

Utjecaj ASIC sklopovlja na kvalitetu električne energije u distribucijskoj mreži

Beretić, Mario

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:613976>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-29**

Repository / Repozitorij:

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



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

Sveučilišni studij

**UTJECAJ ASIC SKLOPOVLJA NA KVALITETU ELEKTRIČNE
ENERGIJE U DISTRIBUCIJSKOJ MREŽI**

Diplomski rad

Mario Beretić

Osijek, 2022.

SADRŽAJ

1.	ZADATAK DIPLOMSKOG RADA.....	1
2.	PREGLED PODRUČJA ISTRAŽIVANJA	1
3.	UVOD	1
4.	KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE.....	3
3.1.	Općenito o kvaliteti električne energije	3
3.2.	Norme	3
3.3.	Nadzor (Monitoring) kvalitete električne energije	5
3.4.	Izvori i utjecaj mjerenih parametara	5
3.4.1.	Kolebanje napona i treperenje napona	5
3.4.2.	Previsoki naponi i prenaponi	6
3.4.3.	Nesimetrija napona	6
5.	HARMONICI	9
4.1.	Općenito o harmonicima	9
4.2.	Strujni harmonici	9
4.2.	Filteri	10
6.	ASIC SKLOPOVLJE.....	12
5.1.	Što je ASIC sklopovlje	12
5.2.	Sklopno napajanje.....	13
7.	ANALIZA REZULTATA MJERENJA	15
6.1.	Mjerni instrument i metoda mjerenja	15
6.2.	Analiza rezultata mjerenja prvog tjedna	17
6.3.	Analiza rezultata mjerenja drugog tjedna	28
8.	MODELIRANJE MREŽE S UTJECajem VIŠIH HARMONIKA	35
7.1.	Odabir mreže	35
7.2.	Simulacija i analiza rezultata	36
7.2.1.	Slučaj 1.....	37
7.2.2.	Slučaj 2.....	38
7.2.3.	Slučaj 3.....	41
7.2.4.	Slučaj 4.....	43
7.2.5.	Usporedba rezultata.....	45
9.	ZAKLJUČAK	46

1. ZADATAK DIPLOMSKOG RADA

Opisati ASIC sklopovlje i njegovu glavnu ulogu. Teoretski obraditi mogući utjecaj ASIC sklopovlja na kvalitetu električne energije te napraviti pregled suvremene literature spomenute problematike. Izvršiti mjerenje kvalitete električne energije ASIC hardvera te analizirati rezultate mjerenja, s naglaskom na više harmonike. Pomoću suvremenog programskog paketa modelirati utjecaj viših harmonika na niskonaponsku elektrodistribucijsku mrežu. Pratiti pokazatelje kvalitete električne energije na PCC čvoru NN mreže.

2. PREGLED PODRUČJA ISTRAŽIVANJA

U ovom radu proučavan je utjecaj trošila na kvalitetu električne energije i na utjecaj viših harmonika u mreži. Literatura [1] i [2] su osnovne literature za upoznavanje i proučavanje područja kvalitete električne energije. Prilikom analize mjerenja parametri kvalitete električne energije strogo su propisani normama koje su navedene u literaturi [3]. Literatura [4] služi kao uvod za problematiku viših harmonika, dok literature [5] i [6] pružaju rješenje problematike harmonika kroz aktivne, pasivne i hibridne filtre. Literatura [7] pruža podatke korištenog ASIC uređaja koji su potrebni pri analizi mjerenja kvalitete električne energije. Dio zadatka je i pretpostaviti što bi se moglo dogoditi u mreži ukoliko se spoji ASIC uređaj i njemu odgovarajuće sklopno napajanje. Najbolji opis takve situacije nalazi se u literaturi [8]. Podaci sklopnog napajanja koje se koristilo u radu nalaze se u literaturi [9], dok je u literaturi [10] opisan softver i adekvatan način spajanja mrežnog analizatora kao bi se pravilno izvršilo mjerenje. U literaturi [11] opisan je jedan primjer analize mjerenja električne energije koji pokazuje na koji način je potrebno izvršiti mjerenje i na što treba obratiti pažnju.

3. UVOD

U elektroenergetskom sustavu svakim danom povećava se broj potrošača u mreži. Većina tih novih potrošača su uređaji koji su sklopljeni od dijelova poput ispravljača, izmjenjivača, mikroprocesora i sl. Baš takva trošila imaju najveći utjecaj na kvalitetu električne energije.

Primjer takvog trošila je ASIC sklopovlje koji se koristi za rudarenje Bitcoina. Odrađeno je mjerenje svih parametara koji su bitni za kvalitetu električne energije. Mjerenje se provodilo u zgradi FERIT-a u Osijeku.

Obavljena je i analiza rezultata s naglaskom na više harmonike koja je potrebna za modeliranje jednog takvog potrošača u jednom od suvremenih programskih paketa. Takvi potrošači su priključeni na distribucijsku mrežu kako bi se mogao modelirati utjecaj viših harmonika na mrežu i kako bi se mogli pratiti pokazatelji električne energije na PCC čvoru.

4. KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE

3.1. Općenito o kvaliteti električne energije

Kvaliteta električne energije se prije poistovjećivala sa stalnim i neprekinutim napajanjem krajnjeg potrošača električnom energijom. Odnosno, ukoliko se dogodio relativno mali broj prekida u nekim vremenskim intervalima može se reći da je kvaliteta električne energije dobra. Danas i uz neprekinuto napajanje nije nemoguće da potrošač ima velikih problema pri korištenju opreme. Najčešći razlog tomu je povećan broj aparata koji koriste opremu čiji se rad zasniva na mikroprocesorima i logičkim sklopovima. To se događa jer mikroprocesori imaju nelinearnu strujno-naponsku karakteristiku. Takvim uređajima za rad je potrebna dobra kvaliteta električne energije, dok je s druge strane radom mikroprocesora i ostalih logičkih sklopova jako kvare. Neki od takvih uređaja su pogoni s podesivom brzinom, sklopni izvori napajanja i lučne peći.[1] Kvaliteta električne energije sama po sebi nema jednu konkretnu definiciju, ali možemo reći da je to stanje elektroenergetskog sustava u kojem isporučena električna energija i njeno korištenje omogućavaju normalan i siguran rad opreme korisnika. [2]

3.2. Norme

Danas se električna energija tretira kao i svaka druga roba na tržištu, stoga je kvaliteta električne energije strogo definirana normama. Za pojednostavljenje pojma kvaliteta električne energije koristi se pristup elektromagnetske kompatibilnosti, koji određuje uvjete rada električnih uređaja.[2] Za parametre elektromagnetske kompatibilnosti primjenjuju se različite norme što isto vrijedi i za parametre kvalitete električne energije. Norme koje definiraju EMC su: IEEE (međunarodna), IEC (međunarodna) i EN (europska). Sukladno tome propisane norme za definiranje kvalitete električne energije su: IEEE 1159-2014 (norme za Amerika), EN 50160 – 2010 (Europa) i IEC 61000-4-30-2015 (Međunarodna norma). Navedene norme opisuju razinu elektromagnetskih smetnji na koje je oprema imuna i razinu smetnji koje potrošač može generirati, te razinu elektromagnetske kompatibilnosti.

Za normu EN 50160 zadani parametri i njihove propisane granice zadane su u tablicama 2.1. i 2.2.

Tablica 2.1. Propisani parametri i njihove granične vrijednosti za normu EN 50160 [3]

Parametar	Osnovna veličina	Vrijeme usrednjavanja	Promatrano razdoblje	Granične vrijednosti
Frekvencija	Prosječna vrijednost	10 s	1 godina	$\pm 1 \%$ u 99,5 % perioda + 4 % / - 6 % u 100 % perioda
Kolebanje napona u NN mreži	Efektivna vrijednost	10 min	1 tjedan	$\pm 10 \%$ u 95 % perioda + 10 % / - 15 % u 100 % perioda
Treperenje (Flicker)	Izračunata vrijednost	$P_{lt} - 120\text{min}$ $P_{st} - 10\text{min}$	1 tjedan	95 % vrijednosti P_{lt} mora biti < 1
THD	Efektivna vrijednost	10 min	1 tjedan	$< 8 \%$
Nesimetričnost	Efektivna vrijednost	10 min	1 tjedan	$< 2 \%$
Viši harmonici	Efektivna vrijednost	10 min	1 tjedan	Tablica 2.2.

Tablica 2.2. Granične vrijednosti viših harmonika prema normi EN 50160 [3]

Neparni harmonici – višekratnici trećeg harmonika	
Redni broj harmonika	Granična vrijednost (U_h (%))
3	5 %
9	1,5 %
15	0,5 %
21	0,5 %
Neparni harmonici – nisu višekratnici trećeg harmonika	
Redni broj harmonika	Granična vrijednost (U_h (%))
5	6 %
7	5 %
11	3,5 %
13	3 %
17	2 %
19	1,5 %
23	1,5 %
25	1,5 %
Parni harmonici	
Redni broj harmonika	Granična vrijednost (U_h (%))
2	2 %
4	1 %
6 do 24	0,5 %

3.3. Nadzor (Monitoring) kvalitete električne energije

Nadziranje kvalitete električne energije je proces prikupljanja, analiziranja i tumačenje sirovih podataka u korisne informacije. Nadzor kvalitete električne energije je neophodan za označavanje elektromagnetskih pojava na određenim lokacijama mreže, odnosno na određenim točkama u mreži. [2] U nekim slučajevima monitoring služi kako bi se utvrdila nekompatibilnost između izvora i potrošnje električne energije, ponekad se nadzor koristi za procjenu električnog okruženja na određenoj lokaciji u mreži, a može se koristiti i za predviđanje ponašanja kasnije priključene opreme. Najopsežniji pristup nadziranja kvalitete električne energije jest trajno instalirani sustav s automatskim prikupljanjem informacija o parametrima kvalitete električne energije u stacionarnom stanju, kao i prikupljanje podataka o smetnjama.

3.4. Izvori i utjecaj mjerenih parametara

3.4.1. Kolebanje napona i treperenje napona

Napon u mreži konstantno se mijenja zbog uklapanja i isklapanja električne opreme. Te promjene mogu biti brze i spore. Brze se nazivaju flikeri, a spore kolebanje napona, a razina naponske promjene ovisi o impedanciji mreže. Uglavnom naponsko kolebanje je manje od 10% nazivnog napona, većina uređaja na takve manje naponske promjene nije osjetljiva.

Treperenje napona odnosno fliker je vidom primjetno prekidanje izazvano svjetlosnim podražajem s vremenskim kolebanjem svjetlosne gustoće ili spektralne razdiobe. Flikeri su posljedice naponskih kolebanja i utječu na rasvjetu.

Definiraju se na sljedeći način: ako u prostoriji pod jednakim uvjetima boravi 100 ljudi i 50 od 100 ljudi opazi promjenu intenziteta svjetla kažemo da treperenje ima intenzitet 1. Razlikuju se dugotrajni i kratkotrajni flikeri. Kratkotrajni flikeri mjere se unutar jednog desetominutnog intervala te su oni osnovni parametar mjerenog treperenja, dok su dugotrajni flikeri računaju na temelju 12 uzastopnih vrijednosti kratkotrajnih flikera prema formuli [2]:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}}{12}} \quad (2-1)$$

3.4.2. Previsoki naponi i prenaponi

Previsoki naponi su mrežni događaji kada je gornja granična vrijednost napona prekoračena. Ovisno o nastanku mogu se podijeliti na tri vrste: prolazni, sklopni i atmosferski. Uzorci prolaznih previsokih napona mogu biti: proboj izolacije između faze i zemlje, prekid neutralnog vodiča, kvarovi i greške na regulaciji generatora i transformatora, prekompenzacija jalove snage.

Zbog brzih promjena u strukturi mreže dolazi do povećanja sklopnih previsokih napona, a razlikuju se: sklopni prenaponi pri normalnom opterećenju, previsoki naponi nastali uklapanjem i isklapanjem malih induktivnih struja i oni previsoki naponi koji su nastali sklapanjem kapacitivnih krugova.

Previsoki atmosferski naponi mogu se javiti prilikom udara munje koji može biti izravan ili neizravan.

Posljedice previsokih napona su: proboj dielektrika, propadanje opreme tijekom vremena, dugotrajni naponski prekidi izazvanim uništenjem opreme, poremećaji u upravljačkim i komunikacijskim sustavima, mogućnost požara izazvan munjom ili sklopnim prenaponima.

3.4.3. Nesimetrija napona

To je stanje u višefaznom sustavu kod kojeg su efektivne vrijednosti linijskih napona ili fazni kutovi između linijskih napona različiti, a uglavnom se izražava kao omjer inverzne i direktne komponente. Pošto nam je za analizu moguće smetnje aparata bitna samo inverzna komponenta normom su propisane samo vrijednosti inverzne komponente. Istodobno analiziramo fazne kutove i amplitude faza.

Izvori naponske nesimetrije su većinom jednofazni potrošači, ali do nesimetrije napona dolazi i zbog dvofaznih opterećenja. U mrežama niskog napona jednofazna opterećenja spojena su na fazu i nulu pa se distribuiraju podjednako na sve tri faze. S druge strane, u srednjenaponskim i visokonaponskim mrežama takvi tereti se spajaju ili preko faze i nule ili preko dvije faze. Izvori nesimetrije dijele se u dvije grupe, prva grupe izvora nesimetrije odnosi se na pasive distributivne mreže, dok druga grupa izvora nesimetrije se odnosi na aktivne distributivne mreže s velikom integracijom distribuirane proizvodnje:

- Nejednoliko raspoređeni jednofazni kupci - prilikom izgradnje niskonaponskog izvoda, operatori pokušavaju priključiti isti broj kupaca na svaku fazu jer pri nepravilnom raspoređivanju može nastati nesimetrija napona.

- Promjenjivo opterećenje kupca – trenutno opterećenje kupca ovisi o vremenu, meteorološkim uvjetima i sl. Nesimetrično opterećenje je izraženije kod onih izvoda koji imaju manji broj kupaca u odnosu na one izvode s većim brojem kupaca.
- Propagacija nesimetrije iz nadređene mreže – propagira se preko namota transformatora
- Nesimetrija impedancija elemenata mreže – ukoliko postoje nesimetrične impedancije elemenata (transformatori, nadzemni vodovi, kabeli) može doći do dodatne pojave nesimetrije napona u toj mreži
- Velike varijacije potrošnje uzrokovane distribuiranom proizvodnjom – zbog velikog udjela integrirane distributivne proizvodnje mogu se javiti vrlo velike promjene opterećenja zbog neistovremene proizvodnje i potrošnje električne energije. U odnosu na klasične potrošače izvori distributivne proizvodnje imaju veću nazivnu struju i duže trajanje rada što dodatno rezultira još većom nesimetrijom.
- Različite tehnologije distribuirane proizvodnje po pojedinoj fazi – zbog različitih karakteristika povećavanjem ili smanjivanjem opterećenja kroz dan možemo povećati ili smanjiti nesimetriju napona u mreži.

Nesimetrija ima različite utjecaje na pogon niskonaponske mreže, a razlikujemo:

- Neučinkovito korištenje opreme – može doći do preopterećenja jednog dijela opreme, dok je preostali dio opreme nedovoljno iskorišten. Tada je moguće zamijeniti preopterećeni dio opreme s opremom veće prijenosne moći, ali ta oprema će u ostalim fazama ostati neučinkovito iskorištena.
- Veće struje kroz neutralni vodič – neutralni vodič je glavni put za povratnu pogonsku struju. Ako je ta struja nastala uslijed nesimetričnog opterećenja ovo rezultira preopterećenjem voda.
- Veće struje kroz zemlju – velike povratne struje rezultiraju zatvaranje velikih struja kroz zemlju, a iznos te struje ovisi o impedanciji neutralnog vodiča i o impedanciji uzemljenja. To može izazvati probleme na rad telekomunikacijskih sustava.
- Veći gubici – gubici transformatora, kabela i nadzemnih vodova ovise o kvadratu struje svih faza. Tada, ako postoji nesimetrično opterećenje, dio struje će teći i neutralnim vodičem, a upravo zbog toga će se povećati i ukupni gubici snage u mreži. Povećanje gubitaka utječe na povećanje troškova opskrbe kupca za jednaku količinu energije, kao i na skraćivanja životnog vijeka nekih elemenata uslijed povećanog termičkog naprezanja.

- Fazno pomicanje nultočke sustava – pojavljuje se ako postoji tok struje kroz neutralni vodič. Ovo rezultira sniženjem napona jedne faze i povišenjem napona preostale dvije faze i obratno. Posljedica je što opskrbni napon može ispasti iz propisanih granica
- Ispad faznih napona izvan propisanih granica – premali fazni napon je rezultat velikog pada napona koji je nastao zbog velikog opterećenja. Isto vrijedi i za previsoki napon.
- Poteškoće u regulaciji napona – zbog razlike faznih napona koje su nastale zbog nesimetričnog opterećenja imamo i poteškoće sa regulacijom napona.
- Propagacija nesimetrije – ukoliko ima dva ili više izvoda na istoj trafostanici, naponska nesimetrija jednog izvoda moći će se primijetiti i na drugom izvodu. Strujna nesimetrija propagira se preko transformatora u nadređenu mrežu, a ovisno o vrsti spoja namota transformatora propagiraju se samo neke komponente.
- Utjecaj na rad trofaznih uređaja – nesimetrija utječe na rad trofaznih uređaja poput rotacijskih strojeva i sklopovlja energetske elektronike.

Kod pokretanja asinkronog stroja, koji je nesimetrično napajan, poteći će struja s puno većim stupnjem nesimetrije nego kod naponskog izvora. Posljedica pokretanja na ovakav način dolazi do pregrijavanje faza i ubrzanog starenja opreme, a moguće je da dođe i do uništenja motora. Zato je motore velikih snaga potrebno zaštititi. Trofazni ispravljači – ukoliko se napaja ispravljač nesimetričnim naponom na istosmjernoj strani pojavljuje se valovita komponenta struje, a na izmjeničnoj strani stvaraju se viši harmonici.

Trofazni izmjenjivači – nesimetričnim napajanjem na izmjeničnoj strani pojavljuju se parni harmonici, ali ukoliko je prisutna nesimetrija napona na izmjeničnoj strani pojaviti će se i 3. harmonik koji utječe na ubrzano starenje komponente.

5. HARMONICI

4.1. Općenito o harmonicima

Zbog različitih trošila valni oblici struja i napona nisu idealne sinusoide već dolazi do izobličenja valnih oblika istih. Takva odstupanja se nazivaju harmonici, koji predstavljaju sinusoide čije su frekvencije višekratnici osnovne frekvencije. Za određivanje izobličenja signala koristi se koeficijent ukupnog harmonijskog izobličenja (eng. Total Harmonic Distortion). Ukupno harmonijsko izobličenje računa se prema formuli [4]:

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} (U_h)^2} \quad (3-1)$$

Postoje strujni i naponski harmonici, kao i strujni odnosno naponski koeficijent ukupnog harmonijskog izobličenja. Postoje još i međuharmonici koji predstavljaju sinusne komponente čije su frekvencije necjelobrojni višekratnici osnovne frekvencije, većinom nastaju zbog promjena snaga u sustavu. Osim što mijenjaju valni oblik napona, harmonici mogu uzrokovati pregrijavanje kućnih instalacija ili pregrijavanje transformatora. [4]

4.2. Strujni harmonici

Najveći, a često i najčešći problem kvalitete električne energije su strujni harmonici jer su naponski harmonici i problemi s distribucijskom opremom rezultat strujnih harmonika. Kada se čisti sinusni val napona primjenjuje na određenu vrstu opterećenja, ukoliko je oblik vala struje opterećenja jednak ili sličan valnom obliku napona tada se radi o linearnom opterećenju. Nasuprot tome neka opterećenja uzrokuju promjenu struje nerazmjerno s promjenom napona za svaku poluperiodu. Njih nazivamo nelinearna opterećenja i oni su izvor strujnih harmonika. Izvore harmoničnog izobličenja možemo podijeliti na tri dijela:

- Struje viših harmonika koje su injektirane u mrežu zbog industrijskih trošila. Konkretno to su trošila s energetsom elektronikom, trošila s električnim lukom i rasvjeta
- Struje viših harmonika koje dolaze iz uslužnog sektora. Najčešće ih se povezuju zbog povećane instalacije računalne opreme.
- Struje viših harmonika injektirane u distributivnu mrežu koje dolaze zbog opreme u kućanstvima. Tu se ubrajaju trošila s pretvaračima i trošila sa sklopnim napajanjem.

Važno je i napomenuti da se zbog nesinusoidalnog oblika struje javljaju mnogi problemi sa snagom u mreži, a najčešći su niska energetska učinkovitost, mali faktor snage i elektromagnetske smetnje. [4]

Definicija THD-a je omjer efektivne vrijednosti svih viših harmonika i efektivne vrijednosti nultog harmonika, odnosno signala osnovne frekvencije. Napon mreže je gotovo uvijek isti dok je struja promjenjiva pa nam strujni THD ne daje realnu sliku. Na primjer, u nekom trenutku možemo imati malu struju koja je jako izobličena te se računanjem dobije veliki postotak THD-a, no zbog male amplitude struje nećemo imati nikakav utjecaj na mrežu. Zbog toga se obraća pažnju na drugi parametar koji se naziva TDD (engl. Total Demand Distortion). [2] TDD i THD su vrlo slični, a razlika je u tome što je TDD omjer efektivnih vrijednosti svih viših harmonika i najviše zabilježene vrijednosti struje osnovne frekvencije u nekom desetominutnom intervalu. Na ovaj način eliminira se mogućnost pogrešne interpretacije. Računa se prema formuli [4]:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h>2}^{h_{max}} I_h^2}}{I_L} \quad (3-2)$$

4.2. Filteri

Kako bi se utjecaj harmonika što više smanji ili potpuno poništio počeli su se razvijati filteri. Najefikasniji način smanjenja harmonika je ugradnja filtera na mjestu gdje nastaju viši harmonici. Najčešće je to u potrošačkim postrojenjima u kojima se nalaze sklopovi energetske elektronike ili neki drugi izvori viših harmonika [4]. Razlikujemo pasivne, aktivne i hibridne filtere.

Pasivni filteri su titrajni serijski krugovi kondenzatora i prigušnice, a na sabirnicu se spajaju paralelno s ostalim potrošačima. Problem pasivnih filtera je u tome da se za svaki harmonik treba ugraditi jedan poseban filter. Zbog toga pasivni filteri se najčešće ugrađuju do 13. harmonika, a rijetko i do 25. harmonika. Stoga osim smanjenja strujnih viših harmonika pasivni filteri imaju i mogućnost kompenzacije jalove snage.

S druge strane ne mogu se koristiti kada se harmonijske komponente nasumično razlikuju i samim time što je za svaki harmonik potreban poseban filter oni su velikih dimenzija. Također frekvencija ugađanja im je manje točna te zahtijeva puno izračuna, a i zaštita od preopterećenja je teško izvediva. Zbog svega navedenog više se koriste su aktivni filteri. [5]

Zbog nezadovoljavajuće primjene pasivnih filtera nastali su aktivni filteri. Za razliku od pasivnih filtera, aktivni filteri rade na principu mjerenja intenziteta viših harmonika te generiraju jednake ali suprotne harmonike i šalju ih u mrežu. Na taj način mogu se smanjiti ili potpuno ukloniti strujna i naponska izobličenja neovisno o njihovoj promjenjivosti. Kao i pasivni filteri, priključuju se paralelno na sabirnicu s ostalim potrošačima i imaju mogućnost upravljati jalovom snagom. Još neke od prednosti su što su malih dimenzija, te im je frekvencija ugađanja jednostavna i precizna. S obzirom da rade na principu mjerenja intenziteta harmonika moraju biti opremljeni mjernim uređajem koji ima tu mogućnost. Zbog toga su znatno skuplji od pasivnih filtera, a postoji i mogućnost generiranja međuharmonika zbog komponenata energetske elektronike. [5]

Postoje još i hibridni filteri koji su kombinacija aktivnih i pasivnih filtera. Njihova najveća prednost je što mogu eliminirati i naponske i strujne harmonike.

6. ASIC SKLOPOVLJE

5.1. Što je ASIC sklopovlje

ASIC je čip integriranog kruga koji je napravljen za određenu svrhu što znači da je svaki ASIC uređaj odnosno sklopovlje za rudarenje određene kriptovalute. ASIC uređaji ne služe samo za materijalnu dobit. Oni omogućavaju sigurnost i daljnji napredak blockchain infrastrukture. Razvoj i proizvodnja ASIC uređaja zadnjih godina naglo raste jer obavljaju posao rudarenja brže od moćnih računala. Iako je velika većina kriptovaluta zamišljena da se rudari preko stolnih ili prijenosnih računala ASIC uređaj je nadmašio prethodno korištene grafičke kartice zbog većeg računalnog kapaciteta i zbog smanjenja potrošnje električne energije. Najviše su došli do izražaja 2013. godine, tada su ostali uređaji za rudarenje usporili svoj rad što je omogućilo ASIC uređajima da zadrže i povećaju svoju prednost na tržištu.

Rade tako da izvide složene proračune poznatije kao hashovi. Svaki hash ima šansu za pronalazak kriptovalute pa sukladno tome što je veći broj hashova u određenom vremenu to je veća šansa da ćemo zaraditi ili da ćemo više zaraditi. Gotovo sve kriptovalute funkcioniraju na tehnologiji zvanoj blockchain. Prvi uređaj za rudarenje koji nađe rješenje može autorizirati transakciju ili dodati Bitcoin u jedan blok na blockchainu. Krajnja nagrada uključuje sve transakcijske naknade u tom bloku, što motivira rudare da prikupe što više transakcija u taj blok kako bi maksimizirali svoju zaradu. Rudarenje kriptovaluta je postalo eksponencijalno teže danas jer postoji jako veliki broj ljudi i tvrtki koje rudare pa se i potreba za ASIC uređajima povećala. Budući da svaka kriptovaluta ima svoj hash algoritam, ASIC uređaj može rješavati samo taj jedan algoritam, odnosno rudari samo jednu kriptovalutu, no ukoliko se i neka druga kriptovaluta temelji na istom algoritmu moguće je prebaciti se i rudariti nju. Međutim to je vrlo složen i kompliciran proces, stoga se u stvarnosti ljudi koji investiraju u ASIC sklopovlja koja su dizajnirani za rudarenje Bitcoina rudare isključivo tu specifičnu kriptovalutu. Za razliku od rudarenja pomoću grafičkih kartica, ASIC uređaji su mnogo glasniji i proizvode više topline. Prednosti ovog načina rudarenja su:

- Jednostavno postavljanje
- Visoka učinkovitost
- Relativno visoka zarada – zbog same snage uređaja gotovo je sigurno da će prednost na tržištu biti ostvarena, a samim time i zarada bi bila brža nego drugačijom vrstom rudarenja

- Niska potrošnja energije – ako bi ih usporedili s drugim načinima rudarenja, ASIC uređaji su dizajnirani tako da troše manje električne energije u odnosu na njihovu računalnu snagu

ASIC uređaji su najviše došli do izražaja kroz kinesku kompaniju Bitmain, s linijom ASIC uređaja pod nazivom Antminer. Serija je pokrenuta 2013. godine, a prvi od niza ASIC sklopovlja je Antminer S1. Jedan od tih uređaja bio je Antminer S9, proizveden 2016. godine, i tada bio je vodeći uređaj za rudarenje. Trenutno najnovija serija je S19, S19 pro i T19.

Korišteni uređaj za ovaj rad je Antminer S9j koji je pušten je u prodaju 31.7.2018. godine. [7] Svoj kompaktan dizajn naslijedio je od svog prethodnika S7. Iako su gotovo jednake veličine Antminer S9j ima tri puta veću snagu. Svaki od tih uređaja koriste 189 čipova za isporuku većeg hashrate i učinkovitosti, što je tada bilo veće od bilo kojeg Bitcoin uređaja za rudarenje ikad napravljenog. Podržava Gigabit Ethernet kako bi se osiguralo trenutno prihvaćanje izrudarenih blokova. Koristi i kombinaciju vodljivog i konvencijskog hlađenja kako bi se manje zagrijavao od svakog njegovog prethodnika. Svaki zaseban čip je opremljen hladnjakom, koji je kao i kućište izgrađeno od visokokvalitetnih aluminijskih legura. Sastavni dio ovog ASIC uređaja su i dva ventilatora velikih brzina na obje strane uređaja kako bi se omogućila brza izmjena zraka.[7]

Nazivna snaga ovog ASIC sklopovlja je 1350 W, dok može raditi na naponu od 11.6 V do 13 V. Normalno može raditi na temperaturama od 0° C do 40° C, pri čemu je temperatura čipova na 95° C. Antminer S9j prilikom svog normalnog rada proizvodi buku u iznosu od 76 dB. [7]

5.2. Sklopno napajanje

Sklopno napajanje (eng. Switching power supply, odnosno skraćeno SPS) je vrsta napajanja s drugačijom metodologijom od linearnih napajanja i rješava najvažnije probleme standardnih linearnih napajanja kao što su smanjenje veličine transformatora i regulacija napona. Ulazni napon se ne smanjuje, već se ispravlja i filtrira, te kao takav prolazi kroz čoper. Čoper taj signal pretvori u niz visokofrekventnih impulsa, a prije izlaza napona on se još jednom filtrira i ispravlja. Potreba za SPS-om je nastala jer su manji, učinkovitiji i sposobni podnijeti veliku snagu. Linearna napajanja su i dalje zastupljena, ali u manjem broju zato što se koriste u specifičnim industrijskim i medicinskim svrhama, najčešće zbog niske buke. [8]

Za ova mjerenja korišten je SPS APW3+-12-1600. Ovaj SPS ima visoku učinkovitost i dobre dinamičke karakteristike, a vrlo je pogodan za uređaje od 12 V jer ima zaštitu od opterećenja, pregrijavanja, struja kratkog spoja i preniskih napona. Nazivna snaga ovog napajanja je 1600 W i pri maksimalnom opterećenju faktor snage je veći od 0.95. Može raditi na naponima od 176 V do 264 V pri frekvenciji od 47 Hz do 63 Hz, i to na temperaturama od -20 °C do 60° C. [9]

Zbog samih sklopova energetske elektronike čije su preklopne karakteristike izrazito nelinearne jasno je da je SPS ima veliki utjecaj na harmonike, odnosno na kvalitetu električne energije. Najveći problem je kada se SPS isključi na visokoj frekvenciji jer tada dolazi do pojave viših harmonika koje proizvode elektromagnetske smetnje, a samim time se smanjuju stabilnost i pouzdanost cjelokupnog sustava. Za suzbijanje viših harmonika postoje dvije metode, jedna koristi pasivan, a druga aktivni filter. U teoriji aktivni filter je mnogo bolji, ali u praksi je situacija nešto drugačija. Pri korištenju aktivnog filtera postoje problemi detekcije i pomaka harmonijskog sadržaja. [8]

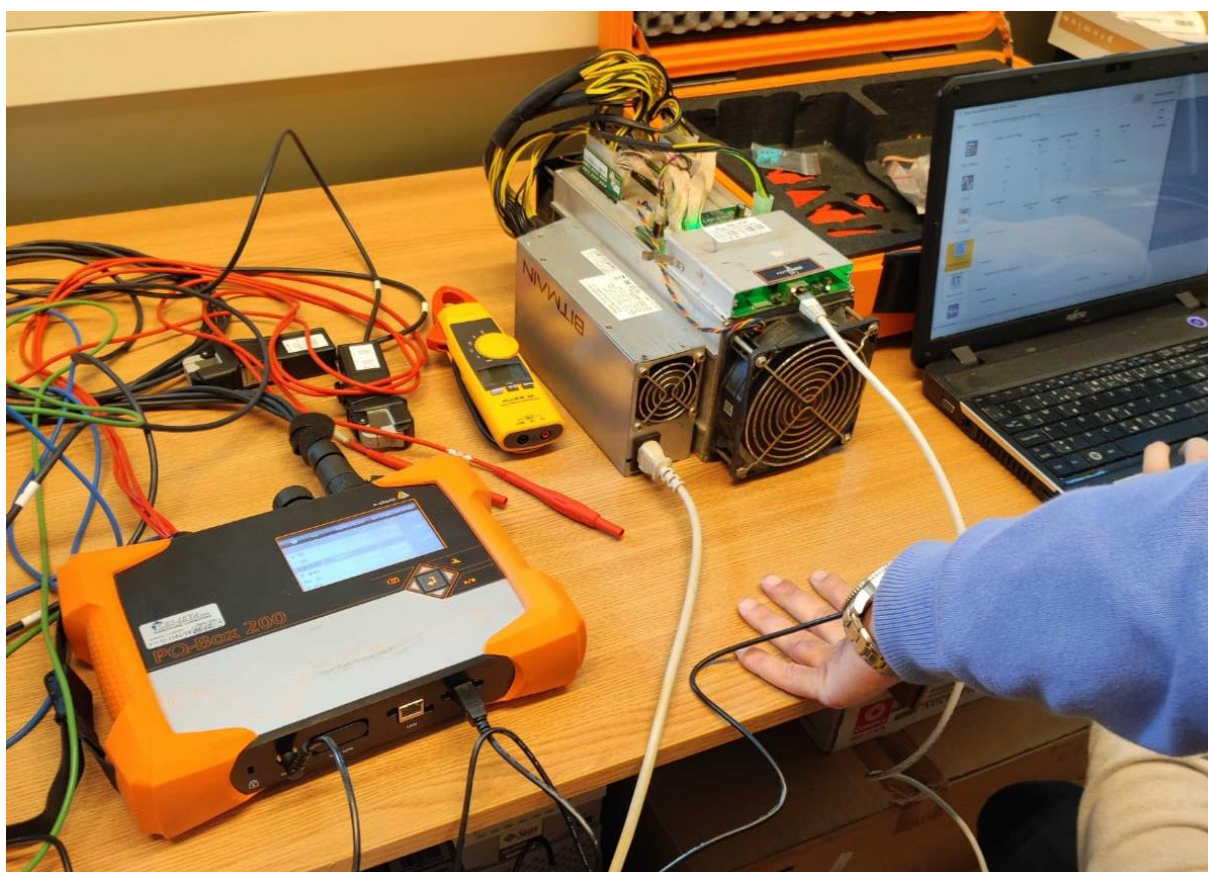
Također aktivni filter i sam proizvodi više harmonike pa je s obzirom na financijske troškove proizvodnje i kontrolu metode neisplativ i zato se koristi pasivni filter. Najdominantniji su 3., 5. i 7. harmonici, dok su ostali visokofrekventni harmonici gotovo zanemarivi zbog malih vrijednosti. [8]

7. ANALIZA REZULTATA MJERENJA

6.1. Mjerni instrument i metoda mjerenja

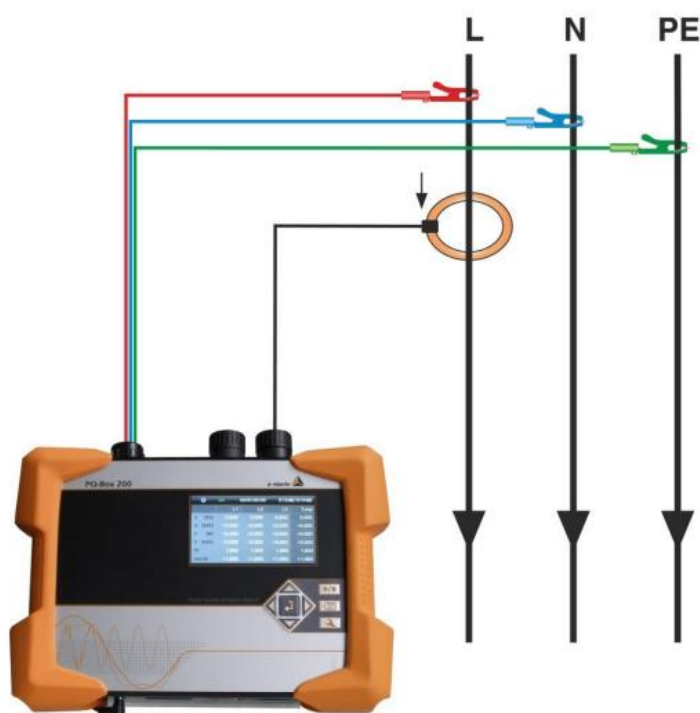
Za mjerenje kvalitete električne energije korišten je mjerni uređaj PQ-Box 200 kojega je proizvela njemačka kompanija A. Eberle GmbH & Co. KG. To je mobilni mrežni analizator koji osim analiziranja kvalitete električne energije ima mogućnosti mjeriti snagu i snimati prijelazne pojave. Razvijen je za mjerenje na svim naponskim razinama te je zbog svojih dimenzija idealan za mjerenja u teškim okruženjima, odnosno na mjestima gdje je prostor ograničen. Vrlo je precizan, a dolazi u paketu s WinPQ Mobile softverom koji je vrlo opsežan. Također, softver se može instalirati na više računala pa čak i na mobilne uređaje jer omogućuje praćenje mjerenja u stvarnom vremenu. Svrha programa je arhivirati mjerenja kvalitete električne energije i na vrlo prezentan način prikazati događaje koji su se dogodili tijekom mjerenja. [10]

Na slici 5.1 prikazan je mjerni instrument koji je spojen na jednofaznu niskonaponsku mrežu u zgradi Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku.



Slika 6.1. Mjerenje utjecaja ASIC sklopovlja na kvalitetu električne energije u zgradi FERIT-
a

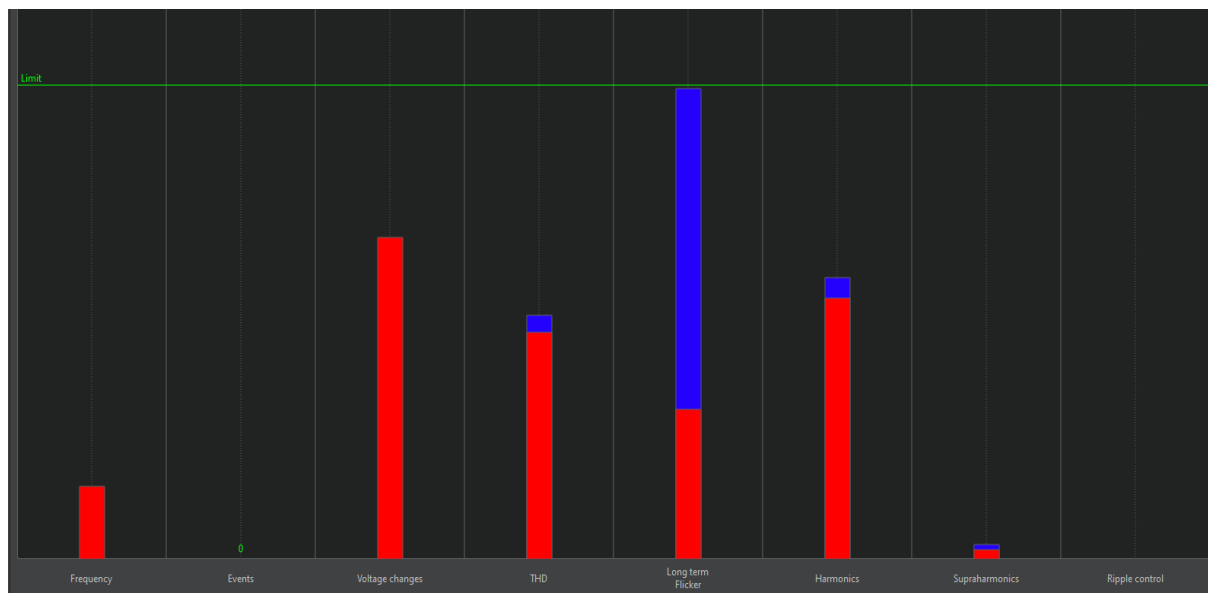
Mjerenje kvalitete električne energije odvija se tijekom 7 dana odnosno tijekom 1008 desetominutnih perioda kako bi se pokrili svi dani u tjednu zbog variranja opterećenja. Tijekom tih 1008 desetominutnih perioda gleda se uglavnom srednja vrijednost efektivnih vrijednosti. Ukoliko želimo veću točnost mjerenja moguće je mjeriti i duže. Konkretno u ovom radu mjerenje je trajalo dva tjedna. Spajanje je bilo izvedeno pomoću tri voda s kojima smo motrili napone i jednim strujnim kliještima pomoću kojih smo motrili struju kao što je prikazano na slici 5.2.



Slika 6.2. Shema spajanja PQ-box 200 uređaja [10]

6.2. Analiza rezultata mjerenja prvog tjedna

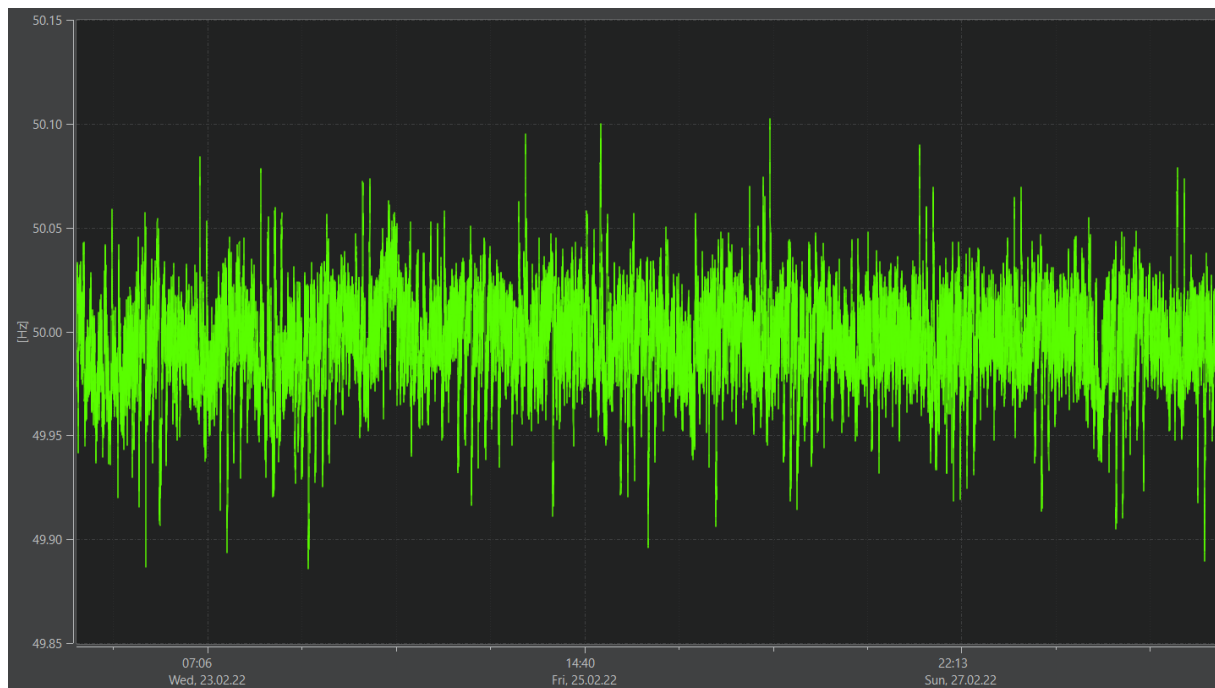
Slika 5.3 prikazuje sumarne rezultate mjerenja kvalitete električne energije u prvom mjernom tjednu.



Slika 6.3. Pokazatelji kvalitete električne energije

Iz slike iznad može se primijetiti kako su frekvencija, napon, THD, harmonici i supraharmonici značajno ispod granične vrijednosti. Kod dugotrajnih flikera vidi se da je plavi stupac na granici. On nam pokazuje maksimalnu vrijednost flikera u svim periodima. Iako je ta vrijednost granična, mrežna pravila nam govore da je ovo zadovoljavajuće. Uz to iako su harmonici unutar propisanih granica norma propisuje vrijednosti pojedinačnih harmonika zbog koje je potrebna dublja analiza.

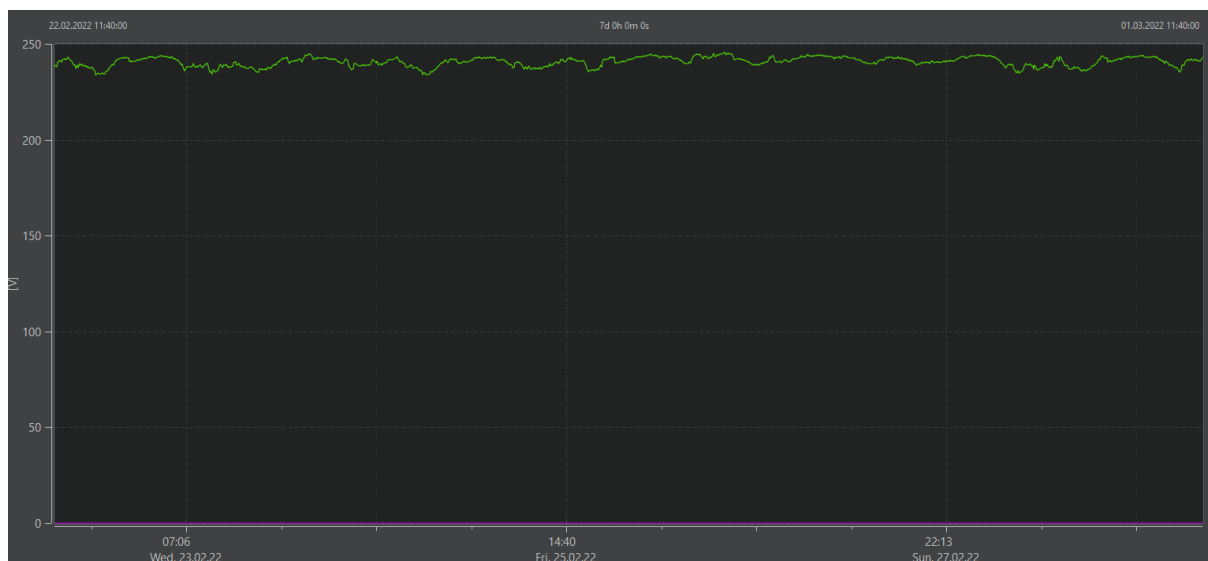
Frekvencija je najosjetljiviji parametar pri analiziranju kvalitete električne energije što se može vidjeti iz norme po propisanim granicama. Postoje granice i za 99.5 % perioda i za sve intervale tokom mjerenja. Iz slike 6.4. može se vidjeti promjenu frekvencije kroz tjedan dana.



Slika 6.4. Promjena frekvencije u mjerenom periodu

Kroz cijelo mjerenje vrijednost frekvencija se nalazi između 49.87 i 50.11 Hz što bi značilo da je frekvencija daleko unutar propisanih granica.

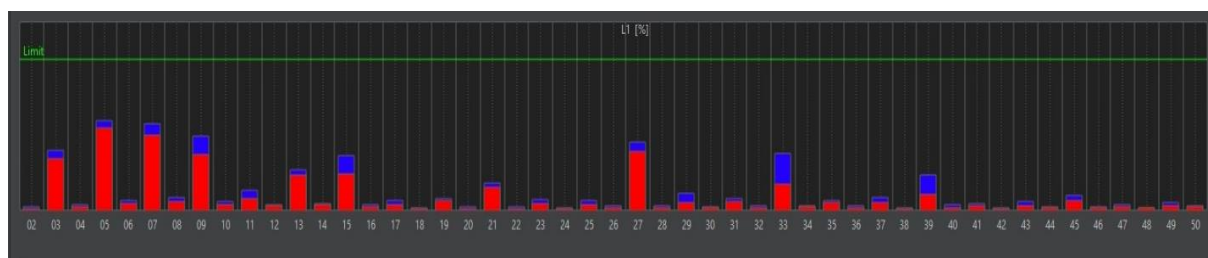
Na slici 6.5. možemo vidjeti promjenu napona kroz tjedan dana.



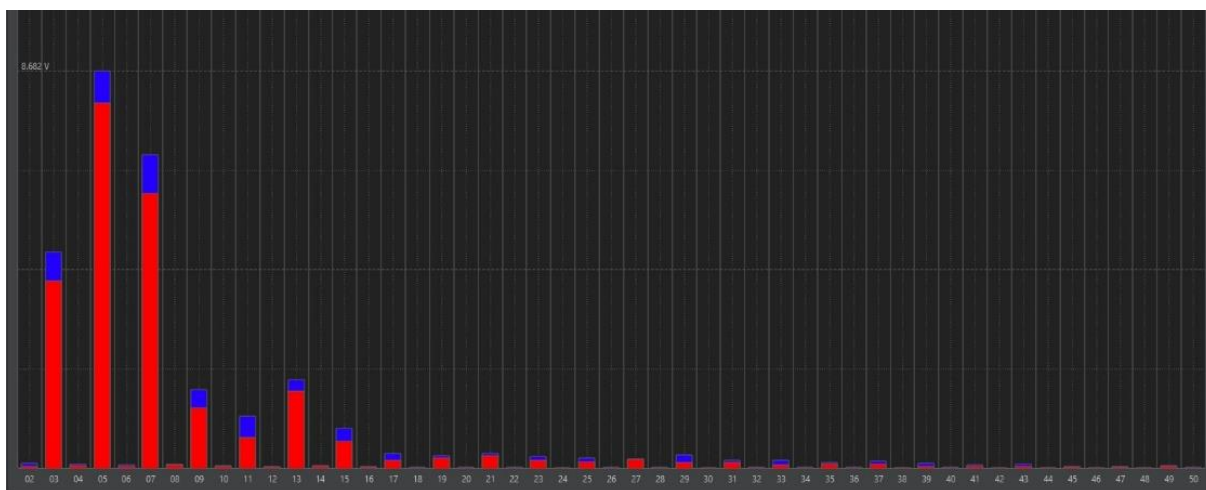
Slika 6.5. Efektivna vrijednost napona kroz mjereni period

Napon je tijekom cijelog mjerenja varirao između 220 V i 250 V te niti u jednom periodu nije ispao iz granica. To je bilo i očekivano jer se mjerenje provodilo u zgradi fakulteta koja ima poprilično stabilno napajanje.

Na slikama 6.6., 6.7. i 6.8 prikazan je harmonijski spektar napona pomoću relativnih vrijednosti, pomoću apsolutne vrijednosti u voltima i pomoću vrijednosti pojedinih harmonika.



Slika 6.5. Harmonijski spektar napona - relativne vrijednosti.



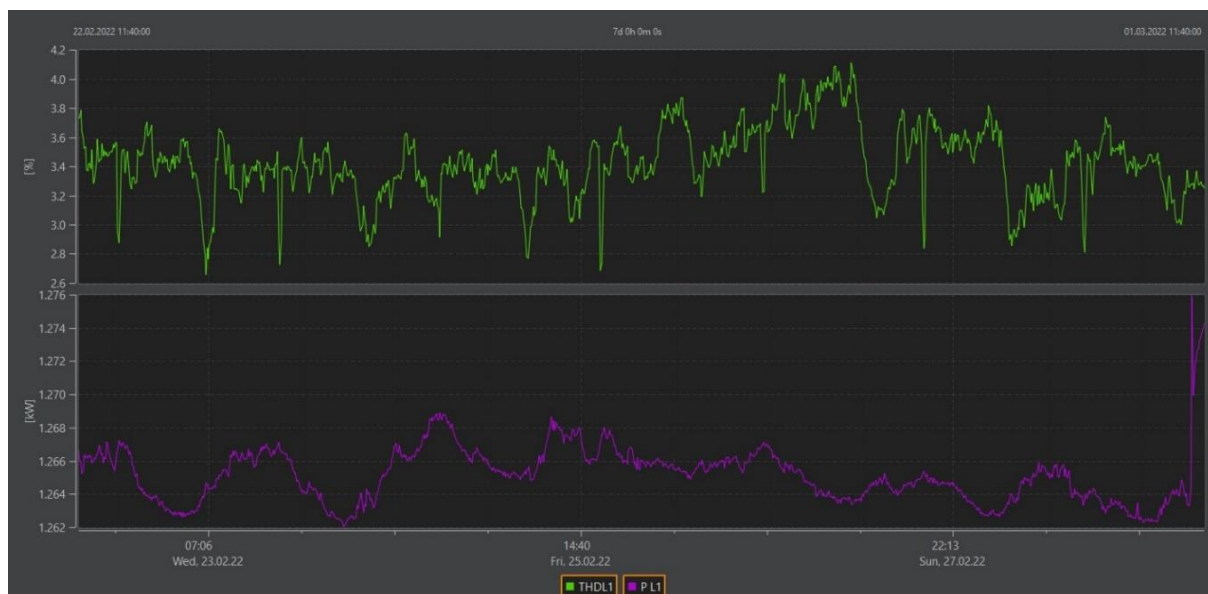
Slika 6.6. Harmonijski spektar napona – apsolutne vrijednosti u voltima

	Limit value [%]	L1 - 95.00% [%]	L1 - Max [%]
THD	8.00	3.83	4.11
02	2.00	0.02	0.05
03	5.00	1.71	1.98
04	1.00	0.03	0.04
05	6.00	3.30	3.56
06	0.50	0.02	0.03
07	5.00	2.52	2.88
08	0.50	0.03	0.05
09	1.50	0.56	0.74
10	0.50	0.02	0.03
11	3.50	0.28	0.48
12	0.50	0.02	0.02
13	3.00	0.70	0.80
14	0.50	0.02	0.02
15	1.00	0.25	0.37
16	0.50	0.02	0.02
17	2.00	0.07	0.14
18	0.50	0.01	0.01
19	1.50	0.10	0.12
20	0.50	0.01	0.01
21	0.75	0.12	0.14
22	0.50	0.01	0.01

Slika 6.7. Vrijednosti pojedinih naponskih harmonika u voltima do 23. harmonika

Dubljom analizom vidimo da parni harmonici nemaju gotovo nikakav utjecaj na oblik napona, dok su neparni puno izraženiji. Najdominantniji harmonik je 5., a zatim ga slijede 7., 3., 13. i 9. harmonik.

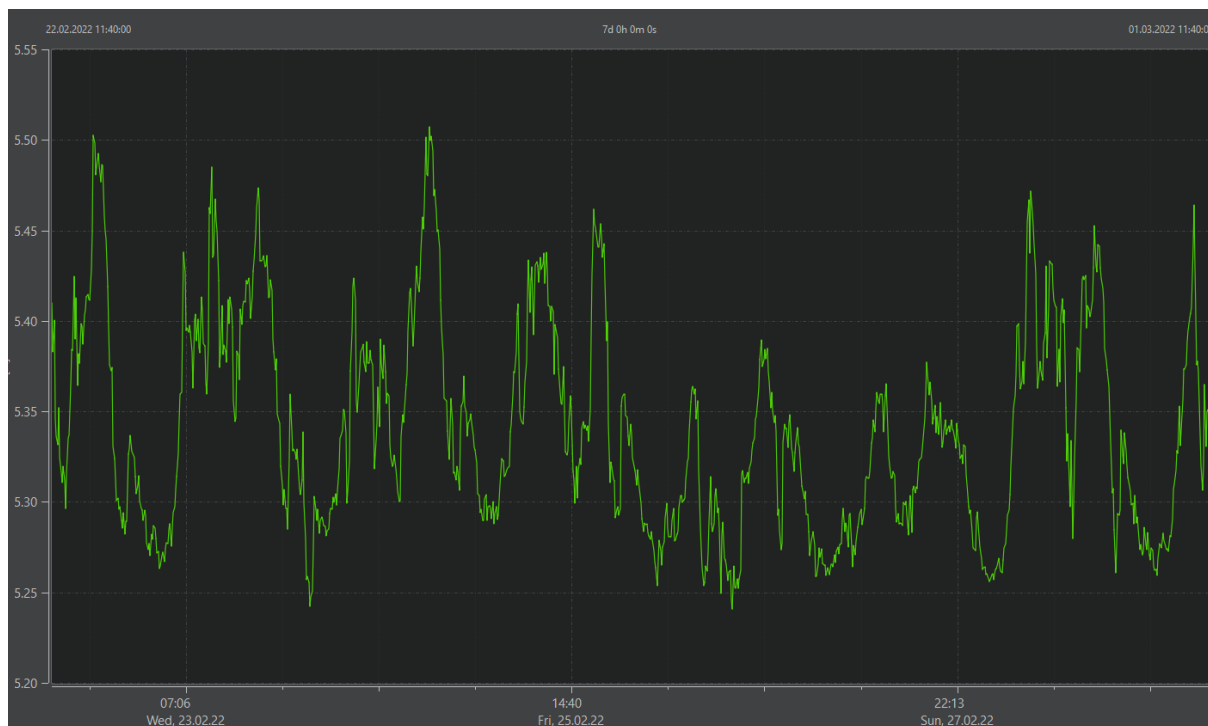
Ovisnost djelatne snage trošila i ukupnog harmonijskog izobličenja prikazano je na slici 6.9.



Slika 6.8. Ukupno harmonijsko izobličenje napona i snaga kroz tjedan

Iz dijagrama THD napona može se vidjeti da su vrijednosti u cijelom tjednu nalaze između 2.5 % i 4.5 % što je znatno ispod 8 % koje propisuje norma. Snaga trošila je također prilično konstantna i vrijednost joj je gotovo u svim periodima između 1.26 kW i 1.27 kW. U jednom periodu postoji veći skok snage na iznos od 1.276 kW, ali ni to ne stvara nikakve probleme sustavu. Uspoređujući dijagram THD-a napona i radne snage trošila može se zaključiti da naše trošilo nema značajan utjecaj na harmonijsko izobličenje napona.

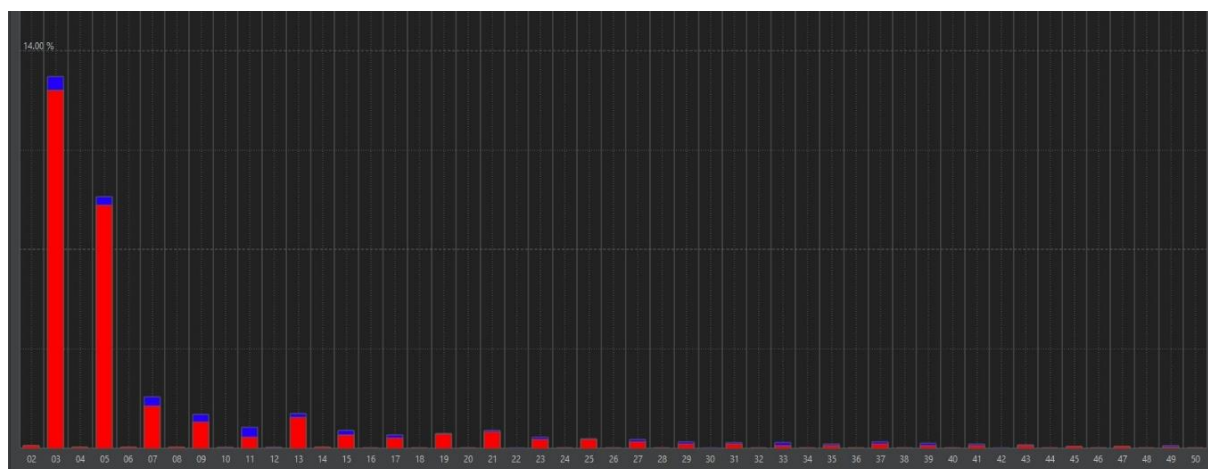
Za očekivati je da struja, za razliku od napona, znatno više varira jer ovisi o snazi trošila koje je spojeno na mrežu i zato nije propisana normama. Dijagram efektivne vrijednosti struje nalazi se na slici 6.10.



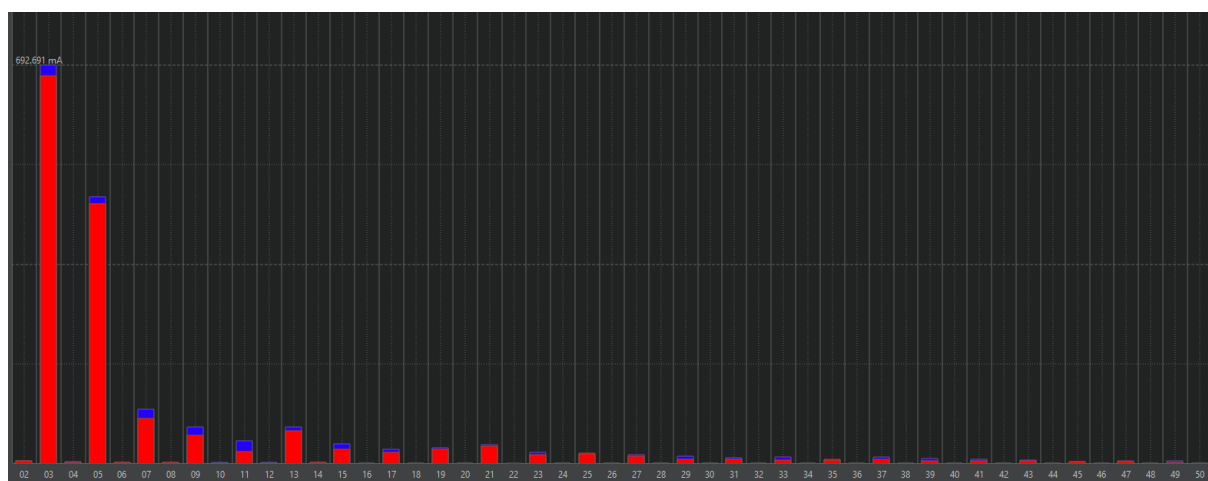
Slika 6.10. Dijagram vrijednosti efektivne struje kroz tjedan dana

Iz slike 6.10. jasno se vidi da je efektivna vrijednost struje tijekom cijelog mjerenja bila između 5.25 A i 5.52 A.

Slike 6.11., 6.12. i 6.13. prikazuju harmonijski spektar struje tijekom mjerenja, ali kao što je i ranije u radu napomenuto to nije mjerodavno za analizu jer se računa prema prvom harmoniku koji se stalno mijenja.



Slika 6.11. Harmonijski spektar struje - relativne vrijednosti



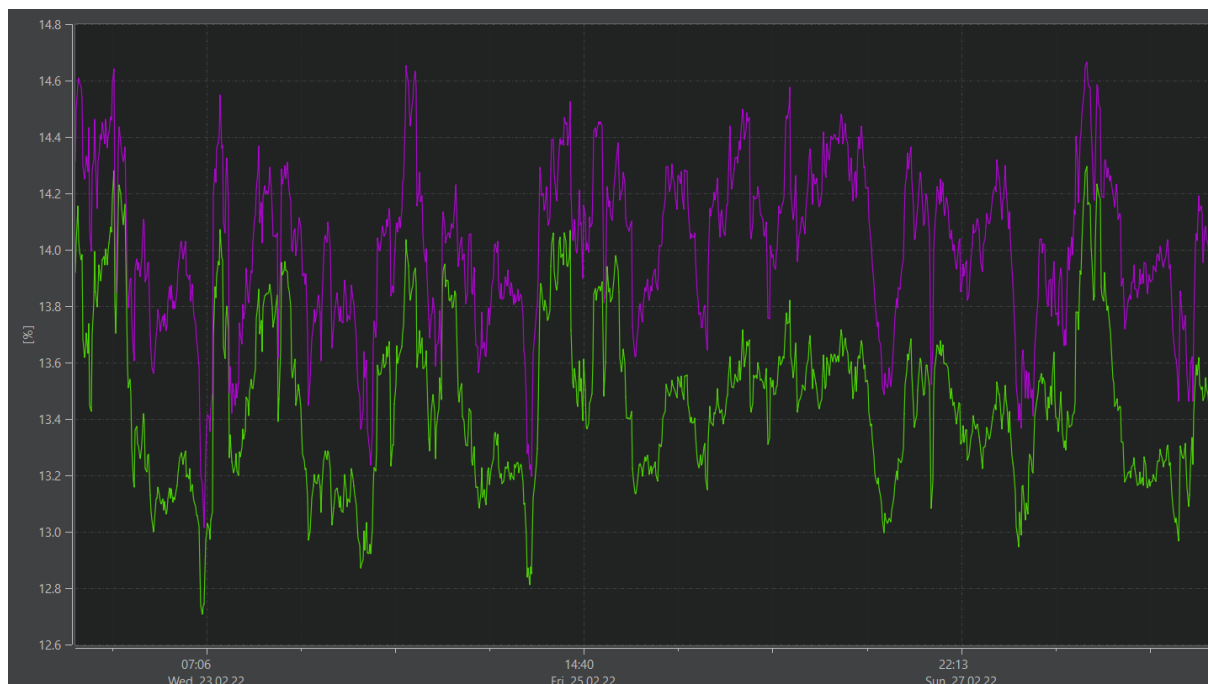
Slika 6.12. Harmonijski spektar struje -apsolutne vrijednosti u amperima

	L1 - Max [mA]
02	5.839
03	692.691
04	3.395
05	463.824
06	2.996
07	94.979
08	3.244
09	64.716
10	2.535
11	39.855
12	2.229
13	64.582
14	2.516
15	34.081
16	1.352
17	24.894
18	1.450
19	27.941
20	1.462
21	33.436
22	1.266
23	20.581

Slika 6.13. Vrijednosti pojedinih strujnih harmonika u amperima do 23. harmonika

Iz slika 6.11., 6.12., i 6.13. možemo vidjeti koji su harmonici više ili manje dominantni. Najdominantniji je 3. harmonik kojeg slijedi 5., a još su izraženi 13. i 21. harmonik.

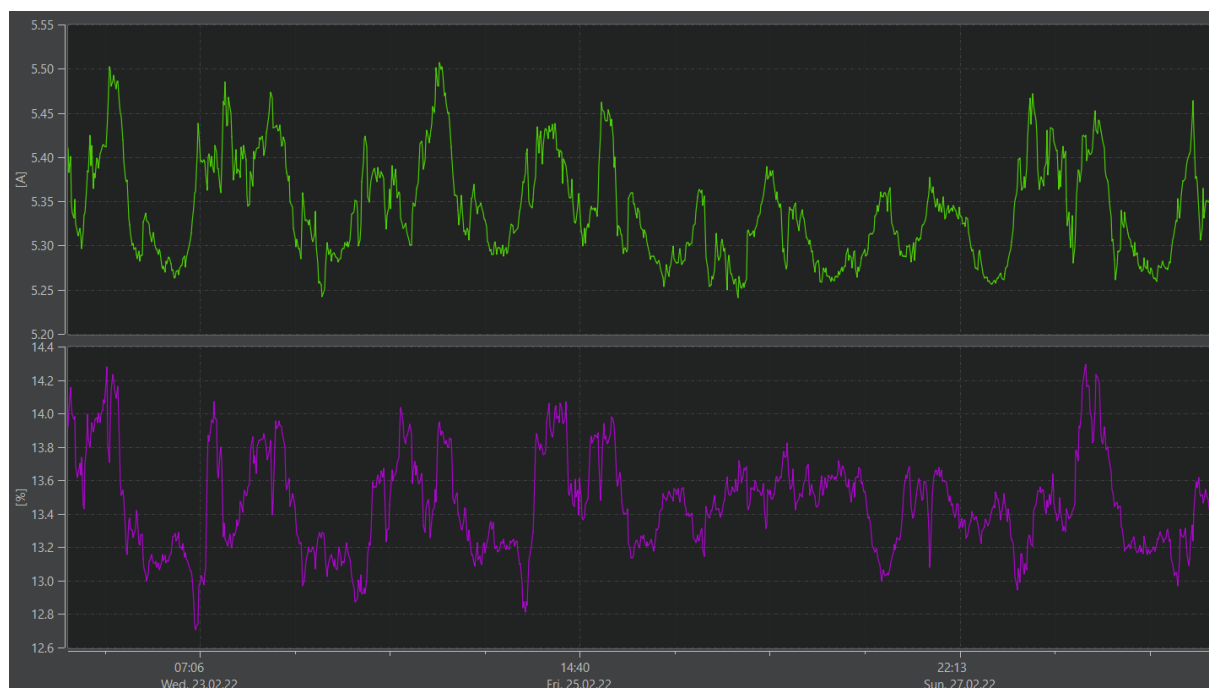
Na slici 6.14. prikazana je razlika između THD-a struje i TDD-a.



Slika 6.14. Dijagram THD-a struje (ljubičasto) i TDD (zeleno) u postotcima

Uspoređujući dijagrame THD-a struje i TDD zaključujemo da su oblikom vrlo slični. Najveću razliku zamjećujemo u samim vrijednostima što je i očekivano jer TDD koristi najveću vrijednost struje koja je zabilježena u tom tjednu. U ovom slučaju to je bila struja od 5.85 A. Zbog toga su postotne vrijednosti TDD-a manje od postotne vrijednosti THD-a i realnije nam pokazuju odstupanje valnog oblika struje od idealne sinusoide.

Slika 6.15. prikazuje ovisnost izobličenja vala struje i efektivne vrijednosti struje.



Slika 6.15. Dijagram efektivne struje (zeleno) i TDD (ljubičasto)

Usporedbom dijagrama efektivne struje i TDD-a može se primijetiti da je strujno izobličenje veće u trenucima kada u mreži postoje veće iznose struja.

Iz slike 6.16. može se vidjeti promjenu vrijednosti maksimalne struje kroz period mjerenja, te se može primjetiti i broj flikera koji se dogodio u mjerenom tjednu.

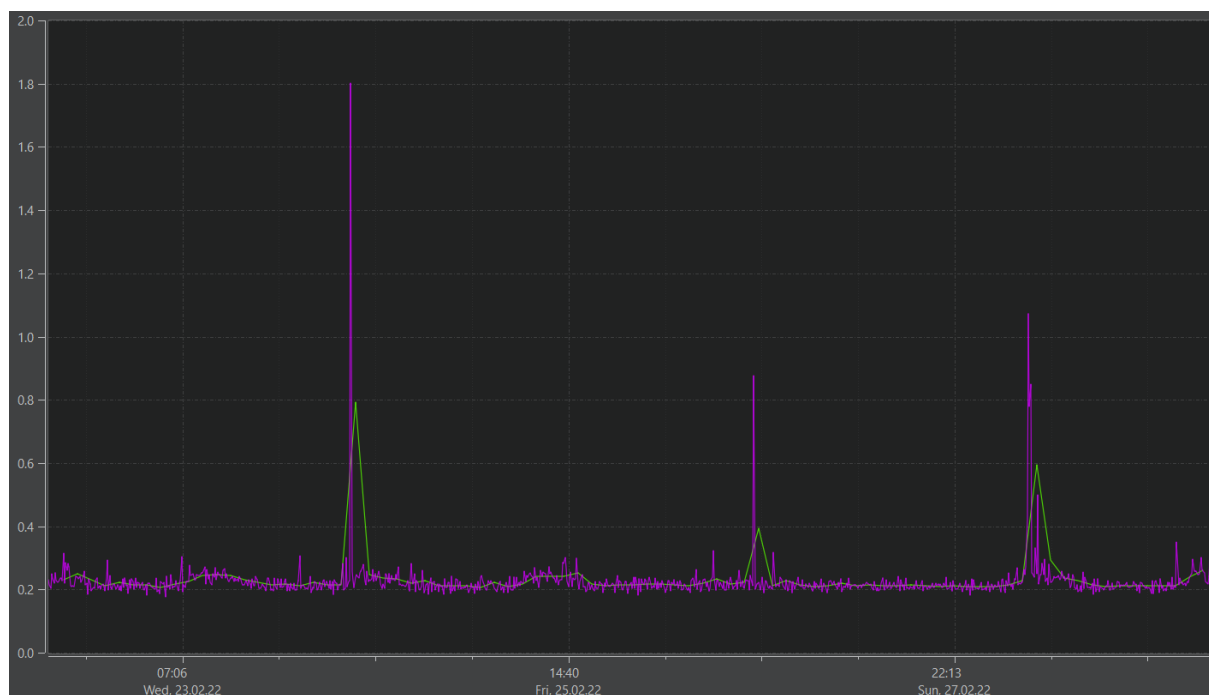


Slika 6.9. Dijagram kratkotrajnih flikera i maksimalne struje u periodu od tjedan dana

Iz slike 6.16 može se primijetiti da se najveći skokovi struje poklapaju s trenucima kada dolazi do pojave kratkotrajnih flikera i na osnovu toga može se zaključiti da je naše trošilo uzrok pojave flikera. Za razliku od kratkotrajnih flikera, dugotrajni flikeri su bitniji jer se vrednuju normom EN 50160.

Dok se kratkotrajni flikeri mjere u svakom desetominutnom periodu, dugotrajni se računaju kao aritmetička sredina kratkotrajnih flikera u 12 perioda (120 minuta). Zbog toga je za očekivati

da se oni vremenski preklapaju. Dijagram kratkotrajnih i dugotrajnih flikera se nalazi na slici 6.17.

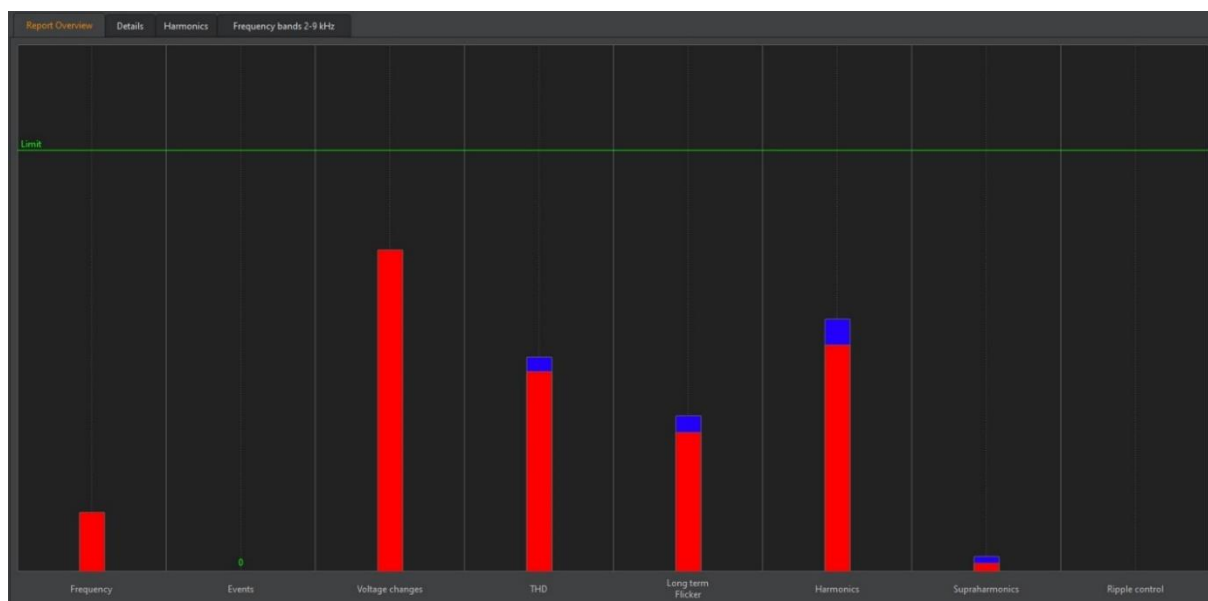


Slika 6.17. Dijagram kratkotrajnih (ljubičasto) i dugotrajnih (zeleno) flikera kroz tjedan dana

Granica prema normi EN 50160 za dugotrajne flikere je 0.8, a maksimalna vrijednost u ovom mjerenju je 0.79, što znači da flikeri zadovoljavaju normu u 100 % perioda.

6.3. Analiza rezultata mjerenja drugog tjedna

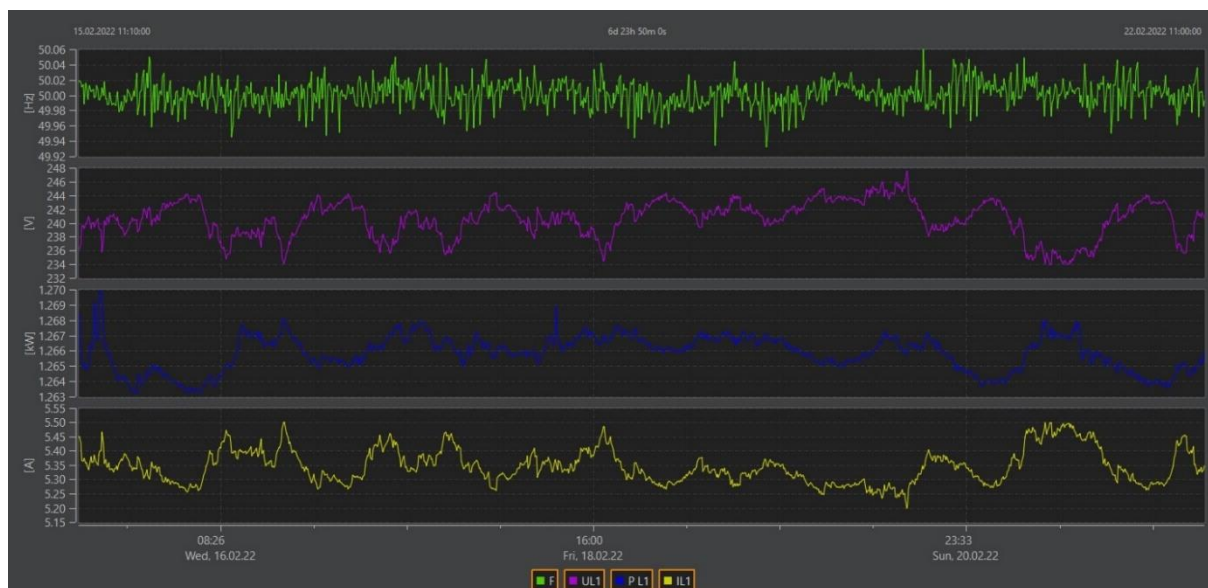
Slika 6.18. prikazuje sumarne rezultate mjerenja kvalitete električne energije u drugom tjednu mjerenja.



Slika 6.18. Pokazatelji kvalitete električne energije mjerenja u drugom tjednu

Kao i u prvom tjednu mjerenja može se vidjeti da su svi parametri u propisanim granicama. Uspoređujući mjerenja prvog i drugog tjedna primjećuje se da se najveća razlika pojavila kod dugotrajnih flikera. U ovom mjerenju i 100 % vrijednosti flikera su značajno ispod granice. Naravno, potrebno je ponovno napraviti dublju analizu harmonika jer su granice za harmonike propisane pojedinačno.

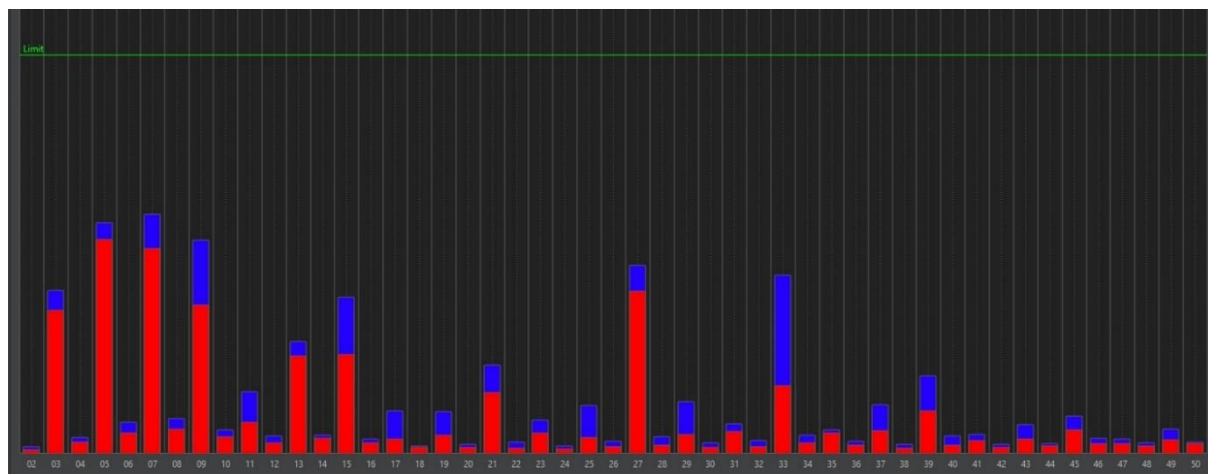
Na slici 6.19. prikazani su dijagrami frekvencije, napona, snage i struje za mjerenje u drugom tjednu.



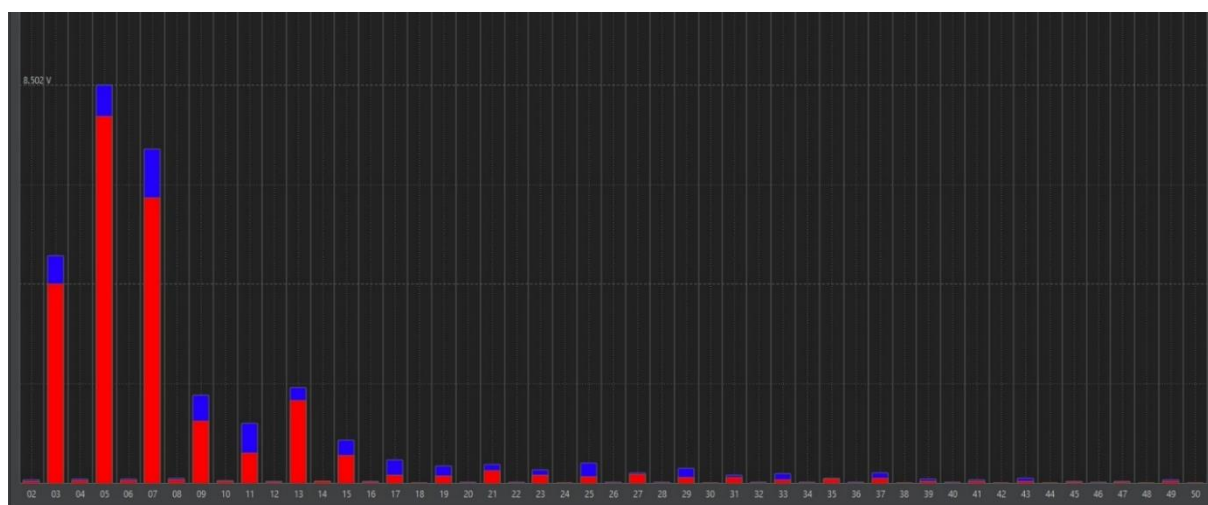
Slika 6.19. Promjena frekvencije, napona, snage i struje u mjerenom periodu u drugom tjednu mjerenja

Frekvencija se u ovom slučaju kreće između 49.92 i 50.6 Hz što je opet unutar zadanih parametara. Iznos napona je cijelo vrijeme varirao između 234 i 248 V, što bi značilo da niti jednom nije prekoračio granične vrijednosti. Snaga je također poprilično konstantnog iznosa. Dogodio se jedan skok na 1.27 kW, dok je u većini ostalih perioda bila 1.25 kW. Efektivna vrijednost struje je očekivano opet varirala. Maksimalna vrijednost efektivne struje bila je 5.5 A, dok je minimalna bila 5.2 A.

Na slikama 6.20., 6.21, i 6.22. prikazan je harmonijski spektar napona za mjerenje u drugom tjednu, a prikazan je pomoću relativnih vrijednosti, pomoću apsolutnih vrijednosti u voltima i pomoću vrijednosti pojedinih harmonika



Slika 6.20. Harmonijski spektar napona - relativne vrijednosti.



Slika 6.21. Harmonijski spektar napona – apsolutne vrijednosti u voltima

	Limit value [%]	L1 - 95.00% [%]	L1 - Max [%]
THD	8.00	3.79	4.06
02	2.00	0.02	0.03
03	5.00	1.79	2.04
04	1.00	0.03	0.04
05	6.00	3.23	3.47
06	0.50	0.03	0.04
07	5.00	2.57	3.00
08	0.50	0.03	0.04
09	1.50	0.56	0.80
10	0.50	0.02	0.03
11	3.50	0.27	0.54
12	0.50	0.01	0.02
13	3.00	0.73	0.84
14	0.50	0.02	0.02
15	1.00	0.25	0.39
16	0.50	0.01	0.02
17	2.00	0.07	0.21
18	0.50	0.01	0.01
19	1.50	0.07	0.16
20	0.50	0.01	0.01
21	0.75	0.12	0.17
22	0.50	0.01	0.01
23	1.50	0.08	0.13

Slika 6.22. Vrijednosti pojedinih naponskih harmonika u voltima do 23. harmonika

Svi harmonici su unutar propisanih vrijednosti, a u ovom mjeranju najdominantniji je 7. harmonik kojeg slijede 5., 9., 27., 33., 15. i 9.

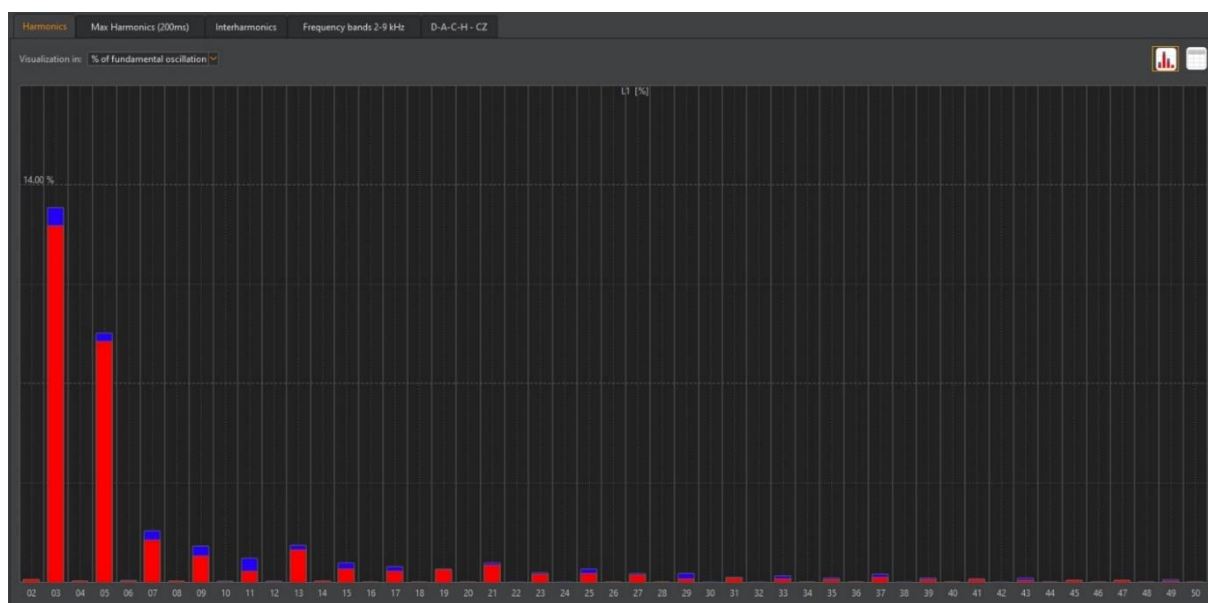
Na slici 6.23. prikazane su vrijednosti naponskog THD-a kroz tjedan dana.



Slika 6.23. Ukupno harmonijsko izobličenje napona u drugom tjednu mjerenja

Iz slike 6.23. vidi se da je vrijednost naponskog THD-a manja u odnosu na prvi tjedan. Vrijednosti su varirale između 2.5 i 4.2 % što je znatno ispod zadanih 8 %.

Slike 6.24. i 6.25. prikazuju harmonijski spektar struje tijekom drugog tjedna mjerenja, ali kao što je i ranije u radu napomenuto to nije mjerodavno za analizu jer se računa prema prvom harmoniku koji se stalno mijenja.



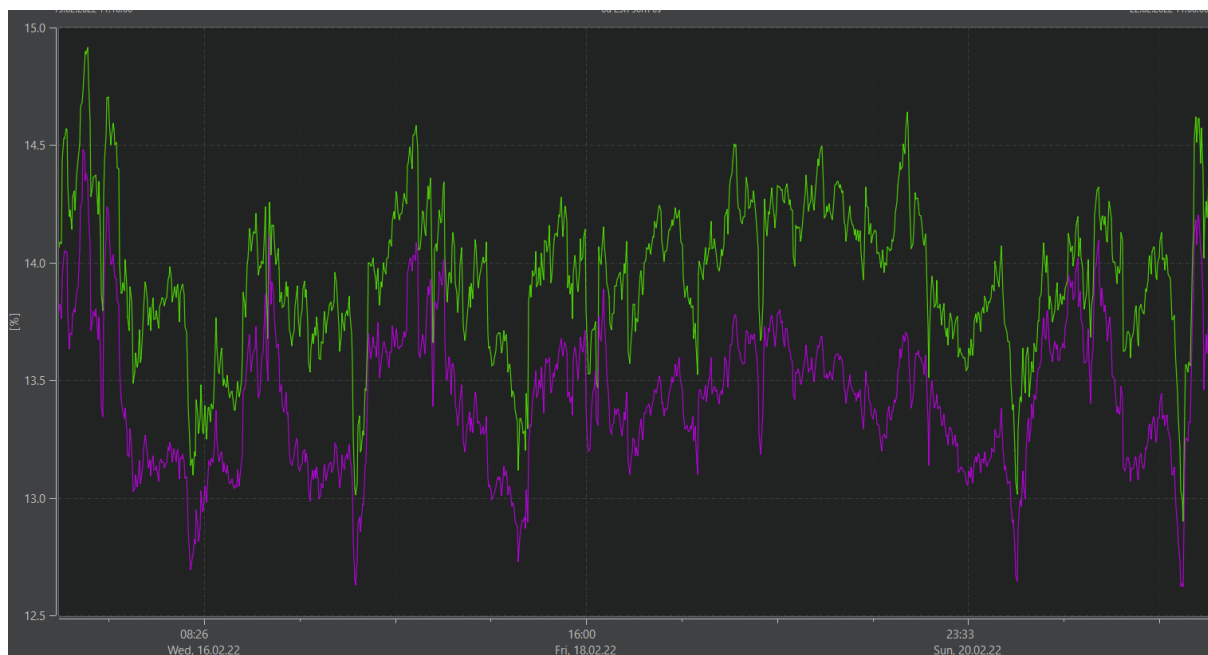
Slika 6.24. Harmonijski spektar struje - relativne vrijednosti u drugom tjednu mjerenja

	L1 - Max [%]
02	0.11
03	13.19
04	0.06
05	8.78
06	0.07
07	1.82
08	0.06
09	1.28
10	0.04
11	0.87
12	0.05
13	1.32
14	0.05
15	0.70
16	0.03
17	0.56
18	0.02
19	0.48
20	0.02
21	0.70
22	0.02
23	0.36

Slika 6.25. Harmonijski spektar struje u postotcima za drugi tjedan mjerenja

To se najlakše vidi iz slike 6.25. gdje se jasno vidi da je najdominantniji harmonik 3., pa 5., pa 7., pa 13. i 9.

Na slici 6.26. prikazana je razlika između THD-a struje i TDD-a



Slika 6.26. Dijagram strujnog THD-a i TDD-a za drugi tjedan mjerenja - relativne vrijednosti

Ponovno su THD i TDD oblikom vrlo slični. Za TDD koristila se maksimalna struja zabilježena u drugom tjednu mjerenja i iznosila je 5.58 A. Najveći zabilježeni postotak TDD-a u ovom tjednu bio je 14.5 %, dok je u prošlom mjerenju bio 14.3 %. Iako je razlika mala ona postoji, a nastala je zbog toga što je vrijednost maksimalne struje u drugom tjednu niža od maksimalne struje u prvom tjednu.

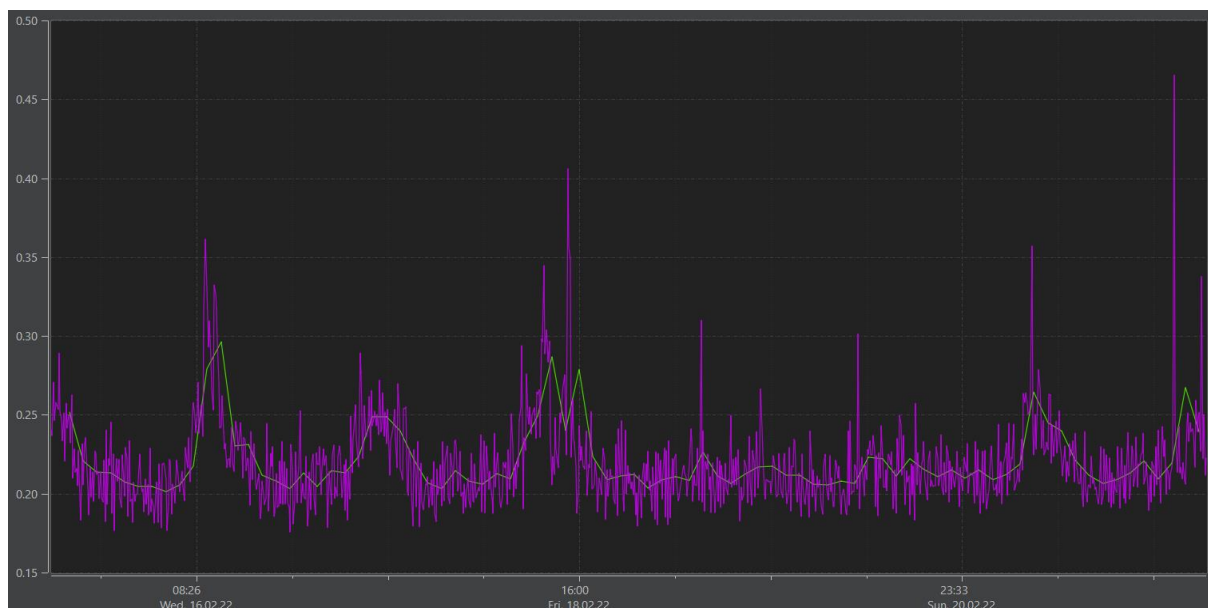
Iz slike 6.27. može se vidjeti promjenu vrijednosti maksimalne struje kroz period mjerenja, te se može primjetiti i broj flikera koji se dogodio u mjerenom tjednu.



Slika 6.27. Dijagram kratkotrajnih flikera i maksimalne struje u periodu od tjedan dana

Za razliku od prvog mjerenja pojava kratkotrajnih flikera je učestalija. Iz slike 5.27. se vide trenuci gdje dolazi do velikih skokova i padova struje na promatranom potrošaču, javljaju se i kratkotrajni flikeri. Prema slici iznad može se zaključiti da su neki od njih uzrokovani ASIC sklopovljem, dok neki potječu iz instalacije FERIT-a ili možda iz distribucijske mreže.

Dijagram kratkotrajnih i dugotrajnih flikera za drugo mjerenje se nalazi na slici 6.28.



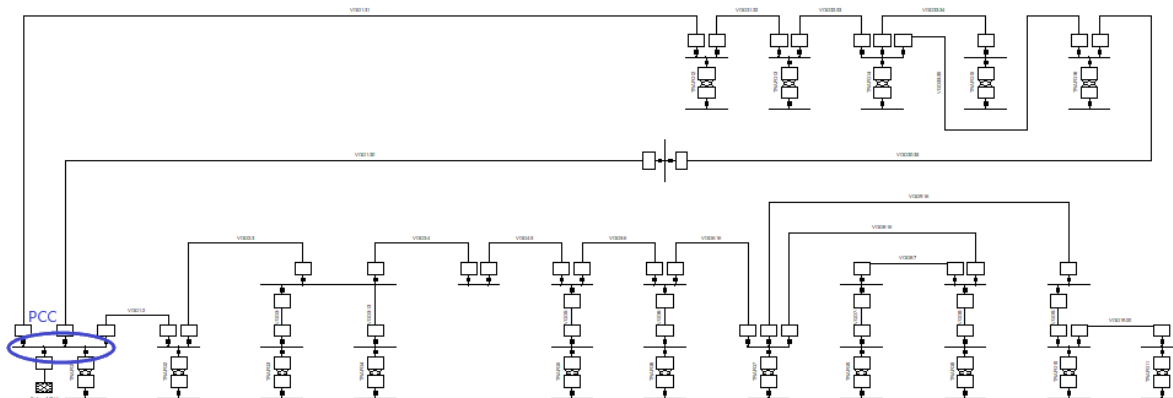
Slika 6.28. Dijagram kratkotrajnih i dugotrajnih flikera

Najveća vrijednost dugotrajnog flikera iznosila je 0.29. U prvom tjednu mjerenja maksimalna vrijednost bila je 0.79. Prema normi EN50160 i jedno i drugo mjerenje zadovoljavaju granice i to u 100% vremenskih intervala.

8. MODELIRANJE MREŽE S UTJECajem VIŠIH HARMONIKA

7.1. Odabir mreže

Mreža na kojoj se gledao utjecaj ASIC sklopovlja na kvalitetu električne energije je realna niskonaponska mreža koja je zapravo dio distributivne mreže u Slavoniji. Mreža je prikazana na slici 7.1.



Slika 7.1. Slika mreže

Ova distributivna 10 kV mreža je sastavljena od 40 sabirnica, 16 dvonamotnih transformatora i 24 nadzemna voda. Naponska razina sekundara spomenutih transformatora je 0.4 V. Na niskonaponske izvode spojeni su potrošači ukupne snage 2.4 MW. Uz stalne potrošače na niskonaponske izvode također su spojeni ASIC uređaji koji su modelirani kao potrošači koji su izvor strujnih harmonika. Također ovaj ASIC uređaj je jednofazan pa treba obratiti pažnju na to da su odrađene simulacije nesimetrične. Za modeliranje harmonika koristile su se vrijednosti iz nepovoljnijeg slučaja sa stajališta harmonika, a to je mjerenje iz prvog tjedna.

7.2. Simulacija i analiza rezultata

Nakon uspješnog pokretanja simulacija tokova snaga i harmonijskih tokova snaga može se početi s analizom. Na promatrane sabirnice spojili smo postrojenje od 20 ASIC uređaja U ovom radu promatrat će se napon, frekvencija i ukupno harmonijsko izobličenje na PCC čvoru kao i harmonijsko izobličenje na dalekovodima koji povezuju PCC čvor s ostatkom niskonaponske mreže, ali i ukupno harmonijsko izobličenje prema nadređenoj mreži. Također promatrati će se i harmonijski spektar struje i propagacija harmonika kroz vod.

Parametre kvalitete električne energije promatrati ćemo na PCC čvoru u četiri slučaja:

- Slučaj 1: Spajanje ASIC uređaja direktno na PCC čvor;
- Slučaj 2: Spajanje ASIC uređaja na sabirnice fizički najdalje od PCC čvora;
- Slučaj 3: Spajanje ASIC uređaja na sabirnice fizički najbliže PCC čvoru;
- Slučaj 4: Spajanje ASIC uređaja na sabirnice koje su fizički najdalje i najbliže.

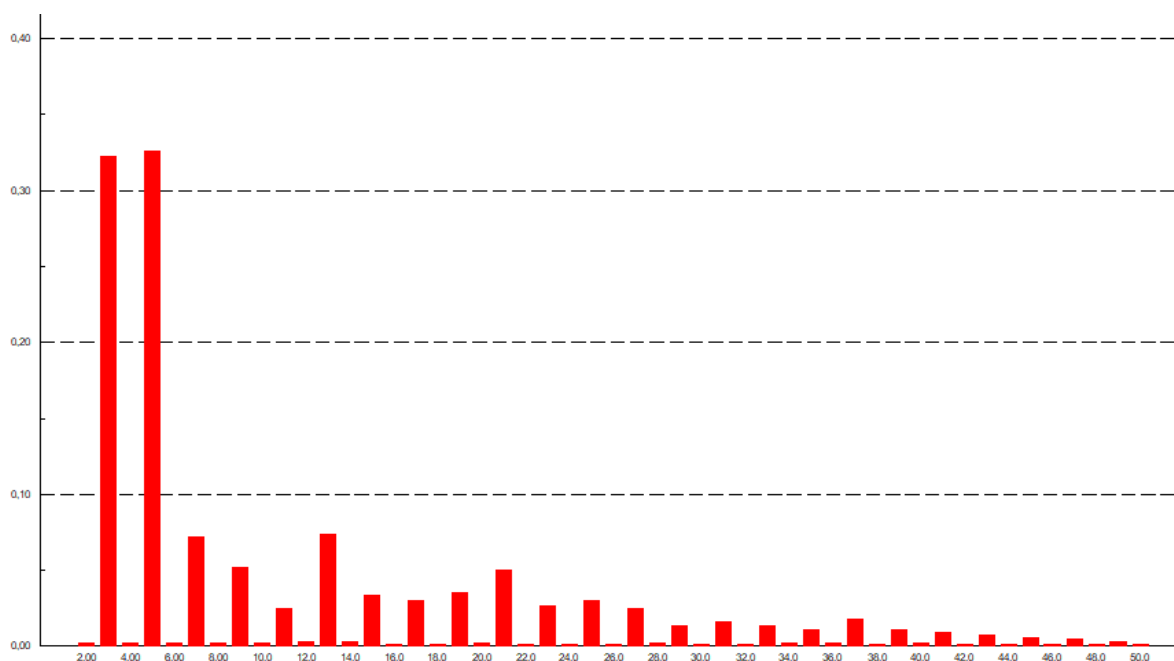
7.2.1. Slučaj 1

U prvom slučaju ASIC uređaji spojeni su direktno na PCC čvor.

Tablica 7.1. Rezultati simulacije za Slučaj 1

Napon (p.u.)	Frekvencija (p.u.)	THDU a PCC čvoru (%)	THDU na vodu 1-2 (%)	THDU na vodu 1-30 (%)	THDU na vodu 1-31 (%)	THDU prema nadređenoj mreži (%)
1.02	1.00	1.25	0.469	0.475	0.437	0.876

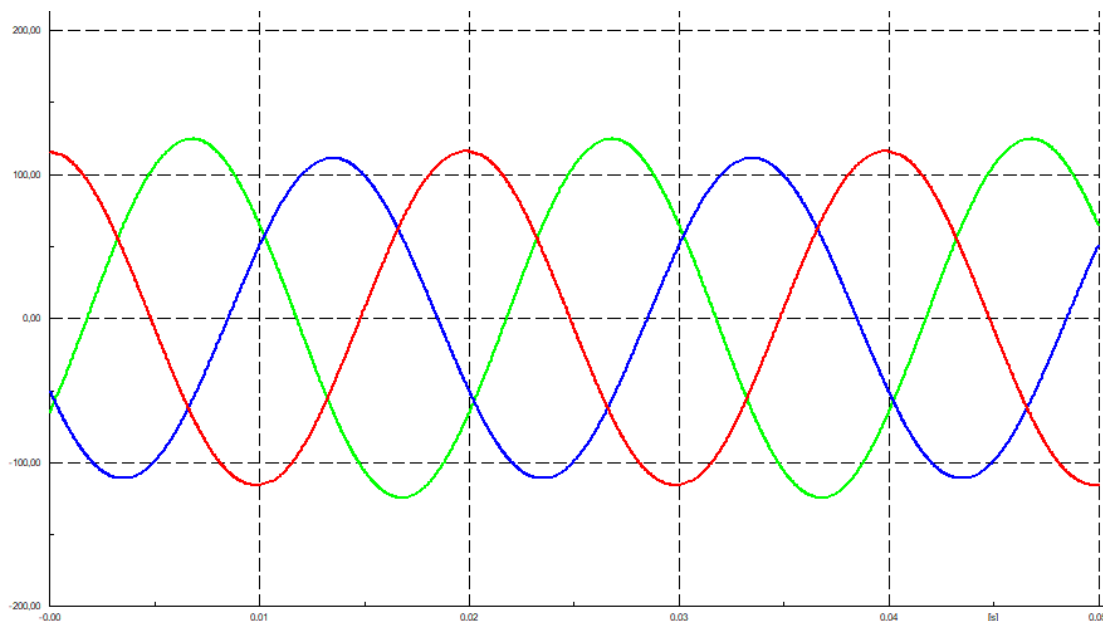
U slučaju 1 i napon i frekvencija i ukupno harmonijsko izobličenje se nalaze unutar granica propisanih normom EN 50160. na slici. Na slici 7.2 prikazan je harmonijski spektar struje.



Slika 7.2. Harmonijski spektar struje za Slučaj 1

Iz slike 7.2 se može vidjeti da su najdominantniji 3. i 5. harmonik, a još do izražaja dolaze 13. i 21. harmonik. Očekivano je da su baš ovi harmonici najdominantniji jer se podudaraju s najdominantnijim harmonicima pojedinačnog ASIC sklopovlja što je prikazano u analizi

mjerenja i vidi se na slici 6.11. Vrijednosti su vrlo male što znači da su unutar granica propisanih normom i za očekivati je da nam je valni oblik struje gotovo isti idealnoj sinusoidi.

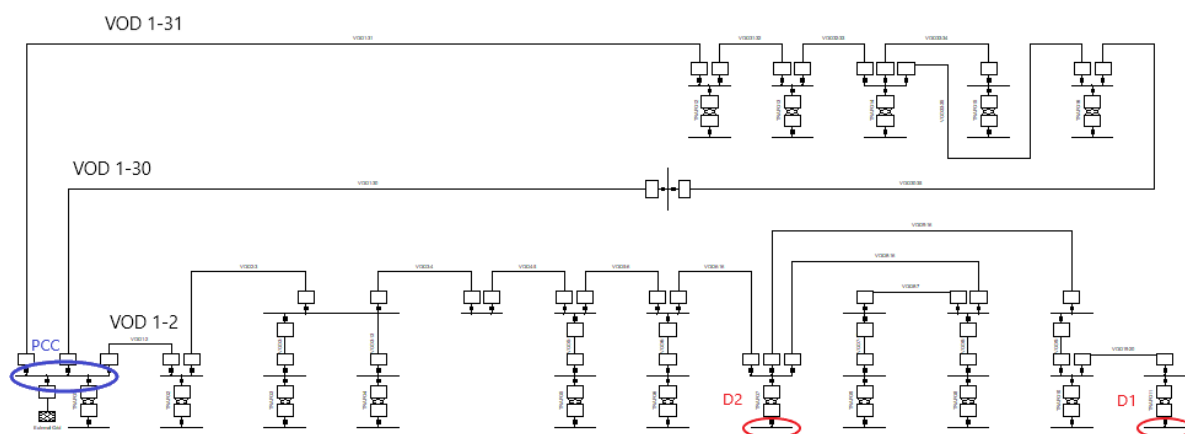


Slika 7.3. Valni oblik struje za Slučaj 1

Iz Slike 7.3 vidimo valni oblik struje po fazama. Može se primijetiti da je amplituda jedne faze (zeleni) nešto veća od ostalih. Razlog tomu je što su ASIC uređaji jednofazni što bi značilo da je na jednoj fazi priključen veći broj uređaja u odnosu na ostale dvije. Bez obzira na to, kao što je i očekivano nakon uvida u harmonijski spektar struje, vidi se da su sve tri sinusoide gotovo jednake idealnoj.

7.2.2 Slučaj 2

U ovom slučaju ASIC uređaji su spojeni na sabirnice koje su fizički najdalje udaljene od PCC čvora. U ovoj mreži to su sabirnica D2 koja je udaljena 3.225 km i sabirnica D1 koja je od PCC čvora udaljena 3.395 km. Mreža za ovaj slučaj prikazana je na slici 7.4. sa označenim sabirnicama D1 i D2.

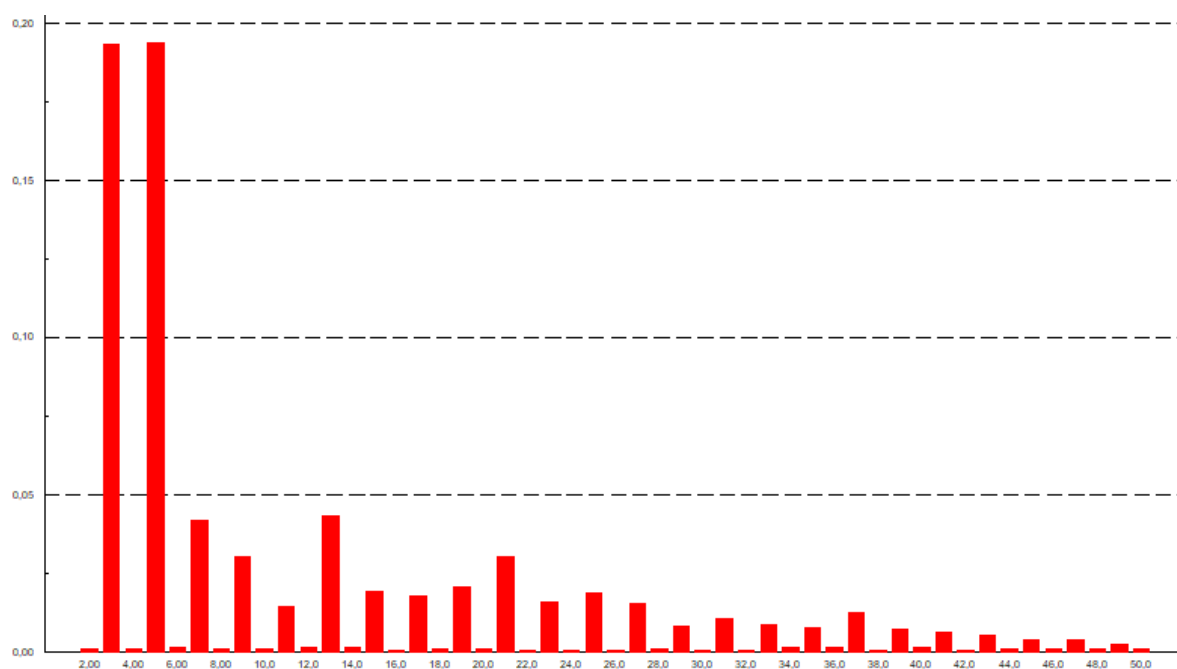


Slika 7.4. Slika mreže za Slučaj 2

Tablica 7.2. Rezultati simulacije za Slučaj 2

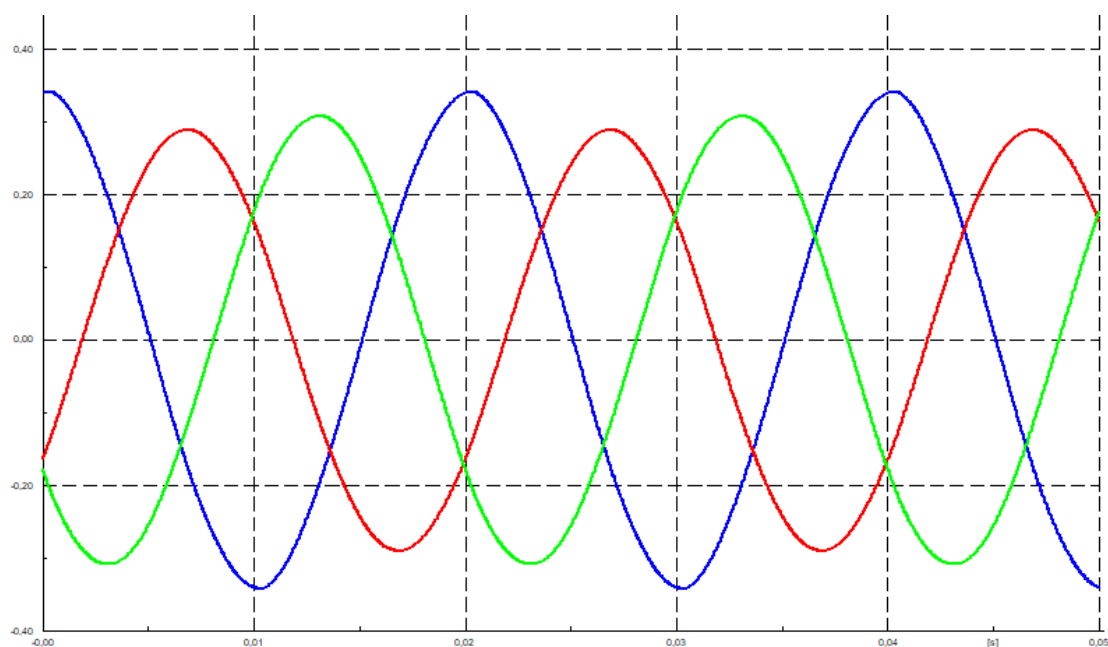
Napon (p.u.)	Frekvencija (p.u.)	THDU na PCC čvor (%)	THDU na vodu 1-2 (%)	THDU na vodu 1-30 (%)	THDU na vodu 1-31 (%)	THDU prema nadređenoj mreži (%)
1.01	1.00	0.76	1.059	0.287	0.264	0.519

I u ovom slučaju promatrani parametri na PCC čvoru ponovno zadovoljavaju granice koje su propisane normom.. Zbog toga što je THDU na PCC čvoru manji nego u prvom slučaju, za očekivati je da je udio pojedinih harmonika pri analizi harmonijskog spektra struje unutar granica što ćemo vidjeti na slici 7.5.



Slika 7.5. Harmonijski spektar struje za Slučaj 2

Iz slike 7.5. ponovno se može vidjeti da su najdominantniji 3. i 5. harmonik, koji su popraćeni 13., 15. i 37. harmonikom, ali kako i što se očekivalo, postotne vrijednosti pojedinih harmonika su gotovo zanemarive. Isto tako se očekuje i mala promjena valnog oblika struje

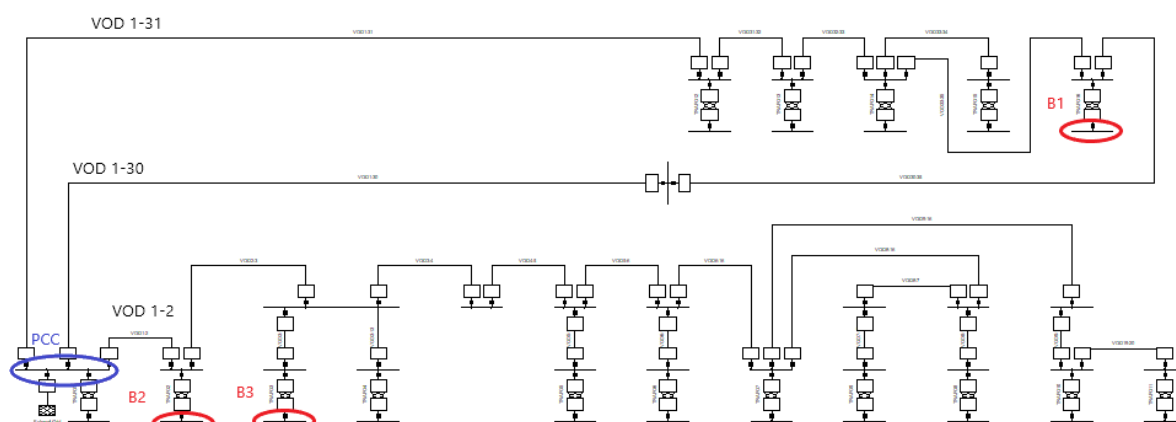


Slika 7.6. Valni oblik struje za Slučaj 2

Iz slike 7.6. može se primijetiti da je amplituda jedne faze ponovno (plava) nešto veća od ostalih. Razlog tomu je isti kao i u prvom slučaju, a valni oblik struje je ostao minimalno deformiran.

7.2.3. Slučaj 3

U slučaju 3 ASIC uređaji priključeni su na sabirnice koje su fizički najbliže PCC čvoru. U ovoj mreži najbliža sabirnica je sabirnica B1 koja je udaljena 0.512 km od PCC čvora, zatim slijedi sabirnica B2 čija duljina od PCC čvora iznosi 0.728 km i sabirnica B3 koja je udaljena 1.118 km od točke promatranja parametara. Mreža za ovaj slučaj prikazana je na slici 7.7. sa označenim sabirnicama B1, B2 i B3.

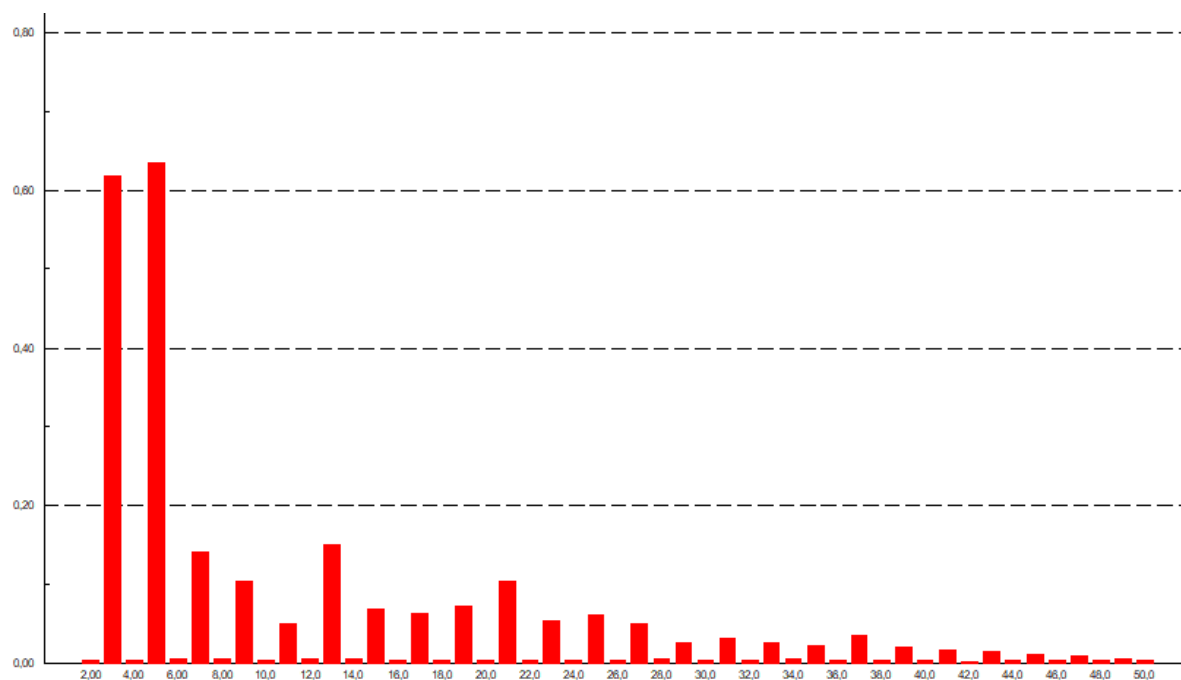


Slika 7.7. Slika mreže za Slučaj 3

Tablica 7.3. Rezultati simulacije za Slučaj 3

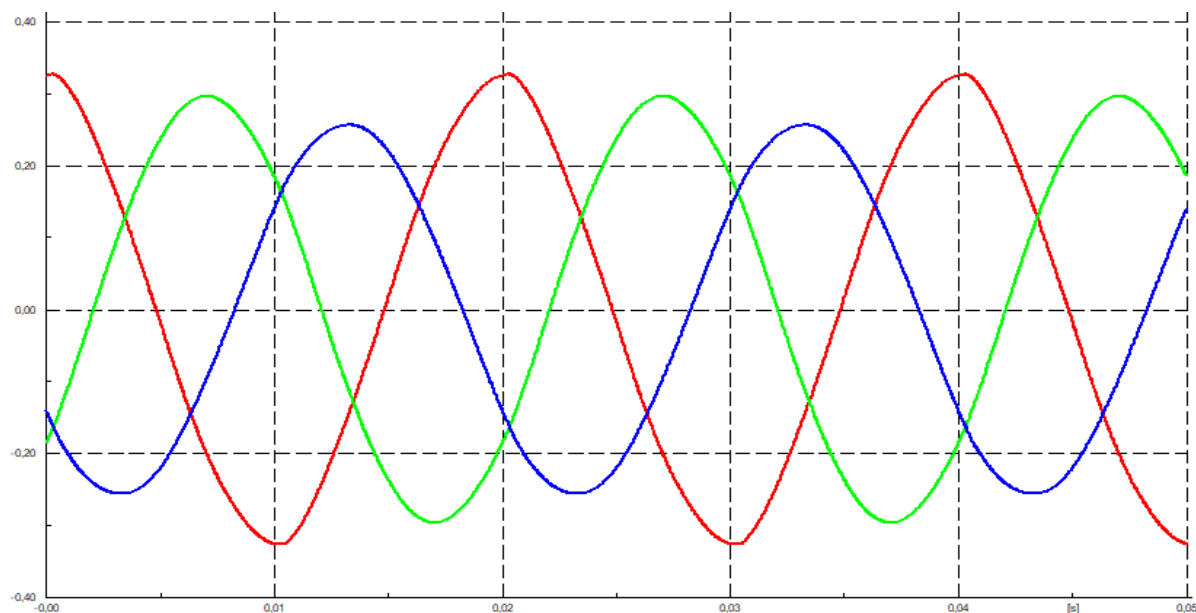
Napon (p.u.)	Frekvencija (p.u.)	THDU na PCC čvor (%)	THDU na vodu 1-2 (%)	THDU na vodu 1-30 (%)	THDU na vodu 1-31 (%)	THDU prema nadređenoj mreži (%)
1.04	1.00	2.45	2.3	1.785	0.759	1.695

Kao i u prethodna dva slučaja napon na PCC čvoru je porastao, a frekvencija je ostala ista. Iako se napon povećao dvostruko više nego u prošlom slučaju i dalje je ostao unutar propisanih granica. Ukupno harmonijsko izobličenje je znatno veće nego u prethodnim slučajevima pa je i za očekivati da će valni oblik struje biti različit od prikazanog u prošlim slučajevima. Prikaz harmonijskog spektra struje na PCC čvoru za slučaj 3 je na slici 7.8.



Slika 7.8. Harmonijski spektar struje za Slučaj 3

Iz slike 7.8 vidimo da je harmonijski spektar struje u ovom slučaju vrlo sličan harmonijskom spektru iz prošlih slučajeva. Udio pojedinih harmonika je primjetno veći nego u prošlim slučajevima pa je i za očekivati da valni oblik struje više odstupa od sinusnog signala. To se može vidjeti na slici 7.9.

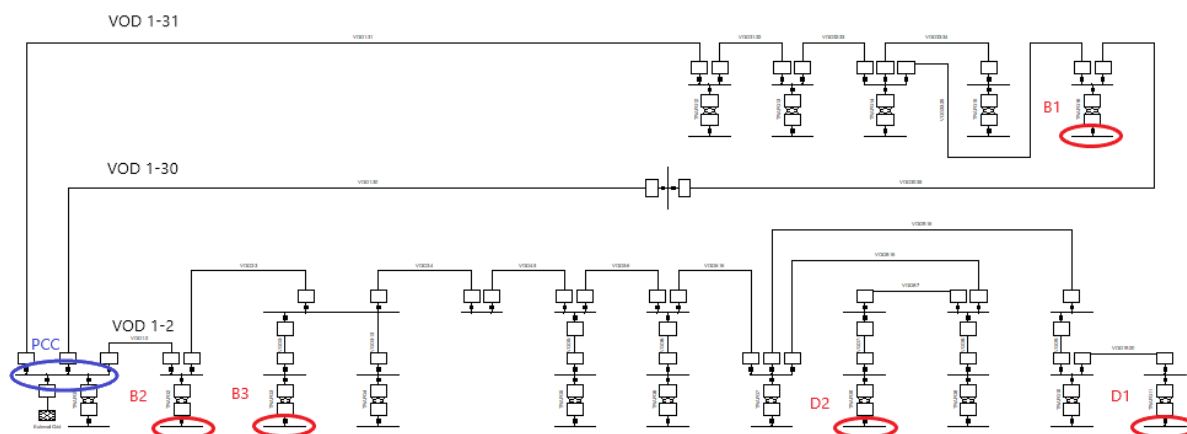


Slika 7.9. Valni oblik struje za Slučaj 3

Iz slike 7.9 može se primijetiti da je amplituda jedne faze (crvene) ponovno veća od preostalih. Razlog tome je isti kao i u prvom slučaju, a također se jasno može primijetiti nepravilnost te iste faze.

7.2.4. Slučaj 4

U ovom slučaju ASIC uređaji spojeni su na sabirnice koje su fizički najdalje, ali i na one koje su fizički najbliže, odnosno slučaj 4 je kombinacija slučaja 2 i slučaja 3. Udaljenosti sabirnica od PCC čvora je jednaka je kao u prošlim primjerima. Prikaz mreže i potrebnih oznaka za slučaj 4 je na slici 7.10.

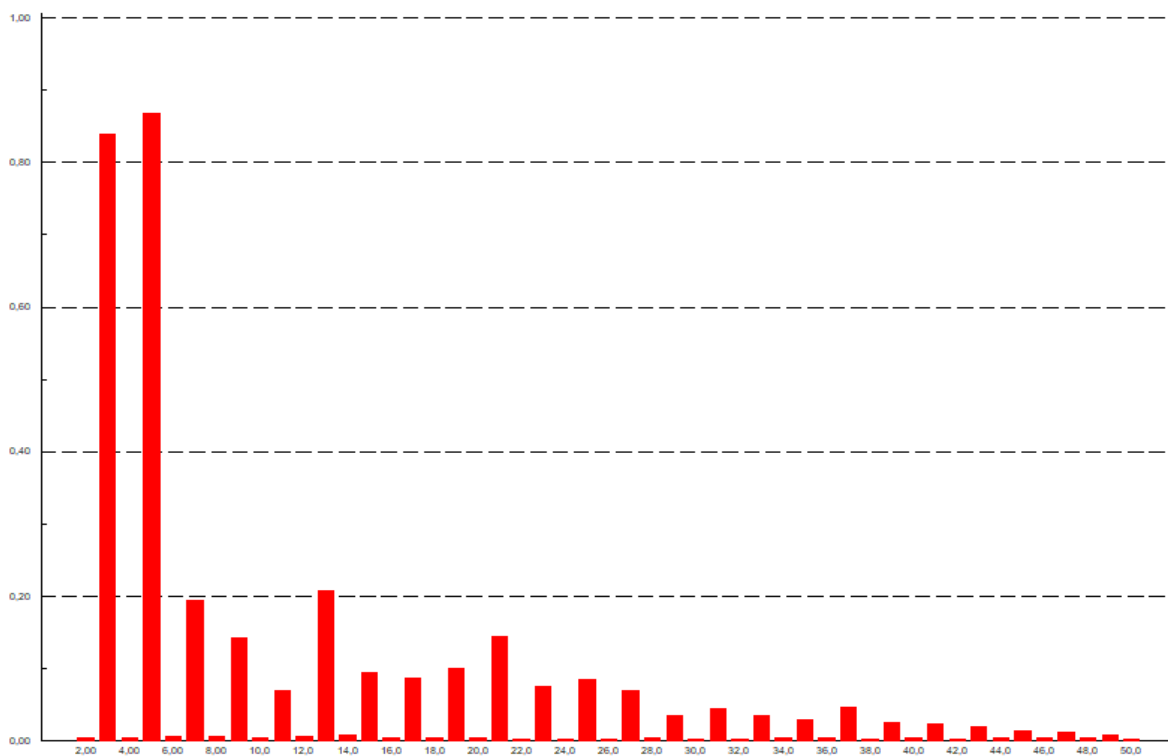


Slika 7.10. Slika mreže za Slučaj 4

Tablica 7.4. Rezultati simulacije za Slučaj 4

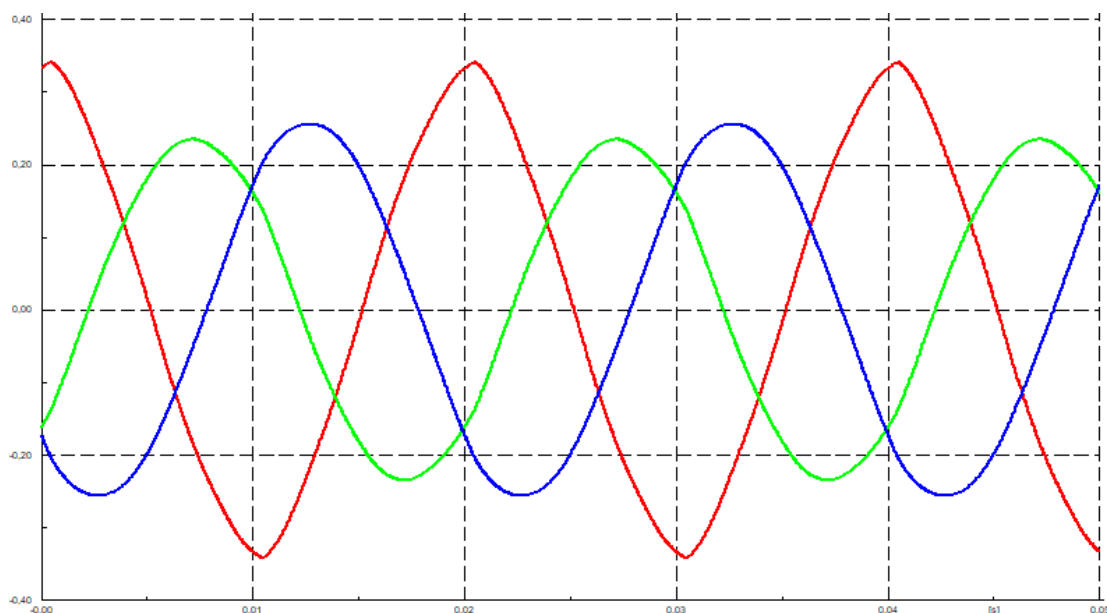
Napon (p.u.)	Frekvencija (p.u.)	THDU na PCC čvor (%)	THDU na vodu 1-2 (%)	THDU na vodu 1-30 (%)	THDU na vodu 1-31 (%)	THDU prema nadređenoj mreži (%)
1.04	1.00	3.37	3.49	1.893	1.027	2.303

Uzevši u obzir znatno veći broj ASIC uređaja u ovom slučaju, bilo je za očekivati da će se pokazatelji kvalitete električne energije na PCC čvoru dodatno pogoršati u usporedbi s prošlim slučajevima. Iako se to dokazalo točnim, svi promatrani parametri se nalaze unutar propisanih granica. Na slici 7.11. prikazan je harmonijski spektar struje za ovaj slučaj.



Slika 7.11. Harmonijski spektar struje za Slučaj 4

Harmonijski spektar struje izgledom odgovara harmonijskom spektru iz prošlih primjera, no udio pojedinog harmonika je veće vrijednosti što je bilo i očekivano jer je u mrežu priključen veći broj ASIC uređaja. Prikaz valnog oblika struje je na slici 7.12.



Slika 7.12. Valni oblik struje za Slučaj 4

Povećani broj ASIC uređaja u mreži rezultirao je dodatnim povećanjem amplitude struje jedne faze. Na toj fazi je i najizraženije odstupanje valnog oblika struje od sinusnoga vala.

7.2.5. Usporedba rezultata

Tablica 6.5. Rezultati svih provedenih simulacija

	Napon (p.u.)	Frekvencija (p.u.)	THDU na PCC čvoru (%)	THDU na vodu 1-2 (%)	THDU na vodu 1-30 (%)	THDU na vodu 1-31 (%)	THDU prema nadređenoj mreži (%)
Slučaj 1	1.02	1	1.25	0.469	0.475	0.437	0.876
Slučaj 2	1.01	1	0.76	1.059	0.264	0.264	0.519
Slučaj 3	1.04	1	2.45	2.3	0.759	0.759	1.695
Slučaj 4	1.04	1	3.37	3.49	1.027	1.027	2.303

U svakoj od provedenih simulacija frekvencija ostaje nepromijenjena dok se napon povećava. Napon se maksimalno povećao 4% i time ne bi izašao iz granica propisanih normom EN50160. Također u svakoj simulaciji je ukupno harmonijsko izobličenje manje od propisanih 8%. Najmanje ukupno harmonijsko izobličenje na PCC čvoru je u Slučaju 2 kada su ASIC uređaji priključeni na najvećoj udaljenosti u mreži, a najveće je ako su ASIC uređaji priključeni na sabirnice koje su najbliže PCC čvoru. Slučaj 4 se razlikuje od ostalih slučajeva jer se iz slike 7.12 može primijetiti i nepravilnosti kod faze s najmanjom amplitudom (zelena).

9. ZAKLJUČAK

U elektroenergetskom sustavu svakodnevno se povećava broj potrošača i svaki od njih ima utjecaj na sustav, odnosno na kvalitetu električne energije u mreži. Novi uređaji i moderna industrijska rješenja koja olakšavaju svakodnevnicu su često sastavljeni od raznih pretvarača, izmjenjivača, mikroprocesora i sl. Zbog toga je neophodno redovno pratiti pokazatelje kvalitete električne energije preciznim uređajima poput PQ-Box 200 kako bi se smanjili nepotrebni gubici.

U radu je obrađena analiza utjecaja ASIC sklopovlja na kvalitetu električne energije. ASIC uređaji su se pojavili 2013. godine i od tada se njihov broj, a tako i snaga povećavaju. Iako ASIC uređaji nisu toliko popularni u Hrvatskoj, oni predstavljaju jedan noviji i „moderan“ uređaj s kakvim će se mreža susretati u budućnosti. Mjerenje se provodilo kroz dva tjedna, nakon čega se vršila analiza rezultata. U oba tjedna ASIC uređaj je zadovoljio sve parametre kvalitete električne energije koji su propisani europskom normom EN 50160.

ASIC uređaji su potrošači relativno malih snaga. Konkretno, u ovom radu je korišten uređaj snage 1350 W. U stvarnosti ovakvi uređaji se rijetko spajaju samostalno na mrežu. Najčešće su to postrojenja od nekoliko desetaka uređaja. Zbog toga je u programskom paketu DigSilent PowerFactory modelirano prijašnje mjereno ASIC sklopovlje.

Uz metodu skaliranja ostvaren je model jednoga postrojenja za rudarenje koji je priključen na distributivnu mrežu. Pokazatelji kvalitete električne energije pratili su se samo na PCC čvoru jer je utjecaj harmonika na nadređenu mrežu od velike važnosti. Simulacija se odradila za četiri slučaja kako bi se mogla obratiti pažnja na korelaciju udaljenosti izvora harmonika od PCC čvora i parametara kvalitete električne energije na istom. Simulacijom je pokazano da udaljenost izvora harmonika od PCC čvora utječe na promjenu parametara kvalitete električne energije na PCC čvoru i to na taj način da pri većoj udaljenosti imamo manje poremećaje na PCC čvoru i obrnuto. U svakoj od provedenih simulacija svi parametri zadovoljili su granice koje propisuje norma EN 50160.

Sažetak

Svakim danom se povećava broj potrošača u sustavu. Većina novih potrošača sadrže neke sklopove energetske elektronike. Takvi uređaji imaju jako velik utjecaj na parametre kvalitete električne energije. Ako je veliki broj takvih potrošača priključen na mrežu može doći do znatnih promjena napona i frekvencije koje će rezultirati raznim problemima prilikom opskrbe, a može doći i do potpunog prekida opskrbe. Najveći problem takvih trošila je pojava viših harmonika koji predstavljaju odstupanje valnog oblika od pravilne sinusoide. Problemi ovog tipa rješavaju se pomoću aktivnih i pasivnih filtera iako se često koristi i kombinacija. Stoga, potrebno je provjeriti utjecaj jednog takvog trošila na pokazatelje kvalitete električne energije. ASIC uređaji se jako rijetko samostalno spajaju na mrežu, većinom su to postrojenja od nekoliko kilovata. Zbog nemogućnosti mjerenja kvalitete električne energije cijelog postrojenja, problem je riješen pomoću metode skaliranja i simulacijom u programskom alatu.

Ključne riječi: Kvaliteta električne energije, harmonici, filteri, ASIC sklopovlje

Abstract

The number of consumers in the system is increasing every day. Most of the new consumers contain some power electronics circuits. Such devices have a very large influence on the parameters of the power quality. If a large number of such consumers are connected to the network, significant changes in voltage and frequency may occur, which will result in various problems during supply, and there may also be a complete interruption of supply. The biggest problem of such consumers is the appearance of current harmonics, which represent a deviation of the waveform from a regular sinusoid. Problems of this type are solved using active and passive filters, although a combination is often used. Therefore, it is necessary to check the influence of such a consumer on the indicators of the power quality. ASIC devices are rarely connected to the network independently, mostly they are plants of several kilowatts. Due to the impossibility of measuring the quality of electricity of the entire plant, the problem was solved using the scaling method and simulation in software tool.

Key words: Power quality, harmonics, filters, ASIC hardware

Literatura

- [1] Alexandar Kusko, Marc T. Thompson, "Power Quality in Electrical Systems", 2007.
- [2] Roger C. Dugan, Mark F. McGranham, Surya Santoso, H. Wayne Beaty, "Electrical Power Systems Quality, Second Edition", 2004.
- [3] Dražen Barukčić, Ante Pavić, Ivan Periša, Mate Lasić, " Osvrt Na Novo Izdanje Norme En50160 Iz 2010. Godine", 2012.
- [4] SURESH MIKKILI, Anup Kumar Panda, "Power Quality Issues, Current Harmonics", 2016.
- [5] Nemanja Katić, https://erg.hr/wp-content/uploads/2021/07/07_Pasivni_i_aktivni_filteri.pdf, 2017.
- [6] R. U. Ghanmare, S. P. Piprode, S. P. Gawande, R. P. Tondare, " Application Of Hybrid Filter For Harmonic Mitigation In Low Voltage Distribution System", 2014.
- [7] Bitmain, <https://support.bitmain.com/hc/en-us/articles/360020079754-S9j-Specifications>, 2019.
- [8] Jianqu Zhu, Dong Xie, Feng Wang, Taiqiang Cao, "Study on the Harmonics of Switching Power Supply", 2012.
- [9] Bitmain, " APW3+---12-- 160000 PSU Series User Guide", 2019.
- [10] A.Eberle GmbH @ Co. KG, „Commissioning WinPQ System“, 2019.
- [11] Zvonimir Klaić, "Kvaliteta Električne Energije – Mjerenja Prema Normi EN50160", 2003.

Životopis

Mario Beretić rođen je 9.listopada 1997. godine u Osijeku. Prvo je pohađao Osnovnu školu “Mladost”, a zatim 2012. upisuje Elektrotehničku i Prometnu školu Osijek koju je završio kao tehničar za računalstvo. Iste te godine upisuje stručni studij elektroenergetike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Stručni studij završava 2019. godine, a potom upisuje diplomski studij Elektroenergetski sustavi kojeg s obranom ovog rada privodi kraju.