

Sustav za analizu kvalitete električne energije zasnovan na industrijskom računalu

Kirn, Filip

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:168:049896>

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

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



Repository / Repozitorij:

[FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 65

**SUSTAV ZA ANALIZU KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE
ZASNOVAN NA INDUSTRIJSKOM RAČUNALU**

Filip Kirn

Zagreb, lipanj 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 65

**SUSTAV ZA ANALIZU KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE
ZASNOVAN NA INDUSTRIJSKOM RAČUNALU**

Filip Kirn

Zagreb, lipanj 2024.

DIPLOMSKI ZADATAK br. 65

Pristupnik: **Filip Kirn (0036518618)**
Studij: Informacijska i komunikacijska tehnologija
Profil: Automatika i robotika
Mentor: prof. dr. sc. Igor Erceg

Zadatak: **Sustav za analizu kvalitete električne energije zasnovan na industrijskom računalu**

Opis zadatka:

U radu je potrebno proučiti specifikacije industrijskog računala i distribuiranog modula s mogućnosti naduzorkovanja (oversampling). Izraditi program za računanje totalne harmoničke distorzije (THD) i frekvencijskog spektra mjerenih ulaznih i izlaznih napona i struja frekvencijskog pretvarača. Validirati izrađeni program na jednofaznom i trofaznom frekvencijskom pretvaraču. Također, potrebno je izraditi vizualizacijsko sučelje za prikaz izračunatih vrijednosti THD-a, odnosno frekvencijskog spektra.

Rok za predaju rada: 28. lipnja 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 65

**SUSTAV ZA ANALIZU KVALITETE ELEKTRIČNE
ENERGIJE ZASNOVAN NA INDUSTRIJSKOM
RAČUNALU**

Filip Kirn

Zagreb, rujan, 2024.

DIPLOMSKI ZADATAK br. 65

Pristupnik: **Filip Kirn (0036518618)**
Studij: Informacijska i komunikacijska tehnologija
Profil: Automatika i robotika
Mentor: prof. dr. sc. Igor Erceg

Zadatak: **Sustav za analizu kvalitete električne energije zasnovan na industrijskom računalu**

Opis zadatka:

U radu je potrebno proučiti specifikacije industrijskog računala i distribuiranog modula s mogućnosti naduzorkovanja (oversampling). Izraditi program za računanje totalne harmoničke distorzije (THD) i frekvencijskog spektra mjerenih ulaznih i izlaznih napona i struja frekvencijskog pretvarača. Validirati izrađeni program na jednofaznom i trofaznom frekvencijskom pretvaraču. Također, potrebno je izraditi vizualizacijsko sučelje za prikaz izračunatih vrijednosti THD-a, odnosno frekvencijskog spektra.

Rok za predaju rada: 28. lipnja 2024.

Iskreno se zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Igoru Ercegu na ukazanom povjerenju, vodstvu i pomoći pri izradi ovoga rada. Također, zahvalio bih se i mojoj obitelji i prijateljima na nesebičnoj podršci koju su mi pružali tijekom cjelokupnog studija.

Sadržaj

1. Uvod	3
2. Opis problema i konfiguracija mjernog postava	4
2.1. Industrijsko računalo	4
2.2. EtherCAT Terminal za mjerenje snage	5
2.3. Frekvencijski pretvarač	7
3. Kvaliteta električne energije	8
3.1. Frekvencijski spektar ulaznih signala	9
3.2. Ukupno harmonijsko izobličenje (THD)	11
4. Algoritam određivanja koeficijenta harmonijskog izobličenja	14
4.1. Mjerenje ulaznih signala napona i struje	14
4.1.1. Programska implementacija	15
4.2. Određivanje frekvencijskog spektra signala	17
4.2.1. Programska implementacija	18
4.3. Određivanje faktora totalne harmoničke distorzije	20
4.3.1. Programska implementacija	20
5. Vizualizacijsko sučelje	22
6. Eksperimentalna verifikacija	23
6.1. Spajanje mjernog modula	23
6.1.1. Akvizicijski mjerni uređaj	24
6.2. Rezultati mjerenja - spoj na mrežu	25
6.3. Rezultati mjerenja - prazni hod	26
6.4. Rezultati mjerenja - 2. radna točka	28

6.5. Rezultati mjerenja - 3. radna točka	30
6.6. Rezultati mjerenja - 4. radna točka	33
6.7. Rezultati mjerenja - 5. radna točka	35
7. Zaključak	39
Literatura	40
Sažetak	42
Abstract	43

1. Uvod

Analiza kvalitete električne energije jedan je od ključnih postupaka kojime procjenjujemo stabilnost, pouzdanost i učinkovitost električnih sustava. Omogućuje praćenje kvalitete električne energije te identifikaciju potencijalnih nedostataka koji dovode do narušavanja iste u električnim sustavima. Neki od uzroka pada kvalitete uključuju pregrijavanje komponenata, prenapon i proboj izolacije, degradacija opreme zbog starosti, uključivanje induktivnih tereta, harmonijska distorzija, nizak faktor snage itd. Iz tog razloga postoje sustavi za kontinuirani nadzor kvalitete električne energije koji mogu ukazati na potencijalne probleme što je i motivacija ovog rada, pri čemu će se ovaj rad fokusirati na određivanje kvalitete električne energije kroz koeficijent ukupnog harmonijskog izobličenja (THD).

Korištenjem Beckhoff IPC-a i pripadajućeg mjernog modula izmjereni su naponi i struje triju faza na izlazu sinkronog generatora. Prikupljeni podaci obrađeni su algoritmom za izračun frekvencijskog spektra signala, te su analizom harmonika određene THD vrijednosti. Mjerenja su obavljena u 5 radnih točaka od kojih je 1. točka rad u praznom hodu dok se kod ostalih točaka, nakon sinkronizacije s mrežom, mijenjala radna i jalova snaga.

U svrhu provjere izračunatih vrijednosti se koriste vrijednosti dobivene analizatorom snage te usporedbom tih dvaju setova podataka, odnosno na temelju odstupanja, donešen je zaključak o tome može li Beckhoff IPC poslužiti za određivanje kvalitete električne energije što je i cilj ovog diplomskog rada.

2. Opis problema i konfiguracija mjernog postava

S obzirom na to da je THD vrijednost vrlo važan pokazatelj kvalitete električne energije potrebno je pronaći način na koji će se iz prikupljenih mjerenja njegova vrijednost i odrediti. Ovaj problem određivanja vrijednosti THD faktora uključivat će prikupljanje mjerenja napona i struje svake od triju faza u praznom hodu te u četiri radne točke, određivanje frekvencijskog spektra napona i struje u svakoj od njih te računanje faktora preko formule i viših harmonika dobivenih iz spektra. Dodatno, u svrhu lakšeg prikaza podataka potrebno ih je i vizualizirati. Sve navedeno potrebno je ostvariti koristeći zadani mjerni postav.

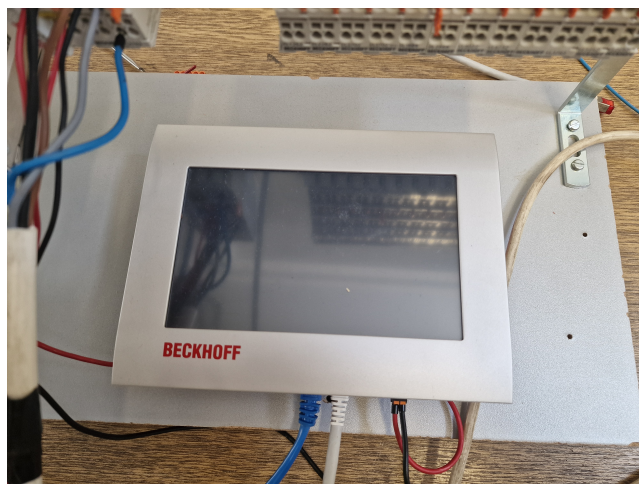
Mjerni postav uključuje industrijsko računalo (IPC) za obradu podataka te vizualizaciju prikupljenih i obrađenih podataka, EtherCAT modul koji predstavlja vezu između IPC-a i mjernog modula te sami mjerni modul za mjerenje fizikalnih veličina. Dodatno, uz mjerni postav koriste se mjerni i strujni transformatori, frekvencijski pretvarač, sinkroni generator i analizator snage.

2.1. Industrijsko računalo

Za obradu prikupljenih podataka te prikaz obrađenih podataka i potrebne vizualizacije koristi se industrijsko računalo Beckhoff CP6706-0001-0050 (slika 2.1.).

S obzirom da industrijsko računalo za komunikaciju koristi EtherCAT komunikacijski protokol potrebno je dodati poveznicu između IPC-a i EtherCAT terminala koji se koristi za mjerenje vrijednosti napona i struje. Veza između industrijskog računala i EtherCAT terminala je u ovome slučaju EtherCAT coupler EK1100 (slika 2.2.).

EK1100 ima dva RJ45 priključka. Jedan priključak koristi se za povezivanje couplera s mrežom dok drugi priključak služi za opcionalno povezivanje dodatnih EtherCAT ure-



Slika 2.1. Industrijsko računalo CP6706-0001-0050 na mjernom postavu

đaja u istom segmentu. Osim toga, EtherCAT coupler može se koristiti za proširenje ili za postavljanje linijske ili zvjezdaste topologije [1]. EK1100 efektivno konvertira zaprimljene telegrame iz Ethernet 100BASE-TX u eBUS reprezentacije signala te uz to i napaja priključene terminale strujom potrebnom za eBus komunikaciju. eBus sučelje se u ovome slučaju koristi iz razloga što su, za razliku od RS-232 sučelja iz kojeg je izvedeno, razine napona implementirane na način da je omogućeno napajanje svih sudionika sa-birnice koji u konačnici koriste stabilizator napona za dobivanje ulaznog napona 5V.



Slika 2.2. EK1100 EtherCAT coupler [1]

2.2. EtherCAT Terminal za mjerenje snage

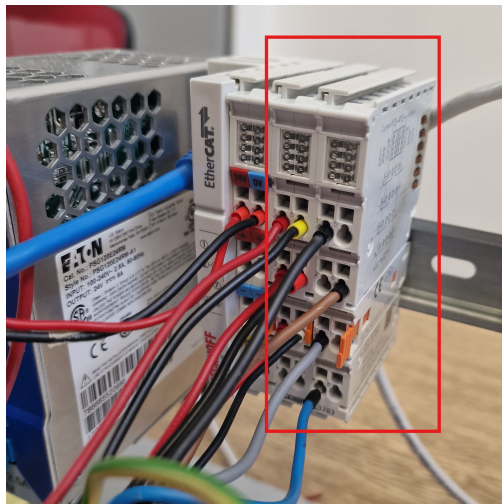
Za mjerenje fizikalnih veličina u izmjeničnom trofaznom sustavu koristi se EtherCAT terminal EL3783 (slika 2.3.). Za svaku fazu moguće je mjerenje iznosa efektivnog napona do 520 V i efektivne struje do 6.5 A koji se uzorkuju kao trenutne vrijednosti s

16-bitnom rezolucijom.

Bitno je istaknuti da EL3783 modul dolazi s opcijom naduzorkovanja (oversampling), što znači da se signal unutar terminala uzorkuje frekvencijom većom od standardne. Ova značajka značajno povećava preciznost akvizicije signala. Umjesto da se signal uzorkuje samo jednom po komunikacijskom ciklusu, oversampling omogućava da se signal šalje više puta unutar istog ciklusa, koristeći frekvenciju koja je definirana unutar komunikacijskog ciklusa.

Faktor naduzorkovanja predstavlja broj uzoraka unutar jednog komunikacijskog ciklusa i može imati vrijednosti između 1 i 100 u slučaju EL3783 modula. Ova opcija omogućava dodatno poboljšanje izgleda krivulje signala, čineći je glatkijom i detaljnijom. Povećanje broja uzoraka unutar ciklusa smanjuje šum i omogućava precizniju analizu signala, što je posebno važno u aplikacijama koje zahtijevaju visok stupanj točnosti.

Oversampling također omogućava detekciju i analizu brzih promjena u signalu koje bi mogle biti propuštene pri standardnoj frekvenciji uzorkovanja. Na taj način, EL3783 modul osigurava visokokvalitetno praćenje i mjerenje signala, pružajući korisnicima pouzdane i detaljne podatke za daljnju analizu i optimizaciju procesa. Ova funkcionalnost je posebno korisna u industrijskim aplikacijama gdje je preciznost mjerenja ključna za održavanje visoke učinkovitosti i kvalitete proizvodnje.



Slika 2.3. EL3783 EtherCAT Terminal označen crvenom linijom

Za mjerenje vrijednosti struje svake faze na izlazu iz frekvencijskog pretvarača koristi se strujni mjerni transformator CTSCM40-200/5A (slika 2.4.)



Slika 2.4. Strujni mjerni transformator CTSCM40-200/5A [2]

2.3. Frekvencijski pretvarač

Frekvencijski pretvarač, za čije se izlazne vrijednosti napona i struja računa frekvencijski spektar te ukupna harmonijska distorzija, jest Siemens MicroMaster 440 6SE6440-2UD38-8FA1. Ovaj varijabilni frekvencijski pogon (VFD) koristi se za upravljanje brzinom AC motora u različitim industrijskim primjenama jer podržava širok raspon snage do 110 kW, što ga čini dovoljno svestranim za korištenje kako u manjim strojevima, tako i u velikim industrijskim procesima.

Jedna od ključnih značajki MicroMastera 440 su njegove napredne mogućnosti upravljanja motorom. Pruža vektorsko upravljanje i upravljanje bez senzora, što omogućuje precizno reguliranje motora i poboljšane performanse momenta, čak i pri niskim brzinama. Osim toga, programabilnost ovog pogona omogućuje korisnicima prilagodbu prema specifičnim potrebama aplikacije, zahvaljujući unaprijed ugrađenim makronaredbama i programabilnim logičkim funkcijama, čime se osigurava prilagodljivost u različitim scenarijima.

Dizajniran je za jednostavnu integraciju u složene sustave automatizacije, podržavajući industrijske komunikacijske protokole kao što su PROFIBUS, DeviceNet i CANopen. Optimiziranjem brzine motora prema potrebama, ovaj pogon značajno smanjuje potrošnju energije, što je posebno korisno u primjenama poput pumpi, ventilatora i kompresora. Izrazito je svestran što ga čini pogodnim za različite industrije, uključujući proizvodnju, HVAC sustave, postrojenja za obradu vode i otpadnih voda, pa čak i u radu dizalica i vitla, gdje je precizna kontrola momenta ključna.

3. Kvaliteta električne energije

Kako bi se osigurao ispravan rad električnih uređaja, važno je postaviti zahtjeve na kvalitetu isporučene električne energije. To znači da se očekuje da električna energija bude u skladu s nazivnim vrijednostima i unutar određenog raspona tolerancije. Osim same vrijednosti napona, također je bitno razmotriti devijacije od idealnog sinusoidnog valnog oblika, koje su dodatni pokazatelj kvalitete električne energije. Ove devijacije mogu nastati zbog nelinearnih karakteristika samih električnih uređaja, koji ne povlače struju proporcionalno naponskoj vrijednosti [3] [4].

Kvaliteta električne energije može se procijeniti prema nekoliko tehničkih parametara:

- treperenje napona (flicker),
- naponske propade i prekide,
- prenapon i impulsni prenapon,
- nesimetriju napona,
- viši harmonici.

Treperenje napona predstavlja cikličke oscilacije u vrijednosti napona uzrokovane naglim i učestalim promjenama opterećenja na električnim uređajima. Ove promjene mogu uzrokovati vidljive fluktuacije u svjetlosti žarulja i smanjenje učinkovitosti uređaja.

Naponski propadi, s druge strane, su privremena smanjenja napona ispod određene granice, najčešće 10% ispod nominalne vrijednosti, dok prekidi predstavljaju još značajnije smanjenje, pad napona ispod 1% od nominalne vrijednosti. Mogu uzrokovati privremeno isključivanje uređaja ili njihov neispravan rad.

Prenapon i impulsni prenapon su uvjeti u kojima vrijednost napona privremeno poraste

iznad određene granice, obično 10% iznad nominalne vrijednosti. Impulsni prenapon može biti vrlo kratkotrajan, ali je intenzivan i može značajno oštetiti električne uređaje. Nesimetrija napona odnosi se na razlike u naponskim vrijednostima između faza u trofaznim sustavima ili na kutove između faza koji odstupaju od idealnih 120° . Najčešći uzrok ove nesimetrije je nesimetrično opterećenje među fazama, što može dovesti do nerazmjernog rasporeda snage i smanjenja efikasnosti sustava.

Jedan od najvažnijih tehničkih parametara koji se razmatra u ovom radu su viši harmonici i njihov utjecaj na resultantni valni oblik signala. Viši harmonici su sinusoidne komponente periodičnog vala s frekvencijama koje su cjelobrojni višekratnici osnovne frekvencije. Na primjer, ako je osnovna frekvencija 50 Hz, frekvencija drugog harmonika će biti 100 Hz, frekvencija trećeg harmonika 150 Hz, i tako dalje.

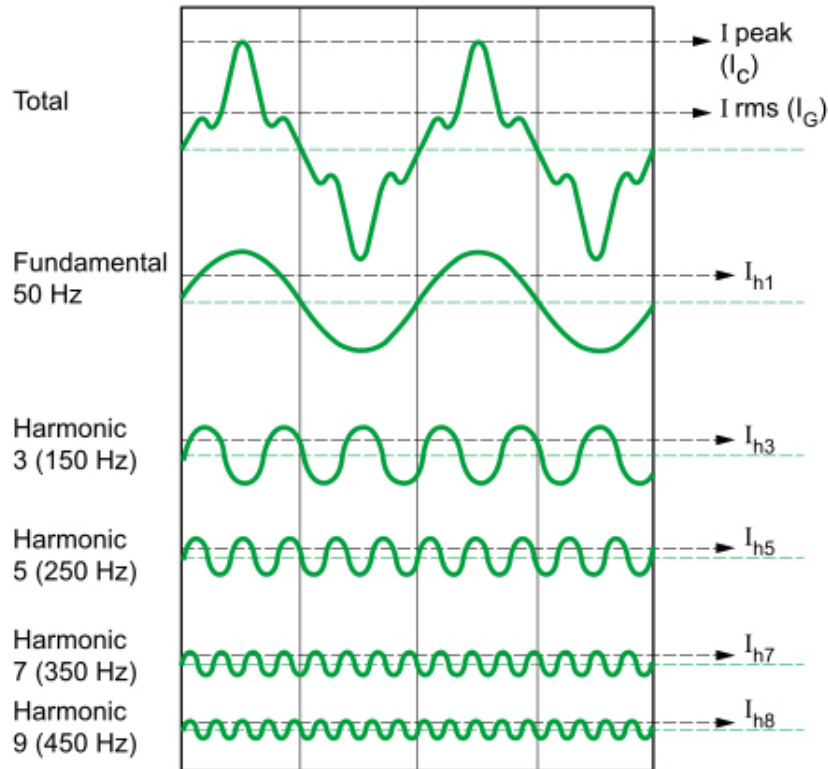
3.1. Frekvencijski spektar ulaznih signala

Kada se razmatra konačni valni oblik, odnosno valni oblik koji se mjeri na ulazu EL3783 modula, važno je razumjeti da on predstavlja niz komponenata viših harmonika. Da bi se dobio pregled frekvencijskog spektra mjerenog ulaznog signala, potrebno je provesti rastavljanje tog signala na njegove komponente. Ovo rastavljanje omogućava analiziranje frekvencijskog sadržaja signala, čime se dobiva detaljna slika o prisutnosti različitih harmonika unutar signala.

Ulazni signal, koji se prvotno prikazuje u vremenskoj domeni, može se prenijeti u frekvencijsku domenu primjenom Fourierove analize. Ova analiza koristi algoritme koji računaju Diskretnu Fourierovu Transformaciju (DFT) ulaznog niza vrijednosti. Fourierova analiza omogućava pretvaranje signala iz vremenske domene u frekvencijsku domenu, gdje se može precizno identificirati spektralni sadržaj signala.

Kada se signal reprezentira u frekvencijskoj domeni, niz vrijednosti koji je dobiven primjenom DFT-a predstavlja komponente osnovnog harmonika kao i svih viših harmonika prisutnih u signalu. Svaka od ovih komponenti odgovara određenoj frekvenciji i doprinosi ukupnom obliku vala. Analizom ovih komponenti moguće je detaljno razumjeti kako osnovni harmonik i viših harmonici utječu na konačni valni oblik signala te identificirati sve značajne varijacije i nesavršenosti u signalu koje mogu biti uzrokovane prisutnošću viših harmonika (slika 3.1.).

Diskretna Fourierova transformacija pretvara konačan niz ulaznih uzoraka kontinuirane funkcije u niz koji predstavlja uzorke diskretno-vremenske Fourierove transformacije (DTFT) [5] [6].



Slika 3.1. Viši harmonici harmonijskog spektra [7]

Niz kompleksnih brojeva $\{x_n\} := x_0, x_1, x_2, \dots, x_{N-1}$ transformira se u niz kompleksnih brojeva $\{X_k\} := X_0, X_1, X_2, \dots, X_{N-1}$ definiran jednažbom 3.1

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (3.1)$$

pri čemu N predstavlja ukupan broj uzoraka u ulaznom signalu, k predstavlja indeks frekvencijskog uzorka a n predstavlja indeks vremenskog uzorka. Za svaki frekvencijski indeks k računa se $X[k]$ pri čemu ovaj koeficijent predstavlja amplitudu i fazu sinusoide frekvencije k/N ciklusa po uzorku.

Iako je DFT vrlo moćan alat za analizu signala velik nedostatak je brzina izvođenja operacija, osobito kod velike količine uzoraka te kod izvršavanja operacija u stvarnome vremenu a to je upravo ono što je potrebno u slučaju ovog rada. Izračun koristeći DFT

zahtjeva približno N^2 složenih kalkulacija te je vremenski i memorijski vrlo zahtjevna operacija dok se isti rezultat može postići koristeći Brzu Fourierova transformacija (FFT) i to uz približno $N \cdot \log_2(N)$ operacija.

FFT je efikasan algoritam za izvršavanje Diskretne Fourierove Transformacije i pri vrlo velikom broju uzoraka značajno smanjuje vrijeme potrebno za postizanje rezultata.

Najpoznatiji algoritam za FFT je Cooley-Tukey koji je najčešće izveden u radix-2 decimation-in-time (DIT) varijanti. Funkcionira na principu podjele ulaznog niza signala, koji obavezno sadrži broj uzoraka duljine 2^m , na dva podniza, pri čemu jedan podniz ima parne indekse $x[0], x[2], x[4], \dots$ a drugi podniz neparne $x[1], x[3], x[5], \dots$.

Krenuvši od već spomenute definicije DFT-a:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-i \frac{2\pi kn}{N}} \quad (3.2)$$

Radimo podjelu izvornog izraza na dva manja gdje jedan sadrži parne indekse frekvencijskog uzorka a drugi neparne:

$$= \sum_{m=0}^{N/2-1} x[2m] \cdot e^{-i \frac{2\pi k(2m)}{N}} + \sum_{m=0}^{N/2-1} x[2m+1] \cdot e^{-i \frac{2\pi k(2m+1)}{N}} \quad (3.3)$$

$$= \sum_{m=0}^{N/2-1} x[2m] \cdot e^{-i \frac{2\pi km}{N/2}} + e^{-i \frac{2\pi k}{N}} \sum_{m=0}^{N/2-1} x[2m+1] \cdot e^{-i \frac{2\pi km}{N/2}} \quad (3.4)$$

Kako bi se broj operacija smanjio sa trenutnih N^2 primjenjuje se svojstvo simetrije jer je raspon od k jednak $0 \leq k < N$, a raspon n je $0 \leq n < M \equiv N/2$ što znači da se mora obaviti samo pola kalkulacija za svaki podniz i ponavljajući ovaj postupak sve dok on ima smisla odnosno sve dok broj kalkulacija ne dostigne $N \cdot \log_2(N)$.

3.2. Ukupno harmonijsko izobličenje (THD)

Harmonijsko izobličenje predstavlja prisutnost neželjenih frekvencija unutar sustava koje su cjelobrojni višekratnici osnovne frekvencije koja je približno 50 Hz. Ove neželjene frekvencije mogu ozbiljno utjecati na rad električnih sustava, uzrokujući razne smetnje i smanjenje efikasnosti. Harmonijska izobličenja nastaju zbog nelinearnih karakteris-

tika pojedinih elemenata sustava, koji zbog svojih specifičnih svojstava uvode dodatne frekvencije u sustav. Takva izobličenja mogu biti posebno problematična jer se često manifestiraju kao višekratnici osnovne frekvencije, što može dovesti do rezonancije i dodatnog opterećenja na sustav.

Izobličenja se mogu podijeliti na naponska i strujna izobličenja. Naponski harmonici su izobličenja na naponskom valnom obliku, koja se pojavljuju na višekratnicima osnovne frekvencije. Ta izobličenja uzrokuju nelinearni tereti koji povlače nesinusnu struju iz sinusnog naponskog izvora, što rezultira promjenom oblika naponskog vala. Nelinearni tereti, kao što su ispravljači, frekventni pretvarači, računalna oprema i drugi električni uređaji, ne koriste struju na potpuno sinusni način, već stvaraju harmonijske komponente koje iskrivljuju naponski valni oblik. To može dovesti do različitih problema, uključujući pregrijavanje opreme, povećane gubitke u sustavu i smanjenje energetske efikasnosti.

S druge strane, strujni harmonici su izobličenja koja se pojavljuju na strujnim valnim oblicima i također su uzrokovana nelinearnim teretima. Ovi tereti struju vuku u pulsivima umjesto u glatkom sinusnom obliku, čime se stvaraju harmonijske komponente struje. Pojava strujnih harmonika može imati niz negativnih posljedica na električne sustave. Prije svega, njihova prisutnost uzrokuje prekomjerno zagrijavanje vodiča, transformatora i motora, što posljedično dovodi do kvarova, smanjenja životnog vijeka opreme i povećanih troškova održavanja. Pregrijavanje može biti posebno opasno jer može dovesti do oštećenja izolacije i eventualnog izgaranja komponenti, čime se značajno povećava rizik od kvarova i prekida u radu sustava.

Osim toga, harmonici mogu utjecati na kvalitetu napajanja, stvarajući smetnje koje mogu ometati rad osjetljivih električnih uređaja. Stoga je vrlo važno pravilno upravljati harmonijskim izobličenjima, koristeći odgovarajuće filtre i druge metode za njihovo smanjenje kako bi se osigurao stabilan i pouzdan rad električnih sustava.

Ukupno harmonijsko izobličenje je mjera efektivne vrijednosti harmonijskih komponenta izobličenog valnog oblika odnosno ono je omjer korijena sume kvadrata efektivne vrijednosti napona ili struje svih harmonika počevši od drugoga i efektivne vrijednosti napona ili struje osnovnog harmonika [8].

Jednadžba 3.5 prikazuje matematičku definiciju THD-a:

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1} \quad (3.5)$$

Kao što je prethodno opisano, koristeći FFT nad izmjerenim podacima struje i napona dobivamo amplitude struje/napona svakog harmonika koje koristimo u izračunu THD faktora.

4. Algoritam određivanja koeficijenta harmonijskog izobličenja

Algoritam određivanja THD faktora uključuje prikupljanje vrijednosti napona i struje, pohranu podataka na način prikladan za određivanje frekvencijskog spektra tj. osnovnog i viših harmonika te konačno i određivanje THD faktora.

4.1. Mjerenje ulaznih signala napona i struje

Amplitudne vrijednosti napona i struje mjere se s 16-bitnom rezolucijom te se prikazuju kao paketi s naduzorkovanjem u procesnoj slici. Procesiranje podataka istovremeno se obavlja za sve postojeće kanale. Zaprimljene vrijednosti nakon analogno-digitalne konverzije su 16-bitni cjelobrojni brojevi, odnosno vrijednosti koje se mogu pojaviti su u rasponu -32768 do 32767. S obzirom na to da mjerni opseg iznosi 130% nominalnog mjerenog opsega tada iznos napona po jedinici iznosi 22.5 mV za nominalni iznos od 400 V, što daje maksimalnu mjerenju vrijednost napona 737.2575 V, te 5.75 mV za nominalni iznos 100V, što daje maksimalnu mjerenju vrijednost napona 188.416V. Analogno vrijedi i za mjerene vrijednosti struje gdje je za raspon 5 A iznos struje po jedinici jednak 281 μ A, što daje maksimalni mjerljivi iznos struje 9,207527 A, te za raspon od 1 A 56.2 μ A, što daje maksimalni iznos struje 1,8415054 A za ovaj opseg. [9]

U početnom trenutku kada na mjerni modul nije priključen mjerni transformator cjelobrojne analogne vrijednosti napona i struje kreću se u rasponu -4 do +4 što ukazuje da u sustavu postoji zanemarivi iznos šuma čiji uzrok mogu biti fluktuacije zbog elektromagnetskih smetnji elektronike u blizini ali i unutarnji šum generiran od strane analogno-digitalno pretvarača i ostale elektronike unutar samog mjernog modula. Mjerni modul EL3783 ima mogućnost oversamplinga, odnosno ovisno o faktoru naduzorkovanja se po jednom ciklusu izvođenja bilježi više od jednog uzorka. Faktor može imati vrijednosti od

1 pa sve do 100, pri čemu je odabrana vrijednost faktora jednaka 16. Ovo znači da svaka od faza ima 16 kanala za mjerenje vrijednosti napona i struje te se tijekom svakog ciklusa izvođenja u buffer pohranjuje po 16 vrijednosti dok se buffer ne popuni te se nakon inicijalnog punjenja ciklus punjenja neprestano ponavlja.

4.1.1. Programska implementacija

Određivanje frekvencijskog spektra, kao i THD-a, odrađuje se u stvarnom vremenu te je stoga za početak potrebno implementirati buffer, gdje se spremaju izmjerene vrijednosti napona i struje. Za implementaciju buffera izrađen je funkcijski blok *FB_ValueBuffer*, koji je zaseban za svaku od triju faza, čiji ulaz je niz od 16 cjelobrojnih izmjerenih vrijednosti napona i struje a izlazi bloka su niz realnih vrijednosti napona, niz realnih vrijednosti struje te zastavica koja označava da je buffer inicijalno popunjen.

Na početku rada počinje inicijalno punjenje buffera. U svakom ciklusu izvođenja prikuplja se, s obzirom da je odabrana DC Oversampling 16 opcija, 16 vrijednosti napona i struje a s obzirom da je veličina buffer-a jednaka 512 tada je potrebno 32 ciklusa da bi se buffer inicijalno napunio.

Punjenje buffera kroz 32 ciklusa izvođenja

```
cycleCounter := cycleCounter + 1;
IF cycleCounter >= 33 AND bufferFull THEN
  FOR i := 0 TO 511 DO
    VoltageDataSet[i] := Buffer2Voltage[i];
    CurrentDataSet[i] := Buffer2Current[i];
  END_FOR
  cycleCounter := 0;
END_IF
```

U svakom ciklusu izvođenja sve se vrijednosti prebacuju u decimalni oblik te se množe faktorom za prikaz u realnom obliku i pohranjuju u zasebne arrayeve. Ukoliko brojač koji prati broj ciklusa izvršavanja dostigne vrijednost 32 tada se na izlazu u TRUE postavlja zastavica *bufferFull* te posljedično kreće računanje frekvencijskog spektra za vrijednosti struje i napona koje se u tom trenutku nalaze u bufferu.

S obzirom da je buffer inicijalno napunjen u prvom idućem ciklusu izvršavanja buffer se puni ispočetka s novih 16 vrijednosti, za što služi zastavica *bufferRestart*, no sada se

frekvenijski spektar određuje u svakom ciklusu za 16 novih vrijednosti plus 496 vrijednosti prethodnog ciklusa te se dobiva preklapanje podatka čime se poboljšala vremenska rezolucija analize spektra podataka.

Pretvorba integer vrijednosti signala u realne vrijednosti struje i napona

```
IF (sampleIndex + currBufferIndex) < 512 THEN
  IF NOT bufferFull THEN
    VoltageDataSet[sampleIndex + currBufferIndex] := TO_LREAL(currDataSample[
      sampleIndex].VoltageValue)
      * VOLTAGE_SCALING_FACTOR;
    CurrentDataSet[sampleIndex + currBufferIndex] := TO_LREAL(currDataSample[
      sampleIndex].CurrentValue)
      * CURRENT_SCALING_FACTOR;
  ELSE
    Buffer2Voltage[sampleIndex + currBufferIndex] := TO_LREAL(currDataSample[
      sampleIndex].VoltageValue)
      * VOLTAGE_SCALING_FACTOR;
    Buffer2Current[sampleIndex + currBufferIndex] := TO_LREAL(currDataSample[
      sampleIndex].CurrentValue)
      * CURRENT_SCALING_FACTOR;
  END_IF;
ELSE
  bufferFull := TRUE;
  bufferRestart := TRUE;
END_IF;
```

Uzimajući u obzir zastavicu *bufferRestart* u svakom ciklusu indeks popunjavanja povećava se do vrijednosti za 16 veće od indeksa trenutnog podatka iz zadnjeg ciklusa, ukoliko trenutni indeks dosegne vrijednosti jednaku ili veću ukupnoj veličini buffera tada se indeks resetira na 0 te je zastavica *bufferRestart* postavljena u TRUE sve dok ne krene ponovno punjenje buffera.

Indeksiranje popunjavanja buffera

```
IF NOT bufferRestart THEN
  num := num + 1;
  currBufferIndex := currBufferIndex + 16;
END_IF;
IF bufferRestart THEN
```

```
currBufferIndex := 0;
bufferRestart := FALSE;
END_IF;
```

4.2. Određivanje frekvencijskog spektra signala

Algoritam koji se koristi prilikom određivanja frekvencijskog spektra je u ovome slučaju Cooley-Tukey algoritam zbog značajnog smanjenja vremenske složenosti izračuna.

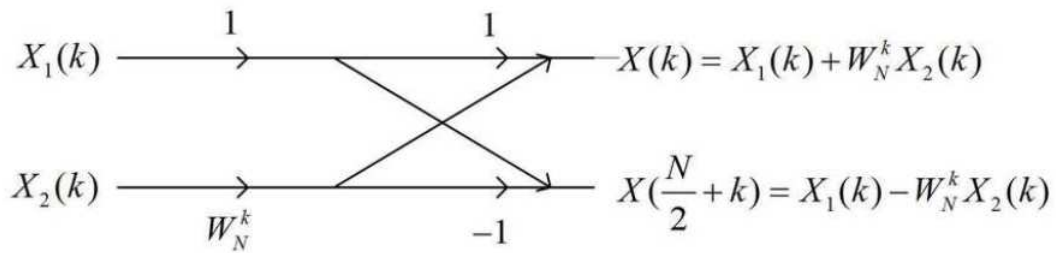
Najčešći oblik ovog algoritma i onaj koji se ovdje i koristi je Radix-2 Decimation In Time (Radix-2 DIT). Koristi se za vektore veličine 2^n dijeleći početni niz na dva podniza veličine polovice početnog. Jedan se podniz sastoji od vrijednosti parnoga indeksa a drugi podniz od vrijednosti neparnog indeksa. Nad svakim od novonastalih nizova izvršava se diskretna Fourierova transformacija te se rezultati transformacija kombiniraju koristeći "twiddle faktore" $W_N^k = e^{-i\frac{2\pi k}{N}}$. Za svaki indeks k od 0 do $N/2 - 1$, računamo dva izlazna uzorka: $X[k]$ i $X[k + N/2]$ pri čemu $X[k]$ koristi parne uzorke $X[n]$ i ponderirani DFT neparnih uzoraka $W_N^k X[k]$ a $X[k + N/2]$ koristi čini istu stvar ali sa negativnim predznakom ispred ponderiranog dijela.

$$X[k] = X_{\text{parni}}[k] + W_N^k X_{\text{neparan}}[k]$$

$$X[k + N/2] = X_{\text{parni}}[k] - W_N^k X_{\text{neparni}}[k]$$

Ovaj postupak se ponavlja dok novonastali podnizovi ne poprime duljinu 1 jer je vrijednost DFT-a za niz duljine trivijalna, odnosno jednaka je vrijednosti niza. Rezultati DFT-a manjih podnizova kombiniraju se sve dok ne dobijemo vrijednost DFT-a za početni niz maksimalne duljine čime je vrijeme računanja značajno skraćeno. Vrlo važna stavka u ovome algoritmu je obrtanje bitova (Bit reversal) koja se odvija prije rekurzivne podjele i kombinacije rezultata DFT-a. Njime se indeksi elemenata reorganiziraju na način da se njihova vrijednost prebaci u binarni oblik te se binarni prikaz svakog od njih obrne čime se dobiva ispravni redosljed uzoraka za računanje FFT-a, odnosno omogućava korištenje iterativne "butterfly" operacije (Slika 4.1.), koja osigurava ispravno kombiniranje parova ulaznih podataka da se u konačnici dobije ispravan rezultat Fourierove transfor-

macije, bez potrebe za dodatnim rekurzivnim pozivima čime bi se narušila vremenska učinkovitost algoritma.



Slika 4.1. Butterfly operacija

4.2.1. Programska implementacija

Prije implementacije u ST programskom jeziku algoritam je napravljen u programskom jeziku Python pri čemu je inspiracija potekla od primjera FFT algoritama Nacionalnog fakulteta u Singapuru te web stranice Pythonic Perambulations. [10] [11] Blok za izračun frekvencijskog spektra pokreće se isključivo ako je buffer u potpunosti popunjen za što se koristi zastavica *bufferFull* a nakon inicijalnog punjenja on se poziva svaki sljedeći ciklus. Njegovi ulazi su niz realnih vrijednosti napona i struje kao realni dio te niz popunjen nulama kao imaginarni niz dok su izlazi realni i imaginarni niz vrijednosti određenih FFT algoritmom. U početnom dijelu programskog koda unutar funkcijskog bloka, korištenjem metode obrtanja bitova, ulazne vrijednosti mjerenja napona i struje preslože se tako da kada se FFT izvršava na iterativan način prilikom pristupa podacima oni budu u ispravnom redoslijedu. Nakon preslagivanja ulaznih podataka postupak određivanja frekvencijskog spektra ulaznog niza kreće glavnom petljom koja iterativno povećava broj DFT-ova koji se računaju te se taj broj (varijabla *step*) udvostruči u svakoj iteraciji. Glavna petlja nastavlja se odvijati unutar istog ciklusa sve dok ne premaši duljinu ulaznog niza (varijabla *N*).

Unutar glavne petlje odvija se FFT izračun. Već spomenuta varijabla *step* predstavlja veličinu DFT-a koji se računa u svakoj fazi algoritma. Počinjemo sa $step = 2$, što znači da prvo računamo DFT-ove s 2 točke. Petlja iterativno povećava veličinu DFT-ova koji se računaju, udvostručujući veličinu u svakoj iteraciji. Petlja se nastavlja dok *step* ne premaši duljinu ulaznog niza *N*. Varijabla *half_step* je polovica trenutne veličine koraka i za jedno sa *step* varijablom omogućava ispravno izvođenje *butterfly* operacije između to dvoje.

Unutar glavne petlje vanjska FOR petlja iterira kroz dijelove niza x , svaki veličine $step$. Varijabla k počinje od 0 i povećava se za $step$ u svakoj iteraciji, dijeleći niz u blokove veličine $step$ dok Unutarnja petlja FOR iterira kroz prvu polovicu ($half_step$) svakog bloka veličine $step$. Ova petlja računa Twiddle faktore te izvodi butterfly operacije za svaki par elemenata u bloku. Varijabla t_real je rezultat množenja elementa $x[k + j + half_step]$ odgovarajućim Twiddle faktorom $\exp[j]$. Ovaj korak je doprinos neparnih elemenata u DFT-u dok je analogno tome t_imag doprinos parnih elemenata. Element u drugoj polovici bloka ($x[k + j + half_step]$) novu vrijednost poprimi oduzimanjem vrijednosti t od elementa u prvoj polovici ($x[k + j]$). Time se kombiniraju parni i neparni dijelovi za trenutni DFT. Na kraju se element u prvoj polovici bloka ažurira dodavanjem vrijednosti t i time se završava Butterfly operacija za ovaj par elemenata. Nakon što su sve Butterfly operacije za trenutnu varijablu $step$ dovršene, varijabla $step$ se udvostručuje kako bi se u sljedećoj iteraciji obradili veći DFT-ovi. Proces se nastavlja dok cijeli niz ne bude transformiran i u konačni funkcijski blok vraća transformirani niz koji sada sadrži frekvencijsku domenu originalnog signala u vremenskoj domeni.

Izračun frekvencijskog spektra koristeći Cooley-Tukey algoritam

```

step := 2;
WHILE step <= N DO
  half_step := step / 2;
  FOR k := 0 TO N-1 BY step DO
    FOR j := 0 TO half_step-1 DO
      // Twiddle faktori
      exp_real := COS(-2 * PI * j / step);
      exp_imag := SIN(-2 * PI * j / step);

      // Butterfly operacija
      t_real := X_re[k + j + half_step] * exp_real - X_im[k + j + half_step] * exp_imag;
      t_imag := X_re[k + j + half_step] * exp_imag + X_im[k + j + half_step] * exp_real;
      even_real := X_re[k + j];
      even_imag := X_im[k + j];

      X_re[k + j] := even_real + t_real;
      X_im[k + j] := even_imag + t_imag;
      X_re[k + j + half_step] := even_real - t_real;
      X_im[k + j + half_step] := even_imag - t_imag;
    
```

```

        END_FOR
    END_FOR
    step := step * 2;
END_WHILE

```

4.3. Određivanje faktora totalne harmoničke distorzije

Određivanje faktora totalne harmoničke distorzije obavlja se korištenjem formule 3.5 odnosno računa se omjer korijena sume kvadrata efektivne vrijednosti struje ili napona sviju harmonika osim prvoga i efektivne vrijednosti napona ili struje prvoga harmonika.

4.3.1. Programaska implementacija

Za određivanje faktora totalne harmoničke distorzije koristi se blok FB_CalculateTHD. S obzirom da su izlazi bloka za izračun frekvencijskog spektra vektori napona i struje pri određenoj frekvenciji za računanje potrebne amplitude vektora za THD faktor koristi se formula 4.1, pri čemu z označava vektor napona ili struje.

$$z = \sqrt{\text{Re}(z)^2 + \text{Im}(z)^2} \quad (4.1)$$

Nakon dobivanja amplitude napona ili struje te je vrijednosti potrebno normalizirati, jer one iznose $A * N/2$ zbog primjene Fourierove transformacije, množenjem faktorom $2/N$ gdje N označava broj uzoraka, u ovome slučaju 512 te se dobiva amplituda A

Izračun amplitude signala frekvencijskog spektra i normalizacija

```

// Množenje sa 2*n normalizacija
FOR i := 0 TO NumOfSamples-1 DO
    Amplitudes[i] := SQRT(InputValuesReal[i] * InputValuesReal[i] + InputValuesIm[i] *
        InputValuesIm[i]) * 2/NumOfSamples;
END_FOR

```

Nakon što su određene sve amplitude signala, potrebno je u spektru pronaći onu amplitudu s najvećom vrijednosti jer ona označava vrijednosti napona ili struje osnovnog harmonika te indeks na kojem se ona nalazi u ulaznom arrayu vrijednosti.

Pronalaženje vrijednosti osnovnog harmonika

```
FundamentalAmplitude := 0.0;
FOR j := 0 TO NumOfSamples-1 DO
  IF Amplitudes[j] > FundamentalAmplitude THEN
    FundamentalAmplitude := Amplitudes[j];
    FundamentalIndex := j;
  END_IF
END_FOR
```

U konačnici da bi se dobila THD vrijednost računa se suma svih vrijednosti harmonika osim osnovnog i koristi formula 3.5 Dobivena vrijednost THD-a množi se sa 100 radi prikaza u postotku.

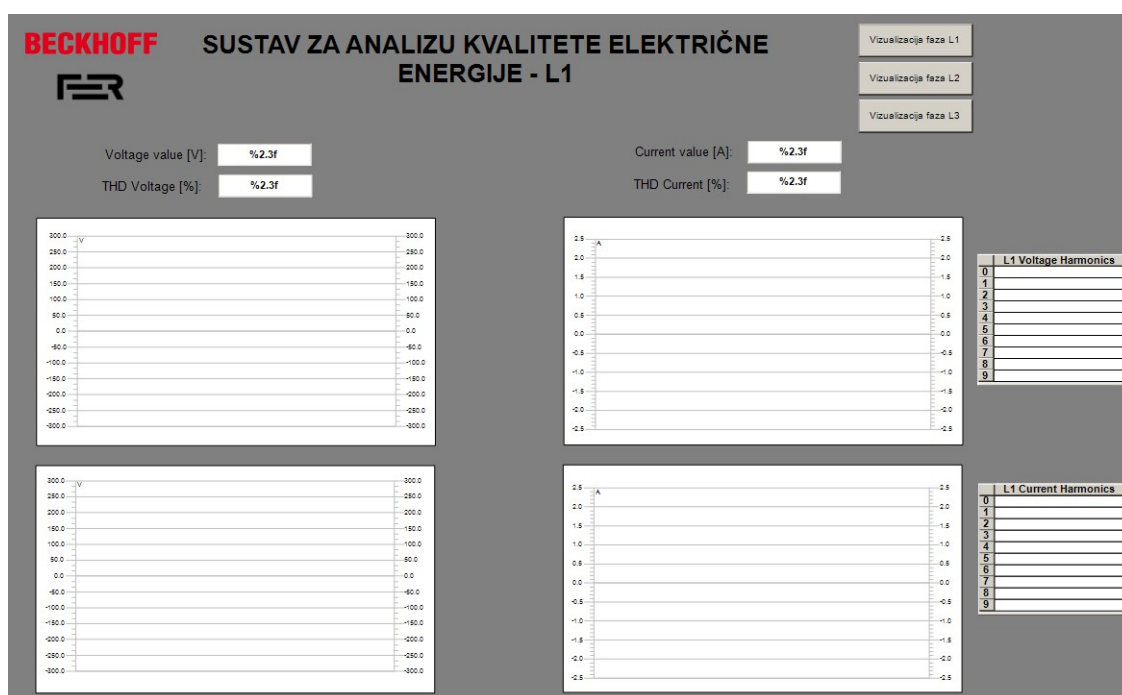
Izračun THD-a

```
FOR k := 0 TO (NumOfSamples / 2)-1 DO
  IF k <> FundamentalIndex THEN
    SumOfHarmonics := SumOfHarmonics + (Amplitudes[k] * Amplitudes[k]);
  END_IF
END_FOR

IF FundamentalAmplitude <> 0.0 THEN
  THDTemp := SQRT(SumOfHarmonics) / FundamentalAmplitude;
  IF THDTemp < 1.0 THEN
    THDValue := THDTemp * 100.0;
  END_IF
END_IF
```

5. Vizualizacijsko sučelje

Kako bi izmjerene fizikalne veličine i obrađeni podaci bili uvijek lako dostupni napravljena je vizualizacija navedenih podataka (slika 5.1.).



Slika 5.1. Vizualni prikaz mjerenih i izračunatih podataka

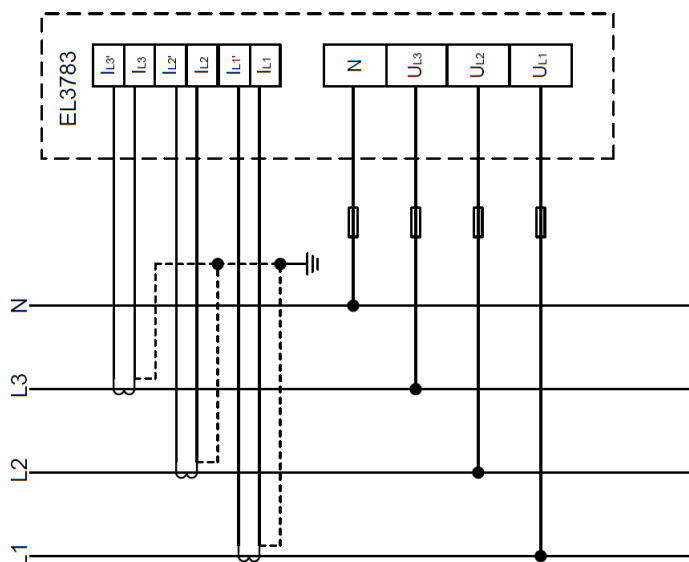
Koristi se integrirana vizualizacija koja za razliku od HMI (Human Machine Interface-a) nalazi unutar TwinCAT programskog okruženja. Zahtijevani prikaz podataka uključuje vizualni prikaz frekvencijskog spektra nad trenutnim setom podataka za napon i struju te vizualni prikaz trenutnog seta podataka. Dodatno, prikazane su efektivne vrijednosti, THD vrijednosti struje i napona te tablični prikaz vrijednosti 10 harmonika. Ovakva vizualizacija napravljena je zasebno za svaku od 3 faze. Uz sami prikaz podataka dodana je mogućnost prebacivanja između triju prikaza odabirom jedne od triju opcija na ekranu.

6. Eksperimentalna verifikacija

Nakon implementacije programskog koda za prikup, obradu i prikaz podataka potrebno je samo industrijsko računalo povezati sa EtherCAT modulom te modulom za mjerenje napona i struje. Nakon uspješnog spajanja moguće je prikupiti potrebna mjerenja i prikazati ih u prikladnom formatu.

6.1. Spajanje mjernog modula

Kako bi se ispitala ispravnost algoritma za određivanje faktora totalne harmoničke distorzije mjerni modul EL3783 spaja se na izlaze sinkronog generatora koristeći shemu na slici 6.1. EL3783 modul sadrži ulaze i izlaze za strujni signal te ulaze za naponski signal što je definirano u tablicama 6.1. i 6.2.



Slika 6.1. Spajanje mjernog modula EL3783 na frekvencijski pretvarač

Ime terminala	Opis
IL1	Mjerenje struje faze L1 - ulaz
IL2	Mjerenje struje faze L2 - ulaz
IL3	Mjerenje struje faze L3 - ulaz
IL1'	Mjerenje struje faze L1 - izlaz
IL2'	Mjerenje struje faze L2 - izlaz
IL3'	Mjerenje struje faze L3 - izlaz
N	Uzemljenje

Tablica 6.1. Terminali strujnih ulaza i izlaza modula EL3783

Ime terminala	Opis
L1	Mjerenje napona faze L1 - ulaz
L2	Mjerenje napona faze L2 - ulaz
L3	Mjerenje napona faze L3 - ulaz
N	Uzemljenje

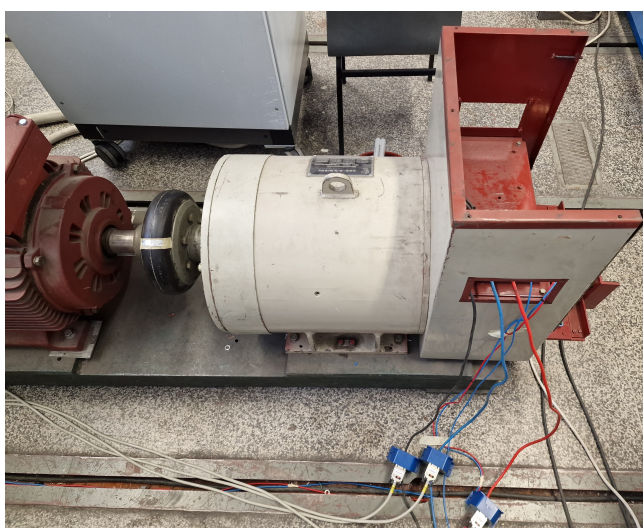
Tablica 6.2. Terminali naponskih ulaza modula EL3783

6.1.1. Akvizicijski mjerni uređaj

Za dobivanje vrlo preciznih mjerenja koja će se koristiti za usporedbu prilikom analize izmjerenih podataka preko Beckhoff IPS-a koristi se analizator snage DEWESoft Sirius. Podaci će se nakon završetka mjerenja usporediti kako bi se odredila kvaliteta i pouzdanost određivanja kvalitete električne energije sa IPS-om a bez korištenja često skupih mjernih uređaja kao što je Sirius. Na slici 6.2. prikazan je DEWESoft analizator snage. Dodatno, na slici 6.3. prikazan je sinkroni generator nad kojim se obavljaju mjerenja.



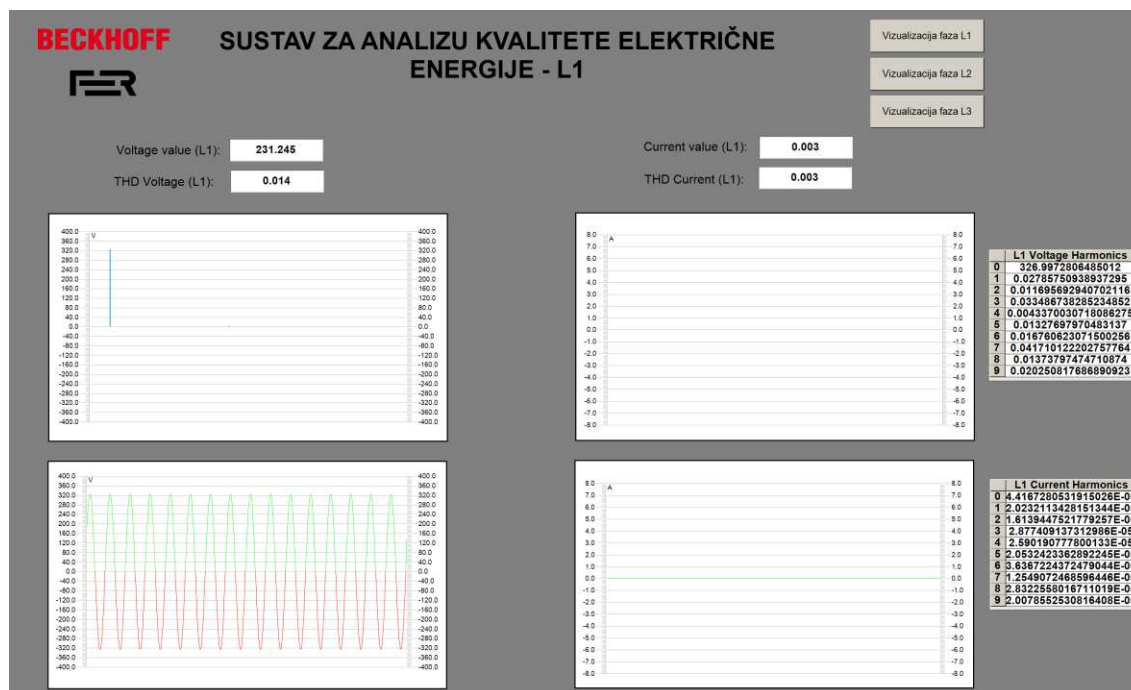
Slika 6.2. Analizator snage DEWESoft Sirius



Slika 6.3. Sinkroni generator

6.2. Rezultati mjerenja - spoj na mrežu

Prije spajanja na sinkroni generator, i u svrhu provjere algoritma i izračunatih vrijednosti THD-a, mjerni modul spojen je na trofaznu mrežu. Zabilježeni su, za svaku fazu, trenutna vrijednost napona, THD, valni oblik napona te frekvencijski spektar izmjerenog signala. Na slici 6.4. vizualno je prikazano stanje mreže faze L1. Valni oblik napona idealan sinusni te je i THD u zadovoljavajućem rasponu 1-1.5% što je bilo i očekivano. Rezultati vezani uz struju prikazani na ovim vizualizacijama zanemaruju se jer predstavljaju šum a ne stvarna mjerenja s obzirom da se prilikom spoja na mrežu mjeri napon.



Slika 6.4. Vizualni prikaz stanja prilikom spajanja na mrežu- faza L1

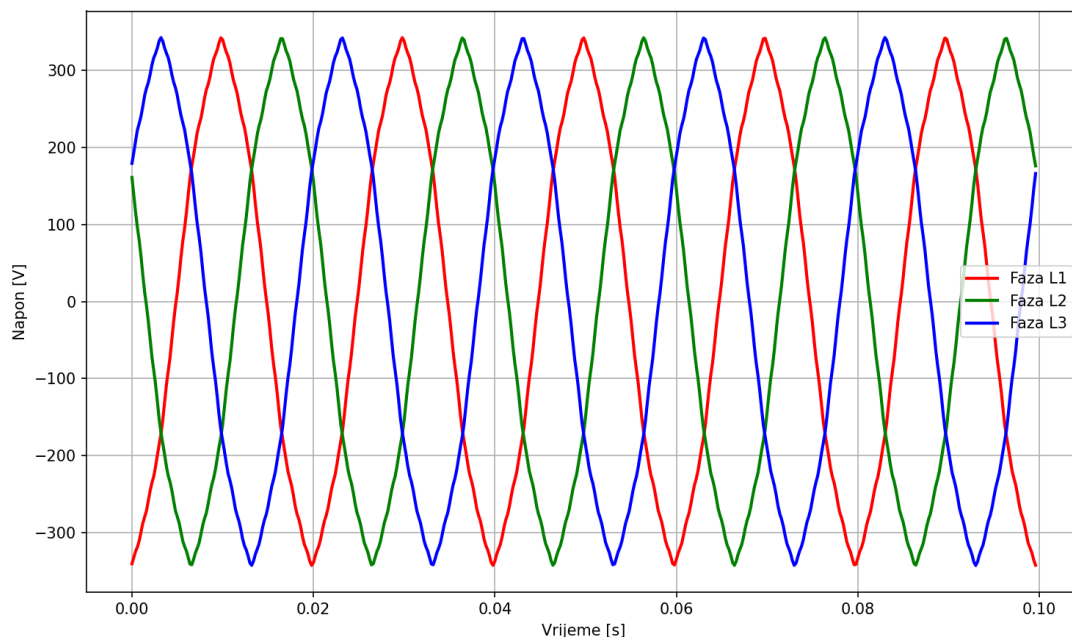
6.3. Rezultati mjerenja - prazni hod

U prvoj točki ispitivanja, generator je u praznome hodu što znači da se uzbuđeni stroj neopterećeno vrti konstantnom brzinom. Elektromotorne sile se induciraju u armaturnom namotu, stezaljke generatora su otvorene te je struja opterećenja jednaka nuli. Sukladno tome u ovome slučaju mjeri se samo valni oblik, frekvencijski spektar i THD napona. Na slici 6.5. prikazani su naponski valni oblici po fazama te nisu u potpunosti sinusnog oblika ali su vrlo bliski idealnom sinusnom valu. Iz tablice 6.3. može se iščitati da je vrlo mala razlika u THD vrijednostima dobivenima iz akvizicijskog uređaja i Beckhoff IPC-a.

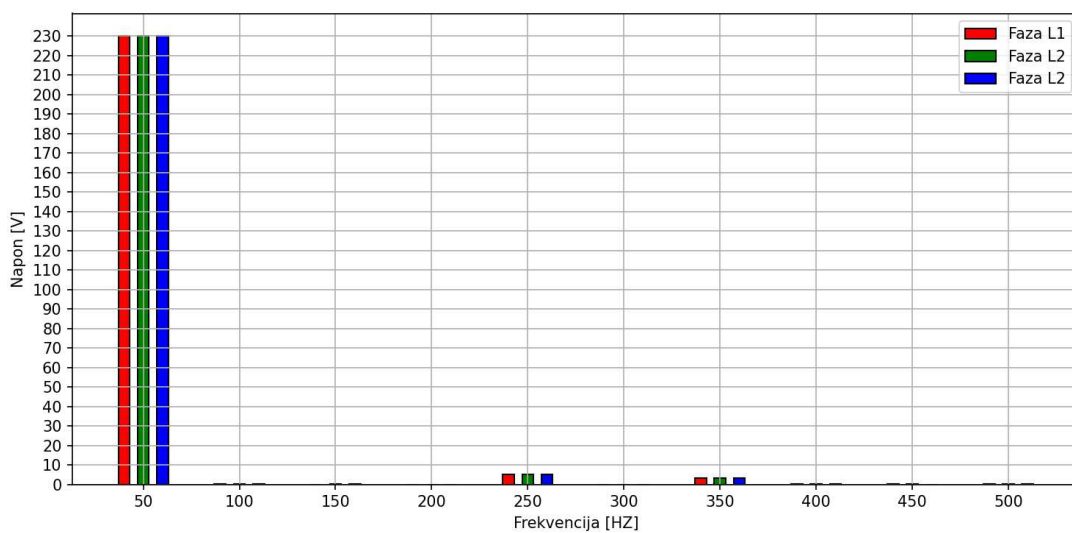
	THD - faza L1 [%]	THD - faza L2 [%]	THD - faza L3 [%]
DEWESoft	2,8597	2,8433	2,8330
Beckhoff	2,9633	2,8895	2,8583

Tablica 6.3. THD napona po fazama izmjeren DEWESoft analizatorom snage i Beckhoff IPC-em - 1. radna točka

Na slici 6.6. prikazan je frekvencijski spektar napona gdje vidimo isticanje neparnih harmonika u odnosu na parne što je uzrokovano simetrijom valnog oblika. To znači da su pozitivni i negativni poluciklusi jednake veličine, ali su suprotnog predznaka te se parni harmonici međusobno poništavaju.



Slika 6.5. Valni oblici napona u praznome hodu



Slika 6.6. Frekvencijski spektar napona u praznome hodu

6.4. Rezultati mjerenja - 2. radna točka

U 2. radnoj točki generator u mrežu daje radnu snagu iznosa $P = 5 \text{ kW}$ dok je reaktivna snaga $Q = 0 \text{ kVAr}$. Sada kada postoji radna snaga postoji i mjerljiva armaturna struja na stezaljkama te se može odrediti THD i za struju i za napon kao i njihove valne oblike i frekvencijski spektar. Na slici 6.7. prikazani su naponski valni oblici po fazama, a na slici 6.8. strujni valni oblici. Viši harmonici imaju manje vrijednosti u ovoj radnoj točki što znači i da su THD vrijednosti napona primjetno manje od onih izmjerenih u praznome hod. Njihova vrijednost je manja od 1% što predstavlja vrlo visoku kvalitetu električne energije koja se predaje u mrežu. Sukladno THD-u i frekvencijskom spektru i valni oblik napona bliži je sinusnom u odnosu na valni oblik u praznome hod.

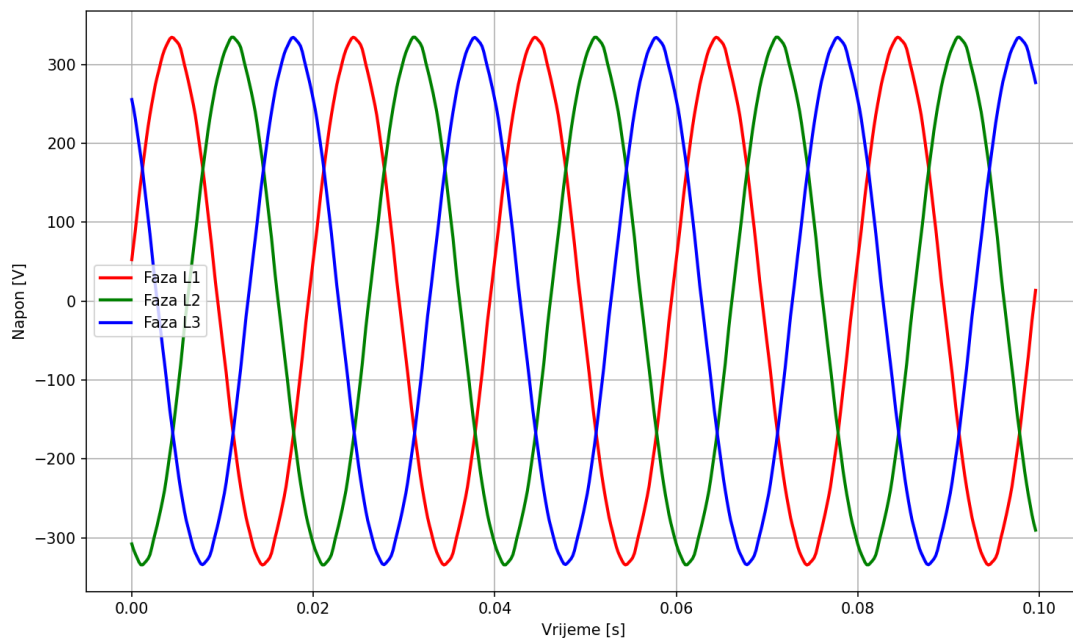
THD struja je u rasponu 36 - 40 % što se može činiti kao velika razliku u odnosu na vrlo mali THD napona no uzevši u obzir da struje imaju značajno manje vrijednosti od napona dijeljenje manjim brojem u formuli za izračun THD-a rezultira većim postotkom.

	THD - faza L1 [%]	THD - faza L2 [%]	THD - faza L3 [%]
DEWESoft	0,8564	0,9257	0,8137
Beckhoff	0,9277	0,9033	0,8599

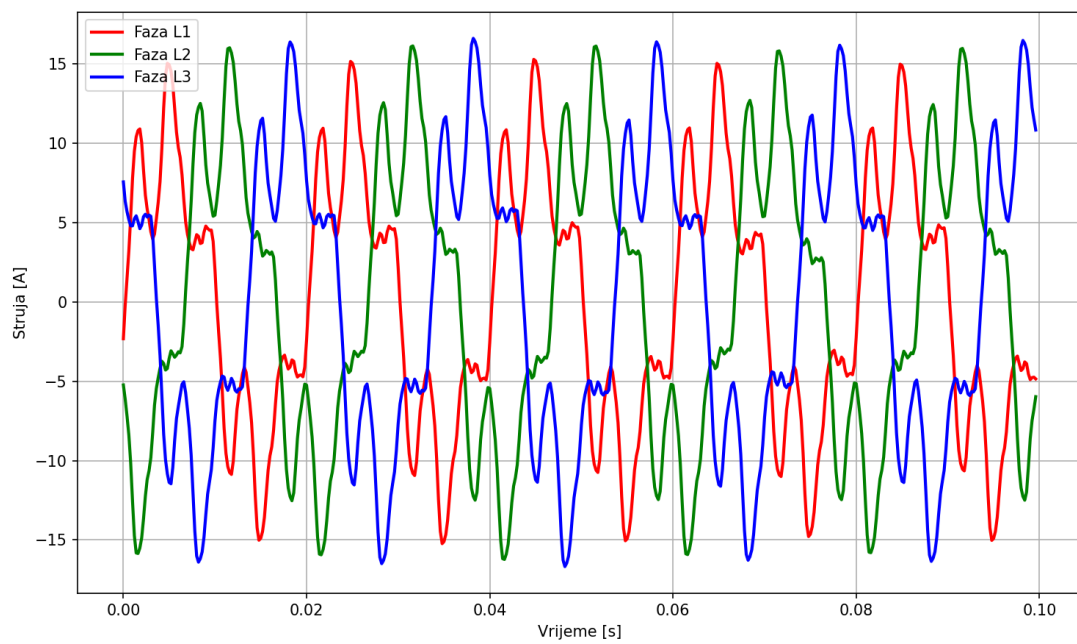
Tablica 6.4. THD napona po fazama izmjeren DEWESoft analizatorom snage i Beckhoff IPC-em - 2.radna točka

	THD - faza L1 [%]	THD - faza L2 [%]	THD - faza L3 [%]
DEWESoft	43,1199	36,7670	37,6445
Beckhoff	44,2033	37,5408	36,8600

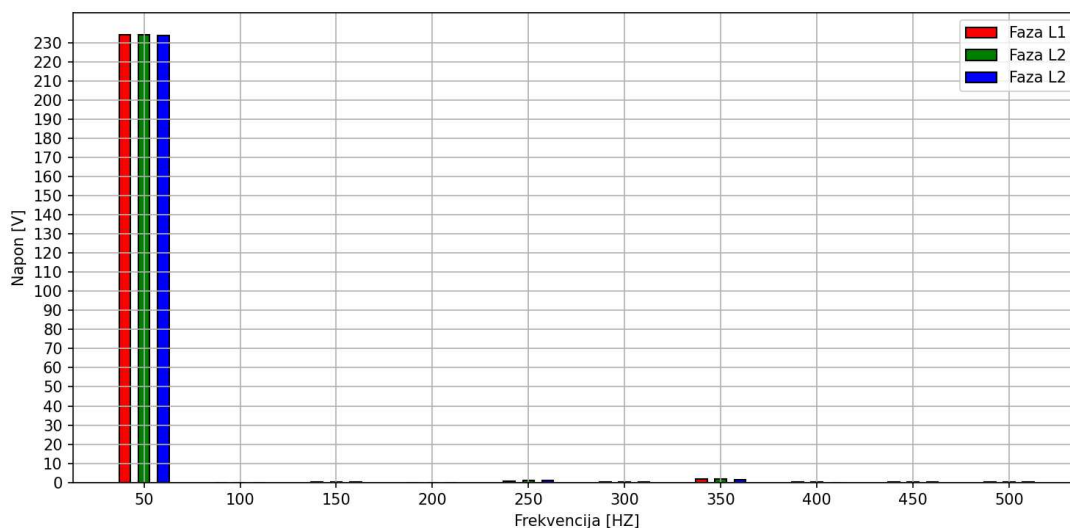
Tablica 6.5. THD struje po fazama izmjeren DEWESoft analizatorom snage i Beckhoff IPC-em - 2. radna točka



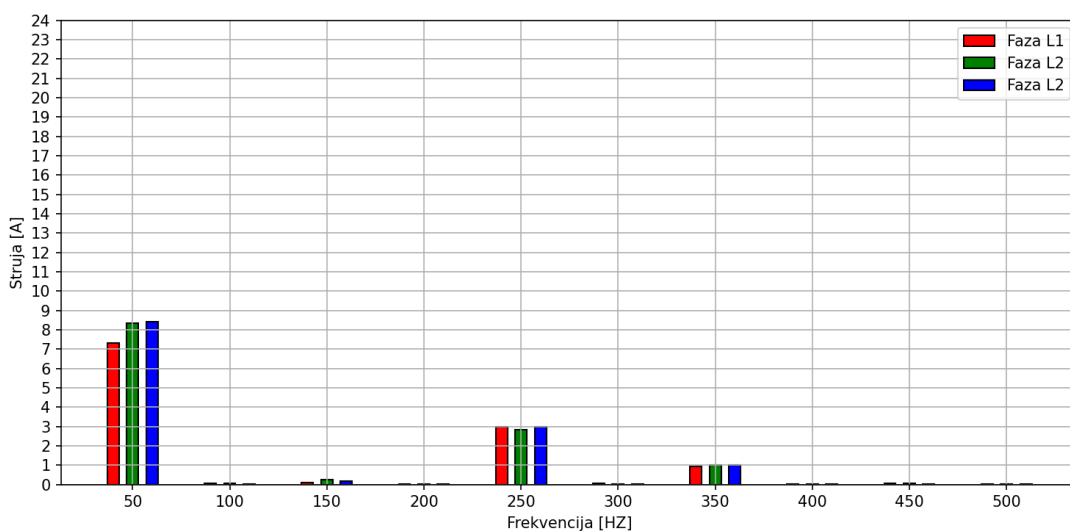
Slika 6.7. Valni oblici napona u 2. radnoj točki



Slika 6.8. Valni oblici struje u 2. radnoj točki



Slika 6.9. Frekvencijski spektar napona u 2. radnoj točki



Slika 6.10. Frekvencijski spektar struje u 2. radnoj točki

6.5. Rezultati mjerenja - 3. radna točka

Treća radna točka uključuje generator spojen na mrežu pri čemu je radna snaga $P = 5 \text{ kW}$ a reaktivna snaga $Q = 5 \text{ kVAR}$. Povećanjem reaktivne snage povećala se ukupna snaga na stezaljkama a s obzirom na konstantni iznos napona povećala se i armaturna struja.

THD napona nešto je manji no ne značajno ali je moguće primijetiti poboljšanje valnog oblika napona. Za razliku od napona kvaliteta struje se značajno poboljšala povećanjem jalove snage, odnosno povećanjem struje s približno 10 A na 14 A što vidimo i u frekvencijskom spektru. Povećanjem struje osnovni harmonik struje postaje dominantniji u odnosu na više harmonike pa se sukladno tome i THD smanjio na vrijednosti

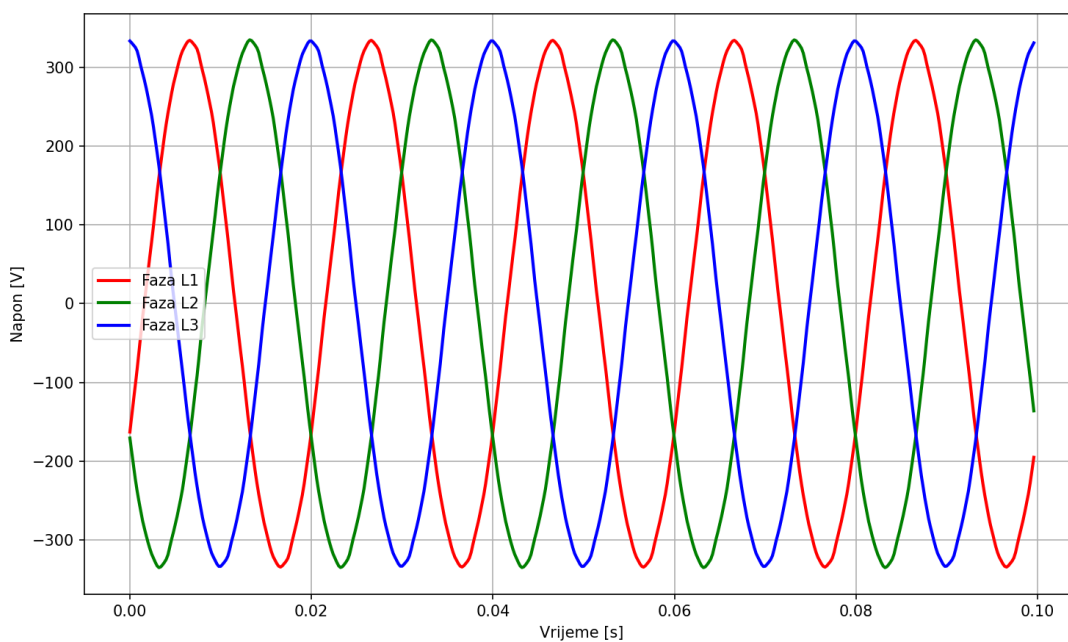
oko 27%. Pretpostavka je da će se daljnjim povećanjima radne i jalove snage, do nazivne izlazne snage generatora, struje nastaviti povećavati te se THD vrijednosti smanjivati a valni oblik struje postajati više idealnog sinusnog oblika.

	THD - faza L1 [%]	THD - faza L2 [%]	THD - faza L3 [%]
DEWESoft	0,7976	0,9027	0,7449
Beckhoff	0.8004	0.9443	0.8499

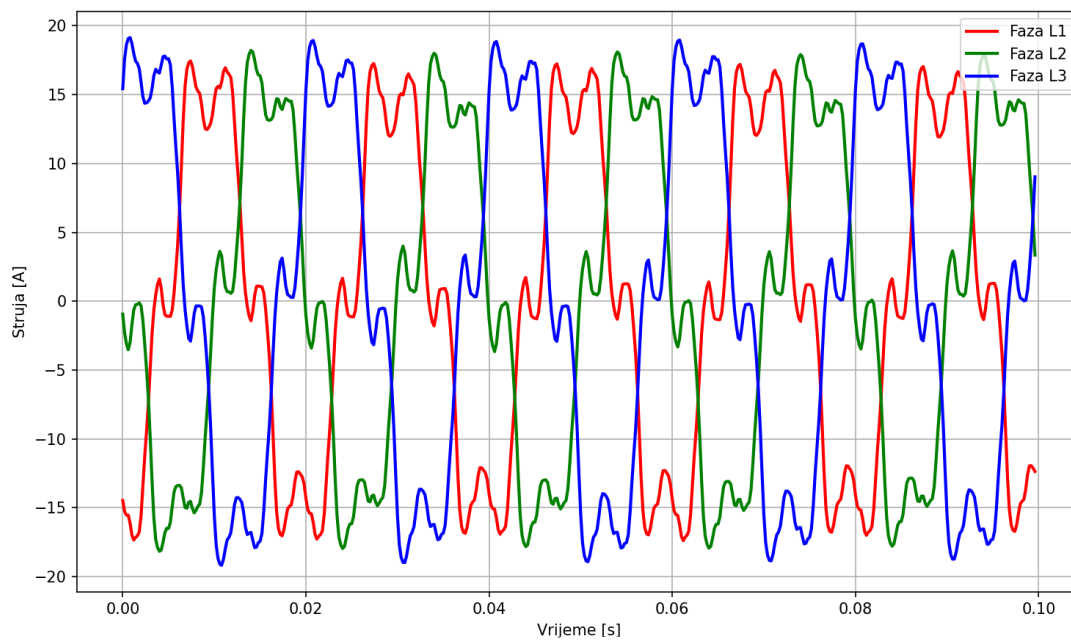
Tablica 6.6. THD napona po fazama izmjeren DEWESoft analizatorom snage i Beckhoff IPC-em - 3. radna točka

	THD - faza L1 [%]	THD - faza L2 [%]	THD - faza L3 [%]
DEWESoft	28,6703	27,4950	26,3101
Beckhoff	29.7043	27,5661	27.5548

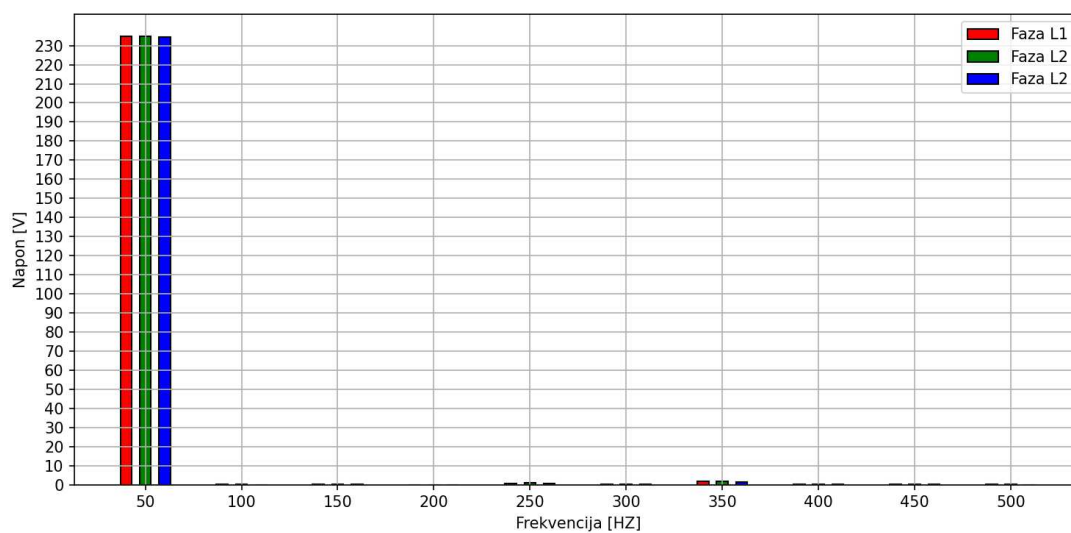
Tablica 6.7. THD struje po fazama izmjeren DEWESoft analizatorom snage i Beckhoff IPC-em - 3. radna točka



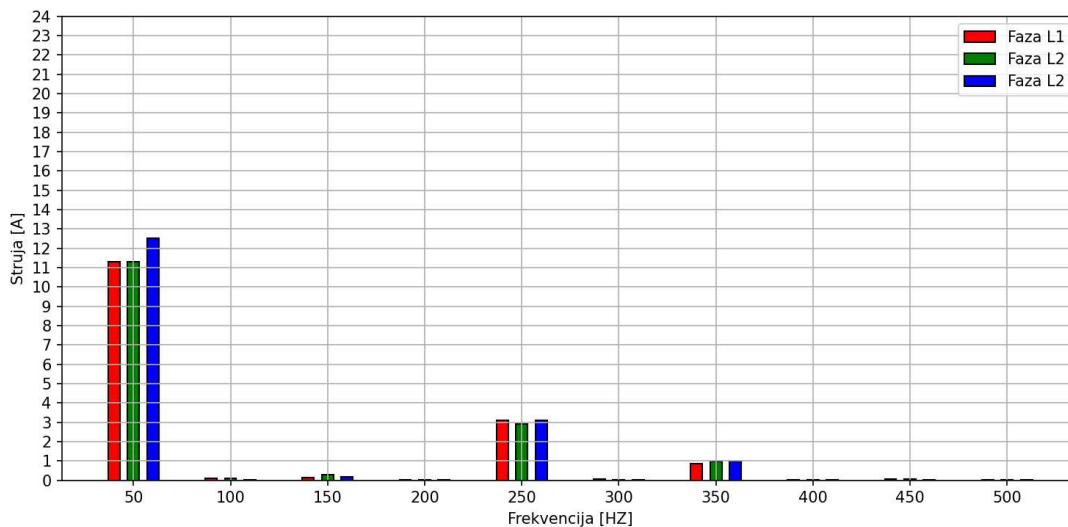
Slika 6.11. Valni oblici napona u 3. radnoj točki



Slika 6.12. Valni oblici struje u 3. radnoj točki



Slika 6.13. Frekvencijski spektar napona u 3. radnoj točki



Slika 6.14. Frekvencijski spektar struje u 3. radnoj točki

6.6. Rezultati mjerenja - 4. radna točka

U 4. radnoj točki generator je spojen na mrežu i daje radnu snagu $P = 10 \text{ kW}$ te reaktivnu snagu $Q = 0 \text{ kVAR}$.

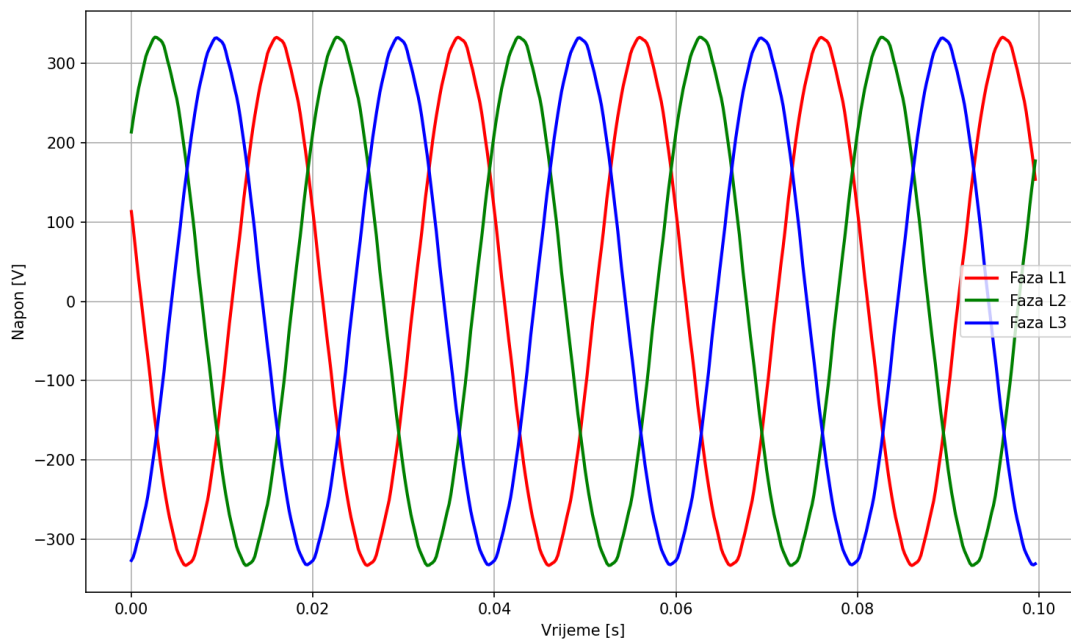
Kao i kod prethodne točke THD napona je približno isti dok se THD struje opet značajno smanjuje povećanjem radne snage. U ovome slučaju poboljšanje THD nije toliko značajno jer vrijednost struje nije porasla kao kod prijelaza između 2. i 3. radne točke ali je pad itekako značajan te odgovara pretpostavci da se povećanjem snage smanjuje njegova vrijednost zbog povećanja razlike između osnovnog i viših harmonika. Vrijednost nekih viših harmonika, ponajviše 5., se povećala, međutim u odnosu na povećanje osnovnog harmonika to nije dovoljno da bi značajno utjecalo na THD struja. Valni oblik struje sve više poprima idealni sinusni oblik na što opet ukazuju već spomenuti faktori, THD i frekvencijski spektar.

	THD - faza L1 [%]	THD - faza L2 [%]	THD - faza L3 [%]
DEWESoft	0,7835	0,8563	0,7360
Beckhoff	0.8004	1.0443	0.8299

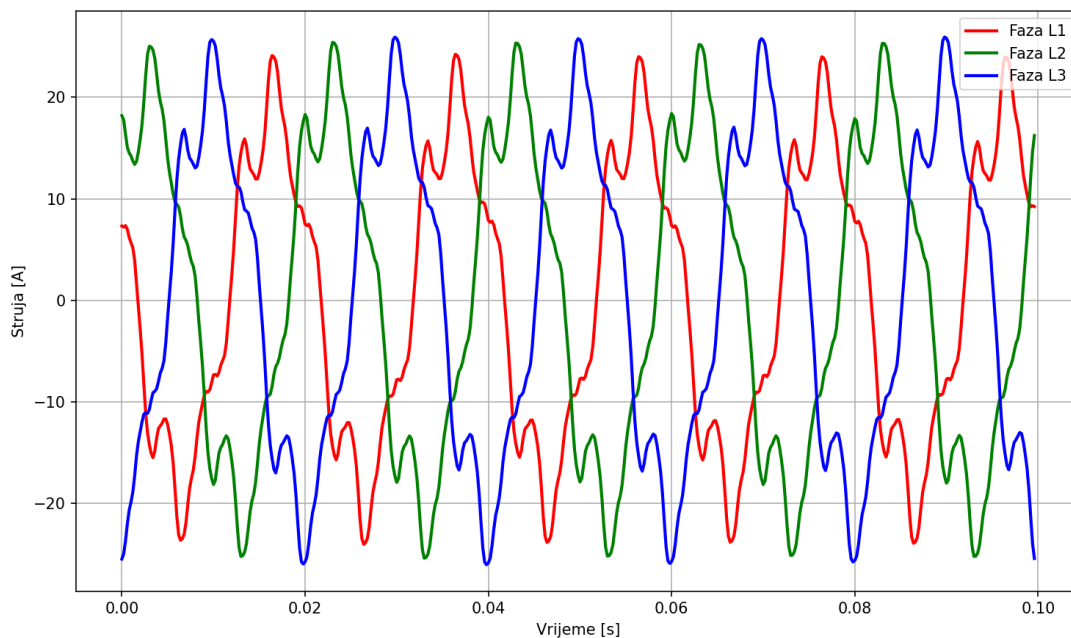
Tablica 6.8. THD napona po fazama izmjeren DEWESoft analizatorom snage i Beckhoff IPC-em - 4. radna točka

	THD - faza L1 [%]	THD - faza L2 [%]	THD - faza L3 [%]
DEWESoft	23,5216	20,9189	21,0697
Beckhoff	25.5607	21,0117	21.9077

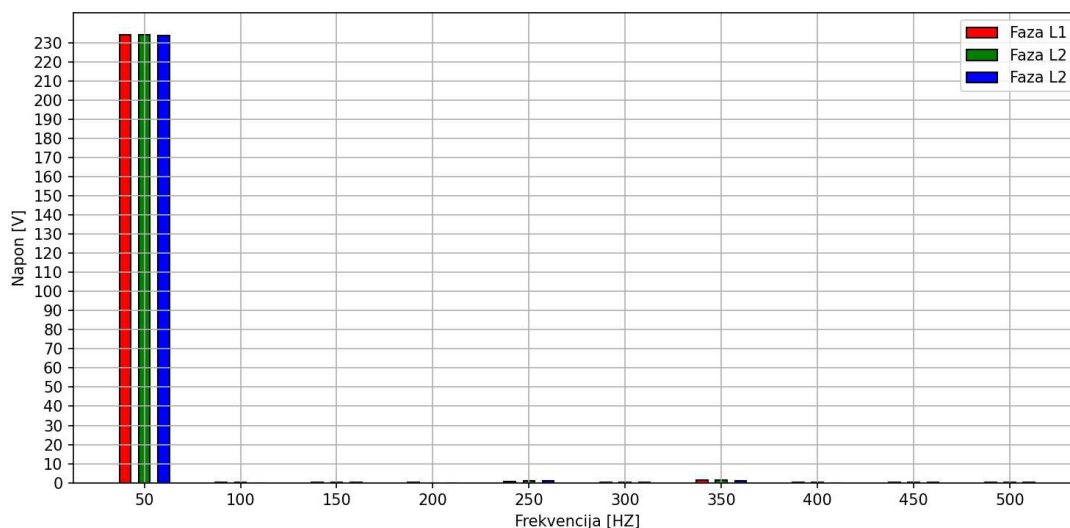
Tablica 6.9. THD struje po fazama izmjeren DEWESoft analizatorom snage i Beckhoff IPC-em - 4. radna točka



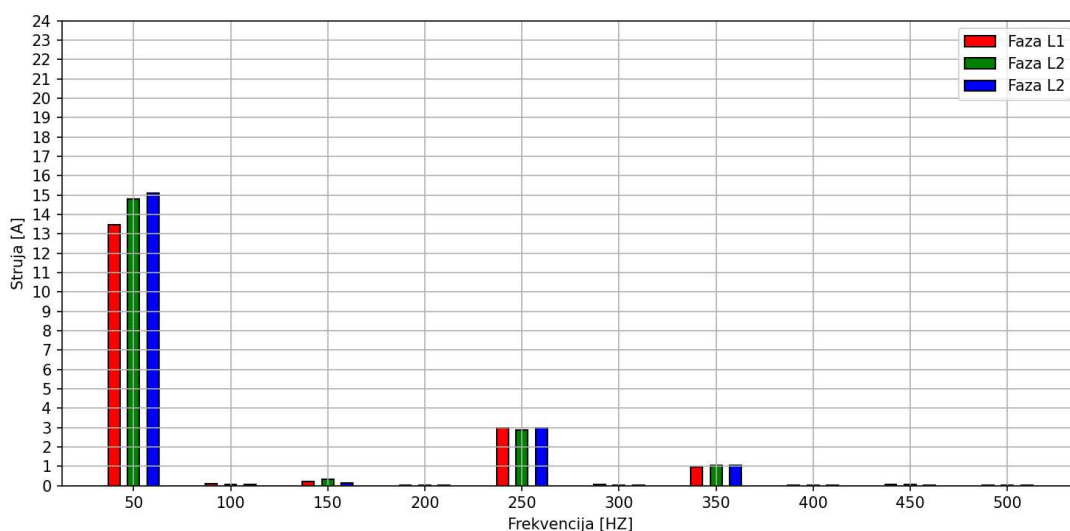
Slika 6.15. Valni oblici napona u 4. radnoj točki



Slika 6.16. Valni oblici struje u 4. radnoj točki



Slika 6.17. Frekvencijski spektar napona u 4. radnoj točki



Slika 6.18. Frekvencijski spektar struje u 4. radnoj točki

6.7. Rezultati mjerenja - 5. radna točka

U petoj i finalnoj radnoj točki radna snaga iznosi $P = 10$ kW dok je reaktivna snaga jednaka $Q = 10$ kVAR. THD i valni oblik napona približno su isti kao u prethodnoj radnoj točki i zadovoljavajućeg su iznosa. Kao i u svim prethodnim točkama THD vrijednost i frekvencijski spektar dobiveni analizatorom snage približno su jednaki onima koji su izračunati na Beckhoff IPC-u, no u ovome slučaju ta su odstupanja, iako vrlo male vrijednosti, ipak nešto veća.

U odnosu na 2. radnu točku THD, koji je sada približno 16%, odgovara porastu struje u odnosu na istu radnu točku, koja sada iznosi približno 22 A. Valni oblik struje je u odnosu

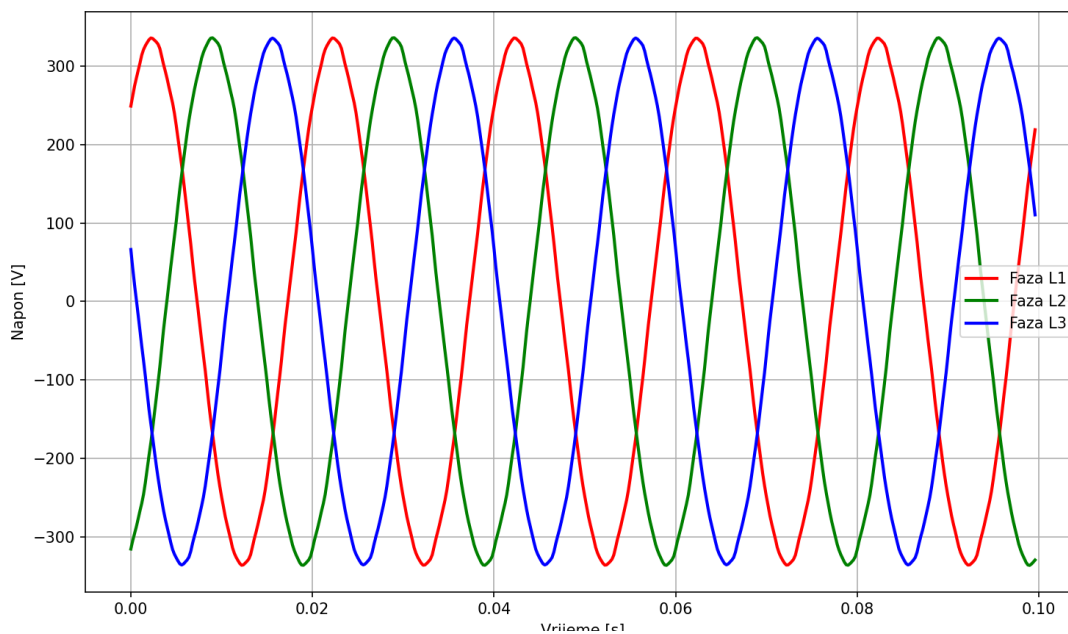
na početni također vrlo zadovoljavajućeg oblika kao i izračunati frekvencijski spektar. U ovome slučaju također dolazi do povećanja nekih viših harmonika, međutim nedovoljno da bi narušio valni oblik struje odnosno u konačnici i kvaliteta električne energije.

	THD - faza L1 [%]	THD - faza L2 [%]	THD - faza L3 [%]
DEWESoft	0,8850	0,9318	0,8235
Beckhoff	1.1363	1.2361	0.9088

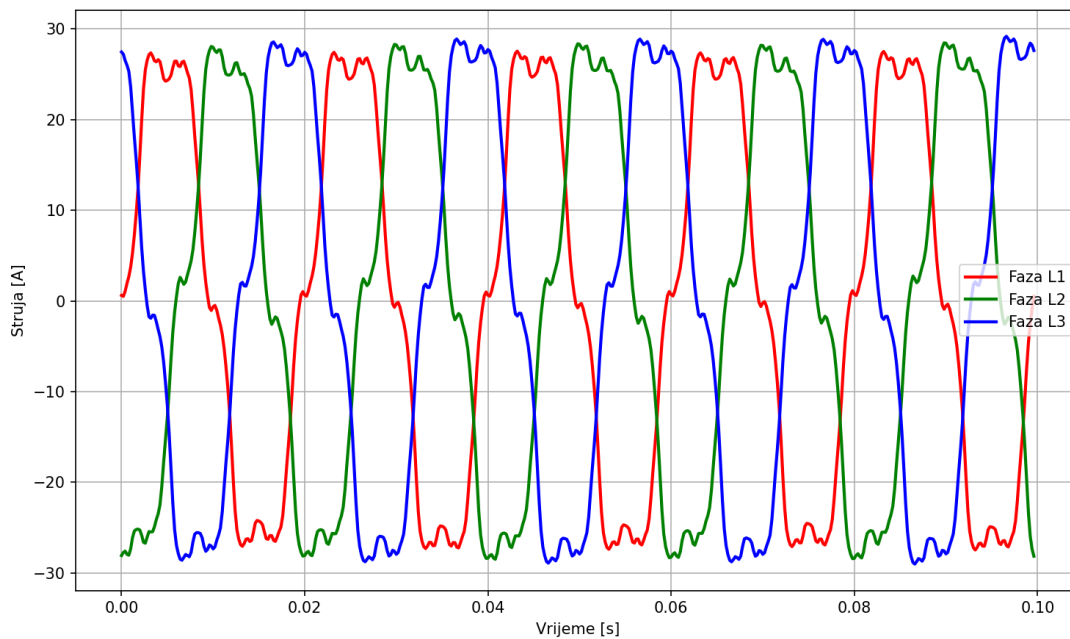
Tablica 6.10. THD napona po fazama izmjeren DEWESoft analizatorom snage i Beckhoff IPC-em - 5. radna točka

	THD - faza L1 [%]	THD - faza L2 [%]	THD - faza L3 [%]
DEWESoft	15,7328	15,2503	15,0839
Beckhoff	16.4012	16,2232	16.4531

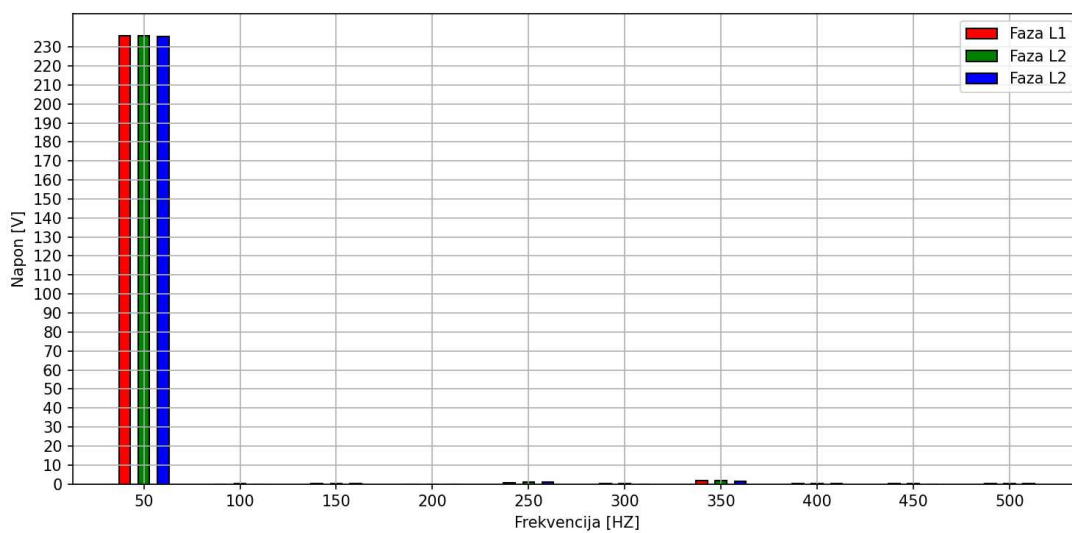
Tablica 6.11. THD struje po fazama izmjeren DEWESoft analizatorom snage i Beckhoff IPC-em - 5. radna točka



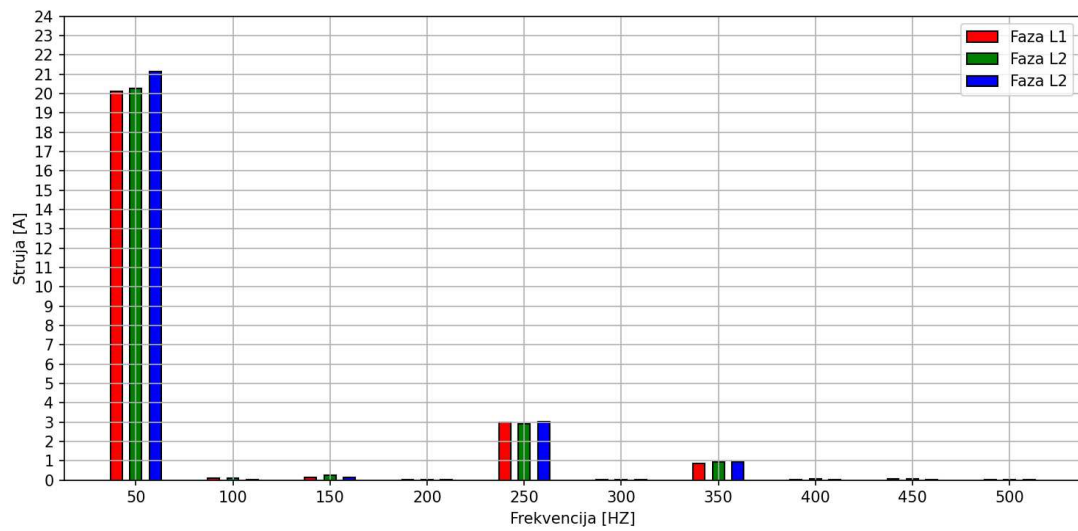
Slika 6.19. Valni oblici napona u 5. radnoj točki



Slika 6.20. Valni oblici struje u 5. radnoj točki



Slika 6.21. Frekvencijski spektar napona u 5. radnoj točki



Slika 6.22. Frekvencijski spektar struje u 5. radnoj točki

7. Zaključak

Iz prikupljenih podataka, primarno THD-a napona i struje, vrlo lako se vidi veza između načina rada generatora, njegove izlazne snage i kvalitete električne energije na izlazu. Vrijednost napona nakon sinkronizacije s mrežom ostaje približno iste vrijednosti. THD napona se nakon praznog hoda, gdje je vrijednost bila oko 3%, stabilizirao te iznosio približno 1% što pokazuje visoku kvalitetu energije što se tiče naponskog dijela a isto se vidi i na snimljenim valnim oblicima.

S druge strane, struja je značajno mijenjala svoju vrijednost, odnosno povećala se kako se ukupna snaga koja se predavala u mrežu povećavala. Ova pojava je bila očekivana i prouzrokovala je da je u frekvencijskom spektru struje osnovni harmonik izrazito dominantan u odnosu na više harmonike. Kroz povećanje snage je dominacija osnovnog harmonika postajala sve izraženija te se i THD vrijednost struje sukladno tome smanjila s približno 43% u 1. radnoj točki na približno 16% u 5. radnoj točki kako se generator približavao nazivnoj snazi za koju je projektiran.

Usporedivši valne oblike, frekvencijske spektre i najvažnije THD-ove iz IPC-a i one iz analizatora snage zaključuje se da su odstupanja minimalna te rezultati zadovoljavajući. Minimalna odstupanja od vrijednosti izmjerenih analizatorom snage pripisuju se tome što IPC i analizator snage ne mjere istim strujnim transformatorima, frekvencija uzorkovanja je manja kod IPC-a te analizator snage sadrži 24 harmonika dok IPC sadrži samo 10.

Ovo pokazuje da je moguće, i to vrlo efikasno, koristiti IPC-eve za kompleksnije izračune frekvencijskog spektra međutim, s obzirom da IPC nije predviđen za obradu mjerenja ovakvog tipa, analizator snage i dalje ima prednost jer je praktičniji za dobivanje preciznih podataka.

Literatura

- [1] Beckhoff Automation GmbH, “Documentation | ek110x-00xx, ek15xx ethercat bus coupler”, 2024., pristup: travanj 2024. [Mrežno]. Adresa: https://download.beckhoff.com/download/Document/io/ethercat-terminals/ek110x_ek15xxen.pdf
- [2] HOWARD BUTLER LTD, “Ctscm40-200/5 datasheet”, pristup: srpanj 2024. [Mrežno]. Adresa: <https://docs.rs-online.com/9fad/0900766b81384266.pdf>
- [3] Department of EEE, “Introduction to power quality”, 2024., pristup: travanj 2024. [Mrežno]. Adresa: <https://vardhaman.org/wp-content/uploads/2021/03/Power-Quality.pdf>
- [4] Fakultet elektrotehnike i računarstva, “Kvaliteta električne energije”, 2024., pristup: travanj 2024. [Mrežno]. Adresa: https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/05_Kvaliteta_elektricne_energije_2019.pdf
- [5] Ni, “Fourier transform (dft and fft)”, 2023., pristup: svibanj 2024. [Mrežno]. Adresa: https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/diadem/page/genmaths/genmaths/calc_fouriertransform.htm
- [6] DeweSOFT, “Fft spectrum analysis (fast fourier transform)”, pristup: svibanj 2024. [Mrežno]. Adresa: <https://training.dewesoft.com/online/course/fft-spectral-analysis>
- [7] R. W. Ajinkya B. Parit, H. T. Jadhav, “An inbuilt passive harmonic filtration transformer for low voltage distribution network”, *International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies*, 2017., pristup: travanj 2024. [Mrežno]. Adresa: <https://www.semanticscholar.org/paper/An-inbuilt-passive-harmonic-filtration-transformer-Parit-Jadhav/fb3ab8ad18aa99b2f6e383d909272d5d59563a13>

- [8] David Williams, “Understanding, calculating, and measuring total harmonic distortion (thd)”, 2017., pristup: svibanj 2024. [Mrežno]. Adresa: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/the-importance-of-total-harmonic-distortion/>
- [9] Beckhoff Automation GmbH, “Manual | cp6700-0001”, 2024., pristup: travanj 2024. [Mrežno]. Adresa: https://download.beckhoff.com/download/document/ipc/industrial-pc/CP6700-0001_en.pdf
- [10] Wang Jian-Sheng, “Computational frameworks for the fast fourier transform”, pristup: lipanj 2024. [Mrežno]. Adresa: <https://phyweb.physics.nus.edu.sg/~phywjs/CZ5101/fft.c>
- [11] Pythonic Perambulations, “Understanding the fft algorithm”, pristup: lipanj 2024. [Mrežno]. Adresa: <https://jakevdp.github.io/blog/2013/08/28/understanding-the-fft/>

Sažetak

Sustav za analizu kvalitete električne energije zasnovan na industrijskom računalu

Filip Kirn

Kvaliteta električne energije vrlo je važan aspekt u industriji s obzirom na vrlo velik utjecaj na rad i performanse električnih uređaja. Postoje brojni čimbenici koji utječu na kvalitetu električne energije te načini na koji se ona nadzire. Ovaj rad istražuje korištenje faktora totalne harmoničke distorzije kao jednog od načina nadzora kvalitete energije u izmjeničnom trofaznom sustavu korištenjem Beckhoff industrijskog računala. U sklopu rada implementiran je algoritam određivanja frekvencijskog spektra signala napona i struje te računanje faktora totalne harmoničke distorzije i vizualizacija dobivenih podataka. Podaci se uspoređuju s referentnima dobivenima analizatorom snage te se donosi zaključak o kvaliteti određivanja električne energije korištenjem IPC-a. Rezultati mjerenja pokazali su vrlo mala odstupanja od referentnih iz čega proizlazi da je u svrhu određivanja kvalitete moguće koristiti industrijsko računalo ovoga tipa.

Ključne riječi: beckhoff, twincat3, ipc, totalna harmonička distorzija, frekvencijski spektar, kvaliteta električne energije, thd

Abstract

Power system quality analyzing system based on industrial computer

Filip Kirn

The quality of electrical power is a very important aspect in the industry due to its significant impact on the operation and performance of electrical devices. There are numerous factors that affect the quality of electrical power and ways in which it is monitored. This paper explores the use of the total harmonic distortion factor as a method for monitoring power quality in a three-phase AC system using a Beckhoff industrial computer. As part of the study, an algorithm was implemented to determine the frequency spectrum of voltage and current signals, calculate the total harmonic distortion factor, and visualize the obtained data. The data is compared with the reference data obtained by the power analyzer, and a conclusion is made about the quality of the determining power quality using an IPC. The measurement results showed very small deviations from the reference ones, which means that it is possible to use an industrial computer of this type for the purpose of determining the power quality.

Keywords: beckhoff, twincat3, ipc, total harmonic distortion, frequency spectre, power quality, thd