

## POBOLJŠANJE KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE U RAČUNARSKOM CENTRU PRIMENOM AKTIVNOG SHUNT FILTERA

### ENHANCING POWER QUALITY IN DATA CENTER THROUGH THE APPLICATION OF ACTIVE SHUNT FILTERS

Aleksandar TOSUNOVIĆ, Electroconsult doo, Srbija  
Nataša SAVIĆ, Electroconsult doo, Srbija

#### KRATAK SADRŽAJ

Kvalitet električne energije je ključan za stabilno funkcionisanje modernih električnih sistema, posebno u računarskim centrima koji koriste visoko osetljivu elektronsku opremu. Ovaj rad istražuje problematiku viših harmonika struje u računarskim centrima i predlaže rešenja za njihovo efikasno uklanjanje koristeći aktivni harmonijski filter. Analiziraju se standardi kao što su IEEE 519 i EN50160, kao i važnost kvaliteta električne energije iz perspektive potrošača. Negativni efekti viših harmonika uključuju pregrevanje transformatora, smanjenu efikasnost sistema i skraćen vek trajanja opreme. Aktivni harmonijski filteri mogu značajno poboljšati stabilnost sistema i produžiti vek trajanja opreme.

**Ključne reči:** kvalitet električne energije, računarski centri, harmonici, aktivni harmonijski filter

#### ABSTRACT

The quality of electric power is crucial for the stable functioning of modern electrical systems, especially in data centers that use highly sensitive electronic equipment. This paper investigates the issue of current harmonics in data centers and proposes solutions for their efficient elimination using an active harmonic filter. The standards IEEE 519 and EN50160 are analyzed, along with the importance of power quality from the consumer's perspective. The negative effects of current harmonics include transformer overheating, reduced system efficiency, and shortened equipment lifespan. Active harmonic filters can significantly improve system stability and extend equipment lifespan.

**Key words:** power quality, data centers, current harmonics, active harmonic filter

[aleksandar.tosunovic@electroconsult.rs](mailto:aleksandar.tosunovic@electroconsult.rs), [natasa.savic@electroconsult.rs](mailto:natasa.savic@electroconsult.rs)

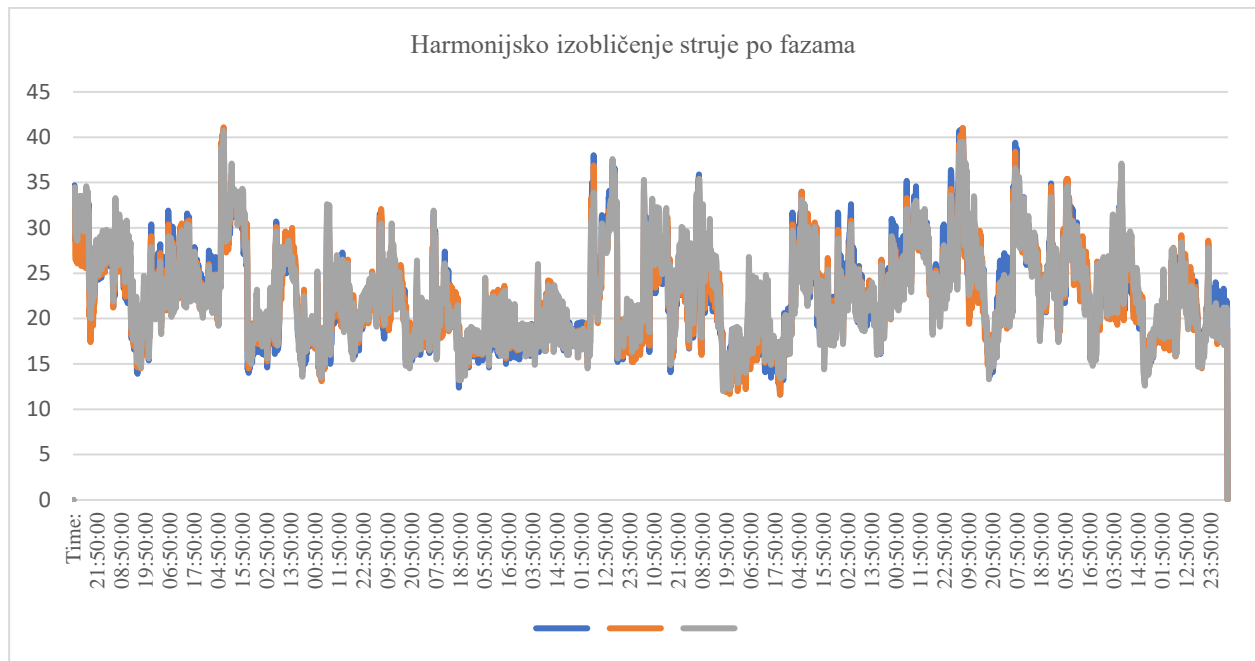
#### UVOD

Kvalitet električne energije je ključan faktor za stabilno i efikasno funkcionisanje modernih električnih sistema. Računarski centri, koji se oslanjaju na visoko osetljivu elektronsku opremu, posebno su podložni problemima uzrokovanim lošim kvalitetom električne energije. Ovaj rad istražuje problematiku viših harmonika struje u računarskom centru i predlaže rešenja za njihovo efikasno uklanjanje, upotrebom aktivnog harmonijskog filtera. Kvalitet električne energije se odnosi na skup parametara koji definišu stabilnost i pouzdanost napajanja. Standardi kao što su IEEE 519 i IEC 61000 pružaju smernice za prihvatljive nivoe harmonika, naponskih padova, prekida i drugih anomalija. Za krajnjeg potrošača, kvalitet električne energije utiče na rad i dugovečnost opreme, energetske gubitke i troškove održavanja. Računarski centri, koji se oslanjaju na visoko osetljivu elektronsku opremu, posebno su podložni problemima uzrokovanim lošim kvalitetom električne energije. Nestabilnosti u napajanju mogu dovesti do gubitka podataka, kvarova opreme i povećanih troškova održavanja. Viši harmonici mogu uzrokovati pregrevanje transformatora, smanjenu efikasnost sistema i skraćen vek trajanja opreme. Ovaj rad istražuje problematiku viših harmonika struje u računarskom centru i predlaže rešenja za njihovo efikasno uklanjanje, upotrebom aktivnog harmonijskog filtera.

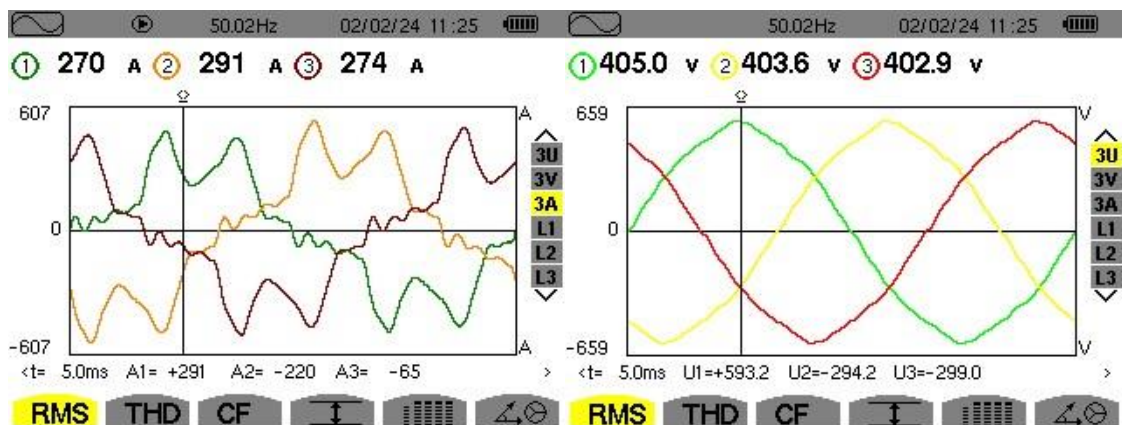


Merenje je izvršeno mrežnim analizatorima kvaliteta električne energije proizvođača Chauvin Arnoux, model C.A 8336. Inicijalna merenja su obavljena u periodu od sedam dana. Učestalost zapisa podataka merenja (vreme usrednjavanja mernih podataka) je podešeno na 10 minuta. Mereni su potrebni parametri električne energije radi određivanja kvaliteta električne energije.

U tački priključenja, harmonijsko izobličenje struje je značajno, što se može uočiti sa slike 2. Vrednost ukupnog harmonijskog izobličenja je između 10 i 40 % dok veće harmonijsko izobličenje odgovara periodima višeg opterećenja. Dominantnu vrednost imaju 3, 5, 7, 9. i 11. harmonik struje.



Slika 2 Harmonijsko izobličenje struje po fazama u MM1 tokom perioda merenja



Slika 3 Talasni oblik struje i napona u MM1 za jednu tačku tokom perioda merenja

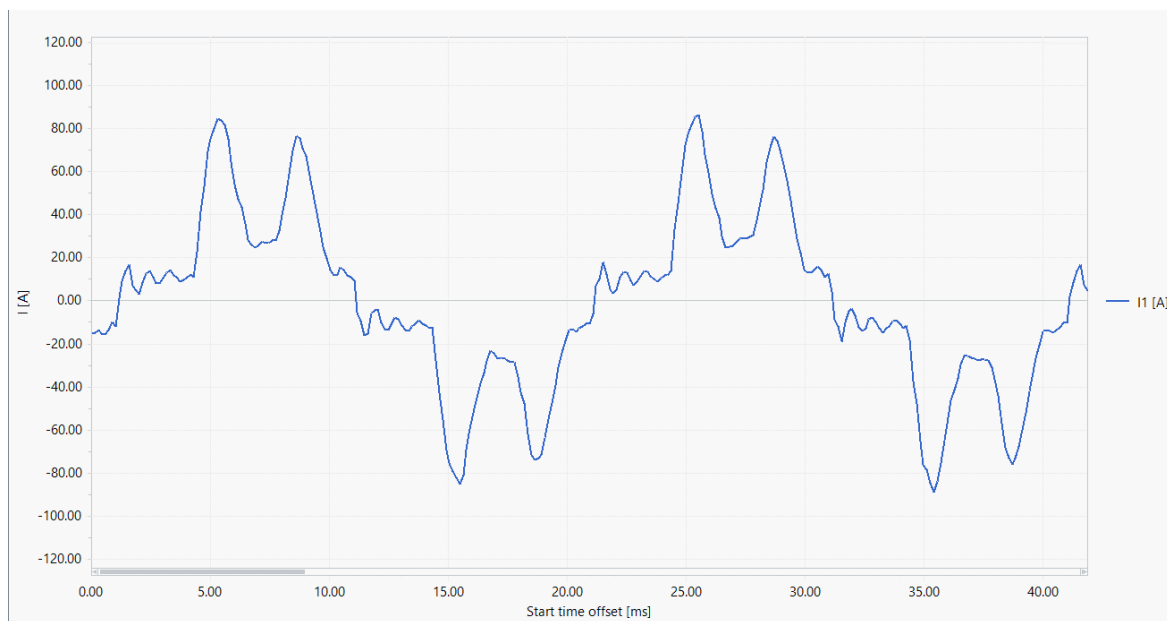
Iako standard EN 50160 ne postavlja jasno ograničenje za limit izobličenja struje, postoje dva aspekta koje je potrebno obraditi. Pre svega, prema standardima IEEE 519-2022 i 60364-5-523, gde kod prvog postoji preporuka za limitiranje harmonika struje za sisteme različitih naponskih nivoa s obzirom na struju kratkog spoja na mestu priključenja. Ovaj standard preporučuje izobličenja od 4 % do 15 % za harmonike od 2. do 11. (zavisno od odnosa struje kratkog spoja i opterećenja), svakako je potrebno analizirati mogućnost otklanjanja dominantnih harmonika. Izuzev toga, standard 60364-5-523 propisuje uticaj viših harmonika na strujnu nosivost kablova na niskom naponu. standard tretira izobličenje na trećem harmoniku veće od 15 % prema kojima je potrebno je usvojiti dodatne faktore redukcije nosivosti kablova.

Drugi aspekt analize izobličenja struje, predstavljaju negativne posledice na opremu i instrumente potrošača. Trenutne posledice kao uništenje kondenzatora u sistemu potrošača usled pojave rezonancije, neadekvatna prorada

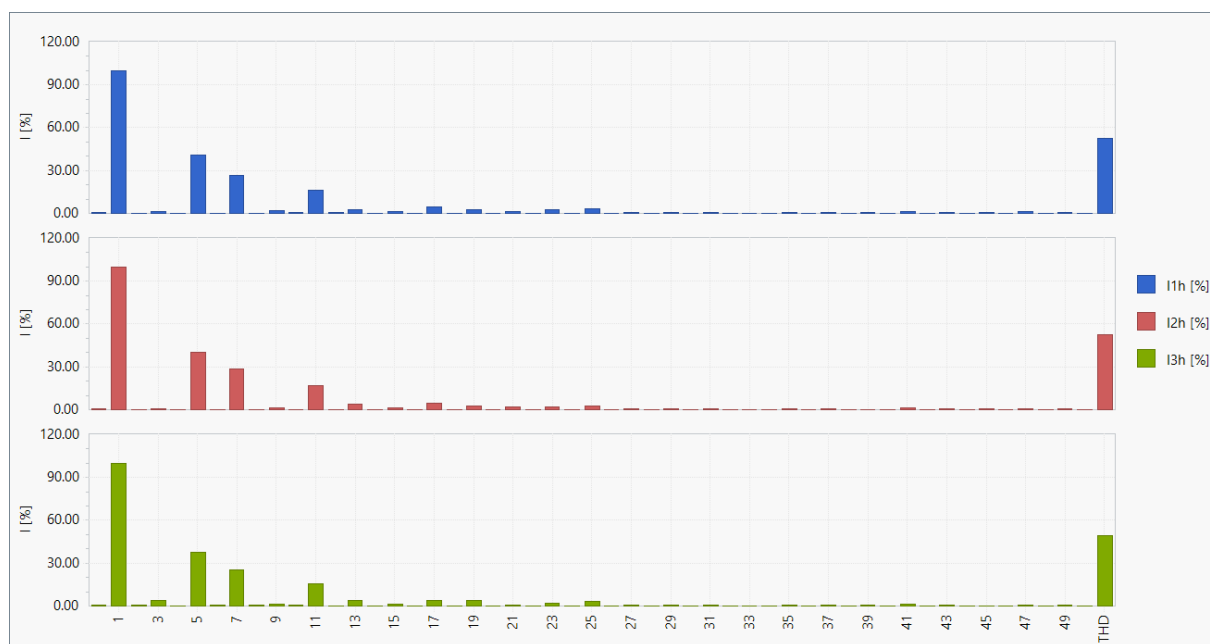
zaštitnih uređaja, smetlje u informacionim sistemima. Visok nivo harmonijskog izobličenja može značajno uticati na rad i dugovečnost električnih i elektronskih uređaja u računarskim centrima. Harmonici mogu uzrokovati pregrevanje transformatora, kablova, prekidača i osigurača, što dovodi do prevremenih kvarova i smanjenja radnog veka ovih uređaja. Direktno napajani motori, takođe su podložni kvarovima.

Merenje kvaliteta električne energije u mernim tačkama MM2, MM3, MM4 i MM5 vršena su sukcesivno, uređajem Metrel MI 2892. Za svaku mernu tačku, vršena merenja su trajala različiti vremenski period, dok su prikazani rezultati sa vremenskim odabiranjem 10 minuta. Svrha merenja kvaliteta u mernim tačkama MM2 – MM5 jeste da se ustanove uzroci parametara kvaliteta električne energije na sumarnom izvodu, kao i da se utvrdi prostiranje pojedinih parametara (poput harmonijskog izobličenja) unutar razvoda objekta. Merenja na MM1 paralelno su nastavljena.

Slika 5 predstavlja procentualne vrednosti pojedinačnih harmonika. Uočljivo izraženi 5, 7, 11 harmonik (THDi 50%) daju objašnjenje da se iz tačke MM4 napajaju šestopulsni pretvarači za potrebe zagrevanja/hlađenja prostorija firme. Slika 4 prikazuje talasni oblik stuje u prvoj fazi sa prisustvom viših harmonika.



Slika 4 Prikaz talasnog oblika stuje prve faze zabeležen 2.2.2024. u 12.00 časova MM4



Slika 5 Prikaz pojedinačnih harmonika u procentima zabeležen 2.2.2024. u 12.00 časova MM4

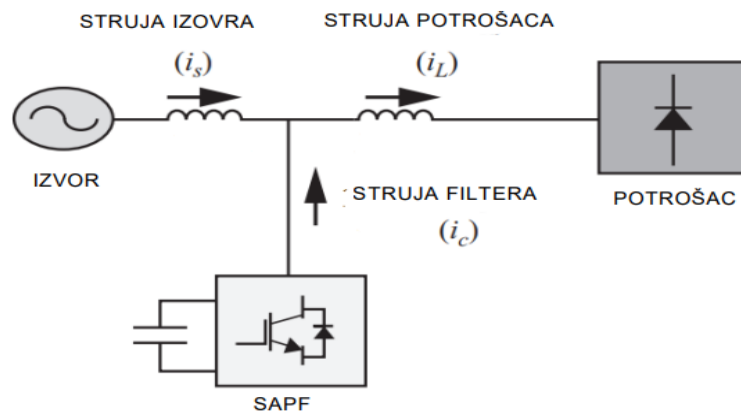
Vrednost izobličenja struje koja unutar objekta na mestima iznosi i više od 50 %, dok je u proseku oko 35 % za MM1, sa dominantnim harmonicima 5. i 7. redosleda. Ovi harmonici predstavljaju izvor gubitaka snage i mogu pospešiti degradaciju napojnih kablova, dok se njihovom propagacijom mogu očekivati i lošije naponske prilike unutar objekta.

S obzirom da su harmonici 5. i 7. redosleda iznad vrednosti dozvoljenih (preporučenih) standardom IEEE 519-2022 predlaže se upotreba aktivnih filtera serije PowerLogic AccuSine PCS+. Iako ugradnja filtera može biti izvedena centralizovano, veći efekat bi se postigao ukoliko bi se filteri ugrađivali u neposrednoj blizini razvodnih oramara razvoda unutar instalacije.

## PRIMENA KOMPENZACIJE

Kompezcija viših harmonika se u prošlosti vršila primenom pasivnih filtera. Pasivne komponente u aplikaciji korekcije izobličenja stuja ispoljavaju svoje nedostatke, projektuju se za unapred određene vrednosti harmonika, nije ih moguće usaglasiti sa naknadnim promenata konfiguracije sistema, postoji mogućnost nastanka rezonancije u interakciji sa drugim elemenrima u sistemu. Kako bi se kompezovali ovi nedostatici preporučuje se primena paralelnih (shunt) aktivnih harmonijskih filtera, SAPF.

Aktivni shunt filter, predstavlja uređaj, čiji su esencijalni delovi uređaji energetske elektronike, ispravljač i inverter povezani međukolom jednosmerne stuje. SAPF kontinualno meri struje, iz kojih se izdvajaju vrednosti struja viših harmonika i reaktivne energije, kako bi se u mrežu injektovale sa suprotnom fazom od 180°. Ekstakcija stuje viših harmonika, vrši se na dva načina, izdvajanjem vrednosti svakog harmonika zasebno primenom Furijeovih transformacija, ili punim spektrom za sve harmonike zajedno, uobičajeno primenom Klarkinih i Parkovih transformacija, primenjuje su i za izdvajanje vrednosti reaktivne energije.



Slika 6 Ilustracija primene aktivnog shunt filtera [7]

Odabir filtera vrši se na osnovu maksimalne struje kompezacije, koje su date kao tipske vrednosti. Potrebana veličina struje kompezacije može se dobiti: Primenom formule za efektivnu vrednost struje:  $I_{rms} = I_{h1} * \sqrt{1 + THDi^2}$ , primenom softvera: Etap, EasyPower, upotrebom odgovarajućih alata (excel tabele i sl.).

Za kompezaciju viših harmonika i reaktivne energije na MM4 odabran je Schneider Electric AccuSinePCS+ filter od 120A, za maksimalnu srednju (za tri faze) efektivnu vrednost struje koja iznosi: 129,17 A i maksimalnu srednju vrednost THDi koja iznosi: 83,29 %. Filter pruža mogućnost kompezacije harmonika i reaktivne energije istovremeno. Izbor moguće raspodele kapaciteta filtra za kompezaciju harmonika i reaktivne energije prikazan je u tabeli ispod. Za filter priključen na mestu MM4 optimalan je odnos 90% stuje harmonik i 44% reaktivna energija, čime su pokrivenne vrednosti maksimalnih stuja harmonika i reaktivne energije.

TABELA 1 - Raspodela opterećenja filtera

|                    |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Stuja harmonika    | 100% | 90% | 80% | 70% | 60% | 50% | 30% | 20% | 10% | 10% |
| Reaktivna energija | 0%   | 44% | 60% | 71% | 80% | 87% | 95% | 98% | 99% | 99% |

U tabeli 2. prikazane su efektivne vrednosti za svaki harmonik pojedinačno, totalno harmonijsko izobličenje u procentima i amperima, kao i efektivna vrednost struje pre kompezacije harmonika i reaktivne energije. U tabeli

su primetne dominantne vrednosti petog, sedmog, jedanaestog, trinaestog harmonika sa vrednostima od 14,72 A, 9,51 A, 5,86 A, 2,09 A, respektivno. Totalno izobličenje iznosi 52,5% osnovnog harmonika, odnosno 18,8 ampera.

TABELA 2 - Vrednosti harmonika pre kompezacije

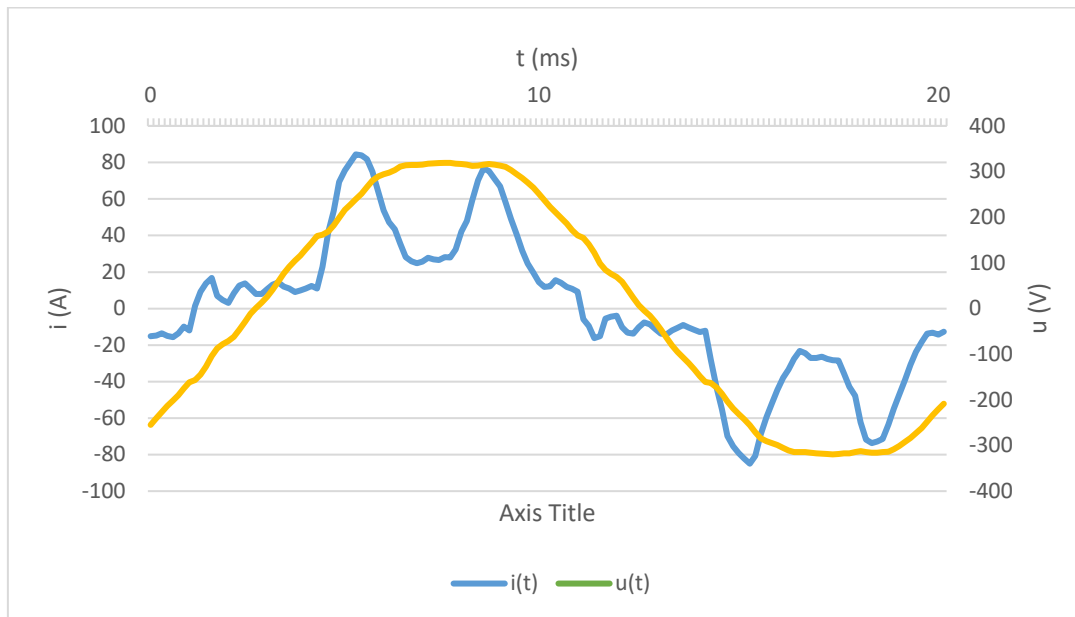
| Efektivne vrednosti harmonika pre kompezacije |          |        |          |        |          |        |          | THDi (%) | THDi (A) | Irms (A) |
|---|----------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|----------|----------|----------|
| Rd. br  | Irms (A) | Rd. br | Irms (A) | Rd. br | Irms (A) | Rd. br | Irms (A) | 52,5     | 18,8     | 40,45    |
| 1.  | 35.82    | 11.    | 5.86     | 21.    | 0.39     | 31.    | 0.26     |          |          |          |
| 2.  | 0.03     | 12.    | 0.13     | 22.    | 0.04     | 32.    | 0.06     |          |          |          |
| 3.  | 0.37     | 13.    | 2.09     | 23.    | 1.02     | 33.    | 0.09     |          |          |          |
| 4.  | 0.09     | 14.    | 0.07     | 24.    | 0.04     | 34.    | 0.10     |          |          |          |
| 5.  | 14.72    | 15.    | 0.36     | 25.    | 1.15     | 35.    | 0.23     |          |          |          |
| 6.  | 0.09     | 16.    | 0.02     | 26.    | 0.04     | 36.    | 0.03     |          |          |          |
| 7.  | 9.51     | 17.    | 1.68     | 27.    | 0.29     | 37.    | 0.12     |          |          |          |
| 8.  | 0.09     | 18.    | 0.04     | 28.    | 0.02     | 38.    | 0.08     |          |          |          |
| 9.  | 0.80     | 19.    | 0.98     | 29.    | 0.30     | 39.    | 0.15     |          |          |          |
| 10.   | 0.12     | 20.    | 0.03     | 30.    | 0.02     | 40.    | 0.06     |          |          |          |

TABELA 3 - predstavlja simulirane efektivne vrednosti nakon kompezacije harmonika i reaktivne energije. Dominantne vrednosti petog, sedmog, jedanaestog, trinaestog harmonika su kompezovane u odnosu na tabelu 2. Totalno harmonijsko izobličenje nakon kompezacije iznosi 6,2% osnovnog harmonika, odnosno 2,1 ampera. Takođe primenom kompezacije efektivna vrednost stuje je smanjena sa 40,45 na 34,15 ampera, za približno 14%.

Tabela 3 Vrednosti harmonika nakon kompezacije

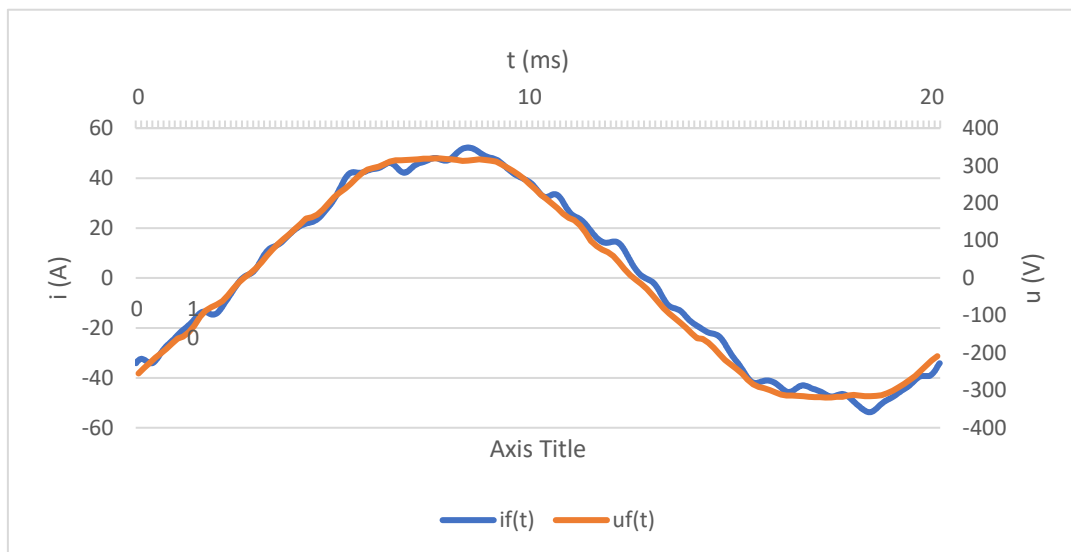
| Efektivne vrednosti harmonika nakon kompezacije |          |        |          |        |          |        |          | THDi (%) | THDi (A) | Irms (A) |
|---|----------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|----------|----------|----------|
| Rd. br  | Irms (A) | Rd. br | Irms (A) | Rd. br | Irms (A) | Rd. br | Irms (A) | 6,2      | 2,1      | 34,15    |
| 1.  | 34.080   | 11.    | 0.527    | 21.    | 0.463    | 31.    | 0.101    |          |          |          |
| 2.  | 0.036    | 12.    | 0.154    | 22.    | 0.048    | 32.    | 0.071    |          |          |          |
| 3.  | 0.035    | 13.    | 0.192    | 23.    | 0.206    | 33.    | 0.107    |          |          |          |
| 4.  | 0.107    | 14.    | 0.083    | 24.    | 0.048    | 34.    | 0.119    |          |          |          |
| 5.  | 0.883    | 15.    | 0.428    | 25.    | 0.392    | 35.    | 0.083    |          |          |          |
| 6.  | 0.107    | 16.    | 0.024    | 26.    | 0.048    | 36.    | 0.036    |          |          |          |
| 7.  | 1.141    | 17.    | 0.428    | 27.    | 0.345    | 37.    | 0.061    |          |          |          |
| 8.  | 0.107    | 18.    | 0.048    | 28.    | 0.024    | 38.    | 0.095    |          |          |          |
| 9.  | 0.950    | 19.    | 0.334    | 29.    | 0.087    | 39.    | 0.178    |          |          |          |
| 10.   | 0.143    | 20.    | 0.036    | 30.    | 0.024    | 40.    | 0.071    |          |          |          |

Grafik jedan prikazuje talasni oblik stuje i napona, zabeležen na kraju perioda merenja (slika 4). Na grafiku se vidi talasni oblik stuje za prisustvom viših harmonika, upečatljiva su dva pika karakteristična za frekventne pretvarače. Takođe stuja prednjači u odnosu na napon za 17°, zbog neadekvatne raspodele centralne kompezacije.



Grafik 1 Struja i napon pre primene aktivnog shunt filtera

Na grafiku 2 predstavljeni su simulirani talasni oblici struje i napona, nakon aktiviranja kompezacijskog filtera. Primitan je nedostatak karakterističnih pikova struje, usled kompezacije viših harmonika, takođe amplituda struje je smanjena sa približno 80 ampera na 50 ampera. Kompezacijom reaktivne energije, struja i napon su sada u fazi.



Grafik 2 Struja i napon nakon primene aktivnog shunt filtera

## ZAKLJUČAK

Analiza merenja u računarskom centru pokazala je uvećane vrednosti visokih harmonika struje, sa dominantnim vrednostima 3, 5, 7, 11. i 13. harmonika. Uzroci visokih harmonika su uglavnom nelinearna opterećenja kao što su uređaji za grejanje, ventilaciju i računski uređaji. Nelinearni potrošači generišu harmonike koji se prenose kroz mrežu i stvaraju probleme u kvalitetu električne energije.

Harmonici struje mogu izazvati niz problema, uključujući pregrevanje transformatora, smanjenu efikasnost sistema i skraćen vek trajanja opreme. Takođe, mogu uzrokovati povećane energetske gubitke i smanjiti pouzdanost sistema. Efikasno uklanjanje visokih harmonika može se postići korišćenjem aktivnih i pasivnih filtera. Aktivni shunt filteri, kao što je AccuSine PCS+, pokazali su se kao veoma efikasni u smanjenju visokih harmonika. Simulacijom primene aktivnog filtera na vrednosti struje zabeležene 2.2.2024. u 12.00 časova na tački merenja MM4, razvodnog ormara za napajanje uređaja za hlađenje i ventilaciju. Prikazano je smanjenje totalnog

harmonijskog izobličenja sa 52.5 % na prihvatljivih 6,2%, odnosno u amperima sa 18,8 na 2,1 amper. Primenom kompezacije reaktivne energije napon i stuja su u fazi, u odnosu na predhodnih 17° prednjačenja stuje u odnosu na napon. Primenom filtera efektivna vrednost stuje je smanjena sa 40,45 ampera na 34,15 ampera, za 14%.

## LITERATURA

- [1] V. Katić, A. Tokić, T. Konjić, Kvalitet električne energije, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2007.
- [2] V. Katić, Svetski standardi i kvalitet električne energije u Srbiji, Fakultet tehničkih nauka, XLV Konferencija za Etran, 2002.
- [3] Mietek Glinkowski, ABB Inc. Lynn Simmons, Dell David Loucks, Eaton Dusty Becker, Emerson Network Power Ian Bitterlin, Emerson Network Power Bill Campbell, Emerson Network Power Harry Handlin, GE Energy Management Pamela Lembke, IBM Tom Earp, Individual Member Darrin LeRoy, Individual Member Andrew Lynch, Individual Member Stephen McCluer, Schneider Electric Jim Spitaels, Schneider Electric, Data center power system harmonics: an overview of effects on data center efficiency and reliability
- [4] E. Battega, Jean Noël Fiorina, Active harmonic conditioners and unity power factor rectifiers, Cahier technique no. 183, 1999.
- [5] <https://www.nidec-netherlands.nl/media/2926-engineering-documentatie-a-guide-to-supply-harmonics-and-other-low-frequency-disturbances-iss6-0704-0002.pdf>
- [6] Ž. S. Janda, Pregled standarda i preporuka za kontrolu viših harmonika u električnim mrežama, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd, 2004.
- [7] N. Ćosić, Primjena aktivnog filtera snage (PQFS) u distribucijkoj mreži, Master rad, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, 2022.