

Aktivni filter viših harmonika - primjena

Krmpotić, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2025

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:200:378493>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**

Repository / Repozitorij:

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



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

Sveučilišni diplomski studij

AKTIVNI FILTER VIŠIH HARMONIKA - PRIMJENA

Diplomski rad

Luka Krmpotić

Osijek, 2025.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac D1: Obrazac za ocjenu diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju****Ocjena diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju**

Ime i prezime pristupnika:	Luka Krmpotić
Studij, smjer:	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
Mat. br. pristupnika, god.	D-1409,
JMBAG:	0165077615
Mentor:	prof. dr. sc. Zvonimir Klaić
Sumentor:	dr. sc. Mario Primorac
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	izv. prof. dr. sc. Krešimir Fekete
Član Povjerenstva 1:	prof. dr. sc. Zvonimir Klaić
Član Povjerenstva 2:	dr. sc. Ružica Kljajić
Naslov diplomskog rada:	Aktivni filter viših harmonika - primjena
Znanstvena grana diplomskog rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak diplomskog rada:	Opisati osnovne pokazatelje kvalitete električne energije. Objasniti harmonijsko izobličenje i pripadajuće pokazatelje te norme za njihova ograničenja. Opisati metode za ublažavanje utjecaja viših harmonika u elektrodistribucijskoj mreži. Ispitati princip rada stvarnog aktivnog filtera harmonika i njegov utjecaj na ublažavanje strujnih i naponskih harmonika u mreži.
Datum ocjene pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:	05.02.2025.
Ocjena pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:	Izvrstan (5)
Datum obrane diplomskog rada:	4.3.2025.
Ocjena usmenog dijela diplomskog rada (obrane):	Izvrstan (5)
Ukupna ocjena diplomskog rada:	Izvrstan (5)
Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije diplomskog rada čime je pristupnik završio sveučilišni diplomski studij:	11.03.2025.

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

Osijek, 11.03.2025.

Ime i prezime Pristupnika:	Luka Krmpotić
Studij:	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	D-1409,
Turnitin podudaranje [%]:	14

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Aktivni filter viših harmonika - primjena**

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

i sumentora dr. sc. Mario Primorac

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis pristupnika:

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Zadatak diplomskog rada	1
2. PREGLED PODRUČJA RADA	2
3. O KVALITETI	3
3.1. Pokazatelji kvalitete električne energije	3
3.1.1. Naponska nesimetrija	3
3.1.2. Prijelazne pojave	4
3.1.3. Prekid opskrbe	4
3.1.4. Previsoki i preniski naponi	5
3.1.5. Naponski propadi i prenaponi	5
3.1.6. Kolebanje i treperenje napona	6
3.1.7. Električni šum i signalni naponi	7
4. VIŠE O HARMONICIMA	8
4.1. Osnovno o harmonicima	8
4.2. Matematička analiza harmonijskog izobličenja	10
4.3. Izvori harmonika	13
4.3.1. Transformatori	14
4.3.2. Rotacijski strojevi	15
4.3.3. Trošila s električnim lukom	15
4.3.4. Rasvjeta	16
4.3.5. Sklopovi energetske elektronike	16
4.4. Pokazatelji harmonijskog izobličenja	19
4.4.1. Ukupno harmonijsko izobličenje – THD	19
4.4.2. Ukupno harmonijsko izobličenje u odnosu na potražnju – TDD	20
4.5. Štetni utjecaj harmonika na opremu	20
4.6. Norme i pravila elektroenergetskog sustava	23
4.6.1. EN 50160	23
4.6.2. IEC 61000	26
4.6.3. IEEE 519	29
5. METODE ZA UBLAŽAVANJE UTJECAJA VIŠIH HARMONIKA	30
5.1. Smanjenje amplituda harmonijskih struja	30
5.2. Mijenjanje rezonantne frekvencije sustava	31

5.3. Ugradnja filtera.....	32
5.3.1. Pasivni filteri	32
5.3.2. Aktivni filteri.....	34
6. ISPITIVANJE RADA AKTIVNOG FILTERA I NJEGOV UTJECAJ NA SMANJENJE STRUJNIH I NAPONSKIH HARMONIKAU MREŽI	41
6.1. Opis opreme.....	41
6.2. Ispitivanje mogućnosti opreme pri generaciji harmonika	43
6.3. Analiza harmonijskog sadržaja struje i napona pri simulaciji rada trošila	49
7. ZAKLJUČAK.....	61
LITERATURA	62
SAŽETAK.....	65
ABSTRACT	66
ŽIVOTOPIS.....	67

1. UVOD

Povijesno gledano, kvaliteta električne energije uvijek je bila važna zbog ispravnog funkcioniranja elektroenergetskog sustava. S promjenama ekonomskih uvjeta, robusnost električnih strojeva se smanjila, a napredak tehnologije doveo je do sve veće uporabe sklopova energetske elektronike u kućanstvima i industriji. Ovi sklopovi zahtijevaju visoku kvalitetu električne energije, ali je istovremeno narušavaju svojim radom. Ključne karakteristike kvalitete električne energije uključuju konstantnu frekvenciju, idealni sinusni valni oblik, simetriju i konstantan napon. Međutim, prisustvo i rad sklopova energetske elektronike, kao i nelinearnih trošila, uzrokuju pojavu strujnih i naponskih harmonika. Harmonici mogu dovesti do skraćenog životnog vijeka uređaja, nepravilnog rada ili čak uništenja ostale opreme u mreži. Stoga je bitno smanjiti harmonijsko izobličenje na minimalnu razinu. Kroz povijest, ovaj cilj se postizao raznim metodama koje su opisane u ovom radu. Isto tako, ovaj rad se fokusira na najnoviju metodu ublažavanja harmonijskih izobličenja pomoću aktivnih filtera. Aktivni filteri učinkovito smanjuju harmonijska izobličenja i osiguravaju stabilnu i kvalitetnu električnu energiju, čime produžuju životni vijek uređaja i poboljšavaju njihovu pouzdanost.

1.1. Zadatak diplomskog rada

Definirati osnovne pojmove vezane uz kvalitetu električne energije s naglaskom na problem viših harmonika i metode smanjivanja istih. Opisati aktivne filtere i ostale metode za snižavanje iznosa viših harmonika. Simulirati trošila koja uzrokuju harmonijske struje generatorom harmonika, istovremeno filtrirati generirane struje aktivnim filterom, te izvršiti mjerenja i analizu rezultata mjerenja.

2. PREGLED PODRUČJA RADA

Upoznavanje sa osnovnim problemima u kvaliteti električne energije, njihovim uzrocima i posljedicama, te važnost održavanja kvalitete na visokom nivou opisana je u literaturi [1] i [2]. U istoj literaturi kao i u [3] još su detaljnije opisani pokazatelji kvalitete, kao i njihove granične vrijednosti koje jamče pravilan rad svih dijelova distribucijskog sustava. Ovaj rad fokusira se na problem viših harmonika, što je slučaj i sa [4] i [5] gdje autori detaljno opisuju koji su izvori harmonika u sustavu. U literaturi [6] i [7] još su detaljnije opisani pojedini izvori harmonijskih struja i napona.

Harmonijsko izobličenje bitno je prepoznati i moći izmjeriti. Tako su u [8] i [9] postavljene matematičke osnove analize harmonika kojima se mjeri njihovo prisustvo u strujama i naponima u mreži. Radom [10] autori navode praktične primjere problema na opremi koju mogu uzrokovati harmonici. Izvor [11] daje uvid u aktualne norme koje vrijede na području Republike Hrvatske i njihov razvoj kroz povijest. Literatura [12] opisuje sadržaj i bitne stavke norme EN 50160 koja je važeća za cijelo europsko područje, a tako i Hrvatsku. Literatura [13] i [14] korisna je za upoznavanje s ostalim važećim normama i preporukama koje se koriste u svijetu, ali i u Europi.

Kako bi se zadovoljile navedene norme, postoje razne metode za ublažavanje utjecaja harmonika od kojih je najefektivnija i najefikasnija uporaba aktivnih filtera. Uz prethodno navedenu literaturu, [14] je suvremeni izvor koji definira osnovne dijelove aktivnog filtera i podjelu prema različitim parametrima. „Active Harmonic Filters“ [15] komplementira prethodno, ali daje i uvid u povijesni razvoj i izazove koji su stajali na putu ostvarenja tehnologije aktivnog filtera. Pojedine topologije i njihove karakteristike još su detaljno opisane u [16] i [17]. U praktičnom dijelu rada korištena je literatura od strane proizvođača koja je dobivena uz mjerne uređaje i sam aktivni filter.

3. O KVALITETI

Kvaliteta električne energije može se definirati na više načina. S gledišta proizvođača, operatera prijenosa i distributera kvaliteta električne energije vezana je uz pouzdanost distribucijske mreže elektroenergetskog sustava i dostupnost električne energije krajnjem potrošaču. S druge strane, proizvođači opreme i potrošači kvalitetu definiraju parametrima koji osiguravaju siguran i pouzdan rad opreme. Problem u kvaliteti električne energije zato se može definirati kao bilo koja promjena u naponu, struji ili frekvenciji koja uzrokuje nepravilan rad ili uništenje opreme krajnjeg potrošača, [1].

Uzroci koji dovode do promjena u naponu, a time i problema u kvaliteti električne energije mogu biti višestruki i vezani uz različite elemente elektroenergetskog sustava, ali i vanjske utjecaje. Općenito, uzroci se mogu razvrstati u četiri grupe: normalne sklopne operacije u sustavu, nelinearni karakter potrošača, prirodni faktori i utjecaj okoline i specifičnost rada potrošača i elektroenergetskog sustava, [2].

Problemi koji nastaju u elektroenergetskoj mreži su poremećaji koji se kvalificiraju pokazateljima kvalitete električne energije. Bitni pokazatelji su: naponska nesimetrija, prijelazne pojave, prekidi opskrbe, previsoki i preniski naponi, naponski propadi i prenaponi, kolebanja napona, treperenje te harmonici. U svijetu su propisane različite norme koje definiraju granične vrijednosti, metode mjerenja i analize mjerenih vrijednosti kako bi se osigurala zadovoljavajuća razina kvalitete električne energije u mreži.

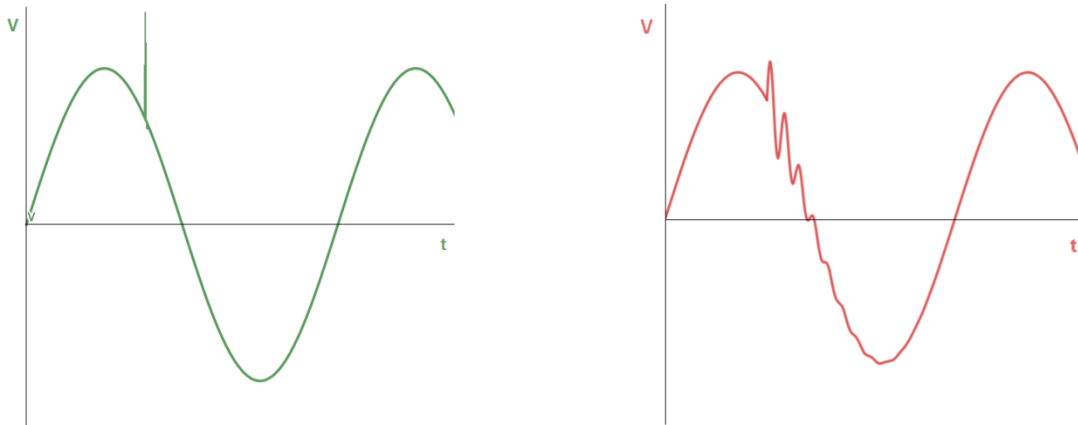
3.1. Pokazatelji kvalitete električne energije

3.1.1. Naponska nesimetrija

U trofaznim elektroenergetskim sustavima nesimetrija napona se definira kao odstupanje iznosa napona od nazivnog u jednoj od triju faza i/ili odstupanje faznog kuta od točno 120° između pojedinih faza. Izvori nesimetrije su različita jednofazna i dvofazna trošila i najednako raspoređeni potrošači po fazama ili kvarovi u elektroenergetskoj mreži. Posljedice nesimetrije će djelovati na rad trofaznih strojeva. Tako će motori raditi neujednačeno, moment neće biti konstantan te će se motor pregrijavati, [18]. Uobičajeno, nesimetrija se može analizirati metodom simetričnih komponenti, ali se može predočiti i kao postotna promjena napona u odnosu na nazivnu vrijednost.

3.1.2. Prijelazne pojave

Prijelazne pojave ili tranzijenti mogu se definirati kao kratkotrajne neželjene pojave koje uzrokuju deformaciju valnog oblika, a nastaju prelaskom iz jednog u drugo stacionarno stanje. Razlikuju se impulsne i oscilatorne prijelazne pojave. Impulsni događaj karakterizira velika amplituda, velika brzina uspona i jednosmjerni polaritet, dok oscilatorni događaj ima dvosmjerni polaritet i duže traje, [2]. Slikom 3.1. prikazani su valni oblici u oba slučaja.

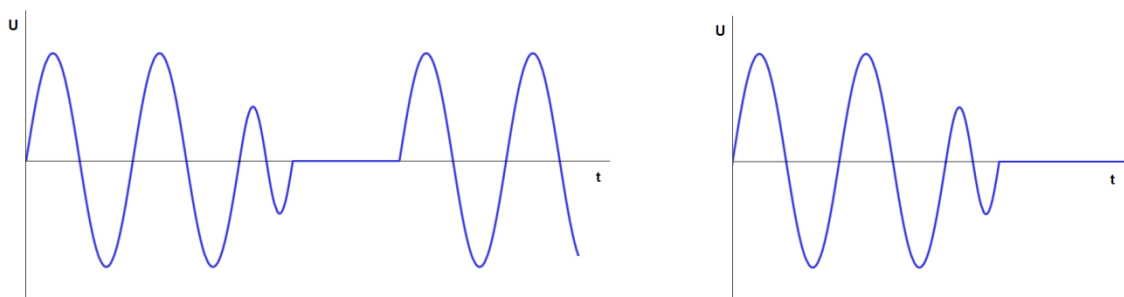


Slika 3.1. Impulsna (lijevo) i oscilatorna (desno) prijelazna pojava

Impulsne prijelazne pojave najčešće nastaju atmosferskim pražnjenjem i za posljedicu imaju oštećenja transformatora i ostale opreme. Od ovakvih pojava elektroenergetsku mrežu i njene komponente štite odvodnici prenapona. Oscilatorne prijelazne pojave nastaju uključivanjem kondenzatorskih baterija, promjenom topologije mreže i kao posljedica atmosferskog pražnjenja.

3.1.3. Prekid opskrbe

Prekidi opskrbe su pojave kada napon mreže u mjerenoj točki iznosi manje od 5 % nazivne vrijednosti. Prema vremenu trajanja prekidi napajanja dijele se na kratkotrajne (do 3 minute) i dugotrajne prekide (dulje od 3 minute). Slika 3.2. prikazuje kratkotrajni prekid (lijevo) i dugotrajni prekid (desno).



Slika 3.2. Kratkotrajni prekid (lijevo) i dugotrajni prekid (desno)

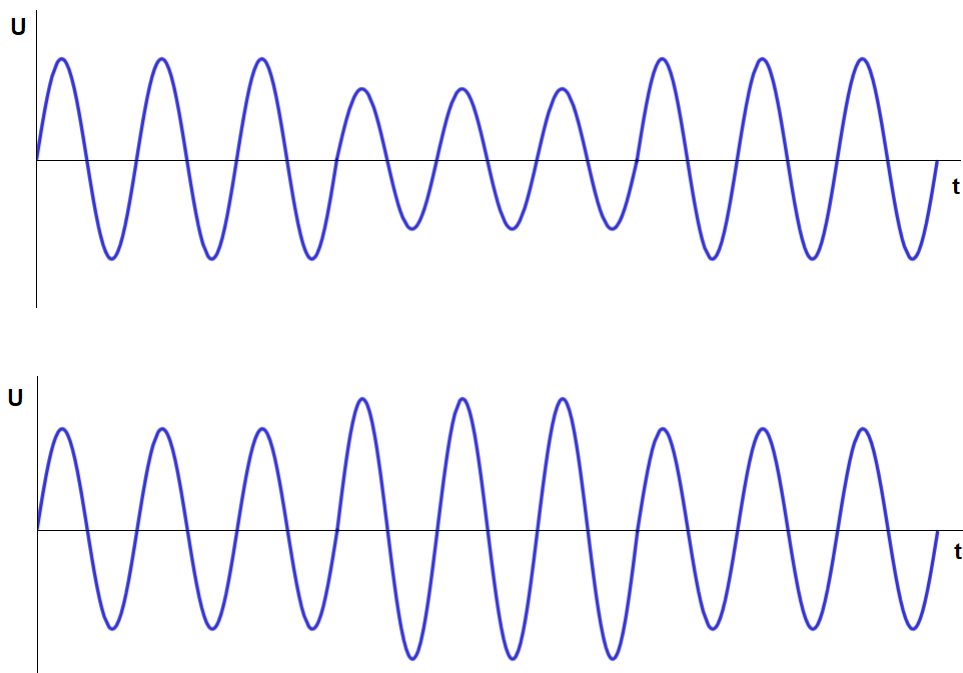
3.1.4. Previsoki i preniski naponi

Preniski napon je smanjenje efektivne vrijednosti mrežnog napona na razinu manju od 90 % nazivne vrijednosti u vremenskom periodu duljem od 1 minute. Uzrokuju ih uključivanje velikih opterećenja, isključivanje kondenzatorskih baterija i rad naponske regulacije, [2].

Stanje previsokog napona predstavlja porast efektivne vrijednosti mrežnog napona iznad 110 % nazivne vrijednosti u trajanju duljem od 1 minute. Uzrok tome su rasterećenja ili ispadi postrojenja i isključivanje kondenzacijskih baterija. Oba stanja karakteriziraju se kao dugotrajne promjene napona i uzrokuju poremećaj u radu uređaja koji zahtijevaju konstantnu naponsku razinu, [2].

3.1.5. Naponski propadi i prenaponi

Naponski propad je stanje kada efektivna vrijednost mrežnog napona padne na vrijednost između 10 % i 90 % nazivne u trajanju od pola periode do 1 minute. Prenapon se definira kao stanje povećane efektivne vrijednosti na vrijednost od 110 % do 180 % koje traje više od pola periode, a manje od 1 minute. Naponski propadi i prenaponi se razlikuju od stanja previsokog i preniskog napona prema trajanju i graničnim vrijednostima, gdje su propad i prenapon kratkotrajni događaji, uglavnom većeg intenziteta.



Slika 3.3. Naponski propad (gore) i prenapon (dolje)

3.1.6. Kolebanje i treperenje napona

Odstupanje od nazivne vrijednosti napona u određenom rasponu definira se kao kolebanje napona i normalna je pojava u sustavu koju uzrokuje promjena opterećenja. Prema normi EN50160 dopušteno odstupanje je od 90 % do 110 % nazivne vrijednosti. U tom rasponu neće biti problem u radu opreme.

Treperenje napona, poznato i kao flickeri, predstavlja oscilacije vrijednosti napona uzrokovane brzim i učestalim promjenama struja opterećenja. Flickeri su definirani titranjem svjetlosti rasvjetnih tijela koje ljudsko oko može primjetiti. Intenzitet treperenja procjenjuje se subjektivnim procjenom skupine ljudi; kada polovica promatrača primijeti svjetlosno treperenje, smatra se da je ono dostiglo vrijednost 1, [3].

Uzroci treperenja su najčešće uređaji koji generiraju nagle promjene opterećenja poput elektrolučnih peći, aparata za zavarivanje, uredskih uređaja i sl.

3.1.7. Električni šum i signalni naponi

Električni šum su svi neželjeni signali napona i struje superponirani na napone i struje osnovne frekvencije. Obuhvaćaju signale u rasponu do 200 kHz. Uzrok šuma su nepravilno uzemljenje, rad električne opreme i uređaji s električnim lukom, [2].

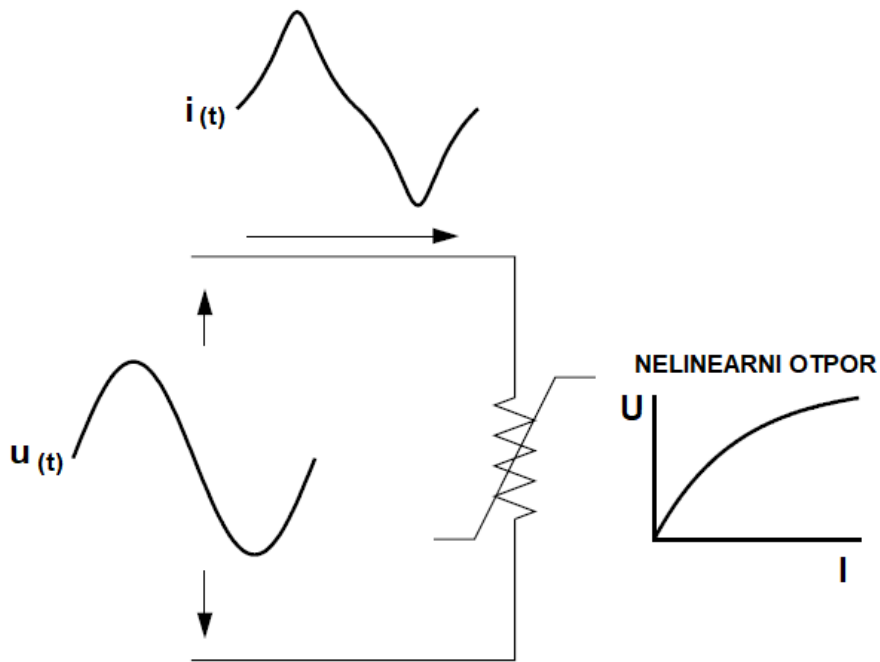
Signalni naponi su također superponirani naponi koje generira oprema za upravljanje mrežom. Obično su ovakvi signali male amplitude u odnosu na veličine u mreži, ali ih je potrebno nadzirati kako ne bi ometali rad ostale opreme u mreži, [3].

4. VIŠE O HARMONICIMA

4.1. Osnovno o harmonicima

Smatra se da je napon vrlo dobre kvalitete i da je identičan gotovo savršenom sinusnom valnom obliku na samom mjestu proizvodnje, ali se zato odstupanje od sinusnog valnog oblika povećava što je udaljenost od izvora veća. Rad pojedinih uređaja i strojeva može uzrokovati struje i napone u mreži čiji valni oblik nije niti približno sličan sinusnom obliku.

Trošila u sustavu se mogu podijeliti na linearna i nelinearna; ako bi sustav sadržavao samo linearna trošila tada bi valni oblici struje i napona bili čistog sinusnog oblika. Linearna trošila imaju proporcionalnu strujno-naponsku karakteristiku te će za sinusnu promjenu napona uzrokovati struju sinusnog oblika. Suprotno tome, nelinearna trošila su ona čija struja nije proporcionalna dovedenom naponu. Najjednostavniji primjer toga je nelinearni otpor. Strujno-naponska karakteristika tog otpora nije linearni pravac. Slikom 4.1. prikazano je kako dolazi do izobličenja valnog oblika struje za zadani sinusni napon. Takvo izobličenje naziva se harmonijsko izobličenje. Harmonijski izobličena struja će preko mrežne impedancije uzrokovati izobličeni napon u sustavu koji se dalje širi u više naponske razine i prema ostalim potrošačima. Dakle, harmonijsko izobličenje struje uzrokovat će izobličenje napona, [4], [19]. Uz ostale parametre vezane uz kvalitetu električne energije, harmonici su jedan od značajnijih parametara u modernoj distribucijskoj mreži.



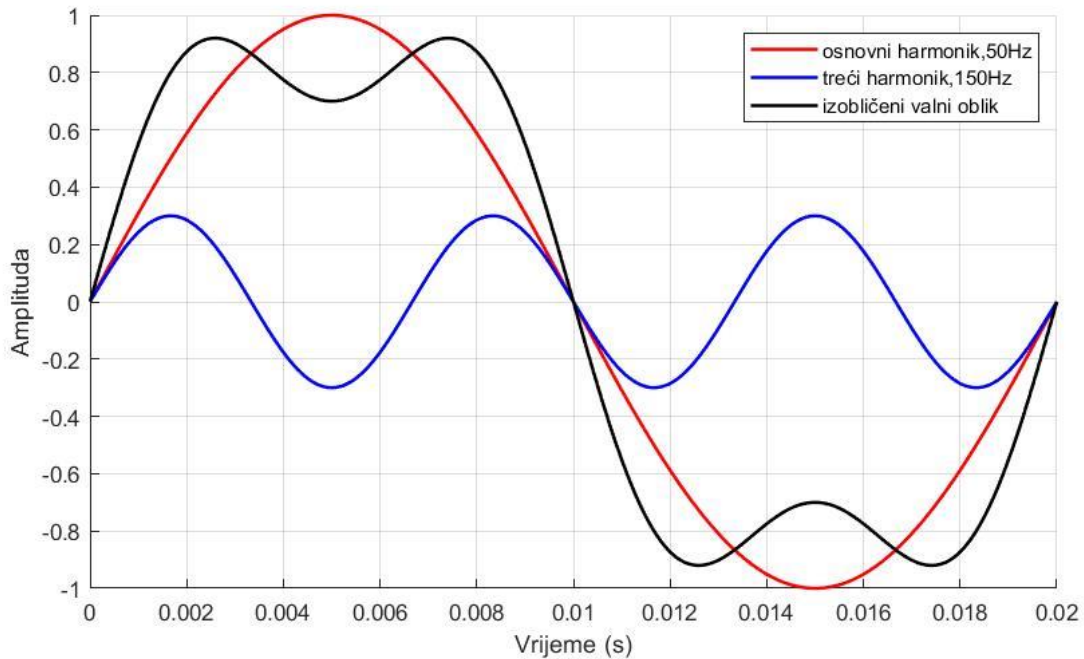
Slika 4.1. Izobličenje valnog oblika struje uslijed nelinearnog otpora [1]

Harmonici napona i struje definiraju se kao neželjene komponente napona i struje čije su frekvencije cjelobrojni umnošci osnovne frekvencije sustava (50 Hz), [2]:

$$f_h = (h) * (\text{osnovna frekvencija}) \quad (4-1)$$

gdje je f_h frekvencija jednog harmonika, a h cijeli broj.

Tako će za osnovnu frekvenciju sustava od 50 Hz drugi harmonik imati frekvenciju od 100 Hz, a treći 150 Hz. Primjer harmonijskog izobličenja koje se sastoji od osnovne komponente i trećeg harmonika prikazano je slikom 4.2.



Slika 4.2. Valni oblik koji sadrži osnovni i treći harmonik

Uz harmonike postoje i međuharmonici koji su komponente struje i napona čije frekvencije nisu cijeli brojevi, te subharmonici i supraharmonici. Subharmonici su komponente čije frekvencije ne prelaze onu osnovnog signala, a supraharmonici su komponente čije su frekvencije znatno više (do 15 kHz), [2].

4.2. Matematička analiza harmonijskog izoblićenja

Iako se na prvi pogled može činiti da je izoblićenje nasumično i kaotičnog karaktera, to uglavnom nije slučaj. Većina izoblićenja je periodična, [1]. Postojanje osnovnog perioda u signalu omogućuje korištenje Fourierovog reda kojim se svaki periodički signal može rastaviti na harmonijske komponente, te se od istih može konstruirati početni signal.

Funkcija $f(t)$ koja je definirana za sve realne brojeve t je periodična ako postoji period T za koji vrijedi:

$$f(t + T) = f(t) \quad (4-2)$$

gdje je T – osnovni period funkcije.

Ako je uvjet periodičnosti funkcije zadovoljen ona se može rastaviti u Fourierov red:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} [a_h \cos(h\omega_0 t) + b_h \sin(h\omega_0 t)] \quad (4-3)$$

gdje je:

$$\omega_0 = 2\pi/T = 2\pi f_0 \quad (4-4)$$

U izrazu (4-4), ω_0 predstavlja osnovnu kružnu frekvenciju, a f_0 osnovnu frekvenciju funkcije $f(t)$. Koeficijenti a_h i b_h u relaciji (4-3) računaju se prema:

$$a_h = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(k\omega_0 t) dt \quad (4-5)$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin(k\omega_0 t) dt \quad (4-6)$$

Izraz (4-3) može se napisati u skraćenom obliku zbroja sinusoidalnih harmonika:

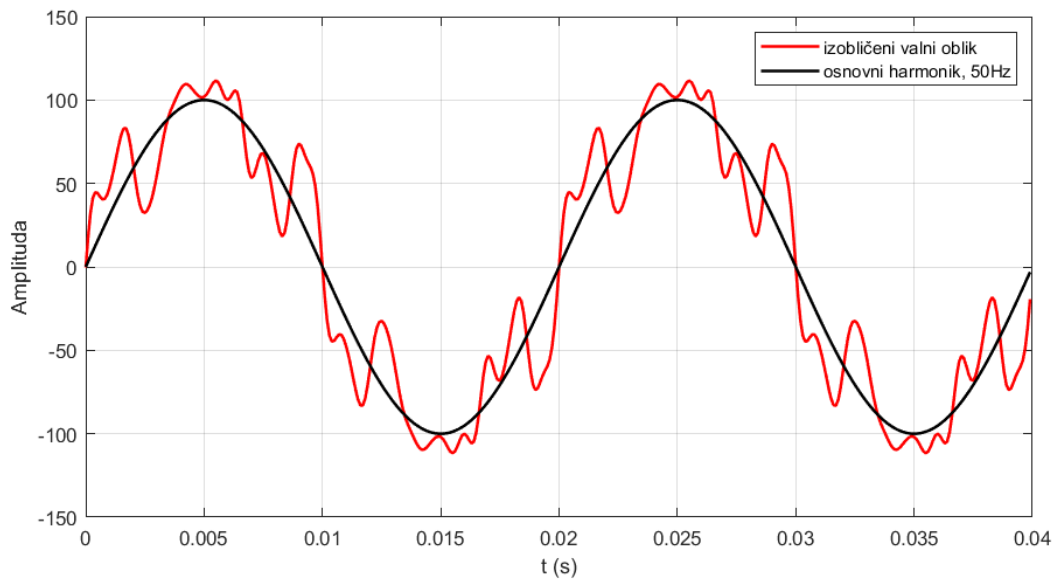
$$f(t) = F_0 + \sum_{h=1}^{\infty} F_h \sin(h\omega t + \varphi_h) \quad (4-7)$$

Prvi član Fourierovog reda F_0 predstavlja nulti harmonik ili istosmjernu komponentu dok F_h predstavlja h-ti harmonik. Također, F_h i φ_h su maksimalna vrijednost i fazni kut h-tog harmonika definirani s: [2]

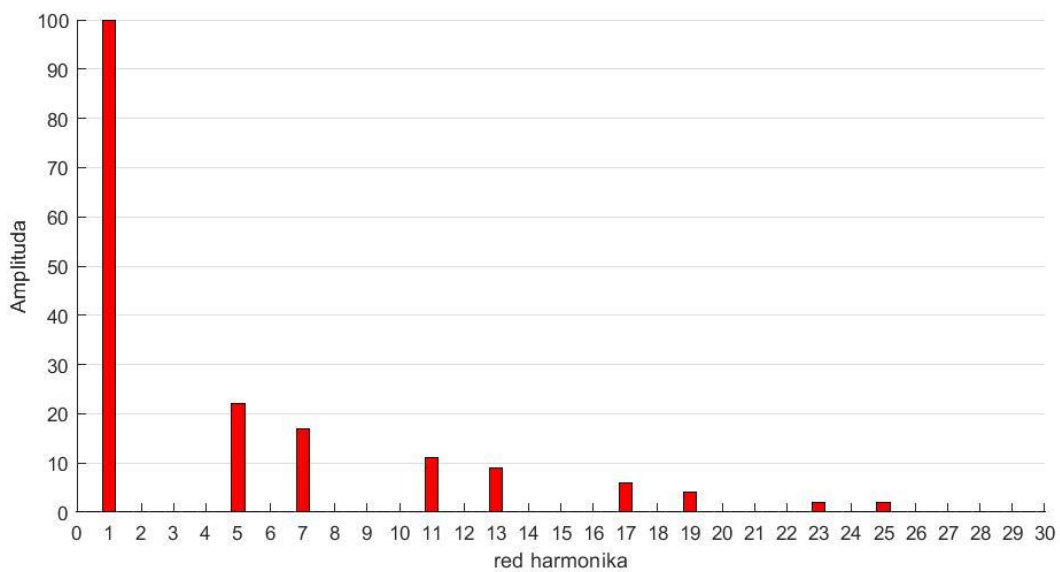
$$F_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt, \quad F_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}, \quad \varphi_h = \arctg \frac{a_h}{b_h} \quad (4-8)$$

Dakle, primjenom Fourierovog reda na periodički, kontinuirani signal u vremenskoj domeni se dobiva niz diskretnih komponenti u frekvencijskoj domeni. Slika 4.3. prikazuje izobličeni signal, a slikom 4.4. su prikazane amplitude harmonika nakon rastava signala sa slike 4.3. u Fourierov red. Ovisno o osobinama simetrije signala neki od harmonika biti će jednaki nuli. Tako vrijedi da ako je funkcija antisimetrična na poluperiodu, odnosno simetrična na točku poluperioda, tada

postoje samo neparni harmonici. To je slučaj u većini valnih oblika napona i struja elektroenergetske mreže. Time pojava parnih harmonika upućuje na nepravilan rad ili kvar pogonske ili mjerne opreme. Iznimka je rad punovalnih ispravljača čiji izlazni signal u spektru sadrži samo parne harmonike jer signal ima svojstvo simetrije na poluperiodu, [2], [5].



Slika 4.3. Izobličeni valni oblik



Slika 4.4. Spektar izobličenog valnog oblika

Za analizu signala koji nisu nužno periodični koristi se Fourierova transformacija, točnije, diskretna Fourierova transformacija (DFT) koja za rezultat daje diskretne vrijednosti spektra. Diskretni pristup pogodan je za digitalnu obradu zbog mogućnosti uzorkovanja kontinuiranog analognog signala. Viši broj uzoraka signala daje bolju aproksimaciju signala (rezoluciju), a time zahtjeva i velik broj matematičkih operacija pri analizi. U tom slučaju se primjenjuje brza Fourierova transformacija (FFT) koja smanjuje broj operacija množenja s vrijednosti N^2 na vrijednost $(N/2)\log_2 N$, gdje N označava broj uzoraka signala, [2].

4.3. Izvori harmonika

Izvori viših harmonika većinom su nelinearna trošila koja svojim radom injektiraju struje sa harmonijskim sadržajem koje uzrokuju harmonijsko izobličenje napona. Prema karakteru, nelinearna trošila mogu se dijeliti na: elemente s efektom zasićenja, elemente koji rade na principu električnog luka i energetske elektronike.

Prema [2], izvori se još mogu dijeliti prema mjestu nastanka, a to su:

- kućanstva
- veliki poslovni potrošači i podatkovni centri
- industrija.

Veliki poslovni potrošači, podatkovni centri, bolnice, ali i kućanstva su izvori viših harmonika čiju potrošnju čine rasvjeta, frekvencijski pretvarači u klimatizacijskim i ventilacijskim uređajima te elektronički uređaji koji su napajani jednofaznim pretvaračima koji rade u sklopnom načinu rada. Ovakvi potrošači nemaju velike nazivne snage ali su u velikom broju i nisu zanemarivi, [1].

Suprotnost tome su industrijski pogoni koje karakteriziraju nelinearna trošila velikih snaga. Povijesno gledano, izvori viših harmonika u mreži bili su vezani uz rad elemenata s efektom zasićenja. To su transformatori koji rade u području zasićenja, preopterećeni rotacijski strojevi, te peći za taljenje koje rade na principu električnog luka. Danas najveći izvor viših harmonika predstavljaju uređaji energetske elektronike, [1].

U industriji su kondenzatorske baterije često rješenje za korekciju faktora snage, ali njihov rad može uzrokovati povećanje harmonijskih struja i rezonanciju koja dovodi do pregrijavanja transformatora i motora, [1]. Kao što je već rečeno, loša kvaliteta električne energije, a time i

prisutnost viših harmonika u mreži uzrokuju ubrzano starenje opreme. Primjer toga su transformatori i kabeli. Također, dolazi do smetnji pri radu mjerne opreme i zaštitnih uređaja, to može rezultirati velikim ekonomskim gubicima. Zato je, uz korekciju faktora snage, isplativo primijeniti neku od metoda za ublažavanje viših harmonika.

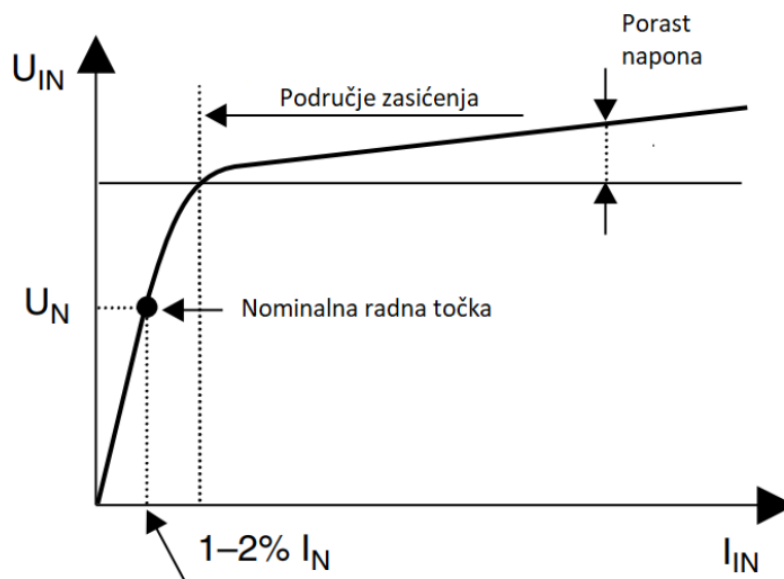
4.3.1. Transformatori

Kroz povijest transformatori su predstavljali jedan od prvih značajnih izvora harmonika. Transformatori, kao i ostali strojevi sa željeznom jezgrom, stvaraju harmonike zbog nelinearne karakteristike magnetiziranja željezne jezgre, [20]. Prema [4], transformator može doći u stanje zasićenja u dva slučaja:

- Preopterećen rad
- Podopterećen rad.

Do stanja preopterećenog rada dolazi prilikom velike potrošnje u sustavu, a to je uobičajeno za vrijeme radnog vremena tijekom dana, dok je podopterećen rad moguć pri malom opterećenju u sustavu koje je uobičajeno za jutarnje sate kada mrežni napon može biti viši od nazivnog. Visok napon u sustavu se također može pojaviti i kada se kompenzacijske baterije ne isključe pravovremeno.

Transformatori su dizajnirani tako da se pri normalnim radnim uvjetima radna točka nalazi u linearnom djelu krivulje magnetiziranja koja je prikazana slikom 4.5. Ako zbog navedenih razloga transformator uđe u zasićenje, njegova radna točka ulazi u područje zasićenja te će se kretati po koljenu krivulje koje je izrazito nelinearno. Ovakvim radom struja primarnog namota postaje vrlo izobličena i sadržava harmonike. Spektar se većinski sastoji od neparnih harmonika, ali izraženi su i 2. i 4. harmonik. Također su prisutni i harmonici višekratnici broja 3 koji se mogu ograničiti unutar transformatora ako se koristi trokut spoj, time se sprječava njihovo širenje mrežom. Iako pojedinačni doprinos jednog transformatora nije velik, u distribucijskim mrežama sa stotinama transformatora ukupni doprinos više nije zanemariv, [4].



Slika 4.5. Krivulja magnetiziranja transformatora [20]

4.3.2. Rotacijski strojevi

Motori, kao i transformatori, mogu generirati harmonike, ali njihov doprinos harmonijskom sadržaju je znatno manji jer je krivulja magnetiziranja motora linearnija od one kod transformatora. Harmonijske struje mogu nastati kao rezultat fizičke nesimetrije u utorima statora ili rotora, kao i zbog nepravilnosti namota. Korak namota motora, koji obično sadrži 5 do 7 utora po polu, također doprinosi stvaranju petog ili sedmog harmonika. Zasićenje magnetske jezgre može uzrokovati dodatne harmonijske struje, ali one su manjeg intenziteta nego kod transformatora. Kod generatora, harmonici napona su obično vrlo mali, ali postoje jer prostorni raspored namota statora nije idealan, što rezultira blagim izobličenjem induciranih napona time i struja, [4], [20].

4.3.3. Trošila s električnim lukom

U trošila s električnim lukom se ubrajaju lučne peći i aparati za zavarivanje. Uzrok nastanka harmonika je sam luk koji je nelinearan i stohastičan po prirodi. Rad lučne peći odvija se u više faza pri kojima se mijenja temperatura i duljina luka što direktno utječe na harmonijski sadržaj koji je u rasponu od 0,1 do 30 kHz. Luk čini serijski spoj iskrišta sa zračnim rasporedom u kojem se stvara električni luk vrlo male impedancije. Nakon paljenja luka, napon se smanjuje kako

struja luka raste, a jedino ograničenje dolazi od impedancije vodova, prigušnica i energetskog sustava, [4].

Kada bi se analizirao valni oblik luka, uočio bi se trapezoidni valni oblik čija je amplituda ovisna o duljini luka. Ipak, impedancija prigušnica i vodova prigušuje većinu harmonika, te valni oblik poprima oblik sličan sinusoidi. Zato se lučne peći smatraju kao relativno stabilan izvor harmonika, iako vrlo promjenjivog spektra uz prisustvo flickera, [1], [4], [6].

4.3.4. Rasvjeta

Gotovo sva rasvjeta u industriji, poslovnim prostorima, kućanstvu i javnoj rasvjeti sačinjena je od fluorescentnih ili LED rasvjetnih tijela. Fluorescentne cijevi su nelinearni potrošači koji, kao i lučne peći, rade na principu električnog luka, a time stvaraju nezanemariv iznos harmonika. Za rad cijevi potrebna je prigušnica koja ograničava iznos struje i kondenzator koji popravlja faktor snage. Fluorescentne cijevi u kombinaciji s ostalim elementima za njihov rad stvaraju harmonike trećeg, petog i sedmog reda. Isto tako, u trofaznim sustavima dolazi do nezanemarivih utjecaja harmonika višekratnika broja 3 na neutralni vodič. Taj problem se otklanja spajanjem opskrbnog transformatora u trokut spoj, [4].

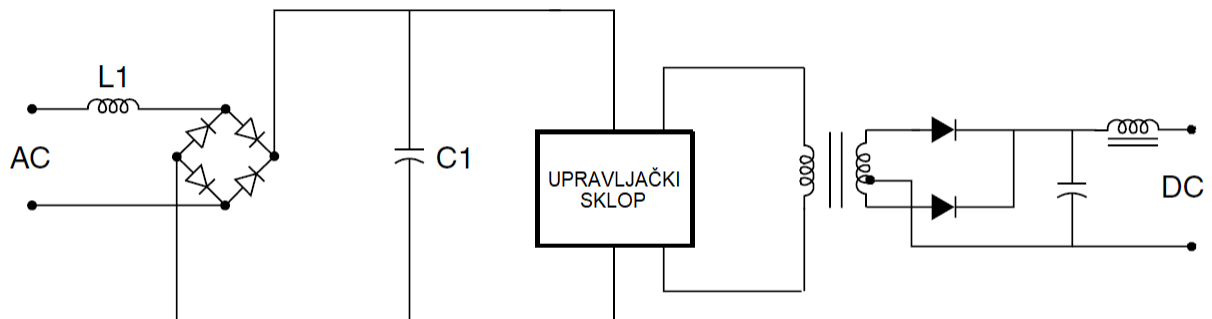
U zadnjih deset godina, gotovo sva nova rasvjetna tijela su LED tehnologije. Postojeća rasvjeta se također zamjenjuje LED rasvjetom. LED tehnologija je dugotrajnija i učinkovitija u usporedbi s ostalim tehnologijama, ali su za njen rad potrebni sklopovi energetske elektronike koji narušavaju kvalitetu električne energije injektiranjem harmonika sve do 50. reda. Iako je njihova potrošnja mala zbog visoke učinkovitosti, ukupna snaga koja je potrebna za rasvjetu je i dalje velik dio opterećenja u distribucijskoj mreži, a time ima i harmonijski doprinos, [7].

4.3.5. Sklopovi energetske elektronike

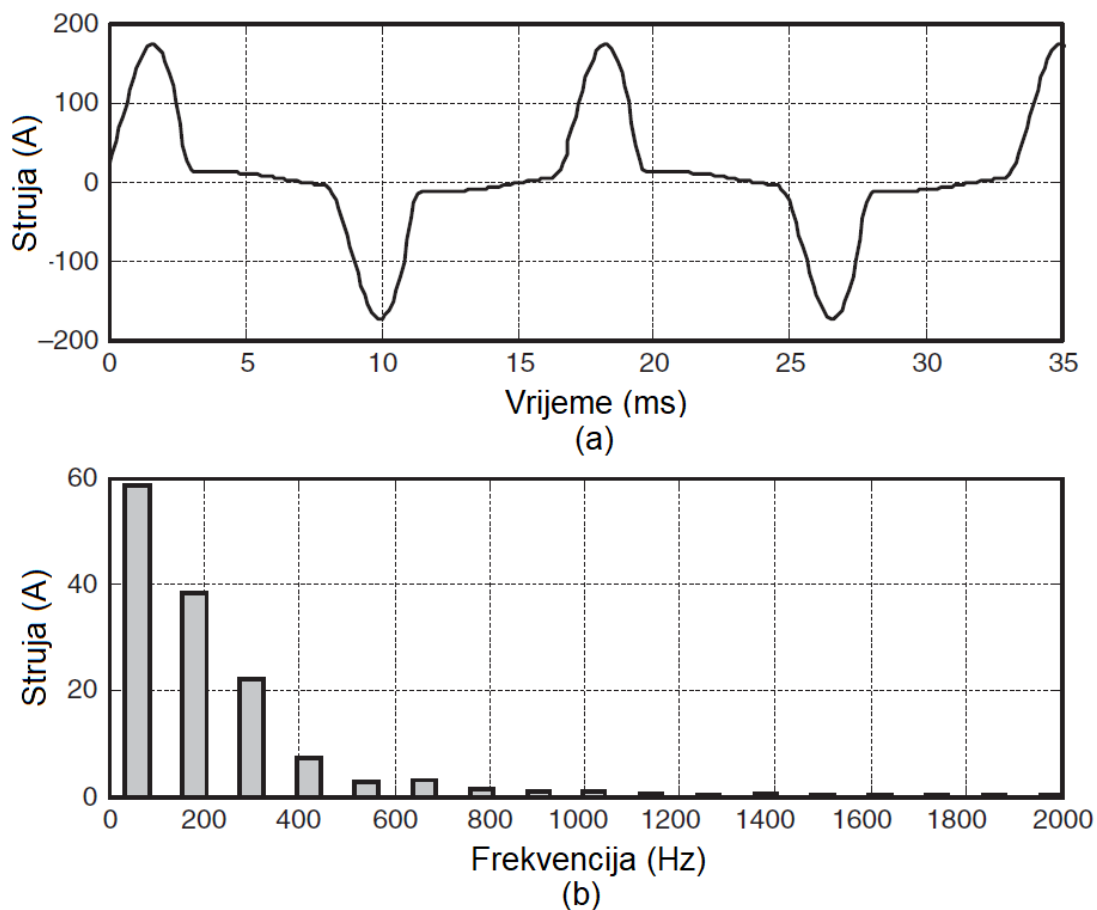
Radi ekonomskih i tehničkih razloga, ali prije svega težnjom za povećanjem učinkovitosti sve veći broj uređaja i strojeva napajan je sklopovima energetske elektronike koji omogućuju prilagodbu naponskih razina i ostalih parametara mreže kako bi se omogućio rad tih uređaja i strojeva. Osnovni tipovi sklopova energetske elektronike, još zvanih pretvaračima snage, su ispravljač, izmjenjivač i njihovom kombinacijom dobiven frekvencijski pretvarač. Svi navedeni sklopovi svojim sklopnim načinom rada uzrokuju harmonike i zbog njihove sve veće zastupljenosti danas su glavni izvor harmonika u mreži.

Ispravljači su najzastupljeniji tip pretvarača snage. Za uređaje manjih snaga koriste se jednofazni ispravljači. Postoje dvije topologije jednofaznih ispravljača. Do nedavno korištena topologija u

kojoj se transformator nalazi sa izmjenične strane, nakon njega se napon punovalno ispravlja i uglađuje na sniženoj naponskoj razini pri mrežnoj frekvenciji. Novija topologija ispravljača koji koja se zasniva na sklopnom načinu rada (engl. *Switched Mode Power Supplies - SMPS*), prikazana na slici 4.6., stavlja punovalni ispravljač na stranu mrežnog napona, zatim se napon uglađuje i transformira na nižu naponsku razinu pri frekvenciji višoj od mrežne, te se ponovno ispravlja. Do problema dolazi kada se napon ispravlja direktno na mrežnoj strani jer ispravljački most, koji je često upravljiv, dopušta prolazak struje samo u djelu poluperiode i time dolazi do izobličenja. Slika 4.7. prikazuje struju i spektar jednofaznog ispravljača sa slike 4.6. u kojem je dominantan 3. harmonik, te je vidljiv visok sadržaj 5., 7., 9., i ostalih neparnih harmonika, [1], [21].



Slika 4.6. Topologija SMPS-a [1]



Slika 4.7. Valni oblik struje i spektar SMPS-a [1]

Za napajanje trošila veće snage kao što su istosmjerni motori i pogoni, te frekvencijski pretvarači za izmjenične motore, koriste se trofazni mosni ispravljači još poznati kao 6-pulsni ispravljači, [4]. Ovaj tip ispravljača generirat će karakteristične harmonike prema relaciji (4-9):

$$h = (p * i) \pm 1 \quad (4-9)$$

gdje je h red harmonika, p broj pulseva, te i cijeli broj veći ili jednak 1.

Tako će vrijediti $(6 * i) \pm 1$, te će karakteristični harmonici biti 5., 7., 11., 13., 17., 19. itd. Ovime je vidljivo da neće biti trećeg harmonika koji je inače dominantan u distribucijskoj mreži, [1]. Za 12-pulsni ispravljač, prema istom principu, da se zaključiti da će karakteristični harmonici biti 11., 13., 23., 25., 35., 37. itd. Iz tog se razloga se u praksi pokušava koristiti ispravljač sa što većim brojem impulsa, ali relacija (4-9) vrijedi samo u idealnom slučaju i uslijed nesimetrije napona može doći do pojave ostalih harmonika, [4].

4.4. Pokazatelji harmonijskog izobličenja

Postoje mnogi parametri za iskazivanje harmonijskog sadržaja u valnom obliku. Dva najčešće korištena su ukupno harmonijsko izobličenje i ukupno harmonijsko izobličenje u odnosu na potražnju. Oba se mogu primijeniti na valni oblik struje i napona te su mjere efektivne vrijednosti valnog oblika, [1].

4.4.1. Ukupno harmonijsko izobličenje – THD

Ukupno harmonijsko izobličenje THD (engl. *Total Harmonic Distortion*) mjera je koja se najčešće koristi za opisivanje kvalitete električne energije s obzirom na harmonike. Definira se kao omjer srednjeg kvadrata harmonijskog sadržaja i srednje kvadratne vrijednosti osnovnog harmonika. Nema mjernu jedinicu već se izražava u postotku s obzirom na vrijednost osnovnog harmonika, [8].

Razlikuju se ukupno harmonijsko izobličenje napona THD_U i ukupno harmonijsko izobličenje struje THD_I . THD_U se izračunava relacijom: [9]

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}}{U_1} [\%] \quad (4-10)$$

gdje je:

h – red harmonika

U_h – efektivna vrijednost napona pojedinačnih harmonijskih komponenti

U_1 – efektivna vrijednost napona osnovnog harmonika.

Ekvivalentno tome, THD_I se izračunava prema relaciji: [9]

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} I_h^2}}{I_1} [\%] \quad (4-11)$$

gdje je:

I_h – efektivna vrijednost struje pojedinačnih harmonijskih komponenti

I_I – efektivna vrijednost struje osnovnog harmonika.

Obično se u obzir uzimaju harmonici do 40. reda kako je preporučeno normom EN 50160. Ista propisuje dozvoljene granične vrijednosti ukupnog harmonijskog izobličenja kao i pojedinih harmonika pri normalnom radu.

4.4.2. Ukupno harmonijsko izobličenje u odnosu na potražnju – TDD

Ukupno harmonijsko izobličenje THD koristan je pokazatelj harmonijskog izobličenja ali u nekim slučajevima može navesti na krive zaključke o utjecaju na mrežu. U slučaju male struje sa velikim izobličenjem THD će biti velik, ali uzimajući u obzir cijeli sustav to izobličenje neće imati velik utjecaj. Primjer toga su pogoni s promjenjivom brzinom. Pri maloj ulaznoj struje vrijednost THD može biti veća od normom propisanih vrijednosti. Iako je distorzija te struje velika, sam iznos struje je male vrijednosti i time ne utječe na sustav. Ovaj problem može se izbjeći korištenjem drugog pokazatelja harmonijskog izobličenja, taj pokazatelj je ukupno harmonijsko izobličenje u odnosu na potražnju TDD (engl. *Total Demand Distortion*). TDD se definira kao omjer korijena efektivnih vrijednosti struje svih harmonijskih komponenti (obično do 40. reda) i maksimalne izmjerene struje opterećenja na mjestu priključka na mrežu (PCC), [1], [5]. TDD se računa sljedećim izrazom: [2]

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} I_h^2}}{I_L} [\%] \quad (4-12)$$

I_h – efektivna vrijednost struje pojedinačnih harmonijskih komponenti

I_L – vršna ili maksimalna struja opterećenja na komponenti osnovne frekvencije, predstavlja srednju vrijednost maksimalne struje opterećenja za period od 12 mjeseci.

Srednja vrijednost I_L može se dobiti očitanjem mjerenja u zadnjih 12 mjeseci rada ili se procjenjuje na temelju karakteristika opterećenja i periodima rada.

4.5. Štetni utjecaj harmonika na opremu

Viši harmonici mogu loše utjecati na rad transformatora na nekoliko načina: povećanje gubitaka, preopterećenje neutralnog vodiča i prekomjerno zagrijavanje. Gubici u transformatoru se sastoje od zbroja gubitaka u željezu i gubitaka u bakru. Gubici u željezu nastaju zbog magnetiziranja

jezgre i vrtložnih struja u jezgri, dok gubici u bakru nastaju zbog otpora namota. Dodatno, gubicima u bakru doprinosi skin efekt koji se javlja pri višim frekvencijama i smanjuje efektivni presjek vodiča, dok je na osnovnoj frekvenciji od 50 Hz zanemariv, [2], [20]. Prisustvom harmonika u struji znatno se povećavaju gubici, što uzrokuje dodatno zagrijavanje transformatora i za posljedicu ima bržu degradaciju izolacije i kraći životni vijek. Između transformatora i kondenzatora za poboljšanje faktora snage, uz prisustvo harmonika može doći do rezonancije koja će uzrokovati dodatne gubitke, [1], [10].

Harmonici reda višekratnika broja tri (3, 9, 15, itd.) su još jedan problem koji utječe na transformatore u trokut spoju, a i na one u zvijezda spoju. U simetričnim trofaznim sustavima zbroj struja između faza u bilo kojem trenutku je nula, ali kod ovakvih harmonika to nije slučaj. Primjer je treći harmonik koji u sve tri faze sinkroniziran, tj. minimumi i maksimumi valnog oblika trećeg harmonika se „poklapaju“ u sve tri faze. To će rezultirati zbrajanjem amplituda trećeg harmonika u sve tri faze. Ta struja će u zvijezda spoju teći neutralnim vodičem, a time može doći do njegova preopterećenja, dok će u trokut spoju ta struja kružiti kroz namotaje i time ih dodatno zagrijavati, [10].

Zbog ključne uloge transformatora u elektroenergetskom sustavu i sve prisutnijih nelinearnih potrošača u kućanstvima i industriji, poduzimaju se mjere zaštite transformatora. Najjednostavnija zaštita uključuje korištenje transformatora veće snage od one koju zahtijevaju priključeni potrošači. Ako to nije moguće, razmatra se opcija rasterećenja transformatora. Druga, ekonomičnija opcija podrazumijeva korištenje posebno projektiranih "K-faktor" transformatora, koji su otporniji na gubitke uzrokovane harmonijskim komponentama u usporedbi sa standardnim transformatorima, [4], [10].

Viši harmonici kod kondenzatora koji se koriste za poboljšanje faktora snage uzrokuju povećano zagrijavanje i gubitke, [2]. Najveći i najčešći problem je rezonancija između kondenzatorskih baterija i ostatka mreže ili transformatora. Pojavom rezonancije vršne vrijednosti struje mogu biti veće od nazivnih vrijednosti kondenzatorske baterije što može dovesti do trajnog oštećenja, [1], [19].

Motori također mogu imati negativne posljedice zbog utjecaja naponskih harmonika. Magnetni tok prouzročen harmonikom ne pridonosi puno ukupnom momentu motora već inducira struje viših frekvencija i time zagrijava rotor. Time smanjuje efikasnost motora i proizvodi zvuk visokih frekvencija, što narušava radne uvjete. Prema normi IEEE 519 nije potrebno smanjivati snagu motora ako ukupni THD ne prelazi 5 %, odnosno 3 % za pojedinačne harmonike. Ozbiljni

problemi sa zagrijavanjem motora se javljaju pri harmonijskom izobličenju većem od 8 % do 10 %, [1], [10]. U slučaju generatora, momenti uzrokovani strujama viših harmonika mogu dovesti do mehaničke rezonancije između pogonskog stroja i generatora, [4].

Neki od analognih i digitalnih mjernih uređaja efektivnu vrijednost izmjenične struje i napona mjere na način da ispravljenju/apsolutnu srednju vrijednost množe s određenim koeficijentom. U slučaju sinusnog izmjeničnog napona i struje koeficijent iznosi 1.11. Ova pogreška se eliminira korištenjem mjernih instrumenata koji mjere pravu efektivnu vrijednost (engl. *True RMS*). Također, mjerene vrijednosti koje se mjere indirektno ili računaju pomoću nepravilno izmjerenih vrijednosti također će imati pogrešku, [10].

Harmonijsko izobličenje također utječe i na faktor snage (engl. *Power Factor – PF*) koji je jednak $\cos\varphi$ kada nema prisustva harmonika u struji. U suprotnom, *PF* se računa prema izrazu (4-13):

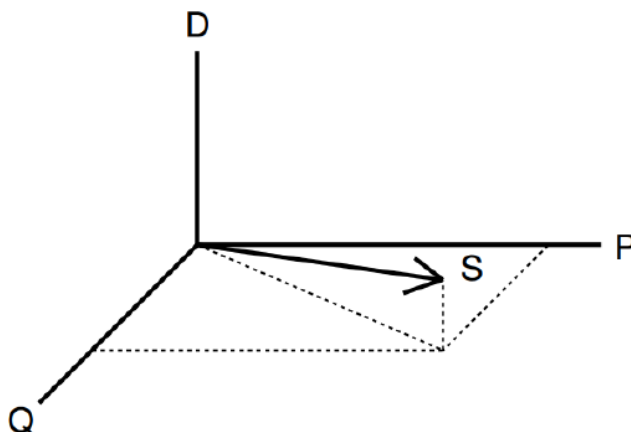
$$PF = \frac{\cos\varphi}{\sqrt{1 + THD_i^2}} \quad (4-13)$$

Izraz (4-13) ukazuje da će povećanje ukupnog harmonijskog izobličenja struje smanjiti faktor snage, [22].

Trokut snage definira odnos snaga pri sinusnim uvjetima, ali taj odnos ne vrijedi kada oni nisu ispunjeni, odnosno kada su napon i/ili struja nesinusoidalnog valnog oblika. Tada je odnos snaga sljedeći:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (4-14)$$

Gdje *D* predstavlja snagu distorzije ili izobličenja, [10]. Ovaj odnos snaga se može vizualizirati dodavanjem treće dimenzije, a prikazan je slikom 4.8.



Slika 4.8. Odnos snaga pri harmonijskom izobličenju [1]

Visok udio harmonika u mreži smanjuje pouzdanost zaštitnih releja. Kod elektromehaničkih releja postoji mogućnost da kasnije reagiraju, dok su poluvodički releji osjetljivi na višestruke prolaskе kroz nulu i mogu prouzročiti lažno okidanje, [2].

Neki od ostalih problema koje uzrokuje harmonijsko izobličenje su:

- nepravilan rad i kvarovi elektroničke i računalne opreme
- pregrijavanje kablova i ubrzano starenje izolacije
- pregaranje osigurača
- interferencija s telekomunikacijskom infrastrukturom
- treperenje rasvjete.

4.6. Norme i pravila elektroenergetskog sustava

4.6.1. EN 50160

EN 50160 je europska norma za kvalitetu električne energije koju izdaje CENELEC (engl. *European Committee for Electrotechnical Standardization*). Prvo izdanje je usvojeno 1995. godine u svim članicama Europske unije s ciljem da ga usvoje i buduće članice, [2]. Ova norma zamjenjivana je novima, a zadnja verzija je iz 2022. godine. U Hrvatskoj je navedena norma prihvaćena pod nazivom HRN EN 50160:2023 „Naponske karakteristike električne energije iz javnih distribucijskih mreža (EN 50160:2022)“, [11]. Normom se definiraju parametri mreže visokog, srednjeg i niskog napona u zajedničkoj točki priključka. Zajednička točka priključka je mjesto predaje električne energije između kupca i isporučitelja (engl. *Point of common coupling*,

PCC). Bitno je napomenuti da se norma primjenjuje pri normalnom radu, tj. da se ne primjenjuje u specifičnim uvjetima na koje isporučitelj nema utjecaj npr. vremenske nepogode, [2].

EN 50160 obuhvaća sljedeće parametre bitne za kvalitetu električne energije: [23]

- frekvencija
- veličina i promjene napona
- nesimetrija napona
- propadi napona
- treperenja napona (flikeri)
- prekidi napona
- kratkotrajni prenaponi
- naponi viših harmonika
- naponi međuharmonika.

Za navedene parametre nisu direktno definirane granične vrijednosti, već je rečeno da granične vrijednosti ne smiju biti premašene u 95 % vremena mjerenja, dok su za ostalih 5 % granične vrijednosti šireg raspona ili ne postoje. Granične vrijednosti pojedinih parametara dane su tablicom 4.1. Mjerenja se provode bez prekida u trajanju od minimalno 7 dana i to na način da se računa srednja vrijednost mjerene veličine u intervalu od 10 minuta, sekundi ili milisekundi, [2], [23].

Tablica 4.1. Parametri niskonaponske mreže prema EN 50160 [12]

Parametar	Granične vrijednosti	Osnovna veličina	Interval usrednjavanja	Promatrano razdoblje	Granice (%)
Frekvencija	50 Hz \pm 1% 50 Hz +4% / -6%	Prosječna vrijednost	10 s	1 godina	99,5 100
Spore promjene napona	$U_n \pm 10\%$ $U_n +10\%$ / -15%	Efektivna vrijednost	10 min	1 tjedan	95 100
Brze promjene napona	5% Max 10%	Efektivna vrijednost	10 ms	1 dan	100
Flikeri	P_{st} $P_{lt} < 1$	Algoritam flikera	10 min 2 h	1 tjedan	95
Nesimetrija napona	< 2%	Efektivna vrijednost	10 min	1 tjedan	95
Harmonici napona	$THD \leq 8\%$ (tablica do 25. harm.)	Efektivna vrijednost	10 min	1 tjedan	95
Interharmonici napona	Granice nisu još definirane				
Povremeni prenaponi	< 1,5 kV	Efektivna vrijednost	10 ms	-	100
Signalni napon	Do 500 Hz: < 9% 1-10 kHz: < 5%	Efektivna vrijednost	3 s	1 dan	99

Granične vrijednosti pojedinih viših harmonika napona za SN i NN distribucijske mreže dane su tablicom 4.2.

Tablica 4.2. Granične vrijednosti pojedinih harmonika u SN i NN mrežama prema EN 50160 [12]

Neparni harmonici				Parni harmonici	
Nisu višekratnici od 3		Višekratnici od 3			
Red h	Relativna amplituda	Red h	Relativna amplituda	Red h	Relativna amplituda
5.	6,0 %	3.	5,0 %	2.	2,0 %
7.	5,0 %	9.	1,5 %	4.	1,0 %
11.	3,5 %	15.	0,5 %	6. ... 24.	0,5 %
13.	3,0 %	21.	0,5 %		
17.	2,0 %				
19.	1,5 %				
23.	1,5 %				
25.	1,5 %				

4.6.2. IEC 61000

Najvažnije norme su one koje izdaje Međunarodna elektrotehnička komisija (engl. *IEC – International Electrotechnical Commission*). U Europi su važne jer su prihvaćene u Europskom gospodarskom prostoru (EEA) te omogućuju neometanu razmjenu proizvoda na tom području, [24]. IEC izdaje seriju normi i tehničkih izvješća IEC 61000 koje se bave elektromagnetskom kompatibilnošću, a time obuhvaća pojave vezane uz kvalitetu električne energije i harmonike, [2].

Seriya normi IEC 61000 je podijeljena u 9 dijelova, od kojih je 6 aktivnih . Svaki dio sadrži norme i tehnička izvješća koji obrađuju specifične probleme kao što je navedeno u tablici 4.3.

Tablica 4.3. Struktura norme IEC 61000 [2]

Dio	Oznaka	Naziv	Opis
1.	61000-1-x	Opće	Osnovna terminologija, definicije i pojmovi
2.	61000-2-x	Okolina	Karakteristike okoline u kojoj će oprema biti korištena
3.	61000-3-x	Limiti	Definirani limiti za opremu
4.	61000-4-x	Tehnike ispitivanja i mjerenja	Detaljna uputstva za postupke mjerenja
5.	61000-5-x	Montaža i tehnike otklanjanja	Definira uputstva za primjenu opreme za ublažavanje problema u kvaliteti električne energije
6.	61000-6-x	Generičke norme	Definira razine imunosti pojedinih uređaja na smetnje

Iz drugog dijela serije bitne su norme IEC 61000-2-2 i IEC 61000-2-4 koje određuju preporučene granične vrijednosti niskofrekventnih elektromagnetskih poremećaja u niskonaponskim mrežama i industrijskim postrojenjima. Ovim se normama postavljaju polazišne vrijednosti u projektiranju opreme. Prema [24] i [13], IEC 61000-2-2 je u skladu s EN 50160 po pitanju dopuštenih graničnih vrijednosti pokazatelja kvalitete električne energije prikazanih tablicom 4.4. Prema istoj tablici vrijednosti se dijele u tri klase elektromagnetske okoline:

- Klasa 1 – osjetljivi potrošači
- Klasa 2 – sabirnica prema distribucijskoj mreži
- Klasa 3 – industrijske mreže.

Tablica 4.4. Preporučene granične vrijednosti pokazatelja kvalitete prema IEC61000-2-2 [13]

Poremećaj	Klasa 1	Klasa 2	Klasa 3
Odstupanje napona u odnosu na nazivni	±8%	±10%	-15% / +10%
Naponski propad	10% do 100%	10% do 100%	10% do 100%
Kratkotrajni prekidi	Niti jedan	Ne primjenjuje se	≤ 60
Nesimetrija napona – Ui/Ud	2%	2%	3%
Harmonici – THDU %	5%	8%	10%
Odstupanje frekvencije	±1%	±1%	±2%

Normom IEC 61000-3-2, izvornog naziva: „Limits for harmonic current emissions (equipment current < 16 A per phase)“ postavljene su granične vrijednosti injektiranih strujnih harmonika u distribucijsku mrežu za pojedine skupine opreme čiji rad ne uzrokuje struje veće od 16 A. Za opremu koja premašuje tu vrijednost struje, granične vrijednosti injektiranih strujnih harmonika propisane su normama IEC 61000-3-4 i IEC 61000-3-12. Ove norme često se mijenjaju dolaskom nove opreme na tržište, [24].

Značajna norma čiji je cilj definiranje metoda mjerenja, analize i interpretacije rezultata svih parametara koji utječu na kvalitetu električne energije je norma IEC 61000-4-30. Specifično za mjerenje harmonika propisana je norma IEC 61000-4-7 prema kojoj se za mjerenje harmonika može provesti bez grupiranja rezultata, s grupiranjem i s podgrupiranjem. Prednost grupiranja i podgrupiranja je stabilnije mjerenje vrijednosti harmonijskih struja pri promjenjivim opterećenjima, [20], [24].

IEC/TR 61000-3-6, IEC/TR 61000-3-13, IEC/TR 61000-3-14 i IEC/TR 61000-3-15 su tehnička izvješća. Tehnička izvješća ne mogu sadržavati nikakve zahtjeve, ali mogu predstaviti vrijednosti i metode kao prijedloge, preporuke i smjernice. IEC/TR 61000-3-6 i IEC 61000-3-13 bave se emisijama harmonika iz postrojenja povezanih na sustave srednjeg, visokog i vrlo visokog napona, dok se IEC/TR 61000-3-14 bavi emisijama harmonika iz postrojenja povezanih na sustave javne mreže niskog napona. IEC/TR 61000-3-15 bavi se emisijama harmonika iz distribuiranih izvora energije, poput fotonaponske proizvodnje, [13], [24].

4.6.3. IEEE 519

IEEE (engl. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) je jedna od najvećih neprofitnih profesionalnih organizacija na svijetu koja između ostalog preporučuje norme iz područja elektrotehnike. Norma IEEE 519 detaljno se bavi problematikom viših harmonika u distribucijskim mrežama, a najviše se koristi na području Sjedinjenih Američkih Država, [2].

Glavni cilj ove norme je ograničiti injektiranje harmonika potrošača u mrežu tako da definira granične vrijednosti za pojedine grupe potrošača, [1], [24]. Potrošači su kategorizirani prema odnosu struje kratkog spoja mreže i maksimalne struje potrošača na mjestu priključenja i prema naponskoj razini. Granična vrijednost strujnih harmonika je definirana TDD-om, a naponski harmonici imaju granične vrijednosti ovisne o naponskoj razini, [1], [2]. Granične vrijednosti naponskih harmonika prikazane su tablicom 4.5. TDD je potrebno računati za parne i neparne harmonike do beskonačnosti, ali u praksi se računa do 50. Harmonika, [2], [24]. Granične vrijednosti naponskih i strujnih harmonika daju osnovu pri projektiranju pogona gdje ne smiju biti prekoračeni pri normalnom radu duljem od 1 sata. Za kraće periode te vrijednosti mogu biti prekoračene za 50 % za prilike kao što su pokretanje proizvodnog pogona, [1], [4].

Tablica 4.5. Ukupno harmonijsko izobličenje prema IEEE 519 [2]

Napon mreže	2,3 – 69 kV	69 – 138 kV	> 138 kV
Maksimum za individualne harmonike HDU [%]	3,0	1,5	1,0
Ukupno harmonijsko izobličenje THD _U [%]	5,0	2,5	1,5

5. METODE ZA UBLAŽAVANJE UTJECAJA VIŠIH HARMONIKA

Strujni i naponski harmonici su kao i ostale smetnje u mreži često prisutni i uzrokuju probleme u opremi. Propisane norme, opisane u poglavlju 4.6., određuju dozvoljene granične vrijednosti pri kojima je osiguran normalan rad opreme. Kako bi se harmonijsko izobličenje svelo pod kontrolu potrebno je znati kojim metodama se to postiže. Prema [1] i [2], ublažavanje ili eliminacija harmonijskih komponenti u mreži može se postići na sljedeće osnovne načine:

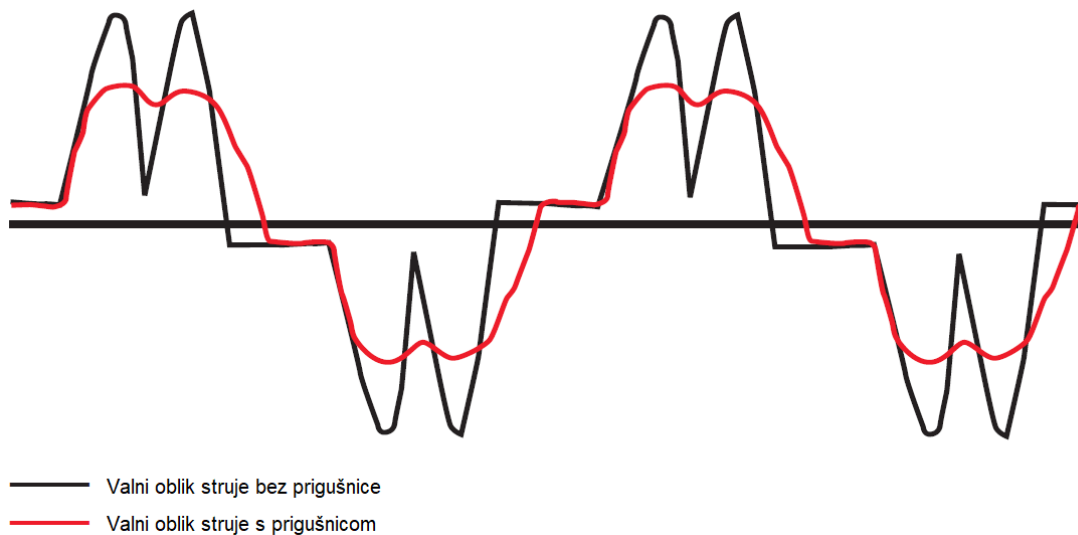
- smanjenje amplituda harmonijskih struja
- mijenjanje rezonantne frekvencije sustava
- ugradnja filtera viših harmonika.

Svaka od ovih metoda ima svoje prednosti i mane i zato je potrebno provesti analizu na mjestu gdje je problem nastao, te odlučiti kojom metodom pristupiti rješavanju problema.

5.1. Smanjenje amplituda harmonijskih struja

Ova metoda zahtjeva smanjenje harmonijskih struja direktno na izvoru, a to su uređaji koji proizvode harmonijske struje navedeni u poglavlju 4.3. Ova metoda nije laka za primjenu pošto se ne može puno utjecati na sam rad uređaja koji proizvode harmonijske struje, osim ako uređaj ne radi optimalno ili je u kvaru. No ipak postoje načini kako smanjiti širenje harmonika mrežom, [1]. Isto tako, bitno je da se mjere smanjenja harmonijskih struja provedu što bliže izvoru harmonika.

Najjednostavniji način za smanjenje intenziteta harmonijskih struja iz nelinearnih trošila je ugradnja serijskih prigušnica. Najveći benefit ove metode se može ostvariti kod frekvencijskih pretvarača gdje već i mala i jeftina prigušnica sprječava širenje većine harmonika u mrežu, ali pri tome štiti uređaj od prijelaznih pojava iz mreže, [1], [2]. Efekt prigušnice na valni oblik struje frekvencijskog pretvarača prikazan je slikom 5.1.



Slika 5.1. Valni oblik struje frekvencijskog pretvarača sa i bez prigušnice [24]

Osim toga, prigodnim odabirom izvedbe namota transformatora moguće je blokirati određene harmonike. Namot koji je spojen u trokut, kao što je ranije navedeno, blokira prolazak neparnih harmonika harmonika višekratnika broja tri. Isto se može postići i cik-cak transformatorom koji sprječava širenje harmonika u mrežu. Ali ti harmonici i dalje kruže između transformatora i trošila kroz neutralni vodič. Ako se 6-pulsni ispravljač napaja transformatorom sa faznim pomakom od 30° , 5. i 7. harmonik biti će poništeni i neće se širiti u mrežu, tj. postiže se isti efekt kao da se koristi 12-pulsni ispravljač, [1]. Kombinacijom transformatora sa faznim pomakom i cik-cak transformatora može se postići značajno smanjenje harmonijske distorzije predane u mrežu, [1], [2].

5.2. Mijenjanje rezonantne frekvencije sustava

Mijenjanje rezonantne frekvencije nekada je potrebno izvršiti u sustavima koji imaju kondenzatorske baterije za kompenzaciju jalove snage. To mogu biti dijelovi distribucijske mreže ili industrijski potrošači. Kondenzatorske baterije mogu sniziti vrijednost rezonantne frekvencije sustava i prouzročiti neželjenu rezonanciju koja će povećati vrijednost određenih harmonika, [2].

Sprječavanje rezonancije promjenom rezonantne frekvencije može se izvršiti ugradnjom serijske prigušnice, dodavanjem paralelno spojenog filtera i promjenom kapaciteta kondenzatorskih baterija. Promjena kapaciteta je često najjeftinija opcija. Odziv sustava još se može promijeniti

promjenom položaja kondenzatorskih baterija. Ova opcija često nije moguća za industrijske potrošače koji nemaju dovoljno velik sustav da bi takva promjena mjesta prouzročila promjenu odziva sustava. Zadnja opcija je potpuno uklanjanje kondenzatorskih baterija i plaćanje penala za loš faktor snage, [1], [2].

5.3. Ugradnja filtera

Generalno filteri se mogu podijeliti na aktivne i pasivne. Glavna razlika je u tome što pasivni filteri zadaću filtriranja obavljaju pasivno, dok aktivni kontinuirano mjere, nadziru i utiskuju struje i napone koji eliminiraju harmonike, [2]. Pasivni filteri često se koriste kako bi spriječili širenje harmonika mrežom. Obično su napravljeni po mjeri za određene uvjete. Mana im je što su ograničeni u svom djelovanju i mogu izazvati neželjene posljedice. Aktivni filteri su moderniji, efikasniji način kojim se otklanjaju harmonici, no i oni imaju mane poput visoke cijene i kompleksnosti.

5.3.1. Pasivni filteri

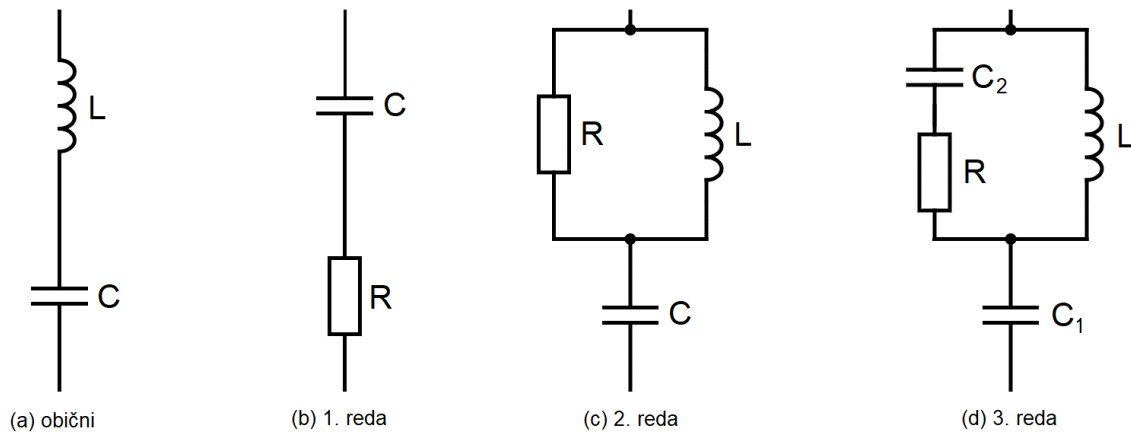
Pasivni filteri sastoje se od elemenata induktiviteta, kapaciteta i otpora. Pasivni elementi su međusobno povezani i njihove vrijednosti prilagođene tako da mogu kontrolirati tok harmonijskih struja, [1].

Prema [13], često se ugrađuju jer su jeftinija opcija od ostalih, ali njihovi nedostaci su:

- mogu uzrokovati rezonanciju
- filtriranje određene frekvencije je neprecizno i zahtjeva puno proračuna
- nisu isplativi kada su harmonijska izobličenja nasumičnog karaktera
- velikih su dimenzija.

Pasivni filteri mogu biti spojeni paralelno ili serijski. Još se mogu dijeliti prema opsegu frekvencija na koji se podešavaju, a to su uskopojasni, te niskopropusni ili visokopropusni. Osnovne konfiguracije pasivnih filtera prikazane su slikom 5.2.

Paralelni filter predstavlja put niske impedancije za harmonijske struje, postavlja se što bliže izvoru, te sprječava njihovo širenje mrežom. Ovakav filter je najčešće korišten jer je ekonomski isplativ. Uz filtriranje, pasivni filter vrši kompenzaciju jalove snage ovisno o veličini kondenzatorske baterije filtera i time vrši korekciju faktora snage, [1], [2], [4].



Slika 5.2. Izvedbe pasivnog filtera različitog reda

Uskopojasni propusni filter je najjednostavniji filter koji je podešen tako da predstavlja put niske impedancije za harmonijsku struju jedne frekvencije. Starenjem filtera može doći do promjene karakteristike filtera i rezonancije na frekvenciji koju proizvodi trošilo. Rezonancija uzrokuje povećanje napona zbog kojeg može doći do uništenja izolacije vodova i namota uređaja u mreži. Kako bi se spriječio ovakav ishod potrebno je projektirati filter tako da željena frekvencija, pri kojoj je najmanja impedancija, bude nešto niža od one koju proizvodi trošilo, uglavnom 3 % do 10 %, [2], [4].

Pri projektiranju je potrebno uzeti u obzir harmonijske struje koje proizvodi trošilo, ali i one koji dolaze iz mreže. Također je bitno dimenzionirati komponente filtera za moguće povećanje struje harmonika budućim dodavanjem novih trošila, [1], [4].

Za razliku od paralelnog filtera, serijski filter će predstavljati veliku impedanciju za harmonijsku struju na odabranoj frekvenciji dok će propuštati struju na osnovnoj frekvenciji. Ovaj filter se ne koristi toliko često jer izobličuje napon i mora biti dimenzioniran za ukupnu snagu trošila. Vrlo je pogodan u slučaju uzemljenja zvijezda spoja transformatora gdje blokira tok neželjenih harmonika, a pruža dobro uzemljenje na osnovnoj frekvenciji. Također je koristan kod jednofaznih trošila, gdje se harmonici višekratnici broja tri ne mogu blokirati trokut spojem transformatora, [1].

Harmonijsko izobličenje često nije samo jedan harmonik, već vremenski promjenjiv spektar harmonika i interharmonika. Ako je potrebno filtrirati više harmonika, umjesto postavljanja više filtera za pojedine harmonike, može se postaviti jedan koje je prilagođen tako da propušta ili blokira određeni dio spektra. Niskopropusni filter spojen serijski će predstavljati visoku

impedanciju svim strujama na frekvencijama višoj od granične. Isti efekt će imati paralelni visokopropusni filter koji će odvoditi sve harmonijske struje iznad granične frekvencije, [1]. Za ovu vrstu filtera potrebni su elementi koji će moći podnijeti veće iznose struja jer obuhvaćaju veći spektar harmonika, [4]. U praksi, serijski niskopropusni filter će smanjiti tok harmonijskih struja frekvencijskog pretvarača pri punoj snazi sa 90 % do 100 % na 9 % do 12 %, [1].

5.3.2. Aktivni filteri

U mnogim slučajevima konvencionalna rješenja poput pasivnih filtera nisu dovoljno dobro rješenje za probleme vezane uz kvalitetu električne energije. Uz to što ne mogu u potpunosti eliminirati širi spektar harmonika, također se ne mogu prilagoditi dinamičkim promjenama harmonijskog sadržaja u mreži, te mogu uzrokovati rezonanciju. Isto tako, sve veća prisutnost uređaja energetske elektronike uzrokuje sve veće i učestalije probleme koje je potrebno ukloniti kako bi se zadovoljile propisane norme, [14].

Razvoju aktivnih filtera pridonijela su otkrića u području elektronike. Velika brzina sklapanja i povećanje snaga poluvodičkih sklopki, razvoj digitalnih metoda mjerenja i upravljanja ostvaruje mogućnost izrade aktivnog filtera, [5]. Danas većina aktivnih filtera kao sklopne elemente koristi IGBT tranzistore (bipolarni tranzistor s izoliranom upravljačkom elektrodom). Dostupnost jeftinih i kvalitetnih Hallovih sondi i digitalnih mikrokontrolera, pridonijela je smanjenju cijena aktivnih filtera i poboljšanju performansi, [14].

Aktivni filteri (engl. *Active Power Filters*) mogu potpuno eliminirati strujne i naponske harmonike do 50. harmonika, utiskivati jalovu snagu, regulirati napon, ublažiti flickere i korigirati nesimetriju napona, [5], [14]. Također se aktivno prilagođavaju promjenama opterećenja i stanja u mreži, manjih su dimenzija i ne uzrokuju značajne negativne posljedice poput rezonancije. Ovisno o odabranoj strategiji upravljanja, mogu se eliminirati pojedinačni problemi ili njihove kombinacije prema određenim prioritetima. Mana aktivnih filtera je što su skupi i složeni uređaji, ali su efikasniji i vrlo prilagodljivi, [14].

Aktivni filter je uređaj energetske elektronike koji pomoću mjernih transformatora ili hallovih sondi mjeri stanje napona i/ili struje u mreži, istovremeno analizira mjerne signale, te generira harmonijske komponente struje i/ili napona jednake ali suprotne amplitude koje poništavaju one prisutne u mreži, [5], [19].

Podjela aktivnih filtera može se napraviti na temelju topologije, pa tako postoje:

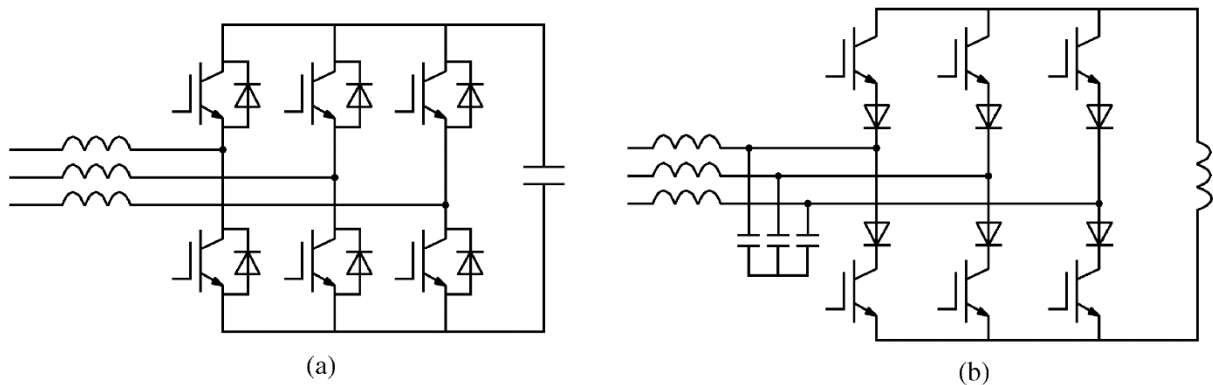
- Serijski aktivni filter
- Paralelni aktivni filter
- UPQC (engl. *Unified Power Quality Conditioner*) – kombinacija serijskog i paralelnog aktivnog filtera
- Hibridni filteri – kombinacija aktivnih i pasivnih filtera.

Još se mogu dijeliti prema nazivnoj snazi, broju faza (jednofazni ili trofazni), vrsti pretvarača i kompenzirane veličine (struja ili napon) i metodama upravljanja i obrade signala, [8], [25].

Odabir vrste filtera ovisi o uvjetima na mjestu priključka kao što su nazivna snaga i napon priključenja, također, financijskoj isplativosti i ponajviše o prethodnim mjerenjima kvalitete električne energije na mjestu priključka filtera prema kojima se određuje koje probleme filter treba korigirati.

Osnovni elementi blok dijagrama svakog aktivnog filtera su: strujni transformatori ili hallove sonde za mjerenje valnih oblika struje, pretvarač (inverter) i regulator koji njime upravlja, mikrokontroler koji analizira mjerene veličine i upravlja cijelim uređajem i DC spremnik energije (kondenzator ili zavojnica), [8], [24].

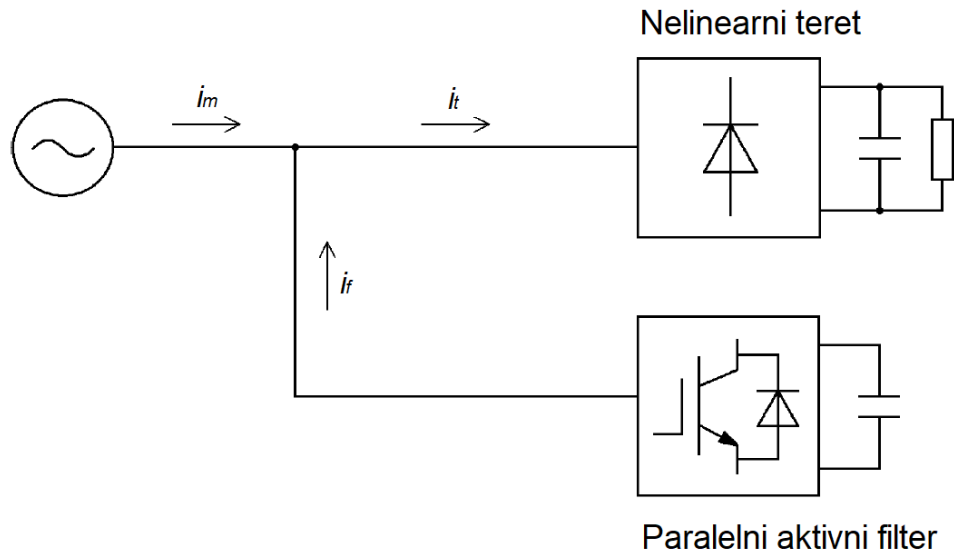
Trofazni pretvarač može biti izveden kao strujni ili naponski izvor, ovisno o vrsti poluvodičkih sklopki i njihovoj topologiji spajanja. Uobičajeno je da naponski pretvarač za spremnik energije ima kondenzator, a strujni pretvarač koristi zavojnicu, [14]. Slikom 5.3.a prikazan je pretvarač u izvedbi strujnog izvora, a slikom 5.3.b naponskog izvora, koji je danas najzastupljeniji zbog veće efikasnosti, manje cijene i manjih dimenzija. Prema [15], IGBT moduli koji su danas dostupni optimizirani su za rad s naponskim izvorom, tj kondenzatorom.



Slika 5.3. Topologije naponskog (a) i strujnog (b) pretvarača [15]

5.3.2.1. Paralelni aktivni filter

Daleko najzastupljenija topologija je paralelni aktivni filter. Najčešće se koriste u pogonima sa promjenjivom brzinom gdje ispravljajući u frekventnim pretvaračima proizvode neželjene harmonike, iako mogu biti instalirani i u drugim dijelovima mreže. Filter se spaja paralelno trošilu preko transformatora, prigušnice ili direktno, kako je prikazano slikom 5.4, [15].



Slika 5.4. Paralelni aktivni filter [15]

Koriste se za smanjenje strujnih harmoika, kompenzaciju jalove snage i korigiranje nesimetrije. Pretvarač se može izvesti kao naponski ili strujni sa odgovarajućim kondenzatorom ili zavojnicom, ali strujni pretvarač sa zavojnicom se u praksi ne koristi. Ovaj filter, kao i ostali,

mjeri i analizira struju mreže. Zatim pretvaračem generira struje koje su amplitudom jednake neželjenim harmonijskim strujama, ali su suprotne po fazi. Zbroj struje filtera i trošila daje struju koja sadržava samo osnovni harmonik, [15], [16]. Što se može predočiti sljedećim izrazom:

$$i_m = i_t - i_f \quad (5-1)$$

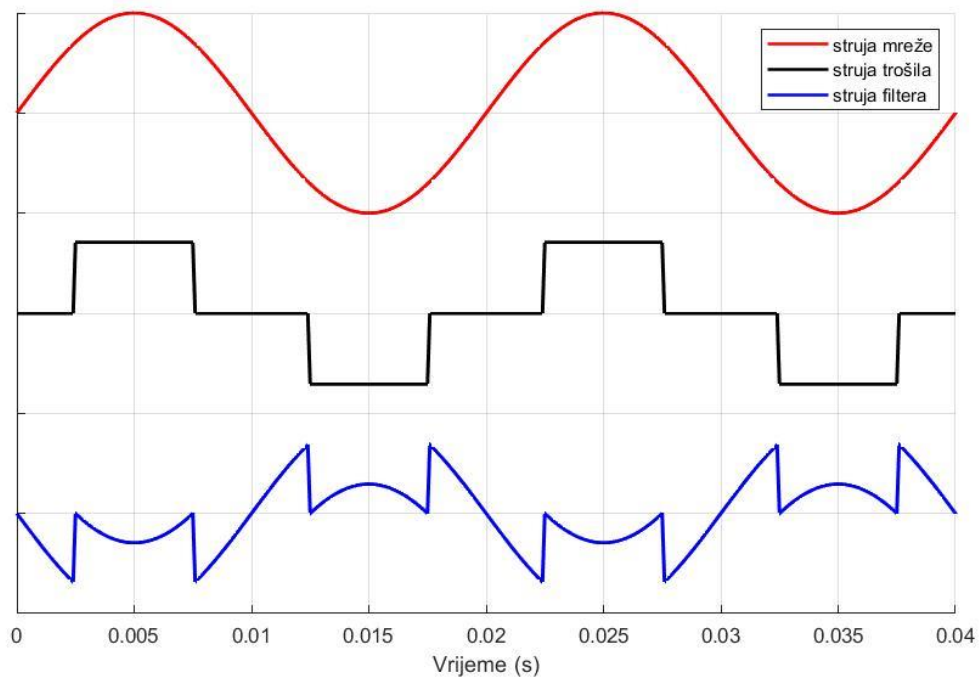
gdje su:

i_m – struja mreže

i_t – struja nelinearnog trošila

i_f – struja filtera.

Smjer pojedinih struja prikazan je slikom 5.4., a valni oblici slikom 5.5.



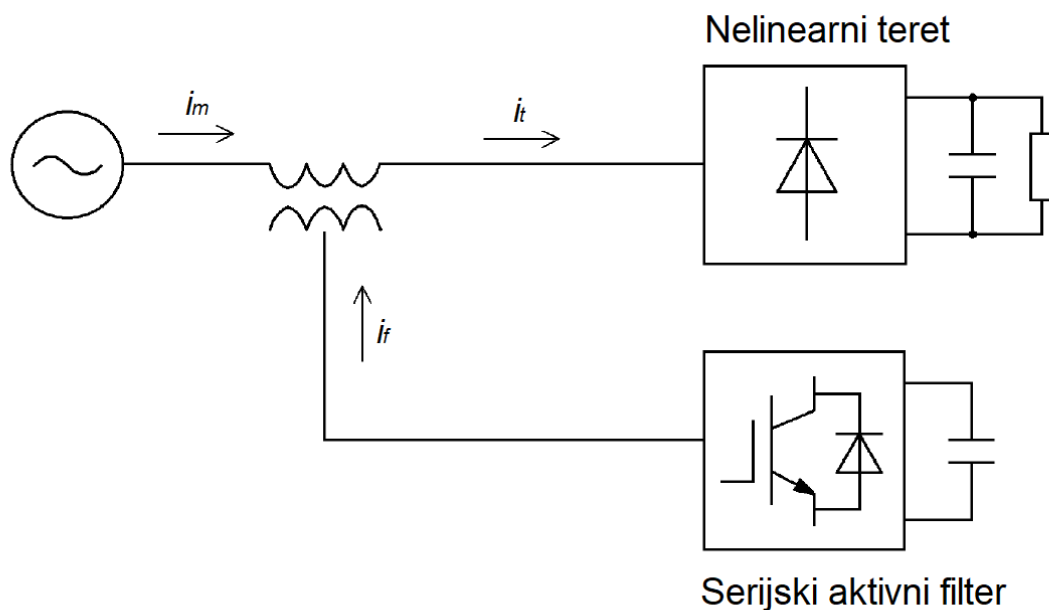
Slika 5.5. Valni oblici pojedinih struja pri radu paralelnog aktivnog filtera

5.3.2.2. Serijski aktivni filter

Serijski aktivni filter manje se koristi u praksi, ali je pogodan za određene slučajeve. U slučaju gdje trošilo uzrokuje veliku distorziju napona, kao što je ispravljač koji napaja istosmjerna trošila velikog kapaciteta. Paralelni aktivni filteri ne mogu u potpunosti eliminirati naponske harmonike, te su zato razvijeni serijski aktivni filteri, [17]. Osim uklanjanja naponskih

harmonika, koriste se za kompenzaciju sporih naponskih promjena, korekciju nesimetrije napona i blokiranje širenja harmonika uzrokovanih rezonancijom, [17].

Serijski aktivni filter prikazan slikom 5.6. spojen je serijski između nelinearnog trošila i mreže preko transformatora. Radi na sličnom principu kao paralelni aktivni filter, ali umjesto struje generira naponske harmonike koji poništavaju one proizvedene nelinearnim trošilom. Ovakav način rada predstavlja visoku impedanciju za harmonijske komponente, dok neometano propušta struju i napon na osnovnoj frekvenciji.

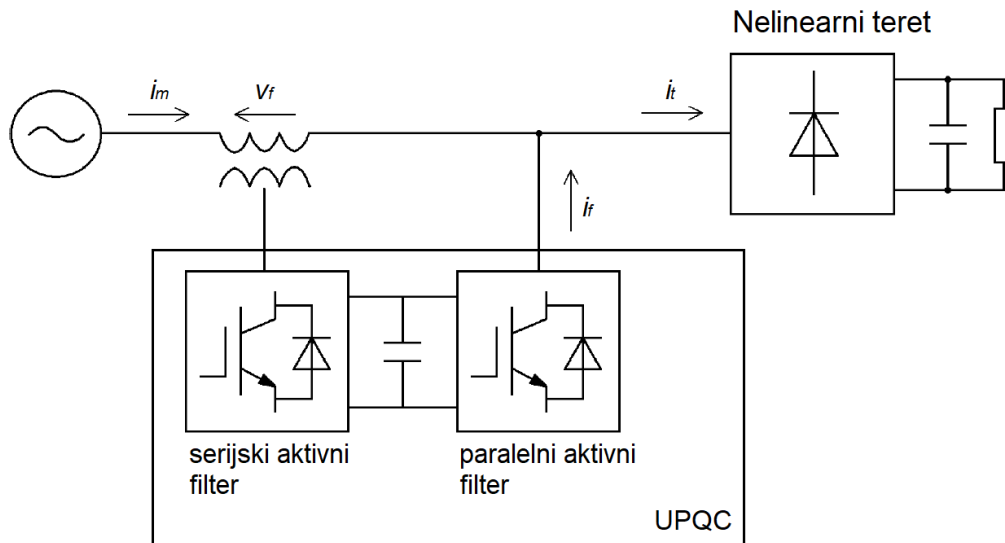


Slika 5.6. Serijski aktivni filter [15]

Ovakva topologija osigurava vrlo dobar napon čistog sinusnog valnog oblika što je vrlo bitno za rad osjetljive opreme kao što su zaštitna oprema u prijenosnim i distribucijskim sustavima, [16].

5.3.2.3. UPQC

UPQC (engl. *Unified Power Quality Conditioner*) ili univerzalni aktivni filter je kombinacija paralelnog i serijskog aktivnog filtera. Shema UPQF-a spikazana je slikom 5.7. DC spremnik energije se nalazi između dva strujna ili naponska pretvarača od kojih jedan radi kao paralelni, a drugi kao serijski filter istovremeno, [15].

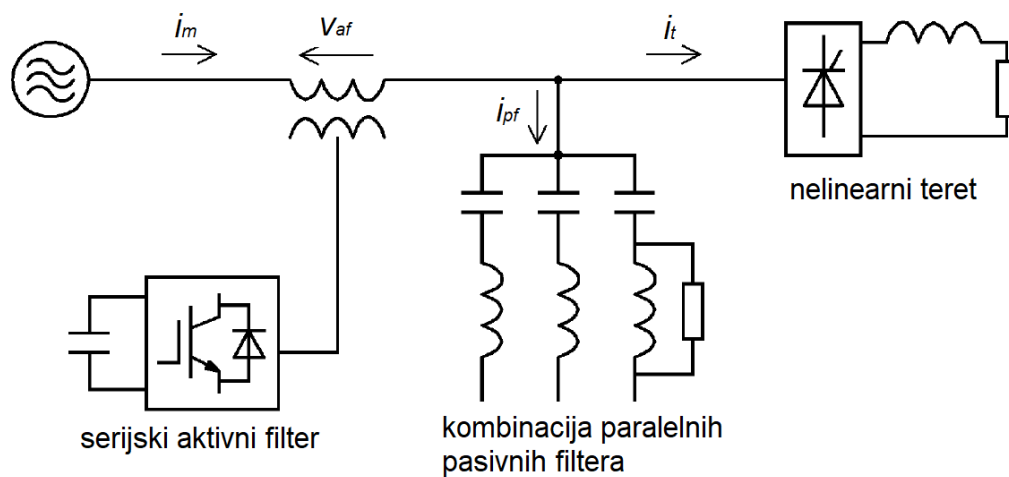


Slika 5.7. Topologija aktivnog filtera UPQC

Ovakva topologija se smatra idealnom jer eliminira i naponske i strujne harmonike. Koristi se kod napajanja osjetljive opreme kao što su uredska oprema (u novije vrijeme i data centri) i medicinska oprema i slično. Nedostatak ovakvog filtera je cijena i kompleksnost upravljanja, [15].

5.3.2.4. Hibridni aktivni filter

Kombinacijom aktivnih i pasivnih filtera dobiveni su hibridni filteri. Postoje razne topologije koje uključuju aktivni filter (serijski ili paralelni) i jedan ili više pasivnih filtera, uobičajeno u paralelnom spoju. Cilj ovakvog spoja je smanjenje snage aktivnog filtera te poboljšanje preformansi u radu pasivnog filtera. Pasivni filter je prilagođen tako da filtrira dominantne harmonike, dok aktivni može eliminirati više harmonike, sprječavati rezonanciju i kompenzirati jalovu snagu, [5], [15]. Velika prednost je što se već postojeći pasivni filter može nadograditi u hibridni. Time što pasivni filter filtrira većinu harmonijskih struja, aktivni dio je manji a time i jeftiniji. Slikom 5.8. prikazan je hibridni filter sastavljen od serijskog aktivnog filtera i paralelnog pasivnog filtera s više grana podešenim za različite spektre harmonika.



Slika 5.8. Hibridni filter sastavljen od serijskog aktivnog i paralelnog pasivnog filtera

6. ISPITIVANJE RADA AKTIVNOG FILTERA I NJEGOV UTJECAJ NA SMANJENJE STRUJNIH I NAPONSKIH HARMONIKAU MREŽI

U ovom dijelu rada bit će analiziran rad aktivnog filtera u nekoliko specifičnih slučajeva. Filter i generator harmonika koji su korišteni pri izradi ovog rada nalaze se na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek te su financirani od strane Hrvatske zaklade za znanost 2021. godine u sklopu projekta „Distribucijska elektroenergetska mreža s velikim udjelom aktivnih kupaca – ProPowerNet“. Sustav filtera i generatora prikazan je slikom 6.1.

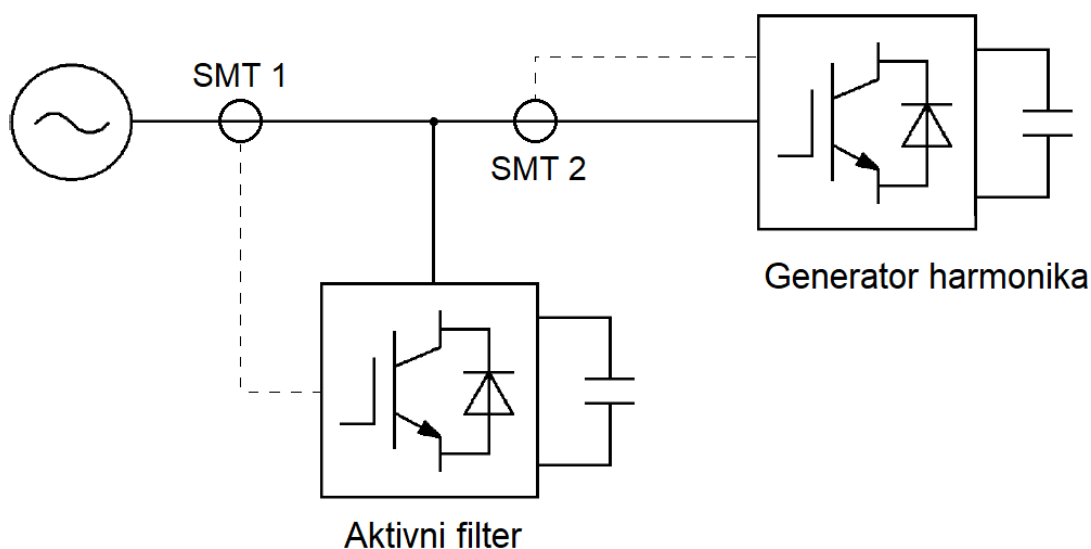


Slika 6.1. Aktivni filter harmonika (lijevo, gore), generator harmonika (desno, gore) i razvodni ormar s priključenim mrežnim analizatorom

6.1. Opis opreme

Za ispitivanje rada aktivnog filtera korišten je sustav koji se sastoji od aktivnog filtera i generatora harmonika. Oba uređaja su komercijalna izvedba aktivnog filtera tvrtke ABB (PQFS V0 1M0S60 IP30 CE NEW), od kojih je jedan programiran da radi kao izvor harmonijskih struja, odnosno generator harmonika. Na prednjoj strani nalazi se nazivna pločica i zaslon s korisničkim sučeljem. Putem sučelja moguće je upravljati radom uređaja. Ovaj aktivni filter, osim mogućnosti filtriranja odabranih harmonika, ima funkciju kompenzacije jalove snage i smanjenja nesimetričnog opterećenja. U četverožilnom spoju može istovremeno filtrirati 15 odabranih harmonika od 2. do 50. reda. Nazivna struja je 60 A, a učinkovitost 97 %, [26].

Uz filter i generator nalazi se ormar u kojemu se nalaze osigurači, rastavne sklopke, sabirnice i strujni mjerni transformatori. Instalirana su dva seta strujnih mjernih transformatora (SMT) na sve tri faze. Prvi set mjernih transformatora postavljen je uzvodno od generatora i filtera, te obuhvaća njihove vodove. Struje sekundara očitavaju se u aktivnom filteru. Drugi set mjeri struje koje proizvodi generator harmonika, a sekundari su spojeni na generator harmonika. Na slici 6.2. prikazana je pojednostavljena shema spoja sustava s mrežom.



Slika 6.2. Pojednostavljena shema sustava aktivnog filtera i generatora harmonika

Za mjerenje struja i napona korišten je mrežni analizator PQ-Box 200 tvrtke „A.Eberle“ vidljiv na slici 6.1. Analizator ima mogućnost mjerenja struja i napona u svim fazama i neutralnom vodu, provođenja analize i generiranja automatskih izvješća prema odabranoj normi, [27]. Prema normi EN 50160 uređaj računa usrednjene 10-minutne vrijednosti. Prema tome, minimalno potrebno vrijeme mjerenja je 10 minuta. Analiza mjerenih vrijednosti izvedena je u programskom paketu WinPQ mobile.

6.2. Ispitivanje mogućnosti opreme pri generaciji harmonika

Zadatak je simulirati rad različitih trošila, odnosno izvora harmonika generatorom harmonika, te ispitati rad aktivnog filtera i generatora harmonika. Bitno je ispitati mogućnosti generacije harmonika visokog reda i provjeriti postoje li odstupanja u zadanim i generiranim vrijednostima strujnih harmonika.

U tu svrhu odabrano je sedam trošila/slučajeva koji generiraju specifični spektar harmonika:

- lučna peć
- magnetiziranje transformatora
- besprekidno napajanje (engl. *Uninterruptable power supply* - *UPS*)
- računalo
- fluorescentna rasvjeta
- 6-pulsni ispravljač
- 12-pulsni ispravljač.

Navedena trošila su česti izvori harmonika u mreži kao što je opisano u teoretskom dijelu. Postotne vrijednosti pojedinih strujnih harmonika s obzirom na osnovni harmonik prikazane tablicom 6.1.

Tablica 6.1. Postotne vrijednosti strujnih harmonika u odnosu na osnovni harmonik za pojedina trošila

Red harmonika	LUČNA PEĆ	MAGNETIZIRANJE TRANSFORMATORA	BESPREDIKNO NAPAJANJE (UPS)	RAČUNALO	FLUORESCENTNA RASVIJETA	6-PULSNI ISPRAVLJAČ	12-PULSNI ISPRAVLJAČ
2.	5,00 %	3,54 %	1,13 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
3.	3,56 %	39,90 %	24,43 %	61,54 %	10,53 %	0,00 %	0,00 %
4.	3,25 %	2,02 %	1,58 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
5.	5,00 %	11,62 %	18,33 %	20,00 %	5,26 %	48,45 %	0,00 %
6.	1,84 %	1,01 %	2,26 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
7.	1,59 %	13,64 %	11,31 %	9,23 %	1,75 %	23,86 %	0,00 %
8.	0,62 %	0,51 %	2,26 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
9.	0,17 %	12,63 %	7,92 %	6,15 %	1,75 %	0,00 %	0,00 %
11.	0,81 %	4,04 %	6,33 %	3,08 %	0,00 %	7,85 %	3,32 %
13.	0,00 %	2,53 %	2,26 %	3,08 %	0,00 %	4,86 %	2,84 %
15.	0,00 %	2,02 %	0,00 %	3,08 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
17.	0,00 %	0,51 %	0,00 %	3,08 %	0,00 %	3,51 %	0,00 %
19.	0,00 %	0,00 %	0,00 %	1,54 %	0,00 %	2,07 %	0,00 %
21.	0,00 %	0,00 %	0,00 %	1,54 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
23.	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	2,48 %	1,24 %
25.	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	1,65 %	1,16 %
35.	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,63 %
37.	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,56 %

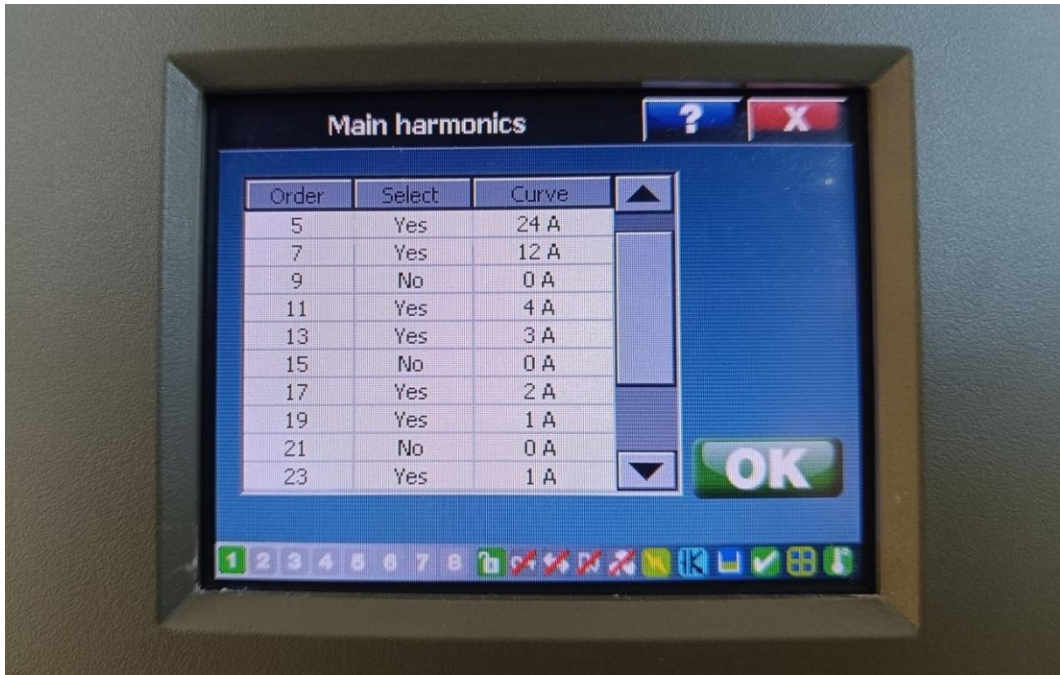
Iz postotnih vrijednosti potrebno je izračunati apsolutne vrijednosti koje generator harmonika može proizvesti. Kako je nazivna vrijednost struje koju mogu proizvesti filter i generator 60 A, bitno je da za pojedini spektar zbroj svih amplituda spektra ne prelazi tu vrijednost, ali cilj je što više se približiti toj granici kako bi se testirale mogućnosti uređaja. Isto tako, iz prethodnih iskustava poznato je da ovaj generator harmonika neće raditi ako amplitude harmonika nisu zadane cijelim brojem. Uz zadovoljavanje ovih uvjeta izračunata je tablica sa spektrima koji će

se simulirati generatorom harmonika. Tablica 6.2. sadrži apsolutne vrijednosti amplituda harmonika za odabrane slučajeve.

Tablica 6.2. Apsolutne vrijednosti harmonijskih struja prilagođene za unos putem sučelja generatora

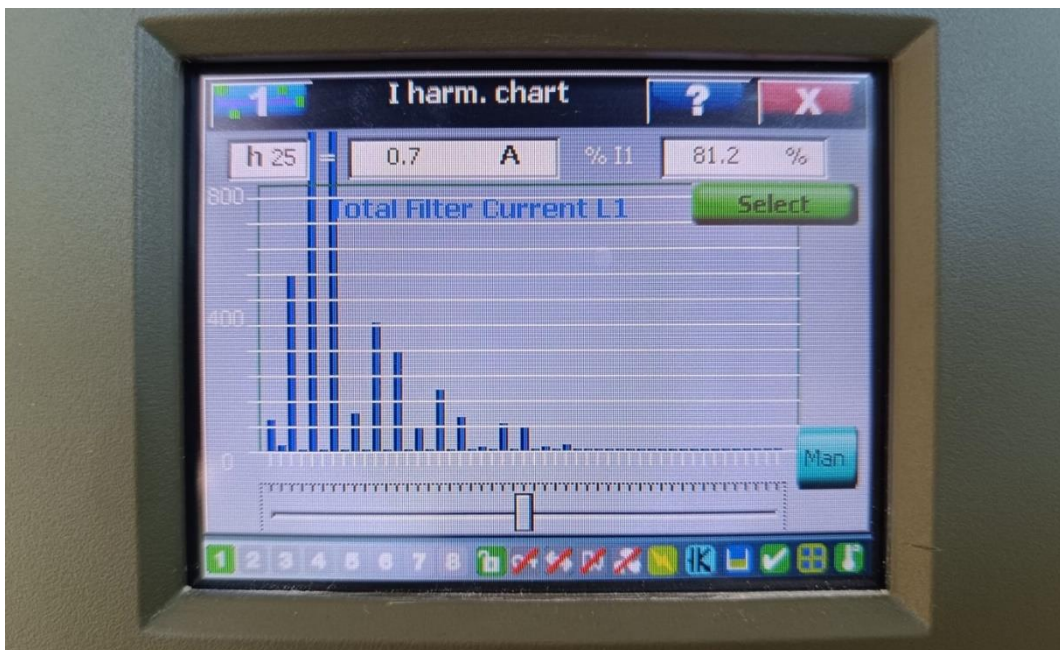
Red harmonika	LUČNA PEĆ	MAGNETIZIRANJE TRANSFORMATORA	BESPREDKIDNO NAPAJANJE (UPS)	RAČUNALO	FLUORESCENTNA RASVJETA	6-PULSNI ISPRAVLJAČ	12-PULSNI ISPRAVLJAČ
2.	10 A	2 A	1 A	0 A	0 A	0 A	0 A
3.	7 A	16 A	12 A	19 A	21 A	0 A	0 A
4.	7 A	1 A	1 A	0 A	0 A	0 A	0 A
5.	10 A	5 A	9 A	6 A	11 A	24 A	0 A
6.	4 A	1 A	1 A	0 A	0 A	0 A	0 A
7.	3 A	6 A	6 A	3 A	4 A	12 A	0 A
8.	1 A	0 A	1 A	0 A	0 A	0 A	0 A
9.	0 A	5 A	4 A	2 A	4 A	0 A	0 A
11.	2 A	2 A	3 A	1 A	0 A	4 A	17 A
13.	0 A	1 A	1 A	1 A	0 A	3 A	14 A
15.	0 A	1 A	0 A	1 A	0 A	0 A	0 A
17.	0 A	0 A	0 A	1 A	0 A	2 A	0 A
19.	0 A	0 A	0 A	1 A	0 A	1 A	0 A
21.	0 A	0 A	0 A	1 A	0 A	0 A	0 A
23.	0 A	0 A	0 A	0 A	0 A	1 A	6 A
25.	0 A	0 A	0 A	0 A	0 A	1 A	6 A
35.	0 A	0 A	0 A	0 A	0 A	0 A	3 A
37.	0 A	0 A	0 A	0 A	0 A	0 A	3 A

Kako bi se spriječilo širenje proizvedenih harmonika u mrežu fakulteta bitno je prvo uključiti aktivni filter i podesiti maksimalne vrijednosti injektiranih struja filtera na razine više od onih koje će se injektirati generatorom. Zatim se, prije uključivanja, na generatoru harmonika odabiru amplitude struja harmonika prema tablici 6.2. kao što je prikazano slikom 6.3.



Slika 6.3. Odabir amplituda harmonika za slučaj 6-pulsnog ispravljača

Nakon uključivanja filtera i generatora potrebno je provjeriti je li zadani spektar generiran ispravno i u potpunosti. To je moguće provjeriti putem sučelja na generatoru harmonika. Odabirom prikaza spektra ukupne struje generatora (filtera) može se vizualno provjeriti koji su harmonici generirani, te se mogu iščitati njihove amplitude. Slika 6.4. prikazuje izgled opisanog zaslona.



Slika 6.4. Prikaz spektra ukupne struje generatora (filtera) za spektra za slučaj 6-pulsnog ispravljača u fazi L1

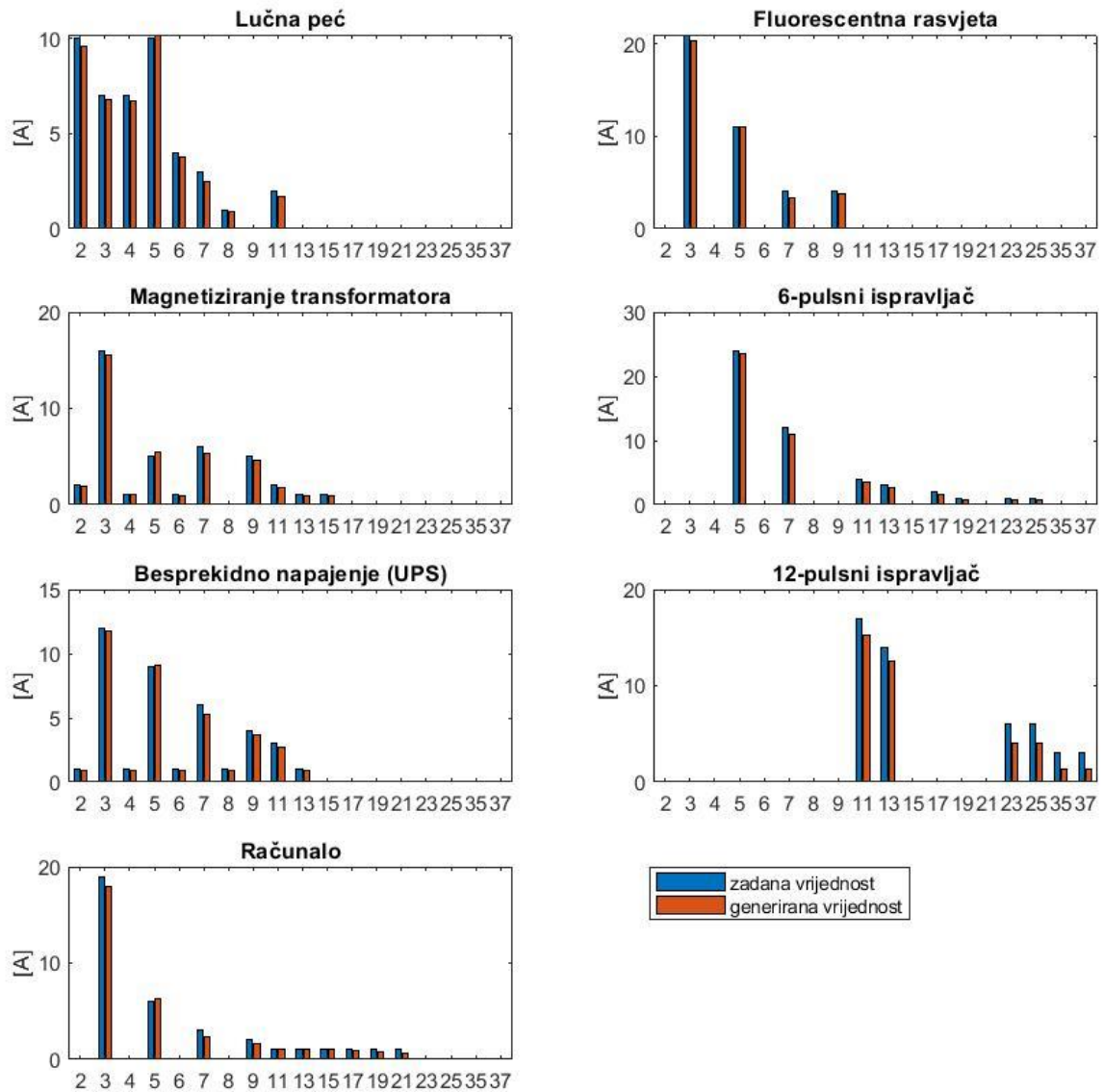
Zatim su za svih 7 slučajeva očitane vrijednosti amplituda harmonika, te su rezultati prikazani tablicom 6.3. Sve vrijednosti očitane su za fazu L1 radi jednostavnosti analize.

Tablica 6.3. Očitane vrijednosti amplituda generiranih strujnih harmonika

Red harmonika	LUČNA PEĆ	MAGNETIZIRANJE TRANSFORMATORA	BESPREDKIDNO NAPAJANJE (UPS)	RAČUNALO	FLUORESCENTNA RASVJETA	6-PULSNI ISPRAVLJAČ	12-PULSNI ISPRAVLJAČ
2.	9,6 A	1,9 A	0,9 A	0,0 A	0,0 A	0,0 A	0,0 A
3.	6,8 A	15,5 A	11,8 A	18,0 A	20,3 A	0,0 A	0,0 A
4.	6,7 A	1,0 A	0,9 A	0,0 A	0,0 A	0,0 A	0,0 A
5.	10,2 A	5,4 A	9,1 A	6,3 A	11,0 A	23,5 A	0,0 A
6.	3,8 A	0,9 A	0,9 A	0,0 A	0,0 A	0,0 A	0,0 A
7.	2,5 A	5,3 A	5,3 A	2,3 A	3,4 A	11,0 A	0,0 A
8.	0,9 A	0,0 A	0,9 A	0,0 A	0,0 A	0,0 A	0,0 A
9.	0,0 A	4,6 A	3,7 A	1,6 A	3,7 A	0,0 A	0,0 A
11.	1,7 A	1,8 A	2,7 A	1,0 A	0,0 A	3,6 A	15,2 A
13.	0,0 A	0,9 A	0,9 A	1,0 A	0,0 A	2,6 A	12,5 A
15.	0,0 A	0,9 A	0,0 A	1,0 A	0,0 A	0,0 A	0,0 A
17.	0,0 A	0,0 A	0,0 A	0,9 A	0,0 A	1,6 A	0,0 A
19.	0,0 A	0,0 A	0,0 A	0,8 A	0,0 A	0,8 A	0,0 A
21.	0,0 A	0,0 A	0,0 A	0,7 A	0,0 A	0,0 A	0,0 A
23.	0,0 A	0,0 A	0,0 A	0,0 A	0,0 A	0,7 A	4,1 A
25.	0,0 A	0,0 A	0,0 A	0,0 A	0,0 A	0,7 A	4,0 A
35.	0,0 A	0,0 A	0,0 A	0,0 A	0,0 A	0,0 A	1,4 A
37.	0,0 A	0,0 A	0,0 A	0,0 A	0,0 A	0,0 A	1,4 A

Iz podataka prikazanih tablicama 6.2. i 6.3. može se primijetiti kako generator ne uspijeva u potpunosti generirati zadane vrijednosti harmonika. Odstupanje je značajnije u slučajevima kada je potrebno generirati harmonike višeg reda i značajnih amplituda. Dok je iznimka peti harmonik kojeg generator proizvodi i iznad zadane vrijednosti. Također, generator svojim radom proizvodi i harmonike koji nisu zadani u sučelju. Vrijednosti tih harmonika zanemarene su u ovom dijelu,

ali biti će vidljive u nastavku. Odstupanje zadanih i očitanih vrijednosti prikazano je grafički slikom 6.5.

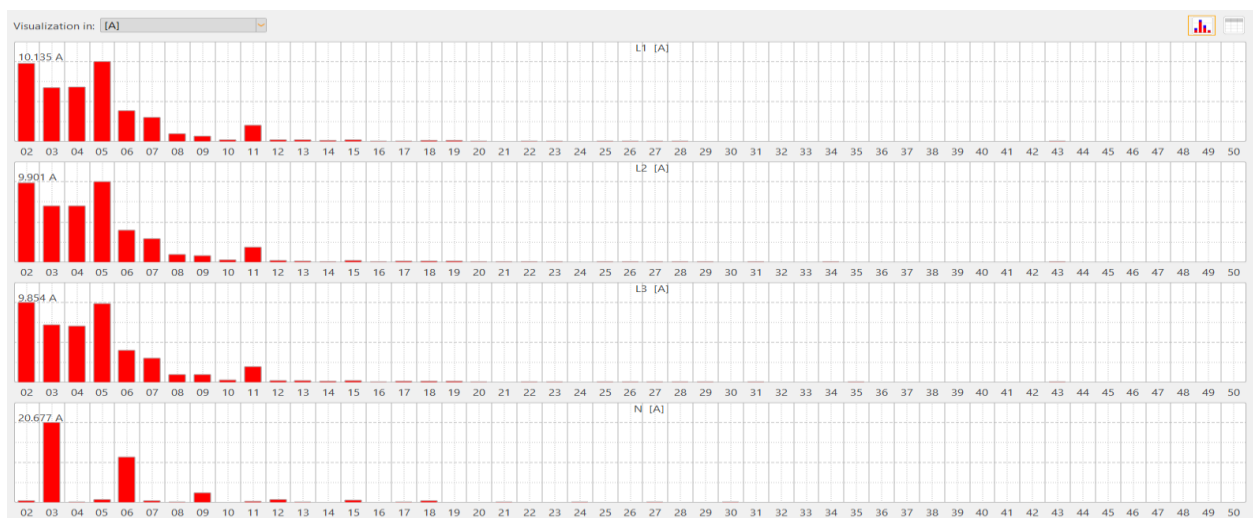


Slika 6.5. Amplitude zadanih i generiranih harmonika proizvedenih generatorom harmonika

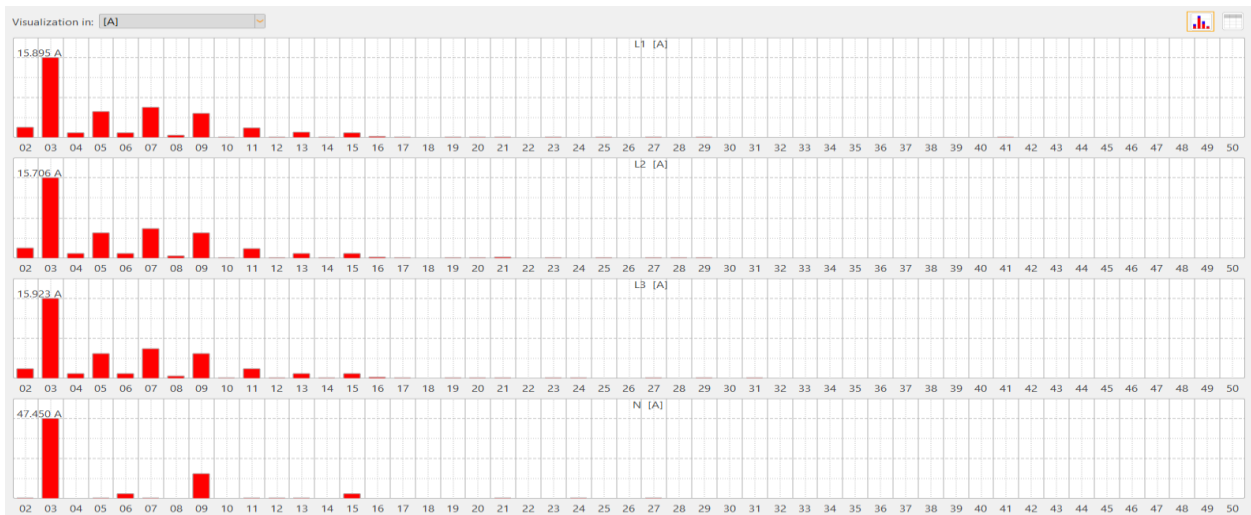
6.3. Analiza harmonijskog sadržaja struje i napona pri simulaciji rada trošila

Cilj ovog eksperimenta je ponovno simulirati rad ranije navedenih trošila, te snimiti i analizirati struje u pojedinim dijelovima sustava i analizirati razine harmonijskog izobličenja napona u mreži. Tako su ponovno generirane struje iz tablice 6.3. prema zadanim vrijednostima iz tablice 6.2. Mrežnim analizatorom mjerene su vrijednosti struja na tri mjesta i napon u zajedničkoj točki priključka na mrežu (PCC). Struja je mjerena na izlazu iz generatora harmonika, na izlazu iz aktivnog filtera i u točki priključka na mrežu.

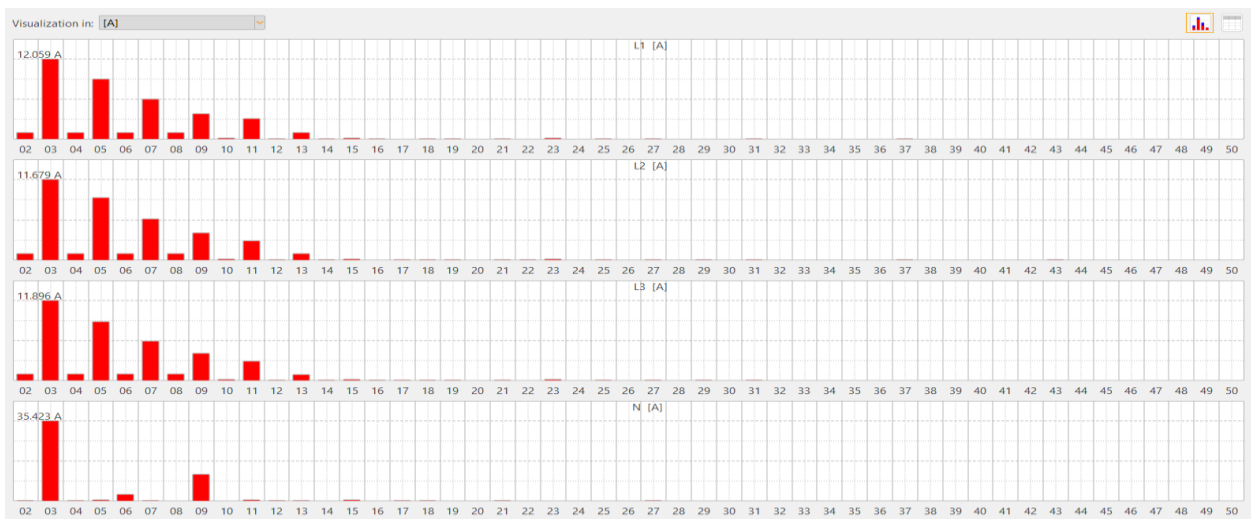
Slike 6.6. do 6.12. prikazuju harmonijske spektre struja generatora harmonika za pojedina trošila. Vidljivo je da generator proizvodi zadane spektre, ali su prisutni i harmonici koji nisu zadani u sučelju generatora. Generator harmonika je uređaj koji radi u sklopnom načinu rada tako da samim svojim radom proizvodi određene strujne harmonike. To su dominantno neparni harmonici nižeg reda što je jasno vidljivo na slici 6.12. Još se može primijetiti da neutralnim vodičem teku značajne harmonijske struje višekratnika broja 3 čija je amplituda zbroj amplituda u fazama.



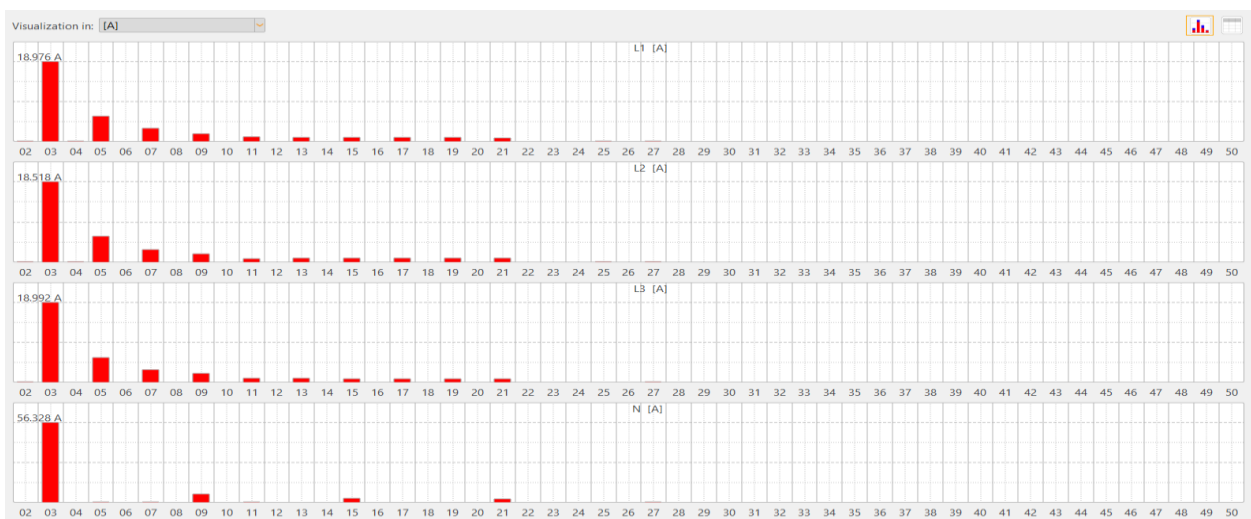
Slika 6.6. Harmonijski spektar struje generatora harmonika - lučna peć



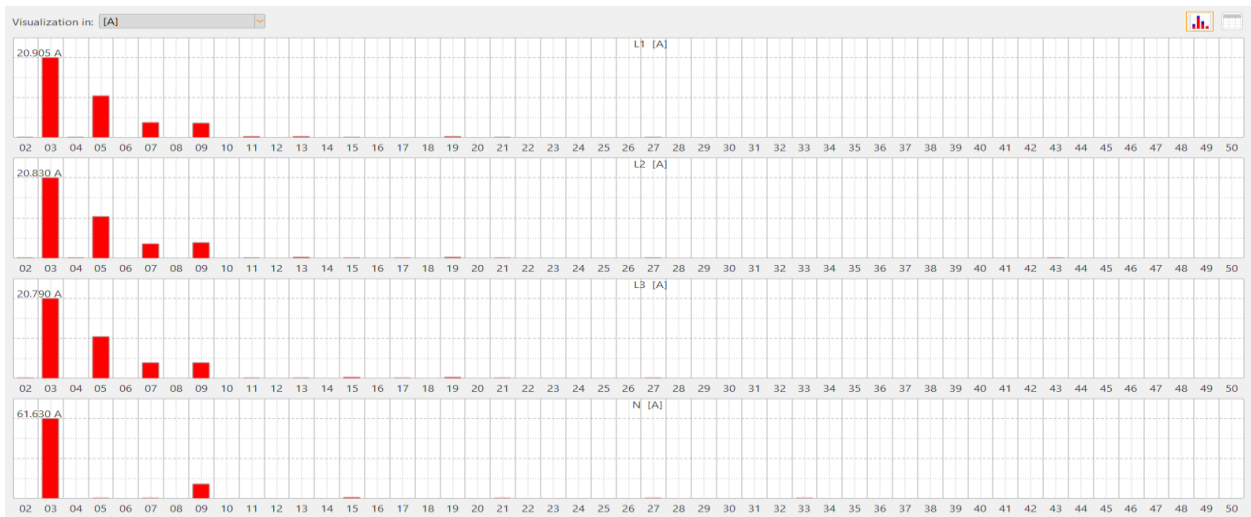
Slika 6.7. Harmonijski spektar struje generatora harmonika - magnetiziranje transformatora



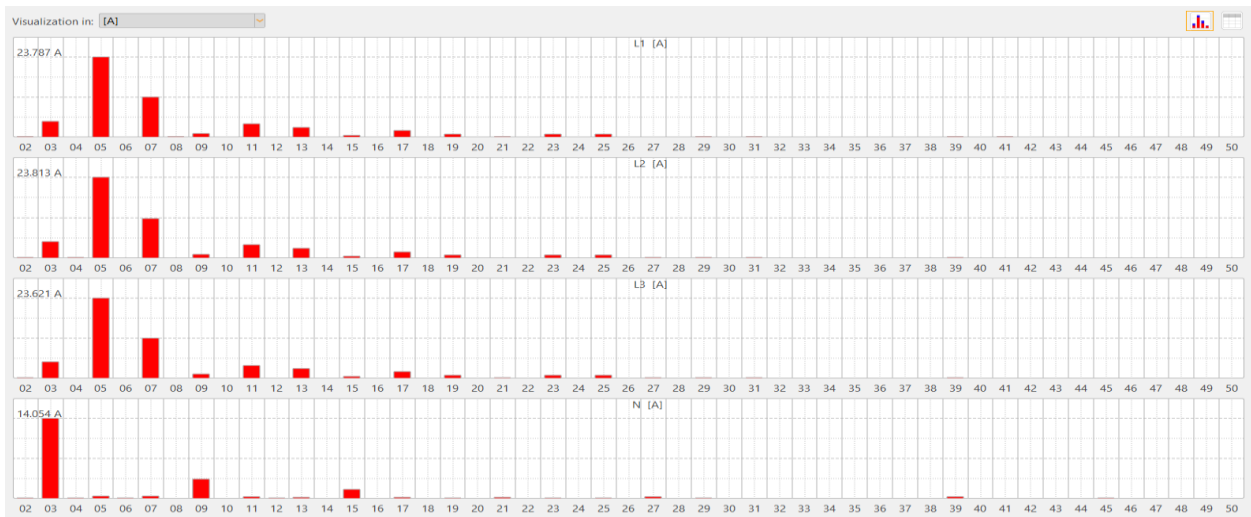
Slika 6.8. Harmonijski spektar struje generatora harmonika - besprekidno napajanje (UPS)



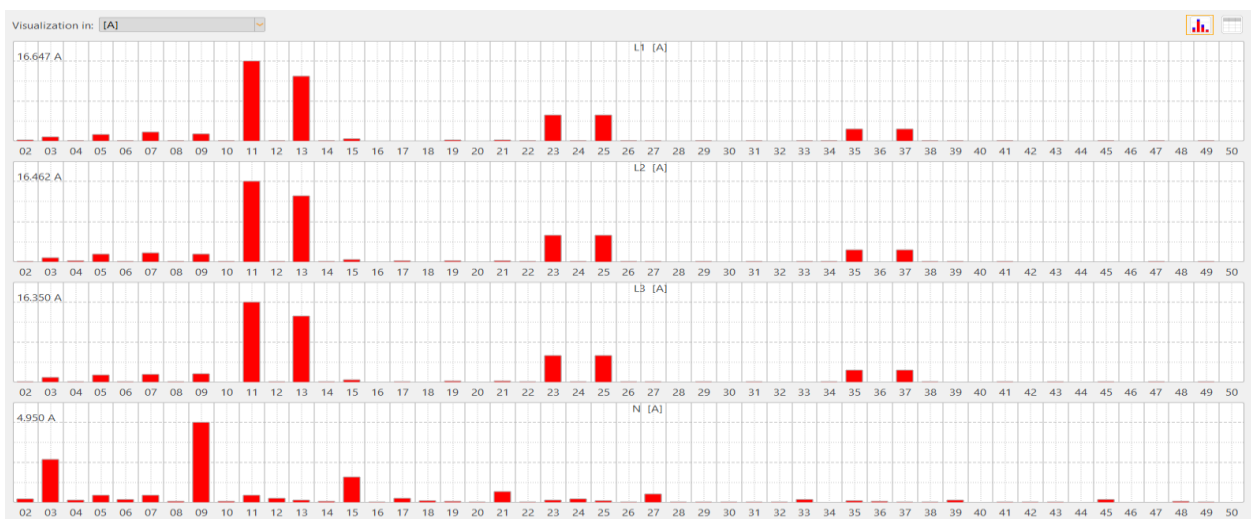
Slika 6.9. Harmonijski spektar struje generatora harmonika - računalo



Slika 6.10. Harmonijski spektar struje generatora harmonika - fluorescentna rasvjeta

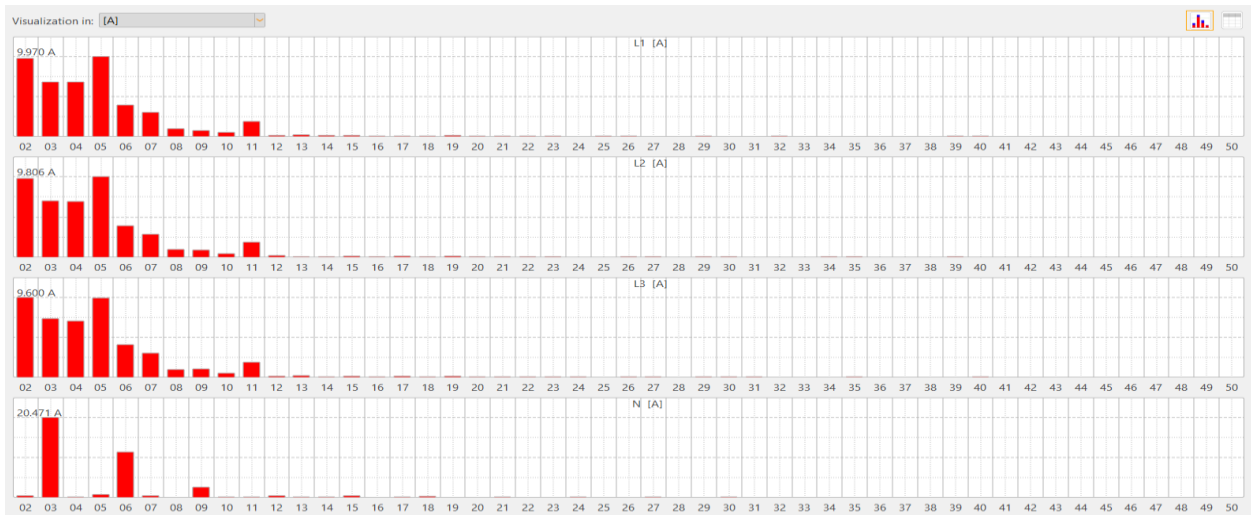


Slika 6.11. Harmonijski spektar struje generatora harmonika - 6-pulsni ispravljač

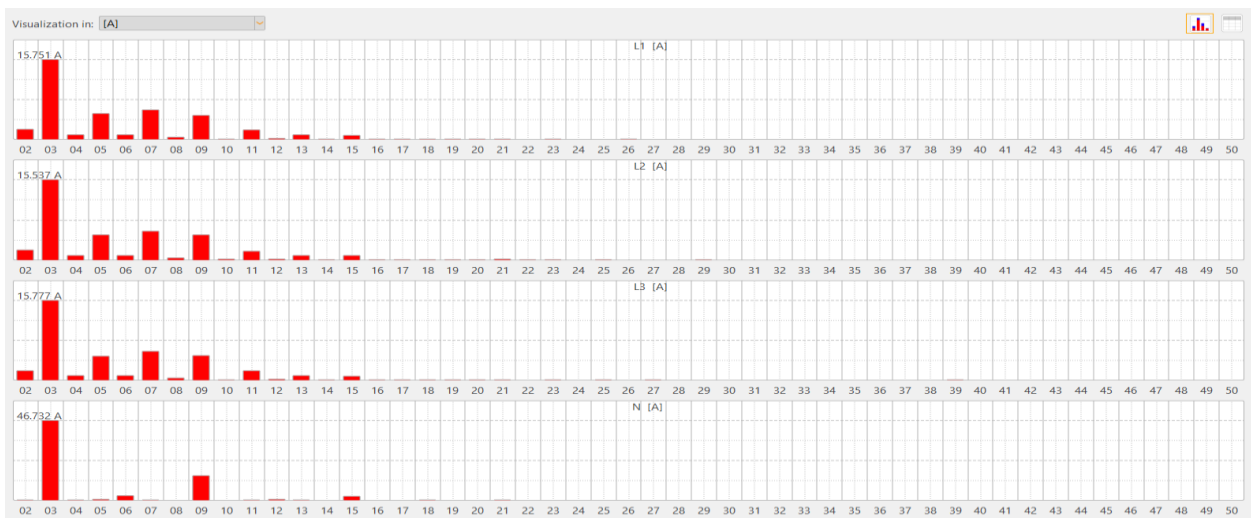


Slika 6.12. Harmonijski spektar struje generatora harmonika - 12-pulsni ispravljač

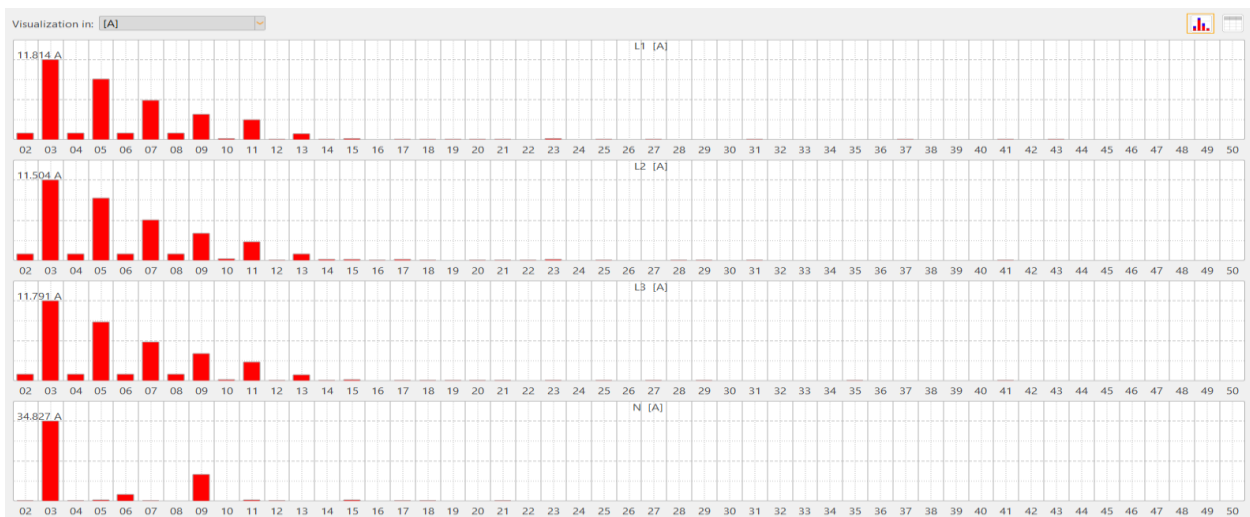
Slikama 6.13. do 6.19. prikazani su spektri harmonijskih struja koje aktivni filter injektira u mrežu. Vidljivo je da su spektri ovih struja vrlo slični onima koje proizvodi generator harmonika što potvrđuje pravilan rad aktivnog filtera. Svaka razlika u struji filtera i generatora teći će mrežom.



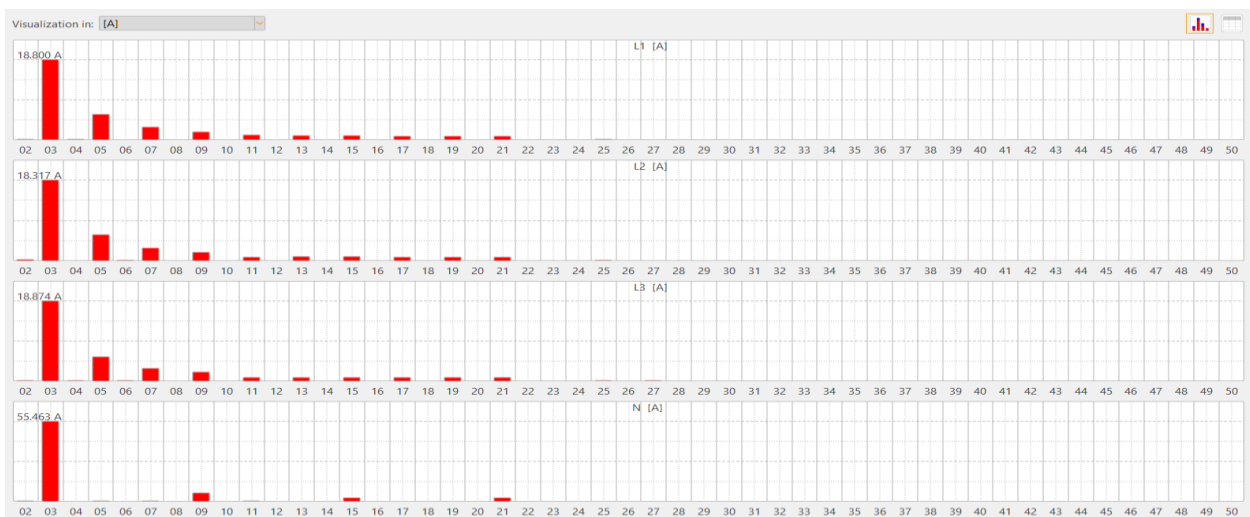
Slika 6.13. Harmonijski spektr struje aktivnog filtera - lučna peć



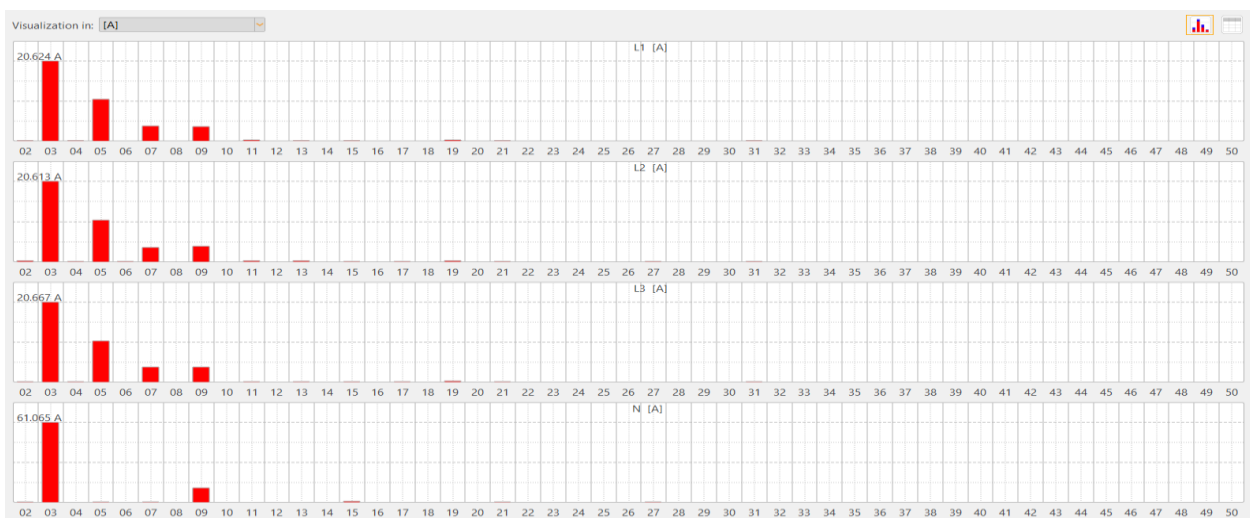
Slika 6.14. Harmonijski spektr struje aktivnog filtera - magnetiziranje transformatora



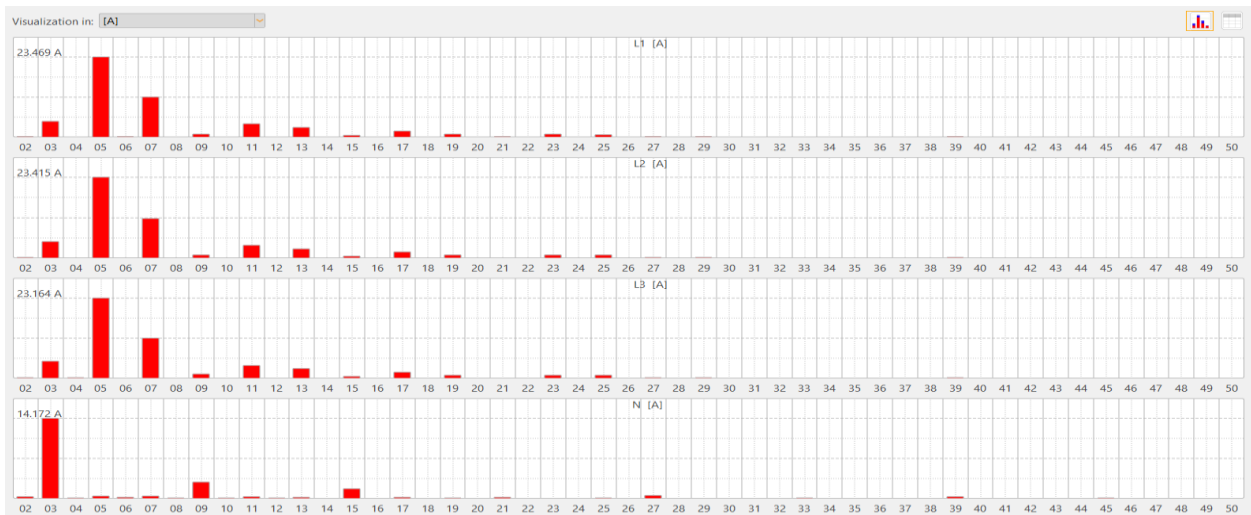
Slika 6.15. Harmonijski spektar struje aktivnog filtera - besprekidno napajanje (UPS)



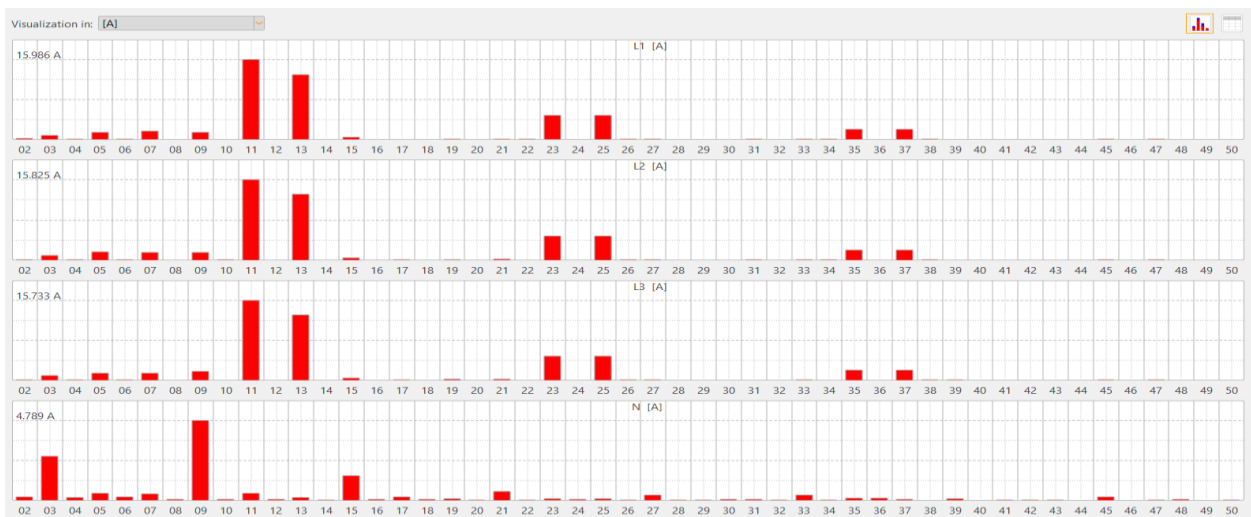
Slika 6.16. Harmonijski spektar struje aktivnog filtera - računalo



Slika 6.17. Harmonijski spektar struje aktivnog filtera - fluorescentna rasvjeta



Slika 6.18. Harmonijski spektar struje aktivnog filtera - 6-pulsni ispravljač

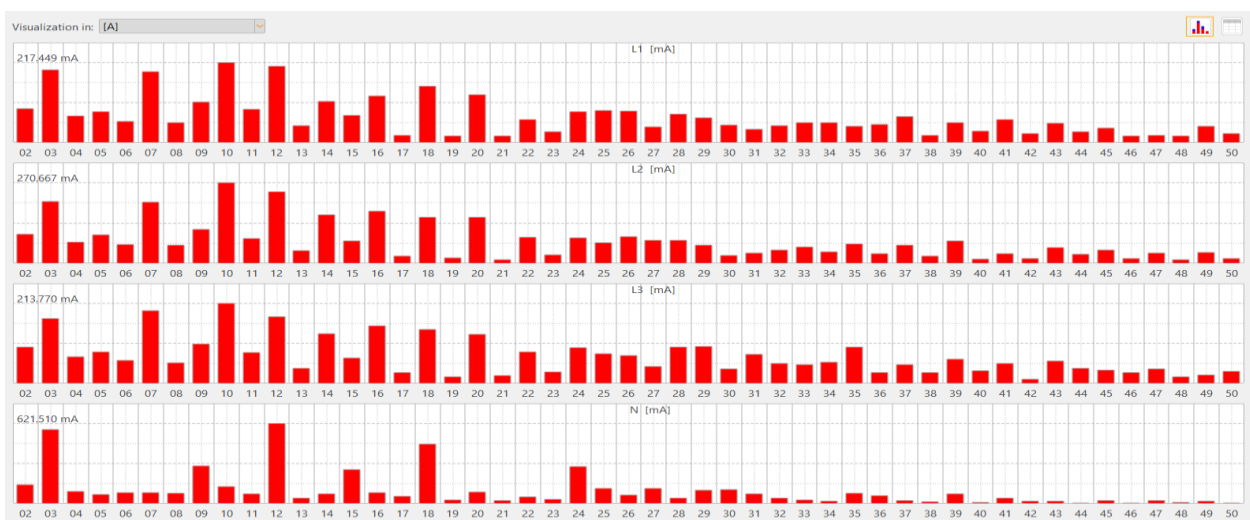


Slika 6.19. Harmonijski spektar struje aktivnog filtera - 12-pulsni ispravljač

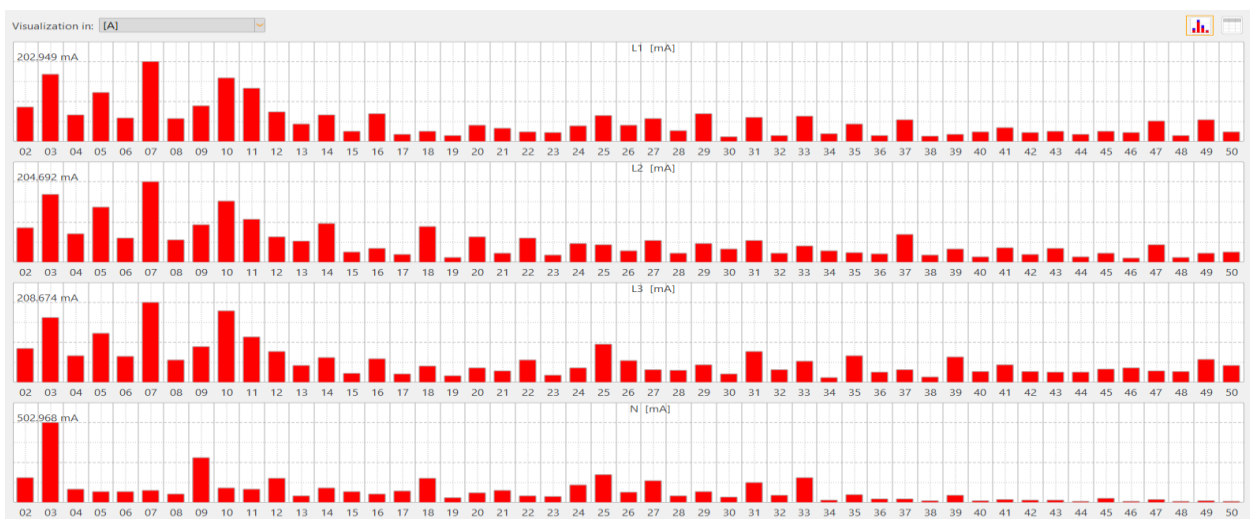
Harmonijski spektri struje mreže prikazani su slikama 6.20. do 6.26. Bitno je primijetiti da je amplitudna os skalirana u odnosu na prethodne slike jer su vrijednosti svih strujnih harmonika na mjestu priključenja na mrežu sada puno niže, odnosno manje od 1 A, što još jednom potvrđuje pravilan rad filtera u svih sedam slučajeva.



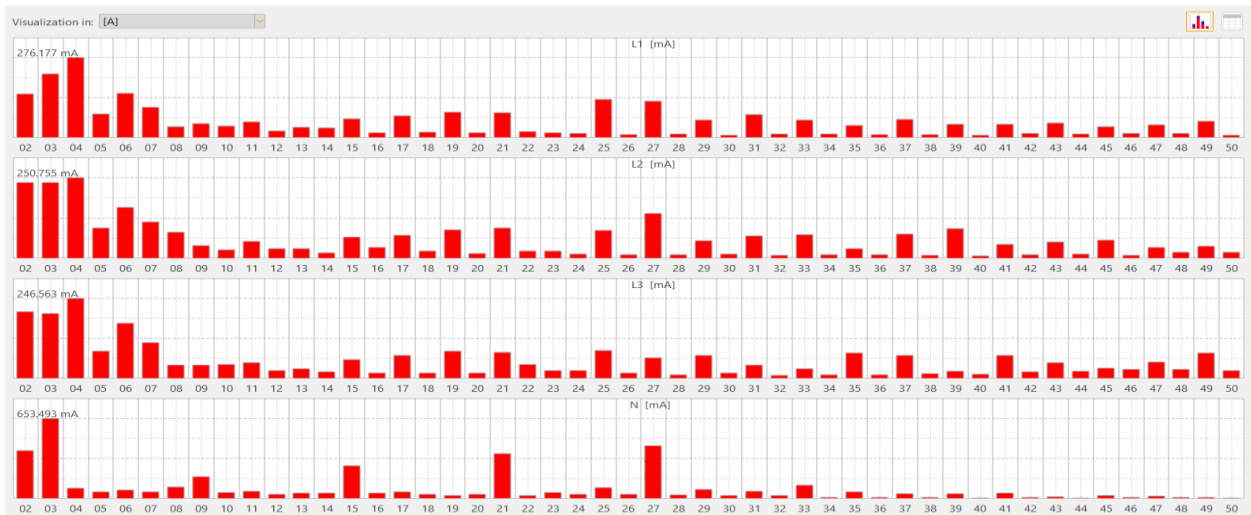
Slika 6.20. Harmonijski spektar struje na mjestu priključka na mrežu - lučna peć



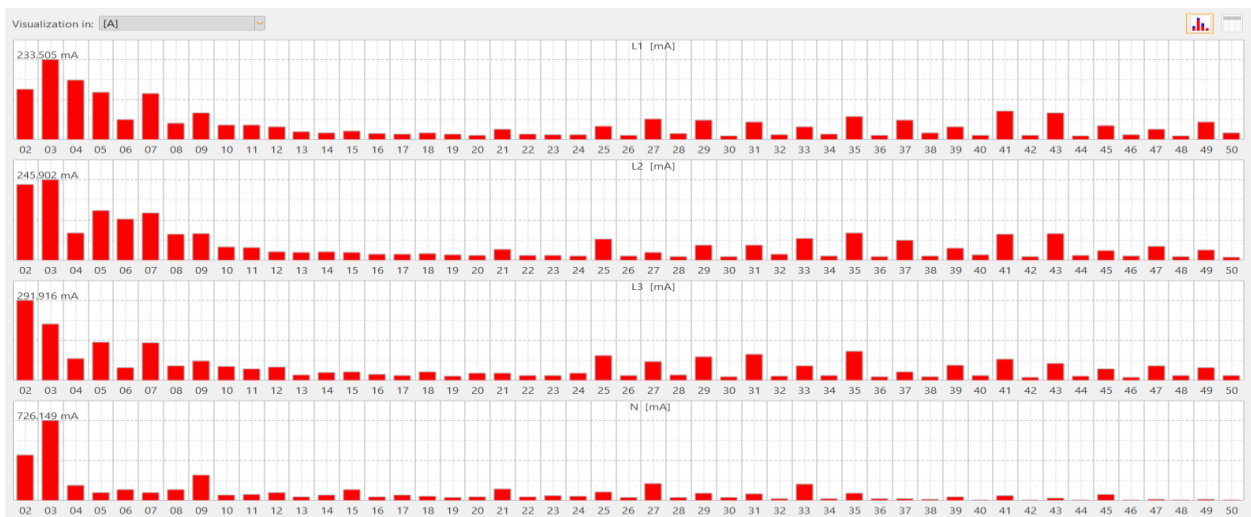
Slika 6.21. Harmonijski spektar struje na mjestu priključka na mrežu - magnetiziranje transformatora



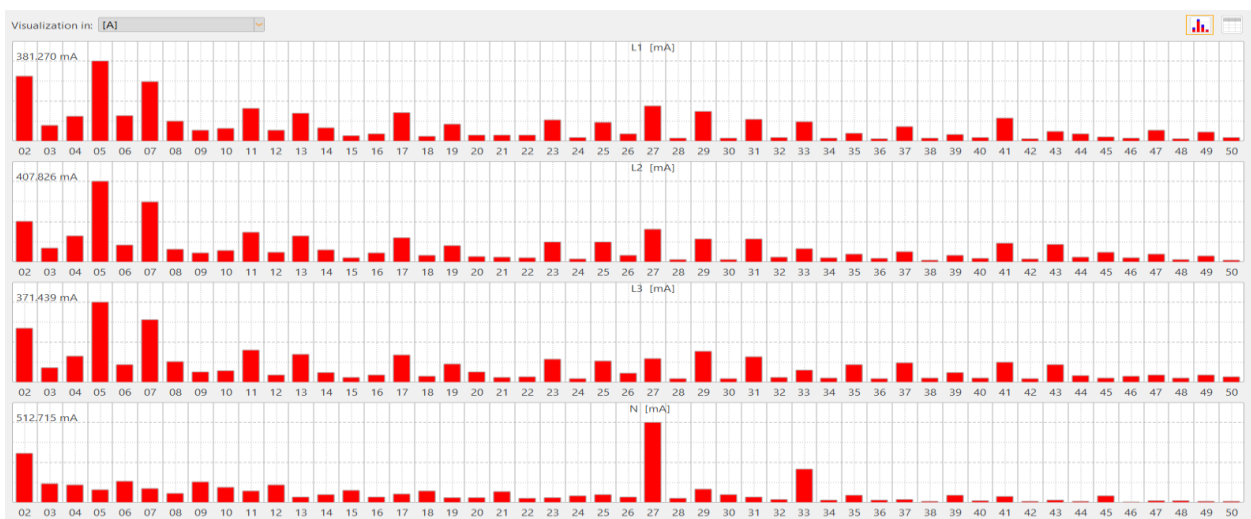
Slika 6.22. Harmonijski spektar struje na mjestu priključka na mrežu - besprekidno napajanje (UPS)



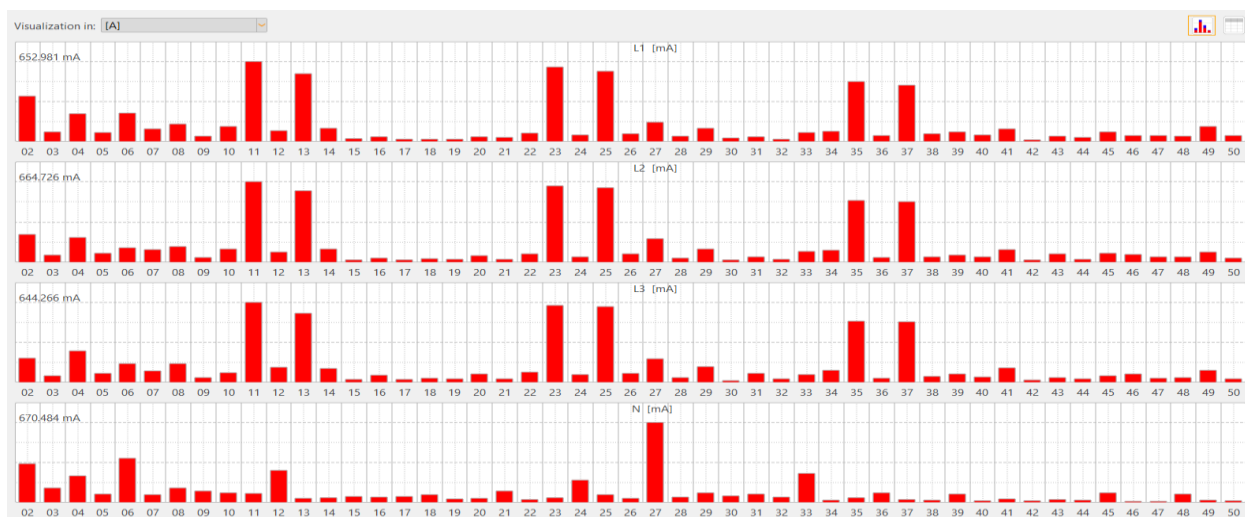
Slika 6.23. Harmonijski spektar struje na mjestu priključka na mrežu – računalo



Slika 6.24. Harmonijski spektar struje na mjestu priključka na mrežu - fluorescentna rasvjeta

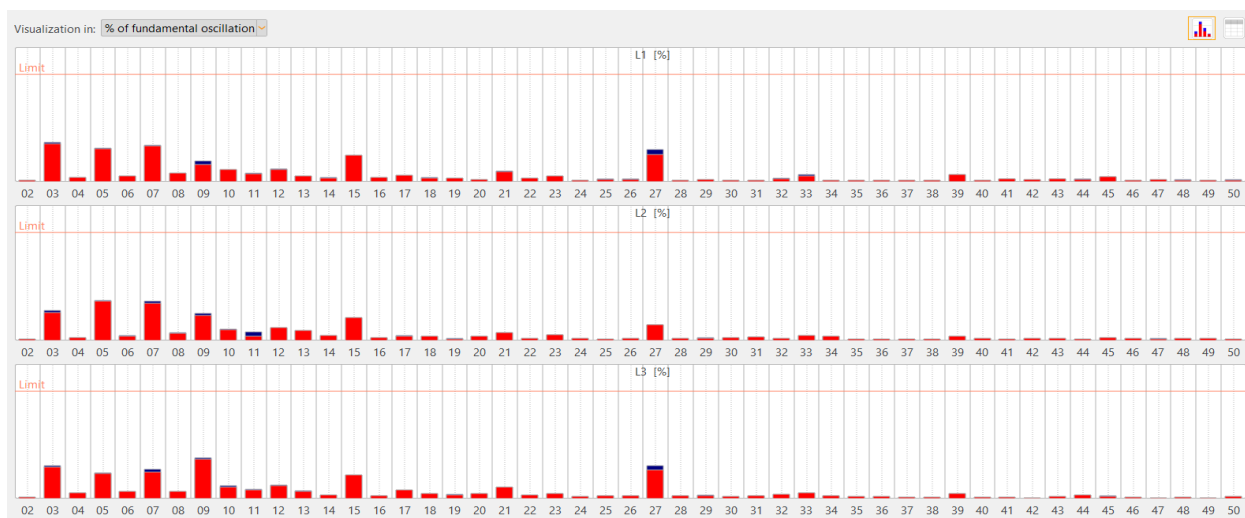


Slika 6.25. Harmonijski spektar struje na mjestu priključka na mrežu - 6-pulsni ispravljač

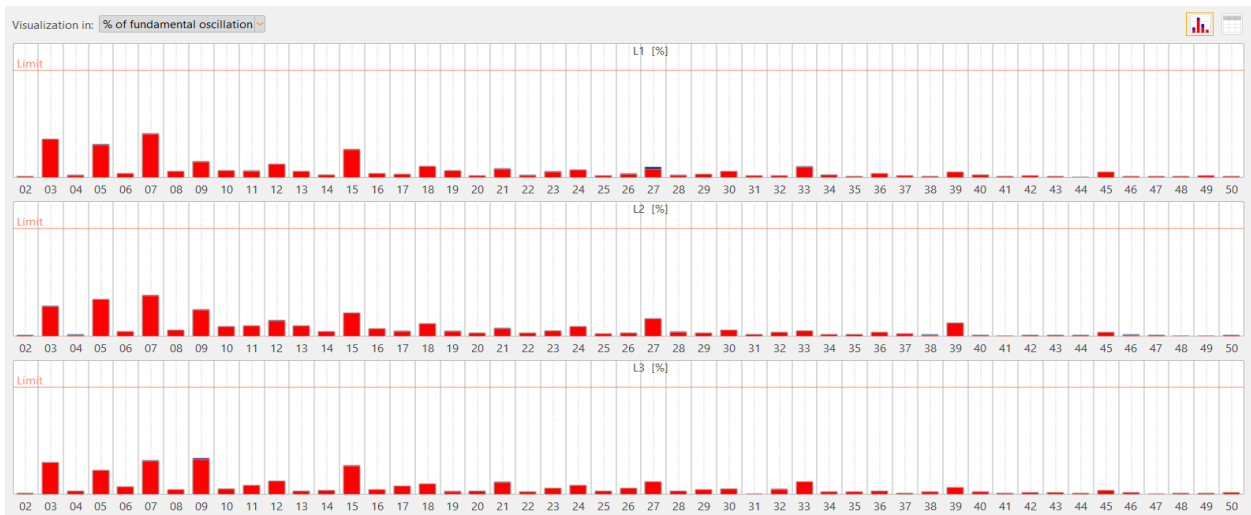


Slika 6.26. Harmonijski spektar struje na mjestu priključka na mrežu - 12-pulsni ispravljač

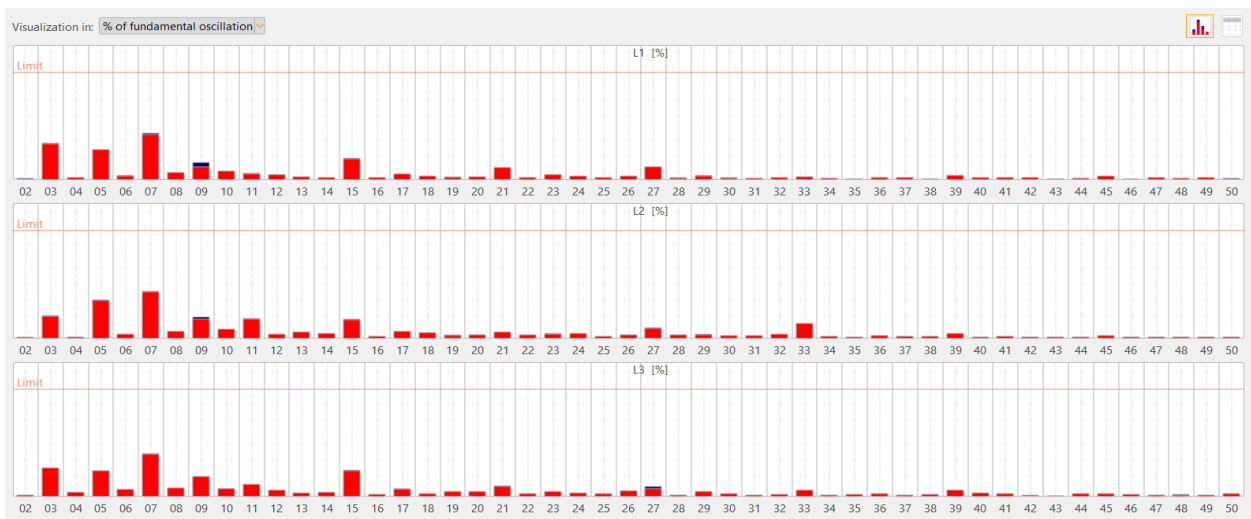
Preko impedancije mreže harmonijske struje uzrokuju naponske harmonike. Slike 6.27. do 6.33. prikazuju naponske harmonike na mjestu priključka na mrežu. Svi naponski harmonici su ispod granice postavljene normom EN 50160, iako se ne može reći da zadovoljavaju normu jer mjerenje nije provedeno u trajanju od najmanje sedam dana.



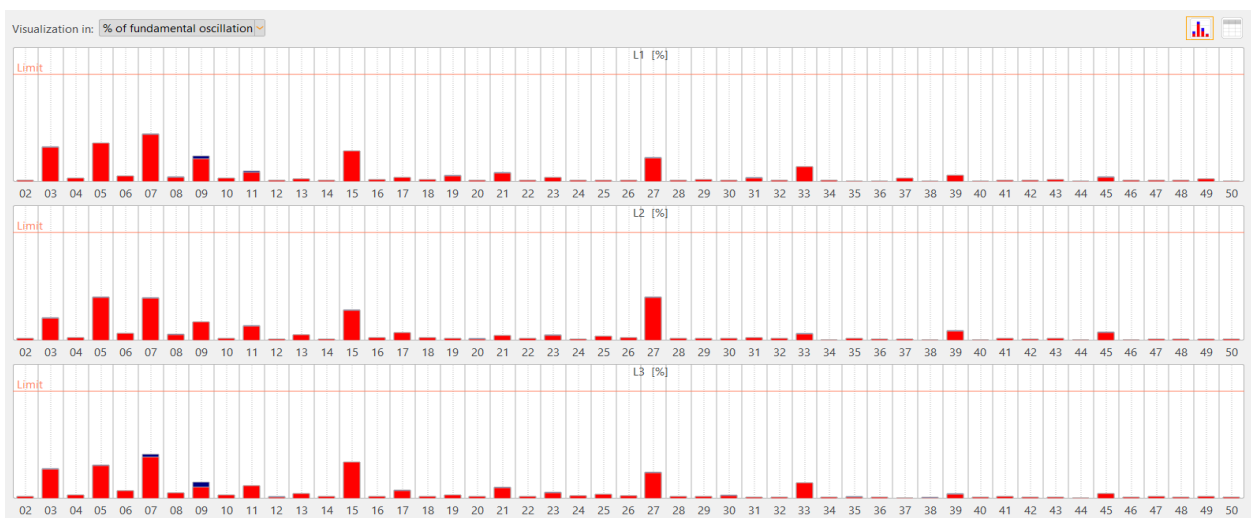
Slika 6.27. Harmonijski spektar napona na mjestu priključka na mrežu - lučna peć



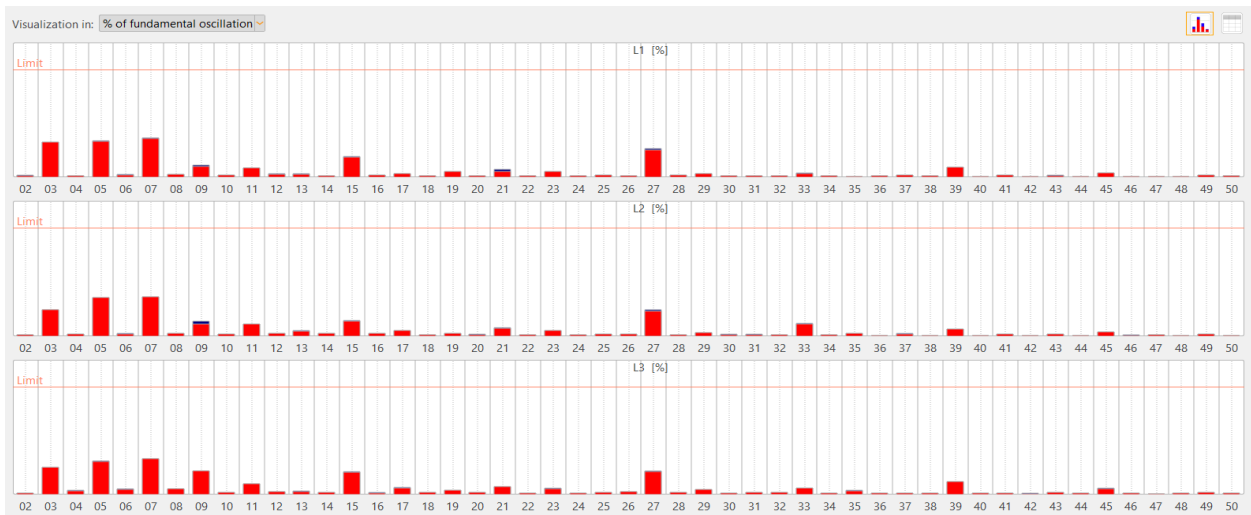
Slika 6.28. Harmonijski spektar napona na mjestu priključka na mrežu - magnetiziranje transformatora



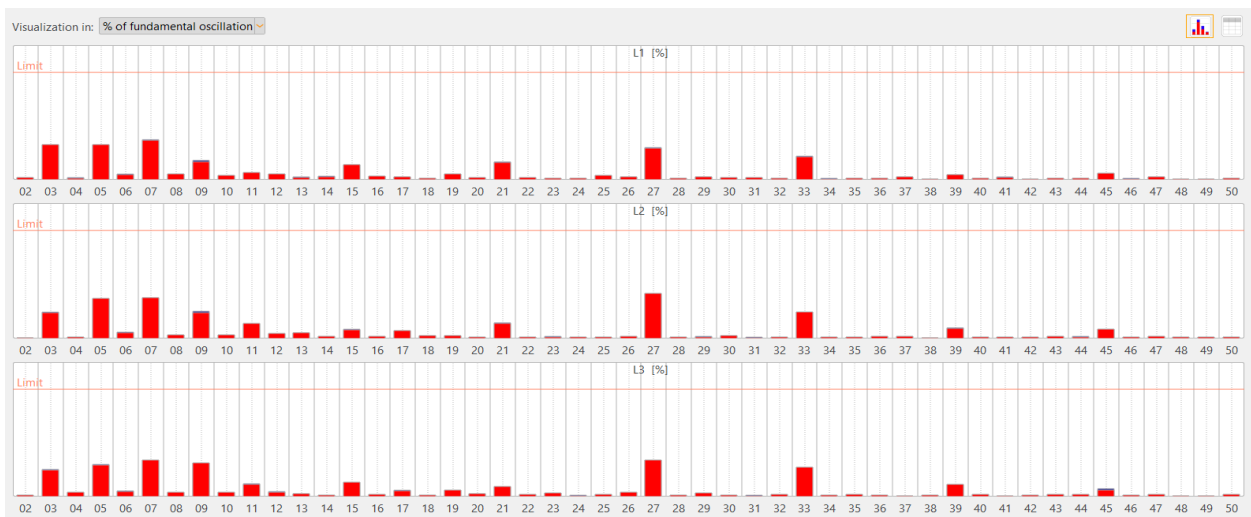
Slika 6.29. Harmonijski spektar napona na mjestu priključka na mrežu - besprekidno napajanje (UPS)



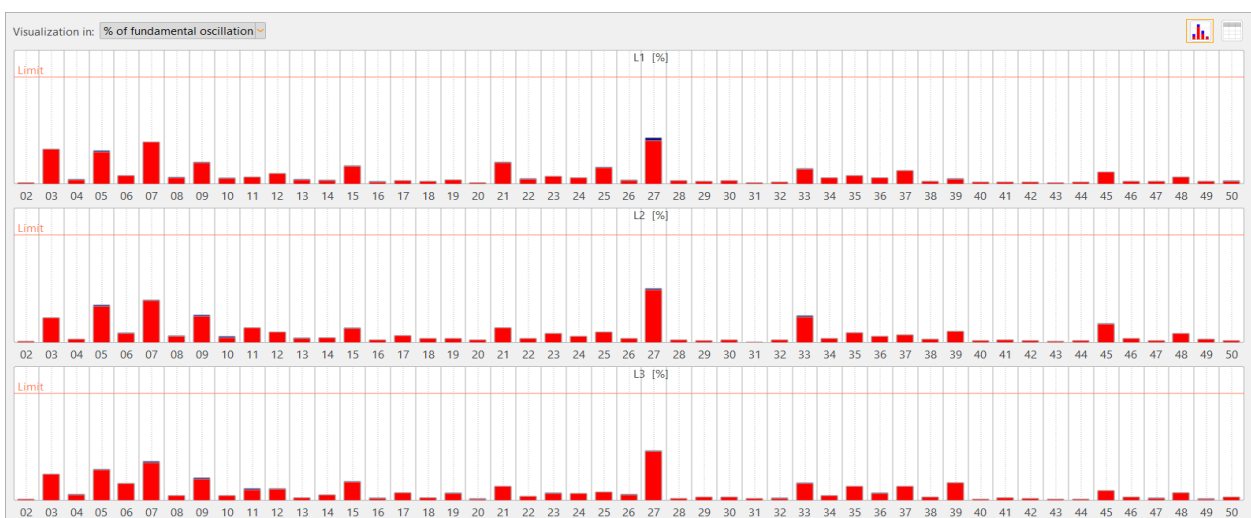
Slika 6.30. Harmonijski spektar napona na mjestu priključka na mrežu – računalo



Slika 6.31. Harmonijski spektar napona na mjestu priključka na mrežu - fluorescentna rasvjeta



Slika 6.32. Harmonijski spektar napona na mjestu priključka na mrežu - 6-pulsni ispravljač



Slika 6.33. Harmonijski spektar napona na mjestu priključka na mrežu - 12-pulsni ispravljač

Kao što su za pojedinačne naponske harmonike postavljeni limiti, tako postoji limit za ukupno harmonijsko izobličenje napona (THD_U) prema istoj normi. Limit iznosi 8 %, a iz tablice 6.4. vidljivo je da niti u jednoj fazi, niti u jednom slučaju ukupno harmonijsko izobličenje napona ne prelazi zadani limit.

Tablica 6.4. Vrijednosti THD_U na mjestu priključenja na mrežu

	Faza	LUČNA PEĆ	MAGNETIZIRANJE TRANSFORMATORA	BESPREKIDNO NAPAJANJE (UPS)	RAČUNALO	FLUORESCENTNA RASVJETA	6-PULSNI ISPRAVLJAČ	12-PULSNI ISPRAVLJAČ
THD_U [%]	L1	2,996	3,220	3,143	3,381	3,111	3,011	3,032
	L2	3,019	3,099	3,166	3,162	3,019	3,087	2,979
	L3	2,403	2,565	2,747	2,859	2,752	2,682	2,701

Ovim rezultatima pokazano je da je aktivni filter vrlo prilagodljivo i efektivno rješenje za problem harmonijskih struja i napona. Unatoč generiranim harmonijskim strujama visokog reda i velikih amplituda, struje i naponi na mjestu priključenja na mrežu ostaju u zadovoljavajućim granicama.

7. ZAKLJUČAK

Sve većom elektrifikacijom i primjenom obnovljivih izvora energije povećava se potražnja za električnom energijom. Energetska elektronika koja povećava efikasnost u industriji i omogućuje rad obnovljivih izvora energije sve češći je prizor. Ovakve promjene mogu negativno utjecati na parametre mreže kao što je pojava harmonika. Iako je problem harmonika već od prije poznat, njegov utjecaj na opremu nije bio na istoj razini kao danas. Zbog sve većeg broja osjetljivih uređaja kao što su računala, bitno je harmonijsko izobličenje zadržati na sigurnoj razini. To se postiže raznim metodama koje mogu potpuno ili djelomično ukloniti harmonike. I dalje se najčešće upotrebljava pasivni filter harmonika, koji ima svoje prednosti i mane. No, pojavom aktivnog filtera na tržištu, a kojemu cijena postaje sve konkurentnija, to bi se moglo promijeniti. Aktivni filter bolje je rješenje od pasivnih filtera jer ima veću učinkovitost, bolje karakteristike filtriranja, manje dimenzije, lako se parametira i pušta u pogon, a često ima mogućnost kompenzacije jalove snage, poboljšanja faktora snage i korekcije nesimetrije napona.

Ovim radom opisan je problem harmonijskog izobličenja od njegovog nastanka do načina kojima se može ublažiti. A iz praktičnog djela ovog rada da se zaključiti kako je aktivni filter dobro rješenje za industrijska postrojenja, distribuciju, pa čak i poslovne zone s velikim brojem računala. Usporedbom spektra struje trošila (generatora harmonika) i struje aktivnog filtera jasno je da je aktivni filter vrlo prilagodljiv uređaj koji može eliminirati harmonijske struje visokog reda i intenziteta. Isto tako, naponsko izobličenje ostaje u zadanim granicama što osigurava pravilan rad ostalih potrošača u mreži.

LITERATURA

- [1] R. C. Dugan et al., „Electrical Power Systems Quality, Second Edition“, McGraw-Hill, New York, 2002.
- [2] A. Tokić, V. Milardić, „Kvalitet električne energije“, PrintCom Tuzla, Tuzla, 2015.
- [3] G. Šagovac, I. Klarić, „Razmatranje kvalitete električne energije u distribucijskim mrežama“, simpozij HO CIGRE, 2004.
- [4] F. C. de La Rosa, „Harmonics and Power Systems“, Taylor & Francis Group, 2006.
- [5] A. Moreno-Muñoz, Ed., „Power Quality“, London: Springer London, 2007. doi: 10.1007/978-1-84628-772-5.
- [6] T. Teklić, „Metoda proračuna širenja flikera uzrokovanih priključkom elektrolučne peći na elektroenergetsku mrežu“, [Online]. Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:168:082165> [Pristupljeno: lipanj 2024.]
- [7] S. Jović, M. Ikić, M. Banjanin, G. Vuković, „Uticaj CFL i LED rasvjetnih tijela na kvalitet električne energije“, naučno-stručni simpozijum Energetska efikasnost, Banja Luka, 2019.
- [8] M. A. S. Masoum, E. F. Fuchs, „Power Quality in Power Systems and Electrical Machines“, Elsevier, 2015. [Online]. Dostupno na: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128007822000014> [Pristupljeno: 12.07.2024.]
- [9] Y. Wang, „Harmonic Analysis in Power Distribution Networks“, Department of Electrical and Electronic Engineering, School of Engineering, University of Manchester, Manchester, UK, 2020.
- [10] D. Stevanović, P. Petković, „Harmonici u elektroenergetskom sistemu - praktični problemi i rešenja“, simpozij INFOTEH-JAHORINA, 2013.
- [11] Repozitorij Hrvatskog zavoda za norme, [Online]. Dostupno na: <https://repozitorij.hzn.hr> [Pristupljeno: kolovoz 2024.]
- [12] D. Barukčić, I. Periša, A. Pavić, M. Lasić, „Osvrt na novo izdanje norme EN50160 iz 2010. godine“, savjetovanje Hrvatskog ogranka Međunarodne elektrodistribucijske konferencije (HO CIRED), 2012.

- [13] Academy of EMC, [Online]. Dostupno na: <https://www.academyofemc.com> [Pristupljeno: rujan 2024.]
- [14] S. Mikkili, A. K. Panda, „Power Quality Issues“, CRC Press, 2018. doi:10.1201/9781315222479.
- [15] H. Akagi, „Active Harmonic Filters,“ in Proceedings of the IEEE, vol. 93, no. 12, 2005, doi: 10.1109/JPROC.2005.859603.
- [16] Z. Salam, T. Perng Cheng, A. Jusoh, „Review of active power filter technologies“, The Institution of Engineers, Malaysia, 2007.
- [17] A. F. Zobaa, S. H. E Abdel Aleem, „Power Quality in Future Electrical Power Systems“, 2017.
- [18] S. Chattopadhyay, M. Mitra, S. Sengupta, „Electric Power Quality“, Springer, 2011. doi: 10.1007/978-94-007-0635-4.
- [19] A. Kamenka, „2014 Six Tough Topics About Harmonic Distortion and Power Quality Indices in Electric Power Systems: A White Paper of the Schaffner Group“, 2014. [Online]. Dostupno na: <http://www.schaffner.com> [Pristupljeno: svibanj 2024.] doi: 10.1007/978-1-84628-772-5.
- [20] A. Baghini, Ed., „Handbook of Power Quality“, Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2008. doi: 10.1002/9780470754245.
- [21] D. Galzina, „Harmonici u visokonaponskoj mreži“, HEP – Operator distributivnog sustava.
- [22] R. Pinyol, „Harmonics: Causes, Effects and Minimization“, 2015.
- [23] „Razdjelne mreže i distribuirana proizvodnja, Održavanje naponskih prilika u razdjelnim mrežama“, FER, materijali s predavanja.
- [24] ABB, „ABB technical guide No. 6“, [Online]. Dostupno na: <https://library.abb.com> [Pristupljeno: rujan 2024.]
- [25] S. Jain, S. Dwivedi, K. K. Gupta, P. Chaturvedi, „Modeling and Control of Power Electronics Converter System for Power Quality Improvements,“ in Modeling and Control of Power Electronics Converter System for Power Quality Improvements, Elsevier, 2018, pp. 31–84, doi: 10.1016/B978-0-12-814568-5.00002-8.

- [26] ABB, „Power Quality Filter PQFS Installation, operation and maintenance instructions.”
- [27] Informativna web stranica proizvođača opreme A. Eberle“, [Online]. Dostupno na: <https://www.a-eberle.de/en/products/mobile-power-quality-analyzer-pq-box-200/>
[Pristupljeno: prosinac 2024.]

SAŽETAK

Ovim diplomskim radom definirana je kvaliteta električne energije i njeni mjerljivi pokazatelji. Poblje je opisan problem strujnih i naponskih harmonika koji u suvremeno doba postaje sve veći. Opisan je pojam nelinearnog trošila koji uzrokuje nastanak harmonika. Također, opisana je matematička analiza i navedeni su izvori harmonika i posljedice koje njihovo prisustvo u mreži uzrokuje. Nadalje, napravljen je pregled aktualnih normi bitnih za definiranje sigurnih razina harmonika u mreži. Date su metode za ublažavanje utjecaja harmonika od kojih je najvažnija ugradnja aktivnog filtera. Aktivni filteri podijeljeni su prema nekoliko kriterija, te su opisane njihove razlike i način rada. Na posljetku je provedeno ispitivanje rada aktivnog filtera u zgradi fakulteta uz pomoć generatora harmonika kojim je simulirano više trošila s različitim karakterističnim spektrima. Izmjerene vrijednosti analizirane su i donesen je zaključak o primjeni aktivnog filtera za filtriranje harmonijskih struja i napona.

Ključne riječi: aktivni filter, harmonik, harmonijsko izobličenje, kvaliteta električne energije, generator harmonika

ABSTRACT

This master's thesis defines the quality of electrical energy and its measurable indicators. The issue of current and voltage harmonics, which is becoming increasingly significant in modern times, is described in detail. The concept of a nonlinear load, which causes the occurrence of harmonics, is explained. Additionally, a mathematical analysis is presented, along with sources of harmonics and the consequences of their presence in the network. Furthermore, an overview of current standards relevant to defining safe harmonic levels in the network is provided. Methods for mitigating the impact of harmonics are given, with the installation of an active filter being the most important. Active filters are categorized based on several criteria, and their differences and modes of operation are described. Finally, an examination of the active filter's performance in a university building was conducted using a harmonic generator, simulating multiple loads with different characteristic spectra. The measured values were analyzed, and conclusions were drawn regarding the application of the active filter for filtering harmonic currents and voltages.

Keywords: active filter, harmonic, harmonic distortion, power quality, harmonic generator

ŽIVOTOPIS

Luka Krmpotić rođen je 24. Lipnja 1999. godine u Pakracu. Pohađao je osnovnu školu te upisuje i završava Tehničku školu u Kutini, smjer Tehničar za računalstvo. Nakon završetka srednje škole 2018. godine, upisuje Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnike i informacijskih tehnologija na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Upisom druge godine opredjeljuje se za smjer elektroenergetika te preddiplomski studij završava 2021. godine. Diplomski studij Elektrotehnike upisuje iste godine te se opredjeljuje za smjer elektroenergetike, izborni blok DEB (Održiva elektroenergetika) na istom fakultetu.

Potpis autora