

Analiza sadržaja viših harmonika na punionici električnih vozila

Đaković, Filip

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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:200:581994>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-19**

Repository / Repozitorij:

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

Sveučilišni studij

**ANALIZA SADRŽAJA VIŠIH HARMONIKA NA
PUNIONICI ELEKTRIČNIH VOZILA**

Diplomski rad

Filip Đaković

Osijek, 2023.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit**

Osijek, 05.09.2023.

Odboru za završne i diplomske ispite

Imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit

Ime i prezime Pristupnika:	Filip Đaković
Studij, smjer:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
Mat. br. Pristupnika, godina	D-1396, 06.10.2021.
OIB studenta:	17557522000
Mentor:	prof. dr. sc. Zvonimir Klaić
Sumentor:	,
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	izv. prof. dr. sc. Krešimir Fekete
Član Povjerenstva 1:	prof. dr. sc. Zvonimir Klaić
Član Povjerenstva 2:	Heidi Adrić, mag. ing. el.
Naslov diplomskog rada:	Analiza sadržaja viših harmonika na punionici električnih vozila
Znanstvena grana diplomskog rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak diplomskog rada:	Obraditi teoretske osnove temeljnih pokazatelja kvalitete električne energije. Izraditi detaljnu analizu mjerenja kvalitete električne energije na punionici za električne automobile. Analizom utvrditi povratni utjecaj punionice za električne automobile na elektrodistribucijsku mrežu.
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
Datum prijedloga ocjene od strane mentora:	05.09.2023.
Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:	<i>Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.</i>
	Datum:



FERIT

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA

Osijek, 14.09.2023.

Ime i prezime studenta:

Filip Đaković

Studij:

Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika

Mat. br. studenta, godina upisa:

D-1396, 06.10.2021.

Turnitin podudaranje [%]:

8

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Analiza sadržaja viših harmonika na punionici električnih vozila**

izrađen pod vodstvom mentora 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	1
2. PREGLED PODRUČJA TEME	2
3. POKAZATELJI KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE	3
3.1. Nesimetrija trofaznog sustava	5
3.1.1. Izvori nesimetrije	6
3.1.2. Posljedice nesimetrije	6
3.2. Harmonici	7
3.2.1. Supraharmonici.....	8
3.2.2. Ukupno harmonijsko izobličenje (THD)	9
3.2.3. Ukupno harmonijsko izobličenje u odnosu na potražnju (TDD)	10
3.2.4. Izvori harmonika	10
3.2.5. Posljedice harmonika.....	11
3.3. Prijelazne pojave	12
3.3.1. Izvori prijelaznih pojava	12
3.3.2. Posljedice prijelaznih pojava	14
3.4. Naponski propadi, prenaponi, prekid opskrbe, preniski i previsoki naponi	14
3.4.1. Naponski propadi.....	14
3.4.2. Prenaponi.....	16
3.4.3. Prekid opskrbe	16
3.4.4. Preniski naponi	17
3.4.5. Previsoki naponi	17
3.5. Električni šum	17
3.6. Kolebanje napona	18
3.6.1. Treperenje napona	19
4. ANALIZA MJERENJA KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE	21
4.1. Kolebanje napona	23
4.2. Treperenje napona	25
4.3. Nesimetrija napona	26
4.1. Frekvencija	27
4.2. Snaga	28
4.3. Naponi viših harmonika	30

4.3.1. Ukupno harmonijsko izobličenje (THD)	30
4.3.2. Supraharmonici (od 2 do 9 kHz)	31
4.3.3. Analiza previsokih vrijednosti harmonika	32
5. Zaključak	38
LITERATURA	39
SAŽETAK.....	40
ABSTRACT	41
ŽIVOTOPIS.....	42

1. UVOD

Od samog otkrića električne energije, tehnologija za njezinu proizvodnju, prijenos, distribuciju i korištenje neprestano se razvija. Inovativna su sredstva za proizvodnju električne energije potaknula industrijsku revoluciju te se počelo doprinositi njenom neprekidnom napretku. U početku su električni strojevi radili prilično dobro, ali uz veliku potrošnju električne energije jer su tada performanse bile važnije od troškova. U to su vrijeme strojevi bili izloženi anomalijama kvalitete električne energije, ali to nije bilo lako primijetiti, djelomično zbog njihove robusnosti, a djelomično zbog nedostatka učinkovitih načina mjerenja parametara kvalitete električne energije.

U posljednjih šezdesetak godina industrijsko doba je uzrokovalo potrebu da proizvodi budu ekonomski konkurentni. To je rezultiralo smanjenjem veličine i povećanjem učinkovitosti električnih strojeva. Također, povećana potražnja za električnom energijom dovela je do stvaranja velikih mreža za proizvodnju, prijenos i distribuciju električne energije.

U novije vrijeme, povećava se udio obnovljivih izvora energije poput fotonaponskih i vjetroelektrana, što također utječe na kvalitetu električne energije jer promjenjiva proizvodnja ovisi o vremenskim uvjetima (sunce, vjetar). Promjene vremenskih uvjeta dovode do kolebanja napona, što može utjecati na kvalitetu napajanja drugih uređaja u mreži.

Danas električna vozila postaju sve popularnija, što također utječe na kvalitetu električne energije u mreži. Povećana potražnja za električnom energijom tijekom punjenja većeg broja električnih vozila može narušiti kvalitetu električne energije u mreži.

Svi ovi čimbenici čine elektroenergetski sustav koji zahtijeva analizu kvalitete električne energije. Važno je razumjeti što utječe na narušavanje kvalitete električne energije i kako se ona može nadzirati i poboljšati. U tu svrhu postoje različiti standardi i smjernice koje se primjenjuju u industriji kako bi se osigurala visoka razina kvalitete električne energije.

2. PREGLED PODRUČJA TEME

Kvaliteta električne energije, njezini pokazatelji, osnovni poremećaji, smetnje i načini poboljšanja kvalitete električne energije detaljno su opisani u literaturi [1]. Dodatne informacije o supraharmonicima, jednim od parametara za procjenu kvalitete električne energije, opisani su u literaturi [2]. Mjerenje parametara kvalitete električne energije se provodi odgovarajućim uređajima koji su namijenjeni u tu svrhu, poput uređaja koji je korišten u ovom radu, a opisan je u literaturi [7]. Dobiveni se rezultati uspoređuju s ograničenjima propisanih normi, opisanih u literaturama [5] i [6], te se donose zaključci zadovoljava li određeni parametar kvalitete električne energije uvjetima zadane norme. Punionice na kojima je provedena analiza kvalitete električne energije su dvije od brojnih HEP-ovih Elen punionica za električna vozila, a opisane su u literaturi [3]. Priključci za punjenje električnih vozila opisani su u literaturi [4].

3. POKAZATELJI KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE

Kvaliteta električne energije postaje sve važnija kako se naša ovisnost o električnoj energiji povećava. Električna je energija neophodna za gotovo sve aspekte našeg života, od rasvjete i grijanja do rada računala i drugih električnih uređaja. Međutim, kvaliteta električne energije može biti narušena zbog različitih smetnji koje se javljaju u elektroenergetskom sustavu. Smetnje u elektroenergetskom sustavu mogu uzrokovati probleme poput prekida napajanja i oštećenja opreme. Ove smetnje mogu biti uzrokovane različitim faktorima, uključujući atmosferske uvjete, kvarove opreme i preopterećenje mreže. Kako bi se smanjili problemi vezani uz kvalitetu električne energije, proizvođači i distributeri električne energije moraju osigurati da njihovi sustavi budu pouzdani i otporni na smetnje. Postoje različiti standardi koji se koriste za procjenu kvalitete električne energije. Međunarodna elektrotehnička komisija (IEC), Institut inženjera elektrotehnike i elektronike (IEEE) i Europski odbor za elektrotehničku normizaciju (CENELEC) tri su organizacije koje su dale smjernice za procjenu kvalitete električne energije. Ove smjernice uključuju parametre poput napona, frekvencije, nesimetrije i harmonika, [1]. Države članice Europske unije pridržavaju se EN 50160. U Republici Hrvatskoj norma za kvalitetu električne energije je HRN EN 50160:2023 Naponske karakteristike električne energije iz javnih distribucijskih mreža (EN 50160:2022). U tablici 3.1. prikazan je dio graničnih vrijednosti norme HRN EN 50160, [5].

Tablica 3.1. Granične vrijednosti norme HRN EN 50160 [5]

Pokazatelj	Mjerna jedinica	Obilježja niskog napona	Obilježja srednjeg napona
Kolebanje napona	V	$\pm 10 \% U_n$ za 95 % tjedna $+10/-15 \% U_n$ za 5 % tjedna	$\pm 10 \% U_c$ za 95 % tjedna
Kratki prekidi	Broj	< 3 min. - nekoliko desetaka do stotina godišnje	
Dugi prekidi	Broj	≥ 3 min. - < 10 do 50 godišnje	
Propadi	Broj	Nekoliko desetaka do tisuću godišnje	
THD napona	$\% U_n$	< 8 % U_n	
Treperenje	P_{lt}	$P_{lt} \leq 1$ za 95 % tjedna	
Nesimetrija	$\% U_n$	< 2 % U_n za 95 % tjedna	
Frekvencija	Hz	$\pm 1 \% f_n$ za 99,5 % godine $+4/-6 \% f_n$ za 100 % godine	

Funkcija kvalitete napajanja električnom energijom ovisi o tome koliko se dobro to napajanje može koristiti kao izvor energije za električnu opremu koja je dizajnirana za povezivanje s opskrbnom mrežom. Kvaliteta napajanja sastoji se od dviju osnovnih komponenti:

- **neprekidnosti**, što predstavlja razinu dostupnosti električne energije krajnjem korisniku tijekom vremena u svakom trenutku i
- **razine napona**, što je specificirani raspon vrijednosti unutar kojeg se napon održava tijekom vremena u svakom trenutku.

Problemi s kvalitetom električne energije nastaju zbog različitih vrsta električnih smetnji. Većina smetnji ovisi o amplitudi i/ili frekvenciji. Temeljem trajanja smetnji, događaji se mogu podijeliti na kratkotrajne smetnje, smetnje srednjeg trajanja ili dugotrajne smetnje. Smetnje koje uzrokuju narušavanje kvalitete električne energije u elektroenergetskom sustavu i njihova klasifikacija uglavnom obuhvaćaju sljedeće:

- **Prekidi opskrbe, previsoki i preniski naponi:** predstavljaju vrlo česte tipove smetnji. Tijekom prekida opskrbe razina napona određenog voda pada na nulu (ili ispod 5 % nazivnog napona). Prekid može biti kratkotrajan, srednjeg trajanja ili dugotrajan. Previsoki ili preniski naponi predstavljaju pad ili porast razine napona određenog voda u odnosu na nazivnu vrijednost napona. Ponekad je dopušteno malo odstupanje u postotku, ali kada prijeđu dopuštenu granicu razine napona, smatraju se smetnjama. Takve smetnje povećavaju količinu reaktivne snage koju sustav troši ili isporučuje te uzrokuju probleme izolacije i stabilnosti napona.
- **Nesimetrija napona/struje:** Javlja se kod nesimetričnog pada napona u generatorskom ili prijenosnom dijelu elektroenergetskog sustava te kod nesimetričnog opterećenja. Nesimetrija može utjecati na promjene gubitaka i u nekim slučajevima narušiti stabilnost napona u elektroenergetskom sustavu.
- **Harmonici:** predstavljaju izmjenične komponente koje su prisutne u signalima napona i struja s frekvencijama koje se razlikuju od osnovne frekvencije. Uzroci su pojave harmonika u mreži nelinearna trošila, prekomjerna uporaba poluvodičkih rasklopnih uređaja itd. Harmonici nisu poželjna pojava te imaju negativan učinak na elektroenergetski sustav kao i na potrošačke električne uređaje.
- **Prijelazne pojave:** mogu biti generirane u vlastitom sustavu ili mogu doći iz drugog sustava. Prijelazne su pojave klasificirane dvjema kategorijama, a to su istosmjerne prijelazne pojave i izmjenične prijelazne pojave. Izmjenične se prijelazne pojave dijele na jednociklusne i višeciklusne.
- **Naponski propadi:** kratkotrajni poremećaji kod kojih efektivna vrijednost napona padne na vrlo nisku razinu.

- **Prenaponi:** kratkotrajni poremećaji kod kojih efektivna vrijednost napona poraste na vrlo visoku razinu.
- **Treperenje napona (flikeri):** predstavljaju neželjeno variranje frekvencije sustava, [1].

3.1. Nesimetrija trofaznog sustava

Nesimetrija je čest problem u višefaznim elektroenergetskim mrežama, a odnosi se na odstupanje faznih napona i faznih struja od njihovih nazivnih vrijednosti u odnosu na njihovu stvarnu (izmjerenu) vrijednost i fazni kut. Nesimetrija trofaznog elektroenergetskog sustava definira se kao odstupanje napona ili struje u jednoj ili dvjema (od triju) faza od nazivne vrijednosti te ako fazni kut između njih ne iznosi točno 120°. Takva pojava može nastati uslijed nejednolikih propada u pojedinim fazama pri trofaznom opterećenju, [1].

Postoje dva načina za proračun faktora nesimetrije, a to su:

- omjer između najvećeg odstupanja od prosječne vrijednosti trofaznih napona i prosjeka trofaznih napona ili
- omjer inverzne (ili nulte) komponente i direktne komponente.

Stoga se nesimetrija u elektroenergetskom sustavu može izraziti kao postotna promjena linijske struje i napona u odnosu na njihove nazivne vrijednosti. Za promjenu linijske struje u bilo kojoj od triju faza, nesimetrija će biti:

$$\frac{I - i}{I} \cdot 100\% \quad (3-1)$$

gdje je I nazivna, a i stvarna vrijednost struje.

Na isti se način određuje i nesimetrija napona:

$$\frac{V - v}{V} \cdot 100\% \quad (3-2)$$

gdje je V nazivna, a v stvarna vrijednost napona.

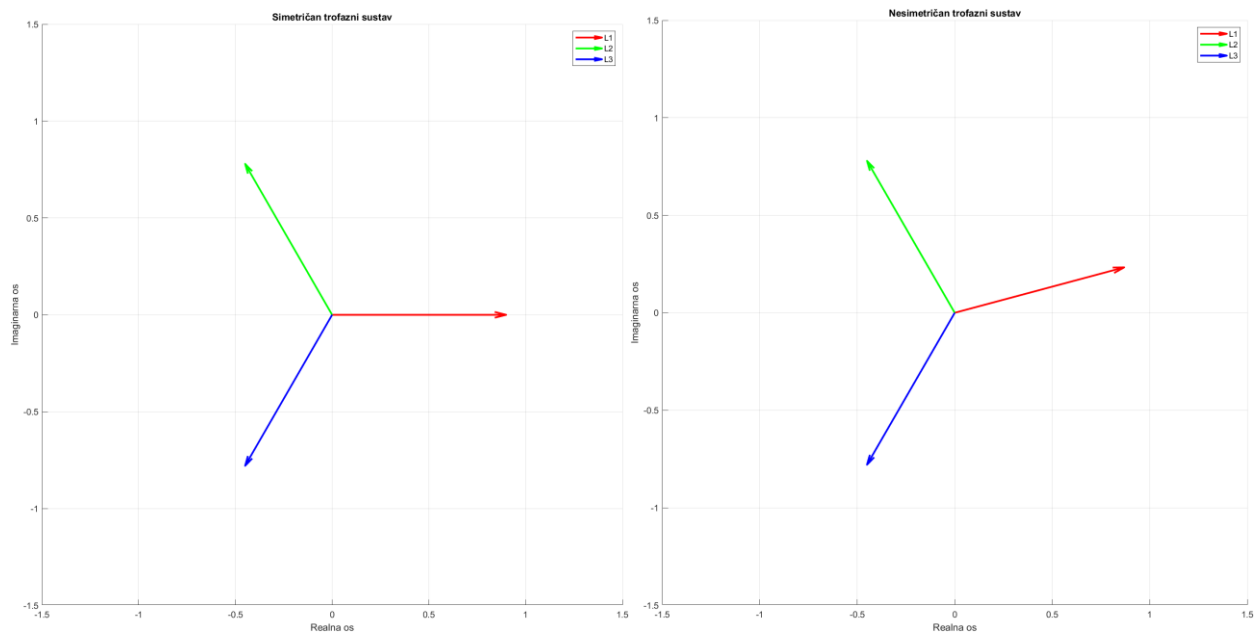
Nesimetrija u elektroenergetskom sustavu karakterizira se i pomoću simetričnih komponenti.

"Pravi" faktor neuravnoteženosti UF izražava se kao:

$$UF = \frac{V_-}{V_+} \quad (3-3)$$

gdje V_+ i V_- predstavljaju korijen srednjeg kvadrata efektivne vrijednosti napona komponenti direktnog i inverznog niza, [1].

Na slici 3.1. prikazani su vektorski graf simetričnog trofaznog sustava i graf nesimetričnog trofaznog sustava na kojemu je vidljivo odstupanje faznog kuta faze L1.



Sl. 3.1. Vektorski prikaz simetrije i nesimetrije trofaznog sustava

3.1.1. Izvori nesimetrije

Izvori nesimetrije mogu biti opterećenja nesimetričnih jednofaznih trošila u trofaznom sustavu koji predstavljaju većinu kućanskih uređaja i industrijsku rasvjetu. Ako raspodjela opterećenja između triju faza nije ravnomjerno raspoređena, parametri faza će se razlikovati, što rezultira nesimetrijom. Nesimetriju mogu uzrokovati loše transponirani (preuređeni) nadzemni vodovi, ispad osigurača na jednoj od triju faza kondenzatorske baterije te promjena napona na jednoj od triju faza, [1].

3.1.2. Posljedice nesimetrije

Nesimetrija može dovesti do problema s radom električnih uređaja koji su osjetljivi na takve promjene u napajanju. Na primjer, motori mogu raditi neujednačeno ili se pregrijavati, a rasvjeta može treperiti ili proizvoditi manje svjetlosti. Da bi se spriječila nesimetrija trofaznog napona, važno je osigurati ravnomjernu raspodjelu opterećenja između faza i održavati ravnotežu između

impedancija faza. Također se mogu rabiti uređaji za nadzor i korekciju nesimetrije kao što su trofazni transformatori s trima zasebnim izvodima, aktivni filtri i drugi uređaji za korekciju faktora snage, [1].

3.2. Harmonici

Harmonici su periodični signali koji se sastoje od više frekvencija koje su višekratnici osnovne frekvencije. U kontekstu elektroenergetskih sustava, harmonici se obično odnose na neželjene frekvencije koje se pojavljuju u električnom signalu napona ili struje i mogu uzrokovati probleme u radu električnih uređaja, [1]. Kod savršenog se elektroenergetskog sustava očekuje da će valni oblici struje i napona pri konstantnoj frekvenciji imati čiste sinusne valne oblike, međutim u stvarnosti valni oblici napona i struje nisu u potpunosti sinusni. Takvi se nesinusoidalni valni oblici formiraju uslijed više sinusnih oblika različitih frekvencija. Stoga stvarni signal elektroenergetskih sustava ima osnovnu i harmonijsku komponentu.

Harmonici se obično analiziraju pomoću Fourierove analize koja razdvaja složeni signal na pojedinačne sinusne komponente. Harmonici se označavaju brojevima koji predstavljaju njihov odnos prema osnovnoj frekvenciji. Na primjer, treći harmonik ima trostruku frekvenciju osnovne frekvencije.

Osnovni val je valni oblik u složenom nesinusoidalnom valnom obliku s najnižom frekvencijom i predstavlja harmonik prvoga reda, odnosno ima nazivnu frekvenciju mreže koja u EU iznosi 50 Hz. Neka je f nazivna frekvencija valnog oblika struje, tada će osnovna komponenta struje biti:

$$i_1 = I_1 \sin(2\pi f \cdot t) \quad (3-4)$$

gdje je I_1 amplituda osnovne komponente struje.

Harmonici su valni oblici nesinusoidalnog valnog oblika koji imaju frekvencije različite od osnovne frekvencije. U većini slučajeva takvi su valovi periodični i dobro definirani te se mogu izraziti Fourierovim redom. Harmonijska je frekvencija umnožak cjelobrojnog reda harmonika s osnovnom frekvencijom. Neka je n red harmonika, tada će harmonička komponenta struje reda n biti:

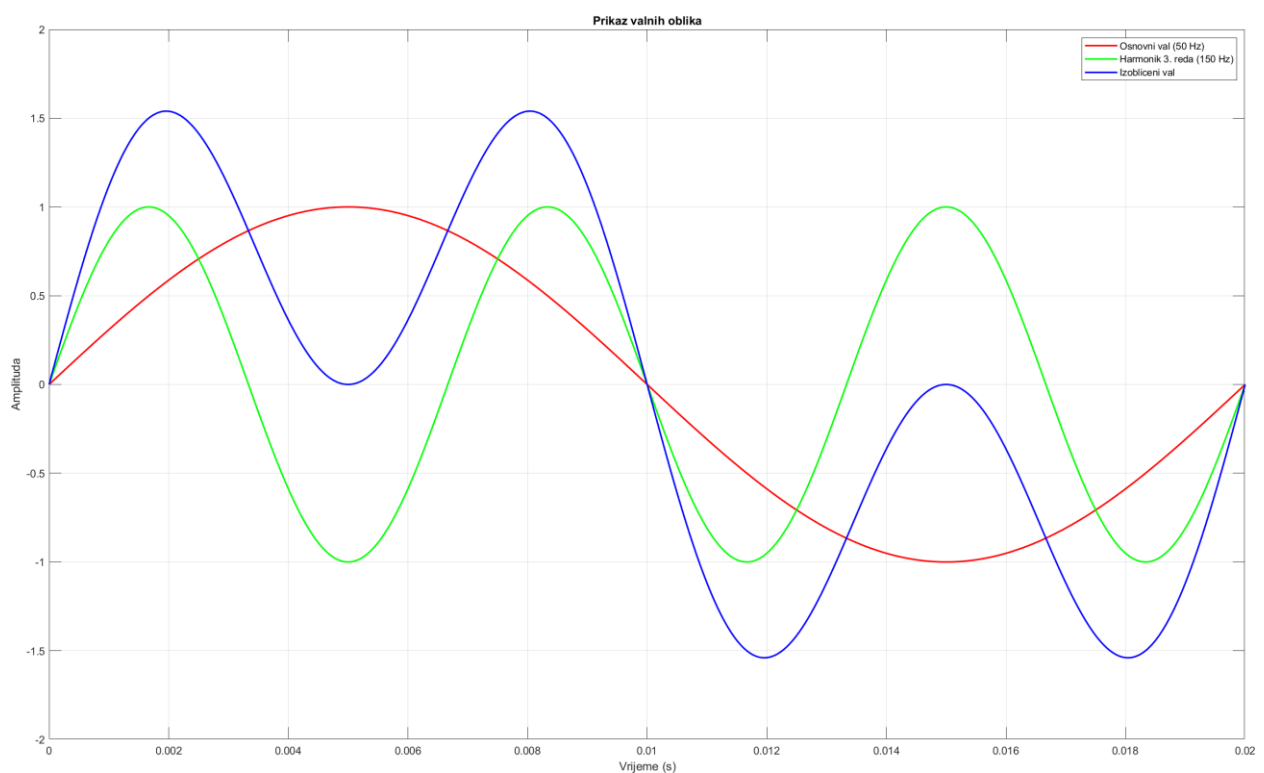
$$i_n = I_n \sin(2\pi f \cdot n \cdot t) \quad (3-5)$$

gdje je I_n amplituda harmoničke komponente struje.

Cjelobrojni se harmonici mogu podijeliti u dvije kategorije: neparni harmonici i parni harmonici. Osim cjelobrojnih harmonika, postoje i subharmonici i interharmonici kod kojih je red harmonika n razlomak, [1].

Neparni su harmonici cjelobrojni harmonici čije su frekvencije neparni višekratnici osnovne frekvencije, dok su parni harmonici cjelobrojni harmonici čije su frekvencije parni višekratnici osnovne frekvencije.

Na slici 3.2. prikazan je valni oblik osnovnog vala nazivne frekvencije 50 Hz, harmonik trećeg reda (150 Hz) i izobličeni valni oblik nastao zbrojem osnovnog valnog oblika i harmonika trećeg reda.

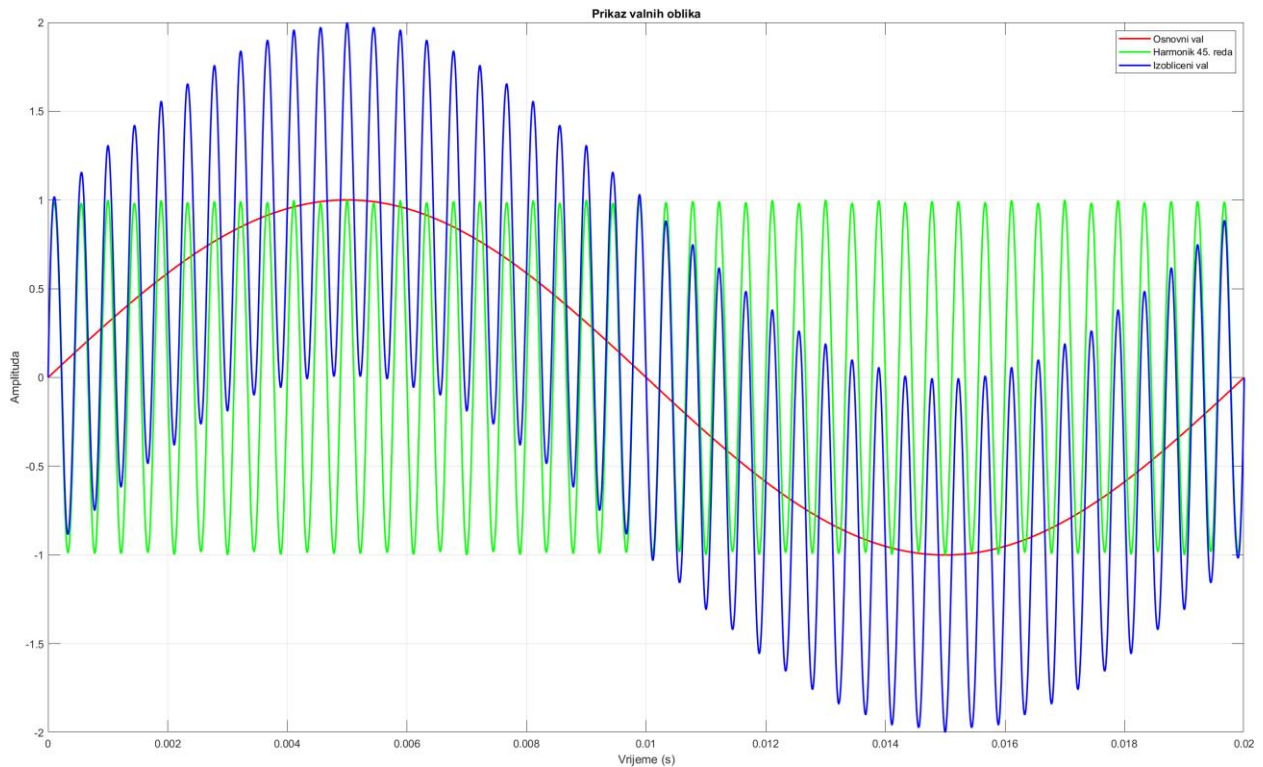


Sl. 3.2. Prikaz valnih oblika osnovnog, harmonijskog i izobličenog vala

3.2.1. Supraharmonici

Supraharmonici su izobličenja valnog oblika struje ili napona u rasponu od 2 kHz do 150 kHz, odnosno predstavljaju harmonike od 40., pa do 3000. reda. Glavni su izvori takvih smetnji visokofrekventna rasklopna oprema i elektroenergetski pretvarači. Neki su od glavnih primjera punionice za električna vozila, fotonaponske elektrane, pogoni s frekvencijskim regulatorom brzine, energetske pretvarači itd., [2]. Istraživanja vezana uz supraharmonike započela su tek nedavno.

Na slici 3.3. prikazan je osnovni valni oblik nazivne frekvencije 50 Hz, harmonik 45. reda (2250 Hz) i izoblićeni valni oblik nastao zbrojem osnovnog valnog oblika i harmonika 45. reda.



Sl. 3.3. Prikaz izoblićenog vala nastalog utjecajem supraharmnika

3.2.2. Ukupno harmonijsko izoblićenje (THD)

Ukupno harmonijsko izoblićenje (THD, engl. Total Harmonic Distortion) indeks je koji mjeri količinu izoblićenog signala struje ili napona koja se razlikuje od savršenog sinusnog valnog oblika. Ključni je parametar za procjenu kvalitete električne energije te se najčešće iskazuje u postotcima, a ponekad i u decibelima. Niža vrijednost THD-a ukazuje na manju razinu izoblićenja, pružajući čistiji i precizniji prikaz izvornog signala, dok viša vrijednost THD-a označava veću razinu izoblićenja. Izraz za proračun THD-a napona:

$$THD_U = \sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} U_h^2} \cdot \frac{100\%}{U_1} [\%] \quad (3-6)$$

gdje U_h predstavlja efektivne vrijednosti harmonijskih napona, U_1 efektivnu vrijednost napona osnovnog vala i h_{max} koji predstavlja najveći red harmonika koji ulazi u proračun.

Na isti se način računa i harmonijsko izobličenje struje:

$$THD_I = \sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} I_h^2} \cdot \frac{100\%}{I_1} [\%] \quad (3-7)$$

gdje I_h predstavlja efektivne vrijednosti harmonijskih struja, I_1 efektivnu vrijednost struje osnovnog vala i h_{max} koji predstavlja najveći red harmonika koji ulazi u proračun, [1].

3.2.3. Ukupno harmonijsko izobličenje u odnosu na potražnju (TDD)

Ukupno harmonijsko izobličenje u odnosu na potražnju (TDD, engl. Total Demand Distortion) indeks je koji mjeri ukupan učinak izobličenja u trenutnom valnom obliku. TDD se izražava kao omjer izmjerene harmonijske struje i struje pri maksimalnom opterećenju za razliku od THD-a u kojemu se sadržaj harmonika odnosi na vrijednosti nazivne struje osnovne frekvencije. Struja maksimalnog opterećenja predstavlja ukupnu količinu neharmonične struje koju uzimaju sva opterećenja dok je sustav u vršnom opterećenju. Izraz za proračun TDD-a:

$$TDD = \sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} I_h^2} \cdot \frac{100\%}{I_L} [\%] \quad (3-8)$$

gdje I_h predstavlja efektivne vrijednosti harmonijskih struja, I_L struju pri maksimalnom opterećenju i h_{max} koji predstavlja najveći red harmonika koji ulazi u proračun.

3.2.4. Izvori harmonika

Izvori harmonika u elektroenergetskom sustavu konvencionalni su elektromagnetski uređaji i poluvodičke komponente. Pod konvencionalnim elektromagnetskim uređajima smatraju se transformatori i rotirajući strojevi. Generiranje harmonika u tim strojevima ovisi o svojstvima materijala korištenih za njihovu izradu, projektnim ograničenjima i pretpostavkama, principu rada i o okruženju opterećenja. Kao konvencionalni uređaji, pored transformatora i rotirajućih strojeva, lučni uređaji stvaraju znatnu količinu harmonika u mreži. Osim konvencionalnih uređaja, uređaji s poluvodičkim komponentama kao što su poluvodički izvori napajanja, fazni regulatori, reaktori

itd., znatno se rabe u mreži elektroenergetskog sustava i doprinose ogromnoj količini harmonika elektroenergetskom sustavu. U posljednjih nekoliko desetljeća, razine harmonijskih poremećaja naglo su porasle zbog sve veće uporabe nelinearnih poluvodičkih uređaja koji predstavljaju jedan od njihovih glavnih izvora.

Glavni izvori harmonika u elektroenergetskom sustavu klasificiraju se prema:

- nelinearnom magnetiziranju transformatora
- rotirajućim strojevima
- lučnim uređajima
- poluvodičkim izvorima napajanja
- izmjeničnim pogonima napajanih izmjeničnim pretvaračem
- tiristorski upravljanim reaktorima
- faznim regulatorima
- izmjeničnim regulatorima, [1].

3.2.5. Posljedice harmonika

U elektroenergetskom sustavu, harmonici su neželjena pojava s negativnim utjecajem na električnu opremu i pravilan rad elektroenergetskog sustava. Prisutnost harmonika u mreži može uzrokovati povećanje gubitaka u mreži zbog veće struje kroz vodiče i transformatorske namotaje. Također, harmonici smanjuju snagu transformatora, što dovodi do pregrijavanja i kvarova. Povećanje temperature na električnoj opremi uslijed prisustva harmonika skraćuje njihov vijek trajanja te uzrokuje kvarove. Osim toga, harmonici mogu ometati rad elektroničkih uređaja koji zahtijevaju stabilno napajanje poput računala, telekomunikacijske i medicinske opreme. Harmonici mogu izazvati i probleme s kvalitetom napona poput kolebanja i smanjenja napona, što može negativno utjecati na rad osjetljive opreme. Također uzrokuju rezonanciju i narušavaju svojstva prigušenja te negativno utječu na performanse rotacijskih strojeva, transformatora i prijenosnih mreža. Harmonici utječu na točnost i karakteristike rada mjernih instrumenata i zaštitnih uređaja. Performanse uređaja za kompenzaciju reaktivne snage također se mogu mijenjati zbog prisutnosti harmonika. Sve ove negativne posljedice harmonika odražavaju se i na različitu potrošačku električnu opremu, [1].

3.3. Prijelazne pojave

Prijelazne pojave označavaju komponente napona i struja koje se javljaju tijekom prijelaza iz jednog stabilnog stanja u drugo stabilno stanje. Kratkotrajna pojava u elektroenergetskom sustavu koja je kraća od jednog ciklusa uglavnom se odnosi na prijelaznu pojavu. Karakterizira ih vrlo brzi porast napona i struje u kratkom razdoblju.

Homogena rješenja diferencijalnih jednadžbi koje opisuju strujne krugove predstavljaju zbroj homogenih rješenja koji odgovara prijelaznoj pojavi. U takvim rješenjima, prijelazna je pojava uvijek povezana s promjenom stabilnog stanja prilikom promjene rasklopnog stanja. Većina je prijelaznih pojava u elektroenergetskom sustavu kratkotrajna te ne postoji jasno određeno ograničenje njihova trajanja. Prijelazne pojave u elektroenergetskom sustavu mogu se generirati unutar samog sustava ili se mogu prenijeti unutar sustava iz vanjskih sustava, [1].

3.3.1. Izvori prijelaznih pojava

Prijelazne pojave mogu biti uzrokovane udarom munje u vodove i sklopne aparate elektroenergetskog sustava, u potrošačku električnu opremu ili u zemlju.

Postoje tri slučaja kojima se mogu karakterizirati kratkotrajni događaji:

1. ***Događaji koji se mogu prepoznati po veličini svoje nazivne frekvencije:*** događaji kod kojih amplituda napona prolazi kroz značajne promjene tijekom dugih razdoblja. S obzirom na njihovu vremensku udaljenost, lako je uočiti događaje sa značajnim promjenama napona. Takvi su događaji najčešće povezani s kvarom ili zasićenjem transformatora i pokretanjem asinkronih motora. Uzrokuju pad napona u trajanju od 50 ms do nekoliko sekundi te prekide u trajanju od nekoliko sekundi do više sati.
2. ***Kratkotrajni događaji koji se mogu prepoznati po veličini svoje nazivne frekvencije:*** događaji kod kojih je vrlo teško izdvojiti veličinu napona prijelazne pojave. Obično se radi o kvarovima povezanim s osiguračima i automatskim ponovnim uklapanjem.
3. ***Vrlo kratki događaji (prijelazne pojave) kod kojih veličina osnovne frekvencije ne pruža važne informacije:*** za ovakve se događaje komponente signala s višom frekvencijom moraju razmatrati temeljitom karakterizacijom i klasifikacijom, [1].

Na temelju valnog oblika prijelazne pojave se mogu klasificirati na:

- impulzivne
- oscilatorne
- višestruke.

Impulzivne su prijelazne pojave nagli i kratkotrajni poremećaji u elektroenergetskom sustavu koji se javljaju kao posljedica promjena napona i/ili struje. Ove pojave mogu biti uzrokovane različitim faktorima kao što su udari munje, prekidi u napajanju i prebacivanje opterećenja. Impulzivne prijelazne pojave se obično analiziraju prema njihovim karakteristikama poput vremena porasta i pada. One se brzo gase zbog prisutnosti otpornih elemenata u krugu te ne dosežu daleko od izvora. Međutim, ako se impulzivna prijelazna pojava dogodi na visokonaponskom vodu ili transformatoru, tada može doseći velike udaljenosti. Da bi se spriječile impulzivne prijelazne pojave, primjenjuju se različite zaštitne mjere poput instaliranja prekidača koji mogu brzo reagirati na promjene napona i struje u mreži.

Oscilatorne su prijelazne pojave izmjenične prirode te su karakterizirane oscilacijama napona i struje koje se javljaju nakon što se sustav poremeti. Oscilacije su prigušene s frekvencijom u rasponu od nekoliko stotina herca do nekoliko megaherca. Oscilatorne se prijelazne pojave mogu matematički izvesti homogenim rješenjem linearnih diferencijalnih jednadžbi. S obzirom na to da se elektroenergetski sustav također može približno opisati skupom linearnih diferencijalnih jednadžbi, oscilatorne prijelazne pojave predstavljaju „prirodne“ prijelazne pojave sustava. Iz tog razloga oscilatorne prijelazne pojave količinski dominiraju u odnosu na impulzivne. Mogu biti uzrokovane punjenjem kondenzatorskih baterija gdje frekvencija oscilacija uglavnom ovisi o njihovom kapacitetu te induktivitetu kratkog spoja strujnog kruga koji ih napaja. Mogu još biti uzrokovane i uklopom prijenosnog voda.

Višestruke su prijelazne pojave uzrokovane kombinacijom više prijelaznih pojava nastalih uslijed više od jedne promjene uklopnog stanja. U praksi se rijetko dogodi da sve tri faze trofaznog sustava promijene uklopno stanje u istom trenutku te na taj način prouzroče višestruke prijelazne pojave. Mogu još biti uzrokovane i prekidom opskrbe te ponovnim uključivanjem, [1].

3.3.2. Posljedice prijelaznih pojava

Trajanje i priroda prijelaznih pojava ovise o ispravnom radu prekidača i prenaponu koje se javlja prilikom uklapanja visokonaponskih vodova. Visoki naponi koji se javljaju tijekom prijelaznih pojava mogu uzrokovati probijanje izolacije voda, dok velike struje mogu spaliti uređaje i mjerne instrumente. Prijelazne pojave također mogu uzrokovati pogrešan rad releja i neispravno okidanje prekidača, a česte oscilatorne prijelazne pojave mogu promijeniti magnetska svojstva jezgre električnih strojeva, [1].

3.4. Naponski propadi, prenaponi, prekidi opskrbe, preniski i previsoki naponi

Osim nesimetrije, harmonika i prijelaznih pojava, elektroenergetski sustav trpi smetnje koje su povezane s promjenama nazivnog napona (ili struje). Naponski propadi, prenaponi, prekidi, preniski i previsoki naponi promjene su koje se zajedno s njihovim trajanjem odnose na porast ili pad efektivne vrijednosti napona. Takvi su poremećaji vrlo česti te njihovo praćenje nije teško s obzirom na to da se radi o praćenju njihove efektivne vrijednosti u određenom vremenskom okviru.

3.4.1. Naponski propadi

Naponski su propadi dvodimenzionalni elektromagnetski poremećaji koji predstavljaju kratkotrajno smanjenje efektivne vrijednosti napona do opsega između 0,05 i 0,9 p.u. Takvo smanjenje efektivne vrijednosti napona u trajanju između 0,5 ciklusa i 1 minute smatra se naponskim propadom.

Najčešći uzroci naponskog propada su:

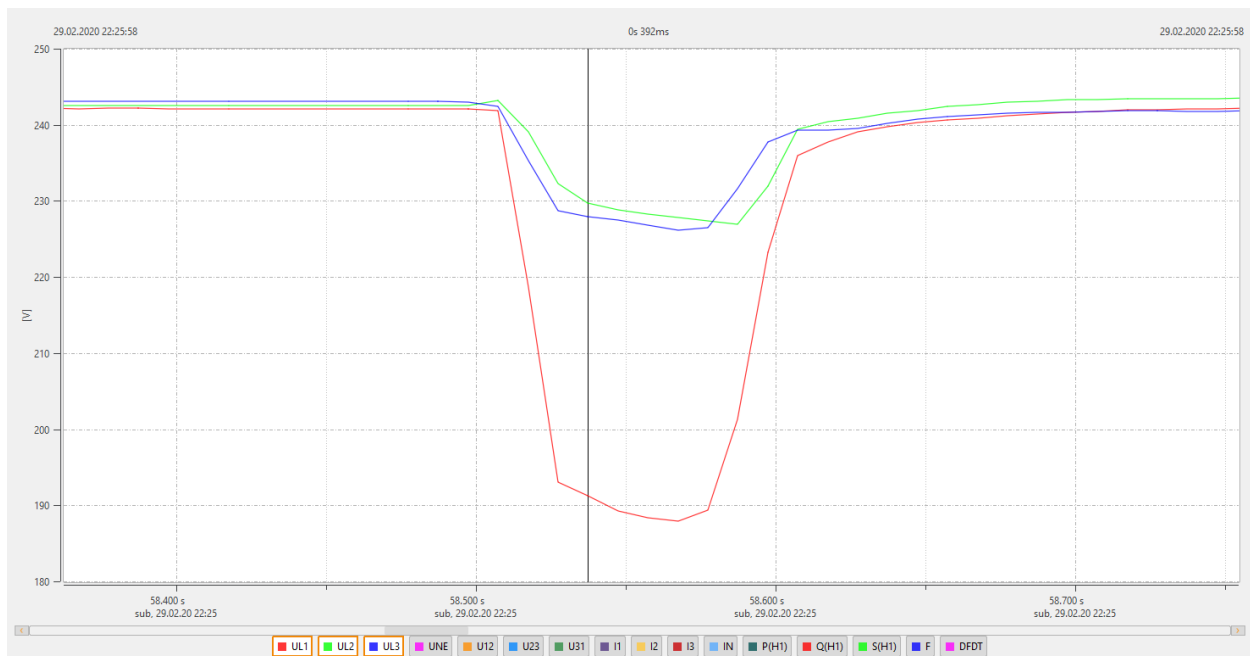
- **Uključivanje velikih opterećenja:** Naglo uključivanje velikog opterećenja dovodi do smanjenja napona u elektroenergetskom sustavu. Međutim, ako napajanje može podnijeti takvo opterećenje, razina napona brzo se vraća na svoju nazivnu vrijednost. Primjer takvog opterećenja mogu biti lučne peći.
- **Pokretanje velikih asinkronih motora:** Višefazni motori prilikom pokretanja povlače veliku količinu struje. Stoga, povezivanje velikih višefaznih motora na sabirnicu

elektroenergetskog sustava često rezultira smanjenjem ili padom napona zbog visoke struje pokretanja.

- **Kvar uzrokovan jednofaznim kratkim spojem sa zemljom:** Uslijed visoke struje kratkog spoja na mjestu kvara, javlja se naglo smanjenje napona, odnosno naponski propad u elektroenergetskom sustavu.
- **Kvar uzrokovan dvofaznim ili trofaznim kratkim spojem:** Kao i kod jednofaznog kratkog spoja sa zemljom, također se javlja se naglo smanjenje napona, odnosno naponski propad u elektroenergetskom sustavu.
- **Prebacivanje opterećenja s jednog izvora napajanja na drugi:** Prilikom prebacivanja opterećenja s jednog izvora na drugi ili između faza, može se javiti naponski propad u elektroenergetskom sustavu.

Posljedice naponskih propada najčešće uključuju probleme sa stabilnošću napona uslijed kratkotrajnog smanjenja napona na sabirnici, kvarove na niskonaponskim uređajima, neprekidnim izvorima napajanja, mjernoj, upravljačkoj i komunikacijskoj opremi. Uređaji koji su posebno osjetljivi na naponske propade pogoni su s promjenjivom brzinom, oprema za vođenje procesa i računala, [1].

Primjer naponskog propada prikazan je dijagramom na slici 3.4.



Sl. 3.4. Prikaz snimljenog naponskog propada

3.4.2. Prenaponi

Prenaponi su upravo suprotnost naponskim propadima. Oni su dvodimenzionalni elektromagnetski poremećaji koji predstavljaju kratkotrajni porast efektivne vrijednosti napona do opsega između 1,1 i 1,9 p.u. Takav porast efektivne vrijednosti napona u trajanju između 0,5 ciklusa i 1 minute smatra se prenaponom.

Najčešći uzroci prenapona su:

- **Isključivanje velikih opterećenja:** Naglo isključivanje velikog opterećenja dovodi do povećanja napona u elektroenergetskom sustavu.
- **Priključenje kondenzatorske baterije:** U trenutku kada kondenzatorska baterija povuče struju, može doći do prenapona u elektroenergetskom sustavu.
- **Porast napona zdravih faza prilikom zemljospoja:** Prilikom zemljospoja (kod neuzemljene sabirnice) javlja se porast napona na zdravim fazama, što uzrokuje prenapon.
- **„Trenutni prenapon“**

Posljedice su prenapona jednake kao i kod naponskih propada, a najčešće uključuju probleme sa stabilnošću napona uslijed kratkotrajnog smanjenja napona na sabirnici, kvarove na niskonaponskim uređajima, neprekidnim izvorima napajanja, mjernoj, upravljačkoj i komunikacijskoj opremi. Uređaji koji su posebno osjetljivi na prenapone pogoni su s promjenjivom brzinom, oprema za vođenje procesa i računala, [1].

3.4.3. Prekid opskrbe

Prekidi opskrbe predstavljaju smanjenje napona ispod 0,05 p.u.

Uzroci prekida opskrbe mogu biti kvarovi na opskrbenj opremi, isklon prekidača, ispad osigurača, kvar na sustavu upravljanja te planirani radovi na elektroenergetskom sustavu.

Prema europskom standardu EN 50160 trajanje prekida može se klasificirati u dvije grupe:

- kratkotrajni prekidi: do 3 minute
- dugotrajni prekidi: preko 3 minute, [1].

3.4.4. Preniski naponi

Preniski naponi predstavljaju smanjenje efektivne vrijednosti napona na 0,8 do 0,9 p.u. u trajanju preko 1 minute. Glavna razlika između naponskog propada i preniskog napona je duljina njihova trajanja.

Uzroci preniskog napona mogu biti preopterećenje, premala opskrba moć te kvarovi opreme u elektroenergetskom sustavu.

Preniski naponi mogu prouzročiti visoku potražnju jalove snage, nestabilnost napona te veliko povlačenje struje koju povlači motor, [1].

3.4.5. Previsoki naponi

Previsoki naponi predstavljaju povećanje efektivne vrijednosti napona na 1,1 do 1,2 p.u. u trajanju preko 1 minute. Glavna razlika između prenapona i previsokog napona duljina je njihova trajanja.

Uzroci previsokih napona mogu biti oštećenje izolatora, ferorezonancija, prevelika kompenzacija, udari munje, promjena rasklopnih stanja zaštitnih uređaja ili uključivanje kapacitivnih krugova te kvarovi na regulatoru generatora i transformatoru s promjenjivim prijenosnim omjerom.

Previsoki naponi mogu prouzročiti preopterećenje izolacije, nestabilnost napona te potražnju jalove snage, [1].

3.5. Električni šum

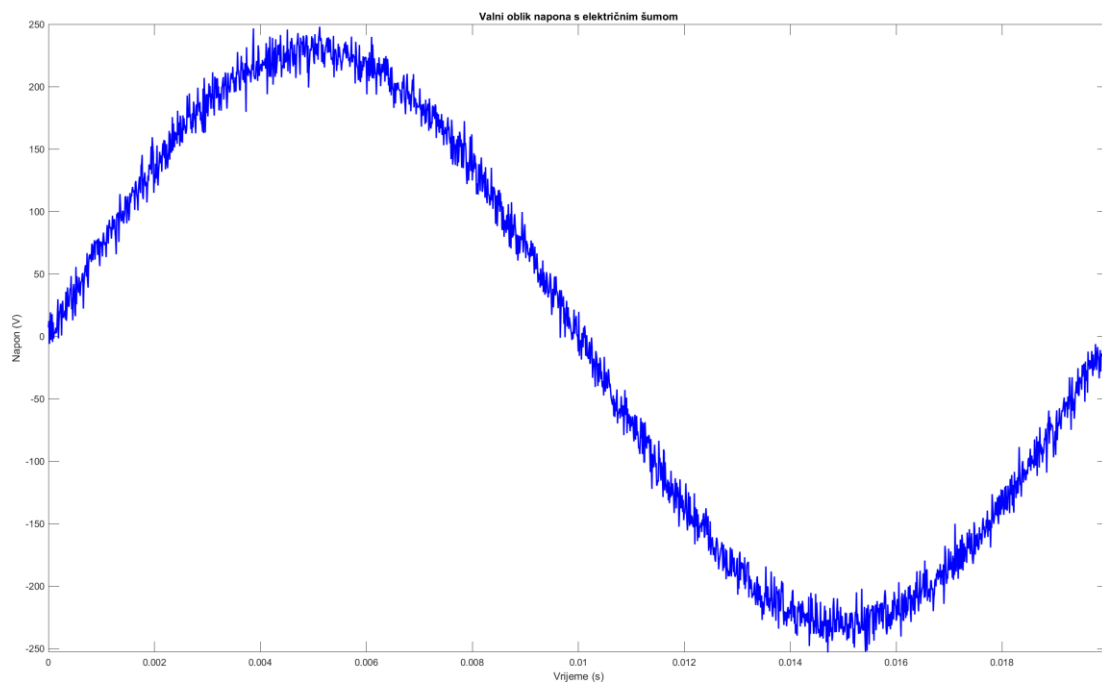
Električni šum predstavlja prisutnost neželjenog električnog signala koji ima širokopolasni spektralni sadržaj niži od 200 kHz. Superponiran je naponom i strujom u faznim, neutralnim i signalnim vodovima elektroenergetskog sustava. Veličina je šuma obično mala u odnosu na snagu.

Glavni uzroci električnog šuma:

- neispravni spojevi u prijenosnim i distribucijskim mrežama
- isključenje kondenzatorskih baterija
- loše uzemljenje
- uređaji energetske elektronike
- upravljački krugovi

- pogoni s podesivom brzinom
- lučne i električne peći
- uređaji za zavarivanje.

Električni šum može prouzročiti nepravilan rad elektroničkih uređaja poput mikroračunala i programabilnih kontrolera te se može smanjiti uporabom filtera, naponskih regulatora, namjenskih vodova ili transformatora, [1]. Na slici 3.5. prikazan je valni oblik napona s prisutnošću neželjenog šuma.



Sl. 3.5. Prikaz valnog oblika napona s električnim šumom

3.6. Kolebanje napona

Kolebanje napona pojava je u elektroenergetskom sustavu kod koje promjene napona ne prelaze određene vrijednosti. Prema ANSI C84.1-1982 i prema EN 50160 to su veličine napona od 0,9 do 1,1 p.u.

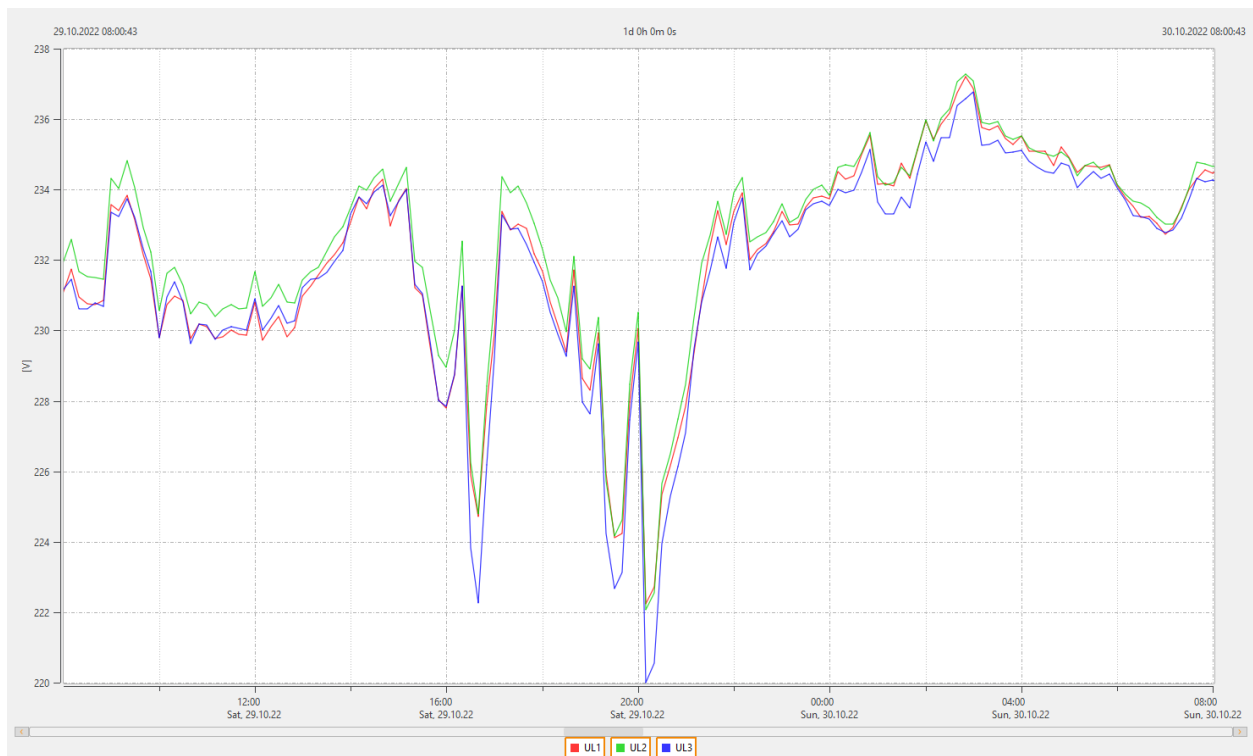
Smetnje se klasificiraju prema prirodi kolebanja napona:

- pravilne i nepravilne promjene napona koraka s obzirom na vrijeme
- ciklično kolebanje napona s obzirom na vrijeme
- nasumično kolebanje napona s obzirom na vrijeme.

Neki od glavnih uzroka kolebanja napona pulsirajući su izvori napajanja, pokretanja i brze promjene opterećenja pogona, valjaonice, uređaji za zavarivanje i lučne peći.

Kolebanje napona može uzrokovati nestabilnost napona i struje te ubrzano starenje električne opreme. Također može uzrokovati i probleme s kompenzacijom jalove snage. Kolebanje napona manje od 10 % u odnosu na nazivnu vrijednost napona obično ne stvara probleme s električnom opremom, [1].

Na slici 3.6. prikazan je primjer kolebanja napona snimljenog prilikom mjerenja kvalitete električne energije na punionici za električna vozila tijekom jednog dana.



Sl. 3.6. Dijagram kolebanja napona

3.6.1. Treperenje napona

Treperenje napona (flikeri) vrsta je kolebanja napona uzrokovana kontinuiranim i brzim promjenama iznosa struja opterećenja. Utjecaj treperenja može se primijetiti ljudskim okom kod rasvjetnih tijela koje uslijed brzih promjena napona titraju nižom frekvencijom, [1]. Lučne su peći najčešći uzročnik naponskih treperenja u elektroenergetskom sustavu. Kako bi se povećala sposobnost za ublažavanje treperenja napona, u distributivnu se mrežu mogu priključiti rotacijski generatori koji bi povećali struje kratkog spoja. Treperenje napona se računa pomoću izraza:

$$P_{lt} = C_c \cdot \frac{S_{dg}}{S_{pcc}} \quad (3-9)$$

gdje su C_c moć opreme koja stvara treperenje napona, S_{dg} nazivna snaga postrojenja distribucijske proizvodnje i S_{pcc} snaga kratkog spoja u točki zajedničkog spoja.

Na primjeru tjednog intervala slika 3.7. prikazuje kratkotrajno treperenje napona snimljenog prilikom mjerenja kvalitete električne energije na punionicama za električna vozila.



Sl. 3.7. Dijagram kratkotrajnog treperenja napona

4. ANALIZA MJERENJA KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE

Mjerenja su provedena na dvjema punionicama za električna vozila prikazanima na slici 4.1., koje se nalaze na odmoru Novska, na autocesti A3. Punionice su u vlasništvu HEP-a, a proizvela ih je francuska tvrtka EVTRONIC. Punionice, na kojima se mjerilo, dvije su od brojnih HEP-ovih ELEN javnih punionica koje su raspoređene diljem RH, [3].



Sl. 4.1. Punionice za električna vozila na odmoru Novska

Prva (viša) punionica omogućuje istosmjerno punjenje dvaju električnih vozila maksimalnim izlaznim snagama od 178 kW. Sadrži dva priključka različitih standarda radi kompatibilnosti s priključnicama različitih modela vozila, [3]. Jedan je od standardnih priključaka, trenutno najpopularniji, kombinirani sustav punjenja tip 2 (CCS - Type 2, engl. Combined Charging System), [4], a drugi je standard priključka CHAdeMO.

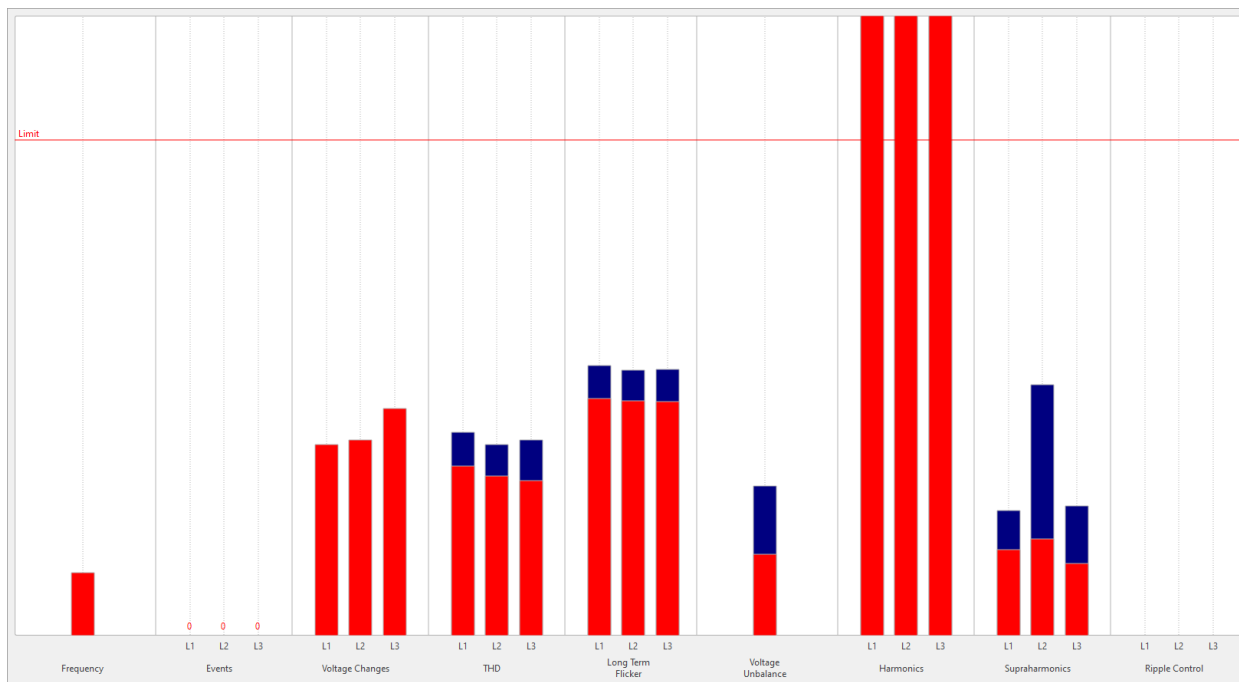
Druga punionica omogućuje istosmjerno punjenje snagom od 50 kW CHAdeMO i CCS - Type 2 standardima, a izmjenično snagom od 22 kW Type 2 standardom, [3].

Obje se punionice napajaju iz jednog razvodnog ormara u kojemu je bila postavljena mjerna oprema za mjerenje kvalitete električne energije. Uređaj kojim se mjerilo razvila je njemačka tvrtka A. Eberle, a naziva se PQ-Box 200, [7], te je prikazan na slici 4.2.



Sl. 4.2. Uređaj za mjerenje kvalitete električne energije A. Eberle PQ-Box 200 [7]

Mjerenja su trajala sedam dana, a provedena su od 26. listopada do 2. studenoga 2022. godine. Analiza je provedena promatranjem snimljenih mjernih rezultata u programskom paketu A. Eberle WinPQMobil te je na slici 4.3. prikazan sumarni pregled rezultata.



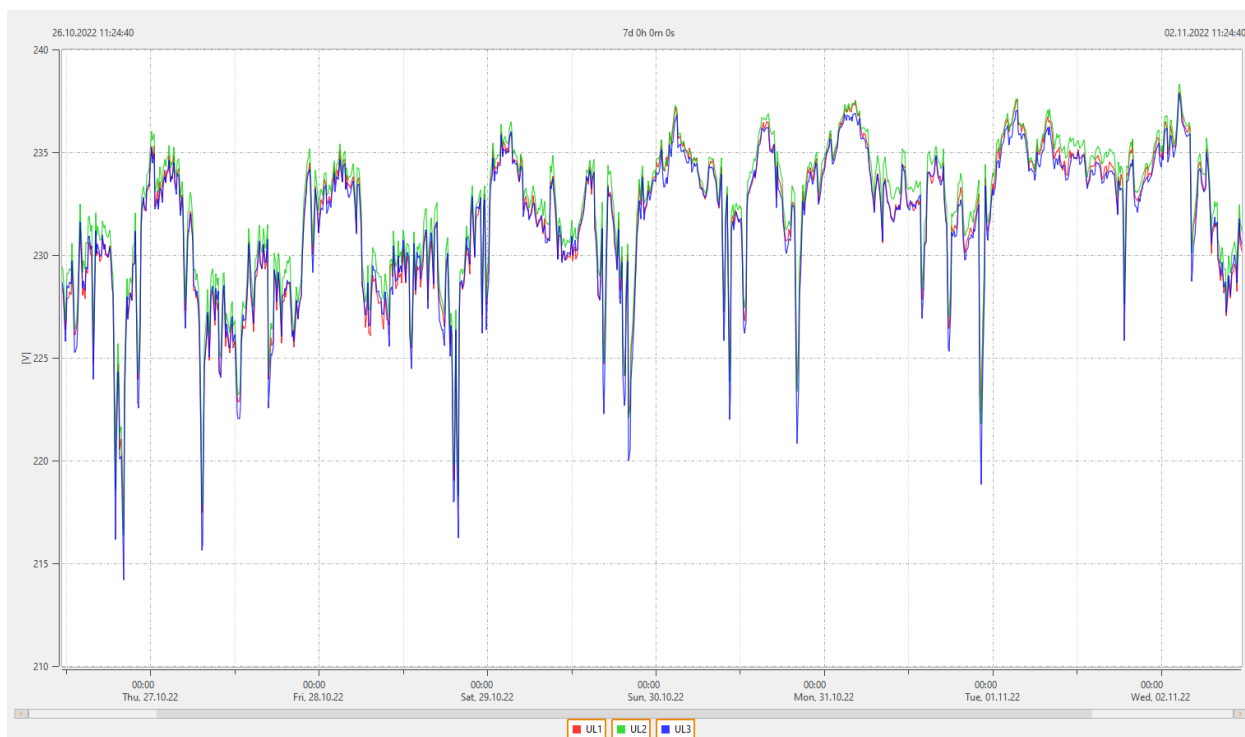
Sl. 4.3. Sumarni pregled rezultata

Na sumarnom pregledu rezultata su vidljivi osnovni parametri kvalitete električne energije te crveni pravac koji predstavlja maksimalnu dopuštenu vrijednost određenog parametra propisanog normom HRN EN 50160. Crvene trake predstavljaju udio poremećaja za 95 %, a plave za 100 % tjedna. Prvo što se na slici može uočiti zabilježena su prekoračenja harmonika. Nisu zabilježena odstupanja promjene frekvencije, kolebanja napona, naponskog treperenja, nesimetrije i THD-a s obzirom na zadanu normu. Također, nije zabilježen ni jedan naponski događaj (naponski propad, prenapon i prekid).

Mjerni su rezultati u daljnjem tekstu analizirani sukladno normi HRN EN 50160.

4.1. Kolebanje napona

Promatrano razdoblje kolebanja napona prema zadanoj normi traje jedan tjedan. Snimljene su 10-minutne usrednjene efektivne vrijednosti napona, a ograničenja norme HRN EN 50160 za nazivni napon su $\pm 10\%$ za 95 % ili $+10/-15\%$ za 5 % tjedna. Kolebanje napona za promatrano razdoblje snimljeno na punionici je prikazano dijagramom na slici 4.4.



Sl. 4.4. Dijagram kolebanja napona

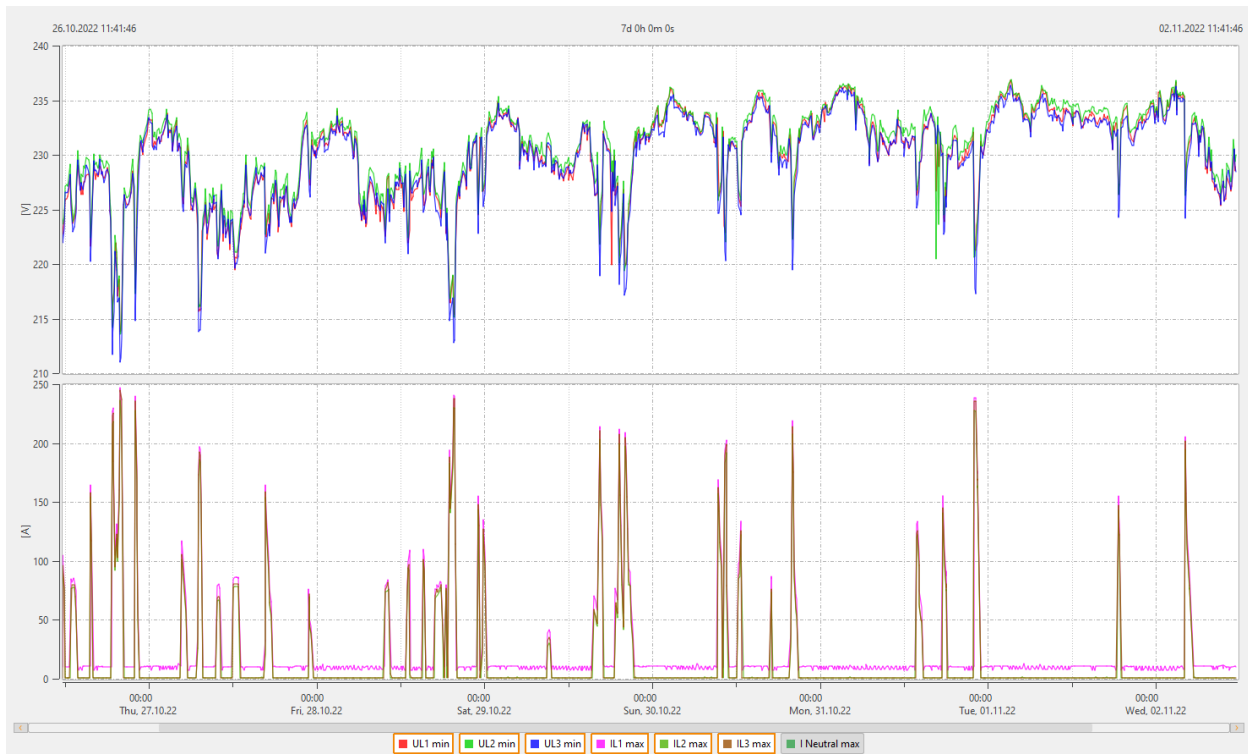
Izmjerene karakteristične vrijednosti napona pojedinih faza prikazane su u tablici 4.1.

Tablica 4.1. Granične i izmjerene karakteristične vrijednosti napona

	Granične vrijednosti, U [V]	U_{L1} [V]	U_{L2} [V]	U_{L3} [V]
Maksimalne vrijednosti napona		237,94	238,33	237,84
95 %-tne vrijednosti napona	$207 < U < 253$	236,28	236,50	235,91
Minimalne vrijednosti napona		216,70	216,41	214,19

Nazivna vrijednost napona iznosi 230 V, stoga napon ne smije porasti iznad 253 V ili pasti ispod 207 V za 95 % tjedna te porasti iznad 253 V ili pasti ispod 195,5 V za 5 % tjedna. Iz tablice 4.1. je vidljivo da ni jedna vrijednost napona ne odstupa od graničnih vrijednosti norme, stoga se može zaključiti da kolebanje napona zadovoljava uvjetima norme HRN EN 50160.

Minimalne vrijednosti napona (gornji dijagram) i maksimalne vrijednosti struja (donji dijagram) svih faza su prikazane dijagramima na slici 4.5.



Sl. 4.5. Dijagrami minimalnih vrijednosti napona (gornji dijagram) i maksimalnih vrijednosti struja (donji dijagram)

Na temelju grafičkog prikaza spomenutih vrijednosti napona i struja sa slike 4.5. može se zaključiti da su sva punjenja bila trofazna i da se radi o velikim snagama punjenja budući da padovi napona svih faza odgovaraju porastu struje svih faza na punionici. Dakle jasno je vidljiv utjecaj struja punjenja električnih automobila na napon.

4.2. Treperenje napona

Snimljene su 120-minutne usrednjene vrijednosti treperenja napona (P_{1t}) čije vrijednosti prema pravilima norme HRN EN 50160 moraju biti manje od 1 za 95 % tjedna. Treperenje napona 120-minutnih prosječnih vrijednosti (P_{1t}) za cijeli tjedan je prikazano dijagramom na slici 4.6.



Sl. 4.6. Dijagram treperenja napona 120-minutnih prosječnih vrijednosti

Izmjerene vrijednosti treperenja napona za sve tri faze i granična vrijednost prikazane su u tablici 4.2.

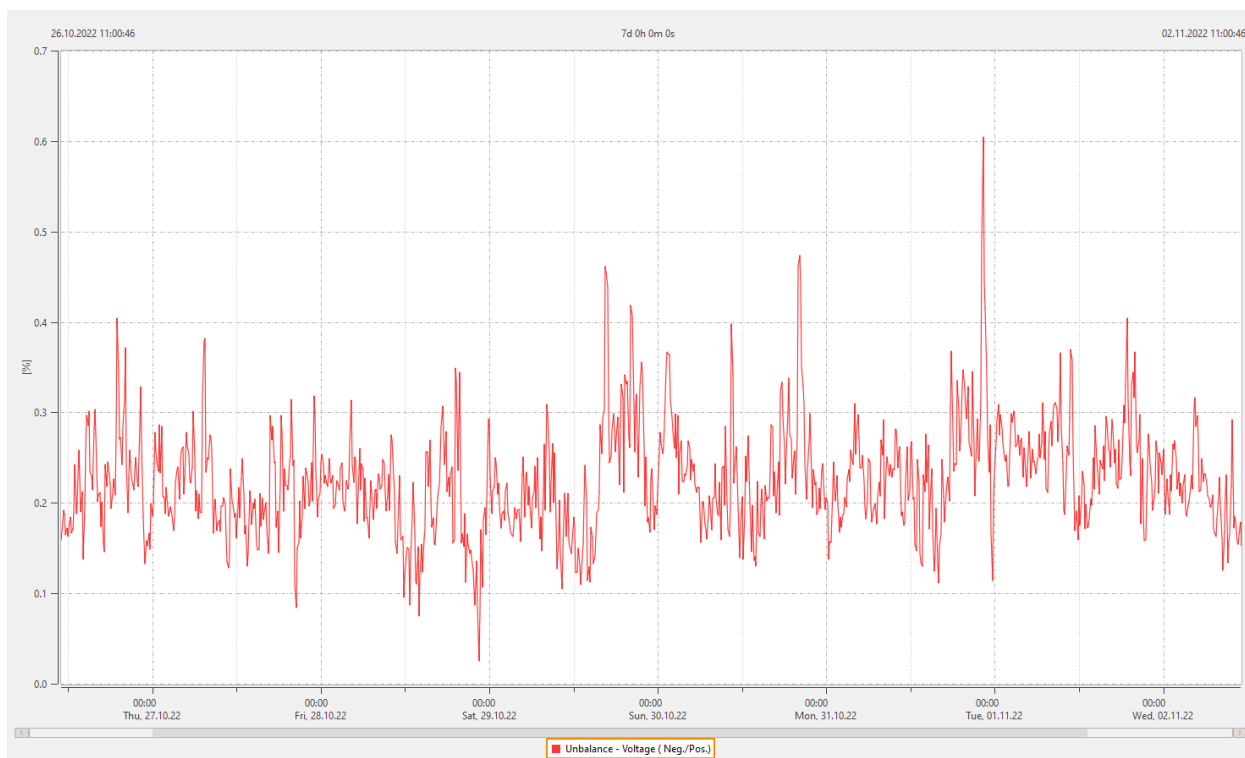
Tablica 4.2. Granična vrijednost i izmjerene vrijednosti treperenja napona

	Granična vrijednost, P_{lt}	P_{lt_1}	P_{lt_2}	P_{lt_3}
Maksimalne vrijednosti		0,54	0,54	0,54
95 %-tne vrijednosti	1	0,48	0,47	0,47

Izmjerene vrijednosti treperenja napona za sve tri faze niže su od granične vrijednosti propisane normom HRN EN 50160 te zadovoljavaju njezine uvjete.

4.3. Nesimetrija napona

Snimljene su 10-minutne usrednjene efektivne vrijednosti napona čije vrijednosti prema normi HRN EN 50160 moraju biti manje od 2 % nazivne vrijednosti napona za 95 % mjernog tjedna. Nesimetrija, odnosno odstupanje napona od nazivne vrijednosti u postotku tijekom cjelokupnog promatranog vremena prikazano je na slici 4.7.



Sl. 4.7. Dijagram nesimetrije napona

Izmjerene vrijednosti naponske nesimetrije prikazane su u tablici 4.3.

Tablica 4.3. Granična vrijednost i izmjerene vrijednosti naponske nesimetrije

	Granična vrijednost [%]	Nesimetrija [%]
Maksimalna vrijednost		0,60
95 % tjedna	2	0,33

Izmjerena vrijednost nesimetrije za 95 % tjedna iznosi 0,33 % što zadovoljava uvjetima norme HRN EN 50160.

4.1. Frekvencija

Prema zadanoj normi promatrano razdoblje za analizu frekvencije traje jednu godinu. Snimljene su usrednjene vrijednosti 10-sekundnih mjerenja frekvencija čija prosječna vrijednost ne smije odstupati $\pm 1\%$ za 99,5 % i $+4\%/-6\%$ za 100 % promatranog vremena. U tablici 4.4. prikazane su izmjerene i granične vrijednosti frekvencije.

Tablica 4.4. Granične i izmjerene vrijednosti frekvencije

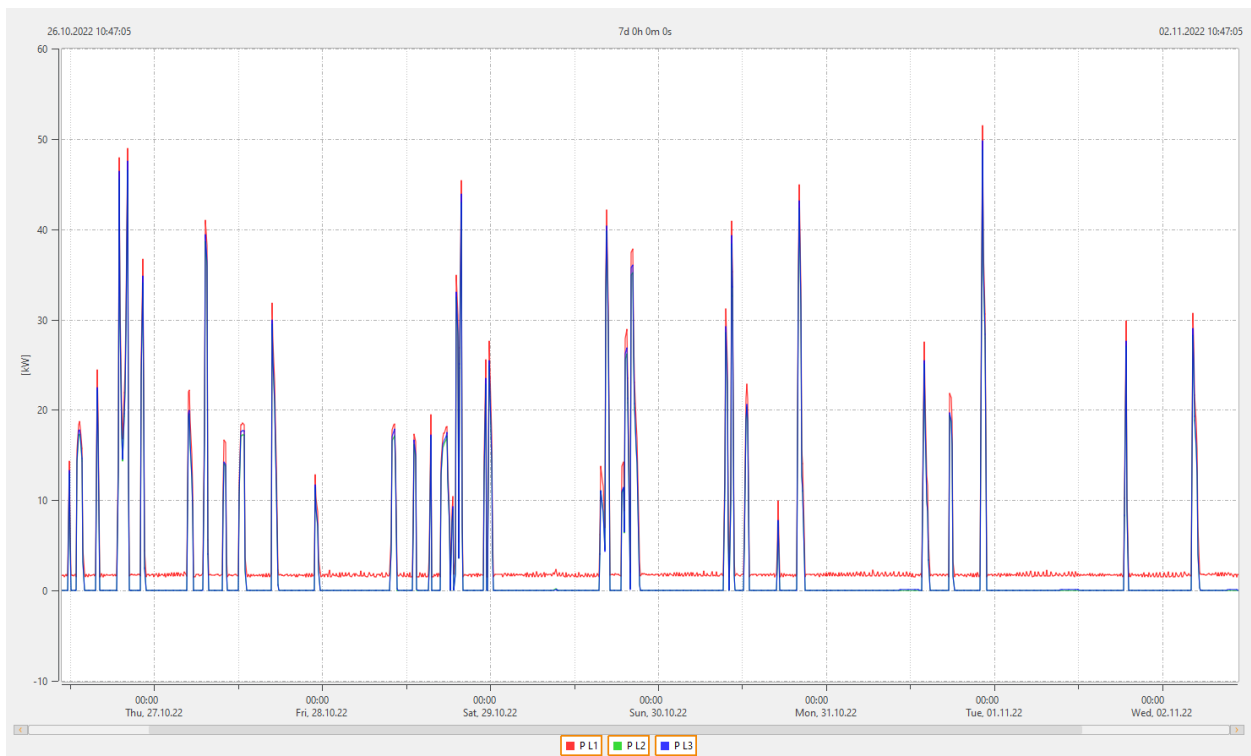
	Granična vrijednost, f [Hz]	Izmjerena vrijednost, f [Hz]
Za 99,5 % tjedna	$49,5 < f < 50,5$	$f = 50,06$
Za 100 % tjedna	$47 < f < 52$	$f_{min} = 49,90$ $f_{max} = 50,08$

Maksimalna izmjerena frekvencija na punionici iznosi 50,08 Hz, a minimalna 49,90 Hz. Maksimalno odstupanje od nazivne frekvencije iznosi 0,16 %, a minimalno -0,2 %. Odstupanja nisu velika te za promatrano razdoblje ne prelaze granične vrijednosti i ne predstavljaju smetnje koje utječu na kvalitetu električne energije.

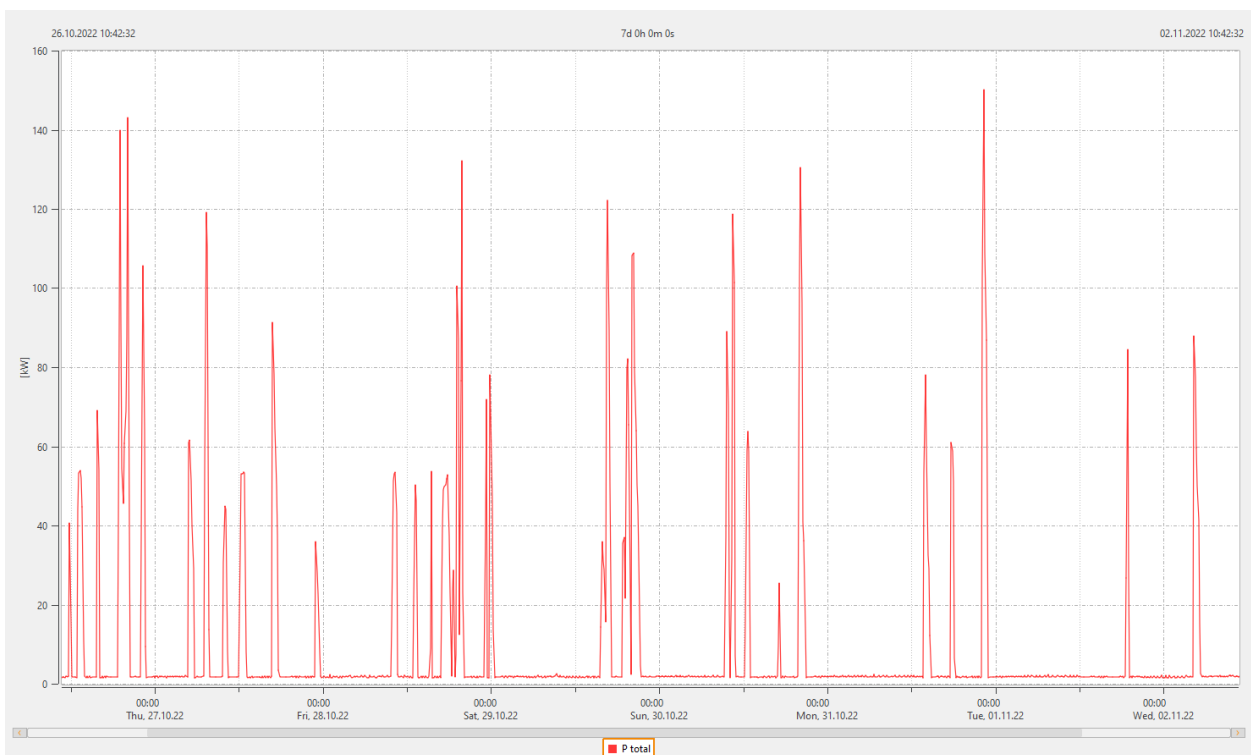
4.2. Snaga

Tijekom promatranog vremena najveća je izmjerena ukupna snaga iznosila 150,14 kW te su sva punjenja bila trofazna.

Snaga je pojedinih faza punionice prikazana dijagramom na slici 4.8. dok je ukupna snaga punionice prikazana dijagramom na slici 4.9.



Sl. 4.8. Dijagram snaga pojedinih faza na punionici



Sl. 4.9. Dijagram ukupne snage na punionici

4.3. Naponi viših harmonika

4.3.1. Ukupno harmonijsko izobličenje (THD)

Prema normi HRN EN 50160 sadržaj ukupnog harmonijskog izobličenja (THD) ne smije prekoračiti 8 % za prvih 40 harmonika.

Ukupno harmonijsko izobličenje napona za cijelo promatrano razdoblje je prikazano dijagramom na slici 4.10.



Sl. 4.10. Dijagram THD-a napona

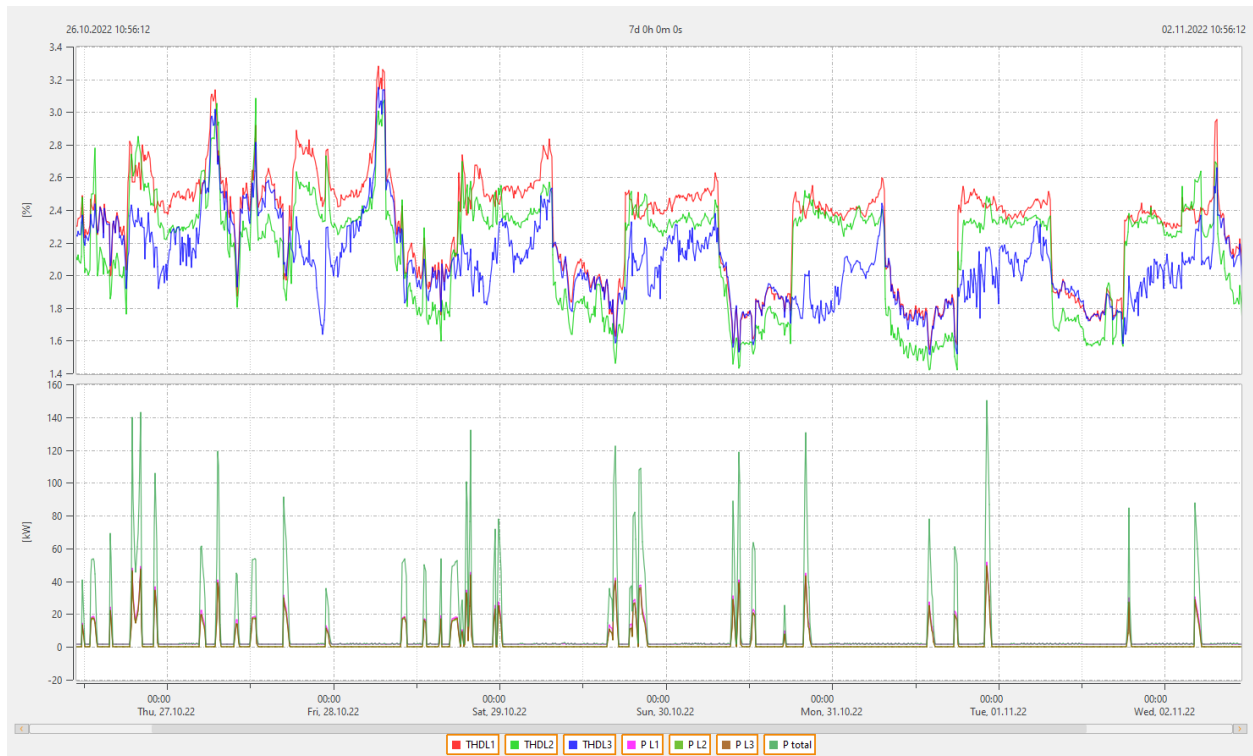
Izmjerene vrijednosti udjela ukupnog harmonijskog izobličenja napona (THD_U) prikazane su u tablici 4.5.

Tablica 4.5. Granična vrijednost i izmjerene vrijednosti THD-a napona pojedinih faza

	Granična vrijednost	Faza 1	Faza 1	Faza 2	Faza 2	Faza 3	Faza 3
THD_U [%]	8	2,74	3,28	2,58	3,09	2,50	3,15

Iz tablice je vidljivo da su udjeli ukupnih harmonijskih izobličenja svih faza unutar dozvoljenih granica, stoga se može reći da THD napona zadovoljava uvjetima norme HRN EN 50160.

Dijagrami THD-a napona (gornji dijagram) i snage (donji dijagram) su prikazani na slici 4.11.

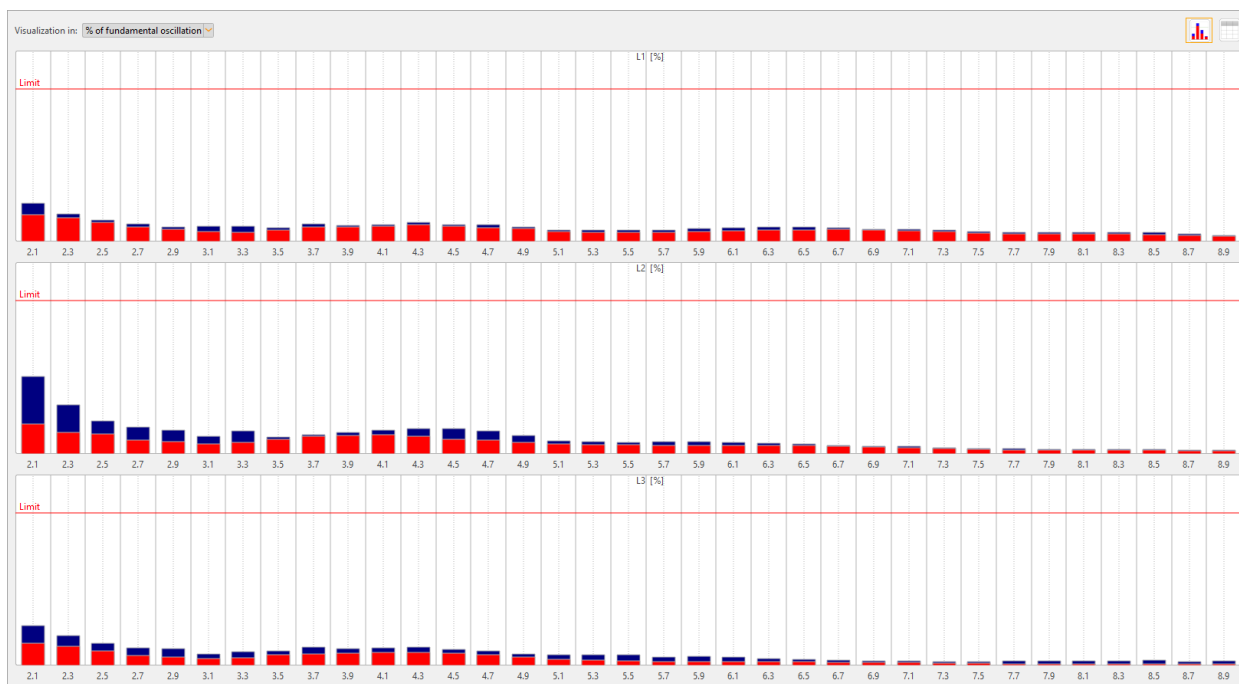


Sl. 4.11. Dijagrami THD-a napona (gornji dijagram) i snage (donji dijagram)

Na dijagramima sa slike 4.11. se može uočiti da su viši harmonici prisutni i kada je punionica izvan uporabe, odnosno na mjestima gdje je snaga minimalna, te se može zaključiti da punionica nije glavni uzročnik viših harmonika. S obzirom na to da je THD veći u noćnim satima, pretpostavlja se da je glavni uzročnik viših harmonika javna rasvjeta koja se napaja s iste trafostanice.

4.3.2. Supraharmonici (od 2 do 9 kHz)

Snimljene relativne vrijednosti supraharmonika u odnosu na osnovnu frekvenciju prikazane su na slici 4.12.



Sl. 4.12. Prikaz relativnih vrijednosti supraharmionika na pojedinoj fazi

Iako su punionice za električna vozila jedan od glavnih uzročnika supraharmionika, [2], prema slici je vidljivo da su svi supraharmionici unutar dopuštenih granica.

4.3.3. Analiza previsokih vrijednosti harmonika

Snimljene su 10-minutne prosječne efektivne vrijednosti napona čije vrijednosti prema normi HRN EN 50160 moraju biti manje od iznosa prikazanih u tablici 4.6. za 95 % tjedna.

Tablica 4.6. Granične vrijednosti napona viših harmonika (HRN EN 50160)

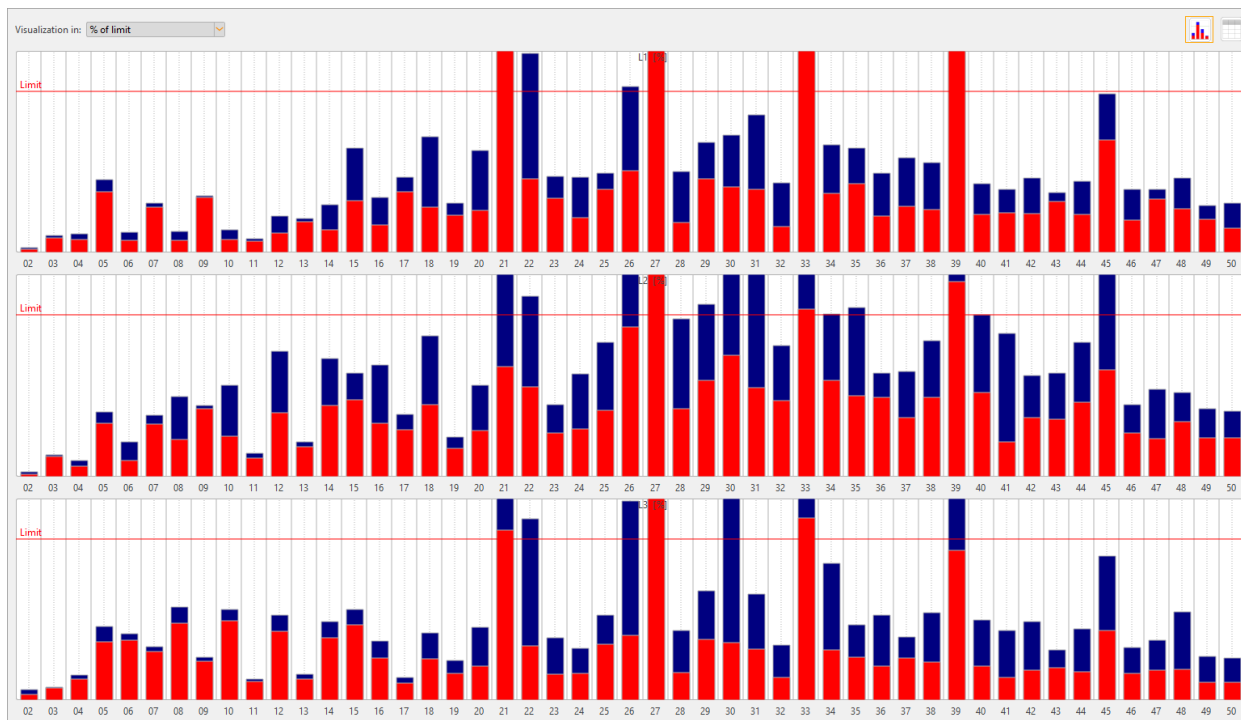
Neparni harmonici				Parni harmonici	
Nisu višekratnici 3. harmonika		Višekratnici 3. harmonika			
Redni broj harmonika h	$U_h(\%)$	Redni broj harmonika h	$U_h(\%)$	Redni broj harmonika h	$U_h(\%)$
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,5	6, ..., 24	0,5
13	3	21	0,5		
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

S obzirom na to da norma HRN EN 50160 obuhvaća napone viših harmonika do 25. reda, za analizu napona viših harmonika iznad 25. reda upotrijebljena je norma HRN EN 61000-2-2. U tablici 4.7. prikazane su granične vrijednosti napona viših harmonika propisanih normom HRN EN 61000-2-2.

Tablica 4.7. Granične vrijednosti napona viših harmonika (HRN EN 61000-2-2)

Neparni harmonici				Parni harmonici	
Nisu višekratnici 3. harmonika		Višekratnici 3. harmonika			
Redni broj harmonika h	$U_h(\%)$	Redni broj harmonika h	$U_h(\%)$	Redni broj harmonika h	$U_h(\%)$
17	2	27	0,20	10	0,50
19	1,76	33	0,20	12	0,46
23	1,41	39	0,20	14	0,43
25	1,27			16	0,41
29	1,06			18	0,39
31	0,97			20	0,38
35	0,83			22	0,36
37	0,77			24	0,35
				26	0,35
				28	0,34
				30	0,33
				32	0,33
				34	0,32
				36	0,32
				38	0,32
				40	0,31

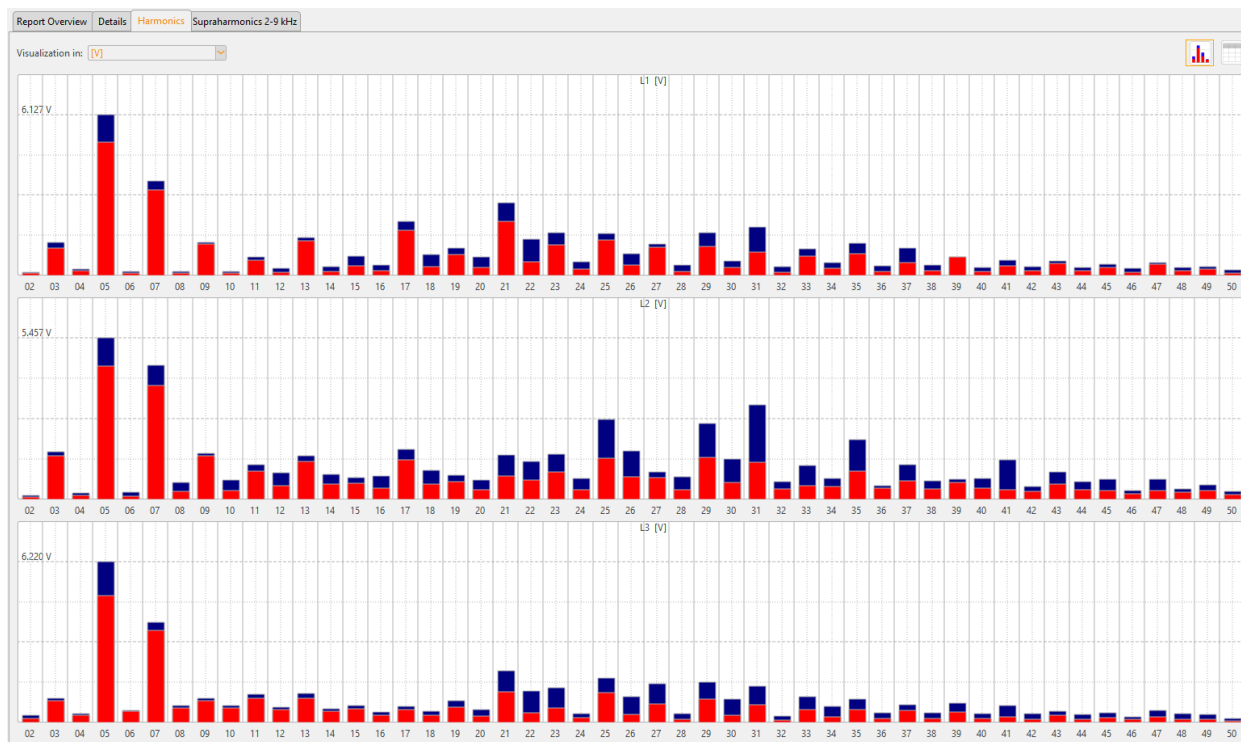
Udjeli viših harmonika (u postotku) s obzirom na osnovnu frekvenciju napona triju faza na kojima se vršilo mjerenje prikazani su na slici 4.13.



Sl. 4.13. Prikaz udjela harmonika po pojedinoj fazi

Crvene trake označavaju udio za 95 % tjedna, a plave trake označavaju udio za 100 % tjedna.

Isti naponi harmonika, samo izraženi u voltima, prikazani su na slici 4.14.



Sl. 4.14. Prikaz napona viših harmonika izraženih u voltima

Na slici 4.13. se može uočiti kako su dominantni neparni harmonici te kako izmjerene vrijednosti pojedinih naponskih harmonika prekoračuju graničnu vrijednost označenu crvenim pravcem.

U tablici 4.8. prikazane su kritične vrijednosti napona viših harmonika koje su označene crvenom bojom, a ograničene su normom HRN EN 50160. Plavom su bojom označene kritične vrijednosti za 100 % tjedna koje nisu ograničene normom, ali prelaze njenu graničnu vrijednost.

Tablica 4.8. Kritične vrijednosti napona viših harmonika obuhvaćene normom HRN EN 50160

Red harmonika	Granična vrijednost	Faza 1		Faza 2		Faza 3	
		95 %	100 %	95 %	100 %	95 %	100 %
21	0,50	0,92	1,25	0,34	0,69	0,53	0,92
22	0,50	0,23	0,62	0,28	0,56	0,17	0,56

U tablici 4.9. prikazane su kritične vrijednosti napona viših harmonika koje su označene crvenom bojom, a ograničene su normom HRN EN 61000-2-2. Plavom su bojom označene kritične vrijednosti za 100 % tjedna koje nisu ograničene normom, ali prelaze njenu graničnu vrijednost, [6].

Tablica 4.9. Kritične vrijednosti napona viših harmonika obuhvaćene normom HRN EN 61000-2-2

Red harmonika	Granična vrijednost	Faza 1		Faza 2		Faza 3	
		95 %	100 %	95 %	100 %	95 %	100 %
21	0,30	0,92	1,25	0,34	0,69	0,53	0,92
22	0,36	0,23	0,62	0,28	0,56	0,17	0,56
26	0,35	0,18	0,36	0,32	0,73	0,14	0,43
27	0,20	0,46	0,51	0,31	0,41	0,32	0,65
29	1,06	0,48	0,72	0,63	1,13	0,40	0,72
30	0,33	0,13	0,24	0,25	0,62	0,12	0,42
31	0,97	0,38	0,83	0,54	1,43	0,31	0,64
33	0,20	0,32	0,44	0,21	0,52	0,23	0,46
34	0,32	0,12	0,21	0,19	0,32	0,10	0,27
35	0,83	0,36	0,54	0,41	0,87	0,22	0,39
39	0,20	0,30	0,31	0,24	0,29	0,19	0,33

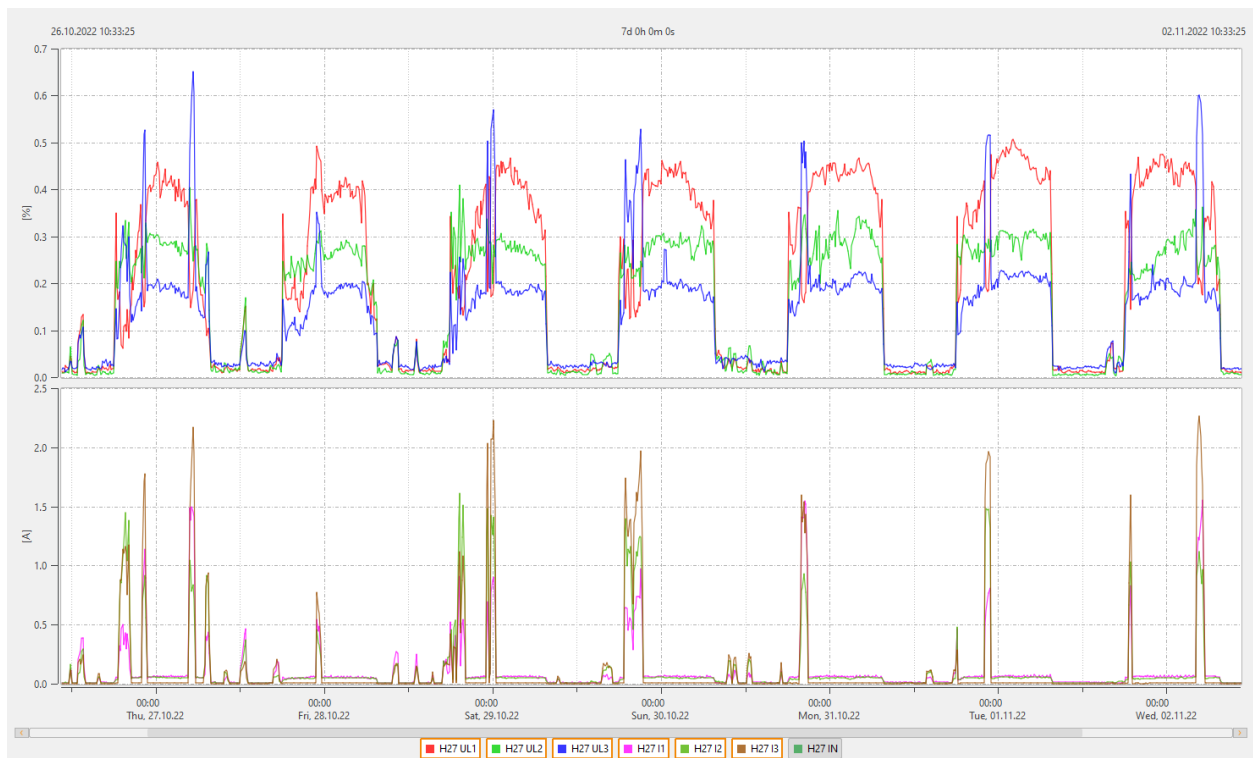
Iz tablice 4.8. je vidljivo da izmjerena vrijednost napona višeg harmonika 21. reda na fazi 1 odstupa od propisane vrijednosti zadane norme. Stoga se može reći da zbog napona višeg harmonika 21. reda na fazi 1, prikazanog dijagramom na slici 4.15., nisu zadovoljeni uvjeti norme HRN EN 50160.



Sl. 4.15. Dijagrami 21. naponskog (gornji dijagram) i strujnog (donji dijagram) harmonika na fazi 1

Na dijagramima sa slike 4.15 crvenom je bojom prikazan naponski, a zelenom strujni harmonik 21. reda. Iz dijagrama prikazanog na slici je vidljivo da struja 21. harmonika djelomično uzrokuje 21. harmonik napona – više vrijednosti su izazvane strujama punjenja, dok postoje i niže vrijednosti naponskog harmonika čija je visina stabilna tijekom svake noći u mjernom tjednu.

Normu HRN EN 61000-2-2 ne zadovoljavaju naponi viših harmonika 21., 27., 33. i 39. reda, što je vidljivo iz tablice 4.9. Kao primjer je uzet harmonik 27. reda prikazan na slici 4.16. s obzirom na to da su na njemu odstupanja zabilježena na sve tri faze.



Sl. 4.16. Dijagram 27. naponskog (gornji dijagram) i strujnog (donji dijagram) harmonika na sve 3 faze

Na dijagramu prikazanom na slici 4.16. se također može vidjeti da struja 27. harmonika djelomično uzrokuje pretjerano visoke napone harmonika istog reda. Iako je očito da postoji uzročna veza između strujnih i naponskih harmonika istog reda, vidljivo je da su naponski harmonici previsoki tokom dana i u periodima kada nema struje. Na dijagramima sa slika 4.15. i 4.16. se može uočiti da se naponski harmonici javljaju u kontinuiranim intervalima i to isključivo noću, od 18 h do sutradan u 8 h, pa je pretpostavka da je njihov glavni uzročnik javna rasvjeta spojena na istu trafostanicu na koju je spojena punionica. Snimljeni rezultati su slični i za ostale redove harmonika na kojima su zabilježene prekoračene vrijednosti. Stoga se može zaključiti da punionica za električna vozila nije glavni uzročnik previsokih vrijednosti naponskih harmonika, čemu svjedoči dijagram na slici 4.11., na kojoj je prikazano ukupno harmonijsko izobličenje napona (THD_U) i snaga (P) punionice. U promatranom tjednu je zabilježeno prosječno oko dva punjenja dnevno. S obzirom na očekivani rast broja električnih vozila, može se očekivati veći broj punjenja, što će uzrokovati još veće probleme s višim harmonicima.

5. Zaključak

Sve veći broj električnih vozila postavlja zahtjeve za proširenjem infrastrukture punionica. Kroz provedenu analizu mjerenja, harmonici, odnosno naponi viših harmonika, predstavljali su jedinu smetnju koja je prekoračila graničnu vrijednost zadanih normi. Punionice za električna vozila nisu bile primarni izvor harmonika te je utvrđeno da postoji dodatni primarni izvor harmonika – vjerojatno javna rasvjeta, koja je svakodnevni stalni izvor harmonika. Iako punionica nije bila primarni izvor harmonika, ipak je dokazano da struje punjenja viših harmonika na punionici za električna vozila uzrokuju napone viših harmonika. Naponi viših harmonika koji su prekoračili granične vrijednosti harmonici su napona 21., 27., 33. i 39. reda. Svaki je od njih višekratnik 3. harmonika, što predstavlja problem jer se oni zbrajaju u neutralnom vodiču i izazivaju njegovo zagrijavanje. S obzirom na rast broja električnih vozila očekuje se veći broj punjenja, što će dovesti do još većeg problema s višim harmonicima. Prilikom održavanja punionica u budućnosti preporučuju se redovita mjerenja i nadzor kvalitete električne energije.

LITERATURA

- [1] Surajit Chattopadhyay, Madhuchhanda Mitra, Samarjit Sengupta, „Electric Power Quality“, Springer, 2011.
- [2] Pružatelj usluga i proizvoda za mjerenje, praćenje, upravljanje i poboljšanje kvalitete i uštedu potrošnje električne energije, HyTEPS, <https://hyteps.com/power-quality/supraharmonics/>, pristup 2. lipnja 2023.
- [3] Informativna web stranica HEP-ovih punionica električnih vozila, HEP Elen, <https://elen.hep.hr/>, pristup 4. srpnja 2023.
- [4] Web trgovina dodatne opreme za punjenje električnih vozila, EV Expert, <https://www.evexpert.eu/eshop1/knowledge-center/connector-types-for-ev-charging-around-the-world>, pristup 6. srpnja 2023.
- [5] HRN EN 50160:2023 Naponske karakteristike električne energije iz javnih distribucijskih mreža (EN 50160:2022), 2023
- [6] HRN EN 61000-2-2:2008/A2:2019, Elektromagnetska kompatibilnost (EMC) -- Okoliš -- Razine kompatibilnosti za niskofrekvencijske vođene smetnje i dojavu u javnim niskonaponskim energetske sustavima (IEC 61000-2-2:2002/am2:2018; EN 61000-2-2:2002/A2:2019), 2019
- [7] Informativna web stranica tvrtke A. Eberle, <https://www.a-eberle.de/en/products/mobile-power-quality-analyzer-pq-box-200/>, pristup 6. srpnja 2003.

SAŽETAK

U ovom diplomskom radu opisani su pokazatelji kvalitete električne energije i provedena je analiza mjerenja kvalitete električne energije na punionicama električnih vozila. Kroz provedenu analizu mjerenja, naponi viših harmonika predstavljali su jedinu smetnju koja je prekoračila graničnu vrijednost zadanih normi. Posljednjih godina broj električnih vozila u Europskoj uniji, ali i općenito u svijetu, ubrzano raste. Električni automobili su učinkovitiji od automobila na fosilna goriva, imaju bolja vozna svojstva, i što je najvažnije ne ispuštaju plinove tijekom vožnje. Još uvijek postoje neki izazovi vezani uz električne automobile. Spremanje energije, odnosno baterije, još uvijek su u razvoju kako bi se povećao domet automobila. Još veći izazov predstavlja infrastruktura za punjenje automobila – postavljaju se punionice sve većeg kapaciteta kako bi se skratilo vrijeme punjenja. Sve veći broj punionica donosi nove izazove, a važno je pitanje kakav utjecaj imaju punionice automobila na kvalitetu električne energije. U radu je prikazana detaljna analiza utjecaja punionica električnih automobila na kvalitetu električne energije u distribucijskoj elektroenergetskoj mreži.

Ključne riječi: kvaliteta električne energije, harmonici, punionica za električna vozila

ABSTRACT

Analysis of higher harmonics content in electric vehicle charging station

In this master's thesis, indicators of power quality are described and an analysis of power quality measurements at electric vehicle charging stations is carried out. Through the analysis of measurements, voltages of higher harmonics represented the only disturbance that exceeded the limit value of the given norms. In recent years, the number of electric vehicles has been growing rapidly in the European Union, and in the world in general. Electric cars are more efficient than fossil fuel cars, they have better driving characteristics, and most importantly they do not emit gas while driving. There are still some challenges related to electric cars. Energy storage, or batteries, are still under development to increase the range of cars. Even bigger challenge is the car charging infrastructure – charging stations of increasing capacity are being installed to shorten charging times. The growing number of charging stations brings new challenges, and an important question is what impact car charging stations have on the power quality. The paper presents a detailed analysis of the impact of electric car charging stations on the power quality in the distribution power grid.

Keywords: Power quality, harmonics, charging station

ŽIVOTOPIS

Autor ovog diplomskog rada, Filip Đaković, rođen je 16. srpnja 1997. godine u Osijeku. Pohađao je Osnovnu školu Ivana Filipovića u Osijeku te je istu završio 2012. godine. Nakon osnovne škole upisao je srednju Elektrotehničku i prometnu školu Osijek, četverogodišnji smjer Tehničar za elektroniku, te je istu završio 2016. godine. Nakon srednje škole upisao je Stručni studij elektrotehnike, smjer Elektroenergetika na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku kojeg je završio 2020. godine. Na istom je fakultetu odmah po završetku stručnog studija upisao razlikovne obveze uvjetovane za pohađanje diplomskog studija. Diplomski studij Elektrotehnike, smjer elektroenergetika, izborni blok DEA (Elektroenergetski sustavi) upisao je 2021. godine te završio 2023. godine.

Potpis autora