
**UNIVERZITET U NIŠU
ELEKTRONSKI FAKULTET**

Milan M. Simić

**SISTEM ZA TESTIRANJE UREĐAJA ZA MERENJE
KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE BAZIRAN NA
PRIMENI VIRTUELNE INSTRUMENTACIJE**

- Doktorska disertacija -

Niš, 2013.

*

*

*

Ova doktorska disertacija urađena je pod mentorstvom prof. dr Dragana Denića, redovnog profesora na Katedri za merenja Elektronskog fakulteta u Nišu, kome se srdačno zahvaljujem, kao i svim ostalim kolegama sa Katedre za merenja, na podršci pruženoj prilikom izrade ove doktorske disertacije.

Autor

SADRŽAJ

1. UVOD	3
2. OSNOVNI MERNI PARAMETRI I POREMEĆAJI KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE	8
2.1. Definicije osnovnih parametara kvaliteta električne energije	9
2.1.1. Vrednost mrežne frekvencije	10
2.1.2. Efektivna vrednost mrežnog napona (RMS)	11
2.1.3. Spore promene napona napajanja	11
2.1.4. Naponsko treperenje (fliker).....	13
2.1.5. Propadi (padovi) napona napajanja	14
2.1.6. Prekidi napona napajanja	15
2.1.7. Previsoki naponi (prenaponi).....	17
2.1.8. Naponsko-fazna nesimetrija	18
2.1.9. Više harmonijske komponente signala	19
2.1.10. Upravljački signalizacioni naponi	22
3. STANDARDI KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE	24
3.1. Evropski standard kvaliteta električne energije EN 50160	25
3.1.1. Osnovne karakteristike standarda EN 50160.....	26
3.2. Standard Međunarodne elektrotehničke komisije IEC 61000	29
3.3. IEEE standardi kvaliteta električne energije	33
3.3.1. Američki standard kvaliteta IEEE 519-1992	34
3.4. Uporedne karakteristike standarda kvaliteta	34
4. UREĐAJI ZA MERENJE KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE	36
4.1. Pristup problematici merenja kvaliteta električne energije.....	37
4.2. Uređaji za merenje parametara kvaliteta električne energije	39
4.3. Uporedne karakteristike savremenih uređaja za merenje kvaliteta	41
4.4. Merenje parametara kvaliteta na transformatoru 10/0.4kV	46
4.4.1. Merenje mrežne frekvencije	47
4.4.2. Merenje parametara mrežnog napona	47
4.4.3. Merenje efektivnih vrednosti struje	50
4.4.4. Merenje ukupnog harmonijskog izobličenja	50

4.4.5. Merenje srednjih vrednosti snage	51
4.4.6. Merenje utrošene energije	53
4.4.7. Merenje faktora snage	54
4.4.8. Merenje viših harmonika napona i struja	54
5. TESTIRANJE UREĐAJA ZA MERENJE KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE.....	56
5.1. Funkcionalne karakteristike kalibratora Fluke 5520A.....	59
5.1.1. Composite harmonic mode	60
5.1.2. Flicker simulation mode.....	61
5.1.3. Sags and swells simulation mode	62
5.1.4. IEC and NRC waves simulation mode	62
5.2. Funkcionalne karakteristike kalibratora Fluke 6100B.....	66
6. REALIZACIJA SISTEMA ZA TESTIRANJE UREĐAJA ZA MERENJE KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE.....	68
6.1. Softver virtuelne instrumentacije.....	69
6.1.1. Primena LabVIEW softvera za merenje kvaliteta električne energije	71
6.2. Osnovne funkcionalne komponente sistema za testiranje.....	75
6.3. Generator standardnih poremećaja kvaliteta električne energije	76
6.3.1. Generisanje porasta napona	81
6.3.2. Generisanje pada napona	81
6.3.3. Generisanje viših harmonika signala	82
6.3.4. Generisanje porasta napona sa višim harmonicima	84
6.3.5. Generisanje pada napona sa višim harmonicima	85
6.3.6. Generisanje naponskih prekida i tranzijenata	86
6.3.7. Serijska kombinacija različitih tipova poremećaja	87
6.4. Snimanje realnih poremećaja kvaliteta električne energije.....	88
6.4.1. Kalibracija senzorskog bloka za kondicioniranje signala	91
6.4.2. Instalacija opreme za snimanje signala u trafostanici TS 10/0.4kV	93
6.4.3. LabVIEW softverska podrška procesa snimanja signala.....	95
6.4.4. Primeri signala snimljenih sa realnim poremećajima kvaliteta	97
6.5. Testiranje virtuelnog instrumenta za detekciju poremećaja kvaliteta	104
6.5.1. LabVIEW prezentacija i analiza rezultata testiranja.....	106
7. ZAKLJUČAK.....	121
8. LITERATURA.....	125

1. UVOD

Osnovni tehnički preduslovi za normalno funkcionisanje distributivne mreže i nesmetano snabdevanje potrošača električnom energijom mogu biti ispunjeni samo uz objektivni monitoring procesa distribucije i potrošnje električne energije, primenom savremenih uređaja i opreme za merenje osnovnih parametara kvaliteta električne energije. Narušavanje kvaliteta električne energije isporučene krajnjim potrošačima posredstvom javne elektrodistributivne mreže direktno doprinosi smanjenju ukupne efikasnosti pri proizvodnji, distribuciji i potrošnji električne energije, što je praćeno i neracionalnim iskorišćavanjem prirodnih energetske resursa čiji se izvorni kapacitetu evidentno sve više iscrpljuju. Kvalitet isporučene električne energije definisan je intervalnim vrednostima osnovnih električnih parametara distributivnih signala na mestima isporuke električne energije, pri kojima oprema potrošača funkcioniše bez značajnih gubitaka u performansama ili u očekivanom radnom veku. U uslovima ekspanzije različitih kategorija potrošača i ubrzanog porasta potrošnje električne energije u svetu, sve distributerske kompanije imaju potrebu i obavezu da konstantno vrše monitoring procesa distribucije i potrošnje električne energije, kako bi u svakom trenutku posedovali detaljne i validne podatke o kvalitetu svojih elektrodistributivnih mreža. Sve izraženija primena uređaja iz oblasti energetske elektronike i snažnih komutacionih komponenata značajno degradira kvalitet isporučene električne energije, što negativno utiče kako na troškove proizvodnje i distribucije električne energije, tako i na pouzdanost i sigurnost u radu električnih uređaja krajnjih korisnika električne energije [1-4].

U okviru ove doktorske disertacije obrađeni su svi važniji aspekti vezani za problematiku obezbeđenja optimalnog nivoa kvaliteta isporuke električne energije. Ovo uključuje pregled i analizu osnovnih mernih parametara i najčešćih poremećaja kvaliteta električne energije, pregled važeće normativne i zakonske regulative u ovoj oblasti, kao i pregled savremenih instrumenata koji se koriste za merenje standardizovanih parametara kvaliteta, sa detaljnom analizom njihovih osnovnih uporednih karakteristika i sistematizacijom metoda i tehnika merenja parametara kvaliteta električne energije. Pored toga, u ovoj disertaciji opisane su i neke od aktuelnih metoda koje se primenjuju za testiranje instrumenata za merenje parametara kvaliteta električne energije. Poseban akcenat stavljen je na detaljan prikaz i analizu mogućnosti primene softvera virtuelne instrumentacije kako u procesu merenja, tako i testiranja instrumenata za merenje kvaliteta električne energije. U skladu sa tim predstavljeno je i rešenje akvizicionog sistema realizovanog za testiranje savremenih uređaja za merenje osnovnih parametara kvaliteta električne energije.

Funkcionalna osnova predstavljenog rešenja sistema za testiranje bazira se na primeni grafičkog programskog paketa za razvoj virtuelne merne instrumentacije LabVIEW [5,6].

Da bi se što jasnije shvatio značaj merenja kvaliteta električne energije pre svega treba definisati osnovne parametre i pokazatelje kojima je on određen, kao i pojedine posledice koje neodgovarajući nivo kvaliteta može prouzrokovati. U drugom poglavlju doktorske disertacije su detaljno obrađeni i analizirani osnovni merni parametri i poremećaji kvaliteta električne energije. Generalno, kada se govori o kvalitetu električne energije razlikuju se dva relativno srodna aspekta. Prvi je obezbeđenje adekvatnih uslova za proizvodnju i distribuciju kvalitetne električne energije, dok drugi podrazumeva kontrolu kvalitativnih parametara električne energije isporučene krajnjim potrošačima. Kvalitet isporuke definiše neprekidnost u napajanju potrošača električnom energijom, odnosno pouzdanost pri funkcionisanju samog elektrodistributivnog sistema. Sa druge strane, kvalitet isporučene električne energije određen je trenutnim vrednostima standardizovanih parametara mrežnog napona na mestima isporuke krajnjim potrošačima. Definisanje, merenje i analiza relevantnih parametara kvaliteta električne energije predstavljaju imperativ u cilju obezbeđenja optimalnog nivoa ukupne efikasnosti tokom procesa proizvodnje, distribucije i potrošnje električne energije. Ukupan nivo kvaliteta isporučene električne energije definisan je stepenom odstupanja trenutnih vrednosti osnovnih parametara kvaliteta u odnosu na standardima propisane njihove referentne vrednosti. Ove nominalne vrednosti osnovnih tehničkih parametara i pokazatelja kvaliteta električne energije određene su na osnovu višegodišnjih iskustava i analiza funkcionisanja elektrodistributivnih sistema u svetu, kao rezultat dogovora i kompromisa između relevantnih organizacija koje se na širem međunarodnom planu bave problemima standardizacije u ovoj oblasti. Prihvatljive granične vrednosti, odnosno dozvoljene tolerancije ovih parametara kvaliteta, tako su odabrane da njihove promene u okviru specificiranih graničnih vrednosti ne mogu negativno uticati na rad uređaja i opreme potrošača, budući da se projektuju sa određenim pragom dozvoljene tolerancije na vrednost mrežnog napona napajanja [7-15].

U cilju zaštite interesa potrošača, kvalitet isporučene električne energije je i normativno definisan odgovarajućim nacionalnim i međunarodnim standardima kvaliteta električne energije. Jedan od elementarnih problema u domaćem elektroenergetskom sektoru jeste neusklađenost između mogućnosti za proizvodnju i realnih potreba u potrošnji električne energije. Ovaj vid problema posebno dolazi do izražaja u toku zimskih perioda, kada su potrebe za zagrevanjem stambenog i poslovnog prostora vrlo često iznad proizvodnih kapaciteta domaće elektroprivrede. Neprekidni porast potrošnje električne energije, uz nedostatak alternativnih izvora za grejanje, kao i nepostojanje definisane energetske politike, usloveli su dugogodišnji rad elektroenergetskog sistema Srbije na granici tehničkih mogućnosti. Smanjenje proizvodnih kapaciteta i strukture elektrodistributivnog sistema dovodi do sve učestalijih višestrukih poremećaja, što rezultira deficitom, koji se pokriva uvozom električne energije, sa značajnim povećanjem distributivnih puteva. Povećanje nivoa efikasnosti proizvodnje, distribucije i potrošnje električne energije u

elektroenergetskom sistemu Srbije zahteva modernizaciju postojećih mernih uređaja i opreme za monitoring i analizu propisanih parametara kvaliteta, kao i harmonizaciju nacionalnih regulativa sa međunarodno važećim normama i standardima kvaliteta električne energije. U uslovima dosta ograničenih mogućnosti u pogledu novih investicionih ulaganja potrebno je obezbediti sve uslove za povezivanje nacionalne elektroprivrede na regionalnom i na širem međunarodnom planu, kao i za uvođenje trenutno važećih evropskih standarda kvaliteta električne energije, kakav je evropski standard kvaliteta EN 50160 [7-9]. U skladu sa tim, poseban značaj u ovoj disertaciji dat je klasifikaciji i analizi osnovnih zahteva propisanih trenutno važećim evropskim standardom za kvalitet električne energije EN 50160. Ovim standardom se propisuju prihvatljive granične vrednosti i kontrolna vremena merenja osnovnih parametara mrežnog napona na mestima predaje električne energije potrošačima u niskonaponskim NN i srednjenaponskim SN elektrodistributivnim mrežama, pri normalnim radnim uslovima. Pod ovim normalnim radnim uslovima podrazumevaju se uslovi pri kojima je obezbeđeno normalno snabdevanje potrošača električnom energijom, pri čemu ne postoje negativni spoljašnji uticaji na kvalitet prenosa električne energije, a eventualne smetnje se mogu otkloniti primenom postojećih automatskih zaštitnih sklopova. Pored toga, u trećem poglavlju ove doktorske disertacije obavljen je i pregled najvažnijih uporednih karakteristika trenutno važećih standarda za kvalitet električne energije predloženih od prestižnih međunarodnih organizacija i institucija CENELEC (EN 50160), IEC (IEC 61000) i IEEE (IEEE 519-1992) [7-15].

Sa stanovišta prava i obaveza definisanih na bazi ugovora između distributera i potrošača električne energije, validni dokazi koji potvrđuju ispunjenost tehničkih preduslova za nesmetano funkcionisanje elektrodistributivne mreže mogu biti obezbeđeni jedino objektivnim kontinualnim nadzorom, primenom savremenih uređaja i opreme za merenje osnovnih parametara kvaliteta električne energije [16-23]. U četvrtom poglavlju ove doktorske disertacije detaljno je obrađena problematika merenja karakterističnih parametara kvaliteta električne energije, uključujući i analizu najvažnijih mogućnosti savremenih uređaja za merenje kvaliteta električne energije i prateće akvizicione opreme. Danas je na tržištu prisutan veliki broj različitih tipova uređaja za merenje kvaliteta električne energije, kakvi su uređaji tipa LEM, Fluke 433/434 ili Chauvin Arnoux CA 8332/8334, koji su bazirani na sofisticiranim rešenjima za merenje i analizu rezultata merenja kvaliteta električne energije. Većina ovih uređaja programirana je za funkcionisanje u skladu sa standardima kvaliteta, najčešće EN 50160, pa se izveštaj o kvalitetu mrežnog napajanja na posmatranoj lokaciji uz odgovarajuću programsku podršku dobija automatski. Direktna komunikacija uređaja sa računarom najčešće se obezbeđuje putem optičkog komunikacionog interfejsa. Grafički kolor displeji uređaja prikazuju rezultate merenja u realnom vremenu, dok memorijski kapaciteti ovih instrumenata omogućavaju hronološko snimanje izmerenih vrednosti parametara za potrebe naknadne softverske obrade i analize [24-27]. U ovoj disertaciji prikazane su najvažnije funkcionalne karakteristike i dat je opširniji uporedni pregled nekoliko različitih tipova savremenih uređaja za merenje kvaliteta električne energije vodećih svetskih proizvođača.

Kao konkretan primer realnih rezultata merenja karakterističnih parametara kvaliteta isporučene električne energije prikazani su i neki od eksperimentalnih rezultata merenja potrošnje električne energije, dobijeni na distributivnom transformatoru 10/0,4kV [28].

Pouzdanе i validne merne informacije o realnim vrednostima kontrolisanih parametara kvaliteta električne energije mogu biti obezbeđene samo kontinualnim monitoringom prenosa i potrošnje električne energije, primenom odgovarajućih mernih uređaja i opreme koji moraju biti adekvatno testirani za ove namene. U skladu sa tim, u petom poglavlju ove doktorske disertacije opisane su i neke od aktuelnih metoda koje se primenjuju za testiranje uređaja za merenje osnovnih parametara kvaliteta električne energije [29-34]. Veliki korak napred u savremenim sistemima metrološkog obezbeđenja napravljen je pojavom i razvojem koncepta virtuelne merne instrumentacije, koja koristi prednosti izuzetnih karakteristika savremenih računara. Virtuelna merna instrumentacija predstavlja metodologiju za realizaciju mernih instrumenata koja koristi standardne računare ili industrijske radne stanice, prateće hardverske komponente za akviziciju i digitalnu konverziju signala, kao i specijalizovane programske pakete za prikupljanje, obradu i grafičku prezentaciju rezultata merenja. Na ovaj način omogućena je sinteza više različitih tipova mernih uređaja u jedan zajednički instrument na bazi računara. Primena virtuelne instrumentacije omogućava korisnicima realizaciju mernog uređaja koji najbolje odgovara njihovim aktuelnim potrebama i zahtevima, odnosno specifičnoj primeni. Pored ostalog, razvoj koncepta virtuelne instrumentacije pruža vrlo dobre mogućnosti za realizaciju instrumenata koji se mogu koristiti za potrebe merenja i kontrole u elektrodistributivnim sistemima, na čemu su poslednjih godina već postignuti i značajni rezultati [35-42]. U skladu sa tim trendovima, u ovoj disertaciji prikazana su i neka rešenja bazirana na primeni programskog paketa virtuelne instrumentacije LabVIEW, realizovana za monitoring i kontrolu kvaliteta električne energije, što uključuje merenje i analizu dobijenih rezultata merenja osnovnih parametara kvaliteta propisanih važećim standardima.

Rešenje sistema realizovanog za testiranje uređaja za merenje kvaliteta električne energije, prikazano u šestom poglavlju, predstavlja poseban doprinos ove doktorske disertacije. Razvijeno je u okviru istraživanja na međunarodnom naučnom projektu kategorije FP7, iz programa SEE-ERA.NET Plus, pod nazivom: "Algorithms for Time-Varying Harmonic Analysis for Power Quality Assesment applicable on Modern Digital Signal Processors". Osnovni cilj istraživanja na konkretnom projektu bio je razvoj i implementacija efikasnog algoritma za analizu standardnih poremećaja kvaliteta električne energije, sa posebnim naglaskom na analizu uticaja harmonijskih izobličenja trofaznih signala elektrodistributivne mreže na kvalitet električne energije isporučene krajnjim korisnicima. Generalno, problematika vezana za analizu kvaliteta električne energije je veoma kompleksna i uključuje više oblasti, kao što su: energetska elektronika, tehnike digitalne obrade signala (DSP), programiranje, uz primenu savremene instrumentacije i naprednih metoda merenja. Sa razvojem metoda i tehnika merenja količina prikupljenih mernih podataka postaje sve veća, što zahteva kompleksniju analizu mernih podataka i kompletnu automatizaciju ovog

procesa. Jedno od efikasnih rešenja je softverska implementacija algoritma za merenje i analizu osnovnih parametara kvaliteta električne energije, na bazi DSP procesora u realnom vremenu [43-48]. Funkcionalna osnova prikazanog rešenja akvizicionog sistema za testiranje bazirana je na primeni grafičkog programskog paketa virtuelne merne instrumentacije LabVIEW i dve kartice za akviziciju podataka NI PCI 6713 i NI USB 9215A [5]. Procedura realizacije ovog softverski podržanog akvizicionog sistema za testiranje uređaja za merenje kvaliteta električne energije uključuje dva funkcionalno povezana segmenta. Prvi segment obuhvata generisanje standardima definisanih referentnih trofaznih signala za testiranje, uključujući i neke kategorije poremećaja kvaliteta električne energije koje su tipične za realne elektrodistributivne sisteme. Drugi segment razvojne procedure ovog sistema uključuje snimanje naponskih i strujnih signala u prisustvu realnih poremećaja kvaliteta električne energije u trofaznom elektrodistributivnom sistemu. Na bazi realizacije ovakvog sistema za testiranje, primenom generisanja i memorisanja tipičnih poremećaja kvaliteta električne energije, obezbeđena je baza podataka sa velikim brojem naponskih i strujnih referentnih test signala sa varijacijom različitih tipova poremećaja kvaliteta.

Osnovni cilj realizacije ovog sistema za testiranje je obezbeđenje velikog broja naponskih i strujnih referentnih test signala sa varijacijom različitih tipova poremećaja kvaliteta, kako bi se izvršilo testiranje i kompletna metrološka verifikacija predloženog rešenja softverskog algoritma za detekciju, klasifikaciju i analizu standardnih poremećaja kvaliteta električne energije. Pored toga, predstavljeno rešenje akvizicionog sistema, sa mogućnošću generisanja različitih kategorija standardnih poremećaja kvaliteta test signala i velikom bazom podataka naponskih i strujnih signala memorisanih u prisustvu realnih poremećaja kvaliteta, može se generalno primenjivati za potrebe testiranja i metrološke verifikacije osnovnih karakteristika savremenih instrumenata i odgovarajuće opreme za merenje kvaliteta električne energije. U poređenju sa postojećim sličnim rešenjima ovog tipa [49-56], kao i sa gotovim prilično skupim varijantama kalibratora namenski projektovanih za ove namene [29,30], prikazano rešenje akvizicionog sistema za testiranje je funkcionalno nešto skromnije i jednostavnije. Sa druge strane, vrlo značajna prednost ovakvog rešenja jeste njegova funkcionalna fleksibilnost, budući da se i tokom samog procesa testiranja od strane korisnika sistema mogu menjati osnovni parametri test signala za generisanje, kao i kompletan tok procedure testiranja. Naravno, svemu ovome treba dodati i relativno nisku cenu ovog softverski baziranog sistema, tako da u poređenju sa postojećim standardnim kalibratorima ove namene, dato rešenje akvizicionog sistema za testiranje predstavlja znatno jeftiniju varijantu.

2. OSNOVNI MERNI PARAMETRI I POREMEĆAJI KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Pored problema u obezbeđenju dostupnosti električne energije što većem broju potrošača, segment koji poslednjih godina dobija sve širi značaj jeste kvalitet električne energije isporučene krajnjim potrošačima. Još sredinom prošlog veka postalo je potpuno jasno da kvalitet električne energije, usled velikog uticaja na proizvodnju materijalnih i nematerijalnih dobara, ima presudan uticaj na kvalitet života i rada ljudi. Ipak, presudne promene u pogledu značaja kontrole kvaliteta električne energije nastale su tek sredinom devedesetih godina prošlog veka. Električna energija je evropskom Direktivom 85/374/EEC 1985. godine zvanično definisana kao proizvod, koji kako bi bio prepoznat i prihvaćen od potrošača, na konkurentnim tržištima mora da zadovolji određene kriterijume [57]. Danas je pouzdanost snabdevanja potrošača kvalitetnom električnom energijom jedna od osnovnih potreba neophodnih za razvoj savremenih industrijskih društava. Sa stanovišta prava i interesa samih potrošača električne energije ovaj resurs mora biti konstantno dostupan, pri čemu njihovim električnim uređajima mora biti obezbeđeno sigurno i kvalitetno funkcionisanje.

Ograničene mogućnosti za investiciona ulaganja u adaptaciju postojećih i izgradnju novih objekata elektroenergetske infrastrukture, uz sve strožija zakonska ograničenja po pitanju zaštite životne sredine, neki su od osnovnih uzroka što pojedini elektroenergetski sistemi u užem i širem okruženju, naročito u tranzicionim zemljama, funkcionišu na granici svojih tehničkih kapaciteta. Razvoj novih tehnologija, posebno uređaja i sistema komutacije i energetske elektronike, sem niza svojih tehnoloških prednosti i ekonomske isplativosti, doneo je i neke od većih problema vezanih za negativne povratne uticaje nelinearnih karakteristika ovih uređaja na sigurnost i pouzdanost u funkcionisanju elektroenergetskog sistema u celinu. Većina tržišno dostupnih savremenih uređaja i opreme potrošača prilično su osetljivi na česte varijacije vrednosti parametara napona napajanja na mestima isporuke električne energije krajnjim korisnicima. Sa druge strane, upravo ovi uređaji mogu biti jedni od glavnih uzročnika degradacije kvaliteta isporučene električne energije [58,59].

Da bi se što jednostavnije shvatio pojam kvaliteta električne energije treba prvo definisati osnovne parametre i pokazatelje kojima je određen, kao i pojedine posledice koje neodgovarajući nivo kvaliteta može prouzrokovati. Kvalitet električne energije primarno je definisan vrednostima karakterističnih parametara mrežnog napona, odnosno stepenom njihovog odstupanja u odnosu na propisane standardizovane referentne vrednosti kvalitativnih parametara. Ove referentne, odnosno nominalne vrednosti naponskih parametara kvaliteta i njihova maksimalno dozvoljena odstupanja

definisana su kako domaćim, tako i međunarodnim normama i standardima za kvalitet električne energije, koji su zakonski obavezujući za sve distributere električne energije. Nominalne vrednosti parametara i pokazatelja kvaliteta električne energije određene su na bazi višegodišnjih iskustava i analiza funkcionisanja elektrodistributivnih sistema u svetu, i rezultat su dogovora i kompromisa relevantnih organizacija koje se problemima standardizacije bave na širem međunarodnom planu.

2.1. Definicije osnovnih parametara kvaliteta električne energije

Parametri kvaliteta električne energije koje treba pratiti, analizirati i prikazivati definisani su propisanom normativno-zakonskom regulativom, nacionalnog ili šireg međunarodnog značaja. Standardi i norme kvaliteta električne energije usvojeni od relevantnih međunarodnih institucija i organizacija propisuju nominalne vrednosti parametara i pokazatelja kvaliteta električne energije, uključujući prihvatljiva granična odstupanja i propisana vremena merenja i registrovanja njihovih promena. Neke od prestižnih međunarodnih organizacija koje se bave problemima standardizacije pri merenju parametara kvaliteta su IEC (International Electrotechnical Commission), CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardisation), UNIPED (International Union of Producers and Distributors of Electrical Energy), IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), CIGRE (Conseil International des Grands Reseaux Electriques - International Council on Large Electric Systems), ANSI (American National Standards Institute) i druge organizacije.

Prihvatljive granične vrednosti, odnosno dozvoljene tolerancije parametara kvaliteta, tako su odabrane da njihove promene u okviru specificiranih granica ne mogu negativno uticati na rad uređaja i opreme potrošača, budući da se projektuju sa određenim pragom dozvoljene tolerancije vrednosti napona napajanja. Po pravilu, prilikom projektovanja elektrodistributivnih mreža treba pretpostaviti nešto strožije kriterijume od onih definisanih važećim preporukama, kako bi čak i za slučaj da pojedini od tehničkih parametara prekorače dozvoljene granične vrednosti, distributivna mreža bila u stanju da normalno funkcioniše. U skladu sa tim, proizvođačima sredstava i opreme potrošača se preporučuje da svoje proizvode projektuju sa nešto širim dozvoljenim tolerancijama, u poređenju sa standardima definisanim prihvatljivim vrednostima kvalitativnih parametara [60].

Značaj pojedinih parametara kvaliteta električne energije se vremenom menjao. U početku osnovni kriterijum je bila dostupnost električne energije potrošačima, pri čemu je bilo neophodno da vrednosti napona napajanja i mrežne frekvencije variraju u dozvoljenim granicama. Očigledno da u ovoj prvoj fazi kada je osnovni problem bila dostupnost električne energije, propadi napona, prenaponi, tranzijenti ili slične negativne pojave, nisu bile od presudnog značaja i uticaja kada se govorilo o kvalitetu električne energije. U uslovima izrazitog industrijskog i ekonomskog razvoja sem dostupnosti električne energije potrošačima, vrednosti mrežnog napona i mrežne frekvencije, velika pažnja mora se posvetiti i ostalim pokazateljima, koji se pre svega tiču negativnih pojava i kraćih ili dužih prekida u snabdevanju potrošača električnom energijom [1-4]. Osnovni tehnički

parametri i pokazatelji kvaliteta isporučene električne energije propisani standardima i normama, koji se tiču vrednosti mrežne frekvencije, napona napajanja i eventualnih mrežnih poremećaja su:

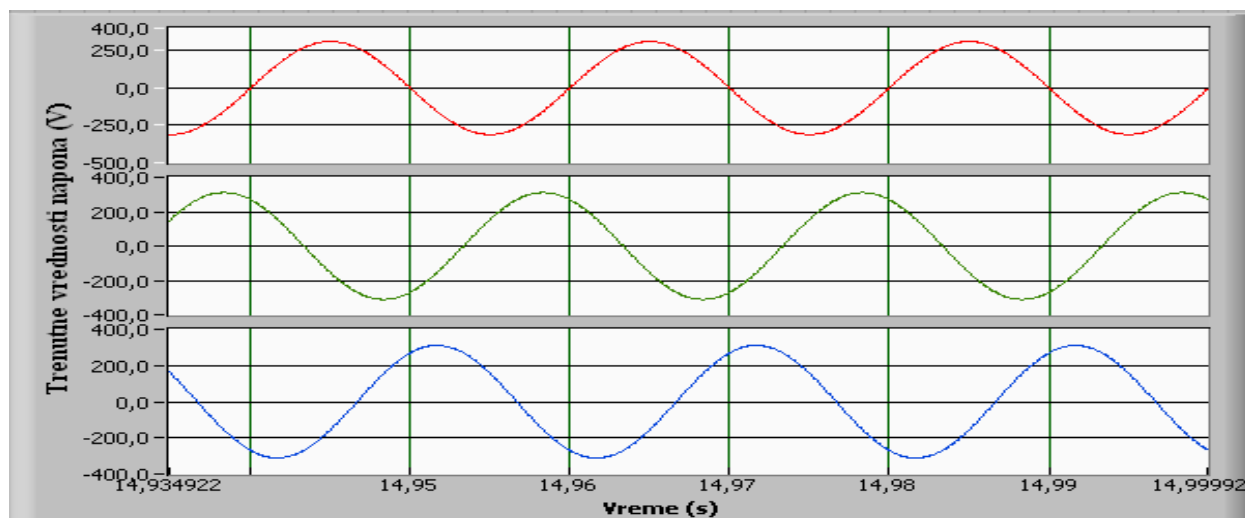
- vrednost mrežne frekvencije;
- efektivna vrednost mrežnog napona (RMS);
- spore promene napona napajanja;
- naponsko treperenje (fliker);
- propadi napona napajanja;
- kratkotrajni prekidi napona napajanja;
- duži prekidi napona napajanja;
- privremeni prenaponi između faznih provodnika i zemlje;
- impulsni prenaponi između faznih provodnika i zemlje;
- naponsko-fazna nesimetrija;
- harmonijske komponente napona;
- međuharmonijske komponente napona;
- signalizacioni upravljački naponski signali.

2.1.1. Vrednost mrežne frekvencije

Mrežna frekvencija predstavlja broj punih oscilacija napona napajanja u jedinici vremena. Propisana nominalna vrednost mrežne frekvencije u evropskim elektrodistributivnim mrežama je 50Hz. U Americi je usvojena vrednost osnovne frekvencije napona napajanja 60Hz. Po definiciji, frekvencija signala jednaka je recipročnoj vrednosti periode signala, kao u relaciji (2.1), što znači da nominalnoj vrednosti frekvencije mrežnog napona od 50Hz odgovara perioda od $T=1/f=20\text{ms}$.

$$f = \frac{1}{T} [\text{Hz}] \quad (2.1)$$

Idealni talasni oblici trofaznih napona distributivne mreže, frekvencije 50Hz, generisani preko virtuelnog instrumenta razvijenog primenom softverskog paketa za projektovanje virtuelne instrumentacije LabVIEW [6], američke kompanije National Instruments, dati su na slici 2.1.



Slika 2.1. Idealni talasni oblici trofaznih signala mrežnog napona frekvencije 50Hz

2.1.2. Efektivna vrednost mrežnog napona (RMS)

Efektivna vrednost naizmeničnog mrežnog napona definiše se na osnovu toplotnog efekta ekvivalentnog jednosmernog napona. Prema klasičnoj definiciji, efektivna vrednost napona V_{eff} je ona vrednost jednosmernog napona pri kojoj se na nekom otporniku tokom jedne periode signala izvrši isti rad, odnosno generiše identična količina toplote, kao i pri posmatranom naizmeničnom naponu. Ako je na određenom potrošaču otpornosti R priključen naizmenični napon $v(t)$, onda se električni rad A koji se tokom jedne periode T izvrši na otporniku može dati sledećom relacijom:

$$A = \frac{V_{eff}^2}{R} T = \int_0^T \frac{[v(t)]^2}{R} dt \quad (2.2)$$

Iz izraza (2.2) sledi relacija za izračunavanje efektivne vrednosti naizmeničnog napona:

$$V_{eff}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T [v(t)]^2 dt \quad (2.3)$$

Za slučaj harmonijskog izobličenja talasnog oblika napona napajanja, usled prisustva viših harmonijskih komponenta napona koje se superponiraju osnovnom harmoniku frekvencije 50Hz formirajući složenoperiodični signal, efektivna vrednost napona izračunava se pomoću realacije:

$$V_{eff} = \sqrt{V_{eff}^2(f_0) + V_{eff}^2(2f_0) + \dots + V_{eff}^2(nf_0)} = \sqrt{\sum_{k=1}^n [V_{eff}(kf_0)]^2} \quad (2.4)$$

Zavisno od efektivnih vrednosti napona, javne elektrodistributivne mreže se mogu podeliti na niskonaponske elektrodistributivne mreže NN (mrežni napon efektivne vrednosti do 1000V) i sredjenaponske elektrodistributivne mreže SN (mrežni napon efektivne vrednosti koja se kreće u granicama od 1kV do 35kV) [61]. Nominalna efektivna vrednost napona distributivne mreže V_n pri normalnim radnim uslovima propisana je aktuelnim standardima kvaliteta električne energije.

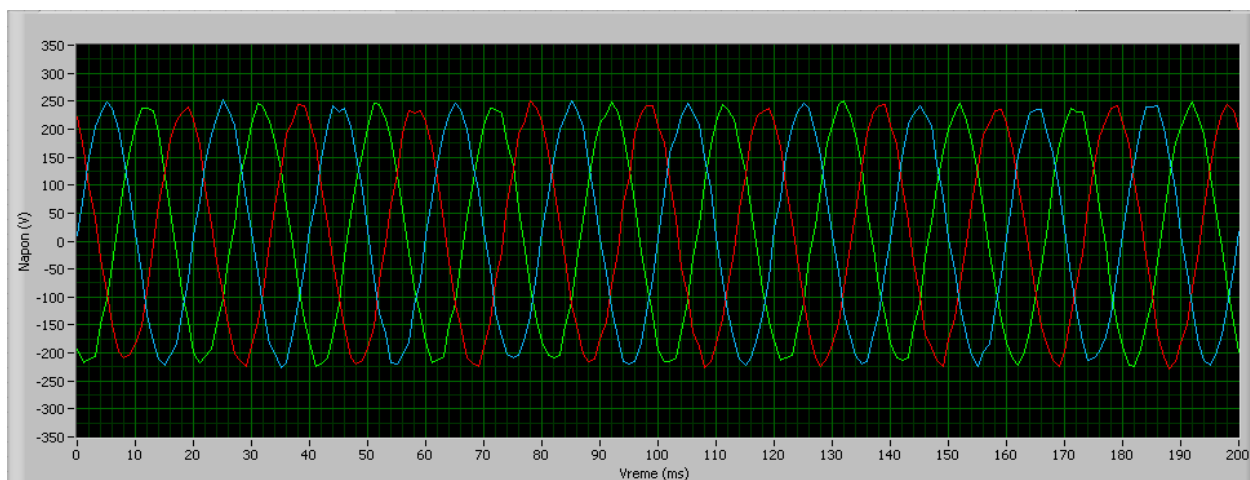
Na područjima zemalja članica Evropske Unije prihvaćen je standard kvaliteta električne energije EN 50160, koji definiše merenje parametara napona na mestu predaje električne energije potrošačima u niskonaponskim i sredjenaponskim mrežama [7-9]. Prema odredbama standarda, nominalna efektivna vrednost napona kod niskonaponskih elektrodistributivnih mreža iznosi:

- za trofazne elektrodistributivne mreže sa četiri provodnika $V_n=230V$ između pojedinačnih faznih i nultog provodnika;
- za trofazne elektrodistributivne mreže sa četiri provodnika $V_n=400V$ između faznih provodnika;

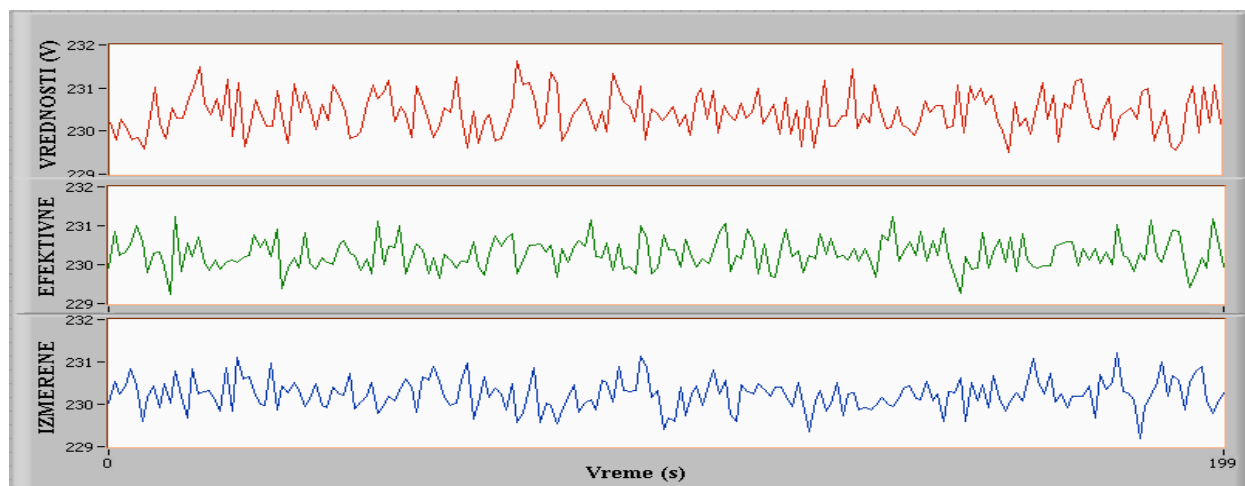
2.1.3. Spore promene napona napajanja

Promene, odnosno varijacije vrednosti napona napajanja su odstupanja trenutnih vrednosti napona od propisane nominalne vrednosti. To može biti niz uzastopnih promena mrežnog napona ili neka periodična promena talasnog oblika napona. Varijacije napona su uzrokovane promenom ukupnog opterećenja u elektrodistributivnoj mreži, odnosno kao posledica naglog uključivanja ili isključivanja većeg broja uređaja i sredstava potrošača. Drugi najčešći uzrok naponskih varijacija

su mogući kvarovi i poremećaji u normalnom funkcionisanju elektroenergetske mreže. Naponske varijacije mogu biti spore ili brze, za koje je karakteristično to što se promena odvija između dva susedna nivoa napona kratkog trajanja, kao posledica nagle promene opterećenja. Grafička prezentacija talasnih oblika trofaznih signala sa sporim varijacijama napona, generisanih u LabVIEW okruženju, data je na slici 2.2. Primer varijacija izmerenih efektivnih vrednosti (RMS) trofaznih napona elektrodistributivne mreže, memorisanih virtuelnim instrumentom realizovanim u LabVIEW programskom okruženju, predstavljen je na slici 2.3.



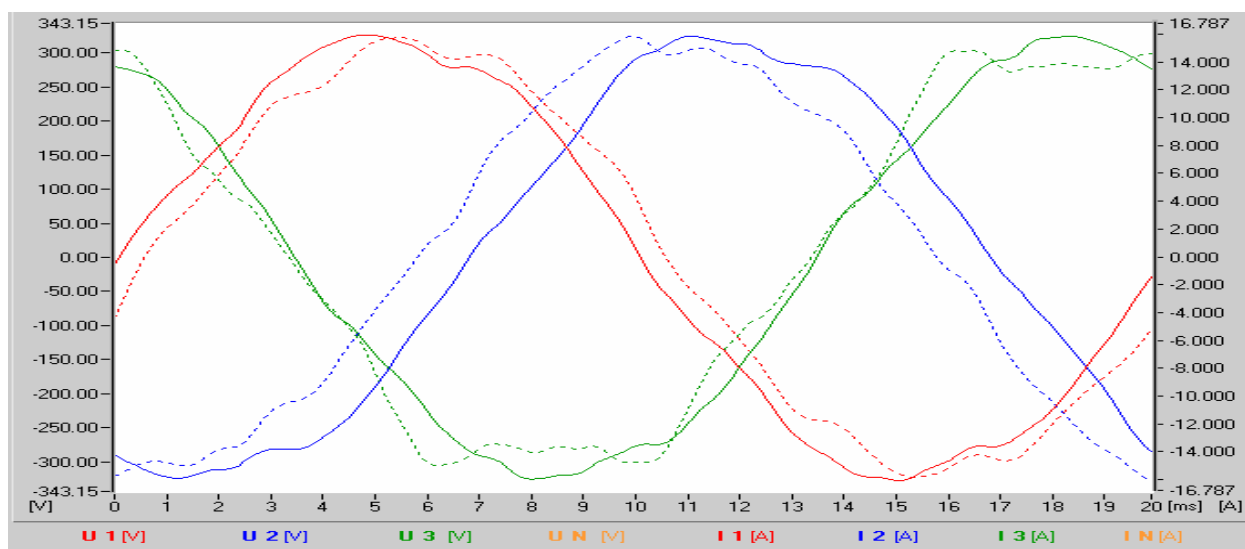
Slika 2.2. Prezentacija trofaznih naponskih signala generisanih sa sporim varijacijama napona



Slika 2.3. Primer varijacija izmerenih efektivnih vrednosti trofaznih mrežnih napona

Iako se razlikuju spore i brze promene napona, prema standardu EN 50160 generalno važi da su varijacije napona prihvatljive ako se pri normalnim radnim uslovima, i ne uzimajući u obzir prekide u napajanju, 95% svih desetominutnih srednjih efektivnih vrednosti napona u toku svake nedelje nalazi unutar opsega $\pm 10\%$ vrednosti nominalnog napona V_n . U preostalih 5% nedeljnog intervala napon može varirati u opsegu $+10\%/-15\%$. To znači da od ukupno 1008 desetominutnih srednjih efektivnih vrednosti napona, izmerenih tokom jedne nedelje, prema standardu EN 50160 958 vrednosti treba da za nominalni napon od 230V ima vrednosti unutar opsega (207 – 253) V.

Na slici 2.4. prikazani su talasni oblici trofaznih napona i struja u realnom elektrodistributivnom sistemu, snimljeni analizatorom kvaliteta električne energije razvijenim u LabVIEW okruženju.



Slika 2.4. Realni talasni oblici trofaznih napona i struja elektrodistributivne mreže

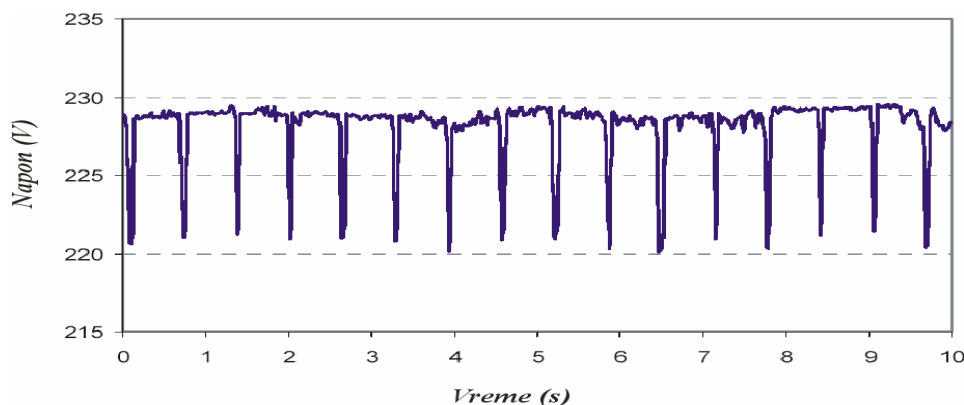
2.1.4. Naponsko treperenje (fliker)

Naponsko treperenje (fliker) predstavlja pojavu varijacija vrednosti napona napajanja koje se ponavljaju, izazivajući učestalu promenu intenziteta svetlosti, odnosno svetlosno treperenje, koje je primetno golim okom posmatrača. Iznad određene granice subjektivne prirode ova pojava počinje ozbiljno da smeta eventualnim posmatračima. Smetnje su sve izraženije što su amplitude naponskih varijacija veće. Pri određenom karakterističnom broju ponavljanja u jedinici vremena, pojava takvih smetnji moguća je već pri vrlo malim promenama amplitude mrežnog napona [58].

Potreba za definisanjem i merenjem treperenja napona posledica je činjenice da promene intenziteta svetlosti u radnoj ili životnoj okolini vrlo negativno utiču na zdravlje ljudi (glavobolja, nervoza, narušavanje vida, itd), značajno umanjujući njihove normalne radne sposobnosti. Fliker se može, kao izrazito subjektivna kategorija, definisati i na sledeći način: ako je u nekoj prostoriji prisutno stotinu ljudi i pri tome se intenzitet svetlosti u toj prostoriji promeni tako da to registruje njih pedeset, može se tvrditi da je intenzitet naponskog treperenja jednak jediničnoj vrednosti. Na slici 2.5. prikazane su varijacije izmerenih efektivnih vrednosti pri pojavi treperenja napona. Intenzitet smetnji usled svetlosnog treperenja, odnosno jačina flikera, prema IEC proceduri za odmeravanje treperenja procenjuje se i utvrđuje na osnovu sledećih karakterističnih veličina [62]:

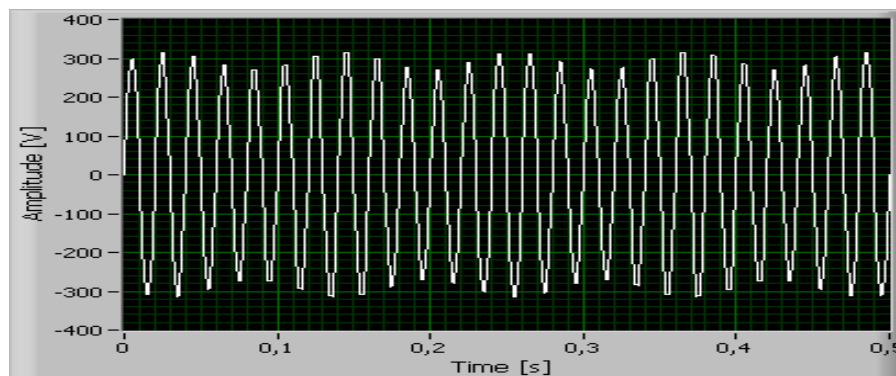
- jačina kratkotrajnog treperenja P_{st} merena tokom vremenskog intervala od 10 minuta;
- jačina dugotrajnog treperenja P_{lt} , koja se na osnovu dvanaest vrednosti za P_{st} , merenih tokom vremenskog intervala u trajanju od dva sata, računa prema sledećem obrascu:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}} \quad (2.5)$$



Slika 2.5. Varijacije izmerenih efektivnih vrednosti mrežnog napona pri pojavi flikera

Pri normalnim radnim uslovima intenzitet dugotrajnog treperenja napona prema standardu EN 50160 ne sme tokom bilo koje nedelje u godini da premaši maksimalnu graničnu vrednost od $P_{lt}=1$. Reakcija na pojavu flikera subjektivnog je karaktera i može biti dosta različita, zavisno od uzročnika flikera i od vremenskog perioda u kome se on javlja. U pojedinim slučajevima smetnje su moguće pri vrednostima bliskim $P_{lt}=1$, dok se u nekim slučajevima smetnje ne javljaju ni pri vrednostima znatno većim od vrednosti $P_{lt}=1$. Ljudskom oku naročito smetaju flikeri frekvencije od 7 do 10Hz. Intenzitet treperenja meri se flikermetrima, koji se nalaze u sklopu instrumenata za merenje i analizu kvaliteta električne energije. Zapravo, flikermetrima se meri dubina modulacije amplitudno modulisanog mrežnog napona frekvencije 50Hz, signalima frekvencije od 1 do 33Hz. Grafička prezentacija talasnog oblika naponskog signala, generisanog u LabVIEW programskom okruženju sa konkretnim primerom simulacije pojave naponskog treperenja, data je na slici 2.6.

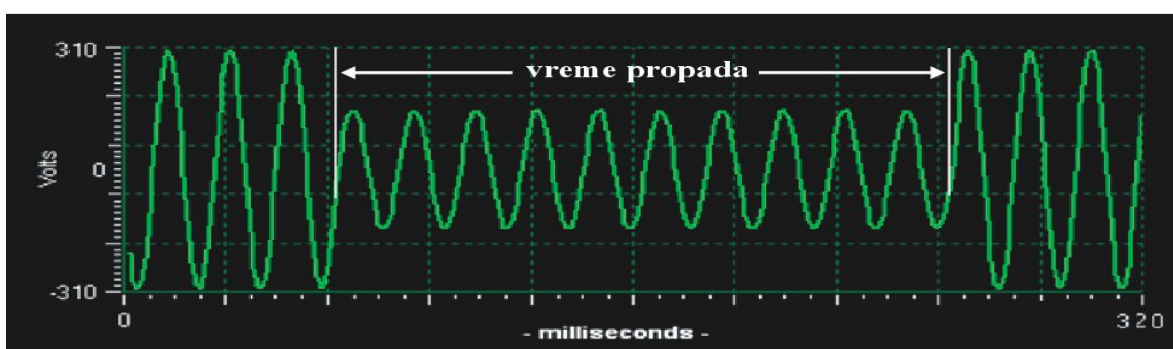


Slika 2.6. Prezentacija naponskog signala generisanog sa simulacijom pojave flikera

2.1.5. Propadi (padovi) napona napajanja

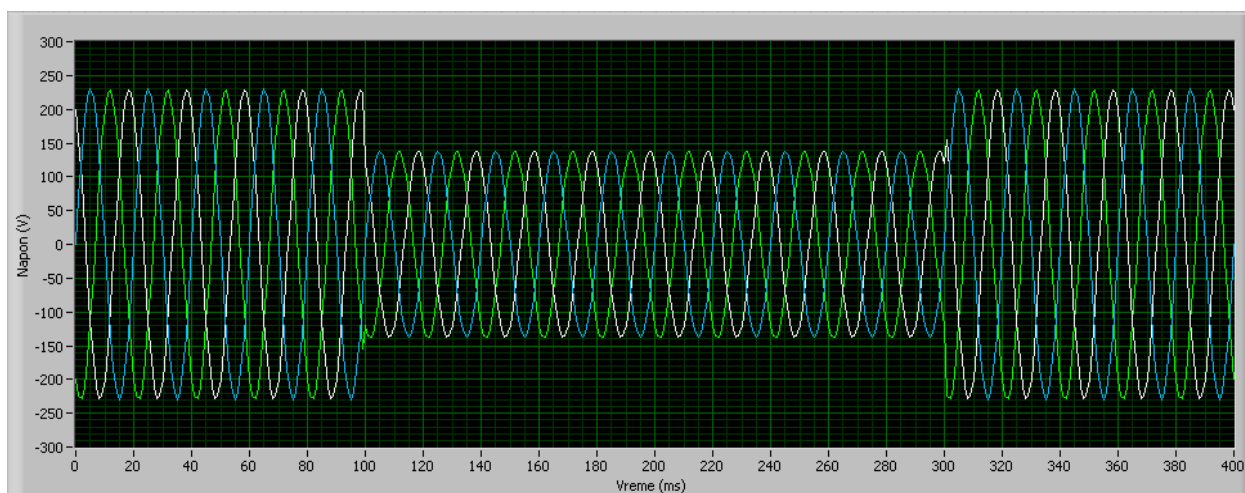
Propad napona je naglo i kratkotrajno smanjenje mrežnog napona na vrednost između 1% i 90% svoje propisane nominalne vrednosti, posle čega se ubrzano uspostavlja prvobitna vrednost napona. Propadi napona se najčešće javljaju usled kvarova u postrojenjima potrošača ili u nekom delu elektroenergetske mreže. Njihov prosečan broj tokom godine je vrlo različit, zavisno od tipa elektroenergetske mreže i od konkretne mrežne lokacije. Pri normalnim radnim uslovima, njihov broj kreće se od nekoliko desetina pa do preko hiljadu propada tokom godine. Pored toga, njihova godišnja raspodela može biti prilično neravnomerna u zavisnosti od perioda i vremenskih prilika.

Trajanje naponskih propada propisano standardima može biti između 10ms i 1min. Dubina propada napona definisana je kao razlika minimalne efektivne vrednosti napona tokom propada i nominalne vrednosti napona V_n . Naponske promene pri kojima se napon ne smanjuje ispod 90% nominalne vrednosti napona V_n ne smatraju se naponskim propadima. Većina propada traje kraće od 1s, a dubine propada su manje od 60% V_n . Ipak, pojedini propadi mogu da budu dužeg trajanja i veće dubine propada. U nekim elektroenergetskim mrežama često se usled promene opterećenja u postrojenjima potrošača mogu javljati propadi napona dubine između 10% i 15% od nominalne vrednosti napona napajanja. Primer propada napona napajanja ilustrovan je na sledećoj slici 2.7.



Slika 2.7. Grafička ilustracija propada napona napajanja

Grafička prezentacija talasnih oblika trofaznih naponskih signala, sa generisanjem pojave naponskog propada u LabVIEW softverskom okruženju, data je na slici 2.8.



Slika 2.8. Prezentacija trofaznih naponskih signala generisanih sa pojavom propada napona

2.1.6. Prekidi napona napajanja

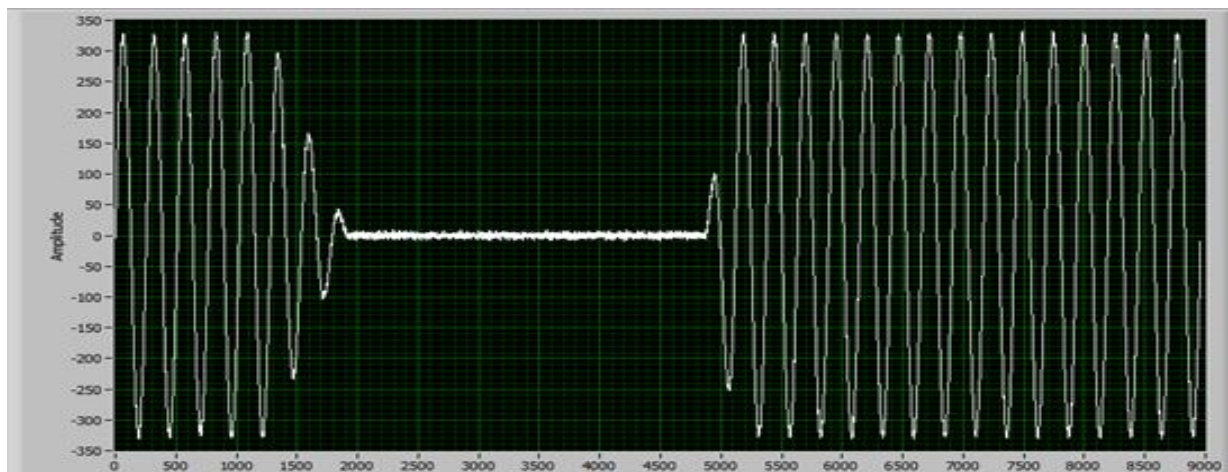
Prekid napajanja nastaje kada je vrednost napona na mestima isporuke potrošačima manja od 1% propisane nominalne vrednosti. Razlikuju se sledeće kategorije prekida napona napajanja:

- planirani prekidi napajanja o kojima se, u cilju omogućavanja obavljanja planiranih intervencija u elektroenergetskoj mreži, potrošači unapred obaveštavaju, tako da se posledice planiranih prekida mogu adekvatnim merama svesti na minimum;

- slučajni prekidi napona napajanja koji su izazvani trajnim ili prolaznim poremećajima pri funkcionisanju elektrodistributivne mreže. Razlikuju se sledeće osnovne kategorije slučajnih prekida napona napajanja:
 - dugotrajni prekidi napajanja (duži od 3 minuta), izazvani trajnim kvarovima;
 - kratkotrajni prekidi napajanja (do 3 minuta), izazvani prolaznim kvarovima;

Pri normalnim radnim uslovima kratki prekidi u napajanju pojavljuju se sa učestanošću od nekoliko desetina pa do više stotina prekida godišnje. Trajanje oko 70% kratkih prekida napajanja mora biti kraće od jedne sekunde. U pojedinim publikacijama polazi se od pretpostavke da kratki prekidi napona napajanja ne traju duže od jednog minuta. Međutim, u pojedinim situacijama treba primeniti zaštitne uređaje i sklopove koji sami zahtevaju vreme prekida u trajanja do tri minuta.

Dugi prekidi napona napajanja većinom su uzrokovani spoljnim ekscesnim događajima na koje isporučilac električne energije ne može uticati. Obzirom na postojeće razlike u postrojenjima i strukturama elektrodistributivnih mreža u različitim državama i obzirom na nepredvidive uticaje trećih strana i vremenskih prilika, nije moguće precizno definisati tipične vrednosti učestanosti i trajanja dugih prekida u napajanju. Zavisno od konkretne mrežne lokacije može se pri normalnim radnim uslovima tokom godine pojaviti od deset do preko pedeset dužih prekida mrežnog napona u trajanja preko tri minuta. Orijentacione vrednosti planiranih prekida u napajanju nisu navedene, jer se o eventualnim prekidima ove kategorije potrošači električne energije unapred obaveštavaju od njihovih distributera. Primeri pojave prekida napona napajanja grafički su dati na slici 2.9.



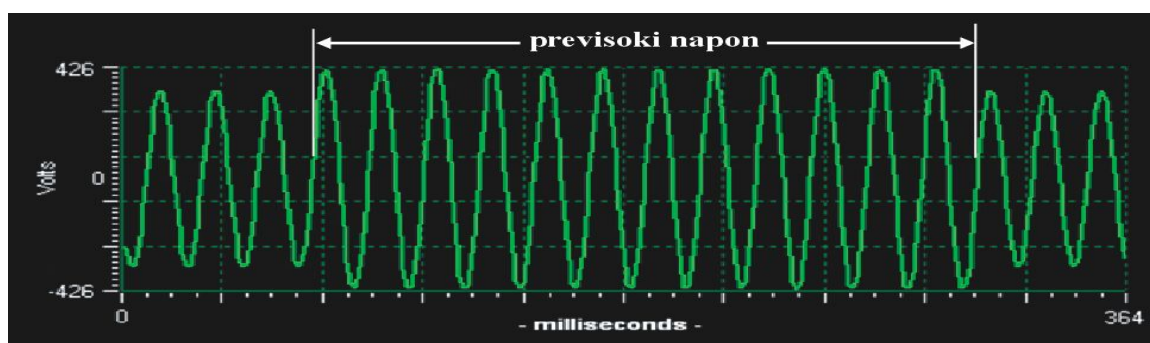
Slika 2.9. Ilustracija pojave prekida mrežnog napona napajanja

2.1.7. Previsoki naponi (prenaponi)

Prenaponi su stanja koja se javljaju u slučajevima kada vrednost mrežnog napona premaši neku graničnu unapred definisanu vrednost. Prema svom trajanju prenaponi se mogu podeliti na:

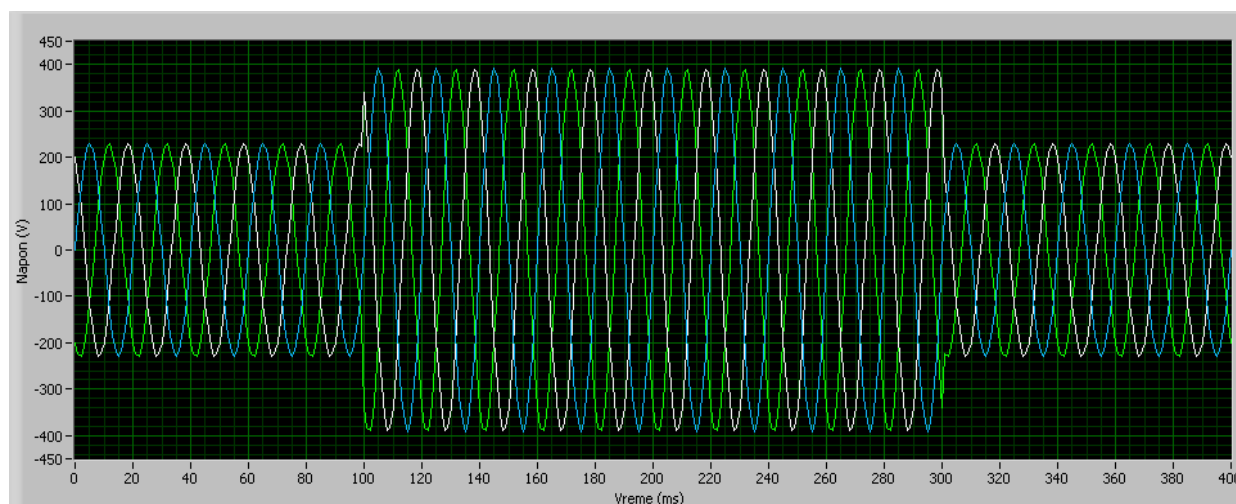
- privremeni previsoki naponi;
- tranzijentni ili impulsni previsoki naponi;

Privremeni prenaponi su nešto dužeg trajanja i po pravilu nastaju kao posledica različitih poremećaja i problema u elektroenergetskoj mreži ili u postrojenjima potrošača, kao i zbog naglih promena ukupnog opterećenja elektroenergetske mreže. Očekivane vrednosti previsokog napona zavise od metodologije uzemljenja mreže. U mrežama sa uzemljenim zvezdištem previsoki napon ne premašuje vrednost $1,7 V_n$. Kod elektrodistributivnih mreža sa neuzemljenim zvezdištem ili sa kompenzacijom zemljospoja, previsoki naponi ne prelaze vrednost $2 V_n$. Način uzemljenja mreže definiše se od strane distributera električne energije. Pod određenim okolnostima kratak spoj na višenaponskoj strani mrežnog transformatora može da na niženaponskoj strani izazove previsoki napon dok teče struja kratkog spoja. Previsoki naponi u proseku ne prelaze vrednost od 1,5kV, ali mogu imati i znatno veće vrednosti. Pojava prenapona grafički je prikazana na sledećoj slici 2.10.



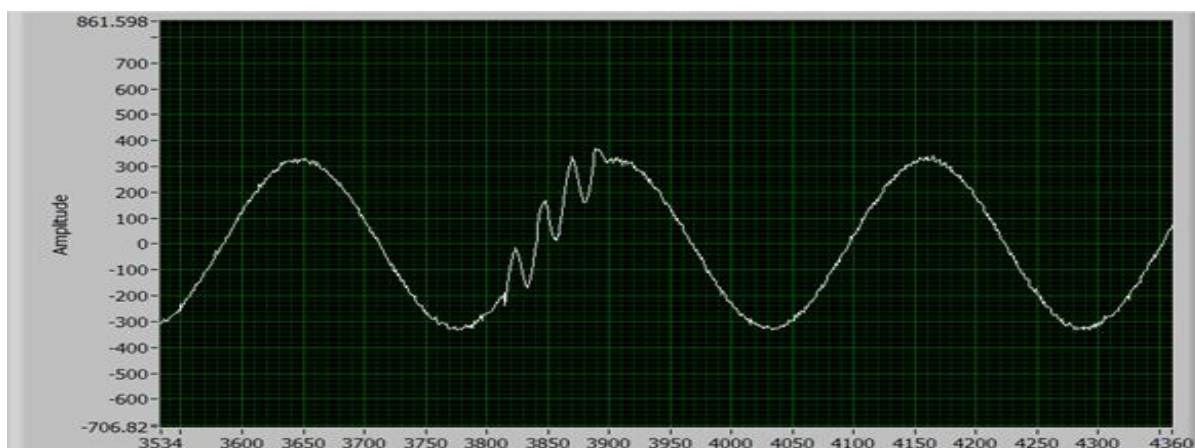
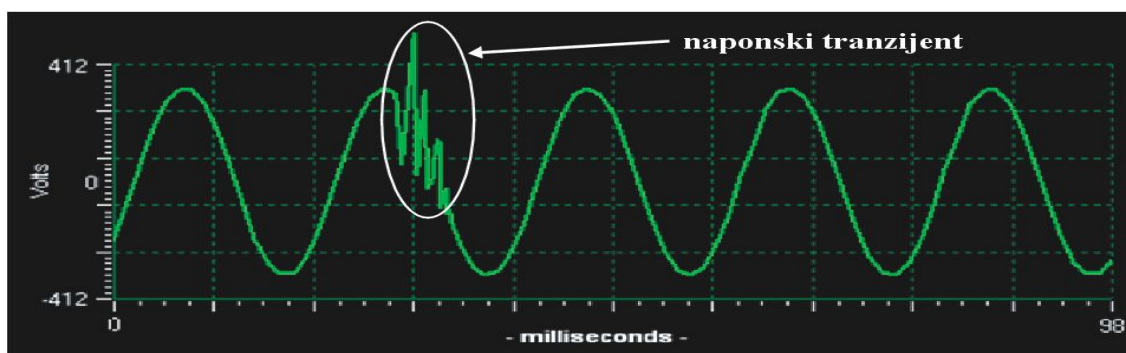
Slika 2.10. Ilustracija pojave previsokog napona

Grafička prezentacija talasnih oblika trofaznih naponskih signala, sa generisanjem pojave porasta napona u LabVIEW softverskom okruženju, data je na slici 2.11.



Slika 2.11. Prezentacija trofaznih naponskih signala generisanih sa pojavom prenapona

Tranzijentni previsoki naponi su kratkog trajanja i prosečno ne premašuju vršnu vrednost od 6kV, ali nekad mogu imati i veću vrednost. To su visokofrekventne naponske promene trajanja kraćeg od 10ms. Vremena porasta napona kreću se u opsegu od znatno ispod mikrosekunde pa do nekoliko milisekundi. Energija tranzijentnog prenapona varira i zavisi od konkretnog uzročnika. U odnosu na prenapon uzrokovan povezivanjem potrošača na mrežu, previsoki napon uzrokovan atmosferskim pražnjenjem ima veću vršnu vrednost, ali i manju energiju. To je posledica toga što su prenaponi pri povezivanju potrošača na mrežu dužeg trajanja. Pri odabiru uređaja za zaštitu od pojave previsokih napona u nekom postrojenju potrošača treba izabrati rešenje koje će zadovoljiti zahteve obe kategorije previsokih napona. Primeri tranzijenta napona ilustrovani su na slici 2.12.



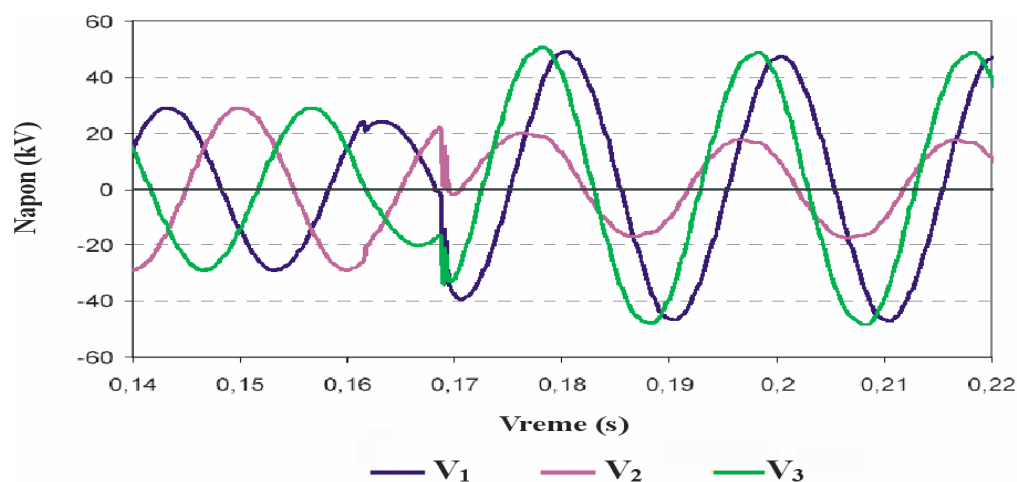
Slika 2.12. Primeri pojave tipičnog naponskog tranzijenta

2.1.8. Naponsko-fazna nesimetrija

Nesimetričnost napona je stanje u trofaznoj elektrodistributivnoj mreži pri kome efektivne vrednosti napona između pojedinačnih faznih i nultog provodnika, kao i fazne razlike između napona uzastopnih faza, nisu međusobno identični. Naponska nesimetričnost se izražava kao odstupanje u odnosu na idealni trofazni sistem, u kome su efektivne vrednosti faznih napona jednake, a njihove fazne razlike su tačno po 120° . U realnim uslovima, kao posledica raznih poremećaja koji se mogu javiti u funkcionisanju distributivne mreže, prisutan je izvestan stepen nesimetričnosti napona koji treba precizno utvrditi. Na bazi informacija o trenutnim efektivnim vrednostima i fazama napona dobijenih merenjem može se proračunati srednje odstupanje ovih parametara naponskih signala od svojih standardima propisanih nominalnih vrednosti. U skladu

sa preporukama standarda kvaliteta EN 50160, srednja vrednost ove razlike (odstupanja) u 95% slučajeva ne sme prelaziti 2% nominalnih vrednosti ovih parametara naponskih signala [7-9].

Srednja odstupanja naponskih parametara izračunavaju se za vremenski interval definisan programskom podrškom uređaja koji se koristi pri merenju parametara kvaliteta. Najčešće se radi o vremenskom intervalu trajanja od deset minuta, što praktično znači da 95% svih desetominutnih srednjih vrednosti odstupanja tokom intervala od nedelju dana ne sme da premaši vrednost od 2% nominalnih vrednosti parametara napona. Tokom merenja i izračunavanja nesimetričnosti napona ne sme se grešiti u redosledu spajanja naponskih i strujnih mernih kablova i mrežnih provodnika. Primer nesimetrije trofaznih mrežnih napona uzrokovane kvarom prikazan je na slici 2.13. [58].



Slika 2.13. Nesimetrija trofaznih naponskih signala prouzrokovana kvarom

2.1.9. Više harmonijske komponente signala

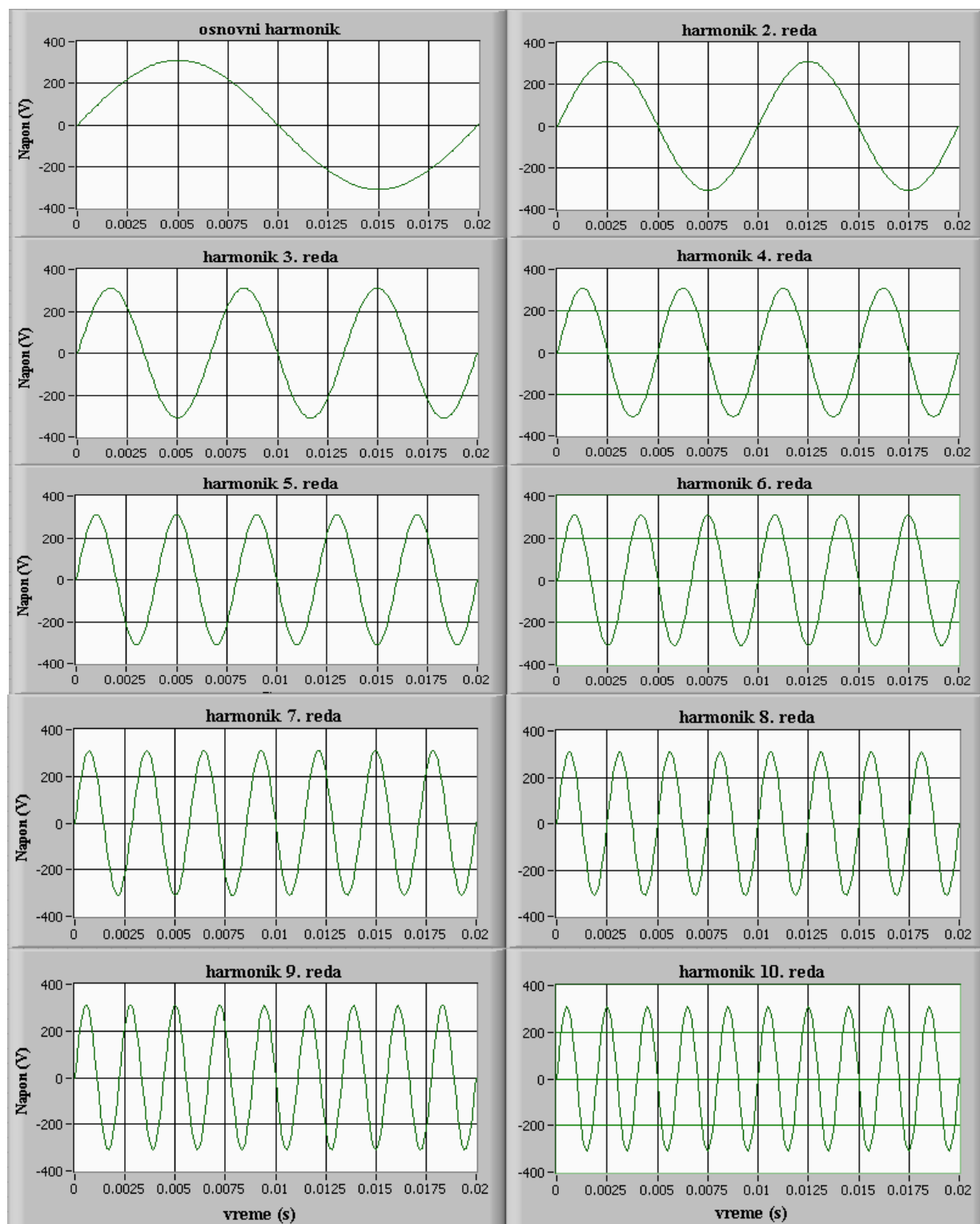
Napon viših harmonika je prostoperiodični napon čija je frekvencija jednaka celobrojnom umnošku frekvencije osnovnog harmonika. Vrednosti viših harmonika napona mogu se odrediti:

- pojedinačno, na bazi njihovih efektivnih vrednosti V_n izraženih u odnosu na vrednost osnovnog harmonika V_1 , gde n odgovara rednom broju odgovarajućeg višeg harmonika naponskog signala;
- zajednički, izraženo preko ukupnog naponskog harmonijskog izobličenja THD, koje predstavlja procentualni odnos efektivnih vrednosti viših harmonijskih komponenti i osnovnog harmonika mrežnog napona. Faktor izobličenja određuje se prema relaciji:

$$THD_{\%} = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{k=2}^n (V_k)^2} 100\% \quad (2.6)$$

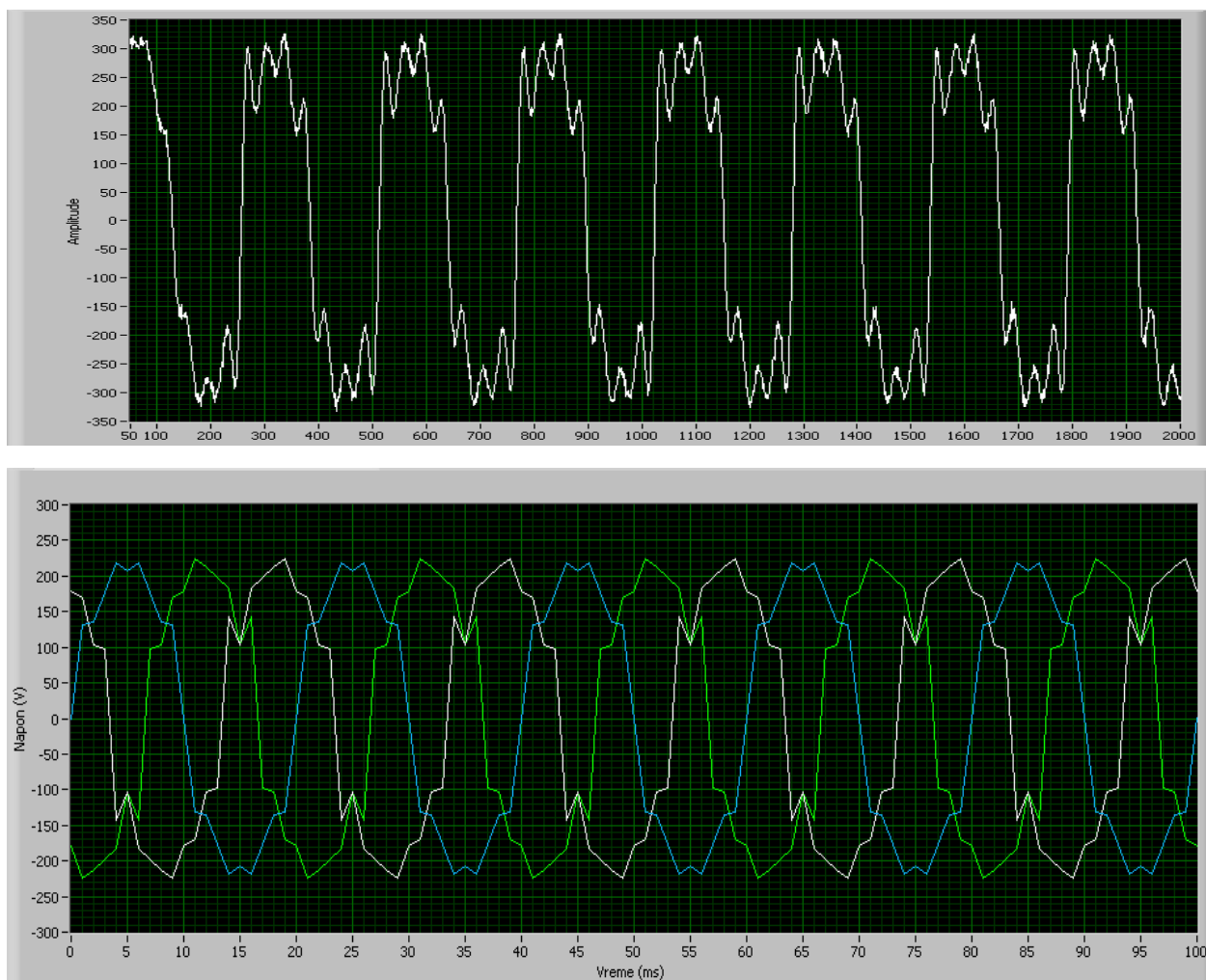
Harmonijske komponente napona najčešće su posledica viših harmonika struje nelinearnih opterećenja pojedinih potrošača, koji su priključeni na elektrodistributivnu mrežu. Viši harmonici struje formiraju na mrežnim impedansama više harmonijske komponente napona. Vrednosti viših

harmonika struje i mrežnih impedansi, a samim tim i viši naponski harmonici na mestima predaje vremenski su promenljivi. Prema standardu EN 50160, harmonijsko izobličenje napona, koje se računa uzimajući u obzir sve više harmonike do 40. reda, ne sme premašiti vrednost od 8% V_n . Talasni oblici signala viših harmonijskih komponenta osnovnog naponskog signala frekvencije 50Hz od 2. do 10. reda, generisani LabVIEW virtuelnim instrumentom, prikazani su na slici 2.14.

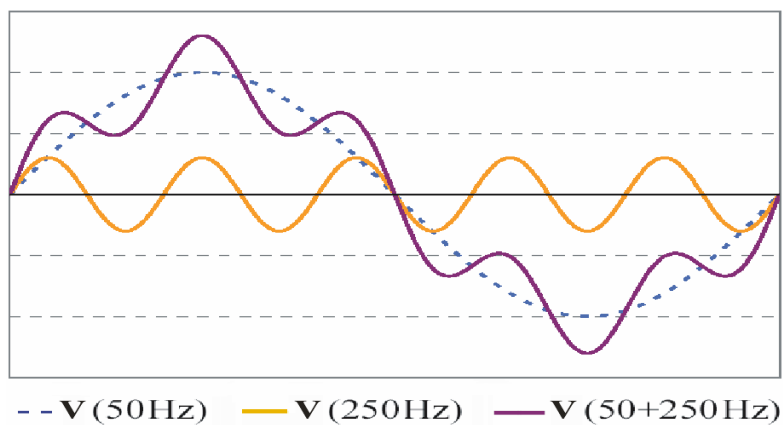


Slika 2.14. Parni i neparni viši harmonici mrežnog napona od 2. do 10. reda

Grafička ilustracija talasnih oblika mrežnog napona, generisanih u LabVIEW softverskom okruženju, koja pokazuje određeni stepen harmonijskog izobličenja signala pod uticajem viših harmonijskih komponentata, data je na slici 2.15. Primer harmonijskog izobličenja naponskog signala nominalne vrednosti osnovne frekvencije od 50Hz, koje je izazvano višom harmonijskom komponentom signala petog reda, prikazan je na slici 2.16. [59].



Slika 2.15. Harmonijska distorzija naponskih signala pod uticajem harmonika višeg reda



Slika 2.16. Harmonijsko izobličenje signala izazvano višim harmonikom petog reda

Dosta jasnija slika stanja kvaliteta nekog elektroenergetskog sistema može da se dobije tek pošto se u razmatranje uključe i faktori koji potiču od karakteristika opterećenja potrošača koji su priključeni na mrežu, a mogu biti jedni od uzroka degradacije kvaliteta električne energije. Pored lošeg napajanja smetnje pri radu uređaja potrošača mogu nastati i kao posledica elektromagnetnih uticaja drugih uređaja istovremeno povezanih na posmatranu elektrodistributivnu mrežu [15,63]. Kada se konkretno radi o ovim međusobnim elektromagnetnim uticajima, razlikuju se dve vrste smetnji, čije su prihvatljive maksimalne vrednosti propisane odgovarajućim standardima. Prva kategorija vezana je za nivo dozvoljenih smetnji koji neki uređaj može emitovati tokom rada, a da pri tome ne utiče negativno na normalno funkcionisanje drugih uređaja koji su istovremeno priključeni na istu električnu mrežu. Druga kategorija odnosi se na maksimalni intenzitet smetnji koji neki električni uređaj može da podnese, a da je pri tome u stanju još uvek normalno da funkcioniše. Preporuke kojima se propisuju obe navedene kategorije granično dozvoljenih vrednosti neželjenih elektromagnetnih uticaja koriste proizvođači tokom proizvodnje električnih uređaja i opreme. Pored toga, ove preporuke se mogu koristiti i kasnije za kontrolu emisije viših harmonika struje od strane pojedinih električnih uređaja potrošača pri normalnim uslovima rada.

Naponi međuharmonika su prostoperiodični naponi sa frekvencijom unutar opsega između frekvencija viših harmonijskih komponenata. Frekvencija međuharmonijskih komponenti napona ne odgovara celobrojnom umnošku frekvencije osnovnog harmonika napona ($n \cdot 50\text{Hz}$, $n = 2, 3, \dots$). Istovremeno se mogu pojaviti međuharmonijske komponente napona bliskih frekvencija, što čini frekvencijski spektar širokopojasnim. Primena pretvarača frekvencije i sličnih kontrolnih uređaja pojačava prisustvo međuharmonijskih komponenti. U pojedinim slučajevima i međuharmonijske naponske komponente vrlo malih intenziteta mogu prouzrokovati pojavu naponskog treperenja.

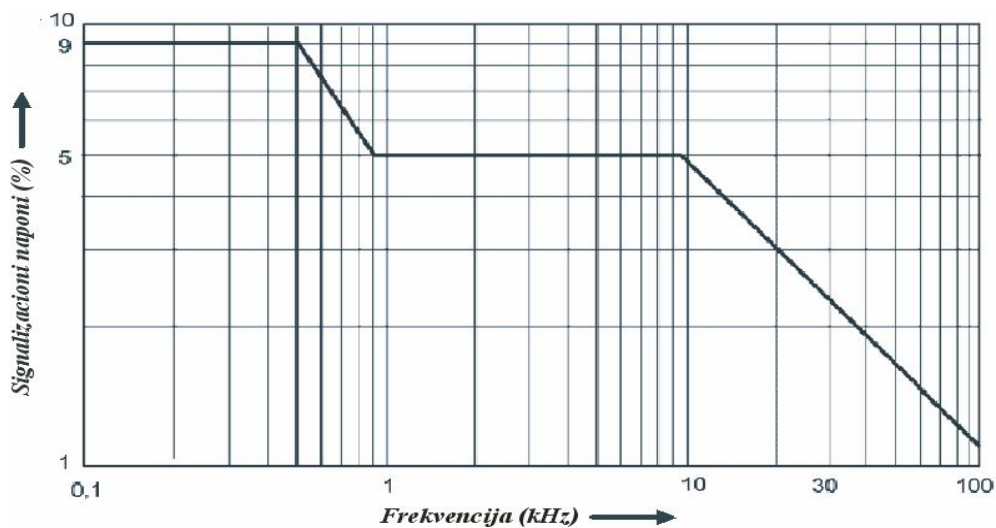
2.1.10. Upravljački signalizacioni naponi

Signalizacioni naponi su signali superponirani naponu napajanja koji se koriste za prenos informacija preko javne elektrodistributivne mreže. Upravljačke napone treba pažljivo i redovno kontrolisati, kako ne bi imali negativan uticaj na rad električnih uređaja potrošača priključenih na elektrodistributivnu mrežu. Razlikuju se sledeće tri osnovne kategorije signalizacionih napona:

- signali mrežnog tonfrekvencijskog upravljanja (MTU) – sinusni signalizacioni naponi superponirani mrežnom naponu, u frekvencijskom opsegu od 110Hz do 3kHz;
- signali frekvencije nosioca - sinusni signalizacioni naponi superponirani mrežnom naponu, u frekvencijskom opsegu od 34kHz do 148,5kHz;
- signalizacione oznake napona napajanja – kratkotrajne promene napona superponirane mrežnom naponu u odabranim vremenskim trenucima;

Za slučaj da distributeri električne energije koriste javnu elektroenergetsku mrežu za slanje signalizacionih i upravljačkih naponskih signala, u skladu sa preporukama standarda EN 50160, moraju se držati sledećeg pravila: unutar frekvencijskog opsega od 1kHz do 10kHz, 99% od svih

srednjih vrednosti signalizacionog napona, u trajanju od tri sekunde, tokom jednog dana ne smeju da premaše gornju granicu od 5% propisane nominalne vrednosti napona napajanja. Dozvoljene granične vrednosti ovih upravljačkih signalizacionih naponskih signala, u zavisnosti od vrednosti frekvencije signala, predstavljene su na slici 2.17. [58].



Slika 2.17. Propisane granične vrednosti signalizacionih napona u zavisnosti od frekvencije

3. STANDARDI KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Poslednjih godina postepeno dolazi do značajnih promena po pitanju društvenog značaja i organizacione strukture elektroenergetskog sektora. Pri tome u prvi plan dolaze procesi vezani za restrukturiranje i liberalizaciju na tržištu električne energije. Osnovne karakteristike ovih procesa jesu uključivanje i integracija širih geografskih područja u poslovanje električnom energijom, što podrazumeva i povećan broj učesnika na tržištu električne energije, veći obim transakcija i znatno veću količinu korisnih informacija i podataka koje treba razmeniti i obraditi. U uslovima porasta potrošnje električne energije i ograničenih resursa za njenu proizvodnju, izuzetno je važno stvoriti uslove potrebne za povećanje efikasnosti proizvodnje, distribucije i potrošnje električne energije, uz ukidanje monopola u ovoj privrednoj delatnosti i uz adekvatnu zaštitu životne sredine. Ovakav prilaz potiskuje tradicionalni koncept vertikalno i hijerarhijski organizovanih sistema, zasnovanih na centralizaciji i postepeno uvodi decentralizovani koncept poslovanja sa oštrom konkurencijom i jakim tržišnim mehanizmima, koji su praćeni adekvatnom normativno-zakonskom regulativom.

Standardi kvaliteta električne energije usvojeni od ovlašćenih međunarodnih organizacija su dokumenti koji propisuju nominalne referentne vrednosti i maksimalna prihvatljiva odstupanja relevantnih parametara i pokazatelja kvaliteta električne energije [7-15]. Postizanje i održavanje optimalnog nivoa kvaliteta elektroenergetskog sistema najvažniji su zadaci distributera električne energije. Bitni pokazatelji degradacije kvaliteta isporučene električne energije su eventualne žalbe potrošača, kao posledica raznih poremećaja u radu njihovih električnih uređaja. Distributerima se nameće potreba i obaveza da radi provere opravdanosti ovih pritužbi i brzog otklanjanja mogućih uzročnika degradacije kvaliteta električne energije, u svakom trenutku imaju detaljne informacije o kvalitetu svojih distributivnih mreža, uz kontinuirani monitoring parametara električne energije u skladu sa važećim preporukama i standardima kvaliteta. Na ovaj način obezbeđuju se uslovi za normalno funkcionisanje kompletnog elektrodistributivnog sistema, za preventivno obezbeđenje sredstava potrošača i ispunjenje svih prava i obaveza ugovorenih između distributera i potrošača.

Proces reorganizacije i restrukturiranja na tržištu električne energije u zemljama Evropske Unije zvanično je započet usvajanjem Direktive 96/92/EC, kojom je regulisano unutrašnje tržište električne energije na tadašnjoj teritoriji Evropske Unije, krajem 1996. godine. Primena direktive nakon pripreme i harmonizacije među članicama počela je 19. februara 1999 godine. Dalji period se karakteriše unapređenjem organizacije elektroenergetskog sektora u okviru Evropske Unije, što je rezultiralo usvajanjem nove Direktive Evropskog parlamenta 2003/54/EC o unutrašnjem tržištu

električne energije, u Briselu 2003. godine. Potpisivanjem Memoranduma o kreiranju regionalnog tržišta električne energije na teritoriji jugoistočne Evrope i njegovom integrisanju u interno tržište Evropske Unije, formiran je Atinski forum 15. novembra 2002. Memorandum je obavezao zemlje potpisnice, između ostalih i Srbiju, da pored organizovanja institucija potrebnih za funkcionisanje nacionalnih tržišta električne energije u skladu sa aktuelnom evropskom Direktivom o električnoj energiji 2003/54/EC, implementiraju sve neophodne pravne, organizacione i tehničke procedure i pravila usvojena poslednjih nekoliko godina u okviru institucija Evropske Unije. Cilj potpisivanja memoranduma bilo je stvaranje povoljnog okruženja i neophodnih uslova za regionalnu trgovinu energetskim proizvodima i uslugama. To znači obezbeđenje sigurnog snabdevanja svih potrošača električnom energijom i sigurnost investicionih ulaganja u nove proizvodne i prenosne energetske kapacitete, uz sprečavanje nacionalnih ili regionalnih monopola na tržištu električne energije [64].

3.1. Evropski standard kvaliteta električne energije EN 50160

Članovi međunarodne organizacije CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardisation), sa sedištem u Briselu, izradili su 1993. godine prednacrt evropskog standarda za kvalitet električne energije EN 50160 (Voltage characteristics of electricity supplied by the public distribution systems). Glavni zadatak usvajanja dokumenta bilo je otklanjanje unutrašnjih granica za elektrotehničke proizvode i usluge u okviru teritorije zemalja članica Evropske Unije. Standard EN 50160 propisuje merenje parametara mrežnog napona na mestima predaje električne energije potrošačima u niskonaponskim i srednjenaponskim mrežama pri normalnim uslovima rada [7-9].

CENELEC su tada činili nacionalni elektrotehnički odbori iz osamnaest zemalja članica: Belgije, Danske, Finske, Austrije, Francuske, Grčke, Irske, Islanda, Italije, Norveške, Portugalije, Holandije, Švajcarske, Švedske, Španije, Luksemburga, Nemačke i Engleske. Evropski standard kvaliteta EN 50160 zvanično je prihvaćen 5. aprila 1994. godine. Pri tome, članice organizacije su obavezane da najkasnije do 15. aprila 1995. godine izrade svoje nacionalne verzije standarda i da zvanično povuku iz upotrebe do tada važeće nacionalne norme i standarde za kvalitet. CENELEC danas uključuje 22 stalne članice iz Evropske Unije i 13 pridruženih zemalja članica iz okruženja.

Zemlje članice CENELEC-a su u obavezi da poštuju pravilnik organizacije, koji precizno definiše uslove pod kojima se ovom evropskom standardu bez ikakvih promena može dati status nacionalnog standarda. Kompletan pregled nacionalnih normi proisteklih iz standarda EN 50160, zajedno sa njihovim osnovnim bibliografskim podacima, može se dobiti po posebnom zahtevu od osnovnih organa CENELEC-a ili od njegovih zemalja članica. Standard EN 50160 zvanično se na teritoriji Evropske Unije koristi u službenim verzijama na engleskom, nemačkom ili francuskom jeziku. Isti status kao i tri službene verzije imaju i druge verzije nastale prevodom izvornog teksta standarda EN 50160 na neki od jezika zemalja članica organizacije, što podrazumeva i obaveznu proveru verodostojnosti tog prevedenog materijala od strane odgovarajućih organa organizacije.

3.1.1. Osnovne karakteristike standarda EN 50160

Standard kvaliteta električne energije EN 50160 definiše i propisuje merenje parametara i pokazatelja kvaliteta mrežnog napona na mestu isporuke električne energije krajnjim potrošačima u niskonaponskim (do 1kV AC) i sredjenaponskim elektroenergetskim mrežama (1 - 35kV AC), pri normalnim radnim uslovima. Osnovni zadatak primene odredaba propisanih ovim standardom je opis i utvrđivanje relevantnih karakteristika napona napajanja, koje se tiču mrežne frekvencije, trenutnih efektivnih vrednosti i simetričnosti talasnih oblika trofaznih napona elektrodistributivne mreže. Standard kvaliteta električne energije EN 50160 propisuje dozvoljene granične vrednosti i kontrolna vremena merenja sledećih bitnih parametara i poremećaja kvaliteta napona napajanja:

- varijacije mrežne frekvencije;
- spore promene napona napajanja;
- padovi i propadi napona napajanja (≤ 1 min);
- kratki prekidi napajanja (≤ 3 min);
- neočekivani, dugi prekidi napajanja (> 3 min);
- privremeni i tranzijentni previsoki naponi;
- kratkotrajno P_{st} i dugotrajno P_{lt} treperenje (fliker);
- naponsko-fazna nesimetričnost;
- harmonijske i međuharmonijske komponente napona;
- naponi za signaliziranje (ripple control);

Naponske karakteristike su tokom vremena podložne manjim ili većim promenama, usled varijacija opterećenja potrošača priključenih na mrežu ili kao posledica kvarova i poremećaja u mreži, najčešće izazvanih spoljašnjim uticajima. Obzirom na to može se zaključiti da su u pitanju naponske promene sa izrazito slučajnim karakterom, kako u pogledu vremenske zavisnosti, tako i zavisno od geografskog položaja posmatranih mrežnih lokacija. Pojedini događaji sa negativnim uticajem na kvalitet napona potpuno su nepredvidivi, pa za neke naponske parametre jednostavno nije moguće definisati stabilne prihvatljive granične vrednosti. Samim tim, dozvoljene tolerancije za neke od pokazatelja kvaliteta mrežnog napona, definisanih preporukama standarda EN 50160, kakvi su naponski prekidi ili propadi napona, pre svega treba shvatiti kao orijentacione vrednosti. Prihvatljive granične vrednosti, vremena merenja, kao i kontrolni periodi parametara i pokazatelja kvaliteta mrežnog napona, propisani prema standardu EN 50160, prikazani su u tabeli 3.1. [7-9].

Standard EN 50160 posebno propisuje prihvatljive granične vrednosti viših harmonijskih komponenti napona napajanja od 2. do 40. reda. Po pravilu, pri normalnim radnim uslovima 95% desetominutnih srednjih efektivnih vrednosti napona svake pojedinačne harmonijske komponente u toku vremenskog intervala od sedam dana, ne sme da premašuje dozvoljene granične vrednosti prikazane u tabeli 3.2. Dozvoljena vrednost za ukupno naponsko harmonijsko izobličenje THD, dobijena na osnovu vrednosti viših harmonika napona do 40. reda, prikazana je u datoj tabeli 3.1.

i ne treba da prekorači 8% od nominalne vrednosti napona napajanja. U tabeli 3.2. nisu posebno navedene dozvoljene granice viših harmonijskih komponenata mrežnog napona preko 25. reda, budući da su ovi viši harmonici napona zanemarljivo malih vrednosti.

Pokazatelji kvaliteta mrežnog napona	Prihvatljive granične vrednosti	Interval merenja	Kontrolni period
Varijacije mrežne frekvencije	49.5Hz do 50.5Hz	10 s	1 nedelja
Spore promene napona	230V ± 10%	10 min	1 nedelja
Padovi i propadi napona (≤1min)	10 do 1000 puta godišnje (ispod 85% od nominalne vrednosti)	10 ms	1 godina
Kratki prekidi napajanja (≤3min)	10 do 100 puta godišnje (ispod 1% od nominalne vrednosti)	10 ms	1 godina
Neočekivani, dugi prekidi (>3min)	10 do 50 puta godišnje (ispod 1% nominalne vrednosti)	10 ms	1 godina
Privremeni prenaponi (faza-uzemljenje)	prosečno < 1.5kV	10 ms	nije propisano
Tranzijentni prenaponi (faza-uzemljenje)	prosečno < 6kV	nije propisano	nije propisano
Kratkotrajno treperenje P_{st} (flikler)	nije propisano	10 min	nije propisano
Dugotrajno treperenje P_{lt} (flikler)	$P_{lt} < 1$	120 min	1 nedelja
Naponsko-fazna nesimetrija	prosečno 2% - 3%	10 min	1 nedelja
Ukupno harmonijsko izobličenje (THD)	8% ukupnog harmonijskog izobličenja	10 min	1 nedelja
Naponi signaliziranja	< 5% od nominalne vrednosti u opsegu 1kHz –10kHz	3 s	1 dan

Tabela 3.1. Prihvatljive granične vrednosti i vremena merenja osnovnih pokazatelja kvaliteta napona napajanja propisani odredbama standarda EN 50160

Neparni viši harmonici napona				Parni viši harmonici napona	
nije umnožak od 3		umnožak od 3			
red harmonika	dozvoljena vrednost	red harmonika	dozvoljena vrednost	red harmonika	dozvoljena vrednost
5.	6%	3.	5%	2.	2%
7.	5%	9.	1.5%	4.	1%
11.	3.5%	15.	0.5%	6.	0.5%
13.	3%	21.	0.5%	8.	0.5%
17.	2%	-	-	10.	0.5%
19.	1.5%	-	-	12.	0.5%
23.	1.5%	-	-	14.	0.5%
25.	1.5%	-	-	16. do 24.	0.5%

Tabela 3.2. Prihvatljive granične vrednosti viših harmonika napona napajanja od 2. do 25. reda propisane standardom EN 50160

Propisana su i sledeća ograničenja kada zahtevi definisani odredbama standarda kvaliteta električne energije EN 50160, nisu obavezujući za distributere električne energije:

- slučaj pojave kvara ili poremećaja u nekom delu elektroenergetske mreže ili planskog prekida napajanja, kada se prelazi na privremene mere u snabdevanju potrošača, kako bi se vreme trajanja prekida napajanja usled otklanjanja kvarova ili održavanja mreže moglo svesti na najmanju moguću meru;
- slučaj pri kome električni uređaji ili oprema potrošača ne ispunjavaju potrebne uslove ili tehničke zahteve neophodne za priključenje na elektroenergetsku mrežu ili kada su premašene granične vrednosti smetnji koje se prenose mrežnim provodnicima;
- slučaj kada fabrički pogon za proizvodnju ili neko postrojenje potrošača ne ispunjava neophodne tehničke zahteve i uslove za priključenje na elektroenergetsku mrežu;
- kod vanrednih događaja na koje distributer električne energije ne može uticati, i to:
 - iznenadnih vremenskih nepogoda ili prirodnih katastrofa;
 - smetnji i poremećaja koji su prouzrokovani od treće strane;
 - u slučaju vanrednih mera donešenih od strane organa vlasti;
 - radnih sporova vođenih prema zakonskim odredbama;
 - ograničenja kapaciteta za napajanje pod uticajem spoljašnjih faktora;

Prihvatljive granične vrednosti parametara kvaliteta električne energije, propisane prema standardu EN 50160, prikazane u tabelama 3.1 i 3.2, dosta su široke i moraju biti zadovoljene u 95% vremenskog perioda tokom kojeg se parametri kontrolišu. Za preostalih 5% od vremenskog intervala kontrole dozvoljene granice parametara kvaliteta su znatno šire ili čak nisu ni propisane. Primera radi, nominalna vrednost mrežne frekvencije, prema standardu EN 50160, jeste 50Hz. Pri normalnim radnim uslovima, desetosekundna srednja vrednost osnovne frekvencije napona napajanja elektrodistributivne mreže mora se nalaziti u sledećim graničnim opsezima [7-9]:

- kod distributivnih mreža koje su u sklopu elektroenergetskog sistema: 50Hz \pm 1% (od 49,5Hz do 50,5Hz) tokom 95% kontrolnog vremenskog perioda od jedne nedelje, tj. 50Hz +4%/-6% (od 47Hz do 52Hz) tokom preostalih 5% vremenskog intervala;
- kod distributivnih mreža koje ne rade u sklopu elektroenergetskog sistema 50Hz \pm 2% (od 49Hz do 51Hz) tokom 95% kontrolnog vremenskog perioda od jedne nedelje; tj. 50Hz \pm 15% (od 42,5Hz do 57,5Hz) tokom preostalih 5% vremenskog intervala;

Dozvoljeno odstupanje nominalne efektivne vrednosti napona napajanja, prema standardu EN 50160, jeste 230V \pm 10% (od 207V do 253V) tokom 95% kontrolnog vremenskog perioda od nedelju dana, odnosno 230V +10%/-15% (od 195,5V do 253V) tokom preostalih 5% intervala.

Standard EN 50160 je kompromis između distributera i potrošača električne energije, koji definiše minimalne uslove koje isporučilac električne energije mora da zadovolji da bi obezbedio pouzdano snabdevanje potrošača kvalitetnom električnom energijom. Ukoliko pojedini potrošači imaju strožije zahteve po pitanju kvaliteta isporučene električne energije od onih koji su određeni standardom EN 50160, mora se napraviti poseban ugovor između distributera i takvih potrošača.

3.2. Standard Međunarodne elektrotehničke komisije IEC 61000

Pored vrednosti parametara mrežnog napona, za obezbeđenje kvaliteta električne energije od značaja je i karakter opterećenja potrošača priključenih na elektroenergetsku mrežu. Ogroman broj poremećaja koji utiču na degradaciju kvaliteta električne energije uzrokovani su električnim uređajima i opremom potrošača. Mnogi uređaji koji se danas koriste nelinearnih su karakteristika, a pad napona koji se na njima pojavljuje nije linearno srazmeran ulaznoj struji. Nelinearni padovi napona se superponiraju osnovnom harmoniku napona napajanja frekvencije 50Hz, što uzrokuje pojavu nelinearnih naponskih izobličenja i narušava kvalitet napajanja ostalih potrošača u mreži.

Preporuke koje razmatraju karakter opterećenja u elektroenergetskim mrežama propisane su standardom elektromagnetne kompatibilnosti IEC 61000 (Electromagnetic compatibility EMC standard), koji je predložen od strane Međunarodne elektrotehničke komisije (IEC – International Electrotechnical Commission). IEC 61000 objedinjuje niz preporuka vezanih za elektromagnetnu

kompatibilnost i u zavisnosti od sadržaja, podeljen je na više podoblasti. Neke od karakterističnih preporuka standarda, uključujući oznake i kratak opis sadržaja, prikazane su u tabeli 3.3. [10,11].

Preporuka standarda IEC 61000	Pun naziv preporuke
IEC 61000-2-2	Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public LV power supply systems
IEC 61000-3-2	Limits for harmonic current emissions equipment input current $\leq 16A$ per phase
IEC 61000-3-3	Limitation of voltage changes, voltage fluctuations and flicker in public low-voltage supply systems, for equipment with rated current $\leq 16A$ per phase
IEC 61000-3-4	Limitation of emission of harmonic currents in low voltage power supply systems for equipment with rated current $> 16A$
IEC 61000-3-6	Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems
IEC 61000-3-7	Assessment of emission limits for fluctuating loads in MV and HV power systems
IEC 61000-4-5	Testing and measurement techniques - Surge immunity test
IEC 61000-4-7	General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto
IEC 61000-4-11	Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests
IEC 61000-4-15	Flickermeter - functional and design specifications
IEC 61000-4-30	Power quality measurement methods

Tabela 3.3. Pojedine preporuke standarda IEC 61000 sa oznakama i punim nazivima

Preporuke IEC 61000-3-2, IEC 61000-3-4 i IEC 61000-3-6 definišu prihvatljive vrednosti viših strujnih harmonika koje električni uređaji potrošača smeju da emituju u distributivnu mrežu tako da ne uzrokuju poremećaje u normalnom funkcionisanju drugih uređaja povezanih na mrežu.

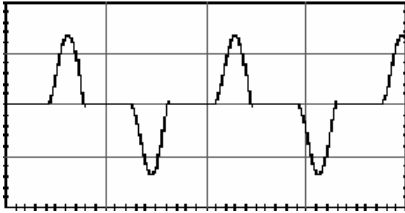
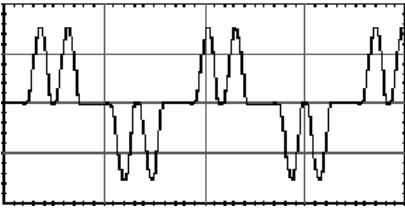
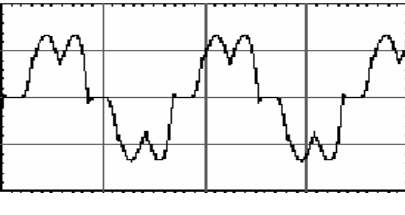
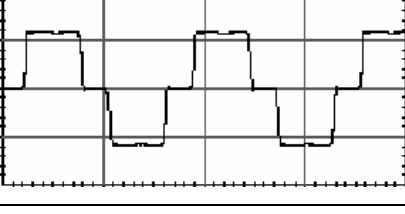
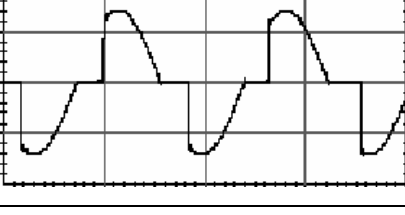
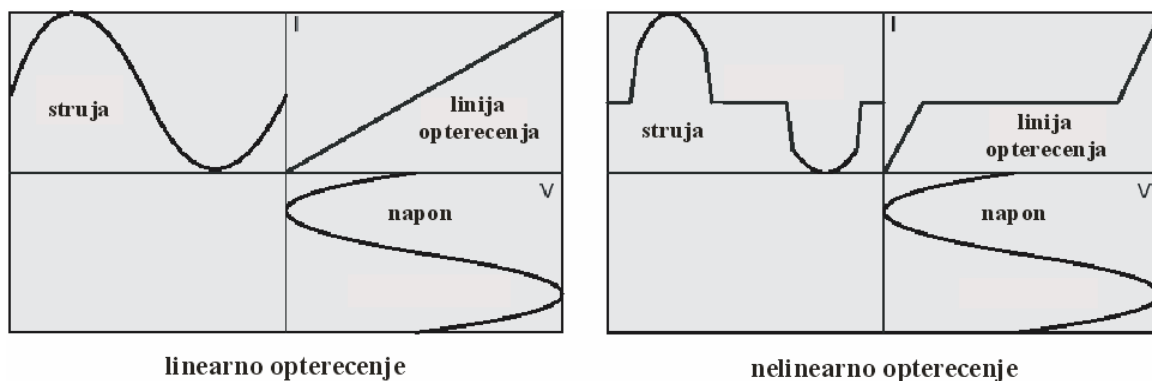
Vrsta uređaja priključenog na mrežu	Tipični talasni oblik struje	Prosečno ukupno harmonijsko izobličenje (THD)
monofazni uređaj za napajanje (ispravljač i kondenzator)		80% (veliki udeo 3. harmonika)
ispravljač sa kondenzatorom bez induktivnosti		80%
ispravljač sa kondenzatorom i sa induktivnošću		40%
strujni ispravljač sa velikom induktivnošću		28%
regulator AC napona		promenljiva vrednost

Tabela 3.4. Primeri nekih od tipičnih potrošača koji generišu više strujne harmonike



Slika 3.1. Princip generisanja viših harmonika struje nelinearnih opterećenja potrošača

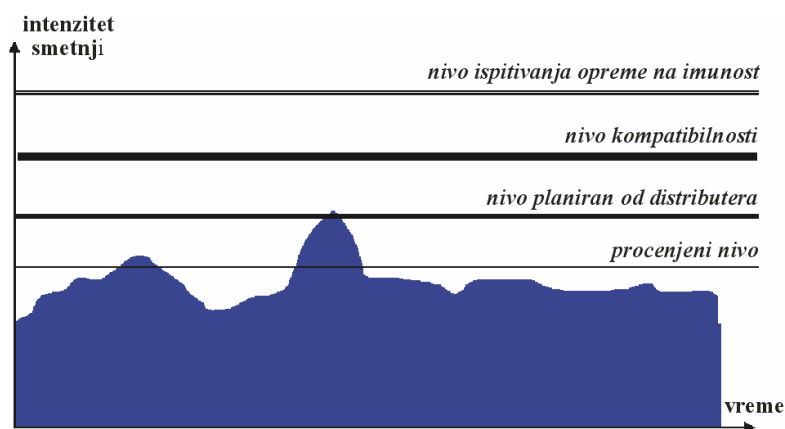
Neki od karakterističnih potrošača kojima se generišu viši harmonici struje prikazani su u tabeli 3.4. [58]. Slika 3.1. prikazuje generisanje viših strujnih harmonika nelinearnih opterećenja.

IEC 61000-3-2 (Limits for harmonic current emissions equipment input current $\leq 16A$ per phase) propisuje granične vrednosti viših strujnih harmonika koje u niskonaponsku distributivnu mrežu emituje oprema potrošača čija nominalna ulazna struja ne prelazi vrednost od 16A po fazi. Ovo je karakteristika većine potrošačkih uređaja koji se svakodnevno primenjuju u domaćinstvu.

IEC 61000-3-4 (Limitation of emission of harmonic currents in low voltage power supply systems for equipment with rated current $>16A$) propisuje granice viših strujnih harmonika koje u javnu niskonaponsku distributivnu mrežu smeju da emituju jednofazni potrošači čija nominalna struja premašuje vrednost od 16A. Obzirom da ovi potrošači imaju značajan uticaj na energetska mrežu na koju su povezani, u mnogim situacijama distributeri električne energije traže ispunjenje nekih posebnih uslova, kako bi pomenute potrošače povezali na elektrodistributivnu mrežu. Ova preporuka nudi informacije koje mogu biti od koristi distributerima u proceni da li se i pod kojim uslovima pojedini uređaji i oprema potrošača mogu normalno priključiti na distributivnu mrežu.

IEC 61000-3-6 (Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems) propisuje uputstva distributerima električne energije kako i pod kojim uslovima treba na javnu distributivnu mrežu priključivati postrojenja i opremu potrošača koji su u stanju da izazovu harmonijska i međuharmonijska izobličenja u srednjenaponskim i visokonaponskim mrežama na koje se priključuju. Preporukom su uglavnom definisana naponska harmonijska izobličenja, mada se navode i neke karakteristične vrednosti za ograničenje viših strujnih harmonijskih komponenti.

Princip prema kome se standardima određuju dozvoljene granične vrednosti smetnji (nivo kompatibilnosti) grafički je predstavljen na slici 3.2. Prilikom projektovanja elektrodistributivnih mreža treba krenuti od nešto strožijih kriterijuma nego što se to standardima propisuje, kako bi za slučaj prekoračenja specificiranih graničnih vrednosti pojedinih parametara kvaliteta distributivni sistem bio imun na moguće smetnje ili poremećaje pri njegovom normalnom funkcionisanju [12].



Slika 3.2. Granične vrednosti intenziteta smetnji koje se propisuju standardima

3.3. IEEE standardi kvaliteta električne energije

Prestižna međunarodna organizacija inženjera iz oblasti elektrotehnike i elektronike IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) obrazovala je nekoliko namenskih radnih grupa, zaduženih za standardizaciju na polju merenja i analize kvaliteta električne energije. Koordinaciju aktivnosti obavljalo je specijalizovano telo IEEE SCC-22 (Standards Coordinating Committee on Power Quality). Krajnji rezultat ovih aktivnosti bilo je usvajanje više standarda u oblasti kontrole kvaliteta električne energije. Neki od karakterističnih IEEE standarda kvaliteta, sa odgovarajućim oznakama, godinama prihvatanja i punim nazivima standarda, predstavljeni su u tabeli 3.5. [13].

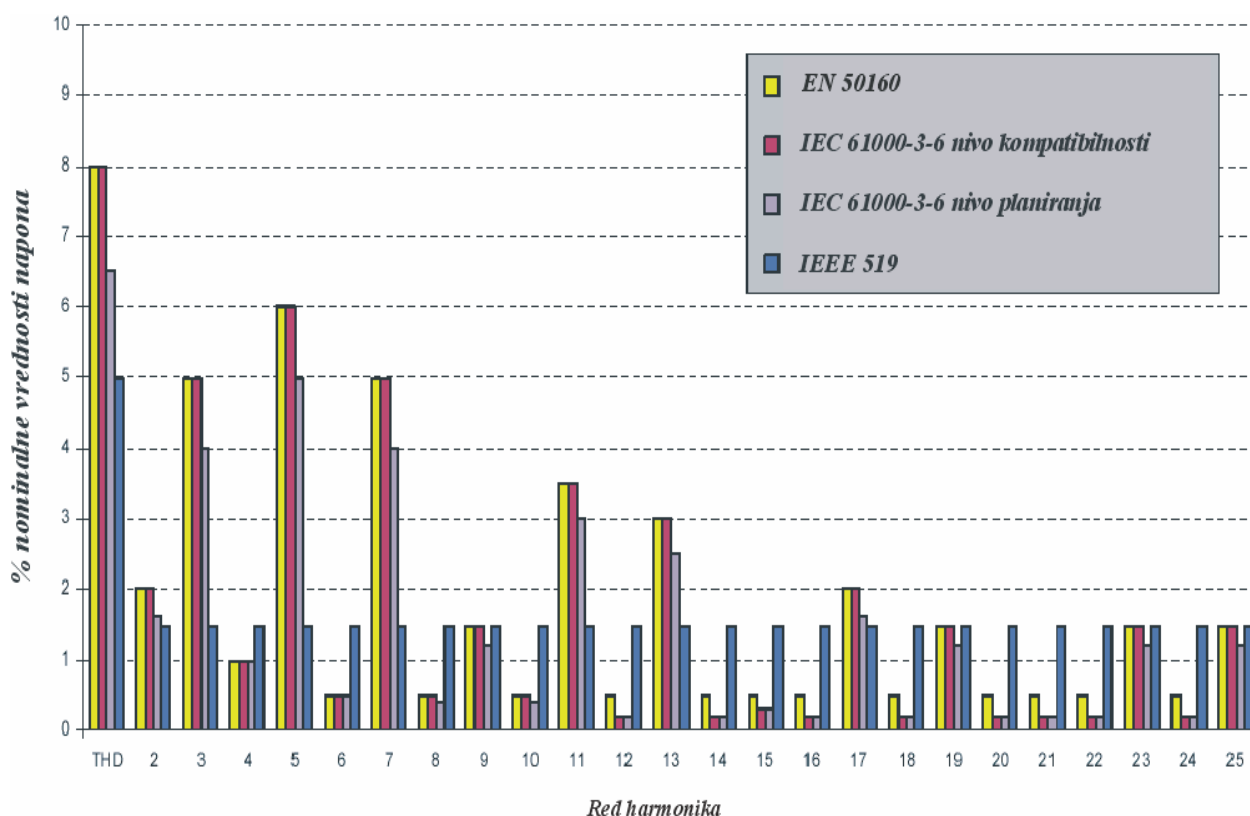
IEEE standard	Pun naziv standarda
IEEE 142-1991	Recommended practice for grounding of industrial and commercial power systems
IEEE 519-1992	Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems
IEEE 141-1993	Recommended practice for electric power distribution for industrial plants
IEEE 1159-1995	Recommended practice for monitoring electric power quality
IEEE 1250-1995	Guide for service to equipment sensitive to momentary voltage disturbances
IEEE 446-1995	Recommended practice for emergency and standby power systems for industrial and commercial applications
IEEE 493-1997	Recommended practice for the design of reliable industrial and commercial power systems
IEEE 1346-1998	Recommended practice for evaluating electric power system compatibility with electronic process equipment
IEEE 1100-1999	Recommended practice for powering and grounding electronic equipment
IEEE 487-2000	Recommended practice for the protection of wire-line communication facilities serving electric supply locations

Tabela 3.5. IEEE standardi kvaliteta električne energije sa oznakama i punim nazivima

3.3.1. Američki standard kvaliteta IEEE 519-1992

IEEE 519 (Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems) je američki standard koji definiše dozvoljene granične vrednosti viših harmonika napona i struje, na naponskim nivoima počev od niskog napona pa sve do vrednosti iznad 161kV. Standard posebno propisuje granične vrednosti viših harmonika struje koje uređaji ili postrojenja potrošača smeju emitovati u distributivnu mrežu na koju su priključeni. Dozvoljene granice viših strujnih harmonika zavise od veličine napona na mestu priključenja uređaja na mrežu, a vrednosti su propisane u relativnom odnosu na prosečnu maksimalnu struju opterećenja potrošača [14,15].

Poređenje prihvatljivih graničnih vrednosti viših harmonijskih komponenti napona od 2. do 25. reda, kao i ukupnog harmonijskog izobličenja, propisanih preporukama standarda kvaliteta EN 50160, IEC 61000-3-6 i IEEE 519-1992, grafički je predstavljeno na slici 3.3. [59].



Slika 3.3. Poređenje standarda kvaliteta EN 50160, IEC 61000-3-6 i IEEE 519 obzirom na propisane dozvoljene vrednosti viših harmonika napona

3.4. Uporedne karakteristike standarda kvaliteta

Uporedni pregled najvažnijih karakteristika i zahteva aktuelnih međunarodnih standarda kvaliteta električne energije EN 50160, IEC 61000 i IEEE 519, obzirom na propisane dozvoljene vrednosti tehničkih parametara i pokazatelja kvaliteta mrežnog napona i nivo elektromagnetne kompatibilnosti (EMC), dat je u tabeli 3.6. [28].

Karakteristika	Kvalitet mrežnog napona	EMC	
		IEC	IEEE
Organizacija	CENELEC	IEC	IEEE
Standard	EN 50160	IEC 61000	IEEE 519
Područje primene	NN i SN	NN	SN i VN
Promene napona	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$	-
Nesimetričnost	2% (3%)	2%	-
Viši harmonici	0,5% do 6% (tabela)	0,2% do 6% (tabela)	3% (< 69kV)
			1,5% (<161kV)
			1% (>161kV)
THD	8%	8%	5% (< 69kV)
			2,5% (<161kV)
			1,5% (>161kV)
Međuharmonici	-	0,2%	-
Signalizacioni naponi	< 5% u opsegu 1kHz –10kHz	-	-
Fliker	$P_{it} < 1$	grafičko ograničenje	grafičko ograničenje
Kratki prekidi	10 do 100 puta godišnje	-	-
Dugi prekidi	10 do 100 puta godišnje	-	-
Propadi napona	10 do 1000 puta godišnje	1 do 4 puta mesečno	-
Mrežna frekvencija	$\pm 1\%$ (+4% /- 6%)	$\pm 1\text{Hz}$	-
Mrežni prenaponi	< 1,5kV (NN) < 2V _n (SN)	-	-
Tranzijentni prenaponi	< 6kV (NN)	-	-

Tabela 3.6. Uporedni pregled zahteva standarda EN 50160, IEC 61000 i IEEE 519

4. UREĐAJI ZA MERENJE KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Pouzdana i efikasna kontrola procesa prenosa i potrošnje električne energije podrazumeva projektovanje i realizaciju merno-informacionog sistema za kontinuirani monitoring i metrološko obezbeđenje kvaliteta isporučene električne energije na različitim lokacijama elektrodistributivne mreže [16-23]. Dugogodišnja praksa pokazuje da se merenja parametara i pokazatelja kvaliteta električne energije najčešće obavljaju po posebnim zahtevima potrošača, pri ekscesnim uslovima rada, usled eventualnih poremećaja elektrodistributivnog sistema i pri postupcima rekonstrukcije ili remonta pojedinih delova elektrodistributivne mreže. U takvim uslovima, osim ako tokom samog merenja ne dođe do prekida u napajanju potrošača električnom energijom, praktično nije moguće precizno utvrditi prave uzroke nastalih problema. Ovakav pristup u održavanju kvaliteta elektroenergetske mreže koji ne podrazumeva ozbiljnu analizu i obradu informacija i podataka dobijenih merenjem, ne pruža mogućnost preventivnog obezbeđenja i zaštite potrošača električne energije i kompletne elektrodistributivne mreže od eventualno mogućih poremećaja i problema tokom funkcionisanja.

Degradacija kvaliteta isporučene električne energije negativno utiče kako na finansijske troškove tehnoloških procesa proizvodnje, tako i na smanjenje efikasnosti distribucije i potrošnje električne energije. Najveće probleme izazivaju prekidi u napajanju potrošača i više harmonijske komponente mrežnog napona. Štete usled prekida u napajanju nastaju kao posledica narušavanja normalnih aktivnosti potrošača ili zbog eventualnog stvaranja škarta kada se radi o neplaniranom prekidu proizvodnje. Kod samih distributera električne energije finansijski troškovi jesu rezultat neostvarenog profita od prodaje električne energije i eventualne finansijske nadoknade pojedinim kategorijama potrošača, ako se to predviđa ugovorom potpisanim između distributera i potrošača. Ukupna procenjena šteta usled prekida napajanja potrošača u Severnoj Americi kreće se oko 150 milijardi dolara godišnje, dok su troškovi koji su posledica lošijeg kvaliteta isporučene električne energije reda 40 milijardi dolara u Americi i 20 do 30 milijardi dolara u Evropi. Većina troškova vezanih za nekvalitetno napajanje posledica je gubitaka prouzrokovanih višim harmonicima [65].

Većina naponskih prekida i propada napona napajanja javlja se tokom prenosa električne energije između distributera i potrošača, pa odgovornost za ove poremećaje leži na distributivnim preduzećima. Sa druge strane, za probleme uzrokovane višim harmonicima su u najvećem broju slučajeva odgovorni potrošači električne energije. Bitni indikatori degradacije kvaliteta električne energije su žalbe potrošača koji registruju probleme pri funkcionisanju svojih električnih aparata.

Na osnovu tih žalbu pristupa se merenju na delu elektroenergetske mreže gde je potrošač uvideo smetnje. Jedan od razloga za konstantno ili bar povremeno praćenje kvaliteta isporuke električne energije jeste upravo eliminacija uzroka mogućih pritužbi potrošača na loš kvalitet napajanja. Na bazi rezultata merenja sprovedenih u skladu sa relevantnim preporukama za kvalitet (EN 50160), utvrđuje se opravdanost pritužbe potrošača, kao i mogući uzrok poremećaja. Pri tome posebno je važno utvrditi ko je odgovoran za nastale probleme, odnosno da li oni potiču iz elektroenergetske mreže ili su posledica emisije viših harmonika struje nelinearnih opterećenja od strane potrošača.

Razvoj i širenje globalne internet računarske mreže omogućavaju da se pored standardnih primena za prikupljanje, razmenu i obradu različitih tipova podataka i informacija, ona iskoristi za realizaciju kompletnih merno-informacionih sistema za nadzor i upravljanje u različitim procesima. Ta mogućnost posebno dobija na važnosti u slučajevima kada se zahteva prikupljanje mernih podataka iz većeg broja prostorno udaljenih distribuiranih mernih tačaka. Povezivanjem geografski udaljenih mernih tačaka, odnosno mernih stanica preko globalne računarske mreže u kompletan sistem, upravljani iz zajedničkog kontrolnog centra, formiraju se distribuirani merno-informacioni sistemi. Generalno, distribuirani merni sistemi za prikupljanje i obradu mernih podataka uključuju veći broj mernih instrumenata, koji prihvataju signale sa mernih pretvarača, obrađuju ih, memorišu i prenose, uz podršku odgovarajućeg softvera za upravljanje akvizicijom, analizu i grafičku prezentaciju mernih podataka. Prikupljanje mernih podataka može se vršiti u ekvidistantnim vremenskim intervalima, ali može biti inicirano i nekim konkretnim događajem. Recimo, prilikom promene nekog od parametara koji se kontinualno kontrolišu iznad dozvoljene granične vrednosti, može se startovati prikupljanje većih količina mernih podataka, sa većom frekvencijom uzorkovanja [16,20-22].

Aktivan pristup problematici obezbeđenja kvaliteta električne energije znači kontinualno merenje standardizovanih parametara i pokazatelja kvaliteta mrežnog napona na bazi većeg broja distribuiranih udaljenih mernih stanica kontrolisanih iz jedinstvenog centra isporučioaca električne energije. Uz detaljnu statističku analizu i obradu mernih informacija, hronološko memorisanje i prezentaciju rezultata, obezbeđuje se centralizovani monitoring distribucije i potrošnje električne energije, sa detekcijom štetnih pojava na kritičnim mrežnim lokacijama. Analizom i korelacijom mernih podataka primljenih i procesiranih u kontrolnom centru glavni uzroci specifičnih mrežnih poremećaja i degradacije kvaliteta električne energije mogu se precizno lokalizovati i eventualno eliminisati. Takođe, ovi podaci su od značaja za plansko održavanje elektrodistributivnog sistema čime bi se eventualni mrežni poremećaji mogli predvideti i blagovremeno predupređiti [17-19].

4.1. Pristup problematici merenja kvaliteta električne energije

Prvi korak u pristupu problemu nadzora tehničkih parametara kvaliteta električne energije je utvrđivanje većeg broja test lokacija za postavljanje izdvojenih mernih stanica. U skladu sa tim treba obezbediti adekvatnu tehničku opremu na bazi savremenih komunikacionih i informacionih

tehnologija i osposobljen tehnički kadar, koji mora biti u stanju da rešava predviđene zadatke i da preduzima preventivne i korektivne mere po pitanju obezbeđenja i održavanja kvaliteta električne energije. Čak i kada je na raspolaganju najbolja oprema za merenje i analizu parametara kvaliteta neophodan je dobro edukovan personal za njeno pravilno i efikasno korišćenje. Instalirana merna oprema na utvrđenim mrežnim lokacijama koja nije dobro izabrana ne može obezbediti pouzdane informacije o vrednostima kvalitativnih parametara električne energije koji se mere i analiziraju.

Rezultati merenja parametara kvaliteta električne energije pouzdaniji su za slučaj kada se merenja obavljaju simultano na više različitih lokacija. Merni podaci dobijeni na ovaj način su od značaja za detekciju prirode problema degradacije kvaliteta električne energije i njegovog uzroka na najbrži mogući način. Ako ova simultana merenja nisu izvodljiva zbog cene ili drugih razloga, svaka lokacija mora se individualno kontrolisati, vodeći računa da budu obezbeđeni isti referentni uslovi za funkcionisanje svih mernih stanica, kako bi rezultati merenja bili uporedivi. Ukupni broj mernih lokacija zavisi od prirode procenjenih mogućih poremećaja i od uticaja uređaja potrošača, priključenih na distributivnu mrežu. Najbolji pristup problemima obezbeđenja kvaliteta električne energije podrazumeva da se najpre kontroliše kvalitet električne energije na lokacijama što bližim uticajnom postrojenju ili uređajima potrošača. Kada se detektuje degradacija parametara kvaliteta tačku ispitivanja treba pomeriti unazad prema distributeru električne energije primenom postupka eliminacije. Praktično, na svim mernim lokacijama mora se pouzdano utvrditi da li je registrovana degradacija kvaliteta isporučene električne energije nastala kao rezultat nelinearnih karakteristika opterećenja pojedinih kategorija potrošača povezanih na elektrodistributivnu mrežu, ili potiče od samog isporučioaca električne energije kao posledica lošeg kvaliteta mrežnog napajanja potrošača.

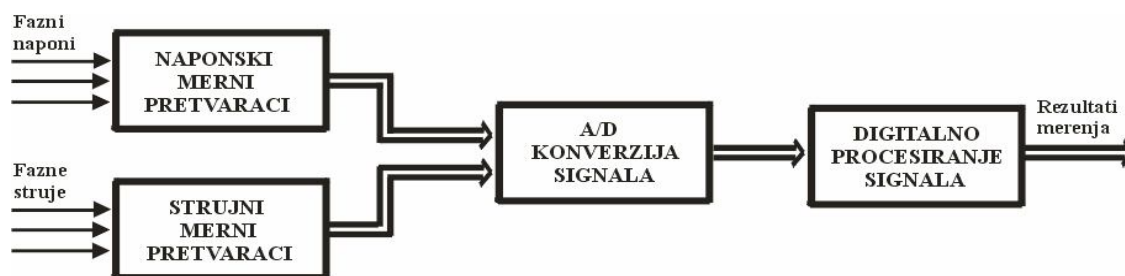
Postavljanje mernih uređaja za prikupljanje relevantnih podataka najkritičniji je segment u postupku kontrole kvaliteta električne energije. Pre svega, treba ispoštovati utvrđena pravila za bezbednost ljudstva i opreme. U većem broju slučajeva napajanu opremu nije moguće isključiti sa elektrodistributivne mreže tokom povezivanja mernog uređaja, obzirom da krajnji potrošači teško prihvataju bezuslovno isključivanje mrežnog napajanja. Uklanjanje zaštitnih poklopaca sa rastavljačkih i razvodnih tabli zahteva pažljivu proceduru i vrlo dobru koncentraciju operatera. Takođe, oprema za zaštitu personala neophodna je komponenta pri kontroli kvaliteta električne energije. Potreban minimum propisane zaštitne opreme su: zaštitne rukavice, zaštitne naočare i protivpožarna odeća. Kada se postavljaju sonde instrumenata važno je obezbediti prisustvo još nekog lica u okolini radnog prostora. Drugo lice ne mora biti u potpunosti obučeno za konkretna merenja parametara kvaliteta, ali mora posedovati osnovna znanja o mogućim opasnostima i neželjenim električnim dejstvima, koja se mogu javiti usled nestručnosti, nepažnje i nepoštovanja definisanih propisa. Pomenuti zahtevi direktno utiču na visinu potrebnih materijalnih troškova za obezbeđenje poslova oko monitoringa parametara kvaliteta električne energije, ali se eventualne uštede ne smeju pronalaziti u smanjenju bezbednosti i zaštite angažovanog personala [23,28].

4.2. Uređaji za merenje parametara kvaliteta električne energije

Validni dokazi koji potvrđuju ispunjenost tehničkih preduslova potrebnih za obezbeđenje optimalnog kvaliteta elektrodistributivnog sistema, važnih sa stanovišta ugovorenih međusobnih prava i obaveza distributera i potrošača, mogu se obezbediti isključivo objektivnim kontinualnim monitoringom sa odgovarajućim metrološki overenim uređajima za merenje parametara kvaliteta. Danas je na tržištu prisutan veliki broj različitih tipova merila kvaliteta električne energije, kakvi su, na primer, analizatori parametara kvaliteta mrežnog napajanja tipa LEM, Fluke 433/434, Circutor ili Chauvin Arnoux CA 8332/8334 - Power quality analyzers, bazirani na sofisticiranim mikroračunarskim rešenjima za kontinuirano merenje i softverski podržanu analizu rezultata merenja definisanih parametara kvaliteta električne energije [24-27].

Većina ovih instrumenata programirana je za rad u skladu sa standardima i preporukama kvaliteta električne energije, najčešće EN 50160 i IEC 61000, pa se izveštaj o kvalitetu napajanja na posmatranoj lokaciji distributivne mreže, prema pomenutim standardima, uz odgovarajuću računarsku i programsku podršku, dobija automatski. Direktna dvosmerna komunikacija ovih mernih instrumenata sa standardnim računarima najčešće se obezbeđuje posredstvom optičkog komunikacionog interfejsa IR RS-232. Grafički kolor displeji ovih uređaja prikazuju rezultate merenja u realnom vremenu, pri čemu njihovi memorijski kapaciteti omogućavaju hronološko memorisanje izmerenih vrednosti parametara kvaliteta, za potrebe naknadne softverske obrade i analize primenom odgovarajućih programskih alata.

Uprošćena blok konfiguracija tipičnog instrumenta za merenje kvaliteta električne energije, koja uključuje naponske i strujne ulazne merne pretvarače, blok za analogno-digitalnu konverziju signala (ADC) i blok za digitalnu obradu signala napona i struja (DSP), prikazana je na slici 4.1.



Slika 4.1. Blok konfiguracija tipičnog uređaja za merenje kvaliteta električne energije

Pomoću naponskih i strujnih ulaznih mernih pretvarača obezbeđuju se podaci o trenutnim vrednostima mrežnih napona i struja prilagođeni ulazima bloka za analogno-digitalnu konverziju, i to najčešće u opsegu od $\pm 10V$. Istovremeno, merni pretvarači primenjeni na ulazu obezbeđuju i neophodnu izolaciju između elektrodistributivne mreže i analizatora kvaliteta električne energije. Većina savremenih merača kvaliteta saglasno preporukama standarda EN 50160, meri i registruje sledeće osnovne parametre i poremećaje kvaliteta mrežnog napona napajanja: varijaciju mrežne frekvencije, spore promene efektivnih vrednosti napona napajanja, padove napona i previsoke

napone, kratke i duge naponske prekide, tranzijentne prenapone, naponsko-faznu nesimetričnost, više harmonijske i međuharmonijske komponente napona napajanja, itd. Neki od instrumenata za merenje kvaliteta električne energije prestižnih proizvođača, konkretno tipa LEM MEMOBOX 800/808, Chauvin Arnoux C.A. 8332/8334 i LEM-QWAVE Power, predstavljeni su na slici 4.2.



Slika 4.2. Savremeni uređaji za merenje kvaliteta električne energije tipa LEM MEMOBOX 800/808, Chauvin Arnoux CA 8332/34 (desno) i LEM-QWAVE Power (dole levo)

Ukoliko su prilikom merenja od značaja samo pojedini od pokazatelja kvaliteta električne energije, recimo samo analiza stanja viših harmonijskih komponenti napona na određenoj lokaciji distributivne mreže, treba koristiti uređaje koji se po potrebi podešavanjem mogu prilagoditi ovoj nameni. Neki analizatori kvaliteta mere i registruju u skladu sa preporukama standarda EN 50160 isključivo varijacije napona (trenutne vrednosti napona, granične vrednosti propada i prenapona, itd), tokom desetominutnog intervala, pri čemu se drugi pokazatelji kvaliteta napona zanemaruju.

Većina analizatora kvaliteta koristi se najčešće za merenje parametara kvaliteta napona po posebnim zahtevima, pa spadaju u kategoriju off-line mernih instrumenata prenosnog tipa. Pored ovih uređaja, za periodična merenja postoje specijalno projektovani uređaji hardverski opremljeni za kontinuirani monitoring propisanih parametara kvaliteta električne energije (on-line merenja). Primer on-line mernog uređaja je analizator kvaliteta LEM-QWAVE Power prikazan na slici 4.2, koji se na duži period priključuje na 10kV strani transformatora u trafostanicama 110/10kV [25].

4.3. Uporedne karakteristike savremenih uređaja za merenje kvaliteta






Prilikom izbora odgovarajućeg uređaja za merenje kvaliteta električne energije potrebno je pažljivo izanalizirati i proučiti osnovne karakteristike mernih instrumenata ove namene prisutnih na današnjem svetskom tržištu. Među prestižne svetske proizvođače ovih mernih uređaja spadaju: austrijski LEM, francuski Chauvin Arnoux, američki FLUKE, španski CIRCUTOR itd. Uporedni pregled karakteristika analizatora Chauvin Arnoux C.A. 8332 i C.A. 8334 dat je u tabeli 4.1. [27].






Karakteristika	C.A. 8332	C.A. 8334
Displej	Kolor LCD 320 x 240	Kolor LCD 320 x 240
Kapacitet memorije	2MB	4MB
Izdrživost baterije	1800mAh	3800mAh
Harmonijska analiza	Da	Da + expert mode
Memorisanje izmerenih vrednosti	Da, uz ograničenja	Da
Alarmiranje	Da	Da
Analiza tranzijentnih pojava	Ne	Da
Napajanje	AC + DC	AC + DC
Digitalni interfejs	RS-232	RS-232
PC programska podrška	DATAVIEWER Pro	DATAVIEWER Pro






Tabela 4.1. Uporedni pregled karakteristika uređaja za merenje kvaliteta C.A. 8332 i C.A. 8334

Sledeća tabela prikazuje detaljan pregled uporednih funkcionalnih karakteristika nekoliko savremenih tipova merila kvaliteta električne energije prestižnih svetskih proizvođača [28], i to:

- CIRCUTOR AR5;
- Chauvin Arnoux C.A. 8332/8334;
- LEM MEMOBOX 300Smart, P/Q;
- LEM MEMOBOX 800/808, P/Q;
- LEM TOPAS 1000;

Proizvođač	CIRCUTOR	Chauvin Arnoux	LEM	LEM	LEM
Tip	AR5	C.A. 8332/34	MEMOBOX 300Smart, P/Q	MEMOBOX 800/808, P/Q	TOPAS 1000
Fizički izgled					
Broj naponskih ulaza	3 (trofazni)	4 (trofazni)	1 ili 3 (monofazni ili trofazni)	3 (trofazni)	4 (trofazni)
Broj strujnih ulaza	3 (trofazni)	3 (trofazni)	1 ili 3/4 (monofazni ili trofazni)	4 (trofazni)	4 (trofazni)
Merenje napona					
RMS fazni i međufazni napon	izbor jednog ili drugog	merenje i prikaz obe vrednosti	mogućnost izbora merenja sa vezom tipa trougla ili zvezde		merenje i prikaz obe vrednosti
THD harmonijska analiza	harmonijska analiza do 50. harmonika	harmonijska analiza do 50. harmonika	harmonijska analiza do 40. harmonika		harmonijska analiza do 50. harmonika
Crest Faktor CS	ne	da	da	da	ne
Nesimetrija	ne	da	da (merna funkcija Q)		da
Treperenje (fliker)	meri P_{st} , P_{lt} se računa softverski	meri P_{st} , P_{lt} se računa softverski	meri P_{st} , P_{lt} se računa softverski	meri P_{st} , P_{lt} se računa softverski	P_{st} i P_{lt}
Naponski događaji	ne	broj događaja, trajanje, vreme pojave	beleži broj događaja, trajanje, krajnje vrednosti, vreme pojave		broj događaja, trajanje, vreme pojave
Prelazne pojave	osciloskopski prikaz napona sa rezolucijom od 500 μ s	rezolucija 78 μ s, naponi i struje za 4 periode, 50 događaja	ne	ne	rezol. 156 μ s, naponi i struje neograničen broj pojava

Proizvođač	CIRCUTOR	Chauvin Arnoux	LEM	LEM	LEM
Tip	AR5	C.A. 8332/34	MEMOBOX 300Smart, P/Q	MEMOBOX 800/808, P/Q	TOPAS 1000
Fizički izgled					
Signalizacioni naponi i međuharmon. komponente	ne	ne	da (merna funkcija Q)		da
Analiza prema standardu EN 50160	statistička obrada parametara	statistička obrada parametara	statistička obrada merenih parametara na PC računaru		statistička obrada parametara
Merenje struje					
RMS fazne struje	da	da	da	da	da
Struja neutralnog provodnika	ne	da	da (opcija sa 4 ulaza)	da	da
THD harmonijska analiza	harmonijska analiza do 50. harmonika	harmonijska analiza do 50. harmonika	meri THD struje (merna funkcija P)		harmonijska analiza do 50. harmonika
Crest Faktor CS	ne	da	da (merna funkcija Q)		ne
Nesimetrija	ne	da	ne	ne	ne
Merenje snage					
Aktivna, reaktivna i prividna snaga	da	da	da (merna funkcija P)		da
Faktor snage, $\cos\phi$	faktor snage	obe vrednosti	faktor snage (funkcija P)		obe vrednosti
Aktivna, reaktivna i prividna energija	da (reaktivna kapacitivna i induktivna)	da (reaktivna kapacitivna i induktivna)	samo aktivna energija (merna funkcija P)		samo aktivna energija

Proizvođač	CIRCUTOR	Chauvin Arnoux	LEM	LEM	LEM
Tip	AR5	C.A. 8332/34	MEMOBOX 300Smart, P/Q	MEMOBOX 800/808, P/Q	TOPAS 1000
Fizički izgled					
Harmonijska analiza snage	ne	da	ne		da
Posebne funkcije					
Tip posebnih funkcija	<p>opcija FastCheck daje brzi prikaz efektivnih vrednosti svih parametara snage, sa rezolucijom od najmanje 1 periode</p> <hr/> <p>opcija CheckMeter koristi se za proveru tačnosti električnih brojila</p>	<p>vektorski prikaz napona i struja na displeju sa indikacijom amplitude i faznog pomeraja</p> <hr/> <p>opcija Harmonics Expert Mode za analizu harmonijskih komponenata napona i struja</p>	brz i detaljan prikaz svih osnovnih parametara kvaliteta električne energije u cilju provere usklađenosti sa standardom EN 50160 (PC softverska podrška CODAM plus)	brz i detaljan prikaz svih osnovnih parametara kvaliteta električne energije u cilju provere usklađenosti sa standardom EN 50160 (PC softverska podrška CODAM plus)	<p>moгуćnost analize različitih parametara vezanih za prolazne pojave</p> <hr/> <p>složene analitičke funkcije za analizu stanja energetske mreže i opterećenja</p>
Specijalne karakteristike					
Način lokalnog prikaza	LCD displej 160x160, jednobojan sa grafičkim prikazom trenutnih vrednosti	kolor LCD, 320x240, sa grafičkim prikazom trenutnih vrednosti i analizom memorisanih vrednosti	LED indikacija stanja	LED indikacija stanja plus LCD prikaz trenutnih vrednosti osnovnih parametara	LED indikacija stanja
Napajanje	230V±15%	230V±20%	88–265V	230V±20% preko posebnog ulaza	100–240 V (100–375V)






Proizvođač	CIRCUTOR	Chauvin Arnoux	LEM	LEM	LEM
Tip	AR5	C.A. 8332/34	MEMOBOX 300Smart, P/Q	MEMOBOX 800/808, P/Q	TOPAS 1000
Fizički izgled					
Lokalno napajanje	5 časova	duže od 9 časova	zavisno od primenjenog UPS-a		5 minuta
Kapacitet memorije	1MB	2/4MB	4MB	2/4MB	0,5-2GB
Standardni interfejs	RS-232	RS-232	RS-232	RS-232	Ethernet/ RS-232
Osnovne prednosti	optimalan odnos mogućnosti i cene; najmanji trofazni analizator koji se nudi; veliki izbor različitih funkcija,	idealno rešenje ako je potrebno meriti sve važnije parametre odjednom, uključujući i prolazne pojave	mogućnost kompletne on-line analize kvaliteta električne energije prema standardu EN 50160;	univerzalna platforma za P i Q merne funkcije; čvrsto i kvalitetno kućište bez elemenata koji zahtevaju posebno napajanje; veliki izbor mernog pribora;	ubedljivo najkompletniji analizator kvaliteta električne energije na tržištu;
	mogućnost nadogradnje osnovne konfiguracije opcionim paketima	veliki izbor mernog pribora i optimalan odnos mogućnosti i cene uređaja	malo čvrsto kućište bez elemenata koji zahtevaju posebno napajanje		nema potrebe za postavljanjem mernih parametara, jer memorise sve značajne parametre
Osnovni nedostaci	neke merne opcije se međusobno isključuju; ne postoji mogućnost analize izmerenih vrednosti na sopstvenom displeju;	vremenski ograničeno trajanje snimanja brzih prolaznih pojava (na 4 periode)	nema svoju posebnu jedinicu za prikazivanje trenutnih vrednosti; ograničen izbor mernih parametara u odnosu na izabranu funkciju;	skromna jedinica za prikazivanje trenutnih vrednosti; ograničen izbor mernih parametara u odnosu na izabranu funkciju;	nema svoju posebnu jedinicu za prikazivanje izmerenih trenutnih vrednosti

Tabela 4.2. Detaljan pregled uporednih funkcionalnih karakteristika nekoliko različitih tipova savremenih uređaja za merenje kvaliteta električne energije

4.4. Merenje parametara kvaliteta na transformatoru 10/0.4kV

Kao konkretna ilustracija procesa merenja karakterističnih parametara kvaliteta električne energije u ovoj doktorskoj disertaciji biće prikazani neki od eksperimentalnih rezultata merenja potrošnje električne energije na distributivnom transformatoru 10/0.4kV, snage 2000kVA [28]. Konkretni rezultati merenja dobijeni su instrumentom za merenje kvaliteta električne energije Chauvin Arnoux C.A. 8334, uz odgovarajuću programsku podršku softvera DataView Pro [66].

Za potrebe merenja potrošnje i kvaliteta električne energije, sa posebnim naglaskom na sadržaj viših harmonika signala napona i struje na distributivnom transformatoru 10/0.4kV snage 2000kVA, pored trofaznog analizatora kvaliteta C.A. 8334 korišćena je i prateća merna oprema, sa pripadajućim setom strujnih senzora AmpFlex 193 3000A i sledećim bitnim karakteristikama:

- merenje napona do 834V (AC True RMS) sa tačnošću od $\pm 0.5\%$,
- merenje struje do 3000A (AC True RMS) sa tačnošću od $\pm 0.5\%$;
- merenje snage sa tačnošću od $\pm 1\%$;
- merenje utrošene/proizvedene energije sa tačnošću od $\pm 1\%$;
- merenje faktora snage sa tačnošću od $\pm 0.01\%$;
- merenje vrednosti viših harmonika napona i struja do 50-tog reda;
- merenje faktora ukupnog harmonijskog izobličenja sa tačnošću od $\pm 1\%$,
- funkcionalnost prema standardima kvaliteta: EN 50160, IEC 61000-4-7, IEC 61000-4-15, IEC 61000-4-30 i EN IEC 61010;

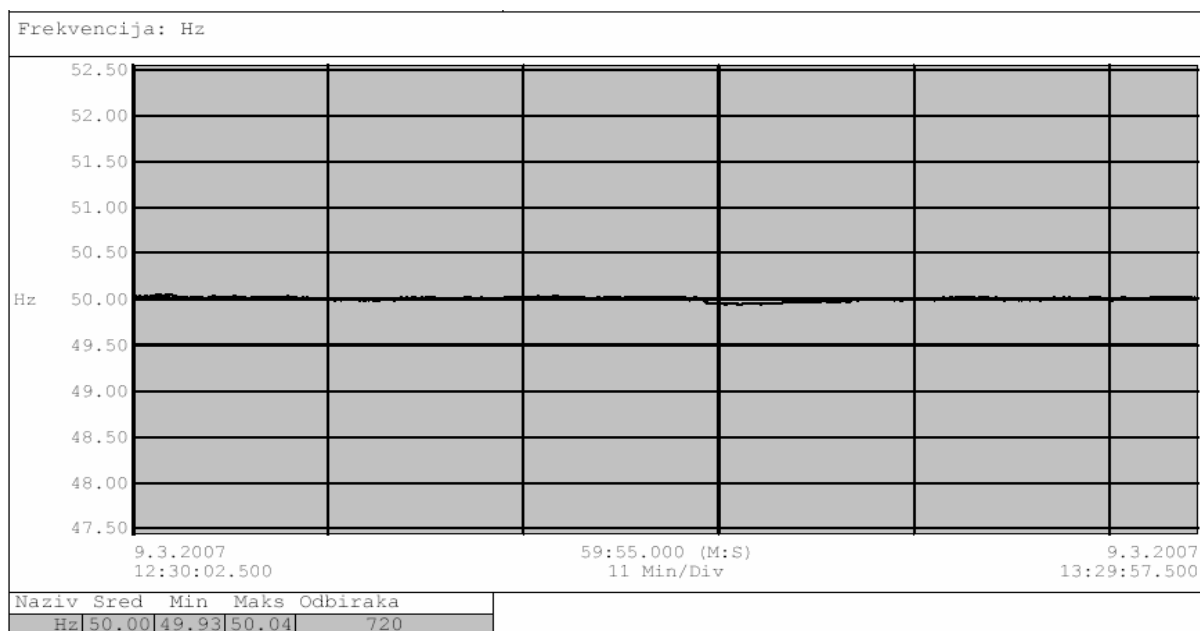
Programska podrška mernog uređaja DataView Professional koristi se za konfiguraciju instrumenta, podešavanje parametara merenja i obradu izmerenih vrednosti parametara kvaliteta, prethodno smeštenih u internu memoriju uređaja. Direktna komunikacija mernog instrumenta sa računarom ostvaruje se posredstvom optički izolovanog RS-232 komunikacionog interfejsa.

Merenja su vršena metodologijom koju propisuje aktuelni evropski standard kvaliteta EN 50160. Ukupno vreme merenja bilo je četiri sata. Frekvencija semplovanja signala je 12,8kHz po kanalu pri mrežnoj frekvenciji od 50Hz, dok su rezultati merenja memorisani uređajem na svakih 5 sekundi. Nakon svih obavljenih merenja snimljeni su vremenski dijagrami sledećih parametara:

- mrežne frekvencije;
- linijskih napona po svim fazama;
- struja po svim fazama plus struje nultog provodnika;
- faktora ukupnog harmonijskog izobličenja (THD) napona i struja po fazama;
- srednjih vrednosti aktivne, reaktivne i prividne snage po svim fazama;
- srednjih vrednosti utrošene aktivne, reaktivne i prividne energije po fazama;
- faktora snage po svim fazama;
- trenutnog sadržaja viših naponskih harmonika do 50-tog reda;
- trenutnog sadržaja viših strujnih harmonika do 50-tog reda;

4.4.1. Merenje mrežne frekvencije

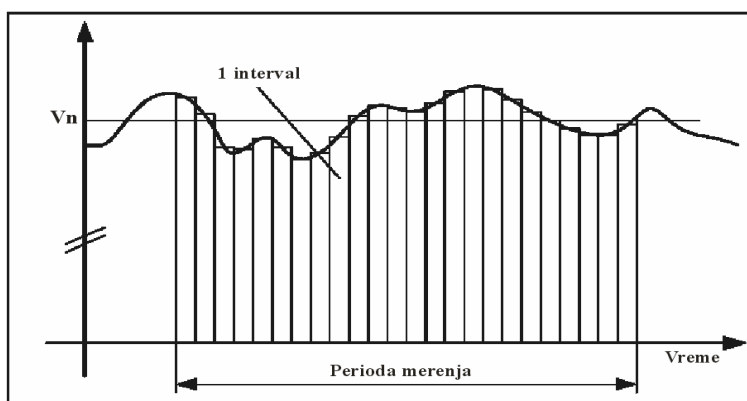
Vremenski dijagram promene izmerenih vrednosti mrežne frekvencije na transformatoru 10/0.4kV, tokom vremenskog intervala u trajanju od sat vremena (12,30h do 13,30h), snimljen analizatorom kvaliteta električne energije Chauvin Arnoux C.A. 8334, prikazan je na slici 4.3.



Slika 4.3. Grafički prikaz varijacija vrednosti mrežne frekvencije merenih uređajem Chauvin Arnoux C.A. 8334 u intervala od sat vremena

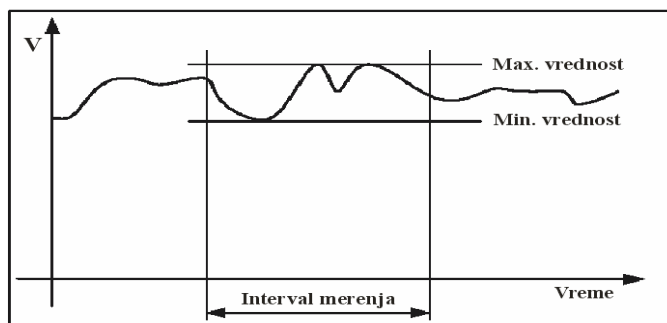
4.4.2. Merenje parametara mrežnog napona

Srednje efektivne vrednosti mrežnog napona (RMS – Root Mean Square) proračunavaju se tokom vremenskog intervala definisanog softverskom podrškom uređaja za merenje kvaliteta električne energije. Najčešće se radi o vremenskom intervalu u trajanju od 10 minuta, kako je i propisano standardom kvaliteta EN 50160. Za kontrolni period od 7 dana teorijski moguće je memorisati ukupno 1008 desetominutnih srednjih efektivnih vrednosti napona. Parametri signala koji se memorišu analizatorom kvaliteta prilikom merenja efektivnih vrednosti napona napajanja, metodom usrednjavanja po definisanoj periodi merenja, grafički su ilustrovani na slici 4.4.



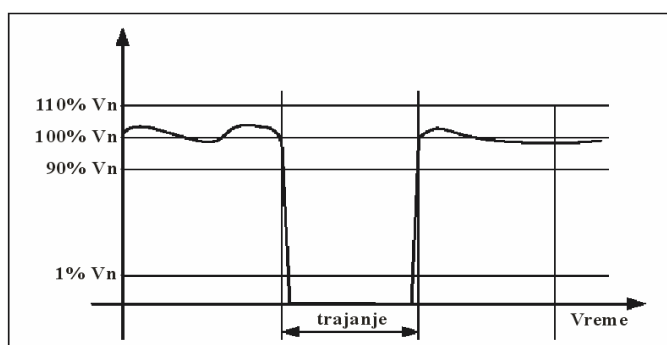
Slika 4.4. Parametri koji se memorišu pri merenju efektivnih vrednosti napona

Maksimalna i minimalna vrednost napona napajanja mere se tokom vremenskog intervala koji ne treba da bude kraći od 10ms (jedna poluperioda napona napajanja). Parametri signala koji se memorišu analizatorom kvaliteta pri merenju graničnih vrednosti napona dati su na slici 4.5.



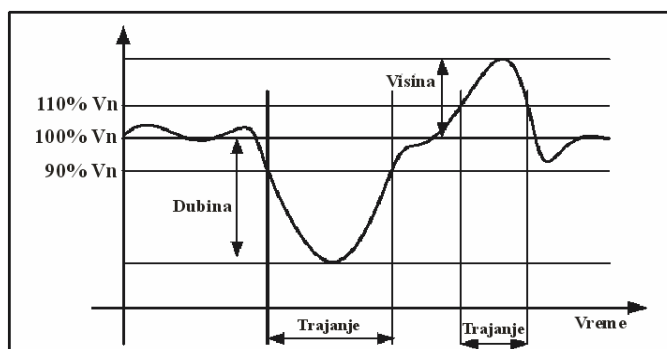
Slika 4.5. Parametri koji se memorišu pri merenju graničnih vrednosti

Prema standardu EN 50160, izmerene vrednosti napona manje od 1% vrednosti nazivnog napona tumače se kao prekidi napona napajanja, pri čemu je taj prag moguće korigovati u skladu sa odgovarajućim lokalnim standardima. Memorišu se vreme pojave i dužina trajanja naponskog prekida, pri čemu prekid napona mora trajati najmanje 20ms, kako bi se uopšte kao takav mogao tretirati. Karakteristični parametri prekida napona napajanja grafički su predstavljeni na slici 4.6.



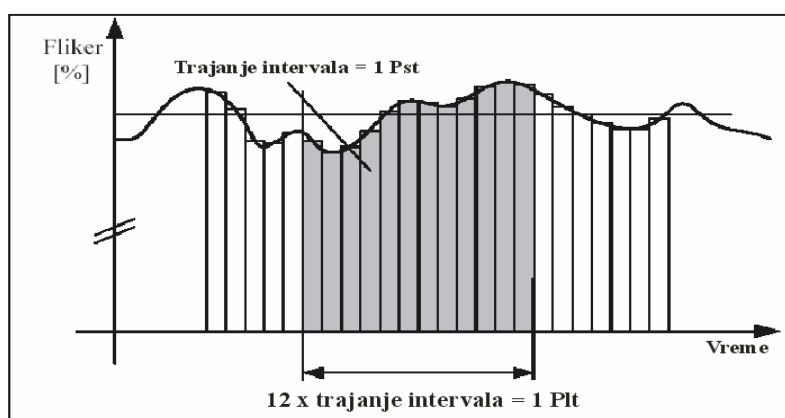
Slika 4.6. Karakteristični parametri naponskog prekida

Kada se gornja granična vrednost $V_n + 10\%$ ili donja granična vrednost $V_n - 10\%$ premaše dolazi do pojave previsokih napona, odnosno propada napona. Dubina propada kreće se u opsegu od $90\% V_n$ do $1\% V_n$. Granične vrednosti mogu se softverski promeniti, pri čemu su preporučene vrednosti u skladu sa standardom EN 50160. U memoriju analizatora kvaliteta C.A. 8334 upisuju se vremena nastanka i trajanja događaja, kao i granične vrednosti, kako je prikazano na slici 4.7.



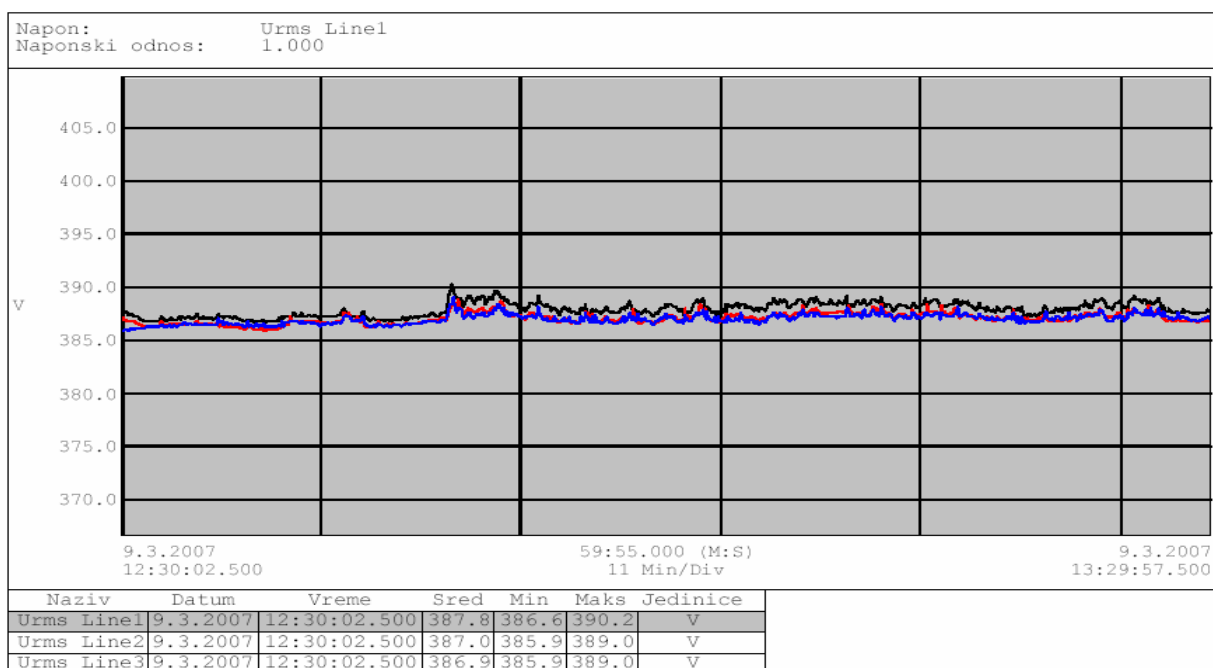
Slika 4.7. Karakteristični parametri propada napona i prenapona

Naponsko treperenje meri se flikermetrom, koji se nalazi u sklopu instrumenata za merenje kvaliteta električne energije. Flikermetri mere dubinu modulacije mrežnog napona frekvencije od 50Hz amplitudno modulisanog signalima frekvencije u opsegu 1 do 33Hz. Flikermetar upoređuje srednju vrednost posmatranog demodulisanog signala sa vrednošću koja je dobijena pri merenju. Prema standardu EN 50160 granična vrednost treperenja jednaka je jedinici. Vrednosti treperenja koje su veće od 1 smatraju se neprihvatljivim. Merenje treperenja propisano je i standardom IEC 61000-4-15. Osnovni parametar flikera koji se meri unutar vremenskog intervala od 10 minuta je kratkotrajno treperenje P_{st} , pri čemu se interval merenja po potrebi može korigovati. Dugotrajno treperenje P_{lt} računa se na bazi dvanaest izmerenih vrednosti kratkotrajnog treperenja. Parametri koji se memorišu analizatorom kvaliteta pri merenju treperenja napona ilustrovani su na slici 4.8.



Slika 4.8. Parametri koji se memorišu pri merenju naponskog treperenja (flikera)

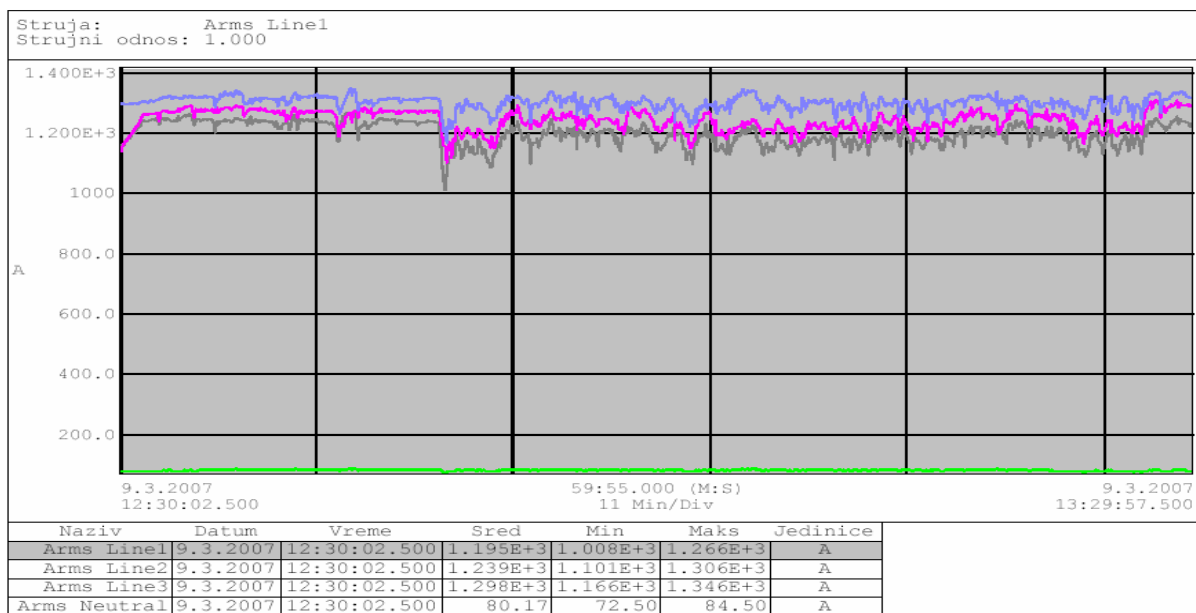
Vremenski dijagram promene merenih efektivnih vrednosti linijskih napona po fazama na transformatoru 10/0.4kV, tokom vremenskog intervala trajanja sat vremena (12,30h do 13,30h), snimljen analizatorom kvaliteta električne energije tipa C.A. 8334, predstavljen je na slici 4.9.



Slika 4.9. Efektivne vrednosti napona po fazama merene uređajem C.A. 8334 u periodu od sat vremena

4.4.3. Merenje efektivnih vrednosti struje

Vremenski dijagrami promene merenih efektivnih vrednosti struja po fazama, uključujući i struju nultog provodnika, na transformatoru 10/0.4kV tokom vremenskog intervala od 12,30h do 13,30h, memorisani analizatorom kvaliteta električne energije C.A. 8334, dati su na slici 4.10.



Slika 4.10. Efektivne vrednosti struja po fazama merene uređajem C.A. 8334 u periodu od sat vremena

4.4.4. Merenje ukupnog harmonijskog izobličenja

Dijagrami izmerenih vrednosti faktora ukupnog harmonijskog izobličenja napona i struja po fazama na transformatoru 10/0.4kV tokom intervala trajanja sat vremena (12,30h do 13,30h), memorisani analizatorom kvaliteta električne energije C.A. 8334, prikazani su na slici 4.11.



Slika 4.11. Ukupno harmonijsko izobličenje mereno uređajem C.A. 8334 u periodu od sat vremena

4.4.5. Merenje srednjih vrednosti snage

Parametri signala elektrodistributivne mreže čije se vrednosti memorišu preko analizatora kvaliteta električne energije prilikom merenja srednjih vrednosti snage, metod procene parametra, kao i obrasci po kojima se izračunavaju njihove konačne vrednosti, prikazani su u tabeli 4.3. [28].

parametri signala	metod procene vrednosti parametra	obraci za izračunavanje
srednja efektivna vrednost napona po fazama	na osnovu N uzoraka merenja dobijenih tokom vremenskog intervala od 200ms	$V_{RMSi} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{j=1}^N V_{ij}^2}$
srednja efektivna vrednost struje po fazama	na osnovu N uzoraka merenja dobijenih tokom vremenskog intervala od 200ms	$I_{RMSi} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{j=1}^N I_{ij}^2}$
aktivna snaga uzorkovanih vrednosti	određuje se za svaki uzorak posebno tokom vremenskog intervala od 200ms	$P(t) = V(t)I(t)$
aktivna snaga tokom odabranog intervala merenja po fazama	određuje se na bazi aktivne snage svakog od N uzoraka tokom intervala merenja od 200ms	$P_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N P_j$
ukupna aktivna snaga	određuje se na osnovu vrednosti aktivne snage za odabrani interval merenja po svakoj od faza	$P_{ukupno} = \sum_{i=1}^3 P_i$
reaktivna snaga uzorkovanih vrednosti	određuje se za svaki uzorak posebno tokom vremenskog intervala od 200ms	$Q(t) = V(\omega t + 90)I(t)$
reaktivna snaga tokom odabranog intervala merenja po fazama	određuje se na bazi reaktivne snage svakog od N uzoraka tokom intervala merenja od 200ms	$Q_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N Q_j$
ukupna reaktivna snaga	određuje se na osnovu vrednosti reaktivne snage za odabrani interval merenja po svakoj od faza	$Q_{ukupno} = \sum_{i=1}^3 Q_i$
ukupna prividna snaga	određuje se na osnovu vrednosti ukupne aktivne i reaktivne snage	$S_{ukupno} = \sqrt{P_{ukupno}^2 + Q_{ukupno}^2}$
faktor snage (power factor)	određuje se na osnovu vrednosti ukupne aktivne i prividne snage	$PF = \frac{P_{ukupno}}{S_{ukupno}}$
tangens ugla gubitaka	određuje se na osnovu vrednosti ukupne aktivne i reaktivne snage	$\tan \varphi = \frac{Q_{ukupno}}{P_{ukupno}}$

Tabela 4.3. Parametri snage koji se mere i memorišu analizatorom kvaliteta električne energije

Za slučaj prostoperiodičnih signala mrežnih napona i struja, trenutna vrednost snage može se primenom trigonometrijskih pravila izraziti preko sume dva kosinusna signala, pri čemu važi:

$$v(t) = V_m \cos \omega t \text{ i } i(t) = I_m \cos(\omega t + \varphi) \quad (4.1)$$

$$p(t) = v(t)i(t) = V_m I_m \cos \varphi + V_m I_m \cos(2\omega t + \varphi), \quad (4.2)$$

$$p(t) = V_m I_m \cos \varphi (1 + \cos 2\omega t) + V_m I_m \sin \varphi \cos\left(2\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \quad (4.3)$$

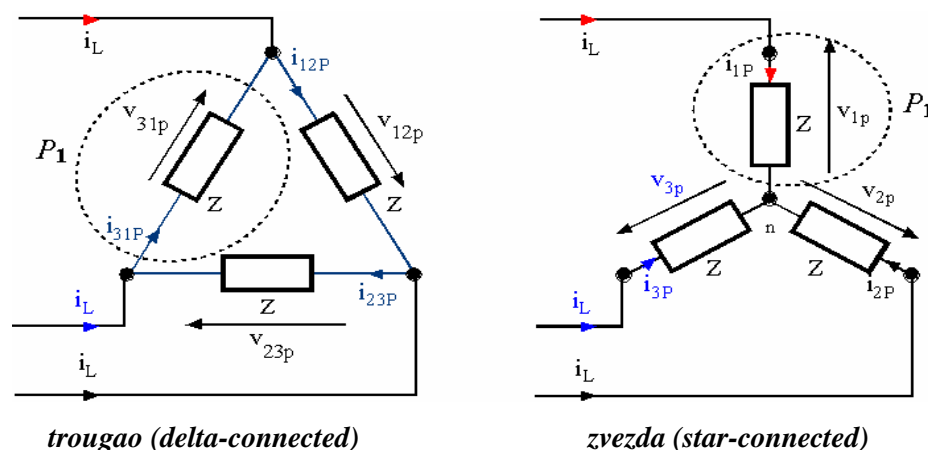
Trenutna vrednost ukupne snage u izrazu (4.3) predstavlja zbir trenutnih vrednosti aktivne snage, izražene u mernim jedinicama W (Watts) i reaktivne snage, izražene u mernim jedinicama VAR (Volt Ampere Reactive). Vrednosti aktivne i reaktivne snage određuju se na bazi relacija:

$$P = V_m I_m \cos \varphi \text{ i } Q = V_m I_m \sin \varphi \quad (4.4)$$

Prividna snaga, izražena u mernim jedinicama VA (Volt Ampere), se iz aktivne i reaktivne snage računa preko korena sume hkvadrata, pri čemu se njena kompleksna vrednost prikazuje kao:

$$\underline{S} = P \pm jQ = V_m I_m \cos \varphi \pm iV_m I_m \sin \varphi \quad (4.5)$$

Dve karakteristične varijante priključenja opterećenja pojedinih potrošača na distributivnu mrežu, sa vezom u trouglu (delta-connected) i zvezdi (star-connected), prikazane su na slici 4.12.



Slika 4.12. Dve varijante priključenja opterećenja potrošača na elektroenergetsku mrežu

Kada je u pitanju varijanta sa vezom opterećenja potrošača u trouglu (delta), aktivne snage po fazama koje su međusobno jednake i ukupna aktivna snaga, određuju se sledećim relacijama:

$$P_1 = P_2 = P_3 = P = V_{line} I_{phase} \cos \varphi \text{ i} \quad (4.6)$$

$$P_{ukupno} = 3 \cdot P = 3V_{line} I_{phase} \cos \varphi = \sqrt{3}V_{line} I_{line} \cos \varphi \quad (4.7)$$

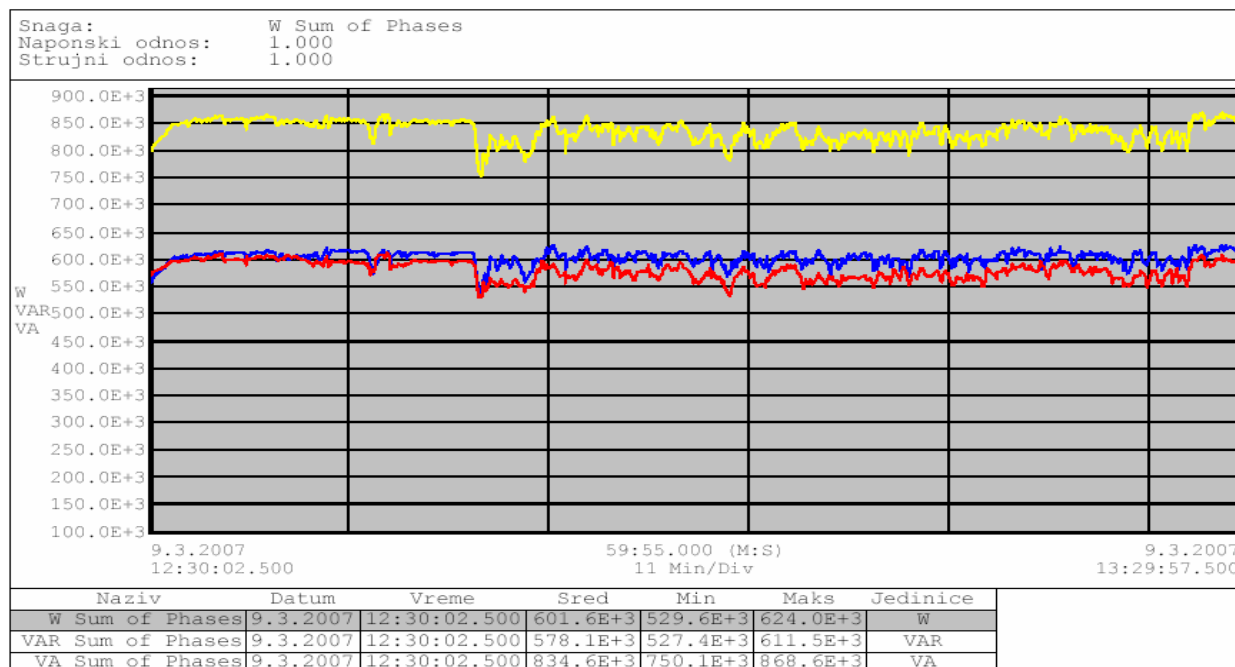
Kada je u pitanju varijanta veze opterećenja potrošača tipa zvezda (star), vrednosti aktivne snage po svim fazama i ukupna aktivna i reaktivna snaga, određuju se pomoću sledećih relacija:

$$P_1 = P_2 = P_3 = P = V_{phase} I_{line} \cos \varphi, \quad (4.8)$$

$$P_{ukupno} = 3 \cdot P = 3V_{phase} I_{line} \cos \varphi = \sqrt{3}V_{line} I_{line} \cos \varphi \text{ i} \quad (4.9)$$

$$Q_{ukupno} = 3 \cdot Q = \sqrt{3}V_{line} I_{line} \sin \varphi. \quad (4.10)$$

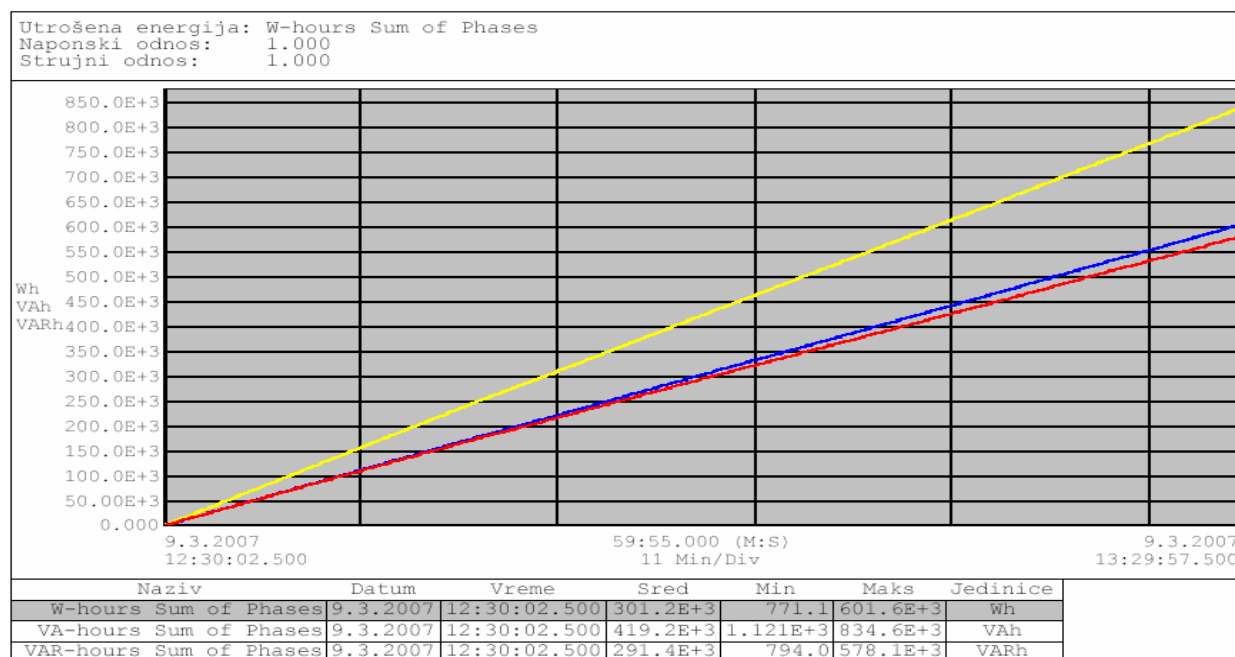
Analiza vrednosti aktivne, reaktivne i prividne snage na transformatoru 10/0.4kV, merenih tokom vremenskog intervala trajanja od sat vremena (12,30h do 13,30h).. primenom analizatora kvaliteta električne energije tipa C.A. 8334, ilustrovana je vremenskim dijagramima na slici 4.13.



Slika 4.13. Aktivna, reaktivna i prividna snaga merene uređajem C.A. 8334 u periodu od sat vremena

4.4.6. Merenje utrošene energije

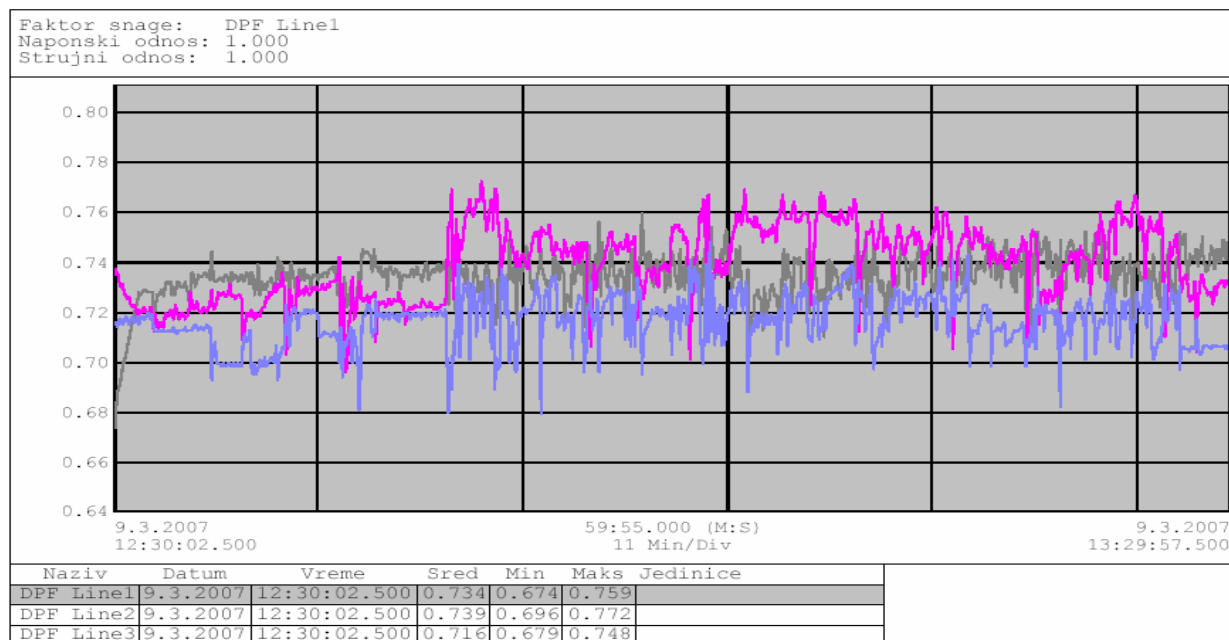
Grafici merenih vrednosti aktivne, reaktivne i prividne energije, utrošene na transformatoru 10/0.4kV tokom vremenskog intervala u trajanju od sat vremena (12,30h do 13,30h), memorisani analizatorom kvaliteta električne energije tipa C.A. 8334, predstavljeni su na slici 4.14.



Slika 4.14. Aktivna, reaktivna i prividna energija merene uređajem C.A. 8334 u periodu od sat vremena

4.4.7. Merenje faktora snage

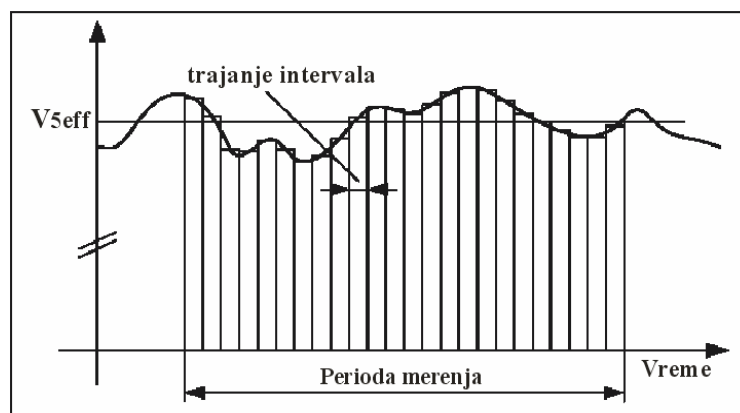
Analiza trenutnih vrednosti faktora snage po fazama, merenih na transformatoru 10/0.4kV tokom vremenskog intervala u trajanju od sat vremena (12,30h do 13,30h), primenom analizatora kvaliteta električne energije tipa C.A. 8334, ilustrovana je vremenskim dijagramima na slici 4.15.



Slika 4.15. Vrednosti faktora snage merene uređajem C.A. 8334 u periodu od sat vremena

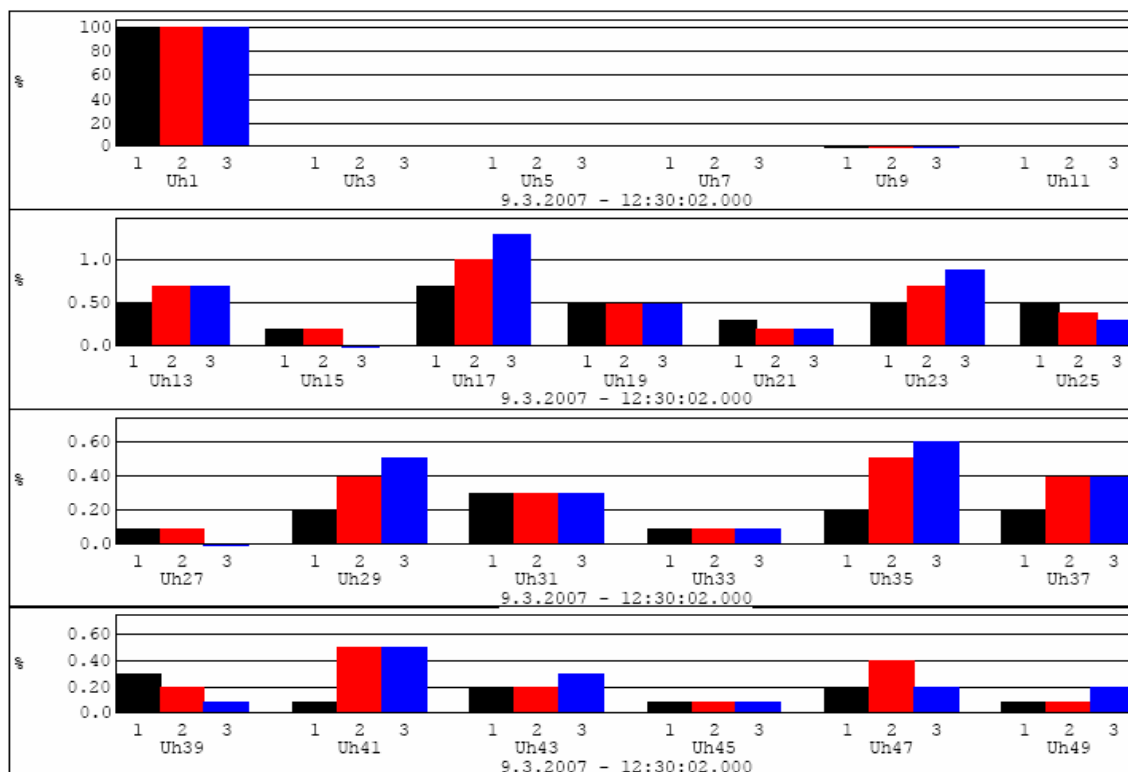
4.4.8. Merenje viših harmonika napona i struja

Više harmonijske komponente napona napajanja od 2. do 50. reda posebno su analizirane. Srednje vrednosti svakog višeg harmonika dobijene tokom definisanog intervala merenja snimaju se u memoriju analizatora kvaliteta C.A. 8334. Parametri koji se memorišu pri merenju efektivne vrednosti više harmonijske komponente napona napajanja 5. reda predstavljeni su na slici 4.16.



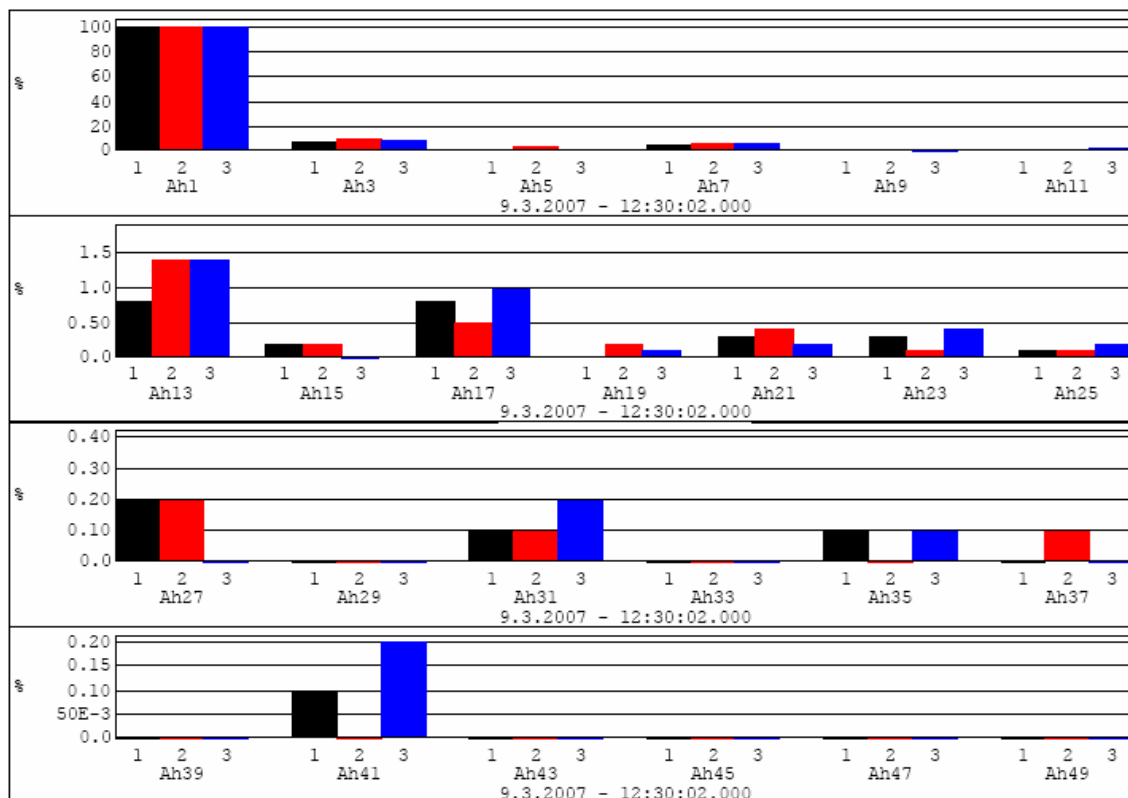
Slika 4.16. Parametri signala koji se memorišu pri merenju vrednosti harmonika 5. reda

Izmerene vrednosti viših neparnih naponskih harmonika po sve tri faze od 3. do 49. reda na transformatoru 10/0.4kV, memorisane analizatorom kvaliteta električne energije C.A. 8334, date su na slici 4.17. Merene vrednosti date su procentualno u odnosu na nominalnu vrednost napona.



Slika 4.17. Vrednosti viših neparnih harmonika napona izmerene uređajem C.A. 8334

Izmerene vrednosti viših neparnih strujnih harmonika od 3. do 49. reda na transformatoru 10/0.4kV, memorisane analizatorom kvaliteta električne energije C.A. 8334, prikazane su na slici 4.18. Izmerene vrednosti harmonika date su procentualno u odnosu na nominalnu vrednost struje.



Slika 4.18. Vrednosti viših neparnih harmonika struje izmerene uređajem C.A. 8334

5. TESTIRANJE UREĐAJA ZA MERENJE KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Metrološke karakteristike su kvantitativni i kvalitativni pokazatelji osnovnih mogućnosti i ograničenja mernih uređaja i opreme, propisani specifikacijama proizvođača. Proces obezbeđenja specificiranih metroloških karakteristika primenjenih sredstava merenja, posredstvom referentnih mernih standarda, poznat je kao sledivost - traceability. Sledivost predstavlja osobinu sa kojom se rezultat merenja ili vrednost mernog standarda može dovesti u relaciju sa referentnim veličinama, nacionalnim ili međunarodnim standardima, preko neprekidnog lanca komparacija sa definisanim vrednostima mernih nesigurnosti. Pod uticajem okruženja, naročito u industrijskim uslovima rada vremenom dolazi do degradacije propisanih metroloških karakteristika primenjenih instrumenata, što zahteva periodičnu overu tačnosti, odnosno kalibraciju. Redovna periodična kalibracija mernih instrumenata najvažnija je aktivnost u procesu obezbeđenja metrološke sledivosti ovih uređaja sa odgovarajućim standardima i za pouzdanu procenu nesigurnosti primenjenih mernih procedura.

Parametar kojim se garantuje kvalitet mernih instrumenata koji se koriste u industrijskim i drugim tehnološkim procesima je garantovana tačnost mernog instrumenta, izražena preko merne nesigurnosti dobijenih rezultata merenja. Po preporuci Međunarodnog komiteta za tegove i mere (CIPM - International Committee for Weights and Measures) i na predlog vodećih međunarodnih metroloških organizacija BIPM, IEC, OIML, IFCC, IUPAC i IUPAP, Međunarodna organizacija za standardizaciju (ISO - International Organization for Standardization) izdala je 1993. zvanični dokument Uputstvo za izražavanje merne nesigurnosti (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement). Po ugledu na taj dokument, američki nacionalni institut za standarde i tehnologiju NIST (National Institute of Standards and Technology) iste godine publikovao je sličan dokument Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results [67,68].

Merna nesigurnost određuje se intervalnom procenom eksperimentalno dobijenih rezultata merenja, tako da predstavlja interval u kome se sa određenim stepenom verovatnoće nalazi prava vrednost merene veličine. Rezultat merenja je kompletan samo ako sadrži i kvantitativni podatak o svojoj mernoj nesigurnosti. Prema NIST - ovom uputstvu za procenu i prikazivanje nesigurnosti rezultata merenja Guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results, baziranom na preporukama CIPM - a, definisani su sledeći tipovi merne nesigurnosti [68]:

- standardne merne nesigurnosti tipa A i tipa B;
- kombinovana merna nesigurnost;
- proširena merna nesigurnost;

Vrednosti standardnih mernih nesigurnosti tipa A procenjuju se statističkim postupcima za obradu rezultata višestruko ponovljenih merenja. Primeri su proračunavanje standardne devijacije serije nezavisnih rezultata merenja ili fitovanje kalibracione krive po metodu najmanjih kvadrata. U slučaju merenja efektivnih vrednosti mrežnog napona napajanja, srednja efektivna vrednost merenog napona može se izračunati preko aritmetičke sredine dobijenih rezultata merenja, kao:

$$\bar{V} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \quad (5.1)$$

Vrednost standardne nesigurnosti tipa A dobijenih rezultata merenja efektivnih vrednosti napona može se izračunati preko standardne devijacije srednje vrednosti merenog napona, kao:

$$u_A(V_i) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2} \quad (5.2)$$

Standardna merna nesigurnost tipa B procenjuje se na osnovu svih raspoloživih relevantnih informacija, koje uključuju predhodne merne podatke, iskustvo i opšte znanje o karakteristikama i osobinama primenjenih standarda i instrumenata, podatke iz specifikacija proizvođača sredstava merenja, podatke dobijene tokom postupaka kalibracije ili iz nekih drugih izveštaja [68].

Vrednosti kombinovanih mernih nesigurnosti računaju se preko pojedinačnih standardnih mernih nesigurnosti tipa A i tipa B, primenom metoda "koren sume kvadrata", odnosno kao:

$$u_C(V_i) = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (5.3)$$

Vrednost proširene nesigurnosti rezultata merenja efektivnih vrednosti napona određuje se množenjem kombinovane merne nesigurnosti sa odgovarajućim faktorom pokrivanja k , odnosno:

$$U(V_i) = k u_C(V_i) \quad (5.4)$$

Odgovarajuće vrednosti faktora pokrivanja k daju se tabelarno u zavisnosti od očekivanog nivoa poverenja dobijenih rezultata merenja. Primera radi, kod izračunavanja proširene merne nesigurnosti za očekivani nivo poverenja dobijenih rezultata merenja od 99% definisana je i odgovarajuća vrednost faktora pokrivanja k koja iznosi 2,58 [68].

Postupci baždarenja ili kalibracije savremenih mernih sredstava zahtevaju precizne, tačne i stabilne naponske i strujne izvore. Korisnicima mernih instrumenata neophodni su prenosni radni etaloni za metrološko obezbeđenje mernih i tehnoloških procesa. U postupku metrološke overe, odnosno kalibracije mernih uređaja, neophodni su podaci o metrološkim karakteristikama radnog standarda i precizno definisani uslovi koje mora da zadovolji svako kalibrisano merno sredstvo. Prilikom kalibracione procedure korisnik definiše početne uslove rada (merni opseg, broj mernih tačaka na opsegu merenja, interval pouzdanosti pri izračunavanju merne nesigurnosti, itd.), unosi neophodne informacije iz specifikacija proizvođača uređaja, prati tok kalibracionog procesa i u zavisnosti od trenutnih potreba koristi memorisane rezultate merenja dobijene tokom kalibracije. Jedna od kalibracionih metoda koja se često koristi je komparativna kalibracija, gde se referentne vrednosti zadaju pomoću kalibratora i poredi sa pokazivanjem mernog uređaja koji se kalibriše.

Za slučaj da su otklonjene eventualne nelinearnosti mernog lanca, rezultat merenja Y jeste linearna funkcija ulazne merene veličine X , odnosno $Y=aX+b$. Koeficijenti linearne prave a i b su pojačanje i ofset mernog sistema. Vrednosti koeficijenata zavise od senzora i ostalih komponenti mernog lanca i podložni su kratkotrajnim i dugotrajnim nestabilnostima, pre svega usled starenja i uticaja sredine. Kod digitalnih uređaja dovoljno je kalibrisati merni lanac do A/D konverzije, pri čemu su koeficijenti u daljoj obradi stabilni i digitalno zapamćeni, dok kod analognih uređaja sva kola za obradu signala mogu da budu nastabilna, sa promenom karakteristika i prenosne funkcije. Za proračun koeficijenata a i b optimalne prave kroz dati set kalibracionih mernih tačaka, koristi se metod najmanjih kvadrata, kojim se pokazuje da postoji optimalna prava koja ispunjava uslov da je suma kvadrata grešaka na izlazu minimalna [69]. Praktično, od svih aproksimativnih pravih za dati set kalibracionih mernih tačaka, jedino jednačina optimalne prave ispunjava sledeći uslov:

$$S = \sum_{j=1}^n \varepsilon_j^2 = \sum_{j=1}^n [y_j - (ax_j + b)]^2 = \min, \quad (5.5)$$

gde $y_j = \bar{x}$ predstavlja najverovatniju vrednost m rezultata merenja, dobijenih tokom kalibracije za svaku od n kalibracionih mernih tačaka, koja odgovara aritmetičkoj sredini rezultata, odnosno:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m x_i \quad (5.6)$$

U cilju dobijanja minimuma zbira iz relacije (5.5), potrebno je odrediti parcijalne izvode te relacije u odnosu na vrednosti nepoznatih koeficijenata optimalne prave a i b . Parcijalne izvode treba izjednačiti sa nulom, pri čemu se dobijaju dve jednačine sa dve nepoznate sledećih oblika:

$$\frac{\partial S}{\partial a} = -2 \sum_{j=1}^n x_j (y_j - ax_j - b) = 0 \quad (5.7)$$

$$\frac{\partial S}{\partial b} = -2 \sum_{j=1}^n (y_j - ax_j - b) = 0 \quad (5.8)$$

Rešavanjem predstavljenog sistema jednačina dobijaju se rešenja nepoznatih koeficijenata u jednačini optimalne prave a i b , koja se naziva i pravom linearne regresije, u sledećem obliku:

$$a = \frac{n \sum_{j=1}^n x_j y_j - \sum_{j=1}^n x_j \sum_{j=1}^n y_j}{\sum_{j=1}^n x_j^2 - \left(\sum_{j=1}^n x_j \right)^2} \quad \text{i} \quad b = \frac{\sum_{j=1}^n y_j \sum_{j=1}^n x_j^2 - \sum_{j=1}^n x_j \sum_{j=1}^n x_j y_j}{n \sum_{j=1}^n x_j^2 - \left(\sum_{j=1}^n x_j \right)^2} \quad (5.9)$$

Pouzdana i validna merna podaci o realnim vrednostima kontrolisanih parametara kvaliteta električne energije mogu biti obezbeđeni samo kontinualnim nadzorom procesa distribucije i potrošnje električne energije, primenom odgovarajućih mernih uređaja i opreme koji moraju biti prethodno adekvatno testirani za ove namene. U cilju verifikacije osnovnih karakteristika uređaja za merenje parametara kvaliteta električne energije, neophodno je testirati svaki od korišćenih instrumenata u laboratorijskim uslovima ili eventualno direktno na lokacijama udaljenih mernih

stanica pojedinih korisničkih mrežnih grupa. Jedno od mogućih rešenja jeste i metoda direktnog testiranja, bazirana na prenosnim referentnim standardima u sastavu izdvojenih mernih stanica, gde se upravljanje tokom kompletne procedure testiranja može obavljati i daljinskim putem iz distributivnog centra isporučioaca električne energije posredstvom komunikacione mreže [70-73].

Referentna merna sredstva, kakva su naponski ili strujni kalibratori, danas su komercijalno raspoloživa na tržištu u različitim konstruktivnim i funkcionalnim rešenjima, od manuelnih preko delimično automatizovanih, do inteligentnih računarski podržanih mernih uređaja. Naponski i strujni kalibratori su izvori referentnih napona i struja visoke stabilnosti i tačnosti, koji u lancu metrološkog obezbeđenja sledivosti odgovaraju sekundarnim standardima, odnosno industrijskim i laboratorijskim radnim naponskim i strujnim standardima. Komercijalni kalibratori projektuju se za DC i AC napone i struje, pri čemu se vrednosti izlaznih veličina mogu menjati kontinualno u širokom opsegu i sa dovoljno velikom rezolucijom indikacije. Stabilizacija DC napona i struja u principu se obezbeđuje naponskim referencama sa serijskim ili šant regulatorima izlaznih napona i struja. Naizmenične izlazne veličine mogu se generisati u formi referentnih test signala prostoperiodičnog, pravougaonog i trouglastog talasnog oblika. Zavisno od konkretnih potreba, postoji više zahteva koje kalibratori moraju zadovoljiti. Najvažniji su da zadata vrednost na izlazu mora biti stabilna i nezavisna od eventualnih promena napajanja, otpornosti opterećenja i temperature ambijenta, kao i obavezna automatska zaštita od kratkog spoja izlaznih priključaka kalibratora. Treba posebno napomeniti da postoje i namenski specijalno projektovani instrumenti za testiranje poznatijih tipova uređaja za merenje parametara kvaliteta električne energije, kakva su rešenja multifunkcionalnih kalibratora tipa Fluke 5520A-PQ i Fluke 6100B [29,30].

5.1. Funkcionalne karakteristike kalibratora Fluke 5520A

Kalibracioni uređaj Fluke 5520A Multi-Product Calibrator je višefunkcionalni instrument, između ostalog opremljen i specijalnom PQ Power Quality opcijom, koja omogućava testiranje instrumentacije realizovane za potrebe merenja i analize parametara kvaliteta električne energije. Generisanje referentnih trofaznih talasnih oblika, stabilnih parametara, koji odgovaraju signalima energetske mreže, uz specijalne funkcije koje simuliraju realno moguće mrežne poremećaje (viši harmonici, fliker, prenaponi, padovi napona), daje mogućnost primene ovog uređaja u procesu testiranja instrumenata za merenje kvaliteta električne energije, analizatora mrežnih poremećaja, različitih uređaja za nadzor i memorisanje parametara kvaliteta i slične opreme. Fluke 5520A-PQ je projektovan za testiranje mernih uređaja programiranih za funkcionisanje u skladu sa sledećim standardima kvaliteta: IEC 61000-3-2, IEC 61000-3-3, IEC 61000-4-7, IEC 61000-4-11, IEC 61000-4-14, IEC 61000-4-15, IEC 868, IEEE 1159 i IEEE 519 [29]. Fizički izgled osnovnog prednjeg panela multifunkcionalnog kalibratora tipa Fluke 5520A predstavljen je na slici 5.1.



Slika 5.1. Prednji panel kalibracionog instrumenta Fluke 5520A

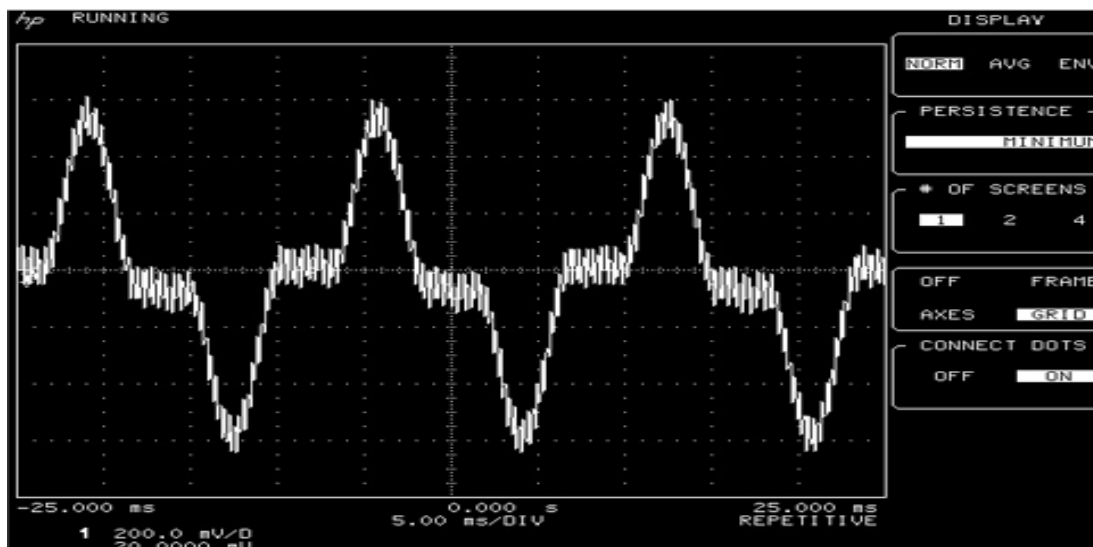
PQ opcija kalibratora 5520A uključuje nekoliko različitih modova generisanja referentnih trofaznih signala. Karakteristični modovi za simulaciju pojedinih mrežnih poremećaja su sledeći:

- Composite harmonic mode;
- Flicker simulation mode;
- Sags and swells simulation mode;
- IEC and NRC waves simulation mode;

Navedeni simulacioni modovi mogu funkcionisati u varijanti sa jednostrukim naponskim, odnosno strujnim izlazom (single output mode) ili u varijanti sa dvostrukim izlazom (dual output mode), naponsko-strujnim ili naponsko-naponskim. Takvi simulacioni signali koriste se prilikom testiranja uređaja za merenje i analizu kvaliteta električne energije, proverom pojedinih opcija za merenje sadržaja viših harmonijskih komponenata, merenje naponskog treperenja, parametara prekida, prenapona i propada napona, itd. [29].

5.1.1. Composite harmonic mode

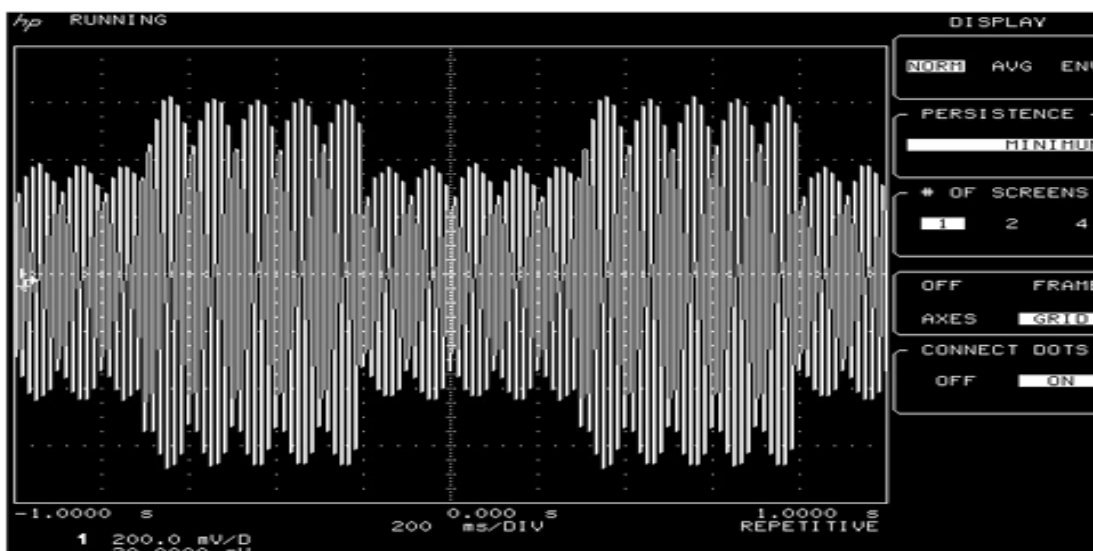
Composite harmonic mode kalibratora Fluke 5520A obezbeđuje korisnicima generisanje referentnih trofaznih signala za simulaciju prisustva viših harmonijskih komponenata od 2. do 63. reda. Pri tome je moguće osnovnom hamoniku signala superponirati do 15 različitih signala viših harmonijskih članova, uključujući tačno specificiranje vrednosti amplituda i faza svakog od viših harmonika u relativnom odnosu na nominalnu vrednost osnovnog harmonika. Naponski i strujni generisani referentni signali međusobno su nezavisni, ali su vremenski sinhronizovani sa faznom rezolucijom od 0,01 stepena. Dva različita korisnički definisana simulaciona harmonijska signala mogu biti istovremeno sačuvana u memoriji kalibratora. Primer kompozitnog referentnog signala generisanog pomoću Composite harmonic moda kalibratora 5520A, predstavljen je na slici 5.2.



Slika 5.2. Generisanje signala u Composite harmonic modu kalibratora Fluke 5520A

5.1.2. Flicker simulation mode

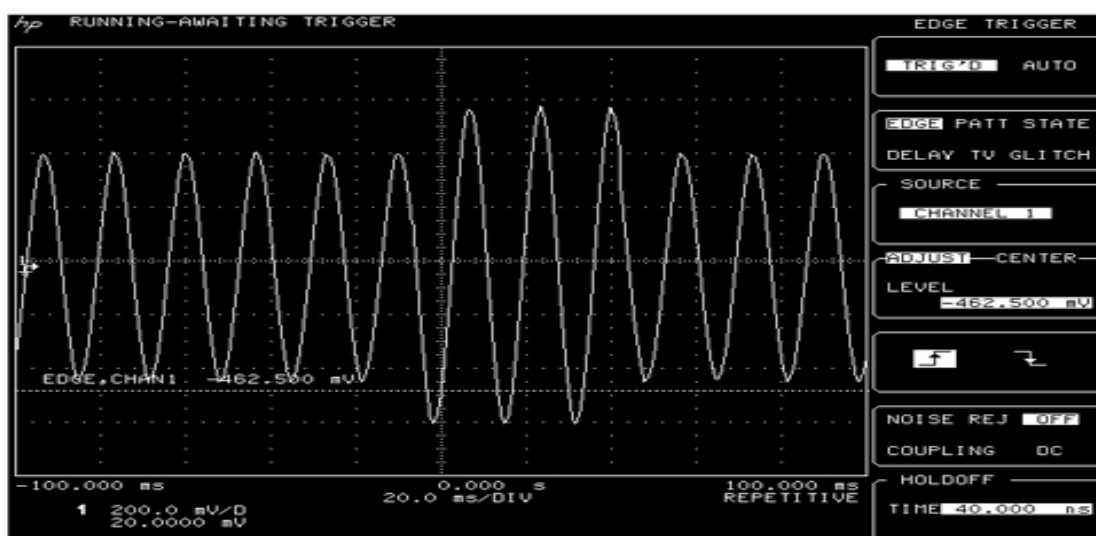
Flicker simulation mode kalibratora Fluke 5520A omogućava generisanje izlaznih signala kalibratora u prisustvu naponskog i strujnog treperenja (flikera). Simulacioni signali sa sadržajem flikera obezbeđuju se postupkom amplitudne modulacije prostoperiodičnih izlaznih naponskih ili strujnih signala. Frekvencija izlaznog simulacionog signala može se korisnički po potrebi menjati u opsegu od 0,1Hz do 30Hz. Amplitudna vrednost flikera je programabilna i može se podešavati u rasponu od $\pm 100\%$ nominalne vrednosti amplitude korisnog signala, uz inkrement pri promeni vrednosti od 0,01%. Mod simulacije flikera koristi se tokom kalibracije flikermetara realizovanih u sklopu savremenih analizatora kvaliteta električne energije, programiranih za funkcionisanje po standardu IEC 61000-4-15. Provera kompatibilnosti flikermetara sa IEC 61000-4-15 bazirana je na merenju vrednosti kratkotrajnog treperenja P_{st} . Referentni signal kojim se simulira prisustvo flikera, generisan preko Flicker simulation moda kalibratora 5520A predstavljen je na slici 5.3.



Slika 5.3. Generisanje signala u Flicker simulation modu kalibratora Fluke 5520A

5.1.3. Sags and swells simulation mode

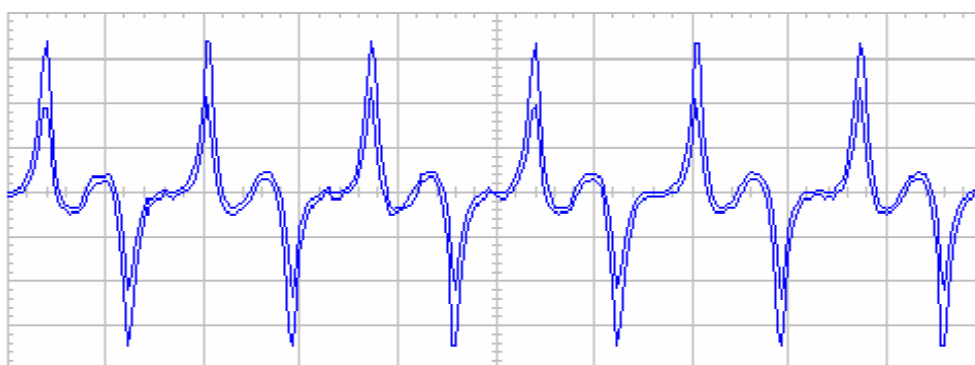
Sags and swells simulation mode kalibratora Fluke 5520A daje mogućnost korisnicima da generišu referentne naponske signale sa simulacijom pojave previsokih napona ili padova napona. Amplitudne vrednosti poremećaja definiše korisnik kalibratora, pri čemu mogu varirati u rasponu od $\pm 100\%$ nominalne vrednosti amplitude korisnog signala. Trajanje padova i prenapona se može podešavati u rasponu od 0,005 do 60 sekundi. Vreme pojave poremećaja napona bira se u rasponu od 0 do 99,999 sekundi nakon iniciranja generisanja signala. Referentni signal previsokog napona generisan pomoću Sags and swells simulation moda kalibratora 5520A, prikazan je na slici 5.4.



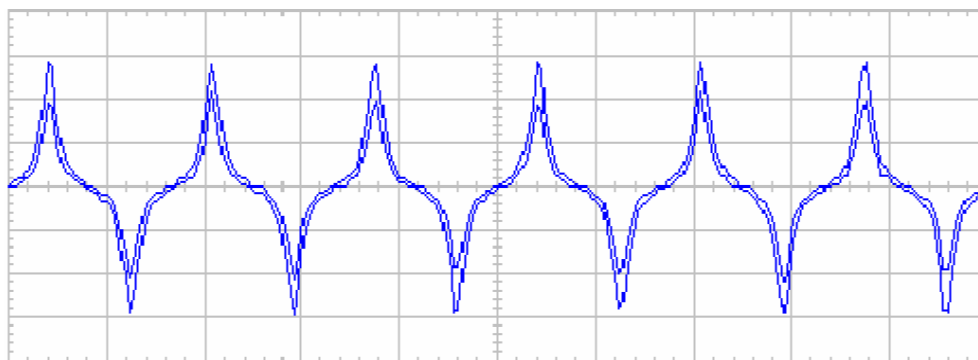
Slika 5.4. Generisanje signala u Sags and swells simulation modu kalibratora Fluke 5520A

5.1.4. IEC and NRC waves simulation mode

IEC and NRC waves simulation mode daje mogućnost generisanja specijalnih harmonijski izobličenih referentnih signala, definisanih dokumentima Međunarodne elektrotehničke komisije (IEC - International Electrotechnical Commission) i kanadskog Nacionalnog istraživačkog saveta (NRC – National Research Council of Canada). Simulacioni signali tipa IEC definisani su prema standardu IEC 61000-3-2, Limits for harmonic current emissions equipment input current $\leq 16A$ per phase. Kompozitni kalibracioni signali IEC A i IEC D predstavljani su na slikama 5.5 i 5.6.

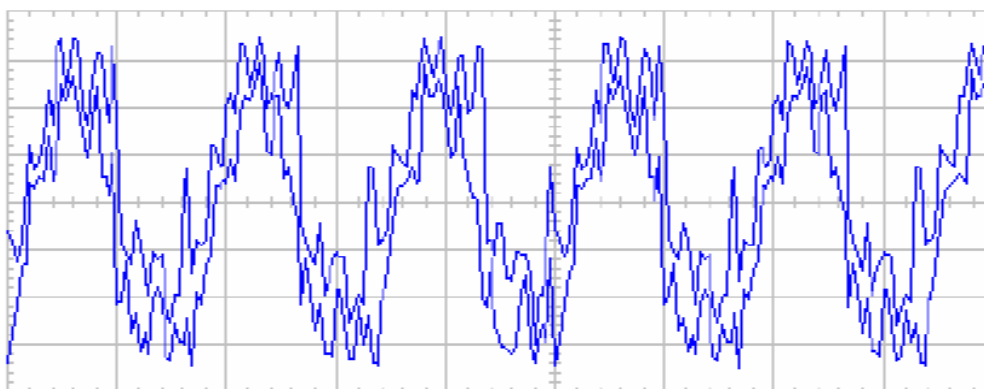


Slika 5.5. IEC A kompozitni simulacioni signal kalibratora Fluke 5520A

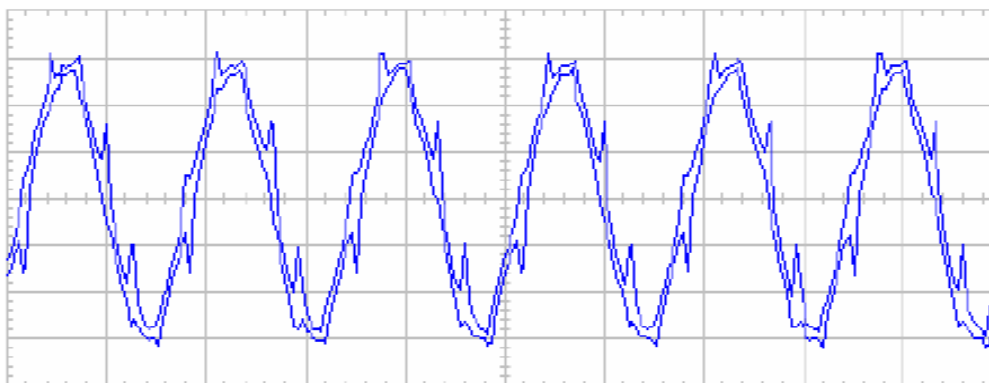


Slika 5.6. IEC D kompozitni simulacioni signal kalibratora Fluke 5520A

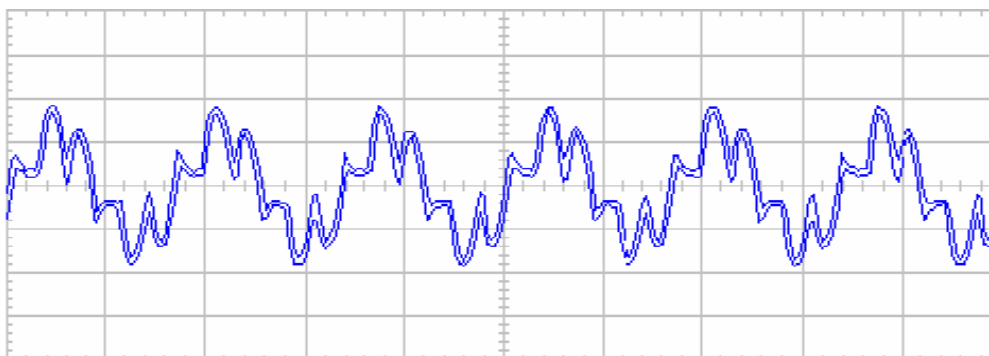
Harmonijski kompozitni simulacioni signali klase NRC definisani su na osnovu normativa kanadskog Nacionalnog istraživačkog saveta vezanih za analizu viših harmonika napona [74,75]. Simulacioni signali tipa NRC 7030, NRC 2, NRC 3, NRC 4 i NRC 5 dati su na sledećim slikama.



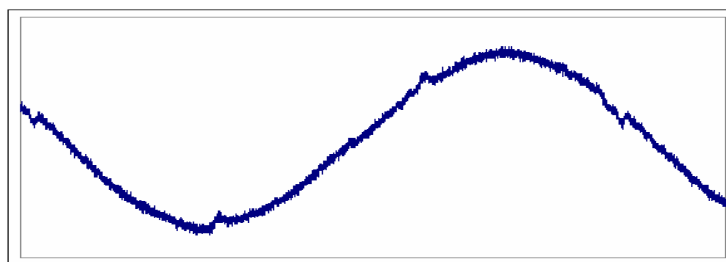
Slika 5.7. NRC 7030 kompozitni simulacioni signal kalibratora Fluke 5520A



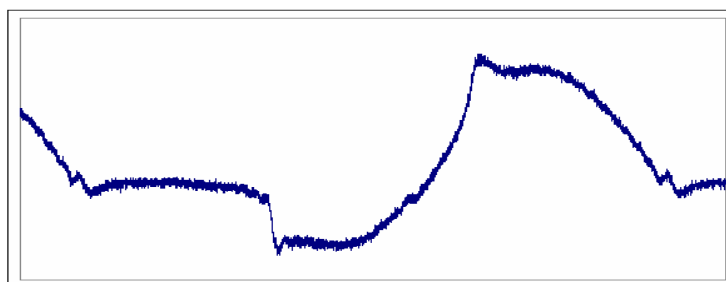
Slika 5.8. NRC 2 kompozitni simulacioni signal kalibratora Fluke 5520A



Slika 5.9. NRC 3 kompozitni simulacioni signal kalibratora Fluke 5520A

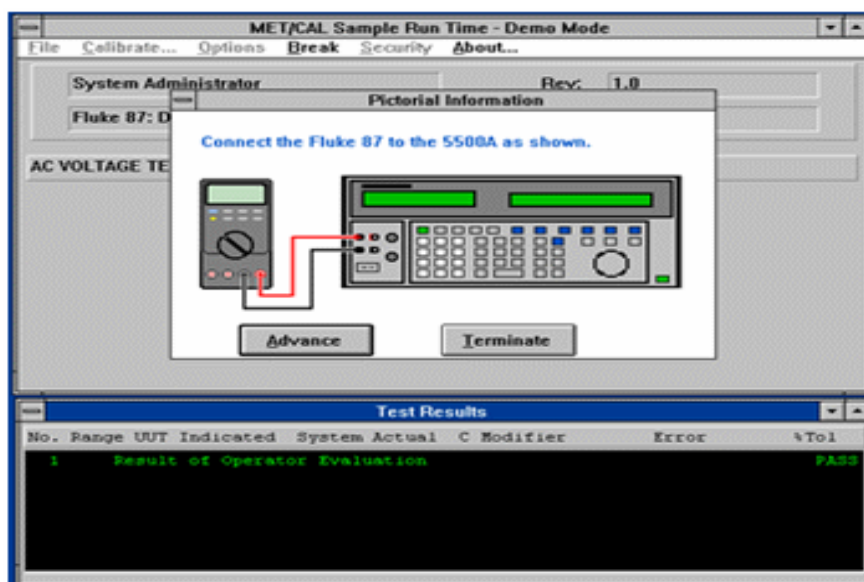


Slika 5.10. NRC 4 kompozitni simulacioni signal kalibratora Fluke 5520A



Slika 5.11. NRC 5 kompozitni simulacioni signal kalibratora Fluke 5520A

Direktna dvosmerna komunikacija kalibracionog instrumenta Fluke 5520A sa standardnim računarom obezbeđuje se pomoću odgovarajuće PC programske podrške MET/CAL, 5500/CAL i MET/TRACK. Kalibracioni softver omogućava računarsko upravljanje postupkom kalibracije uz statističku obradu i analizu rezultata merenja dobijenih tokom kalibracije. MET/CAL programsko okruženje, sa uprošćenom ilustracijom šeme kalibracionog procesa, predstavljeno je na slici 5.12.



Slika 5.12. PC okruženje programske podrške kalibratora Fluke 5520A softvera MET/CAL

Skraćeni pregled osnovnih funkcionalnih karakteristika kalibratora Fluke 5520A za svaki od opisanih simulacionih modova rada, predstavljen je sledećom zajedničkom tabelom 5.1. [29].

Izlazna veličina	Opseg vrednosti	Nesigurnost
DC napon	0 do 1020V	12 ppm
AC napon 10Hz – 500kHz	1mV do 1020V	120 ppm
DC struja	0 do 20.5A	100 ppm
AC struja 10Hz – 30kHz	29 μ A do 20.5A	600 ppm
Otpornost	0 do 1100M Ω	28 ppm
Kapacitivnost	0.19nF do 110mF	0.25%
Fazna razlika dva signala	0 do $\pm 179,99$ stepeni	± 0.07 stepeni
Frekvencija	0.01Hz do 2MHz	25 ppm
DC snaga	10.9 μ W do 20.5kW	0.023%
AC snaga	10.9 μ W do 20.5kW	0.08%
Temperatura	-250 $^{\circ}$ C do 2316 $^{\circ}$ C	0.14 $^{\circ}$ C

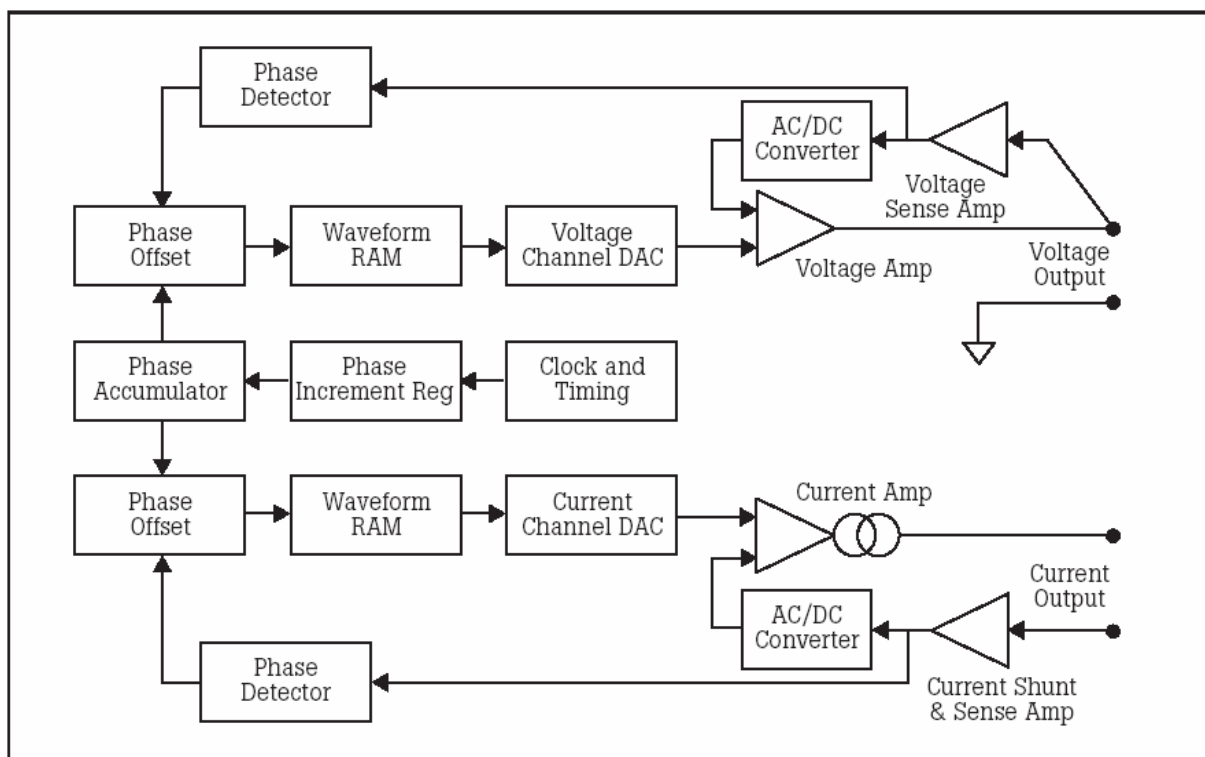
Composite harmonic mode	
maksimalan broj harmonika po signalu	15
specificirane vrednosti osnovne frekvencije	10–20Hz, 45–65Hz, 400Hz
frekvencija harmonika najvišeg reda	5kHz
rezolucija amplitudne vrednosti harmonika	0,1% amplitude osnovnog harmonika
rezolucija faze viših harmonika	0,1 stepen

Flicker simulation mode	
opseg generisanja naponskih signala	1mV do 1020V
opseg generisanja strujnih signala	29 μ A do 20,5A
specificirane vrednosti osnovne frekvencije	50Hz i 60Hz
vrednosti frekvencije modulisanog signala	0,1Hz do 40Hz
tip modulacije izlaznog signala	kvadratna ili sinusna

Sags and swells simulation mode	
opseg generisanja naponskih signala	1mV do 1020V
opseg generisanja strujnih signala	29 μ A do 20,5A
specificirane vrednosti osnovne frekvencije	45Hz do 65Hz
trajanje propada ili prenapona	0,032 do 60 sekundi

Tabela 5.1. Pregled osnovnih karakteristika kalibratora Fluke 5520A po opisanim modovima rada

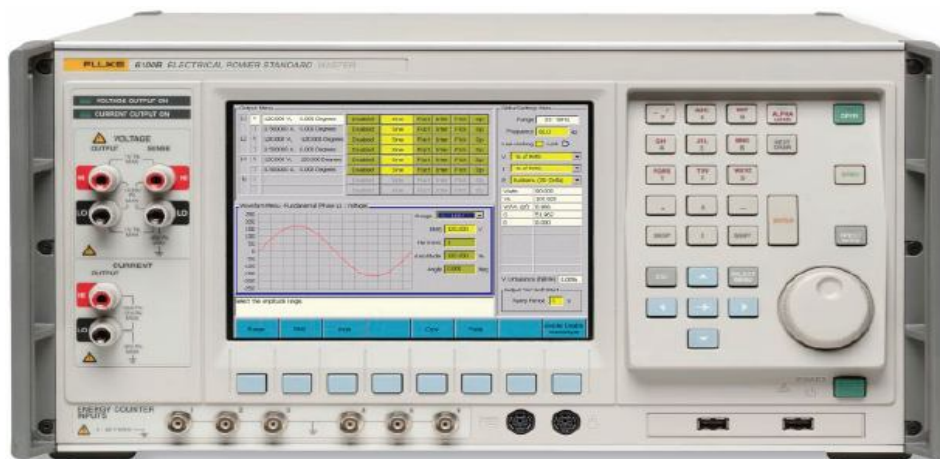
Na kraju, ilustracije radi, uprošćena blokovska konfiguracija prethodno opisanog rešenja multifunkcionalnog kalibracionog uređaja tipa Fluke 5520A, predstavljena je na sledećoj slici.



Slika 5.13. Uprošćena blokovska konfiguracija multifunkcionalnog kalibratora Fluke 5520A

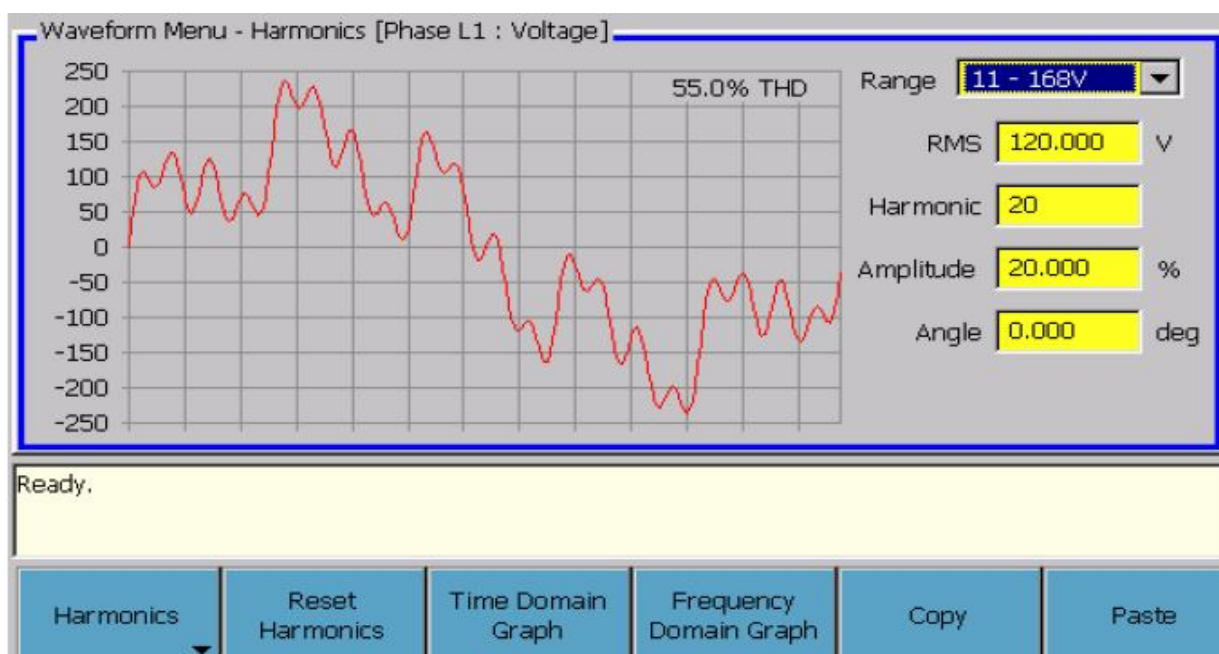
5.2. Funkcionalne karakteristike kalibratora Fluke 6100B

Pored detaljnije opisanog rešenja kalibracionog instrumenta Fluke 5520A komercijalno su dostupne i razne druge varijante ovih uređaja. U ovoj disertaciji će u kraćim crtama biti opisane i neke osnovne karakteristike nešto savremenijeg rešenja ove funkcionalne varijante kalibratora, tipa Fluke 6100B. Na slici 5.14. prikazan je izgled osnovnog prednjeg panela multifunkcionalnog kalibratora tipa Fluke 6100B [30].

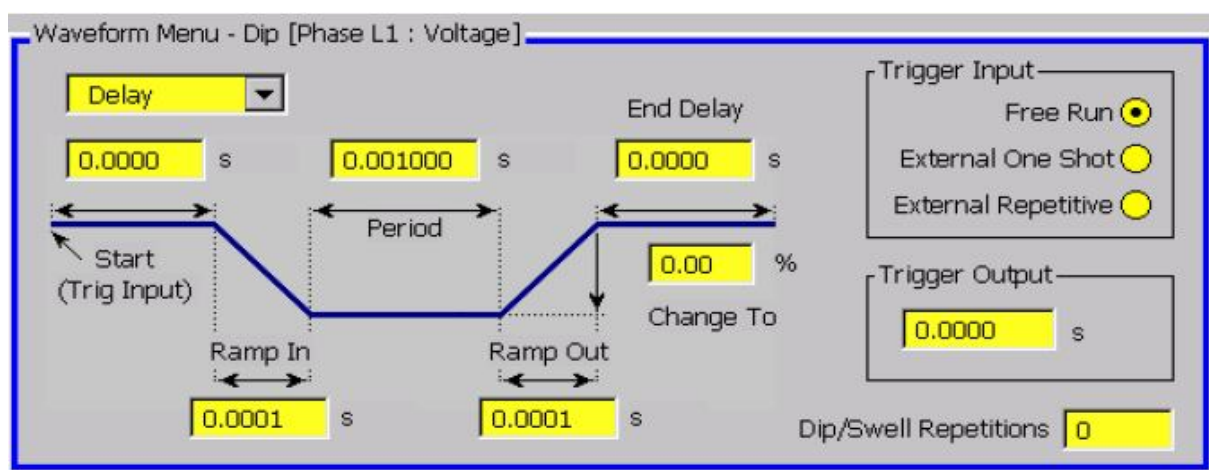


Slika 5.14. Prednji panel kalibracionog instrumenta Fluke 6100B

Kalibrator Fluke 6100B obezbeđuje generisanje naponskih i strujnih referentnih signala sa nominalnom tačnošću od 0.005%, odnosno 50 ppm. Definisanje faze generisanih signala može se vršiti sa rezolucijom od 1 milistepena ili 10 mikroradijana. Tačnost generisanja faze kada se radi o jednom signalu iznosi 3 milistepena, dok se kod generisanja trofaznih referentnih signala fazna razlika između signala definiše sa tačnošću od 5 milistepena. I kod ovog tipa kalibratora postoji više različitih modova rada za definisanje parametara flikera, saržaja viših harmonika, prenapona i padova napona, međuharmonika, različitih fluktuacija parametara signala, itd. Pri generisanju signala sa višim harmonicima moguće je isovremeno kombinovati do 100 različitih harmonijskih komponenata signala. Primer generisanja naponskog signala sa viših harmonicima na prednjem panelu kalibratora Fluke 6100B prikazan je na slici 5.15, dok je na slici 5.16. ilustrovan primer generisanja osnovnih parametara naponskog signala pri simulaciji pojave propada napona [30].



Slika 5.15. Generisanje signala u Harmonics simulation modu kalibratora Fluke 6100B



Slika 5.16. Generisanje signala u Dips and swells simulation modu kalibratora Fluke 6100B

6. REALIZACIJA SISTEMA ZA TESTIRANJE UREĐAJA ZA MERENJE KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Rešenje akvizicionog sistema namenjenog testiranju uređaja za merenje kvaliteta električne energije, koje će biti predstavljeno kao poseban doprinos ove doktorske disertacije, razvijeno je u okviru istraživanja na međunarodnom naučnom projektu kategorije FP7, iz programa SEE-ERA.NET Plus, pod nazivom: "Algorithms for Time-Varying Harmonic Analysis for Power Quality Assessment applicable on Modern Digital Signal Processors", pod referentnim brojem ERA 78/01. Ovaj projekat je realizovan u okviru međunarodne naučne saradnje Elektronskog fakulteta u Nišu sa srodnim fakultetima Univerziteta u Skoplju, Mariboru i Gracu. Osnovni cilj istraživanja na ovom naučnom projektu bio je razvoj i implementacija efikasnog algoritma za analizu poremećaja kvaliteta električne energije, sa posebnim naglaskom na analizu uticaja harmonijskih izobličenja trofaznih signala elektrodistributivne mreže na nivo kvaliteta električne energije isporučene krajnjim korisnicima. Funkcionalna osnova realizovanog rešenja bazirana je na primeni grafičkog programskog paketa za razvoj virtuelne merne instrumentacije LabVIEW i dve kartice za akviziciju podataka NI PCI 6713 i NI USB 9215A [5].

Ubrzano prihvatanje i široka primena računara poslednjih godina donosi značajan napredak i na polju merne nauke i tehnologije, zahvaljujući razvoju sofisticiranih uređaja i prateće opreme za merenje, testiranje i automatizaciju procesa. Veliki korak napred u savremenim sistemima metrološkog obezbeđenja napravljen je pojavom i razvojem koncepta virtuelne instrumentacije, koja koristi prednosti prihvatljive cene i izuzetnih karakteristika savremenih računara. Virtuelna instrumentacija predstavlja metodologiju za razvoj mernih instrumenata koja koristi standardne računare ili industrijske radne stanice, prateće hardverske komponente za akviziciju i digitalnu konverziju signala i specijalizovane programske pakete koji omogućavaju prikupljanje, obradu i grafičku prezentaciju dobijenih rezultata merenja. Na ovaj način obezbeđuje se sinteza više različitih tipova mernih instrumenata u zajednički multifunkcionalni instrument na bazi računara. Takav koncept predstavlja suštinski prelazak sa tradicionalnih, hardverski kontrolisanih mernih instrumenata i sistema na savremene računarski upravljane merno-informacione sisteme [39].

Programi virtuelne instrumentacije omogućavaju korisniku projektovanje mernog uređaja koji najbolje odgovara njegovim aktuelnim potrebama i zahtevima, odnosno specifičnoj primeni. Pri tome, treba napomenuti da osnovne funkcije uređaja definiše upravo korisnik, da se virtuelni instrument odlikuje softverskim rešenjem koje minimizira troškove razvoja i održavanja i koje se

za razliku od klasičnih tipova instrumenata odlikuje relativno niskom cenom. Hardverski segment razvijenog virtuelnog instrumenta čine standardni računar i akviziciona kartica kao spoljni uređaj za merenje i akviziciju podataka. Softverski deo virtuelnog instrumenta programira se po potrebi, pri čemu korisnik na raspolaganju ima univerzalne funkcionalne module, elemente prednje ploče ili gotove prednje panele mernih uređaja i druge funkcije korisne u realizaciji merno-akvizicionih i upravljačkih sistema. Virtuelni instrumenti se sastoje od prednjeg panela (grafičkog korisničkog interfejsa) i blok dijagrama (programske sekvence). Grafički korisnički interfejs GUI (Graphical User Interface) virtuelnog instrumenta predstavlja softversku zamenu za prednji panel klasičnog instrumenta, pomoću koje se obezbeđuje komunikacija između korisnika i programske aplikacije. Primenom raspoloživih funkcionalnih elemenata preko blok dijagrama, koji predstavljaju izvršne programe, korisnik realizuje odgovarajući virtuelni instrument. Jedna od najznačajnijih prednosti virtuelnih mernih instrumenata je da se eventualne izmene mogu vršiti jednostavnom korekcijom softverskog algoritma, na osnovu koga se primenom računara realizuje merna procedura [39,76].

6.1. Softver virtuelne instrumentacije

Danas postoji veliki broj komercijalno dostupnih specijalizovanih softverskih paketa, koji se u kombinaciji sa pratećim hardverskim komponentama koriste za projektovanje virtuelne merne instrumentacije. Funkcionalne mogućnosti softverskih alata kreću se od programskih drajvera za upravljanje specifičnim hardverom ili uređajem, pa do aplikacionih programskih paketa za razvoj kompletnih mernih sistema. Kvalitet i fleksibilnost softvera primenjenog pri projektovanju nekog instrumenta ili sistema, njegove su osnovne karakteristike. Kao najvažnija komponenta virtuelnog mernog sistema, softversko okruženje mora biti koncipirano tako da zadovoljava sledeće osnovne zahteve: upravljanje akvizicijom podataka, kontinuirano praćenje i prikaz mernih signala, analizu i obradu signala, prezentaciju i snimanje rezultata merenja i pomoć korisnicima mernog sistema.

Kraći pregled najvažnijih karakteristika nekih poznatijih komercijalnih softverskih paketa za projektovanje virtuelne merne instrumentacije i njihovih proizvođača, dat je u tabeli 6.1. [76]. Upravljanje akvizicijom mernih podataka podrazumeva obezbeđenje kompletnog upravljanja A/D konverzijom ili drugim funkcijama pomoću kojih se vrši akvizicija signala, kako bi se na najbolji način iskoristile mogućnosti raspoloživog hardvera. Ovim se obezbeđuje jednostavnost procedure rekonfiguracije sistema uz eventualne minimalne intervencije korisnika u slučaju da se jedno hardversko rešenje zameni drugim i omogućava se primena najoptimalnijeg hardvera, pri čemu se ne menja procedura rada. Algoritam određene merne procedure, preko koga se na bazi digitalne obrade signala dolazi do korisnih podataka iz procesiranih signala, predstavlja centralni deo svakog virtuelnog instrumenta. Svaki virtuelni instrument trebalo bi da raspolaže osnovnim bibliotečkim funkcijama kojima se omogućavaju neka najučestalija merenja, kao što su merenja periode i frekvencije signala ili merenja efektivnih vrednosti signala u vremenskom domenu.

Program	Proizvođač	Osnovne karakteristike
LabVIEW	National Instruments (www.ni.com)	grafički orijentisano programiranje; analiza i prezentacija mernih podataka; biblioteke gotovih elemenata za kreiranje korisničkog interfejsa; upravljanje akvizicionim karticama i programabilnim instrumentima;
LabWINDOWS/ CVI	National Instruments (www.ni.com)	akvizicija, analizu i prezentacija podataka; rad pod različitim operativnim sistemima; biblioteke za akviziciju i analizu podataka; poseduje ANSI C kompajler; integracija C koda i DLL-ova u program;
Visual Designer	Intelligent Instrumentation Inc. (www.instrument.com)	grafički orijentisano programiranje; razvojno okruženje na bazi blok dijagrama; podržava veći broj akvizicionih kartica; IEEE-488 i RS-232 komunikacija;
Labtech Control	Laboratory Technologies Corp. (www.labtech.com)	grafički orijentisano programiranje; namenjen za nadzor i upravljanje u industrijskim procesima; obrada alarma;
HP VEE	Hewlett Packard Co. (www.hp.com)	grafički orijentisano programiranje za merenje i testiranje; upravljanje mernim instrumentima; komunikacija sa drugim programima;
DADiSP/LT	DSP Development Corp. (www.dadisp.com)	moгуćnost podešavanja parametara hardvera za A/D konverziju, akviziciju i prezentaciju mernih podataka;

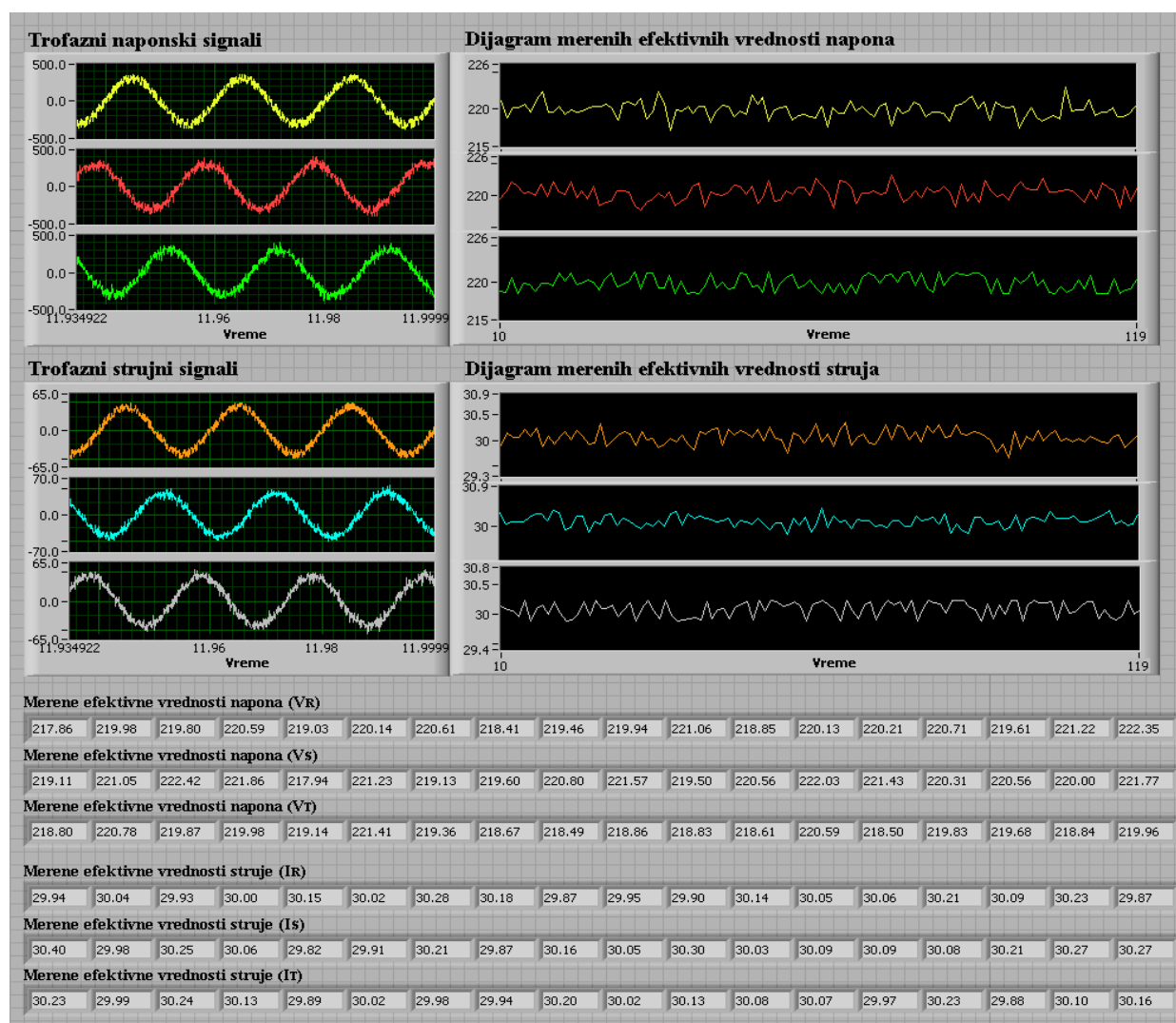
Tabela 6.1. Usporedni pregled osnovnih karakteristika softverskih alata virtuelne instrumentacije

Koncept virtuelne merne instrumentacije se vrlo uspešno primenjuje u različitim oblastima industrije kao deo sistema metrološkog obezbeđenja u procesima proizvodnje i kontrole kvaliteta. Instrumenti ove namene moraju da ispune vrlo stroge zahteve u pogledu brzine prenosa podataka, velikih razdaljina između krajnjih tačaka i mogućnosti povezivanja sa uređajima koji za transfer informacija koriste različite protokole. Kako bi virtuelni merni uređaji bili potpuno funkcionalni i praktično primenljivi moraju imati mogućnosti za brzo i jednostavno integrisanje u već postojeće merne sisteme. U praksi ovo ne predstavlja veći problem, obzirom da virtuelni instrumenti imaju mogućnosti za komunikaciju na bazi različitih tipova interfejsa (RS-232, GPIB, PXI i VXI) [38].

6.1.1. Primena LabVIEW softvera za merenje kvaliteta električne energije

LabVIEW predstavlja softversko razvojno okruženje za realizaciju programa na bazi blok dijagrama primenom grafički orijentisanog programiranja. To je programski jezik opšteg tipa koji uključuje veliki broj bibliotečkih funkcija namenjenih za rešavanje različitih zadataka. LabVIEW omogućava projektovanje virtuelne instrumentacije, formiranjem grafičkog korisničkog interfejsa na ekranu računara, koji upravlja instrumentacionim programom i pratećim hardverom, analizira prikupljene merne podatke i prikazuje rezultate [77]. Pored ostalog LabVIEW softver omogućava projektovanje virtuelne instrumentacije za merenje i analizu kvaliteta električne energije [35-42].

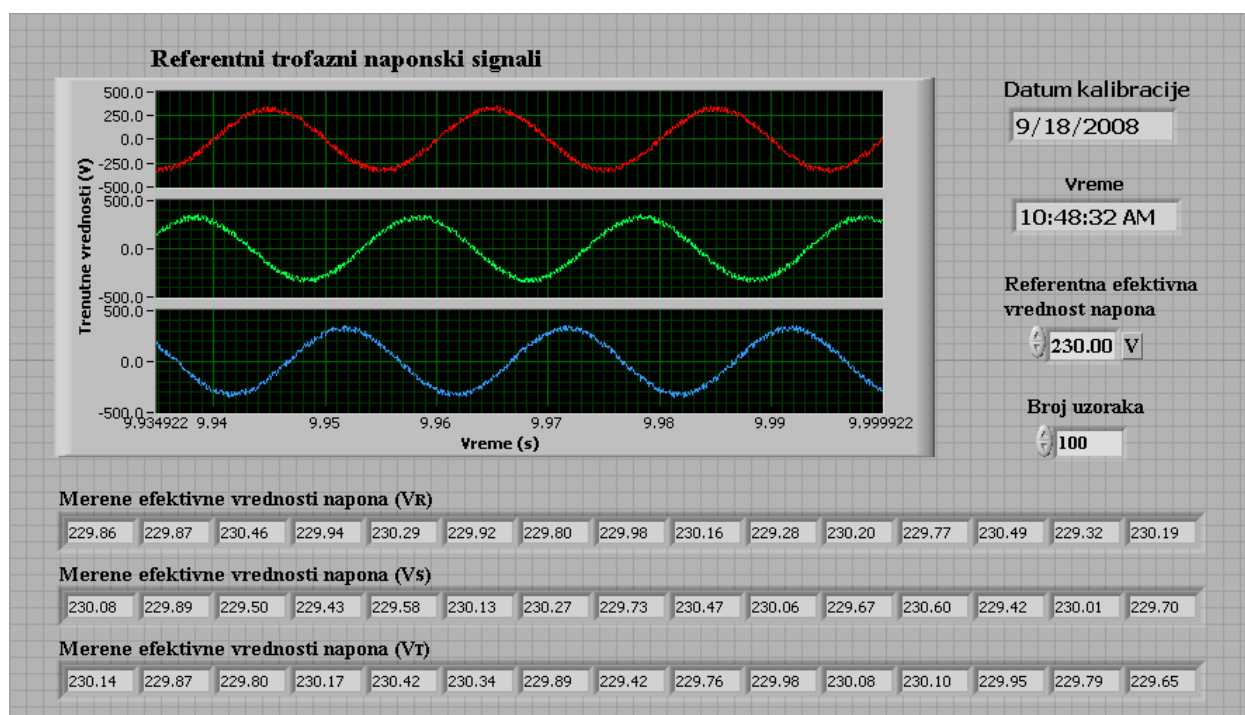
U okviru projekta "Primena savremenih metoda i uređaja za analizu i kontrolu kvaliteta električne energije prema važećim EU standardima", finansiranog od Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, na Katedri za merenja Elektronskog fakulteta u Nišu razvijena su neka rešenja u primeni softvera virtuelne instrumentacije za merenje i analizu propisanih parametara kvaliteta električne energije. Kao primer rešenja jednog takvog virtuelnog instrumenta na slici 6.1. prikazan je prednji panel virtuelnog instrumenta, razvijenog u LabVIEW



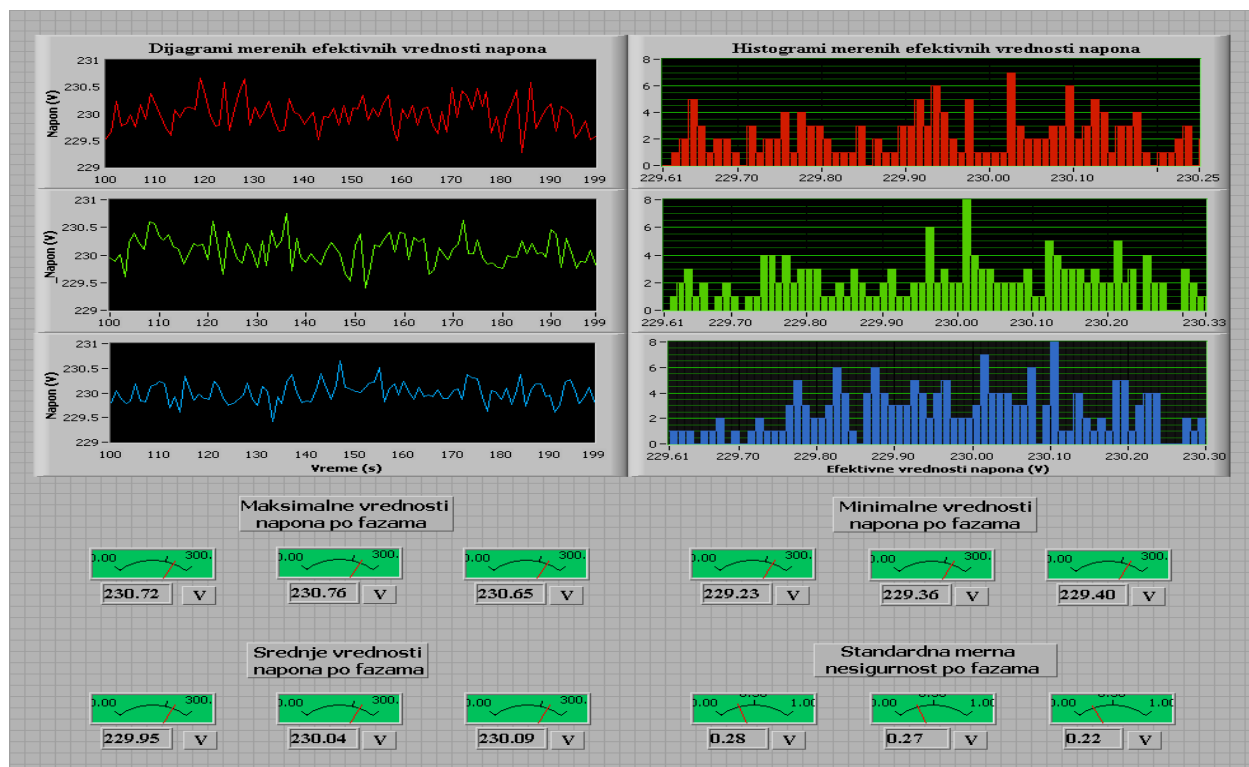
Slika 6.1. LabVIEW virtuelni instrument za merenje efektivnih vrednosti trofaznih napona i struja

programskom okruženju, koji omogućava merenje i grafički prikaz rezultata merenja trenutnih efektivnih vrednosti trofaznih naponskih, odnosno strujnih signala elektrodistributivnog sistema. Uporedo sa kontinualnim monitoringom talasnih oblika trofaznih naponskih i strujnih signala, projektovani virtuelni instrument prikazuje i vremenske dijagrame izmerenih efektivnih vrednosti mrežnih napona i struja, kao i sukcesivne merne podatke o trenutnim vrednostima napona i struja po svim fazama. Radi bolje preglednosti na prednjem panelu instrumenta prikazano je ukupno po osamnaest uzastopno izmerenih efektivnih vrednosti trofaznih napona, odnosno struja. Praktično, implementacijom prikazanog rešenja u sastav izdvojenih mernih stanica distribuiranog sistema za kontrolu kvaliteta električne energije, obezbeđuje se kontinualni monitoring promena trenutnih vrednosti parametara napona i struja na različitim lokacijama elektrodistributivne mreže [78-81].

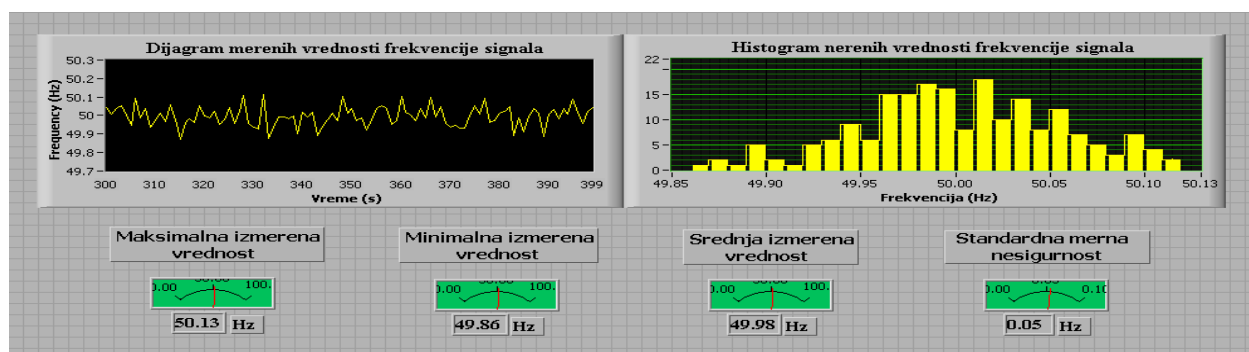
Sledeće rešenje odnosi se na primenu softvera virtuelne merne instrumentacije u procesu kalibracije trofaznog analizatora kvaliteta električne energije. Prednji panel LabVIEW virtuelnog instrumenta za metrološko obezbeđenje toka kalibracije analizatora kvaliteta električne energije prikazan je na slici 6.2. Ovaj virtuelni instrument obezbeđuje algoritam kalibracione procedure, što uključuje poređenje rezultata merenja dobijenih tokom kalibracije sa referentnim vrednostima kvalitativnih naponskih parametara, proračun srednjih efektivnih vrednosti merenog napona, kao i proračun komponenata standardne merne nesigurnosti. Ovi proračuni vrše se na bazi statističke obrade rezultata merenja parametara referentnih trofaznih signala napona, prikazanih na slici 6.2. Pored kontinualnog monitoringa referentnih naponskih signala po fazama, virtuelni instrument prikazuje i odgovarajuće tabele sa izmerenim efektivnim vrednostima referentnih napona po sve tri faze, uključujući i dodatne podatke o datumu i vremenu snimanja rezultata merenja [82-85].



Slika 6.2. Virtuelni instrument za prikaz referentnih kalibracionih signala i rezultata merenja napona



Slika 6.3. LabVIEW statistička analiza efektivnih vrednosti napona izmerenih tokom kalibracije

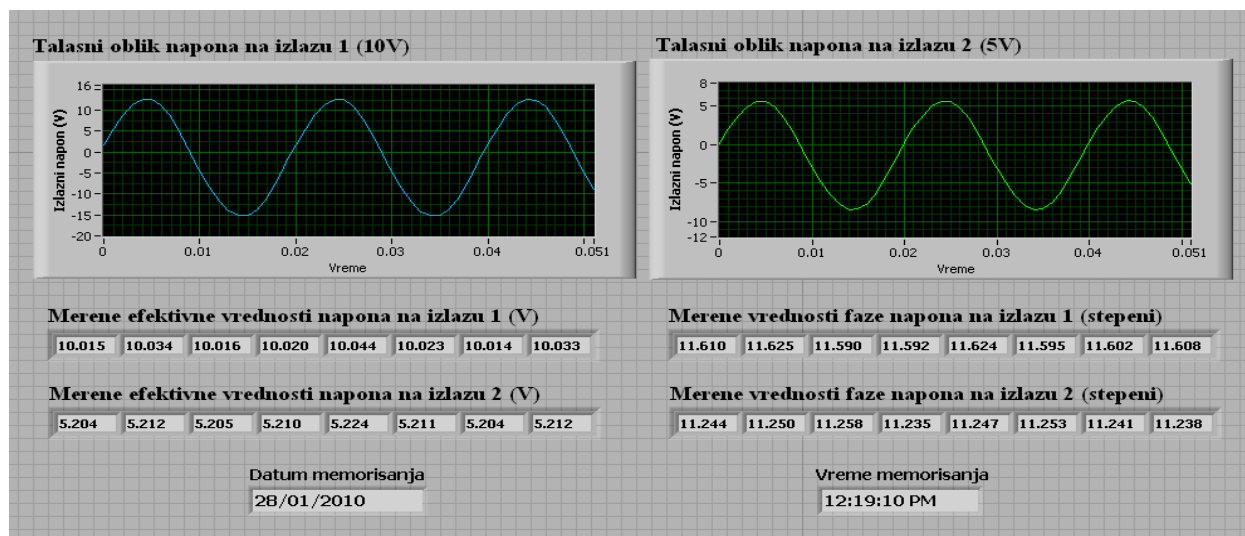


Slika 6.4. LabVIEW statistička analiza vrednosti frekvencije signala izmerenih tokom kalibracije

Na slici 6.3 prikazan je prednji panel za statističku obradu izmerenih efektivnih vrednosti napona po fazama, dobijenih pri kalibraciji. Na ovom prednjem panelu ilustrovani su vremenski dijagrami i odgovarajući histogrami za stotinu efektivnih vrednosti napona merenih analizatorom kvaliteta električne energije tokom kalibracione procedure. Analiza uključuje i prikaz minimalnih i maksimalnih izmerenih vrednosti napona po fazama, procenu srednjih izmerenih vrednosti, kao i proračun standardne merne nesigurnosti po svim fazama. Rezultati LabVIEW statističke analize izmerenih vrednosti frekvencije signala dobijenih tokom kalibracije predstavljeni su na slici 6.4.

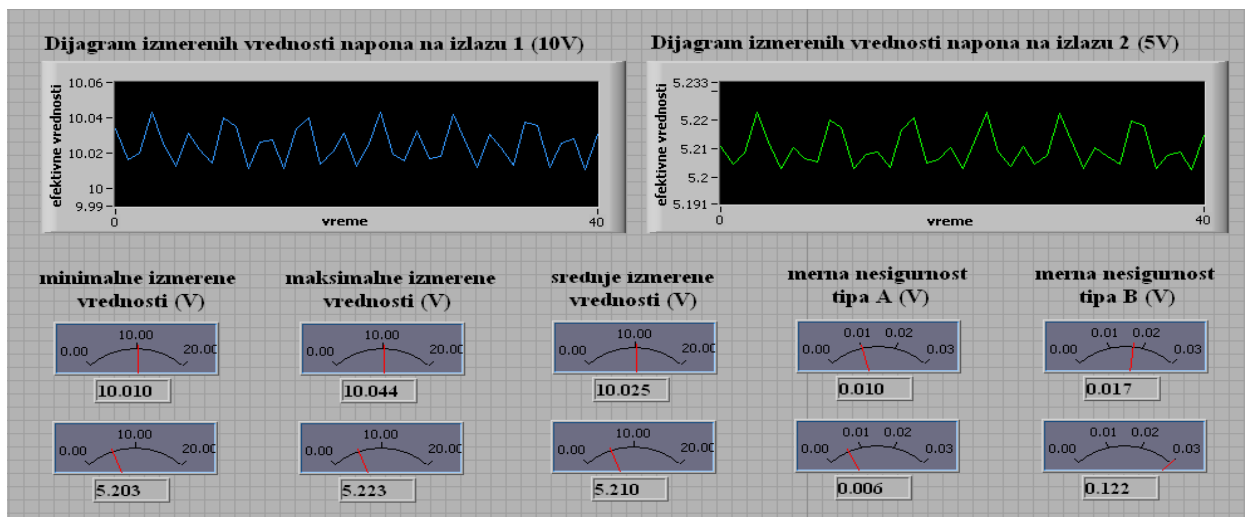
Treći primer koji će ovde biti naveden odnosi se na mogućnosti primene softvera virtuelne instrumentacije u postupku ispitivanja osnovnih karakteristika naponskih mernih transformatora, na bazi softverske analize rezultata merenja dobijenih merenjem napona na izlazu transformatora. Referentne vrednosti parametara napona na ulazu mernog transformatora, propisane standardima,

obezbeđuju se preko multifunkcionalnog kalibratora Fluke 5100B. Hardverski deo sistema čine računar i akviziciona kartica NI PCI 6251. LabVIEW programska aplikacija upravlja procesom merenja parametara napona i omogućava hronološko memorisanje, statističku analizu i grafičku prezentaciju izmerenih vrednosti osnovnih parametara napona na izlazu mernog transformatora. Prednji panel kontrolnog virtuelnog instrumenta, koji omogućava uporednu grafičku prezentaciju memorisanih talasnih oblika naponskih signala na izlazu mernog transformatora i prikaz nekih od rezultata merenja osnovnih parametara izlaznih napona, predstavljen je na slici 6.5. [86-89].



Slika 6.5. Virtuelni instrument za grafičku prezentaciju talasnih oblika signala i rezultata merenja parametara napona na izlazu mernog transformatora

Rezultati LabVIEW statističke analize efektivnih vrednosti napona, izmerenih na izlazima mernog transformatora, grafički su ilustrovani na slici 6.6. Predstavljena programska aplikacija daje mogućnost za uporednu grafičku prezentaciju memorisanih vremenskih dijagrama dobijenih rezultata merenja efektivnih vrednosti napona na izlazu. Na virtuelnom instrumentu obezbeđena je indikacija minimalnih i maksimalnih efektivnih vrednosti izlaznog napona, dobijenih tokom merenja, kao i procena srednjih efektivnih vrednosti napona i mernih nesigurnosti tipa A i tipa B.



Slika 6.6. LabVIEW statistička analiza efektivnih vrednosti napona merenih na izlazu transformatora

6.2. Osnovne funkcionalne komponente sistema za testiranje

Kompleksnost analize kvaliteta električne energije čini je multidisciplinarnom oblašću koja uključuje energetska elektroniku, različite tehnike digitalne obrade signala (DSP), programiranje, kao i napredne merne metode praćene savremenom mernom instrumentacijom. Većina problema vezanih za kvalitet električne energije može se karakterisati merenjem realnih parametara napona i struja elektrodistributivne mreže. Sa konstantnim napretkom metoda i tehnika merenja, količina prikupljenih informacija postaje sve obimnija, pa samim tim i analiza mernih podataka postaje kompleksnija, što zahteva i kompletnu automatizaciju, kako u samom procesu merenja i kontrole kvaliteta, tako i kod testiranja uređaja i opreme za merenje kvaliteta električne energije [43-48].

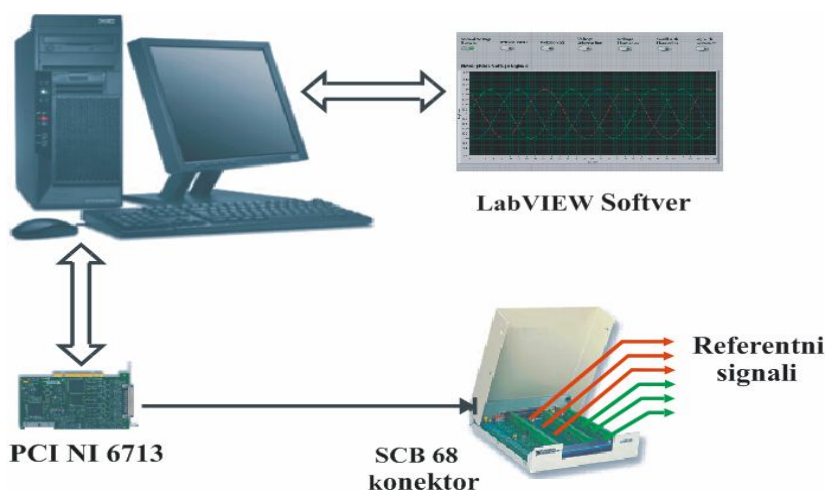
Osnovni cilj razvoja i realizacije rešenja sistema za testiranje uređaja za merenje kvaliteta električne energije je obezbeđenje referentnih trofaznih naponskih i strujnih signala za testiranje, stabilnih osnovnih parametara, sa mogućnošću simulacije tipičnih realnih poremećaja kvaliteta električne energije, u skladu sa zahtevima važećeg evropskog standarda za kvalitet električne energije EN 50160. Kompletna procedura realizacije akvizicionog sistema za testiranje uređaja za merenje kvaliteta električne energije sadrži dva funkcionalno povezana segmenta [5]. To su:

- Razvoj i implementacija softverski podržanog rešenja generatora referentnih trofaznih naponskih signala definisanih standardima, sa specijalnim funkcijama koje omogućavaju simulaciju standardnih tipova poremećaja kvaliteta električne energije. Ovo rešenje se bazira na konceptu virtuelne instrumentacije, sa primenom 8-kanalne D/A kartice za akviziciju podataka NI PCI 6713 i grafičkog programskog paketa za razvoj virtuelne instrumentacije LabVIEW.
- Snimanje naponskih i strujnih signala trofazne elektrodistributivne mreže u prisustvu realnih poremećaja kvaliteta električne energije, sa ciljem formiranja jedinstvene baze podataka realnih poremećaja. Proces snimanja signala uključuje naponski i strujni ulazni senzorski blok za kondicioniranje signala, karticu za akviziciju podataka NI USB 9215A i LabVIEW kontrolnu programsku aplikaciju. Memorisanje realnih naponskih i strujnih signala obavljeno je na niskonaponskoj strani transformatorske stanice TS 10/0.4kV.

Realizovano rešenje akvizicionog sistema za testiranje, koje je funkcionalno koncipirano na ovaj način, primenjeno je u završnoj fazi realizacije prethodno opisanog projekta kategorije FP7 za testiranje virtuelnog instrumenta razvijenog za automatsku detekciju i klasifikaciju osnovnih tipova standardnih poremećaja kvaliteta električne energije. Kompletna ova procedura testiranja virtuelnog instrumenta za detekciju i klasifikaciju standardnih poremećaja kvaliteta električne energije detaljnije je predstavljena i opisana u poslednjem segmentu ovog poglavlja doktorske disertacije.

6.3. Generator standardnih poremećaja kvaliteta električne energije

Prvi segment u razvoju sistema za testiranje uređaja za merenje kvaliteta električne energije je implementacija softverski baziranog rešenja generatora tipičnih poremećaja kvaliteta električne energije [90-93]. Funkcionalna osnova ovog generatora obezbeđuje se na bazi koncepta virtuelne merne instrumentacije. Osnovna hardverska konfiguracija eksperimentalne procedure kojom se obezbeđuje generisanje referentnih trofaznih naponskih signala za testiranje, uključujući i neke osnovne tipove karakterističnih poremećaja kvaliteta električne energije, prikazana je na slici 6.7.



Slika 6.7. Hardverska konfiguracija generatora poremećaja kvaliteta električne energije

Prikazana hardverska konfiguracija generatora standardnih poremećaja kvaliteta električne energije uključuje računar, podržan aplikativnim softverom u LabVIEW okruženju i karticom za akviziciju podataka PCI NI 6713, sa odgovarajućim blokom standardnog konektora SCB 68 [94]. Sam proces generisanja referentnih signala obuhvata dva segmenta. U prvom segmentu se vrši definisanje i simulacija referentnih naponskih signala, sa izborom osnovnih parametara signala i konkretne klase poremećaja kvaliteta, što se obavlja softverskim putem direktno preko prednjeg panela i blok dijagrama kontrolne LabVIEW programske aplikacije. Na ovaj način obezbeđena je mogućnost brze i jednostavne korekcije osnovnih parametara signala u skladu sa specifičnim zahtevima i eventualnim potrebama korisnika generatora. Drugi funkcionalni segment procesa uključuje generisanje u realnom vremenu prethodno definisanih talasnih oblika naponskih signala sa poremećajima kvaliteta, što se obavlja direktno posredstvom tri analogna kanala na izlazu primenjene D/A kartice za akviziciju podataka PCI NI 6713, proizvođača National Instruments.

Primenjena akviziciona kartica PCI NI 6713 je 8-kanalna kartica, sa mogućnošću D/A konverzije ulaznih signala, projektovana za maksimalni opseg ulaznog napona od $\pm 10V$ i sa 12-bitnom rezolucijom. Kartica generiše prostoperiodične trofazne naponske signale na bazi unapred definisanih vrednosti uzoraka signala, prethodno memorisanih u internom baferu akvizicione kartice. Izuzetno bitna karakteristika ove kartice jeste mogućnost duplog baferovanja podataka, što obezbeđuje mogućnost zamene pojedinih uzoraka signala bez prekida u procesu generisanja

signala. Ova kartica se postavlja u neki od slobodnih slotova standardnog računara, pri čemu se komunikacija uspostavlja preko PCI/PXI interfejsa. Analogni izlazni kanali akvizicione kartice povezuju se na blok standardnog konektora SCB (68-Pin Shielded Connector Block), preko koga se obezbeđuje direktna komunikacija kartice sa drugim spoljnim hardverskim uređajima. Za ovu konkretnu primenu kod generisanja signala koriste se tri analogna izlazna kanala ove kartice [94]. Tačnost generisanja naponskih signala na izlazu kartice kreće se u granicama od 0,05 do 0,06%.

Na bazi prikazane procedure moguće je generisati ukupno osam različitih klasa poremećaja kvaliteta električne energije: spore promene RMS vrednosti napona, porast napona, pad napona, naponske tranzijente, naponske prekide, više harmonijske komponente napona, previsoke napone u kombinaciji sa višim harmonicima i pad napona u kombinaciji sa višim harmonicima signala. U sledećoj tabeli 6.2. navedene su osnovne kategorije poremećaja kvaliteta električne energije koje je moguće generisati primenom opisanog generatora, kao i osnovni parametri pojedinačnih poremećaja kvaliteta signala koje je moguće podešavati pomoću kontrolne softverske aplikacije.

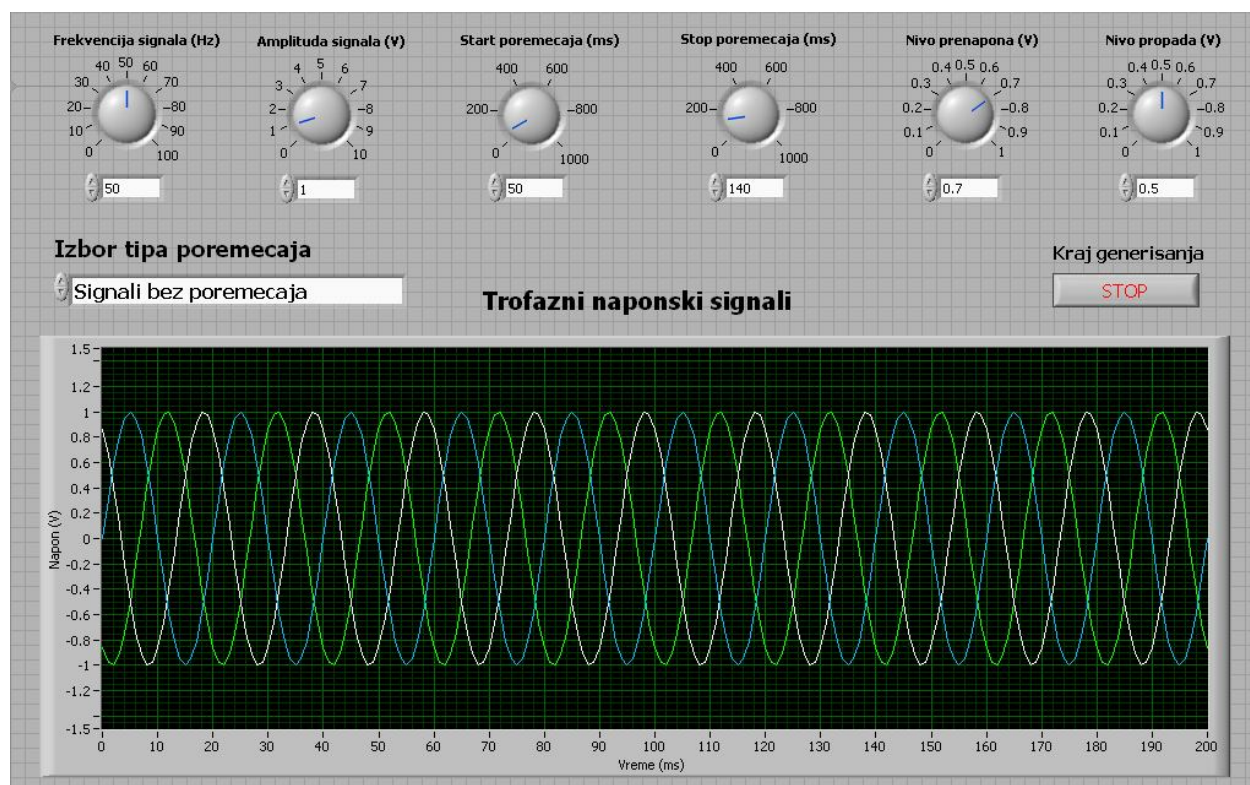
Tipovi poremećaja	Osnovni parametri poremećaja
varijacije RMS vrednosti napona	vremena početka i kraja poremećaja, procentualni nivo varijacije napona
padovi napona	vremena početka i kraja poremećaja, procentualni nivo pada napona
porast napona	vremena početka i kraja poremećaja, procentualni nivo porasta napona
naponski tranzijenti	vremena početka i kraja poremećaja, nivo naponskog tranzijenta
naponski prekidi	vremena početka i kraja poremećaja
viši harmonici napona	vremena početka i kraja poremećaja, nivo svakog od viših harmonika
pad napona sa višim harmonicima	vremena početka i kraja poremećaja, nivo pada napona, nivo svakog od viših harmonika
porast napona sa višim harmonicima	vremena početka i kraja poremećaja, nivo porasta napona, nivo svakog od viših harmonika

Tabela 6.2. Osnovne kategorije poremećaja kvaliteta električne energije za generisanje

Kontrolni prednji panel virtuelnog instrumenta realizovanog u LabVIEW okruženju, kojim se obezbeđuje definisanje, simulacija i grafička prezentaciju standardnih trofaznih talasnih oblika signala, prikazan je na slici 6.8. Virtuelni instrument sadrži osnovni selektorski prekidač kojim se

vrši odabir odgovarajuće kategorije poremećaja kvaliteta električne energije koji treba generisati. Pored toga, virtuelnim instrumentom se omogućava selekcija i definisanje osnovnih parametara referentnih naponskih signala za generisanje, posredstvom velikog broja kontrolnih funkcija i preklopnika, implementiranih na osnovnom prednjem panelu prikazanog virtuelnog instrumenta. Neki od osnovnih standardnih parametara signala za generisanje koje je moguće podešavati su:

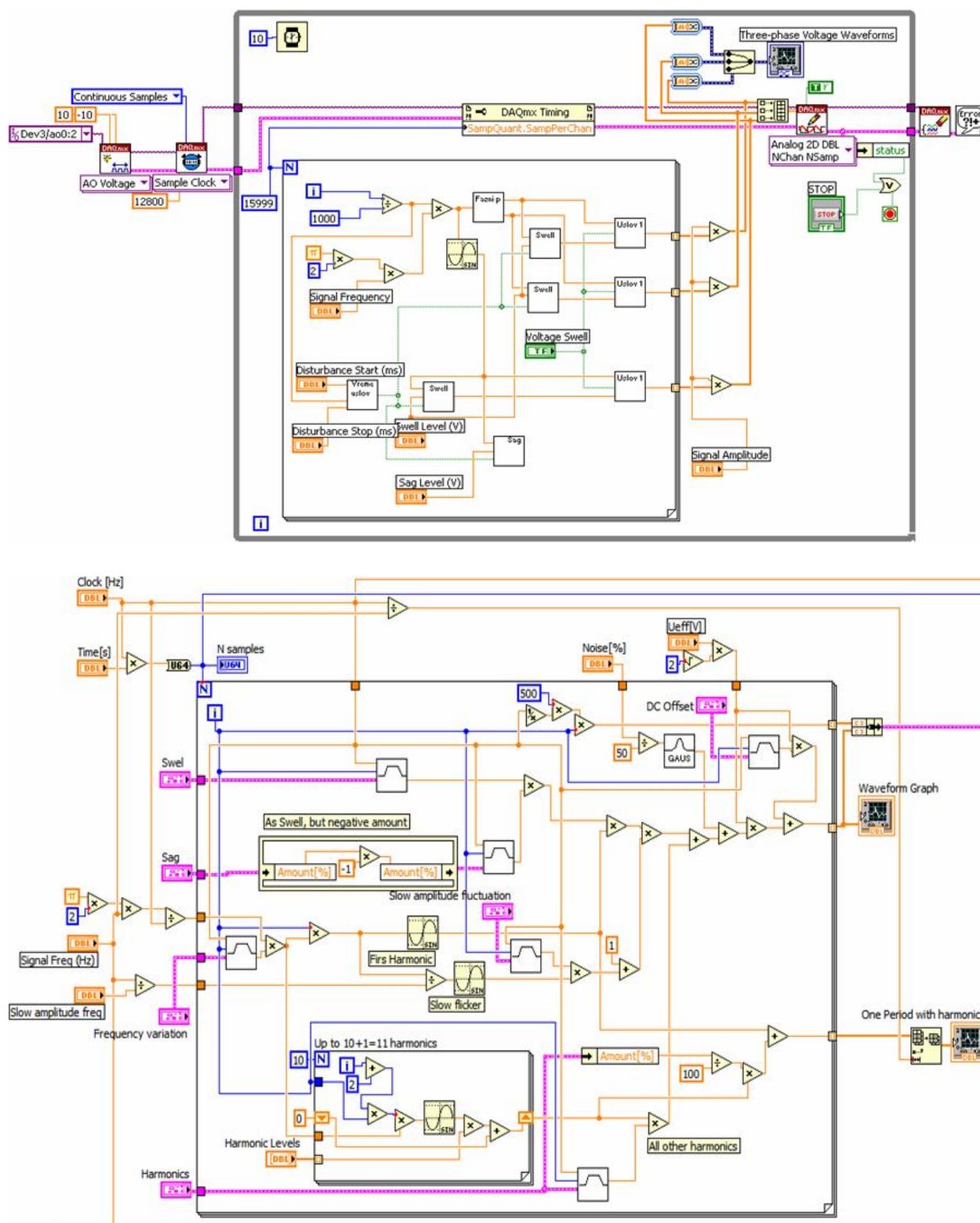
- Nominalne vrednosti amplitude i frekvencije signala za generisanje.
- Brzina semplovanja signala i ukupno vreme trajanja test sekvence.
- Maksimalni nivo Gausovog šuma koji se može superponirati korisnom signalu.
- Maksimalni nivoi varijacija amplitude i frekvencije signala za generisanje.
- Nivo DC offseta signala za generisanje.
- Maksimalni procentualni nivo pada napona.
- Maksimalni procentualni nivo porasta napona.
- Maksimalni procentualni nivoi svakog od pojedinačnih viših harmonika signala.



Slika 6.8. Prednji panel LabVIEW virtuelnog instrumenta za simulaciju standardnih trofaznih naponskih signala bez poremećaja

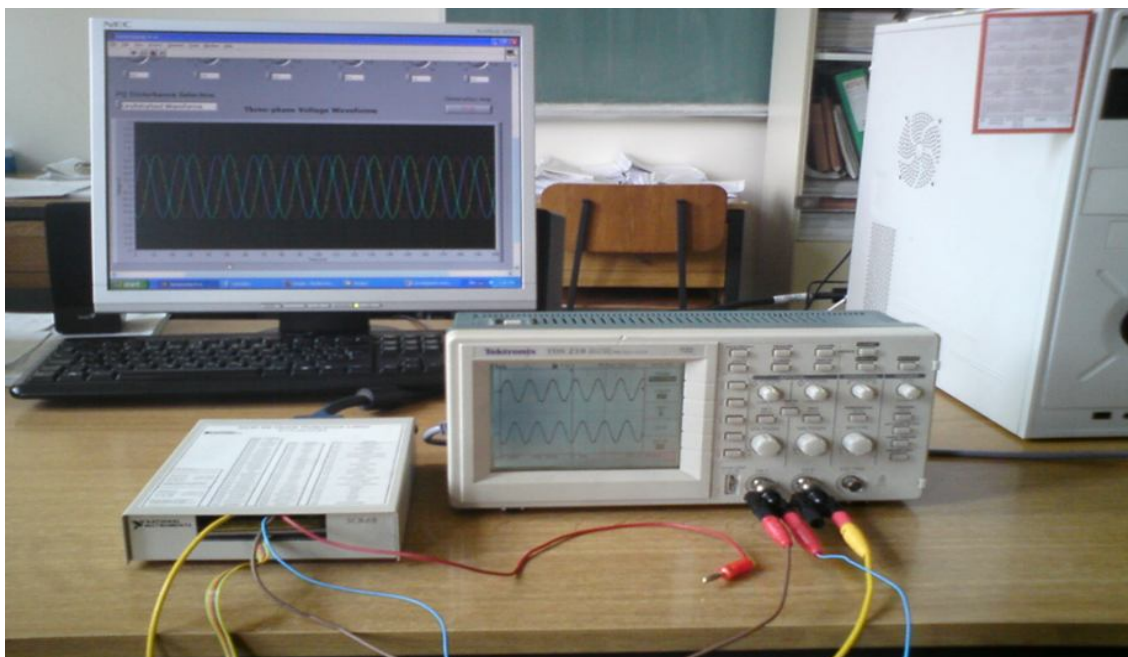
U konkretnom slučaju na slici 6.8. prikazani su standardni trofazni talasni oblici naponskih signala, generisani sa osnovnom opcijom bez ikakvih poremećaja kvaliteta. Ovi naponski signali su ilustrovani sa po deset perioda signala, nominalnom frekvencijom signala od 50Hz, faznom razlikom ovih signala od $2\pi/3$ rad i normalizovanom amplitudnom vrednošću signala od 1V. Za slučaj da postoji selekcija određene kategorije poremećaja kvaliteta signala posebno se definišu vremena početka i kraja poremećaja, amplitudni nivo poremećaja, kao i više drugih parametara.

Dva segmenta LabVIEW blok dijagrama, odnosno softverskog koda virtuelnog instrumenta realizovanog za generisanje standardnih naponskih signala sa poremećajima kvaliteta, prikazana su na slici 6.9. Treba napomenuti da ove dve softverske sekvence ilustruju neke od funkcionalnih elemenata kompletnog blok dijagrama virtuelnog instrumenta, koji je dosta obimniji i složeniji, pa čisto iz praktičnih razloga i radi bolje preglednosti ovde nije prikazan u svom punom obimu.

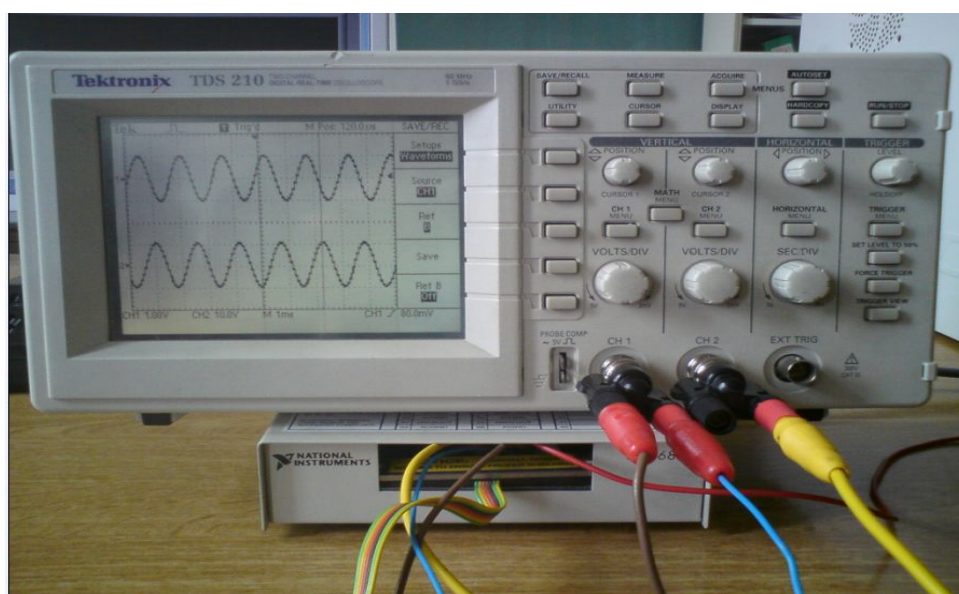


Slika 6.9. Prikaz dva funkcionalna segmenta LabVIEW blok dijagrama (softverskog koda)

Prezentacija kompletnog eksperimentalnog sistema, razvijenog za generisanje standardnih trofaznih naponskih signala sa različitim kategorijama poremećaja kvaliteta, data je na slici 6.10. Ovde su prikazani: monitor sa LabVIEW kontrolnom softverskom aplikacijom, SCB-68 konektor blok akvizicione kartice PCI NI 6713 i dvokanalni digitalni osciloskop tipa TDS 210 za realnu prezentaciju izlaznih naponskih signala sa generisanim poremećajima kvaliteta. Na slici 6.11. je data realna prezentacija generisanih naponskih signala na dvokanalnom digitalnom osciloskopu TDS 210, za slučaj standardnih naponskih signala generisanih bez ikakvih poremećaja kvaliteta.



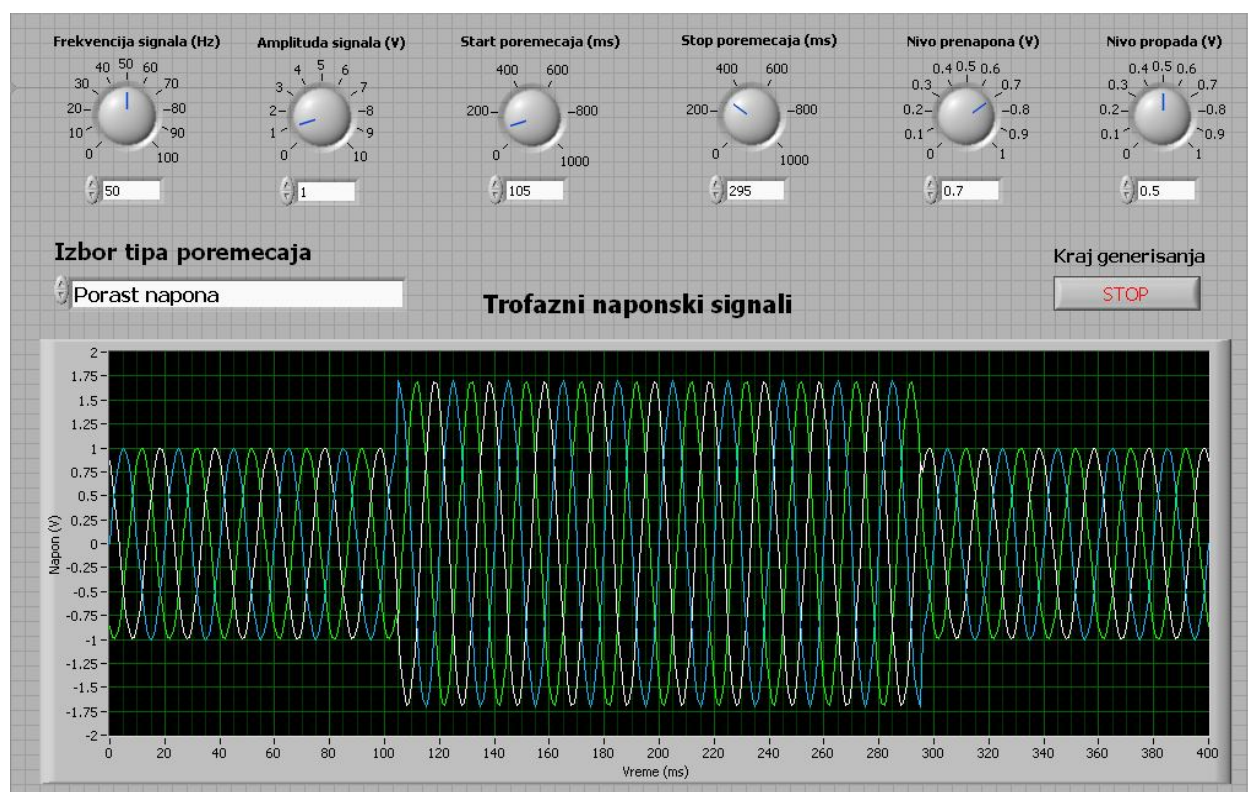
Slika 6.10. Eksperimentalni sistem za generisanje standardnih signala sa poremećajima kvaliteta



Slika 6.11. Prikaz generisanih naponskih signala na osciloskopu (signali bez poremećaja)

6.3.1. Generisanje porasta napona

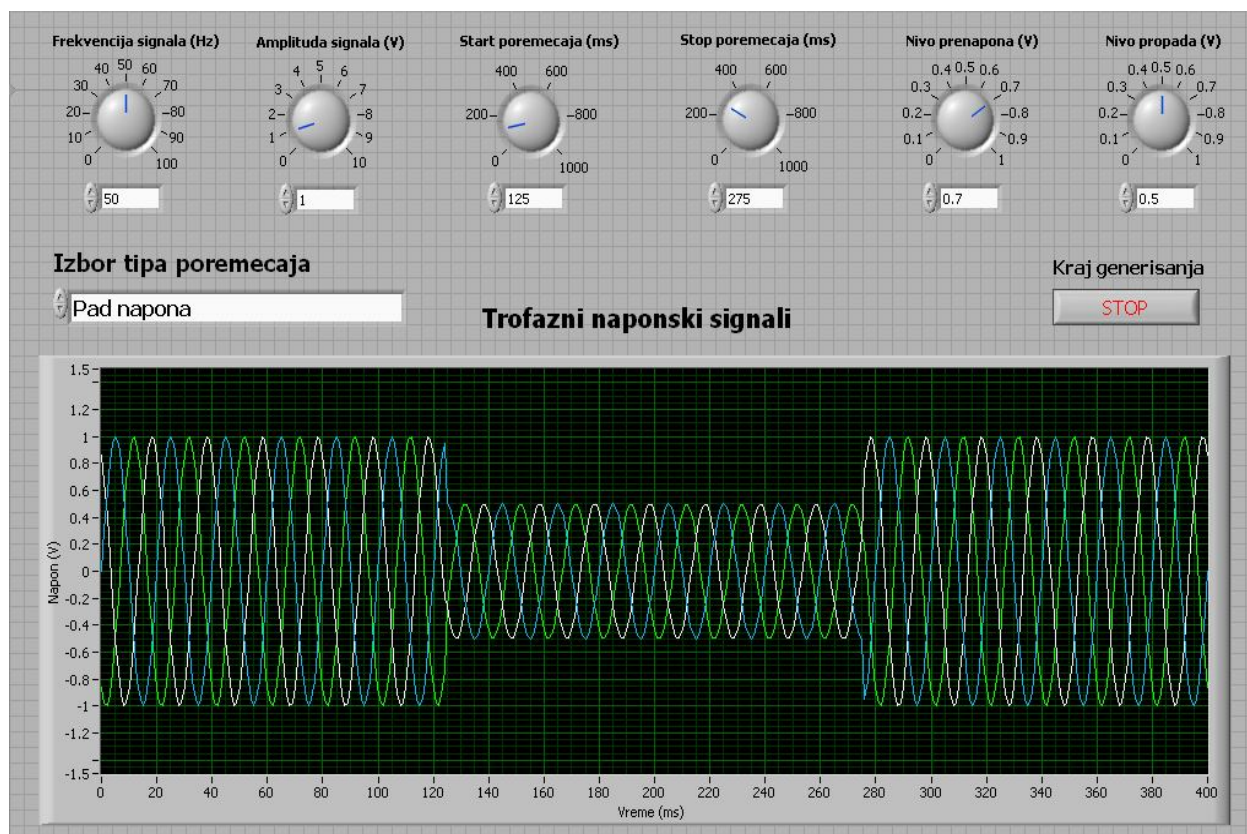
Prednji panel LabVIEW virtuelnog instrumenta za simulaciju trofaznih naponskih signala sa pojavom porasta napona predstavljen je na slici 6.12. Trofazni talasni oblici naponskih signala su prikazani sa po dvadeset perioda signala, nominalnom frekvencijom signala od 50Hz, faznom razlikom između signala od $2\pi/3$ i normalizovanom amplitudnom vrednošću od 1V. Posebno se definišu vremena početka i kraja konkretnog poremećaja, kao i amplitudni nivo porasta napona. Konkretno, za ovaj slučaj unapred definisano vreme ukupnog trajanja poremećaja u naponskim signalima je 190ms, dok je definisani nivo porasta napona 70% od amplitudne vrednosti signala.



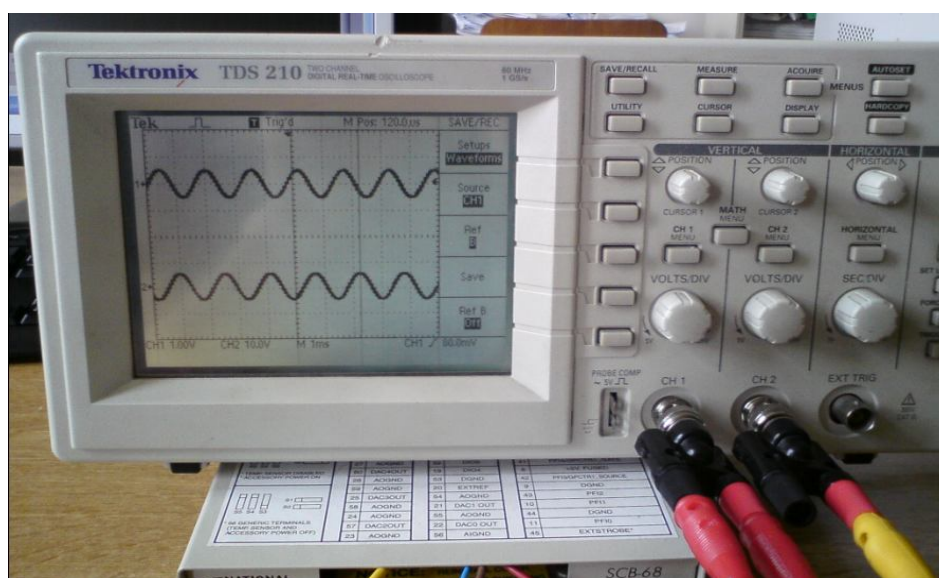
Slika 6.12. LabVIEW prednji panel za simulaciju naponskih signala sa pojavom porasta napona

6.3.2. Generisanje pada napona

Prednji panel LabVIEW virtuelnog instrumenta za simulaciju trofaznih naponskih signala sa pojavom pada napona predstavljen je na slici 6.13. Identično kao u prethodnom primeru sa porastom napona, trofazni talasni oblici naponskih signala su dati sa po dvadeset perioda signala, nominalnom frekvencijom od 50Hz, faznom razlikom između signala od $2\pi/3$ i normalizovanom amplitudom od 1V. Vremena početka i kraja konkretnog poremećaja, kao i amplitudni nivo pada napona se u ovom slučaju nešto razlikuju. Za ovaj konkretan primer generisanja poremećaja unapred definisano vreme ukupnog trajanja poremećaja u naponskim signalima iznosi 150ms, dok definisani amplitudni nivo propada napona iznosi 50% od nominalne amplitudne vrednosti naponskih signala. Na slici 6.14. dat je prikaz talasnih oblika generisanih naponskih signala na digitalnom osciloskopu TDS 210, za slučaj standardnih signala praćenih pojavom pada napona.



Slika 6.13. LabVIEW prednji panel za simulaciju naponskih signala sa pojavom pada napona

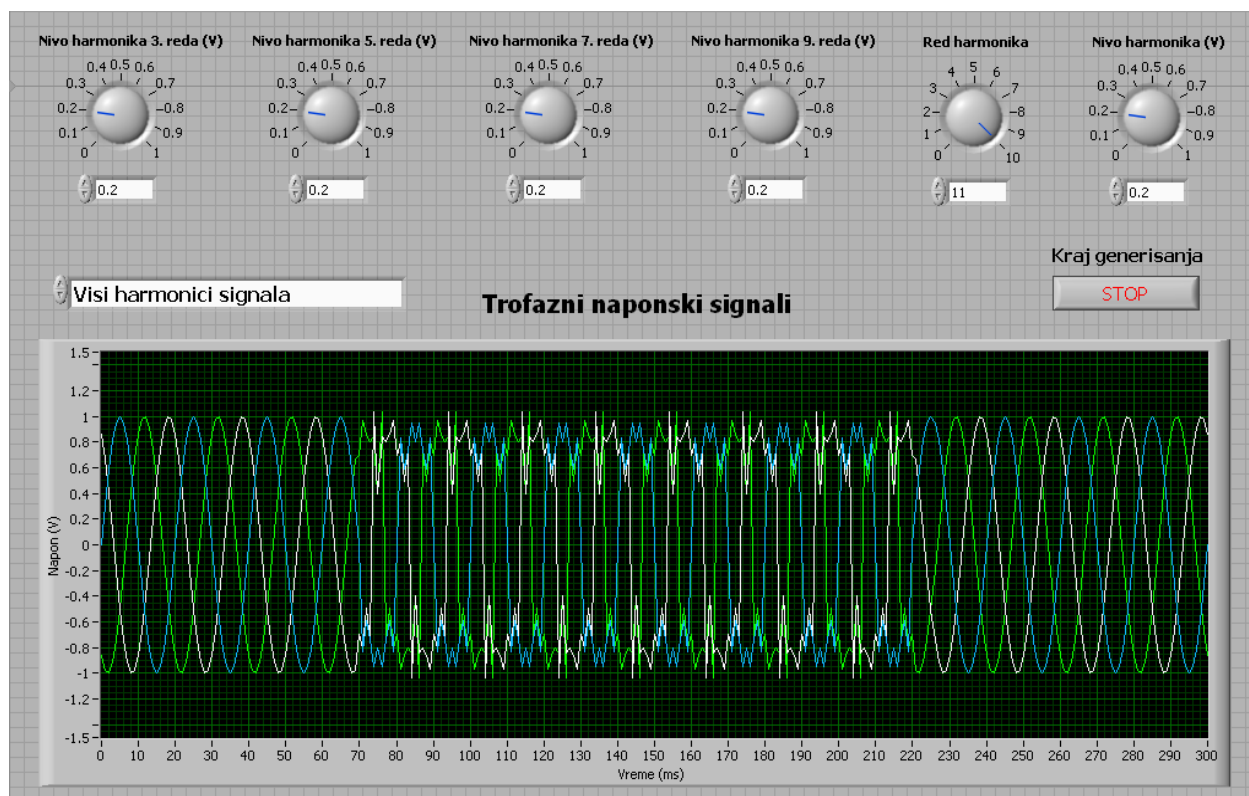


Slika 6.14. Prikaz generisanih naponskih signala na dvokanalnom osciloskopu (pad napona)

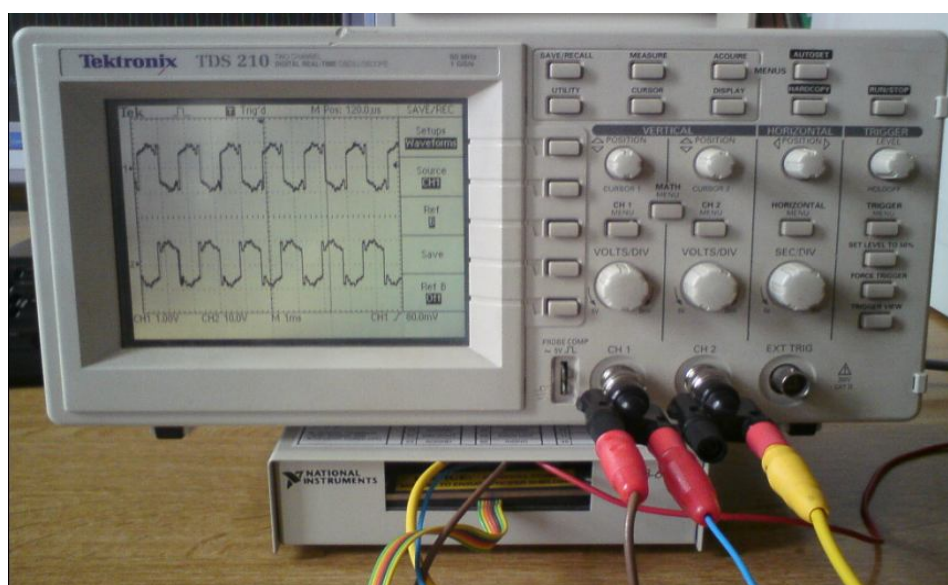
6.3.3. Generisanje viših harmonika signala

Poseban segment kontrolnih funkcija i regulatora instaliranih na prednjem panelu osnovnog virtuelnog instrumenta primenjuje se za selekciju i definisanje vrednosti amplitudnih nivoa viših harmonika naponskih signala za generisanje. Amplitudni nivoi svakog pojedinačnog harmonika napona mogu se vrlo precizno definisati pomoću niza regulatora na prednjem panelu instrumenta.

Prednji panel virtuelnog instrumenta za simulaciju trofaznih naponskih signala u prisustvu viših harmonika napona predstavljen je na slici 6.15. U ovom konkretnom slučaju iskorišćeno je šest regulatora za podešavanje nivoa viših neparnih harmonika naponskih signala, počev od trećeg do jedanaestog reda. Procentualni nivo svakog od viših harmonika je isti i iznosi 20% od nominalne amplitudne vrednosti signala. Vreme trajanja poremećaja u ovim naponskim signalima je 150ms. Na slici 6.16. data je prezentacija talasnih oblika generisanih naponskih signala na dvokanalnom osciloskopu TDS 210, za slučaj standardnih trofaznih signala u prisistvu viših harmonika napona.



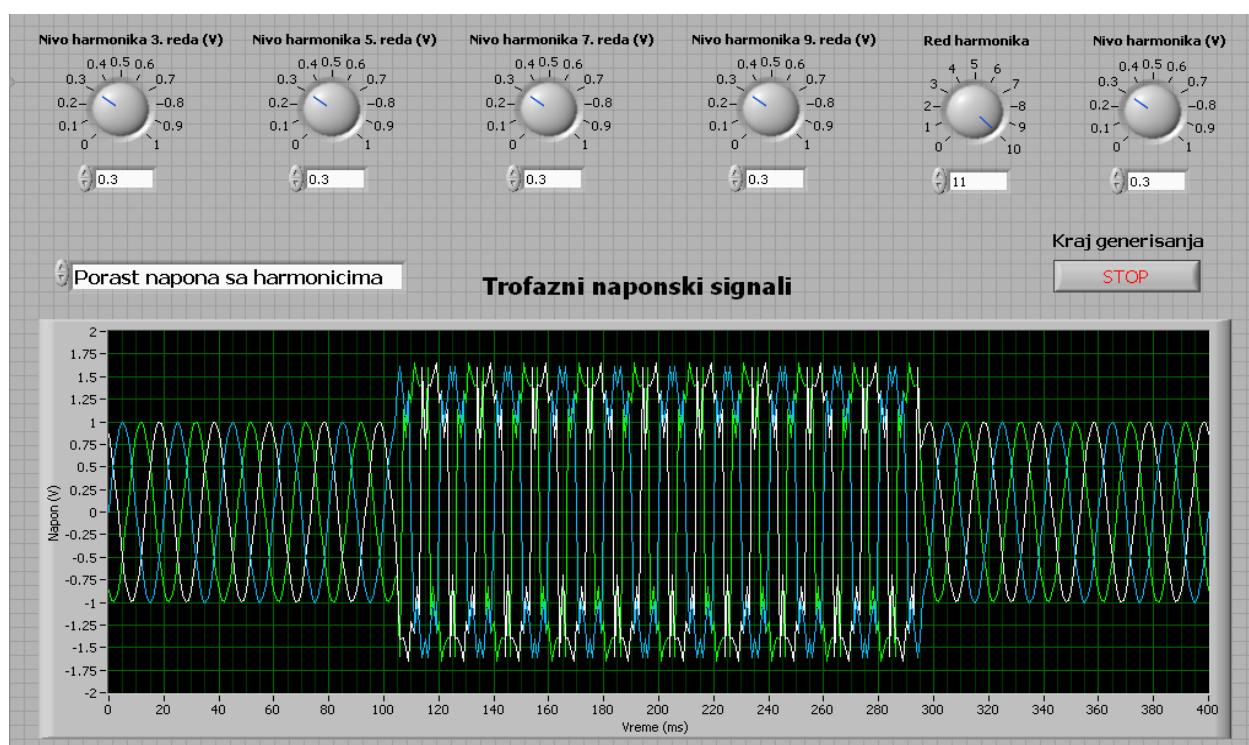
Slika 6.15. LabVIEW prednji panel za simulaciju naponskih signala u prisustvu viših harmonika



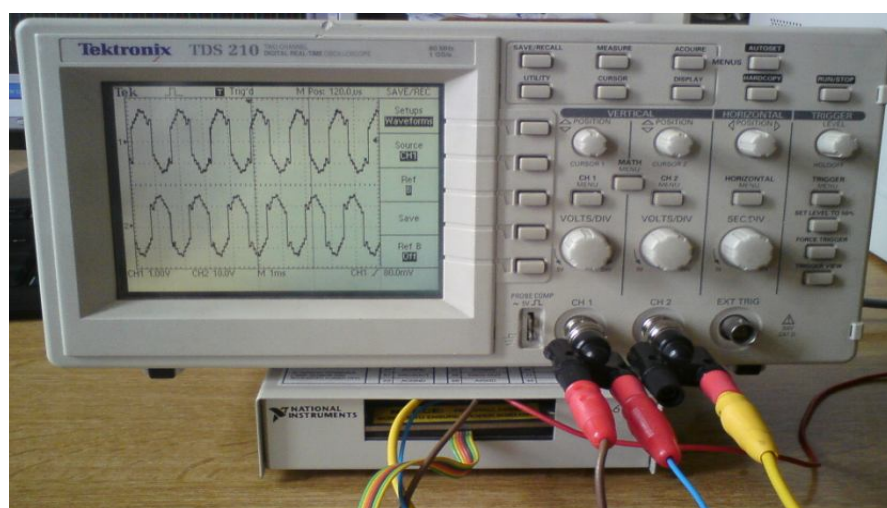
Slika 6.16. Prikaz generisanih naponskih signala na osciloskopu (viši harmonici signala)

6.3.4. Generisanje porasta napona sa višim harmonicima

Prednji panel LabVIEW virtuelnog instrumenta kojim se obezbeđuje simulacija i grafička prezentacija standardnih trofaznih naponskih signala, sa kombinacijom dva različita poremećaja: pojavom previsokog napona i višim harmonicima signala, predstavljen je na slici 6.17. Trofazni talasni oblici naponskih signala su dati sa po dvadeset perioda signala, nominalnom frekvencijom signala od 50Hz, faznom razlikom između signala od $2\pi/3$ rad i normalizovanom amplitudom od 1V. Procentualni nivo svakog od viših harmonika je isti i iznosi 30% od nominalne amplitudne vrednosti signala. Definisano vreme ukupnog trajanja poremećaja u ovim naponskim signalima je 190ms, pri čemu procentualni nivo porasta napona iznosi 70% od amplitudne vrednosti signala. Na slici 6.18. dat je prikaz talasnih oblika ovih naponskih signala na dvokanalnom osciloskopu.



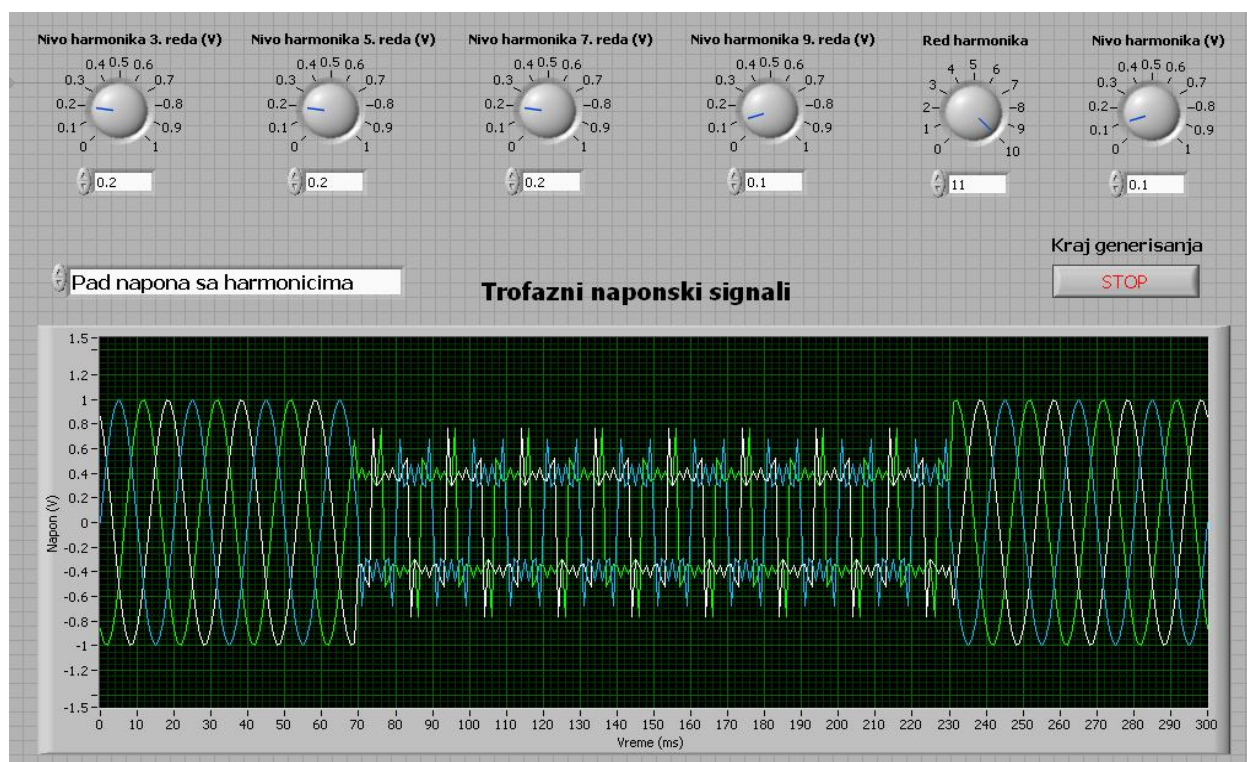
Slika 6.17. Prednji panel za simulaciju trofaznih signala u prisustvu porasta napona i viših harmonika



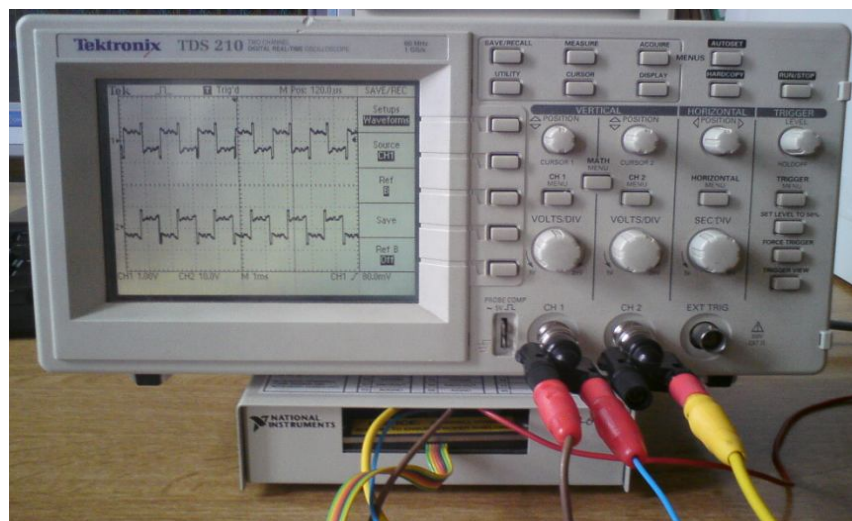
Slika 6.18. Prikaz generisanih signala na osciloskopu (porast napona i viši harmonici)

6.3.5. Generisanje pada napona sa višim harmonicima

Prednji panel virtuelnog instrumenta kojim se obezbeđuje simulacija i grafička prezentacija standardnih trofaznih naponskih signala, sa kombinacijom pada napona i višim harmonijskim komponentama signala, predstavljen je na slici 6.19. Talasni oblici naponskih signala prikazani su sa po petnaest perioda signala, frekvencijom od 50Hz, faznom razlikom signala od $2\pi/3$ rad i normalizovanom amplitudom od 1V. Procentualni nivoi svakog od harmonika se u ovom slučaju nešto razlikuju, 10% ili 20% od nominalne amplitude signala. Ukupno vreme trajanja poremećaja u signalima je 160ms, dok procentualni nivo propada napona iznosi 50% od amplitudne vrednosti signala. Na slici 6.20. data je prezentacija ovih naponskih signala na dvokanalnom osciloskopu.



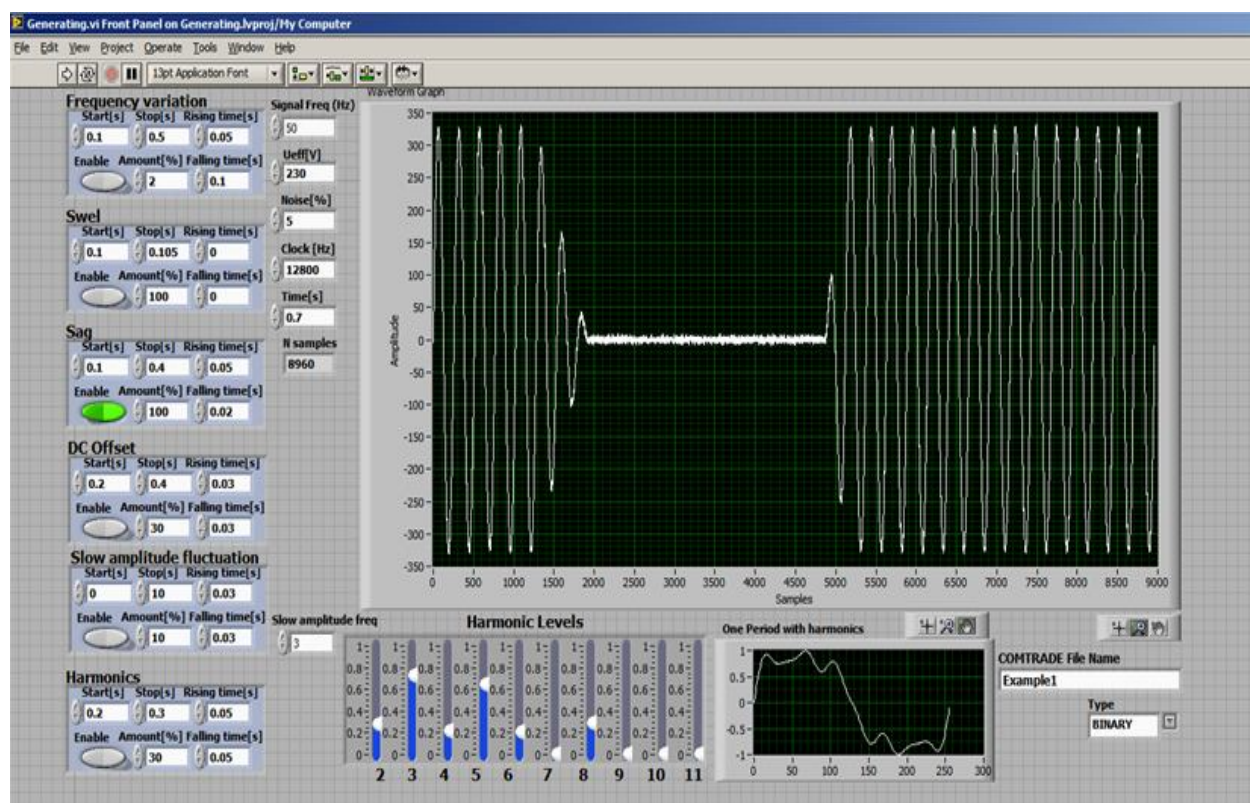
Slika 6.19. Prednji panel za simulaciju trofaznih signala u prisustvu pada napona i viših harmonika



Slika 6.20. Prikaz generisanih signala na osciloskopu (pad napona i viši harmonici)

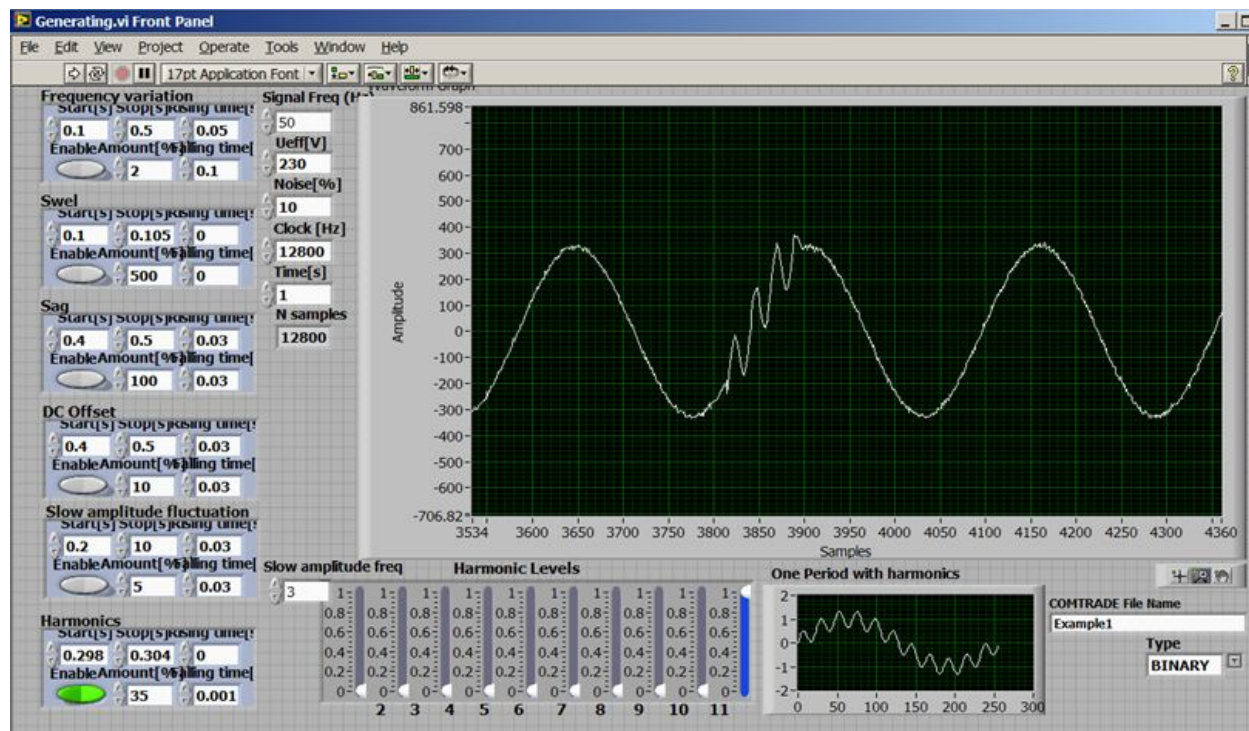
6.3.6. Generisanje naponskih prekida i tranzijenata

Prednji panel LabVIEW virtuelnog instrumenta kojim se obezbeđuje simulacija naponskog prekida prikazan je na slici 6.21. Na ovom prednjem panelu instrumenta implementiran je nešto veći broj regulatora za kontrolu i podešavanje osnovnih parametara naponskog signala koji se generiše. Pored efektivne vrednosti signala, frekvencije, amplitudnih nivoa porasta i pada napona i viših harmonika signala do jedanaestog reda, ovde se mogu definisati i nivo DC offseta signala, maksimalni nivoi varijacija amplitude i frekvencije signala, brzina semplovanja signala i ukupno vreme trajanja test sekvence, kao i maksimalni procentalni nivo Gausovog šuma koji može biti superponiran korisnom signalu. Treba naglasiti i da je u LabVIEW softverskom kodu realizovana specijalna trapezoidna funkcija, koja omogućava posebno definisanje vremena porasta i opadanja određenog poremećaja kvaliteta signala. Na ovaj način moguće je generisati poremećaje signala koji odgovaraju poremećajima kvaliteta signala u realnim elektrodistributivnim mrežama, kao što je slučaj sa simulacijom naponskog prekida na slici 6.21. U ovom konkretnom slučaju naponski prekid generisan je kao poseban slučaj pada napona, sa amplitudskim nivoom propada od 100%.



Slika 6.21. Prednji panel LabVIEW virtuelnog instrumenta za simulaciju pojave naponskog prekida

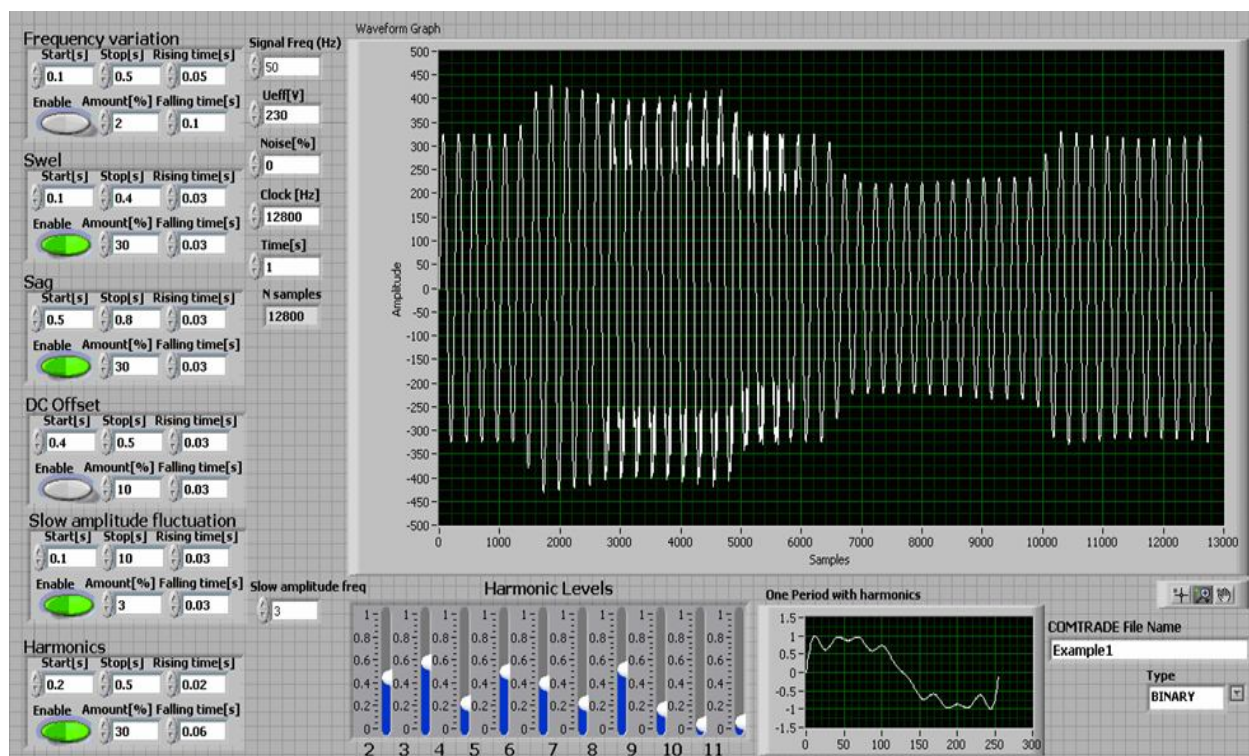
Na slici 6.22. predstavljen je prednji panel virtuelnog instrumenta za simulaciju naponskog tranzijenta. U ovom konkretnom slučaju pojava naponskog tranzijenta izgenerisana je u obliku kratkotrajnih naponskih oscilacija, koje su prouzrokovane isključivo uticajem više harmonijske komponente naponskog signala jedanaestog reda, što se može vrlo jasno i uočiti na slici 6.22.



Slika 6.22. Prednji panel LabVIEW virtuelnog instrumenta za simulaciju pojave naponskog tranzijenta

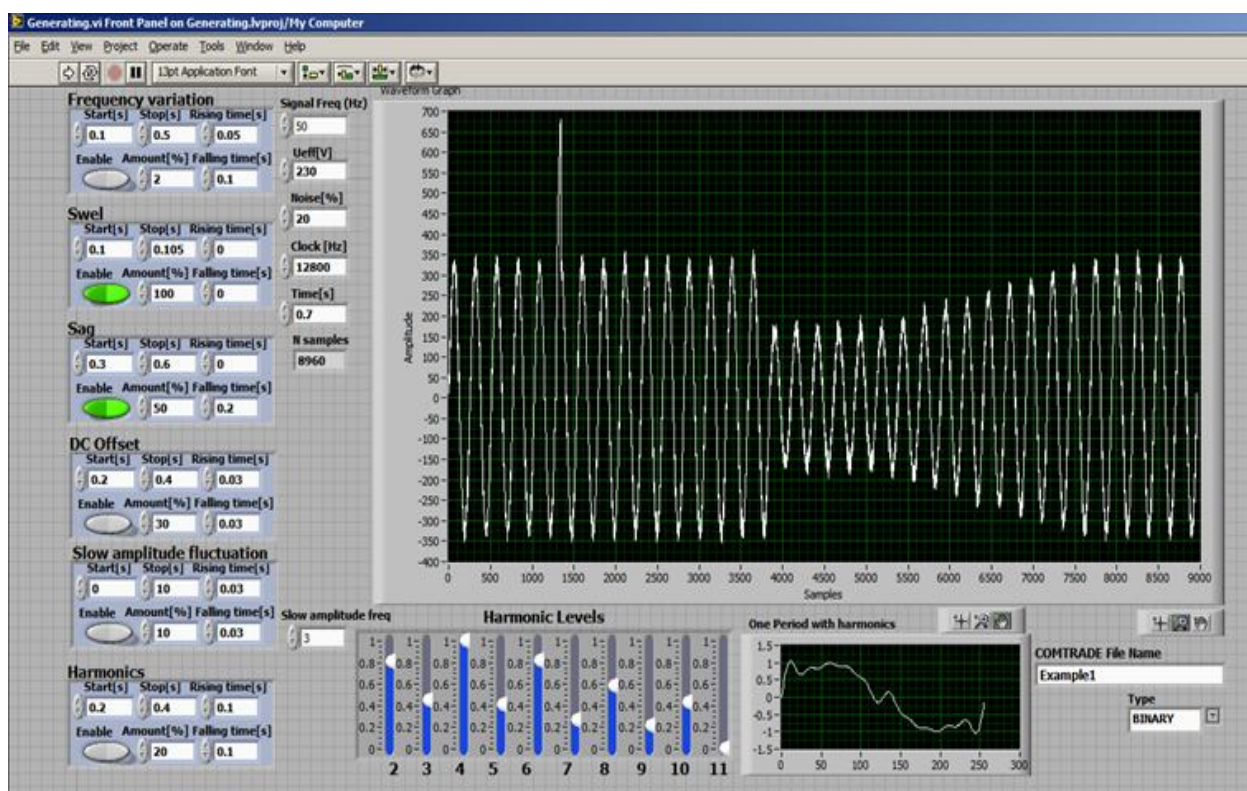
6.3.7. Serijska kombinacija različitih tipova poremećaja

Primenom opisanog virtuelnog instrumenta može se obezbediti i generisanje više različitih kategorija poremećaja kvaliteta signala u serijskoj kombinaciji. LabVIEW prednji panel kojim se generiše serijska kombinacija različitih poremećaja kvaliteta signala predstavljen je na slici 6.23.



Slika 6.23. Prednji panel virtuelnog instrumenta sa kombinacijom više različitih poremećaja kvaliteta

U konkretnom slučaju najpre se generiše porast napona, praćen pojavom viših harmonika signala, a zatim se serijski generiše i pad napona. Za svaki od ovih poremećaja za generisanje posebno se definišu osnovni parametri, kao što su: amplitudski nivoi poremećaja, dužina trajanja svakog od poremećaja, vremena porasta i opadanja poremećaja, nivoi pojedinačnih viših harmonika signala, itd. Na slici 6.24. prikazan je prednji panel za generisanje kombinacije kratkotrajnog previsokog napona i naglog propada napona, sa postepenim oporavkom do nominalne amplitudne vrednosti.

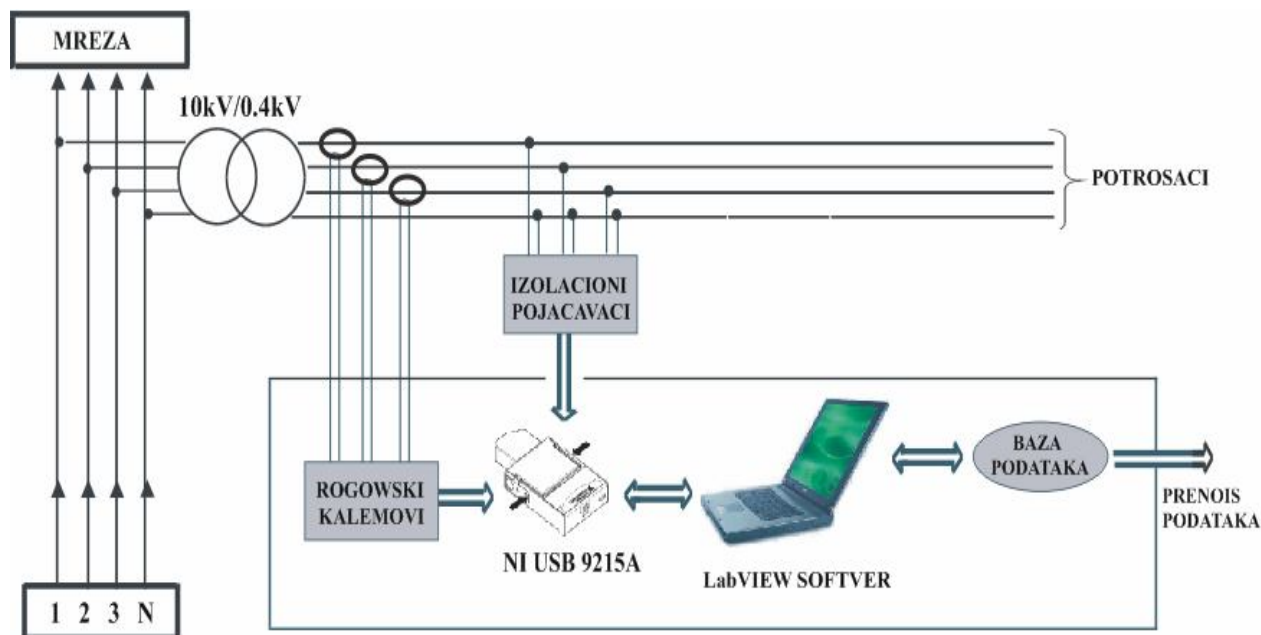


Slika 6.24. Prednji panel za generisanje kombinacije kratkotrajnog previsokog napona i naglog pada napona sa postepenim oporavkom signala

6.4. Snimanje realnih poremećaja kvaliteta električne energije

Procedura snimanja naponskih i strujnih signala u trofaznoj elektrodistributivnoj mreži, uz prisustvo realnih poremećaja kvaliteta električne energije, obavljena je na niskonaponskoj strani distributivnog transformatora trafostanice TS 10/0.4kV, koja je locirana unutar jednog fabričkog pogona za proizvodnju grejnih tela. Osnovni zadatak jednog ovakvog rešenja je formiranje veće baze podataka realnih poremećaja kvaliteta naponskih i strujnih signala, koja se može koristiti kao element ovog sistema za testiranje uređaja za merenje kvaliteta električne energije [95-98]. Hardverska konfiguracija procesa snimanja realnih signala napona i struja elektrodistributivne mreže predstavljena je na slici 6.25. Kompletna procedura uključuje tri funkcionalna segmenta:

- senzorski blok za kondicioniranje ulaznih naponskih i strujnih signala,
- karticu za akviziciju podataka NI USB 9215A,
- kontrolnu softversku aplikaciju realizovanu u LabVIEW okruženju.

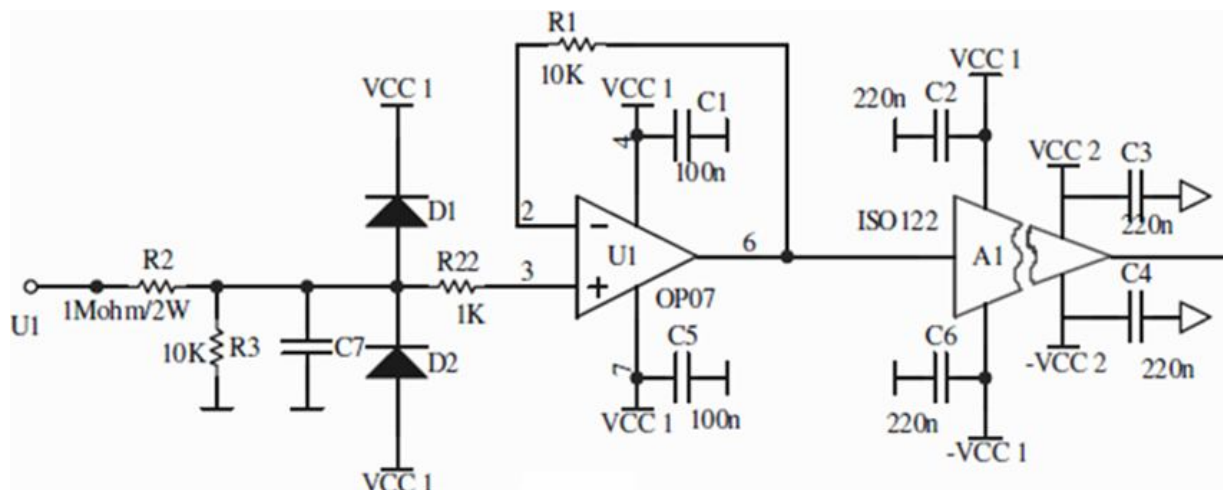


Slika 6.25. Hardverska konfiguracija procedure snimanja realnih naponskih i strujnih signala u trofaznoj elektrodistributivnoj mreži

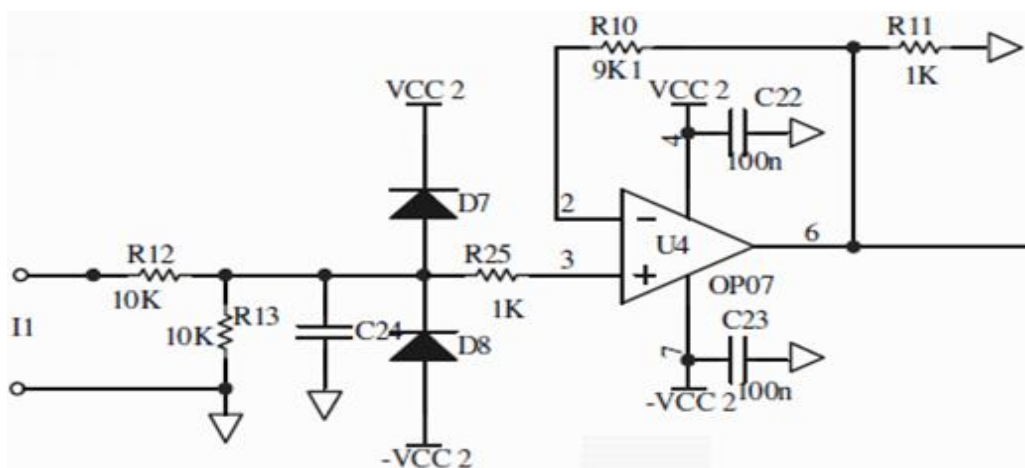
Blok senzorskog interfejsa za kondicioniranje ulaznih naponskih i strujnih signala trofazne elektrodistributivne mreže projektovan je sa nominalnim slabljenjem ulaznih signala od 100 puta. Ovaj ulazni senzorski blok baziran je na primeni izolacionih pojačavača i Rogovski kalemova. Osnovna funkcija senzorskog bloka je prihvatanje naponskih i strujnih signala, sa prilagođenjem amplitudskih nivoa ovih signala analognim ulazima primenjene akvizicione kartice NI 9215A, u opsegu $\pm 10V$. Blok uključuje tri izolaciona pojačavača tipa Burr-Brown ISO 122, sa nominalnim izolacionim naponom od 1.5kV, nominalnom linearnošću od 0,02% i sa mogućnošću bipolarnih operacija u naponskom opsegu $\pm 10V$. Pored toga, u ovaj senzorski blok su uključena i tri dodatna pojačavača, koji se koriste za izlaz Rogovski integratora. Primenjeni su Rogovski kalemovi tipa Fluke i2000flex, projektovani za široki strujni opseg 200A do 2000A, nominalne tačnosti od 1%, za primenu u frekventnom opsegu od 1Hz do 20kHz. Ulazni senzorski blok realizovan je u formi jednog zajedničkog kućišta, sa naponskim i strujnim ulazima, kao što je ilustrovano na slici 6.26, dok su električne šeme pojedinačnih naponskih i strujnih ulaza prikazane na slikama 6.27. i 6.28.



Slika 6.26. Senzorski blok za kondicioniranje ulaznih naponskih i strujnih trofaznih signala



Slika 6.27. Električna šema naponskog ulaza senzorskog bloka za kondicioniranje signala



Slika 6.28. Električna šema strujnog ulaza senzorskog bloka za kondicioniranje signala

U cilju metrološke verifikacije izvršena je i kalibracija kompletnog senzorskog bloka za signale napona do 500V AC RMS, što će detaljnije biti opisano u narednom delu doktorske disertacije.

Primenjena akviziciona kartica NI USB 9215A, proizvođača National Instruments, data je na slici 6.29. Ova kartica poseduje 4 A/D ulazna kanala i projektovana je za maksimalni opseg ulaznog napona $\pm 10V$, sa 16-bitnom rezolucijom i maksimalnom brzinom uzorkovanja signala od 100 ks/s [99]. Za ovu konkretnu primenu definisana brzina uzorkovanja signala je 12,8 ks/s. Direktna dvosmerna komunikacija između akvizicione kartice i računara obezbeđuje se pomoću standardnog USB interfejsa.

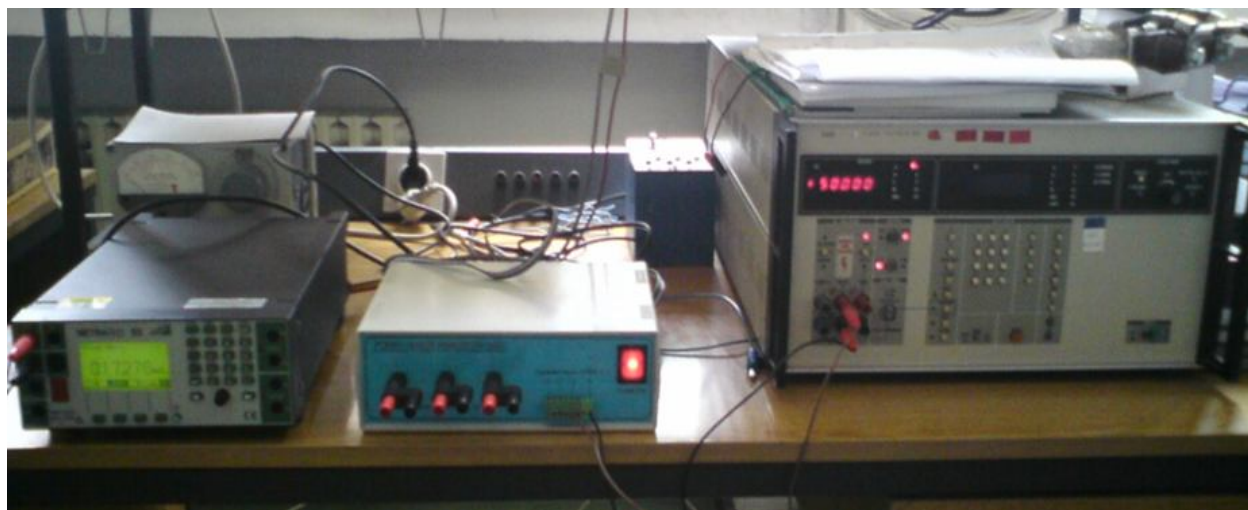


Slika 6.29. Akviziciona kartica NI USB 9215A

LabVIEW programska aplikacija upravlja akvizicijom ulaznih naponskih i strujnih signala, uključujući snimanje i grafičku prezentaciju memorisanih talasnih oblika signala. Realizovana su dva funkcionalno povezana segmenta kontrolnog virtuelnog instrumenta. Prvi kontrolni segment virtuelnog instrumenta obezbeđuje akviziciju i memorisanje talasnih oblika naponskih i strujnih signala, dok drugi segment omogućava prezentaciju prethodno snimljenih talasnih oblika signala.

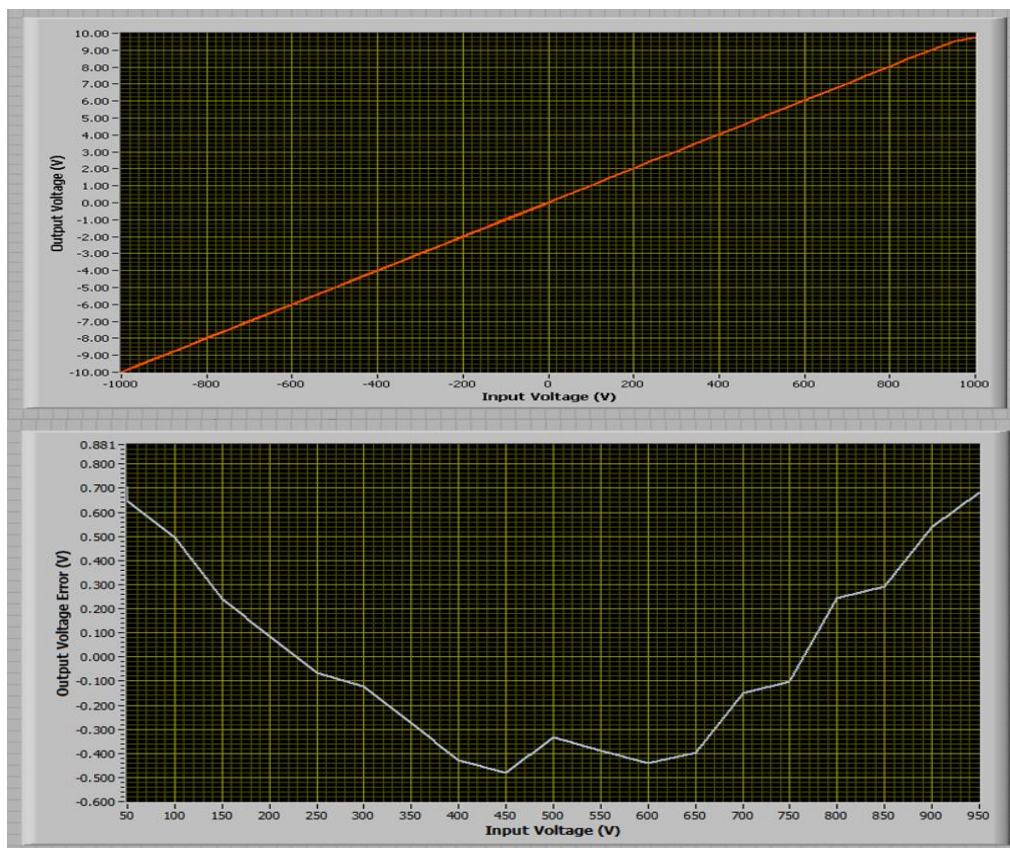
6.4.1. Kalibracija senzorskog bloka za kondicioniranje signala

Kalibracija projektovanog senzorskog bloka za kondicioniranje ulaznih naponskih i strujnih signala obavljena je u cilju njegove kompletne metrološke provere i verifikacije. Grafički prikaz osnovnih hardverskih komponenata primenjenih tokom procedure kalibracije senzorskog bloka dat je na slici 6.30. Proces kalibracije uključuje multifunkcionalni kalibracioni instrument Fluke 5100B, koji obezbeđuje generisanje referentnih naponskih signala za kalibraciju, kao i digitalni multimetar METRAtop 32, za merenje parametara naponskih signala na izlazu senzorskog bloka koji se kalibriše. Digitalni instrument METRAtop 32 ima mogućnost komunikacije sa računarnom putem standardnog RS 232 interfejsa, tako da su kompletna kalibraciona procedura i statistička obrada dobijenih rezultata merenja podržane softverskom aplikacijom u LabVIEW okruženju.

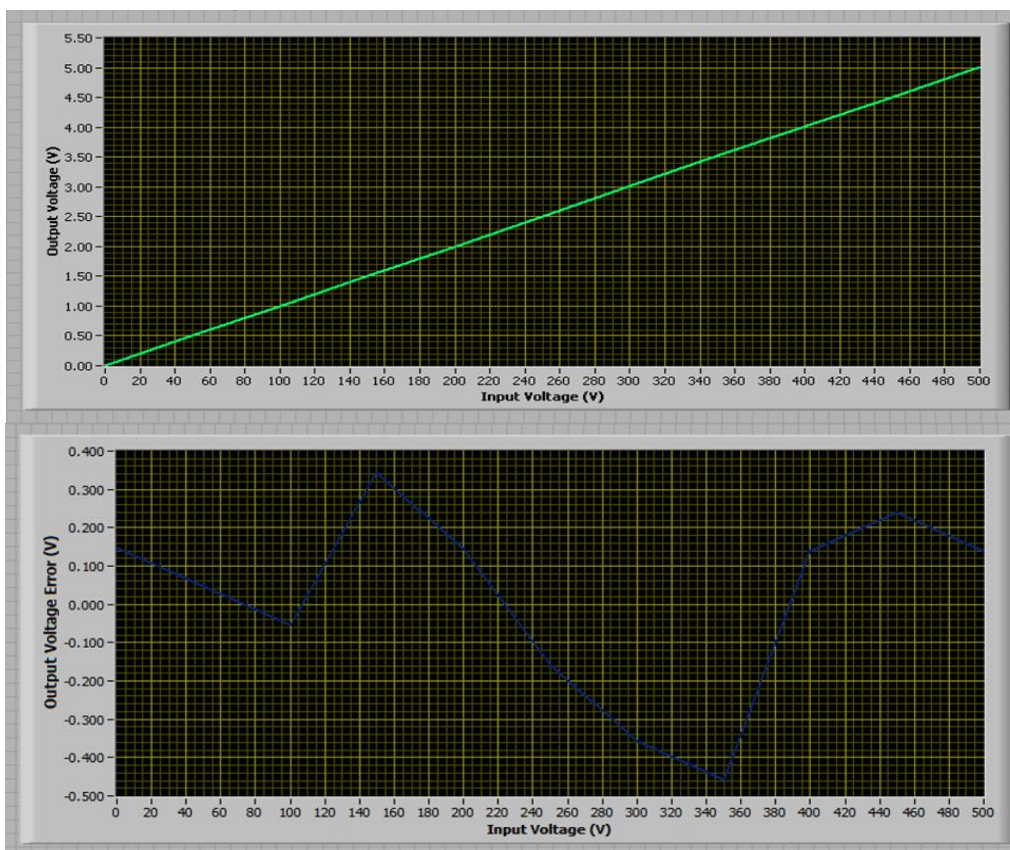


Slika 6.30. Grafička ilustracija postupka kalibracije senzorskog bloka za kondicioniranje signala

Proces kalibracije obavljen je za DC i AC referentne naponske signale na ulazu senzorskog bloka za kondicioniranje signala. Tokom kalibracije DC naponskim signalima vršeno je merenje RMS vrednosti napona na izlazu senzorskog bloka, za kontinualnu regulaciju referentnog napona na ulazu senzorskog bloka u opsegu -1000V do 1000V DC RMS. Prenosna karakteristika jednog naponskog kanala senzorskog bloka, dobijena nakon obrade rezultata merenja tokom kalibracije u DC režimu, kao i odgovarajući dijagram relativne greške merenja napona na izlazu senzorskog bloka, prikazani su na slici 6.31. Maksimalna vrednost relativne greške merenja izlaznog napona u DC režimu, procenjena na osnovu rezultata merenja dobijenih tokom kalibracije, iznosi 0,07%.



Slika 6.31. Prenosna karakteristika (gore) i dijagram relativne greške (dole) jednog naponskog kanala senzorskog bloka snimljeni tokom kalibracije u DC režimu



Slika 6.32. Prenosna karakteristika (gore) i dijagram relativne greške (dole) jednog naponskog kanala senzorskog bloka snimljeni tokom kalibracije u AC režimu

Prenosna karakteristika jednog naponskog kanala senzorskog bloka, dobijena nakon obrade rezultata merenja dobijenih tokom kalibracije u AC režimu rada, kao i dijagram relativne greške merenja napona na izlazu senzorskog bloka, snimljeni su u LabVIEW programskom okruženju i predstavljeni su na slici 6.32. Maksimalna vrednost relativne greške merenja izlaznog napona u AC režimu rada, proračunata na bazi rezultata merenja dobijenih tokom kalibracije, iznosi 0,1%.

6.4.2. Instalacija opreme za snimanje signala u trafostanici TS 10/0.4kV

Snimanje signala napona i struja elektrodistributivne mreže, u prisustvu realnih poremećaja kvaliteta, obavljeno je na niskonaponskoj strani distributivnog transformatora unutar trafostanice TS 10/0.4kV, koja se nalazi u sklopu jednog fabričkog pogona za proizvodnju grejnih elemenata. Ilustracija radnog okruženja unutar konkretne transformatorske stanice u kojoj su obavljena ova snimanja signala, kao i prezentacija pojedinačnih transformatorskih blokova, dati su na slici 6.33.



Slika 6.33. Ilustracija radnog okruženja u transformatorskoj stanici TS 10/0.4kV

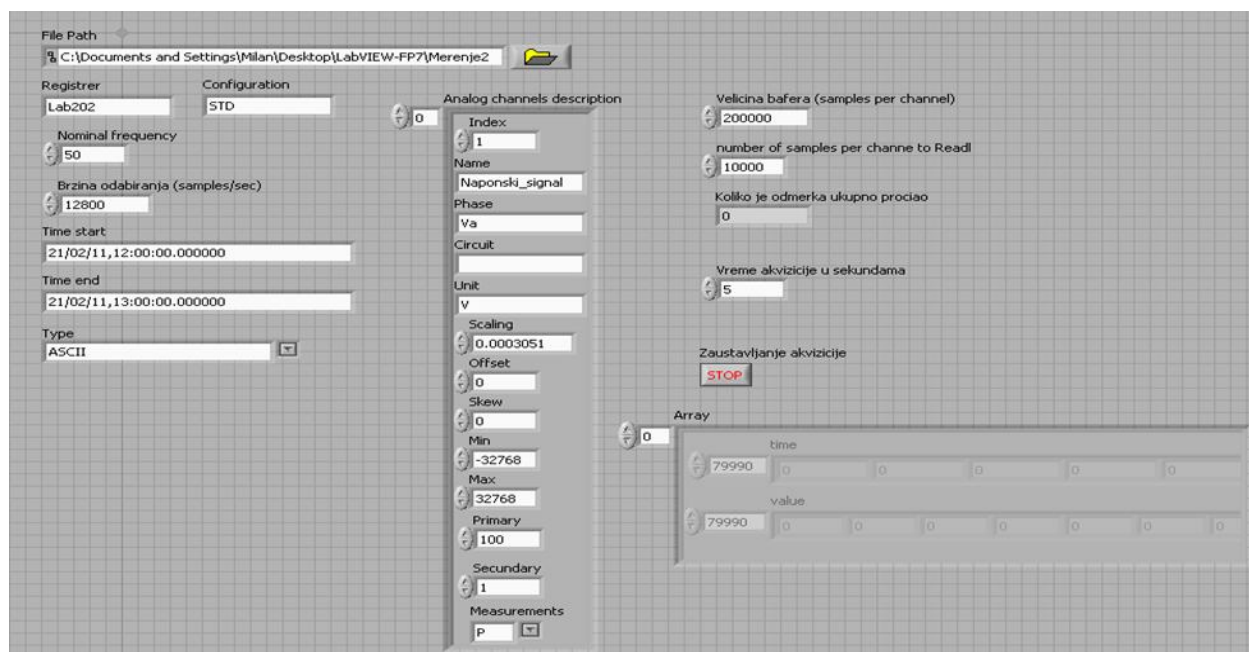
Prikaz delova opreme korišćene za snimanje naponskih i strujnih signala u trafostanici, kao i ilustracija samog povezivanja ove opreme na konkretni transformatorski blok, dati su na slici 6.34. U gornjem levom uglu prikazan je računar sa instalacijom LabVIEW programskog paketa, akviziciona kartica NI USB 9215A, senzorski blok za kondicioniranje ulaznih signala napona i struja, elementi interfejsa Rogowski kalemova, kao i provodnici za povezivanje na transformator.



Slika 6.34. Oprema primenjena za snimanje signala i ilustracija povezivanja na blok transformatora

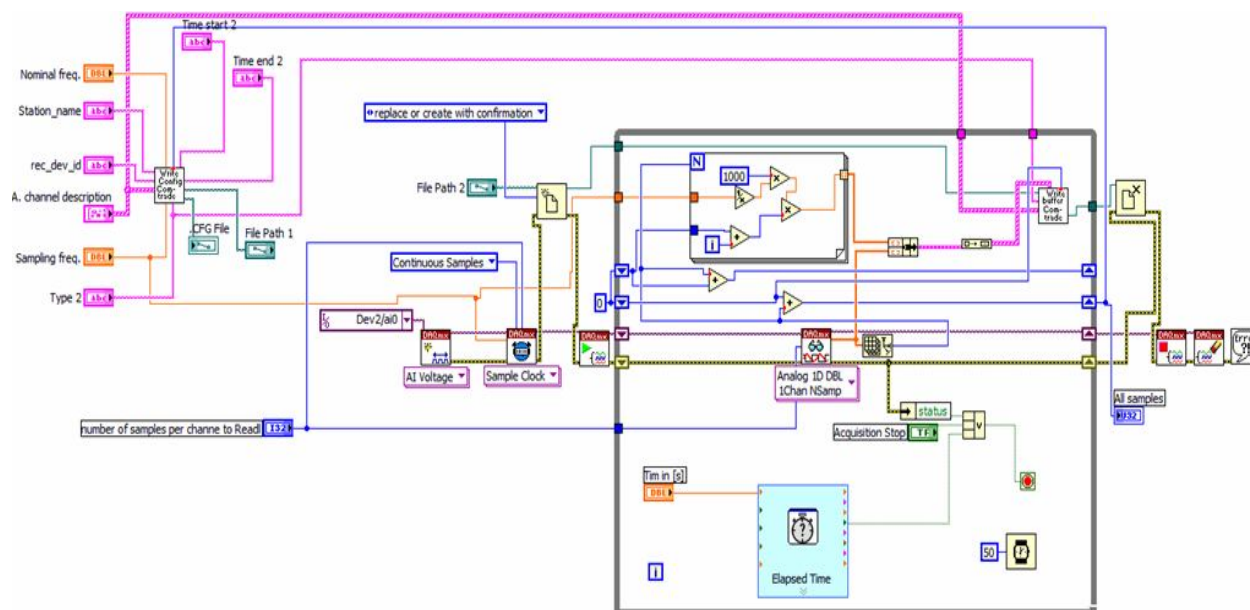
6.4.3. LabVIEW softverska podrška procesa snimanja signala

LabVIEW programska aplikacija kontroliše proces akvizicije ulaznih naponskih i strujnih signala distributivne mreže, uključujući snimanje i grafičku prezentaciju prethodno memorisanih talasnih oblika signala. Razvijena su dva funkcionalno povezana segmenta kontrolnog virtuelnog instrumenta. Prvi segment obezbeđuje podešavanje osnovnih parametara za akviziciju i snimanje talasnih oblika naponskih i strujnih signala, dok drugi kontrolni segment virtuelnog instrumenta omogućava grafičku prezentaciju prethodno snimljenih talasnih oblika signala. Prednji kontrolni panel LabVIEW virtuelnog instrumenta, kojim se obezbeđuje selekcija i podešavanje osnovnih parametara za akviziciju i memorisanje talasnih oblika signala, predstavljen je na slici 6.35.



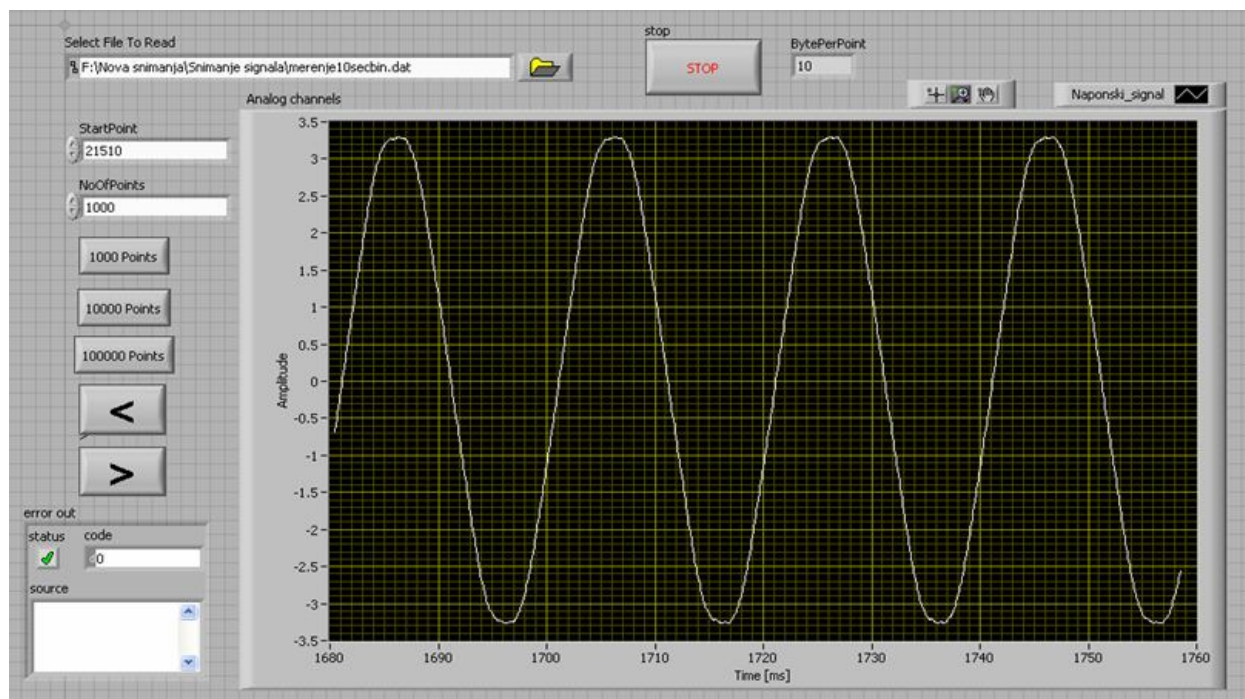
Slika 6.35. Prednji panel LabVIEW virtuelnog instrumenta za podešavanje osnovnih parametara za akviziciju i snimanje talasnih oblika signala

Prednji panel kontrolnog virtuelnog instrumenta za akviziciju i memorisanje signala sadrži veliki broj regulatora za selektovanje i podešavanje vrednosti osnovnih parametara za akviziciju signala, kao što su: frekvencija uzorkovanja signala, brzina uzorkovanja, broj uzoraka signala po pojedinačnom kanalu za očitavanje, vreme trajanja akvizicije signala, ukupni kapacitet bafera, vremena početka i kraja snimanja signala i destinacija datoteke za memorisanje uzoraka signala. Upisivanje uzoraka talasnih oblika signala u prethodno definisane datoteke obezbeđuje se preko COMTRADE formata podataka. Format memorisanih uzoraka naponskih i strujnih signala može biti ASCII ili BIN. ASCII format podataka nije odgovarajući za slučaj dugovremene akvizicije signala, obzirom na fajlove memorisanih uzoraka signala dvostruko većeg kapaciteta od fajlova memorisanih u BIN formatu. Pored toga, binarno upisivanje podataka omogućava jednostavno zumiranje nekih delova signala prilikom prikaza, kao i prezentaciju signala sa širokim opsegom mogućnosti za ilustraciju specifičnih delova memorisanih talasnih oblika signala. Blok dijagram opisanog virtuelnog instrumenta za akviziciju i memorisanje signala predstavljen je na slici 6.36.



Slika 6.36. Blok dijagram virtuelnog instrumenta za akviziciju i snimanje naponskih i strujnih signala

Osnovni prednji panel virtuelnog instrumenta u LabVIEW softverskom okruženju kojim se obezbeđuje grafička prezentacija prethodno memorisanih talasnih oblika realnih signala napona i struja elektrodistributivne mreže, predstavljen je na slici 6.37. Na ovom konkretnom primeru dat je realni naponski signal po jednoj fazi, memorisan bez приметnih poremećaja u kvalitetu signala.



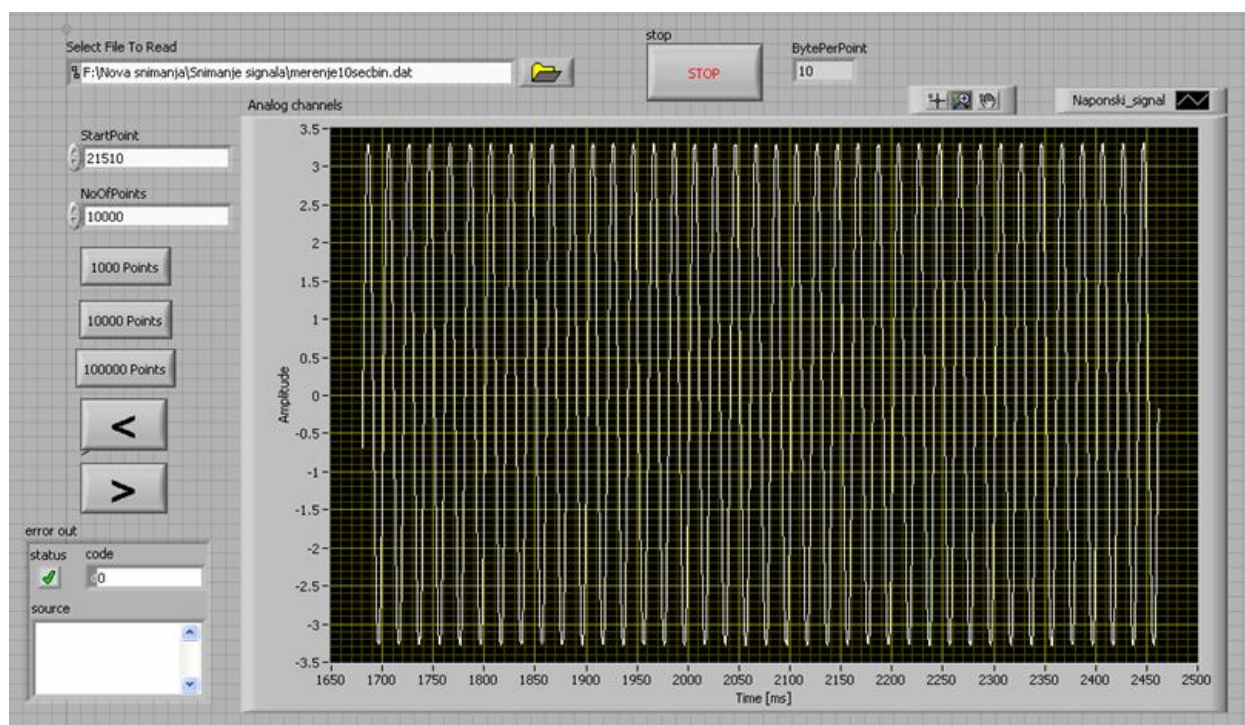
Slika 6.37. LabVIEW prednji panel za grafičku prezentaciju snimljenih talasnih oblika signala

I na ovom prednjem panelu virtuelnog instrumenta implementiran je veći broj regulacionih funkcija za selekciju i podešavanje različitih parametara, kao što su: izbor odgovarajuće datoteke sa prethodno memorisanim uzorcima signala, pozicija početne tačke za očitavanje konkretnog

signala, kao i ukupan broj memorisanih uzoraka nekog signala po jednom kanalu za očitavanje i grafičku prezentaciju. Pored toga, obezbeđeno je prilično jednostavno zumiranje i pomeranje na levo ili na desno određenih segmenata talasnih oblika memorisanih signala napona i struja.

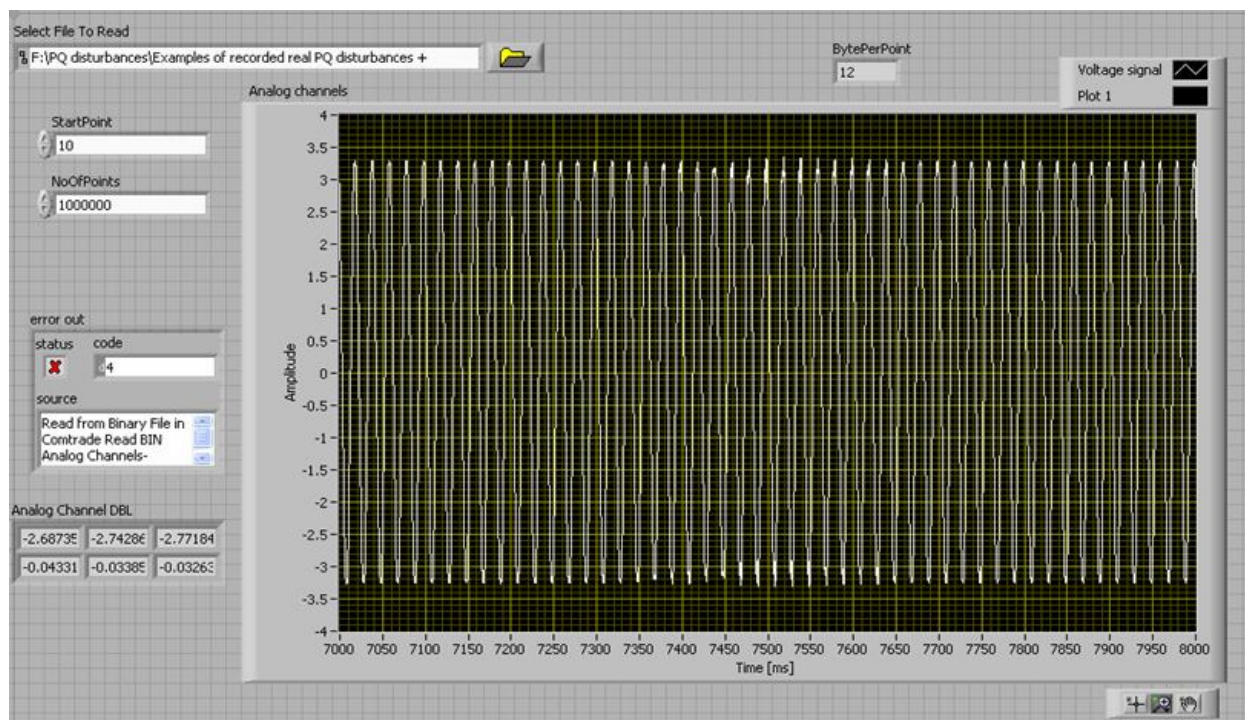
6.4.4. Primeri signala snimljenih sa realnim poremećajima kvaliteta

Primenom prethodno opisane procedure snimanja signala izvršeno je memorisanje velikog broja uzoraka naponskih i strujnih signala elektrodistributivne mreže, uz prisustvo manjeg ili većeg stepena različitih poremećaja kvaliteta električne energije. Neki od karakterističnih primera memorisanih signala napona i struje biće predstavljeni u ovom segmentu doktorske disertacije. Na slici 6.38. predstavljen je LabVIEW prednji panel za grafičku prezentaciju realnog naponskog signala koji je memorisan bez većih poremećaja kvaliteta signala. Ovaj talasni oblik odgovara naponskom signalu prikazanom na prethodnoj slici 6.37, ali je ova prezentacija istog naponskog signala data sa nešto većim brojem perioda, što se selektuje i podešava direktno na prednjem panelu virtuelnog instrumenta, u zavisnosti od trenutnih potreba i specifičnih zahteva korisnika.



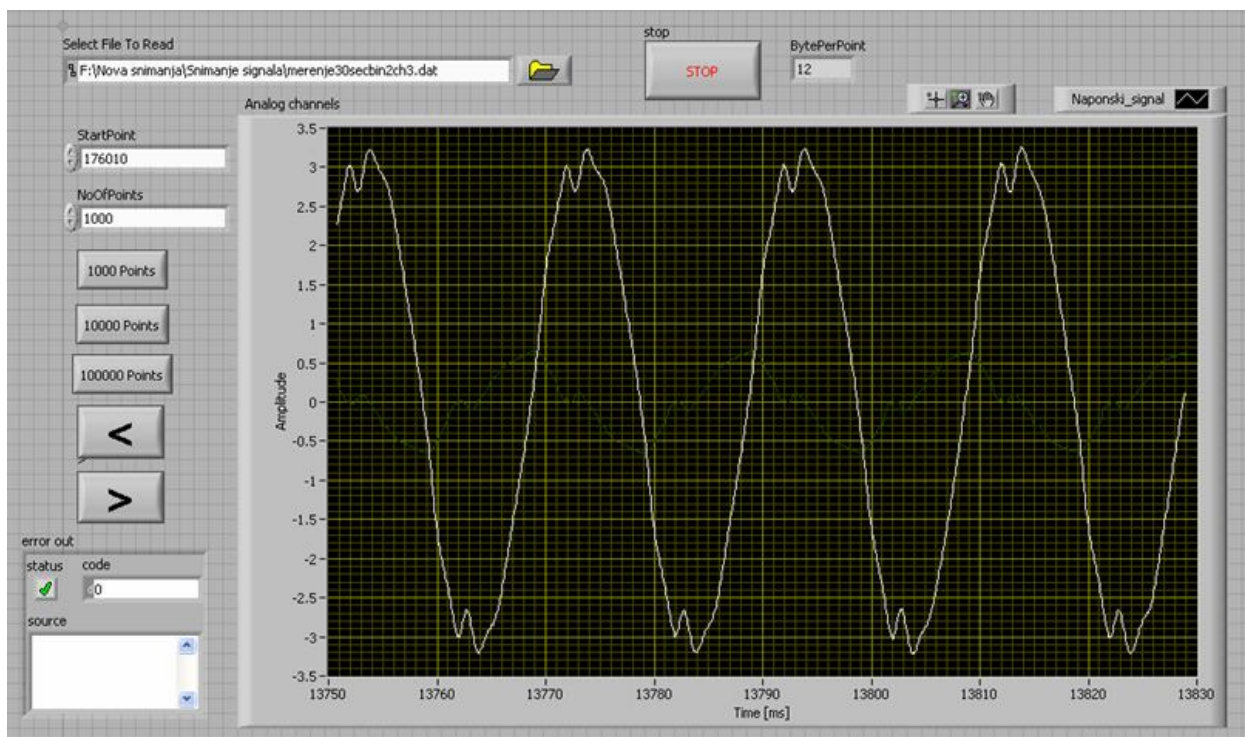
Slika 6.38. LabVIEW prezentaciju snimljenog naponskog signala data sa većim brojem perioda signala

Drugi primer prednjeg panela virtuelnog instrumenta za grafičku prezentaciju snimljenog talasnog oblika napona sa većim brojem perioda signala predstavljen je na slici 6.39. Za razliku od prethodnog primera, ovaj prikaz snimljenog talasnog oblika naponskog signala jasno ukazuje na prisustvo manjih varijacija amplitudne vrednosti napona u jednom segmentu datog signala.

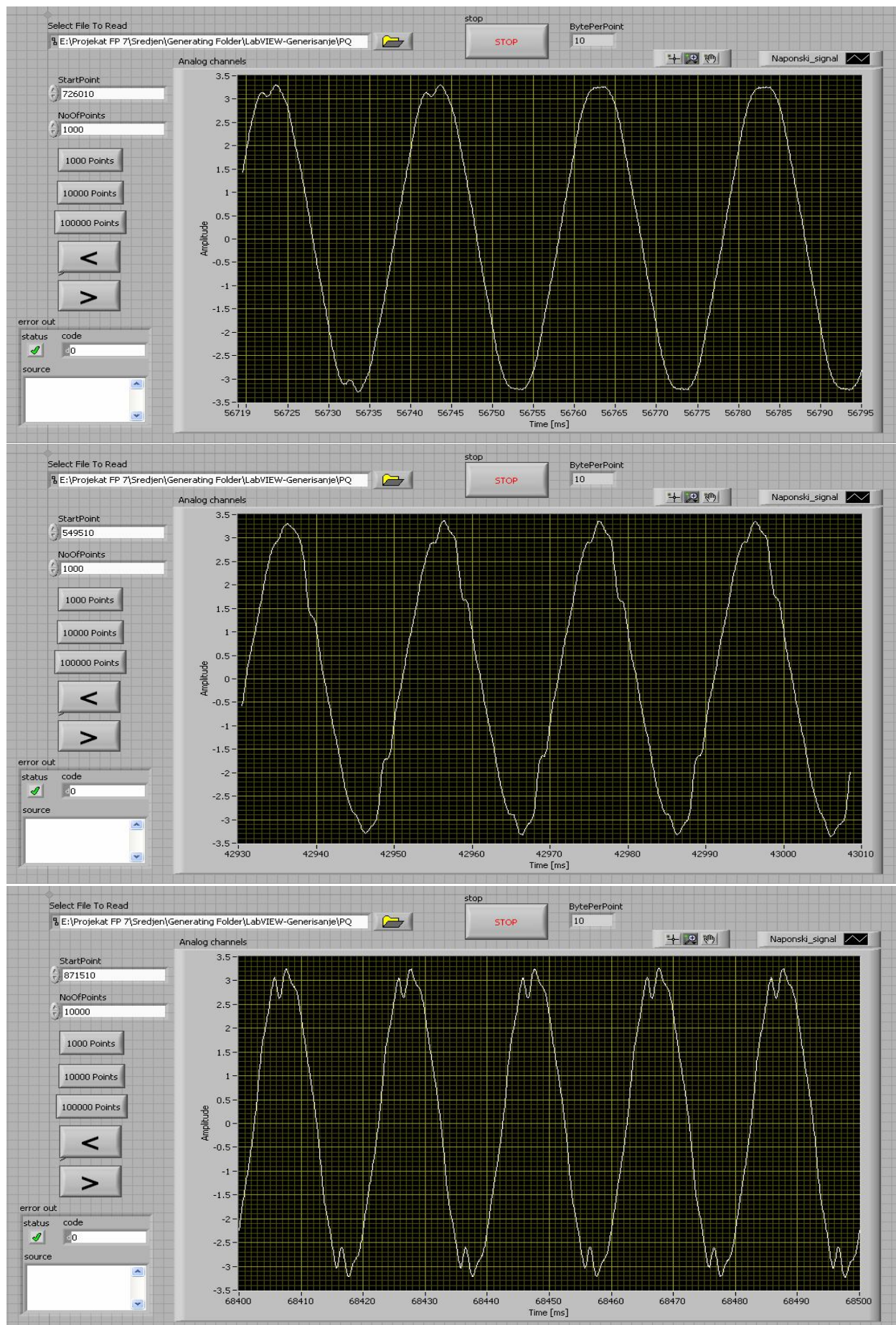


Slika 6.39. Prikaz naponskog signala snimljenog u prisustvu manjih varijacija amplitude signala

Na slici 6.40. predstavljen je realni naponski signal memorisan u prisustvu viših harmonika signala. Prisustvo određenog nivoa poremećaja i vidljiva harmonijska distorzija talasnog oblika ovog naponskog signala jasno ukazuju na pojavu i uticaj viših harmonijskih komponenti signala.



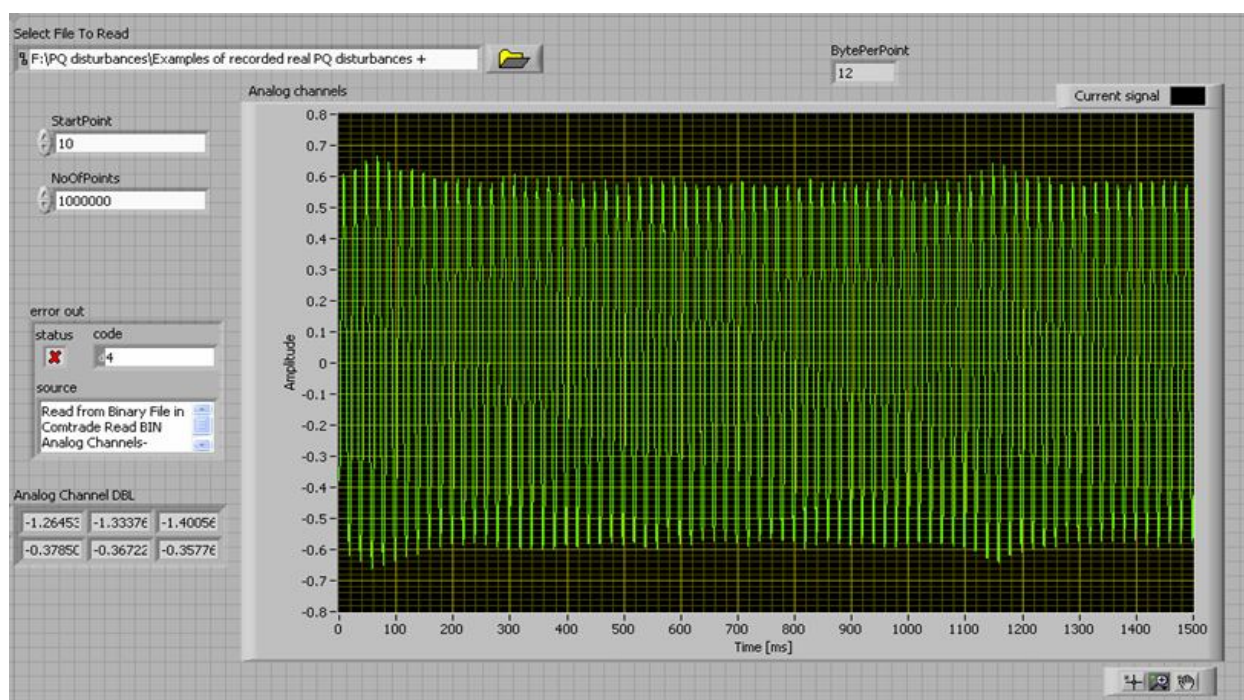
Slika 6.40. Prikaz realnog naponskog signala koji ukazuje na prisustvo viših harmonika signala



Slika 6.41. Realni naponski signali snimljeni sa različitim stepenom uticaja viših harmonika

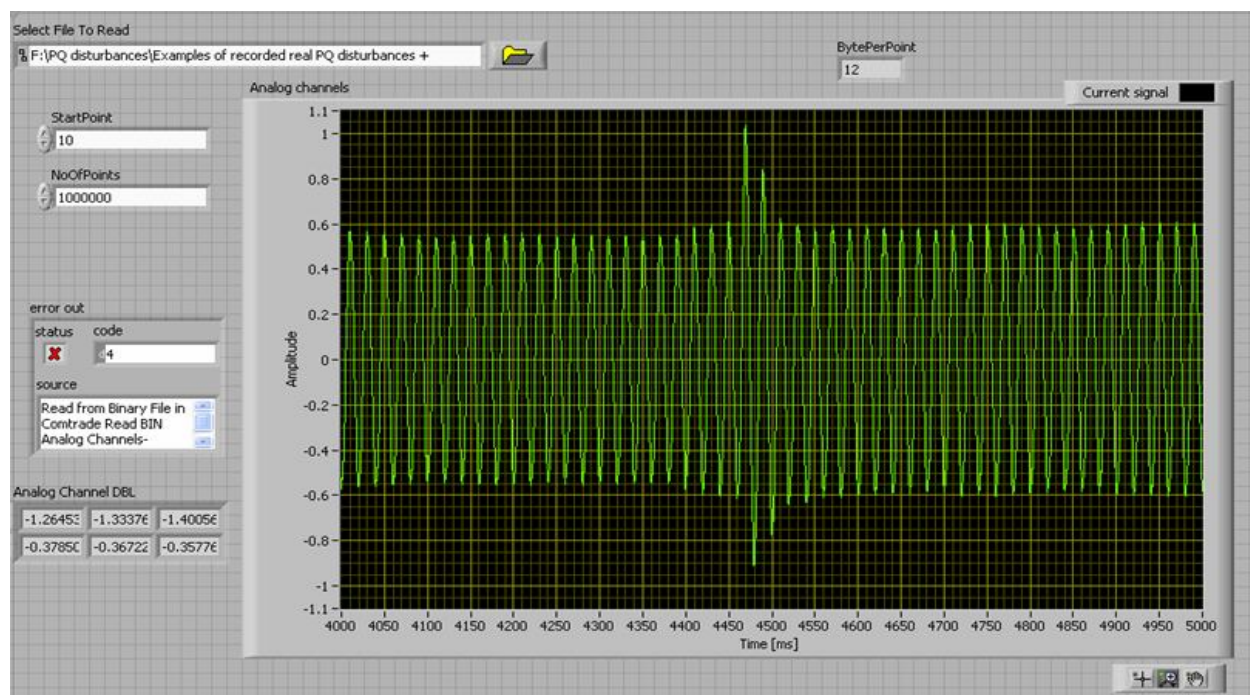
Uporedna grafička prezentacija više realnih naponskih signala elektrodistributivne mreže, memorisanih sa različitim stepenom uticaja viših harmonijskih komponenata signala, data je na slici 6.41. Na predstavljenim talasnim oblicima realnih naponskih signala, počevši odozgo prema dole, može se jasno uočiti uticaj pojave viših harmonijskih komponenata na izobličenje talasnih oblika signala. Na prvom gornjem signalu primetna su manja izobličenja talasnog oblika samo u jednom vršnom segmentu ovog naponskog signala, dok se kod drugog i posebno kod poslednjeg donjeg talasnog oblika napona može videti i znatno veći stepen harmonijskog izobličenja signala.

Prednji panel LabVIEW virtuelnog instrumenta za prezentaciju snimljenog talasnog oblika realnog strujnog signala prikazan je na slici 6.42. Konkretni strujni signal ilustrovan je sa znatno većim brojem perioda i na osnovu datog talasnog oblika signala jasno se mogu primetiti manje ili veće varijacije amplitudne vrednosti signala tokom vremena. Sličan primer prezentacije realnog strujnog signala sa velikim brojem perioda predstavljen je i na slici 6.43. Pored manjih oscilacija amplitudne vrednosti signala memorisanih tokom dužeg vremenskog perioda, u središnjem delu prikazanog talasnog oblika snimljenog signala registrovan je neželjeni nagli i kratkotrajni porast amplitudne vrednosti struje, odnosno došlo je do pojave tranzijenata u datom strujnom signalu.



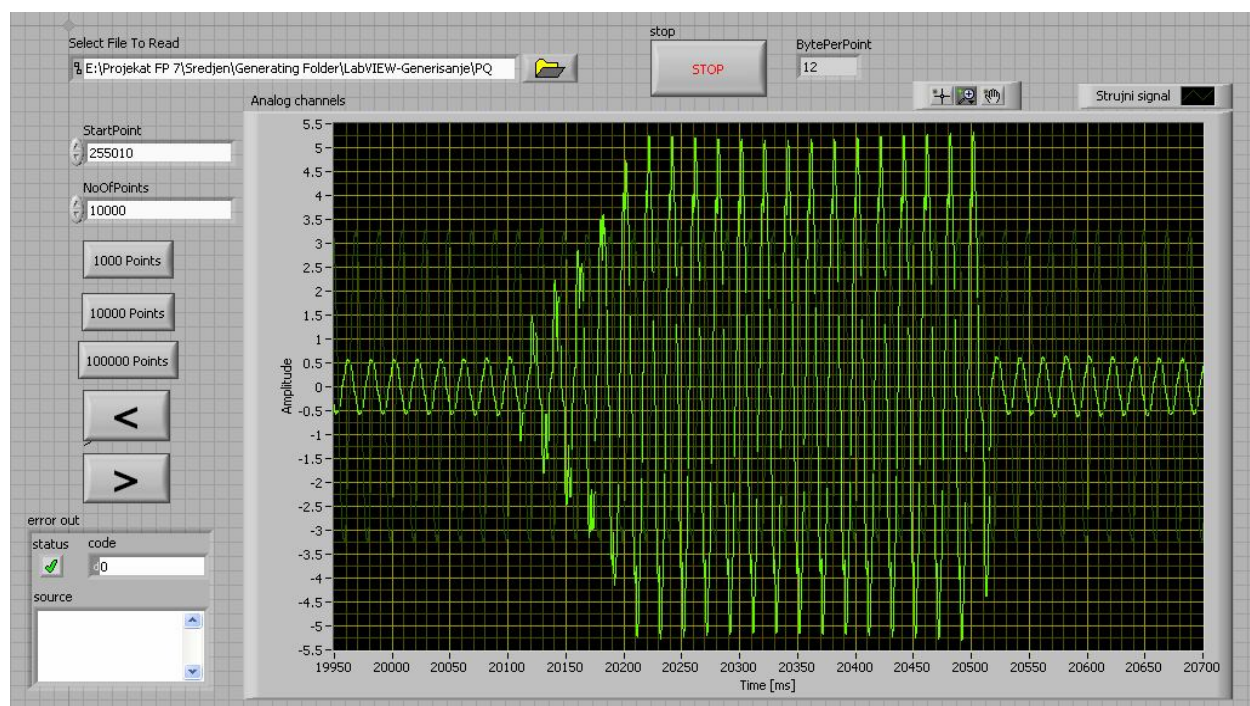
Slika 6.42. LabVIEW prezentacija realnog strujnog signala sa varijacijom amplitudne vrednosti

Na slici 6.44. prikazan je karakterističan talasni oblik realnog strujnog signala, memorisan tokom snimanja u trafostanici 10/0.4kV, koji pokazuje specifičnu promenu amplitudne vrednosti signala, praćenu i pojavom viših harmonijskih komponenata signala. Ovaj karakterističan talasni oblik strujnog signala direktna je posledica specifičnih procesa usled uključivanja i isključivanja pojedinih funkcionalnih sklopova neophodnih za proizvodni proces u fabrici grejnih elemenata. Puštanje u pogon određenih funkcionalnih blokova u proizvodnom lancu izaziva naglu promenu

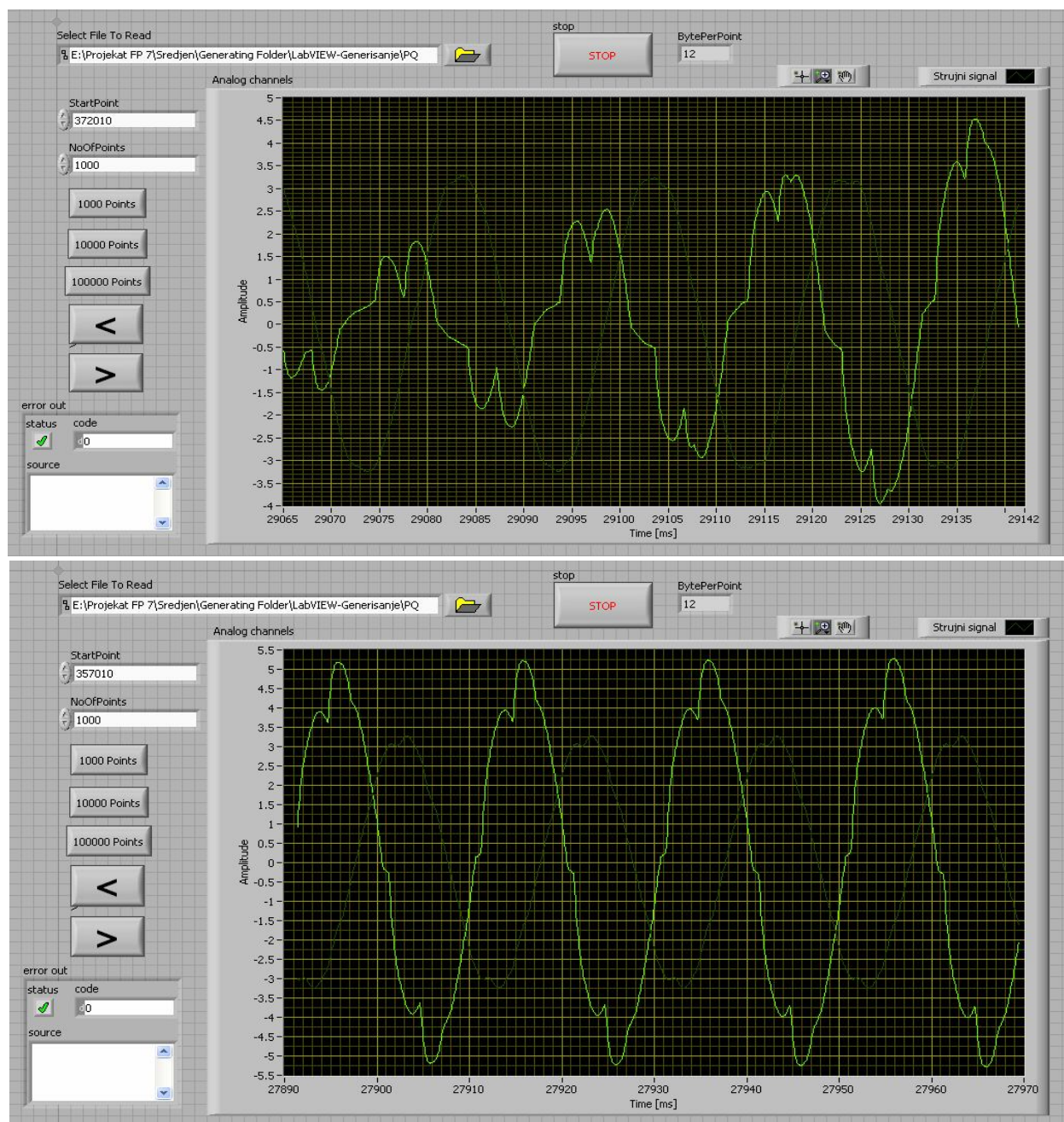


Slika 6.43. Prikaz realnog strujnog signala koji pokazuje nagli i kratkotrajni porast amplitude signala

struje i pojavu viših harmonika signala, što se može jasno i videti sa slike 6.44. Pregledniji prikaz određenih segmenata talasnog oblika memorisanog strujnog signala, koji potvrđuje harmonijsku distorziju signala pod uticajem indukovanih viših harmonika, dat je na slici 6.45. Gornji snimak strujnog signala pokazuje postepeni porast nivoa signala uz očigledno prisustvo viših harmonika, dok se na donjem snimku signala može videti talasni oblik struje snimljen nakon uspostavljanja maksimalnog nivoa signala, takođe sa vidljivim uticajem viših harmonijskih komponenti signala.

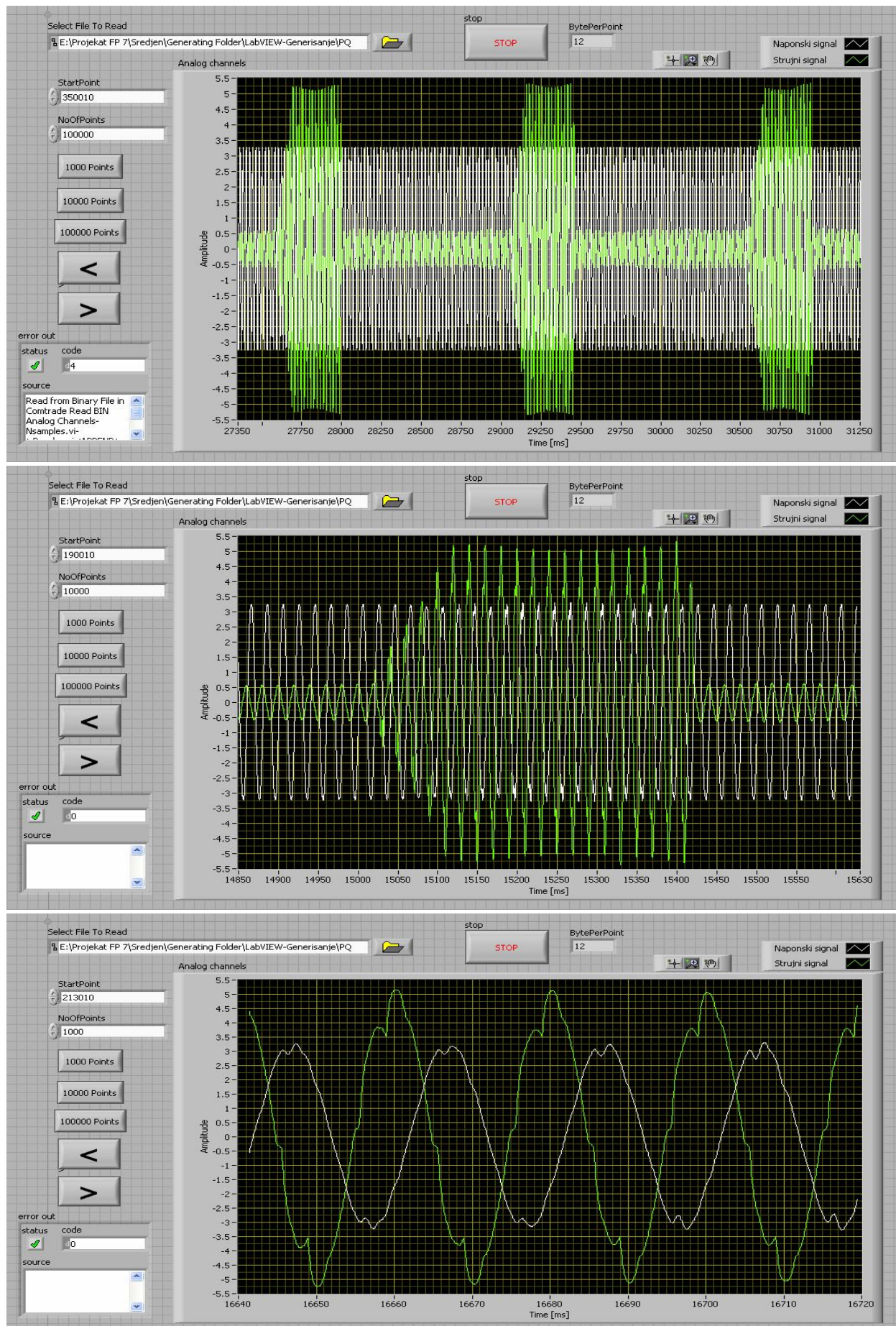


Slika 6.44. Prikaz snimljenog signala koji pokazuje porast struje praćen višim harmonicima signala



Slika 6.45. Ilustracija talasnog oblika struje koja ukazuje na prisustvo viših harmonika signala

Pored individualnog prikaza snimljenih realnih signala napona i struje, na prednjem panelu LabVIEW virtuelnog instrumenta može se obezbediti istovremeni prikaz naponskog i strujnog signala. Na slici 6.46. dati su primeri uporedne grafičke prezentacije memorisanih talasnih oblika signala napona i struje. U sva tri slučaja prikazana na slici radi se o identičnim signalima napona i struje, pru čemu se osnovna razlika odnosi na broj perioda signala koje se trenutno prikazuju na prednjem panelu virtuelnog instrumenta. Veći broj perioda signala na prednjem panelu virtuelnog instrumenta omogućava praćenje talasnog oblika signala u dužem vremenskom periodu, kao što je slučaj na prvom gornjem snimku signala na slici 6.46. Sa druge strane, prezentacija signala sa malim brojem perioda daje mogućnost za detaljniju analizu memorisanih talasnih oblika signala, kakav je konkretno slučaj na trećem donjem snimku naponskog i strujnog signala na slici 6.46.



Slika 6.46. Primeri različitih varijanti uporedne prezentacije snimljenih signala napona i struje

6.5. Testiranje virtuelnog instrumenta za detekciju poremećaja kvaliteta

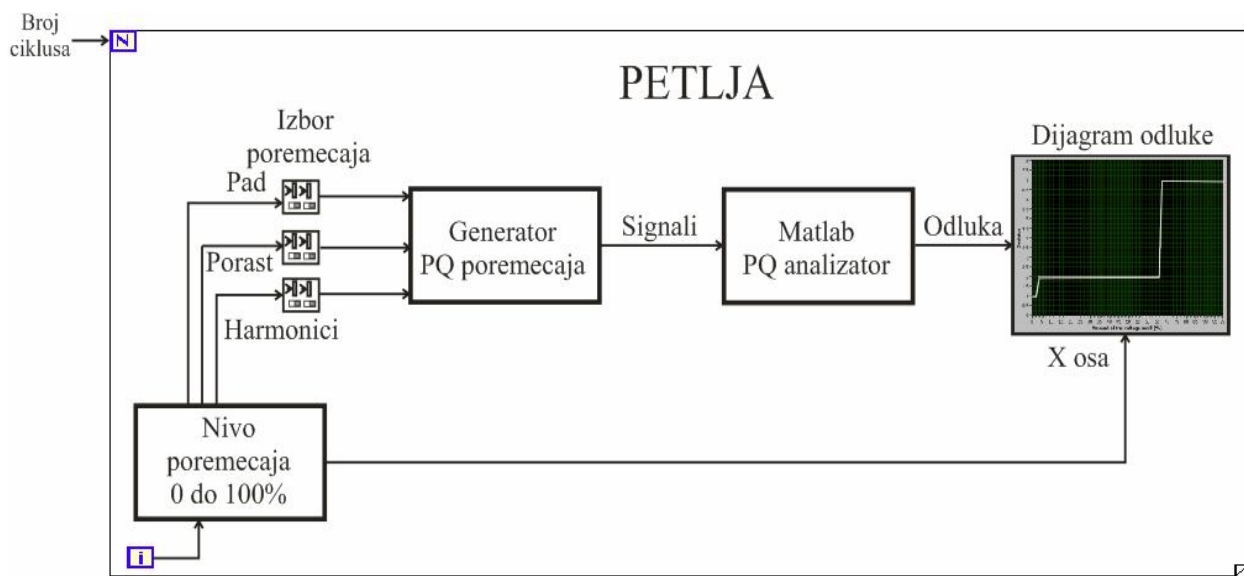
Rešenje softverski podržanog generatora standardnih tipova poremećaja kvaliteta električne energije, koje je prethodno već detaljno opisano u poglavlju 6.3, primenjeno je u svrhe testiranja virtuelnog instrumenta realizovanog za detekciju, analizu i klasifikaciju standardnih poremećaja kvaliteta električne energije. Rešenje ovog virtuelnog instrumenta razvijeno je kao deo aktivnosti u okviru već pomenutog međunarodnog FP7 projekta: "Algorithms for Time-Varying Harmonic Analysis for Power Quality Assesment applicable on Modern Digital Signal Processors", a ova procedura testiranja obavljena je u cilju provere i verifikacije osnovnih performansi ovog rešenja virtuelnog instrumenta. Softverski algoritam za detekciju i analizu osnovnih poremećaja kvaliteta električne energije, primenjen kao osnova za realizaciju ovog virtuelnog instrumenta, razvijen je u Matlab programskom okruženju [100-103], dok je procedura testiranja virtuelnog instrumenta obavljena u LabVIEW programskom okruženju. Ovaj virtuelni instrument realizovan je tako da ima mogućnost za detekciju šest standardnih kategorija poremećaja kvaliteta električne energije: porast napona, padove napona, više harmonijske komponente signala, naponske tranzijente, kombinacije porasta napona sa harmonicima, kao i padove napona sa višim harmonicima signala.

Moguće različite varijante konačne odluke o detektovanom tipu konkretnog poremećaja kvaliteta električne energije prikazane su na prednjem panelu virtuelnog instrumenta i označene su odgovarajućim brojevima od 1 do 7. Posebno je definisan i označen svaki od eventualno mogućih poremećaja u kvalitetu signala, kao što je detaljnije predstavljeno i opisano u tabeli 6.3.

Tip detektovanog poremećaja kvaliteta signala	Oznaka detektovanog tipa poremećaja kvaliteta
Signal bez poremećaja kvaliteta	1
Porast napona	2
Padovi napona	3
Viši harmonici signala	4
Naponski tranzijenti	5
Pad napona sa višim harmonicima signala	6
Porast napona sa višim harmonicima signala	7

Tabela 6.3. *Moguće varijante konačne odluke o detektovanom tipu poremećaja kvaliteta signala na indikatoru virtuelnog instrumenta*

Funkcionalni blok dijagram kompletne procedure testiranja rešenja virtuelnog instrumenta za detekciju i klasifikaciju poremećaja kvaliteta električne energije predstavljen je na slici 6.47.

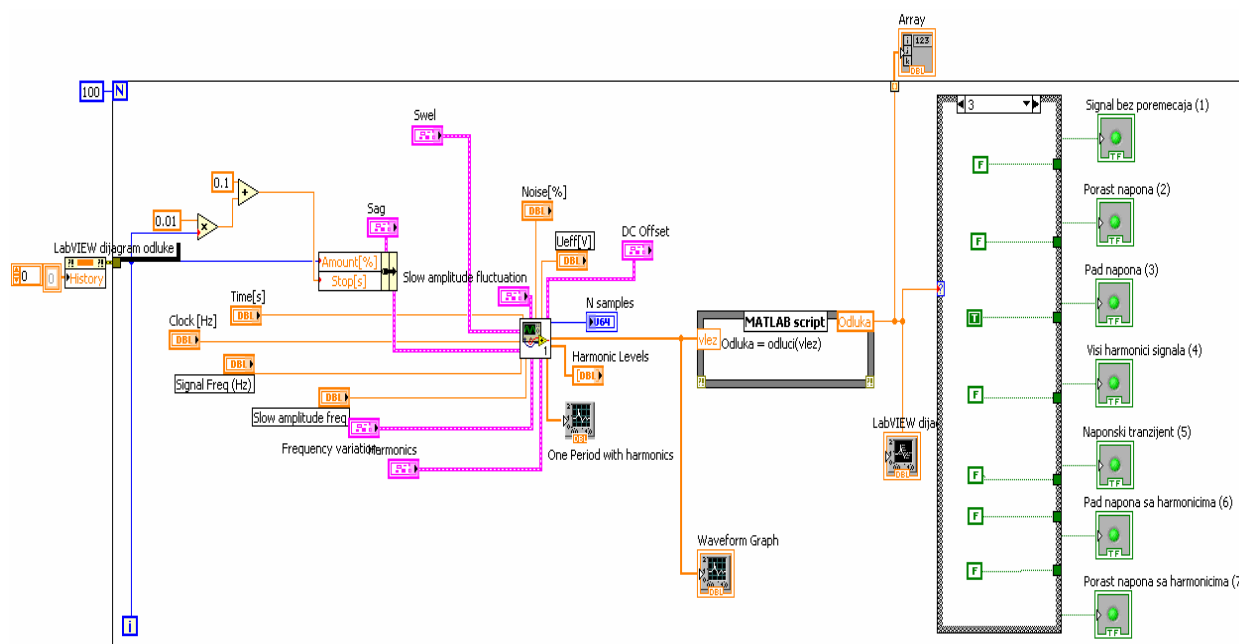


Slika 6.47. Funkcionalni blok dijagram procedure testiranja virtuelnog instrumenta za detekciju i klasifikaciju poremećaja kvaliteta električne energije

Prikazana softverski podržana procedura testiranja uključuje četiri funkcionalna segmenta:

- ulazni segment za izbor i regulaciju procentualnog nivoa pojedinih poremećaja kvaliteta referentnih test signala iz LabVIEW generatora poremećaja;
- generator referentnih signala sa standardnim poremećajima kvaliteta električne energije za testiranje virtuelnog instrumenta;
- Matlab analizator za detekciju i klasifikaciju poremećaja kvaliteta električne energije;
- LabVIEW dijagram za grafički prikaz konačne odluke o detektovanom tipu poremećaja signala u zavisnosti od promene amplitudnog nivoa poremećaja u test signalima.

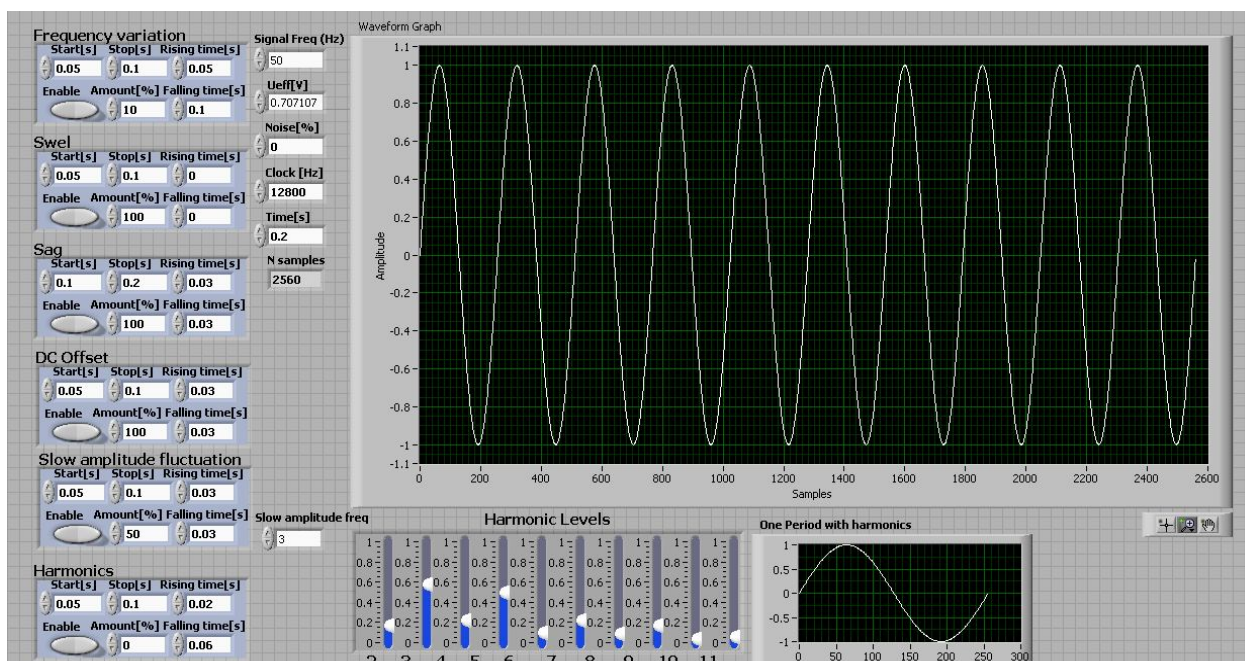
Postupak testiranja virtuelnog instrumenta baziran je na pozivanju generatora standardnih poremećaja kvaliteta električne energije, kao posebne potprogramske sekvence u okviru glavnog LabVIEW programa za testiranje. Nakon pozivanja ovog generatora referentni naponski signali generisani sa odabranim osnovnim parametrima i željenim tipom poremećaja kvaliteta signala šalju se direktno na ulaz Matlab analizatora poremećaja kvaliteta električne energije, sve u okviru programske petlje. Broj iteracija programske petlje definiše se od strane korisnika prema potrebi, a u konkretnom slučaju broj iteracija petlje zavisi od zahtevanog amplitudnog nivoa poremećaja test signala iz generatora. Konačna odluka o detektovanom tipu poremećaja signala može se predstaviti i u formi LabVIEW dijagrama, kao zavisnost konačne odluke testiranog virtuelnog instrumenta o tipu konkretnog poremećaja signala od promene amplitudnog nivoa poremećaja u referentnim test signalima. Odgovarajuća LabVIEW programska sekvenca kompletne procedure testiranja virtuelnog instrumenta za detekciju poremećaja kvaliteta predstavljena je na slici 6.48.



Slika 6.48. LabVIEW programski kod procedure testiranja virtuelnog instrumenta za detekciju poremećaja kvaliteta električne energije

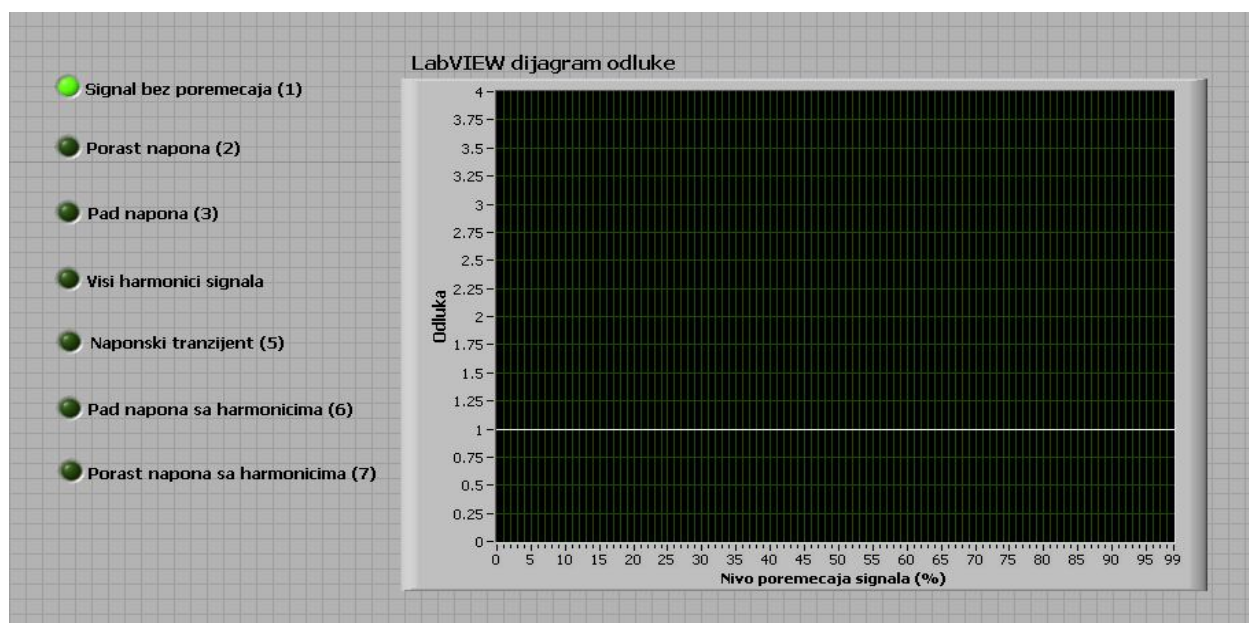
6.5.1. LabVIEW prezentacija i analiza rezultata testiranja

Procedura testiranja virtuelnog instrumenta za detekciju i klasifikaciju poremećaja kvaliteta električne energije funkcionalno je podržana LabVIEW aplikativnim softverom za prezentaciju i analizu rezultata dobijenih tokom testiranja. Primenom generatora standardnih poremećaja mogu se obezbediti referentni naponski signali za testiranje, sa mogućnošću izbora i varijacije različitih parametara signala, pri čemu se vrednosti više različitih parametara mogu menjati istovremeno ili se svaki od uticajnih parametara može pojedinačno kontrolisati. Na slici 6.49. prikazan je prednji



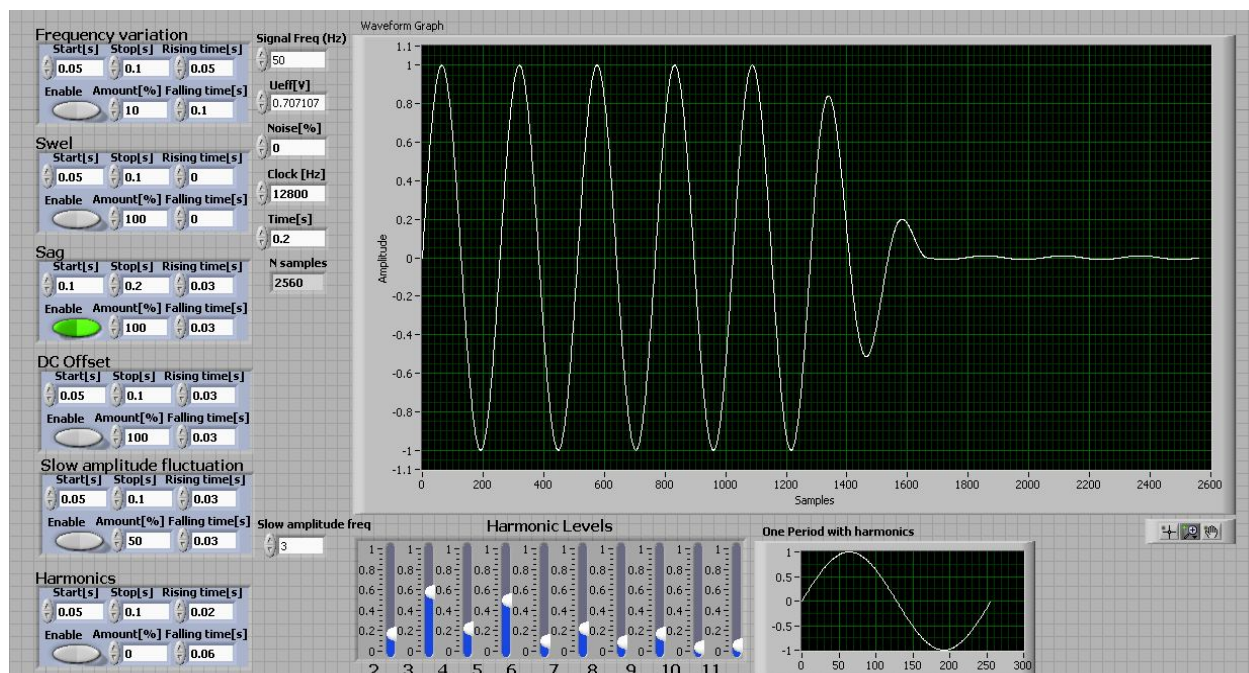
Slika 6.49. Generiranje naponskog signala bez poremećaja kvaliteta za testiranje virtuelnog instrumenta

panel za generisanje naponskog signala za testiranje bez prisustva poremećaja u kvalitetu signala. Virtualni instrument sa Matlab analizatorom za detekciju poremećaja kvaliteta na indikatoru kao rezultat prikazuje jedan od sedam mogućih slučajeva označenih brojevima od 1 do 7, navedenih u tabeli 6.3. U cilju preglednije prezentacije i lakše analize dobijenih rezultata testiranja razvijen je LabVIEW prednji panel za prikaz dijagrama odluke o detektovanom tipu poremećaja zavisno od vrednosti amplitudnog nivoa poremećaja u test signalima. Dijagram odluke koji se odnosi na konkretan slučaj naponskog test signala bez poremećaja predstavljen je na slici 6.50. Očekivano u slučaju naponskog test signala iz generatora sa slike 6.49. odluka je 1 – signal bez poremećaja.

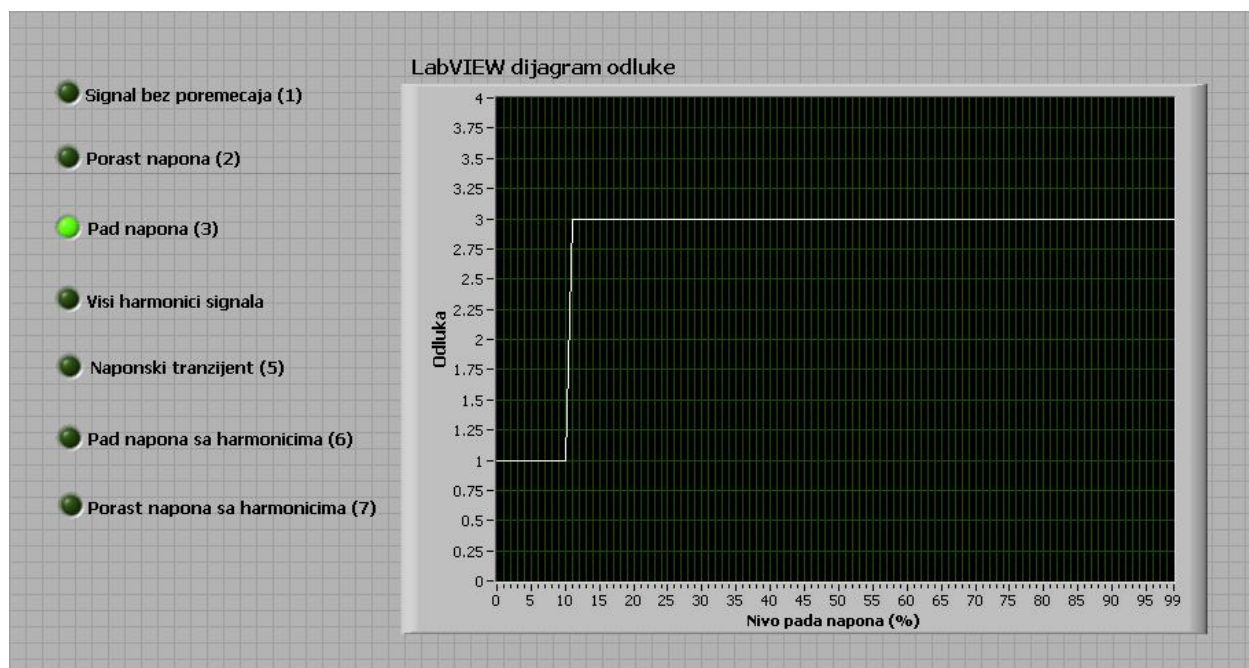


Slika 6.50. LabVIEW prednji panel za prikaz dijagrama odluke o detektovanom tipu poremećaja u zavisnosti od promene procentalnog nivoa poremećaja

Generalno, primenom prethodno opisanog generatora signala sa poremećajima kvaliteta za potrebe testiranja može se generisati veliki broj različitih test signala sa varijacijom poremećaja. Za konkretnu primenu u testiranju ovog virtuelnog instrumenta za detekciju poremećaja kvaliteta analizirane su neke karakteristične kombinacije test signala sa tipičnim poremećajima kvaliteta koji se javljaju u realnim elektrodistributivnim mrežama. Primer prednjeg panela za generisanje naponskog test signala sa pojavom pada napona prikazan je na slici 6.51. Test signal se generiše sa kontinualnom promenom procentalnog nivoa pada napona u opsegu 0 – 100% u odnosu na nominalnu vrednost amplitude signala, pri čemu je na slici 6.51. ilustrovan samo slučaj kada pad napona dostigne krajnju vrednost od 100%. Odgovarajući LabVIEW dijagram odluke o detekciji klase poremećaja kvaliteta u zavisnosti od procentalnog nivoa pada napona predstavljen je na slici 6.52. Na osnovu datog dijagrama odluke može se jasno zaključiti da virtuelni instrument samo u početnom segmentu dijagrama za male vrednosti nivoa pada napona detektuje signal bez ikakvih poremećaja. Pri kontinualnom porastu procentalnog nivoa pada napona u određenom trenutku dolazi do promene odluke o detektovanom tipu poremećaja, tako da prema očekivanju virtuelni instrument na svom indikatoru konstantno pokazuje konačnu odluku 3 – pad napona.

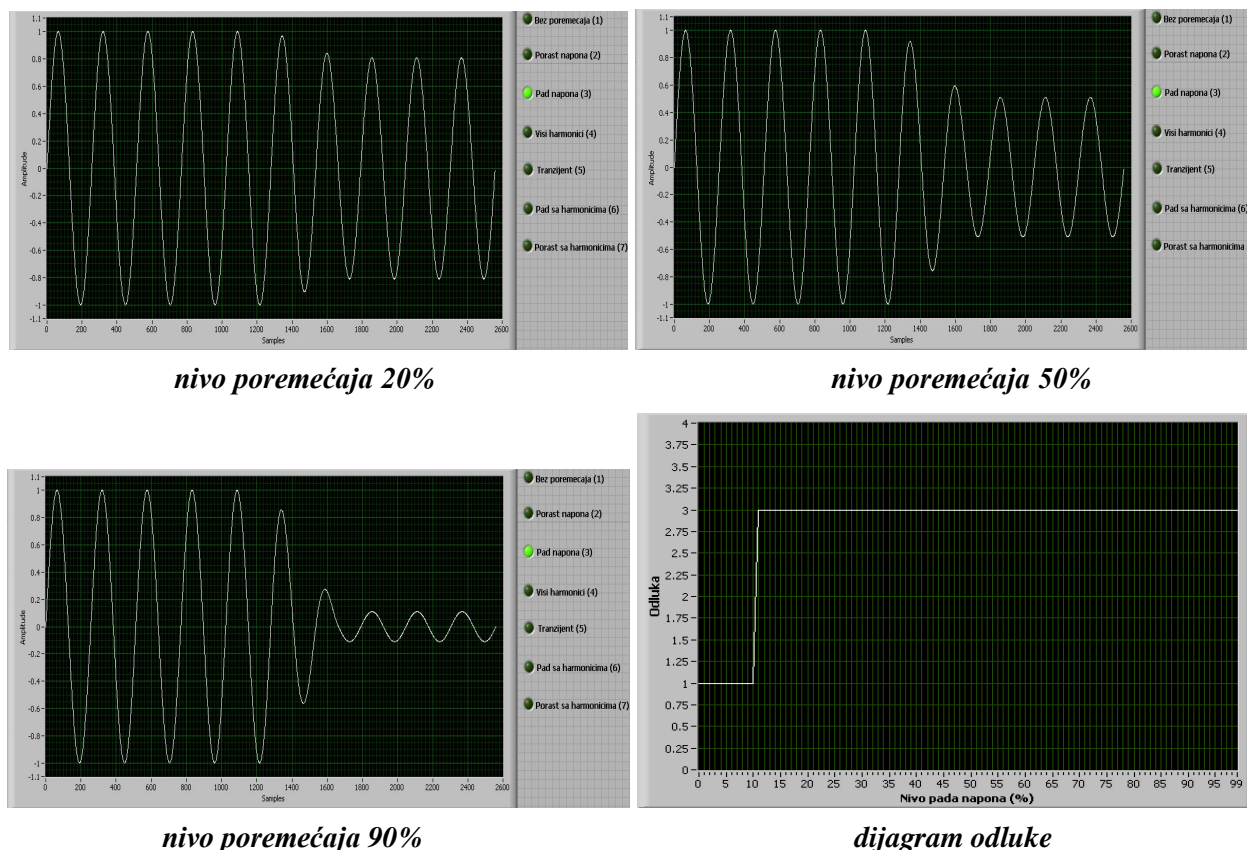


Slika 6.51. Generisanje test signala sa padom napona (kontinualna promena procentualnog nivoa poremećaja u opsegu 0 - 100%)



Slika 6.52. Prikaz dijagrama odluke o detektovanom tipu poremećaja za slučaj kontinualne promene procentualnog nivoa pada napona u opsegu 0 - 100%

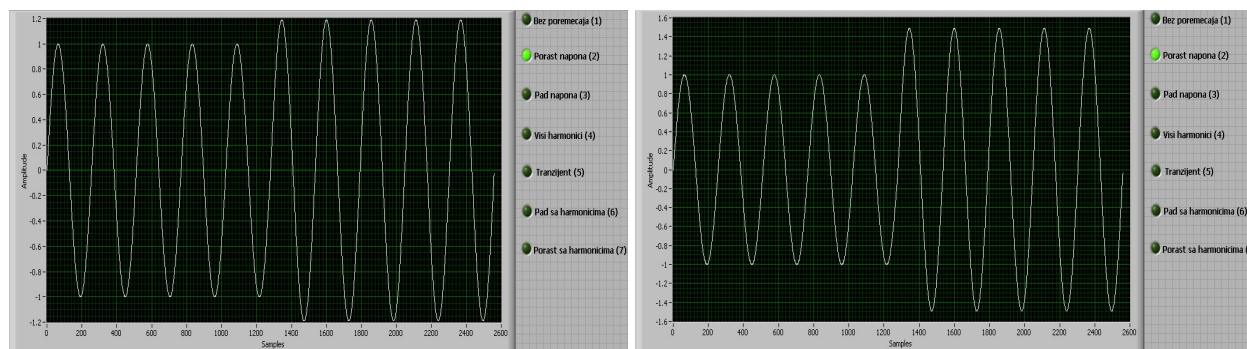
Prezentacija signala koja omogućava bolje i jednostavnije praćenje dijagrama odluke i test signala za različite vrednosti procentualnog nivoa poremećaja signala, u konkretnom slučaju pada napona, data je na slici 6.53. Na ovoj slici su predstavljena tri slučaja naponskog signala za testiranje, sa svetlosnim indikatorima odluke o trenutno detektovanom tipu poremećaja kvaliteta u zavisnosti od trenutnih vrednosti procentualnog nivoa poremećaja, konkretno za nivoa pada napona od 20%, 50% i 90%.



Slika 6.53. LabVIEW prezentacija test signala i dijagrama odluke za slučaj kontinualne promene procentualnog nivoa pada napona u opsegu 0 - 100%

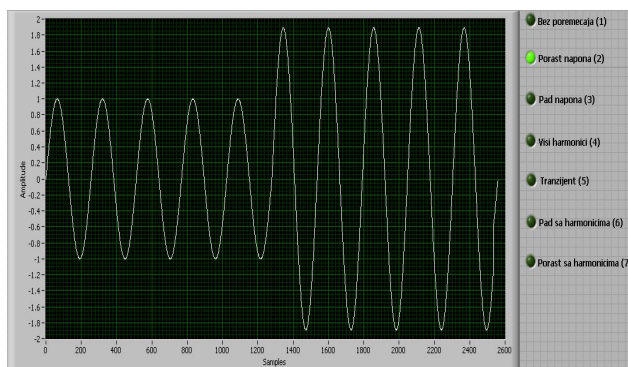
LabVIEW prezentacija test signala i odgovarajućeg dijagrama odluke o detektovanom tipu poremećaja kvaliteta, za slučaj naponskog test signala iz generatora sa kontinualnom promenom vrednosti procentualnog nivoa porasta napona, data je na slici 6.54. Kao u prethodnom primeru i ovde su predstavljena tri karakteristična slučaja signala za testiranje, za procentualni nivo porasta napona od 20%, 50% i 90%. Dati dijagram odluke pokazuje da se samo u početnom segmentu za manje vrednosti procentualnog nivoa porasta napona detektuje signal bez ikakvih poremećaja, ali sa kontinualnim povećanjem procentualnog nivoa porasta napona već na 10% poremećaja dolazi do promene odluke o detekciji, tako da indikator testiranog instrumenta na bazi Matlab algoritma za detekciju poremećaja kvaliteta signala prikazuje očekivanu konačnu odluku 2 – porast napona.

Prikaz referentnog naponskog signala primenjenog za testiranje virtuelnog instrumenta i dijagrama odluke o detektovanim poremećajima test signala, za slučaj kombinacije istovremene kontinualne promene procentualnih nivoa pada napona i pojedinih viših harmonika signala, dat je na slici 6.55. I ovde su predstavljena tri karakteristična slučaja za nivo poremećaja od 20%, 50% i 90%. Prikazani dijagram odluke o detektovanim poremećajima kvaliteta za slučaj ovakvog test signala nešto je komplikovaniji u odnosu na prethodne primere i pokazuje višestruku promenu odluke na izlazu virtuelnog instrumenta za detekciju poremećaja kvaliteta signala. Nakon početne detekcije signala bez poremećaja, pa zatim pada napona, virtuelni instrument počinje da detektuje kombinaciju ova dva poremećaja, odnosno dolazi do promene odluke na 6 – pad napona sa višim

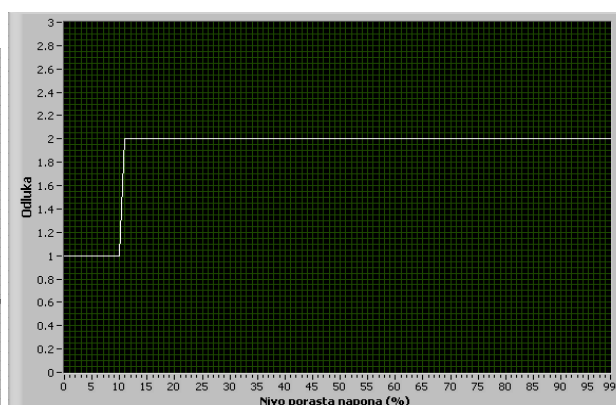


nivo poremećaja 20%

nivo poremećaja 50%

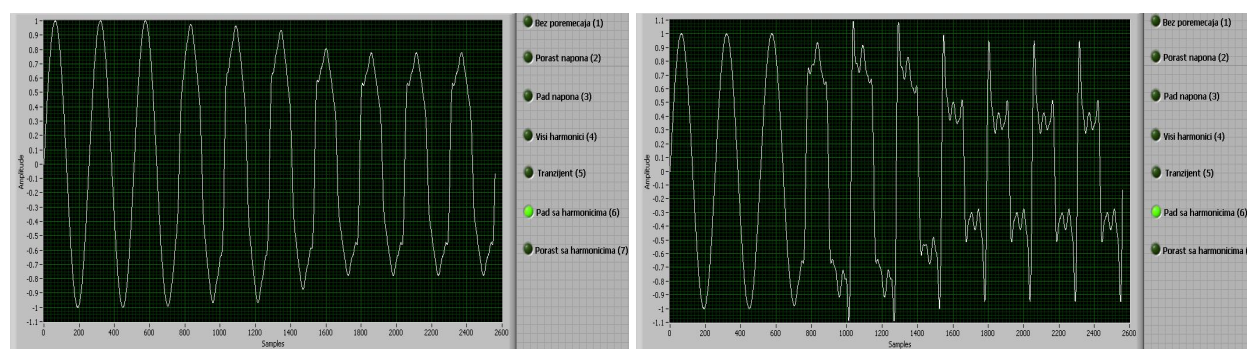


nivo poremećaja 90%



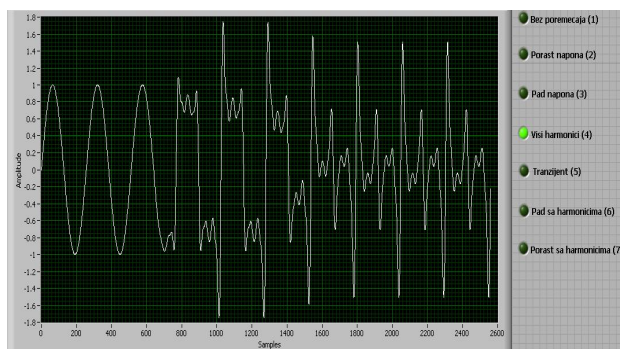
dijagram odluke

Slika 6.54. Prezentacija test signala i dijagrama odluke za slučaj kontinualne promene procentualnog nivoa porasta napona u opsegu 0 - 100%

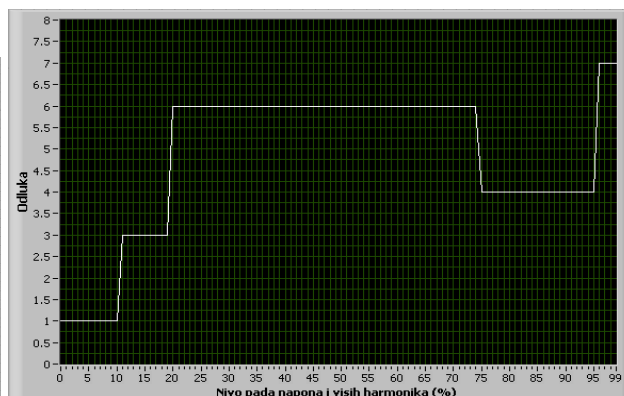


nivo poremećaja 20%

nivo poremećaja 50%



nivo poremećaja 90%

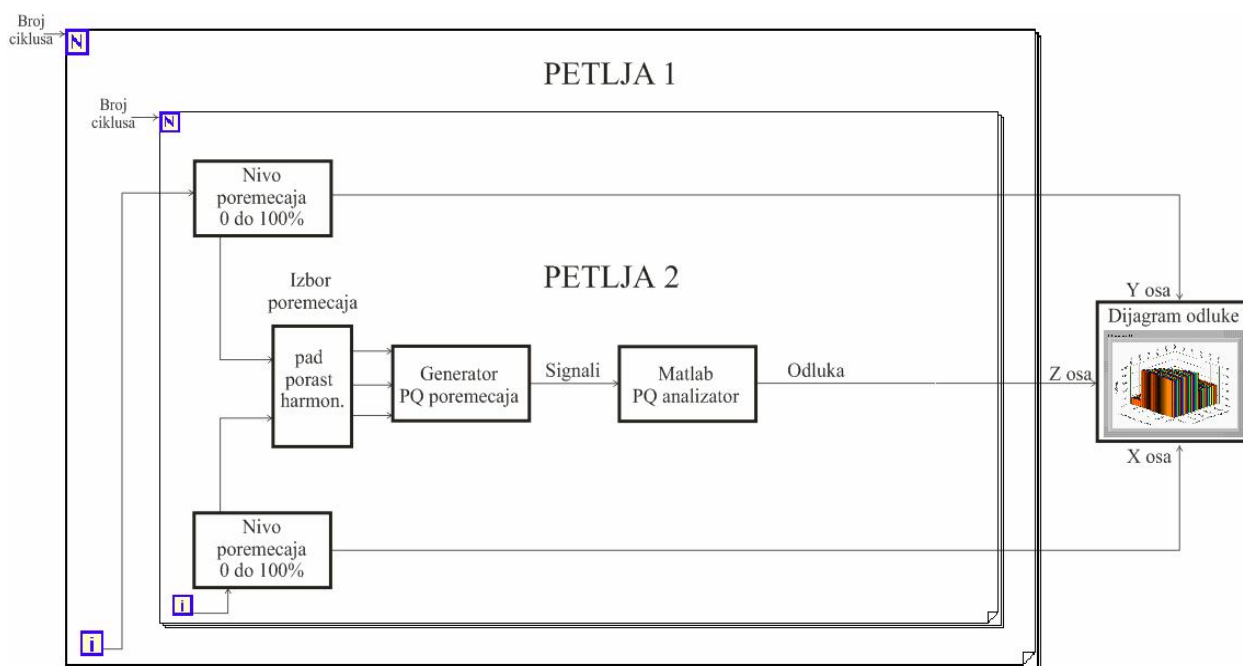


dijagram odluke

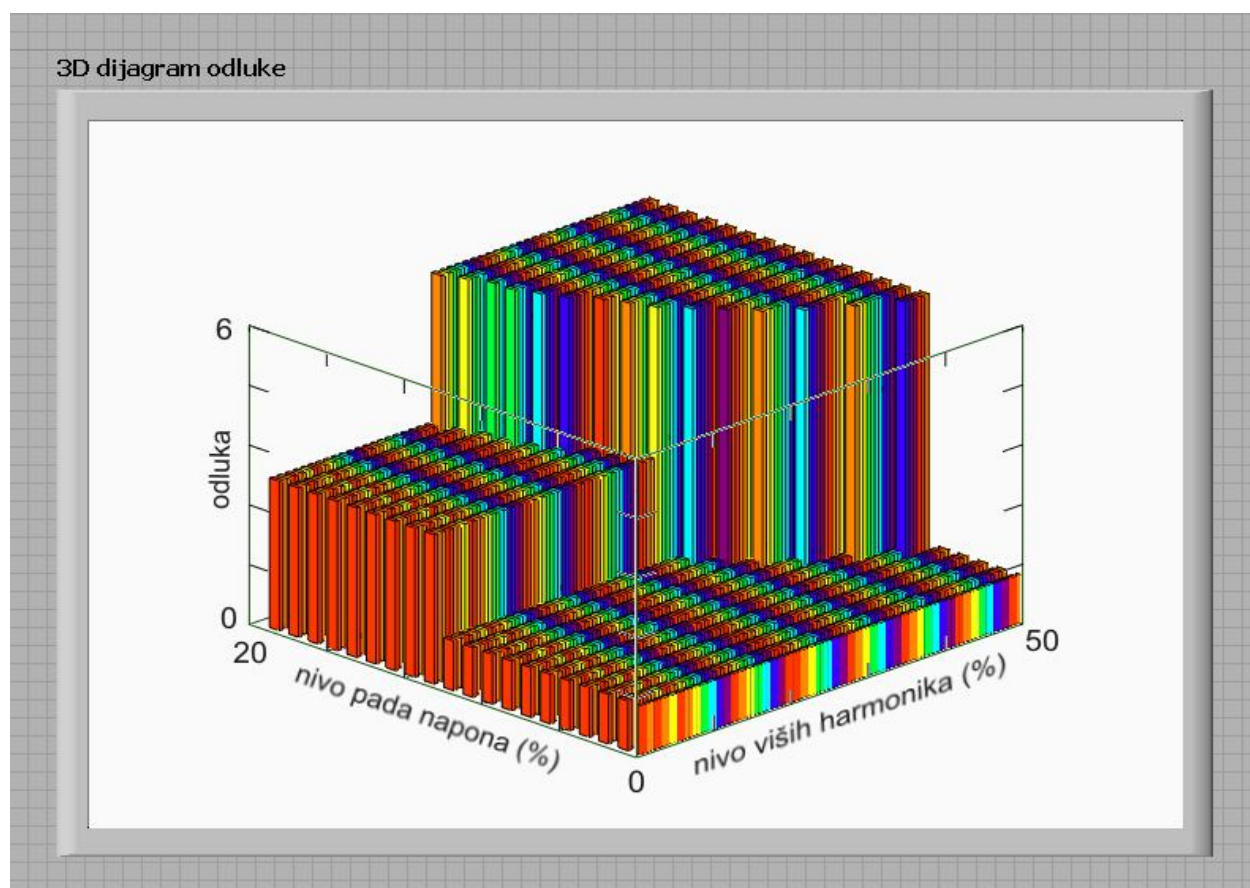
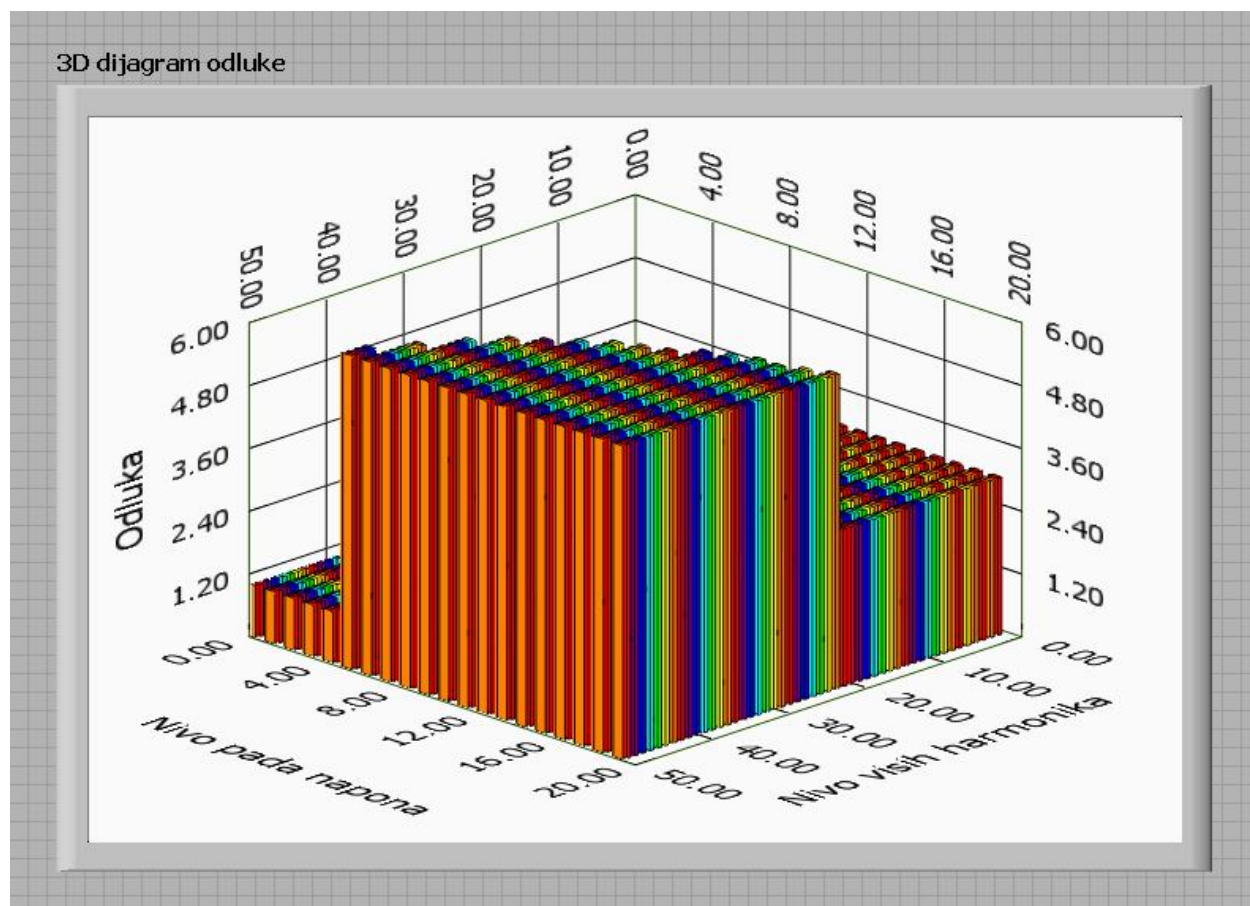
Slika 6.55. Prikaz test signala i dijagrama odluke za slučaj kontinualne promene procentualnog nivoa pada napona i viših harmonika u opsegu 0 - 100%

harmonicima signala. To se može jasno i videti sa slike 6.55. za slučaj naponskog test signala sa nivoom poremećaja od 20% i 50%. U određenom trenutku uticaj viših harmonika signala postaje dominantan u odnosu na pad napona, tako da dolazi do promene odluke o detekciji poremećaja na 4 – viši harmonici signala, što je slučaj i za nivo poremećaja test signala od 90%. Na kraju, u završnom segmentu dijagrama odluke, usled velikog porasta nivoa signala kao direktna posledica pojačanog uticaja viših harmonika signala, odluka o detekciji tipa poremećaja kvaliteta signala na izlazu virtuelnog instrumenta je promenjena na 7 – porast napona sa višim harmonicima signala.

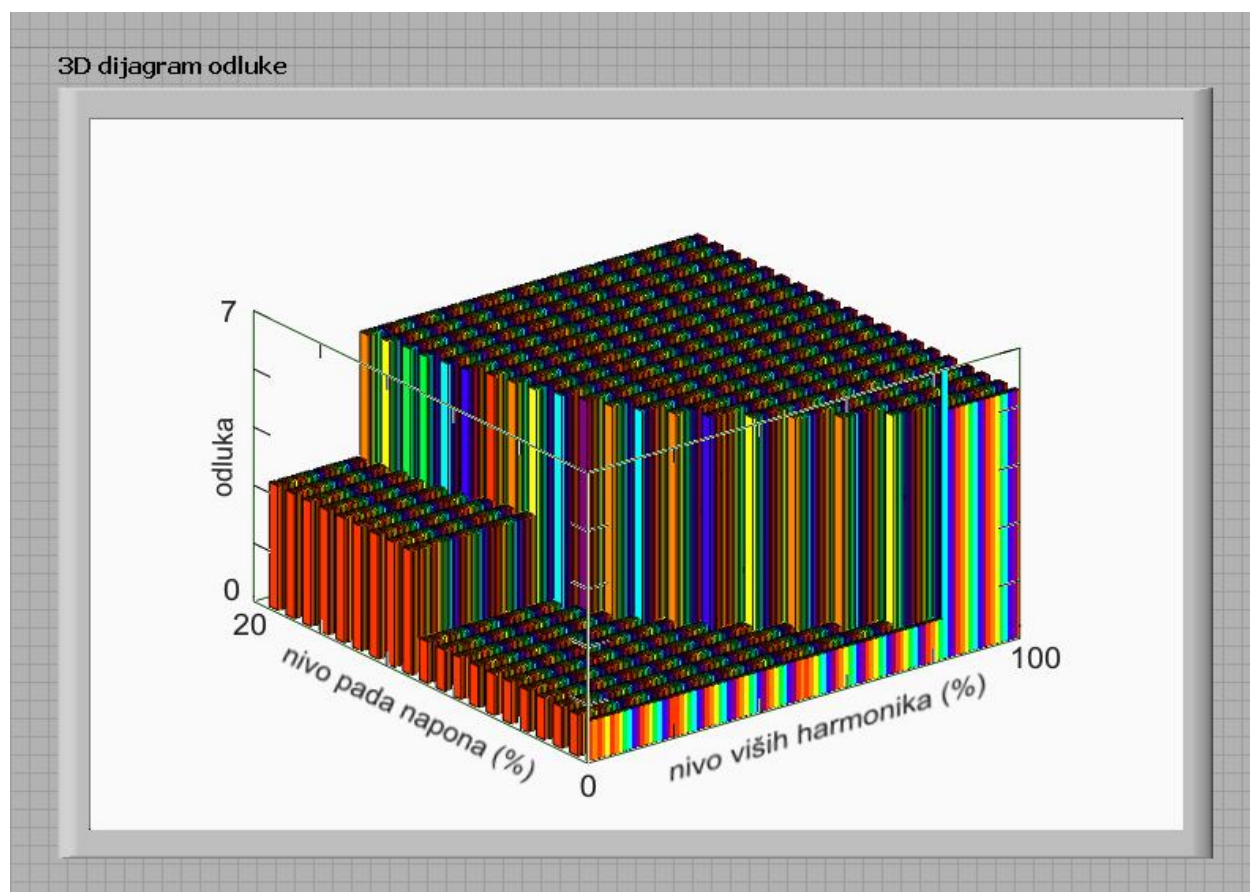
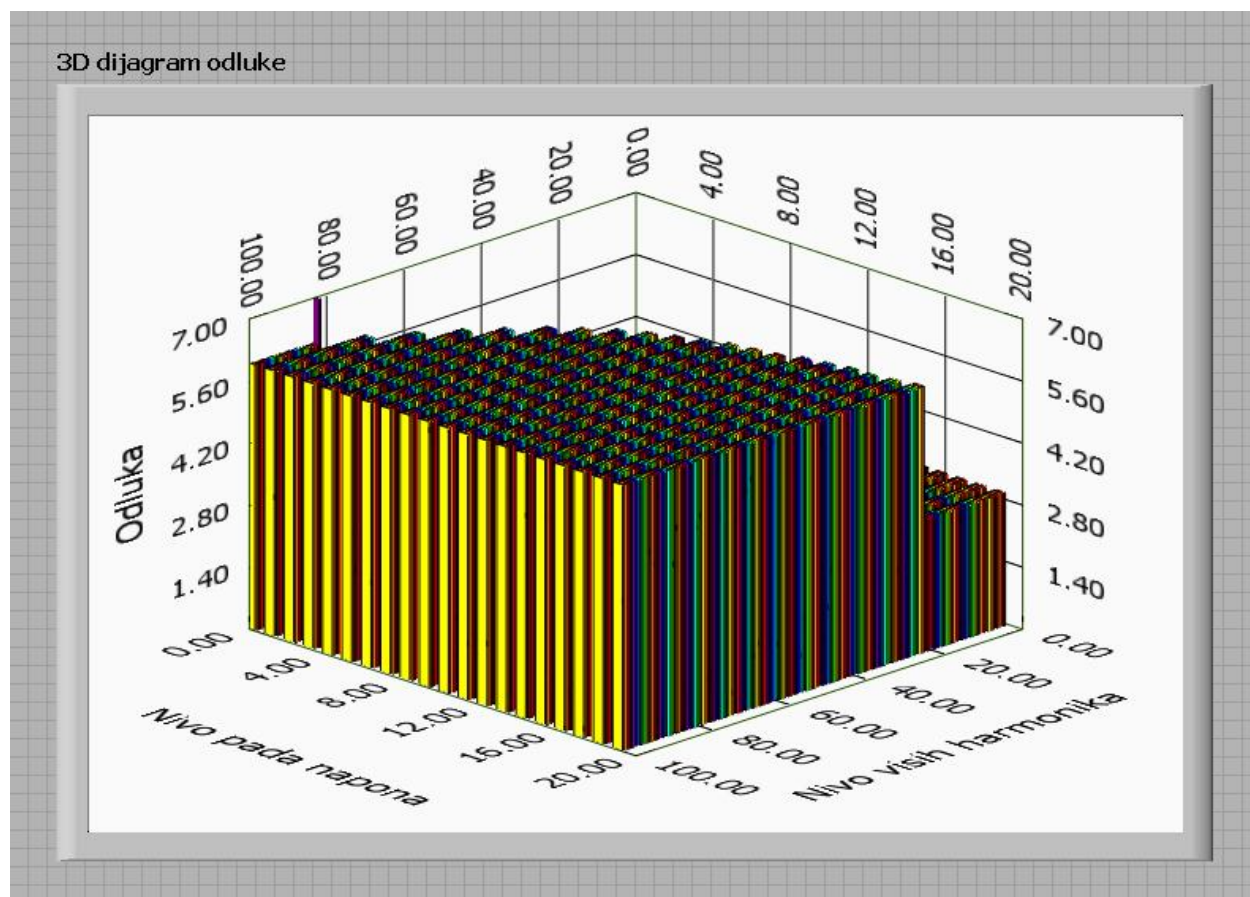
Dijagram odluke testiranog instrumenta o detektovanom tipu poremećaja kvaliteta signala može biti predstavljen i u 3D varijanti. U tom slučaju može se obezbediti kontinualna promena procentualnih nivoa dva poremećaja naponskog signala za testiranje, nezavisno jedan od drugog. Funkcionalni blok dijagram procedure testiranja instrumenta za detekciju poremećaja kvaliteta električne energije, za slučaj 3D grafičkog prikaza LabVIEW dijagrama odluke, predstavljen je na slici 6.56. Ovaj blok dijagram nešto je komplikovaniji od dijagrama prethodno prikazanog na slici 6.47., obzirom da sadrži dve programske petlje, kojima se mogu kontrolisati dva nezavisna poremećaja naponskog signala za testiranje. Na sledećim slikama ilustrovani su upravo neki od primera 3D grafičke prezentacije dijagrama odluke snimljenog u LabVIEW okruženju, za slučaj istovremene kontinualne promene procentualnih nivoa dva tipa poremećaja test signala. Na slici 6.57. ilustrovana je 3D grafička prezentacija dijagrama odluke pri kontinualnoj promeni nivoa pada napona u opsegu 0 – 20% i nivoa viših harmonika signala u opsegu 0 – 50%, dok je na slici 6.58. dat odgovarajući 3D grafički prikaz dijagrama odluke snimljen pri kontinualnoj promeni nivoa pada napona u opsegu 0 – 20% i pri promeni nivoa viših harmonika signala u opsegu 0 – 100%. Na X i Y osi prikazane su procentualne vrednosti nivoa poremećaja signala, odnosno viših



Slika 6.56. Funkcionalni blok dijagram procedure testiranja instrumenta za detekciju i klasifikaciju poremećaja kvaliteta sa 3D prikazom LabVIEW dijagrama odluke



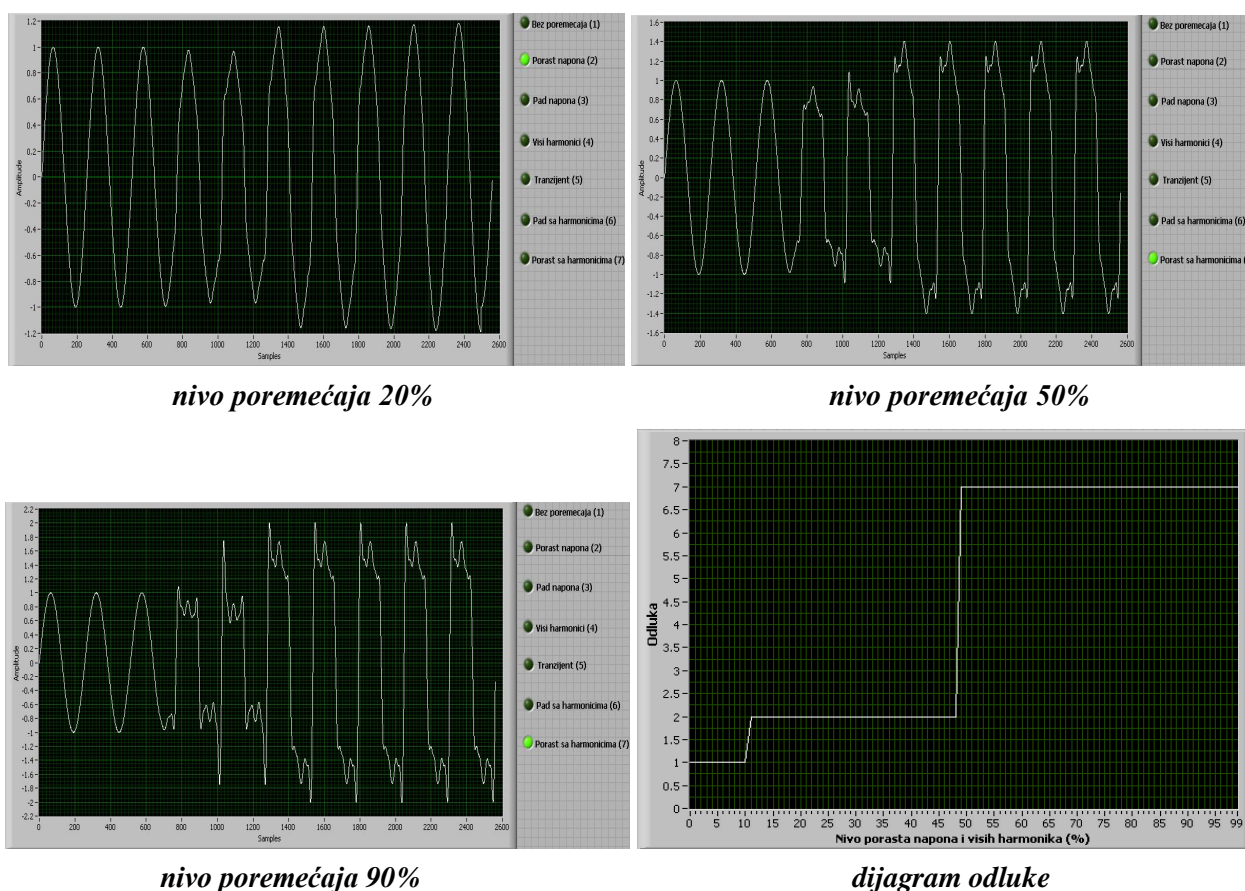
Slika 6.57. 3D prezentacija dijagrama odluke za slučaj kontinualne promene nivoa pada napona u opsegu 0 – 20% i viših harmonika u opsegu 0 – 50%



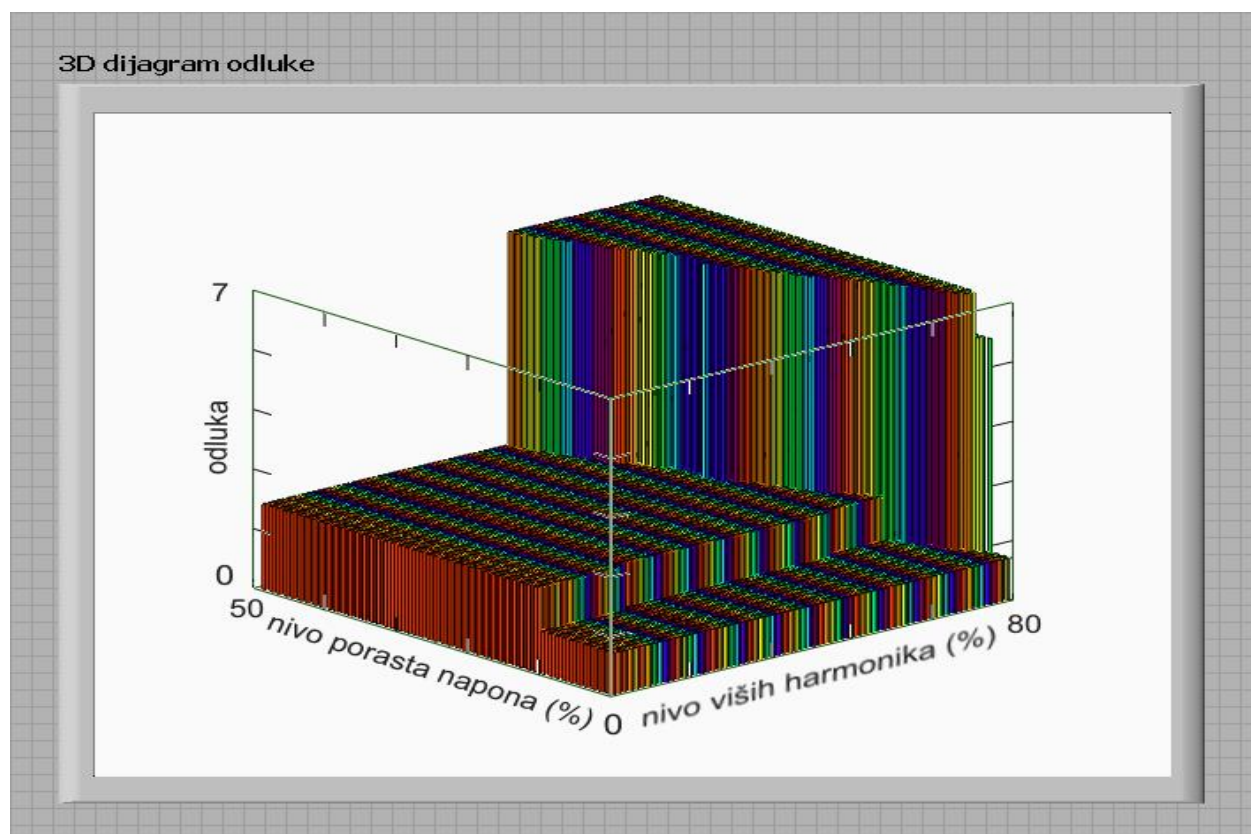
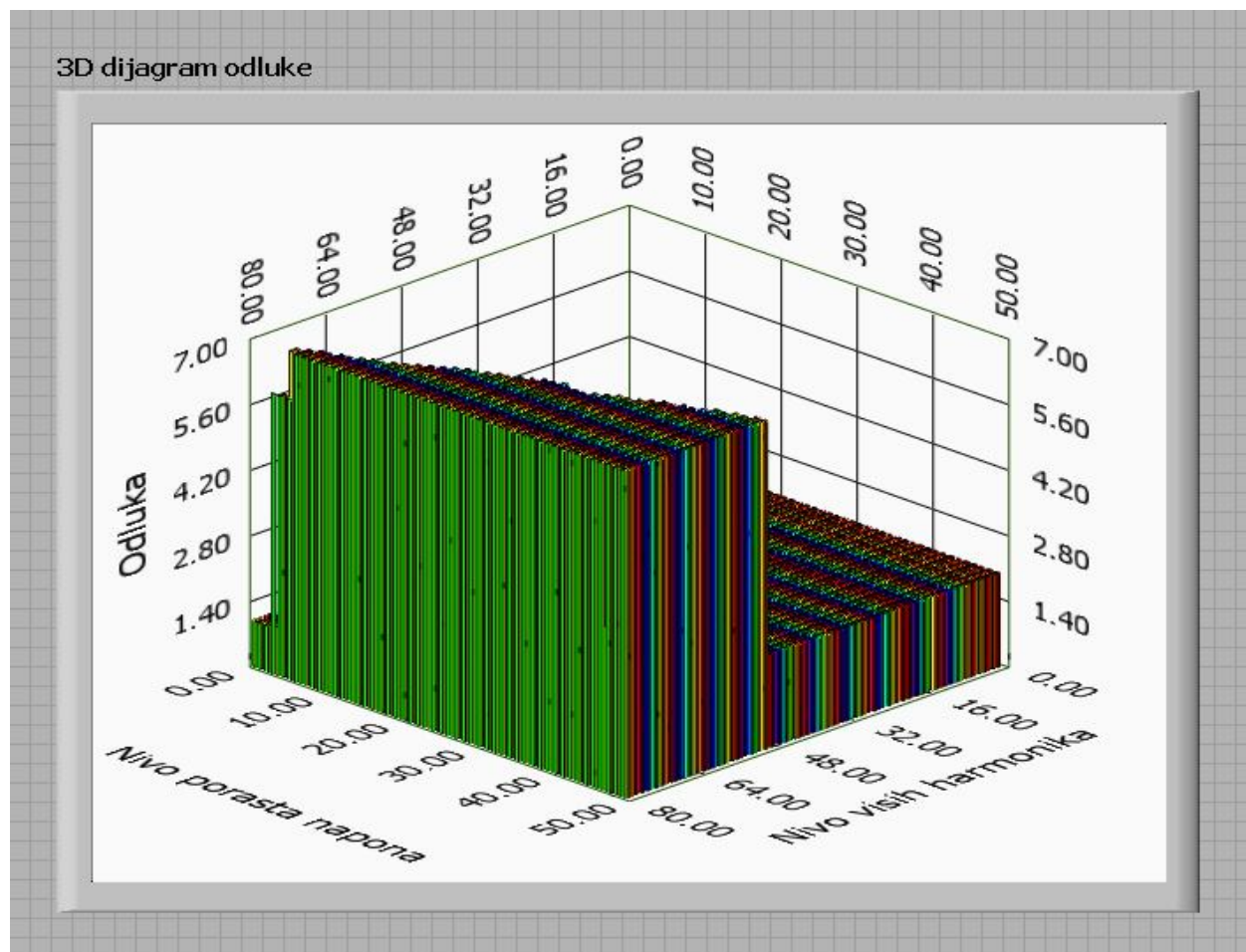
Slika 6.58. 3D prezentacija dijagrama odluke za slučaj kontinualne promene nivoa pada napona u opsegu 0 – 20% i viših harmonika u opsegu 0 – 100%

harmonika signala i pada napona, dok su vrednosti odluke testiranog instrumenta o detektovanom tipu poremećaja kvaliteta signala predstavljene na Z osi datih dijagrama. U cilju što bolje i jasnije preglednosti ovih 3D dijagrama na ovim slikama pored osnovnog prikaza date su i odgovarajuće prezentacije LabVIEW dijagrama odluke sa suprotne strane u odnosu na koordinate dijagrama.

Rezultati testiranja virtuelnog instrumenta za detekciju poremećaja kvaliteta primenom test signala sa kombinacijom istovremene kontinualne promene procentualnih nivoa porasta napona i pojedinih viših harmonika signala, prikazani su na slici 6.59. Dati talasni oblici signala ilustruju naponski test signal iz generatora poremećaja u zavisnosti od procentualnog nivoa poremećaja signala. Prikazani dijagram odluke o detektovanim poremećajima kvaliteta signala ne pokazuje neka veća odstupanja od očekivanih rezultata. Nakon početne detekcije signala bez poremećaja, virtuelni instrument sa Matlab analizatorom poremećaja kvaliteta u jednom intervalu detektuje samo pojavu porasta napona, a zatim pri daljem porastu nivoa poremećaja test signala konačno počinje da se detektuje i kombinacija ova dva poremećaja, odnosno dolazi do promene konačne odluke instrumenta za detekciju poremećaja na 7 – porast napona sa višim harmonicima signala. Na slici 6.60. ilustrovana je 3D grafička prezentacija LabVIEW dijagrama odluke instrumenta o detektovanim poremećajima kvaliteta, za istovremenu kontinualnu promenu procentualnog nivoa porasta napona u opsegu 0 – 50% i promenu nivoa viših harmonika signala u opsegu 0 – 80%.

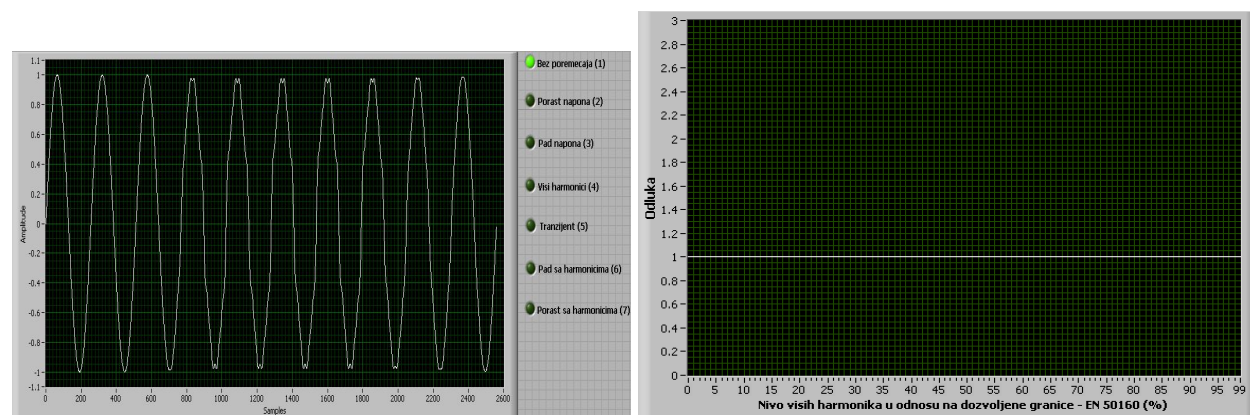
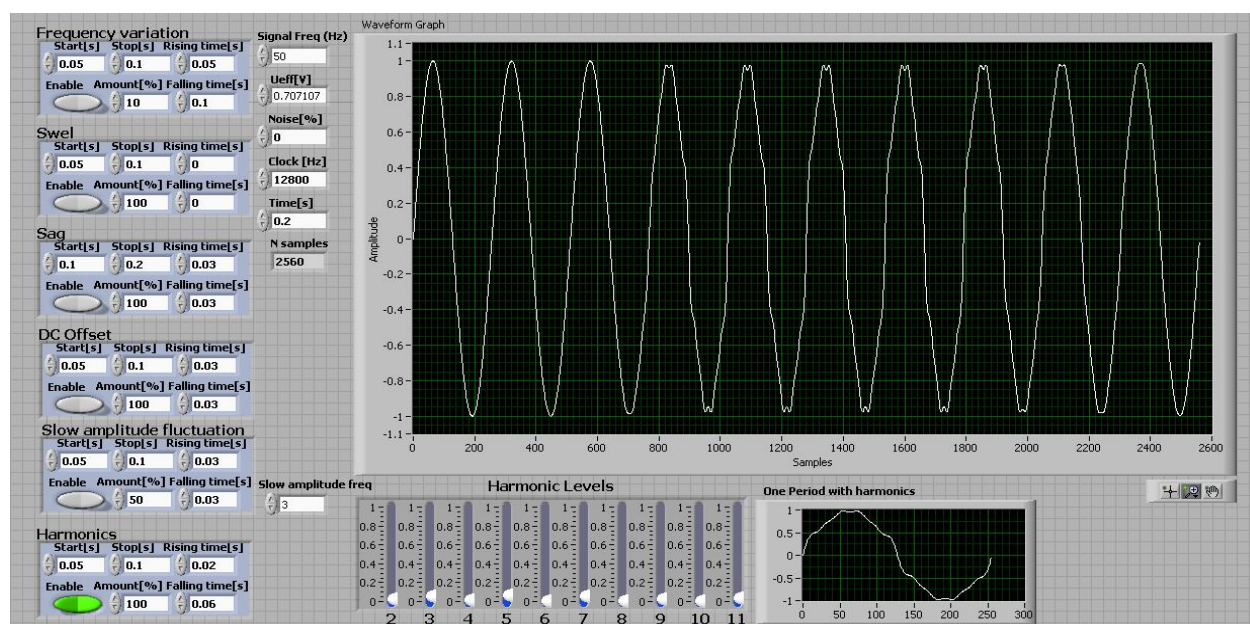


Slika 6.59. Prikaz test signala i dijagrama odluke za slučaj kontinualne promene procentualnog nivoa porasta napona i viših harmonika u opsegu 0 - 100%



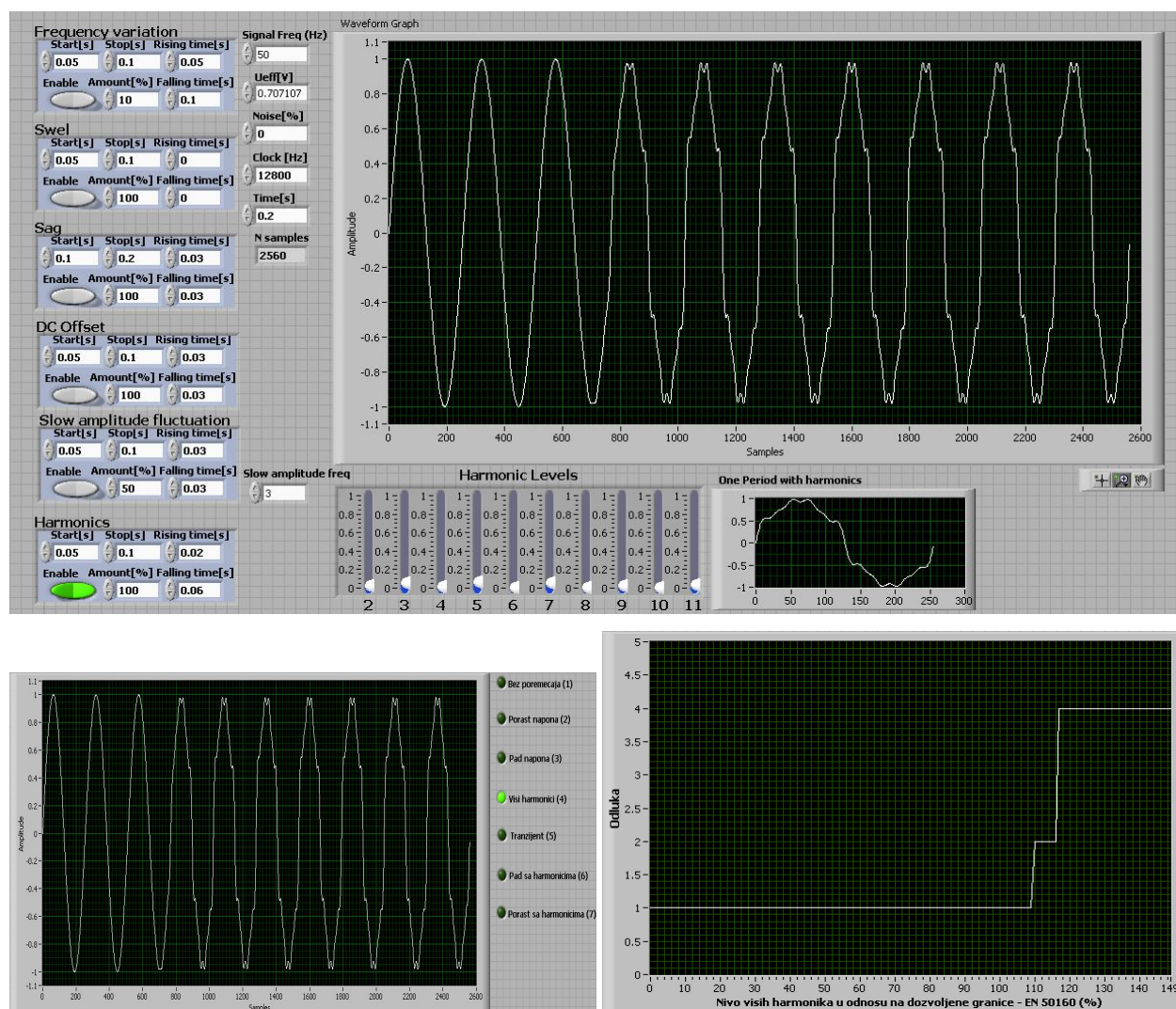
Slika 6.60. 3D prezentacija dijagrama odluke za slučaj kontinualne promene nivoa porasta napona u opsegu 0 – 50% i viših harmonika u opsegu 0 – 80%

Za realnu procenu karakteristika testiranog instrumenta za detekciju poremećaja kvaliteta posebno je značajna analiza rezultata testiranja dobijenih za slučaj parametara naponskih test signala definisanih prema zahtevima važećeg evropskog standarda za kvalitet električne energije EN 50160. U trećem poglavlju ove doktorske disertacije u tabeli 3.2. navedene su prihvatljive granične vrednosti pojedinačnih viših harmonika napona napajanja od 2. do 25. reda, propisane standardom EN 50160. Na slikama 6.61. i 6.62. prikazana su dva slučaja naponskih test signala i snimljenih dijagrama odluke testiranog instrumenta o detektovanim poremećajima, koji pokazuju uticaj pojedinačnih viših harmonika test signala definisanih u skladu sa graničnim vrednostima standarda EN 50160. Slika 6.61. prikazuje generisani test signal i dijagram odluke za kontinualnu promenu nivoa pojedinačnih viših harmonika test signala u opsegu 0 – 100% prema prihvatljivim graničnim vrednostima standarda EN 50160. Treba napomenuti da je na ovom prednjem panelu predstavljen upravo granični slučaj test signala kada sadržaj viših harmonika odgovara graničnim vrednostima standarda EN 50160. Dati dijagram odluke jasno pokazuje da za sve vrednosti viših harmonika test signala u granicama dozvoljenim standardom EN 50160 testirani instrument ne detektuje nijednu kategoriju poremećaja signala, pa je konačna odluka 1 – signal bez poremećaja.



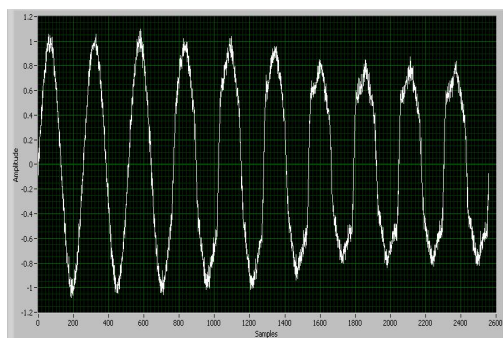
Slika 6.61. Prikaz test signala i dijagrama odluke za slučaj kontinualne promene nivoa viših harmonika (opseg 0 – 100 % u odnosu na granične vrednosti standarda EN 50160)

Slika 6.62. prikazuje generisani test signal i dijagram odluke za kontinualnu promenu nivoa pojedinačnih viših harmonika test signala u nešto širem opsegu 0 – 150% u odnosu na dozvoljene granične vrednosti propisane standardom EN 50160, pri čemu je ovde ilustrovan samo slučaj test signala za nivo viših harmonika od 150% u odnosu na prihvatljive granice definisane standardom EN 50160. Naravno, za nivo poremećaja test signala u opsegu 0 – 100% prikazani dijagram odluke identičan je kao i onaj u prethodnom slučaju, dat na slici 6.61., sa odlukom 1 – signal bez poremećaja. Sa povećanjem nivoa poremećaja iznad 100%, odnosno sa porastom sadržaja viših harmonika test signala iznad graničnih vrednosti propisanih standardom EN 50160, dolazi i do promene odluke instrumenta o detektovanom tipu poremećaja kvaliteta signala. Najpre, u jednom trenutku odluka o detekciji poremećaja menja se na 2 – porast napona, nakon čega se vrlo brzo odluka o detekciji poremećaja ponovo menja i konačno stabilizuje na 4 – viši harmonici signala.

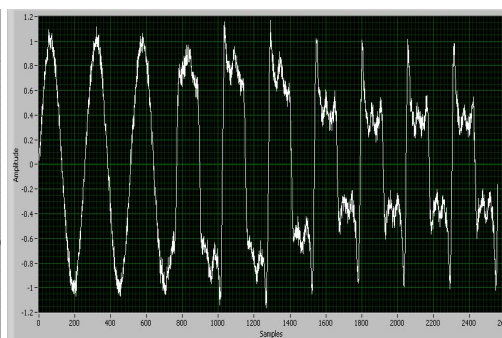


Slika 6.62. Prikaz test signala i dijagrama odluke za slučaj kontinualne promene nivoa viših harmonika (opseg 0 – 150 % u odnosu na granične vrednosti standarda EN 50160)

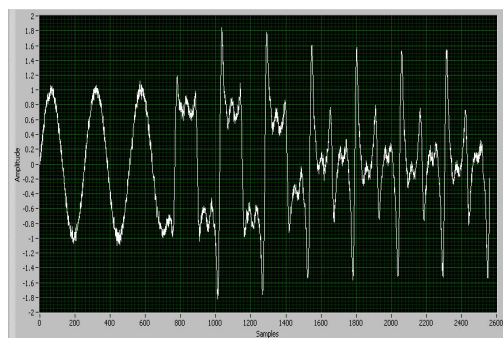
Sledeća dva primera naponskih signala za testiranje virtuelnog instrumenta za detekciju poremećaja kvaliteta koja su ovde predstavljena na slikama 6.63. i 6.64. uključuju kombinaciju pojave pada napona, viših harmonika signala i određenog nivoa Gausovog šuma superponiranog



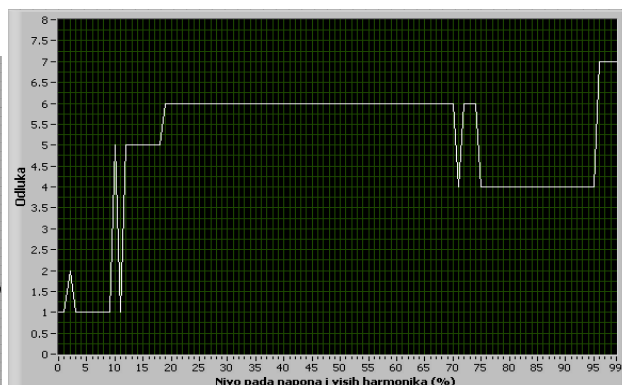
nivo poremećaja 20%



nivo poremećaja 50%

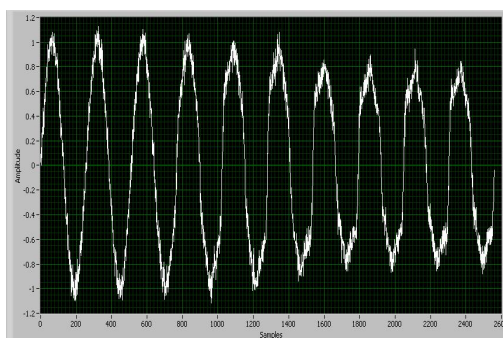


nivo poremećaja 90%

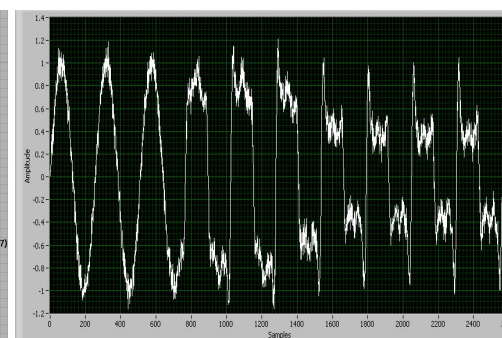


dijagram odluke

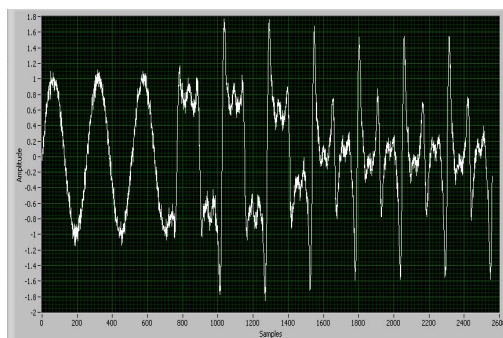
Slika 6.63. Prikaz test signala i dijagrama odluke za slučaj kontinualne promene nivoa pada napona i viših harmonika u opsegu 0 - 100%, za konstantni nivo šuma od 25%



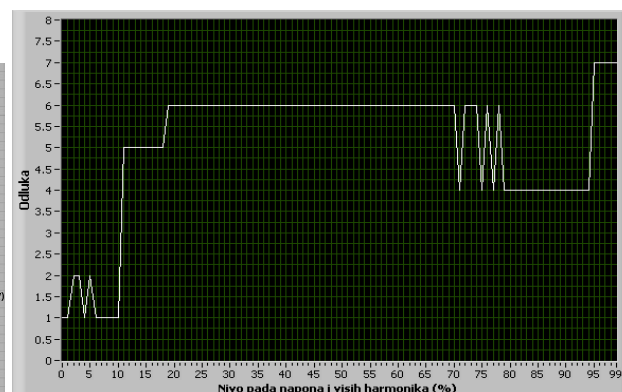
nivo poremećaja 20%



nivo poremećaja 50%

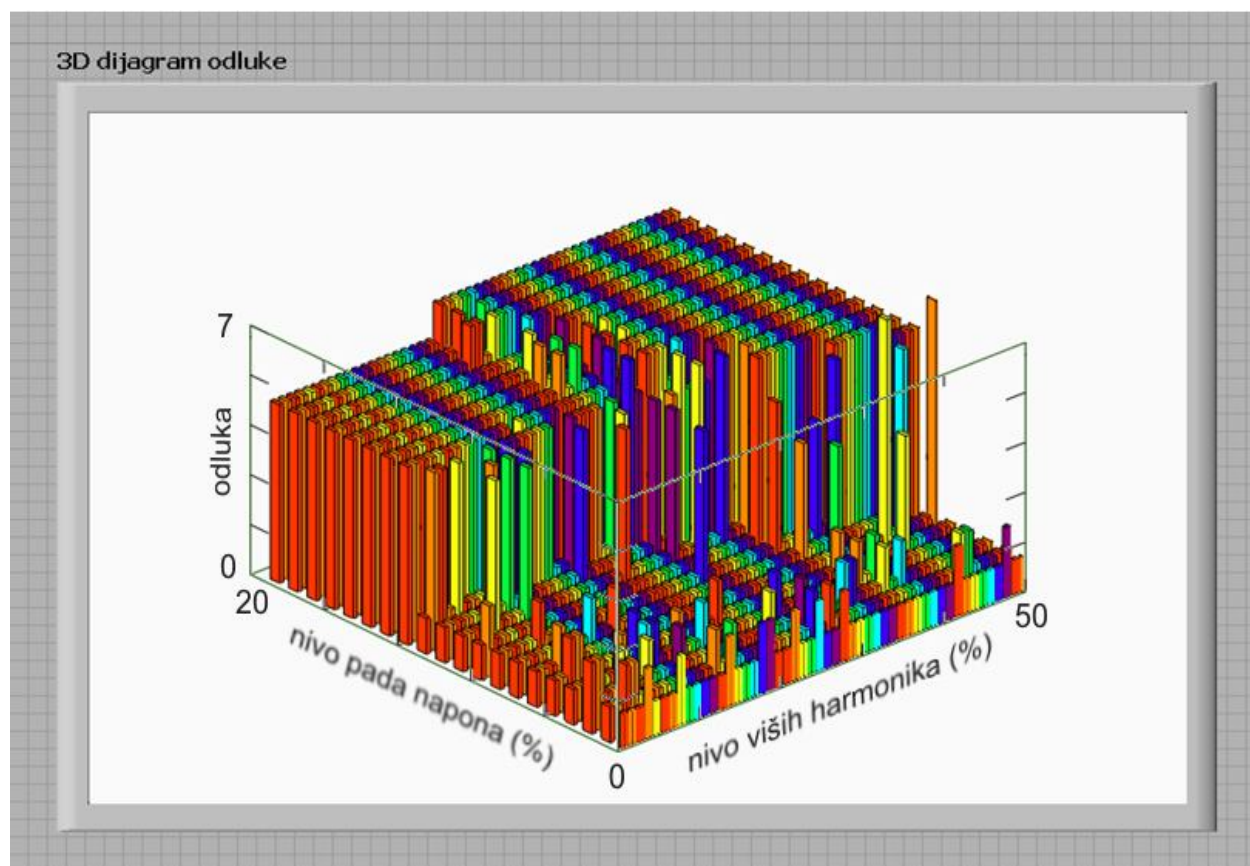
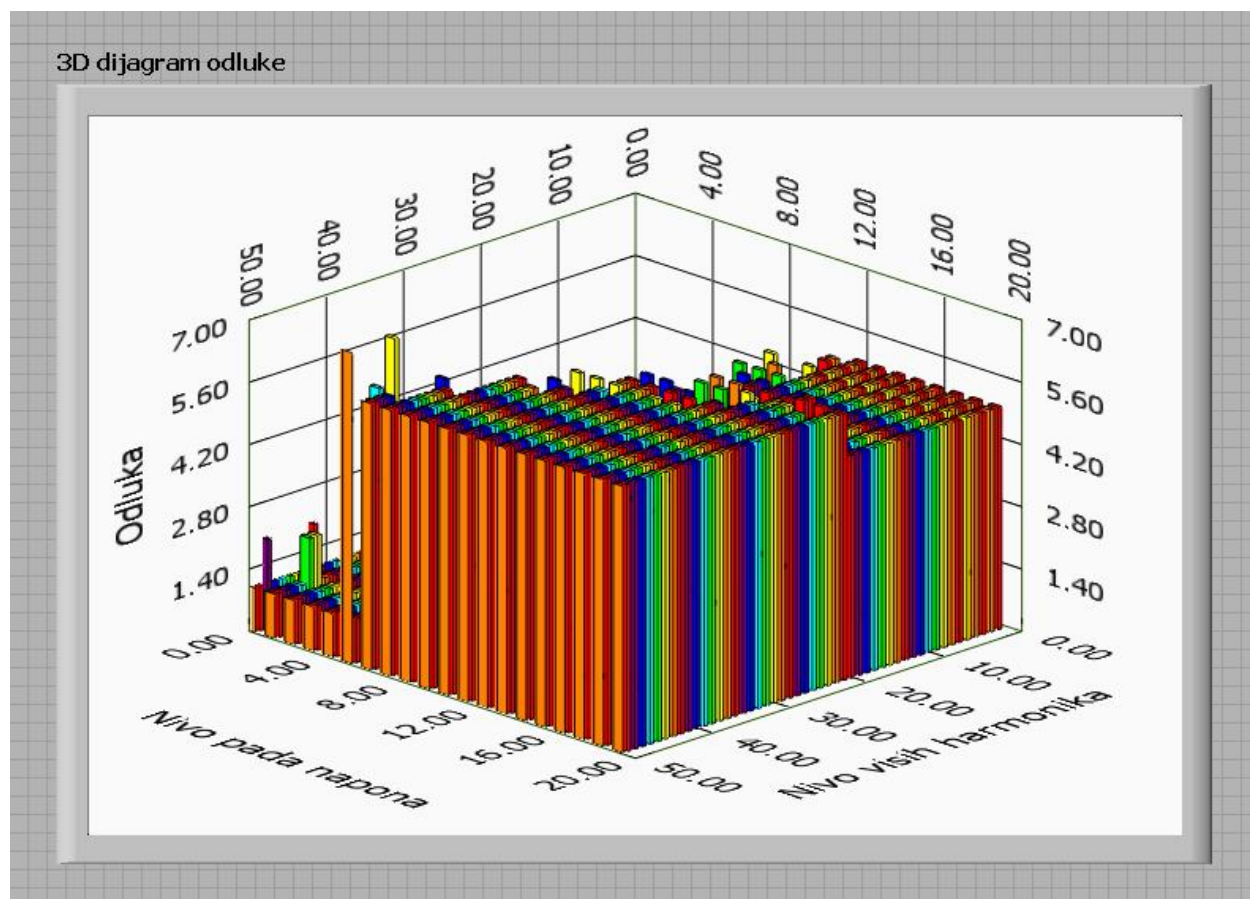


nivo poremećaja 90%



dijagram odluke

Slika 6.64. Prikaz test signala i dijagrama odluke za slučaj kontinualne promene nivoa pada napona i viših harmonika u opsegu 0 - 100%, za konstantni nivo šuma od 35%



Slika 6.65. 3D dijagram odluke za slučaj kontinualne promene nivoa pada napona u opsegu 0 – 20% i viših harmonika u opsegu 0 – 50%, za konstantni nivo šuma od 35%

korisnom naponskom signalu. Na ovim slikama prikazani su naponski test signali i LabVIEW dijagrami odluke o detektovanim poremećajima kvaliteta test signala za istovremenu kontinualnu promenu procentualnih nivoa pada napona i pojedinih viših harmonika signala u opsegu 0–100%, pri čemu nivo Gausovog šuma tokom celog procesa testiranja ima unapred definisanu konstantnu procentualnu vrednost. Definisani nivo Gausovog šuma naponskog test signala predstavljenog na slici 6.63. iznosi 25%, dok je za naponski test signal dat na slici 6.64. ta definisana procentualna vrednost nivoa šuma nešto veća i iznosi 35%. Dijagrami odluke testiranog virtuelnog instrumenta sa Matlab analizatorom za detekciju poremećaja kvaliteta signala, predstavljeni na ovim slikama, generalno su slični dijagramu odluke datom na slici 6.55., koji se odnosi na slučaj naponskog test signala sa padom napona i višim harmonicima signala bez prisustva šuma. Ipak, dijagrami odluke dati na slikama 6.63. i 6.64. su znatno kompleksniji i mogu se jasno uočiti neke karakteristične kritične tačke na ovim dijagramima, gde dolazi do višestrukih uzastopnih i vrlo brzih promena konačne odluke o detektovanom poremećaju, kao direktna posledica prisustva Gausovog šuma u test signalima. Što je veći procentualni nivo Gausovog šuma u naponskim test signalima, utoliko su i ove kritične tačke na dijagramu sa višestrukim promenama odluke o detekciji poremećaja kvaliteta signala izraženije, odnosno nesigurnost testiranog virtuelnog instrumenta pri donošenju konačne odluke o detektovanom tipu poremećaja kvaliteta signala je značajno veća.

Na slici 6.65. data je 3D grafička prezentacija LabVIEW dijagrama odluke o detektovanim poremećajima kvaliteta test signala, za slučaj istovremene kontinualne promene procentualnog nivoa pada napona u opsegu 0 – 20% i promene nivoa viših harmonika naponskog test signala u opsegu 0 – 50%, pri konstantnoj vrednosti procentualnog nivoa Gausovog šuma u test signalu od 35%. Treba ipak napomenuti da su realne vrednosti Gausovog šuma u distributivnim signalima uglavnom znatno manje od ovih konkretnih vrednosti definisanih za date primere test signala. Ove odabrane vrednosti šuma su prvenstveno ilustrativnog karaktera i pokazuju kakav je uticaj promene nivoa Gausovog šuma na degradaciju kvaliteta signala elektrodistributivnog sistema. Činjenica je da u određenim karakterističnim kritičnim tačkama na prikazanim dijagramima konačna odluka testiranog instrumenta o detektovanom tipu poremećaja kvaliteta test signala nije potpuno jednoznačna, što jasno ukazuje na određena objektivna ograničenja testiranog virtuelnog instrumenta, odnosno na neke nedostatke implementiranog rešenja softverski baziranog algoritma za detekciju i klasifikaciju standardnih poremećaja kvaliteta električne energije. Otklanjanje ovih nedostataka i ograničenja biće, između ostalog, u fokusu i nekih budućih istraživanja autora ove doktorske disertacije na polju merenja i analize osnovnih parametara kvaliteta električne energije.

7. ZAKLJUČAK

Pored problema koji se tiču obezbeđenja dostupnosti električne energije što većem broju potrošača, značajan segment kome se poslednjih godina posvećuje sve veća pažnja jeste i kvalitet električne energije koja se putem elektrodistributivne mreže isporučuje krajnjim potrošačima. Degradacija kvaliteta električne energije isporučene potrošačima direktno doprinosi smanjenju energetske efikasnosti proizvodnje, prenosa i potrošnje električne energije. U cilju obezbeđenja neophodnih uslova za kontinualno snabdevanje potrošača kvalitetnom električnom energijom potreban je konstantni monitoring procesa prenosa i potrošnje električne energije, uz primenu sofisticiranih uređaja i opreme za merenje osnovnih parametara i analizu tipičnih poremećaja kvaliteta električne energije. Pored detaljne analize osnovnih aspekata problematike metrološkog obezbeđenja optimalnog kvaliteta isporuke električne energije, u okviru ove doktorske disertacije poseban značaj dat je primeni virtuelne instrumentacije u procesu merenja kvaliteta električne energije, kao i za potrebe testiranja savremenih uređaja za merenje kvaliteta električne energije. Shodno tome, prikazano je rešenje akvizicionog sistema realizovanog za testiranje uređaja za merenje kvaliteta električne energije. Funkcionalna osnova prikazanog rešenja bazirana je na primeni LabVIEW grafičkog programskog paketa za razvoj virtuelne merne instrumentacije.

Najvažniji parametri i tipični poremećaji kvaliteta električne energije koje je moguće meriti i kontrolisati detaljno su analizirani u drugom poglavlju ove doktorske disertacije. Nivo kvaliteta električne energije isporučene potrošačima definisan je stepenom odstupanja izmerenih vrednosti osnovnih parametara kvaliteta u odnosu na referentne vrednosti propisane važećim standardima kvaliteta. Nominalne vrednosti parametara kvaliteta električne energije određene su na osnovu višegodišnjih iskustava i analiza rada elektrodistributivnih sistema u svetu, kao rezultat dogovora prestižnih organizacija koje se na međunarodnom planu bave standardizacijom u oblasti merenja kvaliteta električne energije. Povećanje energetske efikasnosti elektroenergetskog sistema Srbije zahteva modernizaciju uređaja i opreme za monitoring i analizu propisanih parametara kvaliteta, što mora biti praćeno i usklađivanjem nacionalnih propisa sa međunarodno važećim standardima za merenje kvaliteta električne energije. Osnovne odredbe važećeg evropskog standarda kvaliteta električne energije EN 50160, koji propisuje merenje parametara mrežnog napona na mestima predaje električne energije potrošačima, opisane su u trećem poglavlju ove doktorske disertacije.

Pouzdanе informacije o realnim vrednostima kvalitativnih parametara električne energije mogu se obezbediti isključivo primenom savremenih instrumenata i prateće akvizicione opreme za merenje kvaliteta električne energije. Problematika merenja propisanih parametara kvaliteta

električne energije, sa detaljnom analizom mogućnosti savremenih uređaja za merenje kvaliteta električne energije, analizirana je u četvrtom poglavlju ove disertacije. U skladu sa tim, u ovom delu opisane su osnovne funkcionalne karakteristike i dat je opširniji uporedni pregled nekoliko savremenih tipova uređaja za merenje parametara kvaliteta električne energije prestižnih svetskih proizvođača. Pored toga, kao primer realnih merenja parametara kvaliteta prikazani su i neki od rezultata merenja potrošnje električne energije na distributivnom transformatoru 10/0.4kV, snage 2000kVA, koji su dobijeni primenom uređaja za merenje kvaliteta električne energije Chauvin Arnoux C.A. 8334. Obzirom da se validne merne informacije o vrednostima parametara kvaliteta mogu obezbediti samo pod uslovom da su primenjeni merni instrumenti adekvatno testirani za ove namene, u petom poglavlju disertacije opisani su i neki od postupaka koji se primenjuju za testiranje instrumenata za merenje kvaliteta električne energije. Referentna merna sredstva danas su komercijalno raspoloživa u različitim varijantama, od manuelnih, delimično automatizovanih, do inteligentnih računarski podržanih instrumenata. Na tržištu su zastupljena i rešenja namenskih specijalno projektovanih kalibratora za testiranje poznatijih tipova uređaja za merenje parametara kvaliteta električne energije, kakva su rešenja multifunkcionalnih kalibratora Fluke 5520A-PQ i Fluke 6100B, koji su i detaljnije analizirani u petom poglavlju ove doktorske disertacije.

Procedura razvoja akvizicionog sistema namenjenog za testiranje instrumenata i opreme za merenje kvaliteta električne energije, kao najvažniji doprinos ove doktorske disertacije, opisana je u šestom poglavlju. Funkcionalna osnova prikazanog rešenja sistema za testiranje obezbedena je primenom LabVIEW softverskog paketa virtuelne instrumentacije, uz dve kartice za akviziciju podataka NI PCI 6713 i NI USB 9215A. Kompletan proces realizacije ovog sistema uključuje dva funkcionalno povezana segmenta. Prvi funkcionalni segment obuhvata realizaciju generatora standardima definisanih referentnih trofaznih signala, sa specijalnim funkcijama za simulaciju standardnih tipova poremećaja kvaliteta električne energije, dok drugi deo uključuje proceduru snimanja talasnih oblika naponskih i strujnih signala, uz prisustvo realnih poremećaja kvaliteta u trofaznom elektrodistributivnom sistemu. Generator naponskih signala sa poremećajima kvaliteta električne energije uključuje računar, D/A karticu za akviziciju podataka NI PCI 6713 sa blokom standardnog konektora SCB 68 i LabVIEW kontrolnu programsku aplikaciju. Proces generisanja signala obuhvata dva segmenta. U prvom segmentu se vrši definisanje i simulacija naponskih signala, sa izborom osnovnih parametara i konkretne klase poremećaja kvaliteta, što se obavlja softverski preko prednjeg panela i blok dijagrama LabVIEW aplikacije. Drugi funkcionalni segment procesa uključuje generisanje naponskih signala sa poremećajima kvaliteta u realnom vremenu, što se obavlja posredstvom tri analogna kanala na izlazu akvizicione D/A kartice NI PCI 6713. Ovo rešenje obezbeđuje generisanje signala sa osam tipičnih poremećaja kvaliteta električne energije definisanih evropskim standardom kvaliteta EN 50160. Ovi poremećaji koji se mogu pojaviti u realnim elektrodistributivnim sistemima su: spore promene napona napajanja, pojava previsokih napona, padovi napona, naponski tranzijenti, prekidi napajanja, viši harmonici signala, kao i kombinacija previsokih napona i padova napona sa višim harmonicima signala.

Procedura snimanja naponskih i strujnih signala trofazne distributivne mreže u prisustvu realnih poremećaja kvaliteta uključuje tri funkcionalna elementa: naponski i strujni senzorski blok za kondicioniranje signala, akvizicionu karticu NI USB 9215A i softversku aplikaciju u LabVIEW okruženju. Blok za kondicioniranje ulaznih signala, sa nominalnim slabljenjem od 100 puta, baziran je na primeni izolacionih pojačavača i Rogowski kalemova. Senzorski blok projektovan je u formi zajedničkog kućišta sa naponskim i strujnim ulazima. Osnovna funkcija ovog bloka je prilagođenje amplitudskih nivoa naponskih i strujnih signala analognim ulazima kartice NI USB 9215A. LabVIEW softver upravlja akvizicijom naponskih i strujnih signala, uključujući snimanje i prezentaciju talasnih oblika signala. Razvijena su dva segmenta virtuelnog instrumenta. Prvi segment obezbeđuje definisanje osnovnih parametara za akviziciju i snimanje signala, dok drugi omogućava prezentaciju memorisanih signala. Prednji panel za akviziciju i snimanje uključuje veći broj regulatora za podešavanje bitnih parametara, kao što su: frekvencija uzorkovanja signala, brzina uzorkovanja, broj uzoraka signala po jednom kanalu za očitavanje, vreme trajanja akvizicije, ukupni kapacitet bafera, vreme početka i kraja snimanja i destinacija datoteke za memorisanje signala. Snimanje realnih signala distributivne mreže obavljeno je na niskonaponskoj strani transformatorske stanice TS 10/0.4kV, smeštene unutar fabričkog pogona za proizvodnju grejnih tela. Na ovaj način obezbeđena je baza podataka velikog kapaciteta sa realnim signalima napona i struja snimljenim u prisustvu različitih tipova poremećaja kvaliteta.

Realizacijom prikazanog akvizicionog sistema za testiranje na bazi procedure generisanja i snimanja referentnih trofaznih signala, u prisustvu standardnih poremećaja kvaliteta električne energije, formirana je kompletna baza podataka referentnih naponskih i strujnih test signala. Rešenje programski podržanog generatora signala sa poremećajima kvaliteta primenjeno je u svrhe testiranja instrumenta za detekciju, analizu i klasifikaciju standardnih poremećaja kvaliteta električne energije. Ovaj instrument razvijen je tako da ima mogućnost detekcije šest standardnih tipova poremećaja kvaliteta električne energije: porast napona, padove napona, više harmonike signala, naponske tranzijente, kombinacije porasta napona sa višim harmonicima signala, kao i padova napona sa višim harmonicima signala. Procedura testiranja, obavljena u cilju provere i verifikacije osnovnih performansi ovog instrumenta, prikazana je u šestom poglavlju doktorske disertacije. Softverski algoritam za detekciju poremećaja kvaliteta električne energije, primenjen kao osnova za realizaciju ovog instrumenta, realizovan je u Matlab programskom okruženju, dok je procedura testiranja obavljena u LabVIEW programskom okruženju, koje obezbeđuje grafičku prezentaciju i analizu rezultata dobijenih pri testiranju. Proces testiranja baziran je na pozivanju generatora standardnih poremećaja kvaliteta električne energije, kao posebne potprogramske sekvence u okviru glavnog LabVIEW programa koji kontroliše kompletnu proceduru testiranja.

Osnovna i vrlo značajna prednost ovog sistema za testiranje u poređenju sa drugim sličnim rešenjima ovog tipa jeste visok stepen funkcionalne fleksibilnosti, što daje mogućnost korisniku sistema da, čak i prilikom samog procesa testiranja, softverskim putem vrlo jednostavno menja i koriguje osnovne parametre generisanih test signala ili režim kompletne procedure testiranja, sve

u skladu sa specifičnim potrebama i zahtevima. U poređenju sa postojećim poprilično skupim varijantama kalibratora, namenski projektovanih za testiranje instrumenata za merenje kvaliteta električne energije, prikazano rešenje akvizicionog sistema za testiranje predstavlja znatno jeftiniju alternativu. Osnovni nedostatak jednog ovakvog rešenja sistema za testiranje u odnosu na standardne tipove multifunkcionalnih kalibracionih uređaja ove namene jeste nešto skromnija funkcionalnost. Buduće aktivnosti i istraživanja autora ove doktorske disertacije biće, između ostalog, usmerena i na otklanjanje ovih osnovnih nedostataka i ograničenja, u cilju poboljšanja prikazanog rešenja sistema za testiranje uređaja za merenje kvaliteta električne energije. Treba napomenuti i da realizacija prikazanog rešenja sistema za testiranje predstavlja samo jedan od segmenata u razvoju kompletnog instrumenta za merenje kvaliteta električne energije na bazi DSP procesora, na čemu će intenzivnije biti usmerena buduća istraživanja u ovoj oblasti. Ovaj instrument treba da obezbedi merenje i analizu standardnih poremećaja kvaliteta električne energije, sa posebnim akcentom na analizu uticaja harmonijskih izobličenja signala distributivne mreže na kvalitet isporučene električne energije. Testiranje i kompletna metrološka verifikacija ovog instrumenta za merenje i analizu standardnih poremećaja kvaliteta električne energije biće obavljani primenom rešenja sistema za testiranje koje je prikazano u ovoj doktorskoj disertaciji.

LITERATURA

- [1] E. F. Fuchs, M.A.S. Masoum, "Power Quality in Power Systems and Electrical Machines", Academic Press, USA, February 2008.
- [2] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, H. W. Beaty, "Electrical Power Systems Quality, Second Edition", McGraw-Hill, 2003.
- [3] C. Sankaran, "Power Quality", CRC Press LLC, New York, 2002.
- [4] D. Chapman, "Power Quality Application Guide - Introduction to Power Quality", Copper Development Association, London, UK, March, 2001.
- [5] M. Simić, D. Denić, D. Živanović, D. Taskovski, V. Dimcev, "Development of a Data Acquisition System for the Testing and Verification of Electrical Power Quality Meters," JPE – Journal of Power Electronics, Republic of Korea, Vol. 12, No. 5, pp. 813-820, September 2012, http://www.jpe.or.kr/archives/view_articles.asp?seq=678.
- [6] National Instruments, "LabVIEW User Manual", NI Corporation, 2012 (www.ni.com).
- [7] H. Markiewicz, A. Klajn, "Power Quality Application Guide - Voltage Disturbances, Standard EN 50160, Voltage Characteristics in Public Distribution Systems", Wrocław University of Technology, July 2004.
- [8] Siemens, "Power Quality Meters and EN50160 Power Quality Standard", Siemens, 2003.
- [9] Reo, "Standard EN 50160:2000 Voltage Characteristics of Electricity Supplied by the Public Distribution Systems", Reo, UK (www.reo.co.uk).
- [10] Institution of Engineering and Technology, "IET Guidance Document on Electromagnetic Compatibility and Functional Safety, Power quality Annex B1", 2006 (www.theiet.org).
- [11] PSL, "IEC Power Quality Standards", Power Standards Lab (www.powerstandards.com).
- [12] M. McGranaghan, "Roadmap for PQ Standards Development with IEEE/IEC Coordination", EPRI Solutions, Dallas, Texas, USA, May, 2006.
- [13] IEEE, "IEEE Power Quality Standards", IEEE PES Power Quality Subcommittee.
- [14] T. Hoevenaars, K. LeDoux, M. Colosino, "Interpreting IEEE Std 519 and Meeting its Harmonic Limits in VFD Applications", IEEE material, Paper no. PCIC-2003-15.
- [15] S. Halpin, R. Burch, "Harmonic Limit Compliance Evaluations Using IEEE 519-1992", Mississippi State University, Starkville, USA, 2002.
- [16] M. Romero, R. Pardo, L. Gallego, "Developing a PQ Monitoring System for Assessing Power Quality and Critical Areas Detection", Revista Ingeniería e Investigación, Vol. 31, No. 2, pp. 102-109, 2011.

- [17] L. F. Auler, R. D'Amore, "Power Quality Monitoring Controlled through Low-Cost Modules," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 58, No. 3, pp. 557–562, 2009.
- [18] D. Gallo, C. Landi, N. Rignano, "Real-time Digital Multifunction Instrument for Power Quality Integrated Indexes Measurement," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 57, No. 12, pp. 2769–2776, 2008.
- [19] B. D'Apice, C. Landi, A. Pelvio, N. Rignano, "A Multi-DSP Based Instrument for Real-Time Energy and PQ Measurements", *Metrology and Measurement Systems*, Vol. 14, No. 4, pp. 495–506, 2007.
- [20] P.G.V. Axelberg, "A Quality Information System based on Distributed Data Acquisition", *Electrical Power Quality and Utilisation Magazine*, Vol. 1, No. 2, pp. 47-54, 2005.
- [21] G. Bucci, E. Fiorucci, C. Landi "Digital Measurement Station for Power Quality Analysis in Distributed Environment ", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 52, No. 1, pp. 75-84, 2003.
- [22] L. Cristaldi, A. Ferrero, S. Salicone, "A Distributed System for Electric Power Quality Measurement", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 51, No. 4, pp. 776-781, 2002.
- [23] C. Melhorn, M. McGranaghan, "Interpretation and Analysis of Power Quality Measurements", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Volume 31, Issue 6, pp. 1363-1370, 1995.
- [24] LEM, "Power Quality Measurement – more important than ever", LEM NORMA GmbH, Campus 21, A-2345 Brunn am gebirge, Austria, 2005 (www.lem.com).
- [25] LEM, "QWAVE Power Network Analyser - specifications", LEM NORMA GmbH, Campus 21, A-2345 Brunn am gebirge, Austria, 2005 (www.lem.com).
- [26] Fluke, "Fluke 430 Series Three Phase Power Quality Analyzers – technical data", Fluke Corporation, Test Equipment Depot, Melrose, USA, 2007 (www.fluke.com).
- [27] C.A., "C.A. 8332/34 Three Phase Power Quality Analyzers - specifications", Chauvin Arnoux Group, Paris, France, 2006 (www.chauvin-arnoux.com).
- [28] M. Simić, "Metrološko obezbeđenje merila kvaliteta električne energije", Magistarska teza, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet u Nišu, jul 2008.
- [29] Fluke, "5520A-PQ Power Quality Option for the 5520A Calibrator – technical data", Fluke Corporation, Test Equipment Depot, Melrose, USA, 2007 (www.fluke.com).
- [30] Fluke, "The Fluke 6100B Electrical Power Standard – User Manual and Specifications", Fluke Corporation, USA, 2011 (www.fluke.com).
- [31] R. Kuntner, "Testing Power Quality Meters using a CMC Test Set", *Omicron Electronics - International Protection Testing Symposium*, 2007.
- [32] A. D. Femine, D. Gallo, C. Landi, M. Luiso, "Advanced Instrument For Field Calibration of Electrical Energy Meters", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 58, No. 3, pp. 618–625, 2009.

- [33] A. Ferrero, M. Lazzaroni, S. Salicone, "A Calibration Procedure for a Digital Instrument for Power Quality Measurement", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 51, No. 4, pp. 716–722, 2002.
- [34] J. R. Macedo, I. N. Gondim, J. A. F. Barbosa, C. E. Tavares, A. J. P. Rosentino, "Practical Aspects of Performance Tests on Power Quality Analyzers", *International Conference on Renewable Energies and Power Quality - ICREPQ'12*, Spain, March 2012.
- [35] G. Daniel, C. Mircea, C. Andrei, V. Razvan, "Virtual Instrument for Power Quality Assessment", *Journal of Sustainable Energy*, Vol. 3, No. 1, pp. 6-12, March 2012.
- [36] R. Rajkumar, N. Senthilnathan, T. Manigandan, "Virtual Power Quality Monitoring using Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench", *International Conference on Computing and Control Engineering ICCCE 2012*, 12 - 13 April 2012.
- [37] J. Barros, M. de Apraiz, R. I. Diego, "A Virtual Measurement Instrument for Electrical Power Quality Analysis using Wavelets", *Measurement*, No. 42, pp. 298-307, 2009.
- [38] V. Smieško, K. Kovač, "Virtual Instrumentation and Distributed Measurement Systems", *Journal of Electrical Engineering*, Vol. 55, No. 1-2, pp. 50-56, 2004.
- [39] S. Tumanski, "Principles of Electrical Measurements, Chapter 6. Computer Measuring Systems, Virtual Measuring Systems", pp.426-456, Taylor & Francis Group, January 2006.
- [40] V. Dimcev, Z. Kokolanski, M. Srbinovska, D. Denić, M. Simić, "Low Cost Virtual Flickermeter", *Proceedings of IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference I2MTC 2012*, pp. 2764-2769, Graz, Austria, 13–16 May 2012.
- [41] P. Bilik, J. Zidek, D. Kaminsky, J. Hula, M. Starzyk, "Internet-Ready Power Network Analyzer for Power Quality Measurements and Monitoring", *ELCOM, a.s. Division of Virtual Instrumentation, PC-based instruments group*, Prague, Czech Republic, 2004.
- [42] *ELCOM, "BK-ELCOM Power Quality Network Analyzer", ELCOM a.s, Division of Virtual Instrumentation, PC-based instruments group*, Prague, Czech Republic, 2004.
- [43] Z. Ming, L. Kaicheng, H. Yisheng, "DSP-FPGA Based Real-time Power Quality Disturbances Classifier", *Metrology and Measurement Systems*, Vol. XVII, No. 2, pp. 205-216, 2010.
- [44] H. He, Q. Wang, M. He, "Design of Power Quality Monitoring System Based on DSP", *Proceedings on Second International Symposium on Computational Intelligence and Design ISCID 2009*, pp. 345-348, China, December 2009.
- [45] T. Radil, P. M. Ramos, F. M. Janeiro, A. Cruz Serra, "PQ Monitoring System for Real-Time Detection and Classification of Disturbances in a Single-Phase Power System", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 57, No. 8, pp. 1725 - 1733, 2008.
- [46] M. E. Salem, A. Mohamed, S. A. Samad, "Power Quality Disturbance Detection using DSP based Continuous Wavelet Transform", *Journal of Applied Sciences*, Vol. 7, No. 6, pp. 893-902, 2007.

- [47] P. M. Ramos, T. Radil, F. M. Janeiro, A. Cruz Serra, "DSP Based Power Quality Analyzer using New Signal Processing Algorithms for Detection and Classification of Disturbances in a Single-phase Power System", 15th IMEKO Symposium on Novelties in Electrical Measurements and Instrumentation, Iasi, Romania, September, 2007.
- [48] C. Gherasim, J. Van den Keybus, J. Driesen, R. Belmans, "DSP Implementation of Power Measurements According to the IEEE Trial-Use Standard 1459", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 53, No. 4, pp. 1086–1092, 2004.
- [49] M.A. Salam, "Power Quality Disturbances in a Test Distribution System: An Overview", Journal of Applied Sciences Research, 9(1), pp. 560–566, 2013.
- [50] A. Teke, M. E. Meral, M. Tumay, M. U. Cuma, "A Practical Disturbance Generator to Test Performances of Various Power Quality Mitigation Devices", Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, Vol. 21, pp. 38–54, 2013.
- [51] T. Lachman, A. P. Memon, T. R. Mohamad, Z. A. Memon, "Detection of Power Quality Disturbances using Wavelet Transform Technique", International Journal for the Advancement of Science & Arts, Vol. 1, No. 1, pp. 1-13, 2010.
- [52] A. Teke, M. E. Meral, M. Tumay, "Evaluation of Available Power Quality Disturbance Generators for Testing of Power Quality Mitigation Devices", International Journal on Sciences and Techniques of Automatic Control & Computer engineering, IJ-STA, Special Issue on Control and Electrical Machines, Vol. 2, pp. 624-635, December 2008.
- [53] M. Singh, V. Tiwari, R. Jhapte, "Modeling Analysis and Solution of Power Quality Problems", 8 IEEEIC International Conference on Environment and Electrical Engineering, pp.164-169, Karpacz, Poland, May 2009.
- [54] G. Gasparese, "Virtual Instrument for Generation of Disturbances which Affect Power Quality", International Conference on Electromechanical and Power Systems, Moldova, October 2007.
- [55] I. Monedero, C. Leon, J. Roperio, J.L. de la Vega, J.C. Montano, J.M.Elena, "A System for the Generation and Detection of Electrical Disturbances", Fourth IASTED International Conference on Power and Energy Systems, Rhodes, Greece, June 2004.
- [56] F. Magnago, C. Reineri, S. Lovera, R. Lima, E. Belenguer, "Modelling and Simulation Tool for the Analysis of Electric Power Quality Issues", International Conference on Renewable Energies and Power Quality - ICREPQ'03, Vigo, Spain, April 2003.
- [57] "Council Directive 85/374/EEC of 25 July 1985 on the Approximation of the Laws, Regulations and Administrative Provisions of the Member States Concerning Liability for Defective Products", Official Journal No L. 210 , 07/08/1985, pp.29-33.
- [58] Ž. Novinc, "Kvaliteta električne energije - priručnik", Elektrotehnički fakultet Osijek, 2003.
- [59] M. Lasić, "Kvaliteta električne energije i negativno povratno djelovanje trošila na mrežu", Končar – Institut za elektrotehniku d.d, FER Zagreb, Hrvatska, 2006.
- [60] J.F.G. Cobben, J.F.L. van Casteren, "Classification Methodologies for Power Quality", Eindhoven University of Technology, Eindhoven, Holland, February 2006.

- [61] T. A. Short, "Electric Power Distribution Handbook", CRC Press LLC, New York, 2004.
- [62] IEC, "IEC 61000-4-15 Electromagnetic Compatibility - Part 4: Testing and Measurement Techniques - Section 15: Flickermeter - Functional and Design Specifications", 2003.
- [63] W. Mack Grady, R. Gilleskie, "Harmonics and how they relate to power factor", Proc. of the EPRI Power Quality Issues & Opportunities Conference, San Diego, November 1993.
- [64] S. V. Mijailović, D. P. Popović, N. B. Stefanović "Kreiranje tržišta električne energije u jugoistočnoj Evropi", Časopis Elektroprivreda, Broj 4, Novembar - Decembar, 2004.
- [65] J. Nahman, D. Perić, D. Salamon, I. Vlajić-Naumovska, "Štete potrošača u gradskim distributivnim mrežama usled prekida napajanja električnom energijom", Časopis Elektroprivreda, Broj 3, Jul - Septembar, Beograd, Srbija, 2006.
- [66] CA, "DATAVIEWER Pro the PC Processing Software Manual", Chauvin Arnoux Group, Paris, France, 2006 (www.chauvin-arnoux.com).
- [67] ISO, BIPM, IEC, IFCC, IUPAC, IUPAP, OIML, "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement", International Organization for Standardization, Geneva, 1993.
- [68] NIST, "Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results", National Institute of Standards and Technology, Technical note 1297, USA, 1994.
- [69] MIT, "Simple Linear Regression and Method of the Least Squares", Lecture 29, Open Course Ware, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, USA, 2006.
- [70] B. Dimitrijević, M. Simić, "Procedura daljinski upravljane kalibracije analizatora kvaliteta električne energije", Zbornik radova 52. konferencije za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nukleranu tehniku ETRAN 2008, ML 2.4, Palić, Srbija, jun 2008.
- [71] B. Dimitrijević, M. Simić, D. Kovačević, "Remote Providing Traceability of the Power Quality Meters", International Symposium on Power Electronics Ee 2007, Conference Proceedings on CD, pp.1-4, Novi Sad, Serbia, 7-9 November 2007.
- [72] R.A.Dudley, N.M.Ridler, "Internet Calibration Direct to National Measurement Standards for Automatic Network Analysers", IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Budapest, Hungary, pp. 255-258, May 21-23, 2001.
- [73] M. Jurčević, R. Malarić, M. Boršić, "Internet-Enabled Calibration Services: Aspects of Laboratory Information System Security", IMTC 2006 – Instrumentation and Measurement Technology Conference, pp. 1570-1574, Sorrento, Italy, April 2006.
- [74] R. Arsenau, P. Filipski, "An Efficient Test Method for Harmonic Measurement Equipment", NRC - National Research Council of Canada, Ottawa, Ontario, Canada, 1998.
- [75] R. Arsenau, P. Filipski, "A Calibration System for Evaluating the Performance of Harmonic Power Analyzers", IEEE Transactions Power Delivery, Vol. 10, No. 3, pp.1177-1182, 1995.
- [76] D. Denić, I. Ranđelović, D. Živanović, "Računarski merno-informacioni sistemi u industriji, Deseta glava: Virtuelna instrumentacija", Elektronski fakultet, Niš, Srbija, 2005.
- [77] J. Travis, J. Kring, "LabVIEW for Everyone Graphical Programming Made Easy and Fun", Third Edition, Prentice Hall PTR, New Jersey, USA, July 27, 2006.

- [78] M. Simić, D. Kovačević, B. Dimitrijević, "LabVIEW Software Processing of the Power Quality Parameter Measuring Results", Proceedings of Twelfth International Conference ELMA 2008, Vol. 1, pp. 186-190, Sofia, Bulgaria, 16-18 October 2008.
- [79] B. Dimitrijević, M. Simić, "Metrological Support of the Distributed Power Quality Monitoring", XLII International Scientific Conference ICEST 2007, Conference Proceedings, Vol. 1, pp. 97-100, 24 - 27 June 2007, Ohrid, Macedonia.
- [80] M. Simić, B. Dimitrijević, "Distribuirani merno-informacioni sistem za analizu i kontrolu parametara kvaliteta električne energije", Zbornik radova sa 51. konferencije ETRAN 2007, Broj rada ML 2.3. Herceg Novi, Crna Gora, 4-8. juna 2007.
- [81] B. Dimitrijević, M. Simić, "Primena virtuelne instrumentacije za analizu rezultata merenja parametara kvaliteta električne energije", Zbornik radova sa Kongresa metrologa 2007, str. 223-230, Zlatibor, Srbija, 26-28 septembra 2007.
- [82] M. Simić, B. Dimitrijević, "Virtual Instrumentation Software applied to Calibration Procedure for Power Quality Meters", XLIII International Scientific Conference ICEST 2008, Vol. 2, pp. 633-636, Niš, Serbia, 25-27 June 2008.
- [83] M. Simić, B. Dimitrijević, D. Kovačević, "Metrološko obezbeđenje analizatora kvaliteta električne energije primenom softvera virtuelne instrumentacije", Zbornik radova sa VII Simpozijuma Industrijska elektronika INDEL 2008, str. 120-123, Banja Luka, Republika Srpska, BIH, 7-8. novembra 2008.
- [84] B. Dimitrijević, M. Simić, "Calibration of the Power Quality Analyzer based on Virtual Instrumentation", National Conference with International Participation ETAI 2007, Proceedings on CD, Paper No. E2-6, Ohrid, Macedonia, 19 – 21 September 2007.
- [85] B. Dimitrijević, M. Simić, "Remote Wireless Calibration of Equipment in the Distributed Measurement Systems", 8th International Conference TELSIKS 2007, Vol. 2, pp. 479-482, Faculty of Electronic Engineering, Niš, Serbia, 26-28 September 2007.
- [86] M. Simić, D. Denić, D. Živanović, G. Miljković, "Software Controlled Procedure for Verification of the Voltage Measuring Transformer Accuracy", 10th International Scientific Conference UNITECH 2010, Vol. 2, pp.427-430, Gabrovo, Bulgaria, November 2010.
- [87] M. Simić, B. Dimitrijević, "Procedure for Verification of Measuring Transformer Accuracy based on LabVIEW Software", Proceedings of the XLV International Scientific Conference ICEST 2010, Vol. 1, pp. 413-416, Ohrid, Macedonia, 23 – 26 June 2010.
- [88] M. Simić, B. Dimitrijević, "Voltage Transformer Checking Procedure based on the Virtual Instrumentation Software", 15th International Symposium on Power Electronics Ee 2009 Proceedings on CD, Paper No. T3-1.2, Novi Sad, Serbia, 28 – 30 October 2009.
- [89] M. Simić, B. Dimitrijević, "Procedura ispitivanja naponskih transformatora primenom softvera virtuelne merne instrumentacije", Zbornik radova Kongresa metrologa 2009 na CD-u, Društvo metrologa Srbije, Palić, Subotica, Srbija, 7-9. oktobra 2009.
- [90] D. Živanović, M. Simić, D. Denić, G. Miljković, "Virtual Instrument for Generation of the Power Quality Disturbances", Zbornik radova ETRAN 2012, Zlatibor, Srbija, jun 2012.

- [91] M. Simić, D. Živanović, D. Denić, G. Miljković, "LabVIEW Software applied to Simulation of the Typical Power Quality Problems", Proceedings of International Scientific Conference UNITECH 2012, Vol. 2, pp. 319-322, Gabrovo, Bulgaria, 16 – 17 November 2012.
- [92] M. Simić, D. Denić, D. Živanović, D. Taskovski, V. Dimcev, "Generation of the Power Quality Disturbances in LabVIEW Software Environment", Proceedings of the 10th International Conference TELSIKS 2011, pp. 593-596, Niš, Serbia, 5 – 8 October 2011.
- [93] M. Simić, D. Denić, D. Živanović, D. Taskovski, G. Miljković, V. Dimcev, "Software Controlled System for Generation of the Typical Power Quality Disturbances", Proceedings of X International Conference ETAI 2011, Ohrid, Macedonia, 16 – 20 September 2011.
- [94] NI, "DAQ 6711/6713/6715 User Manual, Analog Voltage Output Device for PCI/PXI Compact/PCI/PCMCIA/1394 Bus Computers", National Corporation, 2005 (www.ni.com).
- [95] M. Simić, D. Živanović, D. Denić, A. Jocić, M. Pešić, "Acquisition System applied to Testing of Instruments for Monitoring and Analysis of the Power Quality Parameters", Zbornik radova ETRAN 2012, EE.SS2-1-4, Zlatibor, Srbija, 11–14. juna 2012.
- [96] M. Simić, D. Denić, D. Živanović, G. Miljković, D. Taskovski, Z. Kokolanski, "Software Supported Procedure for Recording of the Power Quality Disturbances", International Scientific Conference UNITECH 2011, pp. 399-402, Gabrovo, Bulgaria, November 2011.
- [97] M. Simić, D. Živanović, D. Denić, G. Miljković, D. Taskovski, V. Dimcev, "System for Recording of the Power Quality Disturbances supported by LabVIEW Software", Proceedings of the International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems ELMA 2011, Vol. 1, pp. 244-247, Varna, Bulgaria, 21–22 October 2011.
- [98] V. Dimcev, D. Taskovski, Z. Kokolanski, D. Denić, D. Živanović, M. Simić, "Signal Conditioning for Power Quality", International Conference on Electrical Power Quality and Utilization IEEE EPQU 2011, pp. 482-486, Lisbon, Portugal, 17–19 October 2011.
- [99] NI, "Data Acquisition Board DAQ NI 9215A - User Guide and Specifications", National Instruments Corporation, 2007 (www.ni.com).
- [100] A. Milchevski, D. Kostadinov, D. Taskovski, "Classification of Power Quality Disturbances using Wavelets and Support Vector Machine", Electronics and Electrical Engineering, Vol. 19, No. 2, pp. 25-30, 2013.
- [101] D. Kostadinov, D. Taskovski, "Automatic Voltage Disturbance Detection and Classification using Wavelets and Multiclass Logistic Regression", Proceedings of IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference I2MTC 2012, pp. 103-106, Graz, Austria, 13–16 May 2012.
- [102] A. Milchevski, D. Taskovski, "Classification of Power Quality Disturbances using Wavelet Transform and SVM Decision Tree", International Conference on Electrical Power Quality and Utilization IEEE EPQU 2011, Lisbon, Portugal, 17–19 October 2011.
- [103] S. Roy, S. Nath, "Classification of Power Quality Disturbances using Features of Signals", International Journal of Scientific and Research Publications, Vol. 2, No. 11, pp.1-9, 2012.