

# Detekcija kvarnih stanja asinkronog motora analizom strujnog spektra

---

**Juroš, Tomislav**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2019**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:003578>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-08**

*Repository / Repozitorij:*

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



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

**Sveučilišni studij**

**DETEKCIJA KVARNIH STANJA  
ASINKRONOG MOTORA ANALIZOM  
STRUJNOG SPEKTRA**

**Diplomski rad**

**Tomislav Juroš**

**Osijek, 2019.**

# Sadržaj

<b>1</b>	<b>UVOD</b>	<b>1</b>
1.1	Zadatak diplomskog rada . . . . .	2
<b>2</b>	<b>OPIS RADA ASINKRONOG STROJA</b>	<b>3</b>
2.1	Osnovna svojstva stroja . . . . .	3
2.2	Kvarna stanja asinkronih motora . . . . .	7
2.2.1	Ležajni kvarovi . . . . .	8
2.2.2	Kvarovi na statoru . . . . .	9
2.2.3	Kvarovi rotorskog kaveza . . . . .	11
2.2.4	Ekscentricitet zračnog raspora . . . . .	12
<b>3</b>	<b>ANALIZA STRUJNOG OTISKA MOTORA I DETEKCIJA KVARA</b>	<b>13</b>
3.1	Fourierova analiza . . . . .	13
3.1.1	Vremenski kontinuiran Fourierov red (CTFS) . . . . .	13
3.1.2	Vremenski kontinuirana Fourierova transformacija (CTFT) . . . . .	15
3.1.3	Vremenski diskretna Fourierova transformacija (DTFT) . . . . .	16
3.1.4	Vremenski diskretan Fourierov red (DTFS) . . . . .	17
3.1.5	Diskretna Fourierova transformacija (DFT) . . . . .	18
3.1.6	Brza Fourierova transformacija (FFT) . . . . .	19
3.1.7	Sažetak Fourierove analize kroz tablične prikaze . . . . .	20
3.2	Opis i primjena <i>MCSA</i> metode . . . . .	21
3.3	Algoritam za detekciju kvarnog stanja . . . . .	24
<b>4</b>	<b>MODELIRANJE METODOM KONAČNIH ELEMENATA</b>	<b>29</b>
4.1	Metoda konačnih elemenata . . . . .	29
4.1.1	<i>Ansys Maxwell</i> programski paket . . . . .	29
4.2	Priprema za izvođenje simulacija . . . . .	33
4.3	Analiza i detekcija simuliranih kvarova . . . . .	37
4.4	2D modeli . . . . .	38
4.4.1	Statički ekscentricitet zračnog raspora . . . . .	40
4.4.2	Dinamički ekscentricitet zračnog raspora . . . . .	42
4.4.3	Mješoviti ekscentricitet zračnog raspora . . . . .	44
4.5	3D modeli . . . . .	46
4.5.1	Ispravan motor . . . . .	48
4.5.2	Prekinut 1 štap rotorskog kaveza . . . . .	50
4.5.3	Prekinuta 2 štapa rotorskog kaveza . . . . .	53
4.5.4	Prekinuta 3 štapa rotorskog kaveza . . . . .	54
4.5.5	Puknut kratkospojni prsten rotorskog kaveza . . . . .	57

4.5.6	Prekid 1 faze . . . . .	59
4.5.7	Kratki spoj između 2 faze . . . . .	60
4.5.8	Kratki spoj između utora iste faze . . . . .	62
<b>5</b>	<b>ANALIZA MJERENJA STRUJA MOTORA U KVARU</b>	<b>65</b>
5.1	Mjerni postav . . . . .	65
5.2	Mjerenje i analiza . . . . .	69
<b>6</b>	<b>ZAKLJUČAK</b>	<b>72</b>
	<b>Literatura</b>	<b>73</b>
	<b>Popis slika</b>	<b>76</b>
	<b>Popis tablica</b>	<b>78</b>
	<b>Sažetak</b>	<b>79</b>
	<b>Abstract</b>	<b>80</b>
	<b>Životopis</b>	<b>81</b>
	<b>PRILOG 1</b>	<b>82</b>
	<b>PRILOG 2</b>	<b>84</b>

# 1. UVOD

Asinkroni motori su u današnje vrijeme najčešće korišteni motori. U prošlosti su to bili istosmjerni motori. Primjenom frekvencijskih pretvarača, asinkroni motori se po upravljačkim svojstvima mogu poistovjetiti s istosmjernim motorima. Isto tako, razvojem tehnologije, frekvencijski pretvarači su postali jeftiniji te time i dostupniji. Usprkos stalnom razvoju, na motorima se mogu očekivati kvarovi koji mogu prouzročiti materijalnu štetu i neplanirano produljenje rokova rokova u industriji. Primjenom dijagnostičkih metoda, kvarovi se mogu otkloniti na vrijeme.

Povijest dijagnoze kvara i zaštite motora je duga i arhaična. Proizvođači i korisnici električnih motora su se na početku oslanjali na zaštitu od preopterećenja, prenapona, podnapona, zemljospoja kako bi osigurali pouzdan i siguran rad. Međutim, kako je zadaća koju motori imaju postala kompleksnija, bila su potrebna i poboljšanja u području dijagnostike kvara. Problemi s kvarovima na motorima u velikim industrijskim postrojenjima postaju sve značajnija briga u industrijskim primjenama. Želja za povećanjem pouzdanosti motora dovela je do istraživanja kvarova i posljedica različitih kvarnih stanja. U literaturi se spominju brojne metode dijagnosticiranja kvarova. Bitno je odabrati električne veličine iz kojih će se dobiti najviše podataka za analizu. Vjerodostojnost dijagnoze kvara i analize rezultata je zadovoljavajuća primjenom više vrsta nadzora motora (dvije i više).

Današnje metode većinom uključuju nadziranje električnih motora prije i poslije popravka stroja (engl. *off - line monitoring*). Zbog takvog pristupa nadziranju rada motora, kvarovi se otkriju tek kada je prekasno. U modernim industrijama se javlja potreba za učestalijim nadziranjima i mjerenjima. Oštećenja motora se mogu u nekim slučajevima razvijati postepeno i sporo, a u daljim fazama kvarova sve brže. Čak i sa oštećenjima, oni mogu i dalje obavljati svoje zadaće. Cilj nadzora je pravodobno uočavanje problema, jer u tom slučaju, postoji mogućnost rješavanja kvara prije nastanka težih oštećenja. Rješenje ovog problema je uvođenje stalnog nadzora (engl. *on-line monitoring*), barem kod najvažnijih motora u pogonu. Njih je potrebno opremiti nadzornim sustavom te uzeti u obzir trošak nadzora rada prilikom izračunavanja troškova vezanih za motor. Tendencija ovog rada je stavljena na simulaciju kvarnih stanja asinkronog motora analizom statorske struje, usporedbom s eksperimentalnim mjerenjima i izradom algoritma za detekciju kvarnog stanja.

## 1.1. Zadatak diplomskog rada

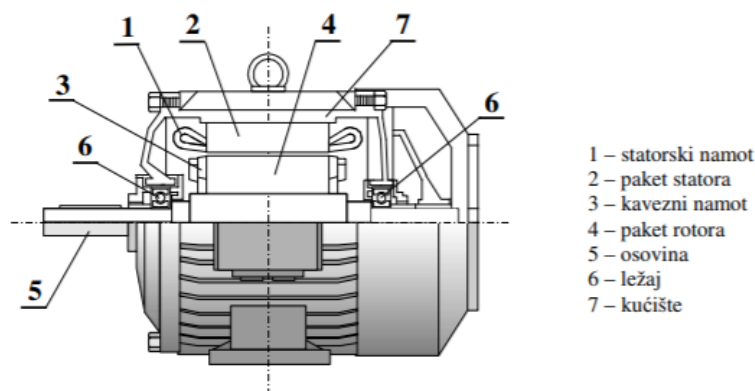
Potrebno je proučiti literaturu vezanu za metodu detekcije kvarova asinkronih strojeva nazvanu analiza strujnog otiska motora (*MCSA - motor current signature analysis*). Potrebno je prikazati koji su glavni kvarovi asinkronih strojeva, kako oni utječu na rad stroja te kako ih se detektira. Napraviti program za detekciju kvarnog stanja u *MATLAB*-u iz mjerenih struja stroja. Simulirati kvarno stanje asinkronog stroja metodom konačnih elemenata te sistematično prikazati rezultate.

## 2. OPIS RADA ASINKRONOG STROJA

### 2.1. Osnovna svojstva stroja

Asinkroni stroj je predmet proučavanja mnogih autora([1–3]), pa se prema njihovim razmatranjima u nastavku teksta opisuju osnovni principi rada stroja. Glavni dijelovi asinkronog stroja su stator, rotor, osovina, namoti, kućište i ležajevi (Sl. 2.1 [1]). Asinkroni stroj se u najčešćem broju slučajeva koristi kao motor. Prednost korištenja ovakvih motora je relativno niska cijena, dostupnost, brza instalacija, pouzdanost.

Stator se sastoji od statorskog paketa (izrađen od magnetskih međusobno izoliranih limova debljine 0.5 mm do 0.63 mm), statorskog namota i kućišta. Stator asinkronog motora posjeduje najčešće trofazni namot, u spoju zvijezda ili trokut.



Sl. 2.1: Građa asinkronog motora [1]

Rotor sadrži rotorski paket (izrađen u obliku valjka od magnetskih međusobno izoliranih limova), osovinu i namot. U utorima rotora je smješten namot, a oblik utora ovisi o vrsti namota koji kroz njega prolazi. Namot rotora može biti izveden kao i namot statora (pomoću svitaka) ili od štapova. Rotor asinkronog motora se izvodi bez istaknutih polova, s namotom raspoređenim po obodu rotora. Naponi u rotorskim vodičima se induciraju statorskim okretnim magnetskim poljem. Namot rotora je uvijek izveden kao višefazni, a broj faza na rotoru ne mora odgovarati broju faza na statoru. Namot može biti načinjen od svitaka kao i statorski namot, ali može biti drugačije izveden, kao kavez (lijevani ili uložni).

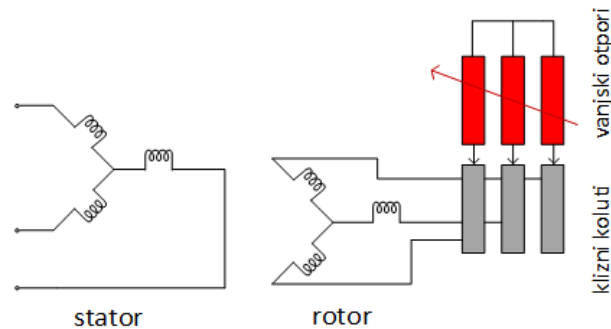
Kućište stroja se izrađuje od lijevanog željeza, čelika ili legura aluminija. Ono služi kao zaštita statora i rotora te kao nosač. Osim zaštite, služi i za hlađenje stroja. S vanjske strane se nalaze rebra koja omogućuju povećanje površine hlađenja. Donja strana najčešće sadrži ravnu plohu s utorima koja služi za montiranje motora na drugu površinu. Na kućištu se još nalazi i priključna kutija sa stezaljkama vezanim za statorski namot.

Asinkroni motor se prema izvedbi može podijeliti na 2 vrste:

- klizno-kolutni,

- kavezni.

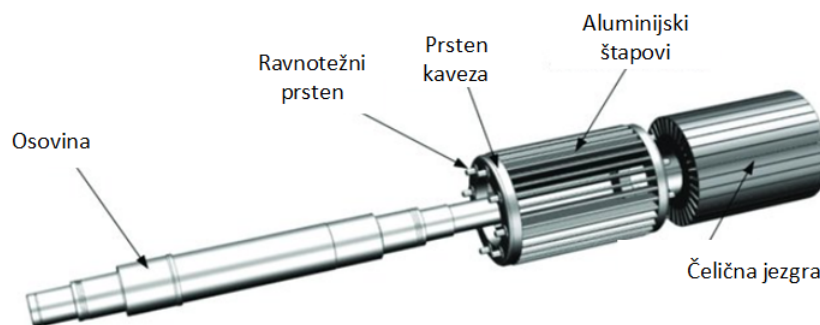
Klizno-kolutni asinkroni motor na rotoru ima najčešće trofazni namot spojen u zvijezdu. Krajevi namota su izvedeni do kliznih koluta. Zbog sklopa kliznih koluta i četkica, moguće je u seriju sa svakom fazom uključiti vanjski (radni) otpornik. Na slici 2.2 se nalazi shematski prikaz klizno-kolutnog asinkronog motora.



Sl. 2.2: Klizno-kolutni asinkroni motor

Klizni koluti ovakvog stroja su međusobno izolirani te su smješteni na osovinu. Njih dodiruju četkice koje pomoću radnih otpornika spajaju namot rotora. Otpornici su promjenjivi te mijenjaju vrijednost ovisno o potrebi. U slučaju nekorištenja dodatnih otpornika, namot rotora se kratko spaja na rotoru, a četkice su odvojene od koluta.

Kavezni motor je dobio naziv po tome što se u svakom utoru rotora nalazi po jedan vodič štapnog oblika čiji krajevi su sa svake strane rotora kratko spojeni pomoću prstena, te takav namot rotora izgleda poput kaveza. Kavez je obično napravljen od aluminija ili njegovih legura. Na slici 2.3 [4] se nalazi rotor stroja s namotom u obliku kaveza. Postoje 2 izvedbe kaveza: uložni i lijevani. Uložni je izrađen od bakrenih štapovi čiji krajevi se zavare na bakreni prsten. Lijevani kavez se izrađuje od aluminija i legura aluminija. Proces proizvodnje se svodi na način da se rotor zajedno s osovinom stavlja u kalup za lijevanje tako da se materijalom ispune utori i prostor za kratkospojni prsten. Lijevani se u principu koriste za motore manjih snaga dok se uložni koriste za motore srednjih i velikih snaga.



Sl. 2.3: Rotorski namot u obliku kaveza [4]



Priključivanjem statorskog namota na trofazni sustav napona (fazno pomaknuti za  $120^\circ$  električno), njime protoku trofazne struje koje stvaraju statorsko okretno magnetsko polje  $\Theta_s$  (2-1)[[1]] koje ima jedino direktnu komponentu.

$$\Theta_s = \frac{m_s}{2} \cdot \frac{2\sqrt{2}I_s}{\pi} \cdot \frac{N_s}{p} k_{ws} \quad (2-1)$$

$m_s$  - broj faza statora

$I_s$  - efektivna fazna vrijednost struje statora

$N_s$  - broj serijski vezanih zavoja po fazi

$p$  - broj pari polova

$k_{ws}$  - faktor statorskog namota

Statorskim protjecanjem je stvoreno okretno magnetsko polje stalnog iznosa i brzine vrtnje (sinkrona brzina) koja je određena frekvencijom napajanja  $f$  i brojem pari polova  $p$  (2-2).

$$n_s = \frac{60f}{p} \quad (2-2)$$

Navedeno okretno magnetsko polje presijeca vodiče rotora pa se u rotorskom namotu induciraju elektromagnetske sile. Ako se rotor vrti sinkronom brzinom  $n_s$ , ne postoji relativno gibanje vodiča naspram magnetskog polja, onda nema induciranja elektromagnetskih sila. U stanju mirovanja, elektromagnetska sila iznosi:

$$E_{r0} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \Phi f_s N_r k_{wr} \quad (2-3)$$

$N_r$  - broj serijskih vezanih zavoja namota rotora po fazi

$k_{wr}$  - faktor rotorskog namota

$f_s$  - frekvencija napajanja statora

$\Phi$  - magnetski tok

Pri nekoj brzini rotora, inducirana elektromagnetska sila iznosi:

$$E_r = s \cdot E_{r0} \quad (2-4)$$

Iz razloga što se rotor ne vrti sinkronom brzinom, ovaj stroj je dobio ime asinkroni stroj. Ako se rotor vrti brzinom  $n$  različitom od sinkrone brzine, može se definirati reaktivna brzina vrtnje  $n_{rel}$  u odnosu na sinkronu. Omjer relativne brzine vrtnje i sinkrone brzine se naziva klizanjem  $s$ .

$$n_{rel} = n_s - n \quad (2-5)$$

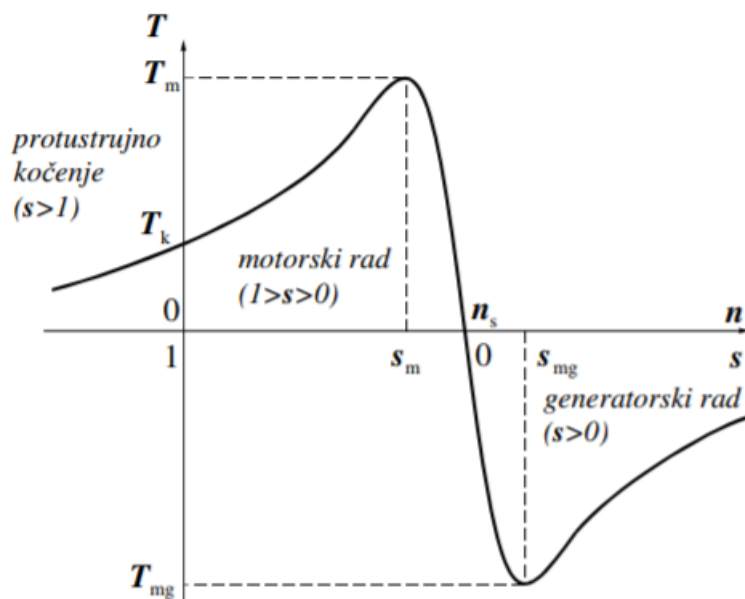
$$s = \frac{n_{rel}}{n_s} = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2-6)$$

Područje rada asinkronog stroja ovisi o klizanju. Za stanje motora u kratkom spoju, klizanje  $s$  iznosi 1. Pri sinkronoj brzini, rotor ima klizanje  $s = 0$ , zbog čega inducirana elektromotorna sila ima iznos 0. U tablici 2.1 se nalazi prikaz režima rada u odnosu na vrijednost klizanja  $s$ .

**Tab. 2.1:** Područje rada u ovisnosti o klizanju

Vrijednost klizanja	Režim rada
$0 < s < 1$	Motorski
$s < 0$	Generatorski
$s > 1$	Protustrujno kočenje

Na slici 2.4 [1] se nalazi momentna karakteristika u svim područjima rada. Pri klizanju  $s = 1$  moment ima vrijednost  $T_k$  (moment kratkog spoja). Kako se klizanje smanjuje, tako moment raste do vrijednosti  $T_m$  što označava prekretni moment ili maksimalni moment ( $s = s_m$ ). Daljnim smanjenjem, moment pada i doseže vrijednosti nula pri  $s = 0$ . Između vrijednosti klizanja  $s_m$  i 0 se odvija nazivni rad motora. Vrtjom motora u suprotnu stranu (moment i dalje pozitivan), motor uzima snagu iz mreže i mehaničku snagu na osovini, stroj radi u režimu protustrujnog kočenja. Stroj radi kao generator u slučaju da se iz praznog hoda stroj počne vrtjeti u istom smjeru, brzinom vrtnje većom od sinkrone brzine. U tom slučaju, klizanje je negativno, stroj vraća radnu snagu u mrežu, ali uzima jalovu snagu radi uspostave magnetskog polja.



**Sl. 2.4:** Momentna karakteristika [1]

## 2.2. Kvarna stanja asinkronih motora

U ovom poglavlju će biti nabrojane vrste kvarnih stanja i neke od tehnika za dijagnostičiranje kvarova, a ostatak diplomskog rada se odnosi na detaljno proučavanje kvarova analizom strujnog spektra.

Iako su jeftini, jednostavni i lagani za održavanje, asinkroni motori su podložni različitim vrstama kvarova. Mnogi kvarovi električnih motora su uzrokovani ljudskom pogreškom. Pri tome se podrazumijeva krivi izbor motora za pojedinu svrhu, nepostavljanje zaštite i nadzora motora, odabir motora neadekvatne snage. Za najvažnije motore u pogonu, koji zahtijevaju neprekidan rad, je povoljnije investirati u nadzor stroja nego ga zamijeniti novim motorom. Kako bi se mogućnost kvara motora svela na minimum, potrebno je posvetiti pozornost pri odabiru motora, ovisno u koju se svrhu i u kojim uvjetima će se motor koristiti. Osim ljudskog faktora, sama konstrukcija motora može biti oštećena u procesu proizvodnje, korištenjem lošeg materijala, loše izvedenim spojevima, mogućim utjecaj zamora materijala i slično. Najveće opterećenje motora se javlja pri pokretanju jer se pojavljuju velika mehanička i električna naprezanja te se u tom stadiju kvarovi najčešće počinju pojavljivati. Najvažniji dijelovi motora na koje treba obratiti pozornost pri dijagnostici su sljedeći: statorski i rotorski paket, ležajevi i osovina.

Najveći kvarovi na električnim motorima mogu biti klasificirani na sljedeće [5, 6]:

1. statorski kvarovi koji rezultiraju kratkim spojevima jedne ili više faza statorskog namota,
2. slomljeni rotorski štapovi ili raspuknuti prstenovi koji drže štapove,
3. statičke i dinamičke nepravilnosti zračnog rasporeda,
4. savijena osovina (srodno dinamičkom ekscentricitetu) koja može rezultirati dodirivanjem između statora i rotora uzrokujući ozbiljnu štetu na jezgri i namotima statora,
5. kratki spojevi na rotoru,
6. kvarovi na ležajevima.

Od gore navedenih, kvarovi na ležajevima i statoru, slomljeni ili prekinuti rotorski štapovi, puknuće kratkospojnog prstena i kvarna stanja vezana uz ekscentricitet su najčešći i zahtijevaju posebnu pažnju. Ti kvarovi mogu uzrokovati razne simptome:

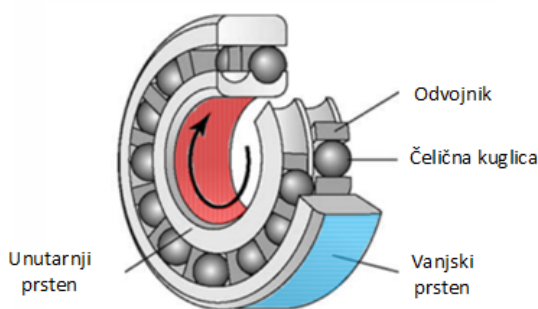
- neuravnoteženi naponi u zračnom rasporedu i neuravnotežene linijske struje,
- povećana pulsacija momenta,
- smanjeni prosječni moment,
- povećani gubici i smanjenje efikasnosti,
- pregrijavanje stroja.

Za potrebe dijagnostike takvih kvarova, do sada su razvijene brojne metode dijagnostike koje često uključuju različita područja znanosti i tehnologije. Mogu se podijeliti na sljedeće [7]:

- monitoring elektromagnetskog polja,
- temperaturna mjerenja,
- infracrveno prepoznavanje (*IR*),
- monitoring pomoću radio-frekvencijskih emisija (*RF*),
- zvučni i vibracijski monitoring,
- kemijska analiza,
- akustična mjerenja,
- analiza strujnog spektra (*MCSA*),
- tehnologije umjetne inteligencije (*ANN*).

### 2.2.1 Ležajni kvarovi

Rotacijski strojevi moraju sadržavati ležajeve. Oni drže rotor na mjestu i pomažu rotoru pri rotiranju smanjujući trenje. Svaki ležaj se sastoji od dva prstena, unutarnjeg i vanjskog. Set kuglica iliti rotirajućih elemenata su smješteni između ta dva prstena, a prostor između dva prstena je ispunjen uljem ili mašću u svrhu smanjenja trenja između kuglica i prstena. Slika 2.5 [8] prikazuje građu ležaja.



Sl. 2.5: Ležaj [8]

Čak i prije montiranja ležaja, on može biti u kvaru uzrokovanim korištenjem materijala u zamoru. Ti kvarovi mogu dovesti do povećanih vibracija i povišene razine buke. Kvar ležaja može nastupiti kada zamor materijala uzrokuje pucanje dijela kuglice ili prstena u ležaju usred dugotrajnog korištenja. Ovakav tip kvara progresivno napreduje usred čega dolazi do pojave visoke buke i vibracija. Nasuprot normalnim unutarnjim radnim naprezanjima uzrokovanim vibracijama, ekscentricitetom osovine i ležajnim strujama usred rada, ležajevi se mogu oštetiti i od vanjskih uzroka poput sljedećih:

- **Pretjeran teret i visok temperaturni rast:** uzrokuju kaljenje materijala prstena i kuglica i sušenje lubrikanta. Prevelik teret može dovesti do prelaska granične elastičnosti materijala ležaja (maksimalno naprezanje koje materijal može podnijeti bez trajne deformacije).
- **Korozija:** pojavljuje se ako su ležajevi izloženi nagrizajućim tekućinama (kiseline itd.) i vodom. Ako je lubrikant loš ili se ležajevima neoprezno rukuje prilikom montiranja, može doći do nastanka korozije koja uzrokuje rani kvar ležaja [9].
- **Onečišćenje:** jedan od vodećih faktora kvara ležaja. Lubrikant se onečisti prašinom ili drugim stranim česticama. Najčešće se to događa u industrijskom okruženju. Visoke vibracije su rezultat onečišćenja.
- **Nepropisno podmazivanje:** uzrokuje pregrijavanje i abraziju. Manjak ulja dovodi do povećane temperature ležaja. Primijeti se na način da dio materijala ležaja poprimi drugačiju (tamniju) boju.
- **Nepropisna instalacija ležajeva:** primjena prevelike sile pri postavljanju ležaja pri čemu se mogu oštetiti kuglice i prstenovi te samim time stvaranje buke i povišenih vibracija.

Prema [5], gotovo 40% - 50% svih kvarova na motoru se odnosi na ležajeve. Ponekad se kvarovi na ležaju mogu manifestirati kao kvar na rotoru, što se obično pokriva pod kategorijom kvarova vezanih za puknuće štapova kaveza rotora. Pri proučavanju kvarova na ležajevima, u obzir treba uzeti i defekte kuglica koji se mogu detektirati vibracijskom analizom ([5, 10]) ili tehnologijom umjetne inteligencije (*ANN*). Frekvencije na kojima se mogu pojaviti vibracije za oštećen vanjski prsten ležaja (2-7), unutarnji prsten ležaja (2-8) i oštećene kuglice (2-9) su sljedeće:

$$f_v[H z] = \frac{N}{2} f_r \left[ 1 - b_d \frac{\cos(\beta)}{d_p} \right] \quad (2-7)$$

$$f_v[H z] = \frac{N}{2} f_r \left[ 1 + b_d \frac{\cos(\beta)}{d_p} \right] \quad (2-8)$$

$$f_v[H z] = \frac{d_p f_r}{2b_d} \left\{ 1 - \left[ b_d \frac{\cos(\beta)}{d_p} \right]^2 \right\} \quad (2-9)$$

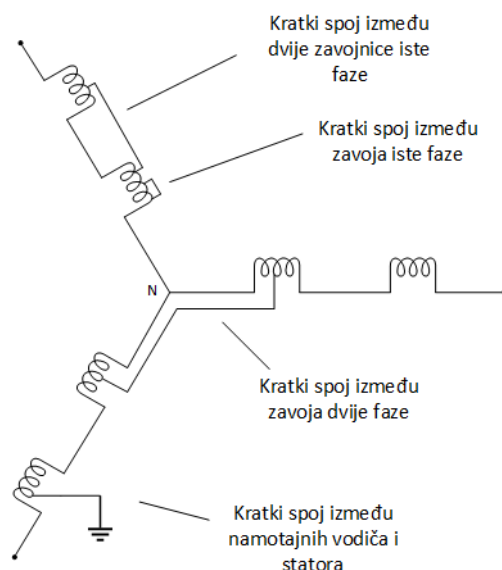
gdje je  $f_r$  - rotacijska frekvencija,  $N$  - broj kuglica,  $b_d$  - promjer kuglice,  $d_p$  - promjer ležišta kuglice,  $\beta$  - dodirni kut kuglice (s prstenima).

Potrebno je istaknuti da su prethodno navedene frekvencijske komponente vibracija dobivene iz analiziranja vibracija tehnikom vibracijskog monitoringa.

### 2.2.2 Kvarovi na statoru

Ovi kvarovi se obično odnose na kvarove izolacije statora. Stator motora je podložan električnim, mehaničkim, termičkim i ostalim naprezanjima. Uobičajeno se to odnosi na kratke

spojeve između faza ili zemljospojeve. Različiti su tipovi kvarova statorskog namota, to može biti: kratki spoj između zavoja iste faze, kratki spoj između dvije zavojnice iste faze, kratki spoj između zavoja dvije faze, kratki spoj između zavoja sve tri faze, kratki spoj između namotajnih vodiča i statora. Slika 2.6 prikazuje različite tipove kratkih spojeva u zvijezda spoju.



**Sl. 2.6:** Zvijezda spoj statora uz prikaz različitih kvarova statorskog namota

Gotovo 30% - 40% svih kvarova na motoru se odnosi na ovu kategoriju. Prema literaturi [11] kvarovi na statoru nastaju iz manjih kvarova, najčešće vezanih za zavoje namote te kroz vrijeme kulminiraju u velike kvarove. Kvarovi i njihov utjecaj na rad motora su sljedeći:

- **Mehanička naprezanja** - Događaju se zbog pomicanja zavojnice statora te rotor može udariti u stator. Rotor također može dodiravati stator ako je osovina savinuta ili usred kvara ležaja. Dodir statora i rotora može uzrokovati oštećenje izolacije i rezultirati kratkim spojem.
- **Električna naprezanja** - Ovakav tip naprezanja se uglavnom događa zbog tranzijenta napona napajanja. Tranzijent raste zbog različitih kvarova uzrokovanih udarom groma, korištenjem prekidača ili frekvencijskih pretvarača. Rezultat električnih naprezanja je smanjen vijek trajanja namota statora i pojava kratkih spojeva i zemljospoja.
- **Termička naprezanja** - događaju se usred toplinskih preopterećenja i glavni je razlog oštećivanja i pogoršanja stanja izolacije namota statora. Termička naprezanja nastaju u situacijama kontinuiranog preopterećenja, neispravne ventilacije, promjenjivog napona napajanja itd.
- **Ostala naprezanja** - Ovakva naprezanja se pojavljuju ako motor radi u uvjetima okoline gdje je prehladno, prevruće ili se radi o okolini gdje vlada visoka vlaga. Prisustvo stranog materijala može kontaminirati izolaciju namota na način da se smanjuje disipacija topline unutar kućišta, a time i vijek trajanja izolacije. Strujanje zraka mora biti neometano,

inače dolazi do povećanja temperature namota. U tablici 2.2 [12] se nalazi ovisnost temperature okoline u odnosu na vijek trajanja izolacije statora.

**Tab. 2.2:** *Vijek trajanja izolacije u ovisnosti o temperaturi*[12]

Temperatura okoline [°C]	Vijek trajanja izolacije [h]
30	250 000
40	125 000
50	60 000
60	30 000

### 2.2.3 Kvarovi rotorskog kaveza

Nasuprot građi statora, dizajn i proizvodnja kaveznog rotora je napredovala puno kroz godine. Kao rezultat toga, kvarovi na rotoru sada obuhvaćaju tek 5% - 10% svih kvarova na motoru ([13, 14]). Kavez rotora se sastoji od štapova i dva kratkospojna prstena koji povezuju štapove u jednu cjelinu. Kvar nastaje kada dođe do pucanja jednog ili više štapova kaveza ili pucanja kratkospojnog prstena.

Kavez rotora se može podijeliti u dvije vrste: lijevani i uložni. Prije su se motori s lijevanim kavezom koristili samo za manje motore, međutim, kako je tehnologija napredovala, sada se motori s lijevanim kavezom mogu koristiti za motore do čak 3000 kW. Rotori s uložnim kavezom svoju primjenu pronalaze u većim i specijalnim primjenama. Lijevani kavez je zbog specifične proizvodnje hrapavije površine nego uložni kavez. Jednom kad kvar uzrokuje pucanje kaveza, gotovo ga je nemoguće popraviti te je pritom potrebno zamijeniti cijeli kavez.

Razloga zbog kojih dolazi do pucanja rotorskih štapova je nekoliko:

- **Termička naprezanja** nastaju zbog kontinuiranog preopterećenja (učestalo pokretanje, loša ventilacija, dodirivanja statora i rotora, prevelik teret, neuspješan zalet itd.), vrućih točaka, pretjeranih gubitaka, iskrenja (uglavnom kod uložnih kaveza), toplinskog istezanja štapova, potiskivanja struje (skin efekt) tijekom zaleta.
- **Magnetska naprezanja** uzrokovana elektromagnetskim silama, elektromagnetskom bukom i vibracijama, ekscentricitetom zračnog raspora, rasipnim tokom utora koji pulsira dvostrukom frekvencijom struje rotora [15].
- **Rezidualna naprezanja** nastaju zbog tvorničkih grešaka u procesu proizvodnje (loše lijevanje, nedovoljno učvršćeni limovi rotorskog paketa itd.).
- **Dinamička naprezanja** uzrokovana centrifugalnim silama, vrtnjom rotora, momentom na osovini, opterećenjima nastalim zbog kvarova zupčanika, spojki i prijenosa, torzijskim opterećenjima osovine u tranzijentnim (prijelaznim) stanjima.
- **Mehanička naprezanja** nastaju zbog pucanja ležajeva, zamora materijala, opterećenja nastala zbog radijalnog pomicanja štapova tijekom rada itd.

- **Ostala naprezanja** nastaju usred onečišćenja i abrazije materijala od kojeg je rotor napravljen, djelovanjem vlage i kemijskih sredstava.

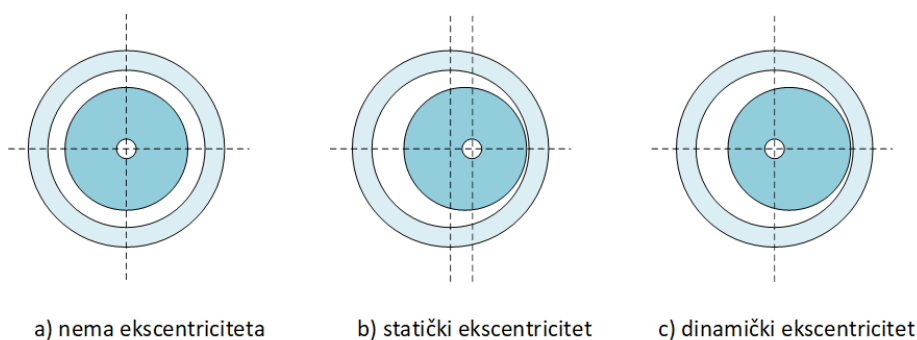
U slučaju puknutog jednog ili više štapova, stroj i dalje može nastaviti s radom iako su mu radne karakteristike pogoršane (brzina vrtnje, moment itd.). Puknuti komad u nekim slučajevima može oštetiti namote statore i uzrokovati kratke spojeve, čime troškovi popravka drastično rastu. Ispitivanja su pokazala kako je velik broj oštećenja štapova nastao tijekom zaleta jer je tada rotorska struja najveća, pa je i rotor tada izložen najvećim silama [16]. Kako oštećen kavez može uzrokovati iskrenje, velika opasnost je iskrenje u uvjetima eksplozivne okoline.

#### 2.2.4 Ekscentricitet zračnog raspora

Ekscentricitet stroja je stanje nejednakog zračnog raspora koji se nalazi između statora i rotora ([7, 17]). Kada ekscentricitet postaje veći, rezultirajuće radijalne sile mogu uzrokovati dodir statora i rotora, odnosno veliku štetu na statoru i rotoru. Postoje tri vrste ekscentriciteta zračnog raspora; statički, dinamički i mješoviti. U slučaju statičkog ekscentriciteta, pozicija minimalnog zračnog raspora je fiksirana u prostoru. Može biti uzrokovana ovalnošću statorske jezgre ili neispravnim pozicioniranjem statora ili rotora u fazi proizvodnje i testiranja. Ako je sklop rotora i osovine dovoljno krut, razina statičkog ekscentriciteta se neće mijenjati.

U slučaju dinamičkog ekscentriciteta, osovina nije u centru rotacije i pozicija minimalnog zračnog raspora se rotira s rotorom, odnosno, nije fiksirana u prostoru. Ovo odstupanje može biti uzrokovano zbog nekoliko faktora uključujući savijenu osovinu rotora, kvarove na ležajevima, magnetsku rezonanciju pri kritičnim brzinama itd. Dinamički ekscentricitet se u novim strojevima kontrolira različitim naprednim testovima. Ekscentricitet zračnog raspora do 10% se smatra dopustivim. Međutim, proizvođači pokušavaju taj postotak što više smanjiti kako bi smanjili razinu vibracija i buke koje su posljedica ekscentriciteta. Na slici 2.7 se može vidjeti primjer statičkog i dinamičkog ekscentriciteta u odnosu na slučaj bez ekscentriciteta.

Osim statičkog i dinamičkog ekscentriciteta, može se definirati i mješoviti ekscentricitet koji sadrži istodobno statički i dinamički ekscentricitet. U praksi, najčešće motor ima mješoviti ekscentricitet.



Sl. 2.7: Vrste ekscentriciteta zračnog raspora



### 3. ANALIZA STRUJNOG OTISKA MOTORA I DETEKCIJA KVARA

U poglavlju 2.2 su opisani uzroci i posljedice kvarnih stanja te postojeće metode za dijagnostiku. U ovom radu je korištena metoda analize strujnog otiska motora (*MCSA*) čiji opis se nalazi u ovom poglavlju. Prikazat će se specifične frekvencijske komponente koje se javljaju za određeni kvar motora. S obzirom da se rezultati struja obrađuju brzom Fourierovom transformacijom, u ovom poglavlju će biti prikazan sažetak Fourierove analize radi lakšeg shvaćanja. Osim toga, u nastavku će biti opisan algoritam za detekciju kvarova koji je kreiran na osnovu Fourierove analize i analize strujnog otiska motora.

#### 3.1. Fourierova analiza

Glavna ideja Fourierove analize je da se općenite funkcije mogu prikazati kao suma jednostavnijih trigonometrijskih funkcija. Danas ona ima mnoge znanstvene primjene u fizici, teoriji brojeva, kombinatorici, digitalnoj obradi slika, teoriji vjerojatnosti, statistici, forenzici, kriptografiji, akustici, geometriji, optici, numeričkoj analizi i u mnogim drugim znanstvenim područjima. Zbog uporabe u različitim znanstvenim granama, ona je postala predmet istraživanja mnogih autora ([18–22]). U današnje vrijeme, uporabom računala, Fourierova analiza se odvija velikom brzinom. Pri procesuiranju signala (zvuk, radiovalovi, svjetlosni valovi), Fourierova analiza može izolirati uskopojasne komponente složenog valnog oblika, koncentrirajući ih radi lakšeg otkrivanja ili uklanjanja. Četiri su oblika Fourierove transformacije:

- Vremenski kontinuiran Fourierov red (CTFS),
- Vremenski kontinuirana Fourierova transformacija (CTFT)
- Vremenski diskretna Fourierova transformacija (DTFT)
- Vremenski diskretan Fourierov red (DTFS)

##### 3.1.1 Vremenski kontinuiran Fourierov red (CTFS)

U matematici, Fourierov red rastavlja periodičku funkciju ili signal na beskonačnu sumu sinusnih harmonika. Kada se funkcija razvija u Fourierov red, onda ta funkcija mora biti periodična, to je glavni uvjet. Aperiodična funkcija na nekom intervalu se može razviti u Fourierov red na način da taj interval postane period te funkcije i da se ponavlja beskonačno puno puta. Fourierov red je jedan od najznačajnijih alata za rješavanje parcijalnih i običnih diferencijalnih jednačini. On je općenitiji od Taylorovog reda iz razloga što neke diskontinuirane periodičke funkcije se ne mogu razviti u Taylorov red, ali mogu u Fourierov red.

Neka je  $f(\tau)$  periodička funkcija (3-1) s periodom  $T$ :

$$f(\tau) = f(\tau + T) \tag{3-1}$$

Funkcija  $f(\tau)$  se može uvijek prikazati periodičnom na način da se uvede nova neovisna varijabla  $t$  kroz sljedeći izraz (3-2):

$$t = \frac{2\pi}{T} \cdot \tau \quad (3-2)$$

Pomoću prethodne dvije jednadžbe, dobiva se sljedeća jednadžba:

$$f(t + 2\pi) = f(t) \quad (3-3)$$

Kako se radi o periodičnoj funkciji, potrebno je razmatrati ponašanje na intervalu  $2\pi$ , npr.  $(-\pi, \pi)$ . Ideja Fourierovog reda je da se bilo koja funkcija  $f(t)$  rastavi na beskonačnu sumu, red ili jednostavnije funkcije. Prema Fourieru, beskonačna suma sinusa i kosinusa je sljedećeg oblika:

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

Prethodni izraz je Fourierov red od funkcije  $f(t)$  na intervalu  $[-\pi, \pi]$ . Vrijednost reda se može razlikovati od vrijednosti funkcije. Za Fourierov red se pretpostavlja da konvergira u svim točkama osim u točkama prekida. Članovi  $a_n$  i  $b_n$  imaju ulogu amplitude, član  $\frac{a_0}{2}$  služi za translaciju duž osi  $y$  (naziva se ponekad "DC komponenta"). On predstavlja harmonik nulte frekvencije, odnosno srednju vrijednost (DC) signala oko koje ostali harmonici čine signal. Izraz za računanje koeficijenta  $a_0$  je sljedeći:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) dt \quad (3-5)$$

Konstantni koeficijenti  $a_n$  i  $b_n$  se nazivaju Fourierovim koeficijentima. Za pronalaženje vrijednosti tih koeficijenata, koristi se ortogonalnost trigonometrijskih funkcija sinusa i kosinusa [18]. Dobiveni izrazi za koeficijente su prikazani u izrazima (3-6) i (3-7).

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \cos(nt) dt \quad (3-6)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \sin(nt) dt \quad (3-7)$$

U svrhu pronalaženja što efikasnijeg alata za rješavanje diferencijalnih jednadžbi, definiran je kompleksni oblik Fourierovog reda. Trigonometrijske funkcije sinus i kosinus se mogu raspisati pomoću Eulerovih formula na sljedeći način:

$$\sin(nt) = \frac{e^{jnt} - e^{-jnt}}{2}; \quad \cos(nt) = \frac{e^{jnt} + e^{-jnt}}{2} \quad (3-8)$$

Jednadžba (3-4) poprima sljedeći oblik:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left( a_n \frac{e^{jnt} + e^{-jnt}}{2} + b_n \frac{e^{jnt} - e^{-jnt}}{2j} \right) \quad (3-9)$$

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{a_n - jb_n}{2} e^{jnt} + \frac{a_n + jb_n}{2} e^{-jnt} \right) \quad (3-10)$$

Primjenjujući sljedeću supstituciju:

$$F[n] = \frac{a_n - jb_n}{2} \quad (3-11)$$

i svođenjem svih koeficijenata pod istu sumu, može se definirati inverzni izraz za vremenski kontinuiran Fourierov red:

$$f(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} F[n] e^{jn\omega_0 t} \quad (3-12)$$

Vremenski kontinuiran Fourierov red onda ima sljedeći izraz:

$$F[n] = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) e^{-jn\omega_0 t} dt \quad (3-13)$$

Vrijedi Parsevalov teorem (3-14) koji kaže da će ukupna energija funkcije ostati sačuvana pri prijelazu iz vremenske u frekventijsku domenu.

$$\frac{1}{T} \int_0^T |f(t)|^2 dt = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |F[n]|^2 \quad (3-14)$$

Prema Dirichletovim uvjetima, funkcija je potpuno integrabilna u svakom periodu.

### 3.1.2 Vremenski kontinuirana Fourierova transformacija (CTFT)

Fourierova transformacija (vremenski kontinuirana i diskretna) omogućava izračunavanje spektra aperiodičkih signala u frekventijskoj domeni. Za razliku od Fourierovog reda, spektar sada postaje kontinuiran, dok period teži u beskonačnost. Jednadžbe za ovu transformaciju se dobivaju iz Fourierovog reda:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)] \quad (3-15)$$

”DC komponenta”, odnosno član  $a_0$  sada ima vrijednost 0 jer je srednja vrijednost signala promatrana kroz beskonačnost sada jednaka nuli. Sumator za zbrajanje spektralnih komponenti se zamjenjuje s integralom jer spektar nije diskretan kao u prethodnoj transformaciji, nego postaje kontinuiran. Iz tog razloga, diskretne frekvencije  $n \cdot \omega_0$  sada postaju kontinuirane

frekvencije oblika  $\omega$ . Jednadžba (3-15) sada poprima oblik:

$$f(t) = \int_{\omega=0}^{\infty} (a_n \cos(\omega t) + b_n \sin(\omega t)) d\omega \quad (3-16)$$

Pošto je kompleksni oblik praktičniji za promatranje, izraz (3-16) je potrebno prebaciti u kompleksni oblik. Trigonometrijske funkcije sinus i kosinus se raspisuju pomoću Eulerovih formula kao u prethodnoj transformaciji te se dobiva sljedeća jednadžba:

$$f(t) = \int_{\omega=0}^{\infty} \left( \frac{a_n - jb_n}{2} e^{jt} + \frac{a_n + jb_n}{2} e^{-jt} \right) d\omega \quad (3-17)$$

Konačni i sređeni izraz za inverzni oblik vremenski kontinuirane Fourierove transformacije glasi:

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (3-18)$$

$F(\omega)$  je spektar signala, odnosno kontinuirana jačina harmonika kompleksne eksponencijale, te se može pisati u sljedećem obliku:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (3-19)$$

Zaključno, pomoću ove transformacije se dobiva kontinuiran aperiodičan spektar iz kontinuiranog aperiodičnog signala (iz vremenske domene). Dirichletovi uvjeti su slični uvjetima za CTFS, funkcija  $f(t)$  mora biti u potpunosti integrabilna, Parsevalov teorem o očuvanju energije i dalje vrijedi.

### 3.1.3 Vremenski diskretna Fourierova transformacija (DTFT)

U matematici, vremenski diskretna Fourierova transformacija je oblik Fourierove analize koji je primjenjiv na niz (sekvencu) diskretnih vrijednosti. Obično se koristi za analizu uzoraka kontinuirane periodičke funkcije u frekvencijskoj domeni. Izraz vremenski diskretna se odnosi na činjenicu da transformacija djeluje nad diskretnim podacima, često uzorcima čiji interval ima jedinicu vremena. Iz jednoliko raspoređenih uzoraka se dobiva funkcija frekvencije koja predstavlja periodično zbrajanje kontinuirane Fourierove transformacije originalne funkcije. Dakle, DTFT je sama po sebi frekvencijski kontinuirana funkcija, a diskretni uzorci se mogu lako računati pomoću diskretne Fourierove transformacije (DFT) koja je najčešće korištena metoda moderne Fourierove analize.

Vremenski diskretna Fourierova transformacija diskretnog skupa realnih i kompleksnih brojeva  $f[n]$  (za sve cijele brojeve  $n$ ) je Fourierov red koji stvara periodičku frekvencijsku funkciju. Jednadžba DTFT-a tada ima oblik:

$$F(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f[n] e^{-j\omega n} \quad (3-20)$$

Ovaj rezultat se dobiva ako DTFT proizlazi iz Fourierove transformacije  $f(t)$  sa Diracovom delta-funkcijom (3-21). Diracova delta-funkcija (funkcija u realnoj ravnini) čija je vrijednost u svim točkama jednaka nuli, osim u nuli kada iznosi beskonačno mnogo, definirana na način da je njen integral u realnoj ravnini jednak 1. Često se naziva funkcijom uzorkovanja.

$$\Delta_{\Delta t}(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \delta(t - i\Delta t) \quad (3-21)$$

Inverzni oblik DTFT-a ima sljedeći oblik:

$$f[n] = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} F(\omega) e^{j\omega n} d\omega \quad (3-22)$$

$X(f)$  je periodičan spektar i potrebno je razmotriti frekvencijski interval  $f_s$ . Obično se promatra interval  $[-f_s/2, f_s/2]$  jer je  $f_s/2$  Nyquistova frekvencija, maksimalna frekvencija izvornog signala  $x(t)$  koja se može dobiti kada se signal uzorkuje frekvencijom uzorkovanja  $f_s$ .

$$f_{Nyquist} = \frac{f_s}{2} \quad (3-23)$$

Zaključno, vremenski diskretna Fourierova transformacija proračunava spektar pri kontinuiranim frekvencijama na temelju podataka diskretnog vremena. Spektar tj. signal u Fourierovoj domeni je periodičan. DTFT stoga radi obrnuto od Fourierovog reda, koji stvara "Fourierove amplitude" na diskretnim frekvencijama koje odgovaraju periodičkom vremenskom signalu. Parsevalov teorem o očuvanju energije ima sljedeći oblik:

$$E = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |f[n]|^2 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} |F(\omega)|^2 d\omega \quad (3-24)$$

### 3.1.4 Vremenski diskretan Fourierov red (DTFS)

Vremenski diskretan Fourierov red se koristi za analizu uzoraka diskretnog periodičkog signala u frekvencijskoj domeni. Fourierov red za vremenski diskretne signale ima nekih sličnosti sa vremenski kontinuiranim signalima. Vremenski diskretni signal je izražen u uzorcima, osnovni period  $N$  se sastoji od frekvencijskih komponenti:

$$f = \frac{1}{N}, \frac{2}{N}, \dots, \frac{N-1}{N} \quad (3-25)$$

osim  $f = 0$  koja je DC komponenta, odnosno, srednja vrijednost signala iznosi nula. Inverzni oblik Fourierovog reda za vremenski diskretan periodičan signal je dan izrazom (3-26).

$$f[k] = \sum_{n=0}^{N-1} F[n] e^{j2\pi kn/N} \quad (3-26)$$

Vremenski diskretan Fourierov red, odnosno, povratak iz frekvencijske domene u vremensku domenu, ima sljedeći oblik (3-27):

$$F[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f[k] e^{-j2\pi kn/N} \quad (3-27)$$

Parsevalov teorem za vremenski diskretne signale osigurava dekompoziciju snage u frekvencijskoj domeni.

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |F[n]|^2 = \sum_{k=0}^{N-1} |f[k]|^2 \quad (3-28)$$

### 3.1.5 Diskretna Fourierova transformacija (DFT)

Iz opisa vremenski diskretne Fourierove transformacije (DTFT) se može vidjeti kako se diskretan signal iz vremenske domene transformira u kontinuiran signal u frekvencijskoj domeni. Treba napomenuti kako diskretni procesori signala poput računala ili mobitela uzimaju u obzir samo diskretne signale u frekvencijskoj domeni. Kontinuiran signal DTFT-a treba na neki način pretvoriti u diskretan signal. Za taj postupak se koristi algoritam diskretne Fourierove transformacije (DFT).

Diskretni procesori signala (ili digitalni procesori signala) ne mogu obrađivati frekvencijski kontinuiran signal iz razloga što se kontinuiranost odnosi na "beskonačnost" ( $\infty$ ). DTFT generira kontinuirani spektar koji sadrži beskonačan broj vrijednosti frekvencija u frekvencijskom rasponu od 0 do  $2\pi$ . Kako bi se takav kontinuirani spektar u frekvencijskoj domeni prilagodio diskretnim procesorima signala, cijeli raspon spektra  $[0, 2\pi]$  je uzorkovan u frekvencijskoj domeni na sljedeći način:

$$\omega = 2\pi \frac{f}{f_s} \quad (3-29)$$

Ako je ukupan broj frekvencijskih uzoraka jednak  $N$ , razmak između dva susjedna uzorka je  $2\pi/N$ . Zbog toga, koristit će se  $F(\omega)$  sa sljedećim vrijednostima  $\omega$ :

$$\omega = 0, \frac{2\pi}{N}, \frac{2\pi}{N} \cdot 2, \frac{2\pi}{N} \cdot 3, \dots, \frac{2\pi}{N} \cdot (N-1) \quad (3-30)$$

Jednadžba za DTFT ima oblik:

$$F(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f[n] e^{-j\omega n} \quad (3-31)$$

Uvođenjem supstitucije  $\omega = \frac{2\pi}{N}k$  za  $k = 0, 1, 2, \dots, (N-1)$  se dobiva izraz za DFT:

$$F[k] = \sum_{n=0}^{\infty} f[n] e^{-j\omega nk/N} \quad (3-32)$$

Inverzni oblik DFT-a poprima sljedeći oblik:

$$f[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{\infty} F[k] e^{j\omega nk/N} \quad (3-33)$$

Uvodeći supstituciju  $e^{-j2\pi/N} = W_N$  jednadžbe za DFT i inverz se mogu zapisati na drugačiji način, pogodan za pojednostavljivanje računanja.

$$F[k] = \sum_{n=0}^{\infty} f[n] W_N^{kn} \quad (3-34)$$

$$f[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{\infty} F[k] W_N^{-kn} \quad (3-35)$$

### 3.1.6 Brza Fourierova transformacija (FFT)

Brza Fourierova transformacija je skupina efikasnih postupaka za računanje diskretne Fourierove transformacije. Kod DFT-a, broj kompleksnih množenja za  $N$  točaka iznosi  $N^2$ . Korištenjem FFT algoritma, broj množenja je sljedeći:

$$m = (N/2) \log_2 N \quad (3-36)$$

Pri računanju DFT-a, javlja se problem izračuna niza  $f[n]$  od  $N$  kompleksnih brojeva koji su zadani nizom brojeva  $F[k]$  dužine  $N$ , te se stoga uvodi *twiddle* faktor  $W_N$  [23].

$$f[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{\infty} F[k] W_N^{-kn}, \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (3-37)$$

$$F[k] = \sum_{n=0}^{\infty} f[n] W_N^{kn}, \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (3-38)$$

Za niz kompleksnih brojeva, DFT se može napisati kroz sljedeće jednadžbe:

$$f_R[n] = \sum_{k=0}^{N-1} \left[ F_R[k] \cos \frac{2\pi kn}{N} + F_I[k] \sin \frac{2\pi kn}{N} \right] \quad (3-39)$$

$$f_I[n] = \sum_{k=0}^{N-1} \left[ F_R[k] \sin \frac{2\pi kn}{N} - F_I[k] \cos \frac{2\pi kn}{N} \right] \quad (3-40)$$

Direktno računanje  $f_R[n]$  i  $f_I[n]$  potražuje  $2N^2$  proračuna trigonometrijskih funkcija,  $4N^2$  realnih množenja,  $4N(N-1)$  realnih zbrajanja te određen broj adresnih i indeksnih operacija. Direktno izračunavanje diskretne Fourierove transformacije je neefikasno jer se ne koristi periodičnost i simetričnost kompleksne eksponencijale  $W_N$ .

### 3.1.7 Sažetak Fourierove analize kroz tablične prikaze

Prema prethodnim opisanim Fourierovim transformacijama, može se zaključno utvrditi sljedeće [21]:

1. Za vremenski kontinuirane signale, spektar je uvijek aperiodičan, izvršava se CTFS ili CTFT.
2. Za vremenski diskretne signale, spektar je uvijek periodičan, izvršava se DTFS ili DTFT.
3. Za periodične signale, spektar je uvijek diskretan, izvršava se Fourierov red (CTFS ili DTFS).
4. Za aperiodične signale, spektar je uvijek kontinuiran, izvršava se Fourierova transformacija (CTFT ili DTFT).

U tablici 3.1 se mogu vidjeti sve 4 transformacije i njihovi inverzi dok se u tablici 3.2 nalaze poveznice između vremenske i frekvencijske domene za svaki oblik transformacije.

**Tab. 3.1:** 4 oblika Fourierove transformacije

	Analiza	Sinteza
<b>CTFS</b>	$F[n] = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t)e^{-jn\omega_0 t} dt$	$f(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} F[n] e^{jn\omega_0 t}$
<b>CTFT</b>	$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt$	$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)e^{j\omega t} d\omega$
<b>DTFS</b>	$F[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f[k]e^{-j2\pi kn/N}$	$f[k] = \sum_{n=0}^{N-1} F[n]e^{j2\pi kn/N}$
<b>DTFT</b>	$F(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f[n]e^{-j\omega n}$	$f[n] = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} F(\omega)e^{j\omega n} d\omega$



**Tab. 3.2:** Poveznice između domena i vrsta signala

	Vremenska domena		Frekvencijska domena	
	Kontinuiran (K)/ Diskretan (D)	Periodičan (P)/ Aperiodičan (A)	Kontinuiran (K)/ Diskretan (D)	Periodičan (P)/ Aperiodičan (A)
<b>CTFS</b>	K	P	D	A
<b>CTFT</b>	K	A	K	A
<b>DTFS</b>	D	P	D	P
<b>DTFT</b>	D	A	K	P

### 3.2. Opis i primjena *MCSA* metode

Kroz godine su se razvile brojne metode za dijagnostiku kvarnih stanja od strane raznih istraživača, ali se *MCSA* pokazala kao najpouzdanija ([5, 16, 24–26]). Analiza strujnog otiska motora (eng. *Motor current signature analysis*) je dokazana kao visoko učinkovita metoda za analiziranje kvarova na elektromotorima. Ona je dio šireg područja analize električnog otiska (*Electrical Signature Analysis*), koja se osim za elektromotore, koristi i za generatore, transformatore i drugu električnu opremu. Najpoznatije od ovih metoda su: analiza strujnog otiska (*Current Signature Analysis*), analiza naponskog otiska (*Voltage Signature Analysis*), pristup proširenog Parkovog vektora (*Extended Park's Vector Approach*) i analiza otiska trenutne snage (*Instantaneous Power Signature Analysis*).

Ova metoda se počela razvijati sredinom 1980ih i kroz godine se etablirala u pronalaženju kvarova statorskog i rotorskog paketa, ležajeva i nepravilnosti zračnog raspóra. To je zapravo proces u kojem se očitavaju i snimaju statorske struje te analiziraju u frekvencijskoj domeni. Analiza rezultata se vrši pomoću brze Fourierove transformacije (*FFT*). Metoda se koristi tijekom rada stroja (*on – line*) bez prekidanja proizvodnje pod opterećenjem u normalnim pogonskim uvjetima. U današnje vrijeme, sve je veća primjena za motore velike snage u industriji. Iako se *MCSA* smatra jednom od najboljih metoda za dijagnostiku kvarova, ona ima nedostatke koji smanjuju preciznost i točnost dijagnoze. Kako bi se garantirano dobili pouzdani rezultati, potrebna je visoka točnost frekvencije klizanja, a razmak između dvije susjedne frekvencije u frekvencijskom spektru mora biti manji od frekvencije klizanja, struja statora mora biti promatrana u ustaljenom stanju. Promjene brzine vrtnje tijekom uzimanja uzoraka može dovesti do pogrešnog zaključka. Prema literaturi [24], motor prilikom ove metode mora biti opterećen teretom od barem 70% nazivnog momenta.

Pomoću ove metode i brze Fourierove transformacije, mogu se detektirati frekvencije na kojima se pojavljuju kvarovi vezani uz rotorski kavez (jedan ili više slomljenih štapova), kvarovi

ležajeva, statorskog namota i ekscentriteta zračnog raspora.

#### A) Detekcija kvarova ležajeva

Kvarna stanja ležajeva uobičajeno stvaraju visoku buku i vibracije koje se na spektru struje uočavaju na sljedećim frekvencijama [5, 25]:

$$f_l = |f_1 \pm m \cdot f_v| \quad (3-41)$$

$f_l$  - frekvencija harmonika uzrokovanih kvarom ležaja

$f_1$  - frekvencija mreže

$m$  - 1, 2, 3, 4...

$f_v$  - karakteristična frekvencija vibracija

Osim *MCSA* metode, detekcija kvara ležaja se može provjeriti koristeći se statističkom frekvencijskom metodom [27]. Eksperimentalno je pokazano kako su svi kvarovi ležaja ovom metodom ispravno klasificirani.

#### B) Detekcija kvarova namota statora

Kvarove statorskog namota je moguće uočiti spektralnom analizom. Ovi kvarovi se obično odnose na kvarove izolacije i potrebno ih je razlikovati od kvarova ostalih dijelova motora. Općenito, to su kratki spojevi između faza, između zavoja istih faza itd. Frekvencijske komponente koje se mogu uočiti u spektralnoj analizi su dane izrazom [28]:

$$f_{st} = f \left( k \pm \frac{n(1-s)}{p} \right) \quad (3-42)$$

$p$  - broj pari polova

$f$  - frekvencija mreže

$k$  - 1,3

$n$  - 1, 2, 3, ...,  $(2p-1)f$

$s$  - klizanje

Iako *MCSA* može detektirati ove frekvencijske komponente, može se dogoditi pojava ovih komponenti usred neravnoteže napona napajanja.

#### C) Detekcija kvarova kaveza rotora

Kada namotom rotora proteku struje, u rotoru se stvara rotorsko okretno magnetsko polje koje se u odnosu na rotor vrti brzinom  $s \cdot n_s$ . Ako je kavez rotora simetričan, onda u rotorskom okretnom magnetskom polju postoji samo direktna komponenta. Prilikom pucanja jednog ili više štapova, u kavezu rotora se pojavljuje osim direktne i inverzna komponenta koja rotira u smjeru suprotnom vrtnji rotora brzinom klizanja. Posljedica

ovog protjecanja je induciranje struje i napona u statoru na frekvenciji [29, 30]:

$$f_b = f(1 - 2s) \quad (3-43)$$

Oscilacije struje su nepoželjne za mrežu. Dodatne komponente struje koje se pojavljuju, na frekvenciji dvostrukog klizanja, uzrokuju pulsiranje momenta frekvencijom klizanja pomnoženom s dva ( $2 \cdot f$ ). Dolazi do oscilacija brzine koje smanjuju amplitudu frekvencijske komponente  $f(1 - 2s)$ , ali se zato pojavljuje i frekvencijska komponenta  $f(1 + 2s)$  [28]. Iz prethodno navedenog, dolazi se do zaključka da su slomljeni rotorski štapovi u spektralnoj analizi na sljedećoj frekvenciji:

$$f_b = f(1 \pm 2s) \quad (3-44)$$

gdje se niža bočna frekvencija  $f_b$  odnosi na puknute štapove dok je viša bočna frekvencija  $f_b$  posljedica oscilacija brzine vrtnje. U praksi se osim na osnovnim bočnim harmonicima pojavljuju i dodatne frekvencijske komponente te se jednadžba (3-44) može za stvarne slučajeve pisati u sljedećem obliku:

$$f_b = f(1 \pm 2ks), \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (3-45)$$

Visina bočnih harmonika ovisi o stupnju kvara, snazi stroja, terećenju i prijenosnom mehanizmu. Dodatni harmonici se mogu javiti zbog specifične građe kaveza, problema s izolacijom štapova te bi se pri analizi trebalo uzeti nabrojane faktore u obzir.

Osim navedenih bočnih harmonika, u spektralnoj analizi struja motora s oštećenim rotorom se mogu pojaviti sljedeće frekvencije [29, 31]:

$$f_b = f \left[ \left( \frac{k}{p} \right) (1 - s) \pm s \right], \quad k/p = 1, 3, 5 \dots \quad (3-46)$$

#### D) Detekcija ekscentriciteta zračnog raspora

Uzroci ekscentriciteta zračnog raspora su razni, neki od njih su nabrojani u poglavlju 2.2.4. Osim vibracija i buke, najgori mogući ishod je zapinjanje rotora o stator. Visok stupanj statičkog ekscentriciteta može uzrokovati dinamički ekscentricitet. Na mjestu gdje je zračni raspoređivanje manji, smanjen je magnetski otpor, a time su veće sile statora koje privlače rotor. Veće sile kroz neko vrijeme sve više smanjuju zračni raspoređivanje, a nakon izvjesnog vremena, može doći do zapinjanja rotora o stator. Spektralnom analizom strujnog otiska se mogu predvidjeti ovi problemi. U slučaju statičkog ekscentriciteta, mjesto minimalnog zračnog raspora je fiksirano u prostoru, dok za slučajeve dinamičkog ekscentriciteta pozicija minimalnog zračnog raspora nije fiksirana u prostoru nego rotira s rotorom. U stvarnosti, oba tipa ekscentriciteta se istovremeno pojavljuju na motoru (mješoviti ekscentricitet).

U [32, 33] je pokazano kako postoje specifične frekvencijske komponente tijekom ovakvog tipa kvarnog stanja u spektru struje statora. Izraz za dobivanje tih frekvencija je sljedeći:

$$f_{ec} = f \left[ (R \pm n_d) \left( \frac{1-s}{p} \pm n_{ws} \right) \right] \quad (3-47)$$

$f_{ec}$  - frekvencijske komponente koje su funkcija ekscentriciteta

$f$  - frekvencija mreže

$R$  - broj rotorskih utora

$n_d$  - 0 za statički, a 1 za dinamički ekscentricitet

$s$  - klizanje

$p$  - broja pari polova

$n_{ws}$  - 1, 3, 5, 7,... red harmonika koji su prisutni u spektru struje

U literaturi [34, 35] je pokazano kako samo određena kombinacija broja pari polova stroja i rotorskih utora može prikazati frekvencijske komponente samo statičkog ili samo dinamičkog ekscentriciteta. Ako statički, dinamički ili mješoviti ekscentricitet postoji, onda se pojavljuju nisko frekvencijske komponente blizu osnovnog harmonika [36, 37]:

$$f_{ecc} = |f \pm k f_{rot}|, \quad k = 1, 2, 3... \quad (3-48)$$

$f_{rot}$  - frekvencija rotacije

$f$  - frekvencija mreže

### 3.3. Algoritam za detekciju kvarnog stanja

Pod pojmom algoritam se podrazumijeva razrađen niz postupaka koji nakon određenog broja koraka dovodi do ostvarenja zadatka. U prethodnom poglavlju, prema literaturama, navedene su frekvencije pri kojima se mogu detektirati kvarovi vezani za stator, rotor, ležajeve i ekscentricitet. U ovom radu su simulirani kvarovi namota statora, namota rotora i ekscentricitet zračnog raspora te se može kreirati algoritam koji će pokazati kakvo kvarno stanje motor posjeduje. Na rezultate simulacija se primjenjuje diskretna Fourierova transformacija koja za računanje koristi brzu Fourierovu transformaciju (*FFT*). *DFT/FFT* algoritam u principu računa Fourierove koeficijente ponavljajućeg signala koristeći se Fourierovim redom. U ovom algoritmu, usporedbe između pojedinih slučajeva će biti analizirane prema energiji signala koja se može dobiti prema Parsevalovom teoremu koji govori o očuvanju energije pri prebacivanju iz vremenske u frekvencijsku domenu (i obrnuto) i može se napisati u sljedećem obliku za *DFT*:

$$E = \sum_{n=0}^{\infty} |f[n]|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{\infty} |F[k]|^2 \quad (3-49)$$

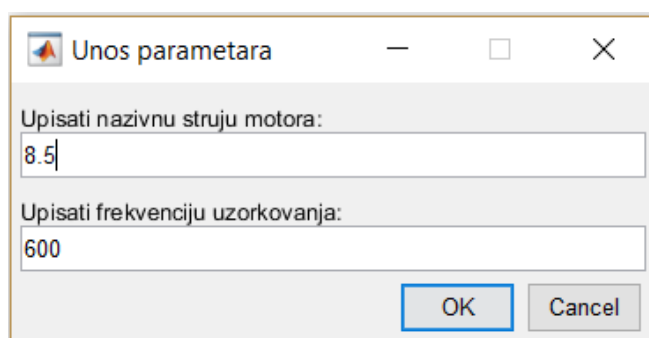
Algoritam za detekciju je rađen u programskom paketu *MATLAB* pomoću skripte. U skriptu se unose dokumenti *csv* formata pomoću naredbe *dload*, pri čemu je uzeto u obzir

da se numeričke vrijednosti pojavljuju od 2. retka (u prvom retku se obično nalaze nazivi pojedinih stupaca). Primjer korištenja naredbe za čitanje (*dlmread*) izgleda ovako:

```
X = dlmread ('Currents_puknut_prsten.csv',',',1,0);
```

Osim unosa dokumenta, za algoritam je potrebno unijeti nazivnu struju motora i frekvenciju uzorkovanja za daljnju obradu dokumenta. Za unos tih vrijednosti je napravljen prozor (moguće mijenjanje dimenzija i broja parametara ovisno o svrsi), a on se otvara pokretanjem skripte (*Run*). U prozoru su vrijednosti nazivne struje i frekvencije uzorkovanja postavljene na zadane vrijednosti (engl. *default values*) koje su korištene za potrebe analize simulacija u ovom radu. U slučaju unosa dokumenta s eksperimentalnim mjerenjima, potrebno je korigirati te vrijednosti u samom prozoru. Kod za kreiranje prozora (Sl. 3.1) u skripti je sljedeći:

```
prompt = 'Upisati nazivnu struju motora:','Upisati frekvenciju uzorkovanja:';  
title = 'Unos parametara';  
dims = [1.0 50];  
definput = '8.5','600';  
answer = inputdlg(prompt,title,dims,definput)
```



Sl. 3.1: Prozor za unos početnih vrijednosti

Vrijednosti iz prozora se pozivaju u algoritmu naredbom *str2num(answer1)* (broj 1 označava prvi parametar). Ako se prilikom pokretanja skripte prozor zatvori bez upisivanja parametara, u *Command Window*-u se pojavljuje pogreška i algoritam se ne izvršava. Upisivanjem frekvencije uzorkovanja se definiraju vrijednosti  $T = 1/F_s$  i Nyquistova frekvencija  $F_n = F_s/2$ , a pomoću naredbe *length* se dobiva broj uzoraka u stupcu unesenog dokumenta. Prije izvođenja brze Fourierove transformacije, pomoću naredbe *max* su pronađeni maksimumi u svakom stupcu koji će poslužiti za postavljanje uvjeta pri detekciji kvarova statorskog namota. Primjer traženja maksimuma u fazi A dokumenta je dan sljedećim primjerom:

```
N1=max(X(:,2));
```

Brza Fourierova transformacija je implementirana u *MATLAB*-u kroz naredbu *fft*. Izvršavanje transformacije nad stupcem (fazom) u kodu se vrši na isti način kao u primjeru traženja maksimuma, samo je *max* zamijenjen s *fft*. Rezultat te transformacije je sekvenca kompleksnih brojeva iz kojih se računa modul kompleksne snage koji se zatim kvadrira prema Parsevalovom teoremu. Kod za računanje energije cijelog spektra u frekvencijskoj domeni za fazu A je sljedeći:

```
F1=fft(X(:,2));
pow1=F1.*conj(F1);
Etot1=sum(pow1);
```

Na isti način se računa i energija cijelog spektra za ostale faze. Pošto se ovaj algoritam temelji na omjerima energija u određenim frekvencijskim rasponima, potrebno je u kodu računati energiju spektra u određenom rasponu frekvencija. Dio koda za računanje energije spektra oko osnovnog harmonika (između 44 i 56 Hz) je sljedećeg oblika:

```
df=Fs/L;
E1=2*sum(pow1(Fv >= 44 & Fv <= 56,:))*df;
```

Izračun snage spektra između 44 i 56 Hz se množi sa frekvencijskim inkrementom  $df$  kako bi se dobio izračun energije u frekvencijskoj domeni. Frekvencijski inkrement je omjer frekvencije uzorkovanja i ukupnog broja uzoraka.

Uz simulacije kvarnih stanja, rađen je i model u ispravnom stanju koji će poslužiti kao referentni model prema kojem se mogu postavljati uvjeti za kvarove u algoritmu. Kako su u poglavlju 3.2 opisane specifične frekvencijske komponente za pojedine kvarove, onda se prema njima može proučavati model ispravnog motora, odnosno energija u frekvencijskim opsezima u kojima se pojavljuju kvarovi za postavljanje referentnih uvjeta u algoritmu. Kod ispravnog motora se osim osnovnog harmonika ističu 3. i 5. harmonik.

Za slučajeve ekscentriciteta, pojavljuju se specifične frekvencije ( $f \pm f_{rot}$ ), jasno vidljive na frekvencijskim opsezima od (23-27) Hz i (73-77) Hz. Usporedbom energije za ispravan motor i motor s ekscentricitetom zračnog raspora u tim frekvencijskim rasponima s frekvencijskim rasponom oko osnovnog harmonika (44-56) Hz, može se iz omjera energija jasno razlučiti da se radi o slučaju ekscentriciteta zračnog raspona. Omjer energija se u kodu računa na sljedeći način:

```
E1=2*sum(pow1(Fv >= 44 & Fv <= 56,:))*df;
E2=2*sum(pow1(Fv >= 23 & Fv <= 27,:))*df;
omjer2 =(E2/E1)*100;
E3=2*sum(pow1(Fv >= 73 & Fv <= 77,:))*df;
omjer3 =(E3/E1)*100;
```

$E1$  predstavlja energiju spektra u frekvencijskom rasponu oko osnovnog harmonika (44-56) Hz,  $E2$  u rasponu (23-27) Hz, a  $E3$  u rasponu (73-77) Hz. Varijable  $omjer2$  i  $omjer3$  predstavljaju omjer energija spektara u rasponima frekvencija (23-27) Hz i (73-77) Hz u odnosu na (44-56) Hz, iskazanu u postocima. Za slučajeve ekscentriciteta zračnog raspora,  $omjer2$  i  $omjer3$  imaju vrijednosti preko 20 % za svaku vrstu ekscentriciteta (statički, dinamički ili mješoviti) pa se prema tome naredbom *if* kreira uvjet za ovo kvarno stanje. Rezultat algoritma za detekciju se ispisuje naredbom *disp* u *Command Windows*-u. Ukoliko je uvjet ispunjen, u *Command Windows*-u će se ispisati rezultat da postoji ekscentricitet zračnog raspora. Za sva ostala kvarna stanja i ispravan motor,  $omjer2$  i  $omjer3$  imaju vrijednosti manje od 2 %.

Za slučajeve slomljenih rotorskih štapova, pojavljuju se specifične frekvencije  $f(1 \pm 2s)$ . S povećanjem broja slomljenih štapova, raste i amplituda navedene frekvencije, a time i energija signala u tom području. Na osnovu toga, može se zaključiti da se u tom frekvencijskom rasponu energija signala povećava porastom broja slomljenih štapova te se usporedbom te energije s energijom signala oko osnovnog harmonika može zaključiti o postojanju 0, 1, 2 ili više slomljenih štapova. Za referentnu vrijednost je promatrana Fourierov spektar ispravnog motora. Omjer energija je u kodu napisan u sljedećem obliku:

$$E4=2*sum(pow1(Fv \ge 44 \& Fv \le 46,:))*df;$$

$$E5=2*sum(pow1(Fv \ge 53 \& Fv \le 55,:))*df;$$

$$omjer5=((E4+E5)/E1)*100;$$

Zbrojem energija  $E2$  i  $E3$  i dijeljenjem s enegijom oko osnovnog harmonika  $E1$ , može se zaključiti o postojanju slomljenih/prekinutih štapova. U tablici 3.3 se može vidjeti broj vrijednost varijable  $omjer5$  u odnosu na broj prekinutih štapova.

**Tab. 3.3:** Varijabla  $omjer5$  u odnosu na broj prekinutih štapova

Broj prekinutih štapova	$omjer5$ [%]
0	0.80
1	0.98
2	1.41
3	2.01

Na osnovu rezultata iz tablice, mogu se postaviti uvjeti u algoritmu za detekciju. Rezultat algoritma se ispisuje pomoću naredbe *disp* u *Command Windows*-u. Prema tome, motor nema puknutih štapova sve dok vrijednost omjera nije veći od 0.98 %.

Za slučajeve kratkog spoja, osim specifičnih frekvencija na kojima se može uočiti kvar, može se usporediti omjer energija cijelog signala između pojedinih faza. U svakom drugom kvarnom slučaju, omjer energija između faza se kreće od 85 do 115 %. Velikim odstupanjem od

toga, može se zaključiti o postojanju kratkog spoja. Kratki spoj između faza i između zavoja iste faze se može razlučiti promatranjem maksimuma struja svih faza. U kratkom spoju između faza, maksimum struje neke faze će imati vrijednost barem 3-4 puta veću od nazivne struje, dok će za kratke spojeve između zavoja iste faze ta struja biti očekivano tek nešto veća od nazivne struje. Omjer između energija pojedinih faza je u kodu računat na sljedeći način:

$$omjer31 = (E_{tot1}/E_{tot2}) * 100;$$

$$omjer32 = (E_{tot1}/E_{tot3}) * 100;$$

$$omjer33 = (E_{tot2}/E_{tot3}) * 100;$$

Ako motor nema kratkih spojeva na statoru, onda će vrijednosti omjera ( $omjer31$ ,  $omjer32$ ,  $omjer33$ ) biti između 85 i 115 %. U slučaju kratkog spoja, jedan od tih omjera će biti manji od 2 % ili puno veći od 500 %, ovisno o tome da li se dijeli manji broj s većim ili obrnuto.

Prekid faze se može detektirati već promatranjem maksimuma sve tri faze. U tom slučaju, jedna faza će imati maksimum nula. U nastavku rada će algoritam biti primijenjen na simulirane slučajeve, a u prilogu 2 se nalazi kod algoritma iz *MATLAB*-a.



## 4. MODELIRANJE METODOM KONAČNIH ELEMENATA

U ovom poglavlju će biti najprije opisana metoda konačnih elemenata koju programski paket *Ansys Maxwell* koristi pri analizi struktura. Zatim će biti prikazana priprema za izvođenje simulacija što se odnosi na definiranje svih parametara motora, a nakon toga način kreiranja 2D i 3D modela i rezultati njihovih simulacija, te analiza i primjena algoritma za detekciju na svaki pojedini slučaj.

### 4.1. Metoda konačnih elemenata

Metoda konačnih elemenata je jedna od najpoznatijih metoda za rješavanje parcijalnih diferencijalnih jednadžbi. Tom metodom se vrši analiza struktura, računanje temperaturnih polja, tokovi fluida itd. U čestim slučajevima, analizirana struktura ima složenu geometriju sastavljenu od dijelova različitih materijala te nije moguće naći rješenje u analitičkom obliku. Analitički oblik podrazumijeva rješavanje diferencijalnih i parcijalnih diferencijalnih jednadžbi i primjenjiv je za jednostavne probleme i geometrije. Međutim, za složene probleme je jako teško naći rješenja u analitičkom obliku te se zbog toga koriste numeričke metode, a najčešće korištena metoda je upravo metoda konačnih elemenata (MKE). Rješavanje metodom konačnih elemenata se svodi na rješavanje sustava algebarskih jednadžbi. Za svaki konačni element se postavljaju jednadžbe, a njihovom kombinacijom se dobivaju jednadžbe cijele strukture.

U današnje vrijeme, postoji mnogi računalni alati koji primjenjuju metodu konačnih elemenata pri računanju i analizi kinematičkih i dinamičkih karakteristika. Neki od tih programi su sljedeći: *NASTRAN*, *SAP*, *ANSYS MAXWELL*, *IDEAS*, *ALGOR* itd. Programi su se razvijali ovisno o području za koje su prvotno namijenjeni ili za univerzalnu primjenu (npr. statička ili dinamička analiza).

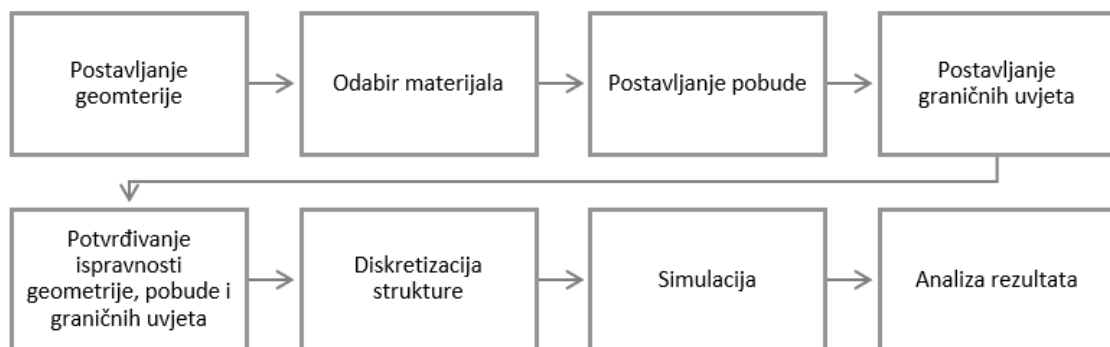
#### 4.1.1 *Ansys Maxwell* programski paket

*Ansys Maxwell* je simulacijski alat namijenjen za proračune elektromagnetskih polja metodom numeričke matematike. Baziran je na metodi konačnih elemenata (*Finite Element Method - FEM*). Program može obavljati simulacije za stacionarna i tranzijentna elektromagnetska polja. Osim samih proračuna, ovaj program, kao i ostali koji rade proračune elektromagnetskog polja i drugih fizikalnih polja, omogućuje modeliranje fizikalne stvarnosti uz što manje zanemarenja i aproksimacija. Zbog toga, ovakve vrste proračuna daju točnije matematičko modeliranje fizikalne stvarnosti nego proračuni bazirani na analitičkim izrazima. Sve češće se pojavljuje primjena ovog programa u industriji jer omogućuje detaljno ispitivanje proizvoda u virtualnom obliku, te u tom slučaju nije potrebno izrađivati brojne prototipove u fazi projektiranja proizvoda. Mogućnosti rada u programu su sljedeće:

- proučavanje elektromagnetizma
- modeliranje pomoću parametara

- simulacija
- optimizacija
- naknadna obrada

Problemi elektromagnetskih polja se rješavaju pomoću Maxwellovih jednažbi u konačnom području s odgovarajućim graničnim uvjetima i parametrima zadanim od strane korisnika. U 3D modelima, osnovna jedinica konačnog elementa je tetraedar. Prvi korak predstavlja modeliranje, a na slici 4.1 je prikazan tijek izvođenja radnji.



Sl. 4.1: Slijed koraka pri modeliranju i analizi strukture

Sljedeći koraci su sastavni dijelovi programa i obavljaju se automatski [38]:

### 1. korak: diskretizacija struktura i izbor vrste elemenata

Metoda konačnih elemenata se zasniva na fizičkoj diskretizaciji posmatrane strukture. Npr. rešetkasta struktura se diskretizira na linijske elemente, ploča se može podijeliti na površinske elemente oblika trokuta. Osnovu za analizu objekta predstavlja podstruktura koja se zove konačni element. Konačni element nije diferencijalno malih dimenzija nego ima konačne dimenzije zbog čega i nosi naziv konačni element. Elementi moraju biti dovoljno male veličine da daju upotrebljive rezultate, ali i dovoljno veliki da se izbjegnu problemi koji se mogu javiti kod modela s velikim brojem elemenata koji se rješavaju neadekvantnim računalima. Diskretizacija struktura se nekada vršila ručno, dok danas svi programi imaju automatsko generiranje mreže u predprocesorskom dijelu programa. Izbor elemenata koji se koristi zavisi od problema koji se rješava i od željene točnosti rezultata.

### 2. korak: izbor funkcije pomjeranja

Izbor funkcije pomjeranja se vrši za svaki element. Funkcija je definirana unutar elementa. Kao funkcije pomjeranja se koriste linearni, kvadratni i kubni polinomi. Razlog korištenja polinoma je jednostavnost rada i primjene u metodi konačnih elemenata. Za dvodimenzionalne objekte, nepoznate veličine su funkcije koordinata  $x$  i  $y$ . Funkcije su

odabrane na način da se pomoću metode konačnih elemenata može ostvariti kontinuitet pomjeranja unutar tijela, između svih elemenata u čvorovima, duž stranica i površina.

### 3. korak: definiranje relacije deformacija - pomjeranje i napon

Za svaki konačni element treba postaviti jednačbe. Ako je problem jednodimenzionalan, tj. postoji deformacija samo u jednom pravcu, npr. u  $y$  pravcu, tada je deformacija  $\epsilon_y$  i ona je povezana s pomjeranjem  $u$  u  $y$  pravcu. Veza pomjeranja i deformacija dana je izrazom:

$$\epsilon_y = \frac{du}{dy} \quad (4-1)$$

Jednačba (4-1) vrijedi za male deformacije. Između deformacija i napona postoje relacije koje se nazivaju konstitutivne relacije. Jedan od jednostavnijih je Hooke-ov zakon. U jednodimenzionalnom prostoru, veza deformacije i napona je sljedeća:

$$\sigma_y = E \cdot \epsilon_y \quad (4-2)$$

gdje je  $\sigma_y$  napon u  $y$  pravcu, a  $E$  modul elastičnosti. Nakon postavljanja prethodnih relacija, postavlja se matrica krutosti.

### 4. korak: matrica krutosti

Postoji više metoda za određivanje matrice krutosti:

#### a) Direktna metoda konačnih elemenata (*Direct FEM*)

Direktna metoda je pogodna za jednodimenzionalne probleme, ali se za višedimenzionalne probleme koriste druge metode. Matrica krutosti povezuje sile u čvorovima elemenata i pomjeranja čvorova elemenata. Dobije se iz ravnoteže sila za svaki promatrani element.

#### b) Varijabilna metoda konačnih elemenata (*Variational FEM*)

U slučaju analize problema mehanike čvrstog tijela, onda je ovaj princip isto što i princip minimuma potencijalne energije. Direktna metoda se može primijeniti na jednodimenzionalne probleme dok se varijabilna metoda može primijeniti i na elemente složenog oblika.

#### c) Metoda težinskih reziduala (*Methods of weighted residuals*)

Ova metoda se zasniva na diferencijalnim jednačbama promatranog modela. Od svih metoda, najčešće korišten je Galerkinov model. Na osnovu ponašanja reziduala, dobiju se jednačbe koje opisuju ponašanje elemenata. Matrični zapis ima sljedeći

oblik:

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \dots \\ f_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & \dots & k_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{n1} & k_{n2} & k_{n3} & \dots & k_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \dots \\ dn \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

$$\{f\} = [k]\{d\} \quad (4-4)$$

$\{f\}$  - vektor sila u čvorovima

$[k]$  - vektor pomjeranja

$\{d\}$  - matrica krutosti

#### d) Metoda energetske ravnoteže (*Energy balance FEM*)

Zasnivaju se na ravnoteži različitih vrsta energije. Primjena im je u termodinamici i termostatičkoj analizi.

### 5. korak: računanje globalne matrice krutosti

Matrica krutosti i jednačbe pojedinih konačnih elemenata se dobiju primjenom nekom od metoda iz prethodnog koraka. Primjenom direktne metode i superpozicije, dobiva se globalna ili ukupna matrica krutosti strukture. Osnovni zahtjev je kontinuitet ili kompatibilnost koja zahtijeva cjelovitost strukture, struktura ni u jednom dijelu ne smije biti prekinuta. Globalna jednačba strukture u matricnoj formi je sljedeća:

$$\{F\} = [K]\{d\} \quad (4-5)$$

gdje je  $\{F\}$  vektor sila u globalnom koordinatnom sustavu,  $[K]$  globalna matrica krutosti, a  $\{d\}$  vektor poznatih i nepoznatih pomjeranja svih čvorova strukture.

### 6. korak: Određivanje pomjeranja cijele strukture

Matrična jednačba strukture u koju su uneseni granični uvjeti predstavlja spregnuti sustav algebarskih jednačbi. Jednačbe se mogu riješiti Gaussovom metodom eliminacije ili primjenom nekog iterativnog postupka.

### 7. korak: računanje napona i deformacije

Deformacije i naponi su nepoznate veličine koje se određuju u strukturalnoj analizi. Pomjeranja se računaju u koraku 6, a nakon toga se korištenjem veze između deformacije i napona izračunavaju deformacije i naponi.

## 8. korak: interpretacija rezultata

Rezultati dobiveni metodom konačnih elemenata se analiziraju i interpretiraju. Zaključak analize se svodi na određivanje točnog djelovanja najvećih napona i deformacija.

### 4.2. Priprema za izvođenje simulacija

Pomoću programa, na osnovu podataka o motoru, može se izraditi 2D model, a zatim i 3D model asinkronog motora. Dimenzije statora i rotora motora koji će biti analiziran, su dobivene od proizvođača, a nazivni podaci su pronađeni u službenom katalogu proizvođača. Nazivni podaci su prikazani u tablici 4.1, a dobiveni konstrukcijski podaci u tablici 4.2

**Tab. 4.1:** *Nazivni podaci motora*

Podatak	Vrijednost
Proizvođač	Končar
Tip motora	5AZ 112 M-4 B3
Broj faza	3
Frekvencija[Hz]	50
Nazivna snaga [kW]	4
Nazivna struja [A]	8.5
Nazivna brzina [o/min]	1435
Nazivni moment [Mn]	27
$\cos \phi$	0.8
Korisnost [%]	84.5

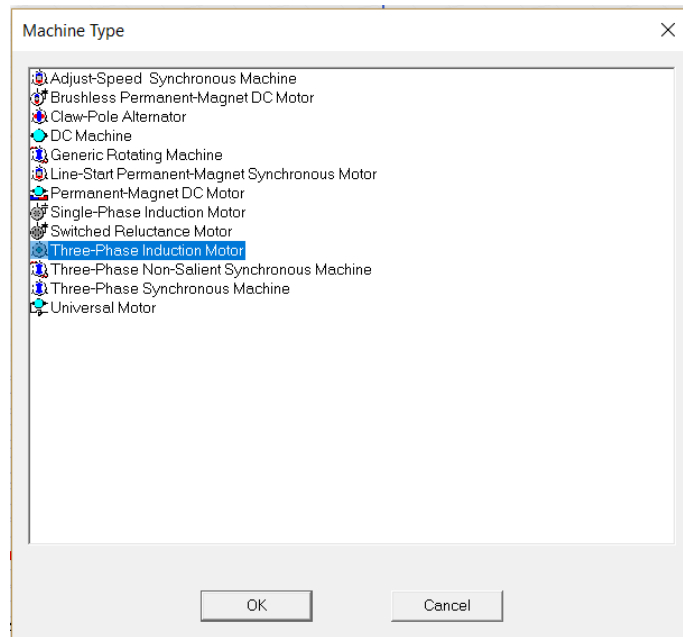
**Tab. 4.2:** *Konstruktivski podaci motora*

Podatak	Vrijednost
Unutarnji promjer statora [mm]	103
Vanjski promjer statora [mm]	170
Duljina statora [mm]	140
Broj utora statora	36
Promjer vodiča [mm]	3 x 0.56
Broj zavoja po utoru	46
Fazni otpor [ $\Omega$ ]	3.30
Istaci [mm]	40
Korak	1-10
Promjer rotora [mm]	102.3
Visina vodiča rotora [mm]	17.25
Broj utora rotora	28
Skošenje rotora	1/36
Kratkospojni prsten [mm]	22 x 11
Debljina limova [mm]	0.5
Materijal izrade	čelik DL80

*Ansys Maxwell* program sadrži *Rotational Machine Expert*, alat koji služi za projektiranje, simuliranje i analizu strojeva, te sadrži različite vrste strojeva:

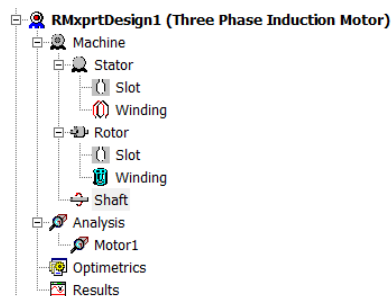
- istosmjerni motor s permanentnim magnetima bez četkica,
- istosmjerni motor s permanentnim magnetima,
- sinkroni motori i generatori s permanentnim magnetima,
- trofazni i jednofazni asinkroni motori,
- opći rotacijski strojevi,
- reluktantni motori,
- alternatori,
- univerzalni strojevi.

Postavljanje simulacije motora započinje odabirom *RMxpert* modula, u ovom slučaju je to trofazni asinkroni motor. Mogućnosti odabira stroja se nalaze na slici 4.2.



Sl. 4.2: Odabir stroja

Nakon odabira stroja, otvara se izbornik u koji se unose parametri stroja (podaci s nazivne pločice), dimenzije aktivnih dijelova, materijali pojedinih dijelova itd. Na slici 4.3 se nalazi izgled izbornika.



Sl. 4.3: Izbornik

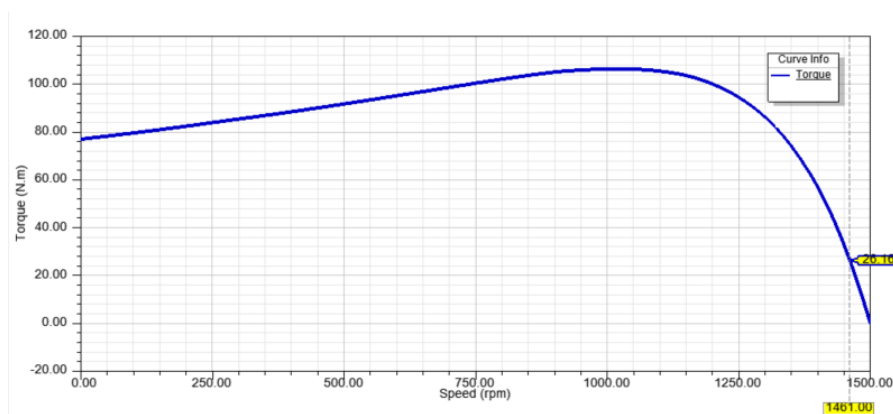
Redom se definiraju stator, rotor, osovina i postavke simulacije. Za stator je potrebno unijeti dimenzije, broj utora, materijal izrade, skošenje, debljinu magnetskih limova, oblik utora itd. Za oblik utora se mogu koristiti već izrađeni oblici za koje se mogu unijeti dimenzije, a može se i nacrtati utor po željenim veličinama. U ovom slučaju, korišten je već gotovi oblik jer jako slični utoru motora korištenog za simulacije. Uspoređujući stvarnu površinu utora (dobivenu od proizvođača) i dobivenu s gotovim utorom, može se izračunati relativna pogreška manja od 0.5 %. Osim dimenzija, definira se i namot statora kojeg čini 46 vodiča po utoru i promjer vodiča. Ako korisnik programa ne poznaje neki od traženih podataka motora, odabire se 0 pri čemu program sam optimizira parametar i postavlja vrijednost. Rotorski paket se odabire na isti način, uz odabir tipa, materijala i dimenzija rotorskog kaveza kao namota rotora. Prije analize, još se definira način spajanja motora (trokut ili zvijezda) te radna temperatura stroja. Do rezultata analize ovakve vrste simulacije se dolazi relativno brzo iz razloga što *RMxpert* modul ne koristi metodu konačnih elemenata nego analitičke izraze koji opisuju rad stroja. Iz

ovakvog modula se mogu kreirati 2D i 3D modeli za čije strukture se koristi metoda konačnih elemenata čiji je osnovni element tetraedar. Dobiveni rezultati imaju manja odstupanja od podataka s nazivne pločice motora (Tab. 4.1). Takvi rezultati su posljedica nedostatka pojedinih traženih parametara i korištenje analitičke metode uz manja zanemarenja pojedinih gubitaka. Usporedba podataka s nazivne pločice i rezultata simulacije se može vidjeti u tablici 4.3.

**Tab. 4.3:** *Usporedba rezultata*

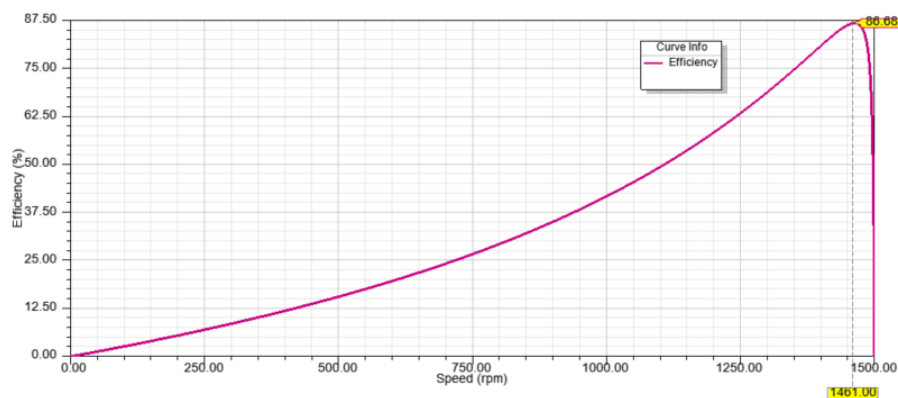
Podatak	Nazivna vrijednost	Rezultat simulacije	Relativna pogreška
$I_n$ [A]	8.50	8.53	0.35%
$\omega_n$ [o/min]	1435.00	1461.03	1.8%
$\cos\phi$	0.80	0.77408	3.29%
$\eta$	0.8450	0.8668	2.55%
$P_n$ [kW]	4.00	3.9998	0.005%
$J$ [kgm <sup>-2</sup> ]	0.0121970	0.0117415	3.08%
$M_n$ [Nm]	27.00	26.14	3.22%

Osim rezultata, mogu se vidjeti ovisnosti pojedinih veličina. Na slici 4.4 se nalazi graf ovisnosti momenta o brzini vrtnje. Na slici 4.5 je prikazana ovisnost korisnosti o brzini vrtnje. U trenutku kada motor doseže nazivnu brzinu, stroj ima najveću efikasnost, a nakon nazivne brzine dolazi do naglog pada.



**Sl. 4.4:** *Ovisnost momenta o brzini vrtnje*





Sl. 4.5: Ovisnost korisnosti o brzini vrtnje

### 4.3. Analiza i detekcija simuliranih kvarova

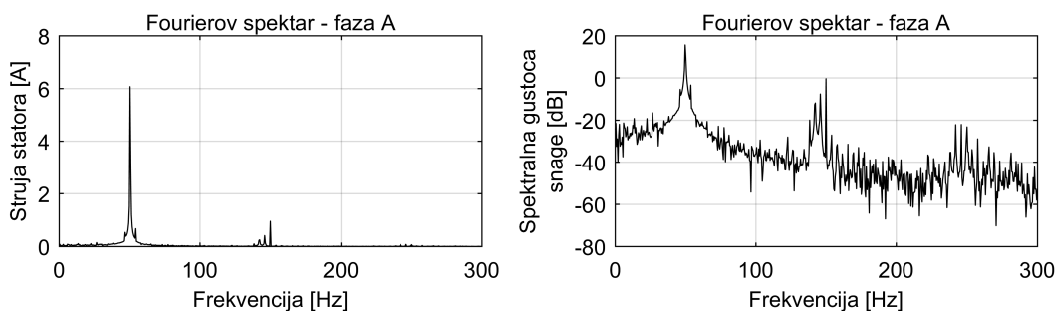
U prethodnom poglavlju napravljena je usporedba rezultata dobivenih simulacijom analitičkom metodom i nazivnih podataka motora. Pokazano je kako relativna pogreška za svaki parametar manja od 5%, stoga se može započeti sa 2D i 3D simulacijama. Kako bi se napravila simulacija kvarnih stanja motora, potrebno je izraditi modele za svaki pojedini slučaj. Simulacije ekscentriciteta zračnog raspora su napravljene u 2D modelu zbog tehničkih nemogućnosti. Prilikom kreiranja modela sa slučajem ekscentriciteta, program stvara potpuni 3D model, a za potpunu analizu takvog modela bi bilo potrebno više stotina sati. Za simulaciju svakog kvarnog stanja osim ekscentriciteta, program kreira polovicu 3D modela, te je time omogućena lakša analiza jer se promatra samo pola modela. Za 2D modele su napravljene sljedeće simulacije kvarnih stanja motora:

- statički ekscentricitet,
- dinamički ekscentricitet,
- statički i dinamički ekscentricitet istodobno (mješoviti ekscentricitet).

Za 3D modele su napravljene simulacije sljedećih kvarova motora:

- prekinut 1 štap rotorskog kaveza,
- prekinuta 2 štapa rotorskog kaveza,
- prekinuta 3 štapa rotorskog kaveza,
- puknut kratkospojni prsten rotorskog kaveza,
- prekid 1 faze,
- kratki spoj između 2 faze,
- kratki spoj između utora iste faze.

Osim kvarnih stanja, napravljena je i simulacija modela motora u ispravnom stanju radi usporedbe rezultata i izrade algoritma. Na rezultatima je primijenjena brza Fourierova transformacija (*MATLAB* kod u prilogu 1), ali je spektar signala prebačen u logaritamski prikaz (množenjem vrijednosti signala struja iz vremenske domene s  $20\log$ ), koji daje jasniji i pogodniji oblik pri kojem su vrijednosti pojedinih harmonika iskazane u dB. Usporedba između dekadskog i logaritamskog prikaza se može vidjeti na slici 4.6.



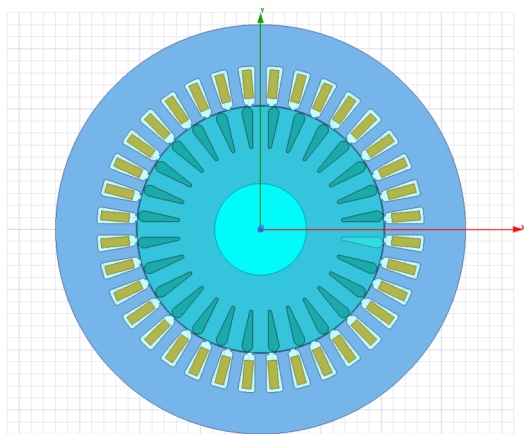
Sl. 4.6: Usporedba između grafova

#### 4.4. 2D modeli

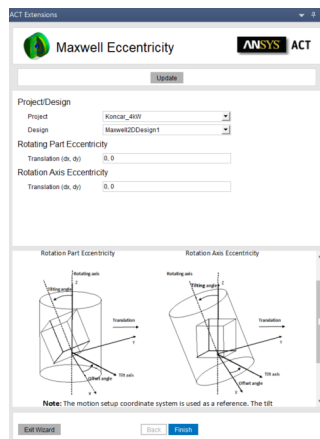
Kao što je prethodno navedeno, 2D modeli će poslužiti za simulaciju ekscentriciteta zračnog raspora. Prednost *RMxprt* modula je što sadrži dodatak, tkz. čarobnjak za izradu slučajeva ekscentriciteta (*Maxwell Eccentricity Wizard*). Postavljanje modela se izvršava sljedećim redom:

1. Kliknuti na *Design Setting*, otvoriti karticu *User Defined Data*, upisati *Eccentricity* 1.
2. Stvoriti 2D model (*RMxprt* > *Analysis Setup* > *Create Maxwell Design*).
3. Odabrati za tip modela 2D.
4. *View* > *Extensions* za otvaranje dodatka, tkz. čarobnjaka.
5. Odabrati *Maxwell Eccentricity* za otvaranje izbornika u koji se unose vrijednosti.
6. Odabrati projekt i model koji se želi koristiti.

Na slici 4.7a se nalazi stvoreni 2D model čija osnova se koristi za dobivanje modela sa statičkim, dinamičkim i mješovitim ekscentricitetom. Izbornik u koji se unose vrijednosti za pojedini model se nalazi na slici 4.7b.



(a) 2D model elektromotora



(b) Izbornik

Sl. 4.7: 2D model elektromotora - lijevo, izbornik - desno

Koristeći izbornik i priručnik za uporabu programa, kvarna stanja se mogu podesiti na sljedeći način:

- **Statički ekscentricitet:** Potrebno je postaviti *Rotating Part Eccentricity* i *Rotating Axis Eccentricity* na iste vrijednosti.
- **Dinamički ekscentricitet:** Potrebno je postaviti vrijednosti samo za *Rotating Part Eccentricity*.
- **Mješoviti ekscentricitet:** Potrebno je postaviti *Rotating Part Eccentricity* i *Rotating Axis Eccentricity* na različite vrijednosti.

Širina zračnog raspora motora koji se simulira iznosi 0.35 mm, a u tablici 4.4 se mogu vidjeti unesene vrijednosti za sve slučajeve.

Tab. 4.4: Postavljanje vrijednosti

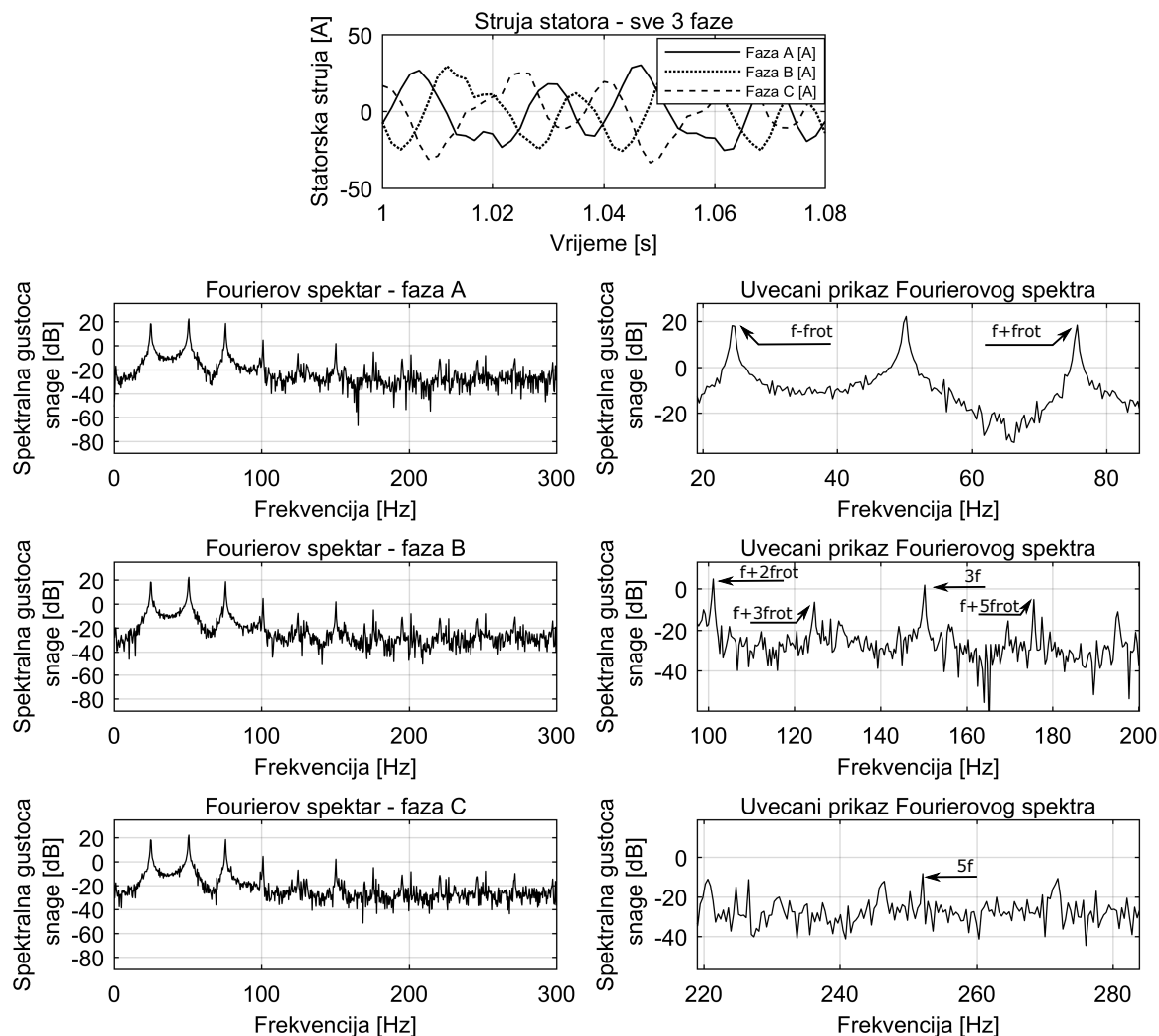
	Ekscentricitet rotora ( <i>Rotating Part Eccentricity</i> ) ( $\Delta x$ [mm], $\Delta y$ [mm])	Ekscentricitet osi rotacije ( <i>Rotating Axis Eccentricity</i> ) ( $\Delta x$ [mm], $\Delta y$ [mm])
Statički ekscentricitet	0.12, 0	0.12, 0
Dinamički ekscentricitet	0.16, 0	0, 0
Mješoviti ekscentricitet	0.08, 0	0.11, 0

Prije provjere geometrije i izvođenja simulacije, modelira se teret, određuje mreženje, postavljaju vrtložne struje te vrijeme simulacije i vremenski korak. Teret je postavljen tako da bude jednak nazivnom momentu, ali sa predznakom minus. Pošto se radi o 2D simulaciji, vrijeme trajanja simulacije je znatno kraće od izvođenja 3D simulacije, stoga je postavljena

najveća moguća kvaliteta mreženja. Kako bi imali što manja zanemarenja, u rotorske štapove se postavljaju vrtložne struje.

#### 4.4.1 Statički ekscentricitet zračnog raspora

Statički ekscentricitet se stvara prema prethodno navedenim uputama. Razina ove vrste ekscentriciteta se ne mijenja tijekom rada ako je rotor dobro pričvršćen i zbog toga je manje opasan od dinamičkog ekscentriciteta.



Sl. 4.8: Statički ekscentricitet - sve 3 faze i karakteristične frekvencije

Proučavajući rezultate dobivene u *MATLAB*-u, dobivene brzom Fourierovom transformacijom, odmah se mogu uočiti karakteristične frekvencije kvarova koje se pojavljuju u slučajevima ekscentriciteta prema literaturama [36, 37]. Na slici 4.8 su te frekvencije označene sa  $f \pm f_{rot}$  čija amplituda doseže skoro vrijednost osnovnog harmonika. Osim tih izrazitih harmonika, mogu se uočiti frekvencijske komponente na  $f + 2f_{rot}$ ,  $f + 3f_{rot}$  itd., dakle, svakih 25 Hz. Prema tim

saznanjima, kreirani su uvjeti za ekscentricitet u algoritmu za detekciju. Pošto se algoritam bazira na omjerima energija, u ovom slučaju, energija signala u frekventijskom rasponu od (23-27) Hz i (73-77) Hz doseže do (30-60) % energije u području osnovnog harmonika (44-56) Hz. Za sve ostale slučajeve (kratki spojevi namota, oštećenje rotorskog kaveza, prekid faze), taj postotak je manji od 2 %. U tablici 4.5 se nalaze omjeri energija za sve tri faze.

**Tab. 4.5:** *Omjeri energija za provjeru ekscentriciteta - statički ekscentricitet*

	Fourierov spektar faza A	Fourierov spektar faza B	Fourierov spektar faza C
Energija spektra (E1) raspon (44-56) Hz	1.5593e+08 J	1.5711e+08 J	1.5644e+08 J
Energija spektra (E2) raspon (23-27) Hz	7.8258e+07 J	7.8748e+07 J	7.7582e+07 J
Energija spektra (E3) raspon (73-77) Hz	5.0029e+07 J	5.1009e+07 J	5.0164e+07 J
(E2/E1)*100 [%]	50.19	50.12	49.59
(E3/E1)*100 [%]	32.08	32.47	32.07

Iako se frekvencije specifične za ekscentricitet pojavljuju svakih 25 Hz, nakon 200 Hz su te frekvencije manje primjetne. Na grafu struje u vremenskoj domeni se može primijetiti da struje nisu sinusnog oblika. Amplitude struja dosežu vrijednosti od 35.93 A, 35.95 A i 35.56 A redom po fazama A, B i C. U algoritmu za detekciju su navedeni uvjeti za postojanje puknutih štapova rotorskog kaveza i kratkog spoja na namotu statora te se i u ovom slučaju može provjeriti vjerodostojnost tih uvjeta. U tablici 4.6 se nalazi omjeri energija spektara za provjeru puknutih štapova. U algoritmu za detekciju je definirano da omjer mora biti barem 0.98 % kako bi se došlo do zaključka da motor ima puknut 1 štap kaveza, u ovom slučaju taj je omjer najveći u fazi C s iznosom 0.4 %, što pokazuje da nema kvarova na kavez u rotora.

**Tab. 4.6:** *Omjeri energija za provjeru puknutih štapova - statički ekscentricitet*

	Fourierov spektar faza A	Fourierov spektar faza B	Fourierov spektar faza C
Energija spektra (E1) raspon (44-56) Hz	1.5593e+08 J	1.5711e+08 J	1.5644e+08 J
Energija spektra (E4) raspon (44-46) Hz	3.4369e+05 J	3.1083e+05 J	3.7065e+05 J
Energija spektra (E5) raspon (53-55) Hz	8.6012e+04 J	2.1230e+05 J	2.5059e+05 J
((E4+E5)/E1)*100 [%]	0.28	0.33	0.40

U tablici 4.7 se nalaze omjeri energija cijelih spektara između faza. Prema algoritmu, ako se vrijednost omjera u postocima kreće između 85 i 115 %, onda se može potvrditi da motor nema kratki spoj na statoru, kao u ovom slučaju.

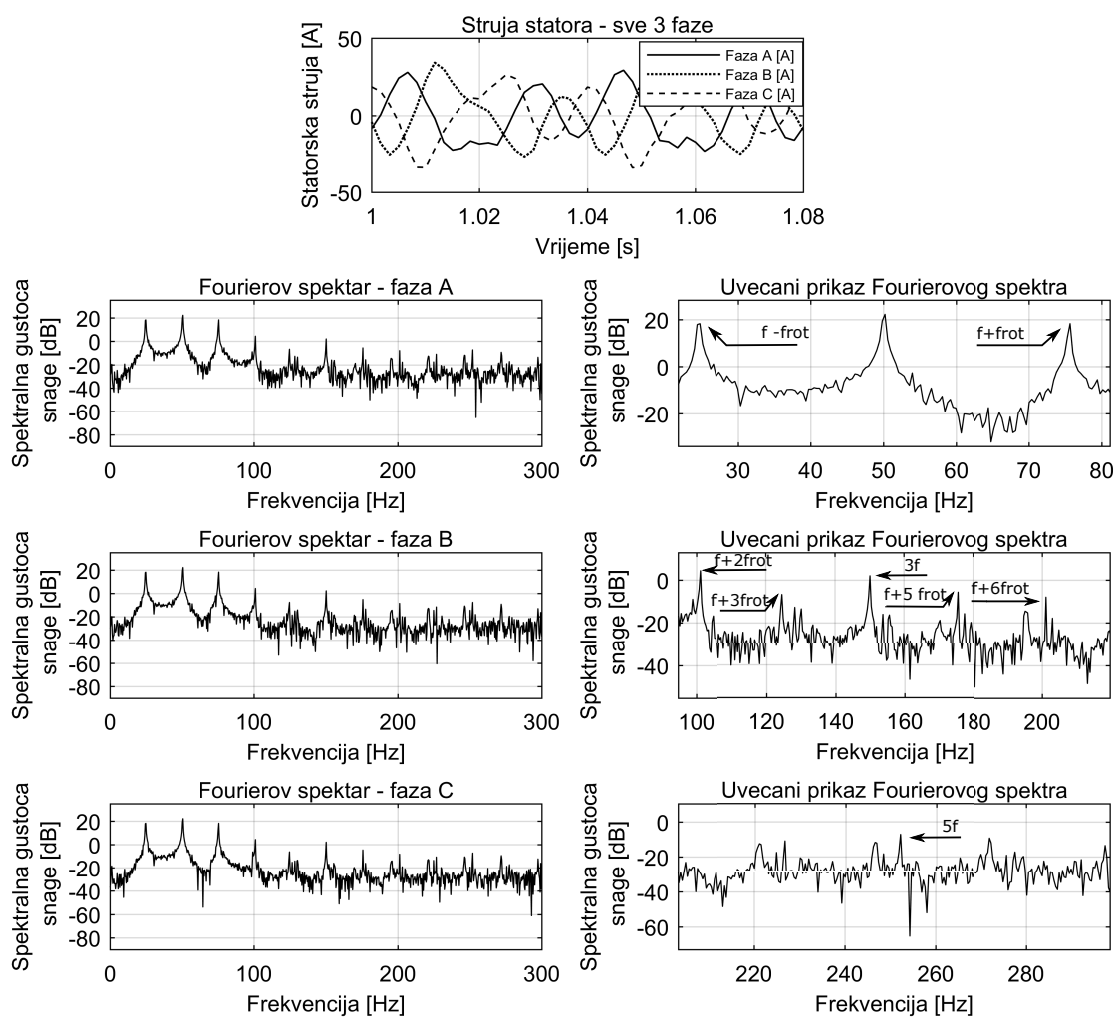
Tab. 4.7: Omjeri energija za provjeru kratkog spoja - statički ekscentricitet

	omjer	vrijednost [%]
$\frac{E6}{E7} \cdot 100$	$\frac{8.3099e+08}{8.3799e+08} \cdot 100$	99.17
$\frac{E6}{E8} \cdot 100$	$\frac{8.3099e+08}{8.3150e+08} \cdot 100$	99.94
$\frac{E7}{E8} \cdot 100$	$\frac{8.3799e+08}{8.3150e+08} \cdot 100$	100.78

E6 - energija spektra faze A, E7 - energija spektra faze B, E8 - energija spektra faze C

#### 4.4.2 Dinamički ekscentricitet zračnog raspora

Dinamički ekscentricitet uglavnom proizlazi iz postojanja statičkog ekscentriciteta. U tom slučaju, razina minimalnog zračnog raspora se mijenja vrtnjom rotora.



Sl. 4.9: Dinamički ekscentricitet - sve 3 faze i karakteristične frekvencije

Kao i u slučaju statičkog ekscentriciteta, uočavaju se karakteristične frekvencije kvarova koje su označene na slici 4.9 sa  $f \pm f_{rot}$  i njihovim višekratnicima. Pošto nema neke vidljive razlike na karakterističnim frekvencijama u odnosu na statički ekscentricitet, može se zaključiti da se ne može točno odrediti o kojoj vrsti ekscentriciteta se radi ako se promatra frekvenzijski raspon od 0 Hz do 300 Hz. Algoritmom se na isti način može pokazati da se radi o pojavi ekscentriciteta, ali ne i o kojoj vrsti ekscentriciteta se radi. U tablici 4.8 se mogu vidjeti rezultati omjera koji potvrđuju uvjet za postojanje ekscentriciteta u algoritmu. Omjeri  $(E2/E1)*100$  i  $(E3/E1)*100$  moraju biti veći od 20 %, što je i potvrđeno u tablici.

**Tab. 4.8:** *Omjeri energija za provjeru ekscentriciteta - dinamički ekscentricitet*

	Fourierov spektar faza A	Fourierov spektar faza B	Fourierov spektar faza C
Energija spektra (E1) raspon (44-56) Hz	1.5669e+08 J	1.5697e+08 J	1.5592e+08 J
Energija spektra (E2) raspon (23-27) Hz	7.9051e+07 J	7.7711e+07 J	7.8317e+07 J
Energija spektra (E3) raspon (73-77) Hz	5.1118e+07 J	5.0668e+07 J	5.0153e+07 J
$(E2/E1)*100$ [%]	50.45	49.510	50.23
$(E3/E1)*100$ [%]	32.62	32.28	32.17

U tablici 4.9 se mogu vidjeti omjeri energija spektara u određenim frekvenzijskim rasponima opisanim u poglavlju 3.3. Za postojanje barem jednom puknutog štapa, jedan od omjera iz tablice mora biti veći od 0.98 %, što ovdje nije slučaj.

**Tab. 4.9:** *Omjeri energija za provjeru puknutih štapova - dinamički ekscentricitet*

	Fourierov spektar faza A	Fourierov spektar faza B	Fourierov spektar faza C
Energija spektra (E1) raspon (44-56) Hz	1.5670e+08 J	1.5697e+08 J	1.5592e+08 J
Energija spektra (E4) raspon (44-46) Hz	2.9069e+05 J	2.6235e+05 J	2.8687e+05 J
Energija spektra (E5) raspon (53-55) Hz	1.4208e+05 J	1.2743e+05 J	1.8195e+05 J
$((E4+E5)/E1)*100$ [%]	0.28	0.25	0.30

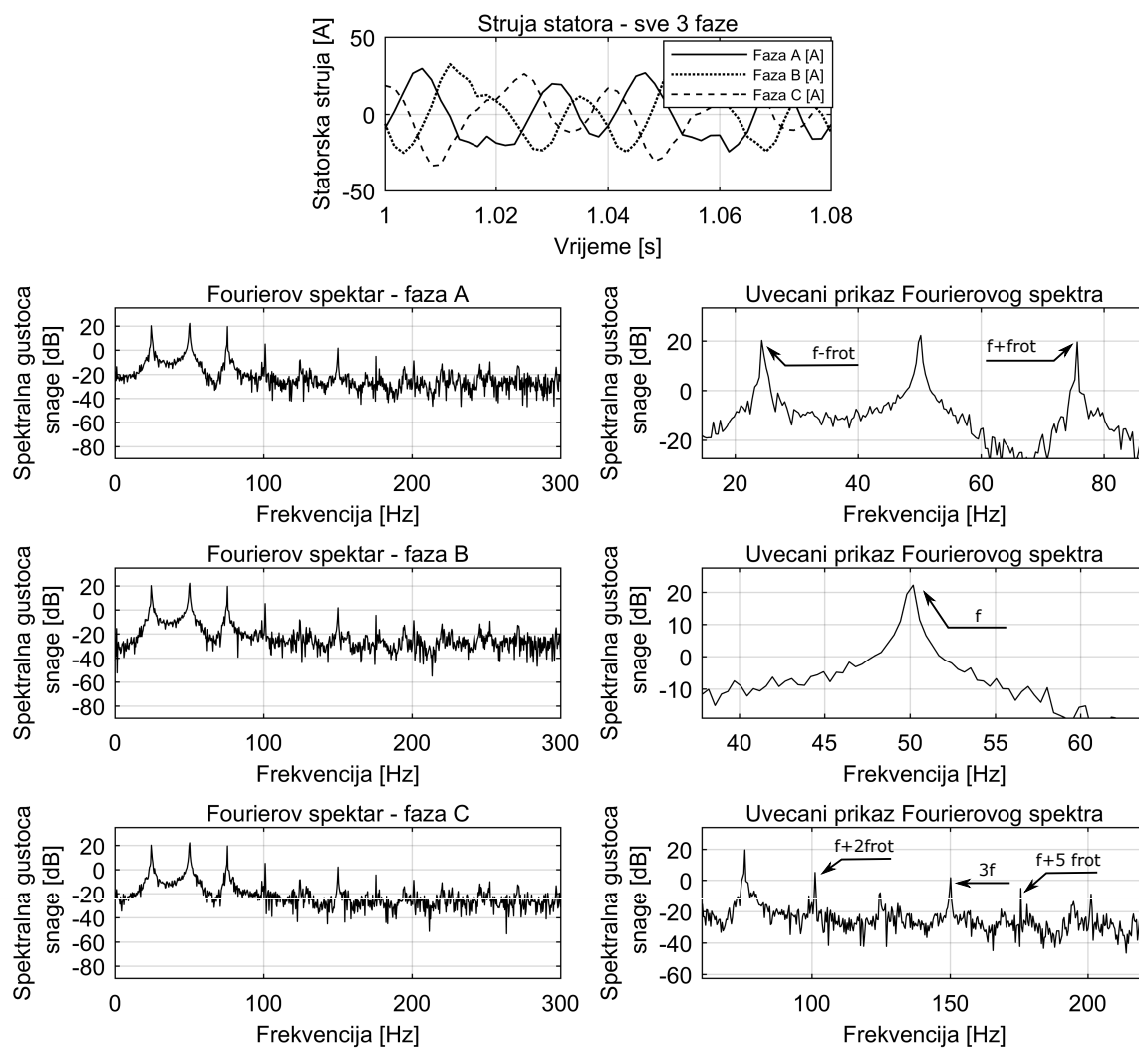
U tablici 4.10 se nalaze omjeri energija cijelih spektara između faza. Prema uvjetima iz algoritma, ovdje je pokazano kako motor nema kratki spoj na statoru. E6 predstavlja energiju spektra faze A, E7 energiju spektra faze B, a E8 energiju spektra faze C.

Tab. 4.10: Omjeri energija za provjeru kratkog spoja - dinamički ekscentricitet

	omjer	vrijednost [%]
$\frac{E6}{E7} \cdot 100$	$\frac{8.3777e+08}{8.32797e+08} \cdot 100$	100.60
$\frac{E6}{E8} \cdot 100$	$\frac{8.37779e+08}{8.3047e+08} \cdot 100$	100.88
$\frac{E7}{E8} \cdot 100$	$\frac{8.32797e+08}{8.30471e+08} \cdot 100$	100.28

#### 4.4.3 Mješoviti ekscentricitet zračnog raspora

Mješoviti ekscentricitet (kombinacija statičkog i dinamičkog ekscentriciteta) se u praksi najčešće pojavljuje. Pozicija minimalnog zračnog raspora se mijenja s položajem rotora, ali je rotor bliže pomaknut statoru na jednom mjestu.



Sl. 4.10: Mješoviti ekscentricitet - sve 3 faze i karakteristične frekvencije



Na slici 4.10 se uočava pojava karakterističnih frekvencija kao i u prethodna dva slučaja te se ne može razlučiti jasna razlika između mješovitog ekscentriciteta i ostalih slučajeva ekscentriciteta. Na osnovu omjera energija, može se doći do zaključka da ekscentricitet postoji. Za sva tri tipa se pomoću omjera jasno može utvrditi postojanje ovog kvarnog stanja, ali za točno utvrđivanje tipa ekscentriciteta, bilo bi još potrebno promatrati i karakteristične frekvencije koje se određuju formulom (3-47). U ovom radu, zbog tehničkih nemogućnosti, promatrane su frekvencije oko osnovnog harmonika. Tablicom 4.11 je pokazano kako su i u ovom slučaju ispunjeni uvjeti za postojanje ekscentriciteta definirani u algoritmu za detekciju.

**Tab. 4.11:** *Omjeri energija za provjeru ekscentriciteta - mješoviti ekscentricitet*

	Fourierov spektar faza A	Fourierov spektar faza B	Fourierov spektar faza C
Energija spektra (E1) raspon (44-56) Hz	1.5576e+08 J	1.5624e+08 J	1.5572e+08 J
Energija spektra (E2) raspon (23-27) Hz	7.7701e+07 J	7.8371e+07 J	7.7867e+07 J
Energija spektra (E3) raspon (73-77) Hz	4.9544e+07 J	5.0039e+07 J	4.9766e+07 J
(E2/E1)*100 [%]	49.89	50.16	50.00
(E3/E1)*100 [%]	31.81	32.03	31.96

Kao i u prethodne dvije vrste ekscentriciteta, u tablici 4.12 se nalazi omjeri koji pokazuju nepostojanje puknutih štapova rotora.

**Tab. 4.12:** *Omjeri energija za provjeru puknutih štapova - mješoviti ekscentricitet*

	Fourierov spektar faza A	Fourierov spektar faza B	Fourierov spektar faza C
Energija spektra (E1) raspon (44-56) Hz	1.5576e+08 J	1.5624e+08 J	1.5572e+08 J
Energija spektra (E4) raspon (44-46) Hz	2.9678e+05 J	2.6293e+05 J	2.8168e+05 J
Energija spektra (E5) raspon (53-55) Hz	1.5536e+05 J	1.8965e+05 J	3.2705e+05 J
((E4+E5)/E1)*100 [%]	0.29	0.29	0.39

U tablici 4.13 su omjeri koji potvrđuju uvjet iz algoritma da omjer energija spektara između pojedinih faza mora biti između 85 i 115 % za potvrdu da motor nema kratki spoj na statoru.

**Tab. 4.13:** Omjeri energija za provjeru kratkog spoja - mješoviti ekscentricitet

	omjer	vrijednost [%]
$\frac{E6}{E7} \cdot 100$	$\frac{8.2811e+08}{8.3116e+08} \cdot 100$	99.63
$\frac{E6}{E8} \cdot 100$	$\frac{8.2811e+08}{8.2994e+08} \cdot 100$	99.78
$\frac{E7}{E8} \cdot 100$	$\frac{8.3116e+08}{8.2994e+08} \cdot 100$	100.15

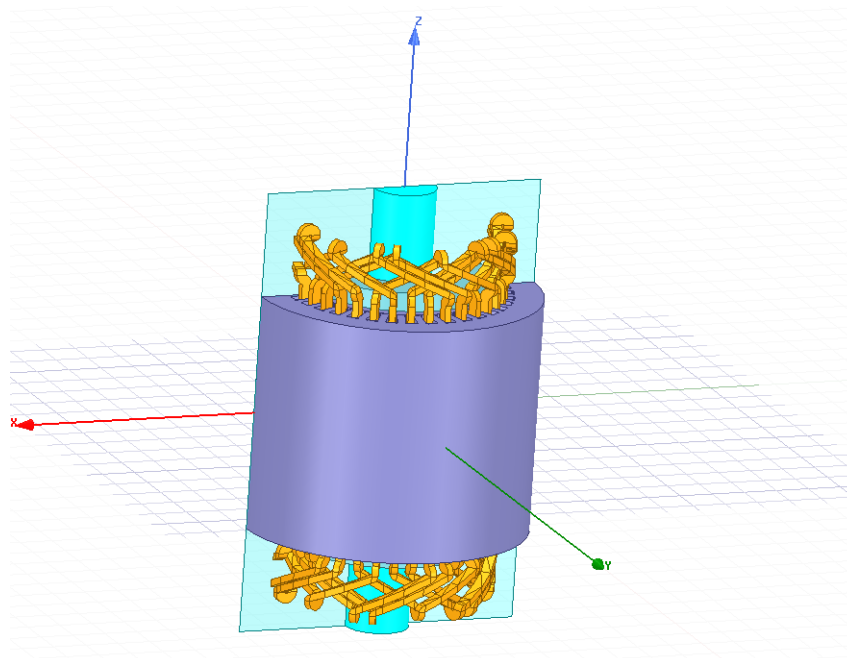
E6 - energija spektra faze A, E7 - energija spektra faze B, E8 - energija spektra faze C

## 4.5. 3D modeli

Za sva ostala kvarna stanja su korišteni 3D modeli. Osnova 3D modela je *RMxpprt* model, a stvaranje se vrši na sljedeći način:

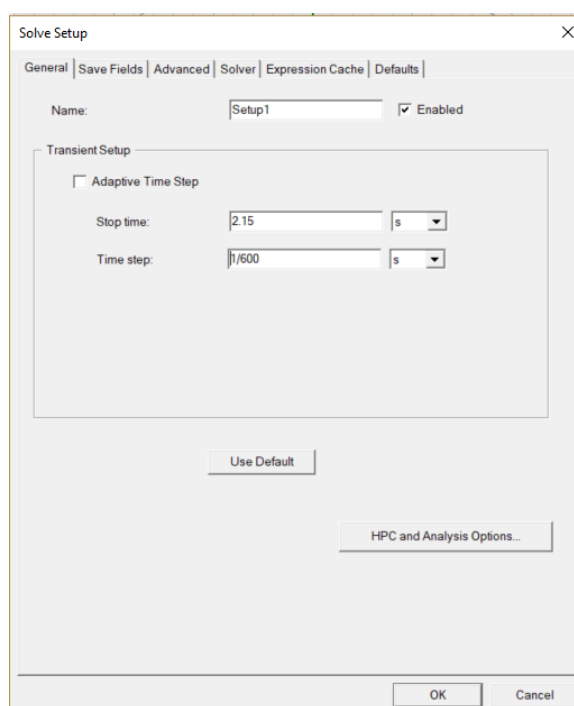
1. Odabir *RMxpprt* modela
2. Kartica *RMxpprt* u alatnoj traci
3. *Analysis Setup > Create Maxwell Design*
4. Odabrati tip modela 3D

Nakon nekoliko minuta, program stvara 3D model, preciznije, pola 3D modela iz razloga što si program na taj način skraćuje vrijeme računanja diferencijalnih jednažbi (Sl. 4.11).



**Sl. 4.11:** 3D model elektromotora

Osim simulacija kvarnih stanja, potrebno je analizirati motor u ispravnom stanju kako bi se dobile referentne vrijednosti prema kojima će se vršiti usporedba rezultata. Za sve slučajeve je postavljena visoka kvaliteta mreženja i teret jednak nazivnom momentu. Zadavanje tereta je napravljeno na isti način kao i za 2D simulacije. Na slici 4.12 je prikazan prozor u koji se upisuje vrijeme trajanja simulacije i vremenski korak simulacije, a postoje i razne druge opcije, omogućeno je snimanje polja u postavljenim vremenskim koracima, način rješavanja diferencijalnih jednadžbi, mogućnost brzog dostizanja stacionarnog stanja itd. U rotorske štapove su postavljene vrtložne struje radi što manjih zanemarenja.

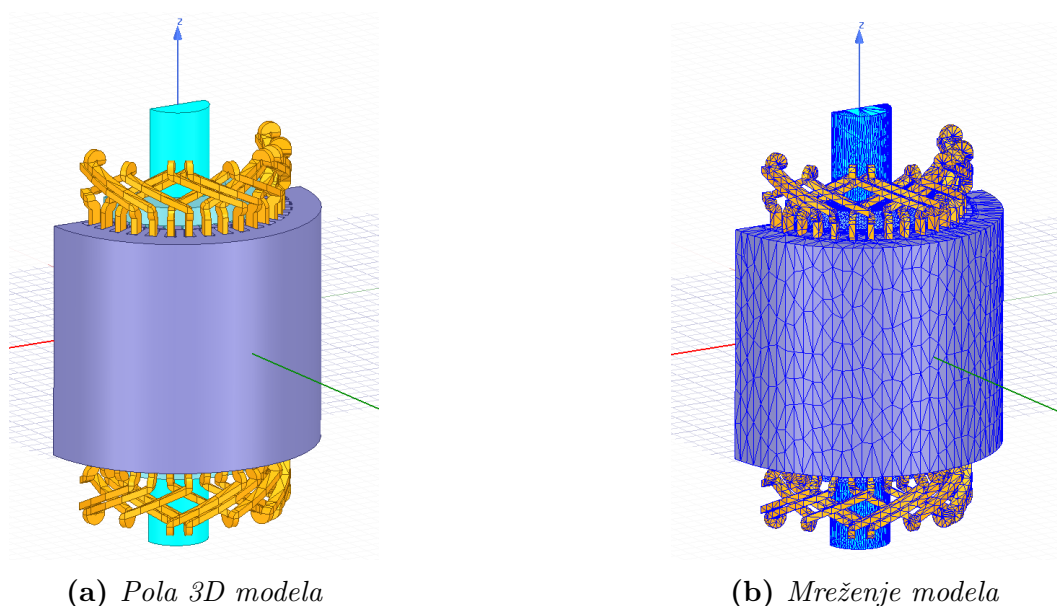


Sl. 4.12: Postavke simulacije

Za kvarna stanja će se analizirati harmonici i međuharmonici oko osnovnog harmonika (50 Hz) te stoga vremenski korak postavljen na vrijednost  $1/600$ , što znači da se promatraju frekvencije do 300 Hz. Vrijeme simulacije je postavljeno na 2.15 sekundi kako bi se u frekvencijskom rasponu od 0 do 300 Hz dobilo oko 1200 uzoraka, tj. u svrhu dobivanja što preciznijih rezultata. U kartici *Solver* potrebno je pod opcijom *Scalar Potential* odabrati *First Order*. *First Order* se odabire u slučajevima kada su strukture, tj. model, vrlo komplicirane i kada je vrijeme analize bitnije nego preciznost rezultata. Iako se analizira tek polovica modela, vrijeme simulacije na računalu fakulteta iznosi oko 150 - 200 sati za svaki pojedini slučaj uz ove postavke.

### 4.5.1 Ispravan motor

Ispravan motor služi kao referentna simulacija za usporedbu s kvarnim stanjima. Na kreiranom 3D modelu (Sl. 4.13) nije potrebno geometrijski ništa mijenjati. Postavljaju se vrtložne struje u štapove rotorskog kaveza, modelira se teret i namještaju se postavke simulacije. Mreženje modela je visoke kvalitete, što se vidi i na slici 4.13b. Za ispravan motor, očekivano je da se ističe 3. i 5. harmonik što je vidljivo i na slici 4.14. Osim pojave 3. i 5. harmonika, nema pojave bilo kakvih drugih harmonika. Vršne vrijednosti linijske struje dosežu vrijednosti slične nazivnoj vrijednosti.

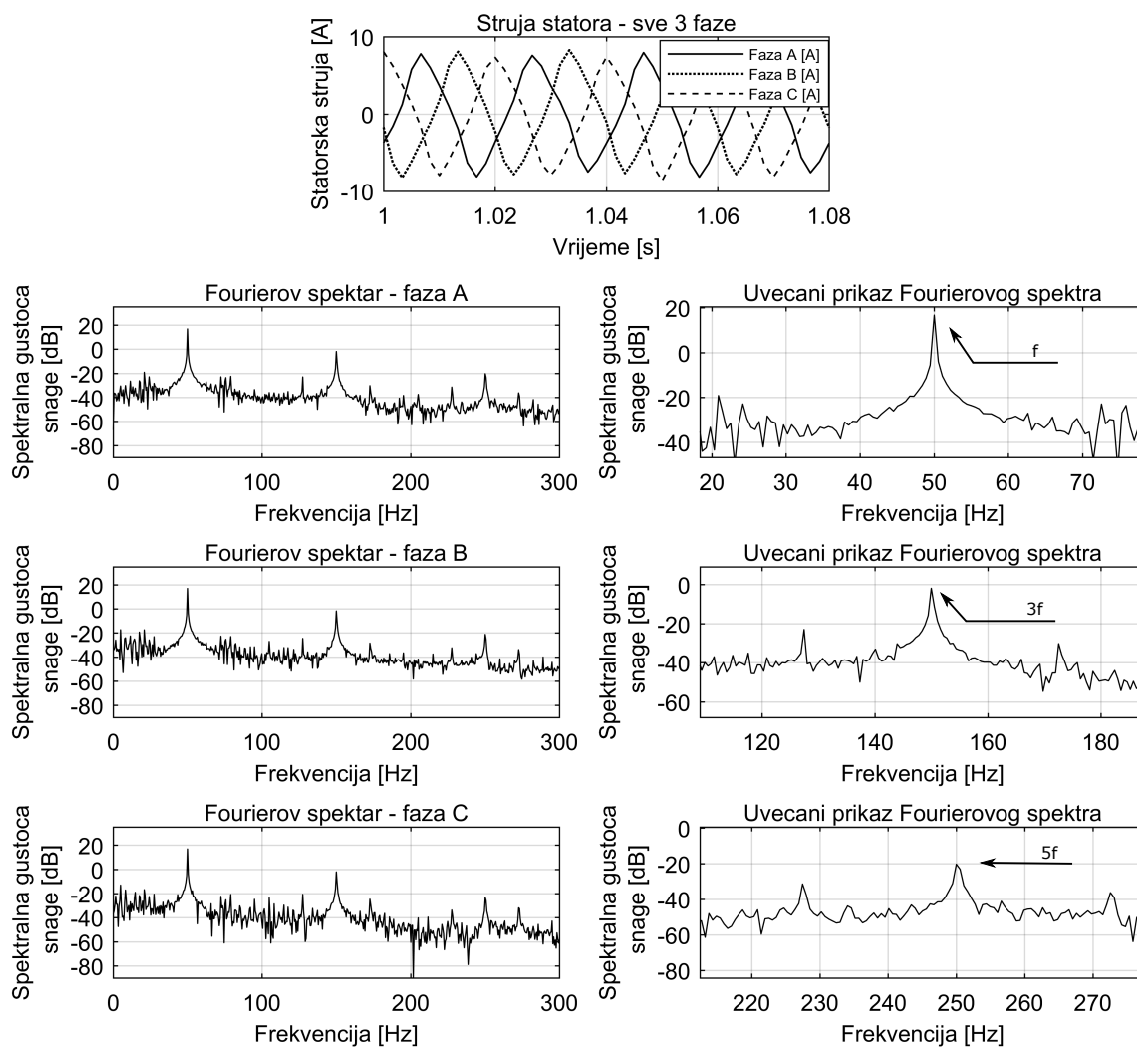


Sl. 4.13: 3D model motora

Vršne vrijednosti linijske struje dosežu vrijednosti slične nazivnoj vrijednosti. Struje u vremenskoj domeni su sinusnog oblika, fazno razmaknute za  $120^\circ$  električno.

Tab. 4.14: Omjeri energija za provjeru ekscentriciteta - ispravan motor

	Fourierov spektar faza A	Fourierov spektar faza B	Fourierov spektar faza C
Energija spektra (E1) raspon (44-56) Hz	1.7237e+07 J	1.8037e+07 J	1.7538e+07 J
Energija spektra (E2) raspon (23-27) Hz	4.7277e+03 J	1.4072e+03 J	1.7060e+03 J
Energija spektra (E3) raspon (73-77) Hz	9.3107e+03 J	1.2941e+04 J	1.0953e+04 J
$(E2/E1)*100$ [%]	0.027	0.007	0.009
$(E3/E1)*100$ [%]	0.054	0.071	0.062



Sl. 4.14: *Ispravan motor - sve 3 faze i karakteristične frekvencije*

U tablici 4.14 se nalaze omjeri energije za provjeru ekscentriciteta. Omjeri su manji od 1 % u sve tri faze što prema uvjetu algoritma dovodi do zaključka kako motor nema ekscentriciteta. Na isti način se pomoću algoritma može pokazati kako motor nema kratkog spoja niti oštećen kavez rotora. U tablici 4.15 se nalaze rezultati omjera energija za provjeru postojanja puknutih štapova. U tablici 4.16 su omjeri energija spektara između faza koji su i u ovom slučaju između 85 i 115 % što potvrđuje ispravnost motora.

**Tab. 4.15:** Omjeri energija za provjeru puknutih štapova - ispravan motor

	Fourierov spektar faza A	Fourierov spektar faza B	Fourierov spektar faza C
Energija spektra (E1) raspon (44-56) Hz	1.7236e+07 J	1.8036e+07 J	1.7538e+07 J
Energija spektra (E4) raspon (44-46) Hz	6.1369e+04 J	5.5570e+04 J	5.3952e+04 J
Energija spektra (E5) raspon (53-55) Hz	7.9472e+04 J	9.5047e+04 J	9.2581e+04 J
$((E4+E5)/E1)*100$ [%]	0.82	0.83	0.83

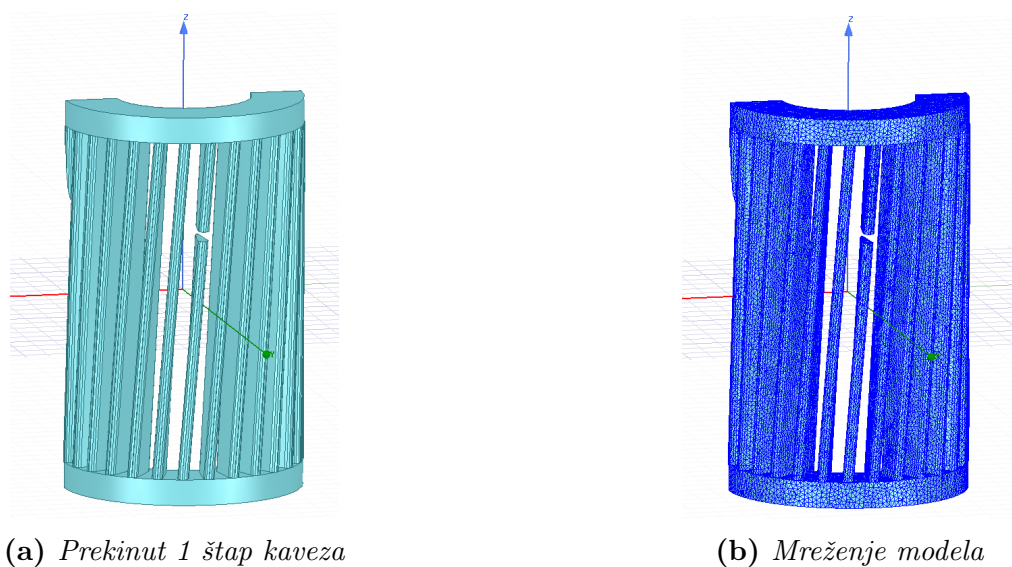
**Tab. 4.16:** Omjeri energija za provjeru kratkog spoja - ispravan motor

	omjer	vrijednost [%]
$\frac{E6}{E7} \cdot 100$	$\frac{3.53231e+07}{3.6987e+07} \cdot 100$	95.50
$\frac{E6}{E8} \cdot 100$	$\frac{3.5323e+07}{3.6033e+07} \cdot 100$	98.02
$\frac{E7}{E8} \cdot 100$	$\frac{3.6987e+07}{3.6033e+07} \cdot 100$	102.65

E6 - energija spektra faze A, E7 - energija spektra faze B, E8 - energija spektra faze C

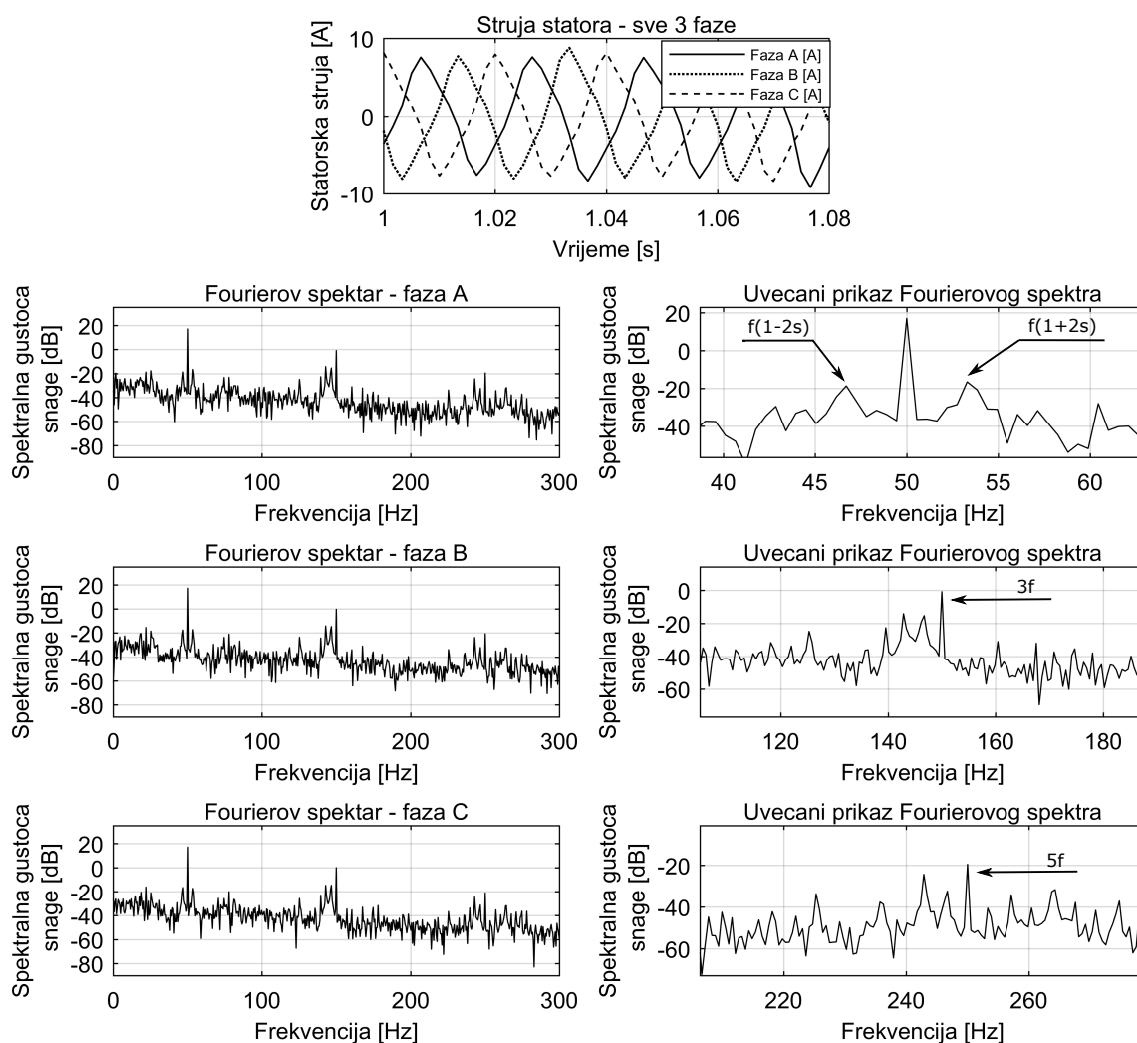
#### 4.5.2 Prekinut 1 štap rotorskog kaveza

Nakon što se stvori 3D Model, moguće je preuređivati 3D model. Za ovakvo kvarno stanje, pomoću objekta kvadra i naredbe *Subtract* je napravljen prekid na štapu kaveza što se može vidjeti na slici 4.15.



**Sl. 4.15:** Modeliranje 1 prekinutog štapa

Na slici 4.16 se nalazi Fourierova analiza sve 3 faze i prikaz karakterističnih frekvencija kvarova koji se pojavljuju u slučaju prekinutih štapova kaveza rotora. Prema literaturi [5, 28], za kvarove kaveza rotora se pojavljuju frekvencijske komponente  $f(1 \pm 2ks)$  koje se mogu uočiti i na slici. U odnosu na ispravan motor, energija oko ovih frekvencijskih komponenti je puno veća u odnosu na ispravan motor. Na osnovu ovog zaključka je kreiran uvjet postojanja prekinutog štapa u algoritmu. Uspoređujući omjer energije u frekvencijskom rasponu u kojem se pojavljuje prekinut štap i energije oko osnovnog harmonika (44-56) Hz, za ispravan motor i motor s prekinutim štapom kaveza, dolazi se do zaključka kako je omjer energija veći u slučaju prekinutog štapa, a s povećanjem broja slomljenih štapova, omjer energija će biti sve veći.



**Sl. 4.16:** Prekinut 1 štap kaveza - sve 3 faze i karakteristične frekvencije

U tablici 4.17 je provjera ekscentriciteta na ovom slučaju. U odnosu na slučaj s ekscentricitetom, i ovdje su omjeri energija spektara manji od 1 %, što dokazuje da motor nema ekscentricitet zračnog raspora prema algoritmu.

**Tab. 4.17:** Omjeri energija za provjeru ekscentriciteta - 1 prekinut štap

	Fourierov spektar faza A	Fourierov spektar faza B	Fourierov spektar faza C
Energija spektra (E1) raspon (44-56) Hz	1.8168e+07 J	1.8775e+07 J	1.8169e+07 J
Energija spektra (E2) raspon (23-27) Hz	1.8492e+04 J	1.5215e+04 J	9.1943e+03 J
Energija spektra (E3) raspon (73-77) Hz	3.8542e+03 J	7.4745e+03 J	4.3772e+03 J
(E2/E1)*100 [%]	0.101	0.081	0.051
(E3/E1)*100 [%]	0.021	0.039	0.024

Tablica 4.18 provjerava omjere energija spektara za utvrđivanje puknuća jednog ili više štapova. Prema dobivenim rezultatima omjera je i kreiran uvjet za algoritam koji kaže da kavez rotora ima barem jedan puknut štap ako je omjer veći od 0.98 %. Uspoređuje se energija spektra oko frekvencija  $f(1 \pm 2s)$  s energijom oko osnovnog harmonika (44-56) Hz. Algoritam za ovaj slučaj ispisuje poruku da motor sadrži 1 prekinut rotorski štap.

**Tab. 4.18:** Omjeri energija za provjeru puknutih štapova - 1 prekinut štap

	Fourierov spektar faza A	Fourierov spektar faza B	Fourierov spektar faza C
Energija spektra (E1) raspon (44-56) Hz	1.8168e+07 J	1.8775e+07 J	1.8169e+07 J
Energija spektra (E4) raspon (44-46) Hz	6.4687e+04 J	5.5570e+04 J	6.6239e+04 J
Energija spektra (E5) raspon (53-55) Hz	1.2310e+05 J	9.5047e+04 J	1.1624e+05 J
((E4+E5)/E1)*100 [%]	0.981	1.000	1.004

Tablica 4.19 potvrđuje da ovaj slučaj nema kratki spoj na statoru prema zadanim uvjetima u algoritmu. Primjenom algoritam na ovaj kvarni slučaj, na *Command Windows*-u se ispisuje poruka da su prekinut 1 štap kaveza rotora.

**Tab. 4.19:** Omjeri energija za provjeru kratkog spoja - 1 prekinut štap

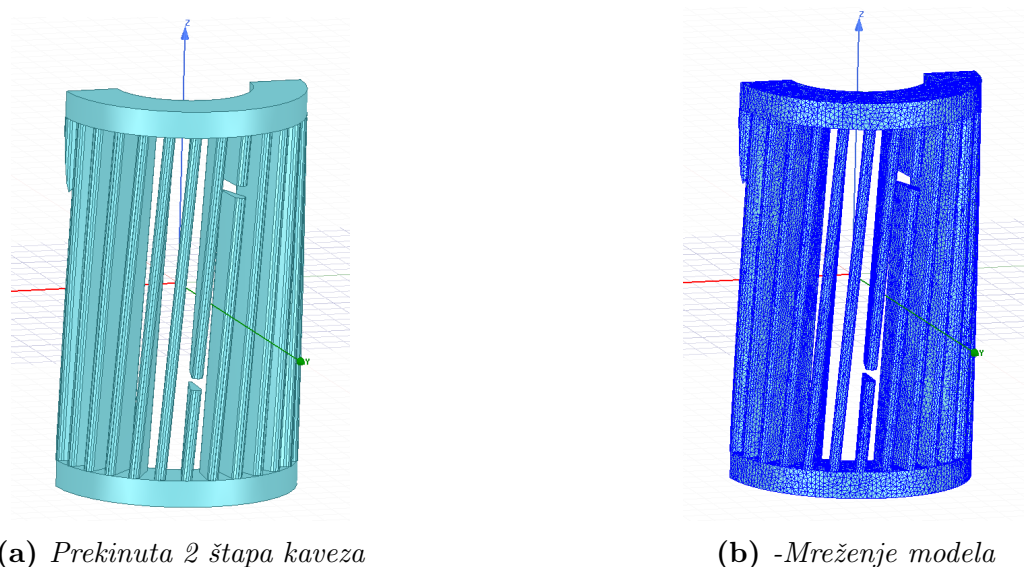
	omjer	vrijednost [%]
$\frac{E6}{E7} \cdot 100$	$\frac{3.7321e+07}{3.8633e+07} \cdot 100$	96.60
$\frac{E6}{E8} \cdot 100$	$\frac{3.7321e+07}{3.7456e+07} \cdot 100$	99.64
$\frac{E7}{E8} \cdot 100$	$\frac{3.8633e+07}{3.7456e+07} \cdot 100$	103.14

E6 - energija spektra faze A, E7 - energija spektra faze B, E8 - energija spektra faze C



### 4.5.3 Prekinuta 2 štapa rotorskog kaveza

Kvarno stanje je modelirano na isti način kao i u slučaju 1 prekinutog štapa rotorskog kaveza, samo što su u ovom slučaju prekinuta 2 štapa (Sl. 4.17). Na uvećanom prikazu Fourierovog spektra na slici 4.18 se također primjećuju karakteristične frekvencije za ovaj tip kvara na frekvencijama  $f(1 \pm 2s)$ , ali su vrijednosti bočnih harmonika izraženije u odnosu na slučaj s 1 prekinutim štapom kaveza. U odnosu na motor bez kvarova, manje su izraženi 3. i 5. harmonik, a cijeli signal ima puno više šumova. Oko trećeg harmonika se pojavljuju bočni harmonici koji nisu simetrični kao pri osnovnom harmoniku.



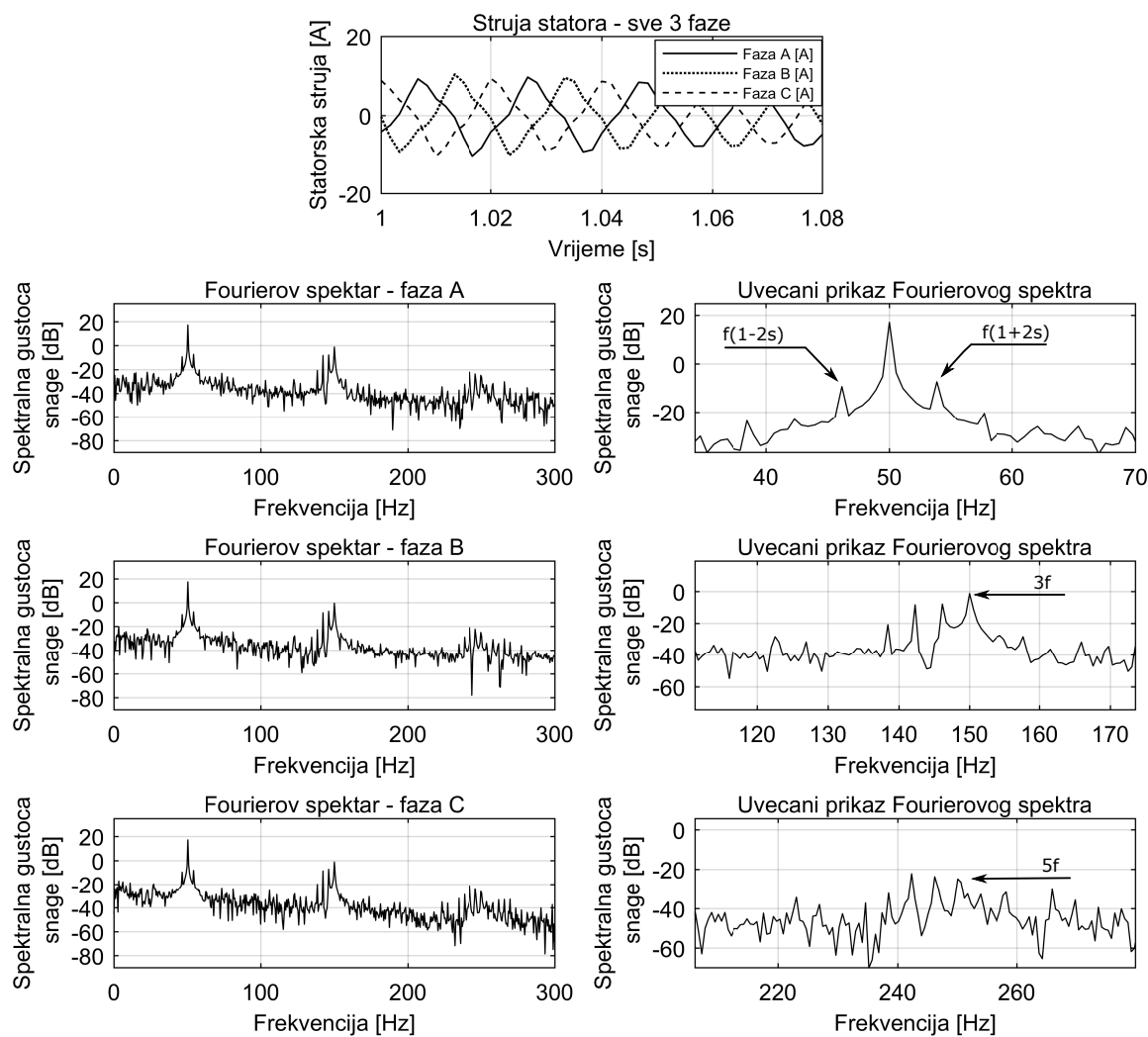
Sl. 4.17: Modeliranje 2 prekinuta štapa

U modelu motora s 1 prekinutim štapom rotora je kroz tablice i uvjete algoritma pokazano kako motor nema ekscentricitet zračnog raspora niti kratki spoj na namotu statoru. U kvarnom slučaju s 2 prekinuta ili puknuta štapa su rezultati omjera za ekscentricitet i kratke spojeve slični kao u slučaju jednog puknutog štapa.

Tab. 4.20: Omjeri energija za provjeru puknutih štapova - 2 prekinuta štapa

	Fourierov spektar faza A	Fourierov spektar faza B	Fourierov spektar faza C
Energija spektra (E1) raspon (44-56) Hz	1.9197e+07 J	2.0110e+07 J	1.9127e+07 J
Energija spektra (E4) raspon (44-46) Hz	4.7996e+04 J	4.90118e+04 J	5.3610e+04 J
Energija spektra (E5) raspon (53-55) Hz	2.2336e+05 J	2.3505e+05 J	2.1769e+05 J
$((E4+E5)/E1)*100$ [%]	1.413	1.412	1.418

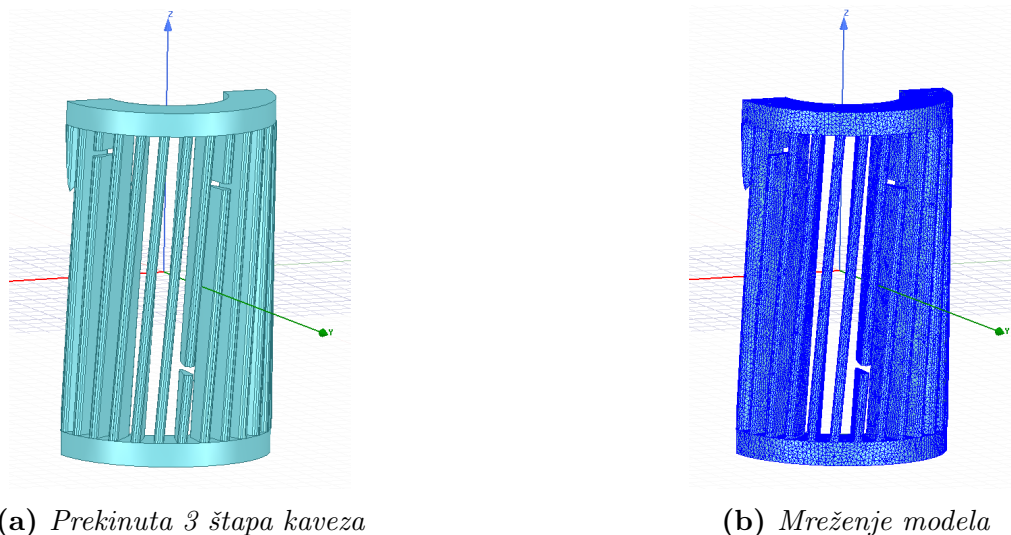
Iz omjera energija spektara dobivenih iz tablice 4.20 je kreiran uvjet za algoritam kada su u pitanju 2 prekinuta štapa. Dakle, ako je jedan on omjera iz tablice veći od 1.41 %, postoje najmanje 2 puknuta štapa kaveza.



Sl. 4.18: Prekinuta 2 štapa kaveza - sve 3 faze i karakteristične frekvencije

#### 4.5.4 Prekinuta 3 štapa rotorskog kaveza

Kvarno stanje je modelirano kao u prethodna 2 slučaja (Sl. 4.19). Fourierov spektar za sve 3 faze se nalazi na slici 4.20. Pojavljuju se karakteristične frekvencije  $f(1 \pm 2s)$ . Bočni harmonici su povećanjem broj prekinutih/slomljenih štapova sve izraženiji. U odnosu na ispravan motor, signal ima puno više šumova, 3. harmonik je manje izražen, dok se 5. harmonik gotovo ni ne primjećuje. Oko 3. harmonika se opet javljaju bočni harmonici, ali samo na frekvencijama nižim od 3. harmonika. U ovom kvarnom slučaju će omjer energije u frekvencijskom rasponu u kojem se javljaju bočni harmonici i energije oko osnovnog harmonika (44-56) Hz biti najveći ako se uspoređuju slučajevi s 1, 2 ili bez prekinutih štapova.



**Sl. 4.19:** Modeliranje 3 prekinuta štapa

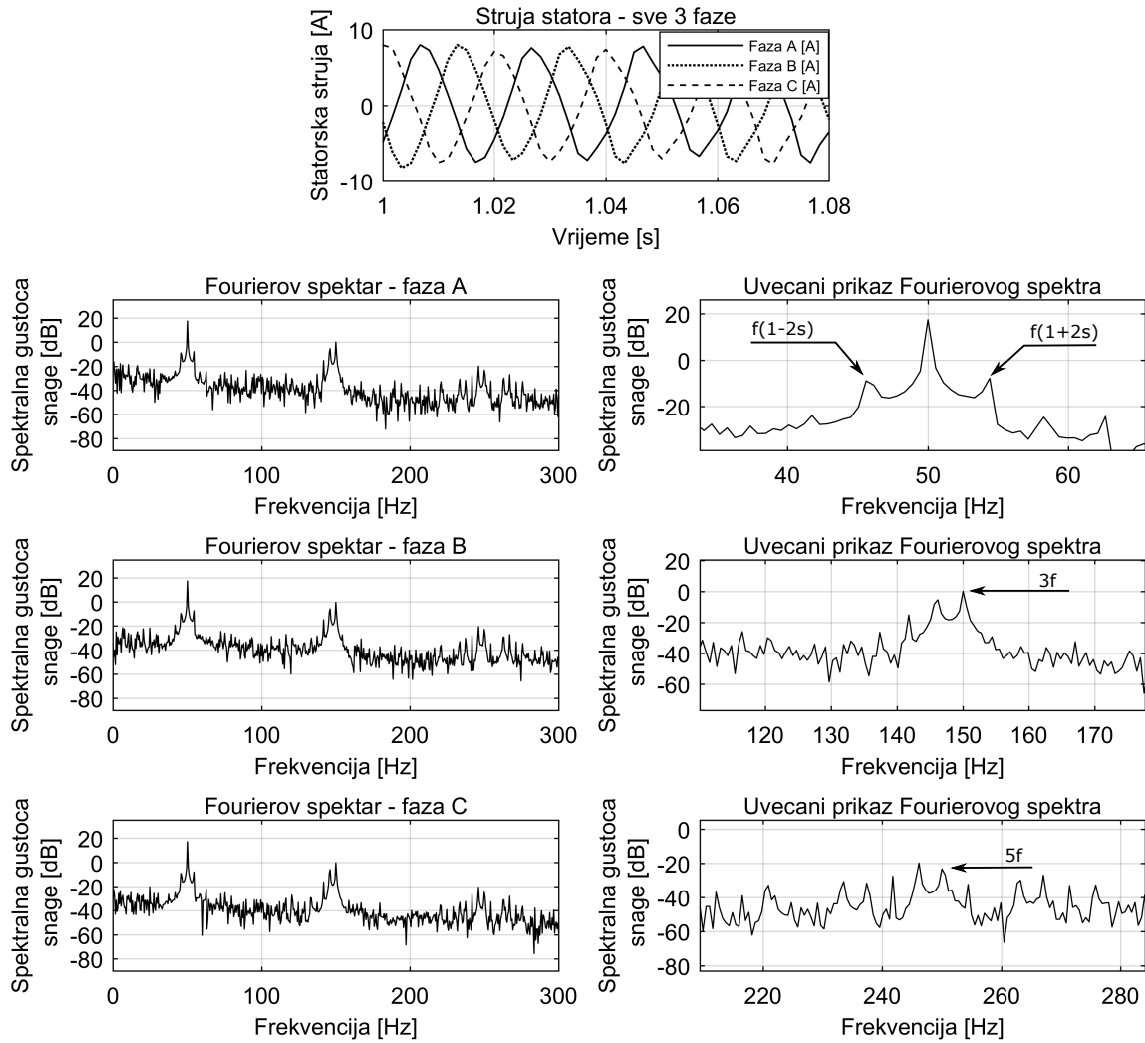
Na slici 4.21 se mogu vidjeti istovremeno sva 3 slučaja sa slomljenim štapovima u odnosu na ispravan motor. Primjećuje se da su bočni harmonici izraženiji kako raste broj prekinutih štapova. U tablici 4.22 se nalaze frekvencijske komponente na kojima se javljaju kvarovi kaveza rotora. Kod slučaja s 3 slomljena štapa, frekvencija na kojoj se javlja kvar se više ne nalazi na istoj frekvenciji kao u slučajevima s manje ili bez prekinutih štapova, što dovodi do zaključka da se povećanjem broja prekinutih štapova povećava klizanje motora.

U tablici 4.21 se nalaze omjeri energija prema kojima se definira postojanje puknutih štapova kaveza rotora. U ovom slučaju je omjer u fazi A 2.01 %, prema čemu je stvoren uvjet za algoritam za postojanje 3 ili više puknutih štapova rotorskog kaveza.

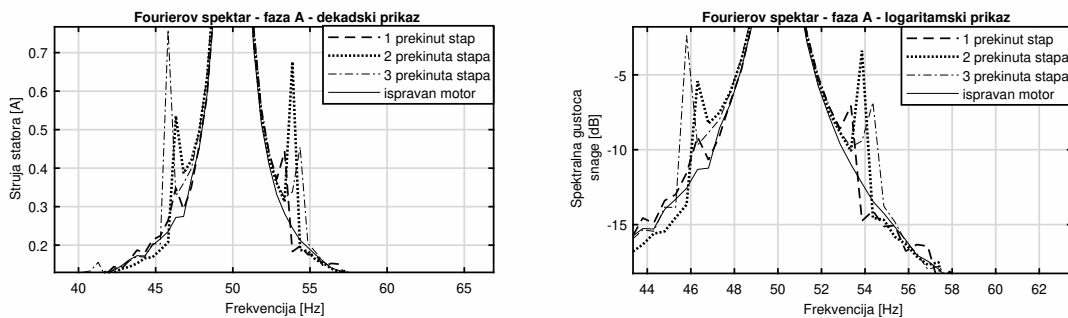
**Tab. 4.21:** Omjeri energija za provjeru puknutih štapova - 3 prekinuta štapa

	Fourierov spektar faza A	Fourierov spektar faza B	Fourierov spektar faza C
Energija spektra (E1) raspon (44-56) Hz	2.0481e+07 J	2.0406e+07 J	1.9050e+07 J
Energija spektra (E4) raspon (44-46) Hz	2.4609e+05 J	2.0687e+05 J	2.1354e+05J
Energija spektra (E5) raspon (53-55) Hz	1.6721e+05 J	1.9157e+05 J	1.7332e+05 J
$((E4+E5)/E1)*100$ [%]	2.018	2.022	2.031

Kao u slučaju motora s 2 prekinuta štapa, rezultati omjera za ekscentricitet zračnog rasporeda i kratki spoj namota rotora su slični rezultatima u slučaju motora s 1 prekinutim štapom. Algoritam za ovaj kvarni slučaj pokazuje da motor ima 3 ili više slomljenih štapova kaveza.



Sl. 4.20: Prekinuta 3 štapa kaveza - sve 3 faze i karakteristične frekvencije



Sl. 4.21: Usporedba bočnih harmonika za slučajeve s 0,1,2 i 3 slomljena štapa kaveza rotora

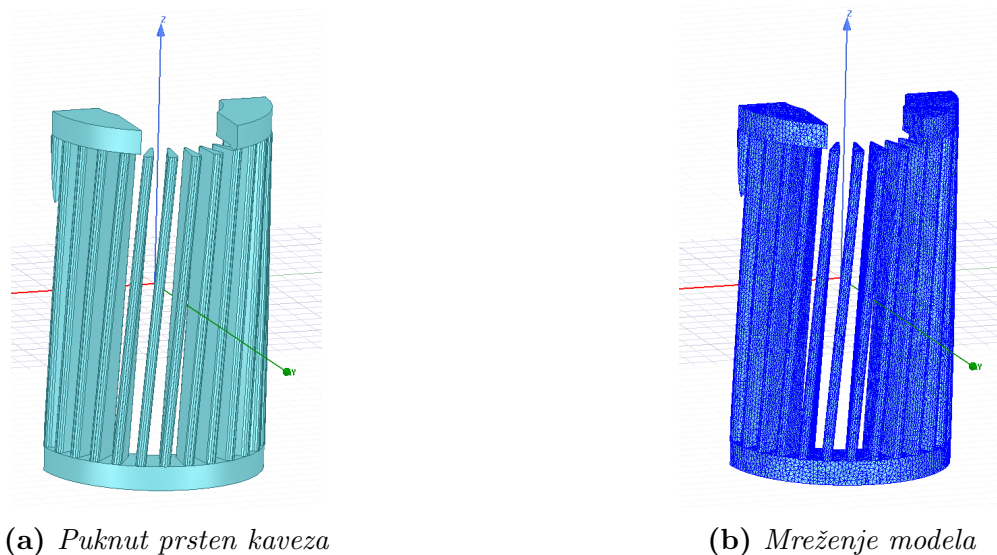
**Tab. 4.22:** *Vrijednosti bočnih harmonika*

Broj prekinutih štapova	$f(1-2s)$	Postotak osnovnog harmonika
0	46.31 Hz	4.70 %
1	46.31 Hz	5.81 %
2	46.31 Hz	8.82 %
3	45.81 Hz	12.13 %

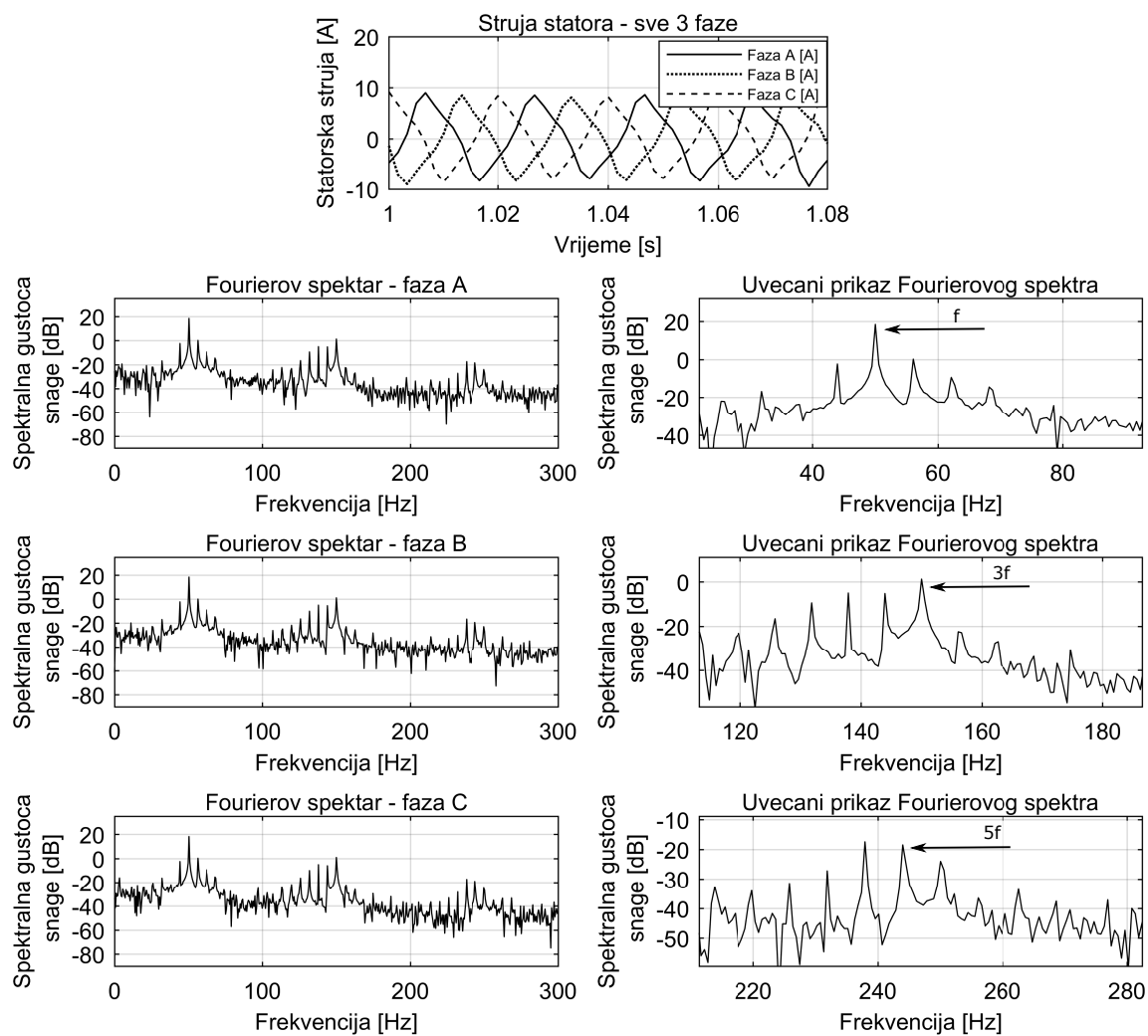
Tablica 4.22 pokazuje da amplituda bočnih harmonika  $f(1 - 2s)$  raste s brojem slomljenih štapova. To potkrepljuje činjenicu kako i energija u tom frekvencijskom opsegu raste s povećanjem broja puknutih štapova kaveza.

#### 4.5.5 Puknut kratkospojni prsten rotorskog kaveza

Model puknutog prstena kreiran na isti način kao i puknuća štapova kaveza (4.22). Na slici 4.23 se nalazi Fourierov spektar sve 3 faze. Proučavajući rezultate simulacije puknutog prstena, može se primijetiti pojava bočnih harmonika na frekvencijama  $f(1 \pm 2s)$ . Osim toga, za razliku od prethodnih slučajeva kvara rotora, signal ima više šuma. S obzirom da ne postoji nekakva veća razlika, teško je definirati da se radi točno o puknuću prstena, ali se može potvrditi kvar kaveza rotora.



**Sl. 4.22:** *Modeliranje puknutog prstena*



Sl. 4.23: Puknut prsten kaveza - sve 3 faze i karakteristične frekvencije

Tab. 4.23: Omjeri energija za provjeru puknutih štapova - Puknut prsten

	Fourierov spektar faza A	Fourierov spektar faza B	Fourierov spektar faza C
Energija spektra (E1) raspon (44-56) Hz	2.5485e+07 J	2.5213e+07 J	2.4339e+07 J
Energija spektra (E4) raspon (44-46) Hz	1.4692e+05 J	1.2606e+05 J	1.2678e+05 J
Energija spektra (E5) raspon (53-55) Hz	6.8505e+04 J	7.4197e+04 J	7.6891e+04 J
$((E4+E5)/E1)*100$ [%]	1.51	1.45	1.49

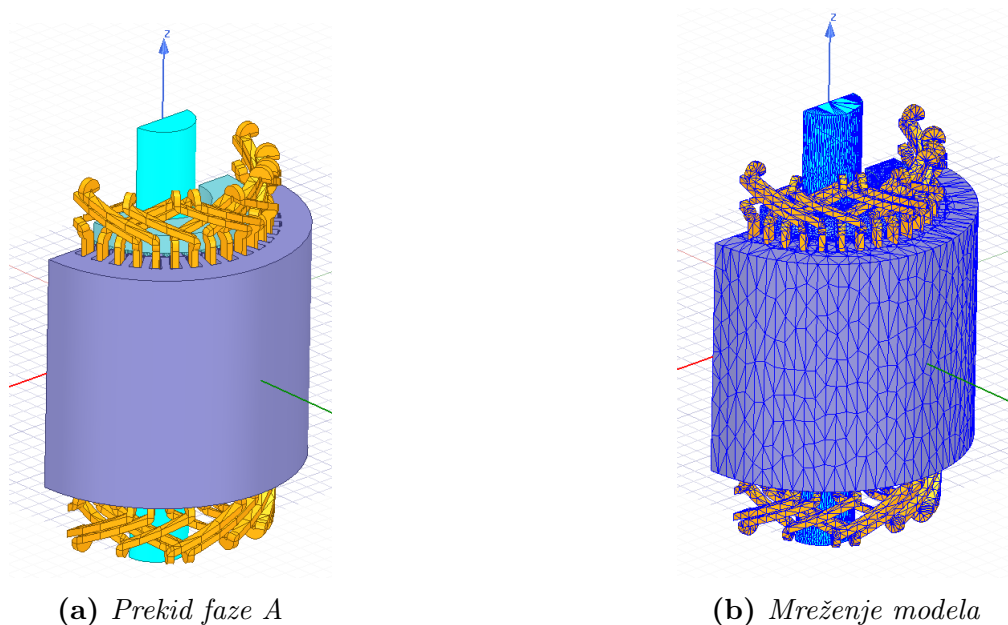
Ako se na ovom kvarnom slučaju promatraju omjeri vezani za provjeru ekscentriciteta ili kratkog spoja, rezultati su slični kao i za slomljene štapove rotora te nije potrebno ponovno dokazivati

nepostojanje ekscentriciteta zračnog rasporeda ili kratkih spojeva. U tablici 4.23 se nalaze omjeri energija vezani za provjeru postojanja puknutih štapova kaveza. Prema dobivenim omjerima i uvjetima algoritma, algoritam za ovaj slučaj pokazuje da motor ima 2 puknuta štapa rotora. Prema rezultatima dobivenim za kavez s 2 prekinuta štapa je u algoritmu definirana donja granica (omjer) za 2 prekinuta štapa (1.41 %). Algoritam ne može raspoznati specifičan kvar poput pucanja kratkospojnog prstena, ali može raspoznati da se radi o kvaru kaveza rotora.

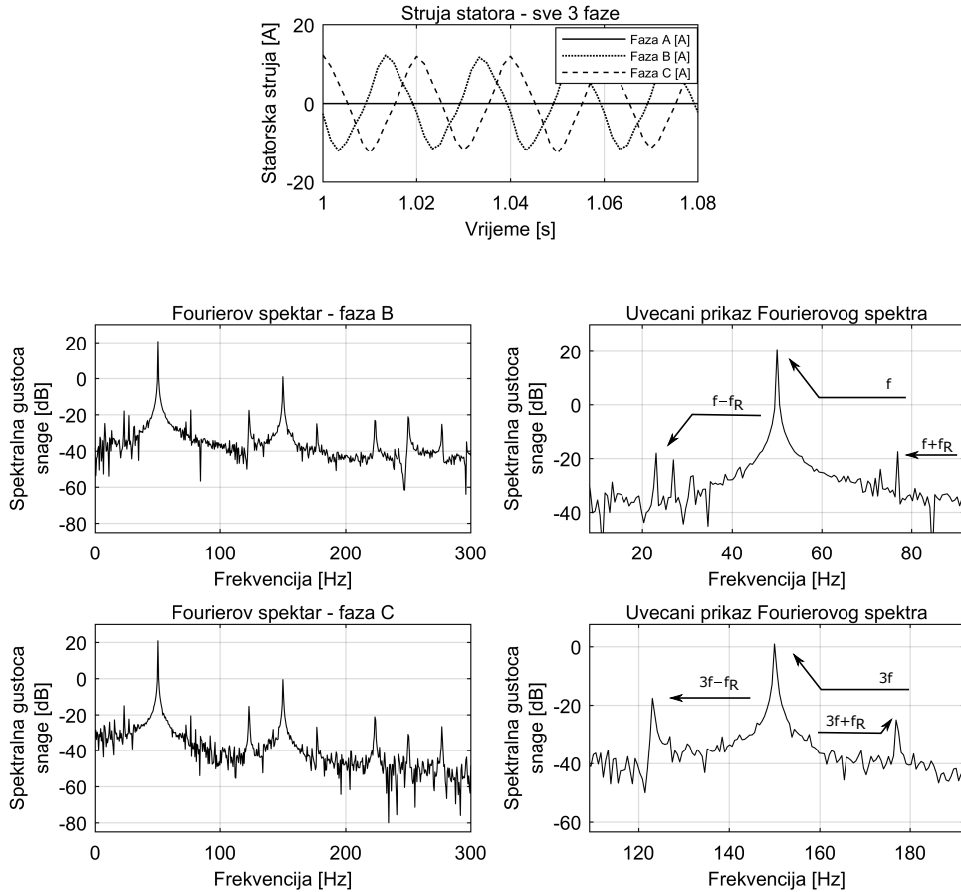
#### 4.5.6 Prekid 1 faze

Kako bi rezultat bio što precizniji, u ovom kvarnom slučaju model je ostao geometrijski netaknut (Sl. 4.24). Prekid 1 faze je napravljen na način da je u pobudi (*Excitations*) obrisana 1 faza čime se dobiva namot kroz koji fizikalno ne teče struja. Na slici 4.25 se nalazi Fourierova analiza ovog slučaja. Već po vremenskoj ovisnosti struje se može zaključiti da se radi o prekidu faze. Osim toga, na uvećanom spektru se može primijetiti pojava frekvencija  $f \pm f_R$  oko prvog, trećeg i petog harmonika, koja se podudara s jednadžbom za detekciju kvara na statoru 3-42.

U algoritmu za detekciju se ovaj kvar bazira na provjeri maksimuma svih faza, ako je jedan od maksimuma jednak nuli, odmah se može zaključiti o prekidu faze. Ovisno o tome koja faza je prekinuta, algoritam ispisuje prekid faze A, B ili C (u ovom slučaju je to prekid faze A).



Sl. 4.24: Model prekida 1 faze

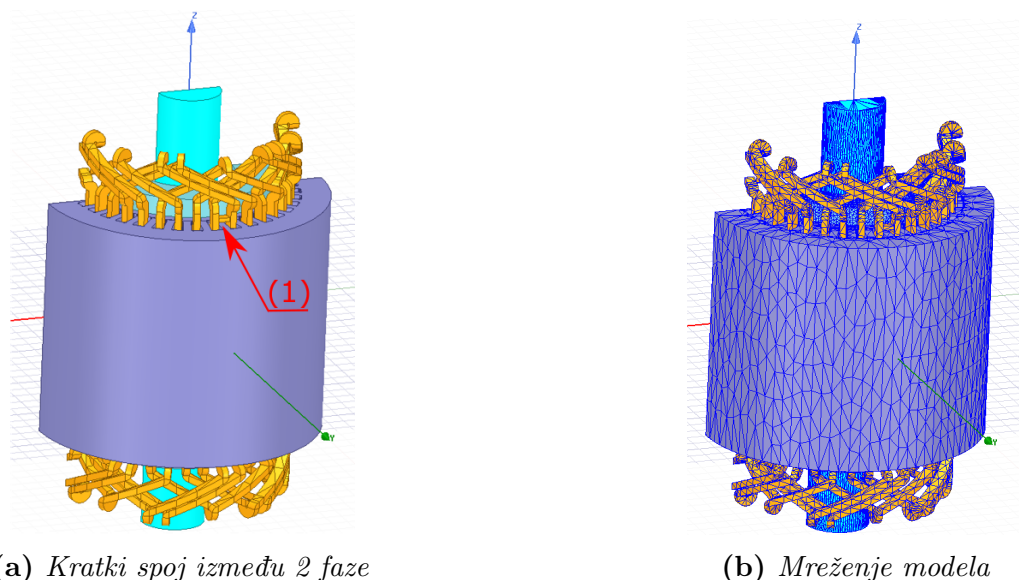


Sl. 4.25: Prekid faze A - sve 3 faze i karakteristične frekvencije

#### 4.5.7 Kratki spoj između 2 faze

Kratki spoj između 2 faze je modeliran pomoću spojnice i naredbe *Unite*. Na slici 4.26a pod oznakom 1 je označena spojnica kojom je modeliran kratki spoj između faza A i B. Na slici 4.27 se može vidjeti ovisnost struje sve 3 faze u vremenu. Vršna vrijednost struje faze A je 3-4 puta veća od nazivne vrijednosti što odgovara ovoj vrsti kratkog spoja. Promatrajući Fourierovu analizu ovog slučaja, može se primijetiti da u fazi A nema pojave 5. harmonika, dok u ostale 2 faze on postoji. Isto tako, vrijednost osnovnog harmonika u sve tri faze za ispravan slučaj ima približno jednake amplitude, dok u ovom slučaju se one vidno razlikuju. U algoritmu za detekciju, kratki spoj je baziran na omjeru energija cijelog signala između faza. Za sve ostale kvarne slučajeve, energije u sve 3 faze su približno jednake. Promatrajući omjere između energija faza u slučajevima bez kratkog spoja, vrijednost u postocima se kreće između 85 i 115 %. U ovom slučaju je napravljen kratki spoj između faza A i B. Na vremenskom grafu struje se može primijetiti da faza B ima manju vršnu vrijednost od faze C, pa se prema tom saznanju može točno znati koje faze su u kratkom spoju i taj uvjet je korišten u algoritmu za detekciju.





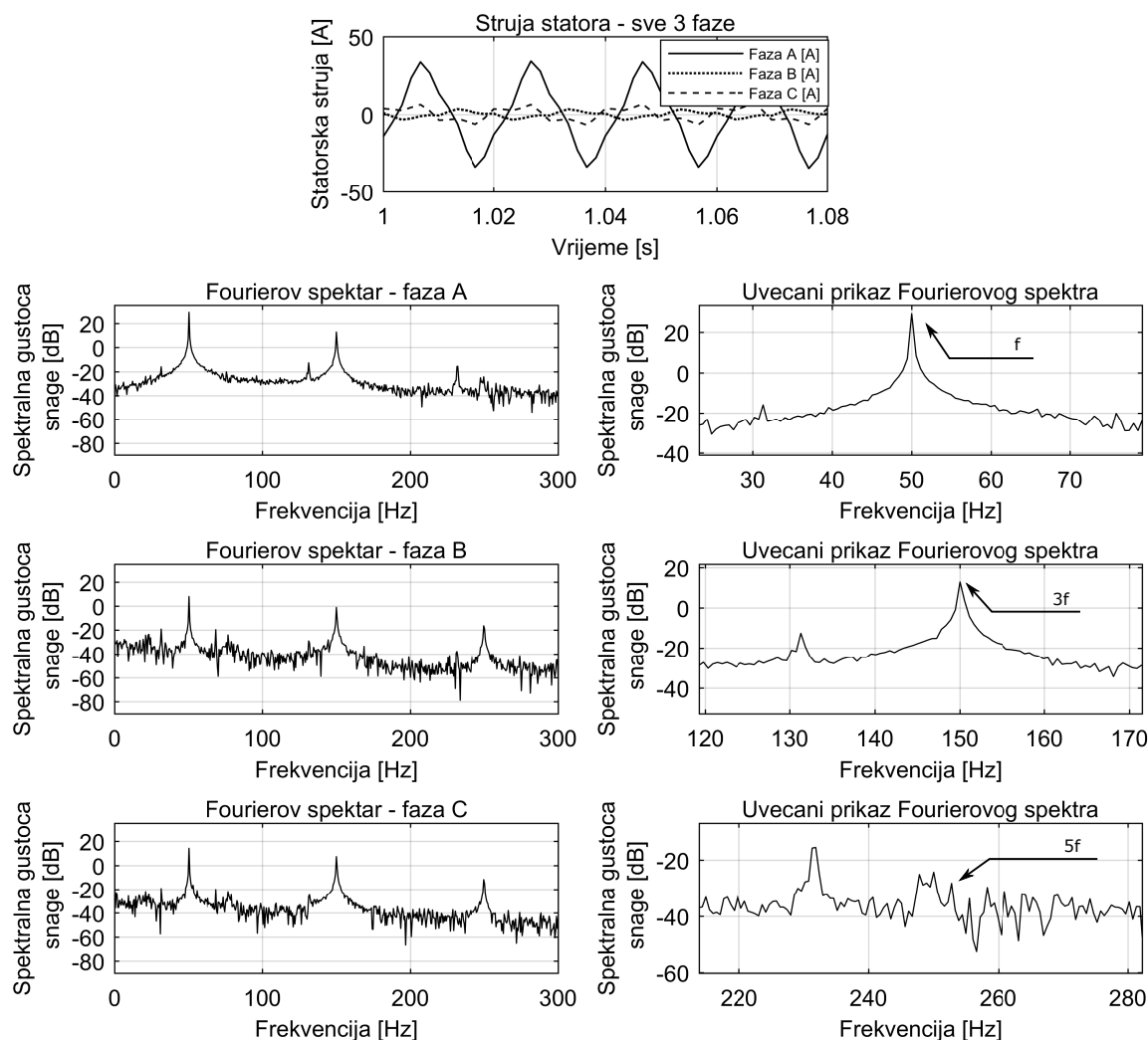
Sl. 4.26: Model kratkog spoja između 2 faze

Tab. 4.24: Omjeri energija za provjeru kratkog spoja - kratki spoj između faza

	omjer	vrijednost [%]
$\frac{E6}{E7} \cdot 100$	$\frac{6.3808e+08}{5.5055e+06} \cdot 100$	1.16e+04
$\frac{E6}{E8} \cdot 100$	$\frac{6.3808e+08}{2.4548e+07} \cdot 100$	2.61e+03
$\frac{E7}{E8} \cdot 100$	$\frac{5.5055e+06}{2.4548e+07} \cdot 100$	22.43

E6 - energija spektra faze A, E7 - energija spektra faze B, E8 - energija spektra faze C

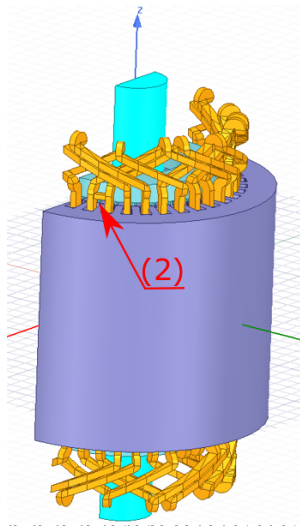
U tablici 4.24 se nalaze omjeri za ovaj slučaj. U algoritmu za detekciju u poglavlju 3.3 se nalaze uvjeti za postojanje kratkog spoja u namotu statora. Ako je vrijednost omjera između 85 i 115 %, motor nema kratki spoj. U ovom slučaju se javljaju vrijednosti koje su daleko veće od postavljenog uvjeta, što je posljedica velike razlike između energije spektra dvije faze. Omjeri za provjeru ekscentriciteta zračnog rasporeda i puknutih štapova pokazuju da motor ima samo kratki spoj u statorskom namotu. Primjenom algoritma za detekciju na ovaj slučaj, kao rezultat se dobiva kratki spoj između faza A i B.



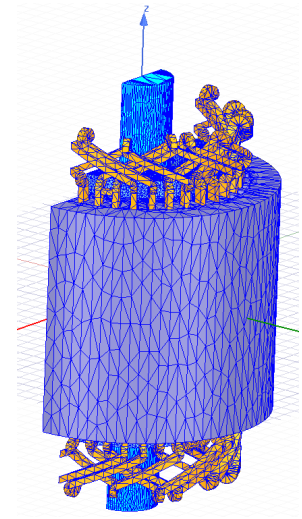
Sl. 4.27: Kratki spoj između 2 faze - sve 3 faze i karakteristične frekvencije

#### 4.5.8 Kratki spoj između utora iste faze

Model ovakve vrste kratkog spoja je napravljen pomoću spojnice i naredbe *Unite* (Sl. 4.28). Kratki spoj između utora iste faze je zapravo kratki spoj između više zavoja. To je najbliže što se može napraviti kratkom spoju između dva zavoja bez detaljnog modeliranja svakog zavoja, a da je tehnički izvedivo na fakultetskom računalu. Pošto se radi o kratkom spoju između  $N$  zavoja, realno je očekivati rezultate struje kao na slici 4.29, dok se za manji broj zavoja mogu očekivati slični oblici struje, ali sa sniženim iznosima struje. Prema Fourierovom spektru, i u ovom kvarnom slučaju nema 5. harmonika u fazi u kojoj se dogodio kratki spoj. Algoritmom može dokazati kratki spoj kao u prethodnom slučaju, ali se ne može se algoritmom točno utvrditi da li se radi o kratkom spoju između faza ili utora iste faze. Za kratki spoj između zavoja iste faze, vršna vrijednost struje faze u kratkom spoju bi bila tek 1.5 - 2 puta veća od nazivne.

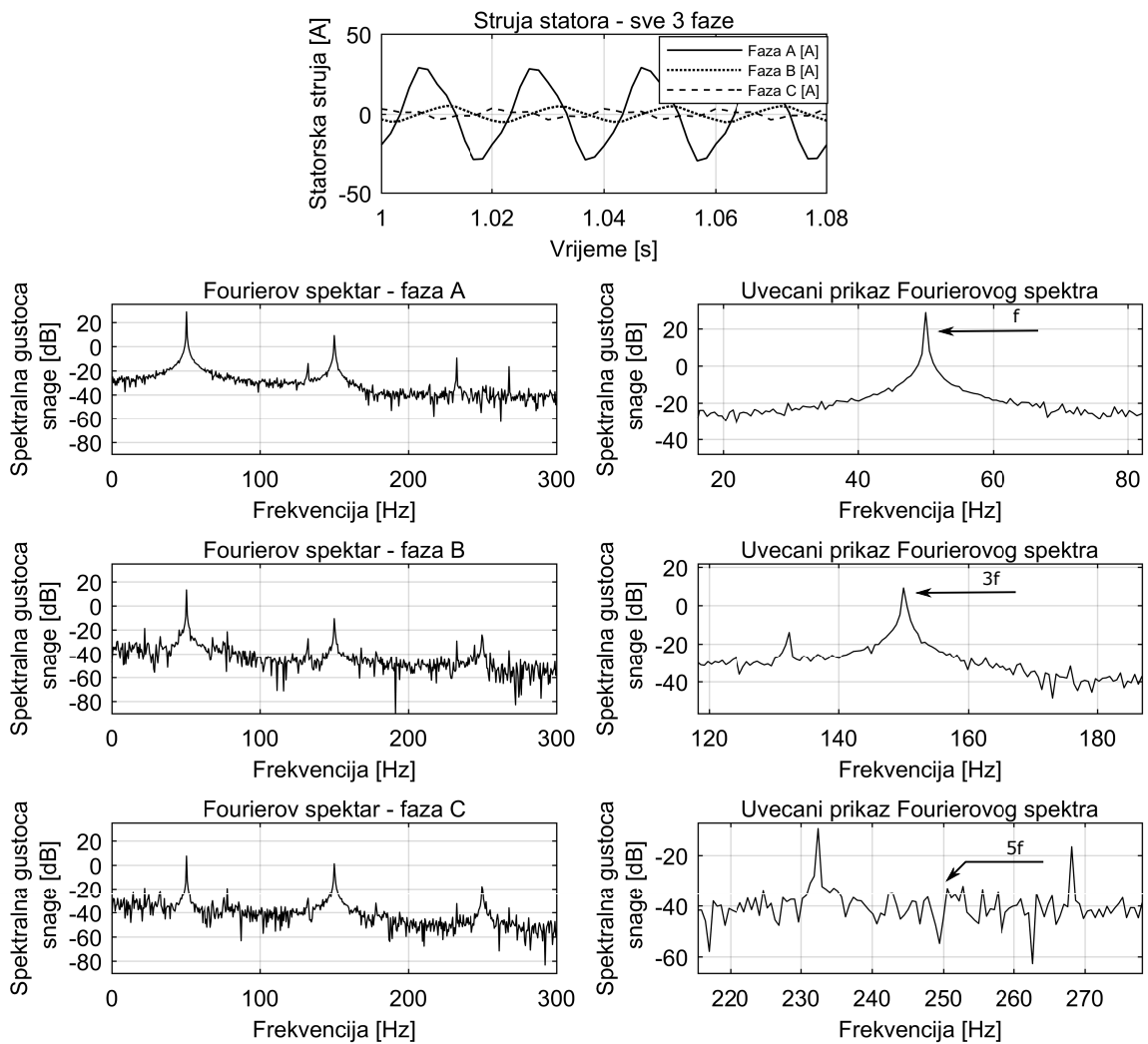


(a) Kratki spoj između utora



(b) Mreženje modela

Sl. 4.28: Model kratkog spoja između utora



Sl. 4.29: Kratki spoj između utora faze - sve 3 faze i karakteristične frekvencije

**Tab. 4.25:** *Omjeri energija za provjeru kratkog spoja - kratki spoj između utora iste faze*

	omjer	vrijednost [%]
$\frac{E6}{E7} \cdot 100$	$\frac{5.5566e+08}{1.5768e+07} \cdot 100$	3.52e+03
$\frac{E6}{E8} \cdot 100$	$\frac{5.5566e+08}{5.4844e+06} \cdot 100$	1.016e+04
$\frac{E7}{E8} \cdot 100$	$\frac{1.5768e+07}{5.4844e+06} \cdot 100$	2.88e+02

E6 - energija spektra faze A, E7 - energija spektra faze B, E8 - energija spektra faze C

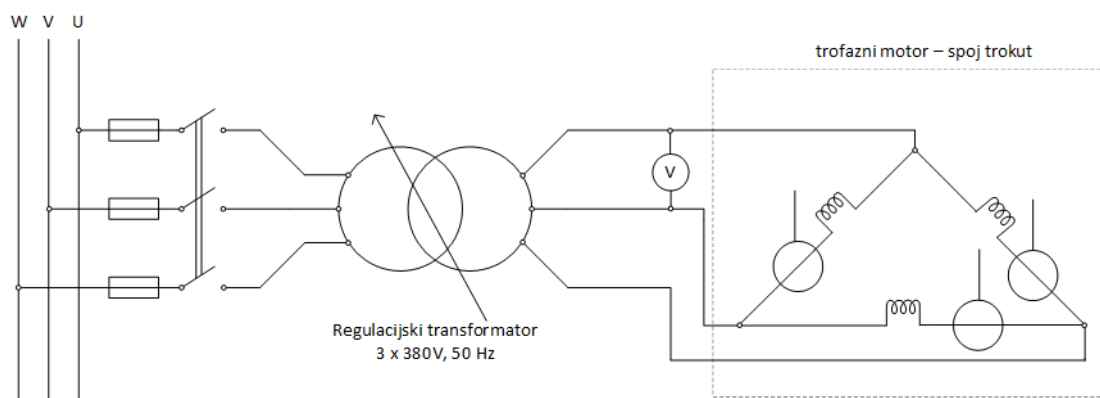
Prema tablici 4.25 i uvjetima postavljenim u algoritmu, može se zaključiti o postojanju kratkog spoja. Razlog velikih vrijednosti omjera je velika razlika u energiji između pojedinih faza, što nije slučaj za kvarna stanja s ekscentricitetom zračnog rasporeda ili kvarovima namota rotora. Primjenom algoritma na ovaj kvarni slučaj, kao rezultat se dobiva kratki spoj između faza A i C. Razlog ovakvog rezultata algoritma je vrijednost struje u fazi u kojoj je napravljen kratki spoj, čija je vrijednost je 3-4 puta veća od nazivne vrijednosti te ju je kao takvu teško razlikovati od kratkog spoja između 2 faze.

## 5. ANALIZA MJERENJA STRUJA MOTORA U KVARU

Eksperimentalna mjerenja su napravljena u fakultetskom laboratoriju za električne strojeve i pogone Zavoda za elektrostrojarstvo. Mjerenja su provedena na trofaznom asinkronom motoru čiji proizvođač je Končar, a nazivni podaci su prikazani u tablici 4.1. Ispitivanja su provedena na krutoj mreži pri opterećenju. Svrha mjerenja je bila izmjeriti i prikazati struje statora te ustanoviti radno stanje stroja analizom statorske struje. Rezultati su obrađeni u *MATLAB*-u i testirani u algoritmu za detekciju.

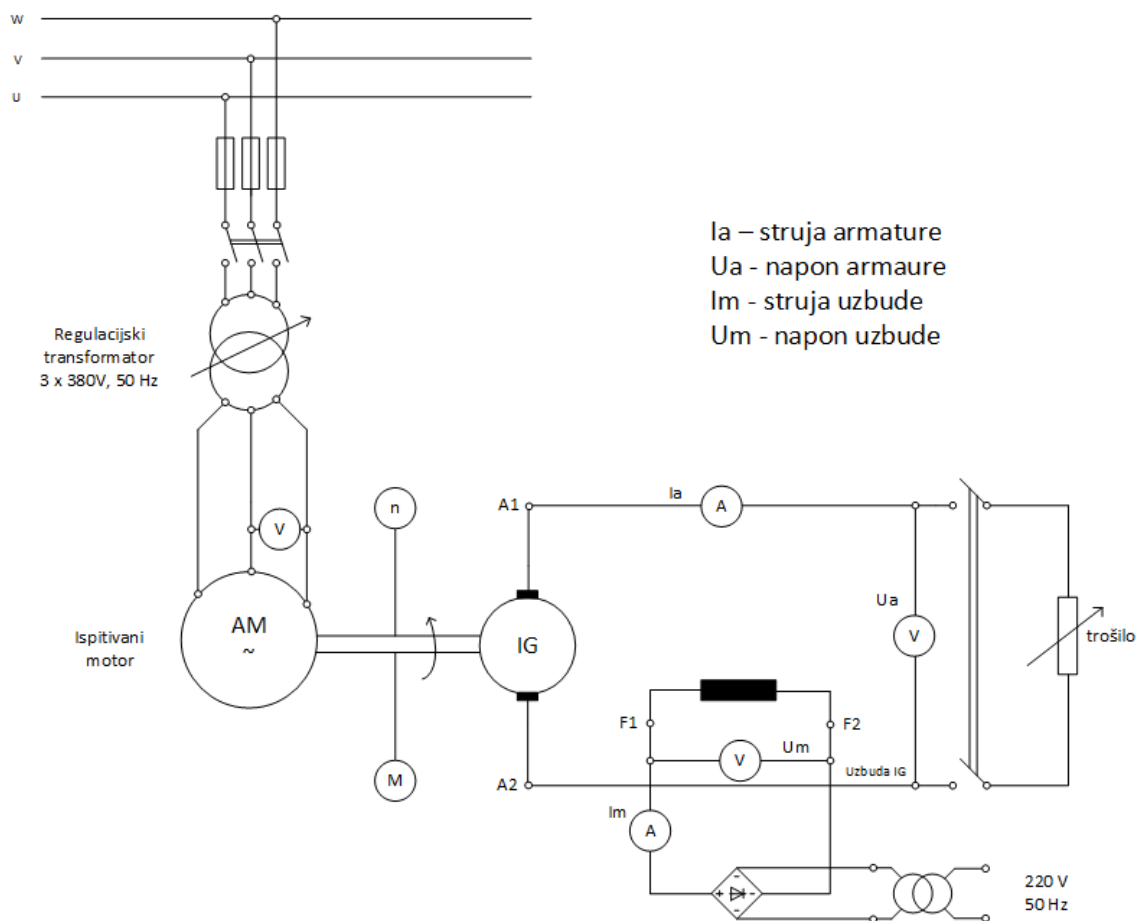
### 5.1. Mjerni postav

Trofazni asinkroni motor je spojen na mrežu u spoju trokut. Električna shema spoja se nalazi na slici 5.1.



Sl. 5.1: Električna shema spoja motora

Na slici 5.2 se nalazi shema priključka opterećenog stroja na ispitivani asinkroni motor. Motor je spojen u trokut, što je prikazano na električnoj shemi. Napon na motoru je konstantan i jednak nazivnom naponu. Maksimalna struja terećenja ne treba prelaziti 120 % nazivne vrijednosti. Terećenje asinkronog motora se vrši promjenom uzbuđivanja istosmjernog generatora i otporima za terećenje.



Sl. 5.2: Shema priključka opteretnog stroja na ispitivani asinkroni motor

Za prikupljanje podataka je korištena NI-DAQ USB-6212 AD kartica koja ima 16 analognih ulaza, 2 analogna izlaza i 8 digitalnih ulaza 5.3a. Tri najvažnije komponente su sklop za prikupljanje podataka, računalna sabirnica i analogno-digitalni pretvarač. DAQ kartice mogu još imati funkcije automatizacije procesa i mjernih sustava. Sklop za prikupljanje podataka uređuje i kontrolira signale koji mogu biti opasni za direktno slanje na analogno-digitalni pretvornik. Usred nekontroliranog signala, može doći do pojačavanja ili smanjivanja signala. Analogno-digitalni pretvornik prikuplja signale i uzorkuje ih u vremenskim intervalima, zatim ih kvantizira i digitalizira u oblik pogodan za slanje računalu. frekvencija uzorkovanja prema Nyquistovom teoremu mora biti barem dvostruko veća od najveće frekvencije signala (5-1).

$$F_N \geq 2 \cdot f_{max} \quad (5-1)$$

Takvi uzorci se šalju računalu preko sabirnice. Povezivanje DAQ kartice s računalom se izvršava serijskom komunikacijom (prenošenje podatka, bit po bit putem komunikacijskom kanala) pomoću USB-a. Spajanje naponskih i strujnih mjernih članova se vrši pomoću BNC priključnica. Za rezultate struja su korištena 3 analogna ulaza na kojim su se prikupljale struje svake faze. Najmanja vrijednost napona koju DAQ kartica može registrirati ovisi o ulaznom opsegu naponu, pa će tako za opseg  $\pm 0.2$  V rezolucija iznositi  $6.1 \mu\text{V}$ , a za najveći opseg  $\pm 10$  V  $0.305$  mV. Osim za mjerenje struja i napona, DAQ kartica omogućuje mjerenje sile, pritiska,

temperature zraka, pozicije, jakosti svjetlosti i još mnogo veličina uz korištenje odgovarajućeg mjernog člana.

Za mjerenje struja su korištena strujna kliješta LEM PR 430 koja su postavljena na mjerno područje od 40 A (Sl. 5.3b). Strujna kliješta omogućuju mjerenje struje bez prekida strujnog kruga, a rade na principu Hallovog osjetnika. Prolaskom izmjenične struje kroz vodič, stvara se promjenjivo magnetsko polje oko vodiča koje je proporcionalno jakosti izmjenične struje. Kliješta se postavljaju oko vodiča kojim protječe struja radi stvaranja magnetske petlje oko vodiča te na taj način strujna kliješta određuju jačinu polja oko vodiča, a za prikaz signala je potrebno dodati sklopove za analogno-digitalnu pretvorbu. Strujni mjerni član LEM PR 430 ima mogućnost mjerenja struja na vodičima čiji promjer je najviše 19 mm. Mjerno područje se može postaviti na 40 i 400 A. Za mjerno područje 40 A, kliješta na izlazu daju 10 mV po 1 amperu uz pogrešku očitavanja struje  $\pm 50$  mA, a za mjerno područje 400 A daju na izlazu 1 mV po 1 amperu, uz pogrešku očitavanja struje  $\pm 100$  mA. U slučaju potrebe se može povećati osjetljivost strujnog mjernog člana na način da se kroz stezaljke namota nekoliko namota testnog vodiča. Osjetljivost strujnog mjernog člana se povećava onoliko puta koliko je testnih namotaja dodano između stezaljki. Kao što je već navedeno, strujna kliješta se spajaju na DAQ karticu pomoću BNC priključnica. Pošto se koriste troja strujna kliješta, ona se spajaju na analogne ulaze A1, A2 i A3.



(a) NI-DAQ USB-6212 AD kartica

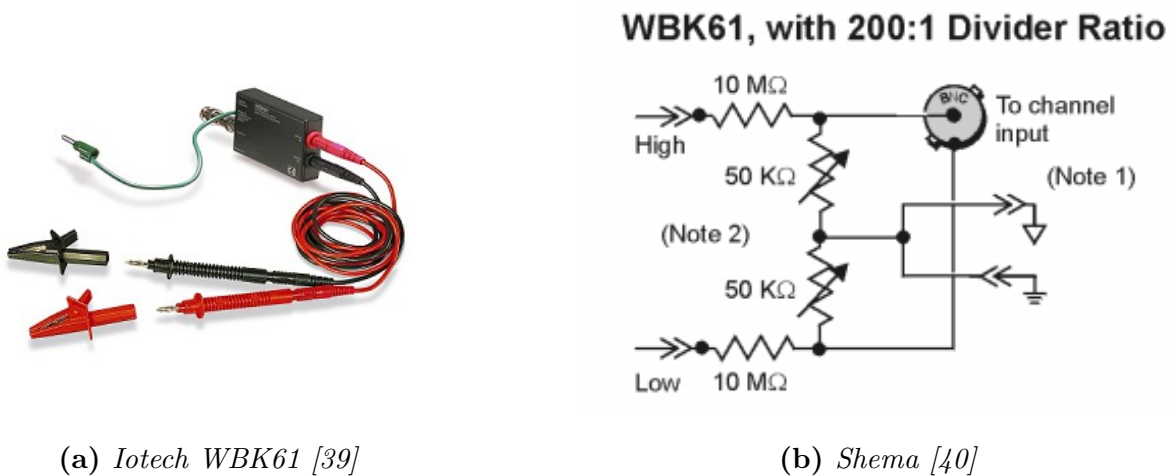


(b) Strujna kliješta LEM PR 430

Sl. 5.3: DAQ kartica lijevo i strujna kliješta s desne strane

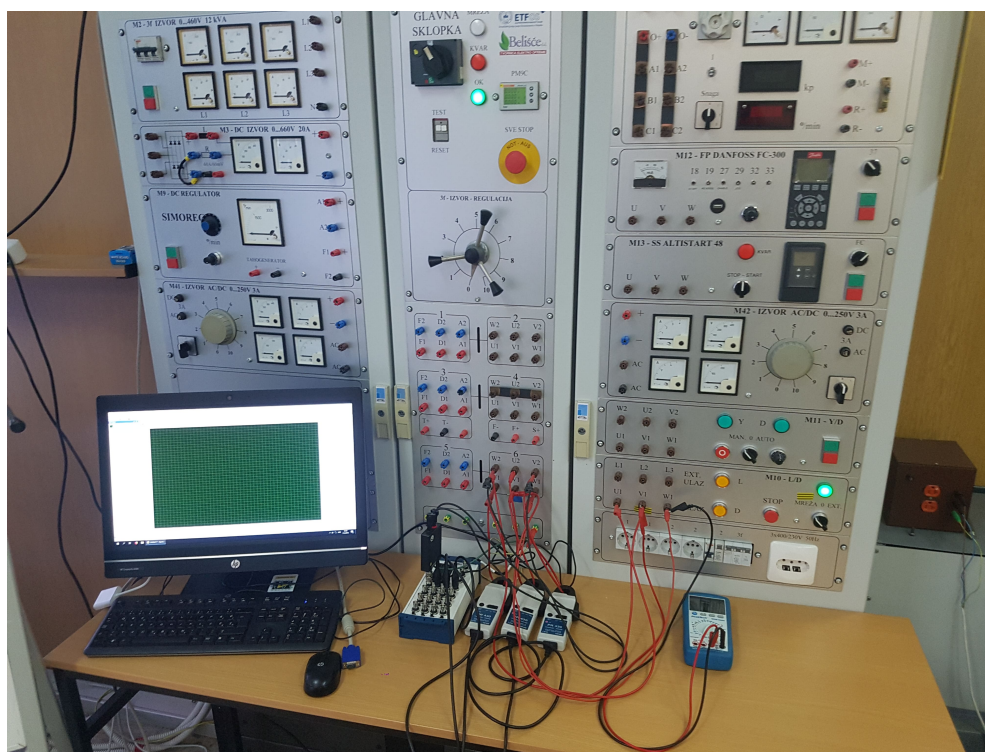
Mjerenje napona između dvije faze je omogućeno korištenjem naponskog mjernog člana Iotech WBK61 (Sl. 5.4a [39]). To su visokonaponski jednokanalni članovi koji se spajaju na DAQ karticu preko BNC priključnice. Omogućavaju mjerenje do 1000 V. Ulazi *Hi* i *Lo* sadrže otpornike od 10 M $\Omega$ , čime ograničavaju struju na 100  $\mu$ A pri 1000 V. Zeleni priključak (presjeka

4 mm) se uzemljuje. Ovom naponskom članu se može na ulaz dovesti maksimalno 1000 V vršne vrijednosti napona. Na slici 5.4b[40] se nalazi shema prikaz ovog modela. Ovaj mjerni član je priključen na DAQ karticu na analogni ulaz A0.



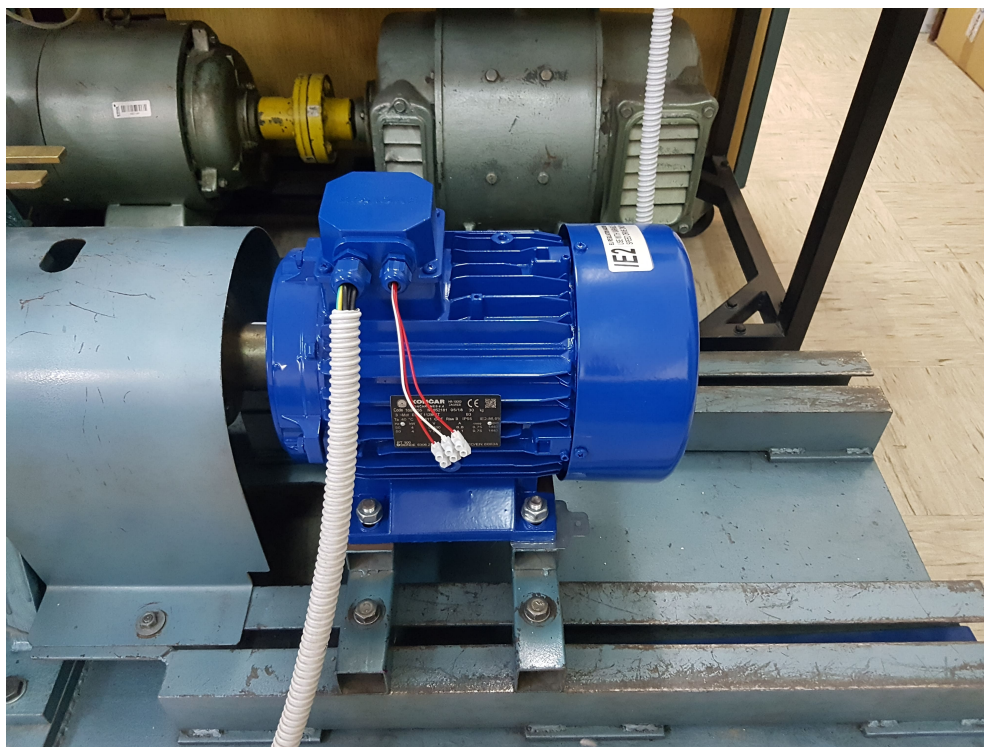
Sl. 5.4: Naponski mjerni član Iotech WBK61

Na slici 5.5 je prikazana radna stanica, a na slici 5.6 je testirani motor.



Sl. 5.5: Radna stanica



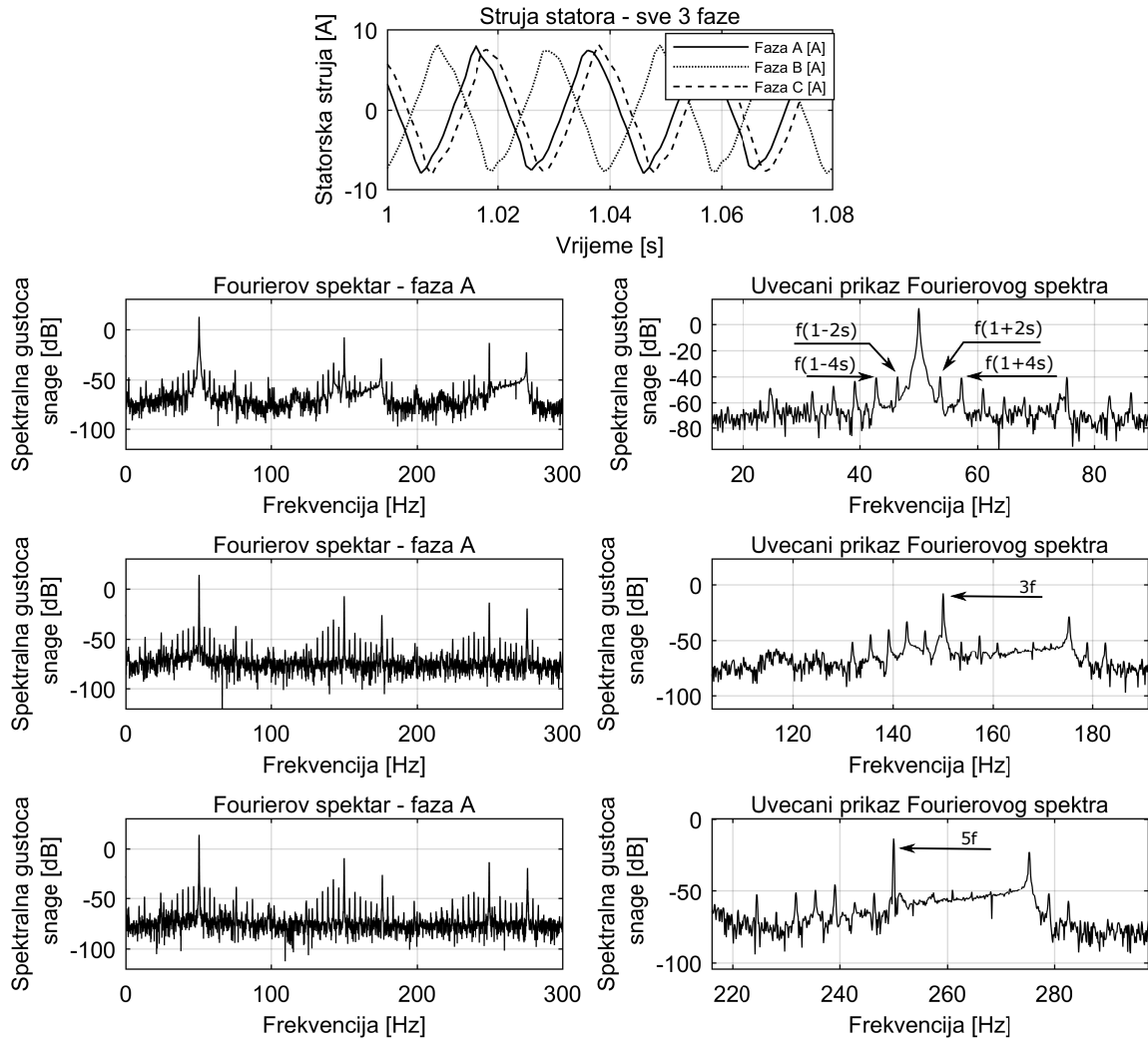


Sl. 5.6: Testirani motor

## 5.2. Mjerenje i analiza

Analiza prikupljenih podataka se izvršava u programu *NI Labview SignalExpress* gdje se može grafički prikazati signal u frekvencijskoj i vremenskoj domeni. U ovom programu se može prikazati spektralna gustoća energije u dB. Dakle, moguće je izvršiti FFT analizu nad ulaznim podacima. Da bi ta analiza bila što točnija, potrebno je snimljene podatke prilagoditi korištenjem prozorskih funkcija koje umanjuju efekt rubnih pojava. Snimljeni podaci ne počinju i ne završavaju u nuli, već imaju neku vrijednost koja automatski smanjuje točnost FFT analize. Prozorske funkcije imaju ulogu amplitude na početku i na kraju ulaznog signala postepeno dovesti u nulu. Za ovaj slučaj je korištena prozorska funkcija *Blackman*.

Pri obradi podataka u *MATLAB*-u, uvežena je datoteka *csv* formata koja sadrži rezultate u vremenskoj domeni. Datoteka sadrži 10 000 uzoraka pri čemu je vremenski razmak između 2 uzorka 0.001 s. Iz toga podataka se omjerom  $1/0.001$  dolazi do frekvencije uzorkovanja od 1000 Hz. Vrijednosti struje se mogu prikazati u dekadskom ili logaritamskom prikazu. Na slici 5.7 se nalaze obrađeni podaci, prikaz struje u vremenskoj i frekvencijskoj domeni. Na uvećanom prikazu se može vidjeti pojava karakterističnih frekvencija  $f(1 \pm 2ks)$  vezanih za puknuće štapova. Za razliku od rezultata simulacija, u ovom slučaju su izraženi i bočni harmonici na frekvencijama  $f(1 \pm 4s)$ . Promatrajući 3. i 5. harmonik, također se ističu bočni harmonici. U prikazu struje u vremenskoj osi, može se vidjeti da struje u ovom slučaju nisu fazno razmaknute za  $120^\circ$  električno.



Sl. 5.7: Rezultati mjerenja

Nakon dobivanja rezultata i uočavanja specifičnih frekvencija koje ukazuju na oštećenje kaveza, datoteka je uvežena u algoritam za detekciju kvarnog stanja. Već prema strujama u vremenskoj domeni se može zaključiti da postoje sve 3 faze, odnosno, kvar u vidu prekida faze se može odmah eliminirati. Nadalje, u tablici 5.1 je izvršena provjera omjera energija za utvrđivanje ekscentriciteta. Prema algoritmu za detekciju, jedan od omjera u bilo kojoj fazi mora biti veći od 20 %. U ovom slučaju, sve vrijednosti omjera su daleko manje od 1 % čime se može isključiti pojava ekscentriciteta zračnog raspora.

Ako se promatraju rezultati dobiveni u tablici 5.2, koja služi za provjeru puknutih štapova kaveza rotora, može se vidjeti da omjeri prelaze 1.41 %, a manji je od 2.01 % što je u uvjetu algoritma predstavlja 2 puknuta štapa rotora. Algoritam za ovaj kvarni slučaj ispisuje rezultat u *Command Windows*-u da motor ima 2 puknuta štapa na kavez u rotora.

Za svaki slučaj, napravljena je i provjera postojanja kratkog spoja, prikazana tablicom 5.3 u kojoj se vidi da se rezultati omjera ne poklapaju u potpunosti s uvjetom u algoritmu da

motor nema kratkih spojeva ako je omjer energija u tablici između 85 i 115 %. Pošto se radi o eksperimentalnom mjerenju, nije nerealno očekivati da se da će rezultati mjerenja razlikovati od simulacija, te se stoga može tvrditi da motor nema kratki spoj na statoru. U prilog tome ide i činjenica da su vršne vrijednosti linijskih struja u vremenskoj domeni između 8.2 i 8.3 A.

**Tab. 5.1:** Omjeri energija za provjeru ekscentriciteta - mjerenje

	Fourierov spektar faza A	Fourierov spektar faza B	Fourierov spektar faza C
Energija spektra (E1) raspon (44-56) Hz	1.7208e+08 J	2.4700e+08 J	2.4929e+08 J
Energija spektra (E2) raspon (23-27) Hz	6.9127e+03 J	4.9608e+02 J	2.2784e+03 J
Energija spektra (E3) raspon (73-77) Hz	7.4616e+03 J	2.2394e+03 J	2.4087e+03 J
(E2/E1)*100 [%]	0.004	2.008-04	9.139e-04
(E3/E1)*100 [%]	0.004	9.066e-04	9.662e-04

**Tab. 5.2:** Omjeri energija za provjeru puknutih štapova - mjerenje

	Fourierov spektar faza A	Fourierov spektar faza B	Fourierov spektar faza C
Energija spektra (E1) raspon (44-56) Hz	1.7207e+08 J	2.4700e+08 J	2.4929e+08 J
Energija spektra (E4) raspon (44-46) Hz	1.0769e+05 J	3.63e+08 J	3.751e+06 J
Energija spektra (E5) raspon (53-55) Hz	2.54e+06 J	2.0103e+03 J	1.8216e+04 J
((E4+E5)/E1)*100 [%]	1.54	1.47	1.51

**Tab. 5.3:** Omjeri energija za provjeru kratkog spoja - mjerenje

	omjer	vrijednost [%]
$\frac{E6}{E7} \cdot 100$	$\frac{1.7308e+09}{2.4731e+09} \cdot 100$	69.85
$\frac{E6}{E8} \cdot 100$	$\frac{1.7308e+09}{2.49275e+09} \cdot 100$	69.44
$\frac{E7}{E8} \cdot 100$	$\frac{2.4731e+09}{2.4927e+09} \cdot 100$	99.21

E6 - energija spektra faze A, E7 - energija spektra faze B, E8 - energija spektra faze C

## 6. ZAKLJUČAK

Analiza strujnog otiska motora je jedna od najznačajnijih *on – line* metoda za detekciju kvarova u ranoj fazi. Velika prednost ove metode je što se pogon ne mora zaustavljati prilikom mjerenja. Za analizu snimljenih struja, potrebno je poznavati Furierovu analizu te programski paket u kojem će se obrađivati rezultati.

U programskom paketu *Ansys Maxwell* su napravljeni 2D i 3D modeli za simulaciju. Prvotna ideja je bila stvoriti modele u programskom paketu *AutoCad*, ali je problem nastao pri uvozu modela u *Ansys Maxwell*, a nakon toga i pri mreženju modela za koji je trebalo više desetaka sati po kvarnom slučaju. Mana *Ansys Maxwell* programskog paketa je što mu dugo vremena treba za prepoznavanje strane geometrije. Prilikom kreiranja potpunih 3D modela koji su trebali predstavljati kvarne slučajeve ekscentriciteta zračnog rasporeda, nije bilo tehničkih mogućnosti za analizu. Konkretno, pojava grešaka vezana za preopterećen procesor je dovela do kreiranja 2D modela za ovakve kvarne slučajeve. Za sva ostala kvarna stanja, kreirane su polovice 3D modela što je računalo na fakultetu moglo obraditi. Za sve modele je postavljena visoka kvaliteta mreženja modela kako bi rezultati bili što vjerodostojniji i sličniji rezultatima iz raznih članaka iste tematike. Ukupno trajanje simulacije je iznosilo između 1500 i 2000 sati.

Rezultati dobiveni analizom pomoću metode konačnih elemenata su obrađivani u programskom paketu *MATLAB*. Korištenjem naredbe *fft* je primijenjena brza Fourierova transformacija na uvezene datoteke *csv* formata. Rezultati su prikazivani u logaritamskom prikazu koji daje jasniji i pregledniji Fourierov spektar u frekvencijskoj domeni. Na spektrima su se jasno vidjele specifične frekvencijske komponente za određeni kvar te su se podudarale s teorijskim razmatranjima. Na osnovu takvih rezultata je rađen algoritam za detekciju kvarnih stanja koji se temelji na omjerima energija spektara u frekvencijskom rasponu u kojem se nalazi frekvencija kvara i frekvencijskom rasponu oko osnovnog harmonika ili omjerom energija cijelog signala između faza. Iskustvenom metodom su postavljeni uvjeti u algoritmu za prepoznavanje. Problem pri detekciji može nastati kada motor ima više različitih kvarova odjednom, ali za slučajeve više kvarova odjednom nije bilo tehničkih mogućnosti. Postoje dva razloga zbog kojih se algoritam nije mogao usavršiti do kraja: jedan je dobivanje samo linijskih struja, a drugi je dobivanje rezultata napona za koji je ne može točno utvrditi koji je zapravo napon.

Osim simulacija, napravljeno je i mjerenje na stvarnom motoru istih specifikacija koje su se koristile za kreiranje pojedinih kvarnih slučajeva. Motor je opterećen pomoću istosmjernog generatora u laboratoriju za električne pogone. Struja motora je mjerena pomoću strujnih klijesta, a zatim je ta struja pomoću DAQ kartice prenesena na računalo gdje su rezultati obrađeni pomoću programskog paketa *NI Labview Signal Express*. Rezultati su zatim analizirani kroz algoritam za detekciju, čime je kao rezultat dobiven ispis da motor ima 2 slomljena štapa na kavez u rotora.

## Literatura

- [1] I. Mandić, V. Tomljenović, and M. Pužar. *Sinkroni i asinkroni električni strojevi*. Tehničko veleučilište u Zagrebu, 2012.
- [2] R. Wolf. *Osnove električnih strojeva*. Školska knjiga, Zagreb, 1995.
- [3] B. Frančić and M. Jadrić. *Dinamika električnih strojeva*. Graphis, Zagreb, 1997.
- [4] B. Liu, R. Badcock, H. Shu, and J. Fang. A superconducting induction motor with a high temperature superconducting armature: Electromagnetic theory, design and analysis. *Energies*, 11(4):792, 2018.
- [5] S. Nandi, H. A. Toliyat, and X. Li. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors—a review. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20(4):719–729, 2005.
- [6] S. Karmakar, S. Chattopadhyay, M. Mitra, and S. Sengupta. *Induction Motor Fault Diagnosis*. Springer-Verlag GmbH, 2016.
- [7] P. Vas. *Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines*. OXFORD UNIV PR, 1996.
- [8] Ležaj. [<https://blog.frenchgerleman.com/electric-motor-bearing-failure-use-proper-vfd-cable/>], (pristup ostvaren 3.3.2019.).
- [9] J. Brandlein, P. Eschmann, L. Hasbargen, and U. Merkle-Eschmann. *Ball and roller bearings: their theory, design and application*. 3 edition, 1999.
- [10] S. A. McInerny and Y. Dai. Basic vibration signal processing for bearing fault detection. *IEEE Transactions on Education*, 46(1):149–156, 2003.
- [11] G. B. Kliman, W. J. Premerlani, R. A. Koegl, and D. Hoeweler. A new approach to on-line turn fault detection in AC motors. In *IAS '96. Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference Thirty-First IAS Annual Meeting*. IEEE, 1996.
- [12] M. A. Cash. *Detection of turn faults arising from insulation failure in the stator windings of AC machines*. PhD thesis, 1998.
- [13] A. H. Bonnett and G. C. Soukup. Rotor failures in squirrel cage induction motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-22(6):1165–1173, 1986.
- [14] G. B. Kliman, R. A. Koegl, J. Stein, R. D. Endicott, and M. W. Madden. Noninvasive detection of broken rotor bars in operating induction motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 3(4):873–879, 1988.
- [15] A. H. Bonnett and G. C. Soukup. Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 28(4):921–937, 1992.

- [16] A. Miletić. *Dijagnostičke metode i kriteriji za ocjenu elektromehaničkog stanja asinkronog stroja*. PhD thesis, 2002.
- [17] B. Heller. *Harmonic field effects in induction machines*. distribution for the U.S.A. and Canada, Elsevier/North-Holland, 1977.
- [18] L. Illing. Fourier analysis, 2008. [<https://www.reed.edu/physics/courses/Physics331.f08/pdf/Fourier.pdf>], (pristup ostvaren 3.3.2019.).
- [19] H. Babić. *Signali i sustavi*, 1996.
- [20] S. M. Alessio. *Digital signal processing and spectral analysis for scientists*. Springer International Publishing, 2016.
- [21] A. Das. *Signal Conditioning*. Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [22] R. H. Shumway and D. S. Stoffer. *Time Series Analysis and Its Applications*. Springer New York, 2011.
- [23] R. M. Piedra. Parallel 1-d fft implementation with tms320c4x dsps, 1994.
- [24] D. Miljković. Brief review of motor current signature analysis. *HDKBR INFO Magazin, Vol.5 No 1, 2015.*, 2015.
- [25] R. R. Schoen, T. G. Habetler, F. Kamran, and R. G. Bartfield. Motor bearing damage detection using stator current monitoring. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 31(6):1274–1279, 1995.
- [26] S. Nandi and H. A. Toliyat. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical machines-a review. In *Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Forth IAS Annual Meeting (Cat. No.99CH36370)*. IEEE, 1999.
- [27] B. Yazici, G. B. Kliman, W. J. Premerlani, R. A. Koegl, G. B. Robinson, and A. Abdel-Malek. An adaptive, on-line, statistical method for bearing fault detection using stator current. In *IAS '97. Conference Record of the 1997 IEEE Industry Applications Conference Thirty-Second IAS Annual Meeting*. IEEE, 1997.
- [28] W. T. Thomson and M. Fenger. Current signature analysis to detect induction motor faults. *IEEE Industry Applications Magazine*, 7(4):26–34, 2001.
- [29] G. B. Kliman, R. A. Koegl, J. Stein, R. D. Endicott, and M. W. Madden. Noninvasive detection of broken rotor bars in operating induction motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 3(4):873–879, 1988.
- [30] F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, and P. Vas. AI techniques in induction machines diagnosis including the speed ripple effect. In *IAS '96. Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference Thirty-First IAS Annual Meeting*. IEEE, 1996.

- [31] B. G. Gaydon. An instrument to detect induction motor rotor circuit defects by speed fluctuation measurements. *Proc. Electric Test Measuring Instrumentation—Testmex Conf. Papers, 1979*, pp. 5–8, 1979.
- [32] A. Barbour and W. T. Thomson. Finite element study of rotor slot designs with respect to current monitoring for detecting static airgap eccentricity in squirrel-cage induction motors. In *IAS '97. Conference Record of the 1997 IEEE Industry Applications Conference Thirty-Second IAS Annual Meeting*. IEEE, 1997.
- [33] J. R. Cameron, W. T. Thomson, and A. B. Dow. Vibration and current monitoring for detecting airgap eccentricity in large induction motors. *IEE Proceedings B Electric Power Applications*, 133(3):155, 1986.
- [34] S. Nandi and H. A. Toliyat. Detection of rotor slot and other eccentricity related harmonics in a three phase induction motor with different rotor cages. In *1998 International Conference on Power Electronic Drives and Energy Systems for Industrial Growth, 1998. Proceedings*. IEEE, 1998.
- [35] A. Ferrah, P. J. Hogben-Laing, K. J. Bradley, G. M. Asher, and M. S. Woolfson. The effect of rotor design on sensorless speed estimation using rotor slot harmonics identified by adaptive digital filtering using the maximum likelihood approach. In *IAS '97. Conference Record of the 1997 IEEE Industry Applications Conference Thirty-Second IAS Annual Meeting*. IEEE, 1997.
- [36] D. G. Dorrell, W. T. Thomson, and S. Roach. Analysis of airgap flux, current and vibration signals as a function of the combination of static and dynamic airgap eccentricity in 3-phase induction motors. In *IAS '95. Conference Record of the 1995 IEEE Industry Applications Conference Thirtieth IAS Annual Meeting*. IEEE, 1995.
- [37] N. Bessous, S. E. Zouzou, S. Sbaa, W. Bentrach, Z. Becer, and R. Ajgou. Static eccentricity fault detection of induction motors using MVSA, MCSA and discrete wavelet transform (DWT). In *2017 5th International Conference on Electrical Engineering - Boumerdes (ICEE-B)*. IEEE, 2017.
- [38] S. Lemeš. Historijski razvoj, principi i primjena metoda konačnih elemenata, 2016. [<http://am.unze.ba/mkpr/MKE%201.pdf>], (pristup ostvaren 26.2.2019.).
- [39] Naponski mjerni član. [[https://www.logicbus.com/WBK61\\_p\\_1427.html](https://www.logicbus.com/WBK61_p_1427.html)], (pristup ostvaren 10.3.2019.).
- [40] Iotech wbk61. [[https://www.mccdaq.com/pdfs/manuals/wbk61\\_wbk62.pdf](https://www.mccdaq.com/pdfs/manuals/wbk61_wbk62.pdf)], (pristup ostvaren 12.3.2019.).

## Popis slika

2.1	Građa asinkronog motora [1] . . . . .	3
2.2	Klizno-kolutni asinkroni motor . . . . .	4
2.3	Rotorski namot u obliku kaveza [4] . . . . .	4
2.4	Momentna karakteristika [1] . . . . .	6
2.5	Ležaj [8] . . . . .	8
2.6	Zvijezda spoj statora uz prikaz različitih kvarova statorskog namota . . . . .	10
2.7	Vrste ekscentriciteta zračnog raspora . . . . .	12
3.1	Prozor za unos početnih vrijednosti . . . . .	25
4.1	Slijed koraka pri modeliranju i analizi strukture . . . . .	30
4.2	Odabir stroja . . . . .	35
4.3	Izbornik . . . . .	35
4.4	Ovisnost momenta o brzini vrtnje . . . . .	36
4.5	Ovisnost korisnosti o brzini vrtnje . . . . .	37
4.6	Usporedba između grafova . . . . .	38
4.7	2D model elektromotora - lijevo, izbornik - desno . . . . .	39
4.8	Statički ekscentricitet - sve 3 faze i karakteristične frekvencije . . . . .	40
4.9	Dinamički ekscentricitet - sve 3 faze i karakteristične frekvencije . . . . .	42
4.10	Mješoviti ekscentricitet - sve 3 faze i karakteristične frekvencije . . . . .	44
4.11	3D model elektromotora . . . . .	46
4.12	Postavke simulacije . . . . .	47
4.13	3D model motora . . . . .	48
4.14	Ispravan motor - sve 3 faze i karakteristične frekvencije . . . . .	49
4.15	Modeliranje 1 prekinutog štapa . . . . .	50
4.16	Prekinut 1 štap kaveza - sve 3 faze i karakteristične frekvencije . . . . .	51
4.17	Modeliranje 2 prekinuta štapa . . . . .	53
4.18	Prekinuta 2 štapa kaveza - sve 3 faze i karakteristične frekvencije . . . . .	54
4.19	Modeliranje 3 prekinuta štapa . . . . .	55
4.20	Prekinuta 3 štapa kaveza - sve 3 faze i karakteristične frekvencije . . . . .	56
4.21	Usporedba bočnih harmonika za slučajeve s 0,1,2 i 3 slomljena štapa kaveza rotora . . . . .	56
4.22	Modeliranje puknutog prstena . . . . .	57
4.23	Puknut prsten kaveza - sve 3 faze i karakteristične frekvencije . . . . .	58
4.24	Model prekida 1 faze . . . . .	59
4.25	Prekid faze A - sve 3 faze i karakteristične frekvencije . . . . .	60
4.26	Model kratkog spoja između 2 faze . . . . .	61
4.27	Kratki spoj između 2 faze - sve 3 faze i karakteristične frekvencije . . . . .	62
4.28	Model kratkog spoja između utora . . . . .	63
4.29	Kratki spoj između utora faze - sve 3 faze i karakteristične frekvencije . . . . .	63
5.1	Elektricna shema spoja motora . . . . .	65



5.2	Shema priključka opterećenog stroja na ispitivani asinkroni motor . . . . .	66
5.3	DAQ kartica lijevo i strujna kliješta s desne strane . . . . .	67
5.4	Naponski mjerni član Iotech WBK61 . . . . .	68
5.5	Radna stanica . . . . .	68
5.6	Testirani motor . . . . .	69
5.7	Rezultati mjerenja . . . . .	70

## Popis tablica

2.1	Područje rada u ovisnosti o klizanju . . . . .	6
2.2	Vijek trajanja izolacije u ovisnosti o temperaturi[12] . . . . .	11
3.1	4 oblika Fourierove transformacije . . . . .	20
3.2	Poveznice između domena i vrsta signala . . . . .	21
3.3	Varijabla <i>omjer5</i> u odnosu na broj prekinutih štapova . . . . .	27
4.1	Nazivni podaci motora . . . . .	33
4.2	Konstruktivski podaci motora . . . . .	34
4.3	Usporedba rezultata . . . . .	36
4.4	Postavljanje vrijednosti . . . . .	39
4.5	Omjeri energija za provjeru ekscentriciteta - statički ekscentricitet . . . . .	41
4.6	Omjeri energija za provjeru puknutih štapova - statički ekscentricitet . . . . .	41
4.7	Omjeri energija za provjeru kratkog spoja - statički ekscentricitet . . . . .	42
4.8	Omjeri energija za provjeru ekscentriciteta - dinamički ekscentricitet . . . . .	43
4.9	Omjeri energija za provjeru puknutih štapova - dinamički ekscentricitet . . . . .	43
4.10	Omjeri energija za provjeru kratkog spoja - dinamički ekscentricitet . . . . .	44
4.11	Omjeri energija za provjeru ekscentriciteta - mješoviti ekscentricitet . . . . .	45
4.12	Omjeri energija za provjeru puknutih štapova - mješoviti ekscentricitet . . . . .	45
4.13	Omjeri energija za provjeru kratkog spoja - mješoviti ekscentricitet . . . . .	46
4.14	Omjeri energija za provjeru ekscentriciteta - ispravan motor . . . . .	48
4.15	Omjeri energija za provjeru puknutih štapova - ispravan motor . . . . .	50
4.16	Omjeri energija za provjeru kratkog spoja - ispravan motor . . . . .	50
4.17	Omjeri energija za provjeru ekscentriciteta - 1 prekinut štap . . . . .	52
4.18	Omjeri energija za provjeru puknutih štapova - 1 prekinut štap . . . . .	52
4.19	Omjeri energija za provjeru kratkog spoja - 1 prekinut štap . . . . .	52
4.20	Omjeri energija za provjeru puknutih štapova - 2 prekinuta štapa . . . . .	53
4.21	Omjeri energija za provjeru puknutih štapova - 3 prekinuta štapa . . . . .	55
4.22	Vrijednosti bočnih harmonika . . . . .	57
4.23	Omjeri energija za provjeru puknutih štapova - Puknut prsten . . . . .	58
4.24	Omjeri energija za provjeru kratkog spoja - kratki spoj između faza . . . . .	61
4.25	Omjeri energija za provjeru kratkog spoja - kratki spoj između utora iste faze . . . . .	64
5.1	Omjeri energija za provjeru ekscentriciteta - mjerenje . . . . .	71
5.2	Omjeri energija za provjeru puknutih štapova - mjerenje . . . . .	71
5.3	Omjeri energija za provjeru kratkog spoja - mjerenje . . . . .	71

## Sažetak

U ovom diplomskom radu je opisana jedna od najznačajnijih *on – line* metoda za dijagnostiku kvara motora (*MCSA*). Ova metoda je bazirana na snimanju statorskih struja i spektralnoj analizi putem brze Fourierove transformacije. Fourierov spektar može pomoći pri određivanju karakterističnih frekvencija kvarova. Promatrajući ispravan motor u odnosu na kvarno stanje, može se zaključiti o kakvom kvaru se radi. Pri snimanju struja, motor treba biti opterećen teretom od barem 70% nazivnog momenta. Na temelju rezultata, kreiran je algoritam koji je baziran na omjerima energije signala i koji odlučuje o tipu kvara.

**Ključne riječi:** asinkroni stroj, Fourierova analiza, energija signala, tip kvara, kvarno stanje, statorska struja

## **Abstract**

### **Detection of fault conditions of the induction motor via power spectrum analysis**

One of the most significant on line diagnostic methods for fault condition of induction motor (*MCSA*) has been described in this master thesis. This method is based on recording stator currents and spectral analysis through fast Fourier transformation. The Fourier spectrum can help to determine the characteristic fault frequencies. Considering a healthy motor in relation to unhealthy motor, it can be concluded about type of failure state. When recording the current, the motor must be loaded with a load of at least 70 % of the nominal torque. Based on the results, an algorithm, which is based on the signal energy ratios and decides about type of failure, was created.

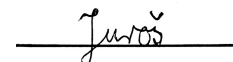
**Key words:** induction machine, Fourier analysis, signal energy, type of failure, fault condition, stator current

## Životopis

Tomislav Juroš je rođen 29.5.1994. u Đakovu. Odrastao je u Semeljcima gdje u Osnovnoj školi Josipa Kozarca završava osam razreda osnovnoškolskog obrazovanja s odličnim prosjekom. Nakon završene osnovne škole upisuje Gimnaziju Antuna Gustava Matoša u Đakovu, smjer matematički, gdje ostvaruje odličan uspjeh kroz sve četiri godine srednjoškolskog obrazovanja. Tijekom svog obrazovanja aktivno je igrao nogomet i stolni tenis.

Nakon završetka srednje škole, 2013. godine ostvaruje izravan upis na preddiplomski studij elektrotehnike na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku. Tokom preddiplomskog studija, dodjeljuje mu se nagrada sponzora fakulteta za uspjeh postignut u studiranju. Diplomski studij upisuje 2016. godine, smjer industrijska elektroenergetika. Stručnu praksu je odradio u tvrtki AIP d.o.o. pod vodstvom mentora Antuna Pravečeka.

Tomislav Juroš

A handwritten signature in black ink, reading 'Juroš', is positioned above a solid horizontal line.

## PRILOG 1

### MATLAB program - učitavanje dokumenata za Fourierovu analizu

```
%DIPLOMSKI RAD – MCSA METODA
%%TOMISLAV JUROS
%%FFT ANALIZA – UCITAVANJE DOKUMENATA
%%14.3.2019.
clear all;
clc;
source_dir='C:\Users\Tomislav\Desktop\FFT_Matlab';
source_files=dir(fullfile(source_dir, '*.CSV')); %%Unos svih csv fajlova
Fs = 600; % Frekvencija uzorkovanja
T = 1/Fs; % racunanje perioda
Fn = Fs/2; % Nyquist Frequency

for k=1:length(source_files)

    filename{k}=dlmread(source_files(k).name, ', ', 1, 0);
    X=filename{k};

f = figure;
X=X(100:end, :);
%Ovisnost struje o vremenu – sve 3 faze
p1=1;
ax(p1)=subplot(4,1,p1);
ax(p1).Position(1)=0.5-ax(p1).Position(3)/2;
plot(X(:,1),X(:,2), '- ', 'Linewidth', 1.5); hold on;
plot(X(:,1),X(:,3), ': ', 'Linewidth', 2); hold on;
plot(X(:,1),X(:,4), '- — ', 'Linewidth', 1.5); hold on;
legend({'Faza A [A]', 'Faza B [A]', 'Faza C [A]'}, 'FontSize', 7);
xlim([1 1.08]); %Ogranicenje po x-osi
grid on;
title('Struja statora – sve 3 faze')
xlabel('Vrijeme [s]')
ylabel('Statorska struja [A]')
X=X(100:end, :);
L=length(X);
FXa = fft(X(:,2))/L;
FXb = fft(X(:,3))/L;
FXc = fft(X(:,4))/L;
Fv = linspace(0, 1, fix(L/2)+1)*Fn;
Iv = 1:length(Fv);
% PRIKAZ SPEKTRA FAZE A
subplot(4,1,2);
a=20*log10(abs(FXa(Iv))*2);
plot(Fv, a);
ylim([-90 35]);
grid on;
```

```

title('Fourierov spektar – faza A')
xlabel('Frekvencija [Hz]')
ylabel({'Spektralna gustoca', 'snage [dB]'})
% PRIKAZ SPEKTRA FAZE B
subplot(4,1,3);
b=20*log10(abs(FXb(Iv))*2);
plot(Fv,b);
ylim([-90 35]);
grid on;
title('Fourierov spektar – faza B')
xlabel('Frekvencija [Hz]')
ylabel({'Spektralna gustoca', 'snage [dB]'})
% PRIKAZ SPEKTRA FAZE C
subplot(4,1,4);
c=20*log10(abs(FXc(Iv))*2);
plot(Fv,c);
ylim([-90 35]);
grid on;
title('Fourierov spektar – faza C')
xlabel('Frekvencija [Hz]')
ylabel({'Spektralna gustoca', 'snage [dB]'})
end

```

## PRILOG 2

### MATLAB program - algoritam za detekciju kvarova

```
%DIPLOMSKI RAD – ALGORITAM ZA DETEKCIJU
%TOMISLAV JUROS
%FFT ANALIZA
%%14.3.2019.
clear all;
clc;
X = dlmread('Currents_ecc_stat0.12.csv',',',',1,0); %uvoz dokumenta

%%kreiranje prozora za unos parametara
prompt = {'Upisati nazivnu struju motora:'};
title = 'Unos parametara';
dims = [1 35];
definput = {'8.5','600'}; % upisivanje nazivne struje
answer = inputdlg(prompt, title, dims, definput)

user_value2= str2num(answer{2}); % unos frekvencije uzorkovanja
Fs = user_value2; % Frekvencija uzorkovanja
T = 1/Fs; % racunanje perioda
Fn = Fs/2; % Nyquistova frekvencija

X=X(100:end,:);
L=length(X); % sirina prozora – broj uzoraka

N1=max(X(:,2)); % maksimum u fazi A
N2=max(X(:,3)); % maksimum u fazi B
N3=max(X(:,4)); % maksimum u fazi C
user_value= str2num(answer{1});
FXa = fft(X(:,2))/L;
FXb= fft(X(:,3))/L;
FXc= fft(X(:,4))/L;
Fv = linspace(0, 1, fix(L/2)+1)*Fn;
Iv = 1:length(Fv);
F1=fft(X(:,2)); % FAZA 1
pow1=F1.*conj(F1); % izracun snage
Etot1=sum(pow1); %ukupna energija A

F2=fft(X(:,3)); % FAZA 2
pow2=F2.*conj(F2); % izracun snage
Etot2=sum(pow2); %ukupna energija faze B

F3=fft(X(:,4)); % FAZA 3
pow3=F3.*conj(F3); % izracun snage
Etot3=sum(pow3); %ukupna energija faze C
```



```

df=Fs/L; % sirina 1 uzorka
E1=2*sum(pow1(Fv>=44 & Fv<=56,:))*df; % energija oko 50 Hz

%% EKSCENTRICNOST
E2=2*sum(pow1(Fv>=23 & Fv<=27,:))*df; % energija u frekvencijskom opsegu
omjer2 =(E2/E1)*100; % omjer u % u odnosu na raspon (23–27) Hz

E3=2*sum(pow1(Fv>=73 & Fv<=77,:))*df; % 75 Hz
omjer3 =(E3/E1)*100;

%% PUKNUTI STAPOVI
E4=2*sum(pow1(Fv>=44 & Fv<=46,:))*df;
E5=2*sum(pow1(Fv>=53 & Fv<=55,:))*df;
omjer5=((E4+E5)/E1)*100;

%% KRATKI SPOJEVI
omjer31= (Etot1/Etot2)*100;
omjer32= (Etot1/Etot3)*100;
omjer33= (Etot2/Etot3)*100;

%% IF STATEMENTS

if (N1==0 || N2==0 || N3==0)
    if (N1==0)
        disp('Postoji prekid u fazi A. ');
    elseif (N2==0)
        disp('Postoji prekid u fazi B. ');
    else (N3==0)
        disp('Postoji prekid u fazi C. ');
    end
elseif (omjer2>25 && omjer3>20)
    disp('Postoji ekscentricitet zracnog raspora. ');
elseif (omjer31<60 || omjer31>300 || omjer32<60 || omjer32 >300...
|| omjer33<60 || omjer33>300)
    if (N1 >=3*user_value || N2 >=3*user_value || N3 >=3*user_value)
        if (N1 >=3*user_value)
            if (N3>N2)
                disp('Postoji kratki spoj izmedu faza A i B. ');
            else disp ('Postoji kratki spoj izmedu faza A i C. ');
            end
        elseif (N2 >=3*user_value)
            if (N1>N3)
                disp('Postoji kratki spoj izmedu faza B i C. ');
            else disp ('Postoji kratki spoj izmedu faza A i B. ');
            end
        else (N3>=3*user_value)
            if(N1>N2)

```

```

                disp('Postoji kratki spoj izmedu faza B i C. ');
                else disp ('Postoji kratki spoj izmedu faza A i C. ')
            end
        end
    end
end

elseif (N1<=2.5*N2 && N1>=1.5*N2 || N1<=2.5*N3 && N1>=1.5*N3)
    disp('Postoji kratki spoj izmedu zavoja u fazi A. ');
elseif (N2<=2.5*N1 && N2>=1.5*N1 || N2<=2.5*N3 && N2>=1.5*N3)
    disp('Postoji kratki spoj izmedu zavoja u fazi B. ');
elseif (N3<=2.5*N2 && N3>=1.5*N2 || N3<=2.5*N1 && N3>=1.5*N1)
    disp('Postoji kratki spoj izmedu zavoja u fazi C. ');
elseif (omjer5>0.98)
    if (omjer5 >0.98&& omjer5 <1.41)
        disp('Motor ima jedan slomljen rotorski stap. ');
    elseif (omjer5>1.41 && omjer5 <2.01)
        disp('Motor ima dva slomljena rotorska stapa. ');
    elseif (omjer5>2.01)
        disp('Motor ima tri ili vise slomljenih rotorskih stapova. ');
    end
else disp('Motor je ispravan. ');
end

```