



UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET
PODGORICA, CRNA GORA

Mr. Tomo Popović

SMART GRID RJEŠENJE ZA AUTOMATSKU ANALIZU KVAROVA ELEKTROENERGETSKOG SISTEMA

- DOKTORSKA DISERTACIJA -

Podgorica, 2014

PODACI I INFORMACIJE O DOKTORANTU

Ime i prezime: **Tomo Popović**

Datum i mjesto rođenja: **30.09.1969, Novi Sad, Srbija**

Naziv završenog postdiplomskog studijskog programa i godina završetka: **Magistar inženjeringa iz oblasti elektrotehnike (Texas A&M University), 17.12.2005. god.**

INFORMACIJE O DOKTORSKOJ DISERTACIJI

Naziv doktorskih studija: **Doktorske studije elektrotehnike**

Naziv teze: **Smart Grid rješenje za automatsku analizu kvarova elektroenergetskog sistema**

Fakultet na kojem je disertacija odbranjena: **Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore, Podgorica**

UDK, OCJENA I ODBRANA DOKTORSKE DISERTACIJE

Datum prijave doktorske teze: **19.06.2012.**

Datum sjednice Senata Univerziteta na kojoj je prihvaćena teza: **14.09.2012.**

Komisija za ocjenu podobnosti teze i kandidata:

Prof. dr. Ilija Vujošević, ETF Podgorica

Prof. dr. Zdravko Uskoković, ETF Podgorica

Prof. dr. Božo Krstajić, ETF Podgorica

Mentor:

Prof. dr. Božo Krstajić

Komisija za ocjenu doktorske disertacije:

Prof. dr. Ilija Vujošević, ETF Podgorica

Prof. dr. Božo Krstajić, ETF Podgorica

Doc. dr. Slavko Gajin, ETF Beograd

Komisija za odbranu doktorske disertacije:

Prof. dr. Ilija Vujošević, ETF Podgorica

Prof. dr. Božo Krstajić, ETF Podgorica

Doc. dr. Slavko Gajin, ETF Beograd

Prof. dr. Zdravko Uskoković, ETF Podgorica

Doc. dr. Milovan Radulović, ETF Podgorica

Datum odbrane: _____

Datum promocije: _____

Mili, Nikoli, Katarini i Nataši

SAŽETAK

Smart grid se sastoji od naprednih senzorskih tehnologija, upravljačkih metoda i komunikacija koji i sami postaju sastavni dio elektroenergetskog sistema. Nagli porast upotrebe kompjuterske i komunikacione opreme je rezultirao “eksplozijom podataka” koji sadrže mjerenja prikupljena u postrojenjima elektroenergetskih sistema. Mjerenja snimljena putem raznih pametnih elektronskih uređaja u sistemu sadrže veoma važne informacije o događajima kao što su kvarovi na prenosnim vodovima u elektroenergetskom sistemu.

U ovom radu se diskutuje specifikacija za implementaciju i predlog rješenja potpuno automatizovanog sistema za integraciju podataka i analizu kvara na prenosnim vodovima u elektroenergetskom sistemu. Implementirano rješenje se zasniva na automatskoj obradi mjerenja prikupljenim putem pametnih elektronskih uređaja u transformatorskim stanicama kao što su digitalni snimači kvara ili zaštitni releji. Predložena arhitektura omogućava transparentni pristup integraciji i upravljanju podacima, analitičkim funkcijama, kao i vizualizaciji. Kombinacijom rješenja sa efikasnom komunikacionom infrastrukturom prema uređajima u transformatorskim stanicama, postiže se pretvaranje tradicionalno neoperativnih podataka u operativne. Rezultati analize kvara, koji se tradicionalno dobijaju putem manuelne “off-line” analize, mogu se generisati automatski sa ciljem da podrže “on-line” proces donošenja odluka prilikom operativnog upravljanja elektroenergetskim sistemom. Predloženo rješenje je otvoreno za dalja proširivanja i integracije prema drugim sistemima.

Informacije koje se dobijaju korišćenjem predloženog rješenja mogu se iskoristiti da značajno poboljšaju proces donošenja odluka, posebno tokom otklanjanja kvara ili u situacijama većih nestanaka električne energije.

ABSTRACT

Smart grid integrates advanced sensing technologies, communications, and control methods into the electricity grid. The enormous expansion of computer and communication devices being deployed in the grid is resulting in an “explosion” of data becoming available through field measurements in substations. The data recorded by various intelligent electronic devices installed throughout the power system contains very valuable information about measurements during disturbances and switching actions in the power system.

This thesis addresses implementation requirements for a fully automated substation data integration and fault analysis for power system transmission lines. The approach is based on an automated analysis of substation measurements extracted from intelligent electronic devices such as digital fault recorders or protective relays. The proposed architecture provides a transparent approach to substation data management, analytics functions, as well as the visualization of the integrated data and analytics results. When combined with an efficient communication and data collection scheme, the solution bridges the gap between traditionally separated non-operational and operational data. The fault analytics results, traditionally obtained through off line manual process can now be used in an automated way to support on-line decisions when operating or restoring the power system. The solution is open for further expansions and interfacing to third-party systems.

The knowledge acquired by the proposed solution can be used to dramatically improve the decision-making process when operating the power system. This knowledge can be invaluable in facilitating the power system restoration after transmission line faults or blackouts.

ZAHVALNICA

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. Božu Krstajiću, profesoru Univerziteta Crne Gore, na inicijativi, punoj podršci, produktivnoj saradnji, datim sugestijama i ukupnom pozitivnom pristupu i ličnom doprinosu u definisanju forme i sadržaja ove doktorske disertacije. Zahvaljujem se članovima komisije na profesionalnom i korektnom odnosu, kao i za stručnu pomoć i korisne sugestije koje su doprinijele poboljšanju kvaliteta ove disertacije.

Posebno se zahvaljujem prof. dr. Mladenu Kezunoviću, profesoru Texas A&M Univerziteta i generalnom direktoru firme XpertPower Associates¹ u Tekasu, za dugogodišnje mentorstvo i zajednički rad na projektima primjene informacionih sistema i najnovijih tehnologija u oblasti elektroenergetskih sistema. Istraživanja i rezultati korišćeni u izradi ove doktorske disertacije su dobrim dijelom urađene tokom moga višegodišnjeg rada i aktivnosti u XpertPower Associates.

Htio bih da se zahvalim dugodišnjim saradnicima i kolegama iz privrede na ekspertizi i uvijek korisnim savjetima i komentarima. Među najvažnijima izdvajam: Donald Sevcik, Robert Lunsford, i Brian Clowe iz *CenterPoint Energy*, Hjuston u Teksasu; Scott Sternfeld iz *FirstEnergy*, Akron u Ohaju; kao i dr. Edvina Uzunović i Deepak Maragal iz *New York Power Authority*, Njujork u državi Njujork.

Dugujem posebnu zahvalnost mom bratu Ivanu Popoviću na pomoći i podršci oko logistike tokom mojih posjeta Crnoj Gori. Zahvaljujem se roditeljima na moralnoj podršci i što su uvijek bili uz mene. Konačno, posebno se zahvaljujem mojim najmilijima, supruzi Nataši i djeci Mili, Nikoli, i Katarini.

¹ XpertPower Associates je novi naziv firme Test Laboratories International, Inc. (TLI)

SADRŽAJ

1 UVOD.....	1
2 AUTOMATIZACIJA ANALIZE KVAROVA.....	7
2.1 Kvarovi u sistemu za prenos električne energije.....	8
2.2 Digitalni snimači kvara i nadzor signala.....	9
2.3 Procesiranje ulaznih signala.....	16
2.4 Ekspertni sistem.....	20
2.5 Računanje lokacije kvara.....	26
3 SMART GRID RJEŠENJE I PRIJEDLOG ARHITEKTURE.....	29
3.1 Šta je Smart Grid?.....	29
3.2 Funkcionalni zahtjevi.....	29
3.3 Koncept sistemskog rješenja.....	30
3.4 Integracija i transparentost podataka.....	34
3.5 Upravljanje konfiguracijom.....	36
3.6 Univerzalna implementacija analitike.....	39
3.7 Univerzalni pristup podacima i izvještajima.....	40
3.8 Nefunkcionalni zahtjevi i specifikacija performansi.....	41
4 IMPLEMENTACIJA.....	43
4.1 Implementaciona arhitektura.....	43
4.2 Client/Server paradigma.....	47
4.3 Korisnički interfejs.....	51
4.4 Integracija sa drugim sistemima.....	56
4.5 Korišćenje Open Source tehnologije.....	58
4.6 Benefiti implementacije automatske analize kvara.....	61
5 TESTIRANJE I DISKUSIJA REZULTATA.....	64
5.1 Testiranje i rezultati korišćenjem simulacije.....	64
5.2 Primjeri iz postrojenja.....	66
6 ZAKLJUČAK.....	81
7 NOMENKLATURA.....	85
8 LITERATURA.....	87

INDEKS SLIKA

Slika 1. Primjer kvara snimljenog putem DFR uređaja.....	8
Slika 2: Procesiranje signala u modernim IED uređajima.....	10
Slika 3: Ilustracija nadzora mjernih signala na prenosnom vodu.....	14
Slika 4. Utvrđivanje početka i kraja promjene u snimljenim signalima.....	19
Slika 5. Dijagram aktivnosti za detekciju i klasifikaciju kvara.....	23
Slika 6. Primjer pravila ekspertnog sistema za detekciju A-G kvara.....	25
Slika 7. Dijagram aktivnosti za evaluaciju zaštite.....	26
Slika 8. Kvar na trofaznoj liniji za prenos električne energije.....	27
Slika 9. Funkcionalni zahtjevi za implementaciju automatizovanog rješenja.....	30
Slika 10: Koncept Smart Grid rješenja.....	31
Slika 11: Framework za implementaciju predloženog Smart Grid rješenja.....	32
Slika 12: Transparentna integracija IED podataka o snimljenim događajima.....	35
Slika 13. Primjer konfiguracije prenosnog voda.....	36
Slika 14: Koncept upravljanja konfiguracionim podacima.....	37
Slika 15: Sekvencijalni dijagram mapiranja konfiguracije.....	38
Slika 16: Univerzalna implementacija analitičkih funkcija.....	40
Slika 17: Korisnički pristup podacima i izvještajima analize.....	41
Slika 18. Logička arhitektura implementiranog rješenja za analizu kvara.....	44
Slika 19: Dva pristupa automatskoj analizi DPR podataka.....	46
Slika 20: Komponenta za procesiranje i analizu podataka (client).....	48
Slika 21: Komponenta za integraciju i skladištenje podataka (server).....	50
Slika 22: Pregled liste događaja/kvarova putem web interfejsa.....	52
Slika 23. Pregled izvještaja u PDF formatu.....	53
Slika 24: Korisnički interfejs na "smart" telefonu.....	53
Slika 25. Pregled signala kvara korišćenjem čitača izvještaja.....	55
Slika 26. Pregled izvještaja analize putem čitača izvještaja.....	55
Slika 27. Prosleđivanje rezultata automatske analize prema drugim sistemima.....	56
Slika 28. Integrisanje rezultata analize u vizualizaciju SCADA sistema.....	57
Slika 29. Integracija rezultata analitike u sistem za satelitske mape.....	58
Slika 30: Open source softver kao platforma za instalaciju rješenja.....	59
Slika 31. Primjer sistema sa 9 sabirnica korišćenog za EMTP simulacije.....	65
Slika 32: Konfiguracija dva TS-a u pilot demonstraciji.....	66
Slika 33: Povezivanje uređaja u pilot demonstraciji.....	67
Slika 34: Primjer izvještaja analize na bazi DFR fajla.....	70
Slika 35: Primjer izvještaja analize na bazi DPR fajla.....	70
Slika 36: Primjer analize DFR zapisa koja ukazuje na spor prekidač.....	75
Slika 37: Primjer analize DFR zapisa koja ukazuje na DPR blok komandu.....	76
Slika 38. Primjer interakcije sa korisnikom (DPR zapis).....	78
Slika 39. Senzitivnost izračunate lokacije kvara (DPR zapis).....	78
Slika 40. Primjer interakcije sa korisnikom (DFR zapis).....	79
Slika 41. Korekcija izračunate lokacije kvara uz interakciju s korisnikom.....	80

INDEKS TABELA

Tabela 1. Lista signala koji se koriste za analizu kvara na prenosnom vodu.....	14
Tabela 2. Karakteristike strujnih i naponskih signala tokom kvara.....	24
Tabela 3. Nefunkcionalni zahtjevi i specifikacija performansi.....	42
Tabela 4. Kreiranje nove vrijednosti i benefiti automatske analize.....	63
Tabela 5. Rezultati analize simuliranih kvarova.....	65
Tabela 6. Primjer A-G kvara na sredini prenosnog voda.....	69
Tabela 7. Primjer B-G kvara u blizini TS.....	72
Tabela 8. Primjer B-G kvara na udaljenosti 103 km od TS.....	73
Tabela 9. Primjer C-G kvara na udaljenosti oko 13 km od TS.....	74

1 UVOD

Trendovi u porastu potrošnje električne energije i povećana kompleksnost elektroenergetskih sistema su kreirali potrebu za naprednijim i modernijim nadgledanjem sistema, obradom podataka, kao i za agilnijim procesom donošenja odluka. S druge strane, svjedoci smo enormnog progressa u domenu informacionih i komunikacionih tehnologija (*Information and Communication Technology*, ICT) koje su svakim danom sve više prisutne u svim sferama modernog života. Sklop ovih okolnosti je uticao da elektroenergetski sistemi danas prolaze kroz ogromnu ekspanziju primjene ICT tehnologija, kako u korporacijskom okruženju, tako i unutar samih transformatorskih stanica (TS). Sve je više pametnih elektronskih uređaja (*Intelligent Electronic Devices*, IED) za razne namjene koji su instalirani u TS-ovima širom elektroenergetske mreže [Mcd03]. Ovi uređaji mogu biti digitalni snimači kvarova (*Digital Fault Recorder*, DFR), digitalna relejna zaštita (*Digital Protective Relay*, DPR), mjerači kvaliteta (*Power Quality Meters*, PQM), jedinice za mjerenje fazora (*Phasor Measurement Units*, PMU), kao razne druge mjerne i procesne jedinice. Kao rezultat imamo pravu “eksploziju podataka” koje treba prikupiti, obraditi i pretvoriti u korisnu informaciju, a zatim te informacije pretvoriti u činjenice potrebne za donošenje ispravnih odluka. Instaliranje i korišćenje velikog broja IED uređaja je pred inženjere postavilo nove tehničke izazove kao što su sigurnost podataka i informaciona bezbjednost (*Cyber Security*), vremenska sinhronizacija podataka prikupljenih sa raznih uređaja, čuvanje podataka, upravljanje konfiguracijskim podacima, efikasna vizualizacija i dr. Rješenja bazirana na automatizaciji analitike podataka mogu odigrati ključnu ulogu u efikasnom iskorišćenju podataka koji su na raspolaganju u modernim TS [Mcg08, Icle12].

U elektroenergetskim sistemima za prenos električne energije, za proces donošenja odluka najšee se koriste sistemi za nadzor i upravljanje (*Supervisory Control and Data Acquisition*, SCADA) koji mjerenja i informacije o sistemu kontinualno prikupljaju putem daljinskih terminala (*Remote Terminal Unit*, RTU). RTU mjerenja su relativno spora i vremenski interval između dva mjerenja se tipično mjeri u sekundama. Ova mjerenja se skeniraju i očitavaju direktno na SCADA kompjuteru koji su na raspolaganju operaterima sistema u kontrolnom centru. Iz tog razloga ovi podaci se još i nazivaju operativni podaci. U zadnjih nekoliko decenija u TS-ovima se koriste i uređaji kao što su digitalni snimači kvarova (DFR) koji ne snimaju mjerenja kontinualno nego je snimanje aktivirano samo ukoliko se na mjerenjima uoče nepravilnosti ili kvarovi. Tipični trigeri za DFR snimanje su nagle promjene u mjerenju faznih struja i napona. Snimanje može biti aktivirano i promjenama u statusnim signalima kao što su aktiviranje relejne zaštite i otvaranje prekidača. Kada je snimanje aktivirano DFR uređaj snimi mjerenja u vremenskom intervalu oko trenutka aktivacije. Mjerenja se zapisuju u fajl i stoje na raspolaganju za kasnije korišćenje. DFR snimci tipično pokrivaju interval od 0.3 do 1s i sadrže veliki broj odbiraka za sve ulazne signale koji su pod nadzorom. Frekvencija odabiranja kod DFR-ova može biti i do 10 kHz. Tradicionalno, ovi DFR snimci kvarova ili nepravilnosti u sistemu se u vidu fajlova čuvaju na samim DFR uređajima ili se putem nekog sporog komunikacionog protokola prebacuju na server koji se nalazi u korporacijskom okruženju. Ukoliko je identifikovana potreba da se pregledaju i analiziraju, ovi fajlovi bi sa DFR uređaja bili preuzimani ručno i analizirani od strane inženjera i eksperata, tipično iz oblasti zaštite i održavanja. DFR podaci se u najboljem slučaju prikupljaju automatski i njihova analiza je inicirana od strane

operatera ili inženjera zaštite i obavlja se manuelno. Ova analiza se ne smatra procesiranjem u realnom vremenu nego *off-line*, najčešće kada je kvar već otklonjen. Dakle, DFR podaci se smatraju neoperativnim podacima zato što informacije i saznanja dobijena ručnom analizom ovog tipa podataka najčešće nijesu dostupni operaterima u vrijeme donošenja odluka. Dalje, DFR uređaji vrlo često nisu instalirani u svakoj TS nego samo u kritičnim ili važnijim stanicama. U zadnjih nekoliko godina broj uređaja koji podržavaju ovu funkcionalnost asihronog snimanja podataka u slučaju kvara ili neke nepravilnosti u sistemu se drastično povećao. Osim DFR-ova, većina modernih IED-ova kao što su DPR-ovi, PQM-ovi, razni drugi mjerači, mogu da “oponašaju” funkciju snimača kvarova i proizvedu manje ili više kvalitetan snimak signala u tom trenutku. Ovo je rezultiralo činjenicom da sada postoji daleko više snimaka tj. mjernih podataka prikupljenih za vrijeme kvara. Vrlo često jedan isti događaj može biti snimljen sa više različitih uređaja, ali je problem što nema dovoljno ljudskih resursa i eksperata na raspolaganju koji ove podatke mogu da procesiraju na efikasan način. Važnost blagovremenog prikupljanja i procesiranja podataka koji su na raspolaganju u TS je najbolje ilustrovana u situacijama nestanka električne energije kao što je bio dramatičan primjer na sjeveroistoku Amerike 2003. godine [Usca04].

Ideja o automatskoj analizi kvarova na bazi podataka iz TS-ova nije nova. Razmišljanja o automatizaciji analize snimljenih kvarova su počela još sa prvim instalacijama pametnih mjernih uređaja. Osim DFR-ova, neke kasnije implementacije i istraživanja su urađena na bazi kombinacije DFR i RTU podataka, kao i na bazi DPR podataka. U većini slučajeva, ova rješenja su bila limitirana na veoma uzak domen aplikacije i specifična okruženja. S jedne strane, sami proizvođači uređaja su limitirali

načine na koji su snimci izmjerenih veličina dostupni za procesiranje, na primjer korišćenjem nestandardnih komunikacionih protokola i formata fajlova. S druge strane, implementacije su bile fokusirane na veoma specifične konfiguracije komponenti elektroenergetskih sistema koji su bili nadgledani ovim uređajima. Postojeća rješenja su najčešće usko limitirana na opcije ponuđene od strane proizvođača opreme ili su veoma specifična i primjenljiva samo na određene komponente sistema i pojedinačne TS-ove. Nagli porast broja IED uređaja u TS-ovima podstiče potrebu za univerzalnijim pristupom automatskoj integraciji i analizi podataka, ali u isto vrijeme donosi i nove inženjerske izazove pošto je nerijetka situacija da su u pitanju različiti tipovi IED-ova (DFR, DPR, PQM), različiti modeli uređaja, različite generacije, kao i da dolaze od različitih proizvođača.

U okviru prethodnih istraživanja je osmišljeno, simulirano, i implementirano više verzija rješenja koji su prvenstveno bila fokusirana na obradu i procesiranje DFR fajlova [Sev00, Kez03]. Prethodne implementacije rješenja za automatsku obradu DFR fajlova su ukazale na veoma važne aspekte unifikacije podataka čime se postiže da se podaci posmatraju i analiziraju nezavisno od modela snimača, generacije, ili proizvođača uređaja [Pop09]. Predloženo procesiranje i analiza mjerenja uključuje digitalnu obradu signala, selekciju električnog kola u kome je identifikovan kvar, te upotrebu elemenata ekspertnih sistema za procesiranje i logičku analizu mjerenja na izabranom kolu. Kvantifikacija veličina is prikupljenih mjerenja uključuje podjelu vremenskog intervala oko događaja na dio prije pojave događaja, za vrijeme događaja (potencijalnog kvara), te nakon što je događaj (kvar) otklonjen ukoliko je to slučaj. Sistem izračunava vrijednosti podataka od interesa u ova tri vremenska intervala i koristi ih za detekciju i analizu kvara. Signali od interesa za automatsku analizu su

fazne struje i naponi, kao i promjene u statusima signala na relejnoj zaštiti i prekidačima. Ekspertni sistem vrši detekciju i prepoznavanje tipa kvara (A-G, A-B, A-B-G, A-B-C, B-G, itd.), te utvrđuje da li je kvar na vrijeme detektovan i otklonjen. Na ovo rješenje je dodato i automatsko izračunavanje lokacije kvara tj. rastojanja od TS gdje su prikupljena mjerenja do kvara na prenosnom vodu. Automatska kalkulacija lokacije koristi mjerenja sa jednog kraja elektroenergetskog voda. Prelaskom sa rješenja koje radi u jednoj TS na sistemsko rješenje isprobane su različite arhitekture implementacije koje uključuju klijent-server opciju gdje se klijent koristi u svakoj TS, a server na centralnom mjestu u korporacijskim prostorijama, zatim centralizovano rješenje gdje se celokupno procesiranje i analiza odvijaju na jednom mjestu, kao i distribuirano rješenje sa više regionalnih centara.

Iskustva u praksi i dalja istraživanja su ukazala na potrebu za većom transparentnosti na svim nivoima [Kez07, Mar09]. Prvi korak jeste da se postigne transparentnost i uniformnost podataka koji se posmatraju i analiziraju [Pop12]. Ovim se postiže i raspoloživost podataka za kasniju analizu, ali i upotrebu u nekim drugim podsistemima. Drugo, identifikovana je potreba da se postigne transparentnost u načinu implementacije automatske analitike podataka što je u softverskom inženjerstvu poznato kao implementacija po zadatom programerskom interfejsu tj. modelu komponente. Treće, korisnički interfejsi takođe treba da budu transparentni i uniformni nezavisno od vrste uređaja, generacije, ili proizvođača. Četvrto, osim automatske analitike podataka potrebno je omogućiti i transparentno i automatsko povezivanje sa ostalim sistemima i rješenjima kao što su SCADA, ili procesne baze podataka (*PI historian*). Automatsko prosleđivanje rezultata analize uključuje i notifikaciju raznih korisničkih grupa putem printera, faks mašina, elektronske pošte,

SMS i slično.

Diskusija u radu je usmjerena na definisanje pravilne arhitekture rješenja za automatsku analitiku uz poštovanje uočenih zahtjeva i potreba za transparentnost na svim nivoima. Osim definisanja *framework*-a za implementaciju sistemskog rješenja, diskusija uključuje specifikaciju zahtjeva za integraciju podataka i konfiguracionih parametara, korišćenje raspoloživih standarda i otvorenih formata, kao i univerzalan pristup integrisanim podacima i rezultatima automatske analize. U radu je prikazana implementacija predloženog rješenja na bazi *open source* softvera (OSS) koja omogućava transparentno procesiranje DFR i DPR fajlova prikupljenih iz TS-ova, nezavisno od tipa, modela, proizvođača ili generacije IED uređaja. Jedna od najvažnijih karakteristika predloženog rješenja je mogućnost da se rezultati automatske analize u kratkom vremenskom roku stave na raspolaganje operaterima koji upravljaju sistemom i donose odluke. Na ovaj način podaci i informacije koji su se prije smatrali neoperativnim postaju operativni čime se poboljšava proces donošenja odluka.

Ova disertacija je izložena kroz šest poglavlja. Nakon uvodnih razmatranja, u drugom poglavlju je dat sistematičan pregled analize kvara na prenosnom vodu korišćenjem podataka iz digitalnih snimača kvara i definisanje osnovnih zahtjeva za automatizovanu implementaciju. U trećem poglavlju je prikazan koncept Smart Grid rješenja i dat je prijedlog arhitekture. Četvrto poglavlje opisuje implementaciju korišćenjem klijent-server paradigme i OSS tehnologije i opisuje prednosti predloženog rješenja za automatsko procesiranje IED fajlova (za DFR i DPR uređaje). Testiranje rješenja i diskusija rezultata su dati u petom poglavlju. Na kraju rada su dati zaključci, opis nomenklature i spisak korišćene literature.

2 AUTOMATIZACIJA ANALIZE KVAROVA

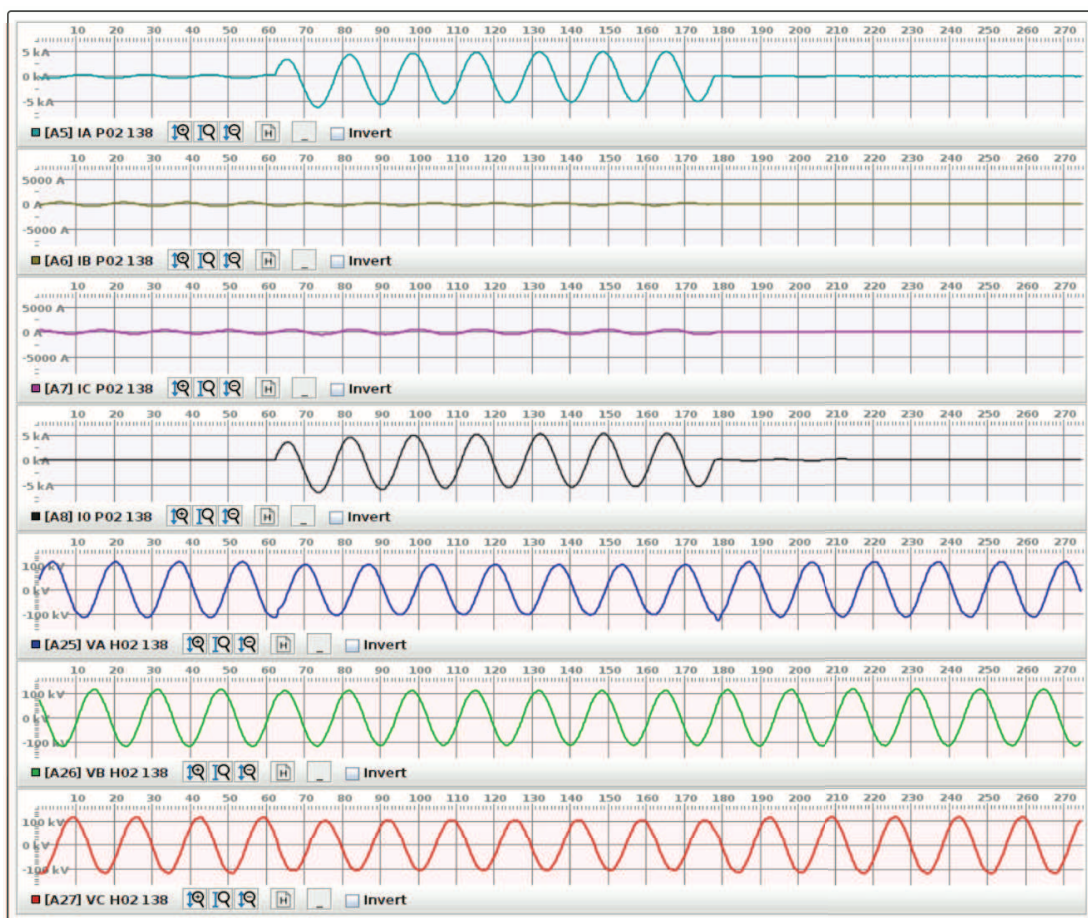
Ideje o automatizaciji analize podataka skupljenih u TS-ovima nisu nove i postoje još iz vremena kada su se instalirali prvi DFR uređaji [Gir89, Mca96]. Jedno od prvih praktičnih rješenja na bazi ekspertnih sistema (*Expert Systems*, ES) i analize DFR podataka je prikazano sredinom 90-ih godina [Kez94]. Takođe, postoje rješenja koja kombinuju podatke sa RTU i DFR uređaja sa ciljem evaluacije operacije prekidača [Dav06]. Analiza kvara na prenosnom vodu se može raditi i na bazi podataka sa DPR uređaja [Izo07]. Postoje i istraživanja i implementacije ekspertnih sistema na bazi analize DPR podataka [Sun92]. Primjer prilično detaljne analize podataka sa DPR uređaja je implementiran korišćenjem ES rješenja i dat u [Luo05]. Interesantan je i primjer kako se podaci iz TS, prikupljeni putem novog tipa IED uređaja, kao što je CBR (*Circuit Breaker Recorder*), automatizovano prikupljaju i analiziraju je dat u [Kez05]. Pored rješenja na bazi ES, postoje i različiti pokušaji da se koriste neuralne mreže i fuzzy sistemi za detekciju i klasifikaciju kvara [Upe08, Sil06]. Većina ovih istraživanja i prikazanih rješenja su limitirana na tip i vrstu IED uređaja, izabranog proizvođača, model ili generaciju. Ova rješenja tipično uključuju komplikovano konfigurisanje i interne parametre, dugu obuku (u slučaju neuralnih mreža) ili specifične metode za podešavanje što ih čini nepraktičnim za upotrebu.

Specifikacije rješenja koja se fokusiraju na upotrebu podataka sa specifičnih IED uređaja, kao što su DFR, DPR, ili CBR uređaji su poznati već neko vrijeme [Kez07]. Činjenica da su IED uređaji prisutni u sve više TS-ova i to u sve većem broju nameće potrebu za automatizacijom kako prikupljanja tako i analize podataka [Mcd03, Nerc2006]. U ovoj disertaciji fokus je na identifikovanju specifikacije i implementacione arhitekture za praktično rješenje automatskog korišćenja podataka

prikupljenih sa raznih IED uređaja u TS u cilju detekcije i analize kvara na prenosnim vodovima. Akcenat je na unifikaciji podataka prikupljenih sa raznih IED uređaja, kao i transparentnosti integrisanih podataka, procesiranja, konfigurisanja sistema, i interfejsa prema krajnjem korisniku. Unifikacija i transparentnost omogućavaju primjenu raznih analitičkih funkcija na integrisane podatke, ali isto tako i redundantnost jer je moguće uporediti rezultate analize na bazi mjerenja koja dolaze sa raznih uređaja. U ovom poglavlju je dat uvod u automatsku analizu kvara u sistemima za prenos električne energije na bazi podataka prikupljenih pomoću pametnih IED uređaja koji imaju funkciju digitalnog snimača kvara.

2.1 Kvarovi u sistemu za prenos električne energije

Primjer kvara snimljenog IED uređajem u TS je ilustrovan u slici 1.



Slika 1. Primjer kvara snimljenog putem DFR uređaja

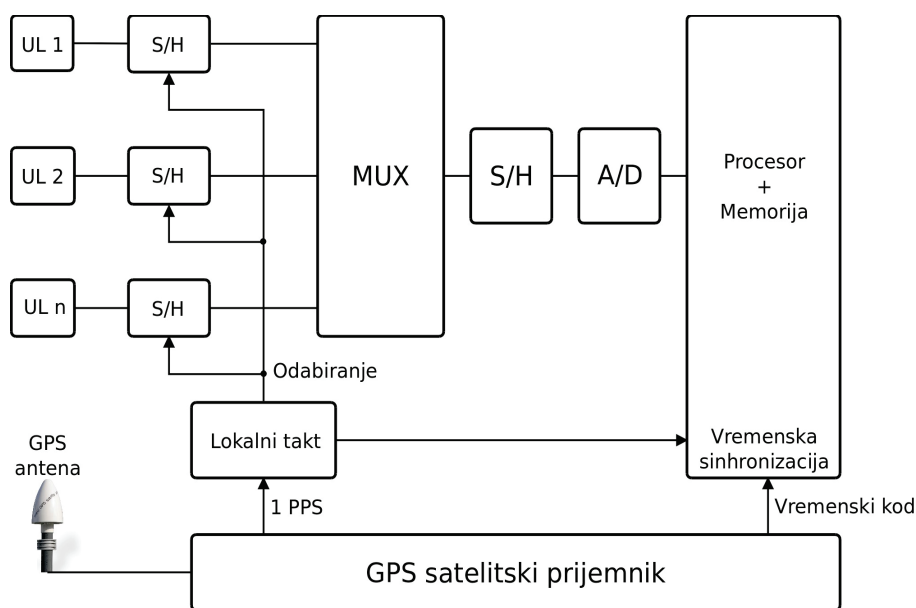
Slika 1 prikazuje izmjerene signale faza struje i napona na prenosnomvodu za vreme kvara između faze A i zemlje (A-G). IED fajlovi ovog tipa, bazirano na uobičajenoj praksi sa DFR uređajima, mogu da sadrže veći broj analognih i digitalnih signala koji odgovaraju različitim mjerenjima unutar čitave TS. Drugim rječima, moguće je da jedan IED fajl sadrži informacije vezane za različite prenosne vodove, sabirnice, transformatore i sl. Neki drugi IED-ovi, kao na primjer DPR-ovi, u svojim fajlovima imaju limitirani broj signala koji se odnose na samo jednu komponentu elektroenergetskog sistema, na primjer prenosni vod ili transformator. Pri automatizaciji procesiranja IED zapisa važno je razumjeti raznovrsnost u nadzoru i snimanju kvara, vrste mjerenja koja se zapisuju prilikom događaja kvara, procesiranje signala, i ostale parametre koji utiču na pretvaranje podataka u informaciju. Konačno, dobijene informacije o kvaru se dalje pretvaraju u novo saznanje tj. činjenice o događaju/kvaru koje se mogu primjeniti prilikom otklanjanja kvara (*System Restoration*) ili pri upravljanju sistemom (*System Operation*).

2.2 Digitalni snimači kvara i nadzor signala

Osim DFR-ova i DDR-ova, čija je osnovna funkcija nadzor i snimanje signala, i drugi moderni IED uređaji u TS-ovima kao sekundarnu funkcionalnost nude snimanje mjernih signala inicirano pojavom događaja/kvara. Primjeri su digitalni zaštitni releji (DPR), snimači sekvence događaja (*Sequence of Event Recorder*, SER), udaljene mjerne jedinice (RTU), i jedinice za mjerenje fazora (*Phasor Measurement Unit*, PMU). Osim svojih bazičnih funkcija, ovi uređaji se mogu konfigurisati da “imitiraju” funkciju DFR-a to da kreiraju zapise događaja na bazi trigeru (*trigger*) koji se vezuju za promjene u nadzornim signalima, recimo pad napona, skok struje i sl.

Konverzija mjerenja u podatke je proces iniciran trigerovanjem IED uređaja

pri čemu uređaj zapisuje digitalne odbirke analognih i statusnih signala u predefinisano vremensko intervalu, tipično 0.3 do 1s, u fajl smješten u internu memoriju uređaja. Tipičan IED fajl uključuje nekoliko ciklusa fundamentalne frekvencije (50 ili 60 Hz) prije događaja (*pre-event* ili *pre-fault*) i nekoliko desetina ciklusa posle triger. Interno odabiranje i procesiranje mjernih signala u modernim IED uređajima je ilustrovano u slici 2.



Slika 2: Procesiranje signala u modernim IED uređajima

Analogno-digitalni (A/D) konvertor pretvara analogne signale u binarni broj. Kriterijum vezan za upotrebljivost podataka kreiranih A/D konverzijom su preciznost A/D u odnosu na mjerni opseg, kao i frekvencija odabiranja (*sampling rate*). Oba parametra utiču na kvalitet mjernih podataka, a samim tim i na funkcionalnosti koje se baziraju na upotrebi ovih podataka [Bra03]. Vertikalna A/D rezolucija za n -bitni konvertor je definisana brojem segmenata u koje se može podijeliti maksimalni ulazni opseg signala. Formula za izračunavanje vertikalne rezolucije je $2^n - 1$. Na primjer, 8-bitna A/D konverzija ima vertikalnu rezoluciju $2^8 - 1 = 255$ što predstavlja 0.39% od pune skale ulaznog opsega. Prije A/D konverzije, ulazni signali se odabiraju

putem S/H (*sample-and-hold*) kola u trenucima sinhronizovanim sa internim vremenskim taktom za odabiranje (*sampling clock*). Sinhrono odabiranje omogućava korektno poravnavanje faznih uglova ulaznih signala (napona i struja). Ovo se postiže korišćenjem S/H ulaznog kola na svakom kanalu i zajedničkim internim taktom, a A/D konverzija se radi ili uz pomoć multipleksera (MUX) kao u slici 2 ili tako što postoji A/D konvertor na svakom kanalu iza S/H kola. Drugi aspekt sinhronizacije ulaznih signala je sinhronizacija između raznih IED uređaja u istoj ili različitim TS-ovima širom elektroenergetskog sistema. Ovo se postiže korišćenjem spoljnog signala takta (*clock*) koji sinhronizuje interni takt IED uređaja putem sistema za globalno pozicioniranje (GPS Clock Receiver) [Lew99]. Neki stariji IED uređaji koriste A/D konverziju putem sekvencijalnog odabiranja (*scanning*) gdje se mjerenja na ulaznim kanalima konvertuju jedan po jedan te dolazi do kašnjenja tj. pomjeranja na vremenskoj osi (*time skew*). Osim internog procesiranja signala u IED uređajima važno je i spomenuti spoljne faktore koji mogu uticati na kvalitet podataka u prikupljenim zapisima: tip i kvalitet ožičenja, karakteristike ulaznih transformatora, tačnost i kvalitet GPS prijemnika, interna propagacija signala takta, nelinearnost, anti-alias filteri i dr. Iako su ovi faktori van opsega teme ove disertacije, važno je razumjeti njihov uticaj na kvalitet prikupljenih mjernih podataka te i same rezultate primjenjene analitike.

Karakteristike digitalnih snimača kvarova za tipične DFR i DDR uređaja, ali i ostale IED uređaje koji omogućavaju snimanje trigerovano događajem (na primjer DPR) su sumirane u sledećim odeljcima.

Ulazni signali se kontinualno prate, ali snimanje je inicirano predefinisanim trigerima tj. pojavama nepravilnosti na mjerenjima. Ovo se postiže konfigurisanjem

IED uređaja da reaguje na predefinisane uslove ili promjene u mjernim signalima (najčešće porast struje ili pad napona na fazama).

Frekvencija odabiranja varira zavisno od uređaja. Za DFR uređaje frekvencija odabiranja je tipično 100 ili više odbiraka/ciklusu (do 10000 odbiraka/s), dok za DPR-ove može biti relativno niska 4-16 odbiraka/ciklusu, ponekad 32 odbiraka/ciklusu (raspon 200 do 2000 odbiraka/s).

Sinhrono odabiranje u internom procesiranju i A/D konverziji IED uređaja je veoma važno da bi se omogućilo korektno utvrđivanje faznih uglova između mjernih signala (faza napona i struje).

Vertikalna rezolucija interne A/D konverzije je tipično 16 bita kod DFR-ova. Neki IED uređaji mogu imati manju vertikalnu rezoluciju, na primjer 12 bita ili manje. Za dobre rezultate automatske analize poželjno je imati bar 16-bita za strujne i 12-bita za naponske signale.

DFR i DDR uređaji tipično omogućavaju nadzor više kola unutar jedne TS, na primjer više prenosnih vodova, sabirnica, i transformatora. Neki drugi uređaji, kao na primjer DPR, vrše nadzor samo jednog kola tj. mjernih signala vezanih za njihovu primarnu funkciju zaštite.

Prolagođavanje mjernih signala (*signal conditioning*) u IED uređajima uključuje upotrebu signalnih transformatora, analognih i digitalnih filtera i sl. Ponekada elementi za prilagođavanje mjernih signala unose suviše promjena i kašnjenja u izmjerene signale što može uticati na kvalitet mjerenja i rezultate analitike.

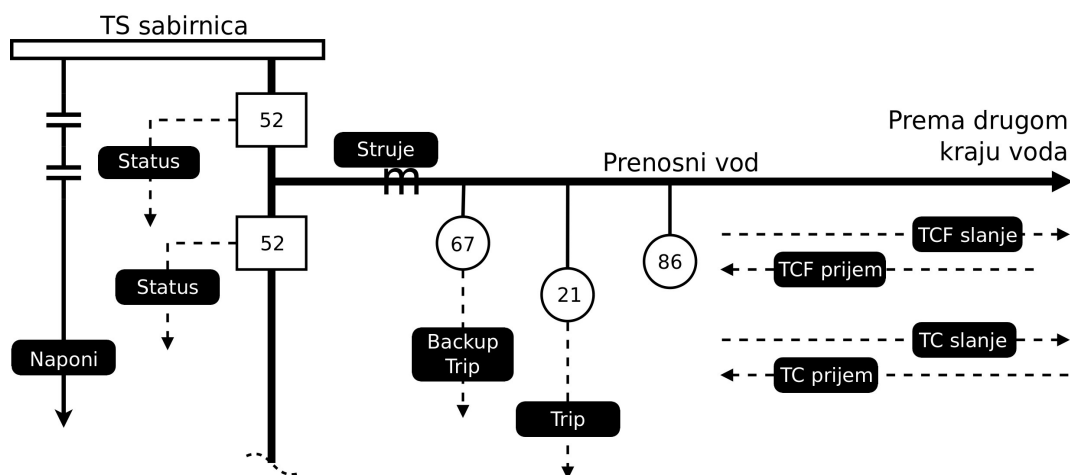
Većina IED uređaja omogućava daljinski pristup putem serijskog ili Ethernet komunikacionog kanala.

Zavisno od tipa uređaja i primarne funkcije, daljinski pristup i komunikacija sa uređajima može biti otežana dodatnim ograničenjima vezanim za informacionu bezbjednost (*cyber security*). Na primjer, DPR uređaji imaju kontrolnu ulogu u sistemu, te se smatraju kritičnim komponentama sistema. Zbog toga daljinska komunikacija sa DPR uređajima zahtjeva specifične restriktivne procedure. DPR i DDR uređaji se smatraju nadzornim uređajima i daljinska komunikacija ima relaksirane zahtjeve [Nerc08].

Sinhronizacija zapisa i odbiraka korišćenjem signala takta putem satelitskog GPS prijemnika je potrebna kada se IED fajlovi sa raznih uređaja i lokacija žele korelirati i procesirati zajedno [Lew99, Pop09].

Primenljivi standardi koji su na raspolaganju (IEEE, IEC, NERC) uključuju preporuke za formate konfiguracionih parametara, formate podataka u zapisima, nazive fajlova, komunikacije i informaciona bezbjednost. Za pojedine IED uređaje je važno razumijeti koji standardi su podržani i, kada god je to moguće, podesti uređaje da koriste standardne preporuke čime se omogućava bolja interoperabilnost.

Mjerni signali koji se prikupljaju prilikom nadzora prenosnog voda korišćenjem IED uređaja u TS su ilustrovani u slici 3. U primjeru je prikazana tipična konfiguracija povezivanja prenosnog voda koja se naziva “prekidač-i-po” (*breaker-and-half*). Ovakva veza omogućava da se dva prenosna voda povežu između dvije sabirnice korišćenjem tri prekidača (označeni brojem 52). Mjerne tačke za nadzor jednog voda su obeležene pravougaonicima sa zakrivljenim uglovima. Mjerenja uključuju napone faza na TS sabirnici ili samom prenosnom vodu, struje u fazama na vodu, kao i digitalne status signala na prekidačima, primarni ili sekundarni *trip* relejne zaštite, kao i komunikacione signale vezane za zaštitnu šemu.



Slika 3: Ilustracija nadzora mjernih signala na prenosnom vodu

Da bi se omogućila automatska analiza kvara na prenosnim vodovima, potrebno je da se definišu mjerne tačke za napone i struje, kao i da se korektno mapiraju svi digitalni status signali, na primjer, prekidač otvoren/zatvoren, komanda releja (*trip*), blok putem komunikacije i sl. U primjeru sa slike 3 korišćeni su brojevi elemenata prema konvenciji IEEE [Ieee08]. Zaštitna šema u primjeru uključuje komunikacione signale (TC, RC, TCF, TCR). Kompletan lista signala za nadzor u ilustrovanom primjeru je opisana u tabeli 1.

Tabela 1. Lista signala koji se koriste za analizu kvara na prenosnom vodu

Signal	Opis	Tip
I	Strujni signali: 3 faze ili 2 faze i nulta komponenta struje (<i>zero sequence</i>)	Analogni
U	Naponski signali: 3 faze ili 2 faze neutralni vod	Analogni
CB1	Status primarnog prekidača (na sabirnici)	Digitalni
CB2	Status sekundarnog prekidača (u sredini)	Digitalni
R1	Status zaštite na primarnom releju	Digitalni
R2	Status zaštite na sekundarnom (<i>backup</i>) releju	Digitalni
TCR	Status prijema blokirajućeg (<i>blocking received</i>) signala	Digitalni
TCT	Status poslanog blokirajućeg (<i>blocking transmitted</i>) signala	Digitalni
TCFR	Status prijema o grešci na prekidaču (<i>breaker failure receive</i>)	Digitalni
TCFT	Status poslanog signala o grešci na prekidaču (<i>breaker failure transmit</i>)	Digitalni

Prikazani slučaj je napredniji primjer nadzora prenosnog voda pošto uključuje i

digitalne statusne signale. Nije netipično da se DFR uređaji koriste samo za nadzor analognih signala (struje i naponi), ili da se nadzire nekompletan skup signala, na primjer, da neka faza struje ili napona nedostaje.

Formati i čitanje snimaka sa raznih IED uređaja predstavljaju tehnički problem pošto različiti proizvođači nude različite opcije kako za formate fajlova, tako i za komunikacione tehnologije. IED uređaji u TS kreiraju zapise i čuvaju ih u internoj memoriji u obliku fajla. Iniciranje snimanja zapisa je uslovljeno postojanjem promjena u mjernim signalima koje su izazvane događajem kvara. Zavisno od implementirane komunikacione šeme za prikupljanje podataka ovi fajlovi se prenose iz TS u korporacijske prostorije gdje se vrlo često arhiviraju na fajl serverima. Za sam prenos podataka se često koriste programski paketi proizvođača ili prilagođene skripte razvijene za konkretnu elektroprivredu. IED fajlove je preporučljivo konvertovati u otvoreni i standardizovani format, kao što je COMTRADE, da bi se omogućila univerzalna upotrebljivost i arhiviranje [Ieee99, Iec01]. Za univerzalno i jednoznačno prepoznavanje IED zapisa preporučljivo je imenovanje fajlova korišćenjem standardne konvencije [Ieee11]. Od interesa može biti i COMFEDE standard koji je relativno nov i nije još uvijek široko podržan od strane proizvođača [Ieee10].

Komunikacija i prikupljanje podataka se automatizuje pravilnim konfigurisanjem pratećeg softvera koji dolazi uz IED uređaje. Komunikacioni protokoli i formati podataka tokom prenosa su najčešće zatvoreni i pod kontrolom samih proizvođača zbog čega se komunikacija i automatsko prikupljanje novih IED zapisa sa raznih uređaja (DFR, DPR) najčešće radi uz pomoć softverskih paketa proizvođača. Dodatni tehnički izazov predstavljaju situacije kada u jednoj TS postoji više IED uređaja koji mogu dolaziti od raznih proizvođača, biti raznog tipa i modela,

kao i različitih generacija. Takođe, tehnički izazov nastaje i u situaciji kada se koriste IED uređaji koji samo djelimično pokrivaju nadzor u TS, na primjer DPR-ovi, pa je nekad potrebno izvršiti kombinovanje više fajlova u jedan da bi se dobila kompletna slika o događaju. Nekada postoje i dodatni tehnički zahtjevi koji se tiču informacione bezbjednosti (kontrolni IED-ovi kao što je DPR) što otežava implementaciju efikasnog i automatizovanog prikupljanja podataka. Pretpostavka je da su zapisi sa IED uređaja efikasno prikupljeni i prebačeni iz TS-ova na fajl servere pristupačne putem lokalne korporacijske mreže. Prikupljanje i procesiranje IED fajlova treba da bude dovoljno brzo da bi se zadovoljile potrebe potencijalnih korisnika rezultata analize. Vremenski interval za prikupljanje i procesiranje podataka treba da bude nekoliko minuta nakon događaja kvara (poželjno manje od 5 min).

2.3 Procesiranje ulaznih signala

Kvantifikacija ulaznih veličina je ključna za procesiranje podataka o kvaru koji dolaze iz IED snimaka i sastoji se iz izračunavanja ulaznih signala prije, za vrijeme, i posle kvara. Ova kvantifikacija se prvijenstveno odnosi na analogne ulazne signale koji odgovaraju fazama struje i napona na prenosnom vodu od interesa. Za kvantifikaciju se najčešće koriste fazori, ali je moguće koristiti i efektivne (*Root Mean Square*, RMS) vrijednosti, ili neke druge metode [Kez00]. Kada se radi o fazorima, trenutna vrijednost sinusoidnog signala, koju na primjer obeležavamo sa $i(t)$, se može predstaviti fazorom I . Fazor je kompleksan broj definisan njegovim realnim $Re\{I\}$ i imaginarnim dijelom $Im\{I\}$, ili njegovom amplitudom i uglom. Izračunavanje fazora se može uraditi primjenom *Fourier*-ove analize. Formule za računanje realnog i imaginarnog dijela fazora I su date poznatim jednačinama (1).

$$\operatorname{Re}\{I\} = \frac{2}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} i\left(\frac{n}{N f_0}\right) \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right), \operatorname{Im}\{I\} = \frac{2}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} i\left(\frac{n}{N f_0}\right) \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \quad (1)$$

N je cijeli broj koji odgovara odnosu između frekvencije odabiranja f_s i fundamentalne systemske frekvencije f_0 . Vrijednosti trenutne struje $i(t)$ su identične vrijednostima odbiraka u tačkama $i(n/Nf_0)$. Odbirci su prikupljeni u vremenskom prozoru širine jednog ciklusa. Amplituda i ugao fazora se mogu dalje izračunati poznatim formulama za konverziju u polarne koordinate. Tipično vrijeme za otklanjanje kvarova na prenosnim vodovima je oko 4 do 6 ciklusa [Sptc08]. Noviji sistemi zaštite, zaštitni releji i prekidači, postaju sve brži i vrijeme otklanjanja kvara može spasti na 1 do 2 ciklusa [Nspctf08]. Najkraće vrijeme otklanjanja kvara koje smo mi iskusili prilikom pilot instalacije rješenja je bilo između 2 i 3 ciklusa. Sa raspoloživim kvalitetom IED podataka, 16-bitnom A/D vertikalnom rezolucijom od 32 odbirka/ciklusu za DPR-ove i 96 odbirka/ciklusu za DFR-ove, opisano izračunavanje fazora je zadovoljilo potrebe automatske analize kvara i svi kvarovi su bili detektovani i klasifikovani. Za analizu događaja sa vrlo kratkim vremenom otklanjanja kvara, ili u situacijama gdje se očekuju kvarovi visoke ili promenljive impedance, poželjno je koristiti brže i naprednije algoritme za estimaciju fazora [Sid05, Ren11].

Identifikacija prenosnog voda u kvaru je jedan od prvih koraka procesiranja IED fajla sa ciljem identifikuje prenosni vod na kome se potencijalno nalazi kvar. Identifikacija prenosnog voda u kvaru se zasniva na pretpostavci da se svi prenosni vodovi u TS nadziru putem IED uređaja, kao i da je svaki vod korektno definisan skupom analognih i digitalnih mjernih signala. Veličine od interesa su trofazne struje i naponi na prenosnom vodu, kao i digitalni statusi relevantnih elemenata, na primjer *trip* relejne zaštite, status prekidača i sl. Ovo se može uraditi tako što se identifikuje signal struje sa najvećom promjenom u kratkom vremenu. Razlog za ovaj korak je to

što neki IED uređaji poput DFR-a vrše istovremeni nadzor više prenosnih vodova. Prilikom traženja najveće promjene fokus je na strujnim signalima koji se organizuju u matricu amplituda I_{dist} (2). Vrste u matrici (2) odgovaraju strujnim kanalima, a kolone predstavljaju podjelu signala na vremenske prozore širine jednog ciklusa fundamentalne frekvencije sistema (50 ili 60 Hz).

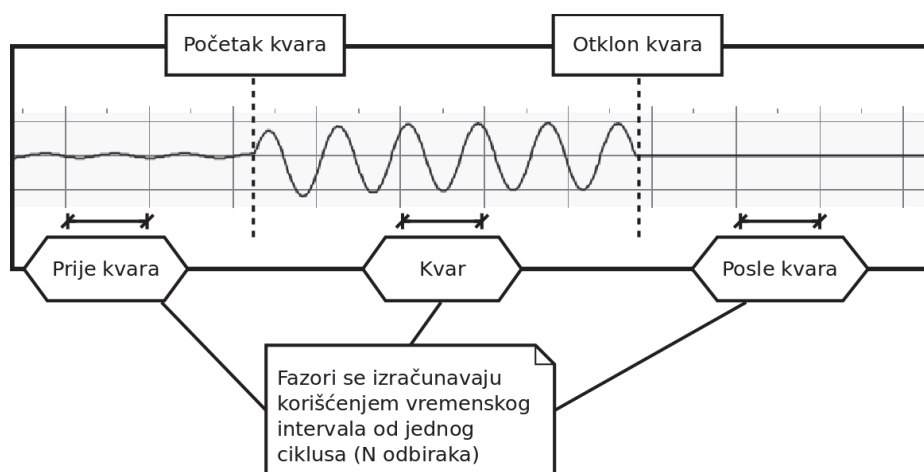
$$I_{dist} = \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} & \dots & I_{1q} \\ I_{21} & I_{22} & \dots & I_{2q} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ I_{p1} & I_{p2} & \dots & I_{pq} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Promenljiva p je broj analognih kanala na IED uređaju koji se koriste za nadzor strujnih signala, i svaki signal sadrži q ciklusa, gdje je broj q određen dužinom zapisa odnosno brojem ciklusa u snimku IED uređaja. Vrste u I_{dist} matrici se pretražuju da se utvrdi najveća promjena između dva susjedna ciklusa. Vrsta sa najvećom promjenom odgovara strujnom signalu sa najvećom promjenom, što indikuje komponentu sistema koja je potencijalno u kvaru. Ukoliko nema primjetnih promjena u amplitudama strujnih signala pretpostavlja se da je zapis nastao zbog nekog drugog uzroka ili promjena na digitalnim statusnim signalima. U tom slučaju fajlovi se ne analiziraju za kvar nego idu direktno u arhivu. Redni broj strujnog kanala sa najvećom promjenom se koristi da se uradi pretraživanje kroz konfiguraciju IED uređaja (mapiranje signala) da bi se ispravno identifikovao prenosni vod u kvaru.

Čitav ovaj proces omogućava automatskoj analizi da se fokusira na podskup signala koji odgovaraju prenosnom vodu na kome su uočene promjene na signalima, tačnije smanjuje se broj signala koje je potrebno dalje procesirati. Alternativno, analiza kvara se može izvršiti na svakom vodu bez obzira da li je u kvaru ili ne, što može uticati na efikasnost.

Utvrđivanje početka i kraja disturbance je neophodan korak da bi se mogla

izvršiti automatska analiza kvara na način koji oponaša logiku koju analitičari-eksperti koriste prilikom analize snimaka. Ideja je da se porede vrijednosti relevantnih signala u različitim vremenskim intervalima: a) prije nego što nastupe poremećaji na signalima (*pre-disturbance*), b) za vrijeme poremećaja odnosno kvara (*disturbance*), i c) nakon otklanjanja poremećaja/kvara. Ovaj proces je ilustrovan u slici 4. Ova podjela na vremenske intervale se može postići jednostavnim zaokruživanjem na cikluse koji odgovaraju veličinama u I_{dist} matrici, ali se rezultati mogu poboljšati ako se uradi detaljnija obrada odbiraka da se preciznije utvrde trenutak početka i kraja kvara. Ovo se postiže pretraživanjem odbiraka od početka zapisa prema početku poremećaja da bi se precizno utvrdio početak (*start*), odnosno od kraja zapisa prema kraju poremećaja da bi se utvrdio trenutak otklanjanja poremećaja/kvara (*end*). Neki IED uređaji, zavisno od tipa, modela, i generacije, u okviru snimaka nude informacije o početku, ili o početku i kraju poremećaja te je moguć pristup da se i te informacije pročitaju i iskoriste. Na kraju ovog koraka analizirani IED fajl je podeljen u tri dobro definisana vremenska intervala kao što je ilustrovano u slici 4.



Slika 4. Utvrđivanje početka i kraja promjene u snimljenim signalima

Pre-procesiranje za ekspertni sistem se sastoji od izračunavanja vrijednosti

signala koji su definisani u tabeli 1 za svaki vremenski interval: prije, za vrijeme, i posle događaja kvara. Za analogne signale se koriste RMS vrijednosti ili fazori koji se računaju za sredinu svakog vremenskog intervala (slika 4). Izračunavanje ovih vrijednosti za svaki vremenski interval direktno zavisi od tačnosti određivanja početka i kraja disturbance, što ponekad može biti izazov usljed lošeg kvaliteta mjerenja, šuma na signalima, ili veoma kratkog vremena otklanjanja kvara.

Osim analognih veličina, neki IED uređaji snimaju i digitalne statusne signale (DFR, DPR). Kada god je to moguće, treba razmotriti i upotrebu statusnih signala prilikom automatske analize. Signali od interesa za analizu kvara na prenosnim vodovima su statusi prekidača (otvoren, zatvoren), komande zaštitnog releja, kao i komunikacioni signali zaštitne šeme. Pre-procesiranje digitalnih signala zahtjeva identifikovanje svih promjena i odgovarajućih vremenskih trenutaka. Ukoliko mjerenje statusnih signala dolazi u formi odbiraka potrebno je dodatno filtrirati smetnje tokom promjene stanja (*de-bouncing*).

2.4 Ekspertni sistem

Koncept vještačke inteligencije (*artificial intelligence*, AI) i ekspertnih sistema (ES) je prisutan u nauci još od 60-ih godina prošlog vijeka. Ideje o primjeni vještačke inteligencije u elektroenergetici diskutovane su prije više od 20 godina [Fust90, Enns94, Wg94]. Razvoj ICT tehnologija je omogućio raznoliku upotrebu vještačke inteligencije i ekspertnih sistema koji se ponašaju kao da imaju sposobnost razmišljanja i donošenja odluka. Pod inteligencijom računarskog programa se podrazumjeva sposobnost analize činjenica za datu situaciju (kontekst), odnosno zaključivanje i donošenje odluka na bazi raspoloživih informacija da bi se postigao određeni cilj. U nekim aplikacijama se implementira i sposobnost “učenja” na bazi

prethodnih iskustava čime se povećava nivo znanja. Područje primjene vještačke inteligencije i ekspertnih sistema je veoma široko i raznovrsno [Schal09].

Ekspertni sistem se može definisati kao inteligentni kompjuterski program koji koristi znanje i mehanizam zaključivanja za rješavanje problema koji su dovoljno složeni da je za njihovo rješavanje neophodna značajna stručna ekspertiza. Ovdje je važno uočiti razliku između baze znanja, mehanizma zaključivanja, i ulaznih podataka. Kombinovanje znanja potrebnog za rješavanje određenog problema i mehanizma zaključivanja se kreira model rješavanja odnosno ekspertize stručnjaka u datoj oblasti.

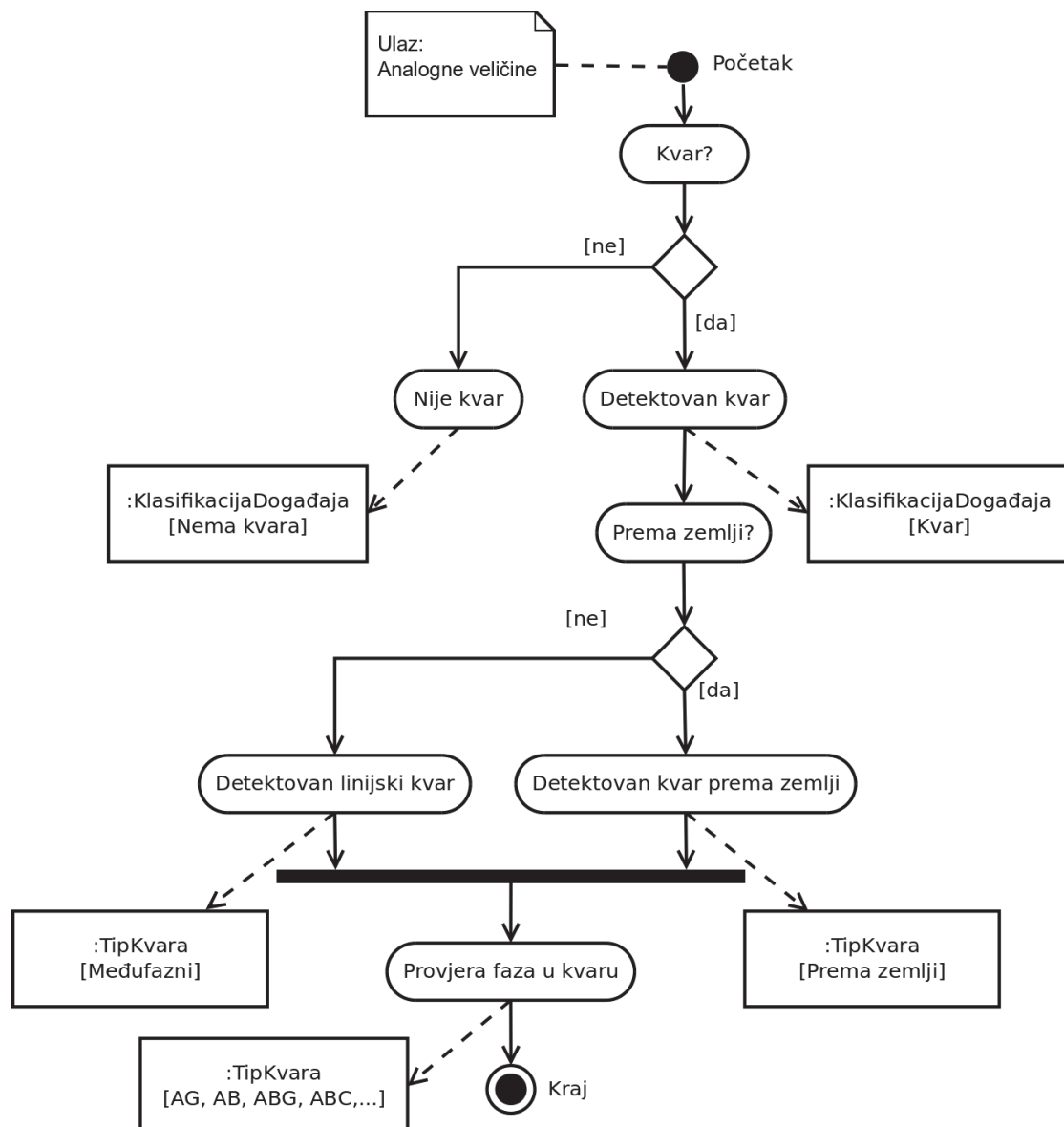
Baza znanja je osnova svakog ES i sastoji se od činjenica i heurisika. Činjenice predstavljaju poznate informacije koje su javno dostupne i opšte prihvaćene od stručnjaka u nekoj određenoj oblasti. Heuristike su saznanja i pravila vrhunskih stručnjaka ili kompanija koja se često čuvaju kao poslovna tajna. Heuristike uključuju saznanja skupljena tokom dugogodišnjeg iskustva u pojedinoj oblasti i dubokog razumijevanja konkretne problematike. Kombinacija činjenica i heuristika karakterizuju logiku donošenja odluka za rješavanje određenog problema na nivou eksperta.

Jedan od najpopularnijih načina formiranja baze znanja je putem definisanja ES pravila. Svako pravilo sadrži jedan mali dio znanja i/ili heuristike u određenoj oblasti. Pravila se dalje mogu grupisati u logički povezane djelove, te se od celokupnog skupa pravila formira baza znanja ekspertnog sistema. Svako pravilo ima dva dijela, premisu i akciju, odnosno skup vrijednosti ulaznih podataka koji opisuju trenutnu situaciju i zaključak koji se na osnovu tih ulaznih podataka može izvesti. Vrlo često se pravila mogu definisati korišćenjem “ako-onda” (*if-then*)

strukture, gdje “ako” dio sadrži premisu - opis karakteristike ulaznih signala na osnovu kojih slijedi određeni zaključak (“onda”). Niz povezanih “ako-onda” pravila formira tok procesa zaključivanja. Pravila se mogu povezati na različite načine. Vrlo često postoje situacije gdje jedan skup pravila kao ulazne podatke koristi izlaze iz nekih drugih pravila te ES implementacije moraju da uključe i svojevrsnu radnu memoriju i “pamćenje” stanja iz prethodno evaluiranih pravila. Ponekad pravila i veze između njih mogu kreirati komplikovane i konfliktne zaključke te je potrebno da mehanizam zaključivanja uključi i funkciju rezolucije konflikta čime se omogućava izbor rezultata koji se najbolje uklapaju u prirodu problema.

Konačno, propuštanje ulaznih podataka kroz bazu znanja i mehanizam zaključivanja rezultuje u nizu zaključaka u obliku novih saznanja, koja se prezentiraju korisniku ili sistemu u koji je dati ES integrisan. Jedan od popularnijih alata za implementaciju ekspertnih sistema je CLIPS koji je razvijen od strane NASA [Clips13]. Inicijalni razvoj ES za analizu kvarova na prenosnim vodovima u elektroenergetskom sistemu su razvijani na korišćenjem CLIPS-a [Sev00], ali se kasnije prešlo na direktnu implementaciju korišćenjem standardnih programskih jezika kao što su C++ i Java.

Funkcionalnost ES za analizu kvarova na prenosnom vodu se može organizovati u dva koraka: a) detekcija i klasifikacija kvara, i b) evaluacija operacije zaštitnog sistema. Logički dijagram procesa za detekciju kvara i klasifikaciju tipa kvara je ilustrovan u slici 5.



Slika 5. Dijagram aktivnosti za detekciju i klasifikaciju kvara

Ekspertni sistem se zasniva na izvršavanju predefinisanih pravila znanja (*knowledge rules*) koja prate “ako-onda” logiku, gdje pravila tipično uključuju predefinisane “okidače” (*threshold*). Naime vrijednosti analognih signala koje odgovaraju vremenskim intervalima prije kvara, za vrijeme, i posle kvara se mapiraju i porede sa očekivanim predefinisanim šablonima tj. pravilima koja koriste analitičari - eksperti za analizu kvarova. Heuristika koja opisuje tipove kvarova i njihovo mapiranje u skup tipičnih karakteristika strujnih i naponskih signala je data u tabeli 2. Tabela sadrži

empirijski modifikovane šablone karakteristika signala na bazi pristupa definisanog u [Kez00, Pop13]. Ovakva pravila su uspješno primjenjena kako na DFR zapise, tako i na DPR zapise koji su nam bili na raspolaganju. Pravila koriste analogne veličine, RMS ili fazore, kao što je to bilo spomenuto u prethodnoj sekciji. Na primjer, u slučaju kvara između A faze i zemlje (A-G), očekuje se da struja u fazi A naglo skoči, da napon u fazi A padne, a da su promjene napona i struje u fazama B i C zanemarljive. Takođe, za A-G kvare se očekuje nagli skok i u nultoj sekvenci struje I_0 .

Tabela 2. Karakteristike strujnih i naponskih signala tokom kvara

Tip kvara	Struja nultog redosleda	Struja faze u kvaru	Struja faze bez kvara	Napon nultog redosleda	Napon faze u kvaru	Napon faze bez kvara	Napon između faza
<i>A-G</i>	$I_0 > 0.1 I_{a,b,c}$	$I_a > 1.3 I_{ap}$	$I_{b,c} < 0.5 I_a$		$V_a < 0.95 V_{ap}$	$V_{b,c} > 0.9 V_n$	$V_{ab} \approx V_{ca}$ $V_{bc} \approx V_{bcp}$
<i>AB</i>	$I_0 < 0.05 I_{a,b,c}$	$I_a > 1.5 I_{ap}$ $I_b > 1.5 I_{bp}$ $I_a \approx I_b$	$I_c < 0.25 I_a$	$V_0 < 7 V_{0p}$	$V_a < 0.9 V_{ap}$ $V_b < 0.9 V_{bp}$ $V_a \approx V_b$	$V_c > V_{a,b}$	$V_{ca} \approx V_{bc}$ $V_{bc} > V_{ab}$
<i>AB-G</i>	$I_0 > 0.1 I_{a,b,c}$	$I_a > 1.4 I_{ap}$ $I_b > 1.4 I_{bp}$ $I_a \approx I_b$	$I_c < 0.5 I_a$	$V_0 > 35 V_{0p}$	$V_a < 0.9 V_{ap}$ $V_b < 0.9 V_{bp}$ $V_a \approx V_b$	$V_c > V_{a,b}$	$V_{ca} \approx V_{bc}$ $V_{bc} > V_{ab}$
<i>ABC</i>	$I_0 < 0.05 I_{a,b,c}$	$I_f > 1.4 I_p$ $I_a \approx I_b \approx I_c$		$V_0 < 9 V_{0p}$	$V_f < 0.9 V_p$ $V_a \approx V_b \approx V_c$		$V_{ab} \approx V_{bc} \approx V_{ca}$
<i>ABC-G</i>	$I_0 > 0.05 I_{a,b,c}$	$I_f > 1.4 I_p$ $I_a \approx I_b \approx I_c$		$V_0 < 9 V_{0p}$	$V_f < 0.9 V_p$ $V_a \approx V_b \approx V_c$		$V_{ab} \approx V_{bc} \approx V_{ca}$

Ekspertni sistem prođe kroz sva predefinisana pravila da se utvrdi da li uopšte bilo kvara; ako jeste, da li je kvar prema zemlji ili između faza, i na kraju, da se utvrdi koje su faze bile u kvaru (slika 5). Primjer implementacije ES pravila korišćenjem pseudo-koda je ilustrovan u slici 6. U pitanju je pravilo za prepoznavanje A-G kvara koje prati karakteristike signala definisane konstantama u tabeli 2. Rezultat evaluacije pravila se čuva za kasniju upotrebu i snima u *log* izvještaja analize.

```

// Rule: Phase A to Ground Fault
// Input(s): prefault and fault phase currents and voltages
if (notDisturbance = false
    and groundFault = true
    and faultCurrentA > 1.30 * prefaultCurrentA
    and faultCurrentB < 0.50 * faultCurrentA
    and faultCurrentC < 0.50 * faultCurrentA
    and zeroSeqCurrent > 0.10 * faultCurrentA
    and faultVoltageA < 0.95 * prefaultVoltageA
    and faultVoltageB > 0.90 * prefaultVoltageB
    and faultVoltageC > 0.90 * prefaultVoltageC
    and faultVoltageAB ≈ faultVoltageCA)
then
    faultType := A-G;
    addLineToReport("The event is a phase A to ground fault!");
endif

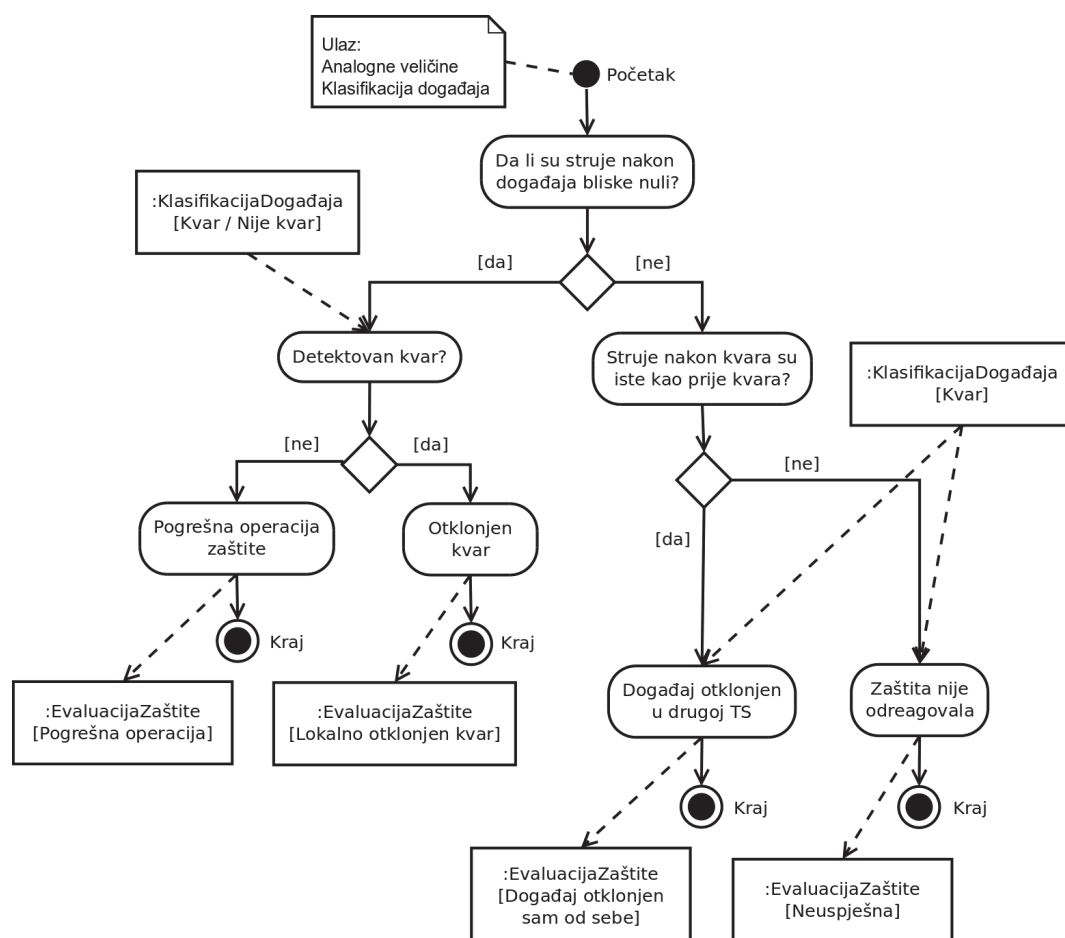
```

Slika 6. Primjer pravila ekspertnog sistema za detekciju A-G kvara

Nakon što je kvar detektovan i kasifikovan, ekspertni sistem nastavlja sa primjenom pravila znanja za evaluaciju zaštite što je ilustrovano primjerom u slici 7. U primjeru se prvo provjerava da li je prenosni vod isključen iz mreže nakon kvara, provjerom da li su izmjerene struje bliske nuli, i ta informacija se kombinuje sa rezultatima detekcije i klasifikacije da se utvrdi da li je zaštita ispravno otklonila kvar. Pravila za evaluaciju zaštite se mogu poboljšati ukoliko nadzor uključuje i digitalne status signale za zaštitne releje (*trip*), status prekidača (otvoren/zatvoren), kao i signala komunikacione šeme. Na primjer, status prekidača “otvoren” se može uporediti za izmjerenim strujama bliskim nuli neposredno posle kvara da bi se potvrdila operacija zaštite odnosno otvaranje prekidača. Za evaluaciju zaštite su od interesa i vremenski intervali od početka kvara do operacije zaštitnog releja i prekidača. Na bazi ovih vremenskih intervala se može procijeniti koliko brzo su releji i prekidači odreagovali, te da li je potrebno alarmirati grupu za održavanje zaštitne opreme, na primjer u slučaju spore operacije prekidača.

Ovdje takođe treba razumjeti da postoji širok spektar konfiguracija prenosnih vodova i implementirane zaštite tako da se pravila za evaluaciju mogu razlikovati od

sistema do sistema odnosno mogu biti različita za svaki TS.

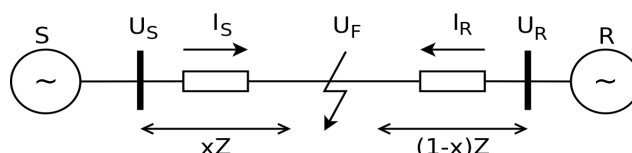


Slika 7. Dijagram aktivnosti za evaluaciju zaštite

2.5 Računanje lokacije kvara

Rješenja za automatsku analizu kvara u sistemima za prenos električne energije treba da omoguće jednostavno integrisanje funkcionalnosti za izračunavanje distance do lokacije kvara. Najpraktičniji pristup je da se koristi izračunavanje na bazi fazora kao što to preporučuje IEEE standard C37.114-2004 [Ieee05]. Naravno, rješenje treba da bude otvoreno za implementaciju ili kombinovanje različitih metoda za izračunavanje lokacije kvara na prenosnom vodu [Kez11, DeA12]. Kako se predloženi koncept integracije i analize podataka se može primjeniti i na sisteme distribucije, u tom slučaju je potrebno izabrati i implementirati računanje distance do kvara primenljivo u distribucionim sistemima [Mor08, Sal09].

Metoda korišćenja podataka sa jednog kraja voda (*single-end*) koristi podatke izmjerene na jednom kraju prenosnog voda da bi se procijenila impedanca koja se “vidi” sa tog kraja. Dijagram prenosnog voda sa kvarom je ilustrovan u slici 8. Krajevi voda su obeleženi sa S za izvornu sabirnicu (*sending bus*) i R za prijemni kraj (*receiving bus*).



Slika 8. Kvar na trofaznoj liniji za prenos električne energije

Lokacija kvara se može izračunati na bazi mjerenja sa izvornog kraja korišćenjem poznate (Takagi) formule (3) [Tak82].

$$x = \frac{\text{Im} \left[U_S \cdot I_S'^{*} \right]}{\text{Im} \left[Z I_S \cdot I_S'^{*} \right]}, \quad I_S'' = I_S - I_S' \quad (3)$$

U_S i I_S su fazori napona i struje izmjereni za vreme kvara, Z je impedanca prenosnog voda, a I_S' je fazor struje izmjerene prije kvara. $I_S''^{*}$ u prikazanoj formuli je kompleksna konjugacija razlike između linijske struje izmjerene za vrijeme i prije kvara. Za izračunavanje putem ove metode potrebno znati i tip kvara (A-G, B-G, AB, itd.) tako da ga je u automatskoj analizi moguće koristiti tek nakon uspješne detekcije i klasifikacije koja se dešava u ekspertnom sistemu. Više informacija o metodi se može naći u [Tak82] i [Ieee05].

Metoda korišćenja podataka sa oba kraja (*two-end*) koristi mjerenja prikupljena iz dva TS-a sa izvornog i prijemnog kraja prenosnog voda. Pretpostavka i preporuka je da su mjerenja sa oba kraja vremenski sinhronizovana te da se za izračunavanje fazora na bazi IED zapisa sa oba kraja može korektno uspostaviti poravnavanje faznih uglova. Ukoliko se vratimo na sliku 8, kombinacijom jednačina

za određivanje vektora faznih napona kvara U_F sa krajeva S i R dobijamo sljedeću matričnu jednačinu (4).

$$U_S - x Z I_S = U_R - (1 - x) Z I_R \quad (4)$$

U_S , U_R , I_S , i I_R su vektori napona i struje na krajevima S i R, Z je matrica impedansi, a x je skalar koji odgovara distanci do kvara gledano s kraja S. Ova matrična jednačina se može predstaviti sa šest skalarnih jednačina sa samo jednom nepoznatom x , koja se može izračunati korišćenjem bilo koje od ovih šest jednačina. Izračunavanje se može poboljšati korišćenjem MLS (*minimum least square*) metode primjenjene na svih šest jednačina [Kez99]. MLS rješenje neće biti egzaktno za bilo koju od jednačina, ali će minimizovati grešku. Jednačine se mogu prepisati u obliku pogodnom za MLS metod (5) gdje se matrice A i B mogu napisati kao što je dato u jednačini (6).

$$A x + B = E \quad (5)$$

$$A = -Z(I_S - I_R), B = U_S - U_R + Z I_R \quad (6)$$

MLS metoda minimizuje $E^T E$ te se rješenje za lokaciju kvara dobija korišćenjem (7).

$$x = -(A^T A)^{-1} (A^T B) \quad (7)$$

Ovaj metod daje dobre rezultate u situacijama kada su na raspolaganju mjerenja sa oba kraja prenosnog voda, ali pod uslovom da su mjerenja i IED fajlovi korektno vremenski sinhronizovani korišćenjem GPS satelitskog prijemnika (8).

$$U'_R = U_R e^{j\delta} \quad (8)$$

U_R je vektor koji sadrži naponske fazore na prijemnoj sabirnici R, a δ ugao korekcije koji se računa na osnovu vremenskih labela (*time-stamp*) u odnosu na početni trenutak zapisa u fajlu. Nakon ovakvog poravnavanja fazora napona i struje, korišćenjem precizne GPS vremenske reference, moguće je uspješno primjeniti algoritme za izračunavanje lokacije kvara na bazi mjerenja sa dva kraja prenosnog voda.

Praktična napomena ovdje je da je i kvalitet podataka unutar IED zapisa bitan, te da je dobra praksa da se upare srodni ili identični IED uređaji na oba kraja voda.

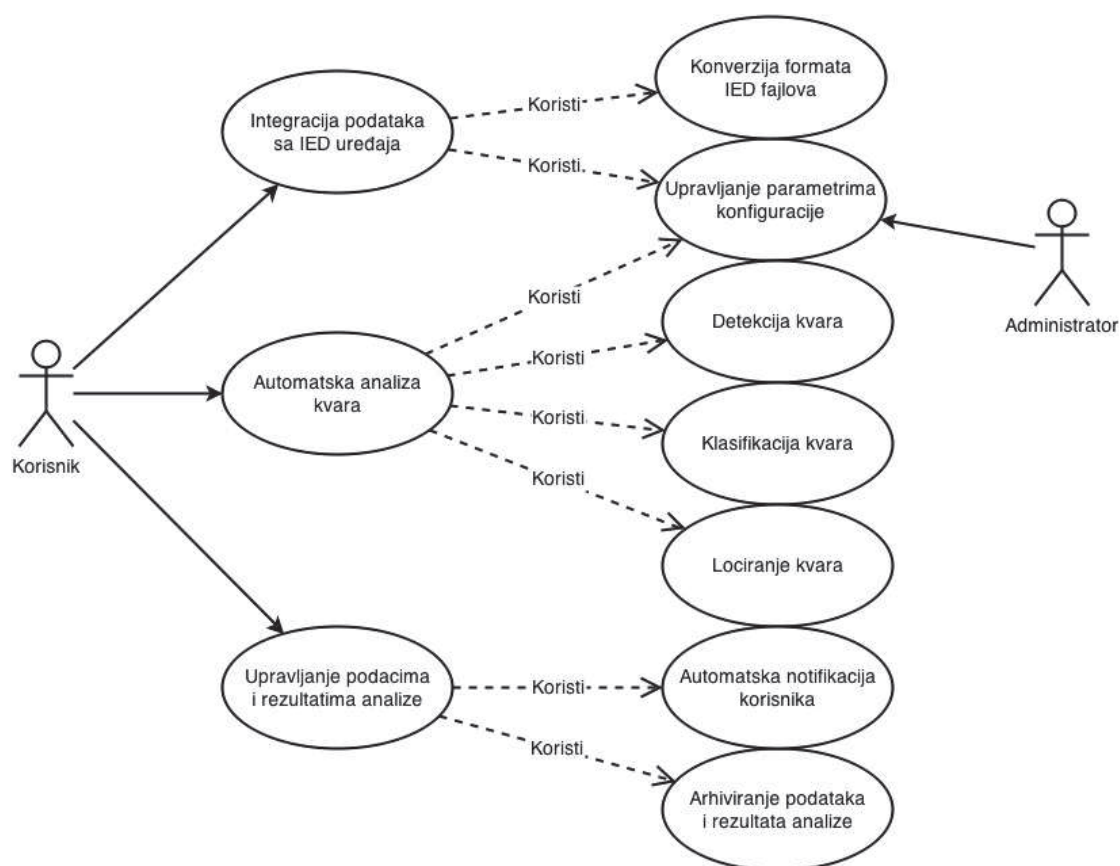
3 SMART GRID RJEŠENJE I PRIJEDLOG ARHITEKTURE

3.1 Šta je Smart Grid?

“Smart Grid (pametna mreža) se sastoji od naprednih senzorskih tehnologija, upravljačkih metoda i komunikacione infrastrukture koje i same postaju dio elektroenergetskog sistema” je samo jedna od definicija (U.S. Dept. of Energy) [Doe03]. U kontekstu automatizacije analize kvara na prenosnim vodovima, Smart Grid je efikasna i pravovremena upotreba mjerenja i ostalih informacija prikupljenih u TS-ovima za vrijeme ili neposredno nakon dešavanja kvara. Činjenica da su moderne TS opremljene raznolikim izborom IED uređaja koji, između ostalog, dolaze sa širokim spektrom nadzornih funkcija koje omogućavaju bolji uvid u stanje i upravljanje elektroenergetskim sistemom.

3.2 Funkcionalni zahtjevi

U prethodnom poglavlju je dat sistematičan pregled analize kvara korišćenjem podataka iz DFR uređaja i definisanje osnovnih zahtjeva za automatizovanu implementaciju. Funkcionalni zahtjevi za implementaciju sistema za automatsku analizu kvarova elektroenergetskog sistema sumirani su u dijagram prikazan u slici 9. U pitanju je pogled na funkcionalne zahtjeve iz korisničkog ugla (*Use Case View*). Kao što dijagram prikazuje, iz ugla korisnika, funkcionalni zahtjevi sistema se mogu organizovati u tri grupe: a) integracija podataka sa IED uređaja, b) automatska analiza kvara, i c) upravljanje podacima i rezultatima analize. Ove osnovne funkcije se dalje granaju tj. oslanjaju na pomoćne funkcionalnosti kao što je to ilustrovano dijagramom. Slika 9 identifikuje i korisničke uloge gde osim osnovnog korisnika postoji i administrator sistema zadužen za unos konfiguracionih parametara.

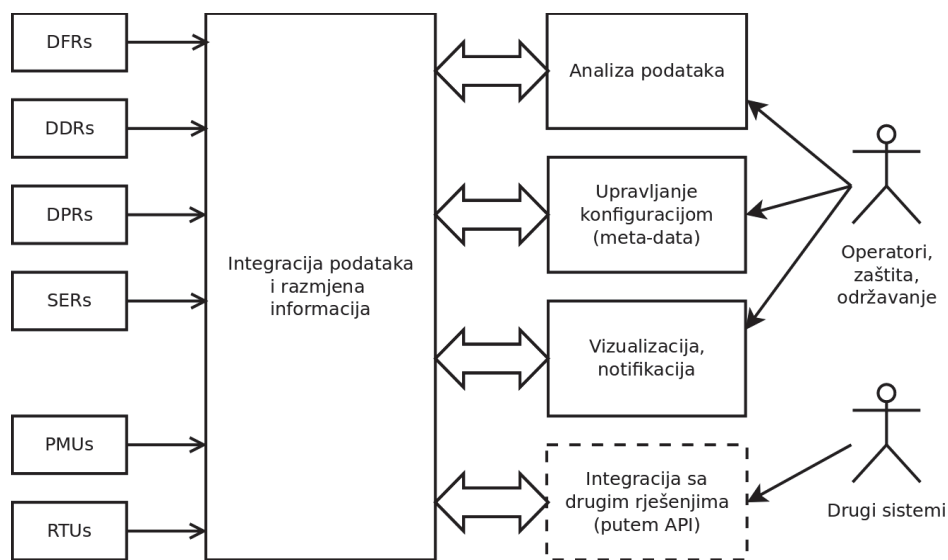


Slika 9. Funkcionalni zahtjevi za implementaciju automatizovanog rješenja

3.3 Koncept sistemskog rješenja

Instalacija ogromnog broja IED uređaja koji omogućavaju dodatni i redundantni nadzor sistema kreira i veliki tehnički izazov da se ogromna količina mjernih podataka efikasno prikupi, razmijeni, i procesira. Jedan uzrok ove kompleksnosti jeste povećan broj mjernih uređaja, a drugi činjenica da se kompleksnost i opterećenje elektroenergetskog sistema povećava iz dana u dan. Efikasno korišćenje podataka izmjerenih i zapisanih putem modernih IED uređaja je jedino moguće automatizacijom analize podataka [Pop12]. Ovaj automatizovani proces se sastoji od konvertovanja mjerenja u podatke, procesiranje podataka da se dobije korisna informacija, i konačno, kreiranjem novog saznanja koje može podržati bolje i sigurnije upravljanje elektroenergetskim sistemom. Koncept Smart Grid

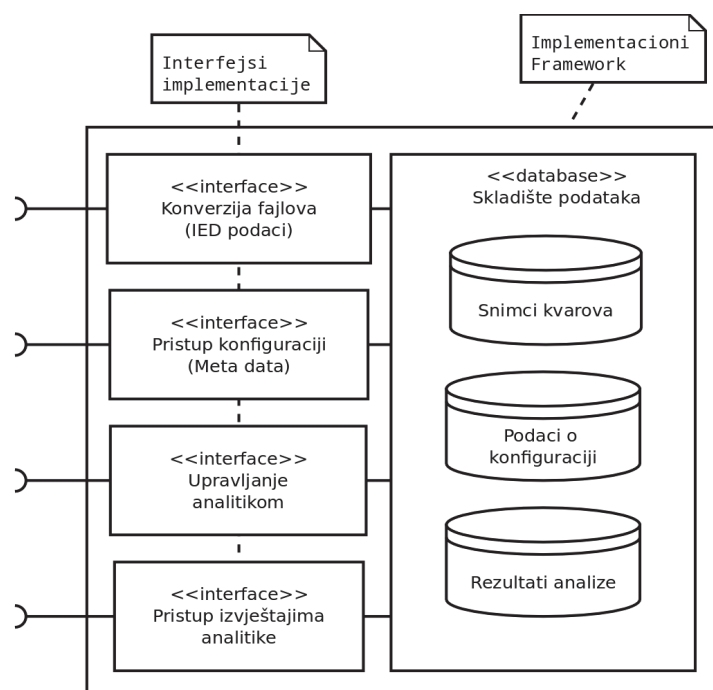
rješenja za automatsku obradu podataka prikupljenih u TS putem IED uređaja je prikazan u slici 10. Osnovu predloženog rješenja čini platforma za integraciju podataka i razmjenu informacija. Sa lijeve strane u slici 10 nalaze se IED uređaji locirani u TS-ovima koji imaju mogućnost nadzora i snimanja kada se događaji kvara dese. Potrebno je da se ovi zapisi mjerenih veličina konvertuju u unificirani format i čuvaju na mjestu koje je lako pristupačno za kasnije korišćenje. Sa desne strane vidimo korisnike ili druge sisteme koji mogu pristupati integrisanim podacima. Korisnici preuzimaju ulogu konfigurisanja i podešavanja sistema, koriste rezultate automatske analitike i koriste razne vidove vizualizacije integrisanih podataka i rezultata analize. Integrisani podaci i rezultati analitike se mogu staviti na raspolaganje drugim sistemima putem API (*application programming interface*) programerskog interfersa.



Slika 10: Koncept Smart Grid rješenja

Jezgro implementacione arhitekture Smart Grid rješenja za automatsku analizu događaja snimljenih u TS-ovima elektroenergetskog sistema je prikazano u slici 11. *Framework* za implementaciju se sastoji iz dva glavna dijela: a) skladište podataka (*data warehouse*), i b) četiri interfejsa za implementaciju. Koncept implementacionih

interfejsa nije nov i dolazi iz oblasti objektno-orijentisanog programiranja (OOP) i softverskog inženjerstva [Gam94, Blo08]. Skladište podataka se sastoji od baze podataka u kojoj se čuvaju podaci o događajima prikupljeni u TS širom sistema (snimci kvarova), konfiguracioni podaci i rezultati (izvještaji) analitičkih funkcija. Četiri interfejsa za implementaciju definišu pravila za unificiranu konverziju fajlova, pristup konfiguracijskim podacima, kontrolu modula analitičkih funkcija i pristup integrisanim podacima i rezultatima analitike.



Slika 11: *Framework* za implementaciju predloženog Smart Grid rješenja

Skladište podataka (baza podataka) se implementira kombinacijom standardne baza podataka i fajl sistema. Fajlovi prikupljeni sa IED uređaja iz TS se konvertuju u standardni format kao što su COMTRADE [Ieee99, Iec01] i COMFEDE [Ieee10]. Skladište IED podataka iz TS-ova koristi standardizovanu šemu za imenovanje fajlova [Ieee10]. Najčešća praksa u današnje vrijeme je da se za prikupljanje i konverziju podataka koristi kombinacija softverskih komponenti koje dolaze od proizvođača IED uređaja i specijalizovanih programa/skripti čime se postiže

automatizovano prikupljanje, konvertovanje i preimenovanje fajlova.

Pored podataka sa IED uređaja, u bazi podataka se mora čuvati i aktuelni opis konfiguracije koja opisuje komponente sistema koji se nadzire i njihove relacije. Primjeri su parametri prenosnih vodova, sabirnica u TS, transformatora, releja, prekidača, mjernih transformatora, itd. Osim opisa komponenti koje su dio elektroenergetskog sistema, konfiguracija uključuje i parametre samih IED uređaja kao što su mapiranje ulaznih kanala, skaliranje signala, tip signala, kalibracija i sl. Svi ovi konfiguracijski parametri su neophodni da bi se podaci iz TS mogli razumjeti i korektno semantički interpretirati. Konfiguracioni podaci, koji se ponekad nazivaju i *meta-data*, se čuvaju u skladištu podataka u otvorenom, standardnom formatu na bazi ASCII [Asc13] ili XML [Xml13]. Druga opcija je da se koriste raspoloživi standardi kao što je SCL (*Substation Configuration Language*) definisan standardom IEC 61850 [Iec13].

Rezultati analitičkih funkcija, odnosno izvještaji, takođe se čuvaju u otvorenim standardizovanim formatima koji ih čine jednostavnim za čitanje od strane korisnika, ali i putem programskih skripti. Za implementaciju same baze podataka preporučuje se korišćenje standardnog SQL podskupa komandi koje su podržane u većini modernih platformi za baze podataka [Sql11].

Interfejsi implementacije prikazani u slici 11 definišu način na koji se četiri odgovarajuće API funkcionalnosti implementiraju, kontrolišu i koje formate podataka koriste. Koncept programerskih interfejsa se može posmatrati kao “ugovor” po kome se pravi implementacija. Na primjer, implementacija konverzije fajlova za različite IED uređaje treba da prati istu specifikaciju što omogućava unificirano korišćenje i jednostavnu integraciju softverskih modula koji konvertuju podatke sa raznih IED

uređaja. Glavni cilj za postojanje interfejsa je da se postigne univerzalnost i transparentnost pri integraciji IED podataka, konfiguracijskih parametara, kontrole analitičkih funkcija i prezentacije rezultata. Opis funkcionalnih specifikacija za implementacione interfejse je dat u poglavljima koja slede.

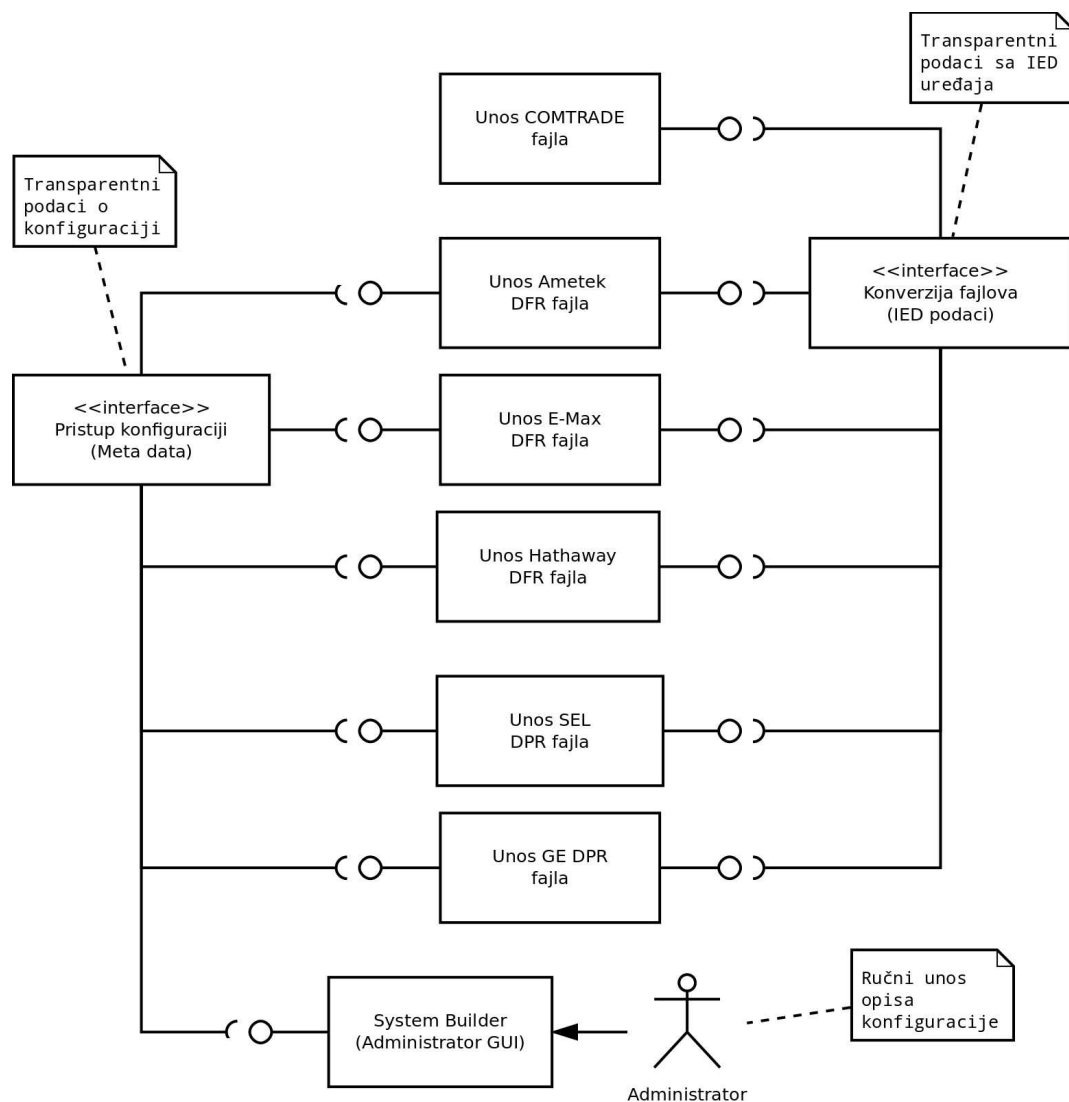
3.4 Integracija i transparentost podataka

Prvi korak u procesu integracije podataka jeste komunikacija i prenos snimaka sa IED uređaja iz TS na fajl servere u korporacijskom okruženju. Kao što je diskutovano ranije, ovaj korak se najčešće ostvaruje kombinacijom upotrebe softvera koji dolazi sa IED uređajima i prilagođenim skriptama. Rezultat prenosa podataka je situacija da su IED fajlovi na raspolaganju na fajl serverima, najčešće u zatvorenim formatima, specifičnim za proizvođače i modele uređaja.

IED fajlovi se dalje konvertuju u standardni format i kombinuju sa konfiguracionim parametrima u cilju postizanja bolje transparentnosti i upotrebljivosti. Realističan primjer transparentne integracije IED podataka je ilustrovan dijagramom u slici 12. U primjeru su zastupljeni DFR uređaji različitih generacija i različitih proizvođača kao što su Ametek [Ame13], E-Max [Ema13] i Hatwaway (Qualitrol) [Qua13]. Primjer dalje prikazuje i DPR uređaje od proizvođača Schweitzer Laboratories (SEL) [Sel13] i General Electric (GE) [Ge13]. U zavisnosti od IED tipa, modela i generacije, dodatne informacije o konfiguraciji su potrebne za korektnu konverziju i transparentnu integraciju podataka. Na primjer, neki stariji DFR zapisi ne sadrže detalje o rasporedu ulaznih kanala, imena signala, skaliranje, ofset i sl.

Cilj integracije podataka i konverzije formata je da se u što kraćem vremenskom roku (nekoliko sekundi) IED podaci automatski pretvore iz nestandardnih i zatvorenih formata fajlova u otvorene i standardizovane formate. Neki

IED uređaji i prateći softver nude opcije za konverziju u COMTRADE format, a neki proizvođači su čak usvojili COMTRADE kao osnovni format. Važno je spomenuti, da je ponekad potrebno konvertovati i dodatno “podesiti” fajlove koji dolaze u COMTRADE formatu zbog postojanja nekoliko revizija standarda, ali i zbog slobode koju standard dopušta kada su u pitanju konfiguracioni parametri koji mogu biti prisutni ili izostavljeni u samom fajlu. To praktično znači da postoje situacije da imamo sintaksno korektne fajlove koji semantički nisu korektni i kompletni.



Slika 12: Transparentna integracija IED podataka o snimljenim događajima

Primjeri uočeni u stvarnim postrojenjima uključuju situacije gdje nedostaju

jedinice signala (A ili V), imamo nekorektne brojeve ulaznih kanala na uređajima, nepostojanje informacije o fazi ili komponenti sistema koja se nadzire i sl. Postoje i situacije kada zapisi iz IED uređaja sadrže više informacija nego što to COMTRADE standard nalaže. Na primjer, neki zapisi sadrže vremenske labele i indikaciju početka i kraja događaja (kvara), tip kvara, pa čak i izračunatu distancu do kvara. U ovim slučajevima je potrebno i te dodatne informacije procesirati i sačuvati za kasnije korišćenje i uporednu analizu.

3.5 Upravljanje konfiguracijom

Kao što je prikazano u slici 12, da bi se korektno i u potpunosti izvršila konverzija formata podataka iz IED uređaja potrebno je obezbjediti dodatne konfiguracione parametre da bi se ustanovila semantika mjerenja prikupljenih i zapisanih u TS-ovima tokom događaja/kvara. U slici 12 je prikazan i GUI alat (*System Builder*) koji omogućava administratoru sistema da unese ili modifikuje konfiguracione parametre prilikom instalacije ili održavanja sistema. Primjer konfiguracionih parametara za prenosni vod su dati u slici 13.

```
[Line2]
LineName = Line 2
AdjBusId = 0
LineLength = 68.73
LineImpedancePos = 3.8293, 41.0188
LineImpedanceNeg = 3.8293, 41.0188
LineImpedanceZero = 27.7062, 93.9084
Ph0Current = 8
PhACurrent = 5
PhBCurrent = 6
PhCCurrent = 7
BusId = 345 kV Bus
MainBreaker = 37
MiddleBreaker = 39
PrimaryTrip = 22
BackupTrip = 23
```

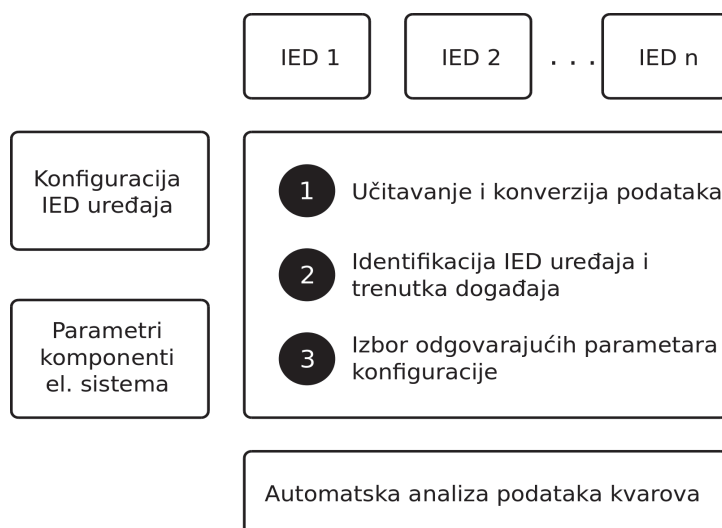
Slika 13. Primjer konfiguracije prenosnog voda

Parametri uljučuju ime prenosnog voda (*transmission line*), dužinu, impedancu,

mapiranje signala na IED uređaju (dodeljeni brojevi ulaznih kanala), kao i signale koji odgovaraju prekidačima i zaštitnim relejima na tom vodu. Čak se i geografska pozicija prenosnog voda (GPS koordinate) može koristiti za prikazivanje izračunate distance do kvara.

Predloženo rješenje za automatsku analizu kvarova na prenosnim vodovima operiše na bazi sljedećih podataka (slika 14):

- fajlova prikupljenih iz IED uređaja koji sadrže podatke o događaju/kvaru,
- aktivne konfiguracije IED uređaja koji su triggerovani događajem (*IED specific settings*),
- parametara koji opisuju prenosni vod, na primjer, dužina, impedanca, GPS lokacija (*Power System Components Parameters*),
- konkretnog okruženja u kome se prikupljeni mjerni signali razmatraju prilikom analize, na primjer, veze između komponenti, tip IED uređaja, zaštitna šema i sl.



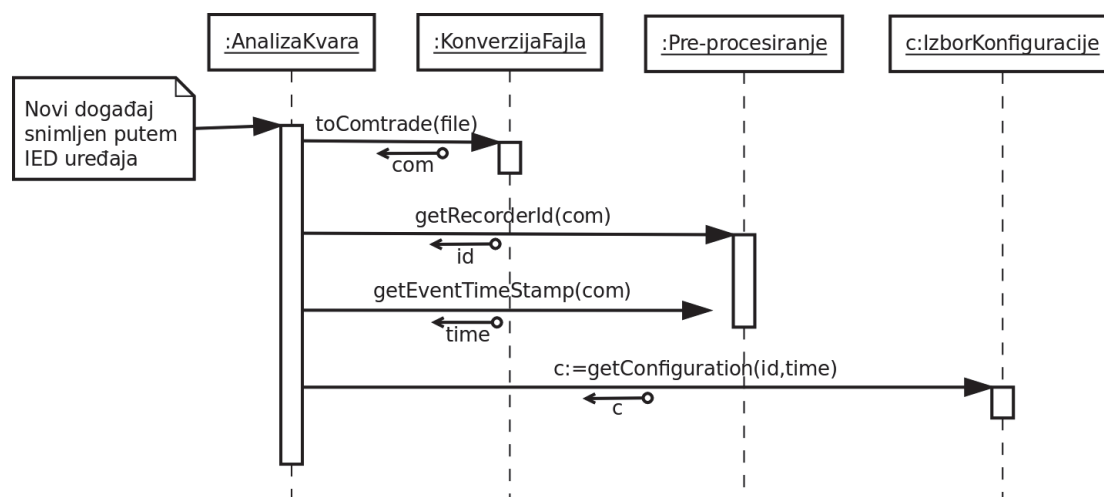
Slika 14: Koncept upravljanja konfiguracionim podacima

Kao što je prikazano u slici 14, zapisi sa IED uređaja se mapiraju na odgovarajuće konfiguracije specifične za same uređaje, ali i na korektne parametre i opis

komponenti sistema. U nekim slučajevima parametri uređaja se nalaze u samim IED fajlovima, ali nije neobično ni da se konfiguracije uređaja nalaze u odvojenim fajlovima, ili čak na nekom udaljenom računaru.

Upravljanje konfiguracijom se može implementirati putem interfejsa prema drugim sistemima kako što su programi za modeliranje sistema (na primjer, short-circuit study), programima za koordinaciju i podešavanje zaštitnih releja, SCADA historian i dr. Druga opcija je da se koriste standardi, koji se doduše još razvijaju i harmonizuju, kao što su spomenuti SCL iz IEC 61850 standarda [Iec13].

Vrlo je važno primijetiti činjenicu da se konfiguracioni parametri mijenjaju kroz vrijeme te da je važno koristiti vremenske labela i na konfiguracionim podacima. Ovo praktično znači da se za svaki IED snimak kvara mora utvrditi vrijeme događaja, pa se prema trenutku događaja izaberu odgovarajući konfiguracijski parametri. Ilustracija ovog procesa je data u UML sekvencijalnom dijagramu u slici 15.



Slika 15: Sekvencijalni dijagram mapiranja konfiguracije

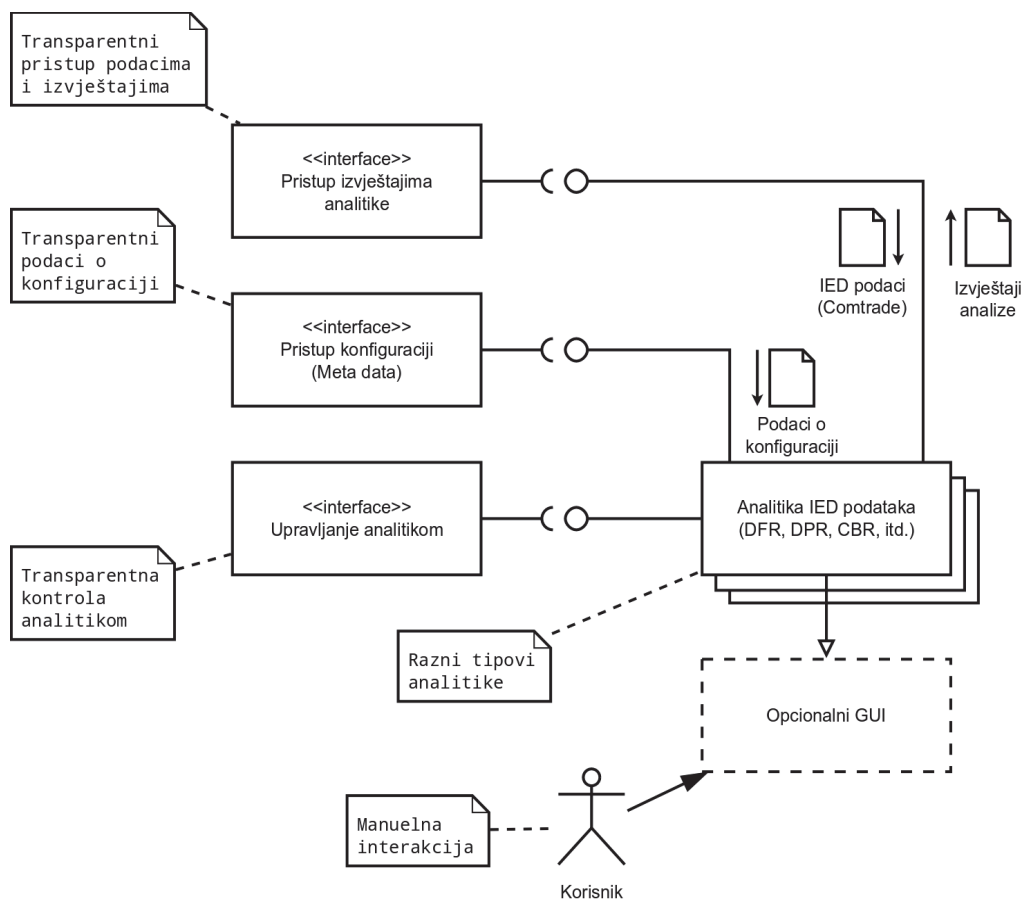
Svaki novi IED fajl se prvo konvertuje u COMTRADE standardni format (označenog sa “com”). Pre-procesiranje ovog konvertovanog fajla (“com”) utvrđuje jedinstvenu

identifikaciju IED uređaja (“id”) i vrijeme snimljenog događaja (“time”). Ova dva parametra, “id” i “time”, se dalje koriste za lociranje i preuzimanje odgovarajućeg skupa konfiguracionih parametara, označenih sa “c”, koji će se koristiti za detaljno procesiranje i automatsku analizu kvara na bazi signala iz IED fajla.

3.6 Univerzalna implementacija analitike

Na bazi istog skupa podataka, mjerenja prikupljenih sa IED uređaja u TS-ovima, moguće je implementirati različite analitičke funkcije. Iz tog razloga potrebno je da se implementacioni interfejsi definišu tako da omogućavaju univerzalan pristup podacima koji se analiziraju, ali isto tako i univerzalan pristup upravljanju samim analitičkim modulima. Primjer implementacije na bazi predložene arhitekture je ilustrovan u slici 16. Ideja je da se softverske komponente koje implementiraju analitičke funkcije moraju napraviti tako da su kompatibilne sa specifikacijom interfejsa za pristup izvještajima analitike i konfiguracionim parametrima, kao da obezbeđuju standardizovane komande definisane u interfejsu za upravljanje analitikom. Ovakav pristup omogućava lakšu integraciju analitičkih komponenti u cijeli sistem, ali i da se nove analitičke funkcionalnosti mogu dodavati u budućnosti. Kao prvo, interfejs za pristup integrisanim podacima i izvještajima analize omogućava univerzalan pristup konvertovanim i integrisanim IED zapisima. Isti interfejs se koristi i za prosleđivanje izvještaja analitike nazad u integrisanu bazu. Drugo, postojeće i buduće analitičke funkcije koriste univerzalan način za pristup konfiguracionim parametrima (*meta-data*) koji su potrebni da se utvrdi puna semantika raspoloživih IED zapisa. Konačno, analitičke funkcije prate specifikaciju interfejsa za analizu podataka koji obezbeđuje transparentnost i univerzalnost samih analitičkih modula. Učitavanje, startovanje i ostale funkcije upravljanja analitičkim

modulima, bilo od strane sistemskog rješenja ili samih korisnika, se obavlja na isti način bez obzira na unutrašnje razlike samih analitičkih funkcionalnosti.

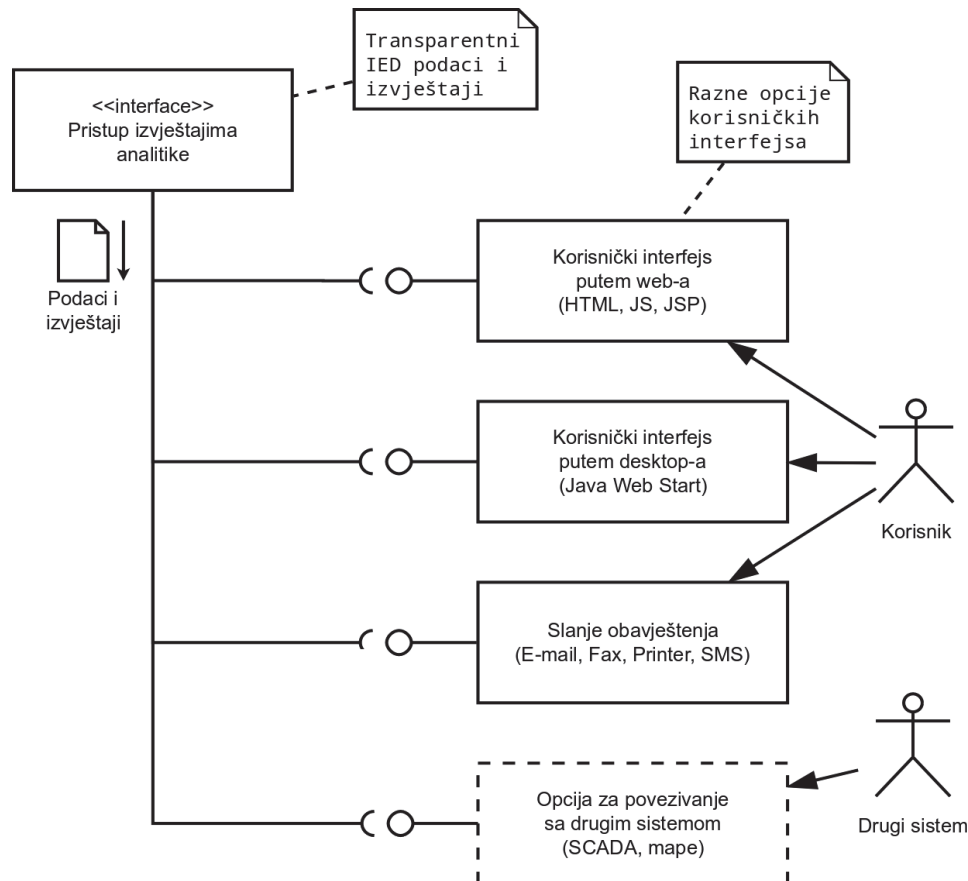


Slika 16: Univerzalna implementacija analitičkih funkcija

3.7 Univerzalni pristup podacima i izvještajima

Univerzalni pristup je predložen i za implementaciju pristupa podacima i izvještajima. Tipičan pristup podacima i izvještajima pretpostavlja postojanje grafičkog korisničkog interfejsa (*graphical user interface*, GUI) ili automatsko slanje notifikacija putem email, fax-a, printera, SMS i sl. Ilustracija implementacije korisničkog pristupa integrisanim IED podacima i izvještajima automatske analize je dat u slici 17. Različiti interfejsi prema korisniku i drugim sistemima mogu se realizovati korišćenjem istog skupa API funkcija sa pristup integrisanim podacima. Univerzalni pristup podacima se koristi bez obzira da li se radi o korisničkom

interfejsu na bazi *web* ili *desktop* implementacije. Takođe, modul za slanje notifikacija kontinualno provjerava nove izvještaje implementirajući isti pristup i u zavisnosti od rezultata analize, na primjer tipa kvara i lokacije, automatski šalje notifikacije predefinisanim grupama korisnika.



Slika 17: Korisnički pristup podacima i izvještajima analize

3.8 Nefunkcionalni zahtjevi i specifikacija performansi

Pored funkcionalnih preporuka za arhitekturu rješenja potrebno je razmotriti i željene performanse rješenja. U tabeli 3 su sumirani nefunkcionalni zahtjevi i specifikacije željenih performansi.

Tabela 3. Nefunkcionalni zahtjevi i specifikacija performansi

Zahtjev	Opis
Vremenska sinhronizacija	Za kvalitetnu i efikasnu analizu, podaci snimljeni putem IED uređaja treba da koriste vremensku sinhronizaciju. Pravilna analiza događaja na bazi snimaka sa raznih IED uređaja u velikoj mjeri zavisi od toga da li se različita mjerenja mogu poravnati i uporediti.
Frekvencija odabiranja	Frekvencija odabiranja za mjerenja prikupljena putem digitalnih snimača kvara treba da bude najmanje 16 odbiraka po ciklusu (800 Hz / 960 Hz). Što je veća frekvencija odabiranja mogu se očekivati precizniji rezultati.
Verikalna rezolucija A/D konverzije	Preporučljivo je da vertikalna rezolucija A/D konverzije bude najmanje 12 bita za naponske signale i 16 bita za strujne. Kao i sa frekvencijom odabiranja, automatska analiza može da radi sa lošijim kvalitetom ulaznih podataka, ali se mogu očekivati i lošiji rezultati.
Izbor mjerenih podataka	Mjerni podaci koji se koriste za automatsku analizu kvara treba da budu izvorni odbirci (<i>raw data</i>), a ne podaci nakon primjene internog filtera. Ova opcija se najčešće odnosi na DPR uređaje.
Vrijeme prenosa podataka	Da bi se rezultati analize mogli koristiti kao operativni podaci za podršku odluka prilikom upravljanja sistemom, potrebno je koristiti efikasni transfer podataka. Poželjno je se IED fajlovi prenose putem brze Ethernet konekcije. Vrijeme prenosa je poželjno da bude do nekoliko minuta (<5 min).
Vrijeme procesiranja podataka	Vrijeme procesiranja pridošlih IED fajlova treba da se mjeri u sekundama ili manje. Znači procesiranje jednog IED fajla treba da je nekoliko sekundi ili manje (<5 sec)
Ulazni podaci	Ulazni podaci treba da budu integrisani i uniformisani korišćenjem primjenljivih standarda kao što su COMTRADE, COMNAME i dr.
Izlazni podaci	Izlazni podaci treba da budu integrisani i standardizovani korišćenjem XML, ASCII, HTML i sličnih formata.
Konfiguracioni podaci	Konfiguracioni podaci su neophodni za implementaciju automatizacije integracije podataka i analize. Primjer je korišćenje konfiguracionog jezika SCL iz standarda IEC 61850.
Mogućnost proširenja	Rješenje treba da bude otvoreno za buduća proširenja: a) dodavanja novih izvora podataka tj. podrške novih IED uređaja b) dodavanje novih analitičkih funkcija c) integraciju i povezivanje sa drugim sistemima
Korišćenje standarda	U implementaciji rješenja treba koristiti relevantne standarde (IEEE, IEC, NERC, FERC i dr.)
Univerzalna platforma	Implementacija treba da omogući primjenu rješenja na što više računarskih platformi.
Korišćenje OSS	Izbor tehnologija treba da uključi razmatranje primjene softvera i alata iz OSS svijeta.

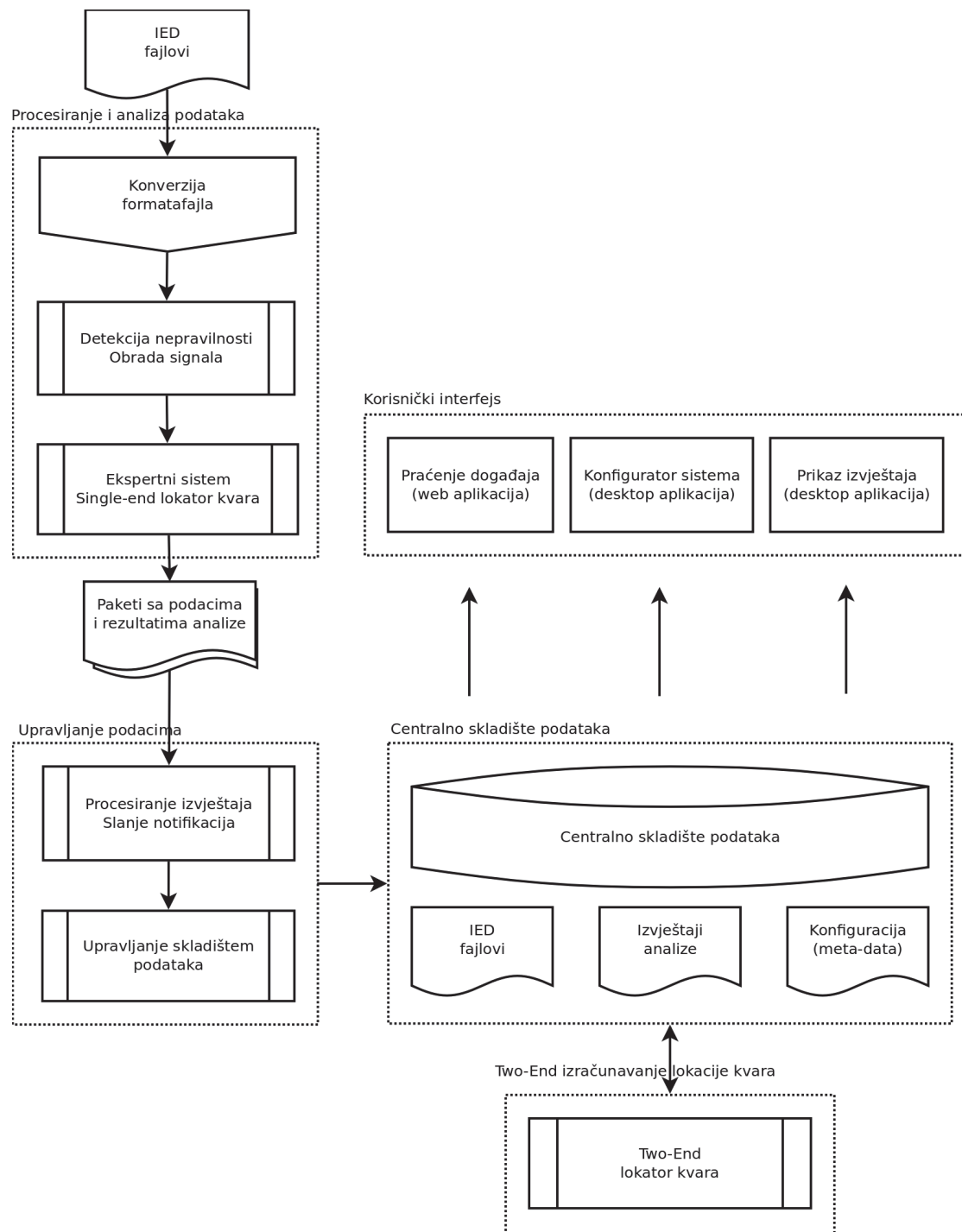
4 IMPLEMENTACIJA

4.1 Implementaciona arhitektura

Logički dijagram implementacije predloženog sistemskog rješenja za automatsku analizu kvara na prenosnim vodovima je prikazan u slici 18. Podaci o kvaru se prikupljaju iz IED uređaja kao što su DFR i DPR. Najvažnije funkcionalne komponente u predloženoj arhitekturi su opisani u sledećim odeljcima.

Procesiranje podataka i analiza podrazumijeva da se svi prikupljeni IED fajlovi automatski konvertuju u unificiran i standardizovan format. Izmjereni signali koji odgovaraju naponima i strujama prenosnog voda se mapiraju na komponente prenosnog sistema (prenosni vodovi, transformatori, zaštitni releji, prekidači) da bi se izabrao skup odgovarajućih konfiguracionih parametara. Na bazi ovih podataka se izvršava detekcija kvara, klasifikacija tipa kvara i računanje distance do lokacije kvara na bazi mjerenja sa jednog kraja voda. Ova komponenta implementira transparentnu integraciju IED podataka, ali i funkciju automatske detekcije kvara. Prilikom implementacije ovdje je potrebno obratiti pažnju na specifičnosti i različitosti pojedinih IED uređaja.

Upravljač podacima je zadužen za integraciju procesiranih podataka i rezultata analize, kao i njihovo arhiviranje u centralnom skladištu. Upravljač podacima kreira i dodatne opise događaja (*meta-data*) koji se čuvaju u bazi podataka i omogućavaju kasnije pretraživanje po raznim kriterijima. Upravljač podacima omogućava i automatsko slanje notifikacija prema predefinisanim korisnicima putem email i/ili SMS poruka.



Slika 18. Logička arhitektura implementiranog rješenja za analizu kvara

Skladište podataka je centralizovano mjesto gde se čuvaju svi integrisani i procesirani IED podaci, izvještaji analize i konfiguracioni podaci. Implementacija skladišta koristi kombinaciju standardne SQL baze podataka i skladišta fajlova.

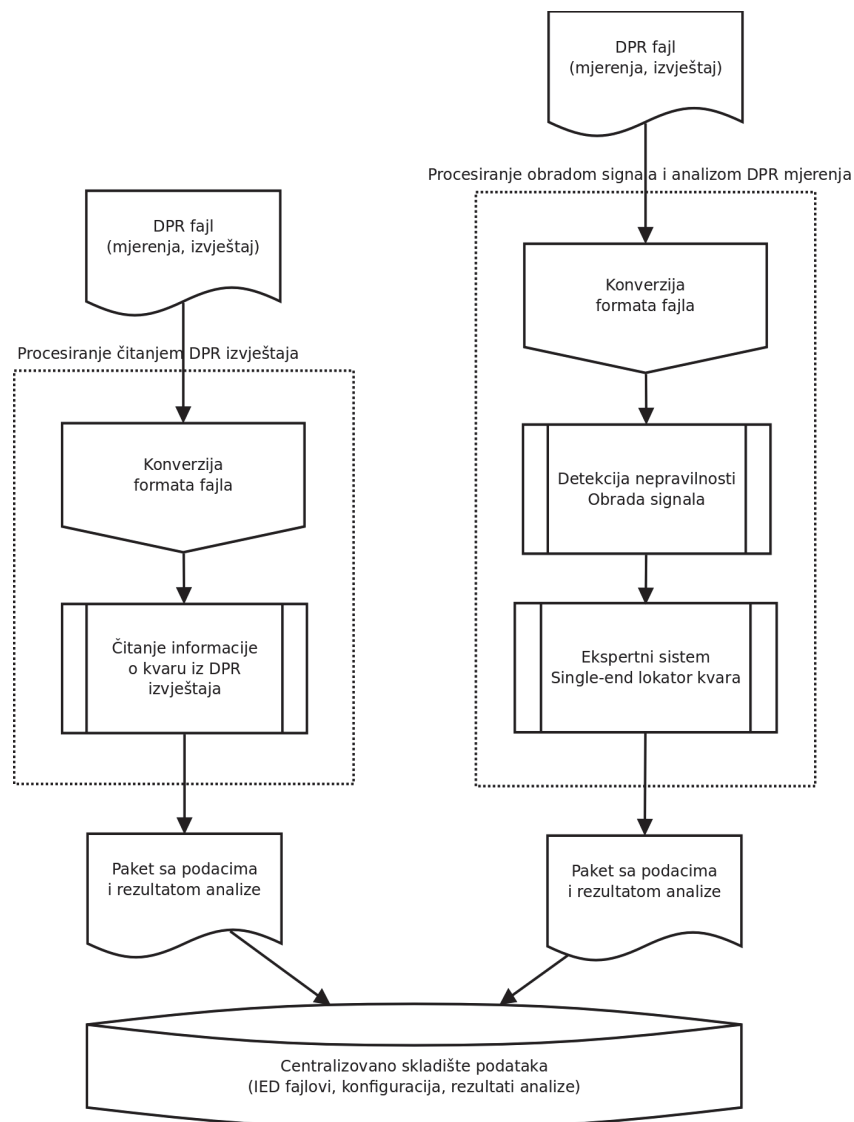
Čuvanje integrisanih podataka u otvorenom i standardnom formatu u fajl sistemu omogućava jednostavan pristup i pregled integrisanih podataka korišćenjem standardnih upravljača fajlovima (na primjer, *File Manager* ili *Windows Explorer*).

Lokator kvara na bazi mjerenja sa dva kraja je komponenta koja se može dodati na upravljač podacima i omogućava izračunavanje lokacije kvara na prenosnom vodu na bazi mjerenja sa dva kraja (*two-end fault location*). Ovaj modul se pokreće svaki put kada se detektuje prisustvo IED fajlova sa dva kraja prenosnog voda koji odgovaraju istom događaju i trenutku snimanja. Ukoliko su mjerenja sa oba kraja na raspolaganju, primjenjuje se metoda za računanje lokacije i rezultat se ažurira u bazi podataka zajedno sa izračunatim vrijednostima na bazi mjerenja sa jednog kraja. Ovim se postiže i dodatna redundantnost izračunate distance do lokacije kvara.

Korisnički interfejs omogućava korisnicima pristup i vizualizaciju podataka koji se nalaze u centralizovanom skladištu podataka. Namjene uključuju pregled integrisanih podataka, izvještaja analize, ali i pregled i ažuriranje konfiguracionih podataka (*System Builder*). Implementirano rješenje omogućava korisnički interfejs na bazi *web* ili *desktop* aplikacije, kao što je diskutovano u prijedlogu arhitekture. Komunikacija prema centralizovanom skladištu podataka treba da bude univerzalna i transparentna kao što diskutovano u prethodnom poglavlju. Korisnik putem istih grafičkih interfejsa pristupa integrisanim podacima i rezultatima analize bez obzira da li podaci dolaze iz DFR, DPR ili nekih drugih IED uređaja.

Iako je primarni fokus integracije podataka da se univerzalno pristupi IED uređajima i iskoristi njihova funkcionalnost digitalnog snimača kvara, važno je napomenuti da neki IED uređaji u svojim snimljenim fajlovima nude dodatne izračunate informacije koje ne treba zanemariti. Najbolji primjer su DPR uređaji koji

osim zapisa izmjerenih signala nude izračunate fazore, tip kvara, lokaciju kvara i slično [Cos00]. Ove dodatne informacije omogućavaju da se DPR podaci mogu automatski procesirati na dva načina kao što je to prikazano u slici 19.



Slika 19: Dva pristupa automatskoj analizi DPR podataka

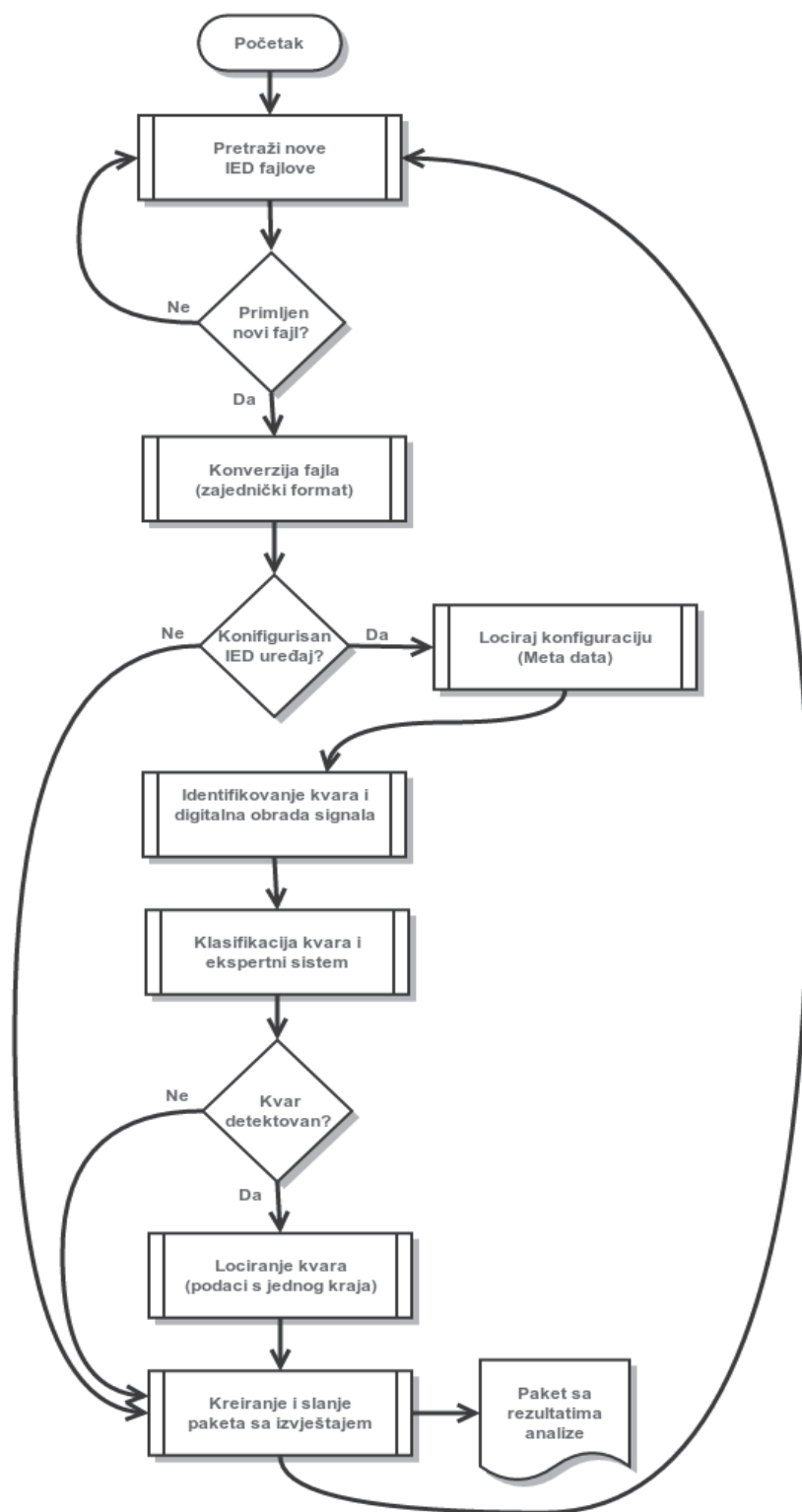
Prvi način je da se podaci iz DPR uređaja konvertuju u unificirani format fajla i da se informacije o događaju dobiju čitanjem podataka generisanih u samom DPR uređaju. Drugi način je da se nakon konverzije DPR fajla izvrši nezavisno procesiranje i analiza na isti način kao što se to radi kod DFR-ova odnosno da se informacije o događaju generišu na osnovu snimljenih izmjerenih signala. Zavisno od kvaliteta

izmjerenih signala kod DPR uređaja se može primjeniti jedan ili oba pristupa čime se dobija dodatna redundantnost. Na primjer, moguće je uporediti rezultate iz DPR fajlova sa rezultatima automatske analize [Pop13].

4.2 Client/Server paradigma

Implementacija predloženog rješenja je urađena korišćenjem dobro poznate *client-server* paradigme. Ovaj pristup omogućava različite konfiguracije prilikom instalacije rješenja u postrojenju gdje je moguće imati jedan ili više klijenata ili servera zavisno od konkretnih potreba.

Klijent aplikacija je zadužena za automatsku konverziju, procesiranje i analizu kvara kao što je ilustrovano u slici 20. Klijent kontinualno skenira fajl servere da ustanovi da li su pristigli novi podaci (fajlovi) sa IED uređaja iz TS. Novi fajlovi se konvertuju u uniformni format, što je u ovom slučaju IEEE COMTRADE. Ukoliko postoje odgovarajući konfiguracioni podaci (*meta-data*), klijent nastavlja sa automatskim procesiranjem i analizom signala. Ako pristigli fajl dolazi sa nekonfigurisanog IED uređaja, konvertovani IED fajlovi se prosleđuju serveru za arhiviranje. Iako automatska analiza u ovom slučaju nije urađena integracija konvertovanih podataka je i dalje važna pošto se ostvaruje arhiviranje i podaci su u standardizovanom i otvorenom formatu na raspolaganju korisnicima da ih ručno analiziraju kasnije.



Slika 20: Komponenta za procesiranje i analizu podataka (*client*)

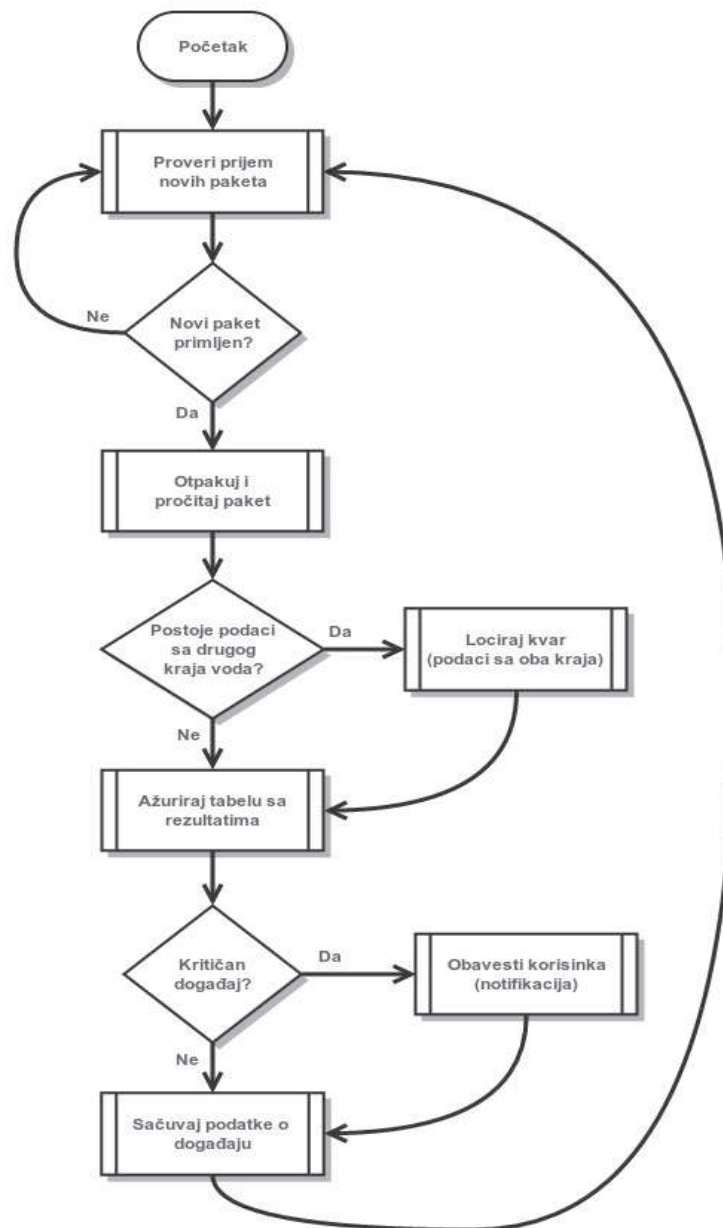
U slučaju uspješne automatske detekcije i klasifikacije tipa kvara klijent izvršava izračunavanje lokacije kvara na bazi podataka sa jednog kraja voda koji se

svi nalaze u jednom IED fajlu. Konačno, klijent kreira paket podataka sa rezultatima koji sadrži: a) originalni IED fajl, b) konvertovani fajl u COMTRADE formatu, c) kopiju konfiguracionih parametara (*meta-data*) korišćenih pri analizi, i d) detaljni izvještaj sa rezultatima analize. Klijent ovakav paket šalje serveru na dalje procesiranje i arhiviranje u centralnu bazu podataka.

Server implementira univerzalno i centralizovano upravljanje podacima kao što je prikazano u slici 21. Server kontinualno skenira pakete koji dolaze sa jednog ili više klijenata. Novi paketi se nakon prijema otpakuju i njihov sadržaj i rezultati se dalje procesiraju i snimaju u bazu podataka. Rezultati analize i detalji o kvarovima se smještaju u posebnu tabelu u bazi podataka koja omogućava brzo pretraživanje i identifikaciju događaja od strane korisnika. Prateći fajlovi se arhiviraju u predviđene direktorijume (izvještaji, COMTRADE fajlovi, konfiguracija i dr.), a opis fajlova i njihova putanja (*path name*) se čuvaju u bazi radi lakšeg pretraživanja.

Server može biti konfigurisan tako da za svaki primljeni paket pretražuje postojeću bazu podataka da utvrdi da li postoje odgovarajući IED podaci sa drugog (prijemnog) kraja prenosnog voda. Kriterijum je da se pronađu IED fajlovi koji su prikupljeni iz TS na drugom kraju prenosnog voda čije vrijeme snimanja (*time-stamp*) je blisko vremenu snimanja na izvornom kraju. Tipičan vremenski interval za ovakvo pretraživanje je oko 100 ms ili manje. Ukoliko postoje IED fajlovi sa oba kraja prenosnog voda server poziva modul za izračunavanje lokacije kvara na bazi mjerenja sa oba kraja voda. Kao što je spomenuto ranije, za implementaciju ove funkcionalnosti u praksi je preporučljivo upariti IED uređaje koji su istog tipa, modela, proizvođača, i generacije te se očekuje da nude iste ili slične performanse i kvalitet podataka. U izvještaj analize se dodaje i lokacija kvara izračunata na bazi

mjerenja sa oba kraja voda. Zavisno od konfiguracije servera, izvršava se automatsko obaveštavanje korisnika o događaju/kvaru putem email, SMS poruka, printera i sl.



Slika 21: Komponenta za integraciju i skladištenje podataka (*server*)

Ovakvo klijent-server rješenje zadovoljava sljedeće zahtjeve iz specifikacije predložene u prethodnom poglavlju: a) transparentnost IED podataka prikupljenih iz TS-ova; b) implementaciju analitičkih funkcija/modula koji ne zavise od tipa ili izvora podataka (IED uređaja); i c) univerzalan pristup integrisanim podacima i

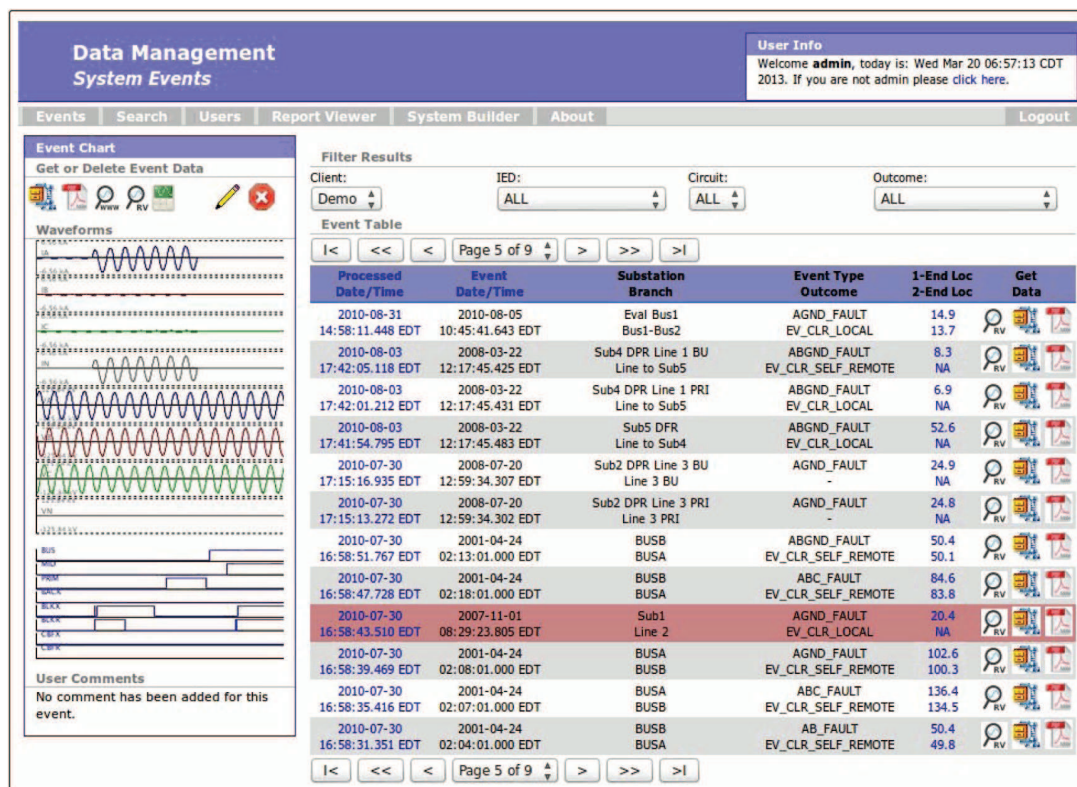
rezultatima automatske analize koji se koristiti od strane raznih korisničkih grupa i za različite namjene. Ovakav otvoren pristup implementaciji omogućava i integraciju cjelokupnog rješenja sa drugim sistemima za procesiranje IED podataka, kao i dodavanje novih funkcionalnosti u budućnosti.

4.3 Korisnički interfejs

Implementirano rješenje objezbeđuje korisnički pristup integrisanim podacima i rezultatima automatske analize na način koji prati koncept univerzalnosti i transparentnosti. Ideja je da se isti grafički korisnički interfejs (GUI) može koristiti za pristup i pregled integrisanih podataka i izvještaja analize bez obzira na mjesto i tip IED uređaja sa kojeg su podaci prikupljeni. Dva tipa grafičkog interfejsa su implementirana: na bazi Intranet tehnologije (*web-based*) i na bazi integracija u radnu površ operativnog sistema (*desktop-based*).

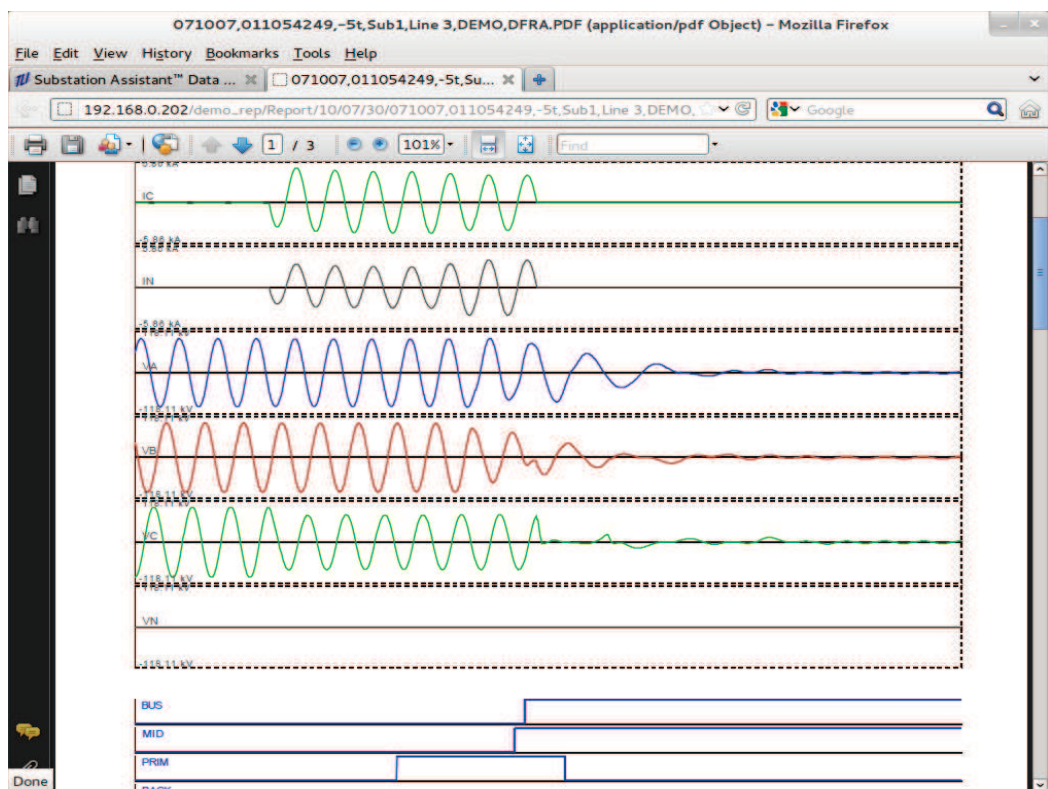
Web-based implementacija prati ranije definisani implementacioni *framework*. Svi IED zapisi su organizovani u tabelu sistemskih događaja koja se prezentuje korisniku (slika 22). Osim tabele sa opisom događaja, grafički interfejs nudi i brzi pregled snimljenih signala na izabranom prenosnom vodu. Tabela događaja prikazuje podatke i rezultate analize na uniformni način tako da korisnici ne moraju da brinu specifičnosti IED tipa, generacije ili originalnog formata podataka. Najnoviji događaji su prikazani pri vrhu tabele. Korisnik može da izabere TS, IED uređaj i prenosni vod, sa ciljem da fokusira prikaz na segment električnog sistema koji mu je od interesa. Vrste u tabeli događaja prikazuju osnovne informacije o događaju/kvaru kao što su naziv IED uređaja, prenosni vod u kvaru (ili sa najvećom disturbancom), tipom događaja/kvara i, ukoliko je na raspolaganju, izračunatom lokacijom kvara. Struje, naponi i digitalni status signali vezani za izabrani događaj su grafički prikazani sa

lijeve strane. U primjeru na slici 22 vidi se A-G kvar na prenosnoj liniji (“Line 2”) koji je lociran na 20.4 milje (32.8 km) od TS (“Sub1”). Na grafiku signala se, osim promjena na analognim signalima, mogu vidjeti i promjene na statusnim signalima koje odgovaraju aktivnosti zaštitnog releja i otvaranju prekidača. Detaljniji pogled na signale i izvještaj analize se dobija klikom na grafikon čime se inicira preuzimanje izvještaja u PDF formatu (slika 23).



Slika 22: Pregled liste događaja/kvarova putem web interfejsa

Glavna prednost *web-based* korisničkog interfejsa je da omogućava elegantan pristup integrisanim podacima, IED signalima i rezultatima analize, korišćenjem standardnog web čitača poput programa *Firefox* ili *Internet Explorer* i nije potrebno instalirati dodatne programe na radne stanice korisnika. Stranice web interfejsa su formatirane korišćenjem standardne HTML/CSS sintakse [Htm13]. Ovakav *thin-client* pristup ima dodatnu prednost zato što omogućava pristup web aplikaciji i putem “*smart*” telefona i tablet uređaja (slika 24).



Slika 23. Pregled izvještaja u PDF formatu

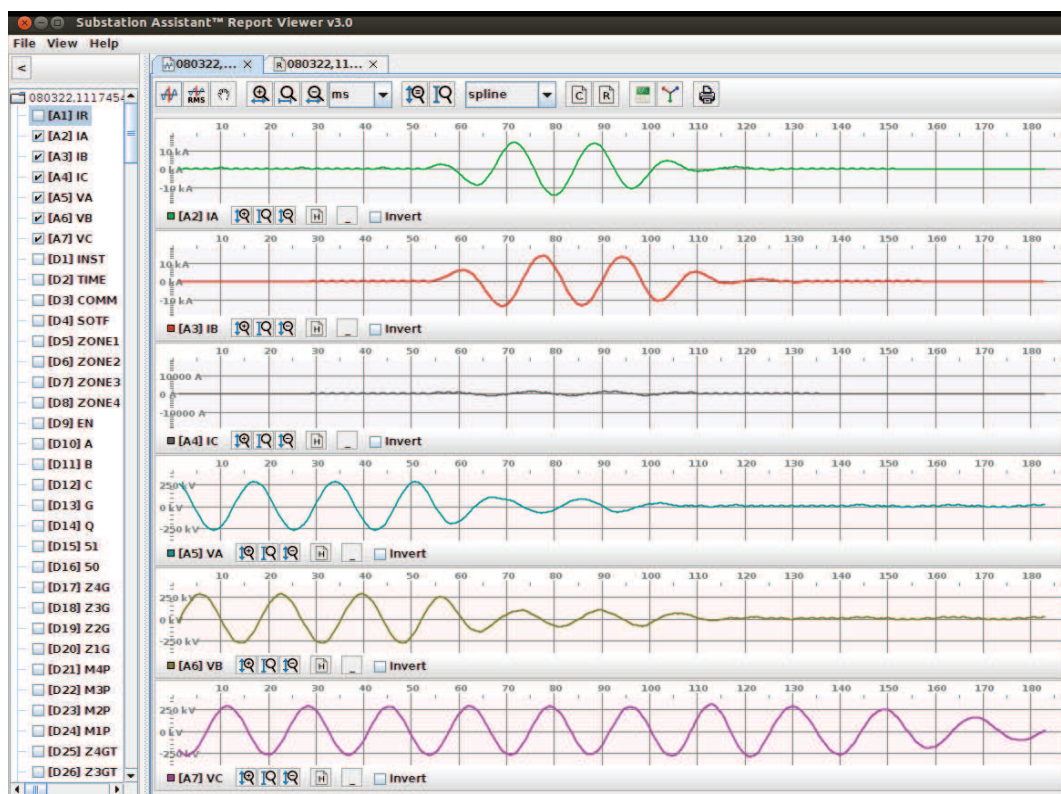


Slika 24: Korisnički interfejs na "smart" telefonu

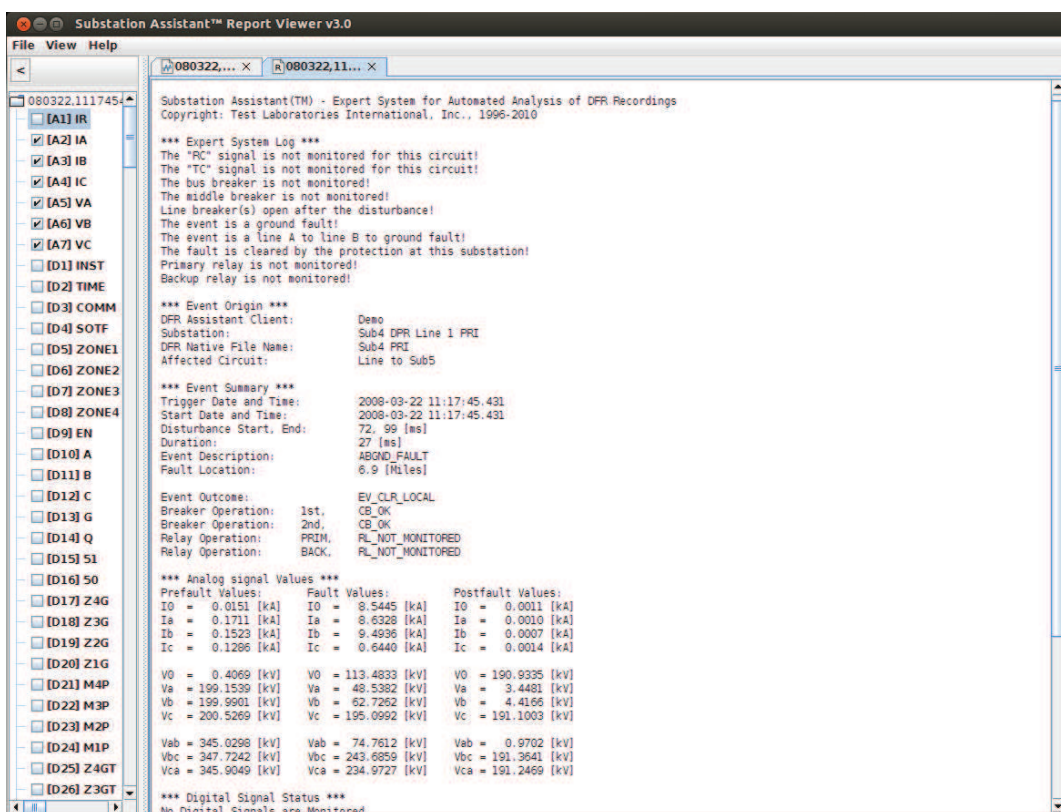
Desktop-based interfejs je poželjan kada se očekuje intenzivnija interakcija sa korisnikom. Implementacija *desktop-based* alata za pregled signala iz IED fajlova i izvještaja automatske analize je prikazana u slici 25. Platforma za implementaciju je programski jezik Java i koristi se *Java Web Start*² tehnologija [Java13]. Neki od razloga za izbor Java programskog jezika, osim što je jedan od najpopularnijih jezika danas, i to što radi na raznim operativnim sistemima (Windows, Linux, Mac OS). Dalje, *Java Web Start* tehnologija omogućava korisniku da učita i startuje *desktop-based* aplikaciju putem *Intranet* mreže bez potrebe da se program posebno instalira kod korisnika. Jedini zahtjev je da korisnička radna stanica ima instaliran *Java run-time engine* (JRE).

Nakon pokretanja alat za pregled signala i izvještaja (*Report Viewer*) automatski učitava podatke sa servera koji odgovaraju izabranom događaju. Signali se prikazuju sa većim stepenom detalja i sam program omogućava korisniku dodatne funkcije kao što su izbor signala, zumiranje, preklapanje signala (*overlay*), očitavanje mjerenja korišćenjem grafičkih kursora, itd. Desktop aplikacija dalje omogućava i dodatne alatke tipa grafičkog prikaza fazora, harmonika i izračunavanje lokacije kvara uz interakciju sa korisnikom. Dodatne softverske alatke za naprednu interakciju i detaljniju inspekciju snimljenih signala omogućavaju korisniku da brzo pristupi integrisanim podacima, ali i da ručnom analizom verifikuje rezultate koji su generisani od strane automatskih analitičkih funkcija [Kez12]. Osim za pregled snimljenih signala, *Report Viewer* alat omogućava brz i jednostavan prikaz izvještaja analize i konfiguracije COMTRADE fajla (slika 26). Konceptualno, ovdje je najvažnije primjetiti da korisnik koristi transparentni pristup podacima i rezultatima analize nezavisno od tipa IED uređaja.

2 Java Web Start je zaštićeno ime (Oracle/Sun)



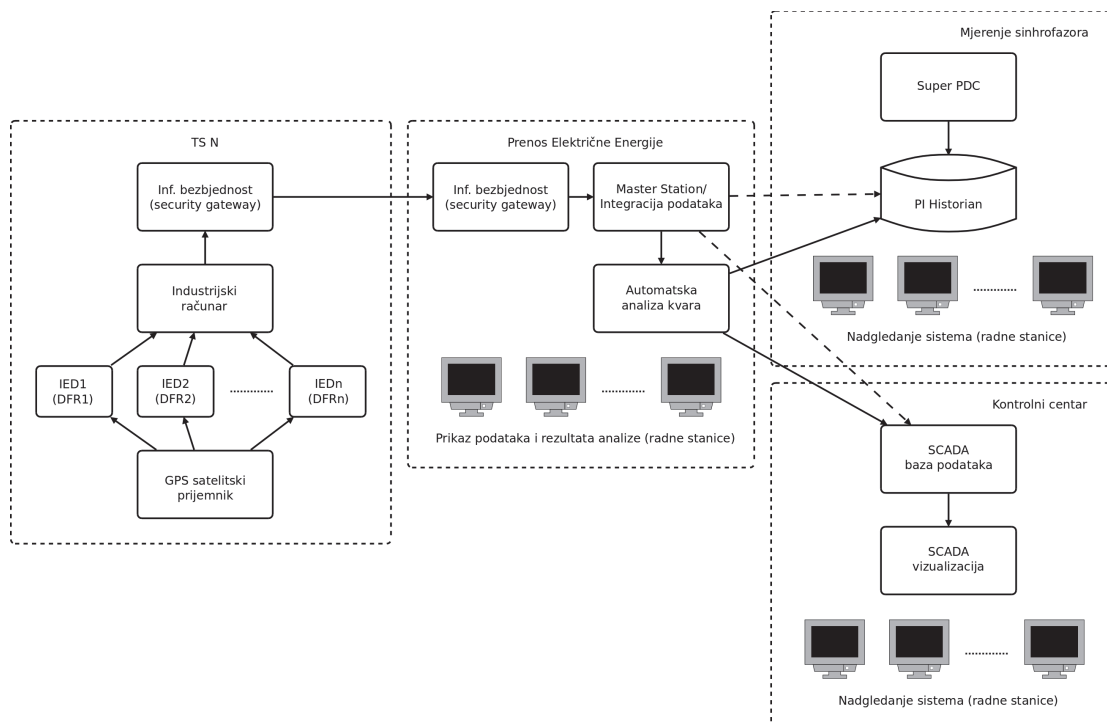
Slika 25. Pregled signala kvara korišćenjem čitača izvještaja



Slika 26. Pregled izvještaja analize putem čitača izvještaja

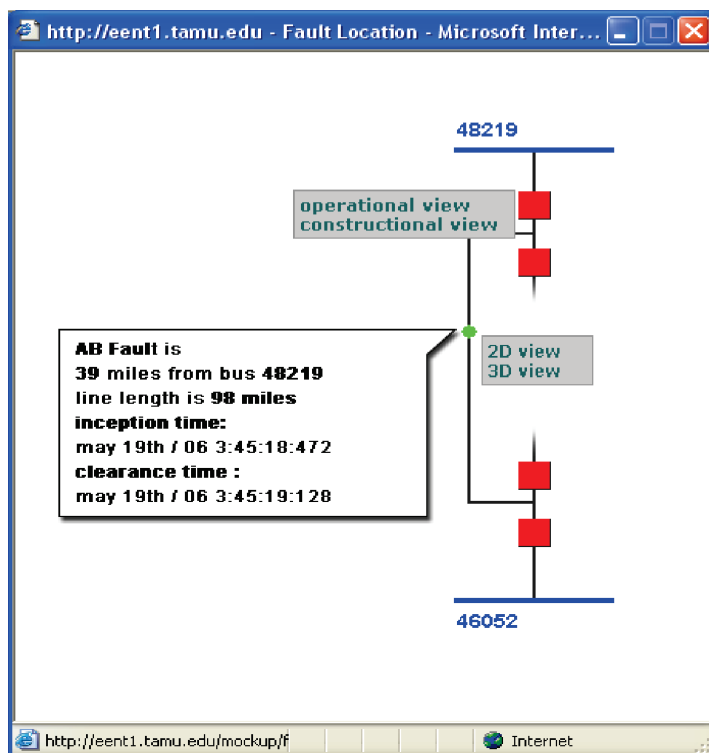
4.4 Integracija sa drugim sistemima

Predložena arhitektura za sistemsko Smart Grid rješenje integracije i automatske analize IED podataka o događajima kvara je otvorena za dalja proširenja i integracije sa drugim sistemima [Pop12]. Osim direktnih korisnika, inženjera zaduženih za analizu kvara, zaštitu i održavanje, rezultati integracije podataka i automatske analize mogu biti prosleđeni prema drugim sistemima za upravljanje podataka i procesiranje kao što je ilustrovano primjerom u slici 27. U primjeru postoji više TS-ova i svaka TS može biti opremljena sa više IED uređaja kao što su DFR, DPR, PQM i sl. Fajlovi o događajima, snimljeni putem IED-ova se prikupljaju i prenose korišćenjem namjenskog industrijskog računara instaliranog u TS i sigurnosnih *gateway* uređaja prema centralizovanom mjestu za integraciju i procesiranje podataka u grupi zaduženoj za prenos električne energije.



Slika 27. Prosleđivanje rezultata automatske analize prema drugim sistemima

Integrirani podaci, konvertovani u standardizovan format, kao i rezultati automatske analize, se dalje mogu proslediti drugim sistemima koji mogu uključivati *PI Historian* rješenje i integraciju sa PMU podacima (mjerenje sinhrofazora), kao i SCADA rješenja i integraciju sa RTU podacima (kontrolni centar). Na ovaj način se premošćava barijera između tradicionalno neoperacionih mjerenja (IED zapisa u TS) i operacionih mjerenja (RTU i PMU). Rezultate analitke i integracije IED podataka je moguće i vizualno integrisati u SCADA vizualizaciju kao događaje (*events*) korišćenjem SCADA API i CIM specifikacije [Iec02]. Primjer je ispis tipa kvara, lokacije i trenutka kvara pored prenosnog voda ili TS (slika 28).



Slika 28. Integrisanje rezultata analize u vizualizaciju SCADA sistema

Implementirano rješenje je otvoreno i za integracije za drugim sistemima za vizualizaciju. Jedan takav primjer je korišćenje satelitskih mapa (Google Maps API) kao što je prikazano u slici 29 [Goog13]. Dodatni interesantni primjeri vizualizacije automatske analitike se mogu naći u [Zhen10].



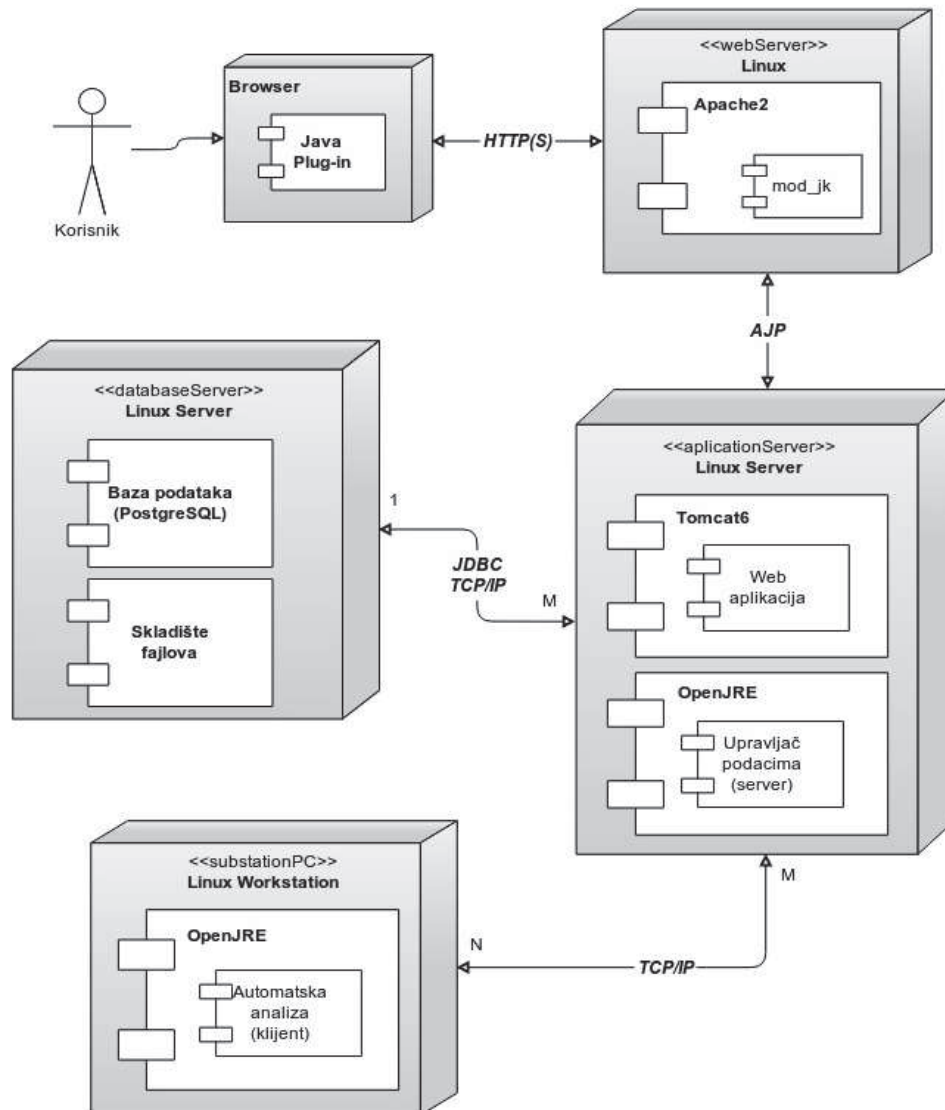
Slika 29. Integracija rezultata analitike u sistem za satelitske mape

4.5 Korišćenje Open Source tehnologije

Komponente implementiranog sistema se mogu rasporediti i konfigurisati prema aplikacionim potrebama krajnjeg korisnika, tipično elektroprivrede, na sljedeće načine:

- instalacija u okviru jedne TS gdje se rješenje nalazi na industrijskom računaru u postrojenju zajedno sa IED uređajima,
- centralizovana instalacija gdje se klijent i server nalaze na jednoj radnoj stanici ili serveru u centralnim prostorijama firme,
- distribuirano gdje se klijenti nalaze u TS-ovima na industrijskim računarima, a server u centralnim prostorijama, ili
- regionalno kada imamo više regionalnih centara što može rezultirati potrebom da se ima više klijenata u TS-ovima, ali i više servera raspoređenih po regionima.

Sistemska rješenje za automatsku analizu kvarova se može realizovati korišćenjem OSS (*open source software*) platforme kao što je prikazano UML dijagramom instalacije rješenja u slici 30. OSS alati i tehnologije koji su korišćeni za implementaciju predložene arhitekture su sumirani u sledećim odeljcima.



Slika 30: *Open source* softver kao platforma za instalaciju rješenja

Razvojna platforma za rješenje se bazira na Java programskom jeziku i Java razvojnom kitu (*Java Development Kit*, JDK) [Java13]. JDK dolazi u nekoliko varijanti i Sun Microsystems (sada Oracle) je izdao OSS verziju JDK pod nazivom OpenJDK. Važne karakteristike Java tehnologija je da su vrlo dobro prihvaćene i

podržane od strane univerziteta i industrije širom svijeta. Java programi su nezavisni od operativnog sistema (*platform-independant*). Dalje, za Java programski jezik postoji širok spektar OSS biblioteka razne namjene što značajno olakšava život programera i ubrzava razvojni ciklus. Konačno, za razvoj u Javi postoji i veliki broj kvalitetnih razvojnih alata koji takođe dolaze iz OSS svijeta [Sma08].

Operativni sistem za implementaciju predloženog rješenja, kao što je prikazano u slici 30, je Ubuntu Linux [Ubu13]. Ubuntu je jedna od najpopularnijih Linux distribucija, lako se preuzima i instalira, i dolazi sa veoma dobrom podrškom u vidu dokumentacije, korisničke zajednice i komercijalne podrške od samog proizvođača. Osim Linux-a, predloženo rješenje se može uspješno implementirati korišćenjem i drugih operativnih sistema (Windows, Solaris ili BSD).

Aplikacioni server omogućava implementaciju funkcionalnosti dostupnih putem *web* interfejsa. Apache Tomcat je korišćen kao aplikacioni server za implementaciju *web* aplikacije [Aptm13]. Tomcat obezbeđuje OSS verziju servlet kontejnera (*servlet container*) i implementira Java Servlet i JavaServerPages (JSP) specifikaciju.

HTTP server omogućava pristup statičkim *web* stranicama kao i daljinski pristup IED fajlovima putem HTTP protokola. Za ovu namjenu je izabran Apache2 [Apht13]. Putem Apache servera se ostvaruje i povezivanje prema *web* aplikaciji implementiranoj u Javi korišćenjem Apache Tomcat poveziča (*connector module*). Apache serveri su sigurni, robustni, pogodni za održavanje i spadaju u najpopularnije Internet alate uopšte.

Baza podataka se može implementirati izborom neke od kvalitetnih OSS implementacija za SQL baze podataka. U implementaciji predloženog rješenja je

korišćena PostgreSQL baza koja je na raspolaganju za različite operativne sisteme, lako se instalira i održava i dobro je dokumentovana [Post13]. Centralizovano skladište i baza podataka su implementirani kombinacijom Linux fajl sistema i baze podataka koja omogućava lak pristup i pretraživanje događaja, IED fajlova i rezultata analitike. Putem baze podataka se takođe referenciraju i nazivi IED fajlova čime se ubrzava pretraživanje fajlova na fajl sistemu.

Radne stanice za korisnike u minimalnoj konfiguraciji treba da imaju standardni *web* čitač kao što je Mozilla Firefox koji dolazi iz OSS svijeta [Moz13]. Da bi se koristila Java Web Start tehnologija i *desktop-based* korisnički interfejs potrebno je dodati Java izvršnu platformu (JRE).

Izabrani OSS programi spadaju u priznate softverske proizvode koji se široko koriste u industriji, imaju veoma jake programerske i korisničke zajednice, te postoji i opcija za komercijalnu podršku. Važno je i spomenuti da je opisana OSS platforma pogodna i za instalacije korišćenjem softvera za virtualizaciju [Vbox13, Vm13] ili sisteme za oblak (*cloud*) [Ama13]. Prednosti korišćenja izabranih OSS tehnologija su višestruke: poboljšana portabilnost, interoperabilnost, informaciona bezbjednost, skalabilnost, dobre opcije za održavanje i naravno finansijske.

4.6 Benefiti implementacije automatske analize kvara

Postoji više benefita koji proizilaze iz implementacije i upotrebe predloženog rješenja za automatsku integraciju IED podataka i analizu kvara na prenosnim vodovima kao što je to diskutovano u [Pop12]. Očekivani benefiti uključuju:

- drastičnu uštedu u vremenu provedenom na procesiranju i analizi podataka prikupljenih u TS-ovima čime se povećava produktivnost osoblja;
- automatsku integraciju i arhiviranje podataka iz TS-ova korišćenjem otvorenih

i standardnih formata omogućava kasniju upotrebu podataka, kao i implementaciju novih analitičkih funkcija u budućnosti;

- pristup podacima sa više IED uređaja koji odgovaraju istom događaju čime se omogućava redundantnost i poboljšanje provjere integriteta mjerenja i rezultata analize;
- centralizovano skladištenje integrisanih podataka korišćenjem standardnih formata i baza podataka na bazi standardnog SQL podskupa komandi što omogućava različite implementacije korisničkih interfejsa, kao i integraciju sa drugim sistemima (na primjer, vizualizacija u SCADA ili GIS sistemima);
- transparentni pristup integrisanim podacima i rezultatima analize bez obzira na tip IED uređaja, model, generaciju ili proizvođača;
- mogućnost kreiranja izvještaja sa više ili manje detalja koji su prilagođeni specifičnoj namjeni ili korisničkoj grupi: inženjeri zaštite, operateri, održavanje i sl;
- prilagođavanje formata izvještaja u cilju zadovoljavanja regulatornih obaveza [Nerc13, Ferc13];
- automatska analitika nudi dodatne informacije i saznanja o kvarovima i operaciji zaštitne opreme koja mogu biti od ogromne pomoći prilikom mitigacije kvara u elektroenergetskom sistemu;
- predložena arhitektura nudi konceptualnu skalabilnost koja omogućava uključivanje podataka sa dodatnih IED uređaja kao i dodavanje novih analitičkih funkcija;
- analitičke funkcije se mogu koristiti da se uspostavi interkonekcija sa drugim sistemima u okviru preduzeća ili čak spoljnih entiteta kao što su susedne

elektroprivreda, regulatorne tijela, koordinatori za pouzdanost i sl.

Implementacija automatske analitike podataka iz TS-ova koji se tradicionalno smatraju neoperacionim podacima otvara nove mogućnosti za kreiranje nove vrijednosti u obliku dodatnog ROI (*return on investment*) koje se mogu sumirati u kategorije poboljšane pouzdanosti, produktivnosti, kapitalne investicije, i regulatorne obaveze (tabela 4). Mogućnost za kreiranje nove vrijednosti i trend naglog porasta broja IED uređaja u TS koji nude funkcionalnost digitalnih snimača kvara čine automatsku integraciju i analizu podataka neophodnim.

Tabela 4. Kreiranje nove vrijednosti i benefiti automatske analize

Kategorija	Poboljšanja
Pouzdanost	Pouzdanost u donošenju operativnih odluka, pouzdanost opreme, prilagodljivost i pouzdanost prilikom slučajnih događaja, robusnost mjernog ožičenja i podataka
Produktivnost	Integracija podataka, analiza, pregled integrisanih podataka, arhiviranje, izvještavanje
Kapitalne investicije	Automatska integracija i analiza podataka ne zahtjeva dodatno povezivanje, nove IED uređaje, komunikacije, procedure i sl.; instalacija dodatnog softverskog rješenja nije skupa kao instalacija novog hardvera; poboljšana upotrebna vrijednost postojećeg hardvera
Regulatorne obaveze	NERC, FERC, PUCs (<i>public utility commissions</i>), RC (<i>reliability coordinators</i>), standardi (IEEE, IEC), velike elektroprivrede

5 TESTIRANJE I DISKUSIJA REZULTATA

Rješenje prikazano u ovoj tezi je prošlo kroz razne vidove testiranja i evaluacije. Inicijalna evaluacija je urađena korišćenjem raspoloživih istorijskih IED fajlova, prvijenstveno prikupljenih sa DFR uređaja. Nakon inicijalnog testiranja, rješenje je detaljno testirano korišćenjem raznih scenarija koji se mogu podijeliti u dvije grupe: a) testiranje korišćenjem podataka generisanih simulacijom kvarova, i b) testiranje korišćenjem fajlova prikupljenim sa raznih IED uređaja u postrojenju.

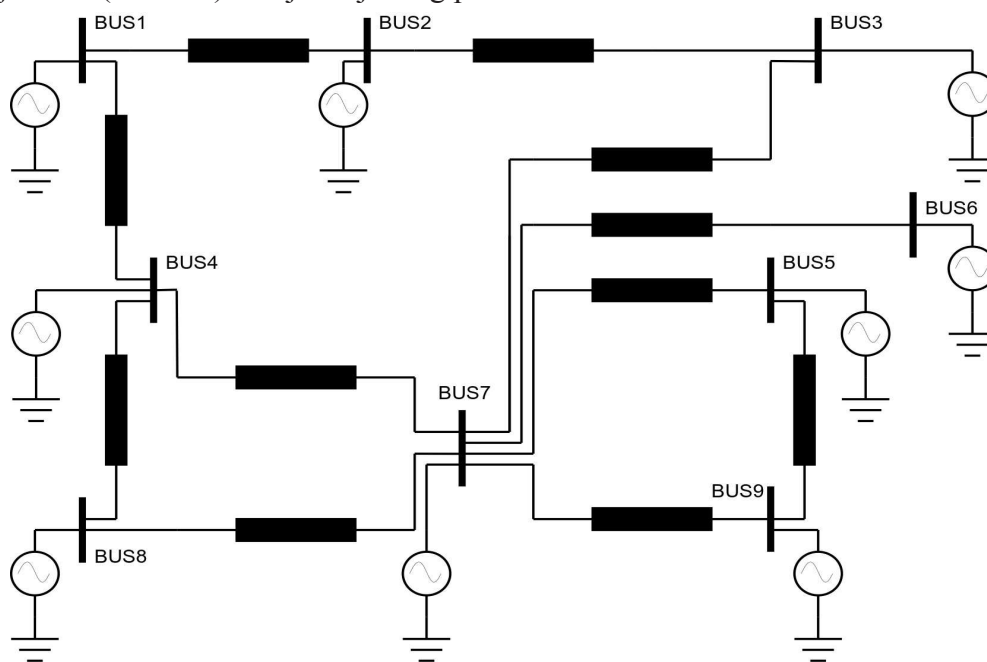
5.1 Testiranje i rezultati korišćenjem simulacije

Nije uvijek lako obezbjediti fajlove sa IED uređaja koji odgovaraju kvarovima na prenosnim vodovima, posebno ako je potrebno imati podatke sa oba kraja prenosnog voda. Iz tog razloga evaluacija rješenja je jednim dijelom bazirana na rezultatima simulacije kvara. Za vještačko kreiranje podataka koji dolaze sa IED uređaja korišćen je EMTP (*electromagnetic transient program*) alat koji se zove ATP (*Alternative Transient Program*) [Atp13].

Primjer sistema sa 9 sabirnica korišćenog za EMTP simulacije je prikazan u slici 31. Ovaj model je kreiran na bazi segmenta postojećeg elektroenergetskog sistema [Hyd05]. Model je verifikovan i kalibrisan korišćenjem snimaka sa DFR i DPR uređaja. Korišćenjem ovog modela i EMTP programa simulirani su razni tipovi kvarova. Parametri simulacije uključuju tip kvara (A-G, AB, AB-G, ABC), lokaciju kvara na izabranom prenosnom vodu (50 do 95 % u koraku od 5%) i otpornost kvara (0.01, 1, i 10 Ω). Izlazni fajlovi kreirani u EMTP simulacijama su konvertovani u COMTRADE format i kao takvi korišćeni kao ulazni podaci za analitiku u implementiranom Smart Grid rješenju.

Za sve slučajeve simuliranih kvarova, analitika je ispravno identifikovala tip

kvara, kao i početak i kraj promjena u signalima koji odgovaraju kvaru. Izračunate distance do lokacije kvara su bile u očekivanom opsegu. Rezultati simuliranih scenarija su sumirani u tabeli 5. Za svaki tip kvara je simulirano 30 scenarija variranjem parametara koji opisuju kvar. Greška procjene distance do kvara uz korišćenje algoritama na bazi podataka s jednog kraja voda (*single-end*) ide i do nekoliko procenata, dok je greška estimacije lokacije kvara na bazi podataka s oba kraja voda (*two-end*) manja od jednog procenta.



Slika 31. Primjer sistema sa 9 sabirnica korišćenog za EMTP simulacije

Tabela 5. Rezultati analize simuliranih kvarova

#	Tip kvara	Broj sim. slučajeva	<i>Single-end</i> Greška [%]	<i>Two-end</i> Greška [%]
1	A-G	30	0.61 - 3.75	0.05 - 0.27
2	AB	30	0.59 - 2.57	0.01 - 0.48
3	AB-G	30	0.61 - 2.57	0.05 - 0.21
4	ABC	30	0.42 - 2.57	0.05 - 0.21

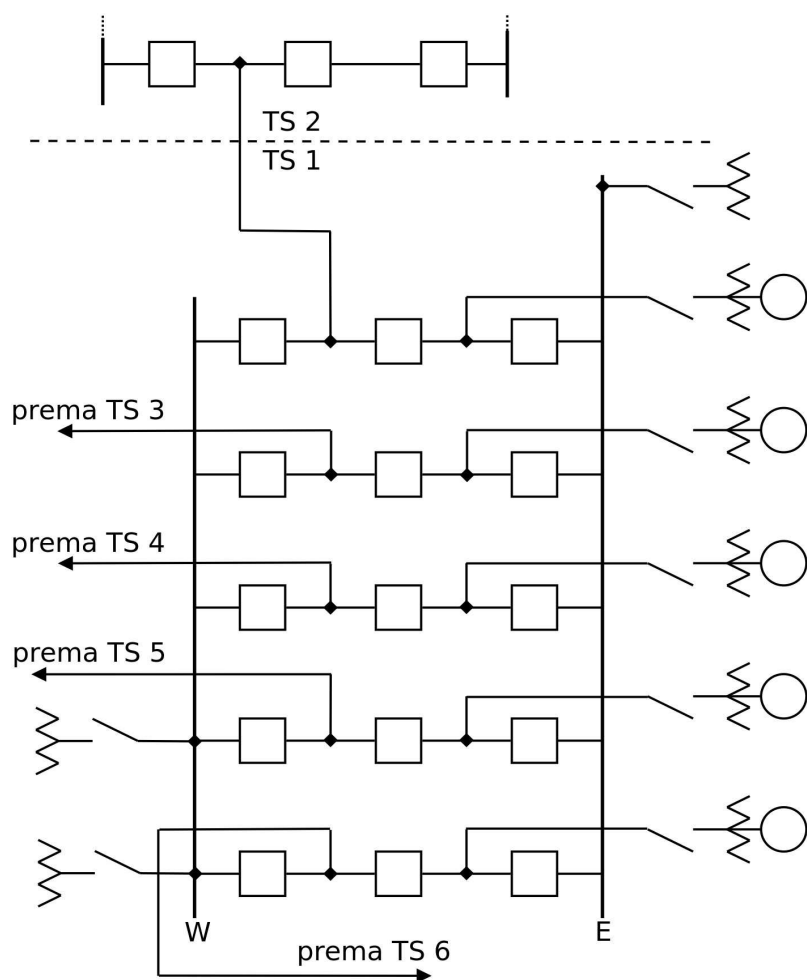
Napomena: greška je data u % relativno prema dužini prenosnog voda

Nekoliko od ovih simuliranih scenarija su evaluirani i uz korišćenje digitalnog *open-loop* simulatora [Kez02], pri čemu se simulirani signali putem D/A konverzije i

pojačala snage šalju na priključeni IED, što je u našem slučaju bio DPR, čime se simulira konekcija uređaja na mjerne transformatore u TS. Na ovaj način je verifikovana ispravna operacija zaštitnog releja, ali su kreirani i test fajlovi u DPR formatu. Ovako kreirani fajlovi su korišćeni za dodatnu evaluaciju implementiranog rješenja, kako na bazi čitanja izvještaja sa releja (*parsing*), tako i na bazi detaljne analize na bazi procesiranja snimljenih signala.

5.2 Primjeri iz postrojenja

Primjeri dati u ovom poglavlju se baziraju na podacima, IED fajlovima, prikupljenim iz TS 1 i TS 2 čija je konfiguracija prikazana u slici 32.

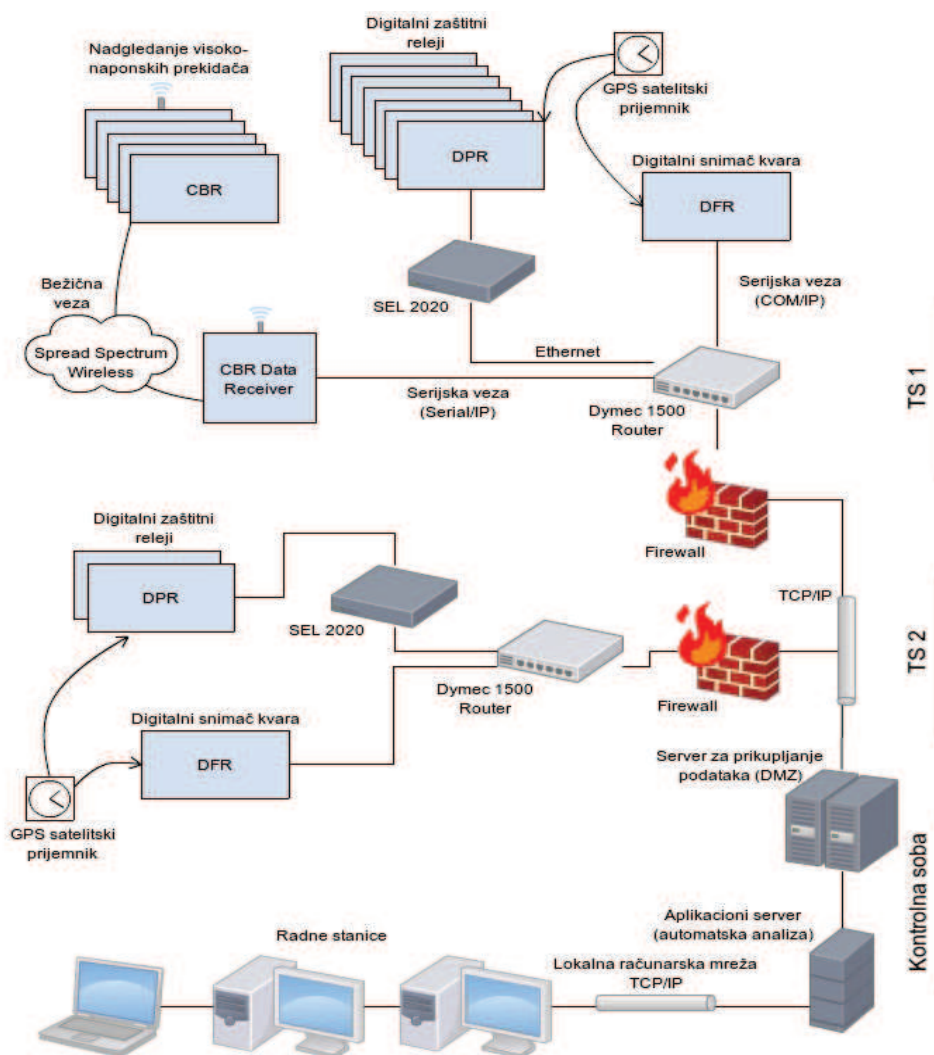


Slika 32: Konfiguracija dva TS-a u pilot demonstraciji

Rastojanje između TS 1 i TS 2 je oko 79 km. IED uređaji sa kojih su prikupljeni

podaci uključuju: a) jedan DFR i sedam DPR-a u TS 1, i b) jedan DFR i dva DPR-a u TS 2.

Sistem za automatsku analizu je instaliran na server kompjuter koji se nalazi u inženjerskim prostorijama u centralnoj lokaciji (kontrolna soba) kao što je prikazano u slici 33.



Slika 33: Povezivanje uređaja u pilot demonstraciji

Svi fajlovi prikupljeni sa DFR i DPR uređaja su obeleženi trenutkom snimanja (datum i vrijeme) korišćenjem sinhronizacije sa GPS satelitskim prijemnikom i putem TCP/IP Ethernet veze se prebacuju do servera. CBR uređaji su instalirani samo za inicijalnu evaluaciju novog CBR hardvera i nije bilo dovoljno primjera fajlova iz postrojenja.

Interesantno je spomenuti da je predložena arhitektura omogućila jednostavnu integraciju i procesiranje CBR fajlova što ilustruje mogućnost koegzistencije različitih analitičkih modula čiji se rad bazira na različitim tipovima podataka.

U pilot instalaciji je prikupljeno i procesirano više stotina fajlova sa DFR i DPR uređaja. Neki od fajlova su preuzeti iz arhive događaja za koje se zna da odgovaraju konkretnim primjerima kvarova iz prošlosti. Najinteresantniji slučajevi za evaluaciju su bili primjeri kvarova ili događaja za koje postoji više fajlova snimljenih putem različitih uređaja. U takvim slučajevima je bilo moguće uporediti rezultate i informacije dobijene putem DFR i DPR uređaja. Na sljedećim stranicama su opisani primjeri događaja kvara koji su izdvojeni kao posebno interesantni jer ilustruju rezultate i vrste informacija koje se mogu dobiti korišćenjem implementiranog rješenja.

Primer 1- Primjer A-G kvara na sredini prenosnog voda

Ovo je interesantan slučaj u kome je na raspolaganju bilo više IED fajlova koji odgovaraju istom događaju kvara. Kvar se desio na prenosnom vodu između TS 1 prema TS 4 na distanci 38.14 km (23.7 milje) posmatrajući iz TS 1. Kvar je snimljen na šest IED uređaja (tabela 6) uključujući DFR-ove u stanicama TS 1 i TS 2, primarne i *backup* DPR-ove u TS 1 na vodu prema TS 4, kao i DPR uređaje na vodu između stanica TS 1 i 2.

Tabela 6. Primjer A-G kvara na sredini prenosnog voda

#	IED/ Prenosni vod	Vrijeme snimka	Tip kvara	Lokacija kvara [km]
1	Primarni DPR TS 1 prema TS 4	11:59.34.302	A-G	39.99
2	Backup DPR TS 1 prema TS 4	11:59.34.307	A-G	40.12
3	Primarni DPR TS 1 prema TS 2	11:59.34.343	A-G	-667.39
4	Primarni DPR TS 2 prema TS 1	11:59.34.305	A-G	802.26
5	DFR TS 1 vod prema TS 4	11:59.34.207	A-G	38.14
6	DFR TS 2 vod prema TS 1	11:59.34.295	Nije kvar	N/A

Kao što se u tabeli 6 može videti svi IED uređaji su pokazali prilično dobru vremensku sinhronizaciju snimanja. Svi IED fajlovi su korekno procesirani i integrisani u bazu podataka. Originalni DFR i DPR fajlovi su konvertovani u COMTRADE standardni format. Izvještaji sa DPR uređaja su automatski pročitani da bi se izvukla informacija o tipu i lokaciji kvarai. Oba DPR uređaja na prenosnom vodu u kvaru su indikovala A-G kvar i izračunali distancu do kvara oko 40 km (24.9 milje). DFR fajlovi su konvertovani, integrisani u bazu i procesirani korišćenjem automatske analitike koja je ispravno identifikovala A-G tip kvara na distanci od

38.14 km što odgovara stvarnom mjestu kvara. Primjeri izvještaja kreiranog automatskom analitikom na bazi DFR i DPR fajlova za ovaj kvar su dati u slikama 34 i 35. Slika 34 prikazuje detalje izvještaja na bazi procesiranja i analize mjernih signala snimljenih DFR uređajem, a u slici 35 se vide detalji izvještaja na bazi čitanja (*parsing*) DPR izvještaja fajla za isti kvar.

*** Event Summary ***		
Trigger Date and Time:	20XX-XX-20 11:59:34.207	
Start Date and Time:	20XX-XX-20 11:59:34.132	
Disturbance Start, End:	65, 106 [ms]	
Duration:	41 [ms]	
Event Description:	AGND_FAULT	
Fault Location:	23.7 [Miles]	
Event Outcome:	EV_CLR_LOCAL	
Breaker Operation:	1st,	CB_OK
Breaker Operation:	2nd,	CB_OK
Relay Operation:	PRIM,	RL_NOT_MONITORED
Relay Operation:	BACK,	RL_NOT_MONITORED
*** Analog signal Values ***		
Prefault Values:	Fault Values:	Postfault Values:
I0= 0.0118 [kA]	I0= 6.5834 [kA]	I0= 0.0038 [kA]
Ia= 0.5158 [kA]	Ia= 6.6937 [kA]	Ia= 0.0006 [kA]
Ib= 0.5478 [kA]	Ib= 0.5190 [kA]	Ib= 0.0037 [kA]
Ic= 0.5638 [kA]	Ic= 0.6320 [kA]	Ic= 0.0004 [kA]
U0= 19.3244 [kV]	U0= 45.3375 [kV]	U0= 195.1439 [kV]
Ua= 198.0319 [kV]	Ua= 162.1927 [kV]	Ua= 198.0891 [kV]
Ub= 197.5894 [kV]	Ub= 195.6939 [kV]	Ub= 197.3722 [kV]
Uc= 216.1114 [kV]	Uc= 214.2247 [kV]	Uc= 1.8417 [kV]
Uab=343.1335 [kV]	Uab=308.4148 [kV]	Uab=342.9095 [kV]
Ubc=356.7998 [kV]	Ubc=354.6029 [kV]	Ubc=198.2614 [kV]
Uca=359.8151 [kV]	Uca=329.4935 [kV]	Uca=199.0470 [kV]
...		

Slika 34: Primjer izvještaja analize na bazi DFR fajla

*** Relay Event Summary ***	
Substation:	Sub2 DPR Line 3 BU
DPR Native File Name:	Relay BU, XXXX20.EVE
Affected Circuit:	Line 3 BU
Trigger Date and Time:	20XX-XX-20 11:59:34.307
Start Date and Time:	20XX-XX-20 11:59:34.207
Event Description:	AGND_FAULT
Fault Location:	24.93 [Miles]
...	

Slika 35: Primjer izvještaja analize na bazi DPR fajla

Za razliku od DPR fajlova, u ovom konkretnom slučaju, DFR fajlovi su procesirani analitikom koja koristi izmjerene signale struja i napona. Ovdje je takođe važno ukazati na upotrebnu vrijednost podataka sa IED uređaja koji nijesu direktno mjerili veličine na vodu sa kvarom. U ovom slučaju su to bili DPR-ovi na vodu između stanica TS 1 i TS 2, kao i DFR u stanici TS 2. Iako nijesu ukazali na lokaciju kvara, druge informacije o tipu i vremenu događaja mogu pomoći inženjerima da dobiju kompletniju sliku o događaju (tabela 6). Za ovaj konkretan primjer je od susedne elektroprivrede dobijen i DFR fajl sa drugog kraja prenosnog voda i uspješno je pokrenuta lokacija kvara na bazi mjerenja sa oba kraja linije (*two-end*). Rezultat se slagao sa prethodnim procjenama i stvarnim mjestom kvara na vodu.

Primjer 2 - B-G kvar u blizini TS

U ovom primjeru kvar je bio tipa B-G na prenosnomvodu između stanica TS 1 i 6, ali u neposrednoj blizini TS 1. Rezultati automatske integracije i analitike IED podataka su sumirani u tabeli 7. U trećoj i četvrtoj vrsti tabele 7 se može videti korektna indikacija lokacije kvara, dok su preostali DPR-ovi iz TS 1, prikazani u vrsti jedan i dva, ispravno detektovali inverzni kvar. Vremena snimanja i tip kvara se slažu u rezultatima analize sva četiri zapisa što dodatno potvrđuje dobijene rezultate.

Tabela 7. Primjer B-G kvara u blizini TS

#	IED/ Prenosni vod	Vrijeme snimka	Tip kvara	Lokacija kvara [km]
1	Primarni DPR TS 1 prema TS 2	07:15:02.825	B-G	-12.06
2	Primarni DPR TS 1 prema TS 4	07:15:02.826	B-G	-6.95
3	Primarni DPR TS 2 prema TS 1	07:15:02.782	B-G	79.26
4	DFR TS 1 vod prema TS 6	07:15:02.704	B-G	0.32

Primjer 3 - B-G kvar na udaljenosti 103 km od TS

U pitanju je takođe B-G tip kvara, ali na vodu između TS 1 i 4. Fajlovi su uspješno procesirani i rezultati analize na bazi DPR internog računanja i analitike implementiranog rješenja na bazi DFR podataka se slažu u detekciji tipa i lokacije kvara (tabela 8). I ovdje je očigledno slaganje trenutka snimanja kao i tipa kvara identifikovanog na raznim uređajima.

Tabela 8. Primjer B-G kvara na udaljenosti 103 km od TS

#	IED/ Prenosni vod	Vrijeme snimka	Tip kvara	Lokacija kvara [km]
1	Primarni DPR TS 1 prema TS 4	19:55:44.772	B-G	102.52
2	Backup DPR TS 1 prema TS 3	19:55:44.933	B-G	604.31
3	DFR TS 1 vod prema TS 4	19:55:44.925	B-G	102.68

Primjer 4 – C-G kvar na udaljenosti oko 13 km od TS

Kvar je ovog puta bio tipa C-G, na prenosnom vodu između TS 1 i TS 3 na distanci oko 13 km od TS 1 (tabela 9). I ovdje imamo vrlo dobro slaganje između rezultata analitike na bazi DPR i DFR uređaja, kao i podudaranje između trenutaka snimanja i detektovanog tipa kvara pri analizi podataka sa sva četiri uređaja.

Tabela 9. Primjer C-G kvara na udaljenosti oko 13 km od TS

#	IED/ Prenosni vod	Vrijeme snimka	Tip kvara	Lokacija kvara [km]
1	Primarni DPR TS 1 prema TS 4	03:05:50.833	C-G	N/A
2	Backup DPR TS 1 prema TS 3	03:05:50.796	C-G	12.97
3	Primarni DPR TS 2 prema TS 1	03:05:50.797	C-G	235.45
4	DFR TS 1 vod prema TS 3	03:05:50.806	C-G	13.52

Primjer 5 – Analitika DFR zapisa ukazuje na spor prekidač

U ovom primjeru se ilustruje analiza kvara na bazi DFR zapisa s tim da automatska analiza uključuje evaluaciju zaštite. U pitanju je prenosni vod u konfiguraciji “prekidač-i-po” (“*breaker-and-half*”). Analitika je detektovala ABC tip kvara i ukazala na operacije zaštitnih releja i prekidača (slika 36).

```
*** Expert System Log ***
The bus breaker opened in 2.92 cycles
The middle breaker opened in 5.74 cycles
Line breaker(s) open after the disturbance!
The event is a non-ground fault!
The event is a three phase fault!
The fault is cleared by the protection at this substation!
Primary relay tripped in 0.83 cycles!
Backup relay tripped in 1.29 cycles!
The bus breaker opened in 2.08 cycles after the primary trip
The bus breaker opened in 1.62 cycles after the backup trip
The middle breaker opened in 4.91 cycles after the primary trip!
The middle breaker is slow!
The middle breaker opened in 4.44 cycles after the backup trip!
The middle breaker is slow!
Primary relay did trip correctly!
Backup relay did trip correctly!
...
```

Slika 36: Primjer analize DFR zapisa koja ukazuje na spor prekidač

Kao što se u izvještaju može vidjeti, analiza ukazuje na sporu operaciju srednjeg (*middle*) prekidača kome je trebalo između 4 i 5 ciklusa da odspoji prenosni vod. Naime, detektovana su vremena operacije of 4.91 i 4.44 ciklusa za srednji prekidač u odnosu na *trip* komande zaštitnih releja.

Primjer 6 – Analiza DFR zapisa koji ukazuje na DPR blok komandu

U ovom primjeru se radi o istoj konfiguraciji prenosnog voda kao u primjeru 5. Sam kvar nije bio na vodu koji je pod nadzorom DFR-a čiji zapis analiziramo. Analitika je ispravno detektovala tip kvara. Dodatna evaluacija zaštite pokazuje da su prekidači na vodu zatvoreni sve vrijeme kao i da je takva situacija bila očekivana. Analitika dalje konstatuje da zaštitini releji nisu aktivirani usled prijema blok signala na komunikaciji. Relevantan segment izvještaja analize za ovaj primjer je prikazan u slici 37.

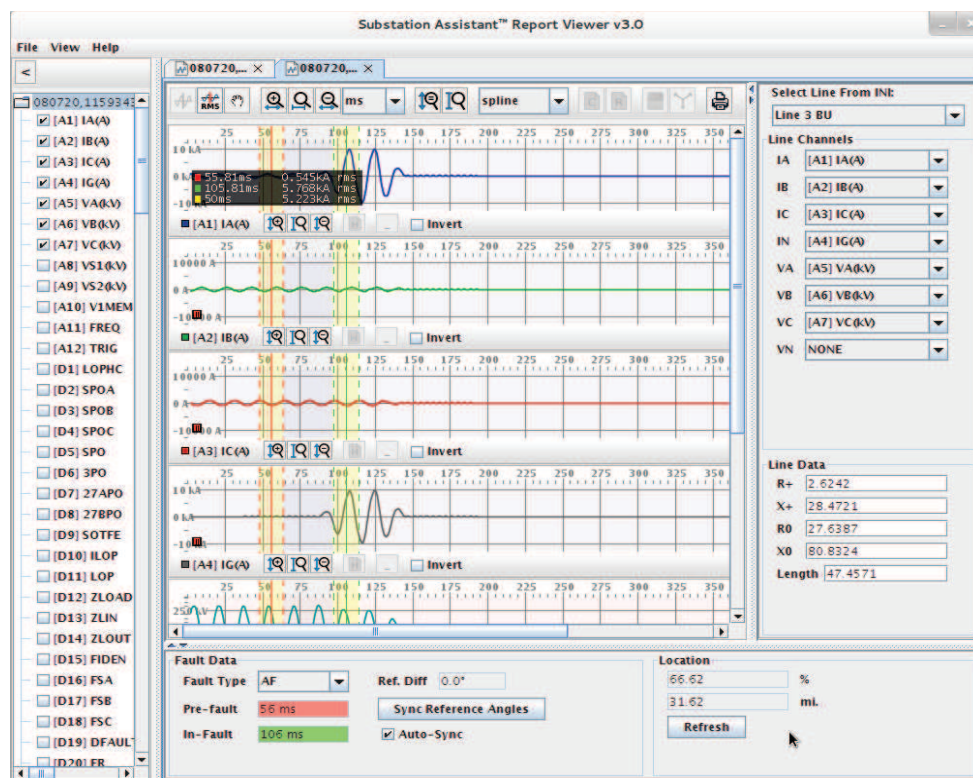
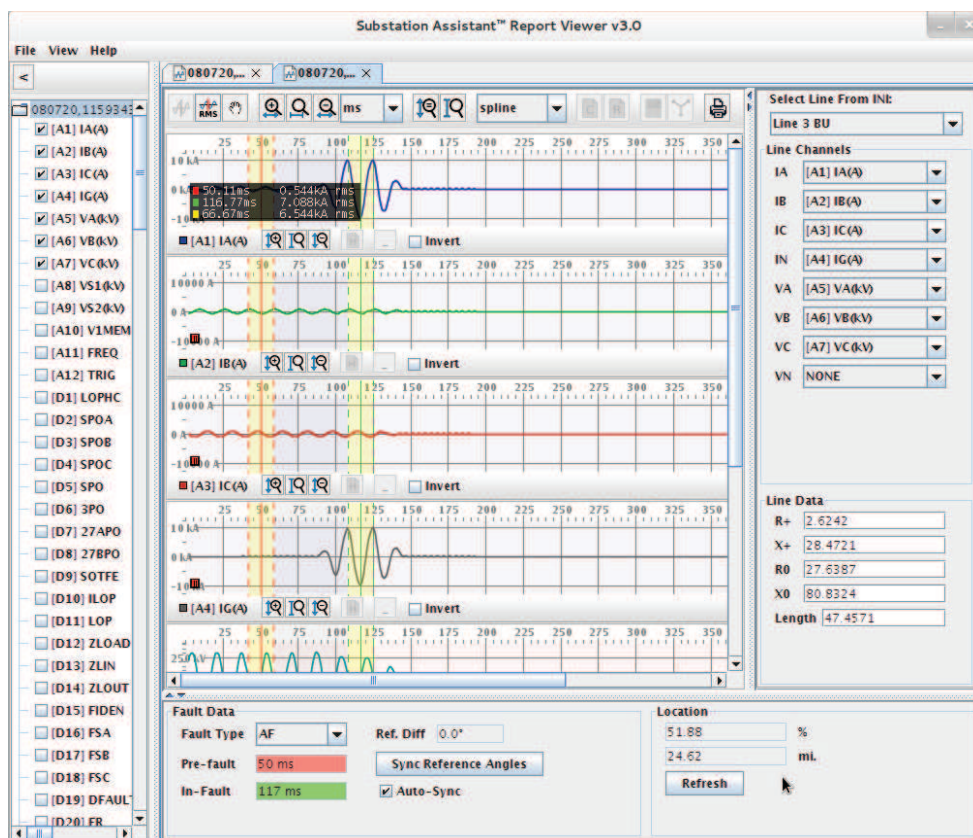
```
*** Expert System Log ***  
The bus breaker is closed all the time!  
The middle breaker is closed all the time!  
The event is a ground fault!  
The event is a phase B to ground fault!  
There is no clearance!  
The bus breaker is OK!  
The middle breaker is OK!  
Primary relay did not trip because the blocking signal was received!  
Backup relay did not trip because the blocking signal was received!  
...
```

Slika 37: Primjer analize DFR zapisa koja ukazuje na DPR blok komandu

Primjer 7 – Analiza DPR zapisa uz interakciju korisnika

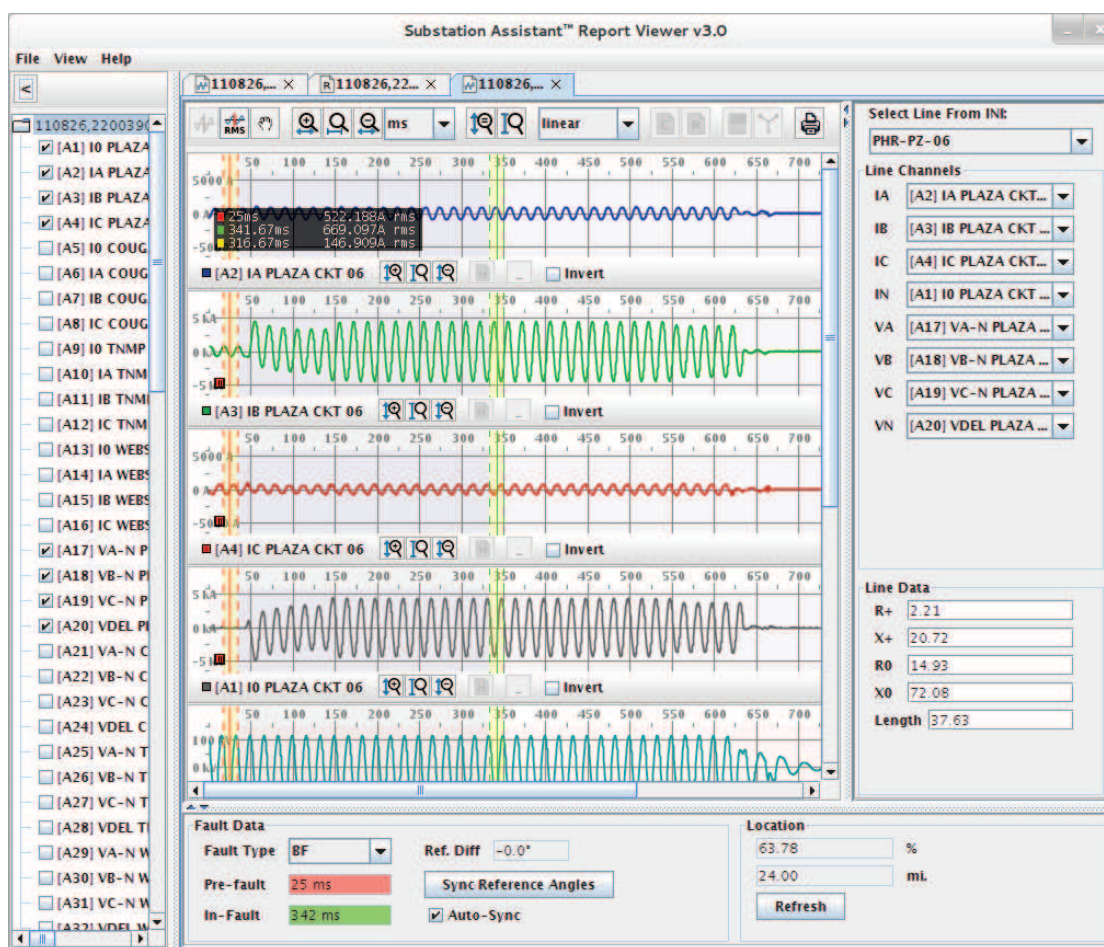
U ovom i sljedećem primjeru je fokus na ilustrovanje interakcije sa korisnikom. Koncept transparentnog pristupa integrisanim podacima, fajlovima sa raznih IED uređaja, kao i rezultatima analize, su ilustrovani korišćenjem *desktop-based* interfejsa [Kez12]. Slika 38 prikazuje primjer DPR zapisa i interakciju sa korisnikom po pitanju izračunavanja lokacije kvara. Izbor mjernih signala i podaci o prenosnomvodu (ulazni kanali, impedanca, dužina) su automatski podešeni. Konkretni primjer prikazuje A-G kvar koji je otklonjen za manje od tri ciklusa. Automatska analitika je detektovala početak i kraj kvara i korektno postavila kursore na mjesta tj. vremenske intervale u kojima se izračunavaju fazori izmjerenih signala. Korektna estimacija fazora je rezultirala prilično tačnom procjenom lokacije kvara oko 24.4 milje (oko 39 km).

U konkretnom primjeru se može primijetiti i efekat niske frekvencije odabiranja i primjene filtera unutar DPR uređaja. Umjesto naglo, u snimljenim mjerenjima u samom fajlu, kvar se pojavljuje i nestaje postepeno što nije realistično. Da bi ilustrovali senzitivnost izračunavanja fazora, a samim tim i izračunavanja lokacije kvara, pomjerali smo desni kursor prema početku kvara što je izazvalo da se pogrešno izračuna distanca do kvara preko 50 km (preko 30 milja, slika 39). Ovakva greška je očekivana s obzirom da se ulazi u vremenski interval gdje se primećuje efekat filtriranja signala. Ovaj primjer takođe dobro ilustruje zašto automatska analiza ponekad daje neočekivano loše rezultate pri računanju distance do kvara. Iz tog razloga je važno korisnicima omogućiti interakciju sa analitikom, te da uz dodatnu inspekciju signala izvrše manuelnu potvrdu dobijenih rezultata.



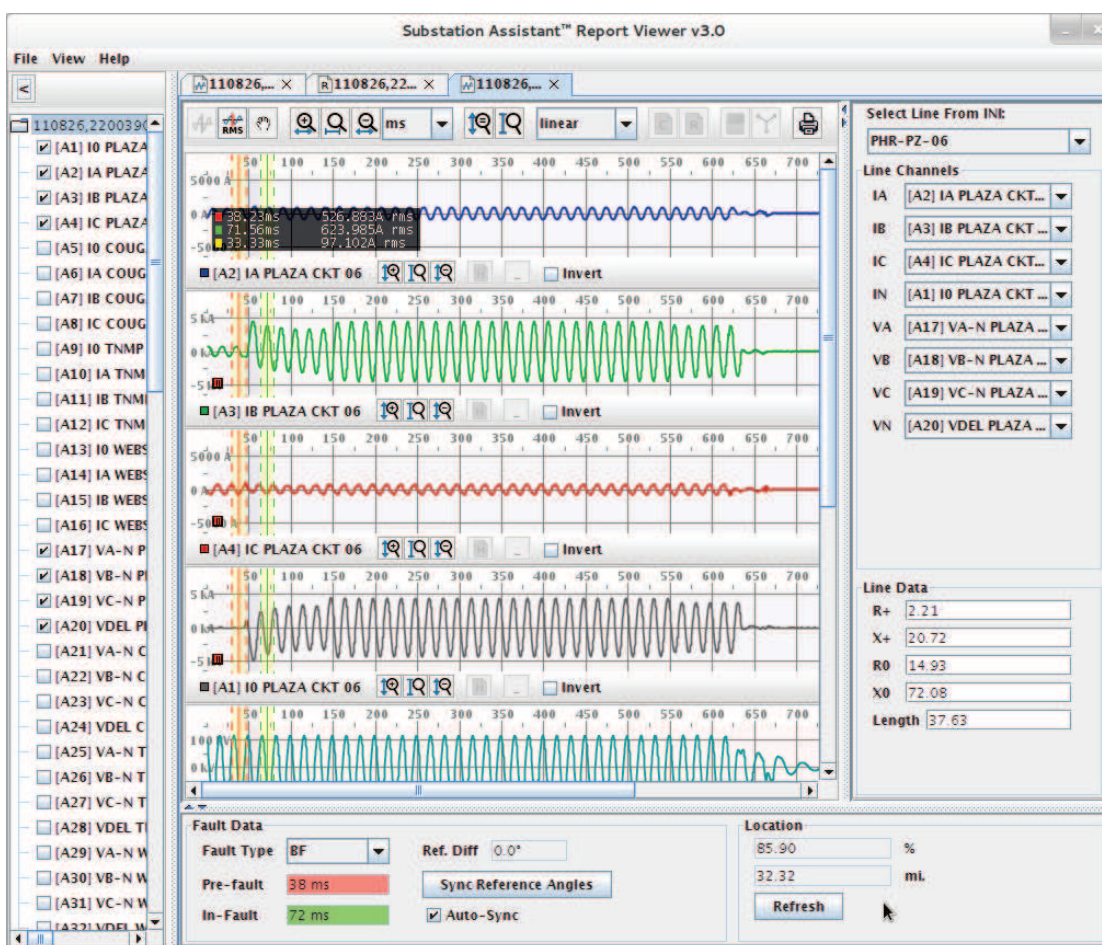
Primjer 8 – Analiza DFR zapisa uz interakciju korisnika

Ovaj primjer je interesantan zato što ilustruje događaj u kome dolazi do poremećaja na signalima (*disturbance*) koji traje prilično dugo. U pitanju je kvar koji je relativno daleko u odnosu na prenosni vod pod nadzorom i trebalo je oko 30-ak ciklusa dok nije došlo do operacije zaštite i otklanjanja kvara. Inspekcijom signala došlo se do zaključka da je bilo operacije zaštite i u drugim TS-ovima. Mogu se uočiti promjene u amplitudama strujnih signala oko 6. i 25. ciklusa. Pošto je u konkretnom slučaju automatska analitika podešena da računa fazore na bazi ciklusa u sredini vremenskog intervala kvara izračunata vrijednost za lokaciju kvara je bila netačna oko 39 km (24 milje). Pozicija kursora za izračunavanje se može vidjeti u slici 40.



Slika 40. Primjer interakcije sa korisnikom (DFR zapis)

U ovom primjeru se ilustruje upotrebljivost interakcije sa korisnikom. Pomjeranjem desnog kursora prema početku kvara (slika 41) može se izabrati koji će se fazori koristiti za kvantifikaciju napona i struja. Na ovaj način se u konkretnom slučaju došlo do izračunate lokacije od oko 51.5 km (32 milje), što je odgovaralo stvarnom mjestu kvara u sistemu. Naravno, pravilno pozicioniranje kursora zavisi od inženjerskog iskustva, ekspertize, poznavanja konkretnog sistema, kao i informacija koje se mogu dobiti sa drugih IED uređaja, SCADA sistema i sl.



Slika 41. Korekcija izračunate lokacije kvara uz interakciju s korisnikom

6 ZAKLJUČAK

U ovoj disertaciji je predloženo Smart Grid rješenje za implementaciju automatske analize kvara na prenosnim vodovima u elektroenergetskim sistemima. Analiza se zasniva na podacima prikupljenim iz IED uređaja u TS koji se mogu konfigurisati da rade kao digitalni snimači kvara. U disertaciji je dat opis modernih IED uređaja koji imaju funkcionalnost snimača kvara (DFR, DDR, DPR i drugi) i napravljena je analiza kako se ova mjerenja mogu automatski procesirati i analizirati.

Glavni zadatak ove disertacije je bio da se analiza kvara na prenosnim vodovima podigne na sistemski nivo te da se omogući efikasna upotreba podataka snimljenih u TS širom elektroenergetskog sistema. Cilj je bio da se upotrebom automatske analize IED podataka koji se smatraju neoperativnim dobijaju rezultati i informacije koje se mogu koristiti kao operativni podaci prilikom upravljanja elektroenergetskim sistemom, odnosno, da se tradicionalno neoperativni podaci sa postojećih uređaja pretvore u operativne čime se kvalitativno unapređuje upotreba IED uređaja i sam proces donošenja odluka.

U radu je specifikacija prikazane automatske analize kvara podignuta na sistemski nivo što omogućava da se rješenje koje radi za jedan prenosni vod u izabranoj TS može replicirati i primjeniti na mjerenja u svim TS-ovima. Koncept sistemskog rješenja i predložena arhitektura se uklapaju u definiciju Smart Grid tehnologije i ilustrovani su primjerom implementacije na bazi klijent-server paradigme i korišćenjem open source platforme. Implementirano rješenje omogućava automatsku integraciju i procesiranje podataka sa DFR i DPR uređaja. Posebna pažnja je poklonjena transparentnosti rješenja koja se odnosi na: a) integraciju

podataka koja je nezavisna od tipa, modela ili generacije IED uređaja; b) upravljanje konfiguracionim podacima koji uključuju kako parametre samih IED uređaja tako i parametre komponenti elektroenergetskog sistema pod nadzorom; c) integraciju i upravljanje analitičkim komponentama čime se omogućava istovremeni rad više analitičkih modula kao i dodavanje novih modula u budućnosti; i d) unificiran prikaz podataka i rezultata analize putem grafičkog interfejsa (GUI), email ili SMS poruka ili komunikacijom prema drugim sistemima kao što su GIS ili SCADA. Diskusija arhitekture referencira i sugerije upotrebu relevantnih standarda što omogućava poboljšanje interoperabilnosti sa drugim rješenjima i kasniju nadogradnju. Predloženo rješenje je otvoreno za dalja proširivanja kako po pitanju podrške dodatnih izvora podataka (mjernih uređaja) tako i u smislu dodavanja novih analitičkih funkcionalnosti.

Predloženo rješenje je prošlo kroz više faza testiranja. Inicijalna evaluacija je urađena korišćenjem raspoloživih istorijskih IED fajlova, prvenstveno prikupljenih sa DFR uređaja. Nakon inicijalnog testiranja, implementirano rješenje je detaljno testirano korišćenjem raznih scenarija koji uključuju testiranje korišćenjem podataka dobijenih simulacijom i podataka prikupljenih sa IED uređaja u pilot postrojenju. Procesiranje i analiza simuliranih kvarova korišćenjem programa za simulaciju elektromagnetnih tranzijenata je prošlo uspješno. Parametri simulacije su uključivali tip kvara (A-G, AB, ABC), različite lokacije kvara na prenosnom vodu, kao i različite otpornosti kvara. U svim simuliranim slučajevima implementirana analitika je ispravno identifikovala tip kvara, trenutke početka i kraja kvara, a izračunate distance do lokacije kvara su bile u očekivanom opsegu. Primjeri iz postrojenja su prikupljeni iz dvije visokonaponske TS na udaljenosti od oko 80 km i procesirane korišćenjem

pilot instalacije. Za vrijeme evaluacije procesirano je više stotina snimaka prikupljenih sa DFR i DPR uređaja. Najinteresantiji primjeri iz postrojenja su kvarovi za koje postoji više istovremenih zapisa sa raznih uređaja te je moguće napraviti uporednu analizu rezultata. Automatska integracija i analiza prikupljenih IED fajlova u pilot postrojenju je radila shodno očekivanjima i rezultati analize su bili na raspolaganju korisnicima samo nekoliko sekundi nakon prenosa podataka. Najinteresantiji primjeri su prikazani i diskutovani na kraju petog poglavlja.

Prednosti predloženog rješenja se ogledaju u sledećem: a) povećana produktivnost osoblja zbog drastične uštede u vremenu; b) bolje iskorišćenje kapitalnih investicija pošto se implementacija bazira na već postojećoj i ugrađenoj opremi; c) povećana pouzdanost i redundatnost prilikom upravljanja sistemom pošto su operaterima na raspolaganju dodatne informacije koje omogućavaju uporednu analizu; i d) poboljšana interoperabilnost i zadovoljavanje regulatornih obaveza pošto rješenje koristi standardizovane formate i unificirane alate koji se mogu prilagoditi kako internim tako i eksternim regulativama. Kombinovanjem predloženog rješenja sa efikasnom komunikacionom infrastrukturom prema uređajima u TS-ovima, postiže se pretvaranje tradicionalno neoperativnih IED podataka u operativne. Rezultati analize kvara, koji se inače dobijaju putem manuelne “off-line” analize, mogu se primjenom predloženog rješenja generisati automatski sa ciljem da podrže “on-line” proces donošenja odluka prilikom operativnog upravljanja elektroenergetskim sistemom.

Dalja istraživanja treba da uključe poboljšanje interoperabilnosti i podrže proces harmonizacije relevantnih standarda (na primjer, razmatranje upotrebe IEEE COMFEDE, IEC 61970 - CIM, IEC 61850 i dr.). Od interesa za dalje istraživanje mogu biti i napredni *open source* softverski alati za integraciju i upotreba *Enterprise*

Integration Patterns, kao i upotreba alati za upravljanje dokumentima (*Document Management Systems, DMS*). Primjer OSS alata za integraciju su Apache Camel, ServiceMix, i ActiveMQ [Eip03], a za upravljanje dokumentima rješenja tipa *Alfresco* i *Nuxeo* [Alfr13, Nux13]. Dalje, predloženo rješenje se, osim povezivanja sa SCADA i GIS sistemima, može integrisati sa rješenjima za praćenje udara groma, vremenske prognoze i drugih, u cilju obrade podataka na višem nivou i kreiranju podrške takozvanim *big data* sistemima [Furg12]. Iz ugla primenjenih informacionih tehnologija interesantan problem za buduća razmatranja može biti i kako se predložena arhitektura i koncept rješenja mogu adaptirati i modifikovati za primjene i implementaciju na takozvanim „oblak“ (*cloud*) platformama.

Vrlo interesantan pravac za nastavak istraživanja je i primjena koncepta automatske detekcije i analize kvara na mjerenja prikupljena putem PMU mjerenja (IEEE Standard C37.118.1 i C37.118.2). Za razliku od digitalnih snimača kvara, PMU uređaji izračunavaju fazore za izmjerene naponske i strujne signale, te u vidu kontinualnog protoka podataka (*data stream*) prenose informacije o mjerenjima putem komunikacione mreže. Ovi kontinualni tokovi podataka se organizuju putem koncentratora (*Phasor Data Concentrator, PDC*) i arhiviraju u procesne baze podataka (*PI historian*). Prednost PMU podataka je to što se dobijaju gotovi izračunati fazori, a tehnički izazov predstavlja činjenica da se radi o kontinualnom prikupljanju mjerenja (30, 60, ili čak 120 puta u sekundi). Automatska analitika podataka o kvaru na bazi PMU mjerenja bi teorijski mogla da se implementira korišćenjem arhiviranih podataka u *PI historian* bazi ili direktnim interfejsom prema protoku podataka, odnosno “osluškivanjem” PMU *data stream*-a putem komunikacione mreže.

7 NOMENKLATURA

Simboli:

A, B, C, G	A, B, C, i zemlja; oznaka faza u 3-faznom električnom sistemu
$i(t)$	trenutna vrijednost struje u vremenskom domenu
I, I_S, I_R	strujni fazori na prenosnom vodu (kompleksne vrijednosti)
U, U_S, U_R	naponski fazori na prenosnom vodu (kompleksne vrijednosti)
Z	impedanca prenosnog voda (kompleksna vrijednost)
N	broj odbiraka po ciklusu
f_S	frekvencija odabiranja
f_0	sistemska frekvencija (50 ili 60 Hz)
I_{dist}	matrica strujnih promjena (amplituda po ciklusu po kanalu)
U_F, U_S, U_R	vektori 3-faznog napona na mjestu kvara, izvornog noda S i prijemnog noda R
I_S, I_R	vektori 3-faznih struja na mjestu kvara, izvornog noda S i prijemnog noda R
Z	matrica impedanci za prenosni vod

Skraćenice:

AI	Artificial Intelligence
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
AC	Alternate Current
ATP	Alternative Transient Program
CBR	Circuit Breaker Recorder
CIM	Common Interface model
COMFEDE	Common Format for Event Data Exchange
COMNAME	Common Format for Naming Time Sequence Data Files
COMTRADE	Common Format for Transient Data Exchange
CT	Current Transformer
VT	Voltage Transformer
DDR	Digital Disturbance Recorder
DFR	Digital Fault Recorder
DMS	Document Managemet System
DPR	Digital Protective Relay
ES	Expert System
FERC	Federal Energy Regulatory Commission
GIS	Geographic Information System
GPS	Global Positioning System
GUI	Graphical User Interface
HTML	Hyper Text Markup Language
ICT	Information and Communication Technology
IS	Intelligent System
IEC	International Electrotechnical Commission
IED	Intelligent Electronic Device
IEEE	The Institute of Electrical and Electronics Engineers
JDK	Java Development Kit
JRE	Java Run-time Environment
MLS	Minimum Least Squares
NERC	North-Americam Electric Reliability Corporation
OSS	Open Source Software
PDF	Portable Document Format
PI	Process Industry (PI historian)
PDC	Phasor Data Concentrator
PMU	Phasor Measurement Unit
PQM	Power Quality Meter
PUC	Public Utility Commission
RC	Reliability Coordinator
RTU	Remote Terminal Unit
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SCL	Substation Configuration Language
SER	Sequence of Events Recorder
SMS	Short Message Service
SQL	Structured Query Language
TS	Transformatorska Stanica
XML	eXtensible Markup Language

8 LITERATURA

- [Alfr13] Alfresco Document Management [Online] <http://www.alfresco.com>
Zadnji pristup 15.12.2013.
- [Ama13] Amazon Elastic Compute Cloud (Amazon EC2) [Online]
<http://aws.amazon.com/ec2/>
Zadnji pristup 15.12.2013.
- [Ame13] Ametek Power Instruments [Online] <http://www.ametekpower.com>
Zadnji pristup 15.12.2013.
- [Asc13] RFC 20: ASCII format for Network Interchange, ANSI X3.401968, Oct 1969.
- [Apht13] Apache HTTP Server [Online] <http://httpd.apache.org>
Zadnji pristup 15.12.2013.
- [Aptm13] Apache Tomcat [Online] <http://tomcat.apache.org>
Zadnji pristup 15.12.2013.
- [Atp13] Alternative Transient Program. [Online] <http://www.emtp.org>.
Zadnji pristup 15.12.2013.
- [Bra03] K.P. Brand, V. Lohmann, W. Wimmer, "Substation automation handbook (pp. 97–101). Bremgarten: Utility Automation Consulting Lohmann, 2003.
- [Blo08] J. Bloch, "Effective Java", 2nd edn, Addison-Wesley, 2008
- [Clips13] CLIPS [Online] <http://clipsrules.sourceforge.net>
Zadnji pristup 15.12.2013.
- [Cos00] D. Costello, "Understanding and analyzing event report information", Schweitzer Engineering Laboratories Inc., Pullman. [Online]
<http://www.selinc.com>.
Zadnji pristup 15.12.2013.
- [Dav06] E.M. Davidson, S.D.J. McArthur, J.R. McDonald, T. Cumming, I. Watt, "Applying Multi-Agent System Technology in Practice: Automated Management and Analysis of SCADA and Digital Fault Recorder Data", IEEE Trans. Power. Syst., vol. 21, no. 2, 2006; pp 559-567
- [DeA12] L. De Andrade, T. Ponce de Leão, "Impedance-Based Fault Location Analysis for Transmission Lines", 2012 IEEE PES Transmission and Distribution Conf. (T&D), 2012, pp 1-6
- [Doe03] U.S. Department of Energy. Grid 2030: A national vision for electricity's second 100 years. Office of Elect. Transm. Distrib., U.S. Dept. Energy, Washington, DC, 2003
- [Eip03] G. Hohpe, B. Woolw, „Enterprise Integration Patterns: Designing, Building, and Deploying Messaging Solutions“, Addison-Wesley Pro., 1st edn, 2003.

- [Ema13] E-Max Instruments [Online] <http://www.e-maxinstruments.com>
Zadnji pristup 15.12.2013.
- [Enns94] M. Enns at al., "Potential Applications of Expert Systems to Power System Protection", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 9, no. 2, 1994.
- [Ferc13] Federal Energy Regulatory Commission [Online] <http://www.ferc.gov>
Zadnji pristup 15.12.2013.
- [Furg12] M. Furguson, "Architecting A Big Data Platform for Analytics", Intelligent Business Strategies, IBM white paper, Oct 2012
- [Fust90] S. Fustar, M. Kezunovic, "Primjena ekspertnih sistema u elektroenergetici", Elektroprivreda, no. 1-2, 1990.
- [Gam94] E. Gamma, R. Helm, R. Johnson, J. Vissides, "Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software", Addison-Wesley Professional, 1st edn., 1994.
- [Ge13] GE Digital Protective Relays [Online] <http://www.gedigitalenergy.com>
Zadnji pristup 15.12.2013.
- [Gir89] A.A. Girgis, M.B. Johns, "A hybrid expert system for faulted section identification, fault type classification and selection of fault location algorithms", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 4. no. 2, 1989; pp 978-985
- [Goog13] Google Maps API [Online] <https://developers.google.com/maps/>
Zadnji pristup 15.12.2013.
- [Html13] HTML and CSS specification [Online] <http://www.w3.org>
Zadnji pristup 15.12.2013.
- [Icle12] International Council on Large Electric Systems, "New Trends for Automated Fault and Disturbance Analysis", CIGRE WG B5.20 Report, 2012
- [Iec01] International Electrotechnical Commission. Common format for transient data exchange (COMTRADE) for power systems, 1st Edn. 2001-05, IEC Std. 60255-24, 2001
- [Ieee99] Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE Standard Common Format for Transient Data Exchange, IEEE Std. C37.111-1999, 1999
- [Ieee05] Institute of Electrical and Electronics Engineers, "IEEE Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines", IEEE Std. C37.114-2004, 2005
- [Ieee08] Institute of Electrical and Electronics Engineers, "IEEE Standard Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations", IEEE Std. C37.2-2008, 2008
- [Ieee10] Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE Standard for Common Format for Event Data Exchange (COMFEDE) for Power Systems, IEEE Std. C37.239-2010, 2010

- [Ieee11] Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE Standard for Common Format for Naming Time Sequence Data Files (COMNAME), IEEE Std. C37.232-2011, 2011
- [Iec01] International Electrotechnical Commission. Common format for transient data exchange (COMTRADE) for power systems, 1st Edn. 2001-05, IEC Std. 60255-24, 2001
- [Iec02] International Electrotechnical Commission. Common Interface Model (CIM), IEC Std. 61970-301, 2002.
- [Iec13] International Electrotechnical Commission. Communication Networks and Systems in Substations, IEC Std. 61850, work in progress [Online] <http://www.iec.ch>. Zadnji pristup 15.12.2013.
- [Izo07] J. Izylowski, E. Rosolowski, M.M. Saha, "Postfault analysis of operation of distance protective relays of power transmission lines", IEEE Transactions On Power Delivery, vol. 22, no. 1, 2007; pp 74–81
- [Java13] Oracle Java platform [Online] <http://java.com> Zadnji pristup 15.12.2013.
- [Kez94] M. Kezunovic, I. Rikalo, C.W. Fromen, D.R. Sevcik, "Expert System Reasoning Streamlines Disturbance Analysis", IEEE Comput. Appl. Power, vol. 7, no. 2, 1994; pp 15-19
- [Kez99] M. Kezunovic, B. Perunicic, "Fault Location", in Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, Wiley-Interscience Publications, John Wiley and Sons, Inc., vol. 7, 1999, pp 276-285
- [Kez00] M. Kezunovic, C.C. Liu, J. McDonald, L.E. Smith, "Automated Fault Analysis", IEEE PES Tutorial, 2000
- [Kez02] M. Kezunovic, T. Popovic, "Assessing Application Features of Protective Relays and Systems Through Automated Testing Using Transients", IEEE/PES T&D 2002 Asia Pacific Conference, Yokohama, Japan, October 2002.
- [Kez03] M. Kezunovic, T. Popovic, D.R. Sevcik, A. Chitambar, "Requirements for Automated Fault and Disturbance Data Analysis", CIGRE Colloquium, SC B5-Protection, Sydney, Australia, September 2003.
- [Kez05] M. Kezunovic, Z. Ren, G. Latisko, D.R. Sevcik, J.S. Lucey, W.E. Cook, E.A. Koch, "Automated monitoring and analysis of circuit breaker operation. IEEE Trans. Power Del., vol. 20, no. 3, 2005; pp 1910-1918
- [Kez07] M. Kezunovic, T. Popovic, "Substation Data Integration for Automated Data Analysis Systems. IEEE PES General Meeting., Tampa, Florida, 2007
- [Kez11] M. Kezunovic, "Smart Fault Location for Smart Grids", IEEE Trans. Smart Grid, vol. 2, no. 1, 2011, pp 11-22
- [Lew99] W. Lewandowski, J. Azoubib, W.J. Klepczynski, "GPS: primary tool for time transfer", Proceedings of the IEEE, 87(1), 163–172, 1999.

- [Luo05] X. Luo M. Kezunovic, "An expert system for diagnosis of digital relay operation", Proc. 13th Intl. Conf. on Intell. Syst. Appl. Power Syst., Washington, DC, 2005
- [Mar09] D. Maragal, B. Fardanesh, "Automated fault data collection, analysis, and reporting", IEEE PES'09 General Meeting, 2009
- [Mca96] S.D.J. McArthur, A. Dysko, J.R. McDonald, S.C. Bell, R. Mather, S.M. Burt, "The Application of Model Based Reasoning Within Decision Support System for Protection Engineers", IEEE. Trans. Power Del., vol. 11, no. 4, 1996
- [Mcd03] J.D. McDonald, "Substation automation, IED integration and availability of information", IEEE Power and Energy, vol. 1, no. 2, 2003; pp 22–31
- [Mcg08] M. McGranham, V. Dollen, P. Myrda, E. Gunther, "Utility experience with developing a smart grid roadmap". IEEE PES'08 General Meeting, 2008
- [Mor08] J. Mora-Florez, J. Melendez, G. Carrillo-Caicedo, "Comparison of impedance based fault location fault location methods for power distribution systems", Elec. Power Syst. Res., vol. 78, 2008, pp 657-666
- [Moz13] Mozilla Firefox [Online] <http://www.mozilla.org>
Zadnji pristup 15.12.2013.
- [Nerc06] North American Electric Reliability Corp., "Protection and Control", PRC-002-1 and PRC-018-1. NERC Standard, 22–44, 2006.
- [Nerc08] North American Electric Reliability Corp., "Cyber Security CIP-002 through CIP-009", NERC Standard., 2008.
- [Nerc13] North American Electric Reliability Corp. [online] <http://www.nerc.com>
Zadnji pristup 15.12.2013.
- [Nspctf08] NERC System Protection and Control Task Force, "Protection System Reliability - Redundancy of Protection System Elements, A Technical Paper, Nov 2008
- [Nux13] Nuxeo Open Source ECM [Online]
<http://www.athento.com/en/nuxeo-enterprise-platform/>
Zadnji pristup 15.12.2013.
- [Qua13] Hathaway (Qualitrol) [Online] <http://www.qualitrolcorp.com>
Zadnji pristup 15.12.2013.
- [Pop09] T. Popovic, M. Kuhn, "Automated Fault Analysis: From Requirements to Implementation", IEEE PES General Meeting PES'09, 2009.
- [Pop12] T. Popovic, M. Kezunovic, "Measures of value: data analytics for automated fault analysis", IEEE Power and Energy Mag., vol. 10, no. 5, 2012; 58-69
- [Pop13] T. Popovic, M. Kezunovic, B. Krstajic, "Smart grid data analytics for digital protective relay event recordings", Information Systems Frontiers, Springer, published online, June 2013.

- [Post13] PostgreSQL [Online] <http://www.postgresql.org>
Zadnji pristup 15.12.2013.
- [Ren11] J. Ren, M. Kezunovic, "Real-Time Power System Frequency and Phasors Estimation Using Recursive Wavelet Transform", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 26, no. 3, 2011; pp 1392-1402
- [Sal09] R.H. Salim, M. Resener, A.D. Filomena, K.R.C. De Oliveira, A.S. Bretas, "Extended Fault-Location Formulation for Power Distribution Systems", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 24, no. 2, 2009, pp 508-516
- [Schal09] R. J. Schalkoff, "Intelligent Systems: Principles, Paradigms and Pragmatics", 1st edn., Jones & Bartlett Publishers, 2009.
- [Sel13] SEL Digital Protective Relays [Online] <http://www.sel-inc.com>
Zadnji pristup 15.12.2013.
- [Sev00] D.R. Sevcik, R.B. Lunsford, M. Kezunovic, Z. Galijasevic, S. Banu, T. Popovic, "Automated analysis of fault records and dissemination of event reports", Georgia Tech Fault and Disturbance Analysis Conference, Atlanta, Georgia, 2000.
- [Sid05] T.S. Sidhu, X. Zhang V. Balamourougan, "A New Half-Cycle Phasor Estimation Algorithm". IEEE Trans. Power Delivery, vol. 20, no. 2, 2005; pp 1299-1305
- [Sil06] K.M. Silva, B.A. Souza, N.S.D. Brito, "Fault Detection and Classification in Transmission Lines Based on Wavelet Transform and ANN", IEEE Trans. Power Del., vol. 21, no. 4, 2006
- [Sma08] J.F. Smart, "Java Power Tools", O'Reilly Media, 1st edn, April 2008.
- [Sql11] Information technology - Database languages - SQL, ISO/IEC Std. 9075:2011 [Online] <http://www.iso.org>
Zadnji pristup 15.12.2013
- [Sptc08] System Protection and Control Task Force, "Protection System Reliability - Redundancy of Protection System Elements".North American Electric Reliability Corporation, 2008.
- [Sun92] Y. Sun, C.C. Liu, "RETEX (RElay, Testing, EXpert): an expert system for analysis of relay testing data", IEEE Transactions on Power Delivery, vol 7. no. 2, 1992; pp 986-994
- [Tak82] T. Takagi, Y. Yamakoshi, M. Yamaura, R. Kondow, T. Matsushima, "Development of a new fault locator using the one-terminal voltage and current data", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-101, no. 8, 1982, pp 2892-2898
- [Ubu13] Ubuntu Linux [Online] <http://www.ubuntu.com>
Zadnji pristup 15.12.2013.
- [Upe08] J. Upendar, C.P. Gupta, G.K. Singh, "ANN based power system fault classification. IEEE Region-10, Intl. Tech. Conf. (TENCON-2008), Hyderabad, India, 2008
- [Usca04] U.S.-Canada Power System Outage Task Force, "Final Report on the

- August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations”, [Online]
<https://reports.energy.gov/BlackoutFinal-Web.pdf>,
 Zadnji pristup 15.12.2013.
- [Vbox13] Oracle VirtualBox [Online] <http://www.virtualbox.org>
 Zadnji pristup 15.12.2013.
- [Vm13] VMware Virtualization Software [Online] <http://www.vmware.com>
 Zadnji pristup 15.12.2013.
- [Wg94] Working Group D10 of the Line Protection Subcommittee – Power System Relaying Committee, “Potential applications of expert systems to power system protection”, IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 9, no. 2, 1994; pp 720–728
- [Xml13] Extensible Markup Language (XML), [Online] www.w3.org/TR/xml/
 Zadnji pristup 15.12.2013.

IZJAVA O AUTORSTVU

Potpisani/a Tomo Popović

Broj upisa 6/11

IZJAVLJUJEM

da je doktorska disertacija pod naslovom:

SMART GRID RJEŠENJE ZA AUTOMATSKU ANALIZU KVAROVA
ELEKTROENERGETSKOG SISTEMA

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predložena disertacija ni u cjelini, ni u djelovima nije bila predložena za sticanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova i
- da nijesam kršio/la autorska prava i koristio/la intelektualnu svojinu drugih lica.

Potpis doktoranda



U

Podjenu

19.06.2019.

**IZJAVA O ISTOVJETNOSTI ŠTAMPANE I ELEKTRONSKE
VERZIJE DOKTORSKE DISERTACIJE**

Ime i prezime autora **Tomo Popović**
Broj upisa **6/11**
Studijski program **Elektrotehnika**

Naslov disertacije

**SMART GRID RJEŠENJE ZA AUTOMATSKU ANALIZU KVAROVA
ELEKTROENERGETSKOG SISTEMA**

Mentor **Prof. Božo Krstajić**

Potpisani/a **Tomo Popović**

Izjavljujem da je štampana verzija doktorske disertacije istovjetna elektronskoj verziji, koju sam predao/la radi pohranjivanja u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore.

Istovremeno izjavljujem da dozvoljavam objavljivanje ličnih podataka u vezi sa sticanjem akademskog zvanja doktora nauka (ime i prezime, godina i mjesto rođenja, naslov disertacije i datum odbrane) na mrežnim stranicama i u publikacijama Univerziteta Crne Gore.

Potpis doktoranda



U

Popović

19.06.2014.

IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku da u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore unese doktorsku disertaciju pod naslovom

SMART GRID RJEŠENJE ZA AUTOMATSKU ANALIZU KVAROVA
ELEKTROENERGETSKOG SISTEMA

koja je moj autorski rad.

Doktorska disertacija, pohranjena u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore, može se koristiti pod uslovima definisanim licencom Kreativne zajednice (Creative Commons), za koju sam se odlučio/la¹.

- ☐ Autorstvo
- ☐ Autorstvo – bez prerada
- ☐ Autorstvo – dijeliti pod istim uslovima
- ☐ Autorstvo – nekomercijalno
- ☒ Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada
- ☐ Autorstvo – nekomercijalno – dijeliti pod istim uslovima

Potpis doktoranda



U Podgorici
19.06.2014.

¹ Odabrati (čekirati) jednu od šest ponuđenih licenci (kratak opis licenci dat je na poledini ovog priloga)