

# Nesimetričnost opterećenja u niskonaponskoj distribucijskoj mreži

---

**Plantosar, Mario**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:674555>

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

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

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Sveučilišni studij**

**NESIMETRIČNOST OPTEREĆENJA U  
NISKONAPONSKOJ DISTRIBUCIJSKOJ MREŽI**

**Diplomski rad**

**Mario Plantosar**

**Osijek, 2020.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit

Osijek, 18.09.2020.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit**

<b>Ime i prezime studenta:</b>	Mario Plantosar
<b>Studij, smjer:</b>	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
<b>Mat. br. studenta, godina upisa:</b>	D-1195, 21.09.2019.
<b>OIB studenta:</b>	29794145874
<b>Mentor:</b>	Izv. prof. dr. sc. Zvonimir Klaić
<b>Sumentor:</b>	
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>	Izv. prof. dr. sc. Krešimir Fekete
<b>Član Povjerenstva 1:</b>	Izv. prof. dr. sc. Zvonimir Klaić
<b>Član Povjerenstva 2:</b>	Zorislav Kraus
<b>Naslov diplomskog rada:</b>	Nesimetričnost opterećenja u niskonaponskoj distribucijskoj mreži
<b>Znanstvena grana rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak diplomskog rada:</b>	Tema rezervirana za: Mario Plantosar
<b>Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):</b>	Izvrstan (5)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
<b>Datum prijedloga ocjene mentora:</b>	18.09.2020.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 05.10.2020.

**Ime i prezime studenta:**

Mario Plantosar

**Studij:**

Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

D-1195, 21.09.2019.

**Turnitin podudaranje [%]:**

11

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Nesimetričnost opterećenja u niskonaponskoj distribucijskoj mreži**

izrađen pod vodstvom mentora Izv. prof. dr. sc. Zvonimir Klaić

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

# Sadržaj

1. UVOD.....	4
2. KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE .....	5
2.1. Međunarodni standardi za kvalitetu električne energije .....	8
3. POKAZATELJI KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE .....	9
3.1. Naponski propadi i prekidi.....	10
3.2. Kolebanje napona i flikeri .....	11
3.3. Previsoki naponi i prenaponi.....	13
3.3.1. Zaštita od atmosferskih prenapona .....	14
3.4. Harmonici i međuharmonici.....	14
3.5. Nesimetrija napona.....	16
3.5.1. Opis nesimetrije .....	17
3.5.2. Izvori nesimetrije .....	21
3.5.3. Učinci nesimetrije napona .....	21
3.5.4. Dopuštene vrijednosti nesimetrije .....	23
3.5.5. Smanjenje nesimetrije.....	23
3.6. Upotreba i spajanje mjernih instrumenata.....	23
3.6.1. Sustav niskog napona .....	23
3.6.2. Karakteristike mjernih instrumenata .....	24
3.6.3. Izvođenje mjerenja .....	25
3.6.4. Dodatni gubici snage uslijed nesimetričnog opterećenja .....	25
4. Analiza potrošnje električne energije i opterećenja na razini NN mreže.....	26
4.1. Osnovna potrošnja – kućanstva.....	26
4.2. Ostali kupci .....	27
4.3. Ukupno opterećenje mreže.....	27
5. Analiza rezultata mjerenja nesimetrije u niskonaponskoj distribucijskoj mreži .....	28
5.1. Analiza mjerenja kvalitete električne energije u TS 10/0,4 kV koja napaja gradsku četvrt .....	29
5.2. Analiza mjerenja kvalitete električne energije u TS 10/0,4 kV koja napaja prigradsko naselje .....	34

5.3. Mjere za smanjenje nesimetrije.....	39
6. ZAKLJUČAK.....	40
7. LITERATURA .....	41
7.1. Internetski izvori .....	41
SAŽETAK .....	42
ABSTRACT.....	43
ŽIVOTOPIS.....	44

## 1. UVOD

Kako dolazi do razvoja i napretka tehnologije u svim aspektima života, tako postoje trendovi razvoja i elektroenergetskog sustava. S povećanjem značaja električne energije i njene kvalitete potrebno je pratiti i unaprjeđivati tehnologiju kako bi što pouzdanije i lakše bila pristupačna svakom korisniku. Električna energija je jedinstven proizvod u kojem sudjeluju elementi koji je proizvode, njena uporaba i djelovanje trošila. Nova oprema koja unaprjeđuje kvalitetu samog proizvoda, pravi i određene probleme. Postoje određeni standardi koji doprinose kvaliteti i smanjenju nepovoljnih situacija. Navedeni su neki međunarodni standardi, gdje je detaljnije objašnjena norma HRN EN 50160.

U ovom radu prikazani su određeni parametri kvalitete električne energije i negativni učinci na samu mrežu. Također su opisane mjere za smanjivanje nepovoljnih utjecaja. Na stručnjacima je da pokušaju uočiti uzroke tih negativnih učinaka i na što efikasniji i bolji način dođu do rješenja za bolju kvalitetu električne energije.

Pomnije je prikazana nesimetrija napona gdje su prikazani i rezultati mjerenja u niskonaponskoj distribucijskoj mreži. Mjerenja su odrađena na dva različita mjesta gdje se vidi razlika u nesimetrijama i njihov utjecaj na mrežu. Jedno mjerenje je bilo u prigradskom naselju, a drugo gradske četvrti. Sve te informacije i mjerenja su potrebna kako bi došli do određenog saznanja kako i na koji način poboljšati rad mreže i sa što manje problema, električnu energiju isporučili svim korisnicima.

## 2. KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Pojam kvalitete električne energije koristio se u svakodnevnom govoru u smislu neprekinutog, stalnog napajanja potrošača električnom energijom. Razvoj tehnologije u svim područjima napreduje bržim tempom, a scenarij napajanja značajno se promijenio. Povećanjem veličine i kapaciteta, elektroenergetski sustavi postaju složeniji što dovodi do smanjene pouzdanosti. Razvoj elektronike uvjetovao je da su električni uređaji s vremenom postajali sve sofisticiraniji te su zahtijevali neprekidnu i uvjetovanu snagu. Zanimanje za kvalitetu električne energije postoji od samih početaka njezine šire primjene, a prema tome mogu se razlikovati tri vala utjecaja na poboljšanje kvalitete električne energije u posljednja četiri desetljeća. Republika Hrvatska, također, se prilagođavala izmjenama kvalitete električne energije, a treba istaknuti kako je upravo Hidroelektrana Krka, prva hrvatska hidroelektrana. [4]



Slika 2.1. Turbina iz prve hrvatske hidroelektrane (Nacionalni park Krka) [4]



Prvi val utjecaja na kvalitetu električne energije odvijao se tijekom osamdesetih godina 20.stoljeća. Naime, tada je započeo nagli i ubrzani rast upotrebe i korištenja elektronike kako u industriji uslužnih djelatnosti, tako i u pojedinačnim kućanstvima, ponajprije s uređajima poput video playera, linija, rekordera, TV prijemnika i slično. [4]

Drugi val utjecaja započeo je početkom 21. stoljeća, a njegov se razvoj ogleda u ubrzanom porastu priključivanja distribuiranih izvora električne energije u distribucijsku mrežu. Ovdje se, prvenstveno, utjecaj može uvidjeti u fotonaponskim elektranama koje se priključuju putem izmjenjivača. [4]

Treći val utjecaja na kvalitetu električne energije odvija se i danas, a ogleda se u naglom porastu i svakodnevnoj upotrebi električnih automobila i punjača. Ovo razdoblje karakterizira i dodatni porast fotonaponskih elektrana iz drugog vala u Republici Hrvatskoj. [4]

Kvaliteta električne energije je izraz koji se odnosi i na održavanje valnih oblika napona i struje što sličnijima sinusoidi, na sabirnicama za distribuciju energije pri nazivnoj veličini i frekvenciji. Stoga se kvaliteta električne energije često koristi za iskazivanje kvalitete napona, kvalitete struje, pouzdanosti usluge, kvalitete napajanja itd. [1]

Posljednjih godina kvaliteta električne energije privlači sve veću pažnju u energetici. Proučavanjem kvalitete formiraju se različite grane, koje se bave pitanjima usmjerenim na kvalitetu električne energije. Istraživanja o kvaliteti električne energije mogu se podijeliti na sljedeće faze:

- temeljni pojmovi,
- izvori,
- učinci,
- modeliranje i analiza,
- instrumentacija i
- rješenja.

Ove su grane međusobno povezane i značajno ovise jedna o drugoj. Jedna od definicija kvalitete električne energije dana je u [2]: „Temeljna koncepcija kvalitete električne energije određuje parametre i njihov stupanj varijacije s obzirom na njih do njihove nazivne veličine koja

je osnovni razlog za pogoršanje kvalitete električne energije.“ Otkrivanje točnih izvora poremećaja vezanih uz kvalitetu električne energije u sve složenijoj mreži veliki je izazov za inženjere. Cjelovito rješenje, odnosno isporuka čiste snage na potrošačku stranu praktički je nemoguća, a cilj je minimizirati vjerojatnost pojave poremećaja i smanjiti učinke problema. [1]

Kvaliteta električne energije opisuje promjenu napona, struje i frekvencije u elektroenergetskom sustavu. Većina opreme elektroenergetskog sustava mogla bi relativno uspješno funkcionirati u velikim varijacijama ova tri parametra. Međutim, u posljednjim godinama u elektroenergetskom sustavu dodana je velika količina opreme koja i nije tako tolerantna prema tim varijacijama.

Loši izvori kvalitete električne energije mogu se podijeliti u dvije skupine:

- stvarna opterećenja, oprema i komponente te
- podsustavi prijenosnih i distribucijskih sustava.

Lošu kvalitetu obično uzrokuju poremećaji na dalekovodu poput impulsa, pada napona, neravnoteže napona i struje, prekida, harmonika, različitih standarda i smjernica koje se spominju u klasifikaciji kvalitete Električne energije i relevantnim IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers<sup>1</sup>) standardima Međunarodne elektrotehničke komisije (International Electrotechnical Commission<sup>2</sup>). Drugi glavni doprinos lošoj kvaliteti energije su harmonici i jalova snaga.

Dvije su temeljne komponente kvalitete napajanja:

- **neprekinutost**, stupanj raspoloživosti električne energije krajnjem korisniku tijekom vremena i
- **razina napona**, odnosi se na specifikirani opseg unutar kojeg se održava napon tijekom vremena. [4]

---

<sup>1</sup> U daljnjem tekstu „IEEE“.

<sup>2</sup> U daljnjem tekstu „IEC“.

## 2.1. Međunarodni standardi za kvalitetu električne energije

Kvaliteta električne energije jedno je od najvažnijih pitanja pri isporuci električne energije. Standarde i smjernice dala su različita tehnička tijela poput

- IEEE
- ANSI (American National Standards Institute)
- IEC
- CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization)

Te su smjernice vrlo korisne u istraživanjima i praksi kvalitete električne energije. [5]

Potreba za standardima kvalitete električne energije pretpostavlja sljedeće:

- povećavanje uporabe osjetljive elektroničke opreme,
- povećanu primjenu nelinearnih uređaja u cilju poboljšanja energetske učinkovitosti i
- povećanu kompleksnost elektroenergetskog sustava te dolazak deregulacije.

Rad opskrbljivača električne energije pretpostavlja norme, koje bi trebale odrediti i postaviti ograničenja naponskih poremećaja proizvedenih nelinearnim trošilima vlastitih kupaca, a koja pri tome sustav može podnijeti.

Također, kao i opskrbljivači električne energije, krajnji kupci trebaju norme kako bi se postavila ograničenja zbog poremećaja generiranih trošilima drugih kupaca te poremećaja koje proizvode opskrbljivači električne energije.

Republika Hrvatska je 2012.godine preuzela standard HRN EN 50160:2012.

Norma EN 50160 opisuje i definira važna obilježja opskrbnog napona na mjestu predaje potrošaču pri normalnim pogonskim uvjetima u javnim visokonaponskim, srednjenaponskim i niskonaponskim mrežama. [4]

**Tablica 2.1. Granične vrijednosti norme HRN EN 50160 [4]**

<b>POKAZATELJ</b>	<b>MJERNA JEDINICA</b>	<b>Obilježja niskog napona</b>	<b>Obilježja srednjeg Napona</b>
Promjene Napona	V	±10%Un za 95% tjedna ±10/-15% Un za 5% tjedna	±10% U <sub>C</sub> za 95% tjedna
Kratki prekidi	Broj	< 3 min.- nekoliko desetaka do stotina godišnje	
Dugi prekidi	Broj	≥3 min. - < 10 - 50 godišnje	
Propadi	Broj	nekoliko desetaka do tisuću godišnje	
THD napona	% Un	< 8 % Un	
Treperenje	P <sub>IT</sub>	P <sub>IT</sub> ≤ 1, za 95% tjedna	
Nesimetrija	% Un	< 2 % Un	
Frekvencija	Hz	± 1 % Un za 99,5 % godine	
		± 4/-6 % Un za 100 % vremena	

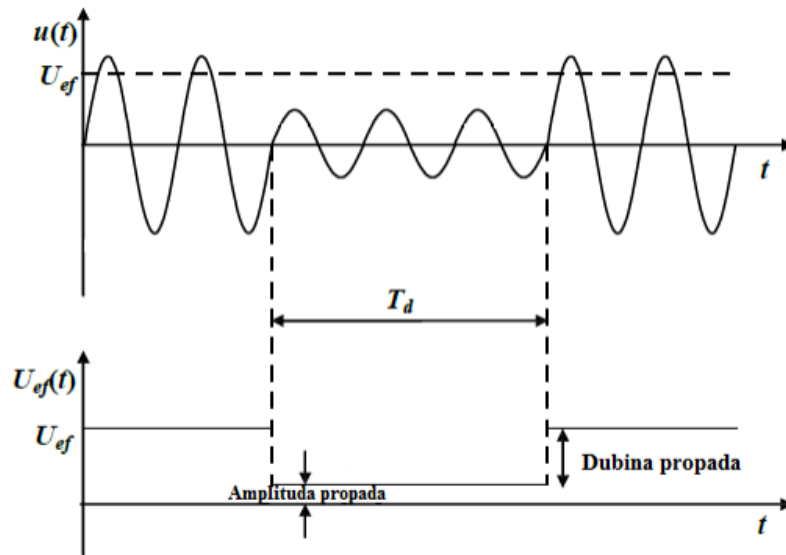
### **3. POKAZATELJI KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE**

Analiza kvalitete električne energije najčešće obuhvaća neke osobine napona, a to su:

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

### 3.1. Naponski propadi i prekidi

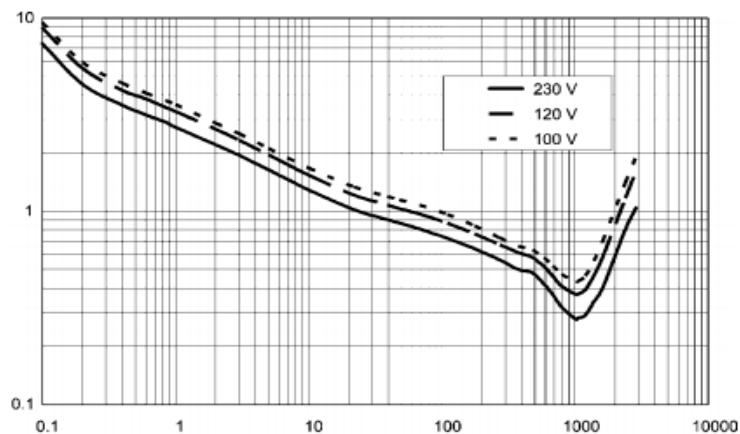
Naponski prekidi vrlo su česti prekidi u distribuciji, a označavaju dvodimenzionalni elektromagnetski poremećaj određen razinom napona te vremenom trajanja. Tijekom prekida napajanja razina napona pojedine sabirnice opada do nule, a prekid se može dogoditi za neko kratko, srednje ili dugo razdoblje (kada je prekid duži od 3 minute). [4] Ponekad su niski i visoki naponi malih postotaka dozvoljeni, ali kada prijeđu određenu granicu željene razine napona, oni se definiraju i tretiraju kao poremećaji. Takve smetnje povećavaju količinu jalove snage koju crpi ili isporučuje sustav, odnosno određeni problemi sa izolacijom i stabilnosti napona. Električni kratki spoj je glavni uzrok naponskih propada i kratkotrajnih prekida. Kao takav, kratki se spoj definira kao proboj u dielektriku između dvije strukture koje se nalaze na različitim potencijalima i u normalnom slučaju je izoliran. Najosjetljiviji procesi i oprema uzrokovani propadima i prekidima jesu: rasvjeta (prerano starenje električnih žarulja i fluorescentnih cijevi) i sigurnosni sustavi, računalna oprema (oprema osjetljiva na propade dubine veće od 10% nazivnog napona), različite proizvodne linije i potrebna pomoćna postrojenja za elektrane. Naponski propadi i prekidi prenose putem transformatora se prenose na niže naponske grane. Poremećaji ovise i o vrsti mreže, gdje je na nadzemnim mrežama zbog loših vremenskih prilika veći broj. Kod sinkronih i asinkronih motora propadi djeluju na smanjenje momenta vrtnje i izazivaju usporavanja koja ovise o dubini i trajanju propada. Za poboljšanje, odnosno čimbenici koji pomažu u smanjivanju i izbjegavanju propada i prekida, potrebno je povećati pouzdanost infrastrukture (održavanjem i/ili modernizacijom) te u vidu kvalitete trošila, kvalitete izvora, zaštitne oprema te uređaja (smanjivanjem snage koju troše veliki promjenjivi tereti), povećanje sigurnosti napajanja. [3]



Slika 3.1. Karakteristika kratkotrajnog naponskog propada [4]

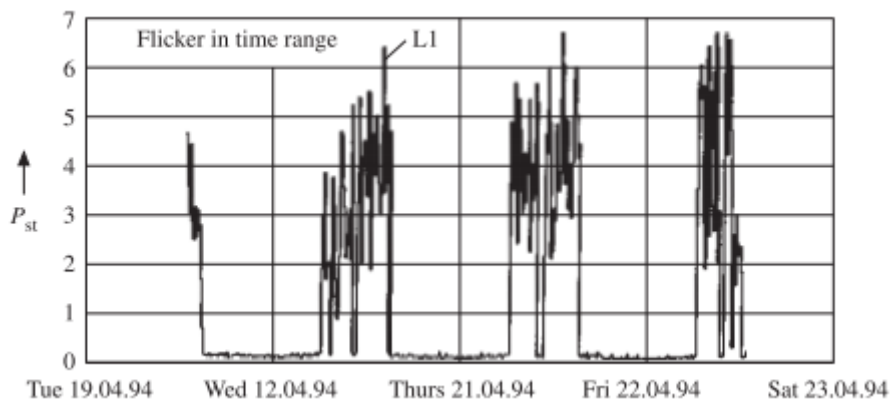
### 3.2. Kolebanje napona i flikeri

Mnogobrojna uključivanja i isključivanja električne opreme koja je spojena na opskrbnu mrežu uzrokuju neprestano mijenjanje napona. Ovakve promjene ovise o impedanciji mreže, a kolebanje je proporcionalno s impedancijom, što označava da s povećanjem impedancije dolazi do povećanje razine kolebanja. Kolebanje je spora promjena napona i nastaje uslijed mnogobrojnih sklapanja u EEM (Elektroenergetska mreža). Kolebanje napona možemo opisati kao serija naponskih promjena ili periodična promjena *envelope* napona. Amplituda ovih iznenadnih promjena ne prelazi 6-8% nazivnog napona. Oblik naponskih kolebanja ovisi o struji koju uzima promjenjivi teret. Kolebanje napona se obično zbog promjenjivog opterećenja širi po mreži ispred i iza ometajućeg trošila, a slabi s udaljenošću od izvora smetnje, što može biti smetnja za veći broj kupaca na mreži. Nepovoljna su velika trošila spojena jednofazno na slaboj NN mreži, a zbog velikih trošila kolebanje napona dolazi do još većeg izražaja. [2]



Slika 3.2. Broj pravokutnih promjena napona u minuti [3]

Posljedica naponskih kolebanja je treperenje, a ono utječe na rasvjetu. Treperenje je brza promjena napona koja je posljedica isprekidanog režima rada trošila velike snage. Vidljivo i primjetno prekidanje izazvano je svjetlosnim podražajem s vremenskim kolebanjem spektralne razdiobe ili svjetlosne gustoće. Glavni izvori kolebanja napona su industrijska opterećenja (u slučaju da izazivaju zamjetno treperenje mogu utjecati na veliki broj potrošača spojenih na istu mrežu). Neka od vrsta industrijskih opterećenja su peći u proizvodnji čelika, strojevi za zavarivanje, električni kotlovi i slično. Prema tome, glavna posljedica tih brzih naponskih promjena je svjetlosno treperenje koje može uzrokovati i psihološki učinak, a koji pak ovisi o amplitudi kolebanja, učestalosti i duljini trajanja. Zbog toga je potrebno više opreza kod epileptičara. [4]



Slika 3.3. Primjer mjerenja flikera [2]

Osnova proračuna flikera je promjena napona na stezaljkama uređaja koji se ispituje.

$$\Delta U = U(t_1) - U(t_2) \quad (3-1)$$

$\Delta U$  - razlika napona

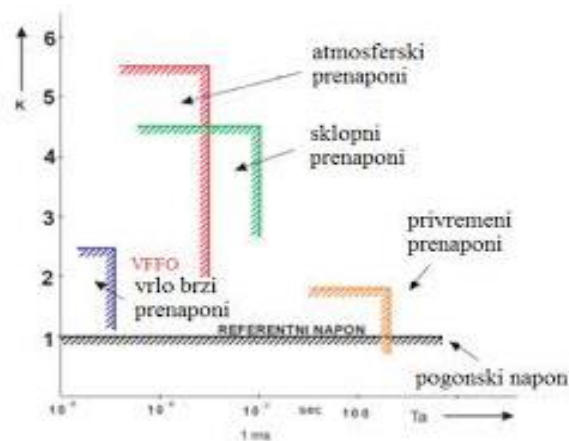
$U(t_1)$  i  $U(t_2)$  - dvije uzastopne vrijednosti faznog napona

Efektivna vrijednost napona  $U(t_1)$  i  $U(t_2)$  mora se izmjeriti ili izračunati. Promjena napona  $\Delta U$  nastaje zbog gubitaka napona na kompleksnoj referentnoj impedanciji  $\underline{Z}$ .

Za poboljšanje treperenja, odnosno oslabljivanja negativnih učinaka, mogu se zamijeniti vrste rasvjete, nadalje može se ugraditi neprekidno napajanje ili se upotrebljavati reaktivni kompenzator. [8]

### 3.3. Previsoki naponi i prenaponi

Previsoki naponi označavaju događaje kada gornja granična vrijednost nazivnog napona biva prekoračena. Prenapon je naziv primjenjiv isključivo za prijelazne pojave, kao što su atmosferska pražnjenja, prenaponi kod uklapanja, isklapanja i kratkih spojeva u elektroenergetskoj mreži, a postoje tri vrste previsokih napona: prolazni, sklopni i atmosferski.



Slika 3.4. Prenaponi [9]



Različiti su uzroci previsokih napona, a mogu se pronaći u proboju izolacije između faze i zemlje, kvarovima na regulaciji generatora i regulaciji napona transformatora, brzim promjenama u strukturi mreže te munjama.

Neke od posljedica previsokih napona mogu izazvati značajno i trajno oštećenje opreme, propadanje opreme tijekom vremena, dugotrajne naponske prekide te razne poremećaje u komunikacijskim i upravljačkim sustavima.

Poboljšanje uključuje bolju zaštitu osoblja i opreme, poznavanje razine i energije napona koji se pojavljuju u mreži te uporabu zaštitnih uređaja gdje je to potrebno.

### **3.3.1. Zaštita od atmosferskih prenapona**

O atmosferskim prenaponima govori autor Mihalek u svojoj monografiji, gdje upućuje da su: „Atmosferski prenaponi čiji je neposredni uzrok udar munje izravno u NN vodove ili blizu njih najveći su neprijatelj izolacije voda.“ [8] Unutrašnji prenaponi nastali sklapanjem u mreži te naglim prekidima i uključenjima opskrbe, nisu za tu mrežu u velikoj mjeri važni jer je ispitni napon izolacije na niskom naponu znatno veći od tih prenapona. Cilj je postavljanje prenaponske zaštite, to jest zaštite od munje, jer se takvim mjerama štiti sama mreža, kao i pripadna postrojenja. [8]

### **3.4. Harmonici i međuharmonici**

Harmonici su sinusni naponi ili struje s frekvencijama koje su višekratnici nazivne frekvencije, to su frekvencije na kojoj radi sustav napajanja. Sve periodičke funkcije frekvencije mogu se rastaviti na zbroj sinusnih valnih oblika frekvencije formulom  $h \times f$ . Slovo  $h$  označava red harmonika, a slovo  $f$  nazivnu frekvenciju. [4] Harmonici nastaju zbog opreme s nelinearnim karakteristikama, prvenstveno transformatora i fluorescentnih svjetiljki. Posebnu pozornost treba posvetiti uporabi ispravljača s kondenzatorom, odnosno ispravljanju koje se uvelike koristi u TV uređajima, računalima, posebno u kućnim i uredskim okruženjima. Također, harmonici mogu imati negativne učinke na performanse rotirajućih strojeva, transformatora i prijenosnih mreža. Točnost i radne karakteristike mjernih instrumenata i zaštitnih uređaja mogu se promijeniti zbog prisutnosti nepoželjnih harmonika. [2]

Dopuštene vrijednosti napona viših harmonika iskazujemo:

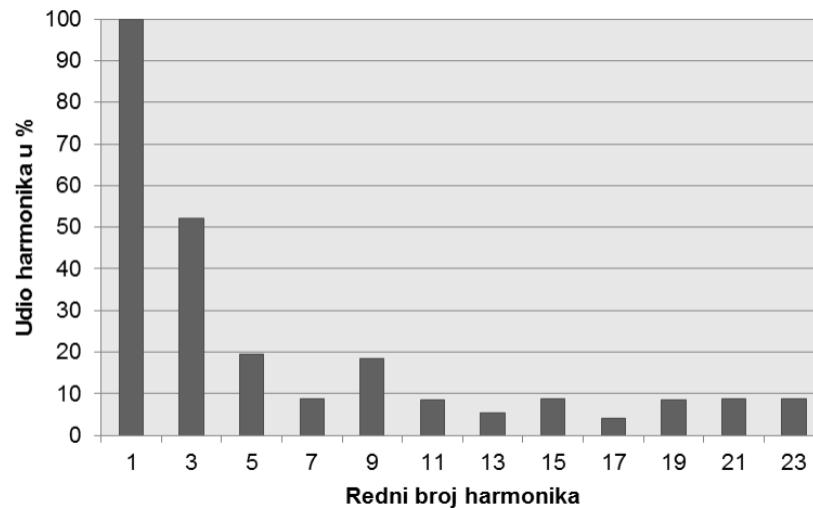
- pojedinačno, njihovim efektivnim vrijednostima ( $U_h$ ) u postotcima efektivne vrijednosti nazivnog napona i/ili
- zajednički, koeficijentom ukupnog harmoničkog izobličenja THD (eng. Total Harmonic Distortion).

$$THD_v = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} (U_h)^2} \frac{100\%}{U_n} \quad (3-2)$$

THDU - ukupno harmonijsko izobličenje napona dobije se iz zbroja efektivnih vrijednosti napona (od 2. do 40. harmonika).

Problemi koji nastaju u elektroenergetskom sustavu zbog viših harmonika su manja iskoristivost snage, troškovi distribucije i drugi. [7]

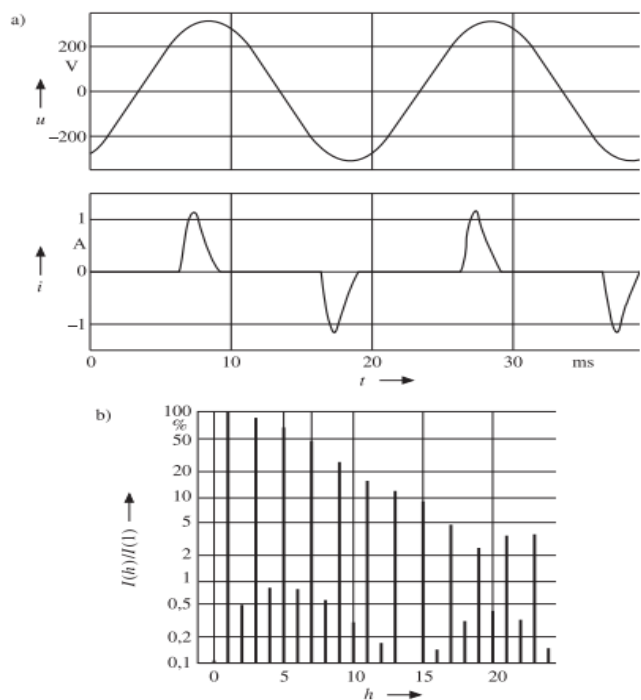
Izvori harmonika su nelinearni tereti (komutacijska napajanja SMPS (Switched-mode power supply), fluorescentna rasvjeta i pripadajuće elektroničke prigušnice, uređaji promjenjive brzine i ostalo). [5]



Slika 3.5. Harmonički spektar SMPS (Switched Mode Power Supply) [10]

Međuharmonici su sinusne komponente s frekvencijama koje nisu cjelobrojni višekratnici osnovne komponente, smješteni su između harmonika, a nastaju zbog periodičnih ili slučajnih promjena snaga.

Neke mjere koje bi mogle omogućiti ograničavanje smetnji izazvanih harmonicima su: sprječavanje interferencije, kvarova, preopterećenja opreme te ograničenje emisije struja viših harmonika u mrežu napajanja. [2]



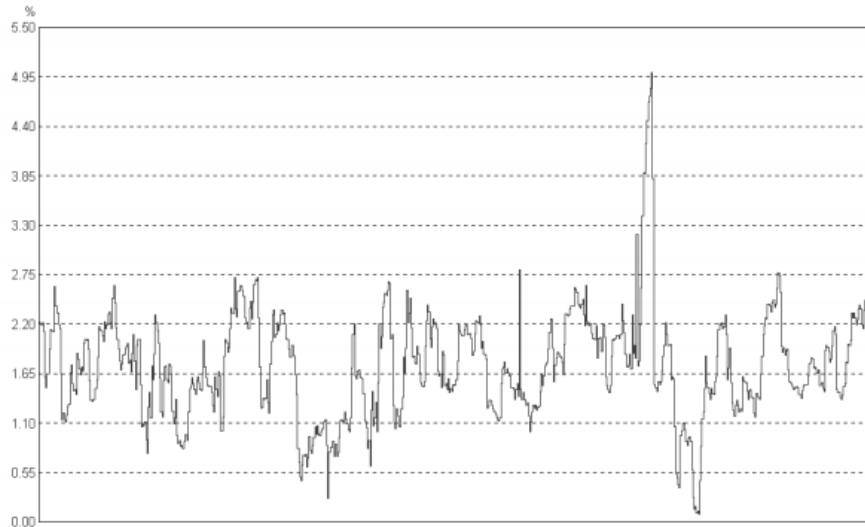
Slika 3.6. Izmjereni napon i struja i harmonici pretvarača s kondenzatorom [2]

### 3.5. Nesimetrija napona

Nesimetrija je uobičajena vrsta problema kvalitete električne energije, a odnosi se na stanje u višefaznom sustavu u kojem efektivne vrijednosti linijskih napona ili fazni kutevi između slijednih linijskih napona nisu jednaki. Jedan od uzroka je loše simetriranje opterećenja u NN mrežama (veliki broj jednofaznih trošila). U NN mreži nesimetrija opterećenja je dosta veća zbog raspodjele pojedinih jednofaznih i dvofaznih opterećenja. Mjere za smanjivanje faktora nesimetrije su:

- jednolika raspodjela jednofaznih opterećenja na sve tri faze,
- instalacija opreme za uravnoteženje opterećenja i
- odvajanje nesimetričnih opterećenja od mreže.

Potrebno je napomenuti kako se karakterizacija nesimetrije u elektroenergetskom sustavu vrši korištenjem simetričnih komponenata.



Slika 3.7. Prikaz nesimetrije napona [2]

### 3.5.1. Opis nesimetrije

U trofaznim sustavima nesimetrija napona definira se kao uvjet u kojem tri fazna napona nisu jednaka po veličini i/ili su kutovi pomaka između njih različiti od  $120^\circ$ . Za analizu nesimetrije uobičajena je metoda simetričnih komponenti, a ona je uvedena u proračune elektroenergetskih sustava početkom prošlog stoljeća.

Dva su načina izračuna stupnja nesimetrije:

- dijeljenje maksimalnog odstupanja od prosjeka trofaznih napona na prosjek trofaznih napona i
- računanje odnosa inverzne (ili nulte) komponente sekvencije prema direktnoj komponenti.

Stoga se nesimetrija u elektroenergetskom sustavu može izraziti kao postotna promjena struje ili napona u odnosu na nazivne vrijednosti. Za promjenu linijske struje u bilo kojoj fazi između tri faze, doći će do nesimetrije.

$$\frac{I-i}{I} \times 100\% \quad (3-3)$$

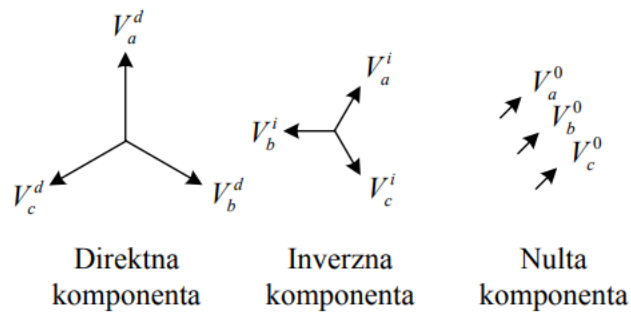
gdje je  $I$ -nazivna struja, a  $i$ -stvarna struja.

Slično tome, u odnosu na napon može se nesimetrija napisati kao

$$\frac{V-v}{V} \times 100\% \quad (3-4)$$

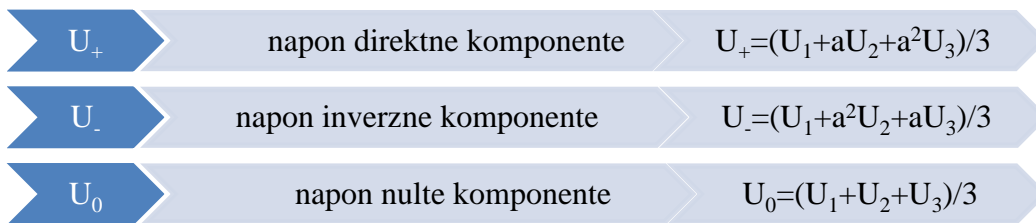
gdje je  $V$ -nazivni napon, a  $v$ -stvarni napon.

Glavna ideja ove metode sastoji se u zamjeni bilo kojeg trofaznog nesimetričnog vektorskog sustava struja ili napona sa zbrojem tri trofazna simetrična sustava s direktnim, inverznim ili nultim nizom.



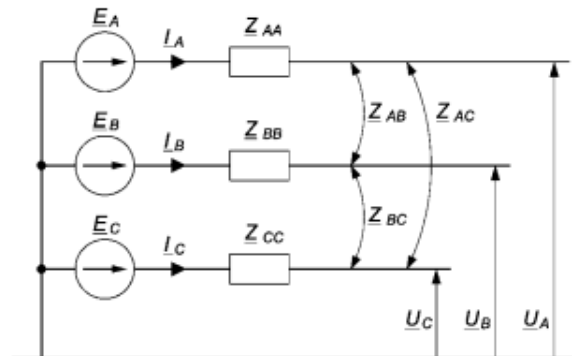
Slika 3.8. Napon direktne, inverzne i nulte komponente [4]

Nesimetrija se definira pomoću simetričnih komponenta  $U_+$ ,  $U_-$  i  $U_0$  gdje je

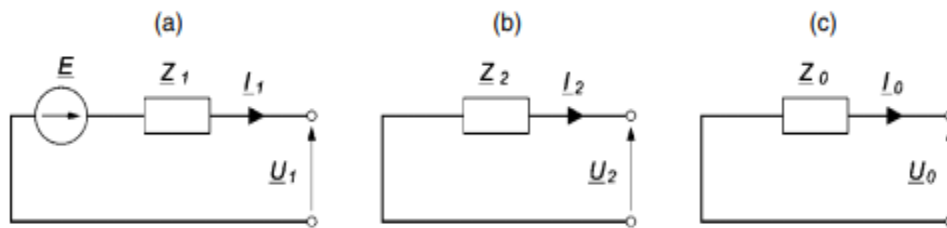


Simetrične komponente struje i napona.

Na slici 3.9. je prikazan trofazni krug i pretpostavlja se da su komponente kruga simetrične dok struje i naponi u općenitim slučajevima mogu tvoriti nesimetrične sustave. [3]



Slika 3.9. Prikaz trofaznog kruga [3]



Slika 3.10. Jednofazni ekvivalentni dijagrami simetričnih komponenti [3]

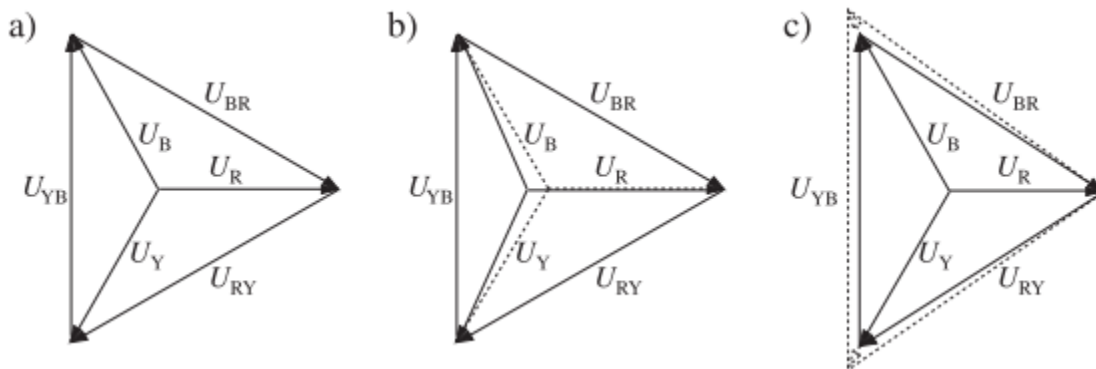
- a) Direktna komponenta
- b) Inverzna komponenta
- c) Nulta komponenta

Definicija nesimetrije napona temelji se na zastupljenosti napona trofaznog sustava u obliku simetričnih komponenti. Prema pravilu transformacije, svaki trofazni sustav predstavljen je superponiranjem dva simetrična trofazna sustava i jednog izmjeničnog sustava. Trofazni sustav sastoji se od sustava direktnog slijeda i sustava inverznog slijeda, koji se okreće u smjeru suprotnom od kazaljke na satu. Izmjenični sustav se naziva sustavom nultog slijeda. [2]

Transformacija napona trofaznog sustava

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_0 \\ \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \underline{U}_R \\ \underline{U}_Y \\ \underline{U}_B \end{bmatrix}$$

Na slici 3.11. prikazani su fazorski dijagrami različitih trofaznih sustava.



Slika 3.11. Fazorski dijagrami trofaznih sustava [2]

- a) simetrični sustav
- b) simetrični sustav sa sustavom nultog slijeda
- c) nesimetrični sustav

Nesimetrija napona određuje se odnosom sustava inverznog slijeda i sustava direktnog slijeda simetričnih komponenti na sljedeći način:

- nesimetrija napona u elektroenergetskim sustavima:

$$k_u = U_2 / U_1 \quad (3-5)$$

$k_U$  možemo približno odrediti na sljedeći način:

$$k_U = S_A / S''_{k3} \quad (3-6)$$

Točniji pregledi zahtijevaju složeniji izračun.

### 3.5.2. Izvori nesimetrije

Izvori nesimetrije su jednofazna i dvofazna opterećenja, poput indukcijskih peći, vlakova, različito distribuiranih opterećenja potrošača na jednofaznom niskonaponskom sustavu i slično. U niskonaponskim sustavima izvori nesimetrije javljaju se uglavnom zbog brojnih izmjeničnih opterećenja povezanih između faznih vodiča i neutralnog vodiča. Prema tome, prevladavajući uzrok nesimetrije su nesimetrično raspoređena jednofazna opterećenja. U niskonaponskim mrežama tereti koji su jednofazni spojeni su skoro isključivo samo na fazu i nulu, ali se distribuiraju više ili manje podjednako na sve tri faze, dok na visokonaponskim i srednjenaponskim mrežama jednofazni tereti se mogu spajati i na dvije faze i na fazu i nulu. Glavni uzroci napona zbog nesimetrije u elektroenergetskim sustavima su:

- Neuravnoteženo jednofazno opterećenje u trofaznom sustavu: većina domaćih opterećenja i opterećenja industrijske rasvjete su jednofazna. Međutim, ta su opterećenja napajana iz trofazne mreže.
- Nadzemni dalekovodi koji nisu transponirani (nisu prepleteni).
- Snažna neuravnoteženost napona (npr. > 5%), što može biti prevelika opterećenost jedne faze. [1]

### 3.5.3. Učinci nesimetrije napona

Nesimetrija u elektroenergetskom sustavu povezana je sa problemom stabilnosti elektroenergetskog sustava. Može uzrokovati pretjerano izvlačenje jalove snage, neispravni rad opreme, loš rad mjernih instrumenata i skraćivanje životnog vijeka različitih uređaja. [1] Nesimetrija napona na pogonskim strojevima dovodi do povećanih gubitaka. U slučaju sinkronih strojeva, struja sustava inverznog slijeda trebala bi ostati ograničena na vrijednost od 5% do 10 % nazivne struje. Na asinkronim strojevima nesimetrija napona od čak 2 % može dovesti do oštećenja podizanjem temperature. Nesimetrija napona negativno utječe na rad opterećenja. Asinkroni motori, sinkroni generatori i ispravljači u tom su pogledu najosjetljivija opterećenja. [2]

#### 3.5.3.1. Asinkroni motori

Asinkroni motori imaju svoje namote povezane najčešće u trokut ili zvijezdu s izoliranim zvjezdštem. Zbog toga na rad motora utječe samo inverzna i direktna komponenta. Struje inverzne komponente stvaraju tok koji se okreće u smjeru suprotno rotoru i uzrokuju:

- pojačano zagrijavanje namotaja statora,



- dodatne gubitke aktivne snage u statoru,
- dodatni zakretni moment koji djeluje u suprotnom smjeru od momenta direktnog slijeda i
- induciranje dodatnih struja u namotima i rotorskom željezu motora, a samim tim dodatni gubici snage u rotoru.

Dugotrajna nesimetrija može uzrokovati brže propadanje izolacije motora te mu na taj način skratiti radni vijek. Motori mogu biti opremljeni zaštitom koja otkriva prekomjerni tok i isključuje ih. Dodatni gubici snage zbog nesimetrije napona smanjuje maksimum snage motora u mjeri koja ovisi o stupnju nesimetrije, vrsti motora i njegove konstrukcije. Stvaraju se dodatne vibracije u motoru što rezultira i skraćivanjem radnog vijeka. Laboratorijska ispitivanja su pokazala da na asinkrone motore ne utječe nesimetrija napona napajanja od 2%. [3]

### **3.5.3.2. Sinkroni generatori**

Nesimetrija opterećenja uglavnom utječe na rad samog generatora u industrijskim toplanama i transformatorskim stanicama koje opskrbljuju distribucijske mreže. Analiza učinaka nesimetrije opterećenja za sinkrone generatore pošto su spojeni na sustav putem transformatora može biti ograničena na inverznu komponentu. Kod transformatora su namoti jedne strane spojeni u trokut i sprječavaju da struje nulte komponente uđu u generator. Kao i kod asinkronih strojeva, struje stvaraju magnetski tok koji se okreće u smjeru suprotnom od rotacije i inducira vrtložne struje i povećava toplinske i energetske gubitke. Proizvodi i dodatne mehaničke sile koje djeluju na rotor i stator generatora, koji su opasni po čvrstoću konstrukcijskih komponenata. Temeljni kriterij za ocjenu dopuštenog rada generatora prilikom nesimetričnih uvjeta je dodatno zagrijavanje rotora. Općenito, nesimetrično opterećenje nije enorman problem za rad sinkronih generatora, već nesimetrija može uzrokovati povećane opasnosti tijekom poremećaja, primjerice za vrijeme nesimetričnog kratkog spoja. [3]

### **3.5.3.3. Pretvarači**

Pretvarači se u većini slučajeva napajaju iz trofaznog trožilnog sustava, dakle na njegov rad u sustavu može utjecati samo komponenta napona inverznog slijeda. To generira:

- dodatna varijabilna komponenta ispravljenog napona čija amplituda ovisi o faktoru neravnoteže i
- harmonike koje nisu karakteristični za zadanu topologiju pretvarača.

#### 3.5.3.4. Ostali tereti

Nesimetrija može utjecati i na rad ostalih trofaznih opterećenja, mijenjajući električnu snagu, eksploatacijske karakteristike i njihov vijek trajanja. Uz to, nesimetrija napona povezana s promjenom veličine napona utječe na rad jednofaznog opterećenja. Neki od njih mogu biti pod utjecajem opskrbnog napona koji je previsok ili prenizak. Može doći i do poremećaja u funkcioniranju sustava upravljanja, što rezultira poteškoćama, pa čak i prekidom rada opreme. [3]

#### 3.5.4. Dopuštene vrijednosti nesimetrije

Razina kompatibilnosti za faktor nesimetrije je usvojena vrijednost zbog međudjelovanja svih instaliranih pogona na mreži. [8]

$$k_{nes} \leq 1,3\% \quad (3-7)$$

Za instalacije individualnih korisnika, granični faktor nesimetrije je prihvaćen kao srednja vrijednost desetominutnog intervala koji iznosi:

$$k_{nesi} = 0,7\% \quad (3-8)$$

#### 3.5.5. Smanjenje nesimetrije

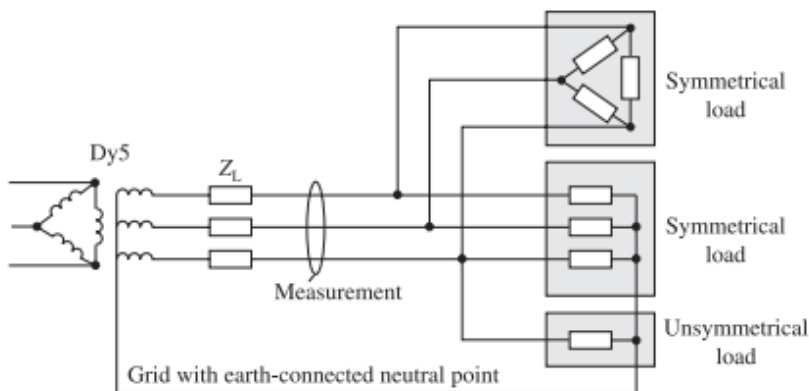
Nesimetrija komponentata elektroenergetskog sustava uklanja se odgovarajućim dizajnom. U slučaju nadzemnih vodova u tu se svrhu primjenjuje transpozicija (preplet) vodiča. Vod je podijeljen na sekcije, čiji broj je djeljiv sa 3, a tri sekcije čine jedan ciklus transpozicije. Tradicionalni pristup izjednačavanja opterećenja je ravnomjerno povezivanje nominalnih opterećenja s njihovim fazama. To je normalno dovoljno da se ne pojavi često veća nesimetrija napona. U slučaju da je značajna nesimetrija opterećenja neizbježna, osobito u slučaju velikih jednofaznih opterećenja, treba primjenjivati posebnu opremu za uravnoteženje. Svrha njegovog djelovanje je obično uklanjanje ili ograničavanje komponenti inverznih i nultih slijedova struje opterećenja, taj se proces naziva balansiranje.

### 3.6. Upotreba i spajanje mjernih instrumenata

#### 3.6.1. Sustav niskog napona

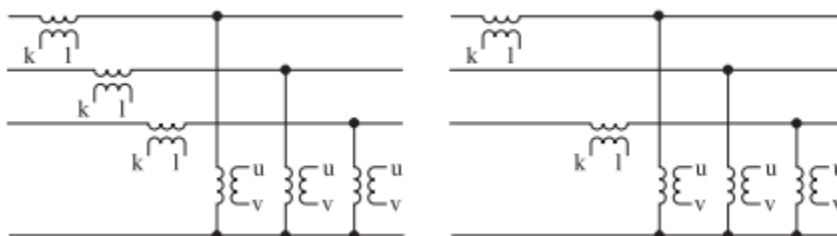
U sustavu niskog napona obično se spaja jednostavni mjerni instrument. Napon se može mjeriti bez korištenja mjernih transformatora, dok se struja često može mjeriti bez poteškoća

pomoću strujnih kliješta. Mjerni sustav je podjednako prikladan za mjerenje harmonika i treperenje. [2]



Slika 3.12. Spajanje mjernog sustava u niskonaponski sustav [2]

Potpuno opremljeni transformatorski paneli s tri naponska i tri strujna transformatora koji su relativno rijetki u sustavima srednjeg napona. Situacija kod mjerenja napona je složenija nego kod mjerenja struja, a slika prikazuje tipični prikaz za niskonaponski sustav. [2]



Slika 3.13. Niskonaponski sustav [2]

### 3.6.2. Karakteristike mjernih instrumenata

Unatoč značajkama koje mjerni instrument za mjerenje kvalitete napona posjeduje, a koji su navedeni u standardima i dalje ima određeni stupanj tolerancije. Posebno potrebna svojstva ovise o velikoj mjeri o namjenskoj uporabi tih instrumenata, a takvi ciljevi mogu biti vrlo raznoliki:

- procjena kvalitete napona,
- sastavljanje registra harmonika,
- određivanje osnovnih vrijednosti za izračun,

- izvedba usporednih mjerenja,
- određivanje emitirane smetnje,
- analiza uzroka smetnji,
- provjera i procjena protumjera i
- dizajn i izgled opreme.

### 3.6.3. Izvođenje mjerenja

Izvođenje mjerenja pretpostavlja različite razloge, a prvi korak u pripremi svakog mjerenja je definiranje istog. Kako bi se znao cilj mjerenja, potrebno je odgovoriti na pitanje „Što treba postići?“. Odabir mjesta mjerenja i navođenja mjernih instrumenata je sljedeći korak. Kada su mjesto mjerenja i mjerni instrumenti uspostavljeni tada se uzima u obzir aspekti o povezanosti mjernih instrumenata. Osobito tamo gdje se mjerenja trebaju provoditi u dužem vremenskom razdoblju, mjerni instrumenti trebaju biti smješteni kako bi izazvali što manje smetnje. U centralama, posebno u sustavima korisnika, to ponekad nije jednostavno. Ugrađeni mjerni uređaj također mora biti na odgovarajući način zaštićen zbog neovlaštenog pristupa. [8]

### 3.6.4. Dodatni gubici snage uslijed nesimetričnog opterećenja

Kako bi se što točnije odredili gubici u NN mrežama potrebno je odrediti utjecaj nesimetričnog opterećenja na povećanje gubitaka. [8] Gubici snage u nesimetričnom trofaznom sustavu s neutralnim vodičem jednaki su:

$$\Delta P_n = R_D \times (\bar{I}_{L1}^2 + \bar{I}_{L2}^2 + \bar{I}_{L3}^2) + \bar{I}_N^2 \times R_N \quad (3-9)$$

Uvažavajući se da se struje u faznim vodičima mogu rastaviti na simetrične komponente, tada slijedi:

$$\bar{I}_{L1} = \bar{I}_d + \bar{I}_i + \bar{I}_0 \quad (3-10)$$

$$\bar{I}_{L2} = a^2 \times \bar{I}_d + a \times \bar{I}_i + \bar{I}_0 \quad (3-11)$$

$$\bar{I}_{L3} = a \times \bar{I}_d + a^2 \times \bar{I}_i + \bar{I}_0 \quad (3-12)$$

gdje su:  $I_d$  struja direktnog sustava,  $I_i$  struja inverznog sustava i  $I_0$  struja nultog sustava.

Kroz neutralni vodič pri nesimetričnom opterećenju teče vektorski zbroj struja iz faza L1, L2 i L3:

$$\bar{I}_N = \bar{I}_{L1} + \bar{I}_{L2} + \bar{I}_{L3} = 3 \times \bar{I}_N \quad (3-13)$$

Nakon sređivanja dobiva se konačan izraz za gubitke snage u trofaznom nesimetričnom opterećenomvodu s neutralnim vodičem:

$$\Delta P_n = R_D \times (3 \times I_d^2 + 3 \times I_i^2 + 3 \times I_0^2) + 9 \times I_0^2 \times R_N \quad (3-14)$$

## 4. Analiza potrošnje električne energije i opterećenja na razini NN mreže

### 4.1. Osnovna potrošnja – kućanstva

Opterećenje osnovne potrošnje kućanstava može se odrediti s pomoću Velandrove formule poznajući potrošnju električne energije:

$$P_{nvr} = n \times k_1 \times E + k_2 \times \sqrt{n \times E}, kW \quad (4-1)$$

Uporabom Velandrove formule za potrošnju vidi se mogućnost određivanja opterećenja ako mreža opskrbljuje kupce različitih standarda stanovanja. [8]

$$P_{nvr} = \sum_{i=1}^m k_i \times n_i \times E_i + \sqrt{\sum_{i=1}^m k_i^2 \times n_i \times E_i}, kW \quad (4-2)$$

gdje su:

$k_i, n_i, E_i$  veličine za pojedine skupine kupaca

$m$  broj homogenih skupina kupaca

## 4.2. Ostali kupci

Ako se na određenom promatranom području javljaju i ostali kupci (osim kućanstava), onda treba znati njihovo pojedinačno opterećenje i ocijeniti istodobnost prema vršnom opterećenju kućanstva.[8]

$$P_{vrost} = \sum_{i=1}^n (k_{osti} \times P_{osti}), kW \quad (4-3)$$

gdje je:

$P_{osti}$  pojedinačno opterećenje ostalog kupca,  $kW$

$k_{osti}$  faktor istodobnosti ostalog kupca prema skupini kućanstava

## 4.3. Ukupno opterećenje mreže

Ukupno opterećenje mreže rezultat je opterećenja osnovnih kupaca, odnosno kućanstava i ostalih kupaca koji su uglavnom manji poslovni kupci i slično. Stoga se može napisati da je ukupno vršno ili maksimalno opterećenje jednako:

$$P_{vruc} = P_{vrkuc} + k_{k-0} \times P_{vrost}, kW \quad (4-4)$$

gdje je :

$P_{vrkuc}$  vršno opterećenje osnovne potrošnje (kućanstva),  $kW$

$P_{vrost}$  vršno opterećenje ostalih kupaca niskonaponske mreže,  $kW$

$k_{k-0}$  faktor istodobnosti ostalih kupaca u odnosu na skupinu kućanstava

## 5. Analiza rezultata mjerenja nesimetrije u niskonaponskoj distribucijskoj mreži

Sva mjerenja kvalitete električne energije su izvedena trofaznim mrežnim analizatorom a-eberle PQ-Box 200. Spomenuti analizator mjeri kvalitetu električne energije prema normi HRN EN 50160:2012, Naponske karakteristike električne energije iz javnog distribucijskog sustava (EN 50160:2010) u klasi točnosti A prema zahtjevima norme IEC 61000-4-30.

a-eberle PQ-Box 200 je mjerni instrument za analizu kvalitete mreže i mjerenje svih električnih veličina u mrežama niskih, srednjih i visokih napona. Mjeri tri napona i četiri struje i može se konfigurirati za više različitih mjernih funkcija. Izmjerene vrijednosti spremaju se u programiranim vremenskim razmacima. Povezane s PC-om one se mogu grafički ili numerički prikazati.

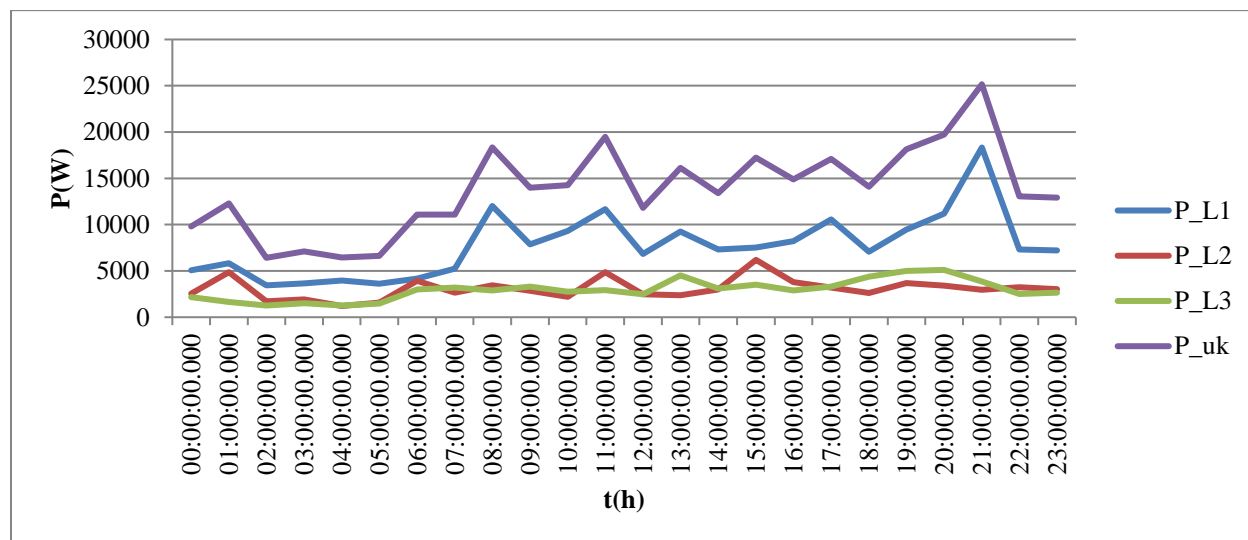
Tablica 5.1. Osnovni opis mjernih funkcija analizatora a-eberle PQ-Box 200.

Mjerna veličina	
Napon (Srednja, maksimalna i minimalna vrijednost)	•
Struja L1, L2, L3 (Srednja, maksimalna i minimalna vrijednost)	•
Struja nulvodiča (Srednja, maksimalna i minimalna vrijednost)	•
Promjene napona (Padovi, prekoračenja, prekidi)	•
Snaga (P,  P , Q, S, Srednja, maksimalna i minimalna vrijednost, faktor snage)	•
Zbroj snaga - ukupna snaga (P,  P , Q, S, Srednja, maksimalna i minimalna vrijednost, faktor snage)	•
Energija: P, Q, P+, P-, Q+, Q-	•
FlikerPst, Plt prema IEC61000-4-15	•
Naponski harmonici prema IEC 61000-4-30:2008, do 50-tog, THD U	•
Strujni harmonici, do 50-tog, THD I	•
Vršni faktor (crestfaktor)	•
Naponski međuharmonici	•
Signalni naponi	•
Nesimetrija	•
Frekvencija	•
Osciloskop, 40.96 kHz	•
3D trokut snaga	•
Smjer i fazni kut harmonika	

### 5.1. Analiza mjerenja kvalitete električne energije u TS 10/0,4 kV koja napaja gradsku četvrt

Mjerenje je izvedeno u TS 10/0,4 kV ukupne snage 630 kVA, a koja napaja pretežno obiteljske kuće u gradskoj četvrti. Mjerenjem je obuhvaćen izvod koji opskrbljuje 35 obiteljskih kuća.

Na sljedećoj slici će biti prikazane sljedeće vrijednosti snaga tijekom jednog dana koje su izmjerene 21. veljače 2020. godine. Dnevni dijagrami se sastoje od 10-minutnih usrednjenih vrijednosti, a tjedni dijagrami od satnih usrednjenih vrijednosti.

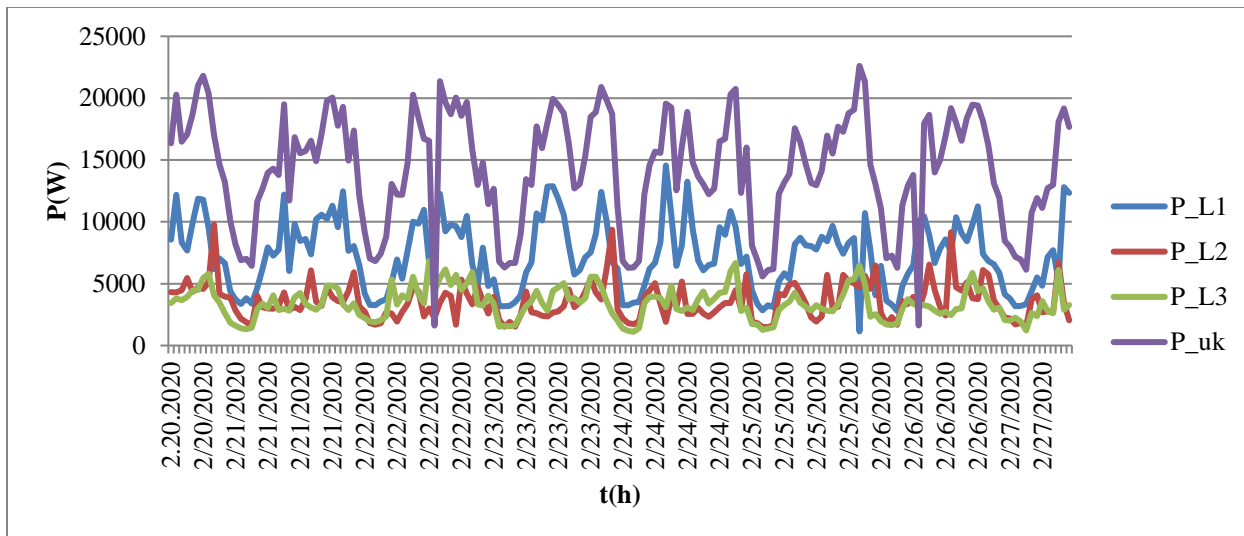


Slika 5.1. Izmjerene vrijednosti snage tijekom jednog dana

Na slici se vidi prikaz ukupne snage i sve tri faze pojedinačno različitim bojama. Vidi se da je najveća snaga tijekom večernjih sati, što je i očekivano kada je riječ o kućanstvu. Najveći iznos snage toga dana je bio 25159 W što je izmjereno u 21h. Sa slike se vidi da postoji značajna razlika u opterećenjima faza.

Slika 5.2. prikazuje izmjerene vrijednosti snaga tijekom jednog tjedna u razdoblju od 20. do 27. veljače 2020. godine.

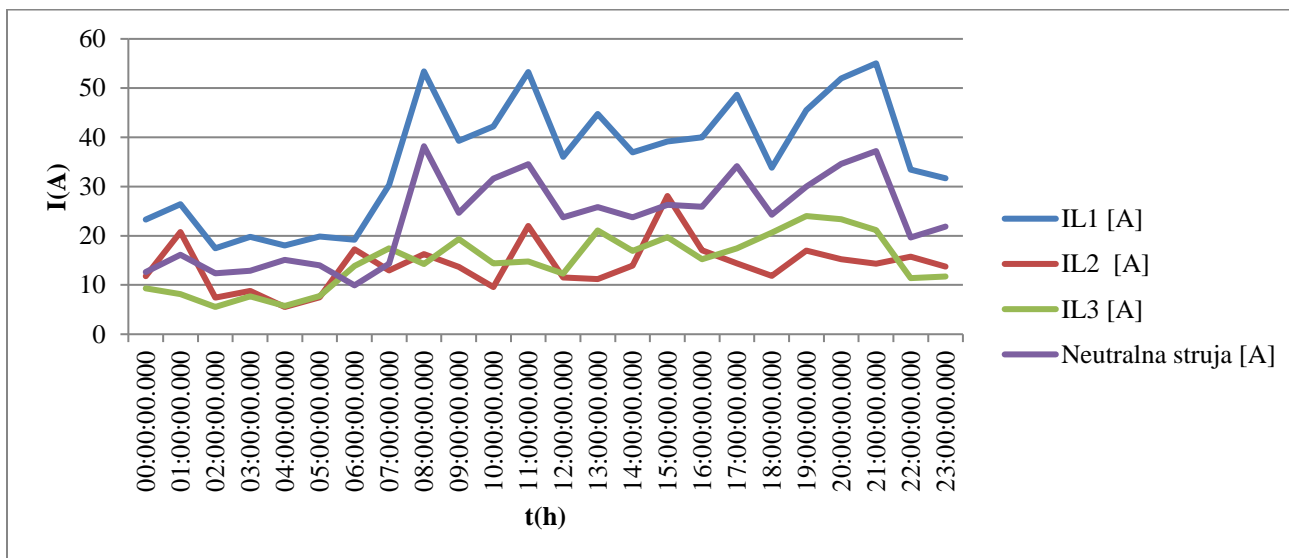




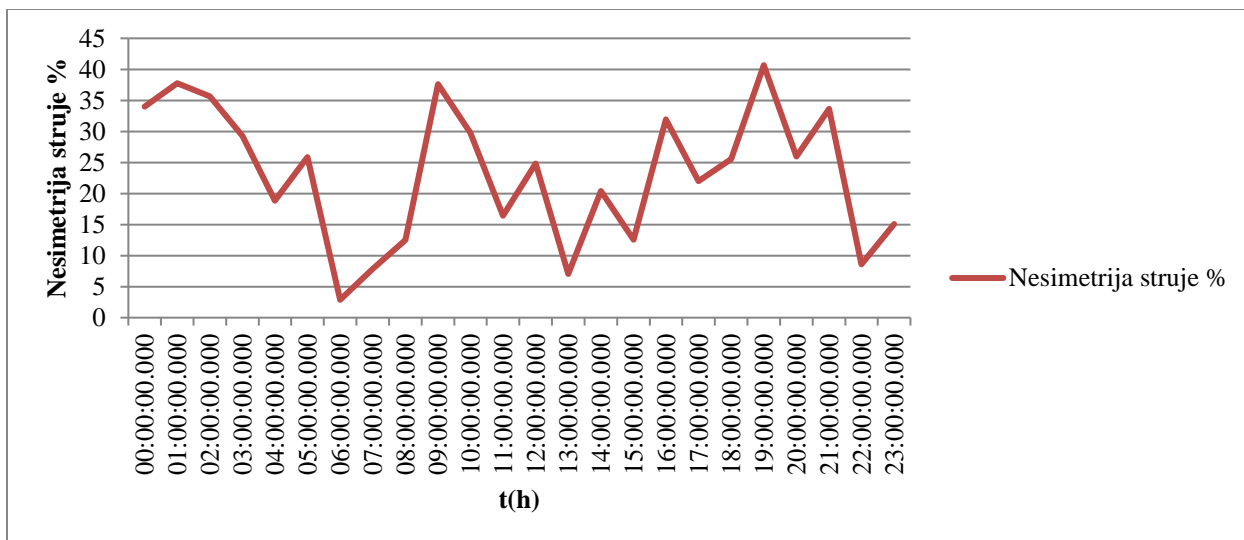
Slika 5.2. Izmjerene vrijednosti snaga tijekom jednog tjedna

Podatci prikazani na slici 5.2. prikazuju izmjerene vrijednosti snaga tijekom jednog tjedna. Na slici je vidljiva razlika u opterećenjima faza.

Slika 5.3. prikazuje izmjerene vrijednosti struje, a slika 5.4 nesimetrije struje tijekom jednog dana, odnosno 21. veljače 2020. godine.



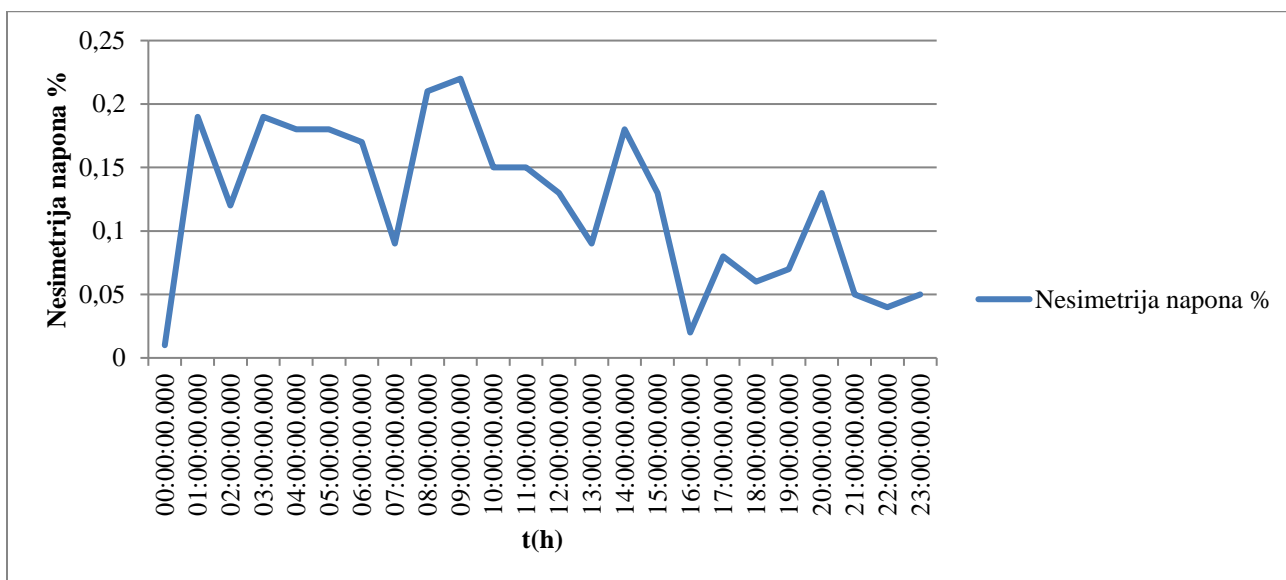
Slika 5.3. Izmjerene vrijednosti struje tijekom jednog dana



Slika 5.4. Nesimetrija struje tijekom jednog dana

Prikazane su struje sve tri faze i neutralna struja na prvoj slici te nesimetrija struje na drugoj slici. Razlike struja u fazama potvrđuju različita opterećenja po fazama. Struja je važan faktor kod nesimetrije napona, ako ne i najvažniji. Na slici je prikaz nesimetrije struje tijekom jednog dana, gdje je najveća vrijednost preko 40 %.

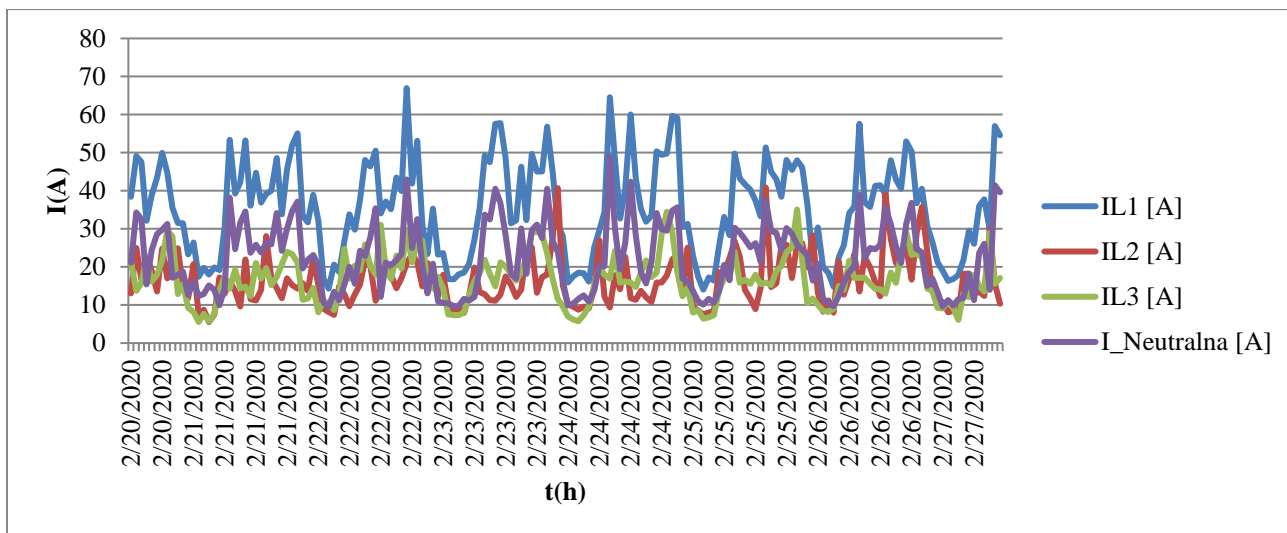
Na sljedećoj slici, 5.5. prikazana je nesimetrija napona tijekom jednog dana.



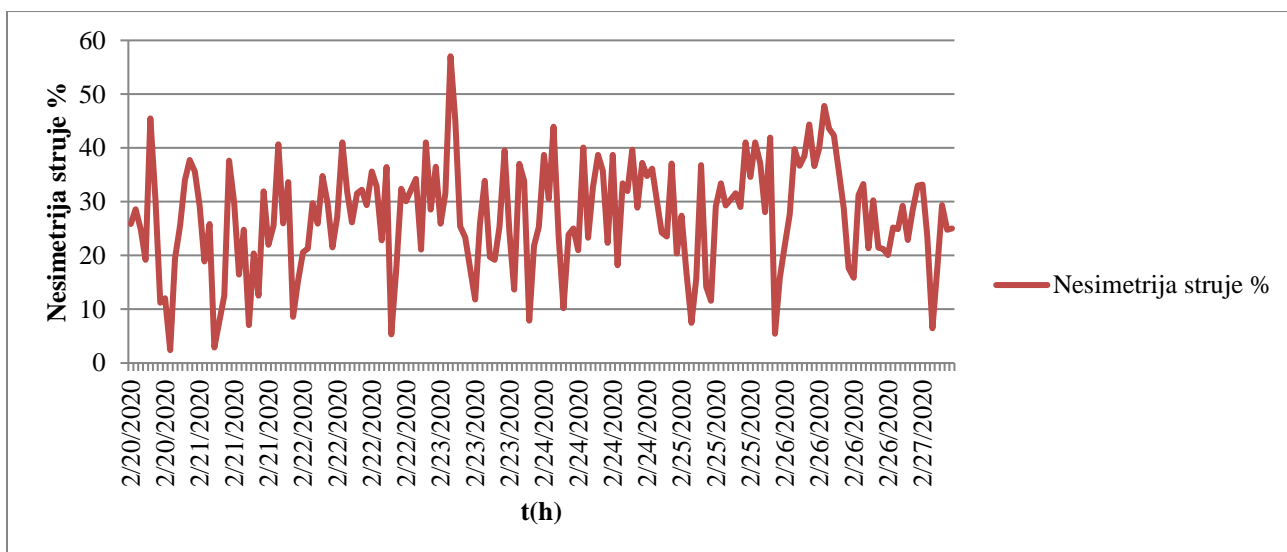
Slika 5.5. Nesimetrija napona gradske četvrti tijekom jednog dana

Slika prikazuje nesimetriju napona prigradskog naselja tijekom jednog dana gdje je nesimetrija dosta niska i zadovoljavajuća. Najveća vrijednost nesimetrije je bila 0.22 %.

Na slikama 5.6 i 5.7. su prikazane izmjerene vrijednosti struje i nesimetrija struje tijekom tjedna.



Slika 5.6. Izmjerene vrijednosti struje tijekom tjedna

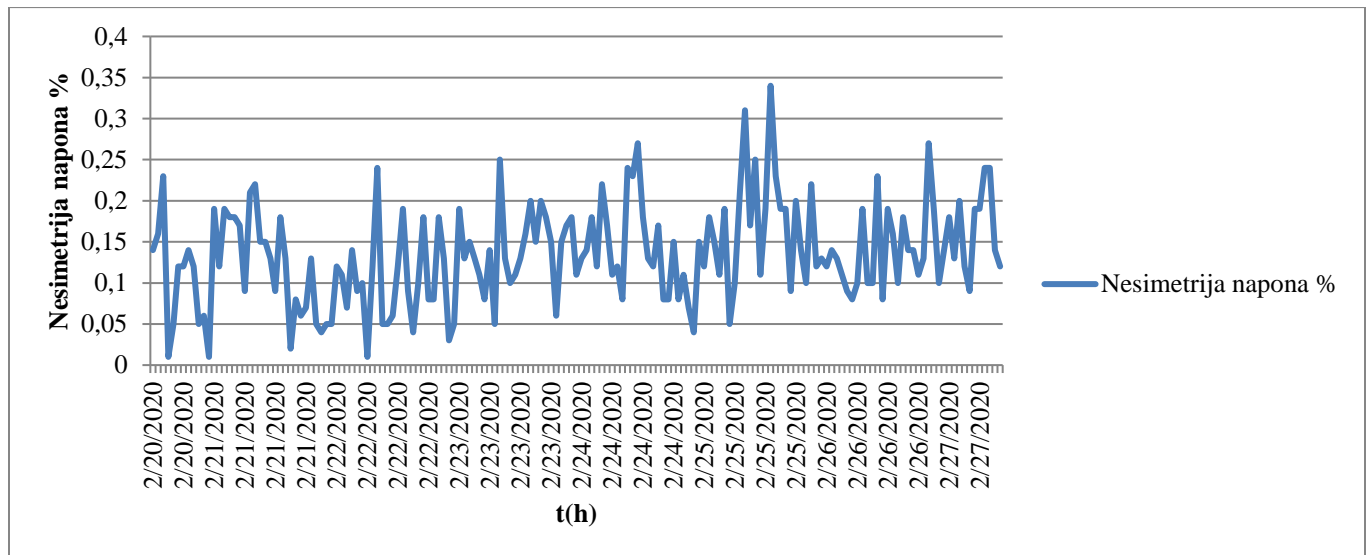


Slika 5.7. Nesimetrija struje tijekom tjedna

Na slikama 5.6 i 5.7 može se iščitati da je najveća nesimetrija struje bila iznosa 57.05 %. Struje faza tijekom svakog dana dosežu visoku vrijednost, a najveća je bila tijekom 22. veljače i

iznosila je 66.97 A. Nesimetrija struje može dovesti i do povećane nesimetrije napona, ali u ovom slučaju je nesimetrija napona je daleko ispod zadane granične vrijednosti norme EN 50160 koja je 2 %  $U_n$ . Najviša zabilježena.

Na sljedećoj slici 5.8. je prikaz nesimetrije napona tijekom tjedna.



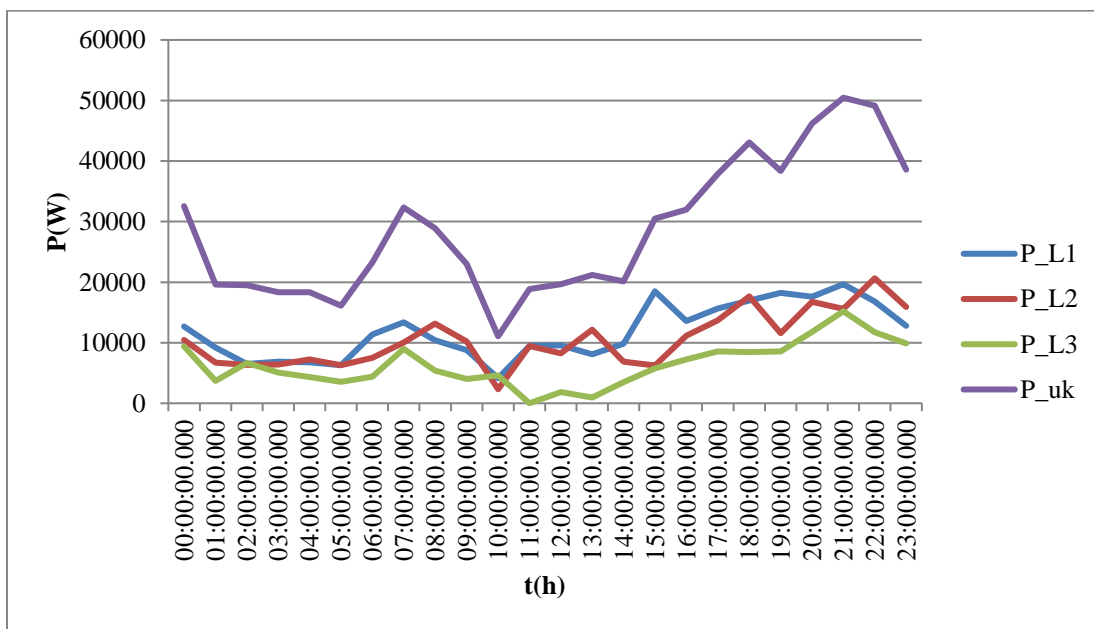
Slika 5.8. Nesimetrija napona gradske četvrti tijekom tjedna

Iz izmjerenih vrijednosti može se zaključiti da je nesimetrija ove gradske četvrti dosta niska što je zadovoljavajuće. Najveća vrijednost nesimetrije je bila 0,34%. Opisana naponska nesimetrija posljedica je različite opterećenosti tri faze (različite struje u fazama, što se također vidi na slikama).

## 5.2. Analiza mjerenja kvalitete električne energije u TS 10/0,4 kV koja napaja prigradsko naselje

Mjerenje je izvedeno u TS 10/0,4 kV ukupne snage 630 kVA, a koja napaja pretežno obiteljske kuće u prigradskom naselju. Mjerenjem je obuhvaćen izvod koji opskrbljuje 74 obiteljske kuće.

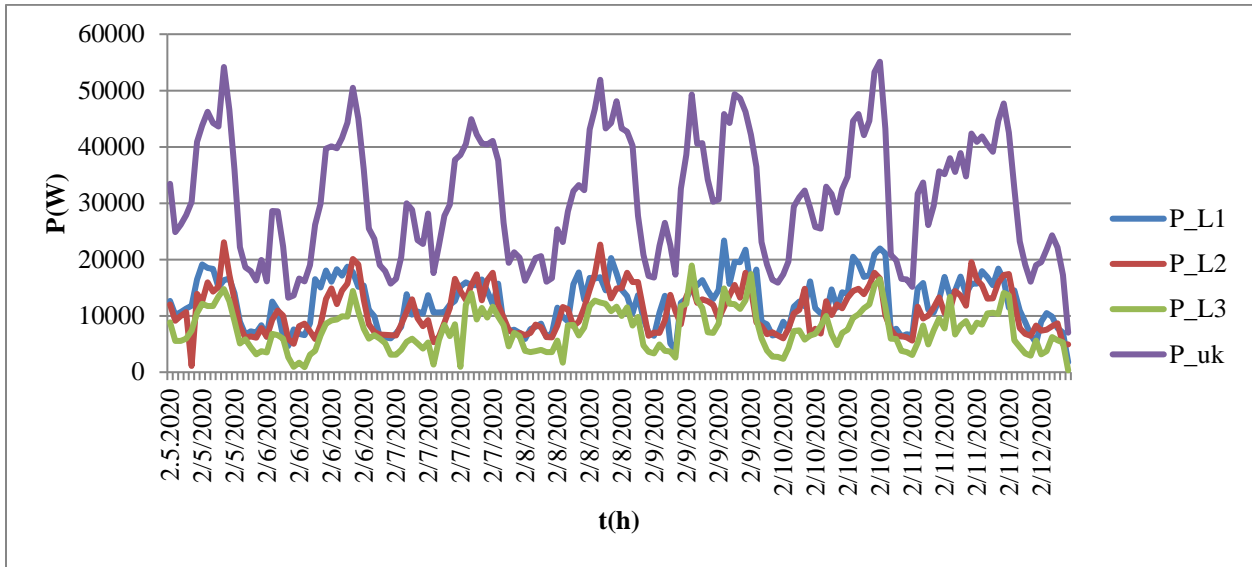
Na slici 5.9. je prikaz izmjerene vrijednosti snaga tijekom dana.



Slika 5.9. Izmjerene vrijednosti snaga tijekom dana

Prikaz grafikona snage tijekom dana u prigradskom naselju gdje se može usporediti s gradskom četvrti te uvidjeti da su ovdje snage puno veće u odnosu na četvrt. Najveća snaga izmjerena 06. veljače 2020. godine te iznosi 50461 W u 21h što upućuje da je i ovdje taj iznos u veći tijekom večernjih sati.

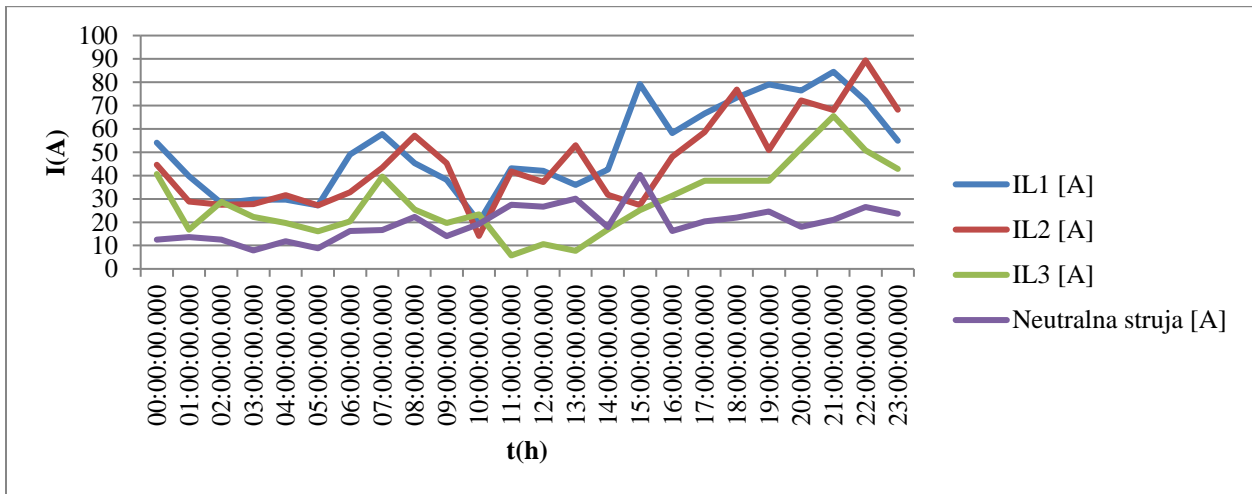
Na slici 5.10. je prikaz izmjerene vrijednosti snaga tijekom tjedna.



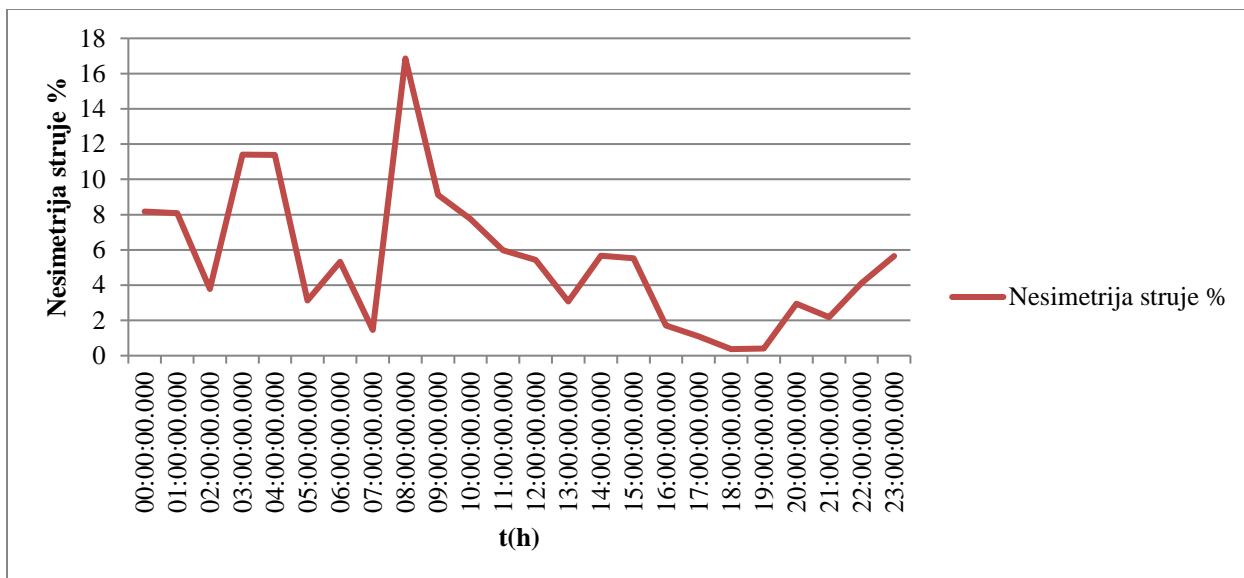
Slika 5.10. Izmjerene vrijednosti snaga tijekom tjedna

Prikaz snage tijekom cijelog tjedna gdje je vidljiva razlika u opterećenjima faza.

Sljedeće dvije slike 5.11. i 5.12. prikazuju izmjerene vrijednosti struja i nesimetrije struje tijekom jednog dana.



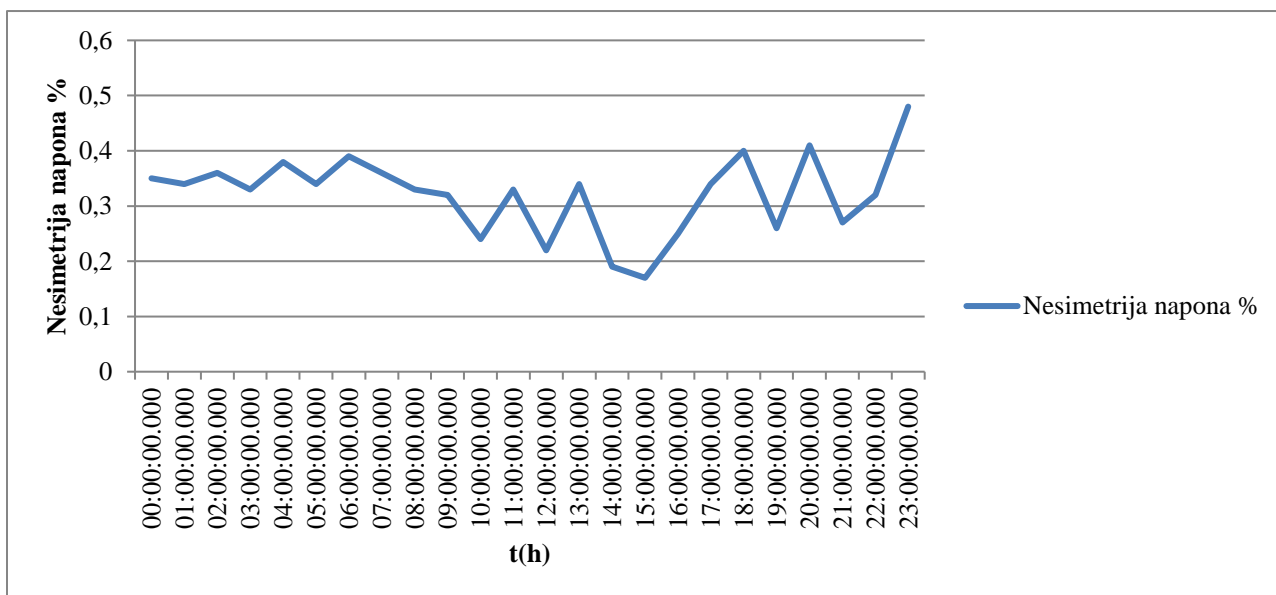
Slika 5.11. Izmjerene vrijednosti struja tijekom dana



Slika 5.12. Nesimetrija struje tijekom dana

Prikaz mjerenja nesimetrije struje tijekom dana gdje se vidi da je veliki skok bio u jutarnjim satima. Najveći iznos nesimetrije struje je iznosilo 16.86 % tijekom jutarnjih sati. Najveći iznos izmjerene vrijednosti struja tijekom dana je iznosila 89.36 %

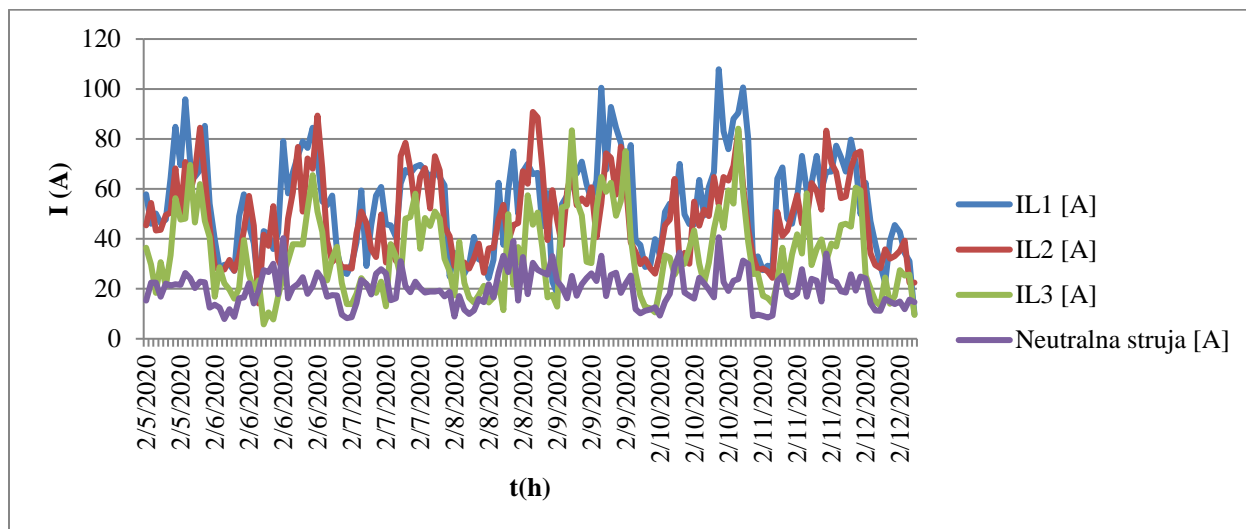
Na slici 5.13. prikazana je nesimetrija napona tijekom dana.



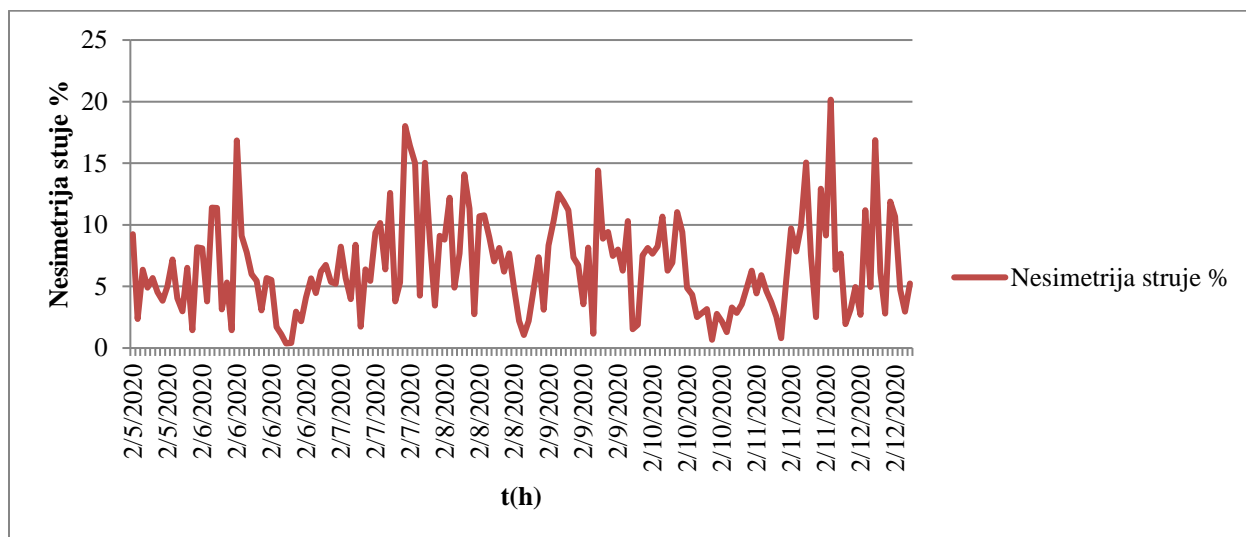
Slika 5.13. Nesimetrija napona tijekom dana

Slika 5.13. prikazuje nesimetriju prigradskog naselja tijekom jednog dana gdje je nesimetrija dosta niska i zadovoljavajuća iako je usporedbom veća nego u gradskoj četvrti. Veći udio nesimetrije u prigradskom naselju je veći broj ne samo kućanstava nego i određeni manji privatni obrti kojih ima više nego u gradskoj četvrti. Najveća vrijednost nesimetrije napona je iznosila 0.48 %.

Slike 5.14. i 5.15. prikazuju izmjerene vrijednosti struja i nesimetrije struje tijekom jednog tjedna.



Slika 5.14. Izmjerene vrijednosti struje tijekom tjedna

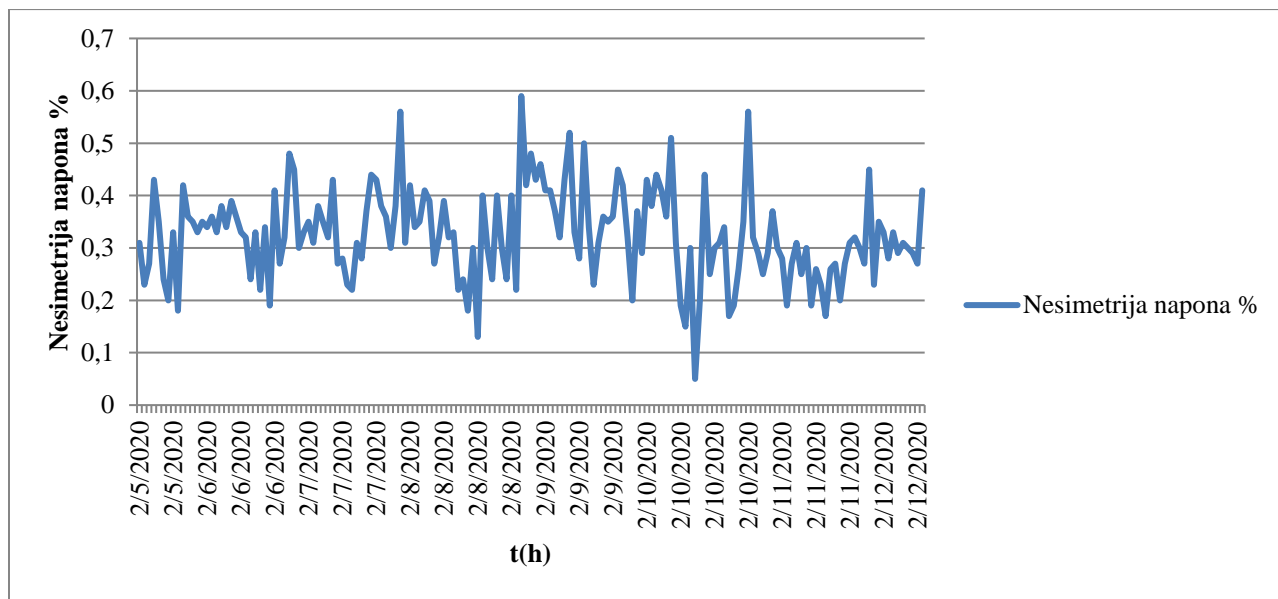


Slika 5.15. Nesimetrija struje tijekom tjedna



Podatci u slici 5.14. ukazuju da dolazi do opterećenosti sve tri faze zbog različitih struja u fazama. Slika 5.15. prikazuje značajne oscilacije tijekom tjedna ovisno o danu, a najveća je vrijednost zabilježena je 11. veljače 2020. godine s iznosom od 20,16%.

Slika 5.16. prikazuje nesimetriju napona tijekom tjedna.



Slika 5.16. Nesimetrija napona tijekom tjedna

Tjedni prikaz nesimetrije prikazuje kolika je razlika u mjerenjima na dva različita mjesta. Ovdje je puno više izražena i ima dosta varijacija. Najveći udjeli nesimetrije su dostizali i do 0.6%.

Veći udio nesimetrije u prigradskom naselju je veći broj ne samo kućanstava nego i određeni manji privatni obrti kojih ima više nego u gradskoj četvrti.

### 5.3. Mjere za smanjenje nesimetrije

Neke od mjera kojima se može smanjiti nesimetrija u mreži su:

- raspodijeliti jednofazna opterećenja jednoliko na sve tri faze,
- instalirati opremu za uravnoteženje opterećenja (kondenzatori i prigušnice),
- spojiti opterećenje putem pretvarača,
- odvojiti nesimetrično opterećenje od mreže uz uporabu motorgeneratora (jednofazni generator i trofazni motor) i
- premjestiti instalaciju ili nesimetrični teret u mjesto priključka s većom snagom kratkog spoja ili povećati snagu kratkog spoja mreže. [8]

## 6. ZAKLJUČAK

Potreba za električnom energijom je sve veća, a napredak u njezinu korištenju vidljiv je u mnoštvu uređaja za koje se koristi. Povećana količina različitih mjernih podataka može pružiti jasniju informaciju kako i na koji je način moguće unaprijediti kvalitetu električne energije. Zbog toga bi stručnjaci trebali biti u korak s novim trendovima te uz pomoć rezultata različitih mjerenja usmjerenih na poboljšanje kvalitete usavršavati i samu kvalitetu električne energije. Rad pruža objašnjenje pokazatelja kvalitete električne energije, na koji način oni nastaju te koji su uzroci i posljedice istih. Također, navedene su određene mjere za smanjenje njihovih negativnih čimbenika. Polazna točka svih mjerenja povezanih s kvalitetom električne energije i nesimetrije napona jesu međunarodni standardi, kojih se treba pridržavati pri mjerenjima, ali i osmišljavanju načina poboljšanja. Nesimetrija napona označava važan čimbenik u kvaliteti električne energije, a definirana je pomoću simetričnih komponenti i formulama za njen izračun koje su prikazane u radu. Mjerenja su važan dio informacija koje pružaju podatke na temelju kojih se donose zaključci i mjere poboljšanja nesimetrije napona. Važna je upotreba i izvođenja mjerenja, kao i poznavanje karakteristika mjernih uređaja i softvera za prikupljanje i analizu mjernih podataka. Mjerenja koja su prikazana na slikama pružaju jasniju sliku načina na koji se ponaša nesimetrija. Mjerenja gradske četvrti prikazuju da je nesimetrija napona u granicama standarda, odnosno može se reći da je zadovoljavajuća. S druge strane, mjerenja za prigradsko naselje prikazuju veću nesimetriju što se može objasniti većim brojem kućanstva, i mogući veći broj malih obrtničkih postrojenja. Sinteza teorije o kvaliteti električne energije i nesimetriji napona s mjerenjima provedenim u gradskoj i prigradskoj četvrti prikazuje da nesimetrija napona ovisi o vrsti potrošača načinu spajanja opterećenja te da je potrebno pratiti i regulirati mjerene veličine, odnosno napon, struju i snagu.

## 7. LITERATURA

- [1] Chattopadhyay, Surajit, Mitra, Madhuchhanda, "Electric Power Quality (Power Systems)", Samarjit, 2011.
- [2] J. Schlabbach, D. Blumeand, T Stephanblome, "Voltage Quality in Electrical Power Systems" London, 1999.
- [3] A.Baggini, "Handbook of Power Quality", John Wiley & SonsLtd, England, 2008.
- [4] Predavanja: Kvaliteta napona u elektroenergetskom sustavu, izv.prof.dr.sc. Zvonimir Klaić.
- [6] Z. Klaić, S. Nikolovski, "Kvaliteta električne energije- mjerenja prema normi EN 50160" 6. savjetovanje HO CIGRE, Cavtat, 2003.
- [8] E. Mihalek, "Niskonaponske distribucijske mreže", Zagreb, 2014.

### 7.1. Internetski izvori

- [5] Fer.unizg.hr. „Kvaliteta električne energije“ [online], 2019., dostupno na: [https://www.fer.unizg.hr/download/repository/05\\_Kvaliteta\\_elektricne\\_energije\\_2019.pdf](https://www.fer.unizg.hr/download/repository/05_Kvaliteta_elektricne_energije_2019.pdf) (16.6.2020.)
- [7] Csanyigroup.com. „EES Kvalitet električne energije - viši harmonici“ [online], 2010., dostupno na: <http://www.csanyigroup.com/ees-kvalitet-elektricne-energije-visi-harmonici-1> (03.07.2020.)
- [9] Elektrotehnički fakultet Sarajevo, „ETF Courseware“ [online], 2019., dostupno na: <https://c2.etf.unsa.ba/> (21.07.2020.)
- [10] Fer.unizg.hr. „Naponske prilike i kvaliteta električne energije“ [online], 2017., dostupno na: [https://www.fer.unizg.hr/download/repository/04\\_Naponske\\_prilike\\_i\\_kvaliteta\\_elektricne\\_energije\\_-\\_2017.pdf](https://www.fer.unizg.hr/download/repository/04_Naponske_prilike_i_kvaliteta_elektricne_energije_-_2017.pdf) (26.07.2020.)

## SAŽETAK

U prvom dijelu rada prikazan je teorijski dio o električnoj energiji i njenim počecima u Republici Hrvatskoj te su objašnjeni pokazatelji kvalitete električne energije i njihov utjecaj na mrežu i elektroenergetski sustav.

Rad donosi detaljniji prikaz nesimetrije napona kao jednog od najvažnijih čimbenika kvalitete električne energije, njezinih učinaka, uzroka te posljedica, a navedene su i određene mjere za smanjenje negativnih utjecaja.

Drugi dio rada donosi podatke o mjerenjima jedne gradske četvrti i jednog prigradskog naselja, a mjerene veličine bile su: napon, struja i snaga.

Ključne riječi: distribucijska mreža, električna energija, napon, nesimetrija, struja

## **ABSTRACT**

The first part of the paper presents the theoretical part of electricity and its beginnings in the Republic of Croatia. Also, paper contains and explains the indicators of electricity quality and its impact on the network and power system.

The paper provides a more detailed presentation of voltage unbalance as one of the most important factors in the quality of electricity, its effects, causes and consequences. Furthermore, paper provides certain measures to reduce negative impacts in the quality of electricity.

The second part of the paper provides data on measurements of one city district and one suburbs. Measured values were: voltage, current and power.

Key words: distribution network, electricity, voltage, unbalance, current

## ŽIVOTOPIS

Mario Plantosar rođen je 6. rujna 1994. godine u Osijeku. Osnovnu školu završio je u Dardi (OŠ Darda), nakon čega upisuje Elektrotehničku i prometnu školu Osijek, smjer Elektrotehničar. Godine 2013. upisuje stručni studij smjer Elektroenergetika na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku, odnosno danas Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek. Stručni studij završio je 2017. godine obranivši rad pod naslovom „Primjena senzora u električnim strojevima“ pod mentorstvom dr. sc. Venca Čorluke. Iste godine upisao je razlikovne obveze na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, a 2018. upisao je diplomski studij na istom fakultetu, smjer Elektroenergetski sustavi.