

Integrirani sustav nadzora kvalitete električne energije u distribucijskom sustavu

Beljo, Josip

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:162050>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-27**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**INTEGRIRANI SUSTAV NADZORA KVALITETE ELEKTRIČNE
ENERGIJE U DISTRIBUCIJSKOM SUSTAVU**

Rijeka, rujan 2022.

Josip Beljo

0069072613

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**INTEGRIRANI SUSTAV NADZORA KVALITETE ELEKTRIČNE
ENERGIJE U DISTRIBUCIJSKOM SUSTAVU**

Mentor: Prof. dr. sc. Vitomir Komen

Rijeka, rujan 2022.

Josip Beljo

0069072613

Rijeka, 19. ožujka 2022.

Zavod: **Zavod za elektroenergetiku**
Predmet: **Prijenos i distribucija električne energije**
Grana: **2.03.01 elektroenergetika**

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Josip Beljo (0069072613)**
Studij: **Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike**
Modul: **Elektroenergetika**

Zadatak: **INTEGRIRANI SUSTAV NADZORA KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE U
DISTRIBUCIJSKOM SUSTAVU / INTEGRATED ELECTRICITY QUALITY
MONITORING SYSTEM IN THE DISTRIBUTION SYSTEM**

Opis zadatka:

Pregled i definiranje pokazatelja i parametara kvalitete električne energije. Normativno reguliranje parametara kvalitete električne energije i obveze operatora distribucijskog sustava. Tehnička rješenja i uređaji za nadzor i mjerenje parametara kvalitete. Integracija mjernih podataka iz naprednih brojlara AMR sustava u jedinstveni sustav nadzora kvalitete električne energije.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Josip Beljo

Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:



Prof. dr. sc. Vitomir Komen

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:



Prof. dr. sc. Viktor Sučić

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

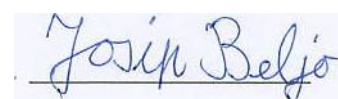
IZJAVA

U skladu sa 1. stavkom članka 8 pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta u Rijeci od 1. veljače 2020., izjavljujem da sam samostalno izradio ovaj diplomski rad prema zadatku koji mi je uručen 21. ožujka 2022. godine.

Rijeka, rujan 2022.

Josip Beljo

0069072613

A handwritten signature in blue ink that reads "Josip Beljo". The signature is written in a cursive style and is placed on a light blue rectangular background.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Vitomiru Komenu na pomoći, pribavljenoj literaturi i vodstvu pri izradi ovog diplomskog rada, kao i obitelji i prijateljima koji su me podržavali tokom cijelog studiranja.

Josip Beljo

0069072613

Sadržaj:

1. UVOD	1
2. KVALITETA OPSKRBE ELEKTRIČNOM ENERGIJOM	2
2.1. Pravilnik o uvjetima kvalitete opskrbe električnom energijom.....	2
2.1.1. Kvaliteta usluga	3
2.1.2. Pouzdanost napajanja.....	4
2.1.3. Kvaliteta napona	6
2.2. Godišnji izvještaj HEP ODS-a o kvaliteti opskrbe električnom energijom za 2021. godinu....	6
2.2.1 Usporedba sa prijašnjim godišnjim izvještajima	10
3. KVALITETA NAPONA	12
3.1. Parametri kvalitete električne energije	12
3.2. Frekvencija napona.....	13
3.3. Promjene amplitude napona	14
3.4. Nagle promjene napona (flikeri).....	15
3.5. Propadi napona	16
3.6. Kratkotrajni i dugotrajni prekidi napajanja	17
3.7. Privremeni mrežni prenaponi	19
3.8. Tranzijentalni prenaponi.....	20
3.9. Fazna nesimetrija napona	21
3.10. Naponi viših harmonika.....	22
3.11. Naponi međuharmonika	23
3.12. Signalni naponi	24
4. MJERENJE I NADZOR KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE	25
4.1. Ciljevi mjerenja kvalitete električne energije	26
4.2. Postupak mjerenja kvalitete električne energije	27
4.3. Uređaji za mjerenje kvalitete električne energije	29
4.3.1. Interval usrednjavanja	30
4.3.2. UNI-T UT285C.....	31
4.4. Uređaji za nadzor kvalitete električne energije	33
4.5. Elektronička brojila električne energije i AMR	35
4.5.1. Daljinsko očitavanje brojila	36
4.6. PQ monitori	38

4.6.1. IEL MT40	38
4.6.2. PQube 3.....	39
5. INTEGRIRANI SUSTAVI NADZORA KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE.....	41
5.1. IPQS sustav nadzora kvalitete električne energije	41
5.1.1. IPQS sustav Elektre Vinkovci	43
5.2. Primjena podataka iz AMR sustava u sustavu analize i nadzora distribucijske mreže	46
5.2.1. Praktična primjena AGA sustava.....	48
5.3. Mogućnost primjene podataka iz AMR sustava u sustavima nadzora kvalitete električne energije	49
5.3.1. Pilot projekt Elektro Ljubljane.....	50
6. ZAKLJUČAK.....	55
LITERATURA	57
SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI.....	59

1. UVOD

Pojam kvalitete električne energije se pojavio razvojem elektroenergetskih sustava. Razvojem elektroničkih uređaja uočeno je da je za ispravan rad tih uređaja potrebna električna energija odgovarajućih parametara. Ovi parametri su definirani i uvedeni u zakonsku regulativu pred kraj 20. stoljeća. U Europi je uvedena norma EN 50160 koja definira parametre kvalitete električne energije, načine njihovog mjerenja i granice unutar kojih se moraju nalaziti. Zakonskom regulativom Europske Unije svim građanima mora biti omogućen pristup električnom energiji odgovarajuće kvalitete po razumnim cijenama. Posao održavanja kvalitete električne energije je pao na operatore prijenosnog i distribucijskog sustava.

Elektroenergetski sustavi prolaze kroz period velikih promjena, prvenstveno potaknuti direktivama o smanjenju emisija CO₂. Najveća promjena dolazi u promjeni načina proizvodnje električne energije. Dok se elektroenergetski sustav donedavno zasnivao na proizvodnji potrebne energije iz manjeg broja velikih termo i hidro elektrana, danas se termoelektrane vade iz pogona a njihovu proizvodnju se teži nadomjestiti sa CO₂ neutralnim alternativama. Najproširenije od tih alternativa su vjetro i solarne elektrane, koje se zbog tehničkih zahtjeva izgradnje moraju graditi kao elektrane manjih snaga, koje su priključene direktno na distribucijsku mrežu. Ovi tzv. distribuirani izvori električne energije preuzimaju sve veći udio proizvodnje električne energije u elektroenergetskim sustavima. Ovo bitno utječe na pouzdanost elektroenergetskih sustava, kao i na kvalitetu napona. Sve veća primjena elektroničkih uređaja koji unose dodatne smetnje u mrežu a u isto vrijeme zahtijevaju veliku kvalitetu napona za ispravan rad također kompliciraju pitanje kvalitete električne energije. Zato je potreba za uspostavom kvalitetnog sustava nadzora kvalitete električne energije danas sve veća.

2. KVALITETA OPSKRBE ELEKTRIČNOM ENERGIJOM

Kvaliteta opskrbe električnom energijom je pojam koji obuhvaća kvalitetu električne energije te kvalitetu usluga koje pružaju opskrbljivači i operatori sustava. Kvaliteta električne energije se dijeli na pouzdanost napajanja koja je sposobnost elektroenergetske mreže da osigura stalnost isporuke električne energije i kvalitetu napona koja predstavlja podudaranje značajki napona na mjestu predaje električne energije sa referentnim vrijednostima. U Hrvatskoj su uvjeti i obveze oko održavanja kvalitete opskrbe električnom energijom u elektroenergetskom sustavu uređeni Uvjetima kvalitete opskrbe električnom energijom. Uvjeti su sastavljeni od strane Hrvatske energetske regulatorne agencije (HERA) 2017. godine[1], te dopunjeni Pravilnikom o uvjetima kvalitete opskrbe električnom energijom donesenim 2022. godine[2].

2.1. Pravilnik o uvjetima kvalitete opskrbe električnom energijom

Ovim Pravilnikom uređuje se[2]:

- Pokazatelji kvalitete opskrbe električnom energijom
- Način mjerenja, prikupljanja i objavljivanja pokazatelja kvalitete opskrbe električnom energijom
- Iznimni događaji u pogledu kvalitete opskrbe električnom energijom
- Opći, minimalni i zajamčeni standardi kvalitete opskrbe električnom energijom
- Način regulacije kvalitete opskrbe električnom energijom u ovisnosti o odabranoj metodi regulacije tarifa
- Financijska kompenzacija na temelju zajamčenih standarda kvalitete opskrbe električnom energijom
- Način, dinamika i opseg izvještavanja te dostavljanja podataka HERA-i o kvaliteti opskrbe električnom energijom
- Sadržaj godišnjeg izvještaja operatora prijenosnog sustava (OPS) o kvaliteti opskrbe električnom energijom
- Sadržaj godišnjeg izvještaja operatora distribucijskog sustava (ODS) o kvaliteti opskrbe električnom energijom
- Sadržaj godišnjeg izvještaja opskrbljivača o kvaliteti usluga

Ciljevi i načela ovog pravilnika su[2]:

- Uređenje kvalitete opskrbe električnom energijom: pouzdanosti napajanja i kvalitete napona na mjestu preuzimanja, odnosno predaje električne energije te kvalitetu usluga korisnicima mreže
- Temeljno načelo regulacije kvalitete opskrbe električnom energijom je dostupnost i provjerljivost upisanih podataka iz kojih se računaju pokazatelji kvalitete opskrbe električnom energijom
- Cilj ovog pravilnika je poticanje OPS-a, ODS-a te opskrbljivača na održavanje razine općih i pojedinačnih pokazatelja kvalitete opskrbe električnom energijom što bliže minimalnim standardima kvalitete opskrbe električnom energijom
- Odredbe ovog pravilnika se odnose na sve korisnike mreže neovisno radi li se o priključku proizvodnog postrojenja, postrojenja za skladištenje energije, postrojenja krajnjeg kupca odnosno aktivnog kupca

2.1.1. Kvaliteta usluga

Pravilnikom su uređeni pojedinačni i opći pokazatelji kvalitete usluga za sljedeće skupine usluga:

- Priključenje na mrežu
- Briga o korisnicima mreže
- Tehničke usluge
- Očitavanje mjernih podataka
- Promjena opskrbljivača ili agregatora

Za svaku skupinu usluga su definirani pojedinačni te opći pokazatelji kvalitete usluga. Pojedinačni pokazatelji predstavljaju vrijeme potrebno da odgovorna stranka obavi pojedinu stavku, poput vremena rješavanja zahtjeva za izdavanje elektroenergetske suglasnosti. Opći pokazatelji predstavljaju udio pravovremeno odrađenih stavki u promatranom vremenskom razdoblju, poput udjela pravovremeno riješenih zahtjeva za izdavanje elektroenergetske suglasnosti u promatranom godini.

Kvaliteta usluga se mjeri vremenom koje je potrebno da se izvrši usluga nakon podnošenja zahtjeva za provedbom te usluge. Kvaliteta usluga je veća što je vrijeme provedbe usluga kraće, te što je udio

pravovremeno provedenih usluga veći. OPS, ODS i opskrbljivač imaju obvezu voditi evidenciju svih podataka o kvaliteti usluga koji su potrebni za računanje pokazatelja kvalitete usluga. U ovoj evidenciji također je potrebno upisati sve podatke o prigovorima, zahtjevima za isplatu naknada te isplaćenim naknadama zbog nepoštivanja zajamčenih standarda kvalitete usluga. Ovu evidenciju je potrebno čuvati u elektroničkom obliku minimalno deset godina.

2.1.2. Pouzdanost napajanja

Pravilnik definira opće pokazatelje pouzdanosti napajanja u prijenosnoj mreži:

1. **ENS** (eng. Energy Not Supplied) – indeks neisporučene energije
2. **AIT** (eng. Average Interruption Time) – indeks prosječnog vremena prekida napajanja

Te opće pokazatelje pouzdanosti napajanja u distribucijskoj mreži:

1. **SAIFI** (eng. System Average Interruption Frequency Index) – indeks prosječne učestalosti prekida napajanja
2. **SAIDI** (eng. System Average Interruption Duration Index) – indeks prosječnog trajanja prekida napajanja
3. **CAIDI** (eng. Customer Average Interruption Duration Index) – indeks prosječnog trajanja prekida napajanja po potrošaču

Prema pravilniku ENS se računa prema formuli 2.1[2].

$$ENS = \frac{1}{60} \sum_{i=1}^K P_i \cdot T_i, [\text{MWh}] \quad (2.1)$$

Gdje je: K – ukupan broj dugotrajnih prekida napajanja (prekidi duži od 3 minute)

P_i – snaga na mjestu i -tog dugotrajnog prekida napajanja, [MW]

T_i – trajanje i -tog dugotrajnog prekida napajanja, [min]

Prema pravilniku AIT se računa prema formuli 2.2[2].

$$AIT = \frac{ENS}{\left(\frac{W_g}{T_g}\right)} \cdot 60, [\text{min}] \quad (2.2)$$

Gdje je: W_g – ukupna isporučena električna energija u promatranoj kalendarskoj godini, [MWh]

T_g – ukupan broj sati u kalendarskoj godini, [h]

Prema pravilniku SAIFI se računa prema formuli 2.3[2].

$$SAIFI = \sum_i \frac{N_i}{N_{uk}}, \left[\frac{\text{Prekida}}{\text{Korisniku}} \right] \quad (2.3)$$

Gdje je: N_i – broj korisnika kod kojih je došlo do prekida napajanja

N_{uk} – ukupan broj korisnika na mreži

Prema pravilniku SAIDI se računa prema formuli 2.4[2].

$$SAIDI = \sum_i \frac{N_i \cdot T_i}{N_{uk}}, \left[\frac{\text{Minuta}}{\text{Korisniku}} \right] \quad (2.4)$$

Gdje je: N_i – broj korisnika kod kojih je došlo do prekida napajanja

T_i – trajanje i-tog dugotrajnog prekida napajanja, [min]

N_{uk} – ukupan broj korisnika na mreži

Prema pravilniku CAIDI se računa prema formuli 2.5[2].

$$CAIDI = \frac{SAIDI}{SAIFI}, \left[\frac{\text{Minuta}}{\text{Prekidu}} \right] \quad (2.5)$$

Pouzdanost napajanja je određena brojem i trajanjem dugotrajnih prekida napajanja (duži od 3 minute). Pouzdanost napajanja je veća što je broj prekida manji, te što je trajanje prekida kraće. OPS, ODS i opskrbljivač imaju obvezu voditi evidenciju svih podataka o pouzdanosti napajanja koji su potrebni za računanje pokazatelja pouzdanosti napajanja. U ovoj evidenciji također je potrebno upisati sve podatke o prigovorima, zahtjevima za isplatu naknada te isplaćenim naknadama zbog nepoštivanja zajamčenih standarda pouzdanosti napajanja. Ovu evidenciju je potrebno čuvati u elektroničkom obliku minimalno deset godina.

ODS je dužan u ovoj evidenciji imati cijelu topologiju srednjenaponske distribucijske mreže, odnosno sve elemente mreže na naponu 35 kV do uključivo transformatorske stanice (TS) 10(20)/0.4 kV. Srednjenaponske izvode i TS koje napajaju treba grupirati po vrsti izvedbe voda na nadzemne i kabelaške, gdje se kabelaškim smatraju izvodi koji su barem 90% duljine izvedeni kao podzemni ili podmorski kabeli. Za potrebe izračuna pokazatelja pouzdanosti napajanja broj korisnika niskonaponske 0.4 kV mreže se uzima na početku kalendarske godine. Za svaki dugotrajni prekid napajanja na distribucijskoj mreži ODS je dužan u evidenciju upisati naponsku razinu na kojoj se

dogodio prekid, tip prekida te vrijeme početka i kraja prekida, koje se bilježi u SCADA (eng. Supervisory Control And Data Acquisition) sustavu.

2.1.3. Kvaliteta napona

Kvaliteta napona se mjeri kao skladnost izmjerenih parametara kvalitete napona na mjestu predaje odnosno preuzimanja električne energije sa vrijednostima parametara propisanim prema normi HRN EN 50160. OPS i ODS imaju obvezu voditi evidenciju svih podataka o provedenim mjerenjima kvalitete napona na mjestu predaje odnosno preuzimanja koji su potrebni za računanje pokazatelja kvalitete napona. Ovu evidenciju je potrebno čuvati u elektroničkom obliku minimalno deset godina.

Korisnici mreže odnosno kupci električne energije imaju pravo jednom godišnje predati zahtjev OPS-u ili ODS-u za dostavu izvješća o kvaliteti električne energije. Za svaki predani zahtjev OPS ili ODS moraju provesti mjerenje kvalitete napona na mjestu predaje električne energije u trajanju tjedan dana te izraditi izvješće o kvaliteti električne energije. Ako se utvrdi da neki od parametara kvalitete napona nisu unutar dopuštenih granica OPS i ODS moraju u evidenciju zapisati koji su od pojedinih parametara prelazili granice. ODS je također dužan u evidenciji upisati podatke o TS iz koje se napaja korisnik kod kojega je utvrđeno odstupanje parametara kvalitete napona od norme.

2.2. Godišnji izvještaj HEP ODS-a o kvaliteti opskrbe električnom energijom za 2021. godinu

Prema napatku iz Uvjeta kvalitete opskrbe električnom energijom HEP ODS je izdao godišnji izvještaj o kvaliteti opskrbe električnom energijom za svaku godinu nakon prihvaćanja uvjeta. U godišnjem izvještaju se upisuju svi pokazatelji kvalitete usluga, kvalitete napona te pouzdanosti napajanja. Godišnji izvještaj za 2021. godinu je izdan 27. travnja 2022. te prikazuje kvalitetu opskrbe električnom energijom u distribucijskom sustavu Hrvatske tokom 2021. godine.

U tablici 2.1. su prikazane izmjerene vrijednosti općih pokazatelja kvalitete usluga za 2021. godinu. Pokazatelj p_{33} – udio pravovremeno otklonjenih neispravnosti priključka i/ili obračunskog mjernog mjesta koja za posljedicu ima prekid napajanja ili ugrožava sigurnost ljudi i imovine u promatranoj godini nije zabilježen zbog nedostatka podrške za vođenje evidencije o ovom pokazatelju.

Tablica 2.1. Opći pokazatelji kvalitete usluga za 2021. godinu[3]

Opći pokazatelj kvalitete usluga	Opći standard kvalitete usluga	Vrijednost pokazatelja
Udio pravovremeno riješenih zahtijeva za izdavanje EOTRP-a (Elaborata optimalnog tehničkog rješenja priključenja), p_{11}	95%	37%
Udio pravovremeno riješenih zahtjeva za izdavanje elektroenergetske suglasnosti, p_{12}	95%	59%
Udio pravovremenih priključenja u slučaju priključenja građevine na mrežu jednostavnim priključkom, p_{13}	95%	35%
Udio pravovremeno riješenih pisanih prigovora i pravovremenih odgovora na pisane upite, p_{21}	95%	62%
Udio pravovremeno odrađenih pisanih žalbi, p_{22}	95%	15%
Udio pravovremenog javljanja na pozive u pozivnom centru, p_{23}	95%	33%
Udio pravovremeno otpremljenih izvješća o kvaliteti napona na mjestu preuzimanja i/ili predaje električne energije, p_{31}	95%	64%
Udio pravovremeno provedenih postupaka provjere brojlara i pripadajuće mjerne opreme, p_{32}	95%	75%
Udio pravovremeno otklonjenih neispravnosti priključka i/ili obračunskog mjernog mjesta koja za posljedicu ima prekid napajanja ili ugrožava sigurnost ljudi i imovine, p_{33}	95%	-
Udio pravovremenih ponovnih uspostava isporuke električne energije, p_{35}	99%	84%
Udio pravovremenih očitavanja mjernih podataka korisnika mreže s mjesečnim obračunskim razdobljem, p_{41}	98%	85%
Udio pravovremenih očitavanja mjernih podataka krajnjih kupaca s polugodišnjim obračunskim razdobljem, p_{42}	95%	76%
Udio pravovremeno izdanih potvrda o usklađenosti podataka novom opskrbljivaču, p_{51}	95%	100%
Udio pravovremenih očitavanja brojlara krajnjim kupcima iz kategorije kućanstvo u postupku promjene opskrbljivača, p_{52}	95%	53%

Iz tablice 2.1. vidljivo je da se skoro svi pokazatelji kvalitete usluga u Hrvatskoj ispod propisanih općih standarda. Međutim tokom 2021. HEP ODS je proveo projekt modernizacije informatičkog sustava koji se negativno odrazio na razinu kvalitete usluga, no dugoročno bi trebao znatno poboljšati kvalitetu usluga. Iz podataka je vidljivo da je razina kvalitete usluga u Hrvatskoj na niskoj razini, ali da su operatori sustava toga svjesni i provode potrebne mjere da bi podigli razinu kvalitete usluga.

Što se tiče kvalitete napona u godišnjem izvješću su izračunati i upisani podatci o otpremljenim izvješćima o kvaliteti električne energije. Prema uvjetima opći pokazatelj kvalitete napona predstavlja udio provedenih mjerenja kvalitete napona kod kojih su svi parametri kvalitete napona bili unutar propisanih granica, te se računa prema formuli 2.6[2].

$$p_v = \frac{N_{VOK}}{N_V} \cdot 100\% \quad (2.6)$$

Gdje je: N_{VOK} – Broj mjesta predaje električne energije na kojima su svi pokazatelji kvalitete napona bili unutar propisanih granica

N_V – ukupan broj mjesta predaje električne energije na kojima je provedeno mjerenje kvalitete napona

U tablici 2.2. su prikazani podatci o pokazateljima kvalitete napona u 2021. godini.

Tablica 2.2. Podatci o mjerenjima kvalitete napona za 2021. godinu[3]

Broj zahtjeva za mjerenje kvalitete napona	Broj opravdanih mjerenja kvalitete napona	Broj pravovremeno otpremljenih izvješća	Udio pravovremeno otpremljenih izvješća	Opći pokazatelj kvalitete napona, p_v
88	21	56	63.64%	76.14%

Iz tablice 2.2. je vidljivo da je unatoč relativno malom broju predanih zahtjeva za mjerenjem kvalitete napona proces izrade izvješća usporen i sa 63.64% pravovremeno otpremljenih izvješća ispod propisanog općeg standarda. Opći pokazatelj kvalitete napona iznosi 76.14% što je dobar postotak jer se promatraju samo predani zahtjevi za mjerenje kvalitete napona, što znači da je u preko 75% provedenih mjerenja utvrđena dovoljna razina kvalitete napona. Iz podataka je zaključivo da je razina kvalitete napona u Hrvatskoj u 2021. godini bila na dobroj razini ali da bi se proces izrade izvješća trebao ubrzati.

Opći pokazatelji pouzdanosti napajanja u distribucijskom sustavu su u izvješću izračunati i prikazani ovisno o:

- Tipu prekida napajanja: planirani i neplanirani
- Tipu mreže: Kabelski i nadzemni
- Uzroku: vanjski i unutarnji
- Naponskim razinama

Također su podijeljeni prema distribucijskim područjima HEP ODS-a, a najrelevantnija od ovih podjela je podjela prema tipu mreže jer su prema tipovima mreže definirani opći standardi kvalitete. U tablici 2.3. su prikazane vrijednosti općih pokazatelja pouzdanosti napajanja u distribucijskoj mreži SAIFI, SAIDI i CAIDI prema tipu mreže za cijelo područje Hrvatske, kao i vrijednosti općih standarda za pojedine pokazatelje.

Tablica 2.3. Opći pokazatelji pouzdanosti napajanja za 2021. godinu[3]

Opći pokazatelj	Opći standard	Iznos pokazatelja
SAIFI – kabelski izvod	3 dugotrajna prekida napajanja po korisniku	1.61
SAIDI – kabelski izvod	400 minuta po korisniku	122.29
CAIDI – kabelski izvod	130 minuta po prekidu	76.11
SAIFI – nadzemni izvod	6 dugotrajnih prekida napajanja po korisniku	4.25
SAIDI – nadzemni izvod	700 minuta po korisniku	462.22
CAIDI – nadzemni izvod	120 minuta po prekidu	108.87

Iz tablice 2.3. je vidljivo da su vrijednosti svih pokazatelja pouzdanosti napajanja za 2021. godinu bili unutar općih standarda. Podjela pokazatelja prema distribucijskim područjima pokazuje da su u velikoj većini područja svi pokazatelji unutar granica općih standarda. Primjetne iznimke su Elektra Zadar gdje su vidljivi problemi sa brojem prekida napajanja te Elektrolika Gospić gdje su vidljivi problemi sa vremenom otklanjanja kvarova. Iz podataka je zaključivo da je razina pouzdanosti napajanja u Hrvatskoj na visokoj razini uz lokalizirane probleme koji su uzrokovani vremenskim nepogodama, stanjem mreže ili nemogućnosti pristupa vodovima.

2.2.1 Usporedba sa prijašnjim godišnjim izvještajima

Kako su godišnji izvještaji HEP ODS-a iz 2018.[4], 2019.[5] i 2020.[6] godine dostupni, zanimljivo je usporediti podatke starih izvještaja sa podacima iz izvještaja za 2021. godinu u cilju dobivanja slike o napretku razine kvalitete opskrbe električnom energijom u Hrvatskoj.

U tablici 2.4. su prikazani opći pokazatelji kvalitete usluga od 2018. do 2021. godine.

Tablica 2.4. Opći pokazatelji kvalitete usluga 2018.-2021. godine

Opći pokazatelj kvalitete usluga	Vrijednost 2018.	Vrijednost 2019.	Vrijednost 2020.	Vrijednost 2021.
p_{11}	54%	41%	42%	37%
p_{12}	48%	62%	67%	59%
p_{13}	54%	36%	31%	35%
p_{21}	77%	79%	68%	62%
p_{22}	52%	88%	50%	15%
p_{23}	48%	60%	52%	33%
p_{31}	84%	81%	67%	64%
p_{32}	79%	77%	88%	75%
p_{33}	-	-	-	-
p_{35}	81%	83%	82%	84%
p_{41}	73%	75%	89%	85%
p_{42}	91%	88%	86%	76%
p_{51}	100%	100%	100%	100%
p_{52}	98%	70%	67%	53%

Iz tablice 2.4. je vidljivo da se razina kvalitete usluga nije bitno mijenjala u razdoblju od 2018. do 2020. godine, ali je zbog projekta modernizacije informatičkih sustava HEP ODS-a u 2021. godini primjetno narušena. Vidljivo je da su pokazatelji kvalitete usluga iz kategorije priključenja na mrežu p_{11} , p_{12} i p_{13} konstantno na niskim razinama. Iz podataka je zaključivo da je kvaliteta usluga u Hrvatskoj na relativno niskoj razini pogotovo pri priključenju na mrežu.

U tablici 2.5. su prikazani opći pokazatelji pouzdanosti napajanja SAIFI, SAIDI i CAIDI te opći pokazatelj kvalitete napona od 2018. do 2021. godine.

Tablica 2.5. Opći pokazatelji kvalitete napona i pouzdanosti napajanja 2018.-2021. godine

Opći pokazatelj	Iznos 2018.	Iznos 2019.	Iznos 2020.	Iznos 2021.
Broj zahtijeva za mjerenje kvalitete napona	37	27	58	88
Opći pokazatelj kvalitete napona, p_v	41.38%	40.75%	59.46%	76.14%
SAIFI – kabelski izvod	1.64	1.75	2.08	1.61
SAIDI – kabelski izvod	146.1	153.02	167.53	122.29
CAIDI – kabelski izvod	88.84	87.58	80.39	76.11
SAIFI – nadzemni izvod	5.04	6.74	5.8	4.25
SAIDI – nadzemni izvod	578.57	654.59	689.99	462.22
CAIDI – nadzemni izvod	114.69	114.35	119.07	108.87

Iz tablice 2.5. je vidljivo da je opći pokazatelj kvalitete napona primjetno porastao kroz godine, što je pozitivan trend, pogotovo uz povećanje broja predanih zahtijeva za mjerenje kvalitete napona. Svi opći pokazatelji pouzdanosti napajanja su od 2018. unutar granica općih standarda osim broja prekida u nadzemnim mrežama u 2019. godini. Također je vidljivo da je vrijeme trajanja prekida smanjeno u 2021. godinu u usporedbi sa prijašnje tri godine. Iz podataka je zaključivo da je pouzdanost napajanja u Hrvatskoj na dobroj razini još od početka vođenja evidencije.

3. KVALITETA NAPONA

Kvaliteta napona opisuje kvalitetu napona na mjestu predaje ili preuzimanja uspoređujući definirane parametre napona sa referentnim vrijednostima. Parametri ili pokazatelji kvalitete električne energije su značajke napona koje određuju odstupanje stvarnog opskrbnog napona od savršenog sinusnog napona.

3.1. Parametri kvalitete električne energije

Normativne udruge koje su mjerodavne za područje elektroenergetike su internacionalne udruge IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) i IEC (International Electrotechnical Commission) te Europska udruga CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization). Norma CENELEC-a EN 50160 je mjerodavna norma koja propisuje uvjete održavanja kvalitete električne energije za područje Europske Unije uključujući i Republiku Hrvatsku. Norma definira parametre kvalitete električne energije te propisuje vrijednosti u kojima se moraju nalaziti. Zajedno sa normom IEC-a IEC 61000-4-30 koja propisuje uvjete elektromagnetske kompatibilnosti (EMC – electromagnetic compatibility) i provedbe mjerenja kvalitete električne energije čine osnovu normativne definicije kvalitete električne energije.

Norma EN 50160 definira sljedeće parametre kvalitete električne energije[7]:

1. Frekvencija napona
2. Promjene amplitude napona
3. Nagle promjene napona (flikeri)
4. Propadi napona
5. Kratkotrajni prekidi napajanja
6. Dugotrajni prekidi napajanja
7. Privremeni mrežni prenaponi
8. Tranzijentalni prenaponi
9. Fazna nesimetrija napona
10. Naponi viših harmonika
11. Naponi međuharmonika
12. Signalni naponi

3.2. Frekvencija napona

Frekvencija napona predstavlja broj perioda izmjeničnog napona u jednoj sekundi. U Europskom sinkronom području nazivna frekvencija iznosi 50 Hz, odnosno 50 punih perioda po sekundi. Frekvencija je na razini mreže određena balansom proizvodnje i potrošnje energije, kada je potrošnja veća od proizvodnje frekvencija pada i obratno. Posebno je opasno kada dođe do veće promjene frekvencije kada može doći do potpunog ispada mreže (ispad iz sinkronizacije). Frekvencija se regulira u stvarnom vremenu promjenom izlaznih snaga generatora, ovisno o opterećenju na mreži.

Norma propisuje da u normalnim pogonskim uvjetima frekvencija mora ostati u sljedećim granicama za period mjerenja od tjedan dana:

- za sustave u sinkronoj zoni povezanog sustava (europsko sinkrono područje)

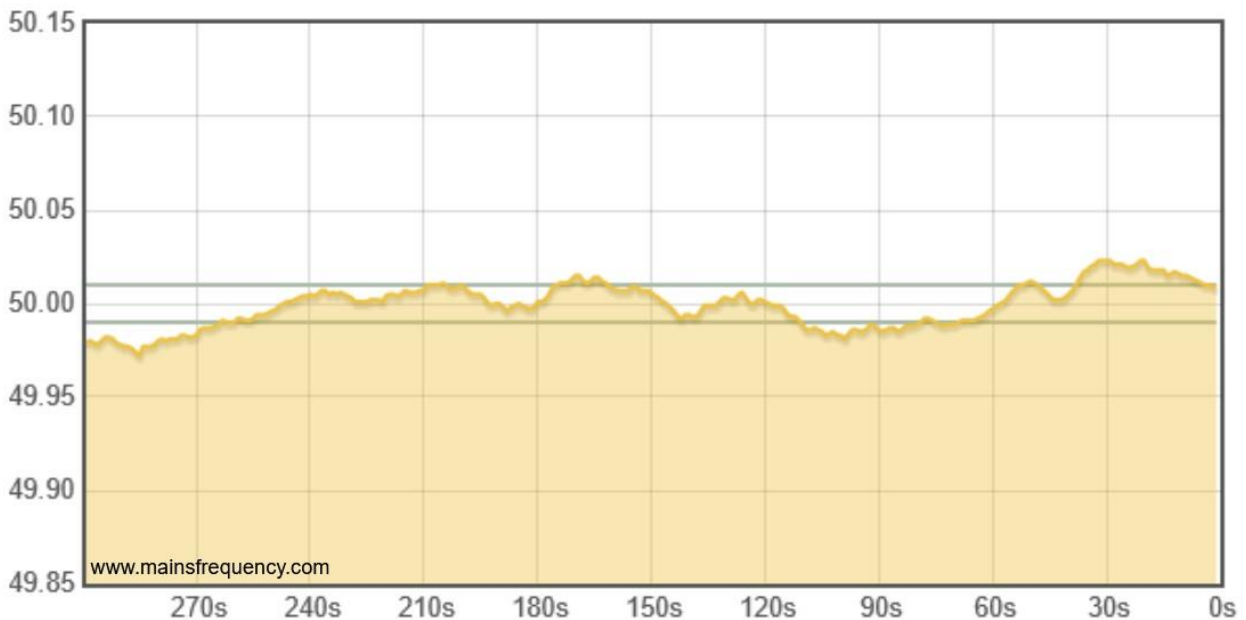
50 Hz \pm 1% (49.5 – 50.5 Hz) 99.5% tjedna

50 Hz + 4% - 6% (47 – 52 Hz) 100% tjedna

- za sustave koji nisu povezani na sinkronu zonu (mreže na nekim otocima)

50 \pm 2% (49 – 51 Hz) 95% tjedna

50 \pm 15% (42.5 – 57.5 Hz) 100% tjedna



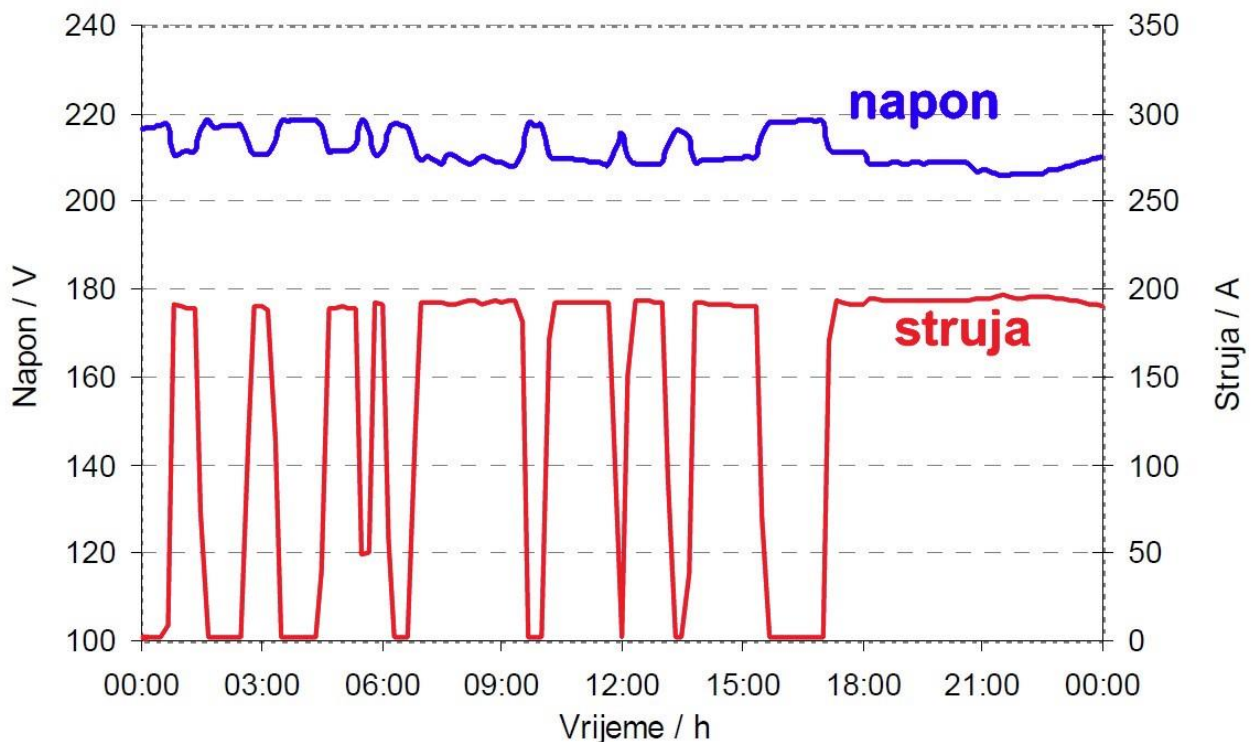
Slika 3.1. Promjena frekvencije Europskog sinkronog područja kroz 5 minuta[8]

3.3. Promjene amplitude napona

U standardnim izmjeničnim sinusnim električnim sustavima amplituda napona predstavlja najveću vrijednost napona u pozitivnoj periodi. Efektivna vrijednost izmjeničnog napona predstavlja napon koji bi imao istosmjerni napon iste snage, te za idealni sinusni napon iznosi vrijednost amplitude podijeljena sa $\sqrt{2}$. U europskom sinkronom području nazivna efektivna vrijednost faznog napona je 230 V. Efektivna vrijednost napona na mjestu predaje električne energije ovisi o više faktora, prvenstveno o potrošnji jalove snage i izobličenjima sinusoide napona.

Norma propisuje da efektivna vrijednost napona za interval mjerenja od 10 minuta neće odstupati više od:

±10% nazivne vrijednosti	(207 – 253 V) za $U_n = 230$ V	95% mjerenja u tjednu
+10% -15% nazivne vrijednosti	(195.5 – 253 V) za $U_n = 230$ V	100% mjerenja u tjednu



Slika 3.2. Promjena napona ovisno o opterećenju(struji)[9]

3.4. Nagle promjene napona (flikeri)

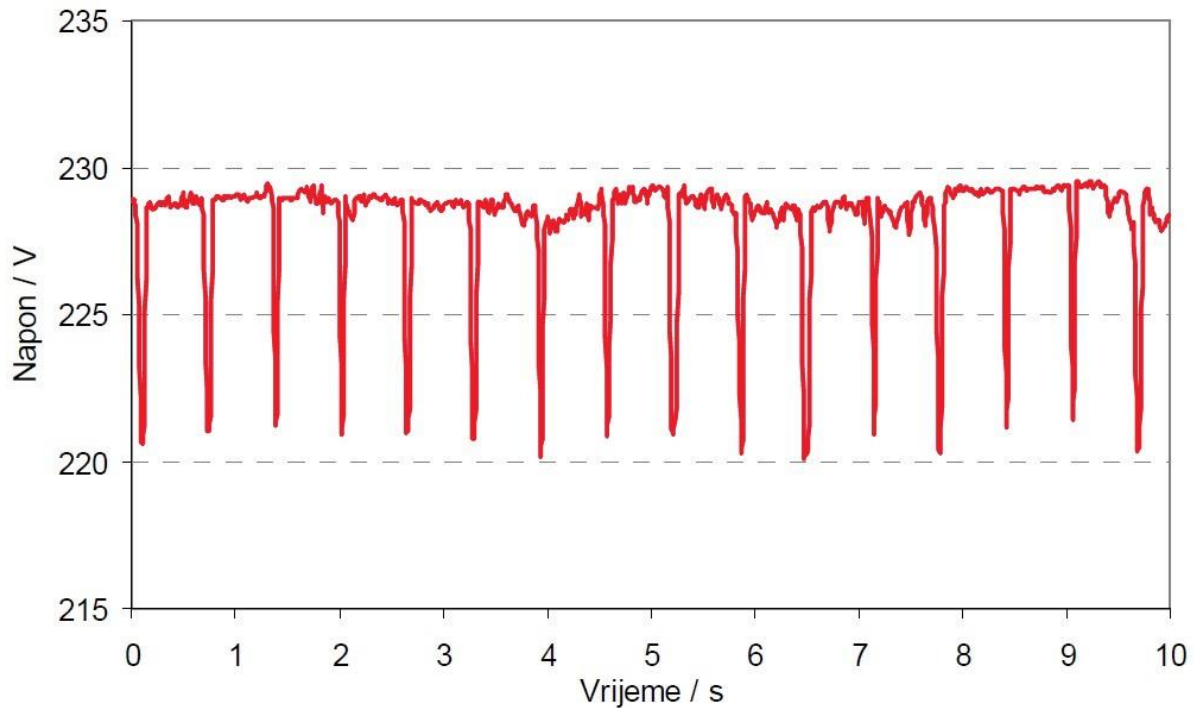
Nagle promjene napona su uglavnom izazvane promjenama tereta na mreži i sklopnim radnjama u mreži. U normalnom pogonu te promjene većinom ostaju unutar granica 5% od nazivnog napona, a promjena do 10% nazivnog napona kratkog vremena se može dogoditi u nekim slučajevima. Promjene napona veće od 10% se smatraju prenaponima ili propadima napona, ovisno dali napon poraste ili propadne ispod nazivne vrijednosti. Nagle promjene napona (flikeri) izazivaju privremena treperenja svijetla uočljiva ljudskom oku. Reakcije na flikere su subjektivne, odnosno neki ljudi neće primijetiti neki fliker koji bi druga osoba primijetila. Definiran je pojam „intenzitet flikera“ koji se koristi u svrhe normativnog definiranja te propisivanja granica tolerancije. Definicija intenziteta flikera glasi: ako se 100 ljudi nalazi u jednoj prostoriji pod istim uvjetima i 50 ljudi primijeti promjenu intenziteta svijetlosti uzrokovanu flikerom, taj fliker je intenziteta 1. Intenzitet flikera se računa prema formuli (3.1).

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}} \quad (3.1)$$

Gdje je: P_{sti} – kratkotrajni intenzitet flikera računat kroz period od 10 minuta

P_{lt} – dugotrajni intenzitet flikera izračunat iz 12 vrijednosti P_{sti} kroz period od 2 sata

Norma propisuje da u normalnim pogonskim uvjetima za bilo koji period od tjedan dana intenzitet flikera mora biti $P_{lt} \leq 1.95\%$ intervala mjerenja.



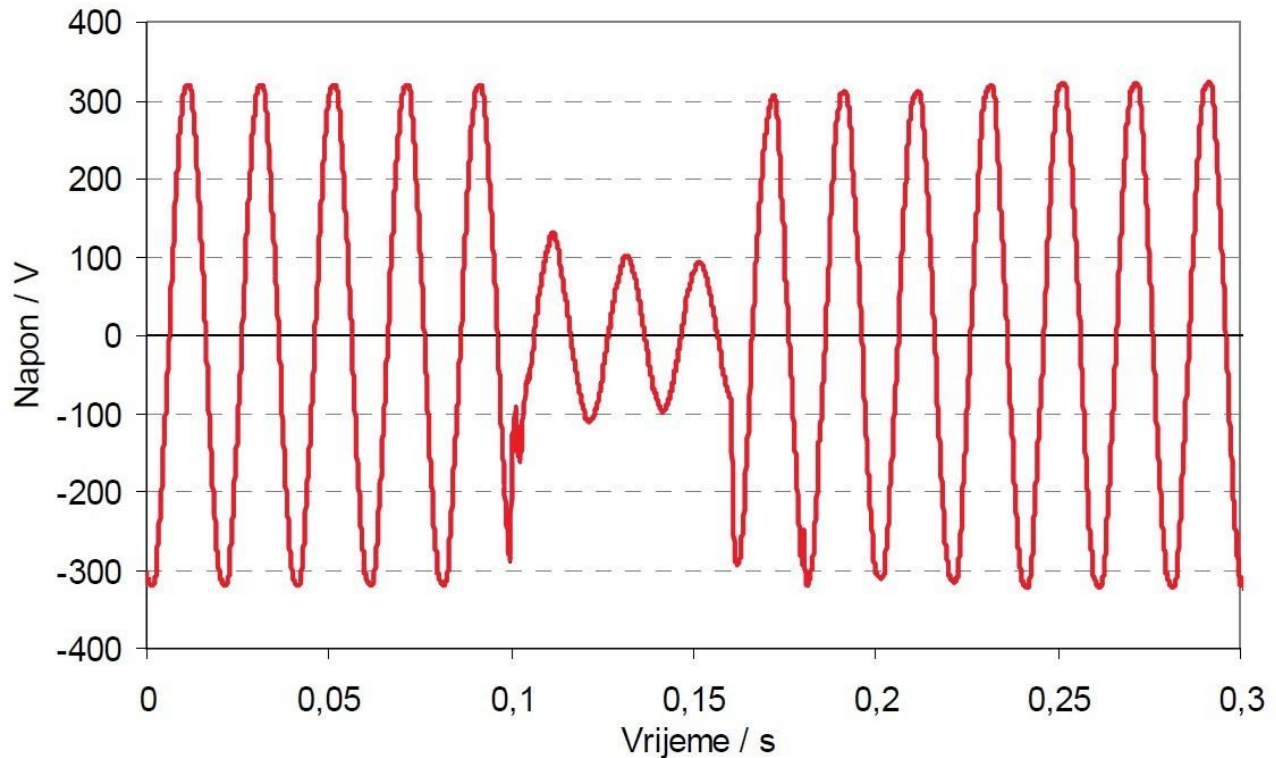
Slika 3.3. Primjer flikera napona[9]

3.5. Propadi napona

Propad napona je nagla redukcija opskrbnog napona na vrijednost između 90% i 1% efektivne vrijednosti, popraćena sa vraćanjem napona na nazivnu vrijednost nakon kratkog vremena. Vrijeme trajanja propada napona dogovorno iznosi između 10ms i 1 minute. Definirana je dubina propada napona kao razlika između najmanje efektivne vrijednosti napona za vrijeme propada i nazivne efektivne vrijednosti. Propadi napona koji ne smanje napon ispod 90% nazivne vrijednosti se ne smatraju propadima, dok se propadi napona na vrijednost ispod 1% nazivne vrijednosti smatraju prekidima napajanja.

Propadi napona su većinom uzrokovani kvarovima u instalacijama kupaca ili kvarovima u distribucijskoj mreži. Propadi su nepredvidljivi i nekonzistentni događaji, njihov broj znatno varira ovisno o promatranom djelu mreže i promatranom vremenskom razdoblju. Pod normalnim pogonskim uvjetima broj propada može se kretati od nekoliko desetaka do tisuću propada. Prema normi većina propada mora biti trajanja kraćeg od 1 sekunde te dubine propada ne veće od 60%. U nekim dijelovima

niskonaponske mreže propadi dubine 10% do 15% mogu biti učestali zbog sklopnih radnji u lokalnoj mreži.



Slika 3.4. Primjer propada napona[9]

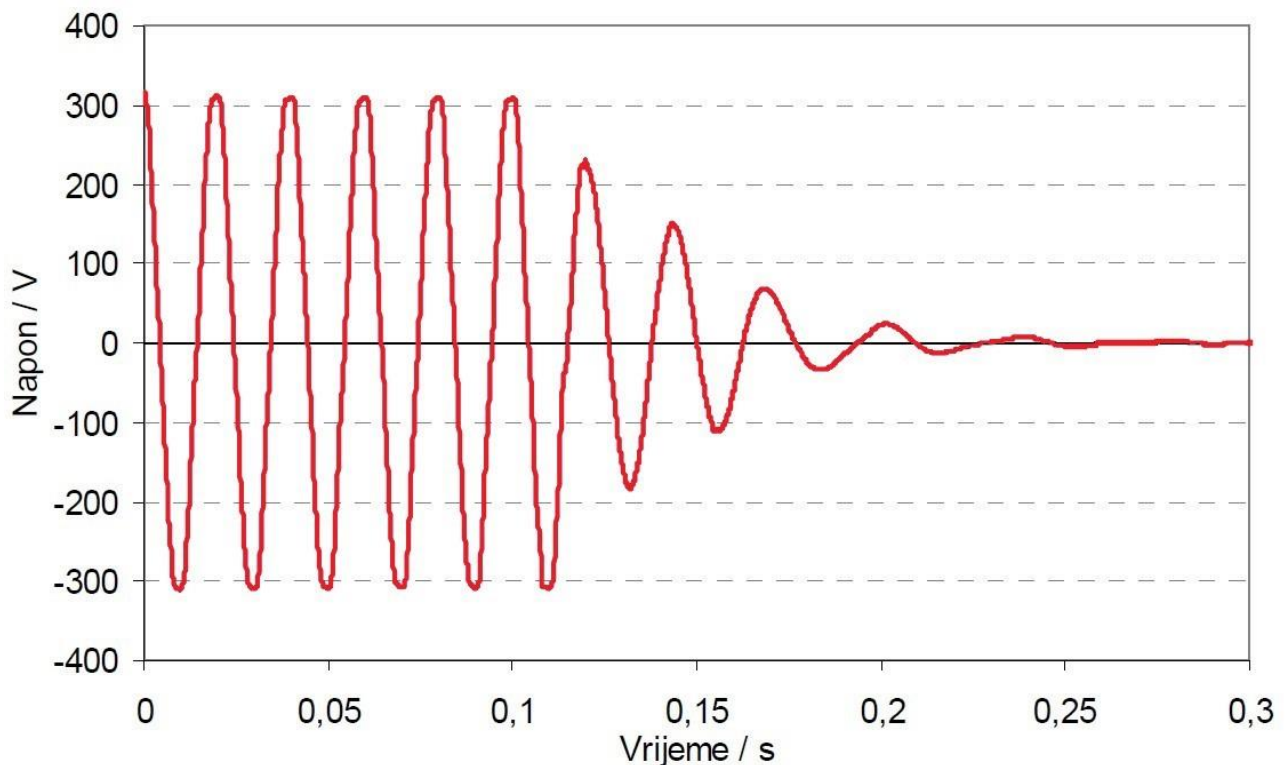
3.6. Kratkotrajni i dugotrajni prekidi napajanja

Kao što je navedeno u prošlom potpoglavlju svaki propad napona na vrijednost ispod 1% nazivne efektivne vrijednosti napona se smatra prekidom napajanja. Prekidi napajanja mogu biti planirani i neplanirani. Planirani prekidi napajanja se dešavaju zbog potrebnih radova ili drugih zahvata na mreži. Korisnici mreže se obavještavaju unaprijed o vremenu, lokalnosti i planiranom trajanju prekida. Neplanirani prekidi se mogu desiti kod trajnih ili privremenih oštećenja na mreži, poput prekida kabela ili ispada transformatorskih stanica iz pogona. Neplanirani prekidi se dešavaju zbog vanjskih utjecaja, većinom zbog nevremena, kvarova opreme ili smetnji.

Neplanirani prekidi napajanja se dijele na:

- kratkotrajne prekide trajanja do 3 minute koji su većinom uzrokovani tranzijentalnim odnosno privremenim kvarovima, poput ispada iz pogona neke transformatorske stanice nakon prorade zaštite
- dugotrajne prekide trajanja 3 minute ili duže koji su većinom uzrokovani trajnim kvarom na opremi koju treba zamijeniti ili popraviti, poput prekida voda uzrokovanim padom stabla usred nevremena

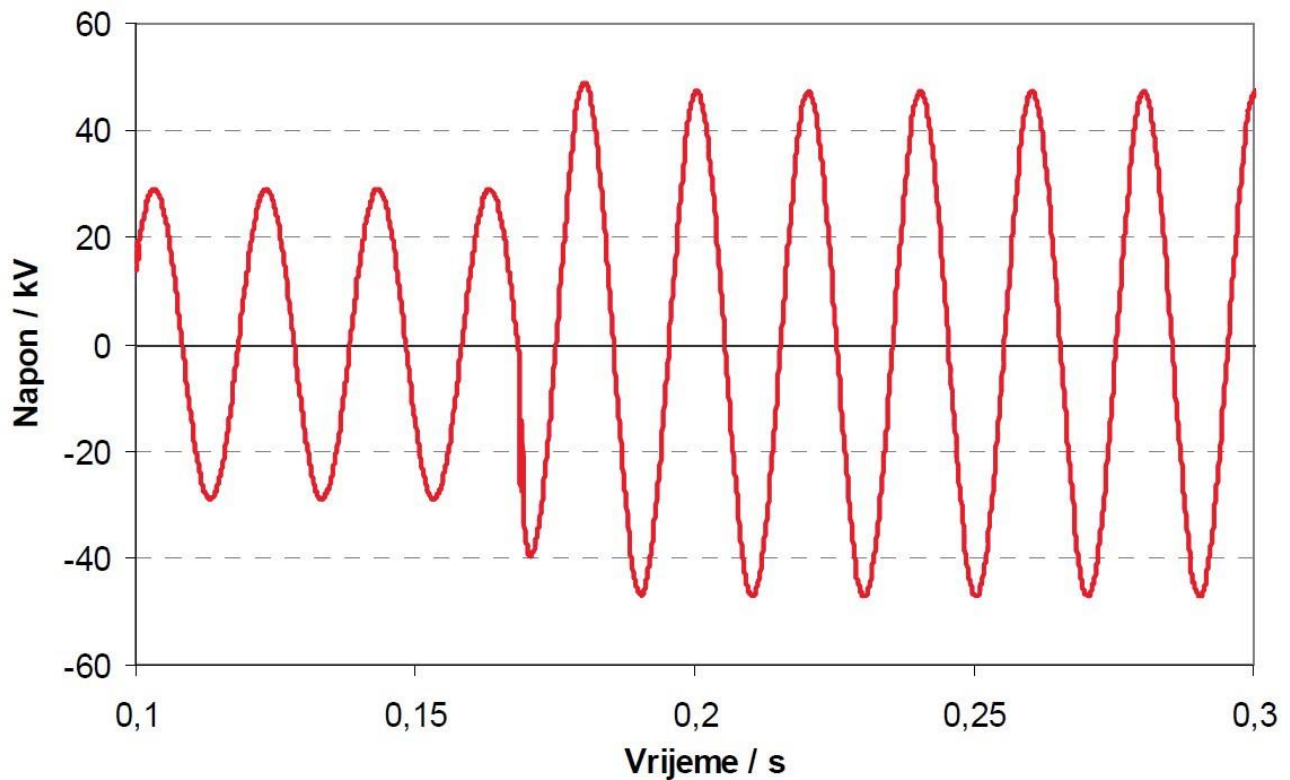
Prema normi broj kratkotrajnih prekida napajanja treba iznositi između nekoliko desetaka do nekoliko stotina, dok 70% tih prekida mora biti trajanja kraćeg od 1 sekunde. Zbog nepredvidljivosti dugotrajnih prekida napajanja, kao i ovisnosti o konfiguraciji i stanju lokalne mreže nije moguće propisati točan dozvoljeni broj kratkotrajnih prekida na razini cijele mreže. Broj dugotrajnih prekida prema normi mora biti manji od 10 do 50 prekida ovisno o dijelu mreže. Pošto se korisnici unaprijed obavještavaju o planiranim prekidima ne postoji popisani broj dopuštenih planiranih prekida.



Slika 3.5. Primjer prekida napajanja[9]

3.7. Privremeni mrežni prenaponi

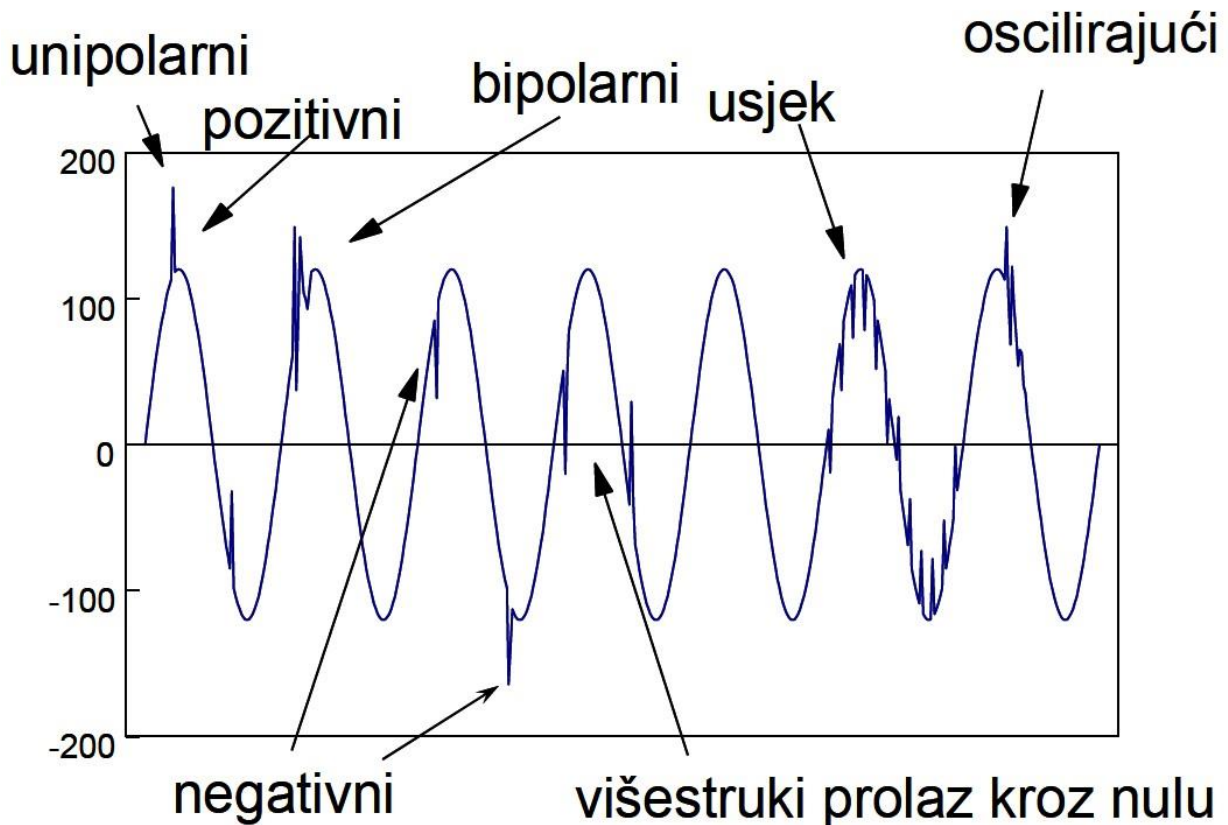
Privremeni mrežni prenaponi su lokalni prenaponi koji mogu trajati nekoliko perioda sinusnog napona. Većinom su uzrokovani kvarovima ili sklopnim radnjama u mreži. Prenaponi se pojavljuju kod kvarova u javnoj distribucijskoj mreži ili instalacijama korisnika mreže, te nestaju nakon uklanjanja kvara. Zbog promjene položaja neutralne točke trofaznog sustava ovi prenaponi mogu dosegnuti vrijednosti linijskog napona. Pod određenim okolnostima kvar na višenaponskoj strani transformatora može izazvati prenapone na niženaponskoj strani transformatora dok struja kvara teče. Prema normi privremeni mrežni prenaponi ne smiju preći vrijednost 1.5 kV efektivno na niskonaponskoj mreži, ok u srednjenaponskoj mreži prenaponi ne smiju preći vrijednosti od 1.7 – 2 puta vrijednost efektivnog napona.



Slika 3.6. Primjer mrežnog prenapona[9]

3.8. Tranzijentalni prenaponi

Tranzijentalni prenaponi su vrlo prigušeni, oscilatorni ili neoscilatorni prenaponi trajanja nekoliko milisekundi ili kraće. Većinom su uzrokovani udarima munja, sklopnim radnjama ili djelovanjima zaštitne opreme. Vrijeme porasta prenapona varira od nekoliko milisekundi do manje od mikrosekunde. Međutim prenaponi dužeg trajanja obično imaju manje amplitude nego prenaponi kraćeg trajanja. Zbog toga je vjerojatnost pojave prenapona visoke amplitude i dugog trajanja vrlo mala. Energija tranzijentalnog prenapona ovisi prvenstveno o uzroku prenapona. Prenaponi uzrokovani udarima groma imaju generalno veće amplitude ali manju ukupnu količinu energije nego prenaponi uzrokovani sklopnim radnjama, zbog kraćeg trajanja atmosferskih prenapona. Uređaji korisnika su dizajnirani prema normi EN 60664-1 da izdrže većinu prenapona koji se mogu pojaviti na mreži, te je također moguća instalacija dodatnih zaštitnih uređaja od prenapona prema normi EN 60364-4-44 za postizanje potpune zaštite od prenapona. Prema normi EN 50160 tranzijentalni prenaponi na niskonaponskoj mreži ne smiju preći granicu od 6 kV amplitude.

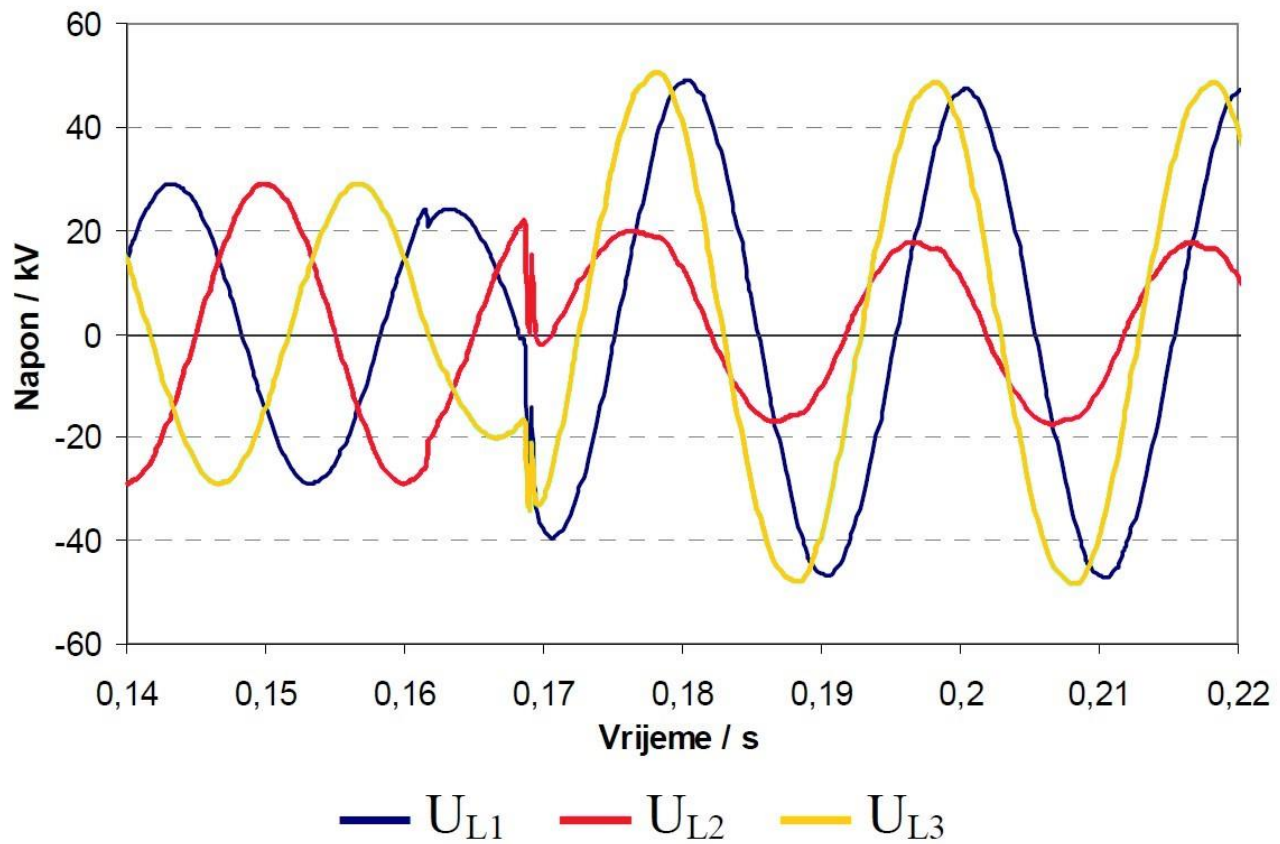


Slika 3.7. Primjer nekoliko vrsta tranzijentalnih prenapona[9]

3.9. Fazna nesimetrija napona

Današnja elektroenergetska mreža je koncipirana kao trofazna izmjenična mreža. Trofazni sustavi imaju tri fazna vodiča i jednu nulu. Radi simetrije sustava koja je bitna za rad mnogih uređaja koji koriste trofazno napajanje faze su jednakih iznosa amplituda i jednakih frekvencija, sa međusobnim faznim pomakom od 120° . Fazna nesimetrija je stanje trofaznog sustava u kojem efektivne vrijednosti napona nisu jednake u svim fazama ili fazni pomak uzastopnih faza nije jednak. Fazna nesimetrija se mjeri kao razina odstupanja od idealnog trofaznog sustava.

Prema normi u normalnim pogonskim uvjetima dopušta se fazna nesimetrija od 0 - 2% efektivne vrijednosti mjerene u 10 minutnim intervalima tokom 95% danog tjedna. U određenim područjima sa djelomično jednofaznim ili dvofaznim priključcima potrošača dozvoljava se nesimetrija i do 3%. U svrhe mjerenja nesimetrije se promatra razlika između inverzne komponente napona i izravne komponente napona, jer je ona mjerodavna za moguće smetnje izazvane nesimetrijom.



Slika 3.8. Primjer fazne nesimetrije napona[9]

3.10. Naponi viših harmonika

Nazivna frekvencija napona na području Europe iznosi 50 Hz. Napon je sinusnog oblika u idealnom slučaju, no u stvarnosti dolazi do manjih izobličenja sinusoide. Jedan od najčešćih oblika izobličenja se javlja u obliku napona viših harmonika, koji su svi naponi kojima je frekvencija višekratnik nazivne frekvencije sustava. Više harmonike u opskrbnom naponu možemo promatrati individualno preko njihovih relativnih amplituda nazivnog napona ili u cijelosti preko faktora harmoničkog izobličenja THD (eng. Total Harmonic Distortion) koji se može izračunati prema formuli (3.2).

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{40} (U_h)^2}{U_1^2}} \quad (3.2)$$

Gdje je: U_h – vrijednost pojedinog harmonika, [V]

U_1 – vrijednost nazivnog napona, [V]

Prema normi u normalnim pogonskim uvjetima srednja 10 minutna vrijednost svakog individualnog harmonika ne smije preći vrijednosti iz tablice 3.1. tokom 95% danog tjedna. Također, ukupni faktor harmoničkog izobličenja THD za 40 prvih harmonika ne smije prijeći 8%.

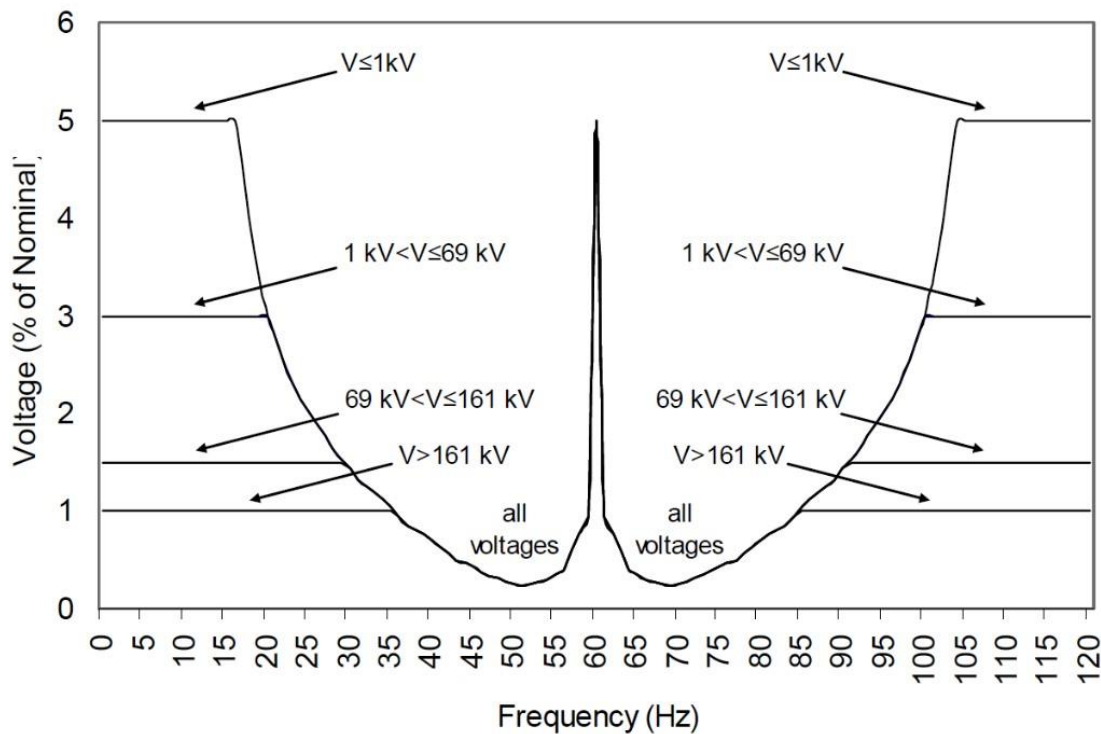
Tablica 3.1. Dozvoljene vrijednosti pojedinih harmonika[7]

Neparni harmonici višekratnici od 3		Neparni harmonici koji nisu višekratnici od 3		Parni harmonici	
Redni broj harmonika	Relativan napon (% U_n)	Redni broj harmonika	Relativan napon (% U_n)	Redni broj harmonika	Relativan napon (% U_n)
3	5	5	6	2	2
9	1.5	7	5	4	1
15	0.5	11	3.5	6	0.5
21	0.5	13	3	8-24	0.5
		17	2		
		19-25	1.5		
		23	1.5		
		25	1.5		

3.11. Naponi međuharmonika

Osim napona viših harmonika koji pridonose izobličenju sinusnog napona pojavljuju se i naponi međuharmonika, odnosno naponi kojima frekvencija nije višekratnik nazivne frekvencije mreže. Međuharmonici, čak i u malim količinama mogu izazvati flikere i probleme u radu sustava mrežnog tonfrekventnog upravljanja. Sustavi mrežnog tonfrekventnog upravljanja (MTU) služe za upravljanje brojilima, sustavima javne rasvjete te većim trošilima poput sustava grijanja.

Danas međuharmonici predstavljaju sve veći problem zbog povećanja korištenja elektroničkih frekvencijskih pretvarača i drugih uređaja energetske elektronike koji unose međuharmonike u mrežu. Prema normi EN 50160 dopuštena razina međuharmonika još nije čvrsto propisana, zbog nedostatka praktičnog iskustva. Prema normi IEEE 519 koja opisuje uvjete maksimalne dozvoljene distorzije opskrbnog napona za 60 Hz mrežu dozvoljene vrijednosti međuharmonika su prikazane na slici 3.9.



Slika 3.9. Dopuštene vrijednosti međuharmonika za 60Hz mrežu[10]

Ordinata – Voltage (% of Nominal) – Napon u postotku nazivnog, [% U_n]

Apscisa – Frequency (Hz) – Frekvencija u hercima, [Hz]

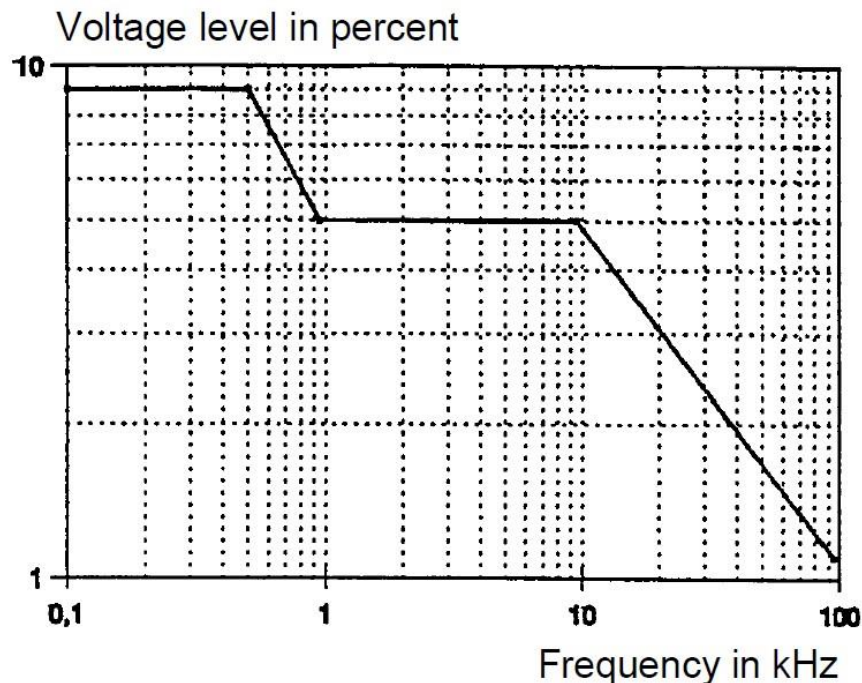
3.12. Signalni naponi

Signalni naponi su naponi superponirani opskrbnom naponu koji se koriste za prijenos upravljačkih signala i informacija u distribucijskoj mreži. Ti signali su malih amplituda i generalno ne izazivaju smetnje korisnicima, no propisane su im granične vrijednosti da ne bi ometali normalan pogon mreže.

Prema [7] postoje tri vrste signalnih napona na distribucijskoj mreži:

1. signali nosive frekvencije – superponirani naponski signali frekvencije od 3 kHz do 148.5 kHz
2. signali mrežnog tonfrekventnog upravljanja (MTU) - superponirani sinusni naponski signali frekvencije od 110 Hz do 3000 Hz
3. signalne oznake na opskrbnom naponu – kratkotrajne promjene napona u odabranim dijelovima krivulje opskrbnog napona

Prema normi preko 99% vrijednosti 3-sekundnih mjerenja signalnih napona moraju ostati u granicama prikazanim na slici 3.10.



Slika 3.10. Dozvoljene razine signalnih napona[7]

Ordinata – Voltage level in percent – Naponska razina u postotku, [% U_n]

Apscisa – Frequency in kHz – frekvencija u kilohercima, [kHz]

4. MJERENJE I NADZOR KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE

U začetku elektroenergetskih mreža mreže su bile pod vlasništvom i kontrolom državnih institucija. Takav sustav je funkcionirao zbog iznimne strateške važnosti mreža, ali nije uvijek osiguravao najjeftinije cijene korisnicima. Razvojem otvorenog tržišta robe javila se ideja tržišta električne energije, radi povećanja kvalitete robe, u ovog slučaju električne energije i istovremenog osiguravanja realne cijene energije. U Hrvatskoj je otvorena burza električne energije (CROPEX) koja je potpuno puštena u pogon 1. srpnja 2008. godine[11]. Kao roba na tržištu, električnoj energiji je bilo potrebno odrediti kvalitetu, jer se roba veće kvalitete može prodati za veću cijenu i obratno. Kvalitetu električne energije je potrebno odrediti na mjestu razmjene i/ili predaje krajnjim kupcima. U slučaju elektroenergetske mreže to znači da se kvaliteta određuje na granici između prijenosne i distribucijske mreže te na priključcima korisnika.

Provođenje mjerenja kvalitete na granicama između prijenosa i distribucije je puno lakše tehnički izvesti nego mjerenje na priključcima svakog korisnika, zbog broja mjernih mjesta. Transformatorskih stanica 110/x kV koje predstavljaju granice između prijenosa i distribucije danas ima 165 u Hrvatskoj[12], dok priključaka korisnika ima preko 2 milijuna. Očito je da je uspostava sustava stalnog nadzora kvalitete električne energije u transformatorskim stanicama 110/x kV prihvatljivije tehničko i ekonomsko rješenje nego nadzor kvalitete kod svakog korisnika, međutim kvaliteta električne energije na mjestu predaje korisnicima je zapravo najbitnija. Ovaj problem se može pojednostaviti ako se uzme kao činjenica da su parametri kvalitete električne energije jednaki kod svih korisnika priključenih na istu transformatorsku stanicu 20(10)/0.4 kV. Ovakvih stanica ima oko 25000 u Hrvatskoj što čini ovo rješenje puno ekonomski prihvatljivije.

Mjerenje kvalitete električne energije je proces prikupljanja i zapisivanja podataka o naponu tokom određenog perioda mjerenja. Ti podatci se zatim analiziraju i uspoređuju sa referentnim podacima kako bi se dobila slika o kvaliteti električne energije na mjestu mjerenja. Mjerena se provode radi utvrđivanja kvalitete napona kod nekog korisnika ili u svrhu planiranja razvoja mreže te priključka novih korisnika. Standardno vrijeme provođenja mjerenja je tjedan dana da bi se dobila dugoročna slika o kvaliteti električne energije na mjernom mjestu. Granice parametara kvalitete električne energije koji su definirani normom EN 50160 su definirane za period od tjedan dana ili period cijele godine u slučaju prekida napajanja.

Nadzor (monitoring) kvalitete električne energije je proces stalnog prikupljanja i obrade podataka o kvaliteti napona u nekoj točki elektroenergetske mreže. Uređaji za nadzor kvalitete električne energije moraju biti spojeni na sustav stalnog praćenja kako bi se mogao vršiti nadzor u stvarnom vremenu, ili imati veliku digitalnu memoriju koja može pohraniti više mjeseci mjernih podataka koji se onda mogu očitati na mjestu mjerenja kada je potrebno. Sustavi nadzora se koriste u elektranama, transformatorskim stanicama i postrojenjima te u većim industrijskim postrojenjima. Moguće je nadzirati samo osnovne karakteristike napona poput frekvencije i amplitude napona ili detaljnu harmoničku i tranzijentalnu analizu napona, ovisno o potrebama i ciljevima nadzora. Danas se teži integraciji sustava nadzora kvalitete električne energije za sve korisnike mreže što je ogroman i kompleksan problem, ali pojavljuju se tehnička rješenja za ovaj problem.

Prema općim uvjetima za opskrbu električnom energijom HOPS i HEP ODS su bili dužni uspostaviti sustav za praćenje kvalitete usluga do 1. srpnja 2006. godine, te sustave za praćenje kvalitete napona i pouzdanosti napajanja do 1. siječnja 2007. godine[13]. Zbog kompleksnosti ovih sustava do danas još nije uspostavljen sustav nadzora kvalitete napona za sve korisnike, no sustavi za praćenje kvalitete usluga i pouzdanosti napajanja su uspostavljeni i ti podatci se objavljuju u godišnjim izvještajima o kvaliteti opskrbe električnom energijom. Mjerenja kvalitete električne energije na mjestu priključka korisnika se provode samo na upit korisnika. OPS ili ODS moraju u roku od 20 dana od podnošenja upita postaviti mjerni uređaj koji će provesti mjerenje u trajanju od tjedan dana, te dostaviti pisano izvješće o kvaliteti napona u roku od 10 dana nakon završetka mjerenja[14].

4.1. Ciljevi mjerenja kvalitete električne energije

Prije provođenja mjerenja kvalitete električne energije potrebno je dobro definirati razlog i ciljeve mjerenja, jer nam oni određuju potrebnu opremu i definiraju postupak mjerenja. U praksi najčešći razlozi mjerenja su:

- Korisnik se žali na razinu kvalitete električne energije
- Operator mreže sumnja na unošenje smetnji od strane korisnika
- Oprema ili uređaji priključeni na mrežu ne rade na ispravan način
- Puštanje nove elektrane ili postrojenja u pogon

Dok su najčešći ciljevi mjerenja kvalitete električne energije:

- Otkrivanje izvora smetnji
- Rješavanje problema sa radom uređaja ili opreme
- Određivanje kvalitete električne energije na priključku korisnika
- Određivanje kvalitete dostupne električne energije prije priključenja nove opreme
- Određivanje utjecaja nekog postrojenja na kvalitetu električne energije

Ako se kupac žali na razinu kvalitete električne energije operator mreže je dužan provesti mjerenje kvalitete na priključku kupca u trajanju od tjedan dana. Za ovo mjerenje je potreban prijenosni (off-line) uređaj za mjerenje kvalitete električne energije, prikladna programska podrška za analizu podataka te potrebno stručno osoblje. Ako operator sumnja na unošenje smetnji od strane korisnika iznad dopuštenih granica onda može provesti mjerenje na priključku korisnika ili na TS sa koje se korisnik napaja. Za ovo mjerenje je također potreban prijenosni uređaj za mjerenje, programska podrška i stručno osoblje. Kada neki uređaj ne radi ispravno mjerenje se provodi što bliže uređaju. Ako se otkrije problem sa kvalitetom električne energije potrebno je dodatno mjerenje na priključku da bi se utvrdilo da li uzrok smetnji dolazi iz mreže ili samog postrojenja gdje se uređaj nalazi. Za ovakva mjerenja su potrebni prijenosni uređaj za mjerenje, programska podrška i stručno osoblje, uz dodatnu koordinaciju sa operatorom mreže radi otkrivanja izvora smetnji. Kod puštanja novih elektrana ili postrojenja u pogon provodi se mjerenje u trajanju od dva tjedna, jedan tjedan prije i jedan tjedan poslije puštanja u pogon, da bi se komparativno mogao odrediti utjecaj postrojenja na kvalitetu električne energije u lokalnoj mreži. Za ovakva mjerenja su potrebni isti resursi kao i za ostala navedena mjerenja.

4.2. Postupak mjerenja kvalitete električne energije

Bez obzira na cilj mjerenja uvijek se koristi ista osnovna procedura mjerenja, koja je prema[15]:

1. Planiranje mjerenja
2. Priprema za mjerenje
3. Inspekcija mjernog mjesta
4. Provođenje mjerenja u potrebnom periodu
5. Analiza mjernih rezultata
6. Provođenje mjera za otklanjanje problema, ako je to potrebno

Planiranje mjerenja obuhvaća određivanje razloga i cilja mjerenja, određivanje mjesta postavljanja mjernih uređaja, definiranje vremena mjerenja, određivanje potrebne mjerne opreme i stručnog osoblja te određivanje obujma analize prikupljenih podataka. U procesu planiranja prikupljaju se podatci o mjestu lokaciji, poput shema električnih instalacija te utvrđivanje konkretnih problema koji se pojavljuju i uvjeti u kojima se pojavljuju. Također se osigurava sva potrebna mjerna oprema i programska podrška te se upućuje stručno osoblje u potrebe mjerenja. Prije početka samog mjerenja još je potrebno provesti inspekciju mjernog mjesta. Inspekcija obuhvaća vizualnu i tehničku inspekciju mjernog mjesta. Vizualna inspekcija se provodi na priključku mjernog mjesta te transformatorskoj stanici sa koje se napaja mjesto. Također se traže i druga postrojenja u blizini koja mogu biti izvor smetnja. Vizualnom inspekcijom se utvrđuju vidljiva oštećenja na električnim instalacijama i potencijalni izvori smetnji koji su korisni u fazi otklanjanja problema. Tehnička inspekcija je proces električnog ispitivanja instalacije te većih uređaja na mjestu radi utvrđivanja mogućih kvarova ili oštećenja.

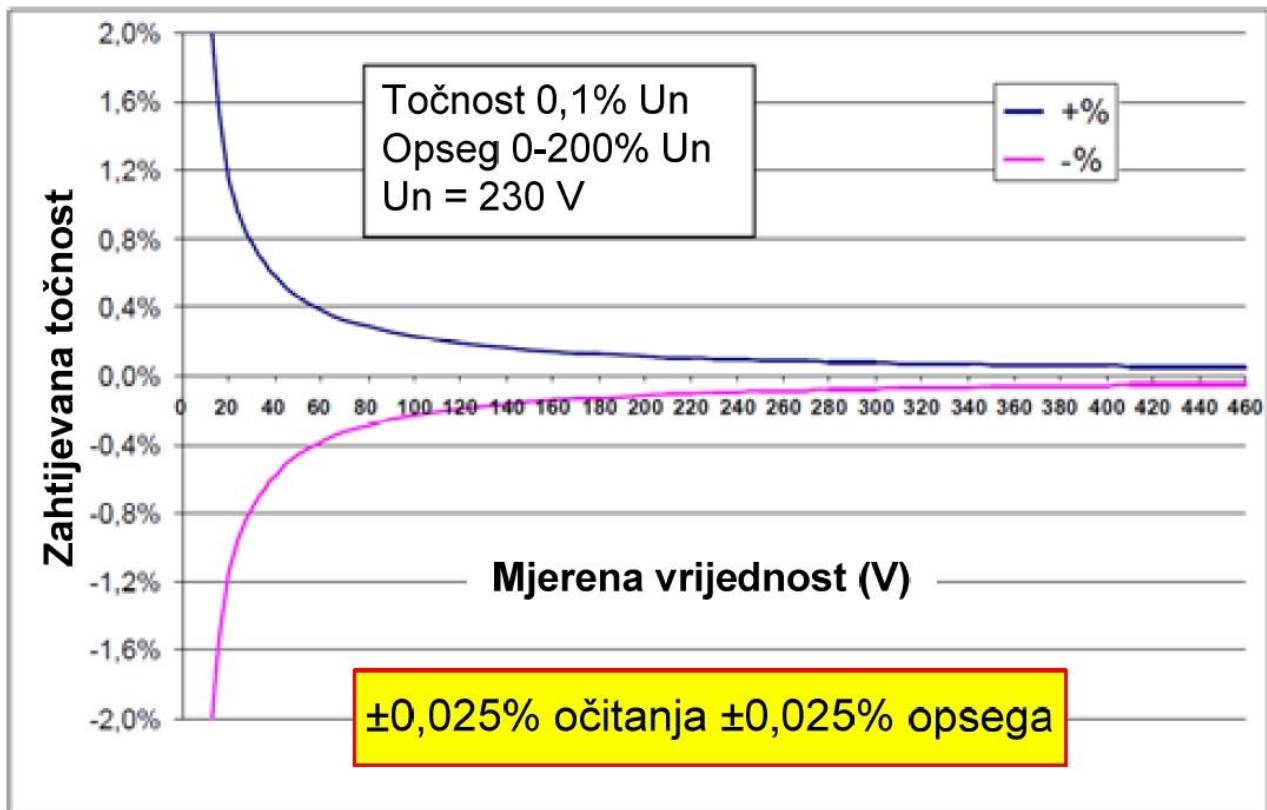
Nakon kvalitetnog planiranja, pripreme te odrađene inspekcije može se pristupiti samom mjerenju kvalitete električne energije. Mjerni uređaji se spajaju na za to prethodno određena mjesta. Kod spajanja uređaja bitno je pratiti smjer toka struje kroz mjesto te redoslijed faza kod trofaznih mjerenja. Uređaji se spajaju u naponsku granu (paralelno) tako da postrojenje ne treba isključivati iz pogona. Ovisno o potrebi mjerenja i mogućnosti uređaja moguće je spojiti i strujnu granu (serijski), koja pomaže pri otkrivanju izvora naponskih smetnji. Jedan kanal uređaja se mora spojiti na relaciju faza-zemlja ili nula-zemlja radi praćenja impulsa uzemljenja. Nakon priključka mjernih uređaja podešavaju se veličine koje će uređaji mjeriti i vrijeme trajanja mjerenja, kako je određeno tokom planiranja. Nakon spajanja i podešavanja mjernih uređaja može započeti mjerenje kvalitete električne energije.

Analiza prikupljenih podataka je proces obrade mjernih podataka o naponu koristeći prikladnu računalnu programsku podršku. Izmjerene značajke napona se uspoređuju sa prikladnim normama za kvalitetu električne energije da bi se dobila slika o kvaliteti izmjenog napona. Koristeći podatke o kvaliteti napona moguće je odrediti potrebne radnje za smanjenje ili otklanjanje problema. Koristeći podatke strujnih mjerenja i podatke prikupljene tokom inspekcije također je moguće odrediti uzrok smetnji. Nakon provedene analize se po potrebi izrađuje izvještaj o kvaliteti električne energije koji sadrži podatke o provedenom mjerenju i utvrđenom stanju napona.

4.3. Uređaji za mjerenje kvalitete električne energije

Norma IEC 61000 koja je preuzeta u Hrvatskoj kao norma HRN EN IEC 61000 uređuje uvjete elektromagnetske kompatibilnosti te definira mjerne metode i načine tumačenja rezultata mjerenja kvalitete električne energije. Mjerni uređaji za mjerenje kvalitete električne energije moraju biti znatno točniji od uređaja koji se koriste za praćenje parametara napona u SCADA sustavima. Mjerni uređaji se dijele na tri klase točnosti: A, S i B.

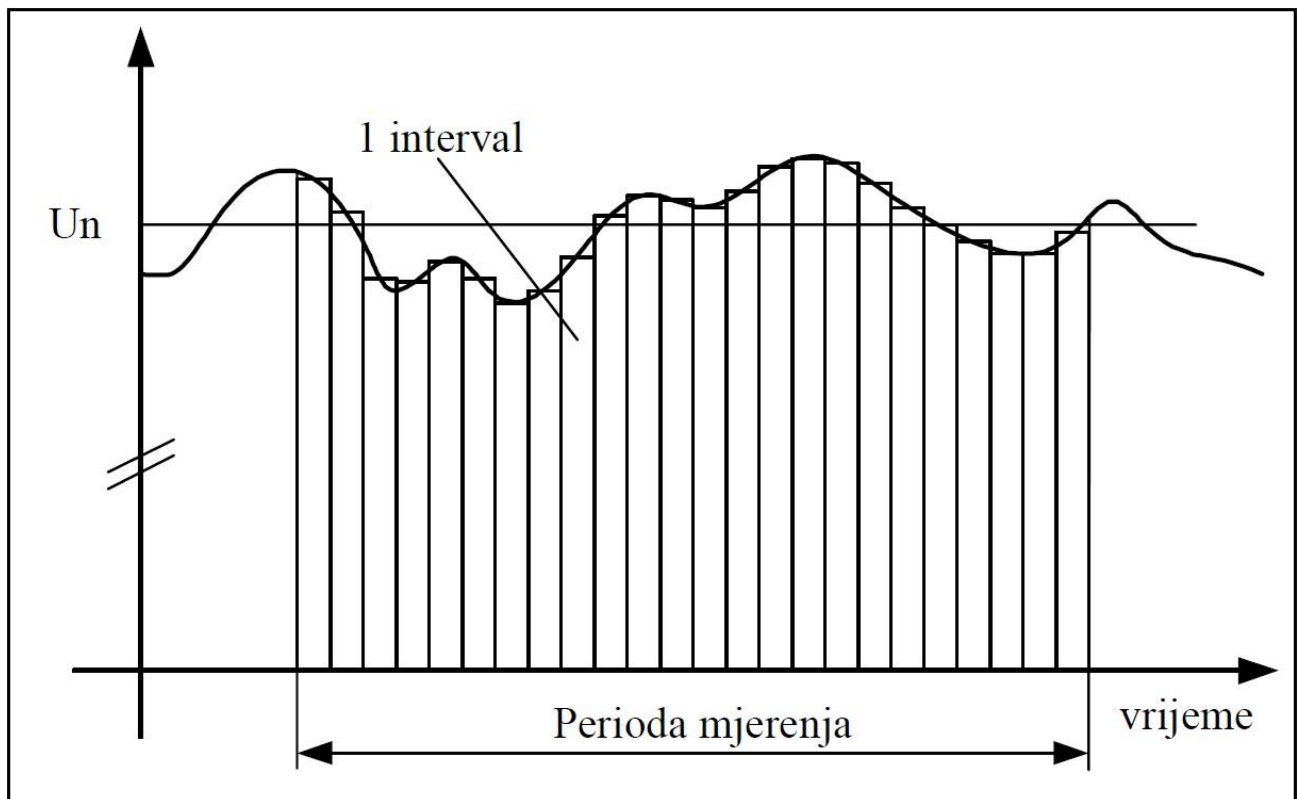
Uređaji klase A su uređaji najveće točnosti. Koriste se za laboratorijska mjerenja i baždarenje drugih uređaja. Mjerenja kvalitete električne energije na zahtjev korisnika moraju biti provedena uređajem klase A. Uređaji klase S su manje točnosti te se koriste za kontrolna mjerenja i mjerenja gdje nema zakonskog spora o razini kvalitete električne energije. Uređaji klase B su najmanje točnosti te se koriste za kvantitativna ispitivanja gdje se mogu dobiti korisni rezultati za daljnje planiranje mjerenja, gdje rezultati ne moraju nužno biti najtočniji.



Slika 4.1. Zahtijevana točnosti mjernih uređaja klase A[14]

4.3.1. Interval usrednjavanja

Svaki parametar kvalitete električne energije ima određeni interval (period) usrednjavanja. Sukladno tome uređaji za mjerenje kvalitete električne energije mjere značajke napona tokom definiranog intervala te zapisuju jednu srednju vrijednost za taj interval. Da bi parametar kvalitete bio unutar dozvoljenih granica postotak tih usrednjenih vrijednosti mora biti unutar statističkih granica, npr. frekvencija se mjeri uz interval usrednjavanja od 10 sekundi, gdje 99.5% zapisanih vrijednosti mora biti unutar $\pm 1\%$ od nazivne vrijednosti a 100% ih mora biti unutar $+4\% -6\%$. Grafički prikaz intervala usrednjavanja kod mjerenja efektivne vrijednosti napona je prikazan na slici 4.2., a formula za računanje srednje zapisane vrijednosti napona je prikazana formulom 4.1.



Slika 4.2. Prikaz intervala usrednjavanja mjerenja efektivne vrijednosti napona[9]

$$U_{sr} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{T_{i-1}}^{T_i} u^2 dt} \quad (4.1)$$

Gdje je: T – interval usrednjavanja, [s]

u – trenutna efektivna vrijednost napona, [V]

4.3.2. UNI-T UT285C

Moderni uređaji za mjerenje kvalitete električne energije dolaze sa pripadajućom programskom podrškom koja omogućava jednostavnu analizu izmjerenih podataka. Uređaji također često dolaze u izvedbi sa ugrađenim LCD ekranom za izravni prikaz dijela mjerenih podataka. Većina instrumenata dolazi sa ugrađenom podrškom za norme o kvaliteti električne energije, bila to Europska norma EN 50160, Američka IEEE 519 ili neka druga, dok kvalitetniji uređaji imaju podršku za više normi. Jedan primjer modernog instrumenta za mjerenje kvalitete električne energije je UNI-T UT285C.

UNI-T UT285C je prijenosni analizator kvalitete električne energije klase točnosti S. Podržava trofazno mjerenje sa četiri strujna i četiri naponska kanala. Uređaj ima LCD ekran koji prikazuje sve mjerene veličine s pripadajućim krivuljama, brojčane vrijednosti efektivnih veličina te odabranu metodu mjerenja. UT285C ima mogućnost mjerenja[16]:

- Efektivnih (RMS) vrijednosti napona i struje
- Istosmjerne komponente napona
- Maksimalnih vrijednosti napona i struje
- Frekvencije u 50 i 60 Hz mrežama
- Vrijednost naponskih i strujnih viših harmonika do 50. harmonika
- Prividnu snagu viših harmonika do 50. harmonika
- Faktor ukupnog harmoničkog izobličenja (THD)
- Radnu, jalovu i prividnu snagu
- Faktor snage i fazni pomak
- Poteznu struju motora i drugih uređaja
- Naponske flikere
- Faznu nesimetriju
- Tranzijentalne napone i struje

Ovakvi i slični uređaji se danas koriste za terenska mjerenja kvalitete električne energije s ciljem otkrivanja problema sa specifičnim uređajima. Pošto je uređaj klase S ne može se koristiti za mjerenja kvalitete koja provodi operator na zahtjev korisnika jer takva mjerenja zahtijevaju uređaje klase A. No ovakav mjerni uređaj je dobar primjer mogućnosti i izvedbe modernih uređaja za mjerenje kvalitete električne energije. Izgled uređaja UT285C je prikazan na slici 4.3.



Slika 4.3. Izgled uređaja UNI-T UT285C[16]

5 voltage input connectors – 5 naponskih priključaka

4 current clamp input connectors – 4 priključaka za strujna kliješta

Dedicated charger port – priključak za punjenje baterije

USB socket – USB priključak

LCD Display screen – LCD zaslon

Functionkeys (yellow keys) – funkcijske tipke (tipke žute boje)

Mode keys – tipke za odabir načina rada

Screen snapshot key – tipka za snimak zaslona

Menu and configuration key – tipka za pristup postavkama uređaja

Return key – tipka za povratak

Confirm/enter key – tipka za potvrdu

Navigation keys – tipke za navigaciju

On/Off switch – tipka za paljenje i gašenje

Help key – tipka za pomoć

4.4. Uređaji za nadzor kvalitete električne energije

Pošto je nadzor zapravo mjerenje kvalitete električne energije u stvarnom vremenu, za potrebe nadzora mogu se koristiti uređaji koji su trajno priključeni na mrežu i SCADA sustav. Zato je za procjenu parametara kvalitete električne energije uvjetno moguće koristiti podatke sa trajno instaliranih mjernih i zaštitnih uređaja. Uvjetno zbog načina prikupljanja i usrednjavanja podataka, odnosno ako način prikupljanja podataka odgovara uvjetima propisanim normama, takvi podatci se mogu koristiti u svrhu nadzora. Ovako prikupljeni podatci se tretiraju kao podatci prikupljeni mjernim uređajima klase S ili B, osim ako se radi o namjenskom uređaju za nadzor kvalitete električne energije klase A. Uređaji koji se koriste za prikupljanje podataka za nadzor kvalitete električne energije su[14]:

- Daljinske stanice sustava nadzora i upravljanja (RTU – eng. Remote Terminal Unit)
- Digitalni multimetri za pogonska mjerenja (DMM – eng. Digital Multimeter)
- Digitalni zaštitni releji
- Digitalni integrirani signalno-upravljački uređaji polja
- Elektronička brojila s mogućnosti daljinskog očitavanja (AMR – eng. Automatic Meter Reading)
- Uređaji za nadzor kvalitete električne energije (PQ monitori – eng. Power Quality monitor)

Daljinske stanice sustava nadzora i upravljanja (RTU) su osnovna komponenta automatizacije elektroenergetskih postrojenja preko SCADA sustava. SCADA sustav komunicira sa RTU-ovima koji vrše funkcije mjerenja električnih veličina i daljinskog upravljanja postrojenja. RTU se sastoji od procesnog sučelja, elektroničkog sučelja i telekomunikacijskog sučelja. Procesno sučelje RTU-a radi na istosmjernom naponu standardizirane veličine, tako da sve mjerene veličine treba svesti na oblik kompatibilan sa RTU-om korištenjem mjernih pretvarača. Mjerni pretvarači se spajaju na sekundare naponskih i strujnih mjernih transformatora te pretvaraju izmjenične veličine na ulazu u proporcionalne istosmjerne veličine. Mjerni pretvarači rade kao niskopropusni filteri sa integracijskom konstantom od nekoliko stotina milisekundi, te se zbog toga mjerni podatci dobiveni RTU-ovima mogu koristiti samo u procjeni parametara kvalitete električne energije koji su određeni sporim promjenama. Drugi nedostatak korištenja podataka RTU-ova je mala frekvencija zapisivanja podataka. Nemaju internu memoriju nego mjerne podatke šalju direktno u SCADA sustav koristeći dostupnu komunikacijsku vezu, što znatno ograničava mogućnost brzine slanja podataka. No sve veća primjena optičkih kabela u postrojenjima eliminira ovaj nedostatak. Podatci prikupljeni RTU-ovima se mogu koristiti za procjenu parametara[14]:

- Frekvencije napona
- Sporih promjena napona
- Padova napona
- Prekida napajanja
- Fazne nesimetrije

Razvojem mjerne tehnologije danas mjerni instrumenti mogu objediniti mjerenja napona, struje i frekvencije u sve tri faze u jednom kućištu. Pomoću izmjerenih veličina napona i struje također je moguće odrediti iznose radne, jalove i prividne snage. Mikroprocesorska izvedba digitalnim mjernih instrumenata (DMM) omogućuje spajanje na komunikacijske sabirnice ili direktno na LAN (eng. Local Area Network) preko ethernet ili optičkog kabela. Primjena specijaliziranih mikroprocesora DSP (eng. Digital Signal Processor) u DMM-ovima omogućuje im provođenje frekvencijske analize, odnosno izračuna ukupnog harmoničkog izobličenja te pojedinih harmonika napona i struje. Moderni DMM-ovi su vrlo blizu uređaja za mjerenje kvalitete električne energije po pitanju mogućnosti mjerenja. Koristeći mjerne podatke iz DMM-ova mogu se procijeniti svi parametri kvalitete električne energije osim tranzijentalnih promjena napona.

Digitalni zaštitni releji su numerički releji koji se koriste za zaštitu električnih uređaja u elektroenergetskim postrojenjima od neželjenih posljedica. Mogu biti strujni, naponski, frekvencijski, diferencijalni ili prilagođeni zaštiti specifičnog uređaja poput motora ili transformatora. Osnovno komunikacijsko sučelje releja služi za podešavanje parametara releja koristeći računalo sa pripadajućom programskom podrškom. Osim osnovnog, releji imaju i sistemsko komunikacijsko sučelje koje se koristi za komunikaciju sa SCADA sustavom i drugim relejima. Mjerne mogućnosti releja su određene njegovom primjenom, odnosno releji mjere samo veličine koja su potrebna za njihov ispravni rad (npr. strujni zaštitni releji mjere samo vrijednost struje). Zbog toga je primjena digitalnih zaštitnih releja za nadzor kvalitete električne energije ograničena.

Razvojem digitalnih mjernih, zaštitnih i upravljačkih uređaja pojavili su se inteligentni elektronički uređaji (eng. Intelligent Electronic Device) koji objedinjuju sve te funkcije. Razvoj ovih uređaja je bio ograničen komunikacijskim protokolima, no razvojem ethernet i optičkih mreža te pojavom norme IEC 61850 orijentirane na komunikacijske standarde ovaj problem je riješen. Danas se koriste

integrirani IED-ovi odnosno tzv. digitalni upravljači polja koji vrše funkcije mjerenja, nadzora, zaštite i upravljanja. Karakteristike takvih IED uređaja su[14]:

- Procesno sučelje za trofazno mjerenje struja i napona
- Procesno sučelje za signalizaciju i upravljanje
- Komunikacijsko sučelje sukladno IEC 61850
- Korisničko sučelje s zaslonom i tipkovnicom
- Programabilno definiranje funkcija prema zahtjevu

Ovisno o primjeni podatci mjerenja iz upravljača polja se mogu koristiti i u sustavima nadzora kvalitete električne energije za procjenu parametara kvalitete električne energije.

4.5. Elektronička brojila električne energije i AMR

Brojila električne energije su električni uređaji koji se ugrađuju na mjestu priključka korisnika na elektroenergetsku mrežu. Brojila mjere i zapisuju električnu energiju koju korisnik troši s ciljem kontrole i naplate potrošene energije. Prva brojila su se pojavila još u 19. stoljeću pri začetku elektroenergetskih mreža, a od uspostave modernih izmjeničnih mreža koristila su se uglavnom elektromehanička brojila. Razvoj elektronike i mikroprocesora doveo je razvoja elektroničkih (digitalnih) brojila električne energije. Digitalna brojila su pouzdanija od starih elektromehaničkih te mnogo točnija u mjerenju. Digitalna brojila rade na principu mjerenja struje i napona u određenim vremenskim intervalima. Te vrijednosti struje i napona se množe dobivajući trenutnu radnu snagu pomoću koje se množenjem trajanjem vremenskog intervala može odrediti utrošena električna energija. Energija koju digitalna brojila mjere se iskazuje formulom 4.2.

$$W = P \cdot t = \sum_{t=0}^{t=\infty} u_n \cdot i_n \cdot \Delta t \text{ [kWh]} \quad (4.2)$$

Gdje je: P – radna snaga[W]

u_n – napon izmjeren u trenutku t_n

i_n – struja izmjerena u trenutku t_n

Δt – vremenski interval između dva mjerenja napona i struje

Rane generacije digitalnih brojila koje su se pojavile na kraju 20. stoljeća su imale komunikacijski kanal koji je služio za parametriranje i očitavanje stanja brojila. Novija brojila imaju mogućnost korištenja komunikacijskih sučelja preko žičane (ethernet) ili bežične (Wi-Fi) veze. Kako je osnovna svrha brojila praćenje potrošnje električne energije brojila nisu predviđena za zapis podataka o izmjerenim vrijednostima napona i struje, nego samo zapisuju utrošenu energiju. Najnovije generacije brojila se izrađuju sa mogućnosti komunikacije sa drugim brojilima koja se koriste u kućanstvima, poput brojila vode i plina, u svrhu izgradnje jedinstvene pametne mreže za očitavanje stanja brojila. Također se dodaje mogućnost pohrane mjerenih podataka napona i struje te prijenos tih podataka u sustav nadzora preko komunikacijskih kanala. Ovi podatci se mogu koristiti za procjenu parametara kvalitete električne energije sa sporom brzinom promjene.

4.5.1. Daljinsko očitavanje brojila

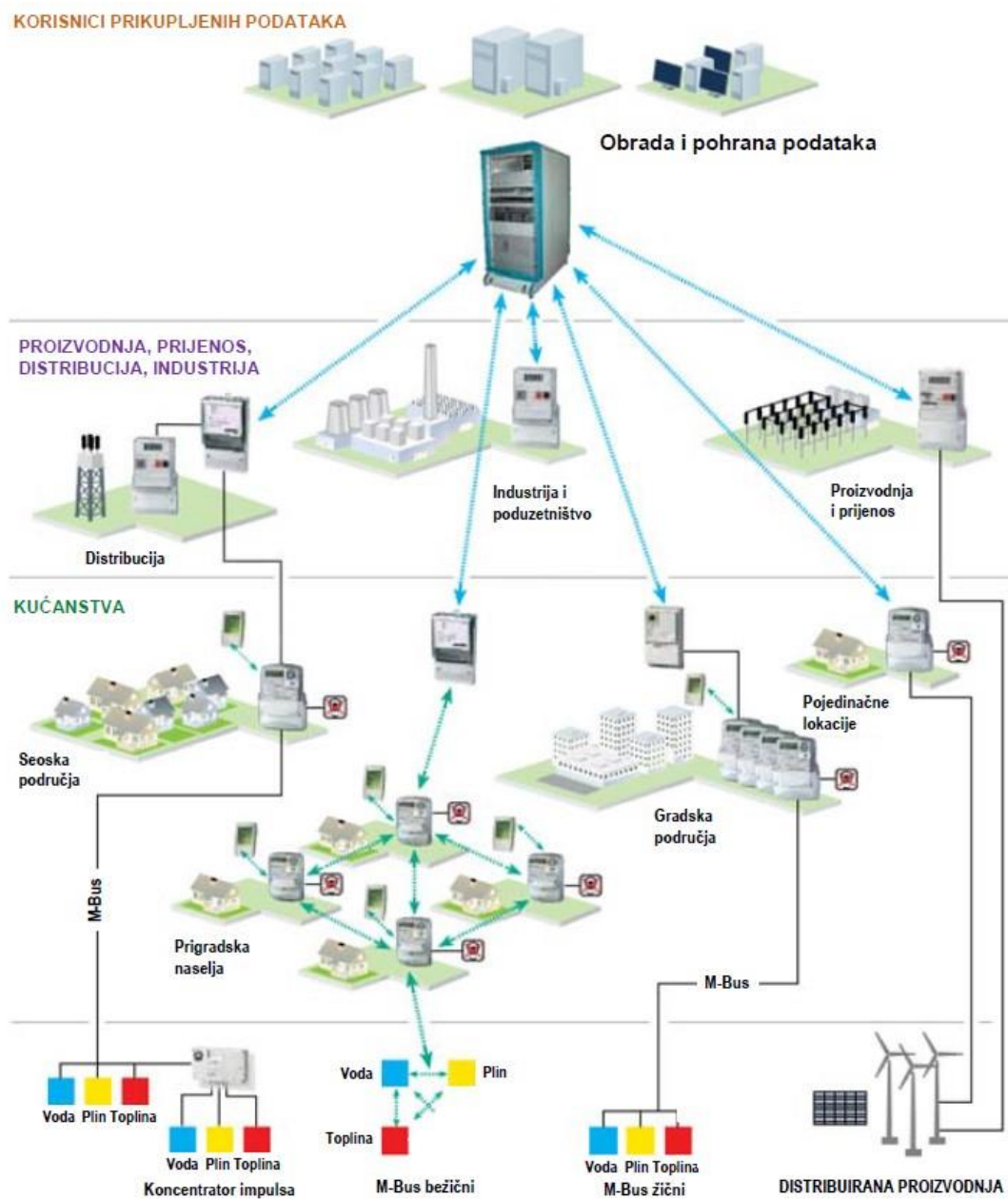
U energetske djelatnostima se teži sve većoj ugradnji brojila koja imaju mogućnost daljinskog očitavanja stanja. Brojila s mogućnošću daljinskog očitavanja omogućavaju automatizaciju te povećanje efikasnosti sustava očitavanja brojila. Trend u Europi je zamjena svih energetskih brojila sa brojilima s mogućnošću daljinskog očitavanja. Cilj je opremiti 100% kućanstava sa digitalnim brojilima električne energije, plina i vode te uspostaviti sustav za daljinsko automatsko očitavanje stanja svih brojila. Daljinsko očitavanje brojila (AMR – eng. Automatic Meter Reading) je tehnologija automatskog daljinskog očitavanja stanja brojila preko telefonske, radio ili „Power line“ (elektroenergetske) veze. Podatci prikupljeni digitalnim brojilima se šalju prikladnom vezom operatoru sustava. U elektroenergetskim sustavima se podatci sa brojila šalju na koncentrator koji se smještaju na transformatorske stanice. Podatci se dalje sa koncentratora šalju do centralne jedinice operatora. AMR sustavi omogućavaju istodobno povećanje efikasnosti i kvalitete usluga te smanjenje dugoročnih troškova jer se eliminira potreba za ručnim očitanjem stanja brojila.

Glavne prednosti AMR sustava u elektroenergetskom sustavu su:

- Analiza potrošnje energije, izrada dnevnog dijagrama opterećenja
- Daljinsko podešavanje brojila te primjena više tarifnih sustava
- Povećanje točnosti i frekvencije očitavanja broja, eliminacija ljudske pogreške kod očitavanja što povećava zadovoljstvo kupaca te njihovu vjeru u sustav
- Automatska detekcija pokušaja krađe električne energije ili manipulacije brojilom

- Integrirana i podesiva funkcija ograničenja priključne snage
- Pružanje uvida u potrošnju kupcima
- Mogućnost prikupljanja podataka o prekidima napajanja te vrijednostima napona i struje
- Smanjenje vremena od očitavanja potrošnje do obračuna

Dok su najveći nedostaci AMR sustava gubitak radnih mjesta radnika koji očitavaju broja te povećani sigurnosni rizik neovlaštenog pristupa podacima u sustavu.



Slika 4.4. Primjer integriranog AMR sustava[16]

4.6. PQ monitori

Uređaji za nadzor kvalitete električne energije ili PQ monitori su uređaji koji se trajno ugrađuju u elektroenergetska postrojenja. Ovi uređaji su optimizirani za mjerenje i obradu mjernih podataka prema normama za kvalitetu električne energije EN 50160 u Europi, IEEE 519 u Americi ili drugima. To znači da mjere sve veličine potrebne za izračun parametara kvalitete električne energije propisanih prema normama te vrše usporedbu tih podataka sa propisanim graničnim vrijednostima. Na integriranim zaslonima, ako ih imaju, ili na pripadajućoj programskoj podršci mogu prikazivati podudarnost parametara u biranom periodu bez potrebe za dodatnom analizom. PQ monitori se izrađuju kao mjerni uređaji klase A, što bez obzira na iskustva proizvođača sa prijenosnim uređajima za mjerenje kvalitete iziskuje visoke cijene ovakvih uređaja. Zbog visoke cijene PQ monitori su se postavljali samo na mjesta spajanja prijenosne i distribucijske mreže. Iako se cijena modernih PQ monitora smanjuje razvojem tehnologije, njihova ugradnja na svakom mjestu predaje električne energije korisnicima i dalje nije ekonomski isplativa. Pošto je dio parametara kvalitete jednak za sve potrošače priključene na jednu transformatorsku stanicu, sa dobrim planiranjem i ugradnjom PQ monitora na ključna mjesta moguće je uz nadomjesne podatke iz ostalih mjernih i zaštitnih uređaja osigurati dobru razinu nadzora kvalitete električne energije.

Brzi razvoj elektronike kroz zadnjih desetak godina vođen razvojem pametnih uređaja i osobnih računala je doprinio je i razvoju tehnologije PQ monitora. Na tržištu se pojavljuju PQ monitori znatno pristupačnijih cijena uz jednake ili bolje performanse. Uz razvoj tehnologije smanjenju cijena je doprinijela i standardizacija performansi mjernih uređaja i komunikacijske tehnologije. Novi tzv. „low-cost“ PQ monitori se sve više koriste u elektroenergetskim postrojenjima, pogotovo u transformatorskim stanicama 20(10)/0.4 kV i elektranama priključenim na distribucijski sustav.

4.6.1. IEL MT40

PQ monitori tvrtke Zagrebačke tvrtke IEL su našli primjenu u distribucijskoj mreži Hrvatske kao monitori kvalitete električne energije u distribuiranim elektranama snaga od 100 kW do nekoliko desetaka MW, kao i u transformatorskim postrojenjima. Serija uređaja MT – mjerni terminal ima uređaje različitih primjena i klasa točnosti koji imaju primjenu u različitim razinama elektroenergetske mreže. Uređaj MT40 je našao primjenu u distribuiranim elektranama i TS srednjeg napona. Mjerni

terminali serije MT-40 namijenjeni su za mjerenje, nadzor, registraciju i analizu kvalitete električnih veličina u sustavima proizvodnje, distribucije i prijenosa energije. Brzim uzorkovanjem mjernih veličina struja i napona procesor izračunava prave efektivne vrijednosti (RMS) struja, napona, snaga, energija, faktora snage i frekvencije. Osim mjerenja trenutnih vrijednosti električnih veličina procesor izračunava maksimalne, srednje i minimalne vrijednosti struja, napona i snaga u vremenskom intervalu te registrira navedene veličine[17].

MT40 je izrađen u skladu sa Euro normom EN 50160 i standardom IEC 61000-4-30 kao mjerni uređaj klase A te omogućava analizu parametara kvalitete električne energije (harmonijska izobličenja, sadržaj harmonika, nadvišenja i propade napona, treperenje napona, nesimetriju itd.) zbog kontrole realizacije ugovornih odnosa prodaje odnosno kupnje električne energije. Pomoću integriranog LCD zaslona informacije o stanju pojedinog dijela mreže dostupne su lokalno, a preko ugrađenog Web servera moguće im je pristupiti i daljinski. Četiri komunikacijske linije i programske opreme MT-DIALOG 3, MT-QUALITY, IPQS ili Web preglednik omogućuju kompletan daljinski nadzor kvalitete električne energije[17].

Mjerni uređaj MT40 omogućuje:

- Mjerenje trenutnih efektivnih vrijednosti napona, struje, frekvencije, snage i faktora snage
- Mjerenje vrijednosti strujnih i naponskih harmonika do 50. harmonika i ukupnog harmoničkog izobličenja THD
- Mjerenje i analizu kvalitete električne energije prema normi HRN EN 50160
- Mogućnost pohrane mjerenih podataka na SD karticu kapaciteta do 8GB (do 8 godina pohranjenih podataka)
- Pregled pohranjenih podataka preko računala

4.6.2. PQube 3

PQube linija uređaja tvrtke Powerside je linija PQ monitora niske cijene. Trenutna inačica uređaja PQube 3 ima široku primjenu u praksi kao monitor kvalitete električne energije u solarnim elektranama, vjetroelektranama, elektranama na biomasu i transformatorskim stanicama srednjeg napona. PQube 3 je trofazni analizator kvalitete električne energije klase A koji mjeri, prepoznaje i zapisuje sve smetnje kvalitete napona u stvarnom vremenu. PQube 3 je jednostavan za upotrebu jer

se automatski podešava nakon prepoznavanja nazivne frekvencije i napona mreže na koji je priključen.

Uređaj podržava izmjenične napona do 960 V linijski te frekvencije 50, 60 i 400 Hz, a za primjenu u sredjenaponskim i visokonaponskim postrojenjima podržava naponske i strujne mjerne transformatore omjera do 50000:1[18]. Pristup podacima sa uređaja je vrlo jednostavan, preko SD kartice ili USB sticka je moguće podatke prebaciti na računalo i pristupiti im bez potrebe za specijaliziranom programskom podrškom. Na prednjoj strani uređaja se nalazi LCD zaslon koji služi za podešavanje uređaja i očitavanje dijela mjerenih podataka. Uređaj je izveden modularno sa osnovnim modulom kojemu je moguće proširiti mogućnosti da dodatnim modulima. PQube 3 ima SD karticu koja može pohraniti više godina mjernih podataka. PQube 3 automatski bilježi propade napona, prenapone, prekide napajanja, promjene frekvencije i slike valnog oblika napona. Također može bilježiti parametre kvalitete napona: flikere, nesimetriju, faktor harmoničkog izobličenja te vrijednosti pojedinih harmonika.

5. INTEGRIRANI SUSTAVI NADZORA KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE

5.1. IPQS sustav nadzora kvalitete električne energije

Sve većom integracijom distribuiranih izvora električne energije na području Elektre Vinkovci pojavio se veliki broj PQ monitora jer su prema mrežnim pravilima oni obavezna oprema za distribuirane izvore snage preko 500 kW[2]. Ovi PQ monitori su instalirani u susretna postrojenja elektrana odnosno mjesta njihova spajanja na mrežu opremljena zaštitnom i mjernom opremom, te regulatorima frekvencije i izmjenjivačima. Susretna postrojenja distribuiranih izvora su u sustavu daljinskog vođenja i nadzora te imaju dobre komunikacijske vodove. Instalirani PQ monitori su klase A te su izrađeni prema normama HRN EN 50160 i IEC 61000-4-30. Iako to nije propisano mrežnim pravilima Elektra Vinkovci je opremila i distribuirane izvore snage manje od 500 kW sa PQ monitorima za potrebe uspostave sustava nadzora kvalitete električne energije[19].

Elektra Vinkovci preuzima električnu energiju od Hrvatskog Operatora prijenosnog sustava (HOPS) na četiri lokacije odnosno četiri transformatorske stanice (TS) 110/35 kV sa po dva transformatorska polja. Ove stanice su također opremljene PQ monitorima radi uvida u kvalitetu energije preuzete od HOPS-a. Te četiri TS su komunikacijska čvorišta Elektre Vinkovci što znači da su dobro komunikacijski povezani sa procesnom mrežom HEP Operatora distribucijskog sustava (HEP ODS). Zahvaljujući rekonstrukciji srednjenaponskih (SN) TS u procesu prelaska na 20 kV naponsku razinu u rekonstruiranim stanicama su ugrađeni PQ monitori na niženaponskim poljima.

Kako niskonaponske (NN) TS 10/0.4 kV nisu opremljene PQ monitorima Elektra Vinkovci je proučila mogućnost korištenja podataka iz postojećih mjernih i zaštitnih uređaja. No ti uređaji su ograničeni u mogućnostima primjene za procjenu parametara kvalitete električne energije te su kao kvalitetnije rješenje pristupili instalacija PQ monitora u ovakva postrojenja za lakšu i kvalitetniju integraciju u sustav nadzora kvalitete električne energije. Elektra Vinkovci je kao primjer potpunog nadzora kvalitete od mjesta preuzimanja energije od HOPS-a do NN sabirnica TS 10/0.4 kV odabrala područje TS 35/10(20) kV Babina Greda[19]. U najopterećenije TS 10/0.4 kV te stanice koje su posljednje u nizu na SN izvodima ugrađeni su PQ monitori klase S dok su u sve ostale TS 10/0.4 kV ugrađeni reducirani PQ monitori koji nemaju mogućnost registriranja treperenja napona i viših harmonika. U

tablici 5.1. su prikazani dostupni PQ monitori u TS, dok su u tablici 5.2. prikazani dostupni PQ monitori u distribuiranim postrojenjima.

Tablica 5.1. Dostupni PQ monitori u transformatorskim stanicama[19]

Naziv	Instalirana snaga [MW]	PQ monitor	Vrsta komunikacije
TS 110/35/10 kV Vinkovci 1 – TR1	40	PQube 2	Optika/ethernet
TS 110/35/10 kV Vinkovci 1 – TR2	40	PQube 2	Optika/ethernet
TS 110/35/10 kV Županja 2 – TR1	40	MT 40	Optika/ethernet
TS 110/35/10 kV Županja 2 – TR2	40	MT 40	Optika/ethernet
TS 110/35/10 kV Nijemci – TR1	20	MT 40	Optika/ethernet
TS 110/35/10 kV Nijemci – TR2	20	MT 40	Optika/ethernet
TS 110/35/10 kV Vukovar 2 – TR1	40	PQube 2	Optika/ethernet
TS 110/35/10 kV Vukovar 2 – TR2	40	PQube 2	Optika/ethernet
TS 35/10 kV Vinkovci 2 – TR1	16	PQube 3	Optika/ethernet
TS 35/10 kV Vinkovci 2 – TR2	16	PQube 3	Optika/ethernet
TS 35/10 kV Županja 1 – TR1	8	MT40	Optika/ethernet
TS 35/10 kV Županja 2 – TR2	8	MT40	Optika/ethernet
TS 35/10 kV Babina Greda – TR1	8	MT40	Optika/ethernet
TS 35/10 kV Babina Greda – TR2	8	MT40	Optika/ethernet
TS 35/20 kV Ilok – TR1	16	PQube 3	Optika/ethernet
TS 35/20 kV Ilok – TR2	16	PQube 3	Optika/ethernet
TS 35/10 kV Tovarnik – TR1	8	PQube 3	Optika/ethernet
TS 35/10 kV Tovarnik – TR2	8	PQube 3	Optika/ethernet
TS 35/20 kV Opatovac – TR2	4	MT40	Optika/ethernet
TS 35/10 kV Opatovac – TR3	4	MT40	Optika/ethernet
TS 35/10 kV Vinkovci 5 – TR1	16	PQube 3	Optika/ethernet
TS 35/10 kV Vinkovci 5 – TR2	16	PQube 3	Optika/ethernet
TS 35/20 kV Drenovci – MP 20kV	12	PQube 2	Optika/ethernet
TS 35/10 kV Vukovar 1 – TR1	4	MT40	Optika/ethernet
TS 35/10 kV Borovo naselje – TR1	4	MT40	Optika/ethernet

Tablica 5.2. Dostupni PQ monitori u distribuiranim izvorima[19]

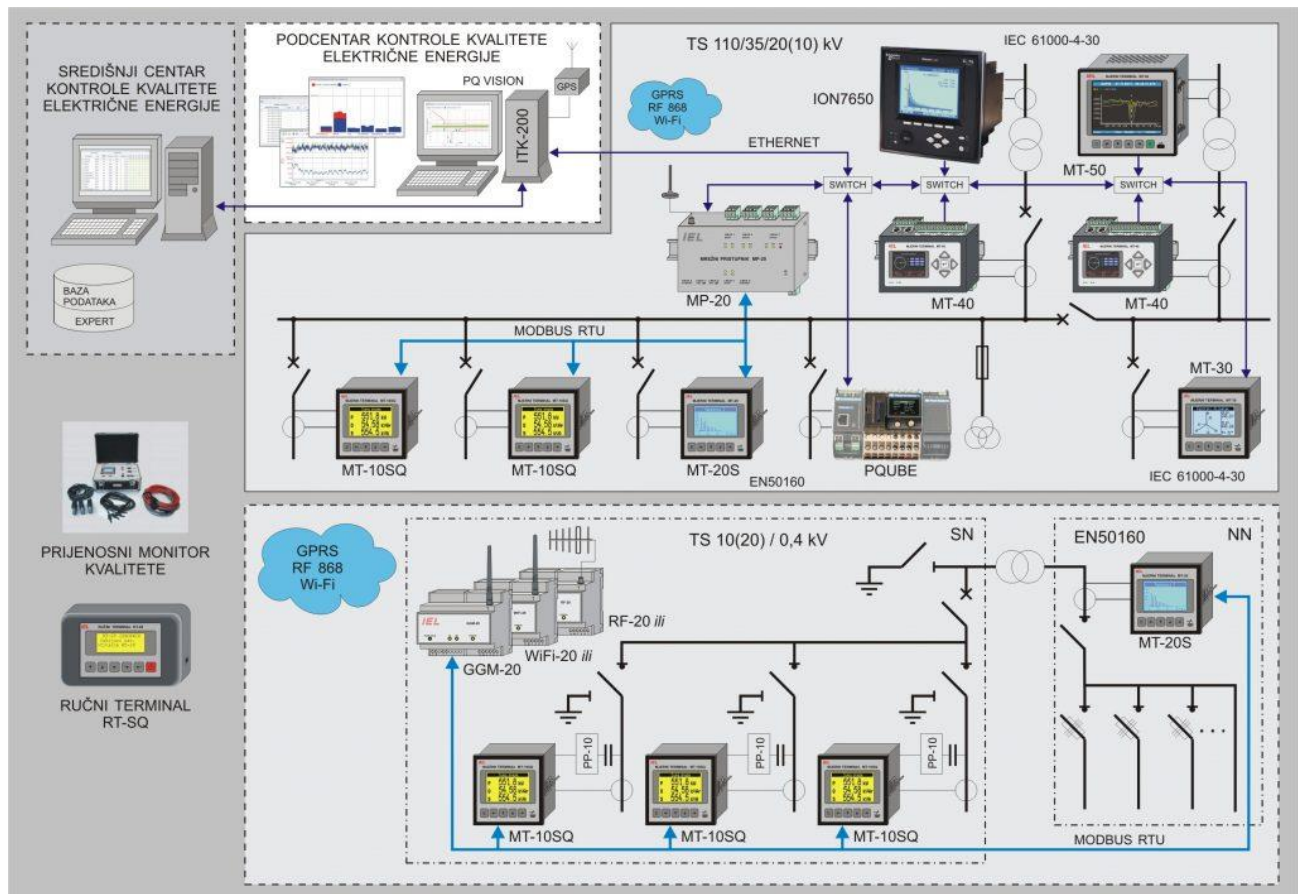
Naziv	Priključna snaga [MW]	PQ monitor	Vrsta komunikacije
Uni Viridass	9.5	MT 40	Optika/ethernet
Biomass to energy Županja	4.93	MT 40	Optika i WiFi/ethernet
Osatina grupa d.o.o, Ivankovo	2.65	MT 40	Optika i WiFi/ethernet
Energija Gradec d.o.o, Vinkovci	2	MT 40	Optika/ethernet
Energija Gradec d.o.o, Vukovar	2	MT 40	Optika/ethernet
Landia, Tordinci	0.999	PQube 2	Metroethernet
Flamtron d.o.o, Županja	1	MT 40	Optika i WiFi/ethernet
KP Agner	0.495	MT 20S	GPRS modem
KP Marina	0.3	MT 20S	GPRS modem
BR Dar prirode	0.3	MT 20S	GPRS modem
KP Bendix 1	0.3	MT 20S	GPRS modem
SE BIS	0.102	MT 20S	GPRS modem
SE Studentski dom	0.1	MT 20S	GPRS modem

5.1.1. IPQS sustav Elektre Vinkovci

Integrirani sustav nadzora kvalitete električne energije koji se koristi je IPQS, koji je baziran na PQ monitorima koji su komunikacijski povezani sa terminalom kvalitete. Terminal kvalitete ima napredne funkcije prikupljanja i analize mjerenja te statističke obrade mjerenih vrijednosti. Terminal koristi odgovarajuću programsku podršku za prikupljanje podataka sa PQ monitora, obradu i pohranu podataka te prilagodbu podataka za grafičko prikazivanje. Terminal također ima implementiranu programsku podršku za automatsku generaciju, arhiviranje i slanje izvještaja o kvaliteti električne energije[20]. Programski modul za prikupljanje i obradu podataka u IPQS sustavu Elektre Vinkovci je PQ DAQ. Povezivanje i komunikacija s PQ monitorima je moguća direktno ili preko komunikacijskih protokola poput Modbus RTU/TCP, IEC 61850 i IEC 60870-5-104[19]. PQ DAQ prikuplja sve podatke o parametrima kvalitete električne energije prema normi HRN EN 50160 koje PQ monitori bilježe te arhivira te podatke u SQL bazu podataka. Reducirani PQ monitori postavljeni u TS 10/0.4 kV nemaju mogućnost trajnog spajanja na sustav nadzora kvalitete nego podatke


pohranjuju na unutarnju memoriju ili SD karticu. Podatci sa ovih monitora se mogu ručno prebaciti na računalo ili USB stick preko USB priključaka na monitorima i uvesti u sustav PQ DAQ.

Programski modul PQ REPORT obrađuje pohranjene mjerne podatke te ima mogućnost automatske izrade izvještaja o kvaliteti električne energije prema podesivim parametrima. U ovom slučaju program je podešen za izrađivanje izvještaja prema normi HRN EN 50160. PQ REPORT ima mogućnost automatske izrade i slanja izvještaja na e-mail. Ove izvještaje je moguće podesiti prema obimu podataka za potrebe različitih službi (odjel mjerenja, uprava, itd.)[19]. Izvještaje je moguće slati periodički (dnevno, tjedno, godišnje, itd.) ili nakon pojave određene smetnje (npr. prekida napajanja). Izvještaji se mogu izrađivati kao detaljni izvještaji za jedno mjerno mjesto ili grupni izvještaji za više mjernih mjesta. Na slici 5.1. je prikazana shema načina rada i dijelova IPQS sustava.



Slika 5.1. Principna shema IPQS sustava nadzora kvalitete električne energije[20]

Sustav nadzora ima veliku primjenu u komunikaciji sa korisnicima mreže. U slučaju žalbe korisnika na razinu kvalitete moguće je otkriti problem bez izlaska na teren i dodatnih mjerenja. Primjer u ovom projektu je korisnik sa proizvodnim postrojenjem snage 2 MW priključen na 10 kV mrežu koji se žalio na proradu prenaponske zaštite. Analizom podataka iz PQ monitora u postrojenju je utvrđeno podudaranje parametara kvalitete električne energije prema normi HRN EN 50160, ali je daljnjim pregledom trenda napona utvrđeno da je napon u uvjetima malog opterećenja na mreži napon došao do granica prorade prenaponske zaštite[19]. Na slici 5.2. je prikazan izvještaj o naponskim prilikama na proizvodnom postrojenju korisnika sa izdvojenim događajima prenapona i propada napona.

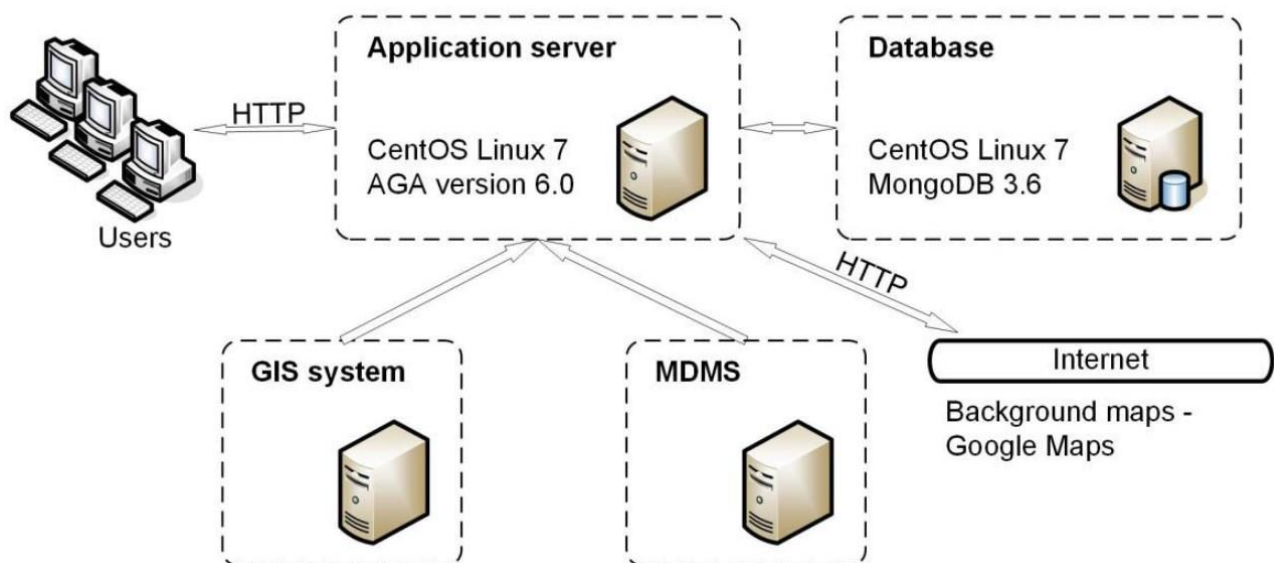
		KONTROLA KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE Izvještaj o sukladnosti s normom HRN EN 50160			
2.9. Događaji					
Promatrane veličine		Propadi napona, prenaponi i prekidi napona			
Metoda evaluacije		HRN EN 50160:2010, sekcija 5.3.2			
Granične vrijednosti					
Propadi napona		90%			
Prenaponi		110%			
Prekidi napona		5%			
Informacije o događaju					
Rbr.	Početak	Kraj	Trajanje	Tip	Vrijednost
1	26.04.2020. 05:45:28.950	26.04.2020. 05:45:29.120	170ms	prenapon	110,06%
2	26.04.2020. 05:46:18.730	26.04.2020. 05:50:00.440	03:41.710	prenapon	110,12%
3	26.04.2020. 05:51:12.660	26.04.2020. 06:50:59.160	59:46.500	prenapon	110,13%
4	28.04.2020. 05:06:28.900	28.04.2020. 05:06:28.970	70ms	propad napona	87,91%

Slika 5.2. Izvještaj o naponskim prilikama na mjernom mjestu[19]

Nakon otkrivanja problema korisniku je dostavljen izvještaj u kratkom roku a ODS je poduzeo dodatne radnje regulacije napona da osigura korisniku nesmetan rad. Cijeli proces je odrađen brzo i bez potrebe izlaska na teren, korištenjem sustava nadzora kvalitete električne energije. Ovaj projekt je pokazao korisnost korištenja sustava nadzora kvalitete u distribucijskoj mreži, pogotovo u svrhu rješavanja sporova s korisnicima s proizvodnim postrojenjima spojenim na distribucijskoj mreži.

5.2. Primjena podataka iz AMR sustava u sustavu analize i nadzora distribucijske mreže

Tvrtka Landis+Gyr je 2019. godine u Lihtenštajnu provela pilot projekt korištenja svojeg AGA (eng. Advanced Grid Analytics) sustava za analizu i simulacije u distribucijskom sustavu. Liechtensteinische Kraftwerke (LKW) je operator prijenosnog i distribucijskog sustava na području Lihtenštajna. Slučaj Lihtenštajna je zanimljiv za analizu jer imaju vrlo pouzdanu mrežu u kojoj je 99% vodova izvedeno kabelski, a 100% korisnika ima ugrađena digitalna brojila. Također je udio distribuiranih fotonaponskih izvora velik i Lihtenštajn je u vrhu svijeta po instaliranoj fotonaponskoj snazi po stanovniku (620 W po stanovniku). LKW od 2011. godine koristi sustav automatskog očitavanja brojila (AMR) i traži moguće primjene podataka prikupljenih tim sustavom[21]. Na slici 5.3. je prikazana arhitektura AGA sustava.



Slika 5.3. Arhitektura AGA sustava[21]

Sa slike: Application server – aplikacijski server

Database – podatkovni server

Users – korisnička računala

Cilj AGA sustava je da korisniku sustava pruži okruženje u kojem može dobiti bolji uvid u rad distribucijskog sustava. AGA sustav radi na dva servera – aplikacijski i podatkovni. Svi prikupljeni podatci se šalju u aplikacijski server koji je povezan sa podatkovnim serverom, internetom i

računalima korisnika. GIS (eng. Geographical Information System) je sustav koji pohranjuje lokacijske i tehničke podatke o uređajima na mreži. Ponekad se tehnički podatci zajedno sa podacima o održavanju opreme pohranjuju na posebni sustav AMS (eng. Asset Management System). Za potrebe simulacija u mreži i izračuna tokova snaga potreban je kvalitetan i točan model mreže koji se može stvoriti koristeći podatke iz GIS sustava.

Podatci iz digitalnih brojila se koriste za ispunu stvorenog modela mreže. Ti podatci su statički podatci odnosno nazivni napon, adresa i serijski broj brojila te podatci mjerenja odnosno 15-minutne srednje vrijednosti struje i napona. AMR sustav LKW-a arhivira prikupljene podatke u MDMS (eng. Meter Data Management System) bazu podataka. Unatoč velikoj prisutnosti distribuiranih izvora energije preko 75% brojila je i dalje tipa potrošačko stambeno brojilo. U tablici 5.3. su prikazani podatci koji se pohranjuju u MDMS sustav iz stambenih, industrijskih i brojila transformatorskih stanica.

Tablica 5.3. Podatci koji se prikupljaju u MDMS ovisno o tipu brojila[21]

Tip brojila	Potrošačka stambena	Prosumer stambena	Generacijska stambena	Industrijska	Distribucijski transformatori
Pohranjeni podatci	A-	A+, A-, R+, R-	A+, A-, R+, R-	A+, A-, R+, R-	A+, A-, R+, R-, napon

Iz tablice: A- - potrošnja radne snage

A+ - proizvodnja radne snage

R- - potrošnja prividne snage

R+ - proizvodnja prividne snage

AMR sustav na dnevnoj bazi čita podatke sa brojila, uz sljedeće mjere da se osigura najveća moguća kvaliteta zapisanih podataka:

- Očitavanje samo potpunih mjerenja sa 96 15-minutnih zapisa
- Provjera za nepotpunim podacima iz prijašnjih dana (do zadnjih 6 tjedana)
- Statički podatci se dnevno ažuriraju zbog bilježenja zamijena ili popravaka brojila
- Podatci sa transformatora se pohranjuju posebno jer ovi podatci ne pridonose opterećenju mreže nego služe kao kontrolna mjerenja

5.2.1. Praktična primjena AGA sustava

Praktična primjena AGA sustava ovisi o potrebama i specifičnosti mreže i operatora mreže. Specifične primjene u slučaju LKW-a su posebno zanimljive zbog značajki mreže. Europska unija teži elektroenergetskoj mreži slične konstrukcije kao LKW mreža, sa velikim udjelom distribuiranih fotonaponskih izvora i digitalnim brojilima kod svih korisnika. U slučaju ovog projekta najznačajnije primjene su bile[21]:

1. **Praćenje opterećenja mreže i detekcija zagušenja** – AGA sustav pruža uvid u opterećenje vodova i TS korištenjem podataka iz AMR sustava. Ulazni podatci su mjerenja stambenih i industrijskih brojila. Pošto je interval mjerenja brojila 15 minuta, na kraju dana se vrši proračun opterećenja svih komponenti za sve 15-minutne intervale u 24 sata. Asset Loading modul omogućava vizualizaciju koristeći boje za jednostavno prepoznavanje preopterećenih komponenti, prikaz krivulje opterećenje i vremenske raspodjele opterećenja
2. **Vizualizacija napona** – Voltage Visualization modul prikuplja mjerenja napona na TS te industrijskim i stambenim brojilima. Modul omogućava vizualizaciju naponskih razina koristeći boje za jednostavno prepoznavanje prenapona i propada napona. Također je moguća automatska detekcija prenapona ili propada napona kod svakog brojila u sustavu automatskog očitavanja
3. **Detekcija gubitaka** – Koristeći mjerenja energije iz TS AGA sustav može odrediti gubitke u mreži uspoređujući ta mjerenja sa mjerenjima potrošene energije iz industrijskih i stambenih brojila koja se napajaju preko tih TS. Razlika zbroja utrošene energije kod svih korisnika i energije na TS predstavlja gubitke u distribucijskoj mreži
4. **Raspodjela potrošnje** – U većini elektroenergetskih sustava većinu potrošnje predstavlja mali udio potrošača. Korištenjem MDMS podataka u AGA sustavu je pokazalo da isto vrijedi u sustavu LKW-a. Pomoću AGA sustava je moguće identificirati ove potrošače. Ovi podatci se mogu zatim koristiti za pametno planiranje razvoja mreže (npr. postava uređaja za kvalitetu električne energije)

Pomoću AGA sustava je također moguće provesti simulacije mreže. Simulacije ispada određenih TS mogu pružiti uvid u ponašanje ostatka sustava u slučaju kvarova ili održavanja na mreži. Simulacija dodavanja novih komponenti također može poslužiti za planiranje budućeg razvoja. Najzanimljivija

simulacija preko AGA sustava je simulacija fotonaponskih distribuiranih izvora. Pomoću ovih simulacija je moguće automatski ili ručno dodati nove fotonaponske izvore te dobiti uvid u ponašanje mreže. Vršiti se simulacija rubnih slučajeva poput slučaja sunčanog dana tokom vikenda sa visokom razinom proizvodnje i niskom razinom potrošnje energije. Pomoću ovih simulacija je moguće predvidjeti ponašanje mreže sa predviđenim porastom distribuiranih izvora u budućnosti. Moguće je otkriti slabe točke mreže, tokove snaga te naponske prilike u mreži.

Ovaj projekt je pokazao mogućnost primjene podataka prikupljenih AMR sustavima u svrhu nadzora, planiranja i simulacija u distribucijskoj mreži. Očigledno je da uz prikladnu programsku podršku je ove podatke moguće primijeniti u sustavima nadzora kvalitete električne energije.

5.3. Mogućnost primjene podataka iz AMR sustava u sustavima nadzora kvalitete električne energije

Elektro Ljubljana ima uspostavljen sustav nadzora kvalitete električne energije prema normi EN 50160 u visokonaponskim (VN) i srednjenaponskim (SN) elektroenergetskim objektima. Zbog povećanja korištenja elektroničkih uređaja Elektro Ljubljana predviđa da će se kvaliteta električne energije u distribucijskoj mreži dodatno narušiti, te planira uspostavu sustava nadzora kvalitete i u niskonaponskoj (NN) mreži. Uspostava sustava nadzora kvalitete u NN mreži bi omogućila[22]:

- Planiranje razvoja mreže i jednostavnije izdavanje elektroenergetskih suglasnosti
- Bolji proces rješavanja žalbi na razinu kvalitete električne energije
- Dodatnu potporu dispečerskom centru u vođenju mreže

U NN mreži mjerenja kvalitete električne energije se rade prema normi IEC 61000-4-30 tokom jednog tjedna samo kada je to potrebno. Ova mjerenja se rade u slučaju prigovora na razinu kvalitete električne energije, u procesu planiranja razvoja mreže, za potrebe izdavanja elektromagnetske suglasnosti te za potrebe projektne dokumentacije. Mjerni uređaji za ovakva mjerenja su skupi, te montiranje takvih uređaja u NN mrežu za stalni nadzor nije ekonomski isplativo rješenje. Zato je Elektro Ljubljana potražila druga rješenja za uspostavu sustava nadzora kvalitete električne energije u NN mreži. Kao kvalitetno rješenje se predstavila uspostava sustava procjene parametara kvalitete napona koristeći podatke iz digitalnih brojila u NN mreži. Prema regulativi do 2025. godine digitalna brojila će biti ugrađena kod 100% korisnika Elektro Ljubljane[22].

Osim preciznog mjerenja utrošene električne energije digitalna brojila imaju dodatne funkcionalnosti. Postoje različite vrste digitalnih brojila, pogotovo za snage manje od 43 kW, koje imaju različite mogućnosti bilježenja veličina i događaja. Događaji koje digitalna brojila mogu bilježiti su prenaponi, propadi napona i prekidi napajanja. Uz kvalitetnu analizu ovih podataka moguće je procijeniti određene parametre kvalitete električne energije prema normi EN 50160. Najnaprednija digitalna brojila u upotrebi na području Elektro Ljubljane su G3 brojila. G3 brojila osim naponskih događaja mogu bilježiti 10-minutni dijagram napona, kao i 10-minutne srednje vrijednosti napona. G3 brojila nisu certificirana za mjerenje kvalitete električne energije prema normi IEC 61000-4-30. Koristeći podatke prikupljene G3 digitalnim brojilima Elektro Ljubljana je odlučila provesti projekt mogućnosti primjene ovih podataka za uspostavu sustava nadzora kvalitete električne energije na mjestu predaje energije korisnicima.

5.3.1. Pilot projekt Elektro Ljubljane

Pilot projekt je proveden na trinaest mjernih mjesta opremljenih sa G3 digitalnim brojilima. Na mjernim mjestima su ugrađeni PQ monitori koji su certificirani za mjerenje prema normi IEC 61000-4-30 ako uređaji klase S. Usporedbom izmjerenih podataka iz PQ monitora i podataka prikupljenih G3 brojilima može se dobiti uvid u mogućnost primjene podataka dobivenih preko AMR sustava za potrebe nadzora kvalitete električne energije. Korištenjem mjernih podataka iz digitalnih brojila može se[22]:

- Otkriti moguće promjene napona u NN mreži
- Otkriti problematična područja NN mreže sa povećanim brojem prekida ili devijacija napona
- Mjeriti pokazatelje pouzdanosti napajanja direktno na mjestu predaje električne energije korisniku

Od trinaest mjerenja dobiveno je devet korisnih usporedbi, jer na četiri mjerna mjesta nisu dobiveni potpuni rezultati. Mjerenja su provedena kao 10-minutna mjerenja usrednjenih efektivnih vrijednosti. G3 brojila su podesiva po uvjetima za zapisivanje događaja kako je prikazano na slici 5.4. Pomoću tih postavki moguće je prilagoditi brojilo za specifične potrebe. Za implementaciju sustava nadzora na razini cijele NN mreže ove postavke moraju biti ujednačene na svim brojilima da se osigura ispravno otkrivanje problema.

Nominal Voltage	230	V
Threshold for voltage sags	90	% = 207 V
Time threshold for voltage sags	30	s
Threshold for voltage swells	110	% = 253 V
Time threshold for voltage swells	30	s
Threshold for missing voltage	45	% = 103.5 V
Time threshold for missing voltage	30	s
Threshold for critical under voltage	88,7	% = 204 V
Threshold for critical over voltage	120	% = 276 V

Slika 5.4. Postavke za zapisivanje naponskih događaja G3 brojila[22]

Nominal Voltage – nazivni napon

Threshold for voltage sags – granica propada napona

Time threshold for voltage sags – vremenska granica propada napona

Threshold for voltage swells – granica prenapona

Time threshold for voltage swells – vremenska granica prenapona

Threshold for missing voltage – granica prekida napajanja

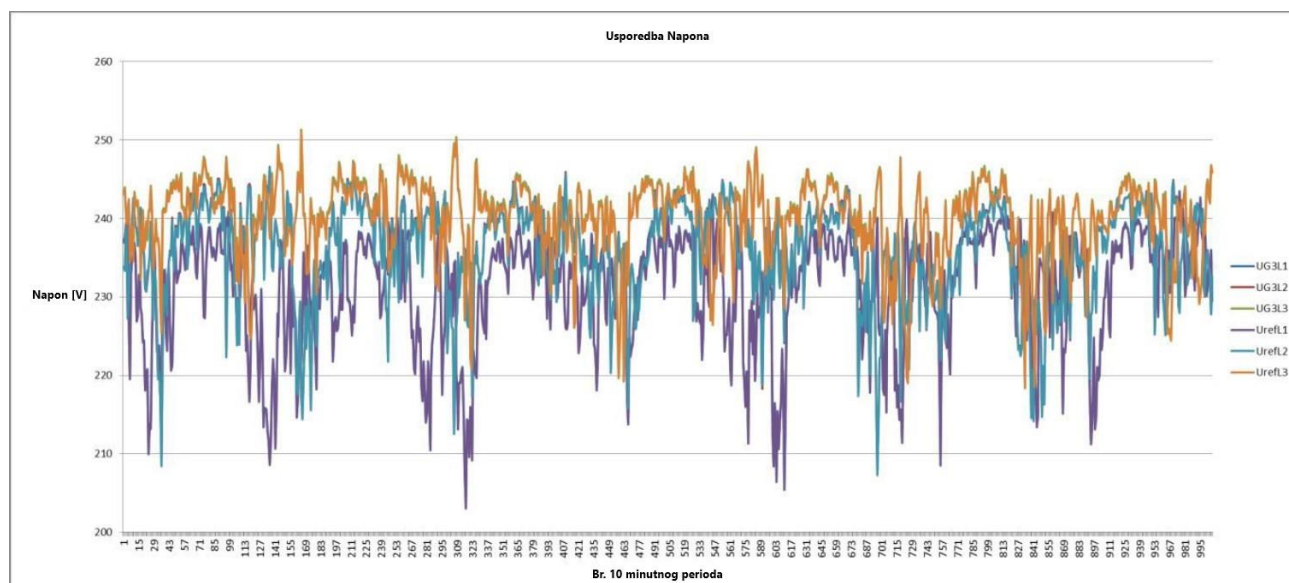
Time threshold for missing voltage – vremenska granica prekida napajanja

Threshold for critical under voltage – granica kritičnih propada napona

Threshold for critical over voltage – granica kritičnih prenapona

Za potrebe projekta odabrana su mjerenja gdje su otkriveni događaji prenapona ili propada napona, kako bi se mogla usporediti detekcija ovaj događaja sa detekcijom preko PQ monitora. Također su uspoređene vrijednosti 10-minutnih mjerenja napona te mogućnost procjene kontinuiteta napajanja preko digitalnih brojila. Usporedba rezultata je pokazala da iako digitalna brojila G3 nisu certificirana za mjerenje kvalitete električne energije njihova mjerenja imaju vrlo mala odstupanja od mjerenja dobivenih pomoću certificiranih PQ monitora. Srednje prosječno odstupanje naponskih mjerenja je

0.14 V, dok je srednje maksimalno odstupanje 9.06 V. Najveća odstupanja su izmjerena u periodima namjerno izazvanih prekida napajanja. Prekidi napajanja su provedeni u cilju procjene mogućnosti brojlara za praćenjem kontinuiteta napajanja. Ova odstupanja se dešavaju jer brojila nisu dobra u mjerenju napona tokom tranzijentalnih događanja. Kada se izbace mjerenja sa namjerno izazvanim prekidima napajanja dobije se srednje prosječno odstupanje od 0.11 V i srednje maksimalno odstupanje od 0.95 V. Na slici 5.5. je prikazan dijagram promjene napona sa ucrtanim vrijednostima mjerenih napona u sve 3 faze sa oba mjerna instrumenta dok su u tablici 5.4. prikazana srednja i pojedinačna odstupanja promatranih mjerenja.



Slika 5.5. Prikaz mjerenih napona na jednom mjernom mjestu[22]

Sa slike je vidljivo da su razlike mjerenja skoro zanemarive, odnosno odstupanje mjerenja između mjerenja brojila i PQ monitora je jedva vidljivo. Također je vidljivo da na ovom mjernom mjestu dolazi do propada napona do vrijednosti blizu 200 V što bi bilo izvan granica propisanih normom EN 50160 za odstupanja napona. Izradom izvješća o kvaliteti električne energije prema normi je za ovo mjerno mjesto to i potvrđeno. Na još dva mjerna mjesta uključena u projektu je zabilježena kvaliteta električne energije koja ne zadovoljava normu.

Tablica 5.4. Odstupanja mjerenja brojila od PQ monitora[22]

Mjerno mjesto	Prosječno odstupanje [V]	Maksimalno odstupanje [V]
1L1	0.10	0.88
1L2	0.08	10.82
1L3	0.13	15.5
2L1	0.23	4.40
2L2	0.20	2.25
2L3	0.14	7.69
3L1	0.14	1.71
3L2	0.07	4.28
3L3	0.07	3.89
4L1	0.12	0.91
4L2	0.12	2.90
4L3	0.09	7.04
5L1	0.24	1.29
5L2	0.21	4.14
5L3	0.10	20.24
6L1	0.05	0.29
6L2	0.06	3.56
6L3	0.06	12.86
7L1	0.22	1.87
7L2	0.15	1.41
7L3	0.32	1.22
8L1	0.13	0.71
8L2	0.23	64.52
8L3	0.24	60.70
9L1	0.07	1.07
9L2	0.14	2.63
9L3	0.13	5.88
Srednje odstupanje	0.14	9.06

G3 brojila mogu uočiti varijacije napona duže od 30 sekundi, dok standard za mjerenje kvalitete zahtijeva uočavanje varijacija duljine 10 ms, za što brojila G3 nisu sposobna. Digitalna brojila u projektu su zapisala 389 događaja propada ili prenapona, dok su PQ monitori zapisali 10359 događaja. G3 brojila su pravilno otkrila sve prekide napajanja duže od 30 sekundi te su pravilno detektirali sve planirane prekide napajanja koji su trajali oko 5 minuta, dok su PQ monitori detektirali još 2 prekida napajanja kraća od 30 sekundi. Očigledno je da koristeći podatke mjerenja digitalnih brojila je moguće kvalitetno i točno bilježiti dugotrajne prekide napajanja te spore promjene vrijednosti napona.

Rezultati ovog projekta su pokazali da moderna digitalna brojila električne energije, iako za to nisu certificirani mogu mjeriti određene parametre napona sa visokom točnošću. Korištenjem mjernih podataka digitalnih brojila koji se mogu prikupljati AMR sustavom moguće je kvalitetno procijeniti sve parametre kvalitete električne energije prema normi EN 50160 osim flikera, frekvencije, tranzijentalnih napona te kratkotrajnih prekida napajanja.

6. ZAKLJUČAK

Električna energija pokreće današnje društvo, električni uređaji nam pružaju rasvjetu, grijanje, zabavu te danas i transport. Električni uređaji zahtijevaju napon određenih značajki za ispravan rad. Značajke napona koji se isporučuje korisnicima zapravo predstavljaju kvalitetu električne energije. Zakonski i normativno su definirani parametri kvalitete električne energije, koji skupno određuju blizinu stvarnog isporučenog napona idealnom naponu. Uređaji korisnika mreže mogu u svom radu unositi smetnje u mrežu koje narušavaju kvalitetu napona. Porast korištenja modernih elektroničkih uređaja, prelazak na obnovljive izvore energije, te pojava električnih automobila koji brzo prodiru na tržište znatno otežavaju održavanje kvalitete električne energije. Zbog ovih tendencija javlja se sve veća potreba operatora prijenosnih i distribucijskih sustava za kvalitetnim mjerenjem i održavanjem razine kvalitete električne energije u mreži. Danas su već u pogonu sustavi trajnog nadzora kvalitete električne energije, koji su za sad većinom ograničeni na visokonaponske i srednjenaponske mreže. Radi osiguranja adekvatne razine kvalitete električne energije, pogotovo u budućnosti, moraju se uspostaviti sustavi za nadzor kvalitete električne energije na svim razinama mreže, od točke proizvodnje od točke predaje energije korisnicima.

Za uspostavu sustava nadzora kvalitete električne energije potrebni su mjerni podatci o značajkama napona na mjestu promatranja kvalitete. Ovi podatci se moraju prenijeti komunikacijskim vezama do centralnog sustava nadzora koji sadrži potrebnu opremu za obradu i analizu ovih podataka. Operatori mogu koristiti centralne sustave nadzora kvalitete električne energije za procjenu stanja mreže, planiranje razvoja i rješavanje sporova sa korisnicima. Mjerni podatci se mogu prikupljati preko specijaliziranih uređaja za mjerenje kvalitete električne energije ili drugih uređaja već u upotrebi. Mjerni podatci iz nadzornih, mjernih i zaštitnih uređaja su ograničeni u mogućnosti primjene u sustavima nadzora kvalitete električne energije. Od takvih uređaja digitalna brojila imaju najveću mogućnost primjene jer mogu služiti kao nadzor u točki predaje električne energije korisniku. Danas su već u upotrebi sustavi automatskog očitavanja brojila koji imaju mogućnost daljinskog očitavanja stanja digitalnih brojila. Proširenjem ovih sustava moguće je preuzimati i mjerne podatke o naponu i struji koje digitalna brojila moraju mjeriti za procjenu potrošene električne energije. Ove i druge mogućnosti primjene digitalnih brojila su primijećene od strane operatora i proizvođača te se novim brojlama proširuju mjerne i komunikacijske mogućnosti.

Iz podataka o provedenim projektima obrađenim u ovom radu, nameće se rješenje uspostave sustava nadzora kvalitete električne energije kao kombinacija obrađenih projekata. U ovakvom sustavu sva elektroenergetska postrojenja na srednjem i visokom naponu bi bila opremljena monitorom kvalitete električne energije te povezana komunikacijskim vodovima na centralni sustav nadzora. Transformatorske stanice na niskom naponu bi bile opremljene sa monitorima kvalitete koji mogu ali ne moraju biti trajno povezani na sustav nadzora, ovisno o značaju pojedine stanice. Sustav bi kompletirali podatci mjerenja prikupljeni sa digitalnim brojilima potrošača, koji se prikupljaju sustavom za automatsko očitavanje brojila. Ovakav sustav bi imao dobre mogućnosti nadzora kvalitete električne energije do svake točke predaje električne energije potrošačima, a izvediv je s tehnologijama koje su danas dostupne. Uspostava ovakvog sustava zahtijeva velika ulaganja od strane operatora sustava u pogledu opremanja elektroenergetskih postrojenja sa monitorima kvalitete, opremanja potrošača sa digitalnim brojilima, uspostavom sustava daljinskog očitavanja brojila, poboljšanja komunikacijskog sustava te proširenja centralnih sustava nadzora kvalitete električne energije. Zbog već pokrenutih procesa prelaska na obnovljive izvore energije, opremanja potrošača sa digitalnim brojilima i renovacije elektroenergetske mreže, dio ovih ulaganja će se odraditi u tim procesima. Mislim da je uspostava ovakvog sustava za nadzor kvalitete električne energije potrebna za kvalitetno vođenje elektroenergetskog sustava budućnosti te da već provedeni projekti pokazuju da bi u bliskoj budućnosti oni mogli biti i uspostavljeni.

LITERATURA

- [1] Hrvatska energetska regulatorna agencija, „Uvjeti kvalitete opskrbe električnom energijom“, s Interneta, https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2017_04_37_795.html, 20. kolovoza 2022.
- [2] Hrvatska energetska regulatorna agencija, „Pravilnik o uvjetima kvalitete opskrbe električnom energijom“, s Interneta, https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2022_07_84_1280.html, 21. kolovoza 2022.
- [3] HEP – Operator distribucijskog sustava, „Izveštaj o kvaliteti opskrbe električnom energijom za 2021. godinu“, s Interneta, https://www.hep.hr/ods/UserDocsImages/dokumenti/Izvjestaj_o_kvaliteti_opskrbe_ee_za_2021.%20godinu.pdf, 28. kolovoza 2022.
- [4] HEP Operator distribucijskog sustava, „Izveštaj o kvaliteti opskrbe električnom energijom za 2018. godinu“, s Interneta, https://www.hep.hr/ods/UserDocsImages/Propisi_kucanstvo/Akti/Uvjeti_kvalitete_Izve%C5%A1taj_2018.pdf, 28. kolovoza 2022.
- [5] HEP Operator distribucijskog sustava, „Izveštaj o kvaliteti opskrbe električnom energijom za 2019. godinu“, s Interneta, https://www.hep.hr/ods/UserDocsImages/dokumenti/Izvjestaj_kvaliteta_opskrbe_2019.pdf, 28. kolovoza 2022.
- [6] HEP Operator distribucijskog sustava, „Izveštaj o kvaliteti opskrbe električnom energijom za 2020. godinu“, s Interneta, https://www.hep.hr/ods/UserDocsImages/dokumenti/Zakoni_i_propisi/Izvjestaj_kvaliteta_opskrbe_2020.pdf, 28. kolovoza 2022.
- [7] CENELEC, „Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems“, CENELEC, 2005.
- [8] Mainsfrequency, s Interneta, https://www.mainsfrequency.com/verlauf_en.htm, 03. rujna 2022.
- [9] Novinc, Ž.: „Kvaliteta električne energije - priručnik-“, Elektrotehnički fakultet Osijek, Osijek, 2006.
- [10] IEEE Standard 519-2014, s Interneta, http://www.egr.unlv.edu/~eebag/IEEE_STD_519_1992vs2014.pdf, 22. kolovoza 2022.
- [11] HOPS, s Interneta, <https://www.hops.hr/trziste-el-energije>, 2. rujna 2022.
- [12] HOPS, s Interneta, <https://www.hops.hr/prijenosna-mreza>, 2. rujna 2022.

- [13] Hrvatska energetska regulatorna agencija, „Opći uvjeti za korištenje mreže i opskrbu električnom energijom“, s Interneta, https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020_09_104_1954.html, 21. kolovoza 2022.
- [14] Tomiša, T.: „Sustavi za trajni nadzor kvalitete napona u distribucijskim mrežama“, 2012.
- [15] Kreiss G.: „Power Quality Analysis“, Dranetz Technologies Incorporated, Edison, New Jersey, 1991.
- [16] UNI-T UT285C Operating manual, s Interneta, <https://meters.uni-trend.com/download/ut285c-user-manual/?wpdmdl=9330&refresh=6319b9915d41e1662630289>, 4. rujna 2022.
- [17] IEL, s Interneta, <https://www.iel.hr/grupe-proizvoda/nadzor-kvalitete-energije/sustav-nadzora-kvalitete-elektricne-energije/mjerni-terminal-mt-40/>, 4. rujna 2022.
- [18] PQube 3 Instruction Manual, s Interneta, <https://www.powermeterstore.com/pdfs/cache/www.powermeterstore.com/pq3iab-portable-000-gps1-0000/manual/pq3iab-portable-000-gps1-0000-manual.pdf>, 4. rujna 2022.
- [19] Babić, M.; Dobutović, D.; Perišić, M.: „Integrirani sustav kontrole kvalitete energije distribucijskog područja“, HO CIRED, 2021.
- [20] IEL, s Interneta, <https://www.iel.hr/grupe-proizvoda/nadzor-kvalitete-energije/sustav-nadzora-kvalitete-elektricne-energije/integrirani-sustav-nadzora-kvalitete-elektricne-energije-ipqs/>, 8. rujna 2022.
- [21] Fussenegger, N.: „Insight in distribution grid using smart meter data“, CIRED, 2019.
- [22] Bergant, P.; Davidovič, D.: „Stalni nadzor KEE z uporabo NMS“, CIRED, 2019.

SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI

Ovaj rad definira pokazatelje pouzdanosti napajanja i parametre kvalitete električne energije. Prikazana je normativna i zakonska regulacija kvalitete opskrbe električnom energijom. Opisani su postupci i uređaji za mjerenje i nadzor kvalitete električne energije. Opisan je sustav automatskog očitavanja brojila AMR. Obrađene su mogućnosti izvedbe sustava nadzora kvalitete električne energije u distribucijskoj mreži korištenjem uređaja za mjerenje kvalitete električne energije, ili već postojećih uređaja na mreži.

Ključne riječi:

- Kvaliteta električne energije
- Pokazatelji pouzdanosti napajanja
- Parametri kvalitete električne energije
- Monitori kvalitete električne energije
- Nadzor kvalitete električne energije

ABSTRACT AND KEYWORDS

This paper defines power supply reliability indices and power quality parameters. Normative and legal regulation of power quality is presented. Procedures and devices for measuring and monitoring power quality are described. Automatic meter reading systems AMR are described. The possibilities of implementing a system for monitoring power quality in the distribution network using devices for measuring power quality, or already existing devices on the network, are discussed.

Keywords:

- Power quality
- Power supply reliability indices
- Power quality parameters
- Power quality monitors
- Power quality monitoring