

# Dizajn algoritma za prediktivno prepoznavanje harmonijskog spektra stanja kvara električnih motora u distributivnoj mreži

---

Štenc, Dario

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:685951>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-23**

*Repository / Repozitorij:*

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



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

**Sveučilišni studij**

**DIZAJN ALGORITMA ZA PREDIKTIVNO PREPOZNAVANJE  
HARMONIJSKOG SPEKTRA STANJA KVARA ELEKTRIČNIH  
MOTORA U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI**

**Diplomski rad**

**Dario Štenc**

**Osijek, 2022**

## Contents

<b>1. UVOD</b> .....	2
1.1 ZADATAK DIPLOMSKOG RADA .....	3
<b>2. HARMONICI</b> .....	3
2.1. HARMONICI KOD ASINKRONIH MOTORA.....	4
<b>3. ASINKRONI MOTOR</b> .....	6
3.1. DIJELOVI ASINKRONOG MOTORA .....	7
3.2. PRINCIP RADA.....	8
<b>4. KVAROVI ASINKRONOG MOTORA</b> .....	9
4.1 Ležajni kvarovi .....	9
4.2. Ekscentritet zračnog rasporeda.....	10
<b>5. ZADATAK</b> .....	11
<b>SAŽETAK</b> .....	56
<b>LITERATURA</b> .....	57
<b>ŽIVOTOPIS</b> .....	58

## 1. UVOD

Dijagnostika stanja električnih strojeva u industrijskim pogonima neinvazivnim metodama i sa udaljene kontrolne točke u suvremenim sustavima održavanja predstavljaju jedan od polazišta buduće implementacije koncepta Industrije 4.0. Detekcija rane faze razvoja kvara električnog stroja omogućava prediktivno planiranje održavanja i popravaka u trenucima koji će minimalno narušiti proces proizvodnje, odnosno osigurati maksimalno povećanje intervala između zaustavljanja procesa proizvodnje u svrhu popravaka čime se smanjuju ukupni troškovi. Ovo bitno utječe na minimiziranje vjerojatnosti pojave neplaniranih zastoja koji su uvijek najskuplji način održavanja. Razvijene su različite metode daljinskog nadzora od kojih se ističe metoda spektralne analize struja napajanja električnih strojeva. Problem nastupa kada se u distributivnoj mreži napajanja pojavljuju i druge vrste potrošača.

Danas u svijetu uređaja energetske elektronike postoji niz normi iz djela kvalitete električne energije. Kvaliteta električne energije spada u normu EN 50160 čija je svrha opisati i utvrditi obilježja napona u distributivnoj mreži koji se odnose na frekvencije, oblika krivulje, veličine te simetrije tri napona faznih vodiča koji se mijenjaju prilikom normalnog rada zbog kvarova i smetnji.

Zbog sve većeg broja nelinearnih potrošača poput računala, klima uređaja, uređaja energetske elektronike i drugih, dolazi do negativnih posljedica koje se odražavaju na mrežu i na ostale priključene potrošače. Ove posljedice dovode do narušavanja kvalitete električne energije tj do narušavanja osnovnih parametara napona u ustaljenim ili prijelaznim režimima.

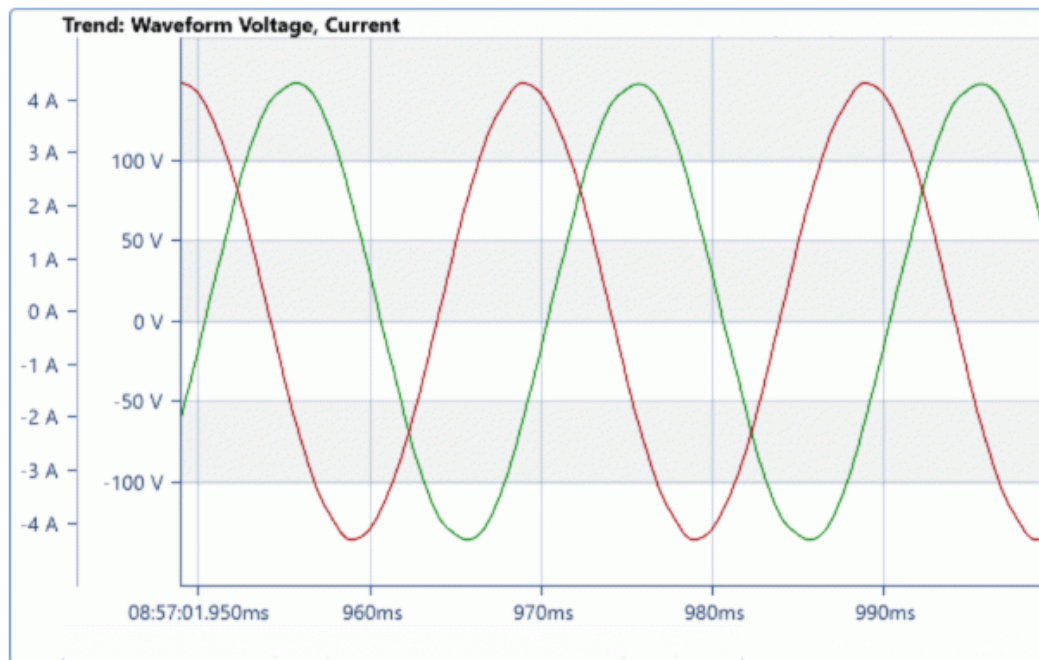
Kvarna stanja uređaja energetske elektronike za upravljanje električnim strojevima imaju svoje značajne harmonijske članove čijim prepoznavanjem se može preventivno spriječiti da ti nepoželjni harmonici putuju mrežom do nezaštićenog uređaja ili da ometaju rad nadzornih uređaja unutar koncepta Industrije 4.0.

## 1.1 ZADATAK DIPLOMSKOG RADA

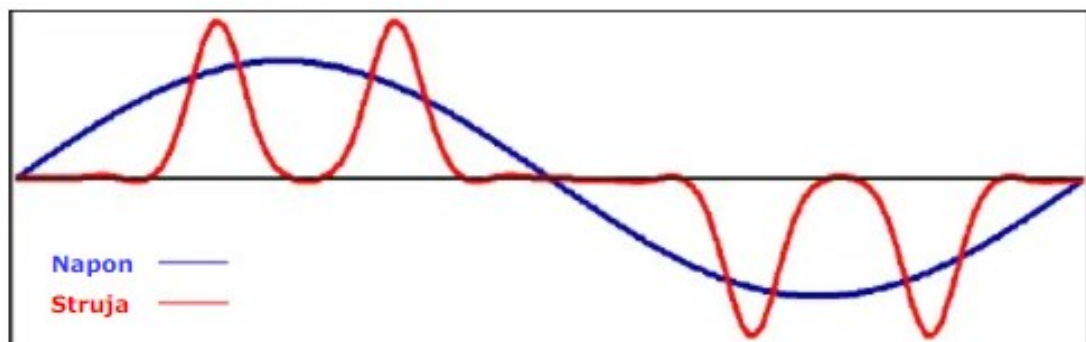
Zadatak rada je pripremiti ulazne parametre za algoritam strojnog učenja za potrebe nadzora rada električnih strojeva u industrijskim pogonima koji će korištenjem mjernog elementa distributivne mreže omogućiti prepoznavanje rane faze razvoja kvara. Prediktivno održavanje podrazumijeva neinvazivne metode mjerenja sa udaljene kontrolne točke koji osigurava planiranje popravaka sa minimalnim utjecajem na proces proizvodnje. Mjerenjem spektra viših harmonika pri kontroliranim stanjima kvara električnih motora trebaju se pripremiti ulazni parametri za sustav strojnog učenja koje bi na osnovu tih poznatih parametara mogao prepoznati moguće kvarove i preventivno alarmirati sustave zaštite.

## 2. HARMONICI

U teoriji signala harmonici prikazuju poremećaj signala, tj distorziju valnog oblika. Uzrok nastankaharmonika u mreži su trošila koja uzrokuju da struju koju uzimaju iz mreže nije sinusnog valnog oblika. Osnovni ili idealni harmonik je savršena periodična sinusoida pri 50 Hz. Na idućim slikama prikazan je osnovni harmonik napona i struje (slika 2.1), dok je na slici 2.2 prikazan primjer valnog oblika napona i harmonički izobličene struje.



Slika 2.1. Osnovni ili idealni harmonik je savršena periodična sinusoida pri 50 Hz [8]



Slika 2.2. Valni oblik napona i harmonički izobličene struje [8]

## 2.1. HARMONICI KOD ASINKRONIH MOTORA

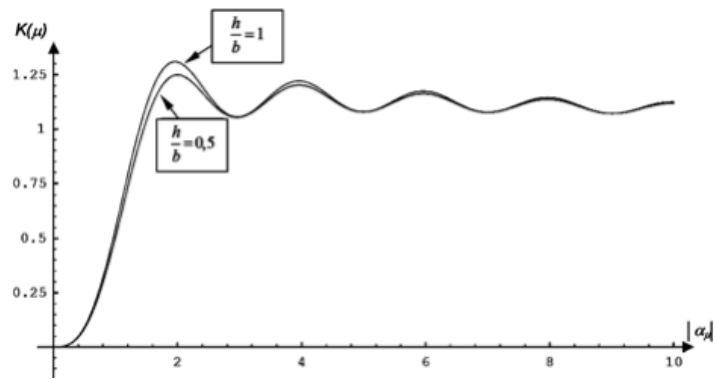
U današnje vrijeme sve više imamo uređaje koji se sastoje od nelinearnih elemenata koji se primjenjuju u sustavima radi povećanja efikasnosti i kontrole. U ovom radu proučavamo asinkrone motore koji su izloženi nesinusoidalnim uvjetima rada, odnosno kvarna stanja motora koja uzrokuju pojavu harmonika.

Najveća posljedica su viši strujni harmonici koji povećavaju gubitke u statoru i rotoru, također naponski harmonici izazivaju dielektrično naprezanje izolacije motora zbog čega se smanjuje vijek trajanja samog motora. Također, dolazi do povećavanja efektivne vrijednosti struje pa su gubici prilikom vrtložnih struja i histereza veći zbog čega dolazi do neravnomjerne raspodjele gubitaka što za posljedicu dovodi do zagrijavanja koje će naposljetku oslabiti izolaciju namota. Osim navedenog javlja se i moment koji oscilira i tako utječe na motor – pojava vibracije i buke motora što može dovesti do ubrzanog propadanja motora ili će doći do pojave mehaničke rezonancije.

Da bi lakše razumjeli utjecaj harmonika u struji napajanja motora moramo promotriti sam princip rada asinkronog motora. Motor je konstruiran za tri faze i nominalnu frekvenciju 50Hz, odnosno takav koncept razmještaja namota za nominalnu frekvenciju da se tvori zajedničko okretno polje (ekvivalent permanentnom magnetu koji mehanički rotira oko rotora). Takvo polje u rotorskom kavezu uzrokuje induciranje struja koje zatim tvore svoje polje. Pri nominalnoj brzini motora frekvencija struje u kavezu rotora je u korelaciji sa klizanjem:  $f_2 = s \cdot f_1$  (u nominalnoj točki klizanje je približno 0,04, pa bi frekvencija rotorskih struja bila 2Hz). Pri tome svaki štap rotorskog kaveza ima struju koja je fazno pomaknuta za utorski korak rotora (npr 24 utora na rotoru fazni pomak je  $360^\circ/24=15^\circ$ ). Svaka od tih struja sa okretnim magnetskim poljem ostvaruje silu. Pošto je rotorski kavez zajedno sa rotorskim paketom lima kruto tijelo spreg sila na svaki pojedini štap daje ukupnu silu koja se promatra kao konačni moment motora. Pri tome je bitno razumjeti da zbog magnetske granice vodič u utoru i željezo susjednih zuba, moment djeluje na željezo rotora i željezo statora.

Ovaj vrlo složeni koncept ostvarivanja momenta motora jako ovisi o konstrukciji i faznom pomaku struja statorskog namota koje trebaju biti simetrične fazno pomaknute. Pojava viših harmonika u struji znači da se pojavljuju nova okretna magnetska polja brzina višekratnika osnovne brzine okretnog magnetskog polja. Pojednostavljeno u sustavu rotacijskih polja to znači da unutar jednog perioda okretaja rotora momenti viših harmonika potpomažu i suprotstavljaju se glavnom okretnom magnetskom polju. To posljedično uzrokuje neravnotežu prema momentu tereta kojeg motor treba savladati i time rezistentnim povećanjem i smanjenjem (oscilacije) potrebne struje glavnog harmonika. To onda znači da se svi posljedično vezani otpori (strujni i magnetski) mijenjaju, ali to u konačnici dovodi do povećanja zagrijavanja i željeza i vodiča.

Prema [xx1] slijedi da je iznos pulzacijskih gubitaka u zubima paketa lima motora ovisan omjeru utora, debljini lima, te o frekvenciji viših harmonika odnosno njegovom višekratniku u odnosu na glavni harmonik. Posljedično to potvrđuje tvrdnju da pojava viših harmonika nije poželjna te da smanjuje efikasnost motora.



$$P_{dd\mu\text{ipul}} = \frac{K_{Fe}}{24 k_{Fe}} (\omega_{\mu} \delta_l)^2 \left[ k_c B_{\mu} \frac{\sin\left(\frac{\tau}{k_c b} \alpha_{\mu} \frac{\pi}{2}\right)}{\alpha_{\mu} \frac{\pi}{2}} \right]^2 V_e, \quad (51)$$

Slika 2.3. Faktor utjecaja otvora utora na površinske gubitke te izraz ovisnosti gubitaka o višim harmonicima

Ukoliko je napon izobličen manje od 5% motor će moći raditi bez opasnosti od pregrijavanja. Izobličenje napona i struje definira se preko THD (Total Harmonic Distorsion) – totalne harmonijske distorzije što predstavlja odnos između efektivne vrijednosti viših harmonika i efektivne vrijednosti osnovnog harmonika. Kroz diplomski rad promatrat će se ispravan asinkroni motor kojem ćemo snimiti harmonike, a potom ćemo snimati odziv na neispravnom motoru te vidjeti koje su razlike.

Treba razumjeti da i ispravan motor zbog nesavršenosti dizajna i feromagnetskih svojstava željeza paketa limova ima određenu količinu viših strujnih harmonika pri idealnom sinusnom naponu napajanja. No, taj dio gubitaka je uračunat u klasu efikasnosti, odnosno ukupni gubici su manji od 2%.

## 2.2. FOURIEROVA TRANSFORMACIJA

Fourierova transformacija razlaže bilo koju funkciju u zbroj sinusoidnih baznih funkcija. Svaka od ovih baznih funkcija je složena eksponencijala različite frekvencije. Fourierova transformacija nam stoga daje jedinstven način gledanja bilo koje funkcije - kao zbroj jednostavnih sinusoida.

Fourierov niz pokazuje nam kako bilo koju periodičnu funkciju prepisati u zbroj sinusoida. Fourierova transformacija je proširenje ove ideje na neperiodične funkcije.

### 2.2.1 BRZA FOURIEROVA TRANSFORMACIJA

Brza Fourierova transformacija (FFT **fast Fourier transform**) je važna mjerna metoda u znanosti o i mjerenju. Ona pretvara signal u pojedinačne spektralne komponente i na taj način daje informacije o frekvenciji i signalu. FFT se koriste za analizu kvarova, kontrolu kvalitete i praćenje stanja strojeva ili sustava.

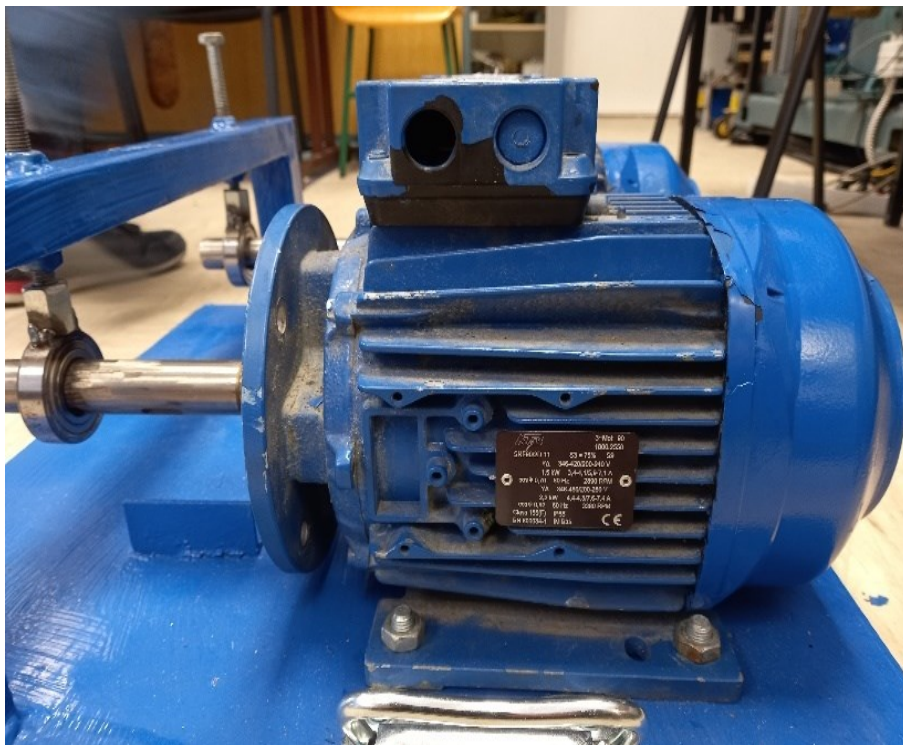


### 2.2.2 DISKRETNA FOURIEROVA TRANSFORMACIJA

Diskretna Fourierova transformacija (DFT **discrete Fourier transform**) jedan je od najvažnijih alata u digitalnoj obradi signala. Koristimo tri uobičajena načina. Prvo, DFT može izračunati frekvencijski spektar signala. Ovo je izravno ispitivanje informacija kodiranih u frekvenciji, fazi i amplitudi sastavnih sinusoida. Drugo, DFT može pronaći frekvencijski odziv sustava iz impulsnog odziva sustava i obrnuto. Treće, DFT se može koristiti kao međukorak u složenijim tehnikama obrade signala.

## 3. ASINKRONI MOTOR

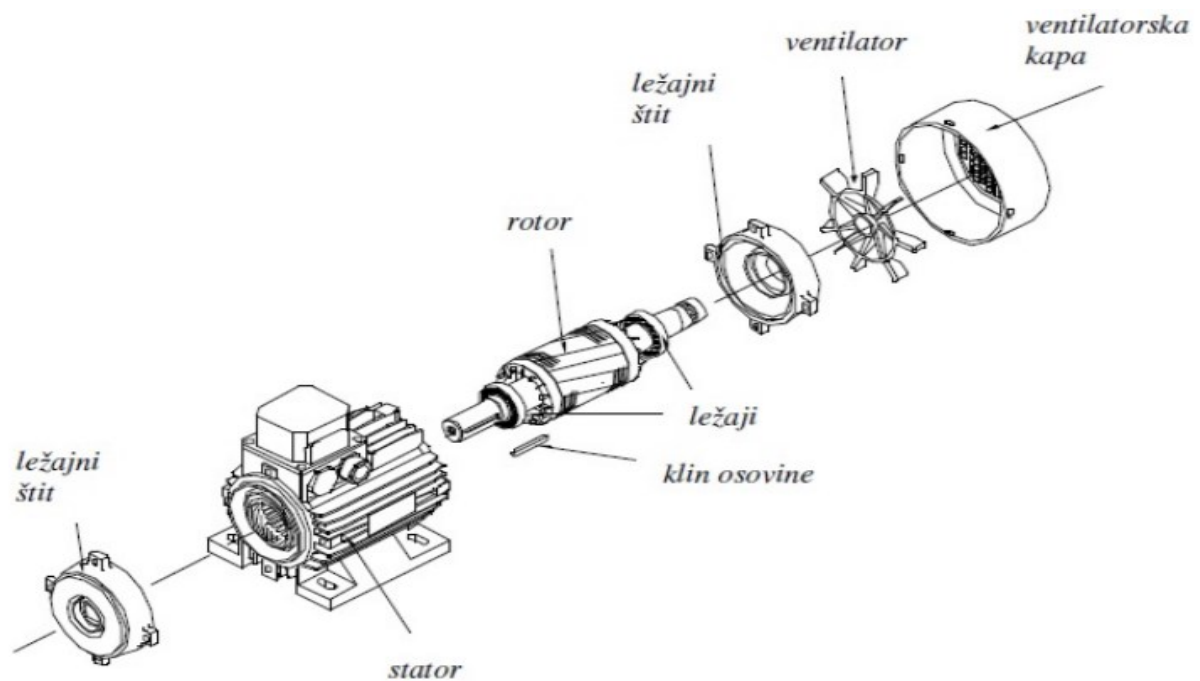
Asinkroni motor je predstavnik električnog stroja male snage koji se proizvodi u veliki serijama. Najveće snage asinkronog motora su oko 60 MW. Zbog svoje jednostavnosti i pouzdanosti, asinkroni motori imaju najčešću uporabu u industriji. Kako danas imamo sve veći broj reguliranih pogona sve više proširujemo korištenje takvog motora.



Slika 3.1. Prikaz trofaznog asinkronog motora

### 3.1. DIJELOVI ASINKRONOG MOTORA

Asinkroni motor sastoji se od ležajnog štita, statora, rotora, klina osovine, ventilatora i ventilatorske kape. Stator asinkronog motora ima raspoređen, najčešće trofazni, namot. Rotor asinkronog motora izvodi se bez istaknutih polova za razliku od sinkronog motora, i namot je raspoređen na obodu rotora. Namot rotora ne napaja se iz vanjskog izvora. Naponi u vodičima rotorskog namota induciraju okretno magnetsko polje statora, te kada se motor optereti struja će poteći kroz rotor.



Slika 3.2. Osnovni mehanički dijelovi asinkronog stroja [7]

Kučište stroja služi kao nosač i zaštita paketa i namota stroja. U srednjem dijelu kućišta su štitovi ležajeva za osovinu u kojoj je smješten rotor. Na kućistu motora nalazi se priključna kutija na kojoj su stezaljke vezane s krajevima statorskog namota.

### 3.2. PRINCIP RADA

Priključivanjem na izmjenični simetrični trofazni izvor kroz statorski namot poteku struje koje stvore okretno (rotirajuće) magnetsko polje. Ono rotira sinkronom brzinom vrtnje  $\omega_s$  i pri svojoj rotaciji presijeca vodiče statorskog i rotorskog namota u kojima se inducira napon. Struja magnetiziranja i iznos okretnog magnetskog toka upravo su takvi da se u statorskom namotu inducira napon  $E_1$  koji drži ravnotežu s priključenim naponom izvora  $U$ . Iznos induciranog napona  $E_2$  u rotorskom namotu ovisi o indukciji, brzini kojom okretno polje presijeca vodiče i o značajkama rotorskog namota. [9]

Vodič rotora nalazi se u magnetskom polju indukcije okretnog polja statora te na njega isto djeluje elektromotorna sila.

$$\vec{F} = I_2 \cdot (\vec{l} \times \vec{B})$$

Pošto sila rotor okreće u smjeru okretnog magnetskog polja, njihov zbroj svih umnožaka sile i promjera rotora predstavlja okretni moment elektromagnetski sila motora. Okretni moment proporcionalan je umnošku struje rotora toka i kuta među njima što je prikazano jednačinom.

$$M = k \cdot I_2 \cdot \phi \cdot \cos\varphi_2$$

U motornom režimu rada, rotor se vrtni brzinom manjom od brzine okretnih polja, a okretna polja vrte se sinkronom brzinom. Zaostajanje rotora za okretnim poljima definiramo kao klizanje koje je opisano sljedećim izrazom.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

## 4. KVAROVI ASINKRONOG MOTORA

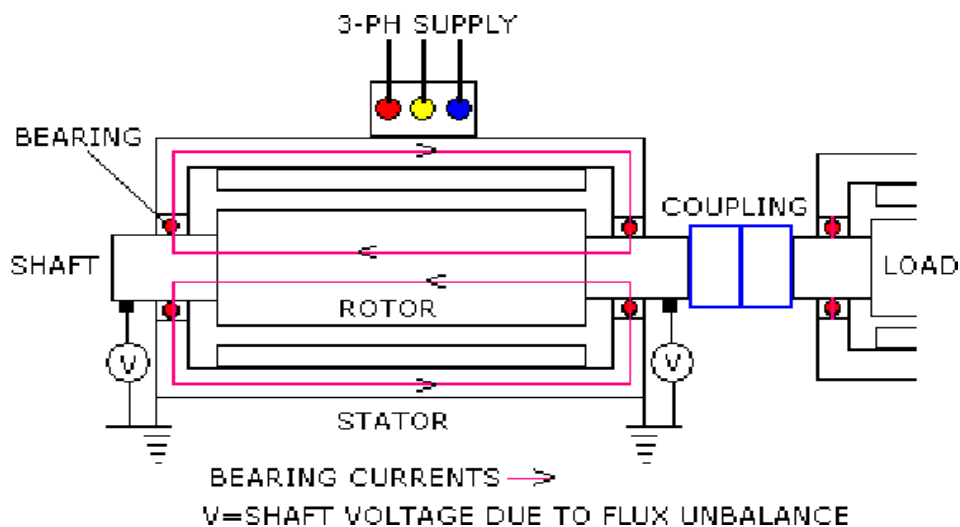
Asinkroni motori su kritične komponente za većinu industrije. Kvarovi asinkronih motora mogu dovesti do neočekivanih posljedica kao što je prekid u industrijskom pogonu s posljedicama u troškovima, kvaliteti proizvoda i sigurnosti. Tradicionalni kvarovi asinkronih motora su podijeljeni u dva područja: mehanički problemi i električni problemi. Mehanički problemi uključuju trošenje ležaja, ekscentritet zračnog raspora i neuravnoteženost rotora. Električni problemi uključuju slomljene šipke rotora i izgaranje izolacije namota.

Gotovo 40%-50% svih kvarova je povezano s ležajevima, oko 5%-10% su kvarovi rotora, a greške neuravnoteženosti su unutar 12% ostalih grešaka. [1]

### 4.1 Ležajni kvarovi

Propadanje ležajeva je vodeći uzrok kvarova motora. Oštećenja na ležajevima često su uzrokovana nepropisnim utiskivanjem ležaja na osovinu ili u kućište. Česta je i neusklađenost ležajeva kao rezultat neispravne ugradnje ležaja.

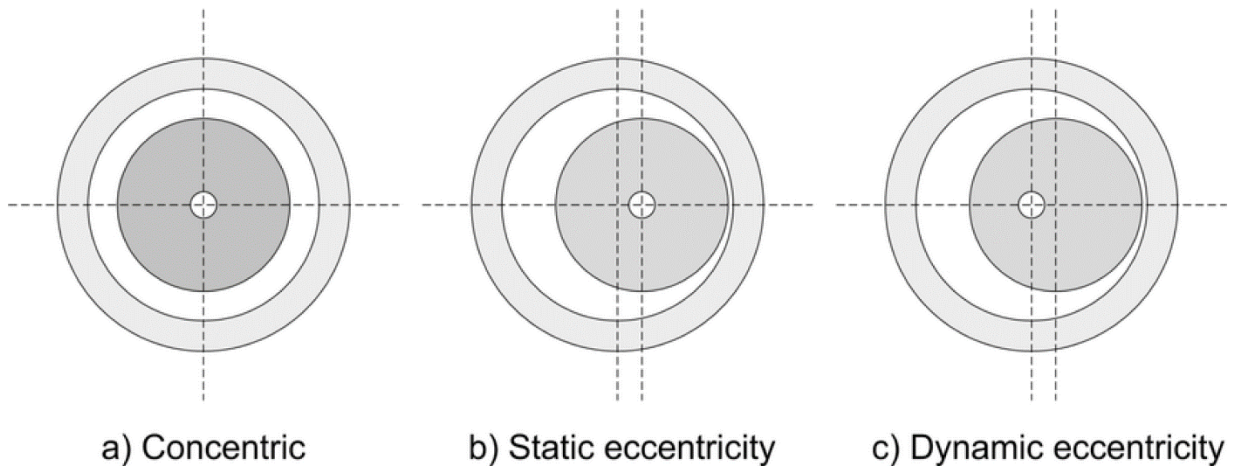
Električni uzročnici oštećenja ležajeva su struje koje teku kroz ležajeve i dovode do njihove erozije. One se razlikuju, kako po načinu nastanka, tako i prema njihovom trajanju tijekom rada motora mogu biti: osovinske struje (induktivne) i ležajne struje (kapacitivne). Kapacitivne struje karakterizirane su probojima izolacije maziva ležaja, kratko traju i imaju velike iznose, te stvaraju oštećenja u obliku nasumičnih kratera po obodu ležajne košuljice (u praksi poznata pod engl. nazivom: pitting). Induktivne struje su relativno puno manjeg iznosa u odnosu na kapacitivne, ali su trajno prisutne u radu motora. Njihovim djelovanjem javljaju se oštećenja u obliku zarez, koji su pravilno raspoređeni po obodu ležajne košuljice (u praksi poznata pod engl. nazivom: fluting). Oba tipa struja djeluju erozivno na ležajnu košuljicu, zbog čeg dolazi do mehaničkog oštećenja ležajnih kuglica ili valjaka, čije raspadanje uzrokuje pojavu povećanih vibracija i daljnjeg oštećenja ostalih dijelova motora. [3]



Slika 4.1. Prikaz strujnog kruga zatvaranja osovinskih struja. [4]

## 4.2. Ekscentritet zračnog raspora

Ekscentricitet zračnog raspora predstavlja uvjet kada udaljenost zračnog raspora između rotora i stator nije ujednačen. Postoje dvije vrste abnormalnosti zračnog raspora: statički i dinamički. U slučaju statičkog ekscentriciteta položaj od minimalnog radialnog zračnog raspora je fiksiran, dok u slučaju dinamičkog položaja ekscentriciteta minimalnog zračnog raspora prati okretanje rotora. Normalno (koncentrično) stanje, statičko i dinamičko stanje ekscentriciteta su ilustrirani na slici 4.2.

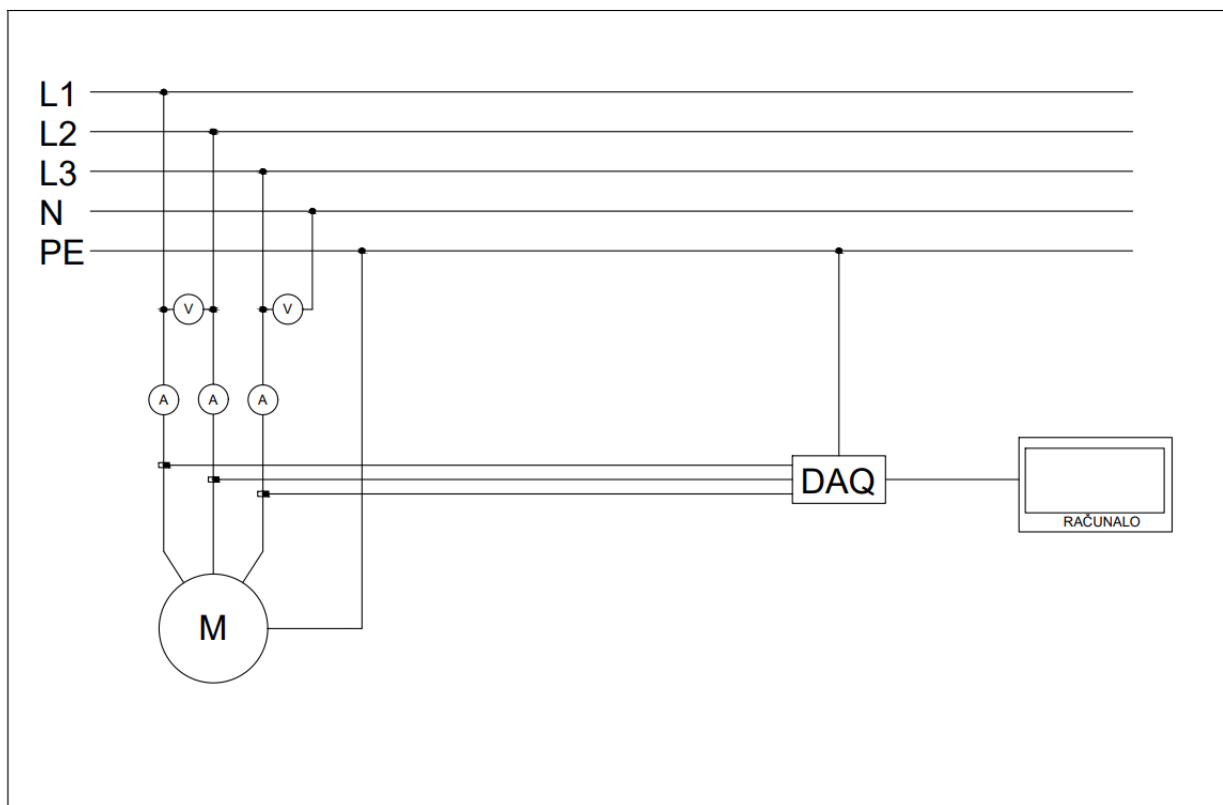


Slika 4.2. Normalno (koncentrično) stanje, statičko i dinamičko stanje ekscentriciteta [5]

Pri napajanju niskonaponskih asinkronih motora (s homogenim jarmovima) iz mreže mogu nastati osovinske struje, koje dovode do kvarova ležaja. Mehanizmi nastajanja osovinskih struja kod tih motora, koji u pravilu imaju homogene jarmove (bez zračnih raspora) jako su komplicirani. Uzrok tim strujama je, uglavnom, ekscentrični položaj rotora u statoru (statička i dinamička ekscentričnost), a nužni uvjet za nastajanje tih struja je nelinearnost krivulje magnetiziranja limova paketa motora. [6]

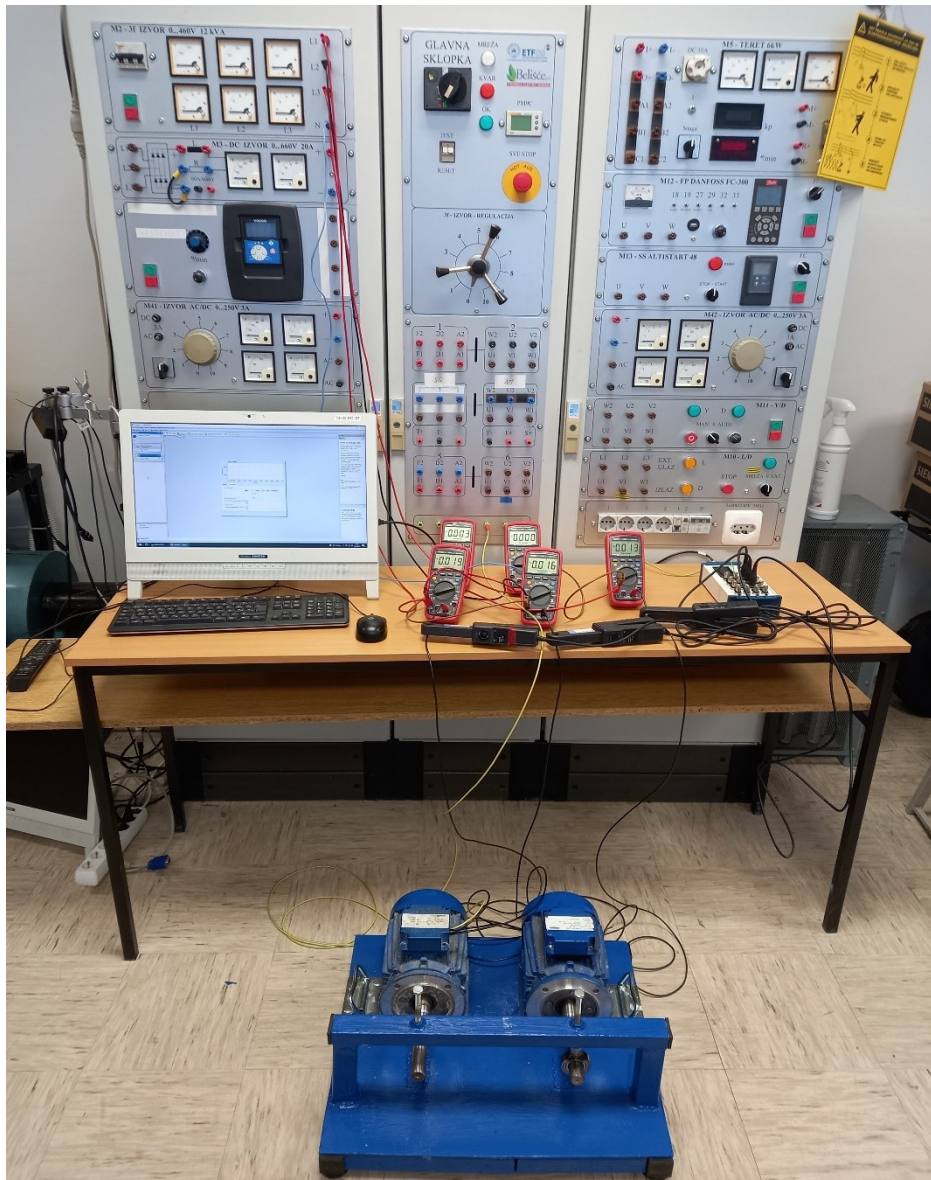
## 5. ZADATAK

Zadatak diplomskog rada bio je shematski prikaz spajanja makete na ispitni pult prikazan je na slici 5.1. i upute kako spojiti maketu na ispitni pult da bi se provodila mjerenja dana su u nastavku rada. Maketa se spaja na ispitni pult 400V, mjerenje se provodi pomoću računlanog programa Signalexpress koji pomoću strunih klješta i National instruments NI USB-6218 kartice. Prikupljeni podatci se spremaju u txt datoteku koju je moguće implementirati u MATLAB kako bi se dobila Fourierova transformacija gdje dolazimo do spektralne analize strujnih signala dobivenih mjerenjem u laboratoriju. Paralelno s računalnim programom pomoću digitalnih ampermetara i voltmeta se vrši provjera napona i struje kako bi se smanjila pogreška pri mjerenju te smanjio rizik od uništenja opreme.



Slika 5.1. Shema spajanja makete





Slika (5.2.). Prikaz spojene makete na ispitnom pultu.

Popis opreme potrebne za izvedbu mjerenje:

- Ispitni pult s izmjeničnm izvorom 400V
- Pet (5) multimetara; tri (3) ampermetra i dva (2) voltmera (Slika 5.3.)
- National instruments NI USB-6218 kartica (Slika 5.4.)
- Strujna klješta (Slika 5.6.)
- Računlni programi SignalExpress i MATLAB
- Maketa (Slika 5.7.)



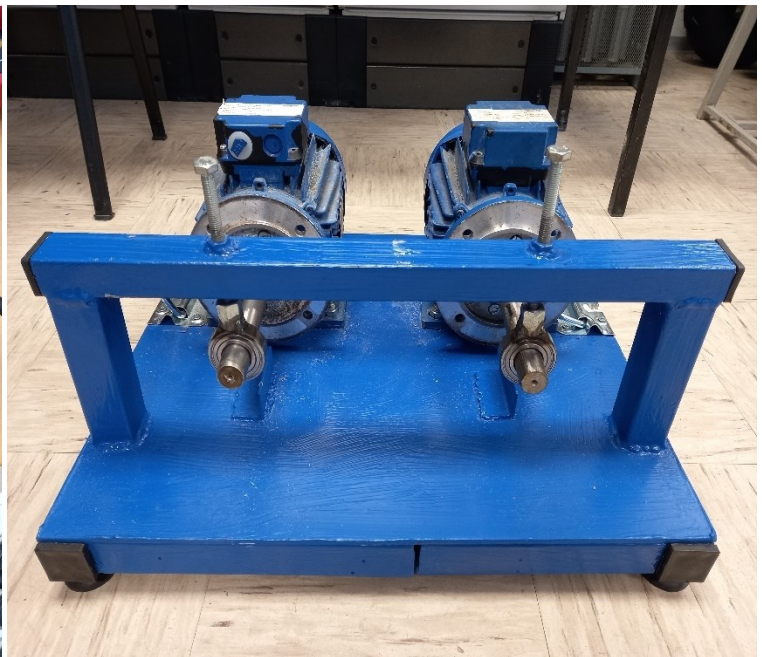
Slika 5.3. Multimetar



Slika 5.4. National instruments NI USB-6218 kartica



Slika 5.6 Strujna kliješta

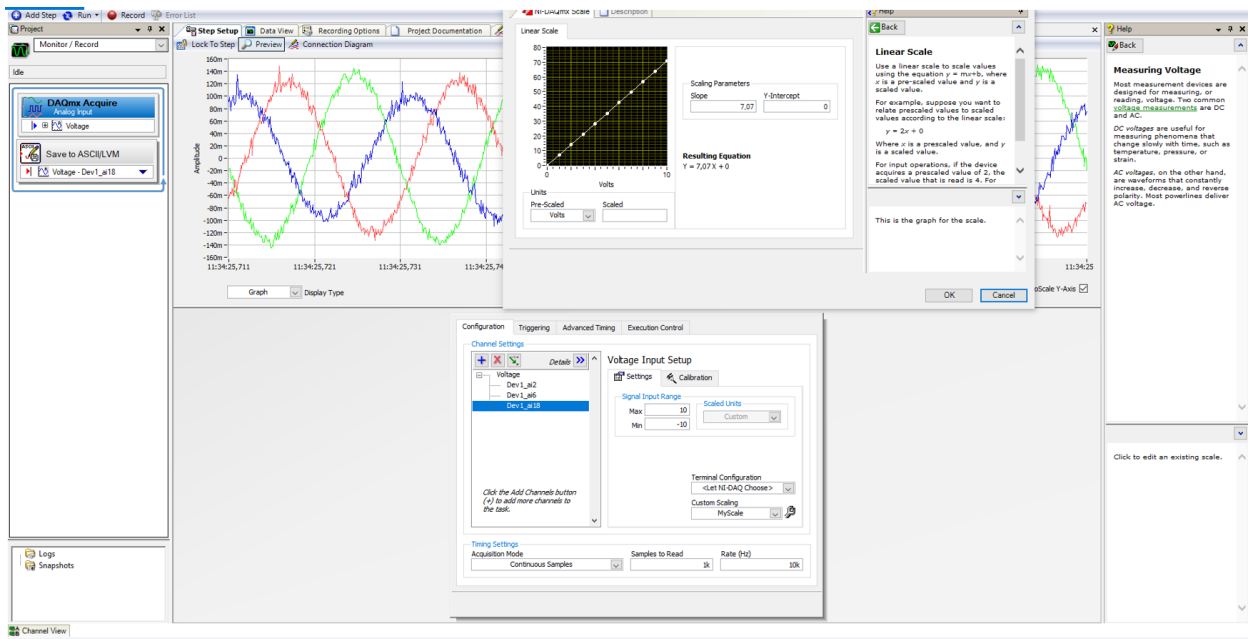


Slika 5.7 Maketa

Nakon spajanja makete i puštanja motora u pogon na nazivne podatke bitno je namjestiti postavke Singlaexpress računalnog programa. Na Slici 5.8 su prikazane postavke programa za sljedeća mjerenja. Prvo započnemo sa odabirom uređaja s kojim mjerimo i odabirom strujnih kliješta koja ćemo koristiti. Sljedeći je korak postaviti pravilno uzorkovanje. Postavljamo Rate (Hz): 10k i Samples to read: 1k. Također moramo podesiti i voltage input setup gdje terminal configuration postavljamo na '!' <Let NI-



DAQ Choose>', tada moramo postaviti i Custom Sacaling: 'MyScale'. Odabirmom 'MyScale' treba odrediti našu skalu koja je bila Slope: '7,07 i Y-Intercept: '0'.



Slika (5.8). Prikaz potrebnih postavki

Završetkom postavljanja postavki računanih programa i spajanja makete možemo početi s mjerenjima. U ovoj vježbi ćemo odraditi snimanje strujnog spektra asinkronog trofaznog motora gdje će biti snimana svaka faza posebno. Maketa se sastoji od dva trofazna asinkrona motora sa nazivnim podacima Slika 5.9.



Slika 5.9: Natpisna pločica motora.

Potrebno je snimiti strujni spektar dva motora u praznom hodu, kratkom spoju, ekscentričnom osovinom i istrošenim ležajevima. Na slici 5.7 možete vidjeti maketu gdje će dalje u radu lijevi motor biti motor 1, desni motor 2. Ekscentar rotora ćemo izazvati pritiskanjem osovine prema dolje što će nam omogućiti konstrukcija makete koja je predviđena za ovaj pokus. U pokusu istrošenih ležaja na motoru 1 smo zamijenili ispravne ležajeve sa onim koje smo dobili u radnji za popravak elektro motora te su ti

ležajevi ranije bili u radu te su oni potpuno ne ispravni. Na motoru 2 smo ispravne ležajeve zamijenili ležajevima koje smo mi oštetili. Ležaj s prednje strane motora smo stavili jedan od starih, a ležaj sa zadnje strane motora smo oštetili Slika 5.10.



Slika 5.10: Namjerno oštećeni ležaj.

Obradu signala dobivenih u Signalexpressu obrađujemo pomoću računalnog programa MATLAB. Pomoću brze fourierove transformacije moći ćemo vidjeti spektranlu analizu viših harmonika. Na slici 5.11 prikazan je kod (FFT) brze fourirevore transforacije orginalnog signala i (DFT) diskrente fourierofe transforamcije koja izbjegava nedostatke koji proizlaze iz frekvencijskih ljestvica koje ne mogu odgovarati karakteristikama signala.

```

%% Dario Stenc, FFT, DFT
filename = 'lezajM2f2.txt' ;
X = csvread(filename,0,2);
Fs = 1/0.00125;           % Sampling frequency
T = 1/Fs;                 % Sampling period
L = 12000;                % Length of signal
t = (0:L-1)*T;           % Time vector

Fn = Fs/2;                % Nyquist Frequency
FX = fft(X)/L;           % Fourier Transform
Fv = linspace(0, 1, fix(L/2)+1)*Fn; % Frequency Vector
Iv = 1:length(Fv);       % Index Vector

figure(3)
plot(Fv, abs(FX(Iv))*2)
grid
title('Fourier Transform Of Original Signal `lezajM2f2`')
xlabel('Frequency (Hz)')
ylabel('Amplitude')
saveas(figure(3), 'Fourier Transform Of Original Signal `lezajM2f2`.png');
savefig(figure(3), 'Fourier Transform Of Original Signal `lezajM2f2`')

FXdcoc = fft(X-mean(X))/L; % Fourier Transform (D-C Offset Corrected)

figure(4)
plot(Fv, abs(FXdcoc(Iv))*2)
grid
title('Fourier Transform Of D-C Offset Corrected Signal `lezajM2f2`')
xlabel('Frequency (Hz)')
ylabel('Amplitude')
saveas(figure(4), 'Fourier Transform Of D-C Offset Corrected Signal `lezajM2f2`.png');
savefig(figure(4), 'Fourier Transform Of D-C Offset Corrected Signal `lezajM2f2`')

```

Slika 5.11: MATLAB kod

## 5.1. REZULATI MJERENJA

## Očitane vrijednosti na multimetrima

Dobivene vrijednosti na digitalnim multimetrima koji su prikazivali vrijednosti struja po fazama, linijski i fazni napon prikazani su u tablici 1 i tablici 2.

Motor 1:

	$A_1$ (A)	$A_2$ (A)	$A_3$ (A)	$U_f$ (V)	$U_l$ (V)
Prazan hod	3.14	2.78	2.96	404.8	231.9
Kratak spoj	4.22	4.09	4.26	65	38.23
Ekscentritet rotora	3.17	2.78	2.85	404.6	230.08
Ležajni kvarovi	2.86	2.89	2.79	399	230.08

Tablica 1: Naponi i struje motora 1 izmjerenih na multimetrima.

Motor 2:

	$A_1$ (A)	$A_2$ (A)	$A_3$ (A)	$U_f$ (V)	$U_l$ (V)
Prazan hod	3.04	2.6	2.9	400.1	229.5
Kratak spoj	4.54	4.501	4.65	68	41.4
Ekscentritet rotora	3.08	2.73	3.06	403.1	231.5
Ležajni kvarovi	3.13	3.05	3.04	405	234.5

Tablica 2: Naponi i struje motora 2 izmjerenih na multimetrima.

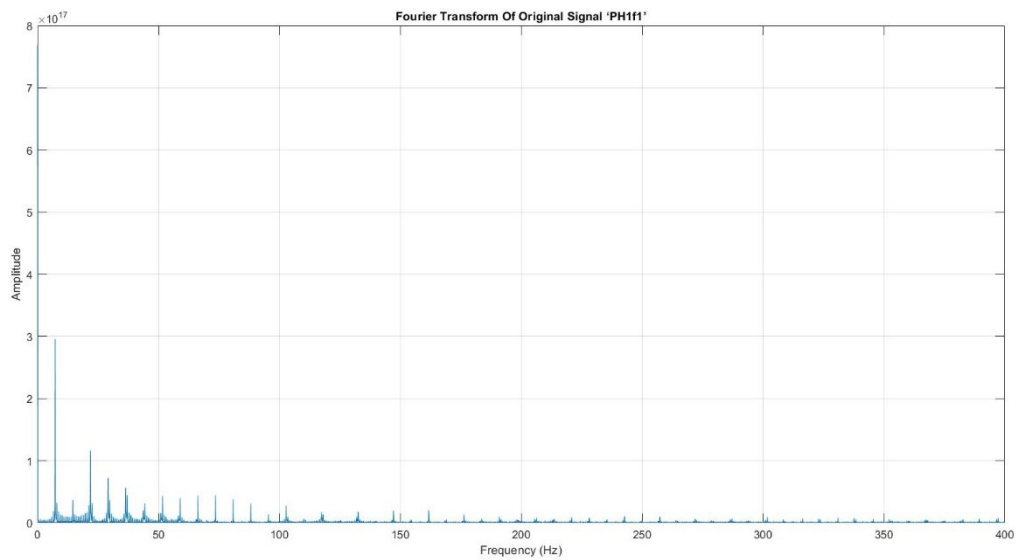
Spektralna analiza harmonijskog spektra struja trofaznog asinkronog motora dobivena pomoću računalnog programa MATLAB prikazana je u sljedećim slikama (Slika 17.- slika 89.).

# Spektralna Analiza

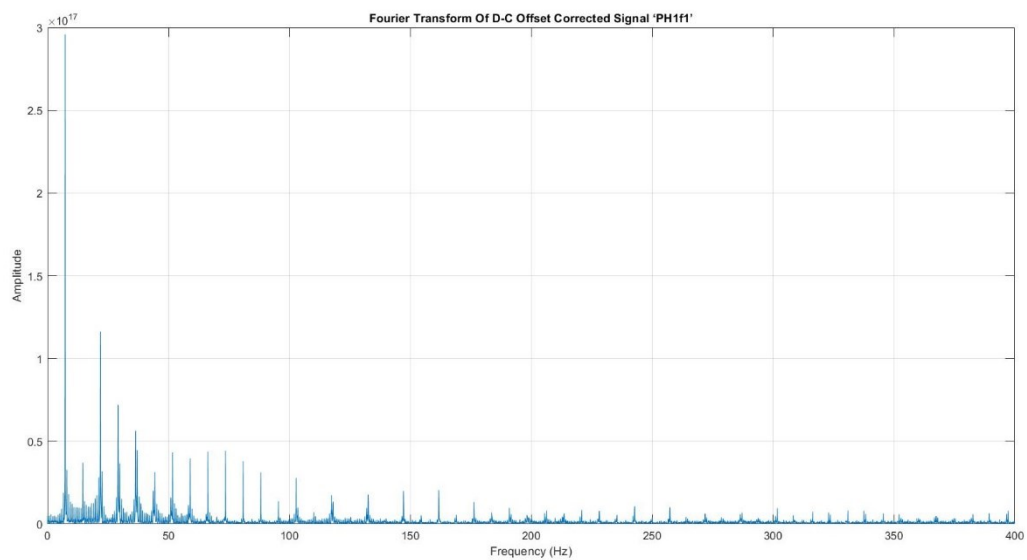
MOTOR 1

*PRAZAN HOD*

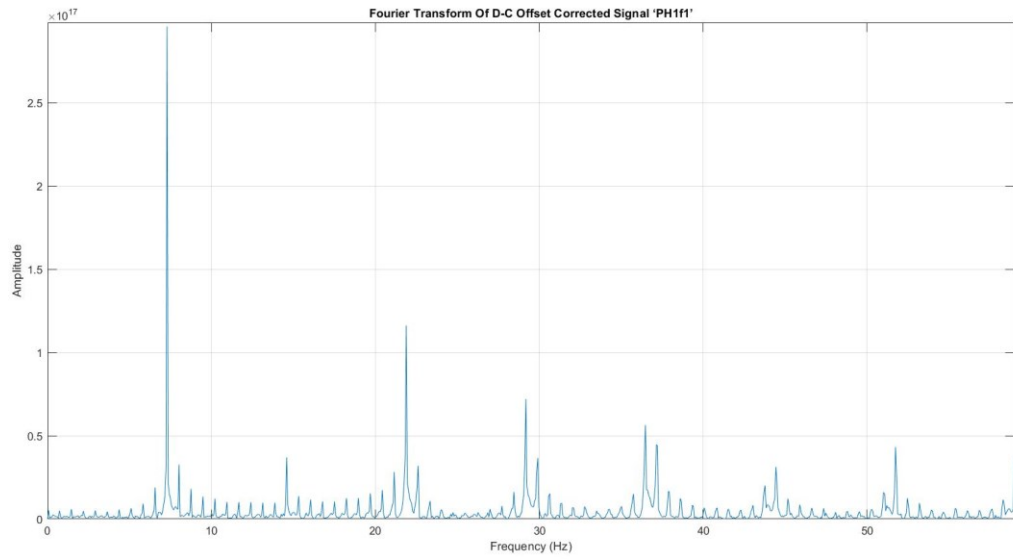
Faza 1



Slika 5.12: Prazan hod motora 1, faza 1, FFT signal 0 – 400Hz

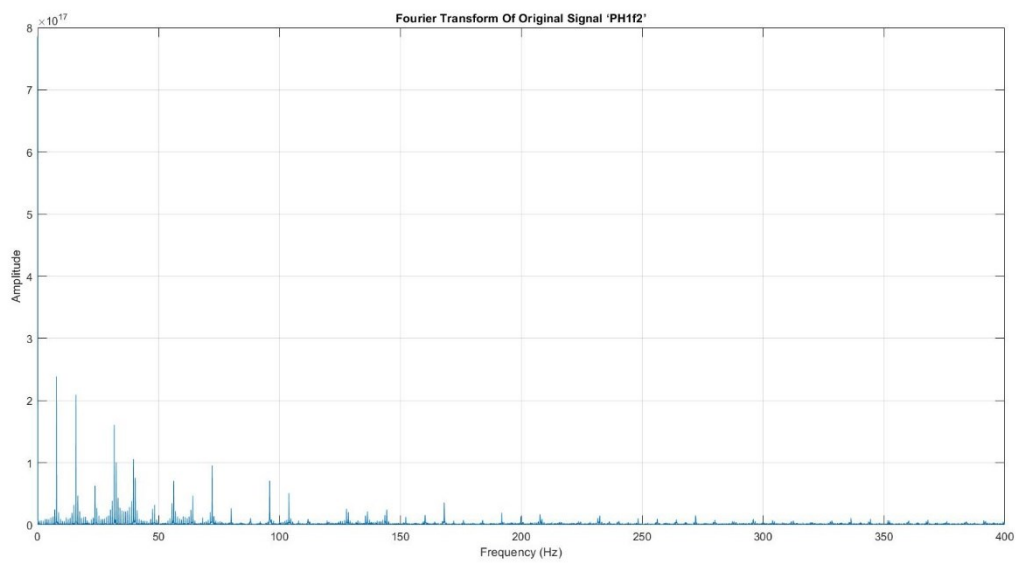


Slika 5.13: Prazan hod motora 1, faza 1, DFT signal 0-400Hz

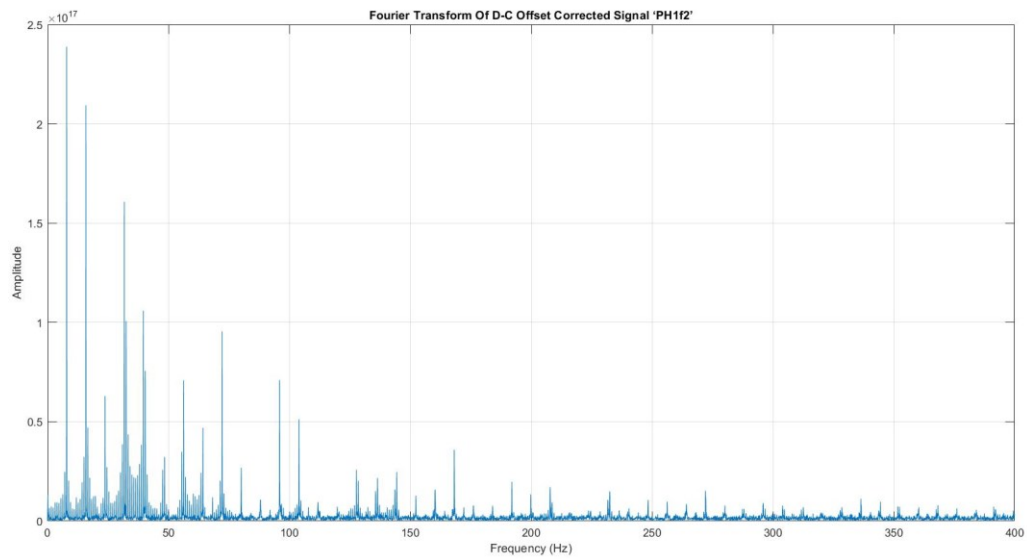


Slika 5.14: Prazan hod motora 1, faza 1, DFT signal 0-60Hz

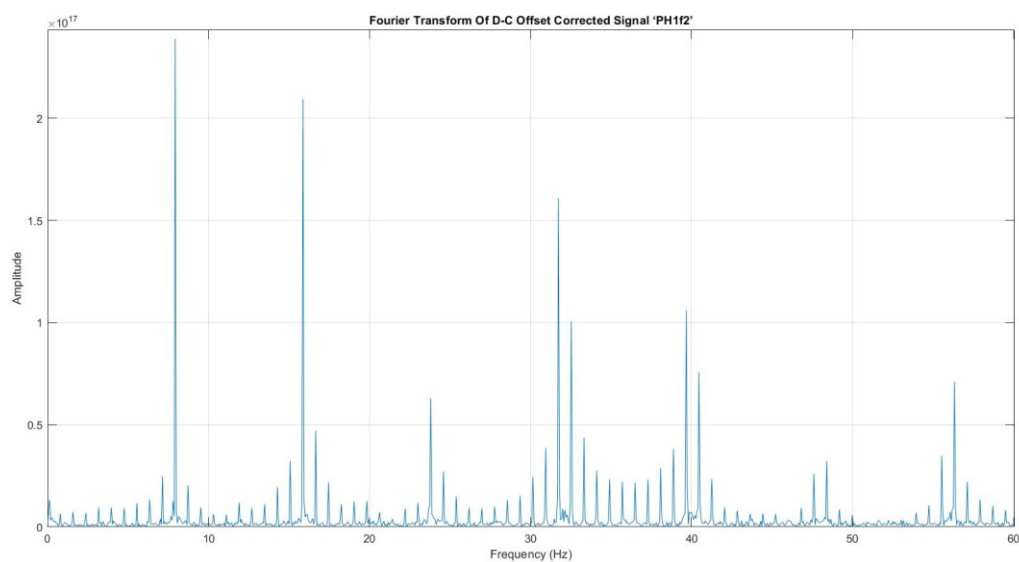
Faza 2



Slika 5.15: Prazan hod motora 1, faza 2, FFT signal 0-400Hz

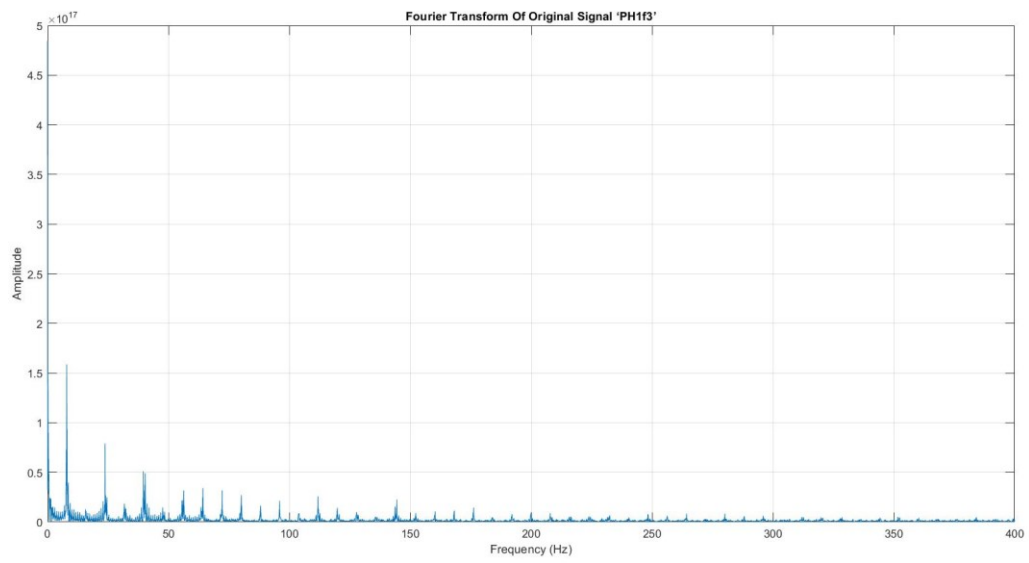


Slika 5.16: Prazan hod motora 1, faza 2, DFT signal 0-400Hz

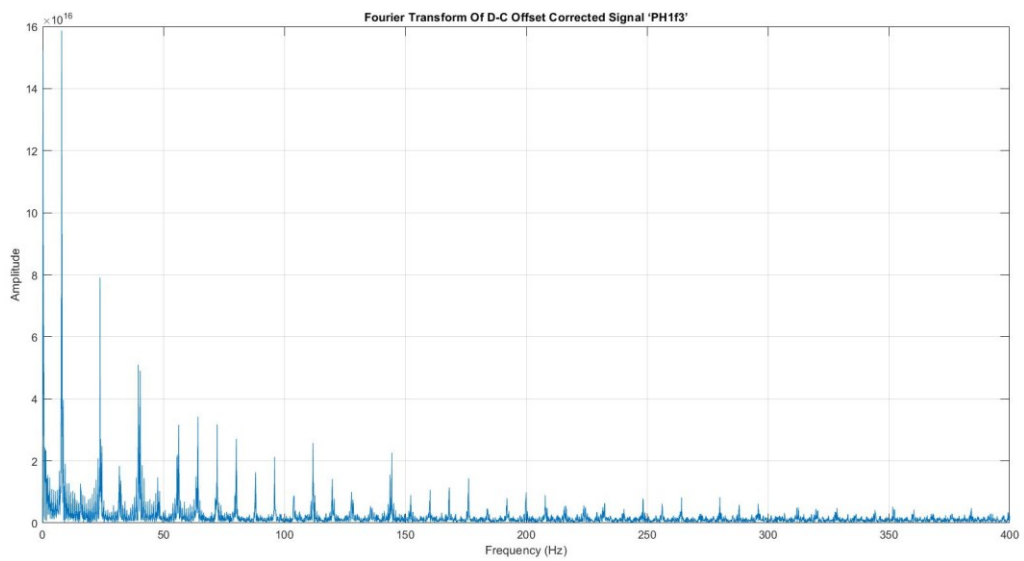


Slika 5.17: Prazan hod motora 1, faza 2, DFT signal 0-60Hz

### Faza 3

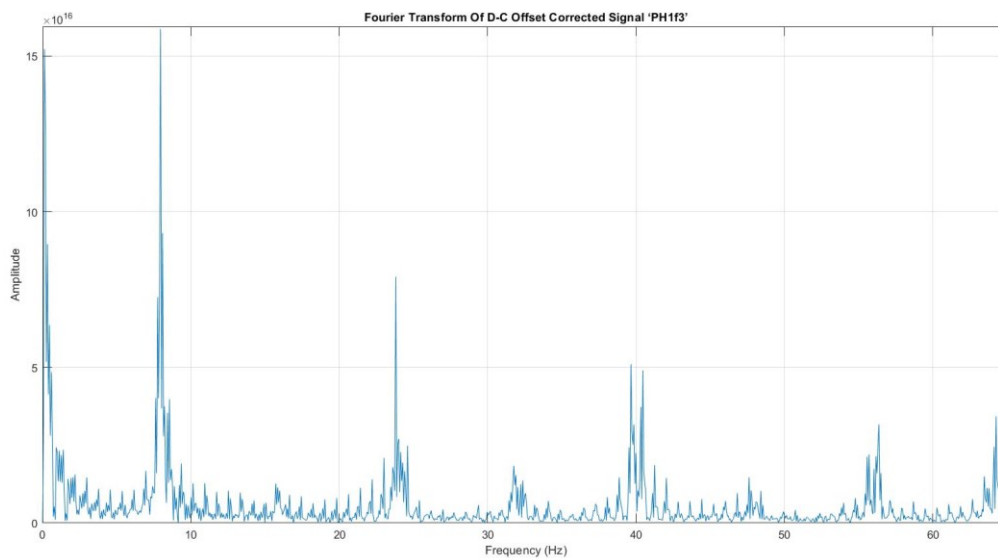


Slika 5.18: Prazan hod motora 1, faza 3, FFT signal 0-400Hz



Slika 5.19: Prazan hod motora 1, faza 3, DFT signal 0-400Hz



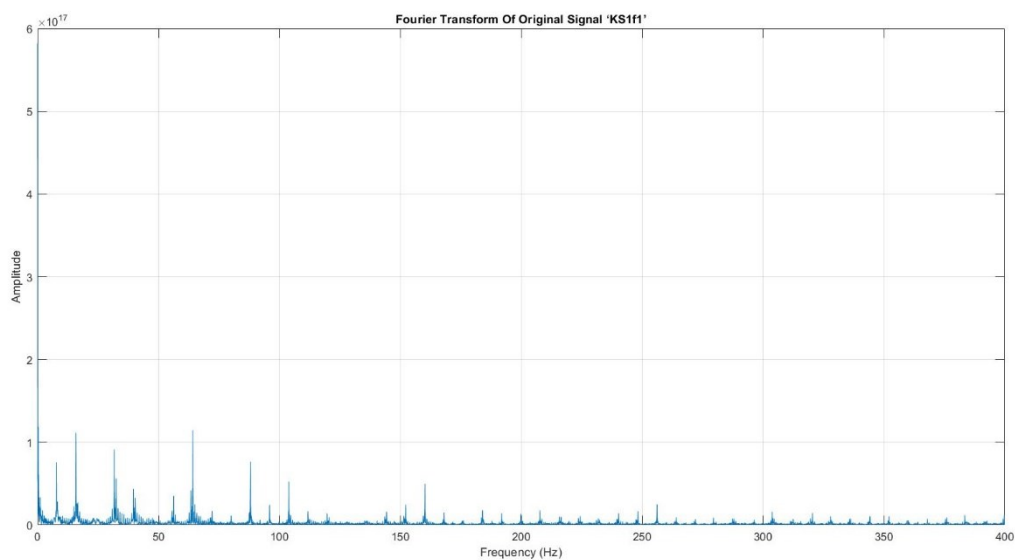


Slika 5.20: Prazan hod motora 1, faza 3, DFT signal 0-65Hz

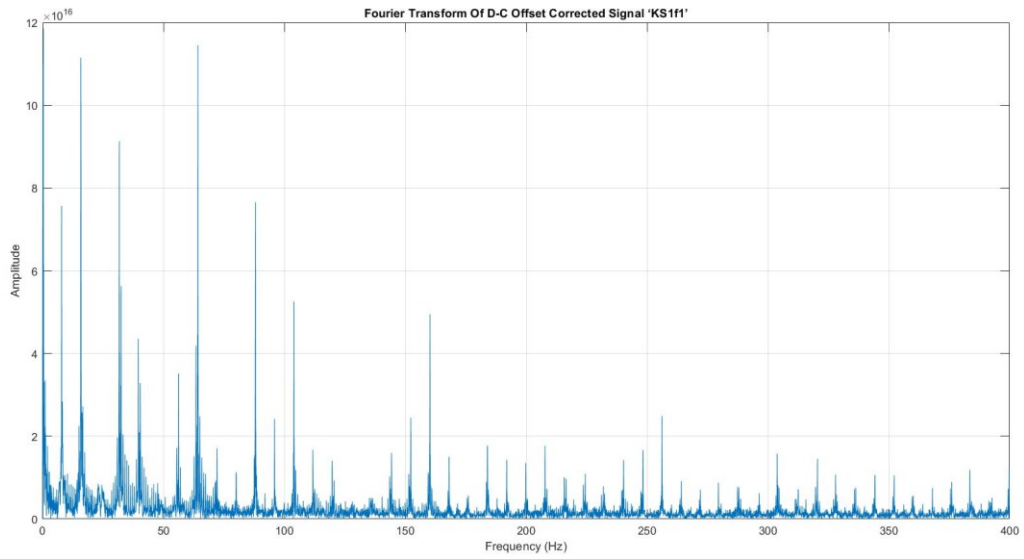
Dobiveni odzivi praznog hoda koji su prikazani na slikama (17-25) će nam poslužiti kao referente veličine za usporedbu sa simuliranim kvarnim stanjima ovoga motora. Zbog jasnijeg prikaza spektra odradili smo svaku fazu zasebno kako bi lakše primijetili harmonike u strujnom spektru.

### *KRATKI SPOJ*

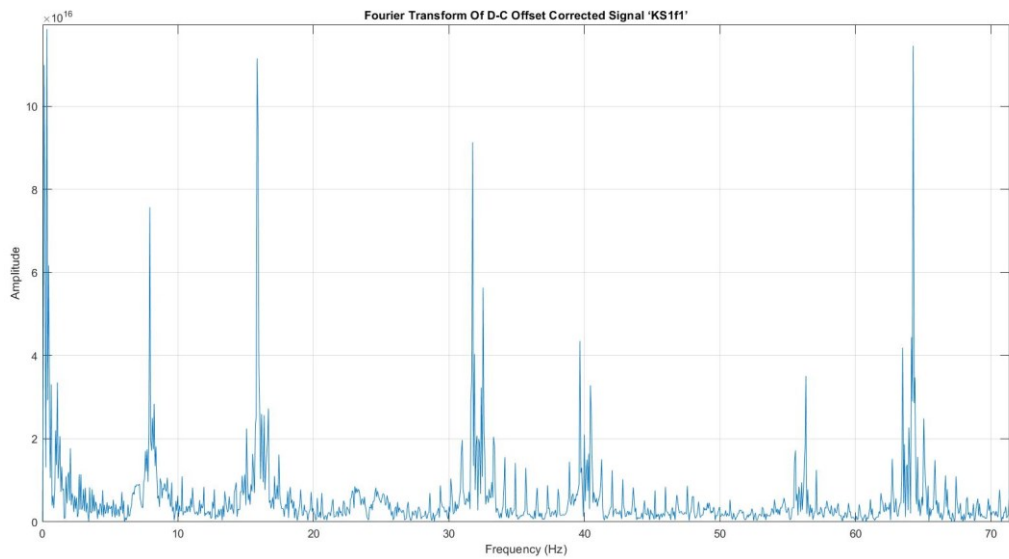
#### Faza 1



Slika 5.21: Kratki spoj motora 1, faza 1, FFT signal 0-400Hz

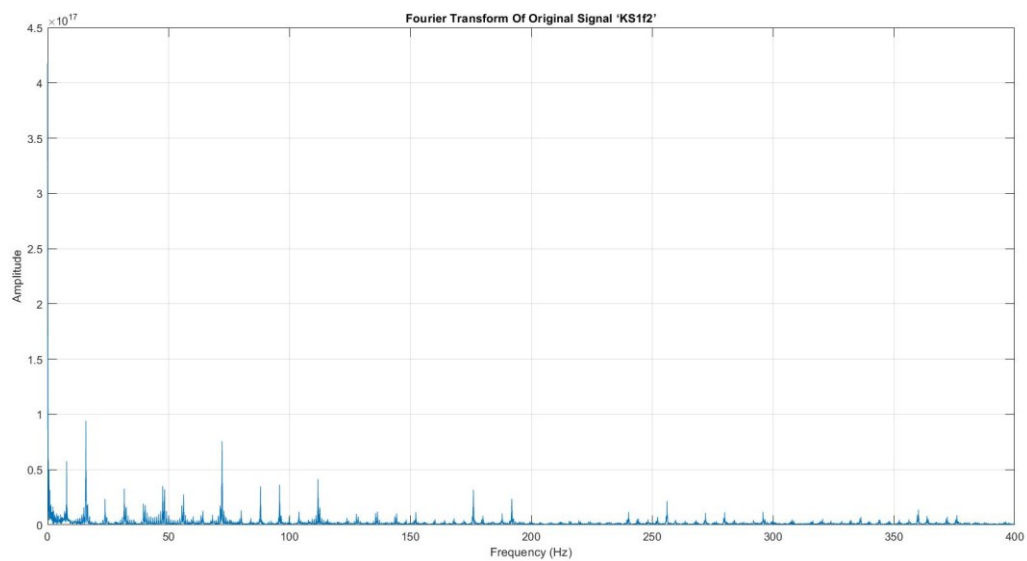


Slika 5.22: Kratki spoj motora 1, faza 1, DFT signal 0-400Hz

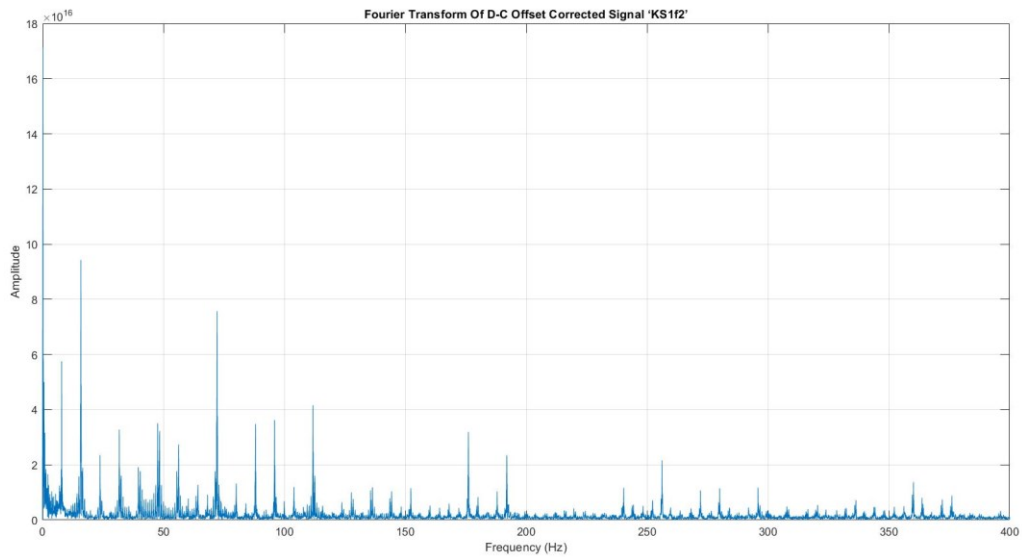


Slika 5.23: Kratki spoj motora 1, faza 1, DFT signal 0-75Hz

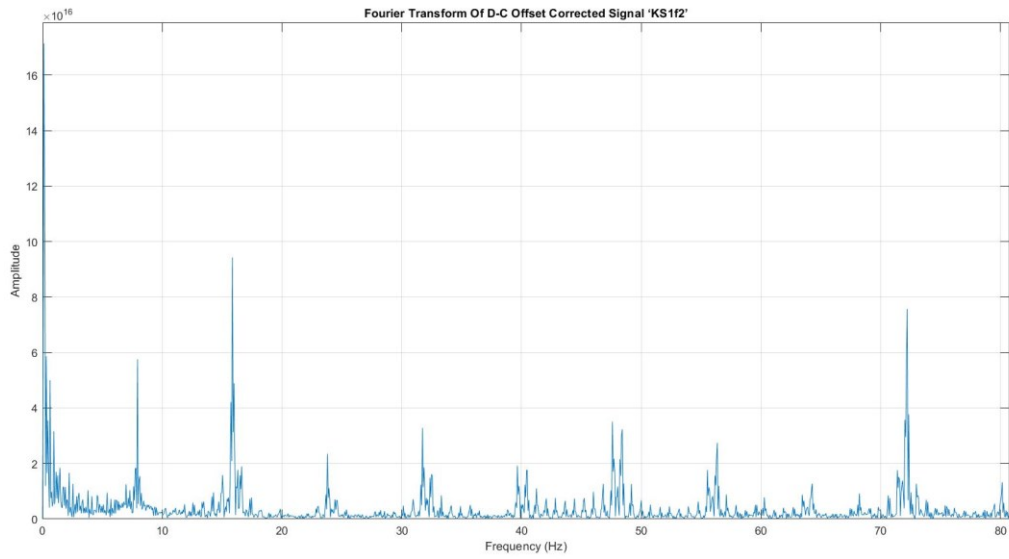
## Faza 2



Slika 5.24: Kratki spoj motora 1, faza 2, FFT signal 0-400Hz

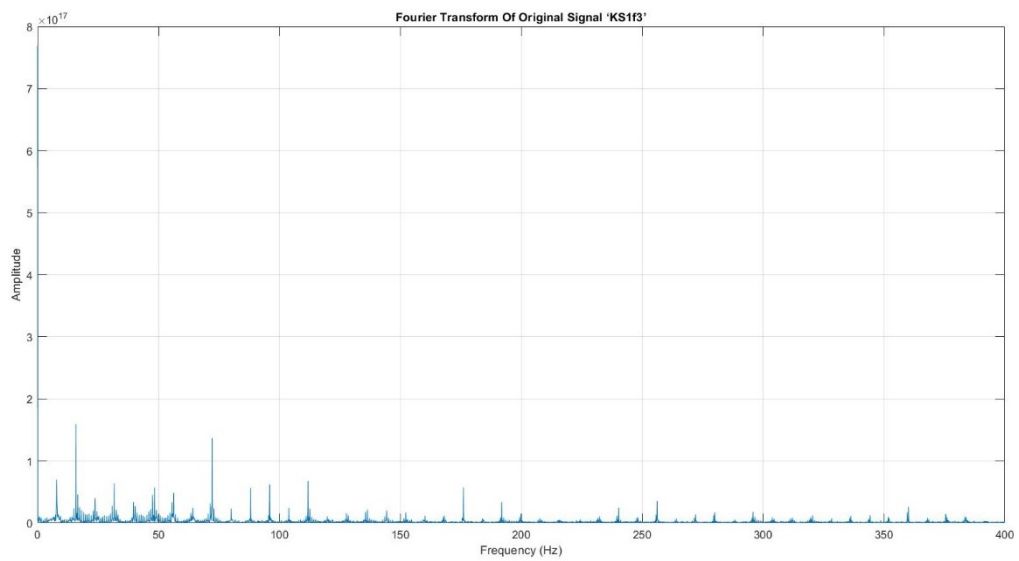


Slika 5.25: Kratki spoj motora 1, faza 2, DFT signal 0-400Hz

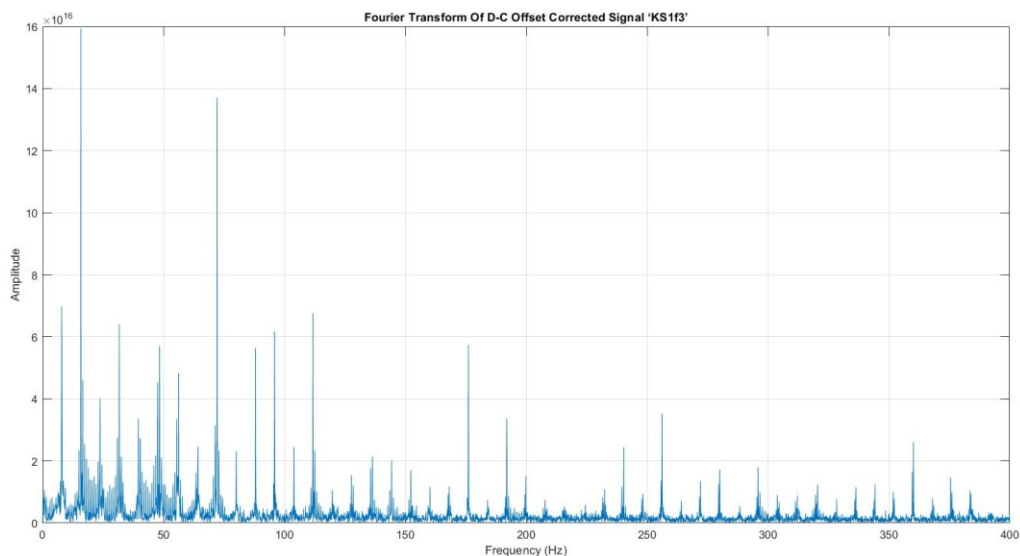


Slika 5.26: Kratki spoj motora 1, faza 2, DFT signal 0-80Hz

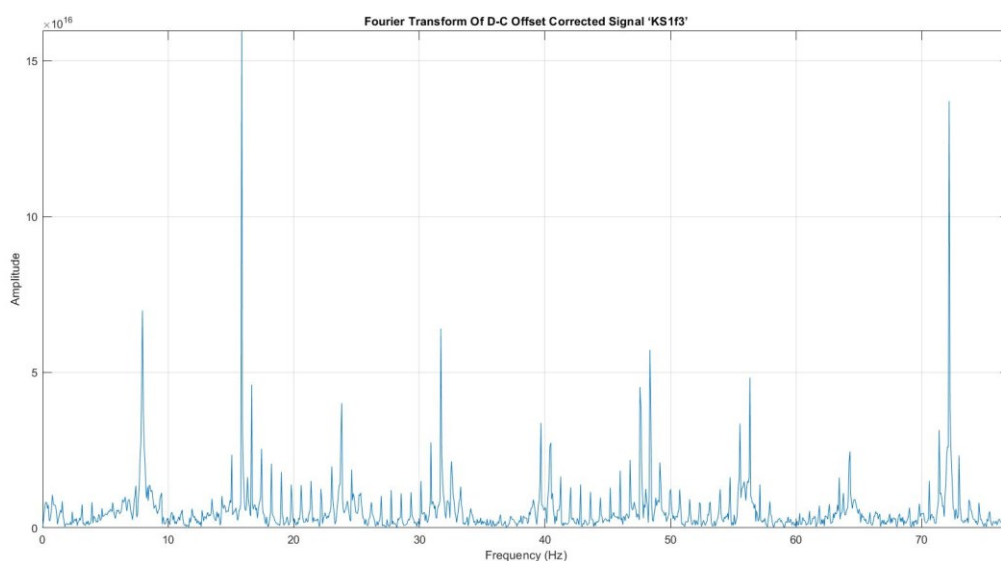
Faza 3



Slika 5.27: Kratki spoj motora 1, faza 3, FFT signal 0-400Hz



Slika 5.28: Kratki spoj motora 1, faza 3, DFT signal 0-400Hz

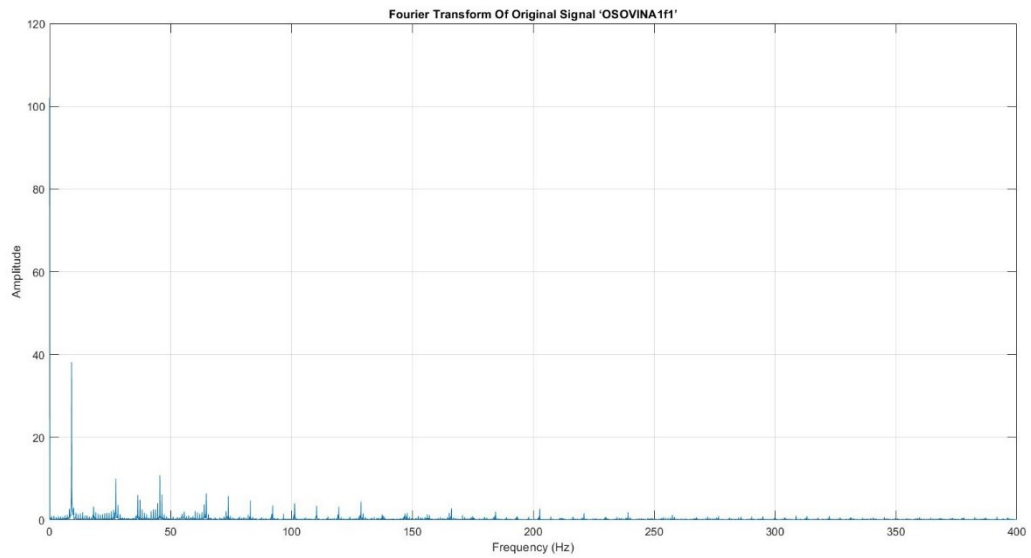


Slika 5.29: Kratki spoj motora 1, faza 3, DFT signal 0-75Hz

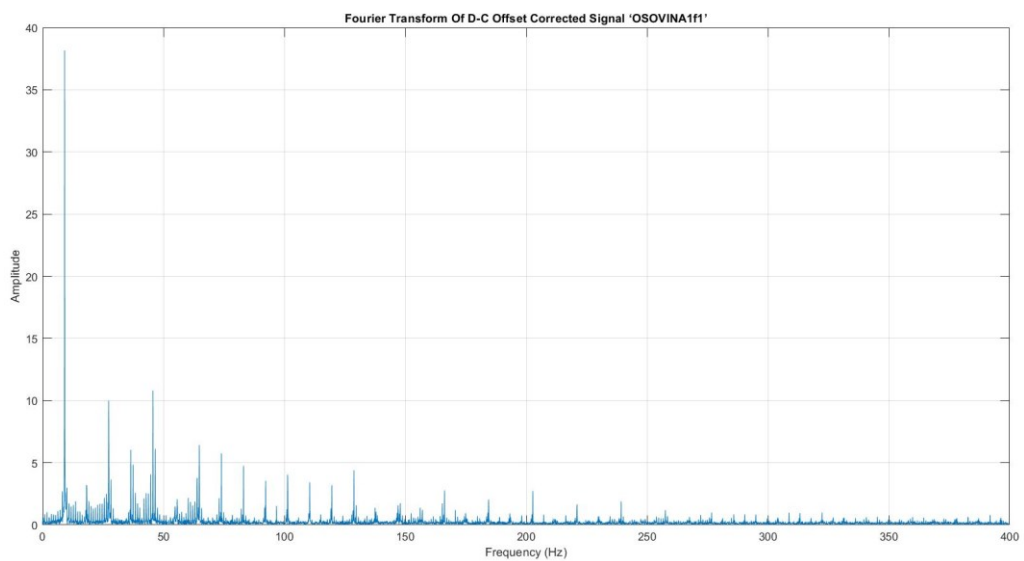
Usporedbom harmonijskog spektra praznog hoda koji nam je referentna veličina za ovaj pokus primjećujemo kako se u prvoj fazi pojavljuju harmonici na 15Hz i 60Hz. Također možemo primijetiti i povećanje amplitude svih ostalih harmonika za 4-6 puta većih nego u praznom hodu. Druga faza motora nam prikazuje povećanje amplitude osnovnih harmonika i pojavu harmonika na 72Hz. U trećoj fazi dolazi do pojave harmonika na 32Hz, 48Hz i 72Hz također kao i ostalim fazama amplitude znatno većeg iznosa nego u pokusu praznog hoda.

## EKSCENTRIET OSOVINE

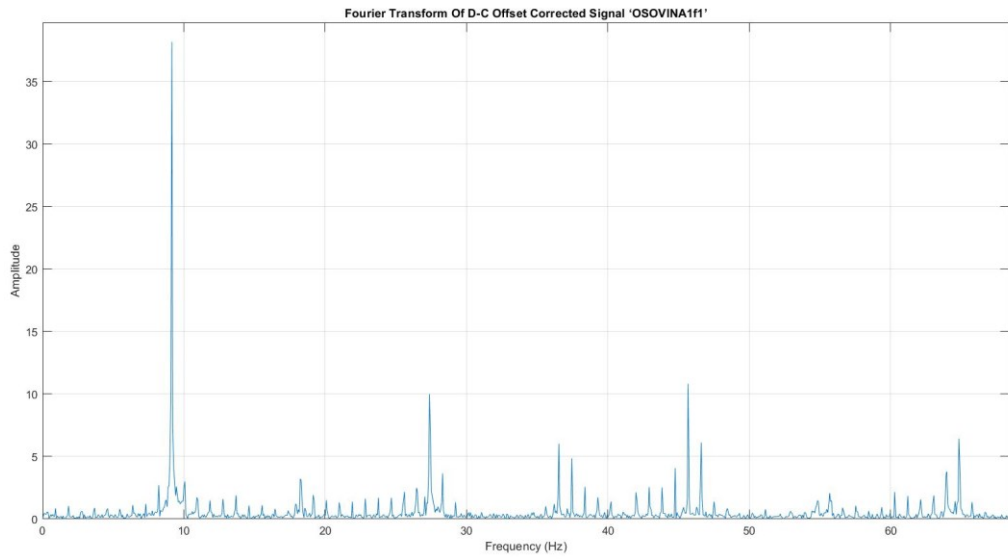
### Faza 1



Slika 5.30: Ekscentar rotora motora 1, faza 1, FFT signal 0-400Hz

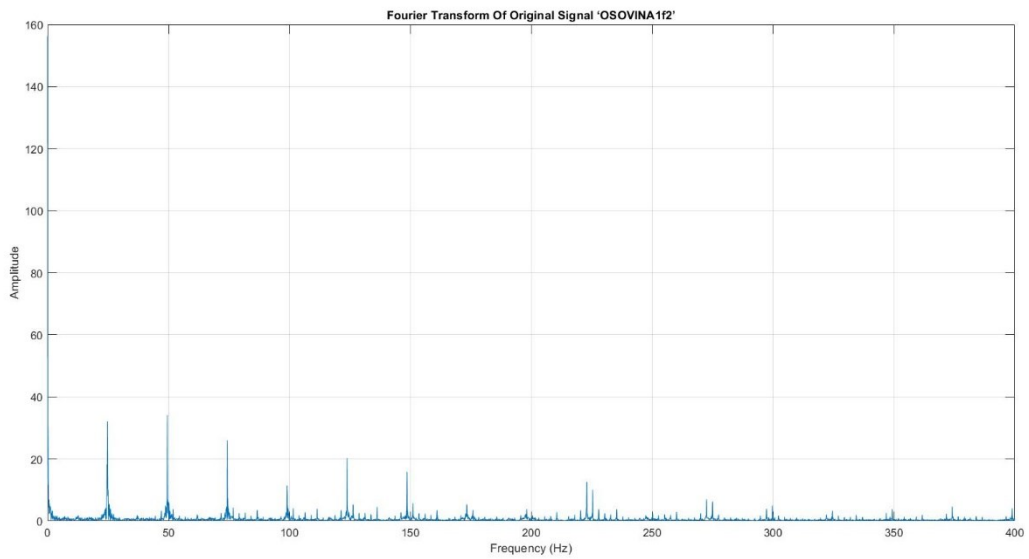


Slika 5.31: Ekscentar rotora motora 1, faza 1, DFT signal 0-400Hz

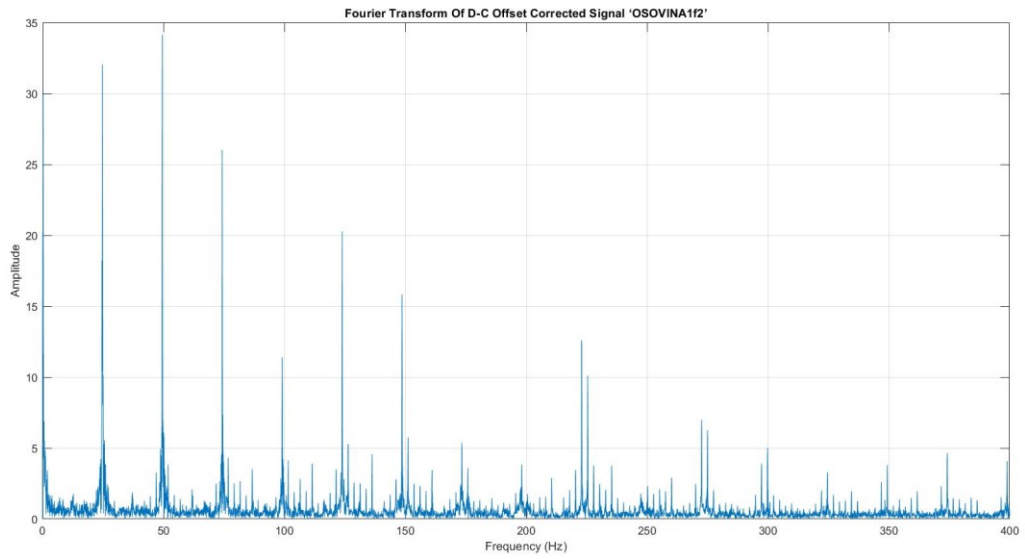


Slika 5.32: Ekscentar rotora motora 1, faza 1, DFT signal 0-65Hz

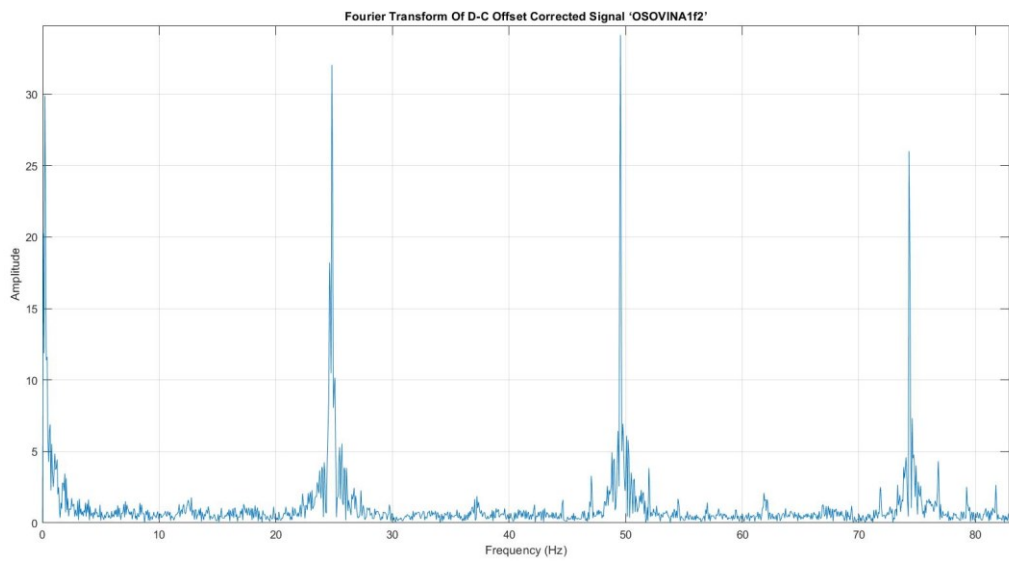
Faza 2



Slika 5.33: Ekscentar rotora motora 1, faza 2, FFT signal 0-400Hz



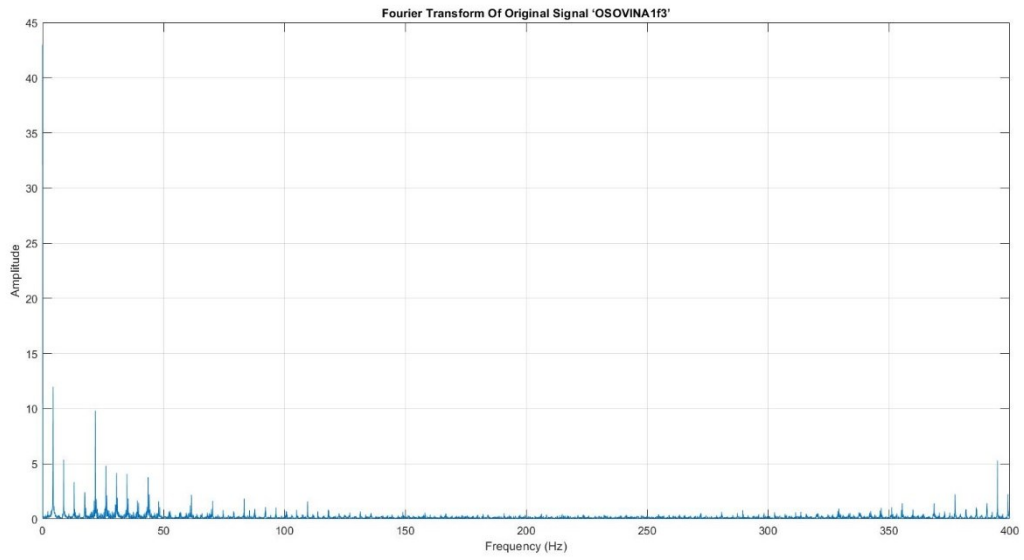
Slika 5.34: Ekscentar rotora motora 1, faza 2, DFT signal 0-400Hz



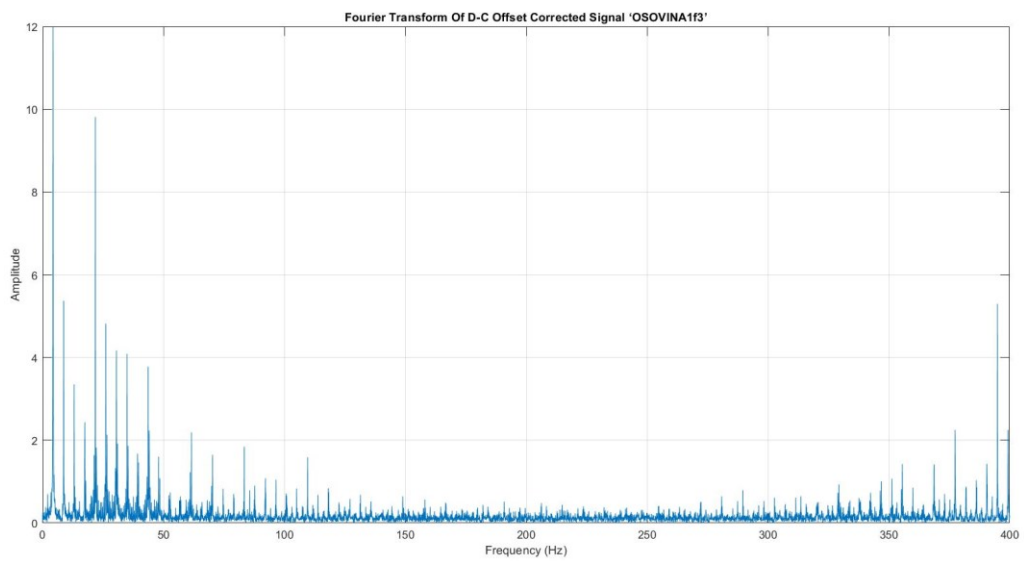
Slika 5.35: Ekscentar rotora motora 1, faza 2, DFT signal 0-85Hz



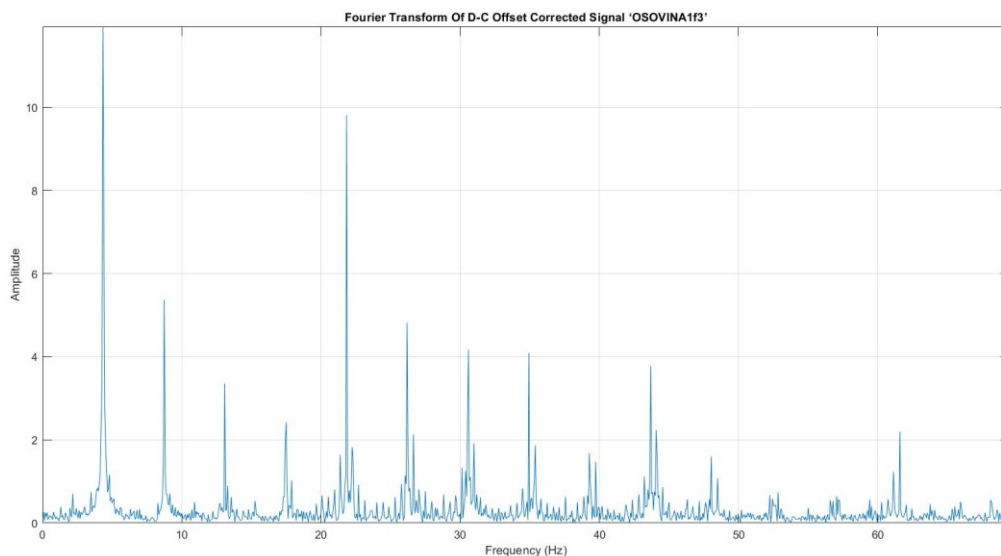
### Faza 3



Slika 5.36: Ekscentar rotora motora 1, faza 3, FFT signal 0-400Hz



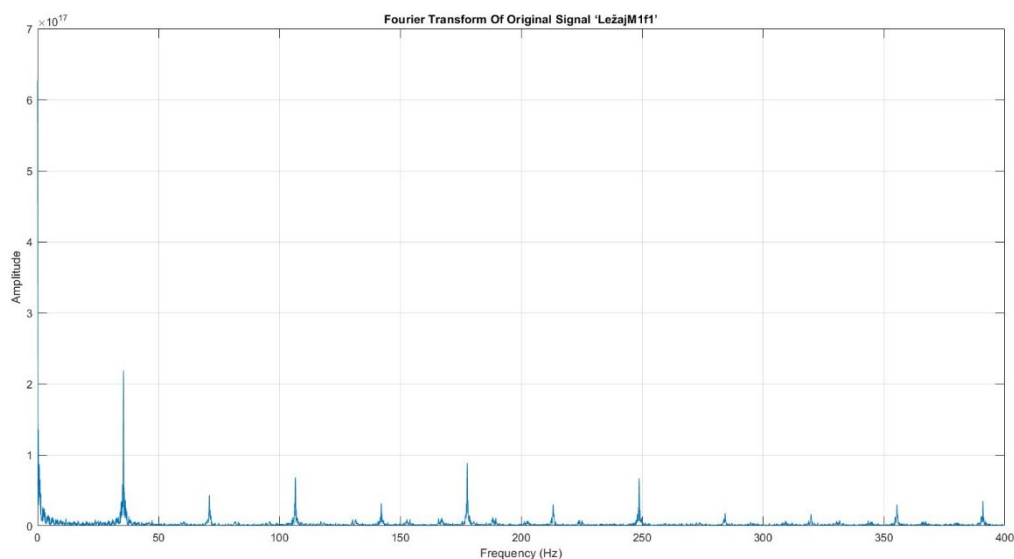
Slika 5.37: Ekscentar rotora motora 1, faza 3, DFT signal 0-400Hz



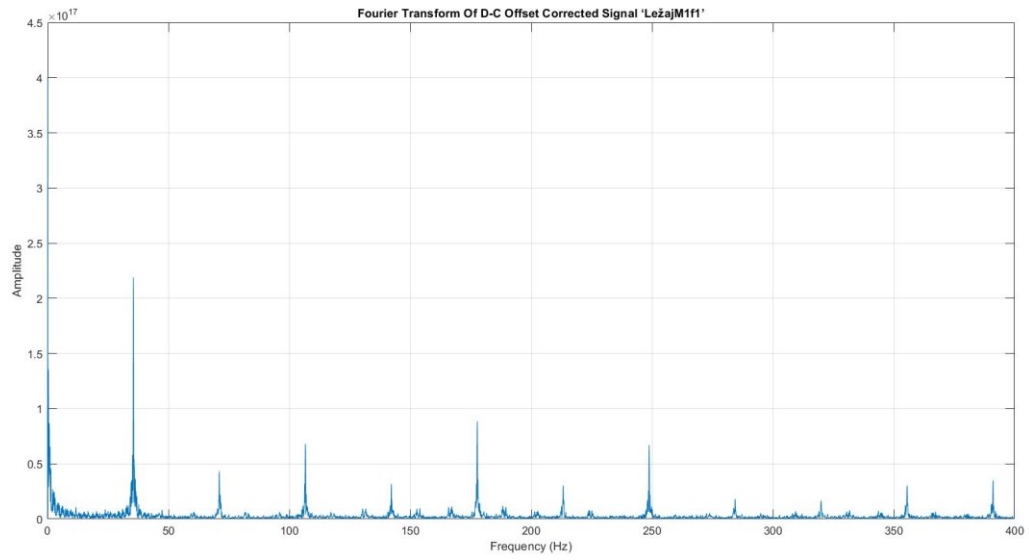
Slika 5.38: Ekscentar rotora motora 1, faza 3, DFT signal 0-70Hz

Smanjenjem zračnog raspora motora, odnosno uvijanjem osovine rotora motora primjećujemo 17 puta veće amplitude osnovnih harmonika. Možemo zaključiti da ukoliko dolazi do velikog povećanja amplitude harmonika dolazi do ekscentričnosti zračnog raspora. Dok u drugoj fazi imamo pojavu harmonika velike amplitude na svakih 25Hz koji intervali traju do 300Hz gdje se ponovno pojavljuje na 400Hz lagano povećanje. Treća faza motora nam prikazuje povećanje harmonika od 0Hz do 125Hz i nakon 275Hz prema 400Hz uzastopno povećanje amplituda harmonika. Pomoću ovih signala se primjećuje kako je došlo do pogreške pri snimanju prve faze motora iz razloga što druga i treća daju približno sličan harmonijski spektar dok nam prva faza prikazuje samo povećanje amplituda osnovnih harmonika.

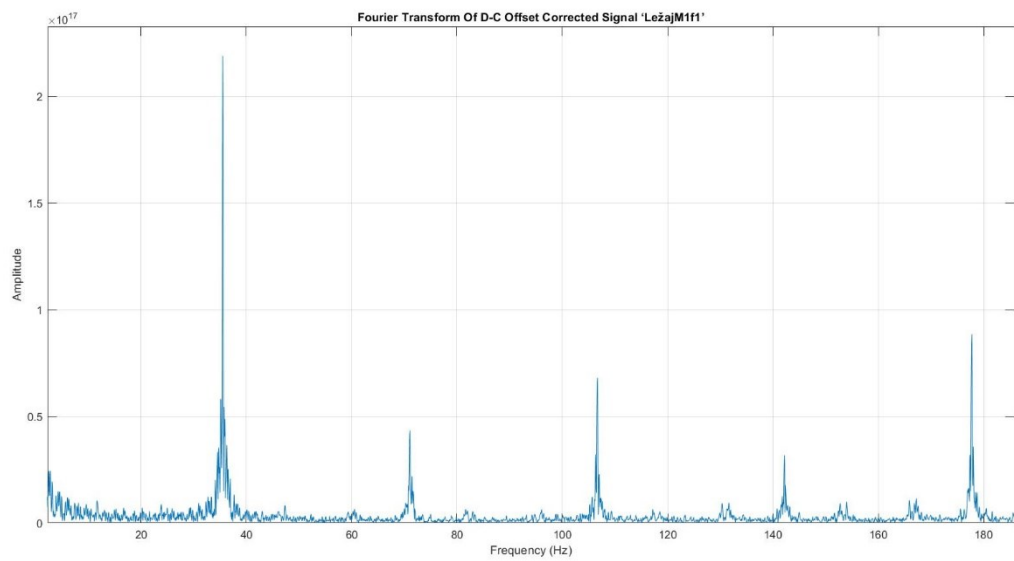
### LEŽAJNI KVAR



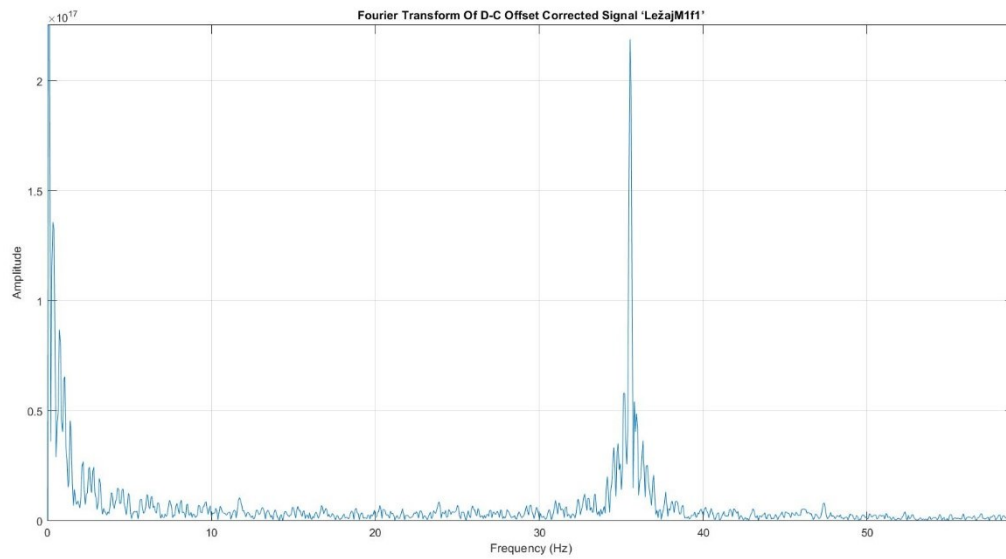
Slika 5.39: Oštećenje ležaja motora 1, faza 1, FFT signal 0-400Hz



Slika 5.40: Oštećenje ležaja motora 1, faza 1, DFT signal 0-400Hz

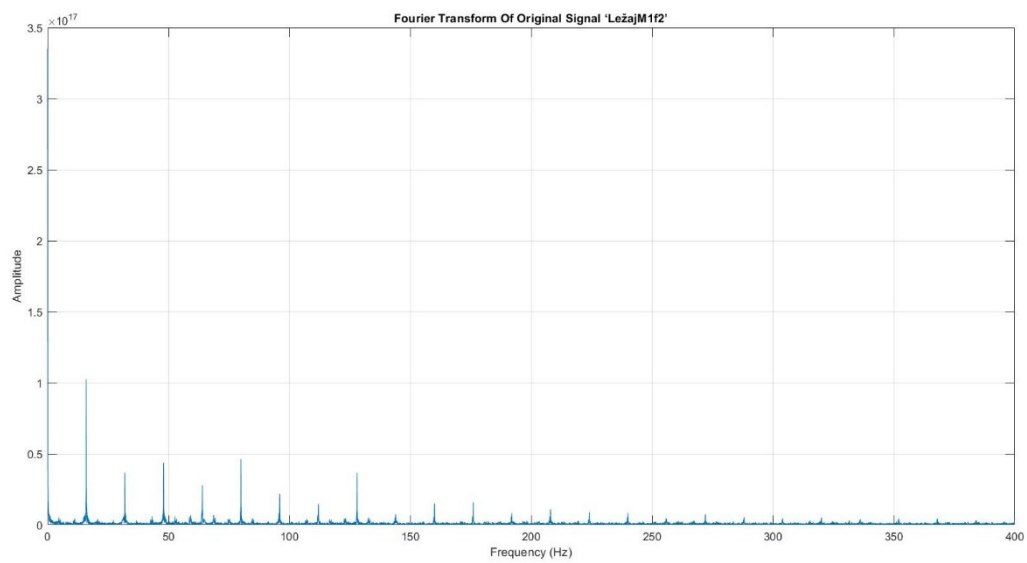


Slika 5.41: Oštećenje ležaja motora 1, faza 1, DFT signal 0-185Hz

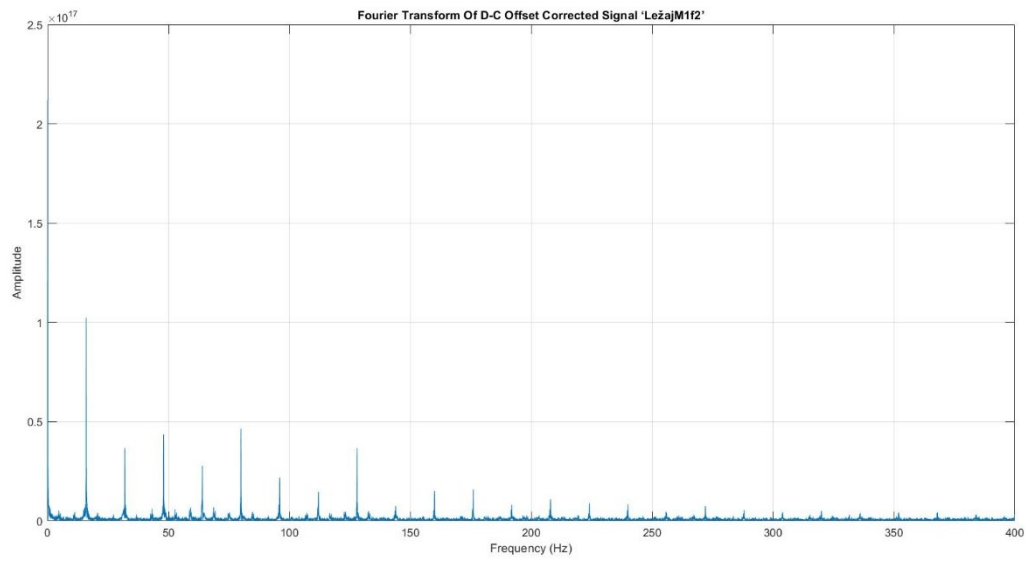


Slika 5.42: Oštećenje ležaja motora 1, faza 1, DFT signal 0-55Hz

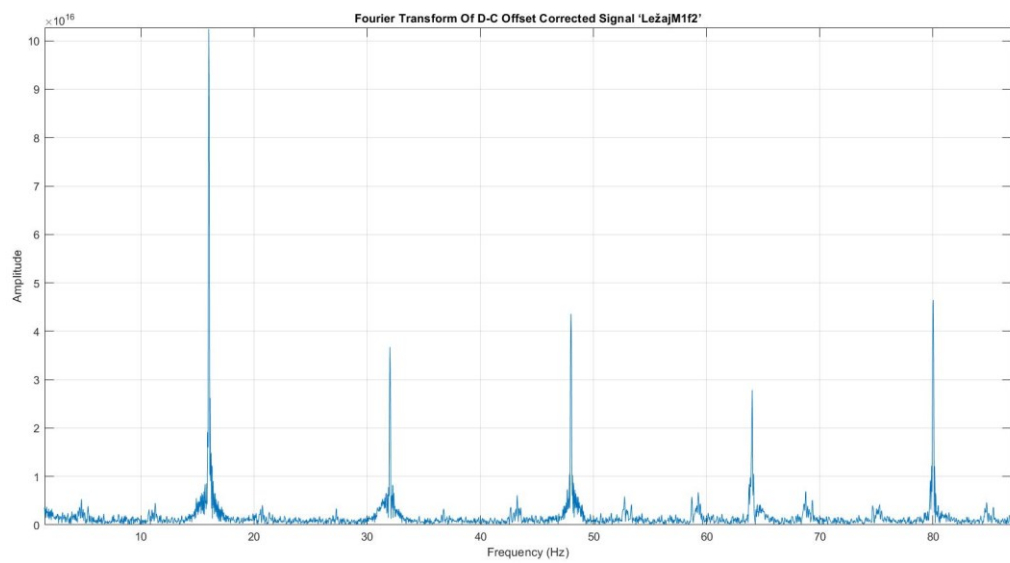
Faza 2



Slika 5.43: Oštećenje ležaja motora 1, faza 2, FFT signal 0-400Hz

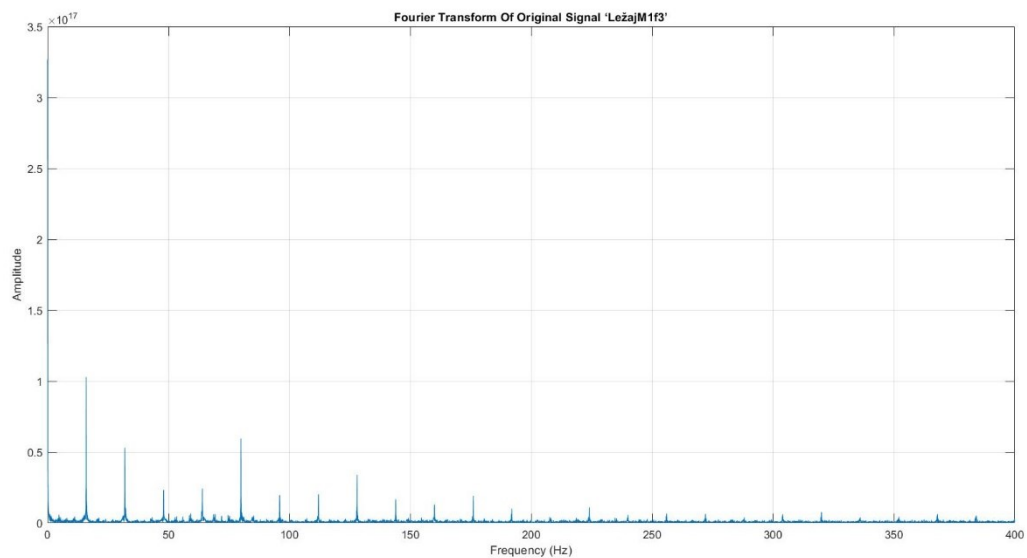


Slika 5.44: Oštećenje ležaja motora 1, faza 2, DFT signal 0-400Hz

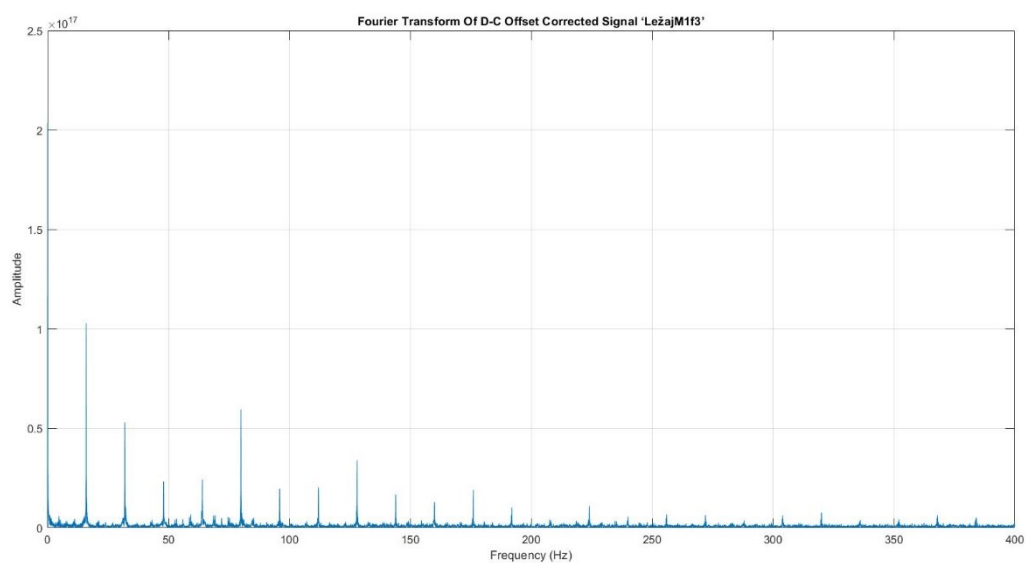


Slika 5.45: Oštećenje ležaja motora 1, faza 2, DFT signal 0-85Hz

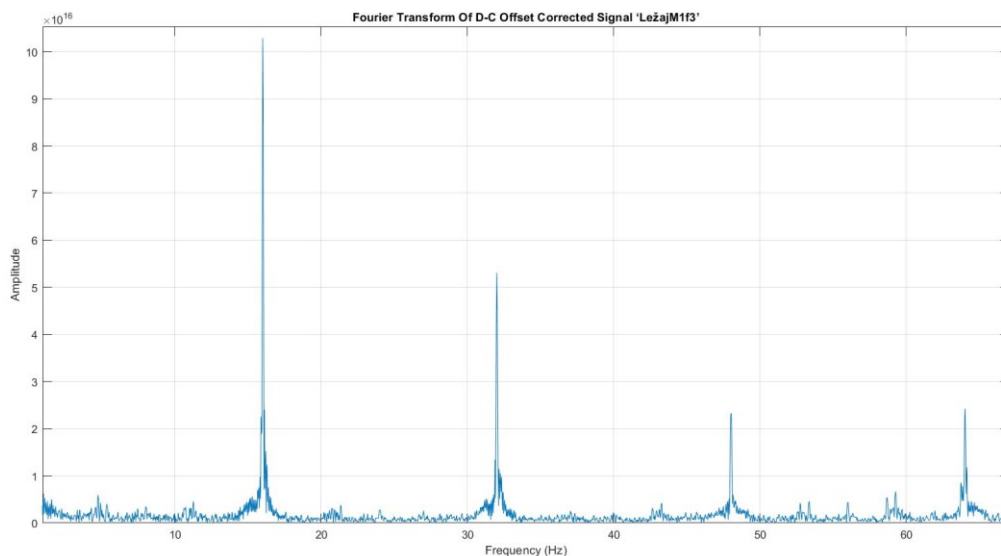
Faza 3



Slika 5.46: Oštećenje ležaja motora 1, faza 3, FFT signal 0-400Hz



Slika 5.47: Oštećenje ležaja motora 1, faza 3, DFT signal 0-400Hz



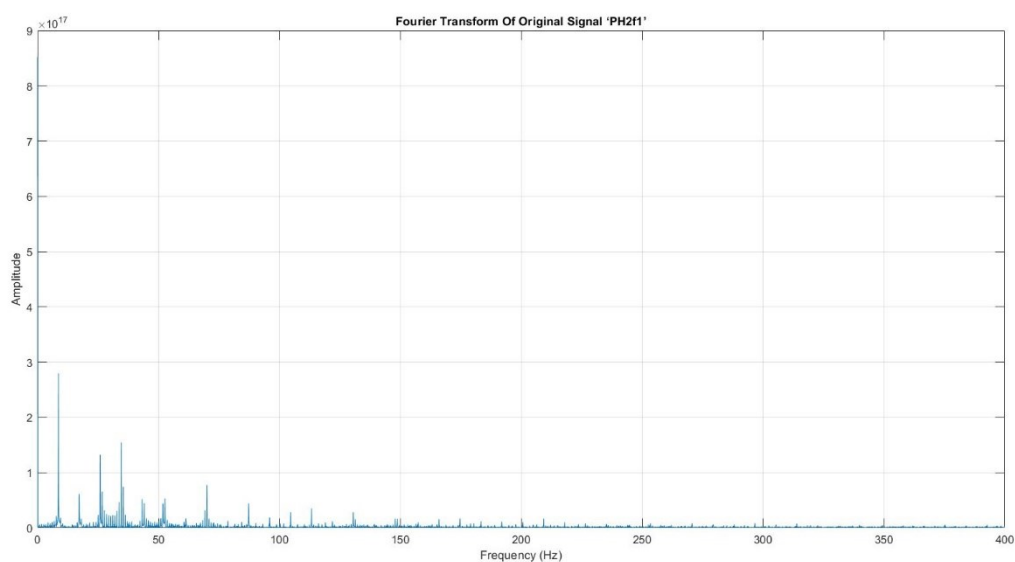
Slika 5.48: Oštećenje ležaja motora 1, faza 3, DFT signal 0-65Hz

U slučaju prvog motora u kojemu smo analizirali harmonijski spektar ležaja koji su oštećeni u praksi odnosno stvarnom radu motora vidimo kako se u prvoj fazi kontinuirano svakih 35Hz pojavljuje harmonijski pik dok su svi ostali harmonici prigušeni. Druga i treća faza motora također imaju prigušene osnovne harmonike, ali kontinuirani pikovi su puno češći i događaju se svakih 16-18Hz.

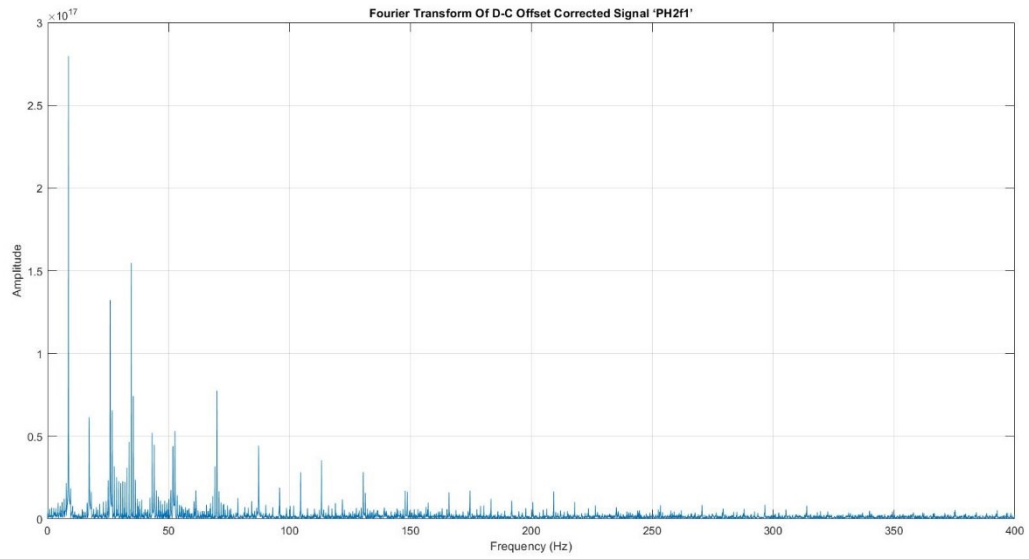
## MOTOR 2

### *PRAZAN HOD*

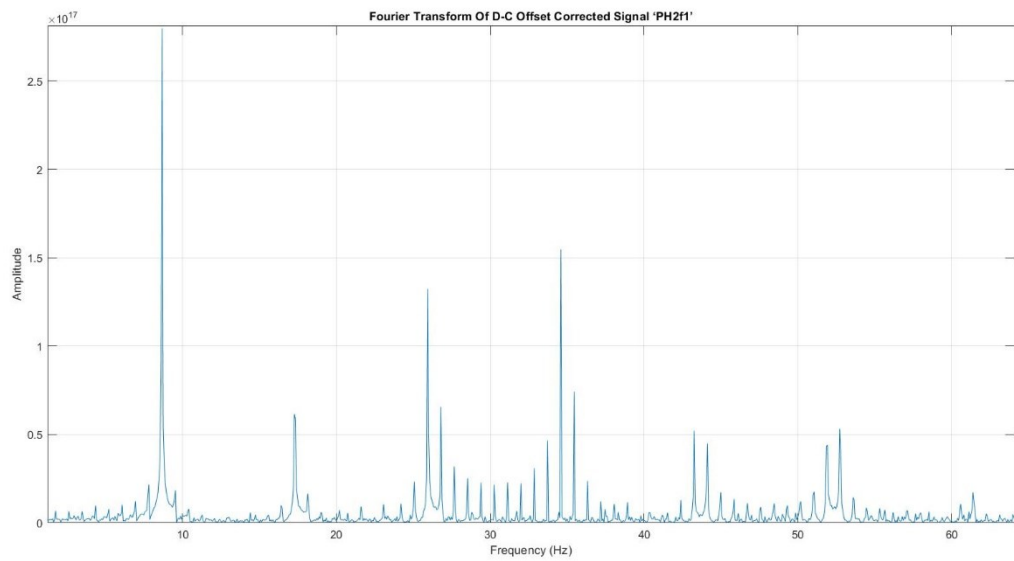
#### Faza 1



Slika 5.49: Prazan hod motora 2, faza 1, FFT signal 0-400Hz



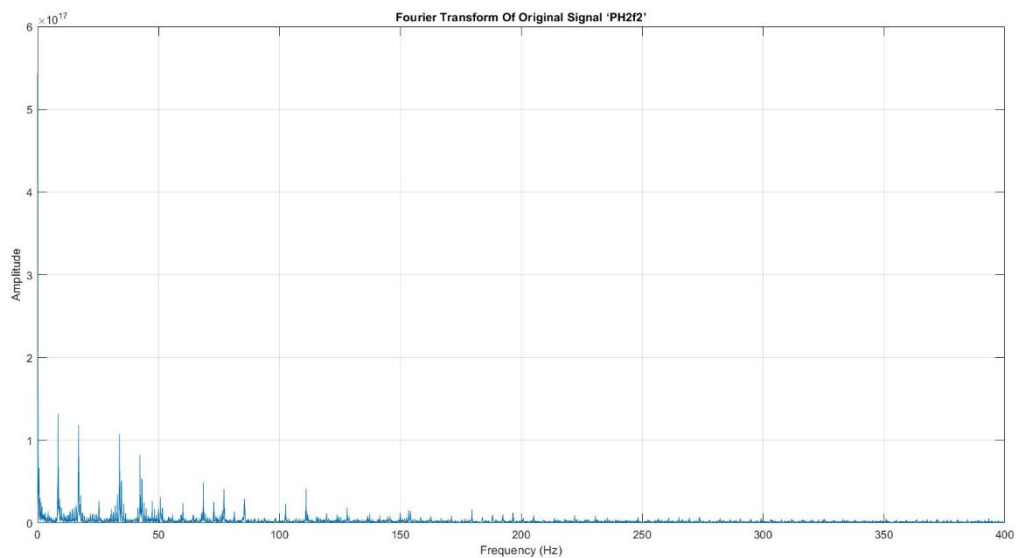
Slika 5.50: Prazan hod motora 2, faza 1, DFT signal 0-400Hz



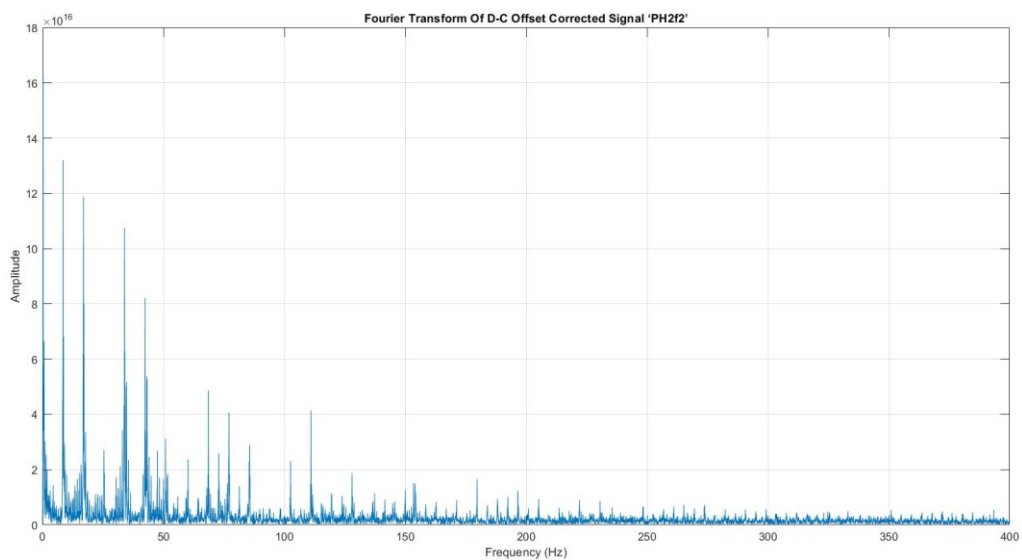
Slika 5.51: Prazan hod motora 2, faza 1, DFT signal 0-65Hz

Faza 2

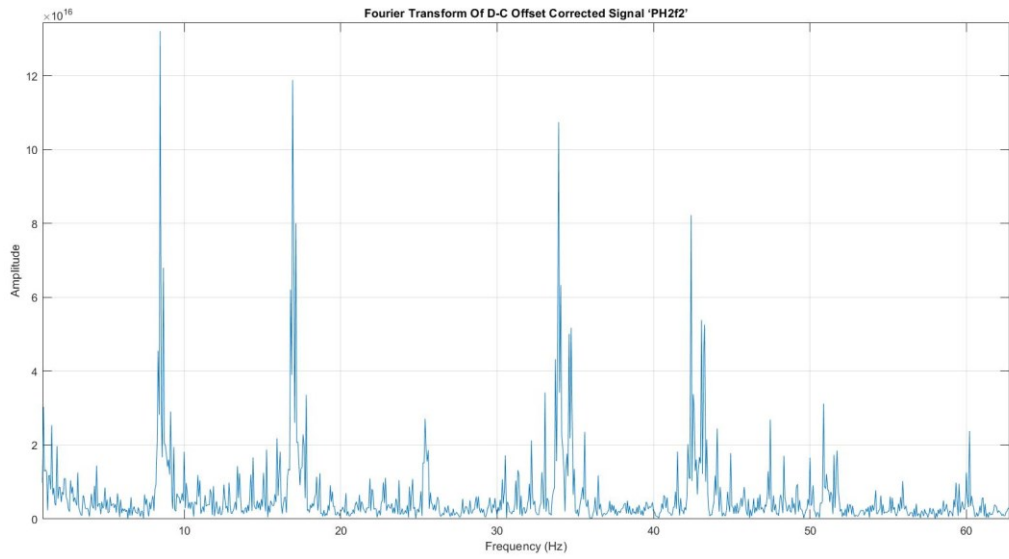




Slika 5.52: Prazan hod motora 2, faza 2, FFT signal 0-400Hz

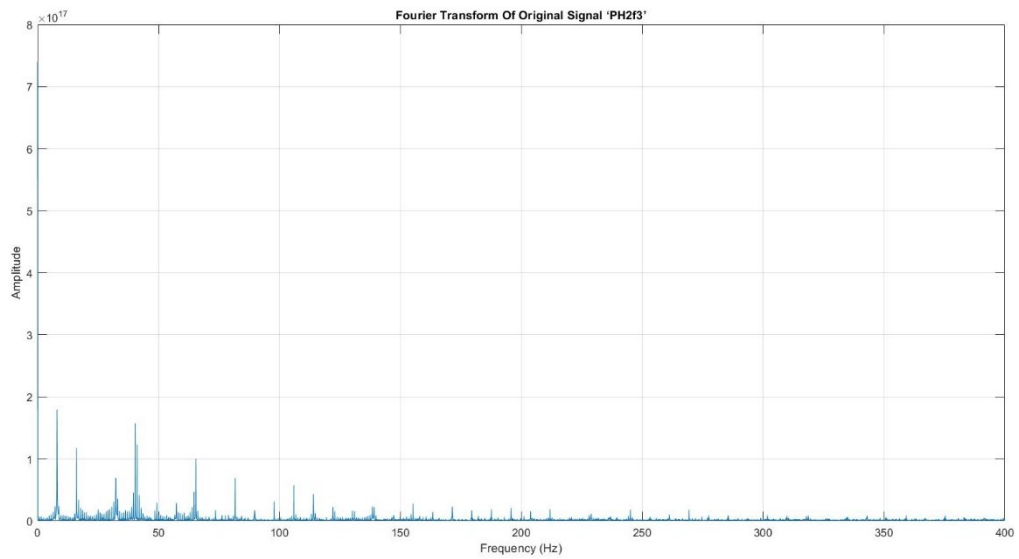


Slika 5.53: Prazan hod motora 2, faza 2, DFT signal 0-400Hz

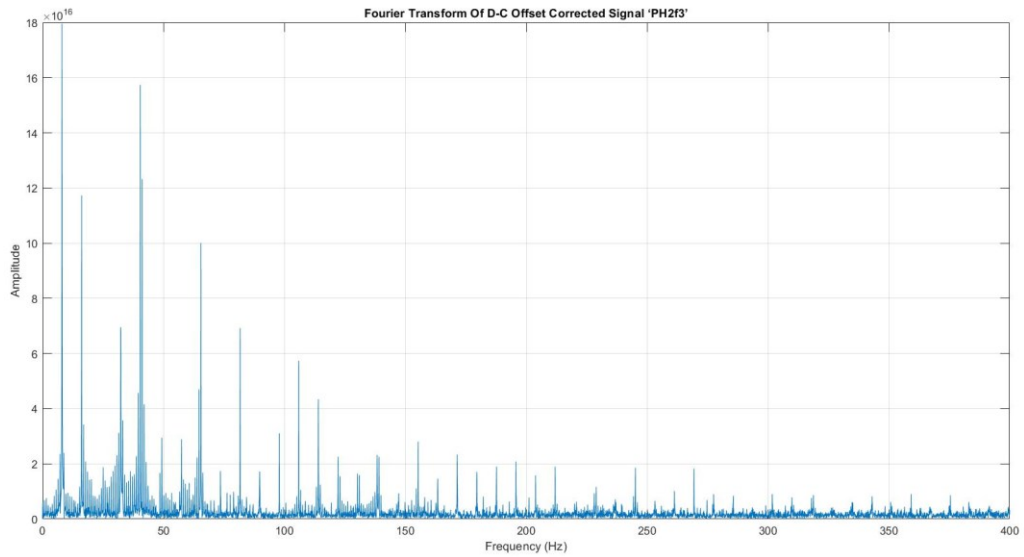


Slika 5.54: Prazan hod motora 2, faza 2, DFT signal 0-65Hz

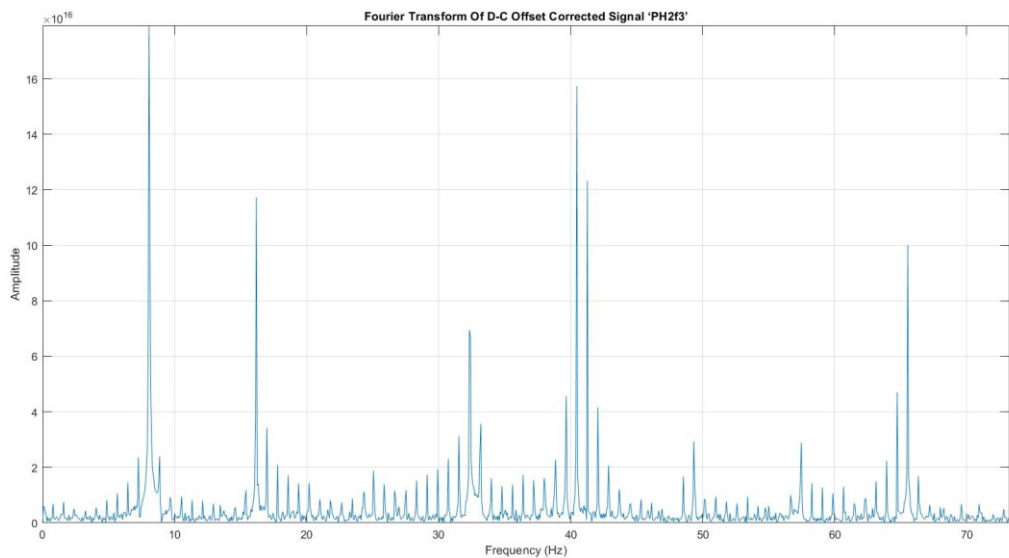
Faza 3



Slika 5.55: Prazan hod motora 2, faza 3, FFT signal 0-400Hz



Slika 5.56: Prazan hod motora 2, faza 3, DFT signal 0-400Hz

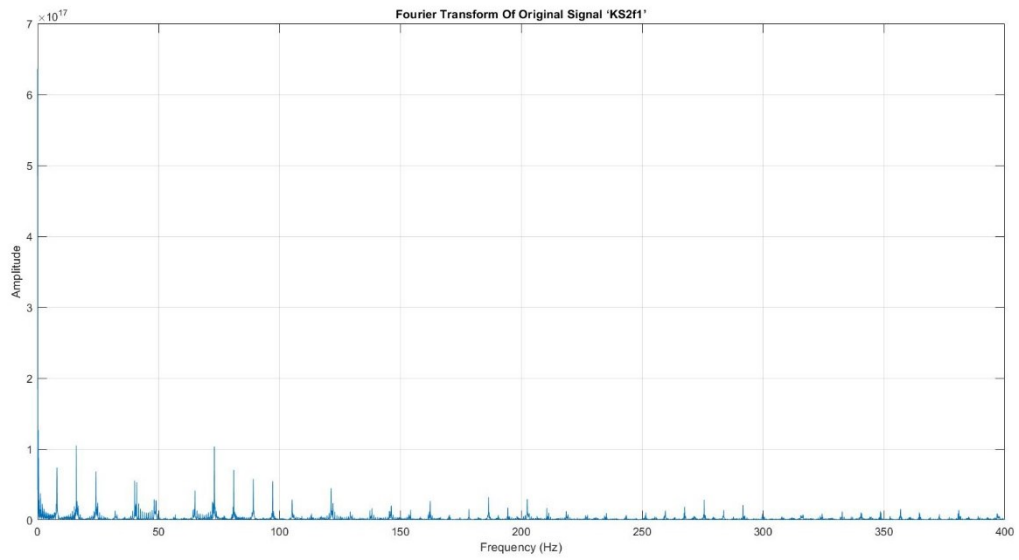


Slika 5.57: Prazan hod motora 2, faza 3, DFT signal 0-75Hz

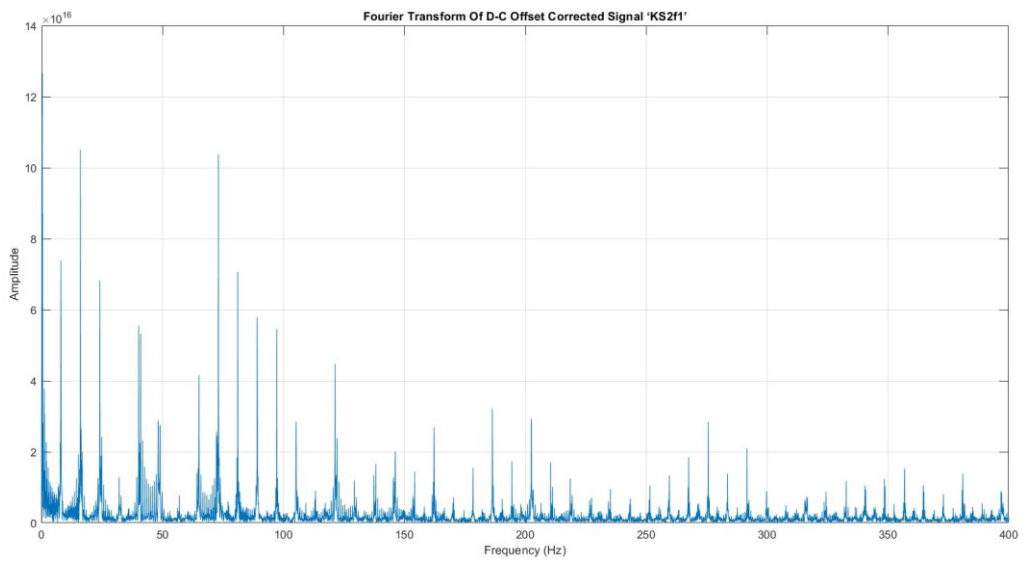
U obradi rezultata drugog motora ćemo također kvarna stanja kratkog spoja, ekscentriteta osovine i ležajnih kvarova usporediti sa rezultatima praznog hoda motora 2. Primjećujemo razliku između motora 1 i motora 2 u harmonijskom spektru gdje smo kod motora 2 dobili približno jednake odzive u sve tri faze što kod motora 1 nije bio slučaj jer je prva faza bila nešto drugačija. Tu ne simetričnost možemo pripisati grešci u mjerenju ili ne ispravnosti prve faze motora.

*KRATKI SPOJ*

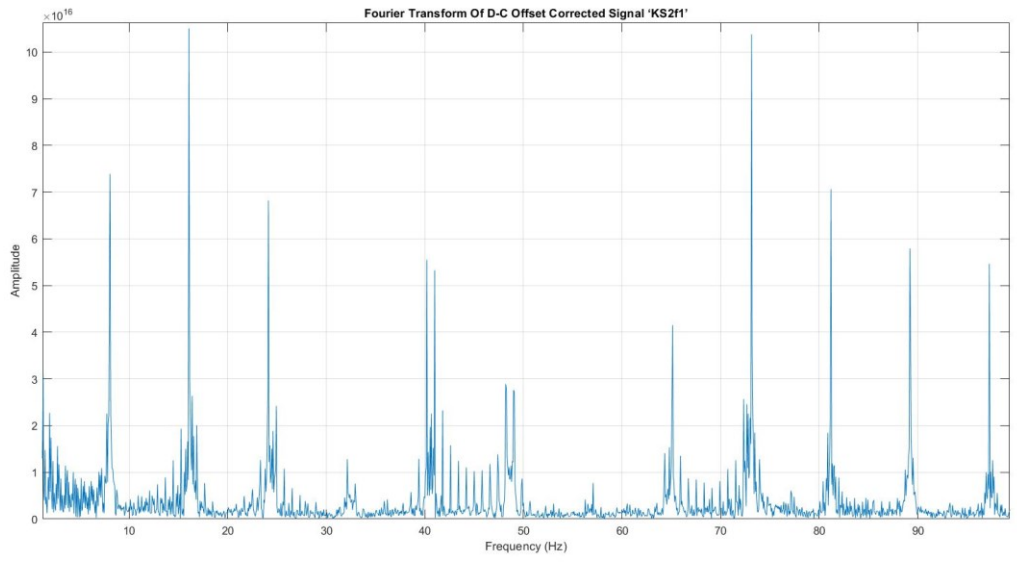
Faza 1



Slika 5.58: Kratak spoj motora 2, faza 1, FFT signal 0-400Hz

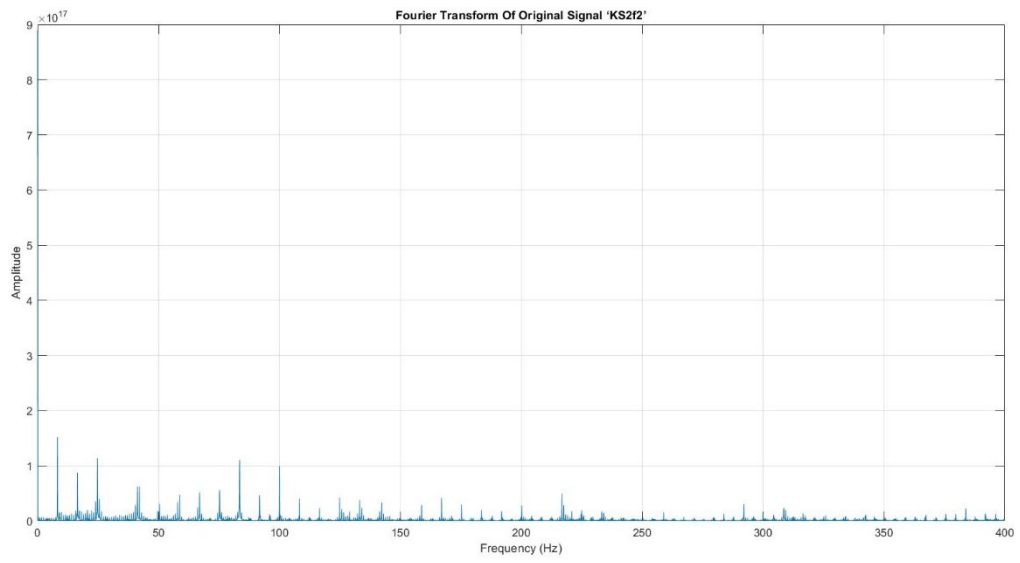


Slika 5.59: Kratak spoj motora 2, faza 1, DFT signal 0-400Hz

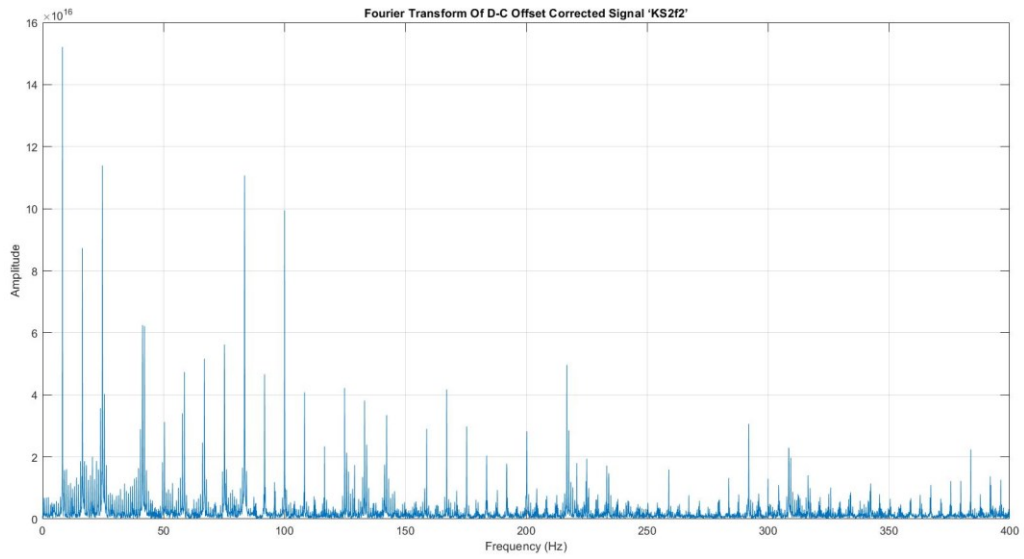


Slika 5.60: Kratak spoj motora 2, faza 1, DFT signal 0-100Hz

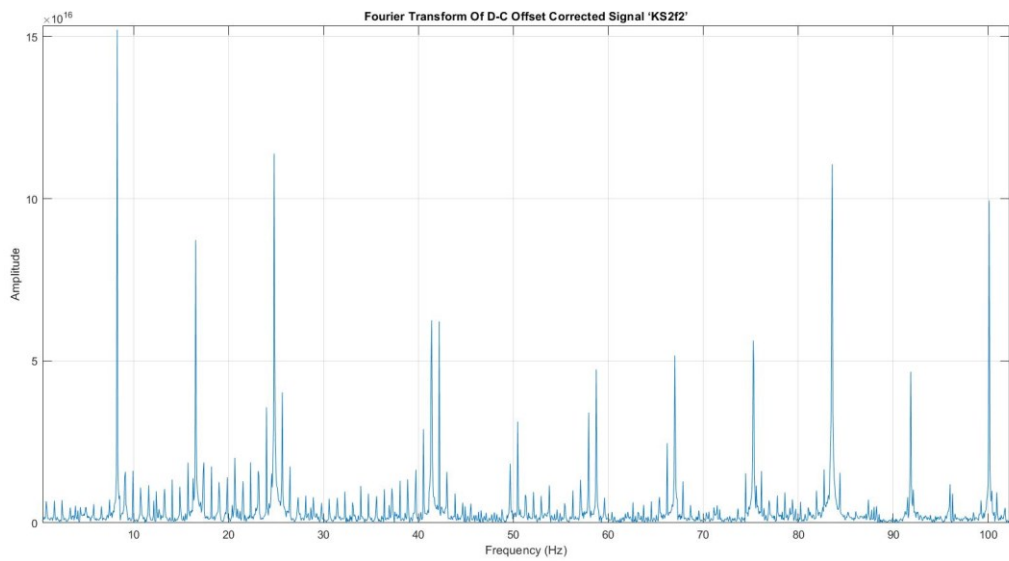
Faza 2



Slika 5.61: Kratak spoj motora 2, faza 2, FFT signal 0-400Hz

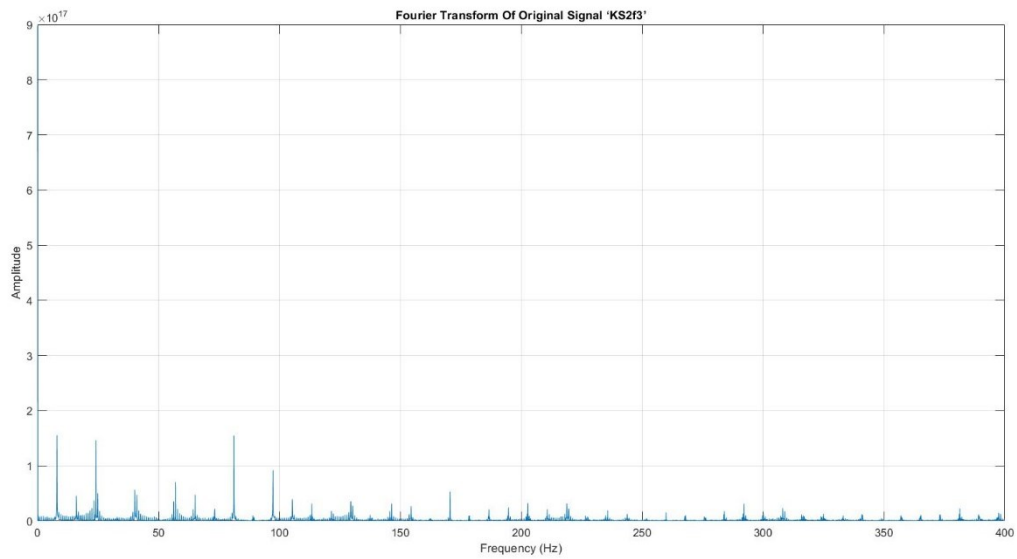


Slika 5.62: Kratak spoj motora 2, faza 2, DFT signal 0-400Hz

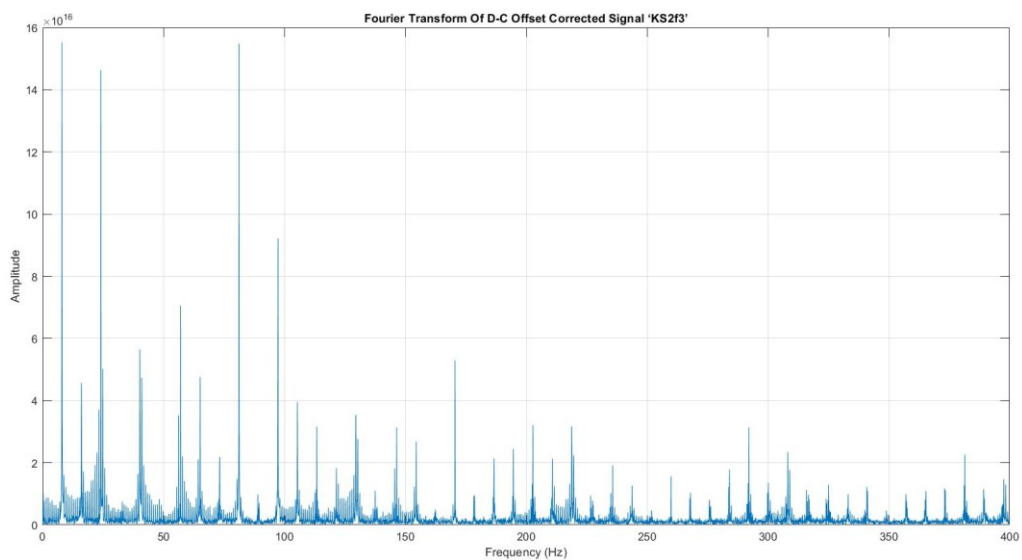


Slika 5.63: Kratak spoj motora 2, faza 2, DFT signal 0-105Hz

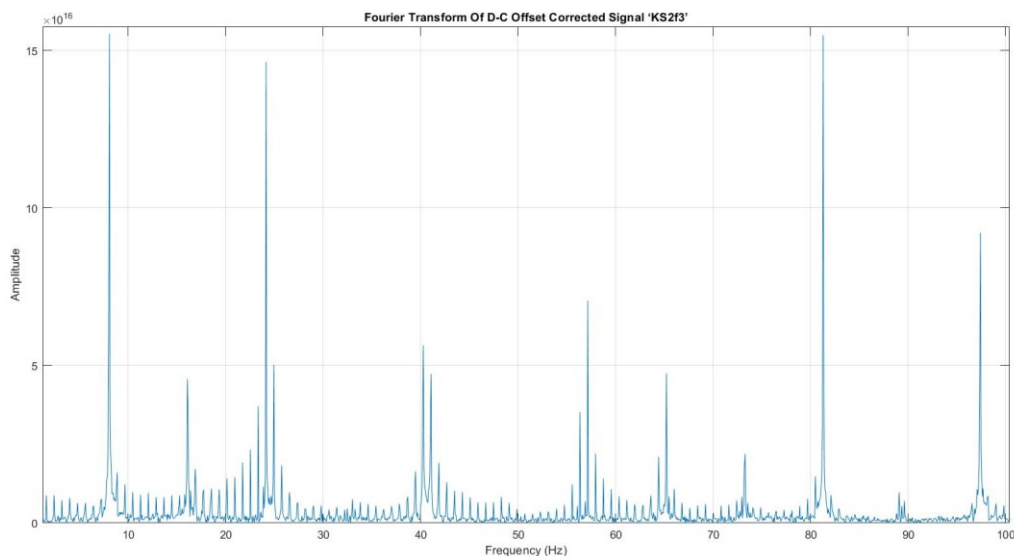
Faza 3



Slika 5.64: Kratak spoj motora 2, faza 3, FFT signal 0-400Hz



Slika 5.65: Kratak spoj motora 2, faza 3, DFT signal 0-400Hz

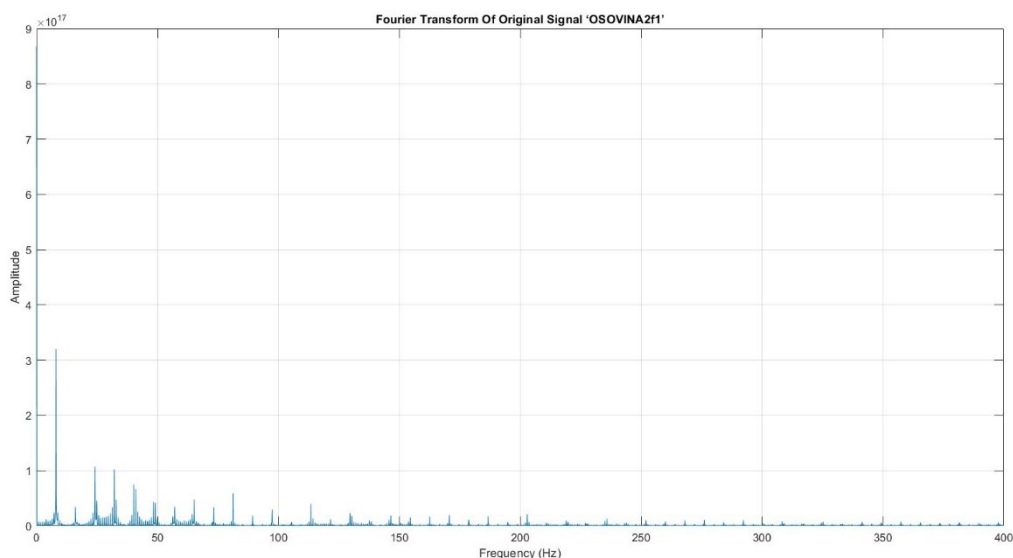


Slika 5.66: Kratak spoj motora 2, faza 3, DFT signal 0-100Hz

Kratki spoj motora 2 ukazuje na povećanje amplitude kao i u pokusu na motoru 1, razlika je što u prvoj fazi se ne pojavljuju dodatni harmonici nego su povećane amplitude osnovnih harmonika. Druga faza nam prikazuje pojavu harmonika na 15Hz i 85Hz što je slično drugoj fazi motora 1. U trećoj fazi primjećujemo pojavu harmonika na 25Hz, 65Hz i 85Hz gdje dolazimo do sličnosti sa motorom 1 i te nam to potvrđuje teoriju da se u kratkom spoju javljaju slični harmonici i pomoću njih možemo predvidjeti mogućnost kratkoj spoja i prijevremeno spasiti motor isključivanjem.

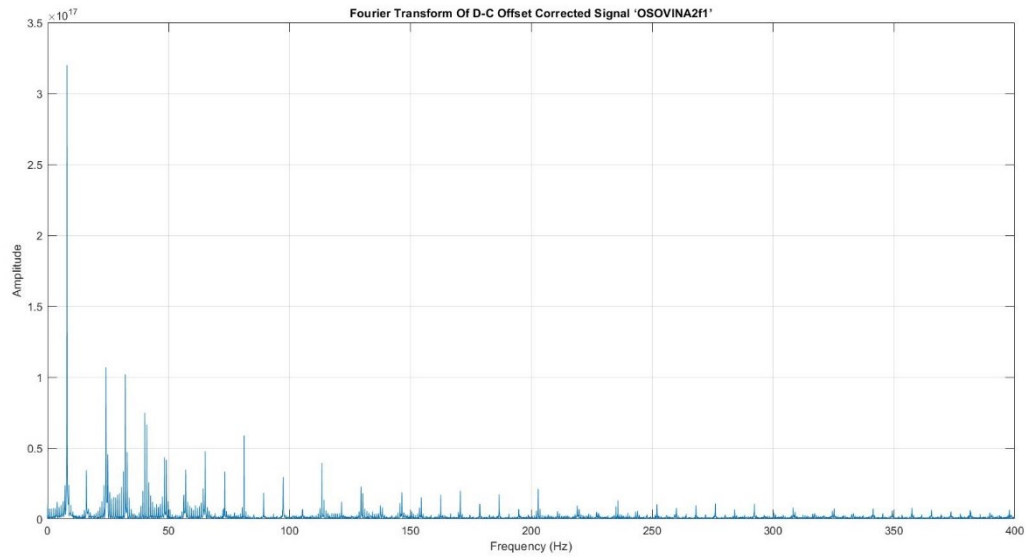
### *EKSCENTRITET OSOVINE*

#### Faza 1

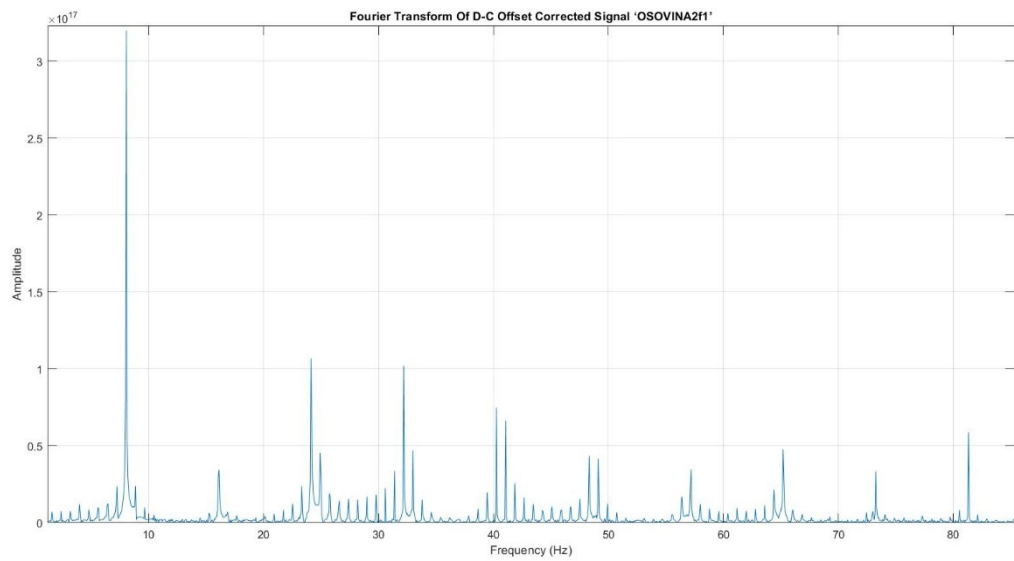


Slika 5.67: Ekscentar rotora motora 2, faza 1, FFT signal 0-400Hz



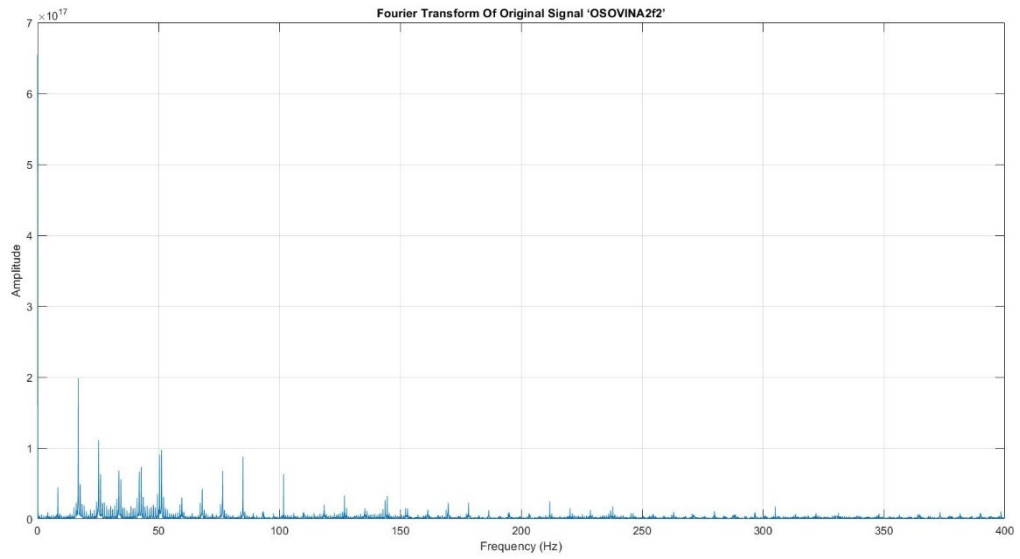


Slika 5.68: Ekscentar rotora motora 2, faza 1, DFT signal 0-400Hz

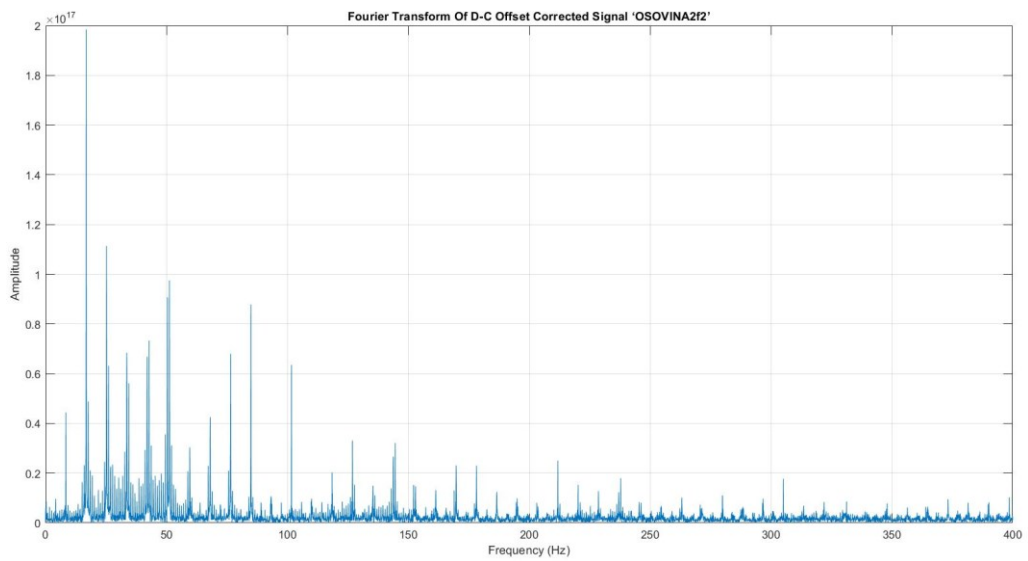


Slika 5.69: Ekscentar rotora motora 2, faza 1, DFT signal 0-85Hz

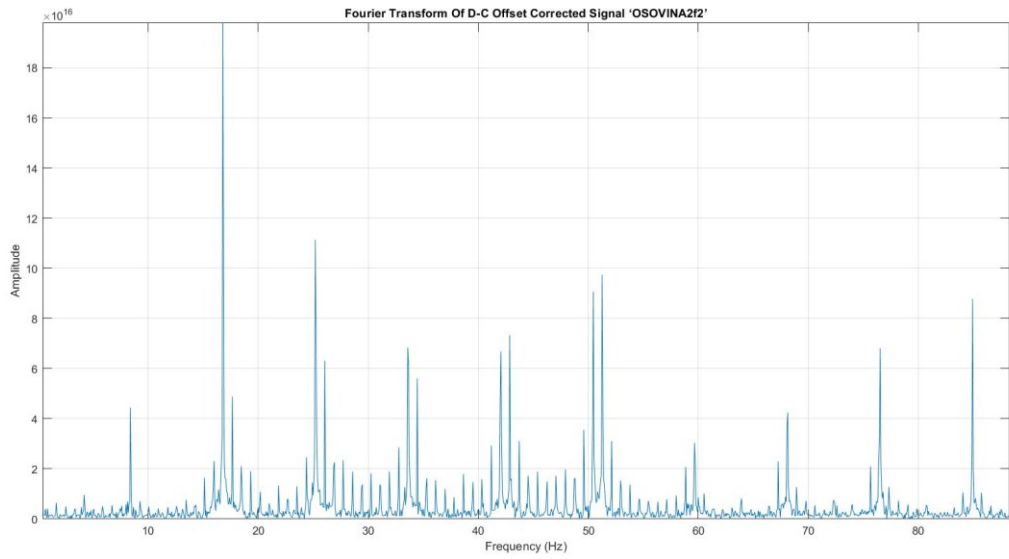
Faza 2



Slika 5.70: Ekscentar rotora motora 2, faza 2, FFT signal 0-400Hz

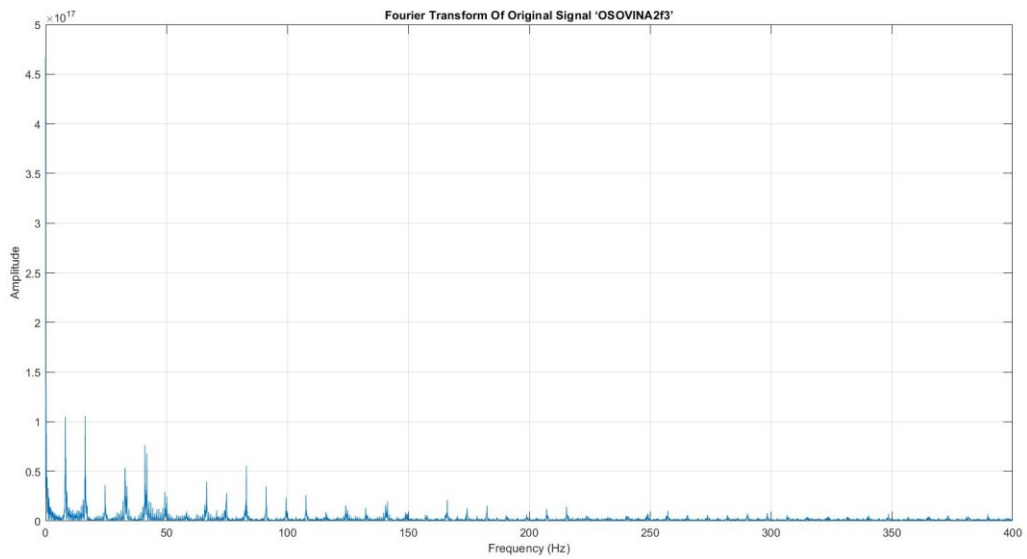


Slika 5.71: Ekscentar rotora motora 2, faza 2, DFT signal 0-400Hz

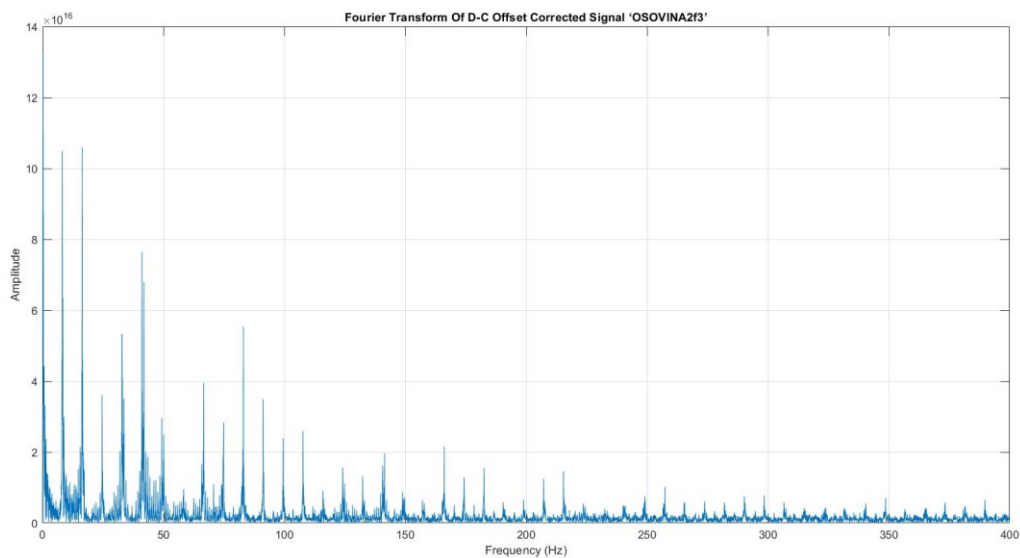


Slika 5.72: Ekscentar rotora motora 2, faza 2, DFT signal 0-85Hz

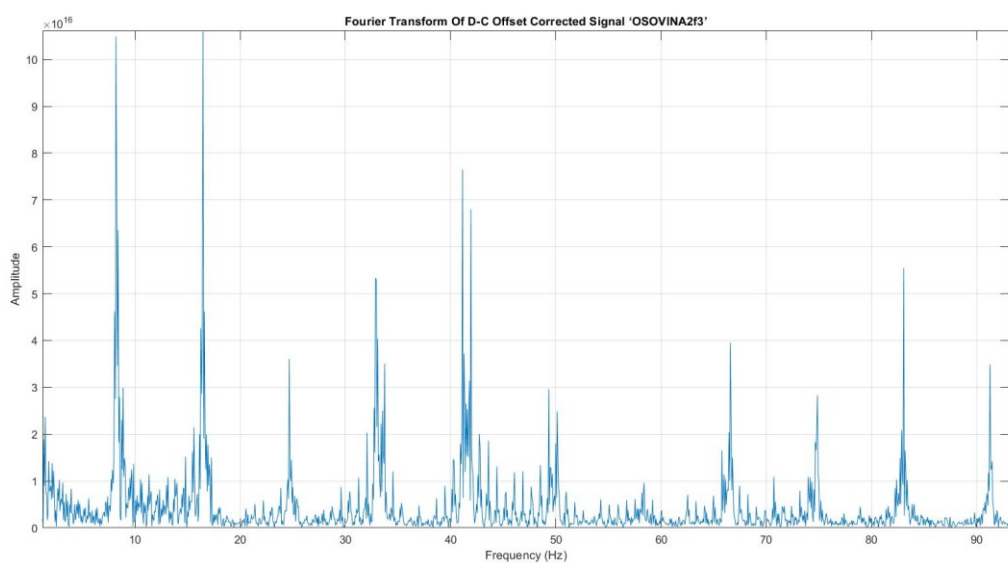
Faza 3



Slika 5.73: Ekscentar rotora motora 2, faza 3, FFT signal 0-400Hz



Slika 5.74: Ekscentar rotora motora 2, faza 3, DFT signal 0-400Hz

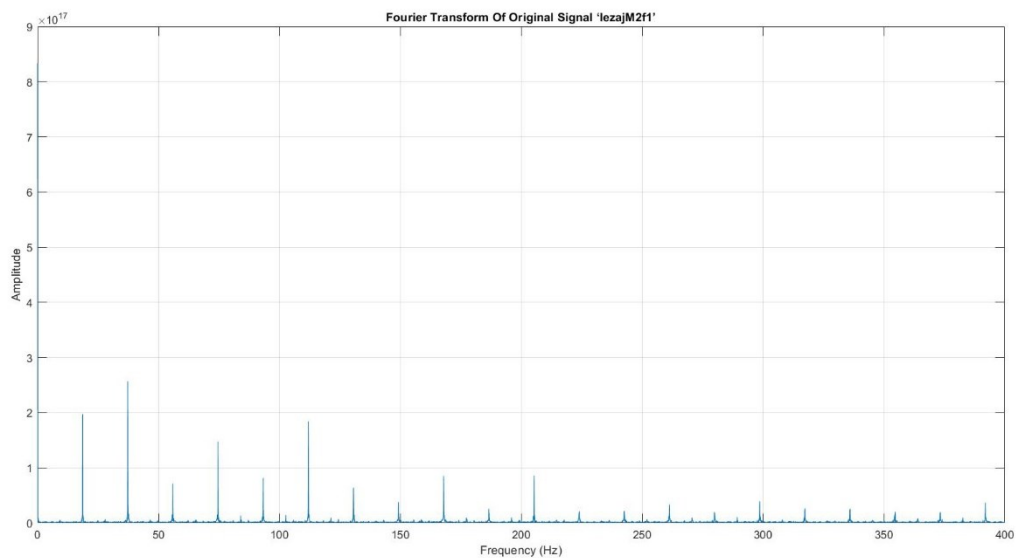


Slika 5.75: Ekscentar rotora motora 2, faza 3, DFT signal 0-100Hz

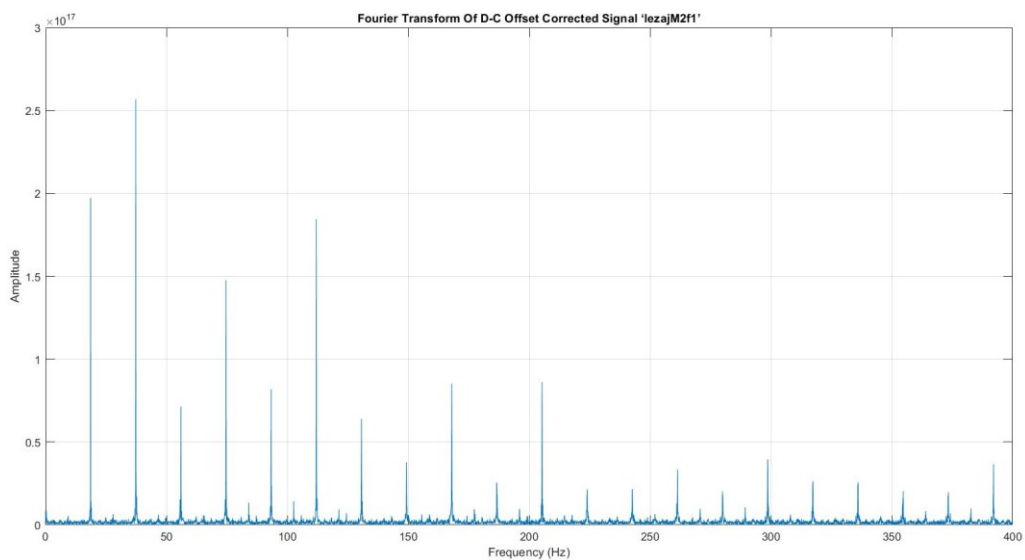
U pokusu smanjenja zračnog raspora motora 2 sve tri faze ovoga motora nam prikazuju povećanje amplitude na odnosu na referentni signal motora 2. Sličnosti između motora 1 i motora 2 su povećanje amplitude u oba pokusa smanjenja zračnog raspora. Ovu sličnost možemo iskoristiti kao podlogu za harmonijsko predviđanje stanja kvarova.

### *LEŽAJNI KVAR*

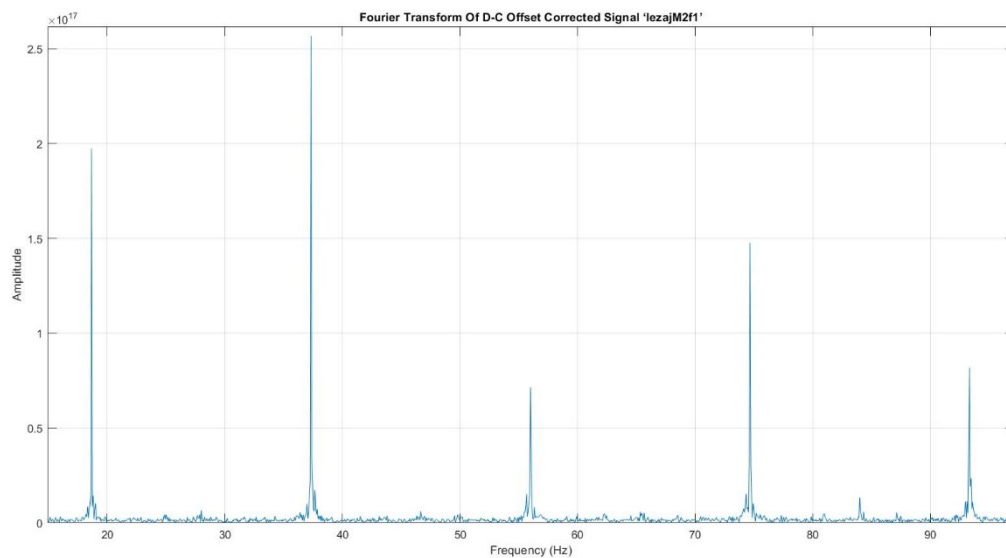
Faza 1



Slika 5.76: Oštećenje ležaja motora 2, faza 1, FFT signal 0-400Hz

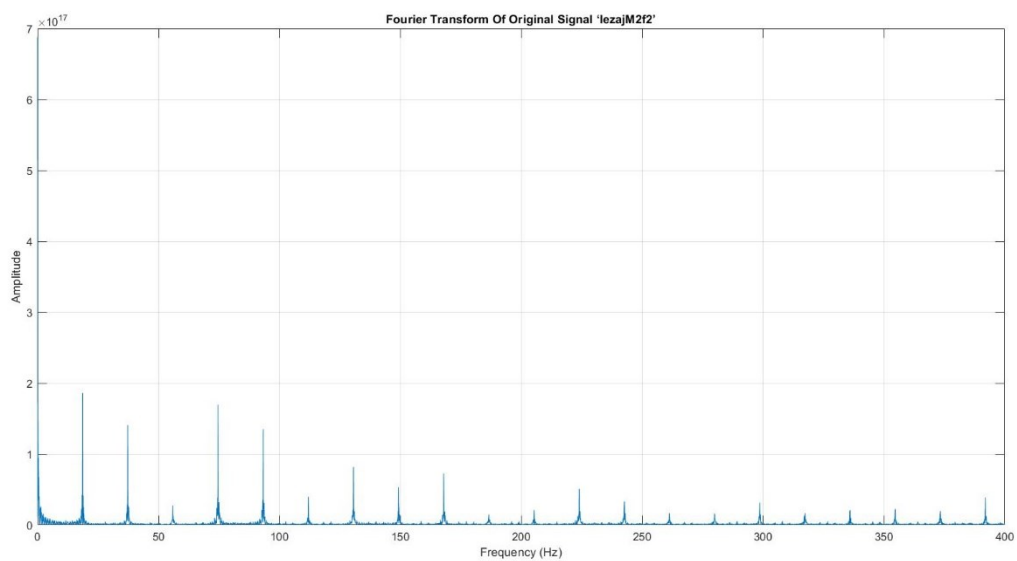


Slika 5.77: Oštećenje ležaja motora 2, faza 1, DFT signal 0-400Hz

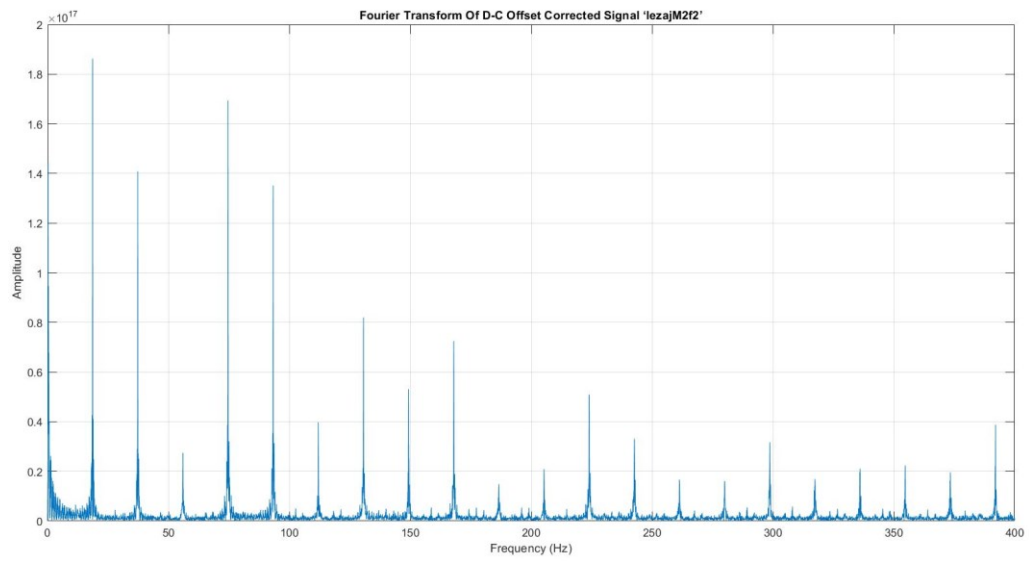


Slika 5.78: Oštećenje ležaja motora 2, faza 1, DFT signal 0-95Hz

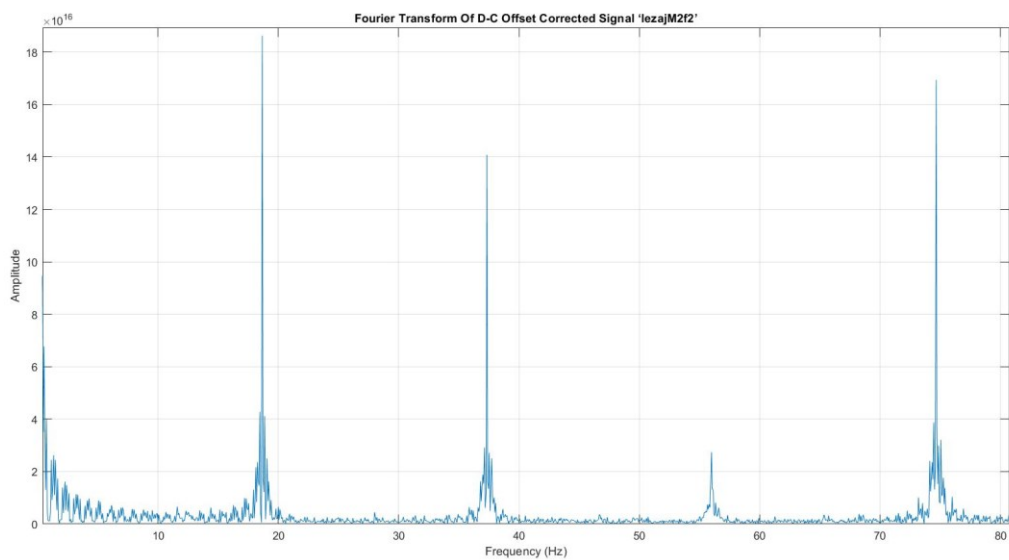
Faza 2



Slika 5.79: Oštećenje ležaja motora 2, faza 2, FFT signal 0-400Hz

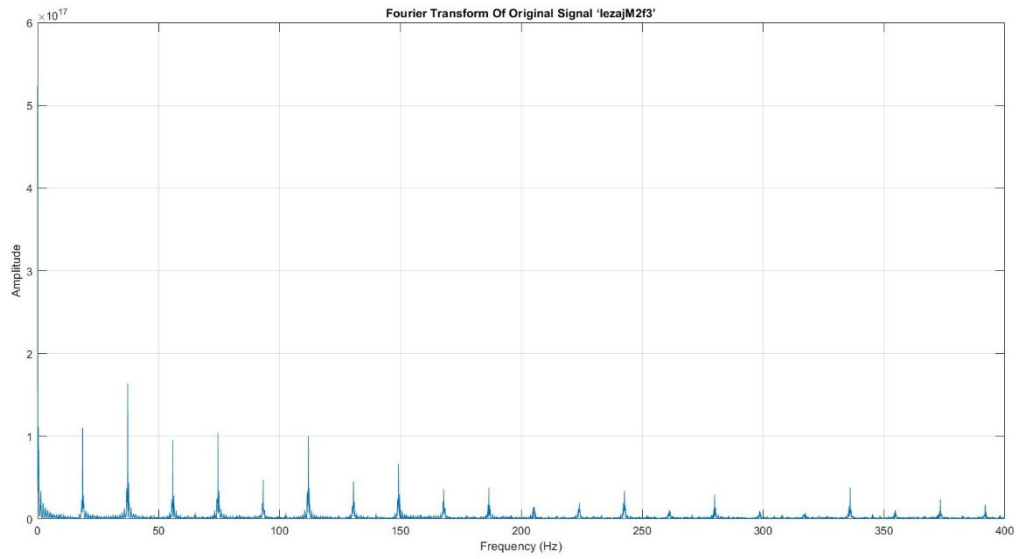


Slika 5.80: Oštećenje ležaja motora 2, faza 2, DFT signal 0-400Hz

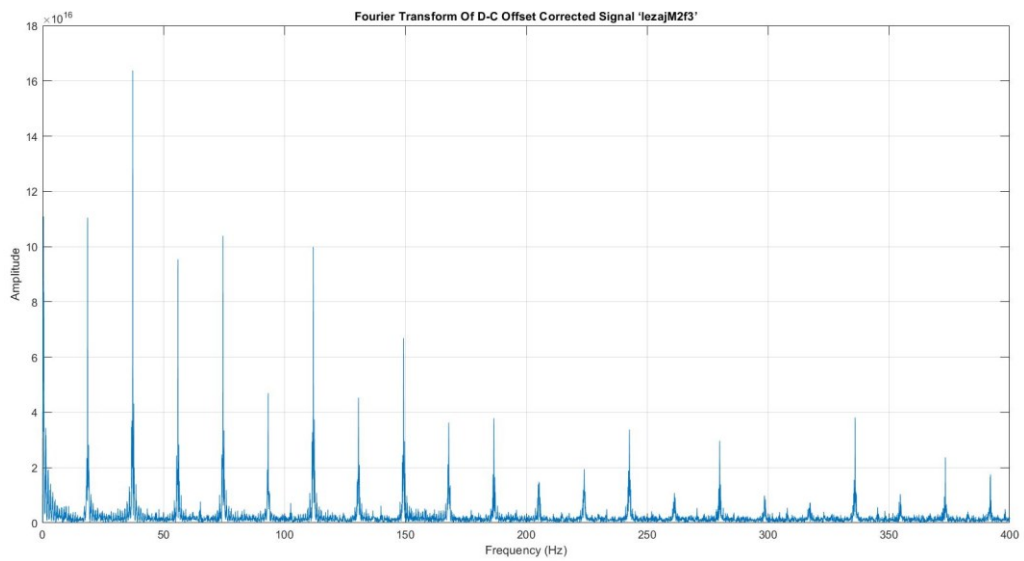


Slika 5.81: Oštećenje ležaja motora 2, faza 2, DFT signal 0-80Hz

Faza 3

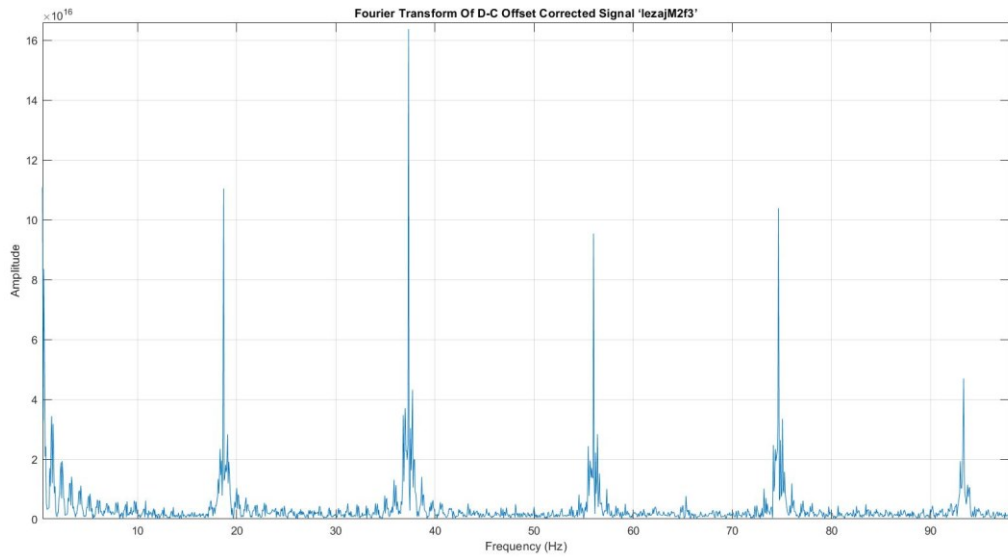


Slika 5.82: Oštećenje ležaja motora 2, faza 3, FFT signal 0-400Hz



Slika 5.83: Oštećenje ležaja motora 2, faza 3, DFT signal 0-400Hz





Slika 5.84: Oštećenje ležaja motora 2, faza 3, DFT signal 0-95Hz

Pokus ležajnog kvara na motoru 2 gdje smo namjerno oštetili ležaj nam bez sumnje dokazuje da se pri oštećenom ležaju periodično prikazuju harmonici, a ovisno o jačini oštećenosti ležaja javlja se određeni harmonik. Tako da u ovom slučaju kod sve tri faze javlja se između 16Hz i 19Hz, te se tako periodično javlja svakih 20Hz.

## 6. ZAKLJUČAK

Metoda analiziranja i praćenja strujnog spektra asinkronog motora je postala jedan od važnijih faktora svakog industrijskog pogona. Razlog tome je što dolazi do smanjenja broja kvarova u pogonu, bolje organizacije revizije pogona i do uništenja ostale opreme koja je vezana uz sami pogon, a to sve dovodi do smanjena troškova i povećanja zarade.

Praćenje strujnog spektra ima veliku prednost što kao u ovom radu pomoću računalnog programa Signalexpress nam dozvoljava da u realnom vremenu prikupljamo podatke i tako ne moramo zaustavljati pogon. Ne prekidni rad pogona i mogućnost detekcije prijevremenog kvara nam daje prednost bolje organizacije i popravka u najkraćem vremenu.

U samom radu i izvođenju ovoga pokusa naišli smo na nekoliko odstupanja kao razlike u harmonijskom spektru praznog hoda motora 1 koje bi obrazložili kao grešku u mjerenju ili mogućnosti da motor nije bio potpuno ispravan. Kod motora 2 pokus kratkog spoja je dao povećanje amplitude, ali ne kao i motor 1 iz razloga što vrlo vjerojatno pri mjerenju kratkog spoja smo trebali dovesti veću struju. Na natpisnoj pločici motora maksimalna struja je bila ne standardno zapisana. Iz tog razloga nismo podizali napon do maksimalne struje te to dovodi do manje amplitude.

Uz sva odstupanja koja smo imali tijekom mjerenja i dalje se da isključiti da u kratkom spoju dolazi do pojave određenih harmonika i porast amplitude cijelog harmonijskog spektra. U ekscentritetu osovine smo vidjeli pojavu harmonika u rasponu od 0 Hz do 125Hz i 275Hz do 400HZ u pojedinim fazama. Ležajni kvarovi su bili najjasniji odzivi koji periodično prikazuju očitavanje harmonika. Sve ovisi o stupnju uništenosti ležaja, ali svakako na ova dva motora možemo zaključiti da pri uništenju ležaja dolazi do periodičnog nastajanja harmonika. Različiti harmonijski spektar po faza za isti pokus bi pripisali greškama u mjerenju, obradi rezultata i mogućnosti da motori nisu bili potpuno ispravni.

Kada uzmemo u obzir greške u mjerenju, mogućnost ne ispravnosti motora i dalje se iz ovoga rada može zaključiti kako je ova metoda obrade strujnog spektra prihvatljiva i dobra metoda. Ona zasigurno može predvidjeti moguće stanja kvara i tako ublažiti gubite ili spasiti pogon od potpunog uništenja.

## SAŽETAK

Široka primjena asinkronih motora u industriji dovodi i do velikog broja gubitaka zbog zaustavljanja pogona radi kvarova asinkronih motora. Primjenom metode praćenja harmonijskog spektra struja kao što je simulirano u ovom radu može omogućiti parvovremeno reagiranje na popravak ili ugađanje pojedinog parametra pogona. Izradom modela za praćenje osovinskih struja koje dovode do habanja ležaja uvelike bi olakšalo planiranje i održavanje samog industrijskog pogona. Tako bi pogon u budućnosti imao znatno smanjen postotak zaustavljanja iz razloga pravovremenog reagiranja na manja oštećenja i nepravilnosti u radu koji bi bili prikazani u harmonijskom spektru.

**Ključne riječi:** Asinkroni motor, spektralna analiza, FFT, DFT

## LITERATURA

- [1] Spectral Analysis for Identifying Faults in Induction Motors by Means of Sound Fernando Salazar-Villanueva, Oscar G. Ibarra-Manzano
- [2] Faults Detection in Induction Motor via Stator Current Spectrum Analysis M. Messaoudi L. Sbita M. N. Abdelkrim
- [3] ANALITIČI PRORAČUN OSOVINSKIH STRUJA KOD MOTORA S HOMOGENIM JARMOM, Željko Hederić – Marinko Barukčić – Krešimir Mikološević
- [4] Study of shaft voltage & bearing currents in electrical machines A. Datta, M. Dubey, S. Jain
- [5] BRIEF REVIEW OF MOTOR CURRENT SIGNATURE ANALYSIS Dubravko, MILJKOVIĆ, HEP, Zagreb, CROATIA,
- [6] PRORAČUN METODOM KONAČNIH ELEMENATA KRUŽNOG MAGNETSKOG TOKA UZROKOVANOG EKSCENTRIČNIM POMAKOM ROTORA, Željko Hederić, Stjepan Štefanko, Marinko Barukčić
- [7] Regulacijski sustav asinkronog elektromotora Očko, Božidar
- [8] <http://avalon.rs/blog/kvalitet-elektricne-energije/visi-harmonici/>
- [9] Mandić, Tomljenović, Pužar: Sinkroni i asinkroni električni strojevi, Zagreb, 2012.g.

## **ŽIVOTOPIS**

Dario Štenc rođen je u Osijeku 11.06.1995 godine. Nakon završene Osnovne škole Ivana Filipovića u Osijeku upisuje Elektrotehničku i promptnu školu u Osijeku. Završavanjem četverogodišnjeg školovanja svoje obrazovanje 2014. nastavlja na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku (današnjem Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija) na kojem upisuje stručni studij elektrotehnike te se opredjeljuje za smjer Elektroenergetika. 2018.godine stječe naziv univ.bacc.ing te upisuje razlikovnu godinu na FERIT-u. Potom upisuje diplomski studij elektrotehnike, smjer Elektroenergetika, izborni blok Industrijski pogoni.