

# Kvaliteta električne energije - supraharmonici

---

**Baričević, Milan**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2022**

*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:200:550575>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-10**

*Repository / Repozitorij:*

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



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

Diplomski sveučilišni studij

Kvaliteta električne energije-supraharmonici

Diplomski rad

Milan Baričević

Osijek, 2022.

**Style Definition:** Heading 1: Font: 18 pt, Font color: Custom Color(74;74;74), Space Before: 0 pt, After: 11,25 pt, Line spacing: At least 18 pt, Border: Bottom: (Single solid line, Custom Color(228;226;226)), 0,75 pt Line width, From text: 8 pt Border spacing: ), Pattern: Clear (White)

# SADRŽAJ

|   |    |
|---|----|
| 1. UVOD .....   | 1  |
| 2 HARMONICI.....  | 3  |
| 2.1 Definicija harmonika.....   | 3  |
| 2.2 Redni broj harmonika h.....   | 10 |
| 2.3 Utjecaj harmonika na opremu, THD i TDD .....  | 11 |
| 2.4 Nelinearna opterećenja.....   | 16 |
| 2.5 Harmonijski filteri .....   | 25 |
| 2.6 Harmonijski analizatori .....   | 28 |
| 2.7 Ekonomija kvalitete električne energije.....  | 31 |
| 3. SUPRAHARMONICI.....  | 36 |
| 3.1 Definicija supraharmenika .....   | 36 |
| 3.2 Primarna i sekundarna emisija.....  | 37 |
| 3.3 Izvori supraharmenika.....  | 37 |
| 3.4 Emisije, imunitet i interakcija supraharmenika.....   | 38 |
| 3.5 Ispitivanje, modeliranje i simulacija supraharmenika.....   | 39 |
| 3.6 Standardizacija supraharmenika.....   | 42 |
| 3.7 Vrijednovanje supraharmenika do 150 kHz kod električnih vozila - Sveučilište primjenjenih znanosti Bingen ..... | 43 |
| 4. ANALIZA MJERENJA PUNIONICE ZA ELEKTRIČNE AUTOMOBILE.....   | 59 |
| 4.1 Statistika .....  | 60 |
| 4.2 Granične vrijednosti .....  | 61 |
| 4.3 Harmonici 2-50.....   | 63 |
| 4.4. Supraharmenici 2-9 kHz .....   | 64 |
| 4.5 Supraharmenici 9-150 kHz.....   | 66 |
| 5. ZAKLJUČAK .....  | 79 |
| LITERATURA.....   | 81 |
| SAŽETAK.....  | 82 |
| ABSTRACT.....   | 83 |
| ŽIVOTOPIS.....  | 84 |

# 1. UVOD

Harmonici opisuju izobličenja valnih oblika normalne (sinusoidalne) električne struje, a uzrokovani su djelovanjem nelinearnih opterećenja. Uzrok nelinearnih opterećenja ~~dolazi prilikom mijenjanja glatkog idealni sinusnog sinusni~~ vala u nepravilni iskrivljeni oblik vala ~~koji dovodi do stvaranja harmonika~~. Neke od štetnih posljedica koje harmonici mogu uzrokovati su: pregrijavanje transformatora, ~~kablova od napajanja vodova u elektroenergetskoj mreži~~, motora itd.

Svrha ovog diplomskog rada je prikaz utjecaja harmonika te supraharmionika na kvalitetu električne energije. Pomoću softvera za analizu WinPQ mobil ~~prikazana je prikazat će se~~ analiza mjerenja punionice za električne automobile. Analiza je izvršena pomoću mrežnog analizatora ~~A-eberle~~ PQ-BOX 200 ~~kroz-tijekom~~ 7 radnih dana gdje će se grafičkim putem pobliže moći vidjeti vrijednosti veličina kao što su: harmonici 2-50. reda, supraharmionici od 2-9 kHz, supraharmionici 9-150 kHz, itd. u odnosu na postavljene limite.

U drugom poglavlju opisan je teorijski dio harmonika te glavni razlog njihovog postanka, a to su nelinearna opterećenja. Matematički je definiran izraz pri kojem se prikazuju harmonici. Objasnjena je definicija „~~harmonijski brojred harmonika  $h$~~ “ – što predstavlja, kako se određuje te prednosti njegovog korištenja, kao i ~~negativni~~ utjecaji koje harmonici imaju na opremu unutar elektroenergetskog sustava kao što su: kondenzatori, motori, prekidači, releji, transformatori itd. ~~Prethodno spomenuta nelinearna opterećenja pobliže su objašnjena na koji način utječu na stvaranje harmonika~~ Pobliže su objašnjena nelinearna opterećenja te njihov ~~utjecaj na stvaranje harmonika~~. Zatim ~~k-~~kako utječu na pojedine dijelove unutar sustava i na samu opremu te na faktor snage. Prikazani su načini na koji se utjecaj harmonika može smanjiti ili u potpunosti ukloniti, kao i ~~uređaji-analizatori~~ kojima se prikazuju harmonici u tehnici. Završetak poglavlja objašnjava ekonomiju kvalitete električne energije prilikom djelovanja harmonika.

U trećem je poglavlju definiran pojam supraharmionika, emisije koje utječu na njih, dosadašnja izvršena ispitivanja, mjerenja, načini modeliranja i simulacija supraharmionika te ponešto o njihovoj standardizaciji. Predstavljeno je istraživanje Sveučilišta u Bingenu o utjecaju supraharmionika kod električnih vozila tijekom njihovog punjenja.

**Commented [zk1]:** Ne razumijem kakav je to harmonijski broj? Ako je u pitanju red harmonika, onda označavamo s „h“!

Posljednje, četvrto poglavlje, [sadrži analizu](#) sedmodnevnog mjerenja [kvalitete električne energije na punionici](#) za [električne automobile](#). [Analizom su detaljno obuhvaćeni harmonici](#) 2-50. reda, [te supraharmonici](#) 2-9 kHz prilikom punjenja automobila.

## 2. HARMONICI

### 2.1 Definicija harmonika

Harmonici su obično uzrokovani nelinearnim opterećenjima, kao što su pogoni s podesivom brzinom, upravljanje [grijanjem](#), elektronička prigušnica za fluorescentnu rasvjetu, sklopna napajanja, medicinska oprema za testiranje, filteri, ispravljači itd. [\[1\]](#).

U novije vrijeme harmonici se slikovitije dočaravaju kao čisti tonovi koji čine jedan kompozitni ton u glazbi, pri tome se čisti ton može definirati kao glazbeni zvuk jedne frekvencije, odnosno kombinacija više čistih tonova čini kompozitni zvuk. Zvučni valovi najkraće su definirani kao elektromagnetski valovi koji pri tome putuju kroz prostor kao jedna periodična funkcija vremena. [\[2\]](#).

Napon i struje harmonika imaju negativan utjecaj na korisnost i opremu krajnjeg potrošača. Harmonici dovode do pregrijavanja transformatora, [vodova u elektroenergetskoj mreži](#) i motora te dolazi do nenamjernog okidanja releja i netočnih rezultata mjerenja napona i struje na brojilima.

Naponski harmonici kod motora, osim pregrijavanja, mogu uzrokovati i zagrijavanje rotora, pulsirajući ili smanjeni zakretni moment.

Naponski harmonici proizlaze iz međudjelovanja harmonijskih struja s impedancijom elektroenergetskog sustava prema Ohmovu zakonu:

$$V = \frac{I}{Z}$$

gdje je:  $V$  = napon [V]

$I$  = struja [A]

$Z$  = impedancija [ $\Omega$ ]

Zbog svih štetnih utjecaja od strane harmonika, od strane IEEE, [1992](#) godine uveden je standard za harmonike pod nazivom [IEEE](#) preporučene prakse i zahtjevi za upravljanje harmonicima u elektroenergetskom sustavu (IEE 519-[1992](#)). IEE 519:[2014](#) standard

**Commented [zk2]:** Premal je razmak između ovog naslova i teksta.

**Commented [b3R2]:**

**Commented [zk4]:** Ako se pozivaš na literaturu na kraju rečenice, kao ovdje, onda ide zarez, pa broj u uglatoj zagradi pa točka – kao što sam ovdje prepravio. Ispravi to u cijelom radu!

**Commented [zk5]:** Ima novija verzija – provjeri i prepravi!

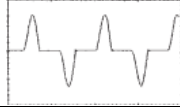
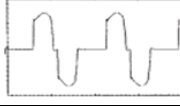
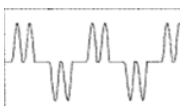
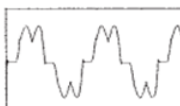
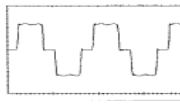
postavlja gornju dozvoljenu granicu izobličenja struje od 5% kako bi se spriječila moguća pregrijavanja transformatora. Maksimalni raspon prenapona za transformatore je 5% pri nazivnom opterećenju ili 10% ako ne postoji opterećenje. Standard IEE 519:2014 postavlja nove metode kao što su: IEE 61000-4-7 standard za mjerenje harmonika i međuharmonika, IEE 61000-4-30 za mjerenje kvalitete električne energije te IEE 61000-4-15 za metode mjerenja treperenja, [1].

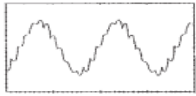
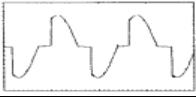
Elektronička oprema ne može izdržati faktor izobličenja napona višeg od 5%, s jednim harmonikom ne više od 3% nazivnog napona. Viši harmonici rezultiraju nepravilnim radom, odnosno, dolazi do kvara opreme. Najčešće se amplitude harmonika izražavaju u odnosu na amplitudu osnovnog harmonika pa se npr. kaže da je treći harmonik 80%, a peti 60%. Dakle, misli se na postotnu vrijednost u odnosu na osnovni harmonik, [6].

Prema Tablici 2.1. mogu se vidjeti različiti tipove nelinearnih opterećenja i njihovih strujnih valnih oblika.

Commented [zk6]: Vidi je li isto u novom standardu!

Tablica 2.1. Tipovi nelinearnih opterećenja i njihovih strujnih oblika [1]

| Tip opterećenja  | Valni oblik   | Tipično strujno izobličenje   |
|--|---|---|
| Jednofazno napajanje   |  | 80% ( <del>visoko treće</del> visok treći harmonik)   |
| <del>Polupretvornik</del> Poluispravljač   |  | <del>Visoko drugo, treće,</del> Visok drugi, treći i četvrti harmonik pri djelomičnom opterećenju |
| 6-pulsni <del>ispravljač pretvarač</del> s kapacitivno zaglađivanjem <del>kondenzatorom za glačanje, nema serijskog induktivitet</del> a nije u seriju spojena prigušnica                    |  | 80%   |
| 6-pulsni ispravljač s kondenzatorom za glačanje, u seriju spojena prigušnica<br>6-pulsni pretvarač, kapacitivno zaglađivanje uz serijski induktivitet veći od 3%, ili <del>de-DC</del> pogon |  | 40%   |
| 6-pulsni <del>ispravljač pretvarač</del> sa velikom <del>in</del> induktorom prigušnicom za strujno zaglađivanje glačanje  |  | 28%   |

|  |   |                |
|--|---|----------------|
| 12-pulsni pretvarač                    |  | 15%            |
| <a href="#">Ae-AC</a> regulator napona |  | varira s kutom |

Napon ( $V$ ) te struja ( $I$ ) su dva glavna elementa kod određivanja harmonika, u ovisnosti o vremenu ( $t$ ). Samim time naponi i struje se mogu prikazati u obliku sinusoidnih funkcija:

Naponska funkcija

$$v(t) = V \sin(\omega t) \quad (2.1.)$$

Trenutna (strujna) funkcija

$$i(t) = I \sin(\omega t \pm \varnothing) \quad (2.2.)$$

gdje je  $\omega$  kružna frekvencija valnog oblika, a  $\varnothing$  predstavlja razliku faznih kutova između napona i struje na zajedničkoj osi. Kut  $\varnothing$  bit će pozitivan u slučaju kada struja prednjači naponu, a negativan kada struja zaostaje za naponom za određeni kut.

Harmonici se matematički definiraju kao komponente s frekvencijom koja je cjelobrojni višekratnik osnovne frekvencije ~~koja te~~ se može izraziti pomoću klasične teorije pojedinačnih Fourierovih nizova.

Pri tome se koristi pojednostavljeni Fourierov izraz:

$$v(t) = V_0 + V_1 \sin(\omega t) + V_2 \sin(\omega t) + V_3 \sin(\omega t) + \dots + V_{h\pi} \sin(\omega t) + V_{h\pi} + 1 \sin((h\pi + 1)\omega t) \dots \quad (2.3.)$$

oblika,  $V_1, V_2$  i  $V_3, \dots$ ,

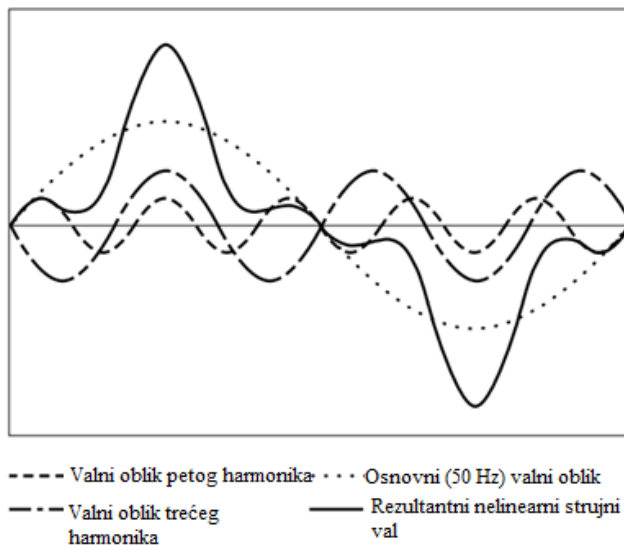
$V_h$  predstavljaju vršne vrijednosti harmonika periodičnih valnih oblika.

Kao što se može vidjeti iz priloženog, Fourierov niz također se može nazvati i beskonačnim nizom.

Osnovni, odnosno, prvi harmonik, sadrži frekvenciju  $f$ , drugi harmonik ima frekvenciju  $2*f$ , a treći harmonik sadrži u sebi frekvenciju  $3*f$ , što dovodi do zaključka kako  $h$ -ti harmonik ima frekvenciju  $h*f$ .

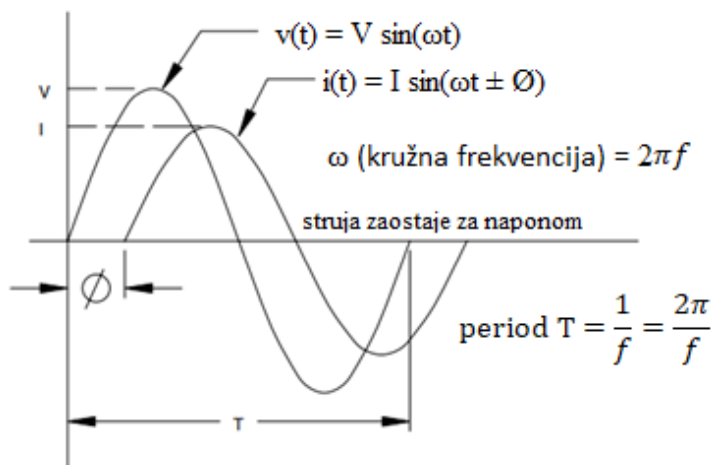
Ako bi uzeli da je osnovna frekvencija  $f = 50$  Hz, onda bi drugi harmonik imao 100 Hz, a treći bi imao 150 Hz. Prema Slici 2.1. mogu se vidjeti valni oblici spomenutih harmonika. Slika 2.2. prikazuje valne oblike napona ( $V$ ) i struje ( $I$ ) u ovisnosti o vremenu ( $t$ ). [2].

Formatted: Font: Not Italic



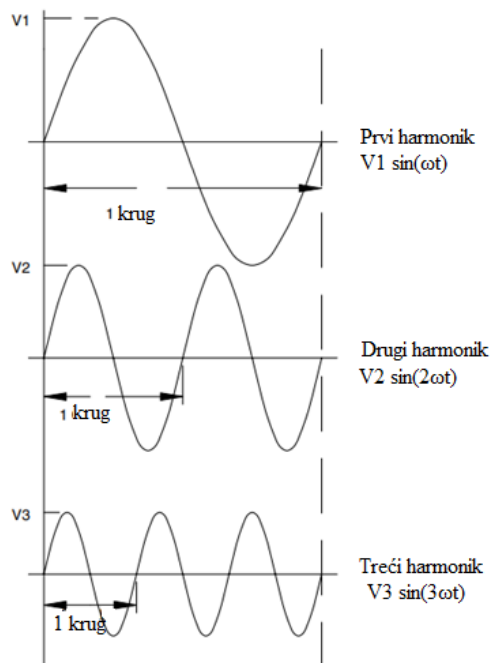
Slika 2.1. Prikaz harmonijskih valnih oblika [2]





Slika 2.2. Prikaz sinusoidnih funkcija napona i struje u vremenu ( $t$ ) [1]

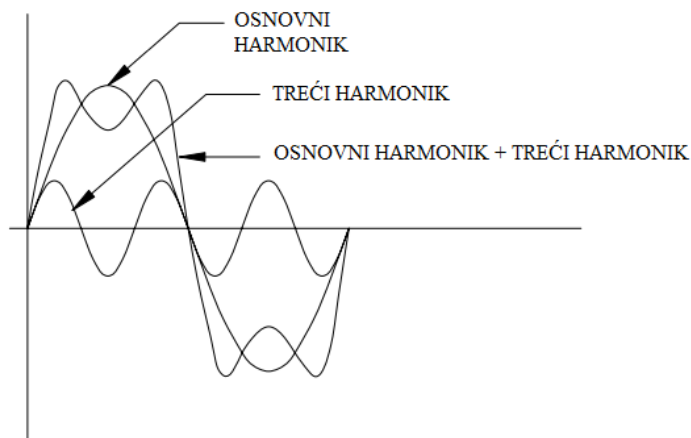
Funkcije koje zaostaju su označene negativnim faznim kutom, a one funkcije koje prednjače su označene pozitivnim faznim kutom. Prema Slici 2.3. može se vidjeti kako drugi harmonik prolazi kroz dva savršena ciklusa unutar jednog ciklusa, a treći harmonik prolazi kroz tri savršena ciklusa unutar jednog ciklusa.



Slika 2.3. Valni oblici trenutnog (osnovnog), drugog i trećeg harmonika [2]

Kako bi se pronašli razlozi nesinusoidnog napona i struje na dijelovima opreme, potrebno je odrediti zasebno svaki harmonik za sebe, a nakon toga se vektorski zbrajaju rezultati i to se može vidjeti na Slici 2.4. gdje postoji stvaranje nelinearnog valnog oblika kombiniranjem temeljnog i trećeg harmonika frekvencijskih valnih oblika.

U ovom slučaju koristit će se izraz koji će sadržavati samo sinusne članove. Važno je za istaknuti da sinusni članovi, a isto tako i kosinusni članovi, utječu jedino na sami kut pomaka kod harmonijskih komponenti i na oblik nelinearnog vala, ali isto tako ne mijenjaju koncept Fourierovog niza.



Slika 2.4. Prikaz nelinearnog valnog oblika kombiniranjem temeljnog i trećeg harmonika [2]

U konačnici, češće je korišten Fourierov izraz prema jednadžbi (2.3) za periodični naponski val s osnovnom mu kružnom frekvencijom  $\omega = 2\pi f$ .

$$v(t) = V_0 + \sum (a_k \cos k\omega t + b_k \sin k\omega t) - \text{za } k = 1 \text{ do } \infty \quad (2.4)$$

gdje su:  $a_k$  i  $b_k$ - koeficijenti pojedinačnih harmonijskih članova, odnosno, komponente.

Navedeni koeficijenti harmonijskih članova funkcije (t) iz izraza (2.3) izračunavaju se prema:

$$a_k = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \cdot \cos kt \, dt, (k = 1, 2, 3, \dots, h) \quad (2.5)$$

$$b_k = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \cdot \sin kt \, dt, (k = 1, 2, 3, \dots, h) \quad (2.6)$$

Koeficijenti prikazuju vršne vrijednosti zasebno svakog harmonijskog člana kod nelinearnih periodičnih funkcija prikazane kao  $f(t)$ .

U nekim uvjetima, sinusni i kosinusni članovi mogu nestati, što na kraju dovodi do jednostavnijeg izraza. U slučaju da je funkcija parna, a to znači da je  $f(-t) = f(t)$ , dio pod sinusom nestaje, u slučaju da je neparna funkcija, gdje je  $f(-t) = -f(t)$ , onda dio pod kosinusom nestaje. Svi ovi podaci su prijeko potrebni za rješavanje problema koji se odnosi na kvalitetu električne energije koja se odnosi na harmonike [1].

## 2.2 Redni broj harmonika h

Redni broj harmonika ( $h$ ) prikazuje pojedinačne frekvencijske komponente koji predstavljaju kompozitni valni oblik. U slučaju da je  $h = 5$  može se reći kako se odnosi na komponentu petog harmonika te frekvencijom koja je  $5 \cdot f$ . Ako je temeljna (osnovna) frekvencija  $f = 50$  Hz, tada je frekvencija petog harmonika 250 Hz

Dva su razloga zašto se koriste redni brojevi harmonika h umjesto harmonijskih frekvencija. Prvi razlog su situacije u kojima frekvencija odstupa u različitim zemljama, kao što je SAD, gdje frekvencija iznosi 60 Hz, dok Europa, a i veći do zemalja Azije, koriste frekvenciju od 50 Hz. Također je moguće vidjeti i kako zrakoplovne industrije koriste frekvenciju od 400 Hz. Poneki AC sustavi mogu koristiti 25 Hz. Zbog svega toga se koriste redni brojevi harmonika kako bi se pojednostavio način na koji ih prikazujemo. Drugi razlog je pojednostavljenje prilikom korištenja matematičkih izračuna koji se na njih odnose.

Neparni harmonici su oni koji sadržavaju neparne brojeve: 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, itd., a parnim harmonicima pripadaju oni koji imaju parne brojeve: 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, itd.

Redni broj harmonika 1 predstavlja osnovnu komponentu frekvencijskog periodičnog vala dok harmonik s rednim brojem 0 predstavlja istosmjernu (DC) komponentu valnog oblika. Izmjenična (AC) komponenta prikazuje razliku između pozitivne i negativne polovice jednog ciklusa valnog oblika.

DC komponente valnog oblika imaju negativni odraz, osobito prema transformatorima gdje može doći do zasićenja jezgre. Do zasićenja dolazi zbog rada jezgre unutar magnetskog polja iznad koljena krivulje magnetiziranja. Transformatori se inače koriste uvijek ispod koljena krivulje, u trenutku kada se istosmjerni naponi i struje primjenjuju na namotu transformatora, te su u jezgri transformatora postavljena istosmjerna magnetska polja. Prilikom sume AC i DC polja može doći do pomicanja rada transformatora iza koljena krivulje zasićenja. Rad unutar područja zasićenja omogućuje veliku snagu uzbude za elektroenergetski sustav. Pri tome dolazi do velikog porasta gubitaka kod transformatora jer dolazi do prekomjernog zagrijavanja i porasta temperature te isto tako dolazi do pojačanih vibracija jezgre [2].

Neravnomjerna struja između pozitivne i negativne polovice jednog ciklusa rada može dovesti i do pojave harmonika, zbog neujednačenog rada, ili može dovesti do problema sa strujnim

krugom. Struje magnetiziranja sadržavaju značajne količine harmonijskih komponenti. Subharmonici imaju frekvencije koje se nalaze ispod osnovne frekvencije i rijetko se nalaze u elektroenergetskom sustavu. Uzrok subharmonika (podharmonika) je rezonancija između harmonijskih struja ili napona s kapacitetom i induktivnosti elektroenergetskog sustava. Među subaharmonike pripadaju one vrijednosti harmonika čije su frekvencije dio osnovne frekvencije signala, a to su: 30 Hz, 25 Hz, 16 Hz, 2/3 Hz itd. [7].

Subharmonici se mogu generirati na način da se dovede sustav koji je visoko induktivan (npr. lučna peć tijekom svog pokretanja) ili ako elektroenergetski sustav sadrži veliki kondenzator za ispravljanje faktora snage ili filtriranje. Takvi uvjeti dovode do smanjenih oscilacija koje su u većini slučajeva neprigušene, što dovodi do pada napona. Međuaharmonicima (interaharmonicima) nazivamo harmonike čija frekvencija nije cjelobrojni umnožak osnovne frekvencije, tako da bi za 50 Hz mrežu vrijednost od 70 Hz pripadala međuaharmonicima. [7].

### 2.3 Utjecaj harmonika na opremu, THD i TDD

Utjecaj harmonika na opremu može se podijeliti na 7 podskupina:

#### 1. Kondenzator

Kondenzatorske baterije su projektirane na način da izdrže opterećenja od 15%, u Europi do 30%. Kada se te vrijednosti premaše, prilikom utjecaja napona viših harmonika može doći do njihovog pregrijavanja. Strujna i naponska rezonancija između kondenzatora i ostatka mreže može dovesti do Strujna i naponska rezonancija između kondenzatora i ostatka mreže može dovesti do Strujna i naponska rezonancija između kondenzatora i ostatka mreže može dovesti do pregrijavanja kondenzatora, čime dolazi do smanjenja životnog vijeka kondenzatorske baterije, a samim time i do povećanja gubitaka.

Suhi kondenzatori ne mogu raspršiti toplinu na najbolji način te dolazi do velike osjetljivosti na djelovanje od strane harmonika i do raspada dielektričnog materijala.

Kondenzatori koji se koriste u računalima posebno su osjetljivi zato što su, u većini slučajeva, nezaštićeni osiguračima i relejima.

Commented [zk7]: Ovo nema smisla! Prepravi rečenicu!

Kao rezultat, zaključuje se da zagrijavanjem kondenzatora dolazi zbog povećanih dielektričnih gubitaka. Mogući su kratki spojevi, neispravnost osigurača te eksplozija kondenzatora.

## 2. Transformator

Naponski harmonici uzrokuju povećanje napona transformatora, također dolazi do pojačanog „stresa“ na izolaciju. Posljedično dolazi do povećanog zagrijavanja transformatora, smanjenja životnog vijeka transformatora te povećane količine gubitaka u bakru i željezu. Ukoliko se premaši dozvoljeni izolacijski napon, moguć je proboj izolacije.

## 3. Motori

Neki učinci kojim harmonici negativno utječu na rad motora su:

1. Povećano zagrijavanje zbog gubitka u željezu i bakru
2. Veća emisija buke u usporedbi sa sinusoidalnom uzбудom.
3. Struje harmonika u rotorskom dijelu.

Strujni harmonici kod rotora mogu dovesti do povećanog zagrijavanja rotora i pulsirajućeg ili smanjenog zakretnog momenta.

Struje harmonika uzrokovane su harmonicima nastalima u statorskom namotaju koji proizvode struje harmonika u rotoru, primjerice 5. i 7. red harmonika statora proizvode 6. red harmonika rotora, a također harmonici 11. i 13. reda harmonika statora dovest će do proizvodnje 12. reda harmonika rotora.

Naponski harmonici proizvode magnetna polja koja pri tome rotiraju brzinom koja odgovaraju frekvenciji harmonika.

Spomenuti gubici u kod željezu i bakru kreću se u granicama od 5-10 %. Dolazi do pojave napona „stresa“ na izolaciji namota motora, čime je smanjena učinkovitost, a samim time i životni vijek motora.

## 4. Elektromehanički industrijski disk- releji

Dolaskom dodatnih komponenata zakretnog momenta, moguće je neispravno aktiviranje releja, a isto tako i netočna očitavanja. Pored ostalog utvrđeno je da u prisustvu harmonika;

Formatted: Font: Font color: Auto

- releji često imaju pojavu sporijeg reagiranja i dolazi do povećanja vrijednosti struje reagiranja

- podfrekventni statički releji su podložni značajnim promjenama radnih karakteristika

- prekostrujni i nadnaponski releji različitih proizvođača prikazuju različite promjene u radnim karakteristikama i sl.

Usmjereni nivo harmonika (THD < 5%) ne stvara nikakve probleme u radu releja, ali izobličenja od preko 10% može dovesti do problema u radu uređaja, [6].

## 5. Prekidači

Djelovanjem harmonika dovodi se do mogućnosti neuspjelog prekidanja struje, odnosno, strujnog kruga. Također, postoji mogućnost da dođe do kvara prekidača.

Prekidači i sklopke koje rade na principu Fidove sklopke, odnosno da ih pobuđuje zbroj faznih i nulte struje, mogu pogrešno reagirati u slučaju da mreža sadrži visoku vrijednost harmonika.

Postoje dva razloga. Prvi je što takva jednostavna elektromehanička oprema u slučaju visokog sadržaja harmonika može pogrešno izvršiti sabiranje faznih i nulte struje pa dovesti do nepotrebnog ( pogrešnog ) reagiranja prekidača. Drugi razlog je što uređaji koji proizvode harmonike često imaju filtre za filtriranje ovih harmonika koji opet u svom sastavu imaju kondenzator vezan između faznog ili nultog provodnika i zemlje. Zbog toga postoji neka, doduše dosta mala, struja prema zemlji. Ova struja je propisima ograničena na 3.5 mA, a često je i manja, ali se u slučaju postojanja nekoliko ovakvih uređaja tijekom strujnog kruga može dovesti da njihov zbroj premaši vrijednost potrebnu za reagiranje spomenutih sklopki. Tako iz naizgled neobjašnjivog razloga ove sklopke reagiraju i bez kvara. U drugom, slučaju je naravno rješenje razdvajanje uređaja sa filtrima u više zasebnih strujnih krugova, [6].

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

## 6. WATT-SAT metar, releji prekomjerne struje

Harmonici stvaraju dodatan moment na releju, koji može dovesti do nepravilnog rada jer su ti uređaji podešeni na točan rad pri osnovnoj frekvenciji (50 Hz), tj. može dovesti do nepravilnih očitavanja.

## 7. Elektronička i kompjuterska oprema

Elektronska oprema je podložna greškama u radu ako se u napajanju nalaze harmonici. Ova oprema je često zavisna od točnog određivanja presjeka napona sa nulom ili od oblika naponskog vala na neki drugi način. Harmonijsko izobličenje često dovodi do pomicanja trenutka presjeka napona sa nulom ili trenutka kada jedan međufazni napon postane veći od drugog međufaznog napona. Za većinu elektronskih kontrolnih krugova oba spomenuta poremećaja dovode do pogrešnog rada. Kompjuteri i slična oprema kao što su programirajući logički kontroleri (PLC) često zahtijevaju izvore naizmjeničnog napajanja koji imaju manje od 5% harmonijskog izobličenja napona (THDU < 5%) sa dodatnim uslovom da niti jedan harmonik napona ne smije imati vrijednost veću od 3%.

Viši nivo harmonika od spomenutog dovodi do pogrešnog rada opreme, što je nekada teško primijetiti, i koji može u nekim slučajevima imati ozbiljne posljedice. Na sličan način mogu biti pogođeni mjerni instrumenti tako da daju pogrešne podatke ili se ponašaju nepredvidivo. Možda najozbiljnije posljedice bi se mogle imati u radu medicinskih instrumenata, pa je to jedan od razloga što se oni napajaju iz reguliranog izvora. Manje ozbiljne i opasne greške u radu mogu se primijetiti kod radio i TV opreme, video rekordera i sistema za reprodukciju zvuka, [6].

Navedeno može dovesti do nepravilnog rada kontrolne i zaštitne opreme – prijevremenih kvarova opreme, nepravilan rad pogona.

### THD

Nacrt standarda za harmonijsko upravljanje u elektroenergetskim sustavima (IEE 519) daje ograničenja ukupnog harmoničkog ograničenja (THD) za mjerenja od strane distribucijskog poduzeća

te ukupnog harmonijskog izobličenja potražnje (TDD) za krajnjeg korisnika na strani distribucijskog poduzeća. Ukupno harmonijsko izobličenje služi za procjenu harmonika napona i struja u sustavu. Formula kojom se izračunava THD prikazana je na sljedeći način:

$$V_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} V_h^2}}{V_1} = \sqrt{\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2 + \left(\frac{V_3}{V_1}\right)^2 + \dots + \left(\frac{V_{hn}}{V_1}\right)^2}$$

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font color: Text 1



gdje  $V_1$  predstavlja osnovnu vrijednost harmonika, dok  $V_h = V_2, V_3, V_4, \dots$  itd. predstavlja vrijednost harmonijskog napona. THD se može koristiti prilikom karakterizacije izobličenja struje i napona, a obično se odnosi na izobličenja u naponu. THD je definiran kao odnos srednje vrijednosti kvadrata harmonijskog sadržaja i vrijednosti srednje vrijednosti kvadrata temeljne veličine.

## TDD

TDD se bavi procjenom trenutnih izobličenja uzrokovanih harmonijskim strujama u objektima kod krajnjih korisnika. TDD prikazuje omjer izmjerene harmonijske struje i struje pri maksimalnom opterećenju.

Dakle, TDD je THD struje normalizirano na maksimalnu struju opterećenja. TDD se računa prema formuli:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=50} (I_h)^2}}{I_L} \quad (2.8.)$$

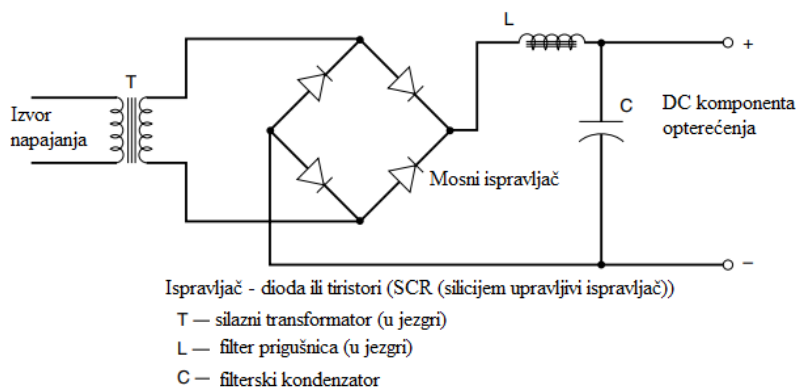
gdje  $I_L$  predstavlja efektivnu vrijednost maksimalne struje potražnje struje opterećenja, broj  $h$  pokazuje harmonijski red (1, 2, 3, 4, itd.),  $I_h$  prikazuje efektivnu struju opterećenja rednog broja harmonika  $h$ .

## 2.4 Nelinearna opterećenja

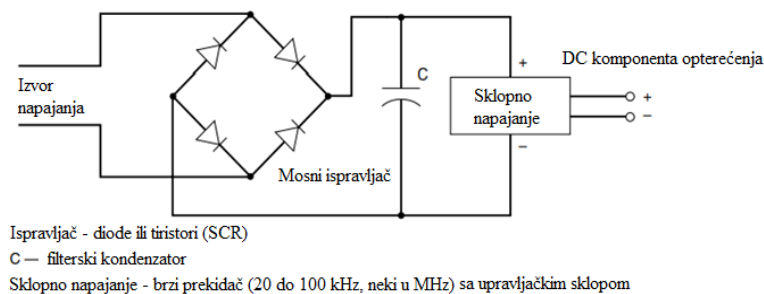
Danas postoji veliki spektar nelinearnih opterećenja u koje ubrajamo sve vrste električne opreme koje koriste sklopna napajanja, pogone s podesivom brzinom, ispravljače koji pretvaraju izmjeničnu struju u istosmjernu, invertere koji istosmjernu pretvaraju u izmjeničnu, lučne peći, elektroničke zavarivače, medicinsku opremu kao što je MRI (magnetsko zračenje) i rendgenski aparati te punjače. Svi ovi uređaji mijenjaju idealni sinusni val u nepravilni iskrivljeni oblik vala. Proizvođači elektroničke opreme došli su do načina kako mogu eliminirati transformator i filter (prikazano na Slici 2.5.) korištenjem sklopnog napajanja (prikazano na Slici 2.6.).

**Commented [zk8]:** Već sam ti napisao izraz „sklopna napajanja“!  
Ispravi to u cijelom radu, na slikama...

**Commented [zk9]:** Prepravi! I na slikama!



Slika 2.5. Napajanje bez uključenog *sklopnog napajanja* [1]



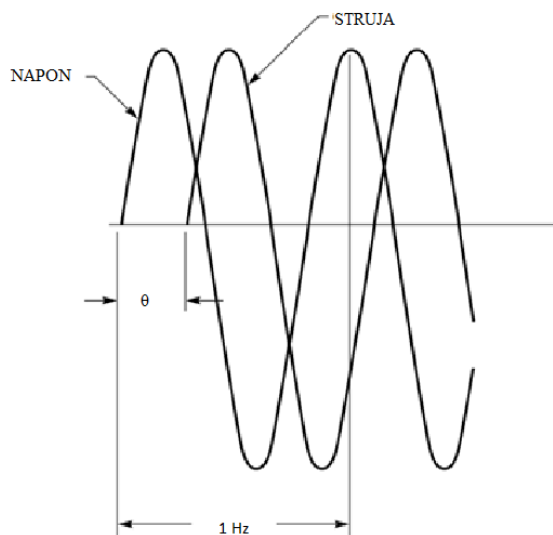
Slika 2.6. Napajanje sa uključenim *sklopnim napajanjem* [1]

Pogoni s podesivim brzinama štede energiju podešavanjem brzine motora, koji je prilagođen opterećenju. Toplinske crpke za stambene objekte, poslovno grijanje, ventilacijski sustavi i tvornice u svojim procesima koriste motore u pogonima s promjenjivom brzinom. Pogoni s promjenjivom brzinom uzrokuju pojavu harmonika prilikom mijenjanja osnovne frekvencije kako bi se promijenila brzina pogona. Još jedan primjer su lučne peći koje koriste električni luk koji pali visokonaponske elektrode do uzemljenog metala te dovodi do stvaranja ekstremnih toplina (1650 °C). Luk se gasi za svaki poluciklus. Prilikom kratkog spoja na masi dolazi do pada napona svaki puta kad udari luk. Ta pojava dovodi do treperenja svjetala na frekvenciji nižoj od osnovne frekvenciji ( $f = 50$  Hz) što je iritantno za ljude. Lukovi također dovode i do stvaranja struja harmonika. Većina nelinearnih opterećenja ne samo da dovode do

Formatted: Font: (Default) Times New Roman, 12 pt, Italic

stvaranja harmonika, nego i uzrokuju nizak faktor snage pomicanjem faznog kuta između napona i struje.

Faktor snage se definira kao način mjerenja količine reaktivne snage potrebne za opskrbu sustava i objekata krajnjih korisnika (potrošača) električnom energijom. Jalova snaga predstavlja izgublenu električnu energiju, odnosno, predstavlja snagu koja ne vrši nikakav rad. Sva induktivna opterećenja sadržavaju jalovu snagu te čine veliki dio energije koja se troši u industrijskim postrojenjima. Motori, transformatori, elektrolučni zavarivači te sve vrste peći [troše](#) jalovu snagu. Faktor snage mjeri razliku između faza napona i struje. Napon možemo prikazati sinusnim valom, a faznu razliku možemo prikazati kosinusom valom. Slika 2.7. predstavlja razliku odnos između faktora snage te faznog pomaka između napona i struje. [1].



Slika 2.7. Prikaz faktora snage i faznog pomaka [1]

Električna harmonijska rezonancija nastaje kada je induktivna reaktancija energetskeg sustava jednaka kapacitivnoj reaktanciji elektroenergetskog sustava. Posljedično, pri osnovnoj frekvenciji pojavljuje se napon i struja u fazi te je faktor snage jednak 1. Međutim, nije dobro kada se rezonancija događa jer struja harmonika u tom trenutku doseže maksimalnu vrijednost i uzrokuje zagrijavanje transformatora, kondenzatora, motora i

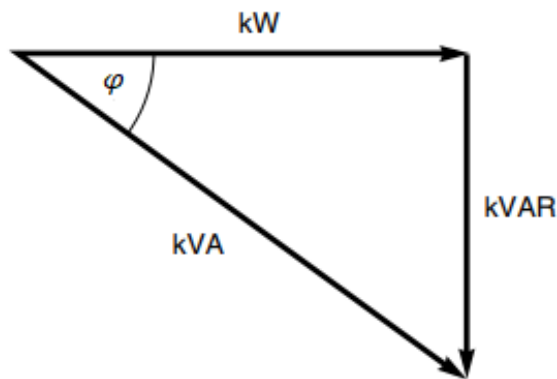
kriva očitavanja brojila. Količina induktivne i kapacitivne reaktancije ovisi o frekvenciji struje i napona, a rezonancija dolazi prilikom raznih frekvencija harmonika.

Faktor snage se definira kao omjer aktivne i prividne snage, prema formuli:

$$\text{Faktor snage} = \frac{\text{aktivna snaga u kW}}{\text{pasivna snaga u kVA}}$$

Faktor snage najčešće se predstavlja trokutom snage (prikazano na Slici 2.8.). Aktivna snaga predstavlja snagu za obavljanje korisnog rada, kao što je okretanje motora ili rad pumpi te se mjeri u kW. Električnoj je opremi aktivna snaga potrebna za pretvaranje električne energije u mehaničku energiju. Jalova snaga se koristi za osiguranje magnetskog polja na feromagnetsku opremu, a to su transformatori i motori te ona ne obavlja nikakav koristan rad. Jalova snaga se mjeri u kVAR. Prividna snaga, odnosno snaga potražnje, definira se kao ukupna snaga potrebna za izvršavanje određenog tereta. Prividna se snaga mjeri u kilovolt amperima (kVA) te prikazuje vektorski zbroj jalove i aktivne snage:

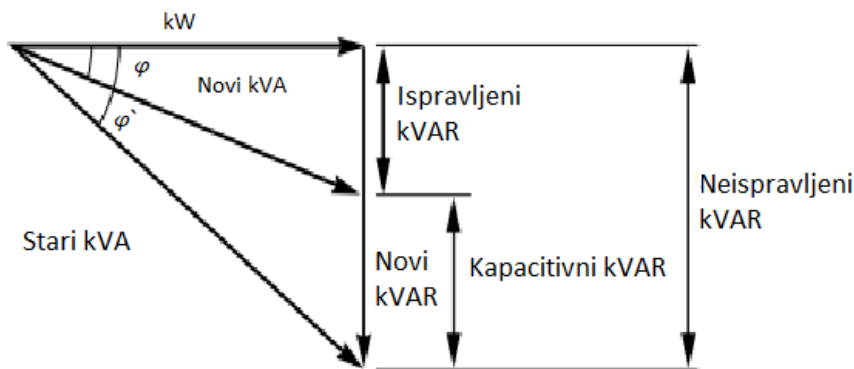
$$(kVA)^2 = (kW)^2 + (kVAR)^2$$
$$\text{faktor snage} = \cos \varphi = \frac{kW}{kVA}$$



Slika 2.8. Trokut snage (faktor snage =  $\cos \varphi = \cos(\frac{kW}{kVA})$ )[11]

Kondenzatori su glavni elementi koji poboljšavaju faktor snage dajući mu određenu jalovu snagu potrebnu teretu. Također smanjuju fazni pomak između napona i struje te dovode do toga da struja prethodi naponu za 90°. Kondenzatori su jeftin način osiguravanja reaktivne snage na

opterećenje i povećanje faktora snage, a također opskrbljuju reaktivnu magnetiziranu snagu koju zahtijevaju električna opterećenja, naročito industrijska opterećenja koja koriste induktivne motore. Motori koriste induktivnu jalovu snagu, što znači da struja zaostaje za naponom pa je potrebno koristiti kondenzatore kako bi djelovalo suprotno induktivno opterećenje te se minimizirala potrebna jalova snaga (prikazano na Slici 2.9.) [1].



$$\text{Faktor snage} = \cos \varphi = \frac{kW}{kVA} = 1$$

Slika 2.9. Povećanje faktora snage pomoću kapaciteta [1]

Formule za induktivnu i kapacitivnu reaktanciju su sljedeće:

$$X_L = 2\pi fL \quad (2.9.)$$

gdje je:  $X_L$  = induktivna reaktancija u Ohm – ima ( $\Omega$ )

$$\pi = 3.14$$

$f$  = frekvencija (Hz)

$L$  = indukcija elektroenergetskog sustava (H)

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (2.10.)$$

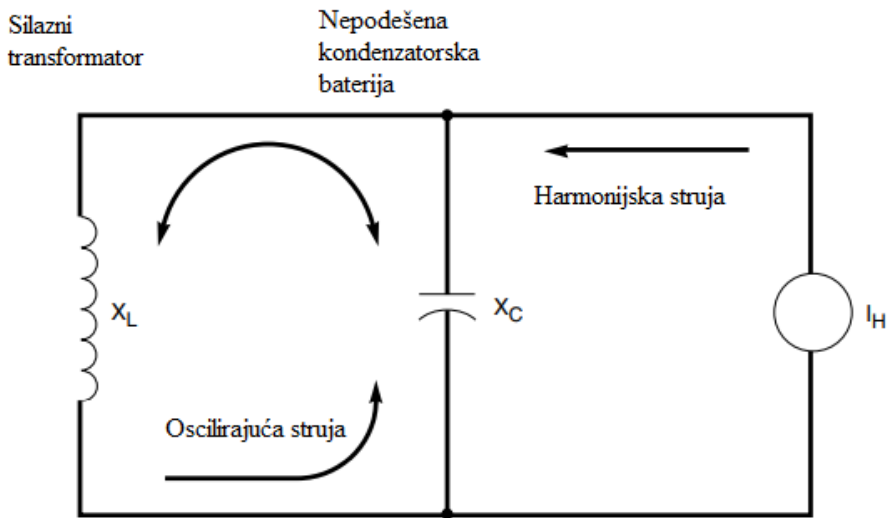
gdje je:  $X_C$  = kapacitivna reaktancija u Ohm-ima ( $\Omega$ )

$$\pi = 3.14$$

$f$  = frekvencija (Hz)

$C$  = kapacitet elektroenergetskog sustava (F)

Kondenzatori mogu uzrokovati dvije vrste rezonancije: paralelnu i serijsku rezonanciju. Budući da se većina kondenzatora povezuje s induktivitetom elektroenergetskog sustava (prikazano na Slici 2.10.) za poboljšanje faktora snage, može se reći kako najčešće dolazi do paralelne rezonancije. [1].



Slika 2.10. Prikaz paralelnog rezonantnog kruga [1]

Kada se u elektroenergetskom sustavu spoje kapacitivna i induktivna reaktancija, ukupnu reaktanciju ili impedanciju možemo prikazati kao:

$$X_T = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (2.11.)$$

gdje je:  $X_T$  = ukupna reaktancija

$R$  = otpor

$X_L$  = induktivna reaktancija =  $2\pi fL$

$X_C$  = kapacitivna reaktancija =  $\frac{1}{2\pi fC}$

Harmonijska rezonancija nastaje kada  $X_L = X_C$  i  $X_R$  postaje čisti otpor ( $R$ ) te iz Ohmovog zakona ( $I = \frac{U}{X_t}$ ) harmonijska struja dostiže svoj maksimum. Na sljedećoj formuli može se vidjeti harmonijska rezonantna frekvencija ( $f_{resonant}$ ):

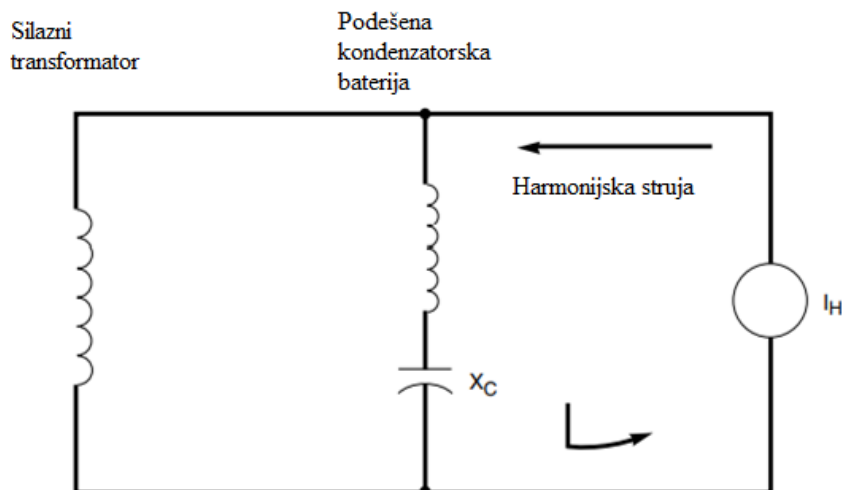
$$f_{resonant} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.12.)$$

Rezonancija se može spriječiti pravilnim dimenzioniranjem i detektiranjem kondenzatora ili korištenjem filtra kako bi se izbjegla moguća harmonijska rezonantna frekvencija. Filtar je induktor, reaktor, povezan u seriju s kondenzatorom (prikazano na Slici 2.11.). Filtri omogućuju uklanjanje kondenzatora od rezonantne frekvencije. Cijena filtra je u većini slučajeva dvostruko veća nego cijena kondenzatora. Filtri omogućuju uklanjanje učinka faktora snage izobličenja i povećavaju stvarni faktor snage. Stvarni faktor snage uzrokovan je harmonicima, dok je standardni faktor snage ili faktor snage pomaka, koji je prethodno objašnjen, uzrokovan temeljnom snagom pri osnovnoj frekvenciji od 50 Hz. Ti se faktori snage mjere takozvanim pravim efektivnim mjerilima. U sljedećoj formuli može se vidjeti definicija pravog faktora snage:

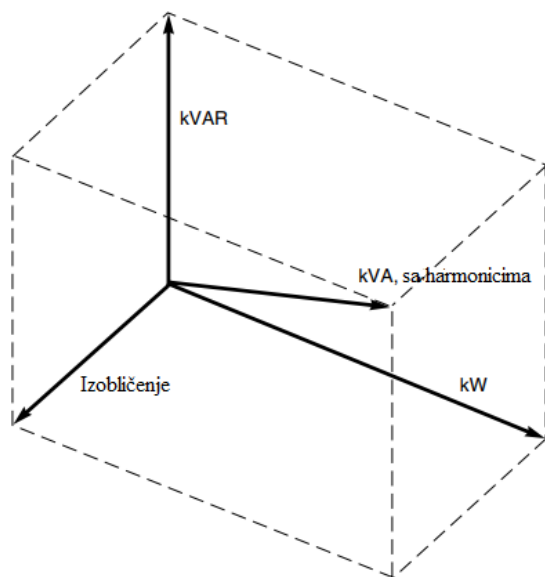
$$\text{Pravi faktor snage} = \frac{\text{Stvarna snaga u kW}}{\text{Ukupna snaga u kVA ili } V_{RMS} \cdot I_{RMS}}$$

Prema Slici 2.12. može se vidjeti kako je pravi kVA veći od pomaka kVA djelovanjem učinka harmonijskog izobličenja. Smanjeni stvarni faktor snage dovodi do povećanih gubitaka i smanjenog kapaciteta unutar sustava. Stvarni faktor snage ne povećava se dodatkom kondenzatora, nego eliminacijom harmonika korištenjem filtera. Dodavanje kondenzatora može uzrokovati da stvarni faktor snage može biti gori povećanjem harmonijskog izobličenja [1].

[1].



Slika 2.11. Filtar povezan u seriju s kondenzatorom [1]



Slika 2.12. Faktor snage izobličenja - trokut snage [11]

Problemi nastali nepravilnim ožičenjem i uzemljenjem, dokazano predstavljaju 80% svih problema sa kvalitetom električne energije. Pravilno ožičenje i uzemljenje koristi se kako bi se ljudi zaštitili od mogućih požara i strujnih udara (kratki spojevi). Oni uzrokuju kvarove električne opreme. Međusobno miješanje opterećenja dovodi do problema kvalitete električne energije. Kada su osjetljiva i neosjetljiva opterećenja spojena na isti krug, međusobno djeluju. Kada se motorno dizalo ili klima uređaj pokreću, uzrokuju velike udarne struje koje dovode do velikih padova napona. Takav slučaj uzrokuje kvar računalne opreme i prigušivanje svjetla. Rješenje je povezati neosjetljiva opterećenja koja će biti u interakciji s osjetljivim opterećenjima. Ožičenje osjetljivih opterećenja ih odvaja od neosjetljivih opterećenja. Loše uzemljenje može dovesti do razlike u potencijalu. Ispravno uzemljenje osigurava referentnu točku te put za velike struje koje su uzrokovane kvarom, npr. [sklopni prenaponi](#) i udari munje. Loše uzemljenje dovodi do uništenja električne opreme, primjer toga su uništenja

Commented [zk10]: Kakvi su to preklopni udari? Možda sklopni prenaponi?



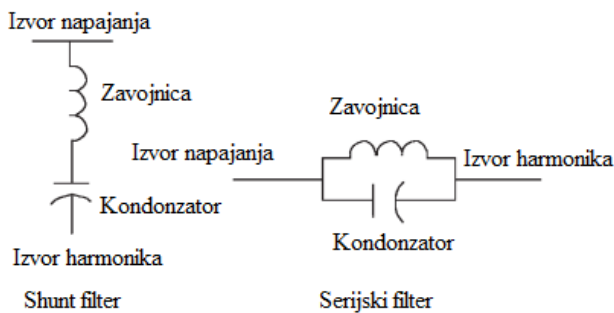
uzrokovana udarom munje. Udari [munje](#) idu najkraćim putem otpornosti, time se ožičenja i uzemljenja trebaju projektirati na način da preusmjere struju groma s osjetljive opreme na uzemljenje kroz uređaje za zaštitu od udara groma, kao što su odvodnici prenapona, odvodnici struje munje.

## 2.5 Harmonijski filteri

Jedan od načina kako je moguće utjecati na smanjenje harmonika ili dovesti do potpunog uklanjanja harmonika je dodavanje filtera u elektroenergetski sustav. Filteri ili prigušnice dovode do smanjenja električnih harmonika kao i smanjenja mehaničkih harmonika. Filtri sadrže kondenzatore i [zavojnice](#) spojene u seriju te odvode struje harmonika u zemlju čime sprječavaju da struje harmonika dođu u distribucijski sustav ili do krajnjih korisnika, što može dovesti do štete na opremi korisnika. Filteri se mogu podijeliti u dvije skupine: [pasivni](#) i aktivni. [Pasivni](#) filteri ne mijenjaju svoju vrijednost, dok aktivni filteri mijenjaju kako bi odgovarali harmoniku koji se filtrira. Drugi način smanjenja, odnosno, eliminiranja harmonika se postiže korištenjem izolacijskih transformatora [ili](#) projektiranjem izvora harmonika za promjenu vrsta harmonika, [1].

[Distribucijska](#) poduzeća koriste harmonijske filtere unutar svojih distribucijskih sustava, dok krajnji korisnici (potrošači) koriste harmonijske filtere na način da u svojim objektima [snize](#) harmonijske struje zbog mogućeg pregrijavanja njihove električne opreme i ugrožavanja rezonantnih krugova. Harmonijski filteri se prikazuju kao „amortizeri“ električne energije te rade na principu da su [zavojnice](#) i kondenzatori povezani zajedno pa će ili blokirati struje harmonika ili ih [odvesti u zemlju](#). Oni filteri koji sadrže [zavojnice](#) i kondenzatore blokiraju ili prolaze osnovne frekvencije, jer povećanje frekvencije uzrokuje povećanje impedancije [zavojnice](#), odnosno, smanjenje frekvencije dovodi do smanjenja impedancije kondenzatora. Dvije osnovne vrste konfiguracija harmonijskih filtera su: serijski i shunt filteri. Serijski filteri su filteri sastavljeni od [zavojnice](#) i kondenzatora spojenih međusobno serijski ili paralelno s teretom. Ova vrsta filtera osigurava visoke impedancije struja harmonika i blokira ih da dođu do napajanja, ali dopušta prolazak osnovne frekvencije od 50 Hz. Njihov nedostatak je što moraju [podnositi ukupnu struju opterećenja](#). Shunt filteri se sastoje od kondenzatora i [zavojnice](#) koji su međusobno spojeni serijski, a paralelno s opterećenjem. Ovakva vrsta konfiguracije omogućuje niske

impedancije za harmonijske struje te ih uzemljuju. Shunt filteri se češće koriste i jeftiniji su jer ne moraju podnositi ukupnu struju opterećenja. U slučaju kada shunt filteri nisu pravilno izabrani, mogu funkcionirati sa postojećim električnim komponentama i uzrokovati dodatne struje harmonika. Na slici 2.13. prikazani su shunt i serijski filteri.



Slika 2.13. Shema shunta i serijskog filtera [1]

Pasivni harmonijski filteri koriste statičke zavojnice i kondenzatore. Statičke zavojnice i kondenzatori ne mijenjaju svoje vrijednosti induktiviteta i kapaciteta. Dizajnirani su tako da obrađuju specifične harmonike, a nazivaju se pasivnim jer ne reaguju na promjene frekvencije. Često su spojeni na električne uređaje koji uzrokuju harmonike, kao što su pogoni s promjenjivom brzinom ili fluorescentna rasvjeta. Ova vrsta može biti neučinkovita u slučaju da se harmonici mijenjaju kada dolazi do promjene opterećenja.

Aktivni filteri razlikuju se od pasivnih filtera po tome što djeluju na harmonijske struje umjesto da ih blokiraju ili preusmjeravaju. Aktivni harmonijski filteri koriste električne uređaje kao što su mosni ispravljač te izmjenjivači za praćenje i očitavanje struja harmonika i stvaraju kontraharmonijske struje. Zatim unose protuharmonijsku struju kako bi poništila struju harmonika opterećenja. Iako su u prošlosti bili skupi, danas su sve jeftiniji i postaju isplativiji.

Jedan od načina kako spriječiti djelovanje harmonijskih struja su pravilno projektirane opreme tako da nema utjecaja harmonika. Opremu dizajniramo tako da izdrži određene toplinske učinke harmonika. Inženjer može dizajnirati vodiče

Formatted: Font: (Default) Times New Roman, Font color: Text 1

Formatted: Font color: Text 1

Formatted: Font color: Text 1

[dovoljno velikog presjeka](#) kako bi nosili velike struje uzrokovane trostrukim harmonicima (3., 6., 9., 12., itd.).

Drugi način sprječavanja struja harmonika je pravilno dizajniranje i specificiranje opreme koja je izvor harmonika ili uzrok pojačavanja harmonika [\[1\]](#).

## 2.6 Harmonijski analizatori

Commented [zk11]: Zašto ovaj naslov, kad pišeš o analizatorima harmonika?

Harmonijski analizatori su uređaji koji imaju nekoliko funkcija. Jedna je da mogu mjeriti valne oblike harmonika pa ih prikazivati na ekranu, zatim izračunavaju faktor K s namjerom da bi se smanjio utjecaj transformatora i ukupna harmonijska izobličenja (THD) prikazana u postotcima (%). Također, mogu mjeriti određeni frekvencijski spektar, odnosno, harmonijske frekvencije struja i napona do pedesetog reda. Harmonijski se analizatori spomenute harmonijske frekvencije prikazuju stupčastim grafikonom ili kao numeričke vrijednosti. Neki analizatori mogu pohraniti podatke na tjedan dana ili duži period od toga, što ih na kraju Neki analizatori mogu pohraniti podatke na tjedan dana ili duži period od toga, što ih na kraju Neki analizatori mogu pohraniti podatke na tjedan dana ili duži period od toga, što ih na kraju Neki analizatori mogu pohraniti podatke na tjedan dana ili duži period od toga, što ih na kraju čini moćnim alatima za analizu problema kvalitete električne energije. Harmonijski analizatori mogu biti ručni harmonijski analizator prikazan na Slici 2.14., koji služi za prikazivanje kvalitete električne energije na licu mjesta ili mogu biti kao monitori koji trajno pohranjuju dobivene rezultate.



2.14. Ručni harmonijski analizator [1]

Uni-T UT285A je Trofazni analizator za mjerenje kvalitete električne energije tvrtke HUAZHENG te omogućuje lako podešavanje analizatora. Sadrži „Scope mod“ koji određuje je li analizator ispravno povezan. Sadrže različite funkcije mjerenja kao što su: harmonici, treperenja, nesimetrije napona, mjerenje udarne struje, snage i energije u skladu sa standardom IEC 61000. Spomenuti analizator se može koristiti kao ručni analizator za testiranje na terenu ili za automatsko testiranje mreže. Također mogućnost analize kvalitete električne energije na PC-u pomoću softvera AccupoView. Slika 2.15 prikazuje analizator Uni-T UT285A. [7].

Formatted: Font: (Default) Times New Roman, 12 pt



*Slika 2.15 trofazni analizator Uni-T UT285A [7]*

## 2.7 Ekonomija kvalitete električne energije

Harmonijska izobličenja za različita nelinearna opterećenja, kao što su računala s uključenim napajanjem, motori s podesivom brzinom, pogoni i fluorescentna svjetla, proizvode harmonike koji se međusobno kombiniraju i prolaze kroz distribucijske transformatore prema distribucijskom sustavu. Harmonijske struje stvaraju troškove za distribucijska poduzeća i krajnje korisnike. Troškovi za krajnje korisnike dolaze kada se harmonijske struje dodaju normalnim opterećenjima te povećavaju gubitke i opterećenje na njihove distribucijske sustave. Povećani gubici već poznato smanjuju kapacitete sustava, uključivši vodiče, transformatore i motore. Povećano opterećenje dovodi do stvaranja topline i skraćuje životni vijek energetske opreme, kao što su transformatori, motori. Harmonici utječu

i na stvaranje buke i vibracija, smanjenje momenta kod motora, smanjenje faktora snage i smanjene karakteristike releja. Poduzeća imaju troškove sličnima onih krajnjih korisnika. Harmonijska izobličenja koja utječu na rad i opremu dovode do povećanog gubitka snage nadzemnih vodiča, podzemnih kabela te transformatora. Povećano opterećenje također utječe na starenje transformatora i generatora, zato poduzeća obično smanjuju snagu svojih transformatora i generatora za otprilike 25% zbog dodatnog zagrijavanja utjecajem harmonika. Neka poduzeća ograničenja za harmonijska izobličenja postavljaju svojim krajnjim korisnicima, dok druga poduzeća ugrađuju posebne mjerače prihoda u tu svrhu te svojim kupcima naplaćuju harmonike. [1].

Postoje dvije metode za ublažavanje harmonika: ugradnja filtera u strujni krug i redizajniranje nelinearnih opterećenja koji proizvode harmonike. Obje metode utječu na troškove. Kao primjer se uzimaju harmonici uzrokovani sklopnim napajanjem poslovnih zgrada, gdje je najjeftiniji način ublažavanja harmonika modifikacijom dizajna napajanja pomoću sklopnika čime se struja harmonika ne pušta u napajanje zgrade. Trošak filtriranja harmonika ovisit će o vrsti filtera i njegovom položaju.

Način poboljšanja kvalitete električne energije kod treperenja i harmonika su krajnji korisnici. Bilo kakva poboljšanja u kvaliteti električne energije potrebno je izvoditi u objektima krajnjih korisnika. Prije početka ekonomske procjene, bitno je za utvrditi korisnost svakog poboljšanja u kvaliteti električne energije.

Procjenjivanje kvalitete filtra za smanjenje ili potpuno uklanjanje harmonika uključuje proračun uštede energije te usporavanja starenja opreme. Prikazuje se ušteda energije kao rezultat prilikom smanjenja harmonika. Tablica 2.2. prikazuje smanjenje gubitaka kod kabela i transformatora koji nastaju zbog djelovanja pasivnih filtera raspoređenih u strujnom krugu i centru opterećenja. [1].

*Tablica 2.2. Prednosti uštede energije filtera harmonika* [1]

Commented [zk12]: ?????????

Commented [zk13]: ????????????

Commented [zk14]: Što je „razgranati krug“ i „centar opterećenja“?

| LOKACIJA                                | razvodna kutija<br>pasivni filter | spojna kutija<br>pasivni filter |
|---|-----------------------------------|---------------------------------|
| Kablovi, W                              | 1993                              | 1191                            |
| Transformator                           | 2591                              | 986                             |
| ukupna ušteda za opterećenje od 60kW    | 4584                              | 2177                            |
| postotak uštede za opterećenje od 60 kW | 7.6                               | 3.6                             |

## 3. SUPRAHARMONICI

### 3.1 Definicija supraharmonika

Emisija smetnji unutar frekventijskih raspona od 2 do 150 kHz nije nova, ali istraživanja su ograničena zbog manjka informacija unutar frekvencija ovakvih razmjera. Nedavno su pokrenuta istraživanja izobličenja valnog oblika iznad 2 kHz za kvalitetu električne energije. Rasponi frekvencija iznad 2 kHz smatraju se „visokom frekvencijom“, dok se frekvencije ispod 150 kHz smatraju „niskim frekvencijama“. Danas se izraz „supraharmonici“ koristi za bilo kakva izobličenja unutar frekventijskog raspona od 2 do 150 kHz.

Unutar IEC i IEE te CENELEC nalaze se određene aktivnosti za razvoj standarda, kao što su ispitne metode i ograničenja koja pokrivaju spomenuti frekventijski raspon. CENELEC prikuplja podatke o mogućim smetnjama unutar ovih frekventijskih raspona.

Pojam „Harmonici visoke frekvencije“ ili „izobličenja visoke frekvencije“ koristi se za opisivanje signala u frekventijskom rasponu od 2 do 150 kHz. Izraz visoke frekvencije koristi Međunarodna telekomunikacijska unija (ITU) za određivanje frekventijskog raspona od 3 do 30 MHz.

Izraz „međuharmonici“ prikazuje one frekventijske komponente koje izlaze van harmonika, odnosno necjelobrojne višekratnike osnovne frekvencije. Izraz „subharmonici“ koristi se za frekventijske komponente ispod osnovne frekvencije. Dodatak prefiksa supra- (predstavlja iznad ograničenja) prilikom opisa komponenti u frekventijskom rasponu od 2 do 150 kHz predstavlja prikladan i specifičan naziv s trenutnom terminologijom unutar područja kvalitete električne energije.

Izbor 2 kHz kao donje granice između harmonika i supraharmonika je proizvoljan, a proizvoljna je i gornja granica od 150 kHz. Poželjnija bi bila klasifikacija na temelju pojava, određenih karakteristika emisije, itd. Nažalost, trenutno znanje o smetnjama u ovim frekventijskim rasponima je otežano za takvu klasifikaciju što se može vidjeti prilikom analize suvremenih elektroenergetskih sustava s velikim brojem mrežnih pretvarača koji uvode sklopna napajanja visokih frekvencija. U takvim je slučajevima teško ili nemoguće odrediti izvor i podrijetlo sadržaja harmonika pa je potrebna određena univerzalna terminologija hamonika i određene mjere, [3].

Commented [ZK16]: Nema smisla!

Commented [ZK17]: sklopna napajanja



### 3.2 Primarna i sekundarna emisija

Pojmovi kao primarna i sekundarna emisija uvedeni su kako bi se objasnilo širenje supraharmnika iz fluorescentnih svjetiljki s visokofrekventnim balastom. Spomenuti balast modeliran je kao idealan izvor struje s paralelnim kapacitetom. Mjerenja pokazuju da veliki dio emisije teče prema susjednim uređajima, a ne u mrežu. Ovo se naziva „prigušivanje“, posebno kada se radi o komunikaciji putem dalekovoda.

Pojmovi su definirani na sljedeći način:

- Primarna emisija je emisija koja potječe od uređaja
- Sekundarna emisija je emisija koja potječe izvan uređaja

Razlika između primarne i sekundarne emisije nije jednostavna i neće biti moguća bez određenih pretpostavki. Kontrolirani pokusi mogu se izvesti kako bi se odredili emisijski spektri uređaja. Drugi bi pristup bio uključivanje ili isključivanje pojedinačnih uređaja te se na taj način prikuplja više informacija o primarnoj i sekundarnoj emisiji. Često postoji interakcija između uređaja koji utječu na primarnu i sekundarnu emisiju, ali niti jedna metoda nije otporna na greške, osim toga, oduzima dosta vremena. Nedostatak dobre metode za razlikovanje primarne i sekundarne emisije ozbiljna je prepreka prilikom proučavanja emisije iz suvremenih vrsta uređaja ili instalacije. [3].

### 3.3 Izvori supraharmnika

Postoje dva glavna izvora supraharmnika: energetske-elektronički pretvarači i odašiljači komunikacije putem vodiča mreže – PLC. Uvođenjem suvremenih pretvarača emisija se prebacila na supraharmnijske frekvencije. Proizvodi koji se danas dizajniraju zadovoljavaju granice emisije na harmonijskim frekvencijama, što rezultira povećanom emisijom na višim frekvencijama.

Neki primjeri uređaja koji emitiraju supraharmnike su:

- Pretvarači industrijske veličine (9 do 150 kHz)
- Ulične LED svjetiljke (do 20 kHz)
- EV punjači (15 kHz do 100 kHz)
- PV pretvarači (4 kHz do 20 kHz)

- Kućanski uređaji (2 do 150 kHz) [3].

### 3.4 Emisije, imunitet i interakcija supraharmenika

Mjerenja su pokazala kako je emisija iz postrojenja, u frekvencijskom području od nekoliko kHz, drastično manja u odnosu na emisije pojedinih uređaja. Supraharmenijska emisija teče između spojenih uređaja. Napravljena je razlika između emisija iz instalacije u cjelini (utječe na mrežu) te emisije koja se širi unutar instalacije (utječe pojedinačno na uređaje). Nemoguće je zaključiti kako će supraharmenici ostati uvijek unutar instalacije. Amplituda emisije iz instalacije koja dopire do mreže bit će većinom niska. Glavni utjecaj je onaj na pojedinačne uređaje unutar instalacije.

Na širenje struja unutar područja supraharmenijske frekvencije utječe impedancija susjednih uređaja u odnosu na impedanciju mreže. Postoje dvije vrste uređaja koji utječu na impedanciju unutar supraharmenijskih frekvencija, a to su: uređaji opremljeni diodnim ispravljačima i kondenzatorima (žarulje za uštedu energije) te uređaji opremljeni EMC filtrom. Kod prisutnosti LED rasvjete, impedancija za supraharmenijske frekvencije varira tijekom jednog ciklusa, 20 ms za sustav od 50 Hz.

Imunitet opreme od utjecaja supraharmenika važan je dio za proučavanje. Mjerenja su pokazala da će povezani uređaji međusobno djelovati na nekoliko načina:

- Naponski signal dovodi do velikih struja kroz uređaj što može dovesti do pregrijavanja komponenti ili drugih smetnji prilikom rada uređaja.
- Nelinearni uređaji izloženi naponu pri supraharmenijskim frekvencijama rezultirat će strujama na drugim frekvencijama, obično na cjelobrojnim višekratnicima, odnosno harmonicima.
- Izobličenje valnog oblika napona na priključcima uređaja može dovesti do nepravilnog rada uređaja.

Postoji nekoliko situacija u kojima oprema radi ili se ponaša na neželjeni način zbog utjecaja supraharmenika. Neki od primjera su prebrzi satovi, sušilice za kosu koje se same uključuju, i treperenje svjetla. Uređaj izložen frekvencijama ispod 20 kHz (tj. u zvučnom području) može proizvesti buku zbog stimulacije mehaničke rezonancije. Životinje mogu čuti više frekvencije te bi one mogle utjecati na njih. Glavna komponenta koja će biti oštećena od strane supraharmenijskih struja, a pokreću ih supraharmenijski naponi, su kondenzatori koji se koriste u EMC-filtrima kao i kondenzatori spojeni nakon diodnog ispravljača. Pregrijavanje

kondenzatora zbog djelovanja struja smanjit će njegov životni vijek. Kada kondenzator dosegne svoj životni vijek, dolazi do povećanja otpora kondenzatora, a posljedica je valovitost napona na izlazu ispravljača što može dovesti do potpunog kvara kondenzatora te mogućeg oštećenja ostatka opreme. Funkcija uređaja neće biti narušena otkáže li EMC-fiter, nego će se emisija na neželjenim frekvencijama povećavati. Visoke razine supraharmoijskih napona na višim razinama napona mogu dovesti do kvara izolacije kod kabela. Različite komponente elektroenergetskog sustava imaju veće gubitke (primjerice gubitci vodljivosti zbog skin efekta, gubitci vrtložne struje u jezgrama, itd.) te kod većih frekvencija dolazi do pregrijavanja i ubrzanog starenja.

Primjećuje se kako smanjenje emisije na nižim rasponima frekvencija dovodi do povećanja supraharmoijske emisije pomoću opreme. Pretvarač energetske elektronike je važan izvor izobličjenja valnog oblika, ali također može biti ključ za ublažavanje izobličjenja prilikom korištenja odgovarajuće opreme. Energetska elektronika (PE) usmjerena je na poboljšanje sposobnosti rukovanja naponom i strujom te brzinom prebacivanja poluvodičkih energetskih uređaja. Serijsko spajanje standardnih niskonaponskih sklopnih uređaja omogućuje apsorpiranje izlaza srednjeg napona, dok određeni poluvodiči moraju izdržati samo dio napona [3].

### 3.5 Ispitivanje, modeliranje i simulacija supraharmoijska

Nova područja kvalitete električne energije, poput supraharmoijska i dostupnost novih mjernih tehnika, potaknulo je uvođenje novih vrsta uređaja za nadzor kao i senzora. Najnoviji razvoji omogućuju suvremenim uređajima za nadzor kvalitete energije da uzrokuju naponske i strujne valne oblike na višim frekvencijama, brže ih analiziraju, preciznije označavaju događaje pomoću GPS tehnologije, podatke spremaju u standardiziranim formatima i koriste bežičnu komunikaciju. Za prelazak na više frekvencije od 150 kHz potrebne su nove vrste senzora koji će zamijeniti tradicionalne mjerne transformatore. Za mjerenje supraharmoijskih struja potrebni su strujni transformatori ili drugi senzori koji sadržavaju visoku točnost za mjerenje amplitude i faznog kutu u višem frekvencijskom području. U slučaju da se za mjerenje koristi naponski transformator, njihov frekvencijski odziv može rezultirati značajnim pogreškama u mjerenju. Napon mora biti analogno filtriran kako bi se dobio dovoljan dinamički raspon. Ovakvo filtriranje trebalo imati minimalan utjecaj na signal te moguća je potrebna korekcija za kompenzaciju frekvencijskog odziva filtra.

Supraharmoijske struje šire se ovisno o impedanciji koju izvor vidi na pojedinoj grani, isto kao slučaj sa strujama na bilo kojoj frekvenciji. Primjer su instalacije, poput instalacija u samostojećoj kući gdje će postojati smetnje zbog ožičenja koja sadrži djelatni otpor i

Formatted: Font: (Default) Times New Roman, 12 pt

Formatted: Font: (Default) Times New Roman, 12 pt

Formatted: Font: (Default) Times New Roman, 12 pt

Formatted: Font color: Text 1

impedanciju induktivnog karaktera, uređaja koji su spojeni unutar instalacije i mreže na koju je instalacija spojena. Prethodno spomenuta impedancija će varirati ovisno o duljini i učestalosti, ali se neće mijenjati s vremenom. Uređaji se klasificiraju u tri glavne vrste:

- Tip I uključuje uređaje čija je impedancija funkcija frekvencije, ali se može promatrati kao konstantna impedancija tijekom trajanja jednog ciklusa osnovne frekvencije,
- Tip II uključuje uređaje čija će impedancija varirati s vremenom tijekom ciklusa osnovne frekvencije,
- Tip III uključuje čisto otporne uređaje kod kojih impedancija ne ovisi o vremenu niti o frekvenciji.

Tip I uključuje one uređaje koji su opremljeni EMC-filterima tipa LCL ili CLC (računala ili televizori), a Tip II uređaje opremljene diodnim ispravljačima (kao LED svjetiljke). Impedancija Tipa I varirat će s frekvencijom, ali ne i s vremenom (gledano na vremenskoj skali jednog ciklusa osnovne frekvencije). Impedancija Tipa II ovisi o frekvenciji i vremenu (na vremenskoj skali jednog ciklusa osnovne frekvencije). Prijelaz visoke impedancije na nisku impedanciju kod uređaja Tipa II ovisi o naponu, odnosno, pod kojim naponom diodni ispravljač počinje voditi struju, a uređaj započinje crpiti struju. Impedancija ovisi o veličinama komponenti koje se koriste u uređajima. [3].

Impedancija se može podijeliti u dva glavna dijela:

- Impedancija transformatora,
- Impedancija kabela i nadzemnih vodova.

U većini slučajeva impedancija mreže je veća u odnosu na impedanciju susjednih uređaja, dok se supraharmonijska struja širi izvan instalacije. Postoje situacije kada je impedancija mreže mala zbog utjecaja rezonancije, a i mreža nije uvijek „bez emisija“. Ponavljajuće osciliranje je vrsta emisije koja se širi od instalacije prema mreži. Komunikacija putem vodiča mreže je još jedan od primjera gdje se emisija ubrizgava u mrežu, dok se kabeli i nadzemni vodovi koriste za prijenos signala između korisnika i transformatorske stanice.

Kako bi došlo do rezonancije, mora postojati induktivna i kapacitivna reaktancija. Na rezonantnoj reaktanciji jedino što može dovesti do prigušenja signala je otporni dio kruga. Unutar instalacija poput zasebne kuće, nalaze se kapaciteti koji će biti prisutni u obliku uređaja

**Commented [ZK18]:** Ovako ne govorimo u struci, napiši kako treba!

**Formatted:** Font: (Default) Times New Roman, 12 pt

(unutar EMC filtra ili u obliku kondenzatora na istosmjernoj strani iza diodnog ispravljača), a induktiviteti u obliku žica i uređaja (npr. izravno spojeni motori). Otporni elementi prisutni su unutar ožičenja ili u nekim aparatima (npr. kuhala za vodu s čajem). Doprinos se smanjuje zamjenom žarulja sa žarnom niti s elektroničkom rasvjetom. [3].

### 3.6 Standardizacija supraharmenika

Postoji niz standarda koji pokrivaju ovu vrstu frekventijskog raspona. Pregled ograničenja u postojećim standardima poznat je u Dodatku A IEC 61000-4-19. Maksimalna emisija zbog komunikacije preko vodiča prikazana je u obliku napona pri standardu EN 50065-1 i IEC 6100-3-8. Vrijednosti napona supraharmenika dane su standardom EN 50160:2012 te se nazivaju „razine napona frekvencija signala“. Granice emisije su izražene u naponu. Nema referentne impedancije povezane s ovom granicom. IEC 6100-3-8 prikazuje ograničenja, ali ona su za red veličine rigorozniji nego ispod 150 kHz. Granica EN 50065 i IEC 6100-3-8 je na 134 dB $\mu$ V (oko 2% od 230 V) kod frekvencija između 2 i 9 kHz. Vrijednosti prenapona prema standardu EN 50160:2012 ne smije biti veća od 5% nazivnog napona. Graničnim vrijednostima emisije te naponskim karakteristikama zbog djelovanja rezonancije potrebno je omogućiti prisutnost više uređaja i pojačati izobličenje napona. Predloženo je da razine kompatibilnosti za uskopojasne signale budu jednake naponskim karakteristikama prema standardu EN 50160. Naponske karakteristike nižih frekvencija su slične razinama kompatibilnosti. Granice imuniteta se postavljaju 6 dB iznad razine kompatibilnosti. Granice emisije širokopojasne signalne rasvjetne opreme dane su CISPR-U 15. Granice su definirane kao napon u odnosu na referentne impedancije. Ograničenja za emisiju putem komunikacijske opreme u mreži, pri frekvencijama koje se ne koriste u komunikacijske svrhe, dana su EN 50065. Za frekvencije iznad 150 kHz te su granice emisije iste kao i u CISPR-U 15. Postoje brojna svojstva supraharmenika koja se razlikuju od onih koja se primjećuju kod harmonika. Neka od njih su prisutnost ponavljajućih oscilacija, širenje emisija kroz instalaciju i dominacija sekundarne emisije u mnogim slučajevima. Mjerenja i simulacije pokazale su kako je emisija iz postrojenja, u frekventijskom području od nekoliko kHz, znatno manja u odnosu na emisije iz pojedinačnih uređaja. Ukupna emisija iz rasvjetne instalacije smanjuje se povećanjem broja svjetiljki. Postavljanje ukupne granice te postavljanje ograničenja pojedinačnim uređajima (kao u IEC 61000-3-8) neće služiti istom cilju. Jačanje mreže, odnosno smanjenje impedancije izvora na 50 ili 60 Hz, ima vrlo ograničen utjecaj na supraharmenijske napone. [3].

Commented [ZK19]: Ne razumijem ovo!

Commented [ZK20]: Ovo nema smisla!

### 3.7. Vrijednovanje supraharmnika do 150 kHz kod električnih vozila - Sveučilište primjenjenih znanosti Bingen

U prvom dijelu kampanje mjerenja 2016. godine ocjenjivana su različita električna vozila s obzirom na njihovo ponašanje tijekom punjenja i učinak opterećenja na električnu mrežu. Analiza se sastoji od istosmjerne komponente do 50. harmonika, odnosno supraharmnika do 20 kHz. Određena vozila koriste frekvencije čopera koje su veće od 20 kHz. Tijekom 2017. godine, također na Sveučilištu primjenjenih znanosti u Bingen, izvršena je još jedna kampanja mjerenja gdje su se mjerile emisije u rasponu do 150 kHz. Također su istražene međusobne smetnje između električnih vozila i solarnog pretvarača. [4].

Standard IEC 61851-21-1 (punjači za električna vozila koji zahtijevaju vodljivo spajanje na AC/DC opskrbu) će se u budućnosti primjenjivati za električna vozila te će uskoro biti objavljen. U ovom trenutku se na električna vozila primjenjuje standard IEC 61000-3-2 do 16 A te IEC 61000-3-12 od 16 A do 75 A . Također, iste takve razine kompatibilnosti koriste se u IEC 61851-21-1 standardu. Postoje određena ograničenja do 40. harmonika (2 kHz) i razine kompatibilnosti od 150 kHz do 30 MHz. Trenutno ne postoje ograničenja za smetnje koje emitiraju električna vozila u rasponu od 2.5 kHz do 150 kHz. Danas postoji veliki broj primjera međusobne smetnje između različitih elektroničnih uređaja. Primjer navedenoga je frekvencija pretvarača CNC stroja koja emitira razinu smetnji > 2.5 kHz u električnu mrežu te dovodi do toga da kuhinjski uređaji ne rade .

Potrebna je određena regulacija s odgovarajućim ograničenjima za spomenuti frekvencijski raspon. [4]. Smetnje se mogu ukloniti ugradnjom filtera za napajanje na uređaj koji ima smetnje ili smanjiti emitirane smetnje na početku. IEC 61000-3-2 standard klasificira električna opterećenja na način prikazan u Tablici 3.1. [5].

*Tablica 3.1. Klasifikacija IEC 6100-3-2 prema klasama [5]*

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

| Klasifikacija IEC 1000 – 3 – 2  | Klasifikacija prema amandmanu A14  |
|---|--|
| <b>KLASA A</b><br>Uravnoteženi trofazni prijemnici i jednofazni prijemnici koji se ne nalaze u ostalim klasama.   | <b>KLASA A</b><br>Uravnoteženi trofazni prijemnici; Kućni aparati (isključujući one koji spadaju u klasu D); Električni alati (osim prenosivih); Dimeri za inkadescetne lampe (ali ne i druga oprema za električno osvetljenje); Audio uređaji; Prijemnici koji nisu navedeni u ostalim klasama. |
| <b>KLASA B</b><br>Prenosivi električni alati  | <b>KLASA B</b><br>Nema izmena.   |
| <b>KLASA C</b><br>Oprema za električno osvetljenje, snage preko 25W.  | <b>KLASA C</b><br>Sva oprema za električno osvetljenje osim dimera za inkadescetne lampe.  |
| <b>KLASA D</b><br>Jednofazni prijemnici, snage ispod 600W, koji ne spadaju u klase B i C, nemaju ugrađene električne motore i imaju "poseban talasni oblik" (slika 15). | <b>KLASA D</b><br>Jednofazni prijemnici snage ispod 600W, personalni računari, monitori, TV prijemnici.  |

Tablica 3.2. i Tablica 3.3. prema standardu IEC 61000-2-2 (razine kompatibilnosti za javnu elektroenergetsku mrežu) definira sljedeće raspone:

Tablica 3.2. Frekvencijski raspon(kHz) u ovisnosti o razini kompatibilnosti (%) [4]

| Frekvencijski raspon(kHz) na 50 kHz | Razina kompatibilnosti (%)   |
|-------------------------------------|--|
| 2 kHz do 3 kHz                      | 1,4 %  |
| 3 kHz to 9 kHz                      | 1,4 to 0,65 %<br>Logaritamski pad s logaritamskim povećanjem frekvencije |

Tablica 3.32. Frekvencijski raspon (kHz) u ovisnosti o razini kompatibilnosti (dB $\mu$ V) [4]

| Frekvencijski raspon (kHz) | Razina kompatibilnosti(dB $\mu$ V)  |
|----------------------------|---|
| 9 kHz do 30 kHz            | 129 to 122 dB $\mu$ V<br>Linearni pad s logaritmom frekvencije od 9 kHz do 30 kHz |

Elektroprivrede koriste signal dalekovoda u frekvencijskom rasponu do 148 kHz za prijenos signala preko strujne rešetke. Kako bi prijemnik mogao detektirati ovakav signal, mora postojati raskorak između nenamjernih emisija iz energetske elektronike u odnosu na onu koju uzrokuju

električna vozila ili PLC signal. Prema tome, dvije granice krivulje su prikazane u standardu. Nadalje, Tablica 3.4. prikazuje pretvaranje napona (mV) u dB $\mu$ V.

Tablica 3.4. Tablica uzoraka- pretvaranje iz volta u dB $\mu$ V[4]

| Napon(mV) | dB $\mu$ V     |
|-----------|----------------|
| 1000 mV   | 120 dB $\mu$ V |
| 100 mV    | 100 dB $\mu$ V |
| 10 mV     | 80 dB $\mu$ V  |

Danas ne postoji toliki broj uređaja koji mjere kvalitetu električne energije za trajno neprekidno praćenje frekvencija od istosmjerne do 150 kHz. Taj podatak proizlazi od činjenice kako ne postoje razine koje će biti u budućnosti usklađene sa standardima >2.5 kHz do 150 kHz Postupak mjerenja za frekvencijski raspon od 2 kHz do 9 kHz opisan je u Dodatku B u- IEC 61000-4-7 standardu za harmonike. U ovom slučaju koristi se postupak grupiranja za frekvencijske pojaseve od 200 Hz. Za raspone frekvencija od 9 kHz do 150 kHz opisan je u standardu IEC 61000-4-30. Predlaže se postupak grupiranja od 2 kHz. Unutar spomenutog standarda raspravlja se o frekvencijama od 200 Hz do 2 kHz. Frekvencijski pojas od 200 Hz omogućuje veće prikaze rezolucije u spektru, što dovodi do toga kako je izmjereno 10 puta veća količina podataka nego u frekvencijskom rasponu od 2 kHz. Taj podatak proizlazi od činjenice kako ne postoje razine koje će biti u budućnosti usklađene sa standardima >2.5 kHz do 150 kHz. PQ BOX 300 tvrtke A. Eberle korišten je tijekom analize mjerne kampanje na Sveučilištu primijenjenih znanosti Bingen. PQ BOX 300 je mrežni analizator kvalitete električne energije koji mjeri frekvencije od istosmjerne pa do 150 kHz s visokom točnošću. Postupak grupiranja mjernog uređaja na ovaj način može konfigurirati frekvencijske raspone od 200 Hz ili 2 kHz. Na ovaj način mogu se provjeriti rezultati mjerenja koji dolaze iz različitih postupaka mjerenja. Za punjenje raznih električnih vozila, stanica za punjenje s utičnicama tipa 2, raznim 32 A utičnicama i dostupne jednofazne utičnice. Punionica je spojena na električnu mrežu Sveučilišta i koristi kabel od 25 mm<sup>2</sup>. Iznos snage kratkog spoja na stanici za punjenje iznosi oko 2.5 MVA. Jednofazni inverter od 5 kVA priključen je na udaljenosti od oko 10 m. Duljina kablskih veza između električnih vozila spojenih na punionicu iznosila je oko 10 m, tj. 2 puta standardni kabel za punjenje od 5 m. [4].

Ocijenjivana su sljedeća električna vozila: Renault Zoe, Nissan Leaf, BMW i3, Audi e-tron, VW Golf GTE, Ford Focus e-lectric, Mitsubishi Outlander i Tesla Model 90D.[4]

Mjerenja koja su izvršena u sljedećim konfiguracijama su:

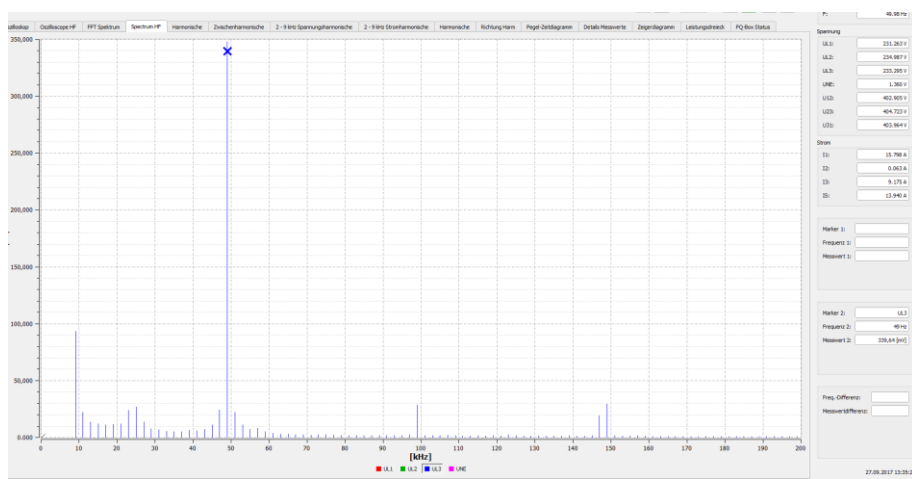
Commented [ZK21]: ?????



- Električno vozilo spojeno na električnu mrežu,
- Električno vozilo paralelno s drugim električnim vozilima,
- Električno vozilo paralelno sa solarnim inverterom Sveučilišta.

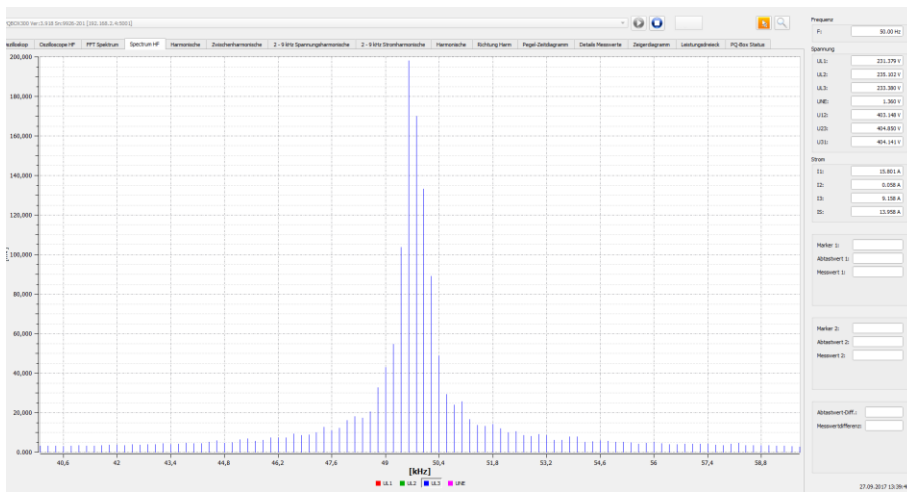
Frekvencije izmjerenih vozila bile su u rasponu frekvencija od 8 kHz do maksimalnih 50 kHz za različite proizvođače. Također su postojale velike razlike u razinama uklopnih frekvencija za različita vozila. **Razlike su se javljale unutar 2 volta za vozila sa slabim filtriranjem** te visokim razinama smetnji, kao i nemjerljive vrijednosti kod vozila s izrazito smanjenom razinom smetnji. Slika 3.1. prikazuje napon koji koristi frekvencijski raspon od 2 kHz do 170 kHz. Frekvencija čopera od 50 kHz može se jasno vidjeti na elektroničkim vozilima. Također se lako vide i harmonici od 100 kHz i od 150 kHz. Slika 3.2. prikazuje identično opterećenje od 50 kHz kao i u Slici 3.1. za električno vozilo. Postupak je grupiranja prebačen u mjernom uređaju s raspona od 2 kHz na raspon frekvencije od 200 Hz. [4].

Commented [ZK22]: ????????????



Slika 3.1. Električno vozilo s frekvencijom čopera, prikazano s frekvencijskim rasponom od 2 kHz [4]

Commented [ZK23]: Slika je mutna, ne vide se brojevi!



Slika 3.2. Električno vozilo s frekvencijom čopera, prikazano s frekvencijskim rasponom od 200 Hz [4]

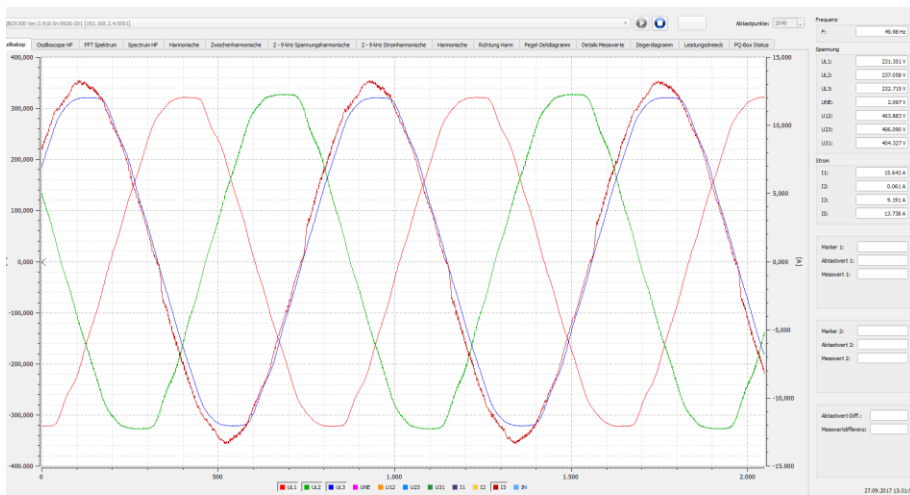
Cijeli postupak mjerenja mora biti jasno definiran za procjene buduće razine kompatibilnosti električnih vozila ili druge energetske elektronike spojene na električnu mrežu. Ako usporedimo rezultate mjerenja od 5 Hz, 200 Hz ili 2 kHz, uviđa se kako rezultati ovisno o razini značajno razlikuju jedan od drugoga. Širi frekvencijski raspon od 2 kHz obično prikazuje veće rezultate mjerenja od užeg pojasa od 200 Hz za isti signal smetnji u električnoj mreži, vidljivo na Slici 3.1. te Slici 3.2. Prilikom šireg frekvencijskog raspona pojedine se linije spektra kvadratno zbrajaju jednoj mjernoj vrijednosti.

Kako je već spomenuto ranije, tijekom kampanje mjerila su se paralelno i različita električna vozila kako bi se procijenile međusobne smetnje između vozila.

Konfiguracija priključka 1: Električno vozilo br. 1 se nalazi samo na električnoj mreži. Električno vozilo se puni jednom fazom u ovom slučaju C. Na Slici 3.3. mogu se vidjeti naponi A, B i C te struja punjenja C za električno vozilo. Pomoću struje ne dolazi do nekih izraženijih promjena opterećenja. Frekvencijski raspon je bio 50 kHz.

Commented [ZK24]: Ne razumijem, zar nije čoper 50 kHz? Ili se ne radi o čoperu? Pojasni zašto 5 Hz!

Commented [ZK25]: Preradi ovo!

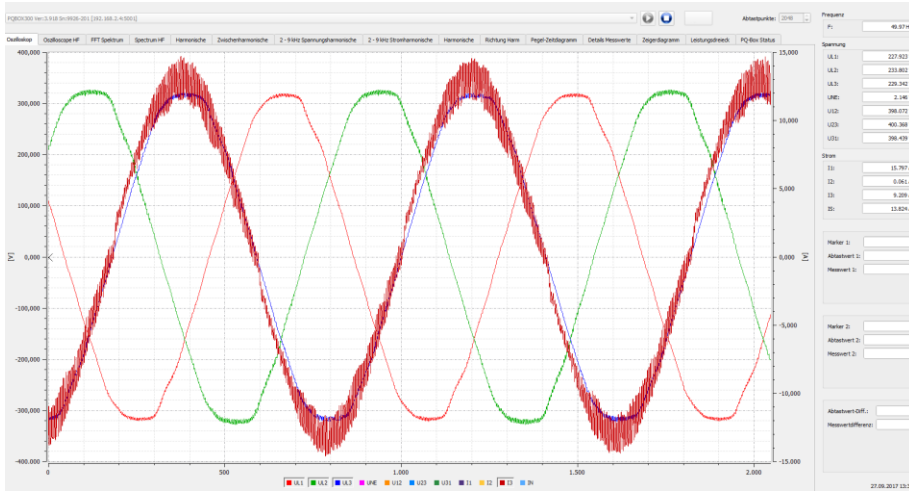


Slika 3.3. Električno vozilo br. 1 spojeno samo na utičnicu [4]

Konfiguracija priključka br. 2: električno vozilo br. 1 je spojeno na utičnicu, dok je električno vozilo br. 2 spojeno paralelno sa stanicom za punjenje pomoću utikača tipa 2.

Slika 3.4. predstavlja promjenu trenutne potrošnje električnog vozila br. 1 zbog djelovanja opterećenja od strane električnog vozila br. 2. Pri tome je moguće vidjeti kako se RMS vrijednosti praktički nisu promijenile, dok se uviđaju veliki vrhovi struje punjenja prilikom uključivanja frekvencija električnog vozila br. 2. Električno vozilo br. 1 spojeno je na električnu mrežu tako da odvodi smetnje za supraharmonike drugog vozila. Na slici 3.3. vidljivo je kako se frekvencija od 10 kHz jedva može vidjeti u naponu, ali je izražena kod struje. Zaključuje se da se mogu pojaviti povremeni prekidi u punjenju ako se različita električna vozila pune paralelno.

Commented [ZK26]: Gdje se ovo vidi???

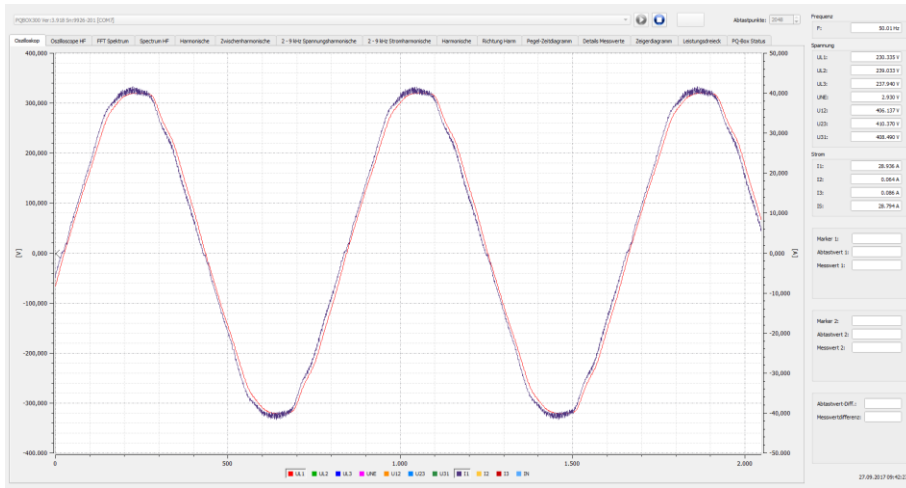


Slika 3.4. Električna vozila br. 1 i br. 2 paralelno spojena na utičnicu i punionicu [4]

Većina vozila prilikom jednofaznog punjenja koristila je fazu A, dok je samo jedno vozilo koristilo fazu C za jednofazno punjenje. To jedno vozilo može uzrokovati probleme vezane za opterećenje faze A u električnoj mreži s većim brojem vozila u opskrbi električnom mrežom. Također dolazi do neuravnoteženosti električne mreže na krajnjim izvodi. Neka vozila koja su se punila na početku pomoću sve tri faze, na kraju su se automatski prebacila na jednofazno punjenje. U inženjerskim priručnicima za spajanje korisničkih sustava na niskonaponsku mrežu (VDE-AR 4100), maksimalna priključna snaga kod jednofaznog opterećenja ograničena je na  $\leq 4.6$  kVA. Električna opterećenja ili proizvodni sustavi  $> 4.6$  kVA mogu se spojiti pomoću tri faze. Proizlazi kako određena električna vozila iz mjerne kampanje ne smiju raditi pri maksimalnoj priključnoj snazi od 7.2 kVA. Za primjer se uzima električno vozilo s jednofaznom strujom punjenja od 30 A na fazi A prikazano na Slici 3.5. [4].

Formatted: Font color: Text 1

Formatted: Font color: Text 1



*Slika 3.5. Jednofazno električno vozilo jednofazno punjeno pri snazi od 6,9 kVA*

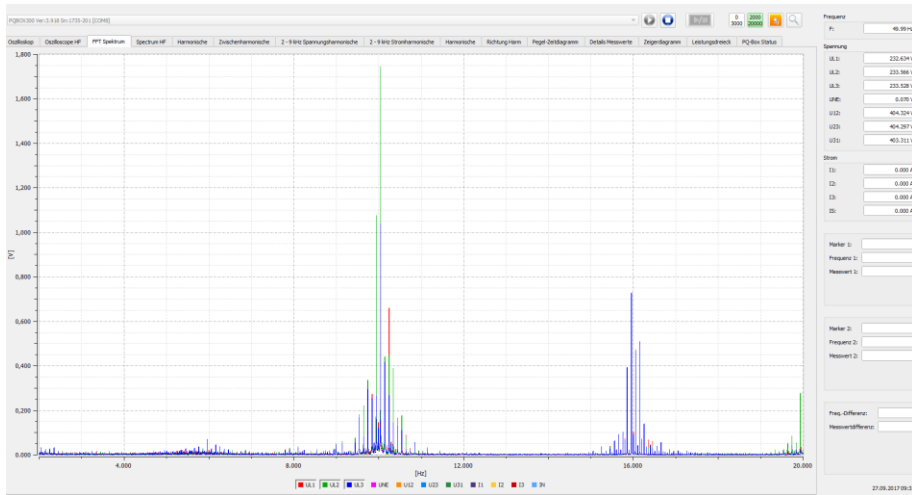
Pri procesu punjenja jednog električno vozilo sa sklopnom frekvencijom od 10 kHz moglo se jasno čuti ljudskim uhom tijekom punjenja. Paralelno su punjena dva električna vozila istog tipa.

Commented [ZK27]: ????????

Kako u ovom slučaju sklopna frekvencija kod oba vozila nije bila točno 10 kHz, nego je varirala oko 10 kHz, razina snage opterećenja mreže varira između 1 V te maksimalnih 2 V. Samo je bilo jedno vozilo s konstantnim opterećenjem od 1.4 V. Kao rezultat toga, obje frekvencije je moguće povećati tijekom vremena ili djelomično pomaknuti ovisno o faznoj razlici frekvencija. Ako bi se tijekom punjenja stajalo u sredini između dva vozila, mogle su se čuti osjetne promjene glasnoće. U praksi, tijekom jednog slučaja, vozila istog proizvođača izazvala su smetnje unutar poslovne zgrade uz nekoliko punionica. Takav je poremećaj bio toliko glasan da prozori donjeg kata zgrade nisu mogli ostati otvoreni tijekom radnog vremena, pojavilo se „zagađenje bukom“. Slika 3.6. prikazuje frekvenciju čopera od 10 kHz, dva električna vozila istog tipa i 16 kHz solarne elektrane na Sveučilištu primjenjenih znanosti Bingen. Amplituda sklopne frekvencije za oba električna vozila je oscilirala u vrijednostima od 1 V i 2 V na frekvenciji od oko 0.5 kHz. Fotonaponski inverter pretvara DC napon sa fotonaponskih ćelija u AC napon kojima se dalje mogu napojiti baterije, a ostatak slati u gradsku mrežu. Omogućava direktno napajanje kućnih trošila direktno sa uređaja. [4].

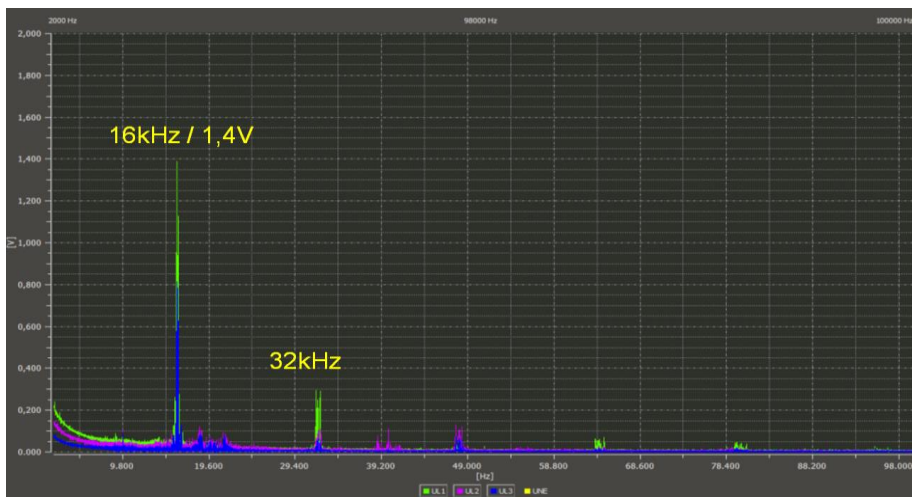
Commented [ZK28]: ????????

Commented [ZK29]: ????????

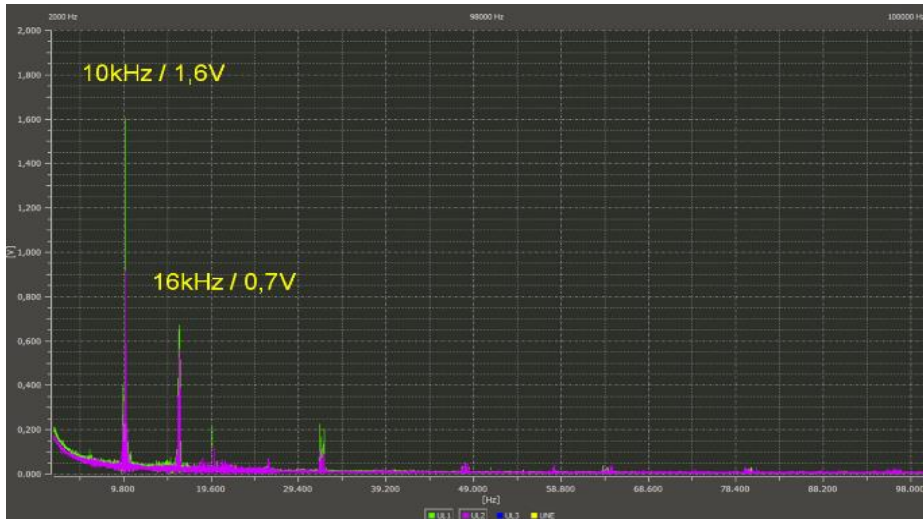


Slika 3.6. Frekvencija čopera 2 električna vozila istog tipa i fotonaponski inverter [4]

Slika 3.7. prikazuje početno opterećenje mreže s fotonaponskim inverterom i solarnom elektranom. Uviđaju se frekvencije čopera od 16 kHz te njeni harmonici na 32 kHz i 48 kHz pa na dalje. Na Slici 3.8. električno je vozilo spojeno na punjenje te se lako može vidjeti sklopnuu frekvencija od 10 kHz sa 1,6 V u mreži. Međutim, kod solarne elektrane vrijednost od 16 kHz smanjena je za 50% sa 1,4 V na 0,7 V.



Slika 3.7. Prikaz frekvencije čopera fotonaponskog invertera



*Slika 3.8. prikazuje frekvenciju čopera fotonaponskog invertera i jednog vozila*

## 4. ANALIZA MJERENJA PUNIONICE ZA ELEKTRIČNE AUTOMOBILE

Mjerenje je izvedeno pomoću trofaznog mrežnog analizatora [A-eberle PQ-BOX 200](#), a rezultati su analizirani u softveru WinPQ mobil. A-eberle PQ-BOX 200 je mjerni instrument za analizu kvalitete električne energije te mjerenje svih električnih veličina kod niskih, srednjih i visokih napona. Mjeri tri napona i četiri struje i može se koristiti prilikom različitih mjernih funkcija. Svrha programa je [obrada](#) ranije [pohranjenih](#) [podatka](#) mjerenja kvalitete električne energije te zapise o mogućim kvarovima te ih prikaže na računalu na odgovarajući način. Za tu svrhu koriste se potrebni alati za učinkovit odabir pohranjenih podataka, skup grafičkih i tabličnih prikaza parametara kvalitete električne energije prema standardu EN50160, IEC61000-2-2, IEEE519 ili standardu za industrijske mreže IEC61000-2-4. Većina standarda kao što je standard EN50160 procjenjuju 95 %-tne vrijednosti. S obzirom da spomenuti standard IEC61000-2-2 daje ograničenja za harmonike do 40. reda, redovi od 41. do 50. se neće analizirati. Procjene maksimalnih vrijednosti mogu biti zanimljive kod kraćih mjerenja. [Postavke](#) izvješća sadrže 5 različitih kartica:

- Statistika – postavljanje općih postavki izvješća,
- Ograničenja – postavljanje graničnih parametara ovisno o pojedinoj normi,
- Harmonici 2-50 – postavljanje granice pojedinih napona harmonika do 50. reda kao i za međuharmonike,
- Frekvencijski rasponi 2 kHz-9 kHz (Supraharmonici 2-9 kHz) – definira granične vrijednosti za raspone od 2-9 kHz,
- Supraharmonici 9-150 kHz – definira granične vrijednosti za supraharmoničke signale od 9-150 kHz, [\[5\]](#).

Postavljanje graničnih vrijednosti se koristi za online analizu, za izvješća, kao i za linije graničnih vrijednosti prilikom dugoročnih analiza podataka. Naziv trenutno korištenog predloška uvijek se prikazuje u zaglavlju softvera, [\[5\]](#). Naziv standardnog predloška može se promijeniti prema Slici 4.1.

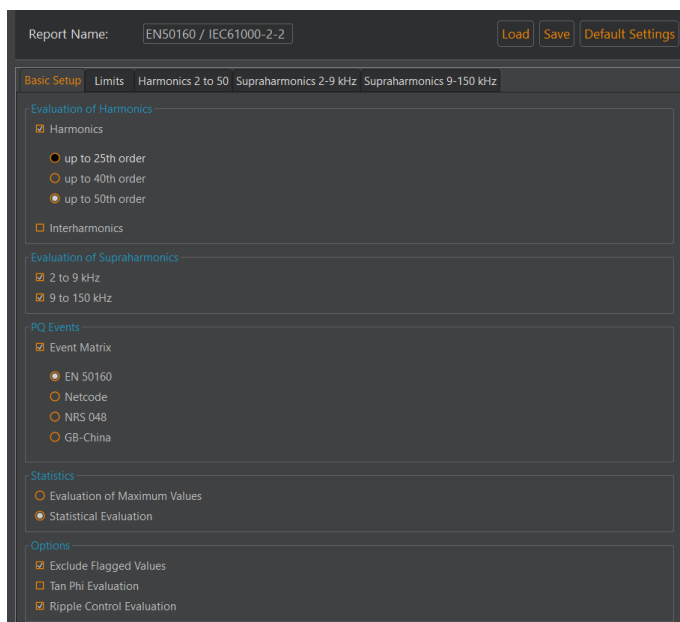




Formatted: Font: Italic

## 4.1 Statistika

Prema Slici 4.2. u postavkama izbornika standardne analize mogu se vidjeti opći parametri automatskog generiranja izvješća. Tablica 4.1. prikazuje objašnjenja pojedinih parametara.



Slika 4.2. Osnovno postavljanje parametara analize

Tablica 4.1. Definicije pojedinih parametara [5]

| Parametar            | Definicija  |
|----------------------|---|
| <i>Harmonik</i>      | <i>Aktiviraj/deaktiviraj analizu harmonika do 25.,40. ili 50.reda</i>       |
| <i>Interharmonik</i> | <i>Aktiviraj/deaktiviraj analizu <del>interharmonika</del>međuharmonika</i> |

|              |   |
|--------------|---|
| 2-9 kHz      | Aktiviraj/deaktiviraj analizu frekvencijskih raspona od 2-9 kHz |
| 9-150 kHz    | Aktiviraj/deaktiviraj analizu supraharmonika                    |
| Event Matrix | Aktiviranje/deaktiviranje PQ analize događaja                   |

Formatted Table

4

#### 4.2. Granične vrijednosti

Formatted: Normal

Na kartici **ograničenja** graničnih vrijednosti, prikazanoj na Slici 4.3., za sve parametre kvalitete električne energije moguće je ograničenja postaviti pojedinačno. Pojedinačni parametri imaju graničnu vrijednost za 95% vrijednosti (najveća vrijednost zabilježena tijekom 95 % tjedna) i maksimalne vrijednosti (najveća vrijednost zabilježena tijekom cijelog tjedna). Ovisno kako je postavljeno na kartici „Statistika“, automatski se prilagođavaju [\[5\]](#).

Report Name: EN50160 / IEC61000-2-2 [Load] [Save] [Default Settings]

Tolerance 95 %: 110.00 % [v] 90.00 % [v]  
Tolerance 100 %: 110.00 % [v] 85.00 % [v]

**THD**  
Tolerance 95 %: 8.00 % [v]  
Tolerance 100 %: 12.00 % [v]

**Long Term Flicker (PLT)**  
Tolerance 95 %: 1.00 [v]  
Tolerance 100 %: 5.00 [v]

**Mains Frequency (50 Hz System)**  
Tolerance 99.50 %: 50.50 Hz [v] 49.50 Hz [v]  
Tolerance 100 %: 52.00 Hz [v] 47.00 Hz [v]

**Mains Frequency (60 Hz System)**  
Tolerance 99.50 %: 60.50 Hz [v] 59.50 Hz [v]  
Tolerance 100 %: 62.00 Hz [v] 57.00 Hz [v]

**Unbalance**  
Tolerance 95 %: 2.00 % [v]  
Tolerance 100 %: 3.00 % [v]

**Ripple Control Signal**  
Tolerance 99 %: 9.00 % [v]

**Statistics**

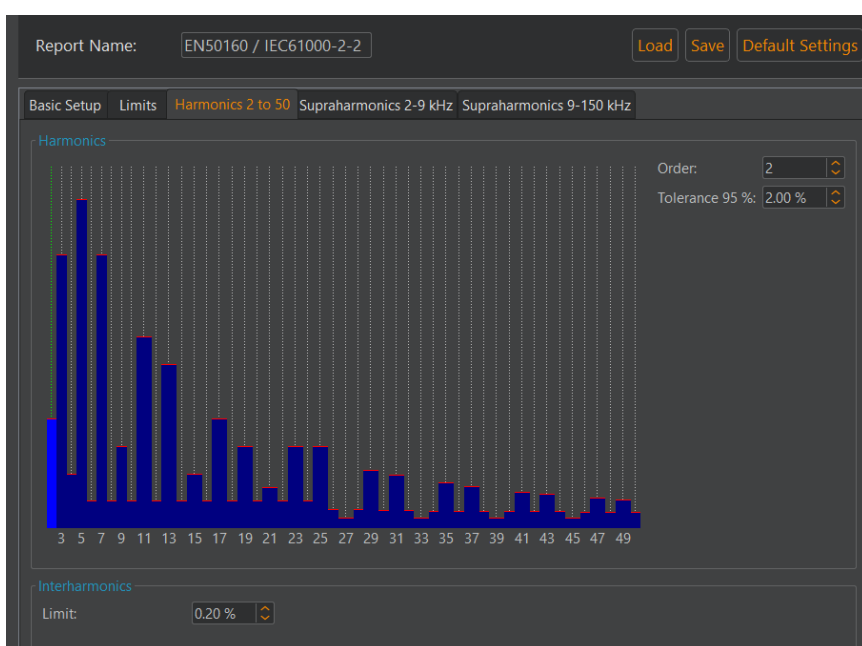
|                              | Percentile  | Upper Limit  |
|------------------------------|-------------|--------------|
| Frequency:                   | 99.50 % [v] | 100.00% [v]  |
| Voltage 4-wire system:       | 95.00 % [v] | 100.00% [v]  |
| Voltage 3-wire system:       | 99.00 % [v] | 100.00% [v]  |
| Harmonics / THD:             | 95.00 % [v] | 100.00 % [v] |
| Voltage Unbalance / Flicker: | 95.00 % [v] | 100.00% [v]  |
| Ripple Control Signal:       | 99.00 % [v] | 100.00 % [v] |

Slika 4.3. Prikaz ograničenja pojedinih parametara

|

### 4.3 Harmonici 2-50

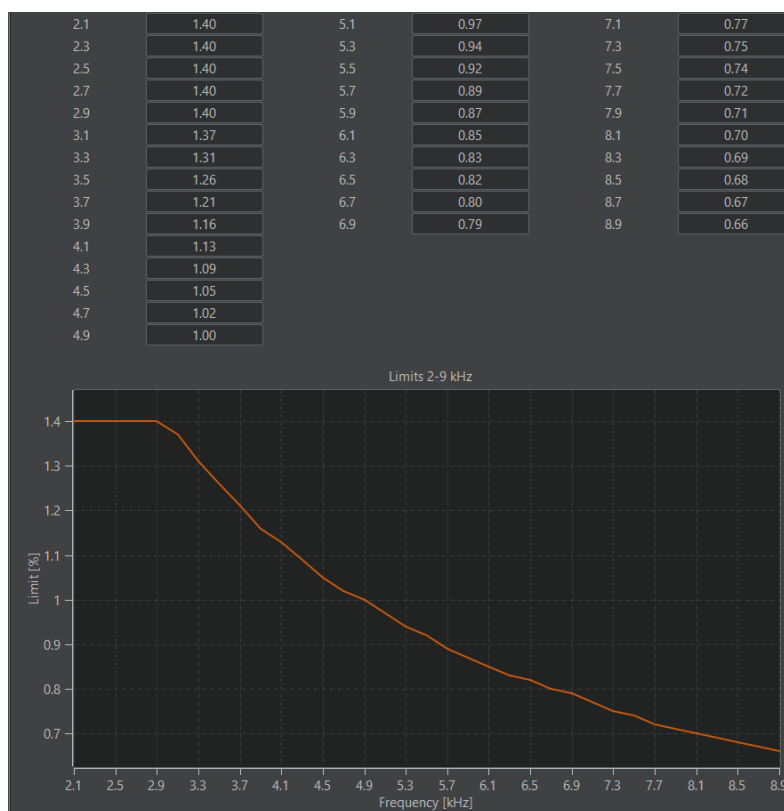
Prema ovoj kartici prikazanoj na Slici 4.4., moguće je vidjeti prikaz graničnih vrijednosti pojedinih harmonika napona. Lijevim klikom na odgovarajuću traku pojedini harmonici mogu se odabrati te izvršavati potrebno uređivanje u podizborniku na desnoj strani. U drugom dijelu prozora mogu se postaviti ograničenja za sve interharmonike (od 1 do 49). [5].



Slika 4.4. Prikaz graničnih vrijednosti naponskih harmonika

#### 4.4. Supraharmonici 2-9 kHz

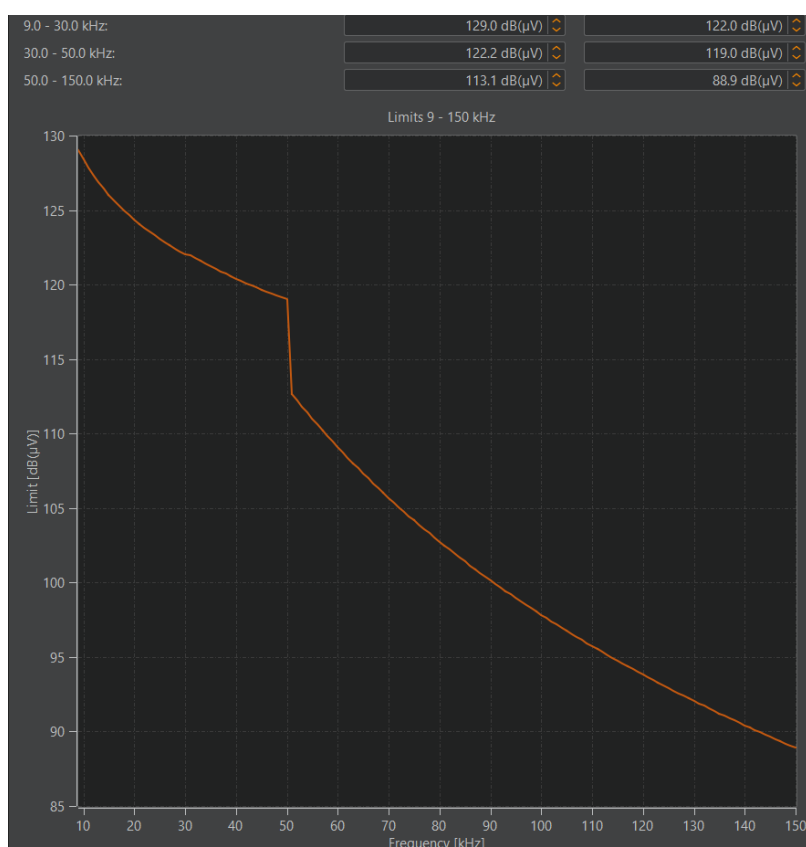
Kod ove kartice prema Slici 4.5. moguće je postaviti granične vrijednosti za frekvencijski raspon od 2 kHz do 9 kHz. Osnovne postavke vrijede za standard IEC61000-2-2 koji se koristi za javne niskonaponske mreže. [5].



Slika 4.5. Prikaz graničnih vrijednosti za supraharmonike 2-9 kHz. [5]

#### 4.5 Supraharmonici 9-150 kHz

U ovoj kartici (Slika 4.6.) granične vrijednosti za supraharmonijsko frekvencijsko područje prikazane su jedinicom ( $dB\mu V$ ). Krivulja granične vrijednosti ima tri referentne točke te između te tri referentne točke razina granične vrijednosti opada logaritamski. Također, osnovne postavke odgovaraju standardu IEC 61000-2-2 koji definira granicu vrijednosti za niskonaponske mreže. [5].



Slika 4.6. Prikaz graničnih vrijednosti za supraharmonike 9-150 kHz [5]

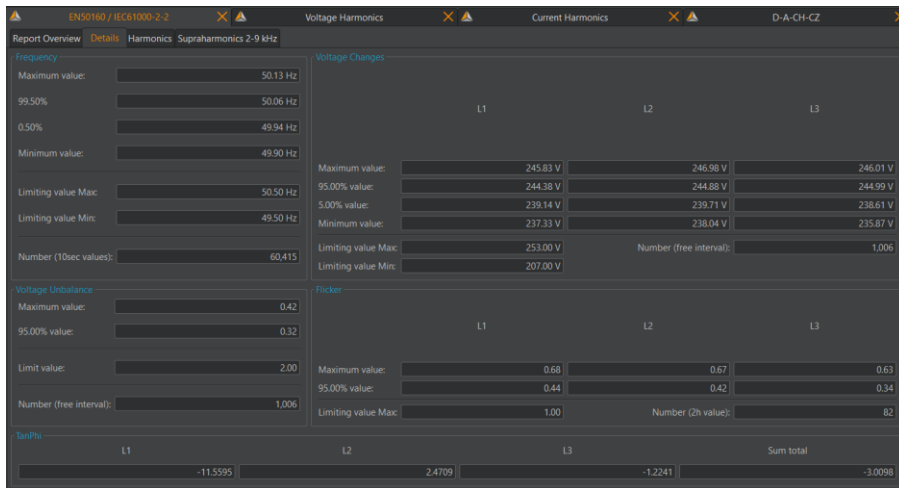
Funkcija prikazana na Slici 4.7. omogućuje brzi pregled svih izmjerenih vrijednosti napona, u odnosu na razine kompatibilnosti postavljenog standarda. Ova postavka je kombinirana od strane EN50160 i IEC61000-2-2 standarda. Može se vidjeti kako se sve izmjerene 95%-tne

vrijednosti (crvene boje), a isto tako i one maksimalne vrijednosti 100%-tne vrijednosti (plave boje) nalaze u prethodno postavljenim granicama.



Slika 4.7. Pregled izvješća svih vrijednosti napona

Kartica „Detalji“ prikazana na Slici 4.8., kod standardnog izvješća omogućuje detaljan prikaz minimalnih i maksimalnih vrijednosti, a isto tako upućuje na standardne granične vrijednosti. Kao jedan od primjera uzimaju se flikeri gdje su dobivene maksimalne 100% vrijednosti po fazama bile: L1 = 0,68, L2 = 0,67, L3 = 0,63, a isto tako izmjerene 95%-tne vrijednosti po fazama su: L1 = 0,44, L2 = 0,42, L3 = 0,34. Granična vrijednost norme EN 50160 je  $P_{fl} = 1,00$ . Vrijednosti frekvencija su bile u rasponu od 49,90 Hz (minimalna vrijednost) do 50,13 Hz (maksimalna vrijednost). Postavljeni limit prema standardu H za maksimalne vrijednosti iznosi do 50,50 Hz, dok za minimalne vrijednosti iznosi do 49,50 Hz.



Slika 4.8. Prikaz kartice „Detalji“ izmjerenih vrijednosti

U kartici „Harmonici“, prikazanoj na Slici 4.9., nalazi se prikaz svih harmonika 2-50. reda te njihove vrijednosti skalirane do granica vrijednosti postavljenih standardom (limit). Gledajući po fazama, vidimo kako su sve 95% vrijednosti napona unutar odgovarajućih limita, a isto tako i one maksimalne (100% vrijednosti) također unutar odgovarajućih postavljenih limita. [5]. Harmonici 3., 5., 7., 11. i 13. reda su pokazali najveće izmjerene vrijednosti. Ističe se i 27. harmonik napona.



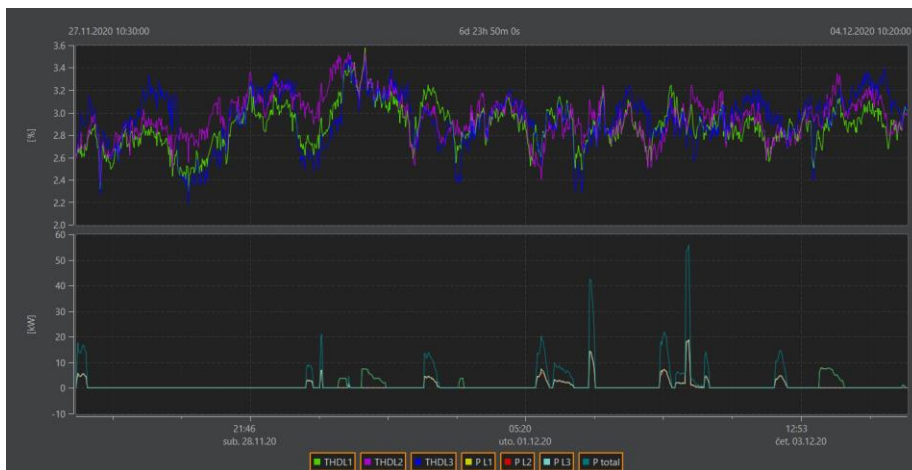
Slika 4.9. Prikaz vrijednosti harmonika napona po fazama



U Tablici 4.2. prikazani su mjerni podatci gdje se faktor izobličenja THD mijenja po fazama u granicama postavljenog limita od 8.00%. Slika 4.10. prikazuje spomenuti THD napona te snage punionice za električne automobile.

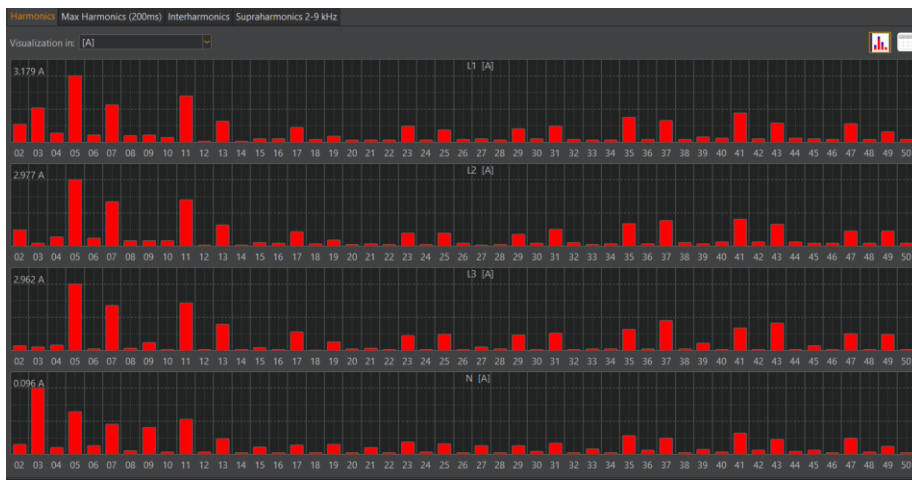
Tablica 4.2. Prikaz izmjernih podataka

|     | Limit value [%] | L1 - 95.00% [%] | L1 - Max [%] | L2 - 95.00% [%] | L2 - Max [%] | L3 - 95.00% [%] | L3 - Max [%] |
|-----|-----------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|
| THD | 8.00            | 3.19            | 3.58         | 3.29            | 3.53         | 3.28            | 3.49         |
| 02  | 2.00            | 0.05            | 0.05         | 0.02            | 0.03         | 0.05            | 0.05         |
| 03  | 5.00            | 1.03            | 1.12         | 0.72            | 0.79         | 0.87            | 0.95         |
| 04  | 1.00            | 0.03            | 0.05         | 0.02            | 0.03         | 0.02            | 0.04         |
| 05  | 6.00            | 2.53            | 3.01         | 2.64            | 2.99         | 2.27            | 2.73         |
| 06  | 0.50            | 0.04            | 0.07         | 0.02            | 0.06         | 0.03            | 0.07         |
| 07  | 5.00            | 2.27            | 2.61         | 2.31            | 2.60         | 2.75            | 3.14         |
| 08  | 0.50            | 0.04            | 0.06         | 0.02            | 0.07         | 0.03            | 0.05         |
| 09  | 1.50            | 0.71            | 0.84         | 0.53            | 0.61         | 0.57            | 0.68         |
| 10  | 0.50            | 0.02            | 0.07         | 0.02            | 0.07         | 0.02            | 0.05         |
| 11  | 3.50            | 0.65            | 0.83         | 0.49            | 0.61         | 0.31            | 0.59         |
| 12  | 0.50            | 0.02            | 0.04         | 0.02            | 0.04         | 0.01            | 0.04         |
| 13  | 3.00            | 0.44            | 0.57         | 0.44            | 0.60         | 0.38            | 0.46         |
| 14  | 0.50            | 0.03            | 0.05         | 0.01            | 0.02         | 0.02            | 0.02         |
| 15  | 1.00            | 0.09            | 0.12         | 0.11            | 0.19         | 0.11            | 0.16         |
| 16  | 0.50            | 0.01            | 0.02         | 0.01            | 0.03         | 0.01            | 0.01         |
| 17  | 2.00            | 0.13            | 0.23         | 0.15            | 0.20         | 0.05            | 0.11         |
| 18  | 0.50            | 0.02            | 0.02         | 0.01            | 0.01         | 0.01            | 0.01         |
| 19  | 1.50            | 0.08            | 0.12         | 0.06            | 0.10         | 0.10            | 0.16         |

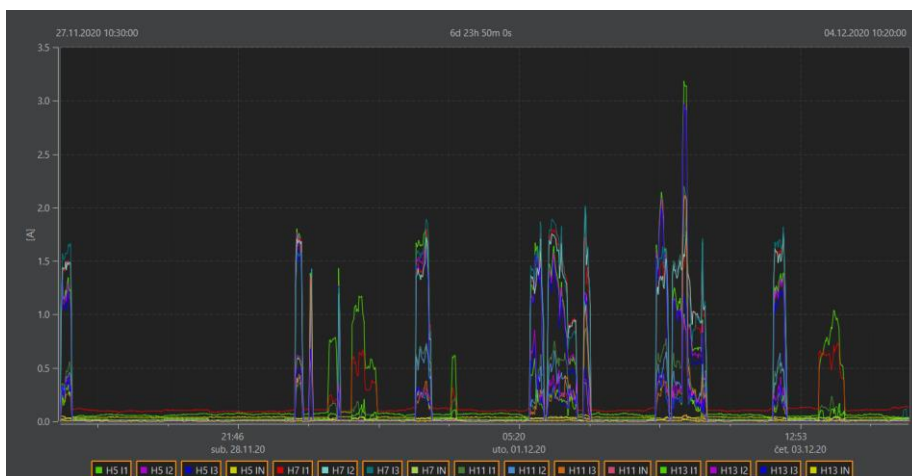


Slika 4.10. Grafički prikaz THD napona [%] i snage [kW]

Prikazom na Slici 4.11. moguće je vidjeti vrijednosti strujnih harmonika (3.,5.,7.,11.,13.) te se mogu vidjeti kako spomenuti harmonici pokazuju najveće vrijednosti. Prema grafičkom prikazu na Slici 4.12. moguće je vidjeti odnos veličina struja harmonika prema pojedinim fazama kod harmonika redova: 3., 5., 7., 11., 13. u sve tri faze ne odstupaju od postavljenih graničnih vrijednosti.



*Slika 4.11. Prikaz vrijednosti harmonika struja po fazama*

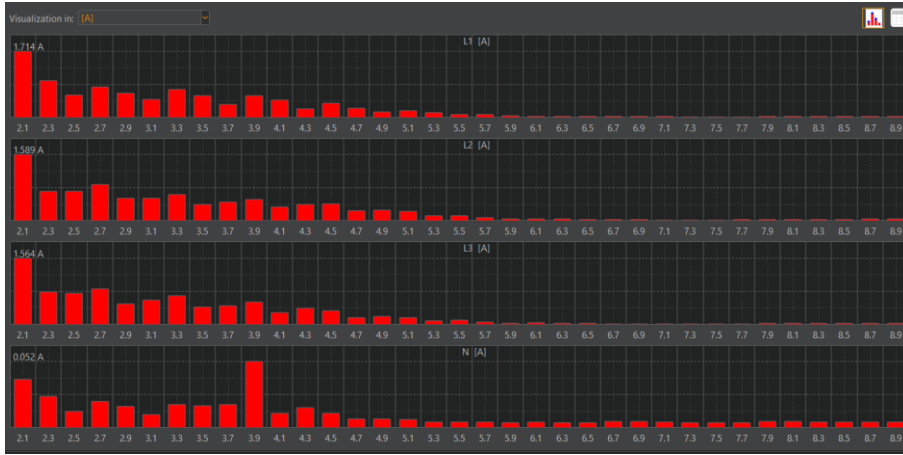


Slika 4.12. Grafički prikaz harmonika 2-50.reda

Tablica 4.2. Prikaz vrijednosti strujnih harmonika u odnosu na zadane granične vrijednosti

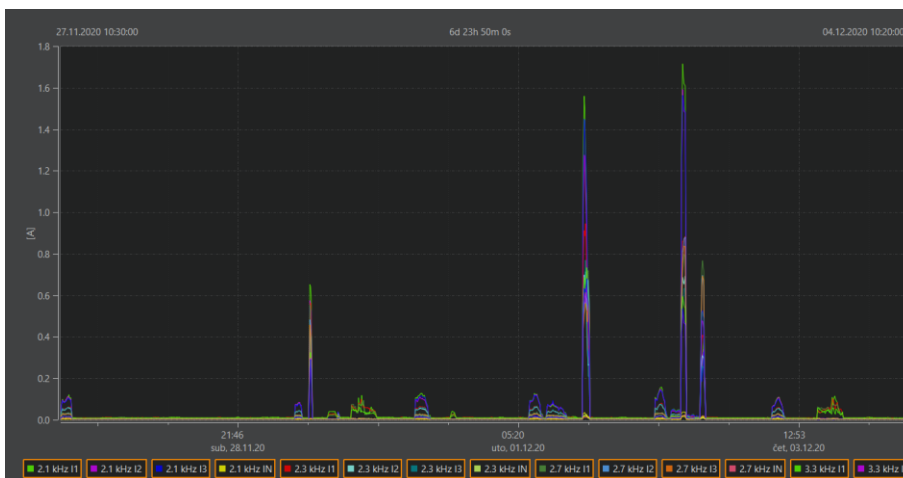
|    | Limit value [A] | L1 - Max [A] | L2 - Max [A] | L3 - Max [A] |
|----|-----------------|--------------|--------------|--------------|
| 02 | 2.000           | 0.879        | 0.725        | 0.226        |
| 03 | 30.000          | 1.657        | 0.151        | 0.178        |
| 04 | -               | 0.458        | 0.422        | 0.250        |
| 05 | 10.000          | 3.179        | 2.977        | 2.962        |
| 06 | -               | 0.366        | 0.378        | 0.091        |
| 07 | 7.000           | 1.798        | 1.993        | 2.016        |
| 08 | -               | 0.317        | 0.250        | 0.105        |
| 09 | 5.000           | 0.350        | 0.241        | 0.364        |
| 10 | -               | 0.236        | 0.262        | 0.068        |
| 11 | 3.000           | 2.200        | 2.096        | 2.115        |
| 12 | -               | 0.069        | 0.070        | 0.049        |
| 13 | 3.000           | 1.002        | 0.972        | 1.173        |
| 14 | -               | 0.074        | 0.063        | 0.069        |
| 15 | 3.000           | 0.174        | 0.177        | 0.133        |
| 16 | -               | 0.165        | 0.147        | 0.052        |
| 17 | 3.000           | 0.704        | 0.648        | 0.835        |
| 18 | -               | 0.136        | 0.118        | 0.039        |
| 19 | 3.000           | 0.305        | 0.295        | 0.377        |
| 20 | -               | 0.117        | 0.094        | 0.084        |
| 21 | 1.000           | 0.136        | 0.100        | 0.104        |

Prema Slici 4.13. prikazane su vrijednosti strujnih harmonika kod supraharmnika 2-6 kHz. Prema Slici 4.13. prikazane su vrijednosti strujnih harmonika kod supraharmnika 2-6 kHz. Prema Slici 4.13. prikazane su vrijednosti strujnih harmonika kod supraharmnika 2-6 kHz. Frekvencije 2,1 kHz, 2,3 kHz, 2,7 kHz, 3,3 kHz pokazuju najveće vrijednosti harmonijskih struja. Vrijednosti struja supraharmnika u ovom slučaju kreću se u frekvenzijskom rasponu od 2-6 kHz.



Slika 4.13. Prikaz vrijednosti strujnih harmonika kod suprahomonika 2-6 kHz

Slika 4.14. prikazuje vrijednosti struja suprahomonika po fazama frekvencija 2,1 kHz, 2,3 kHz, 2,7 kHz, 3,3 kHz.



Slika 4.14. Prikaz vrijednosti struja suprahomonika

Prema Slici 4.15. prikazane su vrijednosti TDD napona i snage suprahomonika 2-6 kHz po pojedinim fazama sustava. Možemo zaključiti u trenucima kada je TDD bio najveći, snage su pokazivale najveće vrijednosti, odnosno najveće vrijednosti opterećenja.

*Slika 4.15. Prikaz TDD napona [%] i snage [kW] kod supraharmonika 2 do 6 kHz*



## 5. ZAKLJUČAK

Pojam *harmonik* postaje sve učestaliji, kako u malim, tako i u srednjim i velikim elektroenergetskim sustavima. Poznato je da upotreba elektroničkih uređaja postaje sve češća, a kako ona raste, raste i potreba za razumijevanjem harmonika te njihovo ublažavanje odgovarajućim metodama. Strujni harmonici dovode do pregrijavanja elektroničke opreme krajnjih korisnika. Metode za ublažavanje strujnih harmonika jesu serijski i shunt filtri koji omogućuju blokiranje spomenutih harmonika struje.

Strujni harmonici utječu na pojedine elemente unutar sustava i stvaranjem gubitaka. Najveća razlika između harmonika i supraharmonika je takva da supraharmonici djeluju na znatno većim frekvencijama koji su reda nekoliko kHz, dok pod harmonike pripadaju one vrijednosti koje se nalaze do osnovne frekvencije od 50 Hz. Zaključuje se da sve više opreme emitira značajne razine supraharmonika u mreži, a izobličenja napona u ovakvom frekvencijskom području pri određenim razinama su značajna. Primarne i sekundarne emisije su bitne za supraharmonike te se uvodi novi pojam „interakcija“, gdje međudjelovanje dvaju ili više uređaja nelinearnih svojstava, utječe na strujne harmonike i struje supraharmonika. Izvršena mjerenja su dokazala da supraharmonici ozbiljno utječu na intenzitet svjetla kod LED rasvjete. Smanjenjem emisije pri nižim frekvencijskim rasponima pomoću opreme, dolazi do povećanja supraharmonijske emisije. Postavljanjem strožih mjera kod harmonijskih emisija dolazi do težih posljedica, a to je povećana supraharmonijska razina. Pojava rezonancije ima značajnu ulogu prilikom širenja supraharmonijskih izobličenja u niskonaponskim mrežama. Za mjerenja supraharmonijskih struja preporuča se korištenje strujnih transformatora koji daju visoku točnost za amplitudu i fazni kut. Uočava se kako na određenim frekvencijskim rasponima ograničenja ne postoje, ali ubuduće su prijeko potrebna, jer dolazi do takvog utjecaja, gdje jedan uređaj može onemogućiti rad drugog uređaja koji je spojen na isti sustav. Kao preporuka je dan prijedlog za postavljanje granica u ovom frekvencijskom području, koji se temelji na trenutnim standardima te se pravi razlika između uskopojsnih i širokopojsnih signala. Prilikom ispitivanja vozila: Renault Zoe, Nissan Leaf, BMW i3, Audi e-tron, VW Golf GTE, Ford Focus e-lectric, Mitsubishi Outlander i Tesla Model 90D.[4] na Sveučilištu primjenjenih znanosti Bingen, primjećeno je da priključenjem drugog električnog vozila paralelno sa prvim dolazi do povećanja struja harmonika. Analizom mjerenja punionice, zaključuje se kako su sve vrijednosti napona bile u dopuštenim granicama i unutar ranije

**Commented [ZK30]:** Ovdje bi trebalo kratko objasniti razliku između harmonika i supraharmonika!

postavljenih limita. Harmonici 3., 5., 7., 11., i 13. reda su pokazali najveće izmjerene vrijednosti napona harmonika, a istaknuo se i harmonik 27. reda. Kod vrijednosti frekvencija supraharmonika: frekvencije 2,1 kHz, 2,3 kHz, 2,7 kHz, 3,3 kHz pokazuju najveće vrijednosti struja harmonika. Vrijednosti struja supraharmonika u ovom slučaju kreću se u frekvencijskom rasponu od 2-6 kHz.

## LITERATURA

[1] B.W.Kennedy, Power Quality Primer, McGraw Hill Professional, 2000.

[2] C. Sankaran, Power Quality, CRC Press, Boca Raton, 2002.

[3] Tutorial 2 Paul Wright.pdf

[4] SP\_SupraHarmonics2-150kHz\_EMobility\_HP\_EN.pdf

[

[6] <https://pdfcoffee.com/harmo-pdf-free.html>, 29.7.2022.

[7] <http://ba.electric-test.com/>, 15.8.2022.

Formatted: Font: (Default) Times New Roman, 12 pt

Field Code Changed

Formatted: Underline

Formatted: Font: (Default) Times New Roman, 12 pt, Underline

Formatted: Font: (Default) Times New Roman, 12 pt, No underline

Formatted: Font: (Default) Times New Roman, 12 pt

Formatted: Font color: Text 1



## SAŽETAK

Harmonici nastaju zbog nelinearnih opterećenja, uzrokuju pojavu strujnih harmonika koja dovode do nepredviđenih štetnih utjecaja na korisnost uređaja te opremu kod krajnjih korisnika kao primjer može se navesti pregrijavanje. Pokazalo se kako sve više opreme utječe na stvaranje supraharmnika u mreži. Izobličenja napona prilikom ovih frekvencijskih raspona u određenim slučajevima pokazuju značajne razine. Rezonancija utječe na širenje struje supraharmnika u niskonaponskim mrežama. Struje supraharmnika utječu na pregrijavanje kondenzatora, odnosno njegova dva uređaja: EMC filtera i diodnog ispravljača te se na taj način smanjuje njegov životni vijek. Potrebno je uvođenje određenih standarda za frekvencijski raspon od 2.5 kHz do 150 kHz, gdje se u određenim situacijama prilikom upotrebe jednog uređaja frekvencije  $f > 2.5$  kHz dovodi do izbacivanja drugog uređaja spojenog na isti sustav. Električna vozila i moderna energetska elektronika stvaraju daleko veća opterećenja na elektroenergetsku mrežu od 2.5 kHz. Tijekom analize mjerenja punionice električnih vozila, pregledom izvješća svih vrijednosti napona ustanovljeno je kako su sve izmjerene vrijednosti napona po fazama bile u dopuštenim granicama. THD je također bio unutar svojih granica od 8%.

**Ključne riječi:** harmonik, supraharmnik, strujni harmonik, naponski harmonik, nelinearno opterećenje, faktor izobličenja.

## ABSTRACT

Harmonics are caused by nonlinear loads and result in the occurrence of harmonic currents that have unforeseen adverse effects on the usability of equipment and devices at end users, which include overheating. It has been shown that more and more equipment is affected by the generation of harmonics in the network. Voltage distortions in these frequency ranges have been significant in some cases. Resonance affects the propagation of supraharmonic currents in low-voltage networks. The supraharmonic current causes overheating of the capacitor of the main part of the two devices: the EMC filter and the diode rectifier, reducing its lifetime. It is necessary to introduce certain standards for the frequency range from 2.5 kHz to 150 kHz, where in certain situations the use of a device with frequency  $f > 2.5$  kHz leads to the expulsion of another device connected to the same system.. Electric vehicles and modern power electronics place a much greater load on the 2.5 kHz power grid. When analysing the measurements at the electric vehicle charging station, by reviewing the report of all voltage values, it was found that all measured voltage values by phase were within acceptable limits. The distortion factor was also within the range of 8%.

**Keywords:** harmonic, supraharmonic, harmonic current, harmonic voltage, nonlinear load, distortion factor

## ŽIVOTOPIS

Milan Baričević je rođen 11.12.1997. godine u Požegi. Osnovnu školu završava u OŠ „Julija Kempfa“ Požega. Nakon završene osnovne škole upisuje srednju „Tehničku školu Požega“, smjer Elektroenergetika koju uspješno završava 2016. godine.

Nakon završene srednje škole upisuje Prediplomski stručni studij na „Veleučilištu u Bjelovaru“, smjer Mehatronika. Na 3. godini u sklopu ERASMUS+ programa odrađuje stručnu praksu na Institutu „Jožef Stefan“ u Ljubljani. Nakon uspješno završene 3 godine, 2019. godine upisuje razlikovne obveze na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku kako bi stekao pravo na upis na diplomski studij te 2020. godine upisuje Diplomski studij Elektrotehnike, smjer Elektroenergetika, izborni blok „Elektroenergetski sustavi“.

Tijekom druge godine diplomskog studija odrađuje stručnu praksu u tvrtki HELB d.o.o. Božjakovina, Dugo Selo.

Formatted: Font: (Default) Times New Roman, 12 pt