

# VREDNOVANJE KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE

---

**Sabljo, Andrija**

**Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni**

**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Split / Sveučilište u Splitu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:228:304474>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-28**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of University Department of Professional Studies](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE**

Specijalistički diplomski stručni studij Elektrotehnike

**ANDRIJA SABLJO**  
**ZAVRŠNI RAD**  
**VREDNOVANJE KVALITETE**  
**ELEKTRIČNE ENERGIJE**

Split, srpanj 2022.

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**

**SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE**

Specijalistički diplomski stručni studij Elektrotehnike

**Predmet:** Parametri kvalitete električne energije

## **ZAVRŠNI RAD**

**Kandidat:** Andrija Sabljo

**Naslov rada:** Vrednovanje kvalitete električne energije

**Mentor:** mr.sc. Zdravko Jadrijev, dipl. ing.

Split, srpanj 2022.

# SADRŽAJ

SAŽETAK .....	1
1. UVOD .....	3
2. KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE.....	5
2.1. Europska norma EN 50160.....	7
3. VREDNOVANJE KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE .....	12
3.1. Proces vrednovanja kvalitete električne energije.....	13
3.2. Pokazatelji odstupanja efektivne vrijednosti napona .....	15
3.2.1. Razina komponente .....	16
3.2.2. Razina mjerenja.....	18
3.2.3. Zajednička razina komponente i mjerenja.....	18
3.3. Pokazatelji odstupanja efektivnih vrijednosti .....	19
3.3.1. Postupak računanja pokazatelja odstupanja efektivne vrijednosti.....	20
3.3.2. Programske aplikacije .....	21
3.4. Pokazatelji harmonika .....	21
3.4.1. Uzorkovanje harmonika .....	21
3.4.2. Karakterizacija mjerenja trofaznih harmonika napona .....	24
3.4.3. Definicija pokazatelja harmoničkog izobličenja.....	24
3.4.4. Sezonski utjecaj na harmonike.....	27
4. UGOVORI O KVALITETI ELEKTRIČNE ENERGIJE .....	29
4.1. Ugovori o odstupanju efektivne vrijednosti.....	29
4.2. Ugovori o harmonicima.....	30
4.3. Primjer ugovora.....	31
4.4. Police osiguranja kvalitete električne energije.....	34
4.4.1. Izrada police osiguranja.....	35
4.4.2. Prilagođavanje troškova ulaganja za kvalitetu električne energije .....	36
5. UKLJUČIVANJE KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE U PLANIRANJE DISTRIBUCIJE.....	38
5.1. Proces planiranja .....	38
5.2. Rizik u odnosu na očekivanu vrijednost.....	41
5.3. Sustav alata za simulaciju .....	41
5.4. Učestalost pojavljivanja kvarova .....	42
5.5. Odziv nadstrujnih uređaja.....	43
5.6. Troškovi za odštetu potrošača.....	45
6. ZAKLJUČAK.....	47
LITERATURA.....	48
POPIS SLIKA .....	49

POPIS TABLICA.....	50
PRILOZI.....	51
Prilog 1. Primjer izvještaja analize električne energije prema EN50160 .....	52

## SAŽETAK

**Naslov rada:** Vrednovanje kvalitete električne energije

Kvaliteta električne energije se može definirati kao obilježje električne energije u određenoj točki elektroenergetskog sustava promatrano u usporedbi s referentnim tehničkim parametrima. U radu je opisan proces vrednovanja kvalitete električne energije, te je prikazan način definiranja pokazatelja kvalitete električne energije koji služe kao mjere koje se koriste za vrednovanje i ocjenu kvalitete električne energije. Sklapanje ugovora o kvaliteti električne energije između isporučitelja električne energije i potrošača je opisano i prikazano na jednom primjeru ugovora. Potpisivanjem ugovora o kvaliteti električne energije se točno definiraju zadaće isporučitelja i potrošača. Na kraju rada je opisano kako se kvaliteta električne energije uključuje u proces planiranja distribucije koji zahtijeva najisplativije nadogradnje sustava kako bi se zadovoljila povećana potražnja za električnom energijom i povećala pouzdanost sustava. Cilj ovog rada je upozoriti na probleme koji se javljaju u primjeni normi o kvaliteti električne energije i ukazati na moguća unaprjeđenja u hrvatskom elektroenergetskom sustavu.

**Ključne riječi:** vrednovanje kvalitete električne energije, pokazatelji, ugovori, kvaliteta električne energije i planiranje distribucije

## ABSTRACT

**Thesis title:** Power quality benchmarking

Power quality can be defined as a performance of electricity at some point in the power system observed compared to reference technical parameters. In thesis was describes the process of power quality benchmarking, and shows how to define power quality indices that serve as measures that are used for benchmarking and assessment of power quality. Concluding power quality contracts between utilities and customers is described and illustrated on one examples of the contract. By signing a power quality contract is exactly define the tasks of utilities and costumers. At the end of thesis has been described including power quality in distribution planning that requires the most cost-effective distribution system upgrades in order to meet the increased demand for electricity and increased system reliability. The aim of thesis is alert to problems that occur during power

quality norm application and indicate the possible improvements in the Croatian electric power system.

**Key words:** power quality benchmarking, indices, contracts, including power quality in distribution planning

## 1. UVOD

Električna energija ima mogućnost pretvorbe u druge oblike energije što je čini jednom od najraširenijih vrsta energije i najvažnijih temelja današnjeg industrijskog doba. Električni uređaji su s vremenom postali sve kompleksniji i od njih se zahtijeva što veća ekonomska isplativost.

Danas se većinom koriste uređaji s nelinearnim djelovanjem koji s jedne strane zahtijevaju kvalitetan napon, a s druge strane sami utječu na smanjenje kvalitete tog napona. Smanjena kvaliteta napona može izazvati vrlo velike troškove u distribucijskom sustavu i/ili kod potrošača. Kako za kvalitetu električne energije nisu odgovorni samo isporučitelji električne energije, već i njihovi potrošači postalo je nužno odrediti potrebne norme i kriterije za vrednovanje kvalitete električne energije.

U drugom poglavlju rada ukratko se opisuje kvaliteta električne energije i europska norma EN 50160. Kvaliteta električne energije može se definirati kao obilježje električne energije u određenoj točki elektroenergetskog sustava promatrano u usporedbi s referentnim tehničkim parametrima. Kriteriji koji jednoznačno određuju kvalitetu električne energije moraju se donositi dogovorom svih zainteresiranih strana. Budući da se električna energija tretira kao roba, kvaliteta električne energije na svim naponskim razinama u Republici Hrvatskoj strogo je definirana međunarodnim normama od kojih je najvažnija europska norma EN 50160. Primjer izvještaja analize kvalitete električne energije sa svim zadovoljavajućim vrijednostima prema normi EN50160 može se vidjeti u prilogu 1.

Treće poglavlje rada detaljno opisuje vrednovanje kvalitete električne energije koje je vrlo važan aspekt u cjelokupnom promatranju kvalitete električne energije. Proces vrednovanja počinje definiranjem pokazatelja kvalitete električne energije koji služe kao mjere koje se koriste za vrednovanje i ocjenu kvalitete električne energije. Ti pokazatelji izračunavaju se iz podataka dobivenih mjerenjem u određenom dijelu elektroenergetskog sustava uz pomoć specijaliziranih instrumenata.

Osim procesa vrednovanja i definiranja pokazatelja kvalitete električne energije, u četvrtom poglavlju ovoga rada, opisani su i ugovori o kvaliteti električne energije koje sklapaju isporučitelji i potrošači uzimajući u obzir odstupanja kvalitete električne energije. Uz sporazumne ugovore, isporučitelji i potrošači, mogu sklopiti i police osiguranja kvalitete električne energije.



U posljednjem, petom poglavlju rada, opisan je proces uključivanja kvalitete električne energije u planiranje distribucijskog sustava. Proces planiranja distribucijskog sustava zahtijeva najisplativije nadogradnje sustava kako bi zadovoljilo očekivano povećanje vršnog opterećenja i kako bi se povećala pouzdanost sustava.

## 2. KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Kvaliteta električne energije je relativno nov pojam za koji ne postoji jedinstvena definicija. Definicije se razlikuju prema tome definira li se pojam s aspekta isporučitelja električne energije ili s aspekta potrošača. Kvaliteta električne energije može se definirati kao obilježje električne energije u određenoj točki elektroenergetskog sustava promatrano u usporedbi s referentnim tehničkim parametrima. Tehnički parametri se određuju preporukama koje se donose na međunarodnoj razini i mogu, ali ne moraju biti zakonski obvezujuće.

Kvaliteta električne energije je sveprisutna i nezamjenjiva, te je glavni pokretač ekonomskog i tehnološkog razvoja društva. Distributeri mogu definirati kvalitetu električne energije kao pouzdanost, te kao takvu poduprijeti dobrim statističkim pokazateljima i na tome graditi svoje zadovoljstvo isporučenom električnom energijom kao robom. Proizvođači električne opreme mogu kvalitetu električne energije definirati kao električnu energiju kojom se napajaju njihovi uređaji pri čemu ti uređaji rade ispravno. Naravno, takav pristup je subjektivan i trpi kritike. Kriteriji koji jednoznačno određuju kvalitetu električne energije moraju se donositi dogovorom svih zainteresiranih, a koje će moderirati regulatorna agencija. Takvi kriteriji se tada donose normama i zakonskim aktima. Kvaliteta električne energije mora biti takva da nedvojbeno zadovolji sve kvalitativne potrebe krajnjeg potrošača. Kvaliteta električne energije ne smije biti takva da odstupanja u naponu, struji ili frekvenciji uzrokuju smetnje ili greške u radu električne opreme krajnjeg potrošača. [5]

Novi i inovativni načini proizvodnje i korištenja električne energije pokrenuli su industrijsku revoluciju i od tada znanstvenici i inženjeri doprinose njihovim stalnim evolucijama. U početku su električna trošila i uređaji bili vrlo primitivni, ali učinkoviti. Strojevi su bili konzervativno dizajnirani, pri čemu su razine troškova bile sekundarne prema razinama učinka. Oni su bili podložni svim anomalijama kvalitete električne energije koje su tada postojale, ali njihovi efekti nisu bili zamjetni radi robusnosti samih uređaja i nedostataka efikasnih načina mjerenja parametara kvalitete električne energije. [5]

No u zadnjih 50-ak godina industrijsko doba je dovelo do potrebe da uređaji budu ekonomski konkurentni, što je značilo da su električne naprave postojale sve manje i efikasnije. Istovremeno u proces su ušli i drugi faktori. Povećana potražnja za električnom energijom je stvorila velike proizvodne i distribucijske elektroenergetske mreže. [5]

Industrija je imala sve veće i veće potrebe za električnom energijom, što je uz povećanu potražnju u kućanstvima natjeralo proizvodne resurse do granica. Danas električna postrojenja više nisu neovisno upravljane jedinice, već su ona dio velike mreže postrojenja povezanih međusobno složenom mrežom. Kombinacija ovih faktora je stvorila električni sustav koji zahtijeva kvalitetnu električnu energiju. [5]

Električna energija se isporučuje pomoću napona koji se dobiva s jednofaznih i trofaznih sinusnih sustava, a ima sljedeće glavne parametre: amplitudu, frekvenciju, valni oblik i simetriju napona. Iz toga je vidljivo da se pod kvaliteta električne energije podrazumijeva kvaliteta napona, a to proizlazi iz pretpostavke da elektroenergetski sustav može osigurati i jamčiti kvalitetni napon, a ne može utjecati na struje koje iz sustava uzimaju pojedini potrošači, iako postoji čvrsta korelacija između napona i struje. [1]

Kvaliteta električne energije često se ocjenjuje kao "dobra" ili "loša". "Dobra" kvaliteta odnosi se na električnu energiju koja ima sinusni napon i struju bez izobličenja, te ima unaprijed zadanu amplitudu i frekvenciju. Električna energija "loše" kvalitete ima izobličen sinusni napon i struju ili napon, struja i/ili frekvencija izlaze iz zadanih ograničenja. Uzročni ili početni događaji u elektroenergetskom sustavu koji "dobru" kvalitetu električne energije čine "lošom" su prirodne ili ljudske naravi. Primjeri uzroka "loše" kvalitete električne energije su udari groma, nelinearna trošila, te loše instalacije i uzemljenja.

Analiza kvalitete električne energije obično obuhvaća sljedeće osobine napona:

- naponski propadi i prekidi
- naponska kolebanja
- harmonici i međuharmonici
- prijelazni prenaponi
- valovitost
- tranzijentni prenaponi
- naponska nesimetrija
- promjene osnovne frekvencije mreže
- prisutnost istosmjernog napona u izmjeničnom
- prisutnost signalnih napona

Općenito nije neophodno mjerenje i razmatranje svih tipova poremećaja. Kvaliteta električne energije može se definirati kao stupanj (bilo kojeg) otklona od nazivnih vrijednosti gore navedenih pokazatelja. Može se definirati i kao stupanj utjecaja uporabe i isporuke električne energije na obilježja električne opreme.

Danas se električna energija tretira kao roba, te je kvaliteta električne energije na svim naponskim razinama strogo definirana međunarodnim normama. Za područje Republike Hrvatske najvažnija je europska norma EN 50160.

## **2.1. Europska norma EN 50160**

Prednacrt ove europske norme izradila je organizacija CENELEC (engl. European Committee for Electrotechnical Standardization). Nacrt donesen u rujnu 1993. godine podvrgnut je jedno stupanjskom postupku prihvaćanja i CENELEC ga je 5. srpnja 1994. godine prihvatio kao normu EN 50160. Članovi CENELEC-a dužni su držati se pravilnika CENELEC-a u kojemu su utvrđeni uvjeti pod kojima se ovoj europskoj normi mora, bez ikakve promjene, dati status nacionalne norme. Osvremenjeni popis normi, koje su preuzimanjem postale nacionalne norme, zajedno s njihovim bibliografskim podacima, može se na zahtjev dobiti od glavnog tajništva ili svake članice CENELEC-a. Ova europska norma postoji u tri službene verzije (njemačkoj, engleskoj i francuskoj). Isti status, kao i te službene verzije, ima i verzija na nekom drugom jeziku koju neka članica CENELEC-a, na vlastitu odgovornost, načini prevođenjem na svoj jezik i prijavi glavnom tajništvu.[2]

Europska norma za kvalitetu napona na mjestu predaje potrošaču u javnim distribucijskim niskonaponskim i srednjenaponskim mrežama pri normalnim pogonskim uvjetima je EN 50160. Ova norma definira i opisuje bitna obilježja razdjelnog napona na mjestu predaje potrošaču u javnim niskonaponskim i srednjenaponskim mrežama pri normalnim pogonskim uvjetima. [8]

Norma EN 50160 ne vrijedi:

- a) za pogon nakon nekog kvara i za mjere privremene opskrbe, koje se primjenjuju kako bi se omogućila daljnja opskrba potrošača pri zahvatima održavanja i pri gradnji, te kako bi se na najmanju mjeru ograničili opseg i trajanje prekida opskrbe,
- b) u slučajevima kad postrojenje ili aparat potrošača ne zadovoljavaju mjerodavne norme ili tehničke uvjete za priključak ili kad su prekoračene granične vrijednosti smetnja prenošenih vodovima,

- c) u slučajevima kad neko postrojenje za proizvodnju ne zadovoljava mjerodavne norme ili tehničke uvjete za priključak na razdjelnu mrežu (npr. postrojenja za proizvodnju energije),
- d) u iznimnim prilikama na koje ne može utjecati isporučitelj električne energije, posebno kod:

- iznimnih vremenskih (ne)prilika ili prirodnih katastrofa,
- smetnja koje su izazvale treće strane,
- mjera javnih tijela ili tijela vlasti,
- radnih sporova prema zakonskim odredbama,
- više sile,
- ograničenja kapaciteta opskrbe zbog izvanjskih utjecaja.

Ova norma može se u cijelosti ili djelomično nadomjestiti ugovorom (dogovorom) između pojedinog potrošača i isporučitelja električne energije. U ovoj normi opisana obilježja opskrbnog napona nisu predviđene za uporabu kao razina elektromagnetske kompatibilnosti ili kao granične vrijednosti smetnja, koje se iz postrojenja potrošača vodovima prenose u javne mreže. [8]

Svrha ove norme je utvrditi i opisati obilježja razdjelnog napona glede:

- frekvencije
- veličine
- oblika krivulje
- simetrije triju napona faznih vodiča

Ta se obilježja za vrijeme normalnog pogona mijenjaju radi kolebanja tereta, smetnji iz određenih postrojenja i kvarova koji su pretežno izazvani izvanjskim događanjima. Obilježja napona su izrazito slučajne naravi, kako glede vremenskog tijeka na nekom promatranom mjestu predaje, tako i u jednom trenutku glede mjesne razdiobe po svim mjestima predaje u nekoj mreži. S obzirom na te ovisnosti, valja računati s time da će navedene razine obilježja opskrbnog napona prijeći u rijetkim slučajevima. Pojedine pojave, koje utječu na opskrbeni napon, potpuno su nepredvidive, tako da nije moguće za odgovarajuća obilježja navesti čvrste vrijednosti.

Vrijednosti koje su za te pojave dane u normi, npr. za propade napona i prekide napona, valja sukladno tome smatrati orijentacijskim vrijednostima. [8]

Za primjenu ove norme vrijedi puno definicija, a neke od njih koje se spominju u ovom radu su:

Potrošač – kupac električne energije, koji električnu energiju nabavlja od nekog isporučitelja električne energije.

Isporučitelj električne energije – društvo koje električnu energiju dobavlja preko javne razdjelne mreže.

Mjesto predaje – mjesto priključka postrojenja (uređaja) potrošača na javnu mrežu.

Opskrbni napon – električna vrijednost napona na mjestu predaje, mjerena u određenom trenutku, tijekom određenog vremenskog razdoblja.

Nazivni napon mreže – napon kojim se neka mreža označuje ili prepoznaje i na koji se svode određena pogonska obilježja.

Niski napon (NN) - u ovoj normi je to razdjelni napon čija je nazivna (efektivna) vrijednost najviše 1000 V.

Srednji napon (SN) – u ovoj normi je to razdjelni napon čija je nazivna (efektivna) vrijednost između 1 kV i 35 kV.

Normalni pogonski uvjeti – pogonsko stanje u nekoj razdjelnoj mreži pri kojemu je pokrivena potražnja za električnom energijom, pri kojemu se obavljaju sklapanja i pri kojemu se smetnje otklanjaju pomoću automatskih zaštitnih sustava, a da pri tome ne postoje izvanredne okolnosti zbog izvanjskih utjecaja ili većih ograničenja kapaciteta opskrbe. [8]

Frekvencija opskrbnog napona – broj ponavljanja osnovnog harmonika opskrbnog napona u jedinici vremena mjerenog tijekom određenog vremenskog perioda.

Polagana promjena napona – povišenje ili sniženje efektivne vrijednosti napona, uobičajeno kod promjena ukupnog tereta u nekoj razdjelnoj mreži ili nekom dijelu razdjelne mreže.

Brza promjena napona – pojedina brza promjena efektivne vrijednosti nekog napona između dviju susjednih (uzastopnih) naponskih razina, određenog, ali ne i čvrsto utvrđenog trajanja.

Kolebanje napona – niz promjena napona ili neka periodična promjena ovojnice krivulje napona.

Treperenje (eng. flicker) – vidom zamjetljivo prekidanje izazvano svjetlosnim podražajem s vremenskim kolebanjem svjetlosne gustoće ili spektralne razdiobe.

Propad napona – naglo, kratkotrajno smanjenje opskrbnog napona na vrijednost između 90 % i 1 % dogovorenog opskrbnog napona, nakon kojeg se ponovno uspostavlja prvotna vrijednost. Dogovoreno trajanje propada napona je između 10 ms i 1 min. Dubina propada je definirana kao razlika između najmanje efektivne vrijednosti napona za vrijeme propada i dogovorenog napona. Promjene napona pri kojima se napon ne smanjuje ispod 90 % dogovorenog napona, ne smatraju se propadima. [2]

Nesimetrija (asimetrija) napona – stanje u trofaznoj mreži pri kojemu nisu jednake efektivne vrijednosti napona između faznih vodiča i neutralnog vodiča ili kutovi među uzastopnim fazama. Mjeri se kao odstupanje u odnosu na idealni trofazni sustav, kod kojega su amplitude napona sve tri faze jednake, a fazni kutovi su točno  $120^\circ$ . [2]

Prekid opskrbe – stanje pri kojemu je napon na mjestu predaje manji od 1% dogovorenog napona. Razlikuju se sljedeći prekidi opskrbe:

- planirani prekidi opskrbe o kojima se, radi omogućavanja obavljanja planiranih radova u razdjelnoj mreži, potrošači unaprijed obavještavaju
- slučajni prekidi opskrbe koji su izazvani trajnim ili prolaznim smetnjama i uglavnom se pojavljuju u svezi s drugim smetnjama. Slučajne prekide dijelimo na:
  - dugotrajne prekide opskrbe (duže od 3 minute), izazvane trajnim kvarom
  - kratkotrajne prekide opskrbe (do uključivo 3 minute), izazvane prolaznim kvarom

Povremeni previsoki napon – razmjerno dugotrajni previsoki napon (prenapon) na određenom mjestu.

Tranzijentni previsoki napon – kratkotrajni trajni ili ne trajni previsoki napon, koji ju u pravilu jako prigušen, a trajanja je nekoliko milisekundi ili manje. Obično ga izazivaju atmosferska izbijanja, sklapanja ili pregaranja osigurača. [8]

Napon viših harmonika – sinusni napon, čija je frekvencija cjelobrojni višekratnik (redni broj) frekvencije osnovnog harmonika.[8]

Napon međuharmonika – sinusni je napon, čija je frekvencija između frekvencija viših harmonika, tj. čija frekvencija nije cjelobrojni višekratnik frekvencije osnovnog harmonika. Kod nas:  $n \cdot 50 \text{ Hz}$ ,  $n = 2, 3, \dots$

Tablica 2.1. ukratko prikazuje ograničenja za pokazatelje kvalitete električne energije u distribucijskim mrežama kako ih propisuje Europska norma EN 50160 za obilježja niskog napona.

Tablica 2.1. Sumarno prikazana ograničenja pokazatelja norme EN 50160 [2]

<b>EN 50160</b>			
<b>Pokazatelji</b>	<b>Mjerna jedinica</b>	<b>Vrijeme usrednjavanja</b>	<b>Ograničenja</b>
Kolebanje napona	V	10 min	10 % $U_n$ za 95 % tjedna
			+ 10/-15 % $U_n$ za 5 % tjedna
Treperenje (Flicker)	$P_{lt}$	$P_{st} - 10 \text{ min}$ $P_{lt} - 120 \text{ min}$	$P_{lt} \leq 1$ , za 95 % tjedna
Harmonici	% $U$	10 min	tablica do 40. harmonika
THD napona	% $U_n$	10 min	$< 8 \% U_n$
Signalni napon	% $U_n$	3 s	$< 5 \% U_n$ (1-10 kHz) u 99% od 24 sata
Frekvencija	Hz	10 s	1 % $f_n$ za 99,5 % tjedna
			+ 4/-6 % $f_n$ za 0,5 % tjedna
Nesimetričnost	% $U_n$	10 min	$< 2 \% U_n$
Propadi	Broj	10 ms	nekoliko desetaka do tisuću godišnje
Kratki prekidi	Broj		$< 3 \text{ min.}$ – nekoliko desetaka do stotina godišnje
Dugi prekidi	Broj		3 min. – $< 10 - 50$ godišnje

Primjer izvještaja analize kvalitete električne energije sa svim zadovoljavajućim vrijednostima prema normi EN50160 može se vidjeti u prilogu 1.



### 3. VREDNOVANJE KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE

Istraživački institut za električnu energiju EPRI (eng. Electric Power Research Institute) već više od 20 godina proučava probleme i rješenja vezana uz kvalitetu električne energije.

Vrednovanje kvalitete električne energije je vrlo važan aspekt u cjelokupnom promatranju kvalitete električne energije. Proces vrednovanja počinje s definiranjem pokazatelja kvalitete električne energije koji služe kao mjere koje se koriste za vrednovanje i ocjenu kvalitete električne energije. Ti pokazatelji se izračunavaju iz podataka dobivenih mjerenjem u određenom dijelu elektroenergetskog sustava uz pomoć specijaliziranih instrumenata. Mnoge tvrtke širom svijeta imaju implementirane trajne nadzorne sustave za vrednovanje kvalitete električne energije. Međutim, još uvijek postoje vrlo velike razlike u pokrivenosti dijelova elektroenergetskog sustava s trajnim nadzorom kvalitete električne energije. [1]

Zbog osjetljivih opterećenja, potrebno je definirati kvalitetu električne energije uz pomoć koje se može ocijeniti isporučitelja električne energije od strane potrošača ili dobavljača opreme. Jedno od osnovnih načela rješavanja problema kvalitete električne energije je da smetnje u elektroenergetskom sustavu nisu ograničene zakonskim granicama. Isporučitelji električne energije, te njihovi potrošači i dobavljači opreme moraju zajedno raditi kako bi riješili mnoge probleme. Da bi to mogli učiniti, moraju razumjeti električno okruženje u kojem radi krajnja oprema. To je nužno kako bi se smanjio dugoročni ekonomski utjecaj neizbježnih odstupanja kvalitete električne energije i identificirala poboljšanja sustava koja mogu ublažiti probleme kvalitete električne energije.

Skup pokazatelja kvalitete električne energije definiranih za pouzdanost metodologije vrednovanja kvalitete električne energije u Istraživačkom institutu za električnu energiju služi kao mjera za kvantificiranje kvalitete usluge. Pokazatelji kvalitete električne energije koriste se za procjenu kompatibilnosti između napona isporučenog od proizvođača i osjetljivosti krajnjeg korisnika opreme. Obično se uzima uzorak onih pokazatelja kvalitete električne energije koje alati za opisivanje pouzdanosti najčešće koriste. Nekoliko pokazatelja kvalitete električne energije je postalo popularno, a program je razvijen tako da ih može izračunati iz izmjerenih podataka, te ih procijeniti u simulacijama. [1]

### 3.1. Proces vrednovanja kvalitete električne energije

Isporučitelji električne energije diljem svijeta obuhvaćeni su procesom vrednovanja kvalitete električne energije. Oni su prisiljeni što bolje razumjeti razinu kvalitete usluge koje pružaju preko svojih distribucijskih sustava kako bi utvrdili da li su predviđene razine odgovarajuće. Zbog toga potpisuju ugovore s klijentima da će im pružiti određenu kvalitetu usluge tijekom određenog vremenskog perioda. Tipični koraci u procesu vrednovanja kvalitete električne energije su:

1. Određivanje mjera vrednovanja na način da se definira nekoliko pokazatelja za ocjenu kvalitete pružene električne usluge.
2. Prikupljanje podataka o kvaliteti električne energije. To uključuje postavljanje nadzornih monitora za praćenje kvalitete električne energije i karakteristika sustava. Razni instrumenti i sustavi za praćenje su nedavno razvijeni kako bi pomogli u ovom vrlo intenzivnom procesu.
3. Određivanje vrste vrednovanja. Proces vrednovanja određuje se na temelju prošlih procesa ili je usvojen od strane sličnih usluga ili se koristi standard koji su utemeljile organizacije kao što su IEEE, IEC, ANSI ili NEMA.
4. Određivanje razine ciljanog svojstva vrednovanja. Traži se razina koja je prikladna i ekonomski isplativa. Ciljana razina može biti ograničena na određene korisnike ili skupine korisnika i može prelaziti vrijednost procesa vrednovanja.

Proces vrednovanja počinje s odabirom mjera koje se koriste za vrednovanje i ocjenu kvalitete usluga. Mjere se mogu jednostavno odrediti iz povijesnih podataka, kao što su prosječan broj kvarova po kilometru voda ili koliko je kvarova rezultiralo prekidom voda. Isporučitelji električne energije i potrošači su sve više zainteresirani za podatke koji opisuju stvarne karakteristike za određeno vremensko razdoblje. Pokazatelji kvalitete električne energije koji su razvijeni kao dio projekta Istraživačkog instituta za električnu energiju izračunavaju se iz podataka izmjerenih na sustavu specijaliziranim instrumentima. [1]

Isporučitelji električne energije diljem svijeta uveli su infrastrukturu za praćenje kvalitete električne energije uz pomoć koje dobivaju potrebne podatke za točno vrednovanje kvalitete usluge koju pružaju potrošačima. Za većinu isporučitelja i potrošača najvažniji je podatak o padu napona uslijed kratkog spoja. Iako takvi događaji nisu nužno najčešći, imaju ogroman ekonomski utjecaj na krajnje korisnike. [1]

Proces vrednovanja razine pada napona općenito zahtijeva dvije do tri godine uzimanja uzoraka. Ti podaci se onda mogu prikazati kao razina pada napona sa standardnim pokazateljima kvalitete električne energije koji su razumljivi i isporučitelju usluge i potrošaču. Nakon prikupljanja podataka, isporučitelj usluge mora odrediti razinu kvalitete koja je prikladna i ekonomski isplativa. Danas se sve više isporučitelja u donošenju tih odluka konzultira s pojedinim potrošačima ili regulatornim agencijama. [1]

Isporučitelji električne energije znaju da se svaka razina kvalitete usluge može postići uz pomoć dodatnih uređaja i sustava kao što su: generatori, sustavi besprekidnog napajanja, kondenzatorske baterije, prigušnice i slično. No, to nije uvijek ekonomski isplativo i mora se prilagoditi potrebama potrošača i vrijednosti njegove usluge. Većina isporučitelja ima sačuvani proces vrednovanja pouzdanosti unazad nekoliko desetljeća.

IEEE standard 1366-1998 definira mjere za vrednovanje kvalitete električne energije za područje pouzdanosti zadobivenih prekida. Mjere su definirane na temelju prosječnih podataka sustava ili prosječnog potrošača o stvarima kao što su broj prekida i trajanje prekida. Međutim, pokazatelji pouzdanosti ne mogu odrediti utjecaj izvanmrežnih radnih opterećenja za 70% padova napona, niti gubitak učinkovitosti i preranog kvara opreme zbog prevelikog harmoničkog izobličenja.[9]

Proces vrednovanja kvalitete usluge u drugim područjima pouzdanosti je značajno porastao u kasnim 1980-im godinama. To je u velikoj mjeri potaknuto iskustvima sa snagom elektroničkih opterećenja koja proizvode značajne harmonike struje i koja su bila mnogo osjetljivija na pad napona od prethodnih generacija elektromehaničkih opterećenja. [1]

1989. godine EPRI je pokrenuo projekt kvalitete distribucije električne energije i počeo prikupljati podatke o kvaliteti električne energije za distribucijske sustave diljem Sjedinjenih Američkih Država. Monitori za praćenje bili su postavljeni na gotovo 300 mjesta na 100 distribucijskih uređaja, a podaci su prikupljeni za 27 mjeseci. Projekt je prikupio više od 30 Gb podataka o kvaliteti električne energije, te je služio kao osnova za standarde i za razne studije.

1996. godine EPRI je završio projekt koji je predviđao pokazatelje kvalitete električne energije kako bi se omogućila kvaliteta usluge definirana na konzistentan način kod svih isporučitelja električne energije.

Pokazatelji su definirani za:

1. Kratkotrajno odstupanje efektivne vrijednosti napona. To su naponski propad, nadvišenje i prekidi manji od 1 minute.
2. Harmonička izobličenja
3. Prijelazni prenaponi. Ovu kategoriju uglavnom čine prijelazne pojave kod uklapanja i isklapanja kondenzatora, ali također mogu uključivati i prijelazne pojave kod udara groma.
4. Stalni režim naponskog odstupanja kao što su regulacija napona i fazna ravnoteža.

### **3.2. Pokazatelji odstupanja efektivne vrijednosti napona**

Već dugi niz godina, jedini pokazatelji koji definiraju odstupanje efektivne vrijednosti napona su pokazatelji trajnih prekida. Trajni prekidi su jedna od vrsta naponskog odstupanja. IEEE standard 1159-1995 definira trajni prekid kao smanjenje efektivne vrijednosti napona na manje od 10 % normalnog iznosa napona u trajanju dužem od 1 minute. [1]

Trajni prekidi su vrlo važni jer su svi potrošači koji se nalaze na području koje je u kvaru pogođeni takvim poremećajima. Pokazatelje za vrednovanje trajnih prekida isporučitelji električne energije neformalno koriste već dugi niz godina, a od nedavno su oni standardizirani po IEEE-u u IEEE standardu 1366-1988. Standard također definira pokazatelje trenutnih prekida, koji su druga vrlo važna vrsta odstupanja efektivne vrijednosti napona. Trenutni prekidi nastaju zbog privremenih smetnji. Oni ne pripadaju tradicionalnim pokazateljima pouzdanosti, ali mogu utjecati na mnoge krajnje korisnike. Pokazatelji odstupanja efektivne vrijednosti napona definiraju i mjeru za pad napona, što također može utjecati na mnoge krajnje korisnike. [1]

IEEE standard 1159-1995 daje zajedničku terminologiju koja se koristi za rasprave i procjenu odstupanja efektivne vrijednosti napona, definiranje amplitude naponskog nadvišenja, propada i prekida. Standard sugerira da se izrazi nadvišenje, propad i prekid opisuju s ocjenom vremenskog trajanja događaja kao što su trenutni, privremeni ili trajni.

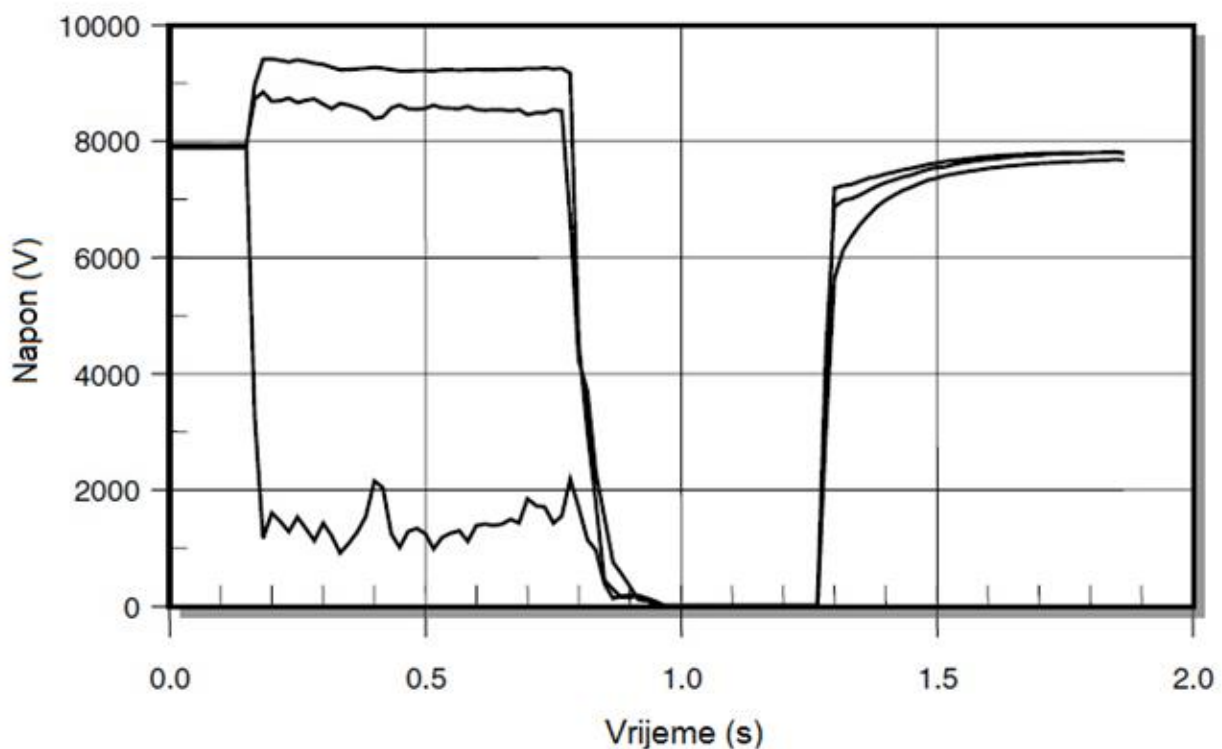
Odstupanja efektivnih vrijednosti napona se klasificiraju prema veličini i trajanju poremećaja. Zbog toga se prije izračuna pokazatelja odstupanja efektivne vrijednosti moraju odrediti karakteristike veličine i trajanja iz valnog oblika i podataka snimljenih za svaki događaj.

Karakterizacija odstupanja efektivnih vrijednosti napona može biti vrlo komplicirana. Ona se dijeli na tri razine, gdje se svaka razina predstavlja kao vrsta događaja kao što slijedi:

1. razina komponente
2. razina mjerenja
3. zajednička razina komponente i mjerenja

### 3.2.1. Razina komponente

Pojedina faza mjerenja odstupanja efektivne vrijednosti može sadržavati više komponenti. U većini slučajeva odstupanja efektivne vrijednosti imaju jednostavni pravokutni oblik i karakterističnu amplitudu i trajanje. Oko 10 % odstupanja efektivne vrijednosti nisu pravokutnog oblika i imaju više komponenti. Na slici 3.1. je prikazano odstupanje efektivne vrijednosti.



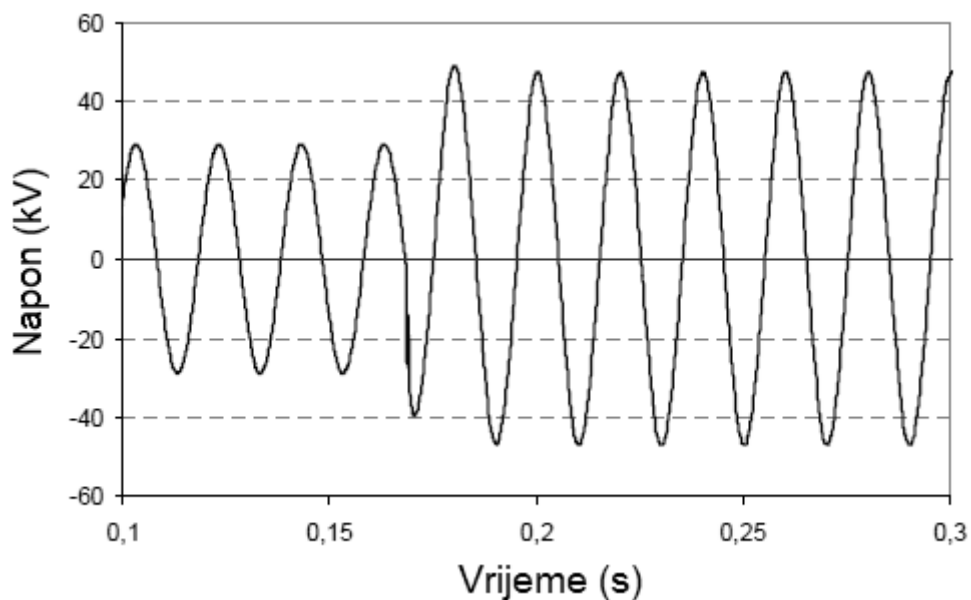
Slika 3.1. Prekid napona uslijed naponskog propada jedne faze [1]

Neki prekidi nastaju uslijed naponskog propada, pogotovo kada se kvar dogodi u sustavu proizvodnje električne energije. Pad napona se događa između trenutka nastanka kvara i trenutka kada djeluje zaštitni mehanizam. Na slici 3.1. prikazan je trenutni prekid pri kojem napon jedne faze padne na oko 20 % i traje oko 0.6 s, nakon čega napon sve tri faze padne na nulu.

Trenutni prekid traje 0.4 s nakon čega se ponovnim uklapanjem uspostavi nominalni napon. Prekidi napona utječu na većinu korisnika, dok propadi utječu samo na osjetljivije potrošače. [1]

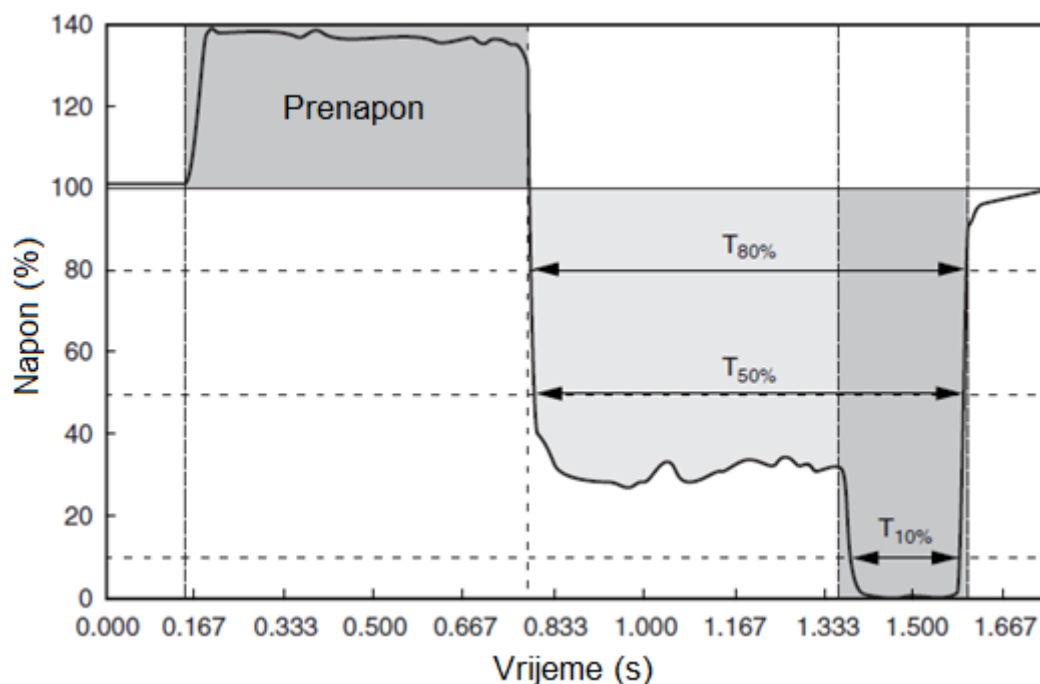
Kod nekih programa potrebno je isključivanje procesa i zamrzavanje valnog oblika kako bi se utvrdile karakteristike događaja. Većina metoda za karakterizaciju kažu da amplituda mora prikazati maksimalno odstupanje od nazivnog napona. Ovdje je korištena metoda određenog napona koja određuje trajanje događaja kao vremensko razdoblje u kojem efektivna vrijednost napona prelazi određenu graničnu razinu napona i koristi se za opisivanje poremećaja. [1]

Na slici 3.2. prikazano je odstupanje efektivne vrijednosti koje u ovom slučaju predstavlja prenapon.



Slika 3.2. Primjer prenapona [1]

Događajima koji su prikazani na slikama 3.1. i 3.2. dodijeliti ćemo različito vrijeme trajanja, ovisno o određenoj graničnoj razini napona koja nas zanima. Na slici 3.3. prikazan je taj koncept za tri različite naponske razine od 80, 50 i 10 %.  $T_{80\%}$  je trajanje događaja za procjenu naponskog propada od 80%. Isto tako  $T_{50\%}$  i  $T_{10\%}$  povezane su s trajanjem naponskog propada za odgovarajuće naponske razine. Može se primijetiti da  $T_{80\%}$  i  $T_{50\%}$  traju 800 ms jer su oba propada komponente ne pravokutnog događaja koji ima amplitudu ispod 50 %. Međutim,  $T_{10\%}$  obuhvaća samo trajanje druge komponente od 200 ms. [1]



Slika 3.3. Karakterizacija određenog napona efektivne vrijednosti mjerenjem odstupanja faze[1]

### 3.2.2. Razina mjerenja

Pojava kvara u elektroenergetskom sustavu može utjecati na jednu, dvije ili sve tri faze distribucijskog sustava. Veličina i trajanje rezultirajućeg odstupanja efektivne vrijednosti mogu se značajno razlikovati za različite faze. Za procjenu karakteristika jedne faze, svaka od tri faze se prikazuje odvojeno. Dakle, za neke kvarove su tri različita odstupanja efektivne vrijednosti napona uključena u pokazatelj. To je neprikladno za opterećenja koja ovo vide kao jedan događaj.

Definirana metoda za karakteriziranje razine mjerenja je trofazna metoda. Ona određuje jedinstvenu skupinu karakteristika za sve tri faze. Za svaki događaj odstupanja efektivne vrijednosti napona, veličina i trajanje su označeni kao veličina i trajanje svake pojedine faze s najvećim odstupanjem napona od nazivne vrijednosti. [1]

### 3.2.3. Zajednička razina komponente i mjerenja

Ukupni događaj je skup svih mjera povezanih s jednim elektroenergetskim sustavom u jedan skup karakteristika događaja. Naprimjer, jedan kvar distributivnog sustava može dovesti do nekoliko mjerenja koje sustav nadstrujne zaštite obriše i osigura ponovno korištenje usluge.

Zajednički događaj povezan s ovim kvarom zbraja sva pripadajuća mjerenja u jedan skup karakteristika kao što su veličina, trajanje itd. Ova razina pruža najtočniju procjenu kvalitete usluge. Pokazatelji odstupanja efektivne vrijednosti obično se temelje na zajedničkoj razini jer je ovo dobra metoda koja uzima u obzir sve događaje koji se javljaju u određenom vremenskom intervalu. Najčešće je to vremenski interval od jedne minute koji odgovara minimalnoj duljini trajnog prekida. Amplituda i trajanje ukupnog događaja utvrđuje se na temelju mjerenja događaja koji će najvjerojatnije dovesti do kvara opreme potrošača. To je uglavnom događaj s najvećim odstupanjem. [1]

### 3.3. Pokazatelji odstupanja efektivnih vrijednosti

Pokazatelji odstupanja efektivne vrijednosti definirani su za procjenu kvalitete usluge na nekom određenom području. Ovi pokazatelji mogu se skalirati za sustave različitih veličina, te se mogu primijeniti na mjerenjima snimljenim pomoću programskih alata u cijelom distribucijskom sustavu.

Postoji nekoliko svojstava odstupanja efektivnih vrijednosti koje se često koriste, poput učestalosti pojavljivanja, trajanja poremećaja i broja uključenih faza. Iako papiri i izvješća uključena u referencama sadrže podatke o svim pokazateljima, u praksi se ne dopušta opis svih njih, već se koncentrira na samo jedan pokazatelj. [1]

Pokazatelji prosječne učestalosti propada napona su označeni sa  $SARFI_X$  (eng. - System average rms frequency index) i predstavljaju prosječni broj navedenih odstupanja efektivne vrijednosti za mjerenje događaja koji su se dogodili tijekom razdoblja procjenjivanja po potrošaču, gdje su navedeni poremećaji oni s manjom amplitudom od X za propade ili većom amplitudom za nadvišenja kao što je definirano sljedećom jednačbom:

$$SARFI_X = \frac{\sum N_i}{N_T} \quad (3-1)$$

gdje je:  $x$  – efektivna vrijednost napona praga

$N_i$  – broj potrošača kod kojih se pojavljuju kratkotrajna odstupanja napona

$N_T$  – ukupan broj potrošača koji se koristi dijelom sustava koji se ocjenjuje



Može se zaključiti da je SARFI definiran u odnosu na napon praga  $x$ . Naprimjer, ako je uređaj potrošača osjetljiv samo na propade ispod 70% nominalnog napona, onda se ova skupina poremećaja može procijeniti pomoću SARFI<sub>70</sub>. Granične vrijednosti pokazatelja nisu proizvoljne. One se definiraju tako da se podudaraju sa sljedećim:

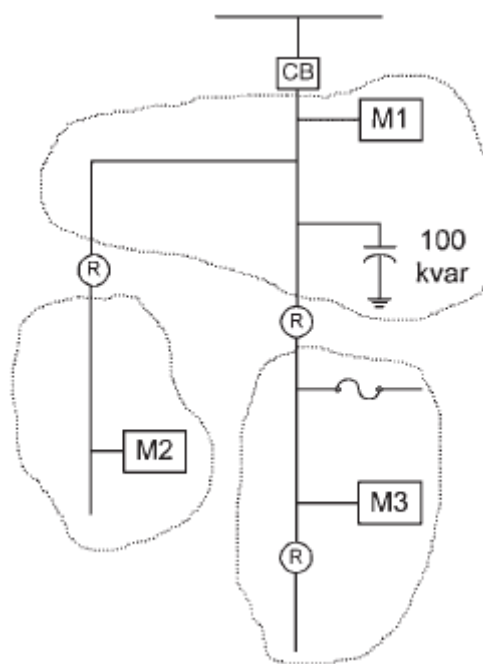
- prenaponi – 110, 120 i 140
- podnaponi – 70, 80 i 90
- procjena motornih sklopnika – 50
- prekid – 10

### **3.3.1. Postupak računanja pokazatelja odstupanja efektivne vrijednosti**

Prvo se mora odrediti koliko potrošača osjeća veće napone od napona praga za svako odstupanje efektivne vrijednosti napona koje se dogodi. Tu je očito da to ne prati svaki potrošač samostalno, već se odredi okvirni iznos napona koji su potrošači osjetili prilikom poremećaja. To se postiže podjelom na manja mjesta (segmente) u kojima se pretpostavlja da svi potrošači imaju jednaki napon i jednako osjećaju poremećaje. Pri tome je važno naglasiti da što su manji segmenti to je usklađenost bolja. [1]

Jedna od metoda određivanja napona za pojedine segmente temelji se na ograničenom broju točaka koje se nadziru. Takva procjena stanja zahtijeva umjereno detaljne sheme i poznate podatke koji se prate. To se naziva nadzor ograničenih segmenata i daje rezultate za samo nekoliko točaka po segmentu. Iako su vrijednosti pokazatelja manje točne, koriste se jer su dovoljno informativne.

Na slici 3.4. prikazan je nadzor tri ograničena segmenta na kojima se prati kvaliteta električne energije na monitorima M1, M2 i M3, te pomoću dobivenih podataka izračunavaju se pokazatelji odstupanja efektivne vrijednosti. [1]



Slika 3.4. Nadzor ograničenih segmenata pri izračunu pokazatelja odstupanja efektivne vrijednosti [1]

### 3.3.2. Programske aplikacije

Uz pomoć programa vrši se analiza o pokazatelju odstupanja efektivne vrijednosti kako bi se unaprijedio cijeli sustav. Oni omogućuju pojedinačno računanje pokazatelja za pojedine trafostanice ili za sustav od nekoliko trafostanica. Također uspoređuju vrijednosti pokazatelja pojedinačnih trafostanica i sustava trafostanica. [1]

## 3.4. Pokazatelji harmonika

Snaga elektroničkih uređaja nudi električnu učinkovitost i fleksibilnost, ali predstavlja dvostruki problem zajedničkog djelovanja s harmonicima. Ne samo da elektronički uređaji proizvode harmonike, već su i osjetljiviji na izobličenja od većine tradicionalnih elektromehaničkih uređaja. [1]

### 3.4.1. Uzorkovanje harmonika

Inženjeri elektrotehnike koji proučavaju kvalitetu električne energije obično konfiguriraju praćenje kvalitete usluge tako da se povremeno snimi uzorak napona i struja za svaku od tri faze i nule. Mjerenje se obično sastoji od jednog ciklusa, ali neki uzorci zahtijevaju i snimanje među harmonika.

Praćenje kvalitete električne energije vrši se uzimanjem uzoraka u intervalima od 15 do 30 minuta i snima se tisuće mjerenja koja su sažeta u pokazateljima. Osim harmoničkog izobličenja, snimljeni valni oblici daju informacije i o drugim obilježjima kao što su ravnoteža faza, faktor snage, faktor oblika i vršni faktor.

Temeljna veličina koja se koristi u obliku pokazatelja je ukupno harmoničko izobličenje napona koje se označava sa THD (eng. Total Harmonic Distortion) napona. THD napona se određuje prema sljedećoj jednadžbi:

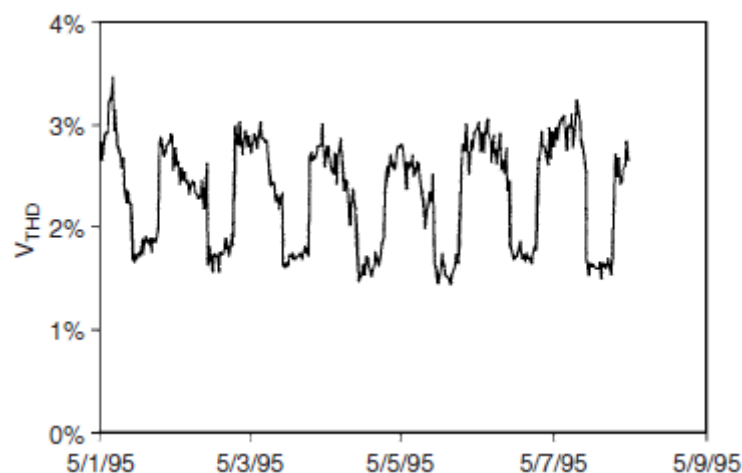
$$V_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad (3-2)$$

gdje je :

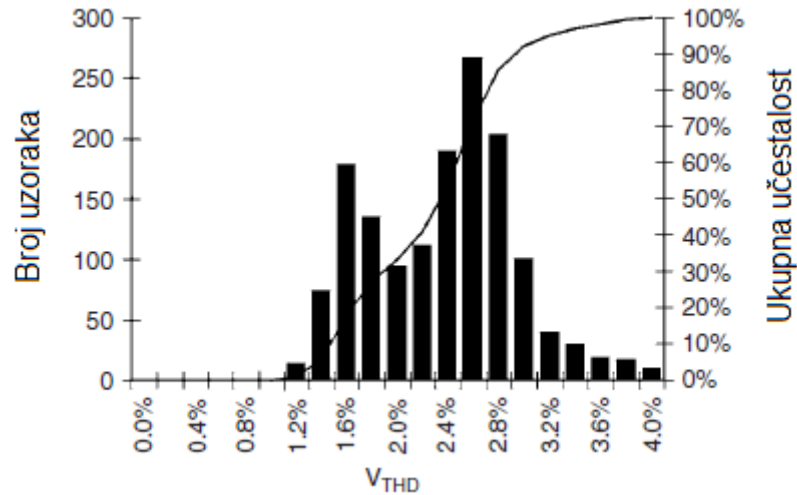
$V_h$  – amplituda napona viših harmonika  $h$

$V_1$  – amplituda napona osnovne vrijednosti

Izobličenje napona nije konstantna vrijednost. Na tipičnom sustavu, harmoničko izobličenje prati se dnevnim, tjednim i sezonskim uzorkovanjem. Primjer dnevnog uzorkovanja ukupnog harmoničkog izobličenja napona za jedan tjedan prikazan je na slici 3.5.. Korisna metoda sumiranja THD uzorka je stvaranje histograma kao što je prikazano na slici 3.6.. Tu treba obratiti pozornost na dva različita vrha u distribuciji koja odražavaju bimodalnu prirodu harmoničkog izobličenja. [1]

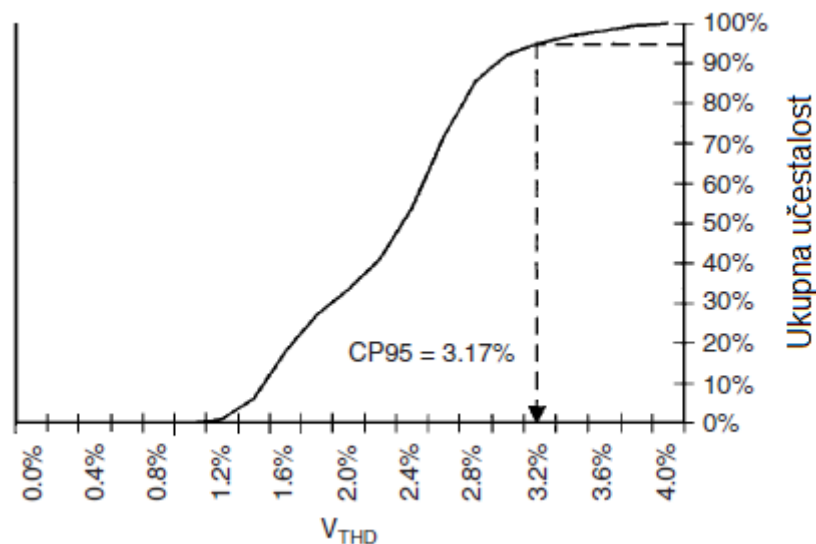


Slika 3.5. Dnevni ciklusi ukupnog harmoničkog izobličenja za jedan tjedan [1]



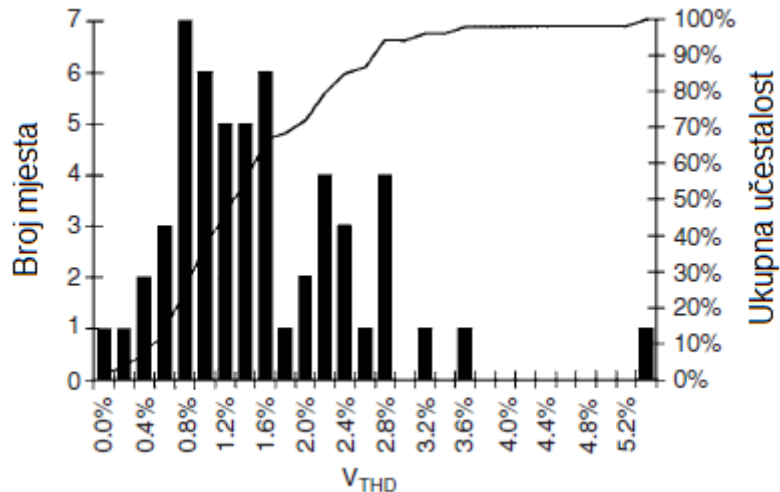
Slika 3.6. Histogram ukupnog harmoničkog izobličenja napona za jedan mjesec[1]

Iz histograma se izračunava kumulativna krivulja učestalosti, kao što je prikazano na slici 3.6.. Na slici 3.7. zasebno je prikazana kumulativna krivulja učestalosti i prikazano je izračunavanje 95%-tne vrijednosti koje se označava sa CP95. U ovom primjeru THD napona od 3.17% je veće od 95% svih ostalih uzoraka u distribuciji. CP95 je često veći od maksimalne vrijednosti u distribuciji jer je manje osjetljiv na pogrešna mjerenja. Obično se prikupljaju mjerenja s više različitih mjesta u sustavu i izračunavaju različite vrijednosti CP95 za svako pojedino mjesto. [1]



Slika 3.7. Izračun vrijednosti CP95 u distribuciji grafičkom metodom[1]

Slika 3.8. prikazuje histogram CP95 vrijednosti prikupljenih iz različitih mjesta, koja služi za sumiranje mjerenja i vremenski i prostorno. CP95 vrijednost se također može odrediti iz ovog histograma i koristiti kao referentna vrijednost cijelog sustava.



Slika 3.8. Histogram vrijednosti CP95 ukupnog harmoničkog izobličenja napona na različitim mjestima[1]

### 3.4.2. Karakterizacija mjerenja trofaznih harmonika napona

Harmonički udio svake pojedine faze napona je drugačiji i to predstavlja problem u karakterizaciji harmonika napona pri trofaznom mjerenju gdje razina izobličenja varira na svakoj fazi.

Postoje dvije moguće metode:

1. Promatrati svaku fazu odvojenim mjerenjem. Potencijalni problem kod ove metode je što često razina izobličenja prelazi zadanu razinu izobličenja.
2. Promatrati prosječnu razinu izobličenja na sve tri faze. Svaka faza u stacionarnom stanju doprinosi jednu razinu izobličenja. Mogući nedostatak ove metode je da visoka razina izobličenja na jednoj fazi prikrije nisku razinu izobličenja na preostale dvije faze.

Druga metoda ima manju vjerojatnost pogreške i zato se ona uglavnom koristi pri izračunu pokazatelja harmoničkog izobličenja. [1]

### 3.4.3. Definicija pokazatelja harmoničkog izobličenja

Pokazatelji harmoničkog izobličenja razvijeni su kako bi se pomoglo u procjeni kvalitete usluge vezane za harmoničko izobličenje napona za određeni krug. Ovi pokazatelji mogu se primijeniti na različitim dijelovima sustava. Vrijednost pokazatelja za cijeli sustav je koristan podatak, ali on ne služi za točan prikaz kvalitete pružene usluge za svakog pojedinog potrošača.

Međutim, može se koristiti kao standard po kojemu se vrijednosti pokazatelja za određena područja u okviru distribucijskog sustava mogu uspoređivati. [1]

Ukupno harmoničko izobličenje sustava CP95 (STHD95) predstavlja vrijednost CP95 distribucije za svaki pojedini segment kruga vrijednosti CP95 ukupnog harmoničkog izobličenja napona kao što je prikazano na slici 3.8. STHD95 se definira jednačinama (3-3) i (3-4):

$$\frac{\sum_{-\infty}^{STHD95} f_t(CP95_s) x L_s}{\sum_{-\infty}^{\infty} f_t(CP95_s) x L_s} = 0.95 \quad (3-3)$$

$$\frac{\sum_{-\infty}^{CP95_s} f_s(x_i)}{\sum_{-\infty}^{\infty} f_s(x_i)} = 0.95 \quad (3-4)$$

gdje je:

- s – broj segmenta u krugu
- i – broj mjerenja ukupnog harmoničkog izobličenja
- $L_s$  – isporučeni kVA od s segmenta u krugu
- $f_s(x_i)$  – vjerojatnost distribucijske funkcije sastavljene od odabranih ukupnih harmoničkih izobličenja za s segment kruga
- $CP95_s$  – 95%-tna kumulativna vrijednost, to je statistička veličina koja predstavlja vrijednost ukupnog harmoničkog izobličenja i veća je od 95% uzoraka distribucije za s segment kruga
- $f_t(CP95_s)$  – vjerojatnost distribucijske funkcije sastavljene od pojedinačnih vrijednosti CP95 ukupnog harmoničkog izobličenja za svaki segment kruga

Degradacija opreme zbog harmonika često je rezultat kontinuiranog izobličenja tijekom dugog vremenskog razdoblja. Visoka razina ukupnog harmoničkog izobličenja nakon relativno kratkog vremena ne može previše utjecati na krajnjeg korisnika ili uslužnu opremu. Vrijednost CP95 zanemaruje najviša izobličenja uzoraka, što znači da 5 % uzoraka može imati vrlo visoku razinu ukupnog harmoničkog izobličenja bez značajnijeg utjecaja na vrijednost pokazatelja harmonika.

IEEE standard 519 kaže da ukupno harmoničko izobličenje ne smije biti prekoračeno više od jedan sat dnevno, što je oko 4 % vremena. Dakle, vrijednost  $STHD_{95}$  otprilike će odgovarati dozvoljenoj granici trajanja prekomjerne vrijednosti ukupnog harmoničkog opterećenja u IEEE standardu. [1]

Ukupno prosječno harmoničko izobličenje sustava  $SATHD$  (eng. System average total harmonic distortion) temelji se na srednjoj vrijednosti raspodjele ukupnog harmoničkog izobličenja napona izmjerenoj na svakom segmentu kruga, a ne na  $CP95$  vrijednosti.  $SATHD$  je standard kvalitete električne energije definiran jednadžbama (3-5) i (3-6):

$$SATHD = \frac{\sum_{s=1}^k L_s \times MEANTHD_s}{L_T} \quad (3-5)$$

$$MEANTHD_s = \frac{\sum_{i=1}^{N_{MW}} THD_i}{N_{MW}} \quad (3-6)$$

gdje je:

- s – broj segmenta u krugu
- k – ukupan broj segmenata kruga u sustavu koji se ocjenjuje
- $L_s$  – isporučeni kVA od segmenta s u krugu
- $L_T$  – ukupni isporučeni kVA od sustava koji se ocjenjuje
- i – broj mjerenja
- $THD_i$  – ukupno izobličenje napona i-tog mjerenja
- $N_{MW}$  – ukupan broj mjerenja prikupljenih za određeni segment tijekom razdoblja praćenja
- $MEANTHD_s$  – statistička srednja vrijednost ukupnog harmoničkog izobličenja dobivena od svih mjerenja za segment s u krugu

Omjer pokazatelja ukupnog prosječnog prekomjernog harmoničkog izobličenja sustava  $SEATHDRI_{THD}$  (eng. - System average excessive total harmonic distortion ratio index  $_{THD}$ ) predstavlja mjeru za broj mjerenja koja pokazuju da vrijednost ukupnog harmoničkog izobličenja prelazi određenu granicu. Pokazatelje učestalosti pojavljivanja harmonika u stacionarnom stanju je teško izračunati jer harmonici ne pokreću mjerenja.

Aproksimacija broja prekoračenja određene vrijednosti ukupnog harmoničkog izobličenja može se izračunati iz omjera ukupnog prekoračenja harmoničkog izobličenja uzorka i ukupnog broja uzoraka. Ovaj omjer predstavlja učestalost pojave prekoračenja vrijednosti praga ukupnog harmoničkog izobličenja. [10]

SAETHDRI<sub>THD</sub> se definira sljedećom jednačinom:

$$SAETHDRI_{THD} = \frac{\sum_{s=1}^k L_s x \left( \frac{N_{THD_s}}{N_{MW_s}} \right)}{L_T} \quad (3-7)$$

- gdje je:
- s – broj segmenta u krugu
  - k – ukupan broj segmenata kruga u sustavu koji se ocjenjuje
  - L<sub>s</sub> – isporučeni kVA od segmenta s u krugu
  - L<sub>T</sub> – ukupni isporučeni kVA od sustava koji se ocjenjuje
  - i – broj mjerenja
  - THD – određena vrijednost praga ukupnog harmoničkog izobličenja za izračun pokazatelja
  - N<sub>THD<sub>s</sub></sub> – broj mjerenja u stacionarnom stanju koji pokazuje vrijednost ukupnog harmoničkog izobličenja za segment koji prelazi određenu vrijednost praga ukupnog harmoničkog izobličenja
  - N<sub>MW<sub>s</sub></sub> – ukupan broj mjerenja prikupljenih za segment s tijekom razdoblja praćenja

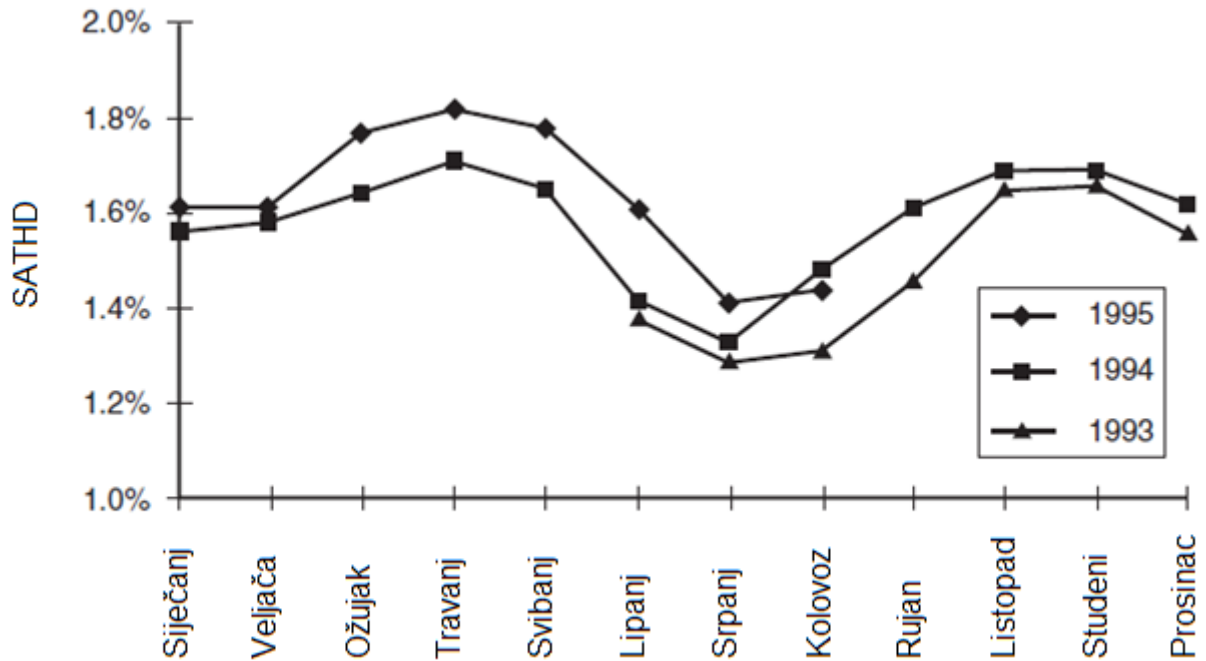
SAETHDRI<sub>THD</sub> određuje mjeru da dio vremena određeni sustav može prijeći vrijednost praga ukupnog harmoničkog izobličenja. Naprimjer, može se koristiti SAETHDRI<sub>5%</sub> što znači da određeno vrijeme definirani sustav prelazi vrijednost praga ukupnog harmoničkog izobličenja od 5 %. [1]

#### 3.4.4. Sezonski utjecaj na harmonike

Harmoničko izobličenje ovisi sezonski o danu, tjednu i mjesecu. Slika 3.8. prikazuje SATHD pokazatelj za vrijeme praćenja od 27 mjeseci. Tu je sezonsko odstupanje vrlo istaknuto. Ukupno harmoničko izobličenje napona teži nižim vrijednostima tijekom zimskih i ljetnih mjeseci, te ka višim vrijednostima tijekom proljeća i jeseni. [1]



Period s niskim ukupnim harmoničkim izobličenjem odgovara periodu velikih opterećenja uzrokovanih grijanjem i hlađenjem klima uređajima. Očito je da klima uređaji više prigušuju ukupno harmoničko izobličenje od uređaja za grijanje. Konfiguracija kondenzatora može se promijeniti za vrijeme ovih sezona što također može utjecati na ukupno harmoničko izobličenje.



Slika 3.9. Vrijednosti SATHD pokazatelja po mjesecima za razdoblje od 1.6.1993 do 1.9.1995[3]

Iz slike 3.9. vidljivo je da SATHD pokazatelji imaju trend porasta tijekom razdoblja praćenja od dvije godine. To znači da postoji razlog za zabrinutost oko mogućeg porasta proizvodnje harmonika iz elektroničkih uređaja. Porast harmoničkog izobličenja može se pripisati i porastu uporabe nelinearnih opterećenja. [1]

## **4. UGOVORI O KVALITETI ELEKTRIČNE ENERGIJE**

Nakon odabira ciljanih karakteristika koje se ocjenjuju, isporučitelji električne energije sklapaju sporazumne ugovore s krajnjim korisnicima uzimajući u obzir odstupanja kvalitete električne energije. Budući da to nije jednostavan postupak, bilo je lakše kada su krajnji korisnici sklapali ugovore samo sa jednim isporučiteljom usluge. Promjene u elektroprivredi dodatno kompliciraju situaciju u mnogim područjima. [1]

U donošenju odluka o ugovoru sudjeluje sljedećih pet subjekata:

1. pružatelj prijenosa električne energije
2. pružatelj distribucije električne energije
3. jedan ili više nezavisnih proizvođača električne energije
4. tvrtka energetske usluge
5. krajnji korisnik

Kako bi zadovoljili radne zahtjeve krajnjeg korisnika, mogu se potpisati ugovori između svih tih subjekata. Iako je većina odstupanja kvalitete električne energije posljedica zbivanja u distribucijskom sustavu, može biti i posljedica poremećaja prijenosnog sustava koji ima utjecaj na velikom prostoru. Prisilni zastoji u elektranama mogu biti uzrokovani vrhuncem elektroenergetskog tržišta ili problemom oko regulacije napona ako napajanje postaje ograničeno. Tvrtka energetske usluge je odgovorna za financijske obveze i koordinaciju dogovora i predstavlja jedinu točku s kojom kontaktira krajnji korisnik. [1]

### **4.1. Ugovori o odstupanju efektivne vrijednosti**

Prvi cilj Inter konekcijskih ugovora je educirati krajnje korisnike sa stvarnim događajima pri prijenosu električne energije i troškovima vezanim uz naponske propade i prekide. Njihov drugi cilj je uspostaviti neke formalne načine kako se snimaju usluge i ocjenjuju eventualni kvarovi u sustavu napajanja električnom energijom.

Neka od ključnih pitanja koja treba riješiti su:

1. očekivani broj prekida tijekom godine,
2. očekivani broj naponskih propada ispod određene razine tijekom godine; razina se može definirati u odnosu na određeni broj kao što je 70 ili 80 posto,
3. način na koji krajnji korisnici mogu ublažiti odstupanja efektivne vrijednosti,
4. odgovornosti isporučitelja usluge u analizi karakteristika isporuke električne energije, praćenja kvarova itd.,
5. održavanje napora za smanjenje broja kvarova za događaje koji su pod kontrolom usluge.

## **4.2. Ugovori o harmonicima**

Iako harmonici nisu toliko rašireni problem kao što su odstupanja efektivne vrijednosti napona, harmonici iz elektroničkih opterećenja mogu ozbiljno utjecati na opremu drugih krajnjih korisnika. U nekim slučajevima oprema ne radi ispravno, dok u drugim slučajevima može uzrokovati smanjenje životnog vijeka opreme. Zbog toga su ugovori o harmonicima vrlo važni.

Glavni alat za ocjenu utjecaja harmonika na sučelje isporučitelj-potrošač je IEEE standard 519-1992. To je dvosjekli mač jer jedan dio tog standarda ograničava harmonike struje koje krajnji korisnik može injektirati u sustav, dok drugi dio učinkovito određuje minimalne zahtjeve za isporučitelja električne energije. Ugovori o harmonicima bi trebali održavati ovu bilateralnu prirodu. [1]

Neka od ključnih pitanja koja treba riješiti su:

1. definiranje zajedničke spojne točke,
2. ograničenje razine harmoničkog izobličenja struje u zajedničkoj spojnoj točki od strane IEEE standarda 519-1992 ili iznimno na neku drugu određenu vrijednost,
3. raspored periodičnog održavanja filtra i druge pomoćne opreme; neka oprema zahtijeva stalno praćenje s trajno instaliranim uređajima,
4. odgovornosti isporučitelja usluga, kao što su:
  - a. vođenje sustava izvan harmoničke rezonancije,
  - b. vođenje evidencije o novim opterećenjima koja se nalaze u sustavu,
  - c. izvođenje inženjerske analize opterećenja za svako novo opterećenje kako bi se spriječilo pogoršanje postojećih problema,

- d. educiranje krajnjih korisnika o mogućnostima ublažavanja,
  - e. periodično ili trajno nadziranje pomoću instaliranih uređaja za provjeru ispravnosti rada sustava,
5. definiranje odgovornosti za ublažavanje troškova kada se prekorače određene granične vrijednosti; je li odgovoran posljednji krajnji korisnik koji je stvorio višak opterećenja ili se trošak dijeli između razreda krajnjih korisnika i isporučitelja usluge.

### **4.3. Primjer ugovora**

Jedan od najčešće objavljenih primjera ugovora je onaj između Detroit Edisona i tri velika proizvođača automobila (Chrysler Corporation, Ford Motor Company i General Motors Corporation). Uvjeti su navedeni u ugovoru poznatom kao „Posebna“ izrada ugovora. Ugovor jamči pružanje usluge, te pokriva naponske prekide i propade uz naknadu. [1]

Kao odgovor na pritiske konkurencije, Detroit Edison je napravio 10-godišnji ugovor s potrošačima kao jedini isporučitelj električne energije. On je davao jamstvo zabrinutim potrošačima da će rješavati probleme kvalitete električne energije tijekom cijelog trajanja ugovora. Zbog toga je u ugovoru navedeno da će potrošačima isplatiti naknadu za zahtijevanu kvalitetu, ako ne ispuni godišnje ciljeve kvalitete električne energije. Dogovorena je razina naknade za kupce koji stvaraju gubitke zbog prekida. Te razine su fiksne za vrijeme trajanja ugovora. U početku su u ugovor bili uključeni samo naponski prekidi, a 1998. godine je Detroit Edison u ugovor dodao i naknadu za naponske propade koji su prelazili dogovorene vrijednosti.

Zbog toga je praćenje kvalitete električne energije i računanje specifičnih pokazatelja od velike važnosti. Detroit Edison je instalirao sustav nadzora kvalitete električne energije na više od 50 mjesta na praćenom teritoriju. Nadzor kvalitete električne energije omogućuje Detroit Edisonu odrediti učestalost i ozbiljnost naponskih propada koji se javljaju na području kupca. Neki od ključnih detalja u ugovoru su naponski prekidi i propadi. [1]

Dozvoljeni broj prekida na području isporuke usluge od Daimler Chryslera i General Motorsa je 0 ili 1 prekid godišnje. Isporučitelji usluge jamče isplatu odštete u slučaju prekida prema dogovorenom iznosu koji ovisi o vrsti usluge. Na nekim se područjima električna energija isporučuje paralelno, tako da potrošači uglavnom ni ne osjete prekide isporuke. [1]

Ugovor s Fordom je malo drugačiji jer se kod njega neko područje podijeli na šest skupina gdje se dozvoljeni broj prekida kreće u rasponu od 1 do 9 prekida godišnje.

Isporučitelj jamči da će platiti odštetu u slučaju da bude više od dogovorenog broja prekida. U ugovoru je dogovoreno da isporučitelj mora svake godine smanjiti broj dozvoljenih prekida za 5 %, što zahtjeva stalno poboljšanje obilježja usluge. [1]

Ugovorom je dogovoreno da se naponski propadi naknadno prate jer Detroit Edison nije imao opremu za trenutni prikaz preciznih mjerenja kvalitete električne energije. Kasnije je instalirano 138 nadzornih monitora za trenutno praćenje kvalitete električne energije pa tako i naponskih propada. Isporučitelji električne energije i potrošači su na inzistiranje potrošača sklopili ugovor o naponskim propadima nakon dvije godine mjerenja i praćenja kvalitete električne energije iako je preporučeno da se kvaliteta električne energije snima tri godine kako bi se dobilo što preciznije mjerenje.

Nadzorni monitori su postavljeni za mjerenje faznih i linijskih napona na sabirnicama. Svaki monitor za praćenje kvalitete električne energije automatski izvrši mjerenje nekoliko puta dnevno koristeći tri modema, od kojih je svaki posvećen jednom potrošaču. Mjerenja se potom pohranjuju u bazu podataka i tamo se može vidjeti svako izvršeno mjerenje. Iz izmjerenih podataka mogu se odrediti odstupanja efektivne vrijednosti napona i izračunati pokazatelji naponskih propada. [1]

1998. godine u ugovor se dodaje pet pravila koja određuju koji naponski propadi zadovoljavaju uvjete za isplatu odštete:

1. Efektivna vrijednost napona na bilo kojoj fazi ne smije pasti ispod 0.75 p.u., pri čemu nema vremenskog ograničenja za trajanje naponskog propada jer svi propadi ispunjavaju uvjete. Vrijednost praga određena je na temelju rezultata mjerenja i razgovora s potrošačima.
2. Naponski propadi koji su uzrokovani od strane potrošača isključeni su iz naponskih propada i ne zadovoljavaju uvjete.
3. Naponski propadi koji se mjere na ne nabijenim kondenzatorima ne zadovoljavaju uvjete. To je automatski određeno programom.
4. Samo najveći pad napona (najniža efektivna vrijednost napona) u 15-minutnom intervalu na nekom mjestu može se kvalificirati. 15-minutni interval počinje kada je otkriven prvi propad u kronološkom popisu propada i završava kada se otkrije posljednji propad u intervalu ili u točki 15 minuta nakon prvog propada. Naponski propadi koji se javljaju nakon toga 15-minutnog intervala smatraju se dijelom sljedećeg intervala i ocjenjuju se pojedinačno.

5. Ako se izmjeri naponski prekid tijekom 15-minutnog intervala, tada se svi naponski propadi koji se izmjere na tom mjestu nakon prekida neće kvalificirati.

Definicija ocjene propada kaže da je ocjena propada prosječna p.u. vrijednost napona izgubljena na svakoj fazi za najniži kvalifikacijski naponski propad unutar 15-minutnog intervala. To je definirano jednadžbom (4-1):

$$\text{Ocjena propada} = 1 - \frac{V_A + V_B + V_C}{3} \quad (4-1)$$

Kod prekida se ocjena naponskog propada definira kao nula kako bi se spriječilo preklapanje naponskih prekida i propada. Ako je bilo koji od faznih napona veći od 1 p.u. zbog neutralne promjene tijekom propada napona, onda se on postavlja na vrijednost 1 p.u. prije izračunavanja ocjene propada. Ova dva pravila ograničavaju ocjenu propada u rasponu od 0.0833 do 1. Minimalna ocjena propada od 0.0833 odgovara stanju u kojem je napon na jednoj fazi 0.75 p.u., što je vrijednost praga za kvalifikacijski naponski propad, a na druge dvije faze napon je postavljen na 1 p.u. [1]

Ciljana ocjena propada je maksimalni zbroj vrijednosti ocjena propada dozvoljenih za grupu nekog područja. Ocjene propada za sve kvalifikacijske propade u grupi zbrajaju se i uspoređuju s ciljanom ocjenom propada grupe. Ako je ukupna ocjena propada veća od ciljane, onda se računa naknada. [1]

Ugovorom je određeno da se ciljane ocjene propada grupe računaju ponovo na početku svake godine. Ciljana ocjena propada grupe određuje se računanjem prosječne vrijednosti ocjene propada grupe za naponske propade koji se prikupljaju od 1995. godine do danas. Ciljana ocjena propada postupno se stabilizira s uključenjem podataka svake nove godine. [1]

Iznos odštete za naponske propade računa se iz viška koji nastane kada se zbroje određene ciljane ocjene propada. Navedeni višak pomnoži se s ugovorenim godišnjim iznosom i dobije se iznos odštete. Naprimjer, neka je ugovoreni godišnji iznos 100000 \$ i ciljana ocjena propada 3.0. Neke je dobivena vrijednost ocjene propada 3.28, tada odšteta iznosi 0.28 puta 100000 \$, što je 28000 \$. Alternativna metoda ocjene naponskih propada je da se propadi kategoriziraju na temelju njihovih veličina. Svaka veličina ima određenu razinu odštete za isplatu. Međutim, to je proizvelo velike oscilacije u plaćanju i razočaralo potrošače. Jedina značajna korist od ove metode ocjene naponskih propada je ne mogućnost naglih promjena u ocjeni propada i iznosu odštete. [1]

#### **4.4. Police osiguranja kvalitete električne energije**

Nudeći vrhunsku uslugu isporučitelj zahtijeva, bilo od distribucijske kompanije ili davatelja električnih usluga (isporučitelja usluge), da naplati uslugu na takav način da od nje profitiraju i potrošači i isporučitelji usluge. Korištenjem modela polica osiguranja u kojima se potrošači pretplate na željenu razinu poboljšanja kvalitete električne energije, osigurat će im da neće platiti više od vlastite percepcije vrijednosti ili pogodnosti povezane s uslugom kvalitete električne energije. Pogodnosti za potrošača su jedinstvene u tome da odražavaju funkciju štete svakog pojedinog potrošača, uključujući korisničku nesklonost riziku. Pogodnosti isporučitelja usluge odražavaju rizik povezan s ponudom osiguranja i uključuju povrate koji odgovaraju poslovanju u novom okruženju. [1]

Program vrhunske usluge kvalitete električne energije koristi poslovni model koji uključuje premije i odštetne zahtjeve. Isporučitelj usluge nudi plan osiguranja kvalitete električne energije. Potrošači plaćaju premije za određenu razinu usluge, a isporučitelj usluge izravno plaća potrošaču događaje koji prelaze dogovorene uvjete za tu uslugu. Potrošači su motivirani platiti premiju kako bi smanjili neizvjesnost i/ili očekivanu vrijednost njihovih troškova za štetu. Isporučitelji usluge preuzimaju financijski rizik povezan sa zahtjevima za povrat ukupnih premija.

Isporučitelji električne energije uslugu osiguranja mogu iskoristiti isključivo za financijsku politiku ili za investiranje u opremu za poboljšanje kvalitete električne energije. U oba slučaja je ključna prednost pristupa osiguranja da preko naplate usluge omogućuje potrošačima da sami odaberu odgovarajuće rješenje iz politike koja je dizajnirana bez korištenja podataka o troškovima za štetu potrošača. Isporučitelji električne energije mogu stvoriti čisto financijsko osiguranje proizvoda u kojem garantiraju potrošačima pouzdanost događaja obuhvaćenih dogovorenim politikom, a potrošači plaćaju premije. [1]

Isporučitelji na području potrošača rade procjenu očekivane učestalosti kvarova. Kako su očekivane učestalosti kvarova razlikuju za različita područja, tako se razlikuju i premije osiguranja. Premija se izračunava prema načelu pravednog osiguranja s odgovarajućom granicom smanjenja razine rizike i povrata za isporučitelje električne energije. Police osiguranja uglavnom sklapaju potrošači koji nisu skloni riziku ili koji imaju velika očekivanja od svojih zahtjeva prema isporučiteljima.

Isporučitelji mogu uvelike unaprijediti kvalitetu električne energije osiguranjem proizvoda ako mogu ponuditi ulaganje u kvalitetu električne energije što igra veliku ulogu.

Donošenjem takve odluke o ulaganju, isporučitelji mogu ponuditi osiguranje proizvoda s isplatom visokih odšteta i poboljšanjem kvalitete usluge potrošačima. Kako bi razvili takve proizvode, isporučitelji moraju ulagati u različita rješenja kvalitete električne energije zbog implementacije za skupine potrošača sa sličnim događajima i na sličnim mjestima. Naprimjer, mogu postojati četiri različite vrste ulaganja u kvalitetu električne energije za period od razvoja programa do ugradnje u sustave besprekidnog napajanja kod potrošača. Za svako moguće rješenje, isporučitelji procjenjuju troškove rješenja i rezultate poboljšanja kvalitete električne energije. Na temelju tih troškova i očekivane štete nakon ostvarenog ulaganja, isporučitelji mogu osmisliti takvo osiguranje proizvoda koje će pokriti njihove ukupne troškove i pružiti potrošačima osiguranu razinu poboljšanja kvalitete električne energije. Tablica 4.1. prikazuje pet općih kategorija problema kod kvalitete električne energije i pripadajuću strukturu plaćanja odštete. [1]

Tablica 4.1. Struktura plaćanja odštete za osiguranje kvalitete električne energije u pet glavnih kategorija

Kategorija kvalitete električne energije	Struktura plaćanja odštete
odstupanje efektivne vrijednosti	\$ / događaju kategoriziranom prema visini odstupanja od dozvoljene vrijednosti
trajni prekidi	\$ / događaju \$ / satu
regulacija napona	\$ / satu kategorizirana s potrebnom veličinom pokazatelja
harmonici	\$ / satu kategorizirani s potrebnom komponentom i veličinom pokazatelja
prijelazne pojave	\$ / satu kategorizirane s potrebnom veličinom pokazatelja

#### 4.4.1. Izrada police osiguranja

Ciljevi sustava osiguranja kvalitete električne energije su naknada troškova za pruženi plan, jednaka svim potrošačima unutar jedne grupe temeljena na iznosima premija, poboljšanje učinkovitosti korištenja resursa, te razumijevanje i prihvatljivost. [1]

Sustav osiguranja smatra se pravednim ako su očekivani troškovi za štetu jednaki plaćenim premijama. Naprimjer, neka je vrijednost usluge potrošača  $x$  \$ / kW, vjerojatnost prekida usluge  $r$ , a očekivana dobit potrošača od električne energije  $(1 - r)x$ .



Ako je sustav osiguranja takav da premija od  $p$  \$ / kW rezultira isplatom osiguranja iznosa  $x$  \$ / kW u slučaju prekida. To znači da će potrošač koji je platio osiguranje sa sigurnošću dobiti iznos:

$$[rx + (1-r)x - p] = x - p \quad (4-2)$$

Potrošač će platiti osiguranje ako je:

$$x - p > rx \quad (4-3)$$

kada je  $p = (1-r)x$ , odnosno kada je sustav osiguranja pravedan i temeljen na troškovima.

Dizajniranje osnovnog područja financijske opcije osiguranja uključuje sljedeće korake:

1. korak: Izračunavanje određene vjerojatnosti prekida nekog područja koristeći povijesne podatke o prekidima. Naprimjer, vjerojatnost prekida koji traje duže od jednog sata:

$$r(>1h) = \frac{\text{ukupno godišnje trajanje prekida u satima}}{8760 h}$$

2. korak: Izračunavanje pravednih premija za određene isplate. Naprimjer, ako je isplata = 1 \$ / kW neisporučene električne energije i  $r(>1h) = 0.0002$ , onda pravedna premija iznosi 0.0002 \$ / kW neisporučene električne energije.
3. korak: Prilagođavanje premija za određivanje marže. Naprimjer, neka pravedna premija iznosi 0.0001 \$ / kW neisporučene električne energije, dogovorena premija tada iznosi 0.0003 \$ / kW neisporučene električne energije.
4. korak: Određivanje radnih uvjeta:
  - a. Pretplata: Potrošač sudjeluje u pretplati kao što je opisano u prethodna tri koraka. On mora odrediti koliko kilovata neisporučene električne energije želi osigurati u razdoblju od 1 godine. Godišnja premija se izračunava kao umnožak zbroja kW neisporučene električne energije i premije / kW. Premija se plaća unaprijed bez obzira na to hoće li se prekid isporuke električne energije uopće dogoditi.
  - b. Pravo na isplatu: Potrošač se isplaćuje prema razini premije koju je platio isporučitelju usluge. U ovom slučaju isplaćuju se samo prekidi rada koji traju duže od 1 sata.

#### 4.4.2. Prilagođavanje troškova ulaganja za kvalitetu električne energije

Prethodno opisana izrada polica osiguranja odnosi se na sustave osiguranja u koja nisu uključena ulaganja u tehnologije za poboljšanje kvalitete električne energije.

U slučaju da isporučitelj usluge želi ulagati u takvu tehnologiju, onda se troškovi ulaganja dodaju u premije kao što je prikazano jednadžbom (4-4):

$$p = (r')y + \text{troškovi ulaganja} + \text{marža} \quad (4-4)$$

gdje je  $r'$  vjerojatnost prekida nakon ulaganja, a  $y$  je isplata po prekidu. [1]

Činjenica je da se ulaganja u kvalitetu električne energije često financiraju u razdoblju od nekoliko godina, te se u mnoga od njih mora stalno ulagati, pa se zato postavlja pitanje hoće li potrošač zadržati policu osiguranja dovoljno dugo da bi platio troškove investicije. U takvim slučajevima polica osiguranja treba imati klauzulu koja navodi da ulaganje u kvalitetu električne energije traje puno dulje od trajanja police, te da je potrošač odgovoran za plaćanje svog dijela troškova za investiranje. [1]

Isporučitelji nude određena osiguranja proizvoda koja mogu ovisiti o minimalnom broju pretplata potrošača, tj. minimalnog ukupnog prihoda od premija. U tom slučaju, isporučitelji nude policu osiguranja koja može biti zasnovana na razini pretplate potrošača.

## **5. UKLJUČIVANJE KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE U PLANIRANJE DISTRIBUCIJE**

Tradicionalni pristup u planiranju distribucijskog sustava zahtijeva najisplativije nadogradnje sustava, vremenski ograničene kako bi se zadovoljilo očekivano povećanje vršnog opterećenja. Najvažnije obilježje planiranja distribucije je pouzdanost. Kvaliteta električne energije nije izričito uključena u planiranje, osim ako isporučitelj električne energije u ugovoru o kvaliteti električne energije ima značajne kazne. [1]

Razlozi praćenja kvalitete električne energije mogu se opravdati promjenom investicijskog plana kako bi se osigurala bolja kvaliteta usluge, dovoljni kapacitet i pouzdanost. Ako su troškovi za gubitak proizvodnje, čišćenje i oštećenje opreme uključeni u određenoj mjeri, tada će vjerojatno investicijski plan izabrati i isporučitelji usluge i potrošači. Ranije odabrani pokazatelji osiguravaju sredstva za kvantificiranje kvalitete električne energije i pokazuju se potrošačima za procjenu mogućnosti planiranja tamo gdje je kvaliteta usluge od velike vrijednosti. Veliki je izazov izračunati pokazatelje na protagonističkim modelima umjesto na povijesnim podacima. [1]

### **5.1. Proces planiranja**

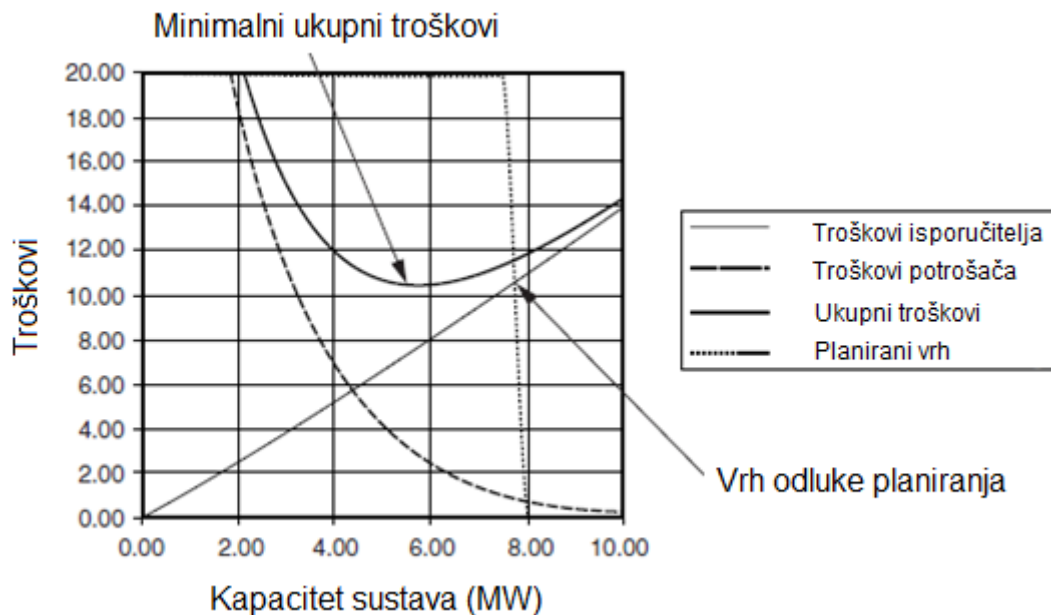
Slika 5.1. prikazuje jedan od načina kako usporediti opće kriterije planiranja investicija usluge s tradicionalnim i konkurentskim kriterijima. Tradicionalni kriteriji predstavljaju velike gubitke potrošačima za neposluženo opterećenje. Zato je najbolja odluka da se može poslužiti očekivano vršno opterećenje uz minimalne troškove. To se često naziva planiranje uz minimalni trošak. Rizik da će se vršno opterećenje razlikovati od prognoziranog preuzima isporučitelj, pa se zato investira u više kapaciteta nego što je stvarno potrebno.

U konkurentskom poslovnom okruženju, isporučitelj mora preuzeti više rizika s neisplativim ulaganjima, dok potrošači i isporučitelji zajedno dijele rizike za neposluživanje opterećenja. To dovodi do razmatranja troškova za štetu potrošačima u odlukama planiranja, kao što je prikazano na slici 5.1.. Kako se kapacitet sustava povećava, vjerojatnost troškova za štetu potrošačima zbog zastoja se smanjuje.[1]

Optimalna odluka planiranja teoretski bi se smanjila u obliku krivulje ukupnih troškova prema slici 5.1. Ako su troškovi potrošača veći, točka optimalnog kapaciteta sustava će se pomicati udesno.

Iako ova odluka može biti sveukupno ekonomičnija, isporučitelj teško može pronaći preciznu procjenu troškova za odštetu potrošačima i zbog toga nema opravdani razlog za izgradnju sustava s manjim kapacitetom. [1]

To se teško može opravdati čak i ako se zna da će troškovi potrošača biti mali. U ovom poglavlju su uglavnom prikazane skupe investicije koje se mogu opravdati na temelju troškova prema krajnjim korisnicima s osjetljivim opterećenjima.



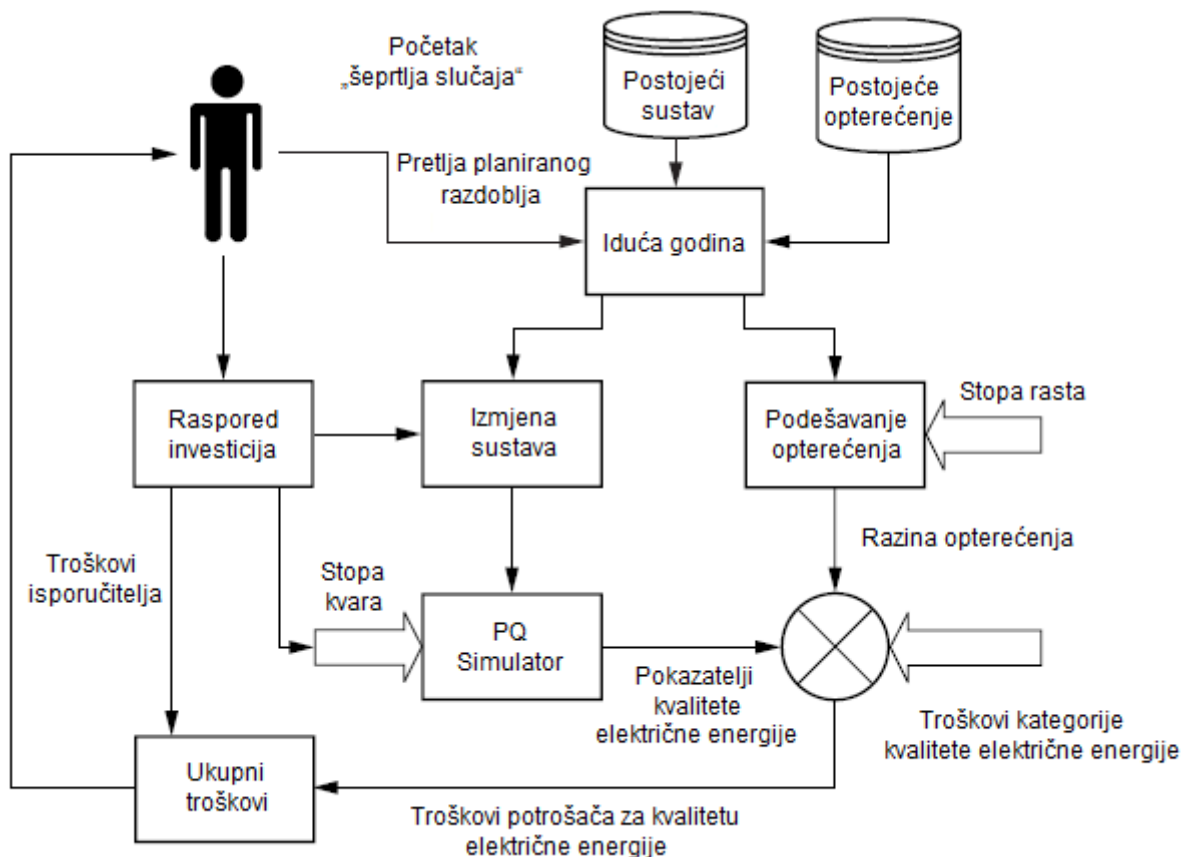
Slika 5.1. Troškovi koji utječu na odluke planiranja[3]

Odluke planiranja prikazane na slici 5.1. uglavnom se odnose na kapacitet sustava koji neizravno pokazuje njegovu pouzdanost. Utjecaj kvalitete električne energije je važan, ali ne i presudan faktor. Uključivanje troškova kapaciteta i kvalitete električne energije u isti proces planiranja zahtijeva investicije koje poboljšavaju kvalitetu električne energije cijelog sustava i utječu na više od jednog potrošača. [1]

Slika 5.2. prikazuje okvir planiranja koji podržava planiranje kvalitete električne energije i druge dodatne zahtjeve. Osnovni slučaj je postojeći sustav bez planiranih investicija ili tzv. „šeptrljavi“ slučaj. Karakteristike sustava se tada simuliraju tijekom razdoblja planiranja od obično 5 do 10 godina kako bi se održalo rizično poslovno okruženje usluge. Pojedinačni troškovi usluge mogu biti u osnovnom scenariju postavljeni na nulu ili mogu uključivati kontrolu vegetacije i troškove popravka kvarova, ako su oni uključeni u slučaj. [1]

Tokom svake godine se ispituju obilježja kvalitete električne energije sustava te se zbrajaju troškovi za štetu potrošačima koji su se nakupili tijekom promatranja sustava. Troškovi za štetu produkt su pokazatelja obilježja sustava na svakom opterećenju sabirnica, a potrošačkim troškovima odgovara svaki pokazatelj. Kako bi se pojednostavilo promatranje, određuju se samo razumne procjene troškova za potrošače sa visoko vrijednim opterećenjima.

Na kraju simulacije planiranog razdoblja procjenjuju se ukupni neto troškovi usluge i potrošača. To postaje trošak osnovnog slučaja, odnosno „šeptrlja slučaja“. Svako dobro planiranje mora imati manje ukupne neto troškove nego što su bili u osnovnom slučaju. [1]



Slika 5.2. Proces planiranja kvalitete električne energije [1]

Dizajniranje alternativa za poboljšanje kvalitete električne energije u planiranju rasporeda novih investicija zahtijeva promjene postavki zaštitnih uređaja, promjene kontrole vegetacije itd. Neke promjene utječu na stopu kvara, vrijeme obnove, promjenu osnovnog sustava, a neke rezultiraju planiranjem investicija za nadogradnju sustava. [1] Sustav se ponovno simulira tijekom razdoblja planiranja s tim promjenama i ponovno se računaju ukupni troškovi s novim vrijednostima.

Tu je važno naglasiti da porast opterećenja i podatke o troškovima ne treba mijenjati tijekom ove simulacije, ali se mogu mijenjati kad se procjenjuje rizik za različite scenarije planiranja. [1]

Ovaj proces se može koristiti za procjenu distribucije, upravljanje na strani potrošnje i automatizaciju distribucije ugrađivanjem odgovarajućih simulatora.

## **5.2. Rizik u odnosu na očekivanu vrijednost**

Osnovni proces planiranja prikazan na slici 5.2. prilagođen je smanjenju očekivane vrijednosti ukupnih troškova. To je danas najčešća praksa, ali to treba prilagoditi kako bi se bolje razmotrio rizik.

Odluke planiranja temelje se na nesigurnim procjenama kojima su dodijeljene vjerojatnosti. Nakon prolaska promatranog vremenskog razdoblja biti će poznat scenarij planiranja i optimalno rješenje. Vrlo vjerojatno neće biti odabrano optimalno rješenje niti će se pogrešne odluke u planiranju moći u potpunosti ispraviti. Dakle, uvijek će biti odstupanja između stvarnih i predviđenih troškova. [1]

Tipična minimalizacija troškova je ekvivalent za minimalno linearno odstupanje od optimalnog rješenja. Još se koristi i popularna Euklidova norma kako bi se smanjilo odstupanje od optimalnog rješenja. Obje procjene očekivanih vrijednosti i procjene rizika zahtijevaju procjenu vjerojatnosti za razne prognoze planiranja. Za velike investicije u konkurentskom poslovnom okruženju procjena rizika uglavnom će biti puno točnija. [1]

## **5.3. Sustav alata za simulaciju**

Simulacijski alati se koriste za potraživanje podataka kod jednostavnih, ali nesigurnih planiranja, dugoročnih planiranja kapaciteta, za detaljnija i složenija planiranja, te za dizajn i operativna istraživanja. Analiza podataka o kvaliteti električne energije zahtijeva sve više detalja, čak i za planiranje nekog istraživanja. [1]

Planiranje kapaciteta obavlja se pomoću programa koji prati pozitivni slijed opterećenja s uravnoteženim opterećenjem modela koji adekvatno podržava tradicionalna istraživanja planiranja kapaciteta. Rezultat tih istraživanja je određivanje rasporeda ulaganja u nove kapacitete prema očekivanom rastu opterećenja. Najvažnije investicije uglavnom su trafostanice, transformatori i automatizacija postrojenja. Raspored ulaganja preporučuje nadogradnju postojećih objekata ili izgradnju potpuno novih.

Analiza kvarova uključuje utjecaj odstupanja efektivnih vrijednosti u proces planiranja. Izračun amplitude odstupanja efektivne vrijednosti napona na simulacijama biti će točniji ako se koriste višefazni modeli. Za sve vrste odstupanja, opterećenja se modeliraju po fazi.

Transformatori moraju bit modelirani s propisanim spojem namotaja kako bi se moglo izračunati odstupanje efektivnih vrijednosti. Europski sustavi koriste isti priključak za srednje naponske i niskonaponske sustave. Većim potrošačima su dostupni podaci o transformatoru za uporabu uređaja za koordinaciju između isporučitelja i potrošača. Manji potrošači se spajaju prema vrsti transformatora i faznog priključka.

Harmonici i prijelazne pojave predstavljaju dodatnu razinu složenosti u simulaciji kvalitete električne energije. Jedno od područja gdje postoje zanimljiva pitanja planiranja je u odnosu između kapaciteta sustava i harmonika. Usluge rutinski povećavaju kapacitet sustava i istovremeno zahtijevaju od krajnjih korisnika da isprave faktor snage svojih opterećenja kako bi se smanjila potražnja sustava. To može dovesti do ozbiljnih problema s harmonicima. [1]

Još uvijek ne postoje dovoljno snažni alati i nema dovoljno podataka da se te pojave izravno uključe u proces planiranja. Iako postoje alati za skeniranje predloženog planiranja problema s harmonicima, većina isporučitelja usluga radije bira rješavanje tih problema nakon što se oni pojave. [1]

#### **5.4. Učestalost pojavljivanja kvarova**

Jedan od ključnih ulaznih podataka za simulaciju odstupanja efektivne vrijednosti napona je učestalost pojavljivanja različitih vrsta kvarova. Najjednostavniji pristup je koristiti prosječnu učestalost pojavljivanja kvarova po jedinici duljine s prosječnim postotkom trajnih kvarova i nominalnim prijelaznim otporom na temelju karakteristika sustava. U SAD-u se pretpostavlja da je godišnja učestalost pojavljivanja kvarova 0.06 kvar/km, od čega je oko 20 % trajnih kvarova. Prijelazni otpor je obično od 1  $\Omega$  do 5  $\Omega$ , iako neki isporučitelji koriste veliki prijelazni otpor od 20  $\Omega$ . [1]

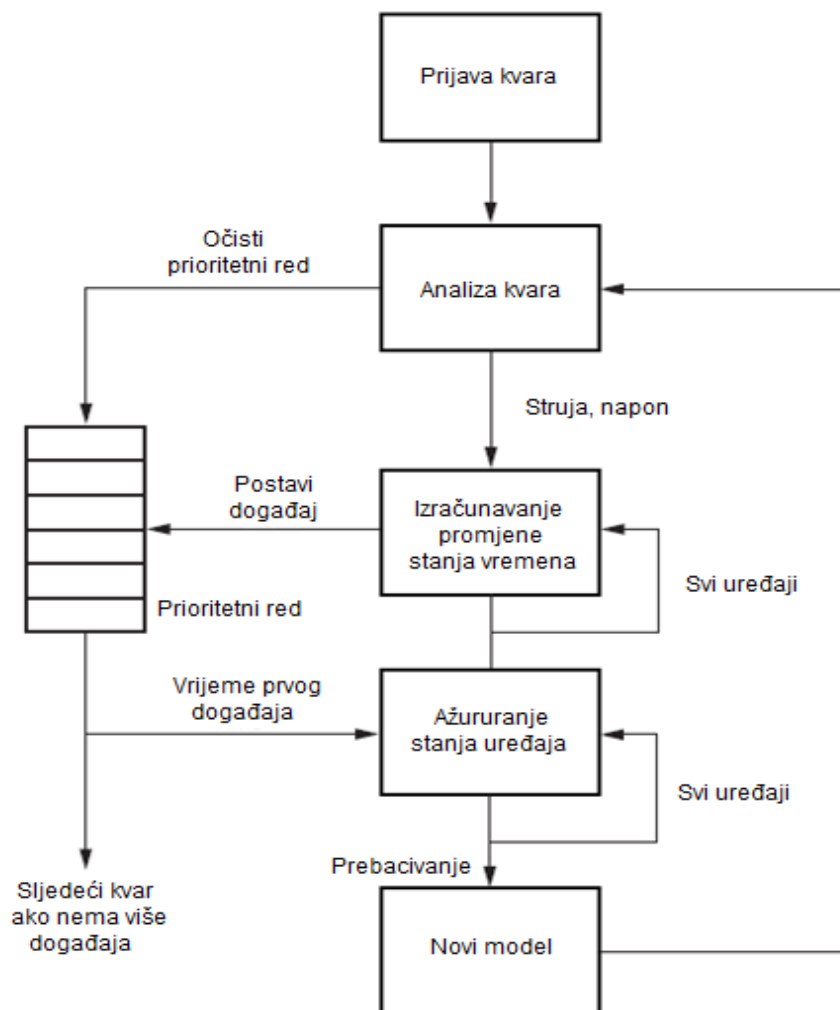
Za planiranje istraživanja važno je odvojiti kvarove uzrokovane udarom groma od kvarova uzrokovanih vegetacijom. S posebnim kategorijama kvarova postaje moguće simulirati učinak ulaganja u gromobransku zaštitu i bolju opremu za lociranje kvarova na uređajima za vrednovanje kvalitete električne energije. Bez zasebnih kategorija kvarova nije moguće ocijeniti planiranje za neke od važnih metoda za poboljšanje kvalitete električne energije.

Modeli bi također trebali moći uključiti zasebne kategorije za kvarove na trafostanicama ili visokonaponskim prijenosnim sustavima, jer se ti kvarovi ne mogu ublažiti sa protumjerama na distribucijskom sustavu. [1]

## 5.5. Odziv nadstrujnih uređaja

Ključna komponenta simulacije odstupanja efektivne vrijednosti napona je odziv nadstrujnog zaštitnog sustava. Svaki segment sustava doživi određenu stopu kvara na godišnjoj razini. Kvarovi se mogu podijeliti prema uključenju faza, postotku privremenih kvarova, otpora itd. To može dovesti do različitih nizova događaja i odstupanja efektivnih vrijednosti.

Ponašanje uređaja za popravak kvarova može biti prilično komplicirano. Slika 5.3. prikazuje jedan algoritam za obavljanje simulacije određene vrste kvara na nekom mjestu. Algoritam koristi prioritetni red uspostave operativnog vremena nadstrujnih uređaja. Detaljan algoritam višefaznog kratkog spoja izračunava naponsko opterećenje i struju zaštitih uređaja za vrijeme kvara. [1]



Slika 5.3. Algoritam za simulaciju kvara pomoću prioritetnog reda [1]



Svaki uređaj za zaštitu u sustavu koristi izračunate struje i napone za predviđanje sljedeće promjene stanja za taj uređaj, te postavlja prioritetni red promjena stanja uređaja. Nakon što su svi zaštitni uređaji analizirani, događaj s najvišim prioritetom (koji ima najmanje vrijeme) se izvršava. Taj uređaj mijenja svoje stanje između otvorenog i zatvorenog promjenom struje modela. Svi ostali uređaji koriste stvarno vrijeme za promjenu stanja i ažuriraju svoja unutarnja stanja pomoću izračunatih struja i napona. Prioritetni red događaja uređaja se briše, a struje i naponi kvara se preračunavaju za novi krug topologije. Simulacija kvara završava kad više nema događaja na vrhu prioritetnog reda od strane bilo kojeg uređaja. [1]

Izračunata naponska opterećenja i trajanje događaja koriste se za određivanje prekida i odstupanja efektivnih vrijednosti. Kada je simulacija kvara gotova, izračunavaju se svi troškovi opterećenja, te se predviđaju sljedeće vrste i mjesta kvara. Pretpostavlja se da svi uređaji osim releja rade ispravno, jer releji mogu izbjeći mjere za poboljšanje kvalitete električne energije. [1]

Strujni prekidač s relejem proraditi će ako njegova struja, promijenjena odgovarajućim prijenosnim omjerom strujnog transformatora, prelazi podešenu radnu vrijednost releja. Vrijeme prorade releja ovisi o njegovim karakteristikama. Ako se struja kvara ukloni prije otvaranja prekidača, onda se ažurira unutarnja varijabla stanja releja. Strujni prekidač može imati jednu ili dvije postavke za ponovno zatvaranje. Ako je prekidač otvoren, izvršiti će se operacija zatvaranja u odgovarajućem vremenu. U slučaju da postoje naknadni događaji iz drugih uređaja, model prekidača mora upravljati s unutarnjom varijablom stanja za vrijeme operacije zatvaranja. Vrijeme između otvaranja i zatvaranja prekidača je konstantno. Nakon zatvaranja prekidača slijedi određeno vrijeme tzv. čišćenje od kvara.

Trajni kvar neće zakazati događaj za prioritetni red, ali će imati pripadajuće vrijeme popravka. Svi potrošači bez električne energije na kraju simulacije kvara doživljavaju trajni prekid za vrijeme trajanja popravka. Privremeni kvar će zakazati događaj čišćenja od kvara kad njegov napon padne na nulu. Kada napon poraste na nominalnu vrijednost, akumulirano vrijeme čišćenja se vraća na nulu. Nakon čišćenja, kvar mijenja stanje iz zatvorenog u otvoreno i nastavlja se simulacija kvara do ponovnog zatvaranja od strane drugog uređaja.

Osigurač će proraditi kada umnožak kvadrata struje i vremena trajanja kvara prijeđe određenu vrijednost, odnosno kada umnožak  $I^2t$  dosegne vrijednost minimalnog taljenja.

Ukoliko je kvar prekinut prije taljenja osigurača, unutarnje pregrijavanje varijable stanja ažurira se u slučaju ponavljanja kvara. Moguće oštećenje osigurača tijekom simulacije ne prati se posebno. Ako struja osigurača prekorači određenu vrijednost krivulje vrijeme-struja ili vrijednost minimalnog taljenja  $I^2t$ , tada se vrijeme taljenja osigurača postavlja na prioritetni red, a ako su struje osigurača premale, onda se ne stavljaju na prioritetni red. Nakon prorade osigurača, svi potrošači iza njega će doživjeti trajni prekid sve dok se osigurač ne popravi. [1]

Model ponovnog zatvarača je vrlo sličan modelu strujnog prekidača s relejem koji je prethodno objašnjen. Glavna razlika je u tome što ponovni zatvarač može imati četiri moguća puta tijekom kvara i može koristiti dvije različite krivulje vrijeme-struja.

Prekidač za automatsko isključenje pojedinog dijela mreže broji koliko puta struja padne na nulu. On će proraditi kada brojač dosegne određeni broj koji može varirati od 1 do 3. Uređaj neće proraditi pod opterećenjem ni za vrijeme trajanja kvara struje.

## **5.6. Troškovi za odštetu potrošača**

Troškovi za odštetu potrošača se određuju prema anketama, iznosima u ugovorima o kvaliteti električne energije ili stvarnoj potrošnji. Za neisporučene kilovat sate procjene se kreću od 2 \$/kWh do 50 \$/kWh. Tipični trošak za prosječnog potrošača s nekim industrijskim i komercijalnim opterećenjem je od 4 \$/kWh do 6 \$/kWh. Za približnu namjenu, težinski faktori se mogu koristiti za proširenje tih troškova kod trenutnih prekida i odstupanja efektivne vrijednosti pod pretpostavkom da je događaj izazvao ekvivalentan iznos za neisporučenu energiju. Alternativni model koji se koristi je sličan modelu koji se koristi u ugovorima o kvaliteti električne energije, a temelji se na broju događaja. Prosječni troškovi po događaju za široki spektar klase potrošača se obično kreću u rasponu od 3000 \$ do 10000 \$.

S obzirom na visinu troškova, troškovi za odštetu potrošača se nalaze u odlukama planiranja. Međutim, ti troškovi su vrlo neizvjesni. Ankete su relativno dobre, ali se troškovi rijetko provjeravaju s ulaganjem potrošača u poboljšanje pouzdanosti i kvalitete električne energije. Naprimjer, prikupljeni utjecaj velikog broja privatnih potrošača može značiti značajne troškove za odštetu, ali nema dokaza da će privatni potrošači uložiti bilo koji dodatni iznos za poboljšanje kvalitete električne energije, unatoč anketama. Zbog toga se odluke planiranja moraju usredotočiti na velike potrošače čiji se troškovi za štetu više provjeravaju. [1]

Troškovi za ostale vrste poremećaja kvalitete električne energije manje su definirani. Naprimjer, ekonomski učinak dugoročno uneravnoteženog napona na motorima nije poznat, iako vjerojatno uzrokuje skraćenje životnog vijeka motora. Isto tako, nisu dobro definirani ni troškovi za harmonička izobličenja i prijelazne pojave.

Troškovi se mogu određivati prema broju potrošača (privatni ili mali komercijalni potrošači), prema isporučenoj električnoj energiji ili prema vršnoj potražnji. Ako su troškovi određeni prema vršnoj potražnji, onda se oni određuju pomoću krivulje trajanja opterećenja. Nominalni napon, harmonička izobličenja, prijelazne pojave i odstupanja opterećenja trebaju biti uključeni u električne simulacije, ali to nije nužno za trajne prekide i odstupanja efektivnih vrijednosti. [1]

## 6. ZAKLJUČAK

Tržište električnom energijom usko je povezano s njenom kvalitetom i može se reći da tržište određuje kvalitetu električne energije. Kvaliteta električne energije u Republici Hrvatskoj još nije dovoljno zastupljena u praksi. Potrebno je provesti opsežne mjere kako bi se poboljšala kvaliteta električne energije na koju se potrošači žale, te kako bi se potrošače koji smanjuju kvalitetu električne energije natjeralo na modernizaciju i/ili prilagodbu.

U radu je opisano kako se kvaliteta električne energije vrednuje u svijetu, kako se sklapaju ugovori o kvaliteti električne energije, te kako se kvaliteta električne energije uvodi u proces planiranja distribucije. Opisano je definiranje pokazatelja kvalitete električne energije koji služe kao mjere koje se koriste za vrednovanje i ocjenu kvalitete električne energije. Ovakav način definiranja pokazatelja je prihvatljiv za Republiku Hrvatsku uz male prilagodbe prema europskoj normi EN 50160.

Ugovore o kvaliteti električne energije sporazumno sklapaju isporučitelji električne energije i potrošači. Za provedbu ovog modela sklapanja ugovora potrebno je elektroprivredu podijeliti na prijenos i distribuciju kako bi potrošači imali mogućnost izbora s kojim će isporučiteljom električne energije sklopiti ugovor. Provedbom ovog modela će se znati tko smanjuje kvalitetu električne energije i tko snosi nastale troškove, isporučitelj ili potrošač.

Uključivanje kvalitete električne energije u proces planiranja provodi se kako bi se sustav najisplativije nadogradio i prilagodio porastu potražnje za električnom energijom, a da se pri tome osigura pouzdanost. Opisani proces planiranja distribucije predstavlja podlogu za primjenu tehničkih mjera za poboljšanje kvalitete električne energije i planiranje razvoja cijele distribucijske mreže.

Na kraju se može zaključiti da nije dovoljno samo ozakoniti norme i pravilnike u Republici Hrvatskoj, već učiniti sve što je potrebno s tehničke strane da se te norme i pravilnici uistinu i provedu. Bez obzira na to kako će se razviti podjela Hrvatske elektroprivrede, poboljšanje kvalitete električne energije će biti jedan od prioriternih zadataka. Zbog toga je ova problematika vrlo kompleksna, a samim time i veći izazov za sadašnje i buduće inženjere elektrotehnike.

## LITERATURA

- [1] Dugan R.C., McGranaghan M.F., Santoso S., Beaty H.W. : *Electrical Power System Quality*, Second Edition, McGraw-Hill, New York, 2003.
- [2] Novinc Ž.: *Kakvoća električne energije*, Graphis, Zagreb, 2003.
- [3] Baggini A.: *Handbook of Power Quality*, John Wiley & Sons, England, 2008.
- [4] Kusko A, Thompson M.T.: *Power Quality in Electrical System*, McGraw-Hill, 2007.
- [5] Šagovac G. : *Kvaliteta električne energije kao karakteristika distribucijske mreže*, 2008.
- [6] Živić Đurović M., Komen V., Čučić R. : *Istraživanje i utvrđivanje stanja kvalitete električne energije*, Engineering review, No.2, Vol.28, str. 45. – 54., Prosinac 2008.
- [7] Klaić Z.: *Mjerenje i analiza kvalitete električne energije u distribucijskoj mreži prema europskoj normi EN 50160*, magistarski rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Elektrotehnički fakultet, Osijek, 2006.
- [8] Jadrijević Z.: *Parametri kvalitete električne energije*, materijali s predavanja
- [9] IEEE 1366-1998, *IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indicators*
- [10] Cahier technique no.199, Level of Power Quality

## POPIS SLIKA

Slika 3.1. Prekid napona uslijed naponskog propada jedne faze [1] .....	16
Slika 3.2. Primjer prenapona [1] .....	17
Slika 3.3. Karakterizacija određenog napona efektivne vrijednosti mjerenjem odstupanja faze[1] .....	18
Slika 3.4. Nadzor ograničenih segmenata pri izračunu pokazatelja odstupanja efektivne vrijednosti .....	21
Slika 3.5. Dnevni ciklusi ukupnog harmoničkog izobličenja za jedan tjedan [1].....	22
Slika 3.6. Histogram ukupnog harmoničkog izobličenja napona za jedan mjesec[1].....	23
Slika 3.7. Izračun vrijednosti CP95 u distribuciji grafičkom metodom[1].....	23
Slika 3.8. Histogram vrijednosti CP95 ukupnog harmoničkog izobličenja napona..... na različitim mjestima[1] .....	24
Slika 3.9. Vrijednosti SATHD pokazatelja po mjesecima za razdoblje od 1.6.1993 do 1.9.1995[3] .....	28
Slika 5.1. Troškovi koji utječu na odluke planiranja[3] .....	39
Slika 5.2. Proces planiranja kvalitete električne energije .....	40
Slika 5.3. Algoritam za simulaciju kvara pomoću prioritetnog reda.....	43

## POPIS TABLICA

Tablica 2.1. Sumarno prikazana ograničenja pokazatelja norme EN 50160 [2].....	11
Tablica 4.1. Struktura plaćanja odštete za osiguranje kvalitete električne energije u pet glavnih kategorija .....	35

## **PRILOZI**

Prilog 1 – primjer izvještaja analize električne energije prema EN 50160



## Prilog 1. Primjer izvještaja analize električne energije prema EN50160

# EN 50160 Report

### Company

Name	
Company	
Address	
Phone	
Email	

### Client

Name	Andrija Sabljo
Company	Weltplast
Address	
Phone	
Email	

### Measurement

Objective	
Site description	
Start time	26.5.2022. 10:08:40,000
Stop time	27.5.2022. 10:08:40,000
Duration	1 d 0 h 0 min 0 s <b>Time period is less than a week</b>
Interval	5 seconds
Connection	Three phase three wire
Nominal voltage	400,00 V
Nominal frequency	50,00 Hz
System type	Systems with synchronous connection
Effective measurement period	100,00 %
EN 50160 Limits	LV
Operating conditions	Normal

## Instrument

Instrument name	Power Master
Instrument model	MI 2892
Manufacturer	Metrel d.d.
Serial Number	15340037
Firmware version	1.0.2161
Operater name	Andrija
Current clamps	A1227 (3.000,00 A), Clamp measuring range (3.000,00 A), Instrument measuring range (100 % of Clamp measuring range),
Additional equipment	

## Additional Information

*\* for informational purposes only and not related to EN 50160 standard*

### Swells

	L12	L23	L31
Count	0	0	0
Max. Value [V]	N/A	N/A	N/A
Max. Duration	N/A	N/A	N/A

### Dips

	L12	L23	L31
Count	0	0	0
Min. Value [V]	N/A	N/A	N/A
Max. Duration	N/A	N/A	N/A

## EN50160 Compliance summary

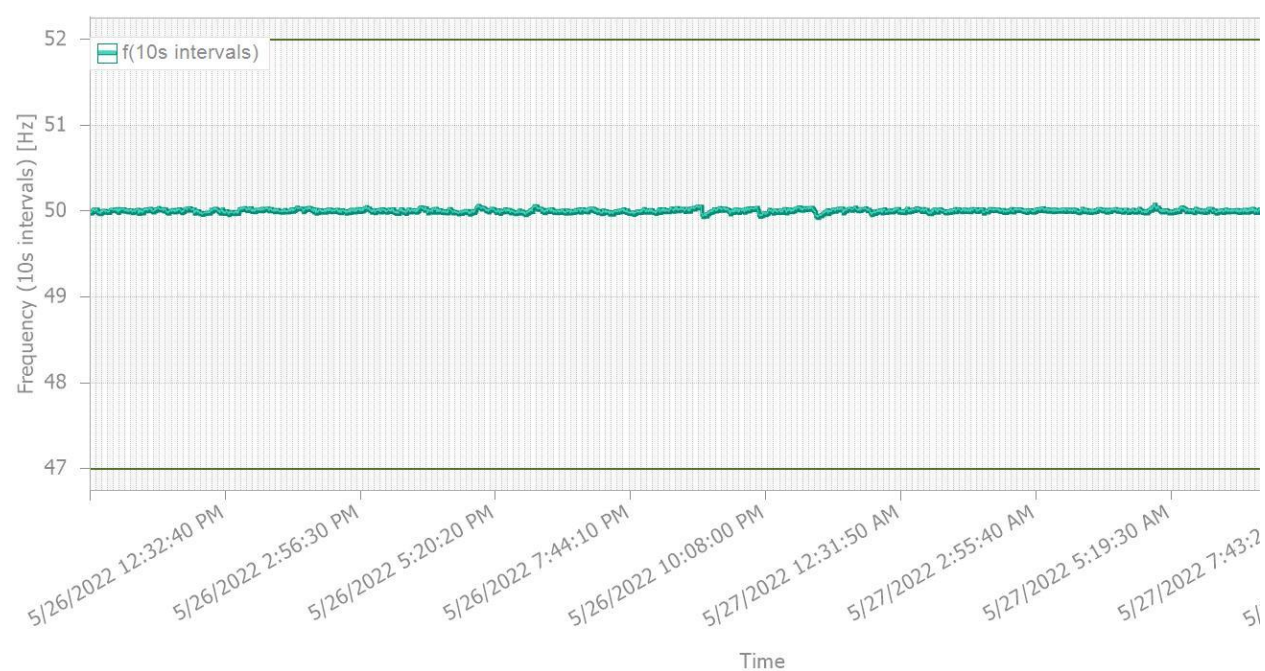
Power frequency	Passed
Supply Voltage Variations	Passed
Flicker Severity	Passed
Voltage Unbalance	Passed
Harmonic Voltages	Passed
Interharmonic Voltages	Measured
Signalling	Passed
Dips	0
Interruptions	0
Swells	0

# EN 50160 Report

## Power frequency

Nominal frequency	50,00 Hz
Measured quantity	Mean value of the fundamental frequency measured over 10 seconds ( $f_{10s}$ )
Criteria	Systems with synchronous connection
EN 50160 standard	Section 4.2.1

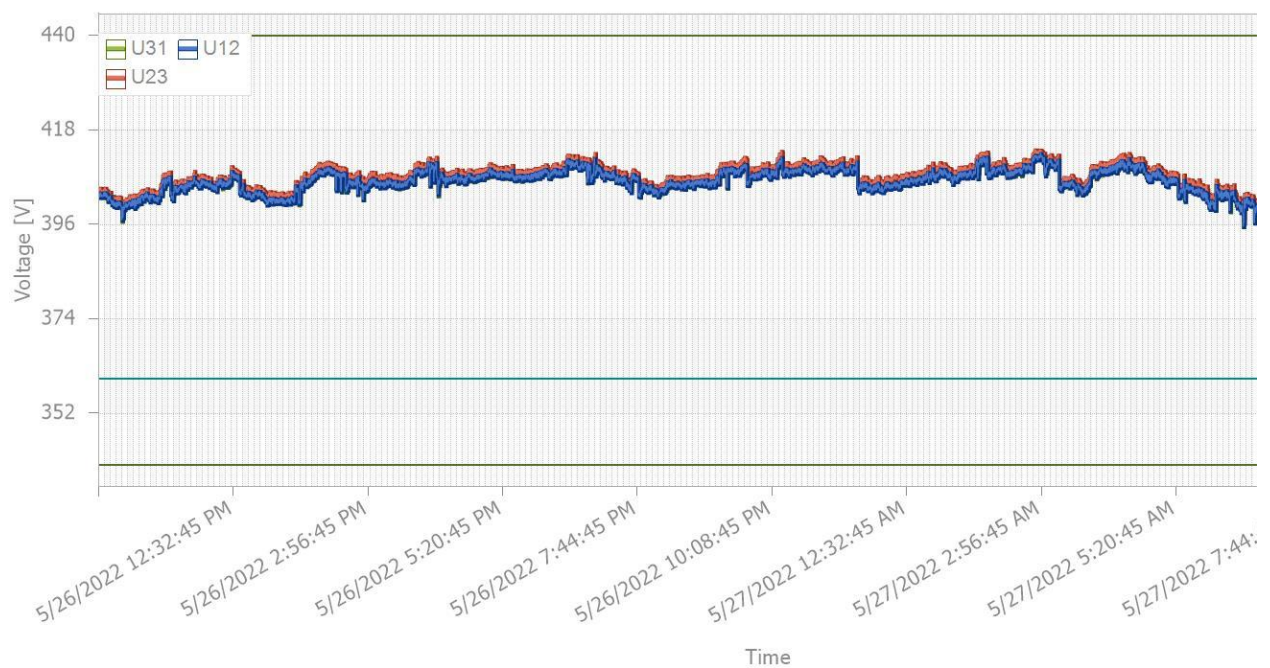
Requirements		Measured	Status
49,50 – 50,50 Hz	99,50 % of interval (week)	49,94 – 50,06 Hz	Passed
47,00 – 52,00 Hz	100,00 % of interval (week)	49,92 – 50,07 Hz	Passed



## Supply Voltage Variations

Nominal voltage	400,00 V
Measured quantity	5 seconds mean RMS value Urms
Criteria	Systems with synchronous connection
EN 50160 standard	Section 4.2.2

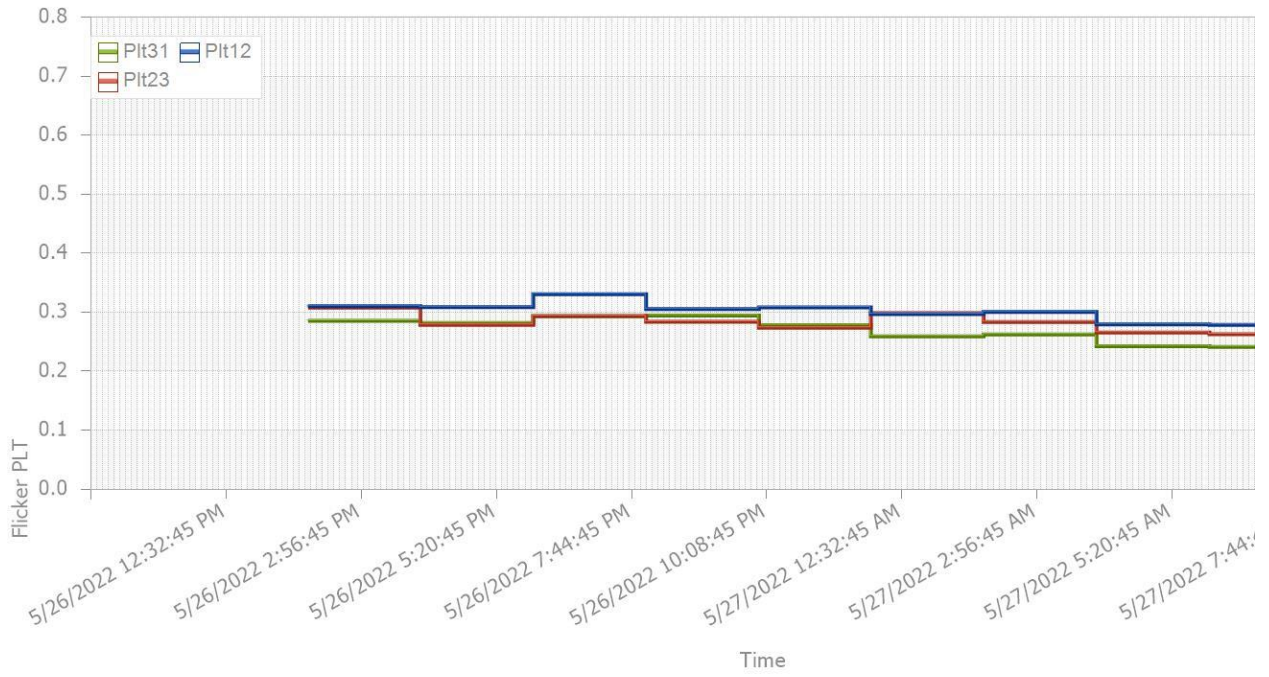
Requirements		Measured	Status
360,00 – 440,00 V	95,00 % of interval (week)	394,07 – 411,00 V	Passed
340,00 – 440,00 V	100,00 % of interval (week)	394,07 – 413,28 V	Passed



## Flicker Severity

Measured quantity	Long term flicker severity ( $P_{lt}$ )
EN 50160 standard	Section 4.2.3.2
Operating conditions	Normal

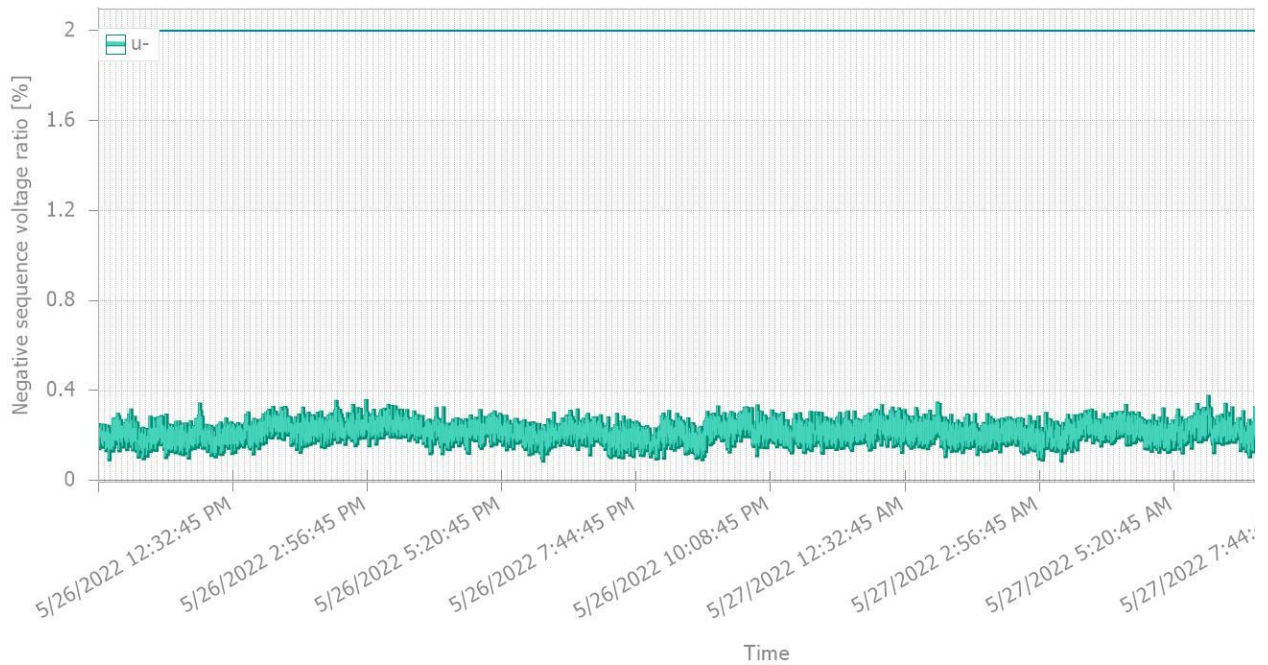
Requirements		Measured	Status
Plt < 1	95,00 % of interval (week)	0,24 – 0,37	Passed



## Voltage Unbalance

Measured quantity	5 seconds mean RMS values of the negative sequence ratio $u_{-}$
EN 50160 standard	Section 4.2.4
Operating conditions	Normal

Requirements		Measured	Status
$u^- < 2,00 \%$	95,00 % of interval (week)	0,09 – 0,27 %	Passed



## Harmonics voltage

Measured quantity	5 seconds mean RMS values of the harmonic and total harmonic distortion
EN 50160 standard	Section 4.2.5
Operating conditions	Normal

Harmonic	Requirement	L12		L23		L31	
		Measured	Status	Measured	Status	Measured	Status
THD	< 8,00 %	5,48 %	Passed	5,47 %	Passed	5,59 %	Passed

2	< 2,00 %	0,08 %	Passed	0,09 %	Passed	0,09 %	Passed
3	< 5,00 %	0,34 %	Passed	0,33 %	Passed	0,18 %	Passed
4	< 1,00 %	0,03 %	Passed	0,04 %	Passed	0,04 %	Passed
5	< 6,00 %	4,38 %	Passed	4,30 %	Passed	4,37 %	Passed
6	< 0,50 %	0,05 %	Passed	0,07 %	Passed	0,06 %	Passed
7	< 5,00 %	2,34 %	Passed	2,40 %	Passed	2,46 %	Passed
8	< 0,50 %	0,04 %	Passed	0,05 %	Passed	0,05 %	Passed
9	< 1,50 %	0,18 %	Passed	0,23 %	Passed	0,11 %	Passed
10	< 0,50 %	0,04 %	Passed	0,04 %	Passed	0,04 %	Passed
11	< 3,50 %	1,39 %	Passed	1,28 %	Passed	1,40 %	Passed
12	< 0,50 %	0,03 %	Passed	0,03 %	Passed	0,03 %	Passed
13	< 3,00 %	0,95 %	Passed	1,13 %	Passed	1,07 %	Passed
14	< 0,50 %	0,05 %	Passed	0,05 %	Passed	0,06 %	Passed
15	< 1,00 %	0,19 %	Passed	0,27 %	Passed	0,13 %	Passed
16	< 0,50 %	0,04 %	Passed	0,05 %	Passed	0,04 %	Passed
17	< 2,00 %	1,14 %	Passed	1,00 %	Passed	1,14 %	Passed
18	< 0,50 %	0,04 %	Passed	0,05 %	Passed	0,04 %	Passed
19	< 1,50 %	0,84 %	Passed	1,02 %	Passed	0,97 %	Passed
20	< 0,50 %	0,09 %	Passed	0,06 %	Passed	0,08 %	Passed
21	< 0,75 %	0,27 %	Passed	0,35 %	Passed	0,17 %	Passed
22	< 0,50 %	0,07 %	Passed	0,09 %	Passed	0,06 %	Passed
23	< 1,50 %	1,10 %	Passed	0,79 %	Passed	1,13 %	Passed
24	< 0,50 %	0,07 %	Passed	0,09 %	Passed	0,06 %	Passed
25	< 1,50 %	0,70 %	Passed	1,09 %	Passed	0,92 %	Passed

## Interharmonics voltage

Measured quantity	5 seconds mean RMS values of each interharmonic and total harmonic distortion
EN 50160 standard	Section 4.2.6 - Informative
Operating conditions	Normal



		<b>L12</b>	<b>L23</b>	<b>L31</b>
<b>Interharmonic</b>	<b>Requirement</b>	<b>Measured</b>	<b>Measured</b>	<b>Measured</b>
2	---	0,13 %	0,13 %	0,13 %
3	---	0,06 %	0,06 %	0,06 %
4	---	0,13 %	0,13 %	0,13 %
5	---	0,07 %	0,07 %	0,07 %
6	---	0,06 %	0,06 %	0,06 %
7	---	0,07 %	0,06 %	0,06 %
8	---	0,05 %	0,05 %	0,05 %
9	---	0,05 %	0,06 %	0,06 %
10	---	0,05 %	0,05 %	0,05 %
11	---	0,06 %	0,07 %	0,07 %
12	---	0,06 %	0,05 %	0,05 %
13	---	0,07 %	0,06 %	0,06 %
14	---	0,05 %	0,05 %	0,05 %
15	---	0,06 %	0,06 %	0,06 %
16	---	0,06 %	0,05 %	0,05 %
17	---	0,07 %	0,09 %	0,09 %
18	---	0,06 %	0,06 %	0,06 %
19	---	0,08 %	0,07 %	0,07 %
20	---	0,06 %	0,06 %	0,06 %
21	---	0,07 %	0,08 %	0,08 %
22	---	0,06 %	0,05 %	0,05 %
23	---	0,08 %	0,09 %	0,09 %
24	---	0,06 %	0,06 %	0,06 %
25	---	0,11 %	0,09 %	0,09 %

## Signalling

Measured quantity	3 second mean value of signal voltages at 316,00 and 1.060,00 Hz
EN 50160 standard	Section 4.2.7
Operating conditions	Normal

Voltage signal at 316,00 Hz (% of time less than 36,00 V)							
		L12		L23		L31	
Start time	Stop time	Measured	Status	Measured	Status	Measured	Status
26.5.2022. 10:08:40	27.5.2022. 0:00:00	100,00 %	Passed	100,00 %	Passed	100,00 %	Passed
27.5.2022. 0:00:00	27.5.2022. 10:08:40	100,00 %	Passed	100,00 %	Passed	100,00 %	Passed

Voltage signal at 1.060,00 Hz (% of time less than 20,00 V)							
		L12		L23		L31	
Start time	Stop time	Measured	Status	Measured	Status	Measured	Status
26.5.2022. 10:08:40	27.5.2022. 0:00:00	100,00 %	Passed	100,00 %	Passed	100,00 %	Passed
27.5.2022. 0:00:00	27.5.2022. 10:08:40	100,00 %	Passed	100,00 %	Passed	100,00 %	Passed

## Dips

Nominal voltage	400,00 V
Measured quantity	Number of dips within predefined voltage and duration ranges
Measurement method	One cycle RMS updated each half cycle $U_{rms}(1/2)$ . Dip begins when the voltage of one or more channels is below the dip threshold and ends when the voltage on all measured channels is equal to or above the dip threshold plus the

Hysteresis voltage	2,00 % of nominal voltage
Operating conditions	Normal
EN 50160 standard	Section 4.3.2.4

Residual voltage (% of nominal)	Duration (ms)				
	$10 \leq t \leq 200$	$200 < t \leq 500$	$500 < t \leq 1\ 000$	$1\ 000 < t \leq 5\ 000$	$5\ 000 < t \leq 60\ 000$
$90 > U \geq 80$	0	0	0	0	0
$80 > U \geq 70$	0	0	0	0	0
$70 > U \geq 40$	0	0	0	0	0
$40 > U \geq 5$	0	0	0	0	0
$U < 5$	0	0	0	0	0

## Swells

Nominal voltage	400,00 V
Measured quantity	Number of swells within predefined voltage and duration ranges
Measurement method	One cycle RMS updated each half cycle $U_{rms}(1/2)$ Swell begins when the voltage of one or more channels is above the swell threshold and ends when the voltage on all measured channels is equal to or below the swell threshold minus the
Operating conditions	Normal
EN 50160 standard	Section 4.3.2.6

Swell voltage (% of nominal)	Duration (ms)		
	$10 \leq t \leq 500$	$500 < t \leq 5\ 000$	$5\ 000 < t \leq 60\ 000$
$120 > U > 110$	0	0	0
$U \geq 120$	0	0	0

