



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U
NOVOM SADU



mr Dejan Reljić

**OTKRIVANJE KVARA ROTORA
KAVEZNOG ASINHRONOG MOTORA
PRIMENOM TEHNIKA ANALIZE
TERMINALNIH VELIČINA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Novi Sad, 2017.



КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР :	
Идентификациони број, ИБР :	
Тип документације, ТД :	Монографска документација
Тип записа, ТЗ :	Текстуални штампани материјал
Врста рада, ВР :	Докторска дисертација
Аутор, АУ :	Дејан Рељић
Ментор, МН :	Дарко Марчетић
Наслов рада, НР :	Откривање квара ротора кавезног асинхроног мотора применом техника анализе терминалних величина
Језик публикације, ЈП :	српски
Језик извода, ЈИ :	српски/енглески
Земља публикавања, ЗП :	Република Србија
Уже географско подручје, УГП :	АП Војводина
Година, ГО :	2017.
Издавач, ИЗ :	Ауторски репринт
Место и адреса, МА :	Факултет техничких наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад
Физички опис рада, ФО : (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	8/132/192/19/52/0/0
Научна област, НО :	Електротехничко и рачунарско инжењерство
Научна дисциплина, НД :	Енергетска електроника, машине и погони
Предметна одредница/Кључне речи, ПО :	Кавезни асинхронни мотор, математички модел, анализа терминалних величина, откривање прекида штапних проводника ротора
УДК	
Чува се, ЧУ :	Библиотека Факултета техничких наука, Универзитет у Новом Саду
Важна напомена, ВН :	
Извод, ИЗ :	У дисертацији је предложена метода за поуздано откривање квара ротора трофазног кавезног асинхроног мотора. Метода је заснована на идентификацији обележја квара ротора из сигнала терминалних величина једнофазно напојеног трофазног кавезног мотора у стационарном стању погона. Предложена метода елиминише потребу за постојања оптерећења мотора, што је основна предност у односу на решења из литературе. Сва теоријска разматрања су праћена одговарајућим резултатима рачунарских симулација, да би се потом спровела експериментална верификација и потврдила ефикасност предложене методе. Такође, представљен је поступак за квантитативну процену оштећења штапних проводника ротора.
Датум прихватања теме, ДП :	9. фебруар 2017.
Датум одбране, ДО :	
Чланови комисије, КО :	Председник: др Владимир Катић, редовни професор
	Члан: др Веран Васић, редовни професор
	Члан: др Ђура Орос, ванредни професор
	Члан: др Петар Матић, ванредни професор
	Члан, ментор: др Дарко Марчетић, редовни професор
	Потпис ментора



KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	Monographic publication
Type of record, TR :	Textual printed material
Contents code, CC :	Doctoral dissertation
Author, AU :	Dejan Reljić
Mentor, MN :	Darko Marčetić
Title, TI :	Induction motor broken bar fault detection based on the analysis of motor terminal quantities
Language of text, LT :	Serbian
Language of abstract, LA :	Serbian/English
Country of publication, CP :	Republic of Serbia
Locality of publication, LP :	Autonomous Province of Vojvodina
Publication year, PY :	2017
Publisher, PB :	Author's reprint
Publication place, PP :	Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	8/132/192/19/52/0/0
Scientific field, SF :	Electrical and computer engineering
Scientific discipline, SD :	Power electronics, electrical machines and drives
Subject/Key words, S/KW :	Squirrel-cage induction motor, mathematical model, analysis of motor terminal quantities, broken rotor bar fault detection
UC	
Holding data, HD :	Library of the Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad
Note, N :	
Abstract, AB :	In this Doctoral dissertation, a novel method for broken rotor bar fault detection in a three-phase squirrel-cage induction motor (IM) is introduced. The proposed method is non-invasive and it is based on the analysis of the IM terminal quantities in a single-phase steady-state operating condition. Compared to conventional fault detection techniques, the developed method does not require any loading on the motor, which is the main benefit of the method. The faulty condition of broken rotor bars was investigated analytically, while the effectiveness of the proposed method was proven by the variety of computer simulations and experimental results. Based on these results, a methodology for the quantification of broken rotor bars in the IM has been presented.
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	February 9, 2017
Defended on, DE :	
Defended Board, DB :	President: Vladimir Katić, PhD, full professor
	Member: Veran Vasić, PhD, full professor
	Member: Đura Oros, PhD, associate professor
	Member: Petar Matic, PhD, associate professor
	Member, Mentor: Darko Marčetić, PhD, full professor
	Mentor's sign

SADRŽAJ

1. Uvod	1
1.1 Uvodna razmatranja.....	1
1.2 Predmet i cilj istraživanja	3
1.3 Pregled literature.....	4
1.3.1 Metode zasnovane na analizi signala buke motora.....	5
1.3.2 Metode zasnovane na analizi signala mehaničkih vibracija motora.....	6
1.3.3 Metode zasnovane na analizi signala elektromagnetskog momenta motora	8
1.3.4 Metode zasnovane na analizi signala brzine obrtanja motora	10
1.3.5 Metode zasnovane na analizi signala polja rasutog magnetskog fluksa motora.....	10
1.3.6 Metode zasnovane na analizi signala struja motora	12
1.3.7 Metode zasnovane na analizi signala potencijala zvezdišta namotaja motora	18
1.3.8 Metode zasnovane na analizi signala električnih snaga motora	18
1.4 Kratak sadržaj i organizacija disertacije	20
2. Obeležja neuravnoteženosti električnog kola rotora u uobičajenim pogonskim uslovima... 22	
2.1 Obeležja kvara rotora u spektru struja motora.....	23
2.2 Obeležja kvara rotora u spektru elektromagnetskog momenta motora.....	29
2.3 Obeležja kvara rotora u spektru brzine obrtanja motora.....	31
2.4 Uticaj oscilacija brzine obrtanja na struju motora	32
2.5 Neinvazivne metode za detekciju kvara rotora.....	35
2.5.1 Metoda spektralne analiza signala struje motora.....	36
2.5.2 Metoda spektralne analize signala električne snage motora.....	40
2.5.3 Metoda spektralne analize signala mehaničkih vibracija kućišta motora.....	44
3. Obeležja neuravnoteženosti električnog kola rotora u izmenjenim uslovima napajanja 48	
3.1 Trofazni kavezni asinhroni motor napajan jednofaznim naponom.....	49
3.2 Obeležja kvara rotora u spektru struje motora.....	52
3.3 Obeležja kvara rotora u spektru elektromagnetskog momenta motora.....	54
3.4 Obeležja kvara rotora u spektru brzine obrtanja motora.....	56

3.5 Uticaj oscilacija brzine obrtanja na struju motora	57
3.6 Obeležja kvara rotora u spektru trenutne vrednosti električne snage motora	64
3.7 Predlog nove metode za otkrivanje kvara rotora	64
4. Matematičko modelovanje kvara rotora u radu trofaznog kaveznog motora	65
4.1 Matematički model trofaznog kaveznog motora	66
4.2 Uvažavanje konfiguracije statorskih namotaja	70
4.3 Određivanje električnih parametara kaveznog asinhronog motora	73
4.4 Rezultati simulacija	77
4.5 Diskusija rezultata	88
5. Postupak za procenu oštećenja rotora trofaznog kaveznog motora	89
5.1 Strategije održavanja industrijskih sistema	89
5.2 Primena metoda veštačke inteligencije u strategiji prediktivnog održavanja	91
5.3 Veštačke neuronske mreže u proceni oštećenja rotora trofaznog kaveznog motora	92
5.3.1 Osnovni pojmovi o neuronskim mrežama	92
5.3.2 Procena oštećenja štapnih provodnika primenom neuronske mreže	96
6. Eksperimentalni rezultati	102
6.1 Opis postavke i tok eksperimenta	102
6.2 Eksperimentalna verifikacija predložene metode	105
6.3 Provera predloženog postupka za procenu oštećenja štapnih provodnika rotora	115
6.4 Završna razmatranja	117
7. Zaključak	119
8. Literatura	121

1. UVOD

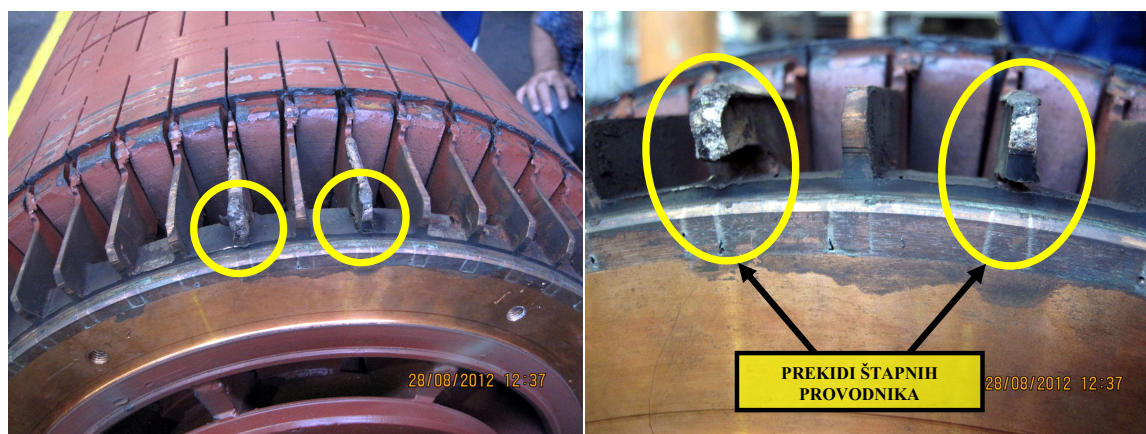
U ovom poglavlju je dat kratak pregled disertacije. Nakon uvodnih razmatranja definisan je predmet i cilj istraživanja. Dat je osvrt na stanje u oblasti uz prikaz relevantne naučne literature. Naveden je kratak sadržaj disertacije po poglavljima.

1.1 Uvodna razmatranja

Predmet naučne rasprave u okviru disertacije je rano otkrivanje kvara (engl. *fault detection*) rotora kaveznog asinhronog motora primenom tehnika analize terminalnih veličina motora. Trofazni asinhroni motori predstavljaju najzastupljeniju vrstu električnih mašina u oblasti elektromehaničke konverzije energije. Njihov udeo u savremenim električnim pogonima različitih vrsta procenjuje se na oko 80% [1], [2]. Među njima, najširu primenu imaju kavezni asinhroni motori [3]. Oni su ključni elementi u modernim industrijskim sistemima, te je jasno da od njihove raspoloživosti zavise mnogi procesi u energetsom sektoru, rudarstvu, petrohemijskoj i hemijskoj industriji [4], kao i u drugim industrijskim granama. Asinhroni motori se koriste i u okviru pogona kao što su nuklearne elektrane, vojni i avio-sistemi, gde njihova sigurnost u radu mora biti na izuzetno visokom nivou [2]. Zahvaljujući razvoju uređaja energetske elektronike i mikrokontrolera, te upotrebi različitih algoritama digitalnog upravljanja, njihova je primena proširena i na moderne pogone hibridnih i električnih vozila [5], [6], [7].

Uprkos svojoj robusnosti, koja proističe iz jednostavne konstrukcije, kavezni asinhroni motori su podložni različitim vrstama kvarova [8]. Oni su posledice električnih, magnetskih i mehaničkih naprezanja, ali i uticaja okoline kojima su ovi motori izloženi tokom svoje eksploatacije. Bilo koja vrsta kvara motora potencijalno može dovesti do značajnog narušavanja pouzdanosti elektromotornog pogona. Bilo kakvo neplansko zaustavljanje pogona dovodi do uvećanja troškova otklanjanja kvara, ali sa sobom nosi i izvesne rizike, jer otkaz motora u okviru vitalnih pogona (npr. u hemijskoj ili vojnoj industriji, pogonima u eksplozivnoj atmosferi, nuklearnim elektranama i sl.) može imati nesagledive posledice.

Kvarovi asinhronih motora se prema [9] mogu klasifikovati u dve kategorije: mehanički i električni. Mehanički kvarovi obuhvataju oštećenja ležaja, ekscentricitet rotora, nesaosnost vratila motora i radne mašine, dok su tipični električni kvarovi vezani za oštećenja statorskog namotaja (međunavojni kratak spoj, proboj izolacije) i rotora (delimični ili potpuni prekidi štapnih provodnika i kratkospojnih prstenova) [9], [10], [11], [12]. Istraživanja su pokazala da kvarovi rotora (oštećenja štapnih provodnika ili kratkospojnog prstena) čine oko 10% ukupnih kvarova kaveznih asinhronih motora [13], [14], [15], [16]. Iako ova vrsta kvara nije česta, njenoj detekciji se pridaje veliki značaj u industrijskim sistemima. Naime, oštećenja rotora mogu dovesti do neželjenih pojava u samom motoru i pogonu, kao što su pulsacije elektromagnetskog momenta i brzine obrtanja motora (što vodi ka ubrzanom habanju ležaja) i stvaranje debalansa rotora koji uzrokuje povišene vibracije motora, a može biti i uzrok stvaranju ekscentriciteta rotora. Osim toga, ispravni štapni provodnici u okolini oštećenih su dodatno termički i mehanički napregnuti [17], [18], što vodi ka nejednakom zagrevanju rotora i pojavi njegovog krivljenja. Ukoliko motor sa ovom vrstom oštećenja nastavi da radi, njegove radne karakteristike postaju lošije, a sam kvar se može proširiti i na susedne štapove i stvoriti višestruka oštećenja. U krajnjem ishodu to može dovesti do otkaza motora. Ilustracija oštećenja rotorskog kaveza prikazana je na slici 1.1.



Slika 1.1 Ilustracija oštećenja rotorskog kaveza – prekid štapnih provodnika na mestima spoja sa kratkospojnim prstenom.

Najčešći uzroci nastanka kvara rotora navedeni su u [11], [19], [20], [21]. To su pre svega visoke temperature štapnih provodnika, ali i velike elektromagnetske sile kojima je rotor izložen. Ovo je posebno izraženo tokom dugotrajnog zaleta ili kod više uzastopnih pokretanja motora. Razlozi kvara kod livenih rotora mogu biti u nekvalitetnoj izradi kaveza, dok kod rotora sa zavarenim prstenovima to je obično posledica nekvalitetno izvedenih spojeva štapnih provodnika i samog prstena [21], [22]. Najčešća oštećenja nastaju upravo na spojevima prstena i štapnih provodnika (slika 1.1). Kod električnih pogona u intermitentnom režimu rada postoji opasnost nastanka ove vrste kvara zbog zamora materijala usled većeg broja ciklusa zagrevanja.

Jasno je da je pravovremeno i pouzdano otkrivanje kvara rotora ključno za blagovremeno preduzimanje odgovarajućih mera u cilju sprečavanja širenja oštećenja ili otkaza pogona.

1.2 Predmet i cilj istraživanja

U prethodnom odeljku naveden je značaj primene kaveznih asinhronih motora, ali je i nedvosmisleno ukazano na neophodnost blagovremenog otkrivanja kvara rotora. Rana dijagnostika ove vrste kvara predstavlja veoma atraktivnu oblast izučavanja, kako u akademskim, tako i u industrijskim krugovima. Tokom istraživanja aktuelnog stanja u oblasti prepoznati su osnovni nedostaci postojećih tehnika koje nisu u mogućnosti da na jednostavan i pouzdan način otkriju kvar rotora kod neopterećenog motora u stacionarnom stanju pogona. Ovim se želi ukazati da postoji potreba za daljim istraživanjima u ovoj oblasti.

Predmet istraživanja disertacije obuhvata ispitivanja mogućnosti unapređenja postojećih tehnika za pravovremeno i pouzdano otkrivanje oštećenja štapnih provodnika rotorskog kaveza mrežno napajanog neopterećenog asinhronog motora. Stoga, glavni cilj istraživanja jeste predlog neinvazivnog postupka kojim će se prevazići ograničenja postojećih rešenja.

Metoda koja se u okviru disertacije predlaže zasniva se na analizi signala terminalnih veličina, tj. signala struje i trenutne električne snage motora, ali i signala mehaničkih vibracija kućišta mašine. Sve analize se obavljaju za stacionarno stanje pogona. Numerička obrada podataka vrši se u vremenskom i frekvencijskom domenu. Analiza u vremenskom domenu je zasnovana na izdvajanju karakterističnih obeležja kvara rotora iz talasnog oblika signala struje motora. S druge strane, analiza u frekvencijskom domenu je mnogo važnija jer se relativno jednostavno izdvajaju značajne frekvencijske komponente iz spektra signala od interesa. Na taj način se lako identifikuju obeležja kvara nastala kao isključiva posledica oštećenja rotora. Kombinovanjem oba pristupa ostvaruje se pouzdana i pravovremena detekcija kvara rotora. U okviru disertacije, posebna pažnja je posvećena rešavanju problematike otkrivanja kvara rotora mrežno napajanog kaveznog motora bez sprege sa radnom mašinom. Ovo je od velikog interesa za praktičnu primenu metode koja se predlaže.

Primenom metode veštačke inteligencije, ostvarene kroz upotrebu neuronske mreže sa prosleđivanjem unapred (engl. *feedforward neural network*), predložena metoda za rano otkrivanje kvara rotora dodatno se unapređuje uvođenjem kvantifikacije oštećenja rotora. Za obuku mreže koristi se reprezentativni skup obeležja kvara rotora dobijenih obradom signala terminalnih veličina motora za različite iznose oštećenja rotora. Očekuje se da će se kao posledica uključivanja više obeležja u sistem za detekciju kvara rotora ostvariti značajno bolje karakteristike predložene metode. Time se stvaraju osnovni preduslovi za razvoj automatizovanog sistema za rano otkrivanje kvara rotora i procenu njegovog oštećenja, što će drastično smanjiti cenu ispitivanja, ali i umanjiti faktor ljudske greške u tumačenju rezultata. Sem toga, ostvariće se i velike uštede (u vremenskim, ljudskim i materijalnim resursima) prilikom popravke motora, jer se mogućom integracijom predložene metode u sistem prediktivnog održavanja industrijskog pogona servis sprovodi tek kada postoje jasne naznake kvara rotora. Na taj način se izbegavaju nepotrebna zaustavljanja pogona i značajno umanjuju mogućnosti pojave otkaza motora zbog kvara rotora.

1.3 Pregled literature

Uzimajući u obzir značaj ranog otkrivanja oštećenja štapnih provodnika rotora kaveznog asinhronog motora, u naučnoj literaturi se predlažu različite tehnike za praćenje njegovog stanja (engl. *condition monitoring*). Otkrivanje ove vrste kvara je izazovan zadatak jer rotorski kavez nije pristupačan u električnom smislu, pa je postupak identifikacije kvara moguć primenom invazivnih ili neinvazivnih metoda. Invazivne metode podrazumevaju rasklapanje motora, pregled i ispitivanje kaveza rotora. Sam postupak je vremenski zahtevan i iziskuje značajna finansijska sredstva, pogotovo kod motora velikih snaga. Neinvazivne metode su sve one pri čijem se izvođenju ne zahteva demontaža i rasklapanje motora u pogonu. One podrazumevaju izdvajanje i praćenje određenih obeležja čiji je uzročnik kvar rotora i to iz izmerenih veličina motora (električnih i/ili neelektričnih). Neinvazivne metode su tehnički naprednije u odnosu na invazivne tehnike i danas čine osnov savremenih sistema za rano otkrivanje kvarova u motoru. U nastavku se daje uvid u stanje u oblasti sa pregledom aktuelne literature na temu otkrivanja oštećenja štapnih provodnika rotora kaveznog asinhronog motora.

U protekle dve decenije objavljen je veliki broj naučnih radova na temu ranog otkrivanja kvara rotora. Ključ uspešne i pravovremene detekcije kvarova je u primeni odgovarajućih neinvazivnih metoda za praćenje stanja motora, ali je od velikog značaja i upotreba savremenih tehnika digitalne obrade signala, jer se sistemi za dijagnostiku stanja motora uglavnom zasnivaju na digitalnoj tehnologiji. Metode praćenja stanja rotora kaveznog asinhronog motora najčešće se sprovode na sledeće načine [22]:

- analizom signala buke motora,
- analizom signala mehaničkih vibracija motora,
- analizom signala elektromagnetskog momenta motora,
- analizom signala brzine obrtanja motora,
- analizom signala polja rasutog magnetskog fluksa motora,
- analizom signala struja motora,
- analizom signala potencijala zvezdišta namotaja motora i
- analizom signala trenutne električne snage motora.

Metode se mogu izvršavati *on-line* ili *off-line* [23]. *On-line* metode su privukle veliku pažnju jer ne zahtevaju zaustavljanje pogona, a obezbeđuju kontinualno praćenje stanja rotora što omogućava krajnjim korisnicima planiranje remonta. Time se značajno skraćuje vreme zastoja pogona. S druge strane, *off-line* metode zahtevaju zaustavljanje pogona, ali u nekim slučajevima daju izvesne prednosti, kao što je umanjeње uticaja šuma na karakteristična obeležja vezana za vrstu kvara u signalu koji se razmatra. U današnje vreme aktuelan je i koncept da se sve neophodne analize u velikom obimu obavljaju preko interneta uz pomoć specijalizovanih računarskih sistema, što vodi ka razvoju posebnih servisa za nadzor stanja pogona zasnovanih na tehnologiji oblaka (engl. *cloud computing*).

1.3.1 Metode zasnovane na analizi signala buke motora

Buka predstavlja pojavu zvučnih talasa koji nastaju usled brzog oslobađanja energije deformacija prouzrokovane poremećajem stacionarnog stanja čestica čvrste sredine zbog naprezanja [24]. Uzroci buke motora su pojave elektromagnetske [25], [26] i mehaničke prirode u njemu [26]. Merenje i analiza signala buke može se upotrebiti kao jedna od neinvazivnih metoda za praćenje stanja asinhronog motora [27], jer signal u sebi sadrži informacije o njegovom operativnom stanju [28]. Osim toga, metoda ima i tu prednost jer je oprema za merenje i obradu signala jeftina i lako dostupna.

U ranim istraživanjima autori u [29] su koristili ovu metodu za detekciju ekscentriciteta rotora. Oni su pokazali da deo spektra audio signala, koji je posledica postojanja žlebnih harmonika, funkcija statičkog ekscentriciteta. U skorije vreme analiza signala buke motora se koristiti i za otkrivanje prisustva drugih vrsta kvarova u motoru. Metoda za detekciju oštećenja štapnih provodnika rotora izložena je u [30], u kojem se analiza signala buke vrši upotrebom MUSIC (engl. *multiple signal classification*) algoritma, a klasifikacija obeležja primenom Bajesovih klasifikatora. Nešto drugačiji pristup izložen je u [31], gde se koriste tehnike autokorelacije i diskretne vejevlet (engl. *wavelet*) transformacije signala buke motora u cilju izdvajanja pokazatelja oštećenja štapnih provodnika. Klasifikacija obeležja se vrši primenom Kohonenovih samoorganizovanih mapa obeležja (engl. *self organising maps*). Hibridni algoritam za izračunavanje spektralne gustine snage (engl. *power spectral density*) signala buke motora u cilju detekcije kvara rotora predstavili su autori u [32]. U okviru tog rada ispitivani motor je testiran sa nekoliko različitih vrednosti momenta opterećenja, a rezultati analize su pokazali da se primenom date metode mogu otkriti oštećenja štapnih provodnika. Značajna unapređenja u predmetnoj oblasti učinili su autori u [33]. Oni su primenom CEEMD (engl. *complete ensemble empirical mode decomposition*) metode izolovali više obeležja iz spektra signala buke motora i uspešno detektovali dva prekinuta provodnika rotora.

S druge strane, autori u [34] su sprovedli uporednu analizu rezultata dobijenih primenom tri različite tehnike otkrivanja oštećenja rotora: analiza signala buke, mehaničkih vibracija i struje motora. Dobijeni rezultati su pokazali da se u spektru audio signala ne uočavaju tako jasni pokazatelji kvara kao što je to slučaj rezultata spektralne analize signala mehaničkih vibracija ili struje motora, te da nije moguće sa sigurnošću potvrditi prisustvo kvara. Stoga, autori rada predlažu da se za potrebe otkrivanja kvara rotora metod analize signala buke motora koristi isključivo kao dopunska metoda. Pri tome, treba imati u vidu da pouzdanost ove metode zavisi od mnogih činilaca [34], [35], [36], [37]. Tako, na primer, spektar signala buke ne zavisi samo od veličine i geometrije motora, već i od pozicija na kojima se vrše merenja. Dalje, na pouzdanost otkrivanja kvara utiče i pozadinska buka [38]. Da bi se prevazišao taj problem, u [39] je dat poseban algoritam obrade signala koji se može koristiti u izdvajanju obeležja kvara rotora iz snimljenog signala buke motora.

1.3.2 Metode zasnovane na analizi signala mehaničkih vibracija motora

Uobičajeno se u postupcima nadgledanja stanja prenosnika snage i obrtnih mašina u industrijskim sistemima primenjuju različite tehnike analize signala mehaničkih vibracija [40], [41]. Shodno tome, postoje velika interesovanja za primenu ovih metoda i u identifikaciji stanja asinhronih motora. Uzroci mehaničkih vibracija u motoru, a koje se prenose na njegovo kućište, su elektromagnetske i mehaničke prirode [26]. Vibrodijagnostička analiza je pouzdana tehnika detekcije kvarova ležaja u motoru [38], ali i raznih drugih problema mehaničke prirode (neizbalansiranost rotora, nesaosnost vratila motora sa radnom mašinom i sl.). Pri tome, mere se vibracije motora u radijalnom i/ili aksijalnom pravcu, a senzori se postavljaju na njegove ležaje [42], tj. bočne poklopce. Analizom signala mehaničkih vibracija kućišta motora moguće je otkriti kvarove statorskog namotaja [43], ali i kvarove rotora [44]. Tako su autori u [44] pokazali da oštećeni štapni provodnici rotora remete elektromagnetsko polje u motoru, što uzrokuje oscilacije elektromagnetskog momenta i stvara pojačane vibracije kućišta motora. Ipak, oni su istakli da metoda analize signala mehaničkih vibracija motora ne daje značajnije rezultate kada nisu prisutne struje kroz oštećeni štapni provodnik i magnetsko kolo rotora do susednih ispravnih provodnika (engl. *interbar currents*). Pojava ovih struja je izraženija kod rotora sa bakarnim štapnim provodnicima nego kod rotora sa livenim kavezom [45]. Te struje stupaju u interakciju sa statorskim magnetskim poljem i stvaraju silu koja deluje aksijalno na rotor. Merenjem i analizom signala mehaničkih vibracija motora u aksijalnom pravcu (npr. na bočnom poklopcu), moguće je otkriti oštećenja štapnih provodnika rotora [46]. No, da bi navedena metoda bila primenljiva za analizu u stacionarnom stanju, potrebno je da ispitivani motor bude opterećen jer su karakteristična obeležja u spektru signala vibracija funkcija klizanja motora. Rezultati studije slučaja u [47] su to potvrdili.

U sprovedenom istraživanju u [34] predstavljeni su rezultati tri različite tehnike detekcije oštećenja štapnih provodnika rotora i ležaja motora: analiza signala buke, mehaničkih vibracija i struje motora. Analize su vršene za stacionarno stanje pogona i to za različite iznose momenta opterećenja i brzine obrtanja. Na osnovu dobijenih rezultata autori su zaključili da je vibrodijagnostička analiza najučinkovitija za detekciju kvarova ležaja. Sličan zaključak je naveden i u [38]. Osim toga, u [34] je ukazano da amplitude karakterističnih obeležja kvara rotora iz spektra signala mehaničkih vibracija umnogome zavise od opterećenja motora.

Valja napomenuti da su analize signala mehaničkih vibracija u [34], [38], [44], [45], [46], [47] vršene samo na mrežno napajanim motorima. Međutim, u [48] je pokazano da je kod vektorski regulisanog asinhronog motora metod vibrodijagnostičke analize pouzdaniji u otkrivanju oštećenja štapnih provodnika rotora nego tehnika spektralne analize signala struje motora. Naime, amplitude obeležja kvara u spektru struje motora su znatno oslabljene zbog postojanja regulatora struje, te se na osnovu njih ne može doneti sasvim ispravan zaključak o stanju kaveza rotora. Zato autori navedenog rada prednost daju vibrodijagnostičkoj analizi.

Zahvaljujući unapređenjima u oblasti digitalne obrade signala [49] i napretku tehnologije, savremeni sistemi za vibrodijagnostiku mogu analizirati višestruka obeležja u signalu mehaničkih vibracija motora, u stacionarnom i/ili prelaznom režimu. U tom pogledu, iskorak su učinili autori u [33]. Oni su primenom CEEMD metode analizirali više karakterističnih obeležja iz spektra signala mehaničkih vibracija motora u stacionarnom stanju i uspešno otkrili dva susedna štapna provodnika u prekidu. Autori u [50] vrše analizu signala mehaničkih vibracija motora tokom njegovog zaleta, sa ciljem otkrivanja početnih oštećenja štapnih provodnika. Eksperimentalna istraživanja u istom radu, sprovedena za različite vrednosti momenta opterećenja, pokazala su da i delimično oštećenje štapnog provodnika utiče na povećanje nivoa vibracija motora. Rano oštećenje provodnika rotora detektovano je primenom tehnika autokorelacije i diskretne vejtlet transformacije na snimljenom signalu. Za jasniju interpretaciju rezultata korišćeni su statistički parametri: srednja vrednost i standardna devijacija signala. Pregled diskretne vejtlet tehnike analize signala mehaničkih vibracija u postupcima otkrivanja kvarova kaveznih motora izložen je u [51].

Za pouzdanu ocenu stanja rotorskog kaveza, autori u [52] daju unapređenje postupka analize mehaničkih vibracija kućišta motora. Predlažu da se prvo izvrši izdvajanje obeležja kvara rotora iz spektra signala radijalnih i aksijalnih mehaničkih vibracija, a potom sprovede vremensko-frekvencijska dekompozicija signala mehaničkih vibracija primenom diskretne vejtlet tehnike. Na taj način se vrši kvantitativna ocena oštećenja rotora i to posredstvom tzv. *mPa* (engl. *dynamic multiresolution mean power*) indikatora. Predložena metoda je eksperimentalno potvrđena na motoru koji je bio opterećen nazivnim momentom, te sa 50% nazivnog tereta, a imao je prekid jednog štapnog provodnika. Međutim, metoda nije dala zadovoljavajuće rezultate za slučaj malih iznosa momenta opterećenja.

U cilju boljeg uvida u rezultate vremensko-frekvencijske analize signala mehaničkih vibracija, autori u [53] su koristili različite tehnike vremensko-frekvencijske dekompozicije signala: vremenski kratku Furijeovu transformaciju (engl. *short-time Fourier transform*), Gaborovu transformaciju, Morletov skalogram (engl. *Morlet scalogram*) i MUSIC algoritam. Analizirani su signali mehaničkih vibracija snimljeni tokom zaleta motora sa jednim i dva provodnika rotora u prekidu. Zaključak autora je da se primenom navedenih tehnika vremensko-frekvencijske analize signala mehaničkih vibracija motora mogu izdvojiti karakteristična obeležja koja se dovode u vezu sa oštećenjima štapnih provodnika rotora.

Algoritmi klasifikacije takođe imaju važnu ulogu u sistemima za detekciju kvara rotora na bazi vibrodijagnostičke analize. Različite tehnike, kao što su veštačke neuronske mreže [54], [55], fazi logika [56] ili vektori podrške (engl. *support vector machines*) [57], [58], [59], uspešno se primenjuju u sistemima za praćenje stanja motora. Autori u [60] predstavljaju dve vrste veštačkih neuronskih mreža: mreža bez povratne veze sa prosleđivanjem izlazne greške unazad (engl. *back propagation feedforward network*) i samoorganizovane mape obeležja (engl. *self organising maps*), a koriste se za klasifikaciju najčešćih vrsta kvarova kod asinhronih kaveznih

motora (oštećenja ležaja, kvarovi statorskog namotaja, debalans rotora i oštećenja štapnih provodnika rotora). Mreže su obučene na skupu ulaznih podataka dobijenih analizom signala mehaničkih vibracija i struje motora za pet različitih brzina obrtanja i četiri vrednosti momenta opterećenja (0%, 33%, 66% i 100% nazivnog tereta). Signali mehaničkih vibracija su analizirani u vremenskom i frekvencijskom domenu. Za kvantifikaciju u vremenskom domenu korišćena su sledeća obeležja deskriptivne statistike: maksimalna vrednost, srednja vrednost i faktor spljoštenosti (engl. *kurtosis*). Postignuti su zadovoljavajući rezultati. Značajni naponi su uloženi u dalja unapređenja dijagnostičkih metoda zasnovanih na analizi signala mehaničkih vibracija, te se u [61] uvodi primena tzv. *K* algoritma (engl. *K-means*) klasifikacije za otkrivanje kvara rotora. Predloženi algoritam se zasniva se na izračunavanju Šenonove entropije (engl. *Shannon entropy*) sadržane u signalima mehaničkih vibracija opterećenog motora koji su snimljeni tokom zaleta i u stacionarnom stanju pogona. Vibracije su merene u tri ose (radijalne u horizontalnoj i u vertikalnoj ravni i aksijalne). Metoda je verifikovana eksperimentalno i to za delimično oštećen štapni provodnik, te jedan i dva štapna provodnika u prekidu. U novije vreme, metoda vektora podrške postaje jedna od popularnijih tehnika klasifikacije kvarova kod asinhronih motora [62]. To je relativno nov koncept, a zasnovan je na teoriji statističkog učenja. Na osnovu vektora ulaznih podataka (koji ujedno predstavlja i vektor obeležja karakterističan za dati tip kvara) obučen metod vektora podrške vrši klasifikaciju ulaznih podataka u unapred definisane klase, što je glavni zadatak ove metode u okviru sistema za detekciju kvara [59]. Ova metoda je uspešno primenjena i za detekciju oštećenja štapnih provodnika rotora kaveznog asinhronog motora [63]. To je izvedeno upotrebom vektora podrške na skupu ulaznih podataka, tj. obeležja, koja su dobijena primenom Velčove metode (engl. *Welch's method*) za procenu spektra u signalima mehaničkih vibracija motora. Eksperimentalne analize su izvršene na motoru sa ispravnim rotorom, i rotoru sa jednim, dva i tri prekinuta štapna provodnika i to za tri različita iznosa momenta opterećenja (0%, 50% i 100% nazivnog momenta motora).

1.3.3 Metode zasnovane na analizi signala elektromagnetskog momenta motora

Elektromagnetski momenat asinhronog motora je rezultat interakcije rotirajućeg elektromagnetskog polja statora i indukovanih struja u provodnicima rotora. Bilo koja vrsta kvara u motoru izaziva pojavu pulsacija elektromagnetskog momenta [22]. Autori u [64] su pokazali da se analizom signala elektromagnetskog momenta može zaključiti da li su pulsacije nastale usled oštećenja štapnih provodnika rotora ili namotaja statora. U istom radu je dokazano da je postojanje frekvencijske komponente jednake dvostrukoj vrednosti klizanja motora u spektru signala elektromagnetskog momenta uzrokovano oštećenjima rotora (štapnih provodnika i/ili kratkospojnih prstenova), dok je pojava komponente jednake dvostrukoj frekvenciji izvora napajanja u spektru elektromagnetskog momenta posledica oštećenja namotaja statora. Međutim, praktična realizacija sistema za ranu detekciju kvara rotora na bazi analize spektra signala elektromagnetskog momenta motora nije jednostavna. Činjenica je da se ne može neposredno

meriti elektromagnetski momenat motora. Umesto toga, moguće je vršiti merenje momenta na vratilu motora posredstvom odgovarajućih senzora (merača momenta), ali se merena vrednost momenta na vratilu motora razlikuje od stvarne vrednosti elektromagnetskog momenta. Naime, rotor, vratilo i kućište motora čine jednu vrstu dinamičko-torzionog sistema koji ima svoju sopstvenu prirodnu učestanost oscilovanja [64], [65]. Merači momenta takođe imaju svoju prirodnu učestanost oscilovanja, ali i propusni opseg. Dalje, iznos momenta na vratilu motora je manji od vrednosti elektromagnetskog momenta za iznos gubitaka usled trenja i ventilacije u motoru. Sve ovo onemogućava uspešnu realizaciju jednostavnog sistema za pouzdanu i pravovremenu detekciju kvara rotora na bazi analize spektra signala elektromagnetskog momenta. Osim toga, treba naglasiti i da je cena merača momenta izuzetno visoka, te da se ne koristi često u industrijskim pogonima.

Da bi se u izvesnoj meri prevazišla navedena ograničenja, autori u [66], [67] predlažu da se vrši estimacija elektromagnetskog momenta na bazi matematičkog modela asinhronog motora, pri čemu razmatraju vektorski regulisan pogon. Postojanje razlike između momenta referentnog modela mašine i estimiranog momenta motora služi kao indikator kvara rotora. Primenom ove metode ne zahteva se analiza signala momenta u frekvencijskom domenu. Konstatovano je da se primenom predložene metode mogu detektovati oštećenja štapnih provodnika rotora još u ranoj fazi nastanka. Ovo rešenje je korišćeno i u [68], [69]. Međutim, za potrebe estimacije elektromagnetskog momenta motora potrebni su senzori i struje i napona, što poskupljuje predloženo rešenje. Osim toga, metod zahteva poznavanje parametara ekvivalentne šeme rotorskog kola koji nisu lako dostupni, a podložni su i promenama (usled zasićenja magnetskog kola i/ili uticaja temperature), što je veći nedostatak ove metode.

Drugačiji pristup problematici otkrivanja kvara rotora, na bazi analize signala elektromagnetskog momenta motora, predstavili su autori u [70]. Oni su predložili algoritam koji se oslanja na Bajsesovu klasifikaciju. Obučavanje algoritma vrši se *off-line* i to na bazi obeležja dobijenog eksperimentalnim putem ili simulacijom na matematičkom modelu mašine, a u *on-line* režimu obeležje kvara rotora se dobija iz estimiranog signala elektromagnetskog momenta motora. Primenom Bajesovih klasifikatora izvodi se zaključak da li je rotor u ispravnom stanju ili je u kvaru. Efikasnost predložene metode verifikovana je eksperimentalno na motorima sa ispravnim rotorom, rotorom sa jednim, odnosno dva, tri, četiri i pet susednih štapnih provodnika u prekidu. Merenja su sprovedena za tri različite vrednosti momenta opterećenja: 50%, 75% i 100% nazivnog momenta motora. Metoda se pokazala kao veoma uspešna kod motora koji su nazivno opterećeni, ali pouzdanost metode u otkrivanju kvara rotora opada sa smanjenjem momenta opterećenja. Razlog je taj što je obeležje kvara rotora funkcija klizanja motora, te nije moguće detektovati prekid provodnika rotora kod neopterećenog motora. Osim toga, nedostatak predložene metode ogleda se i u neophodnom broju senzora, pošto je za estimaciju elektromagnetskog momenta motora potrebno poznavati vrednosti sve tri struje i sva tri napona motora (često se mere dve struje i dva napona u slučaju da zvezdište nije izvedeno). Bitno je

napomenuti da detekcija kvara rotora metodom analize elektromagnetskog momenta motora ne može obezbediti pouzdanu kvantifikaciju oštećenja štapnih provodnika zbog uticaja pulsacije brzine obrtanja rotora na elektromagnetski momenat motora [71].

1.3.4 Metode zasnovane na analizi signala brzine obrtanja motora

Svaka oscilacija elektromagnetskog momenta motora izaziva oscilacije brzine obrtanja, te je jasno da se kvar rotora može otkriti merenjem i analizom signala brzine obrtanja motora. Ovo je najlakše uraditi za stacionarno stanje, pri čemu se signal sa informacijom o trenutnoj vrednosti brzine obrtanja motora dobija sa senzora brzine (enkoder i sl.). Jedan od prvih radova na ovu temu je [72] gde je demonstrirana sposobnost navedene tehnike u otkrivanju kvara rotora. No, ova metoda je manje poznata u odnosu na druge tehnike. Određeni iskoraci u njenoj popularizaciji i unapređenju učinjeni su proteklih godina [73], [74]. Tako su autori u [19] razvili matematički model asinhronne mašine na bazi spregnutih električnih kola da bi analizirali uticaj oštećenih štapnih provodnika rotora na pulsacije brzine obrtanja motora. Pokazali su da je amplituda niskofrekvencijske komponente jednake dvostrukoj vrednosti klizanja motora u spektru signala brzine (primarno obeležje kvara) najosetljivija na postojanje oštećenja štapnih provodnika rotora. Osim nje, u spektru signala brzine obrtanja uočeno je i postojanje komponenti oko frekvencije obrtanja rotora (sekundarno obeležje kvara). One su posledica nesavršenosti konstrukcije rotora, ali ono što je značajno je da i njihova amplituda raste sa uvećanjem oštećenja štapnih provodnika [75]. Rezultati analize u [19] su eksperimentalno potvrđeni na motoru sa jednim prekinutim štapnim provodnikom rotora pri opterećenju motora od 75% nazivnog momenta.

Međutim, glavna prepreka u primeni metoda za detekciju kvara rotora na bazi analize signala brzine obrtanja motora leži u činjenici da brzina obrtanja u stacionarnom stanju pogona praktično nikad nije konstantna [22]. Tako su autori u [76] pokazali da prenosnici snage sa zupčanicima ispoljavaju inherentne fluktuacije brzine obrtanja zbog uticaja različitih faktora (npr. greške u izradi, nesaosnost vratila motora i radne mašine, nesavršenosti konstrukcije rotora i sl.). Osim toga, metoda je osetljiva na prolazne varijacije momenta opterećenja i učestanosti izvora napajanja (slučaj mrežno napajanih motora), što umnogome utiče na tačnost rezultata analize. S druge strane, ukoliko motor nije povezan sa opterećenjem otkrivanje oštećenja štapnih provodnika rotora praktično nije moguće zbog zanemarljivo malog klizanja motora [74], te nemogućnosti izdvajanja obeležja kvara iz spektra signala brzine obrtanja. Sve ovo čini metode za detekciju kvara rotora na bazi analize spektra signala brzine obrtanja motora manje pouzdanim, što im znatno ograničava primenu u industrijskom okruženju.

1.3.5 Metode zasnovane na analizi signala polja rasutog magnetskog fluksa motora

U idealnom slučaju magnetsko polje u vazdušnom zazoru asinhronne mašine ima prostoperiodičnu prostornu raspodelu. Bilo koja vrste neuravnoteženosti u kolu statora ili rotora

dovešće do odstupanja od ove raspodele [77], pri čemu neuravnoteženost može biti posledica nesavršene konstrukcije mašine ili zbog kvara u njoj. Drugim rečima, ukoliko se vrši praćenje signala vektora magnetske indukcije u vazдушnom zazoru mašine, moguće je otkriti nastanak kvara na rotoru. Međutim, upravo je tu glavni nedostatak ovog pristupa, jer kao takva, metoda nije niti praktična ni ekonomična za većinu industrijskih pogona. Razlog tome je potreba za rasklapanjem mašine kako bi se u mali vazdušni procep mogli umetnuti posebni senzori magnetske indukcije ili merni namotaji u statorske žlebove (za šta je potrebna i izmena u konstrukciji, te motor više nije standardan). Sve ovo joj ograničava primenu u širim razmerama.

Da bi se prevazišla navedena ograničenja, u literaturi se predlaže drugačiji pristup. Poznato je da neuravnoteženost unutar motora za posledicu ima da se magnetnopobudna sila u jednom delu glave statorskog namotaja razlikuje po intenzitetu od magnetnopobudne sile u delu glave namotaja koja je smeštena dijametralno po obodu. Rezultat je pojava aksijalnog polja rasutog magnetskog fluksa koje u sebi sadrži dve komponente: komponentu koja potiče od statorskih struja i komponentu koja potiče od struja rotorskih provodnika [21]. Postavljanjem probnog kalema koncentrično oko vratila motora, te analizom indukovane elektromotorne sile, odnosno napona na njegovim priključcima (u stacionarnom stanju), moguće je otkriti različite vrste kvarova u motoru. Tako su autori u [78] spektralnom analizom signala ovog napona detektovali kvar rotora. U kasnijim istraživanjima to su potvrdili i autori u [79], [80]. Autori u [81] su predstavili metod koji omogućava istovremeno detektovanje statičkog ekscentriciteta i oštećenja rotorskog kaveza asinhronog motora. Metod koji je predstavljen u tom radu zasniva se na analizi spektra signala aksijalnog polja rasutog magnetskog fluksa u okolini dvostruke učestanosti izvora napajanja. Ipak, da bi se moglo ustanoviti oštećenje štapnih provodnika rotora, pored poznavanja učestanosti izvora napajanja neophodno je poznavati i iznos klizanja motora. Tako ako motor nije opterećen, otkrivanje oštećenja provodnika rotorskog kaveza praktično nije izvodljivo zbog nemogućnosti izdvajanja obeležja kvara rotora iz spektra signala napona sa probnog kalema. Detaljnije o postojanju frekvencijskih komponenti koje su vidljive u spektru signala aksijalnog polja rasutog magnetskog fluksa usled oštećenja rotorskih štapnih provodnika može se naći u [82].

Iako metoda detekcije oštećenja štapnih provodnika rotora analizom spektra signala aksijalnog polja rasutog magnetskog fluksa motora ima određenih prednosti (metoda je neinvazivna i lako se može integrisati u specijalizovane sisteme za otkrivanje kvara rotora), ona nije naišla na širu primenu u industriji zbog izvesnih praktičnih ograničenja [83], [84]. Osnovni nedostatak metode je potreba za specifičnim probnim kalemom kojim će se registrovati rasuto aksijalno magnetsko polje motora. Potrebne dimenzije ovog kalema se moraju prilagoditi ispitivanom motoru. Vredi napomenuti i to da se u industrijskom okruženju ne može uvek ostvariti kvalitetno merenje rasutog aksijalnog magnetskog polja, jer motor može biti povezan sa radnom mašinom tako da mu je onemogućen pristup [81]. S druge strane, pozicija i orijentacija probnog kalema tokom merenja je veoma bitna jer direktno utiče na veličinu izlaznog napona na

njegovim krajevima, a time i na rezultate analize. Ono što predstavlja još veći nedostatak metode je da se analizom rasutog aksijalnog polja magnetskog fluksa ne može kvantifikovati iznos oštećenja rotora [22].

1.3.6 Metode zasnovane na analizi signala struja motora

Analiza signala struja motora (engl. *current signature analysis*) danas čini jednu od najčešće korišćenih tehnika za detekciju oštećenja štapnih provodnika rotora kaveznog asinhronog motora. Razlozi su mnogobrojni [59], [81], [85]: jednostavna i lako dostupna merna oprema, struje se mere u razvodnom ormanu (bez neposrednog pristupu motoru) putem različitih strujnih senzora (Rogovski kalem, senzori na bazi Holovog efekta ili klasični strujni merni transformatori sa feromagnetskim jezgrom), metoda je nezavisna od parametara ispitivanog motora, ispitivanja se obavljaju u standardnim radnim uslovima itd. Prema navodima iz [86], ideja datira još iz ranih sedamdesetih godina prošlog veka, kada je predložena za analizu stanja motora smeštenih u opasnom okruženju unutar nuklearne elektrane. Izdvajanje karakterističnih obeležja vezanih za kvar rotora zasnovano je na analizi signala struja u stacionarnom stanju i/ili prelaznom režimu [87].

Ukoliko se posmatra uravnotežena trofazna asinhrona mašina napajana prostoperiodičnim trofaznim simetričnim naponom, uz zanemarenje složenoperiodične prostorne raspodele magnetopobudne sile po obodu zazora, te usvajanjem idealno cilindričnog zazora u mašini, njena struja u frekvencijskom domenu sadrži samo komponentu na učestanosti napajanja, a u vazдушnom zazoru se formira obrtno (sprežno) elektromagnetsko polje koje rotira sinhronom brzinom u odnosu na nepomični stator. Međutim, u slučaju prekida štapnog provodnika rotora u njemu se ne uspostavlja struja, te se remeti uravnoteženost mašine i nastaje nesimetrija rotorskog magnetskog polja. Kao posledica toga, u obrtnom elektromagnetskom polju javlja se i inverzna komponenta polja koja rotira brzinom klizanja, ali u suprotnom smeru u odnosu na smer obrtanja rotora. Ova komponenta polja u statorskim namotajima indukuje elektromotornu silu koja stvara komponentu struje na učestanosti izvora umanjenoj za iznos dvostruke vrednosti klizanja motora. To je komponenta struje tzv. donjeg bočnog pojasa (engl. *lower sideband*). Ova komponenta struje stvara oscilacije elektromagnetskog momenta motora na dvostrukoj učestanosti klizanja, što se odražava i na oscilacije brzine obrtanja na istoj učestanosti, zbog čega nastaje dodatna komponenta u spektru struje motora na učestanosti izvora uvećanoj za iznos dvostruke vrednosti klizanja. To je komponenta tzv. gornjeg bočnog pojasa (engl. *upper sideband*), s tim što njena amplituda može biti dodatno uvećana uticajem trećeg prostornog harmonika vektora magnetske indukcije u vazдушnom zazoru mašine [18], [71]. No, ukoliko ovo nije slučaj (odgovarajući radni uslovi zahvaljujući kojima je uticaj na amplitudu gornje bočne komponente struje zanemarljiv), može se smatrati da su komponente struja bočnih pojasa isključivo posledica neuravnoteženosti električnog kola rotora i posledične pulsacije brzine obrtanja motora [71]. Njihove amplitude zavise od iznosa oštećenja kaveza rotora, te se

primenom tehnike spektralne analize struje motora u stacionarnom stanju (engl. *motor current signature analysis – MCSA*) mogu otkriti kvarovi rotora u ranoj fazi nastanka [10], [81], [82], [88], [89]. Osim ovih komponenti, dodatne komponente u spektru struje motora se javljaju i na višim učestanostima [82], ali su im amplitude značajno niže te se obično ne razmatraju. Treba napomenuti da postoje i druge frekvencijske komponente koje se javljaju u spektru struje motora, a dovode se u vezu sa oštećenjima štapnih provodnika rotora [88]. Međutim, u literaturi se najčešće razmatraju samo komponente bočnih pojasa oko osnovne komponente struje motora. Autori u [90] su zaključili da amplitude komponenti ovih bočnih pojasa zavise ne samo od broja oštećenih štapnih provodnika rotora već i od opterećenja motora. U skladu sa tim, autori u [89] i [91] navode da čak tri faktora utiču na amplitude komponenti bočnih pojasa struje: momenat inercije pogona, veličina momenta opterećenja motora i ozbiljnost oštećenja kaveza rotora. Uticaj prva dva faktora se mora umanjiti kako bi se mogla obaviti korektna analiza komponenti bočnih pojasa. Uticaj momenta inercije pogona može se ublažiti ako se komponente struje oba bočna pojasa sabere na način kako je to izloženo u [92], čime se dolazi do vrednosti donjeg bočnog pojasa bez uticaja pulsacije brzine obrtanja (što je ekvivalentno pogonu sa beskonačno velikim momentom inercije). Na taj način se vrednost komponente donjeg bočnog pojasa dovodi u vezu sa oštećenjem štapnih provodnika rotora nezavisno od momenta inercije pogona. Što se tiče uticaja momenta opterećenja motora na amplitude komponenti struje bočnih pojasa, njihovom normalizacijom sa osnovnom komponentom struje motora ovaj efekat se može delimično ublažiti. Pa ipak, bočni pojasi su izraženiji pri većim vrednostima klizanja, te se preporučuje da se dijagnostika kvara rotora vrši kada je motor opterećen približno nazivnim momentom [91]. Empirijski je utvrđeno da ukoliko je iznos amplitude komponente donjeg bočnog pojasa struje motora ispod -54 dB (normalizovano u odnosu na osnovnu komponentu struje motora) rotorski kavez je ispravan, a ako je iznad -45 dB tada postoji prekid bar jednog štapnog provodnika [93]. Opseg od -54 dB do -45 dB se smatra marginom postojanja kvara [59], [93]. U [94] je utvrđeno da je amplituda komponente donjeg bočnog pojasa struje motora ispod -50 dB indikator ispravnog kaveza rotora, dok su eksperimentalna istraživanja u [95] sprovedena na motoru snage 3,6 MW pokazala da je kod ispravnog rotora amplituda ove komponente ispod -45 dB. Amplituda komponente struje donjeg bočnog pojasa u iznosu od -26 dB se smatra pokazateljem ozbiljnog oštećenja rotorskog kaveza [95]. Slično je pokazano i u [96]. Pojedini autori su pokušali da pronađu određeni kriterijum za procenu veličine oštećenja kaveza rotora. Zavisnost amplitude komponente struje donjeg bočnog pojasa u funkciji broja štapnih provodnika rotora u prekidu istražena je u [94], [97], [98], [99]. Međutim, svi predloženi modeli su validni samo pod određenim pretpostavkama koje u uslovima stvarnog kvara rotora često nisu u potpunosti ispunjene. Na primer, postojanje struja kroz oštećeni štapni provodnik i magnetsko kolo rotora do susednih ispravnih provodnika rotora utiče na smanjenje amplitude komponente levog bočnog pojasa [46].

Uprkos svojoj jednostavnosti, metoda detekcije kvara rotora spektralnom analizom struje

motora ima izvesnih nedostataka, što u nekim slučajevima može ograničiti primenu metode u industrijskom okruženju. Tako pulsacije brzine obrtanja motora utiču na smanjenje amplitude komponente struje donjeg bočnog pojasa, te postoji mogućnost donošenja pogrešnih zaključaka u vezi sa oštećenjem rotora. Zato je u [92] i [100] predloženo uvođenje novog indikatora kvara koji se zasniva na zbiru vrednosti komponenti struja oba bočna pojasa. Drugi problemi na koje se nailazi tiču se postupka obrade signala struje. To je, pre svega, problem curenja spektra (engl. *spectral leakage*) na susedne učestanosti. Efekat nastaje ako u snimljenom signalu struje nije obuhvaćen ceo broj perioda [101]. Posledica curenja spektra je da komponente struje koje predstavljaju obeležja kvara rotora bivaju delimično ili u potpunosti maskirane osnovnom komponentom struje koja je dominantna. Ovo dolazi do izražaja pri malim vrednostima momenta opterećenja motora, a posebno je izraženo kod motora velikih snaga (mala vrednost klizanja i pri punom opterećenju). Uticaj curenja spektra se može ublažiti korišćenjem odgovarajućih prozorskih funkcija [102] (u [103] se predlaže upotreba Hanove prozorske funkcije ili Bartletovog periodograma), uz preporuku da se detekcija kvara rotora ne vrši pri opterećenju motora manjem od 35% nazivnog momenta [104]. Da bi se obeležja kvara rotora u spektru struje motora uopšte mogle identifikovati, potrebno je ostvariti i odgovarajuću frekvencijsku rezoluciju. U [104] se predlaže da se za potrebe otkrivanja kvara rotora izabere frekvencijska rezolucija od bar 10 mHz, što u slučaju primene pravougaone prozorske funkcije podrazumeva da se snimanje signala struje obavlja u trajanju od makar 100 s. Druge prozorske funkcije čine frekvencijsku rezoluciju lošijom. Frekvencijska rezolucija se može dodatno poboljšati uzimanjem većeg broja odbiraka (veća dužina prozora), ali se time uvećava i količina podataka koja se treba obraditi u jedinici vremena. Pri tom, u obzir treba uzeti raspoloživo procesorsko vreme (može biti problematično ako se vrši *on-line* dijagnostika), ali i ograničen memorijski prostor. Tehnike obrade signala kojima je moguće poboljšati frekvencijsku rezoluciju, a bez dodatnog povećavanja vremena merenja, izložene su u [102], [105], [106], [107], [108], [109], [110], [111]. Dodatni problem koji u praksi može da ograniči primenu metode spektralne analize struje motora su pojave oscilacija momenta opterećenja. Ukoliko se u vremenskom intervalu snimanja struje motora dešavaju oscilacije u iznosu opterećenja, tada će se komponente struje bočnih pojasa “šetati” sa promenom brzine obrtanja, tj. dešava se “razmazivanje” spektra [95]. Ova vrsta problema je tipična kod pogona vetrogeneratora, elektromotornih ventila [112], pogona transporterata i pogona sa kaišnim prenosnicima snage [113]. Tako je u [95] naveden primer pogona drobilice za ugalj gde se, usled oscilacija momenta opterećenja, struja motora menjala u opsegu od 40 A do 70 A u intervalu od 5 s. Predloženo je da se vrši usrednjavanje signala, dok autori u [110] predlažu primenu tzv. trostepenog algoritma za eliminaciju neželjenih podataka iz signala struje. S druge strane, autori u [112] i [114] su izneli stav da primena Furijeove transformacije na signalu struje motora nije adekvatna tehnika obrade signala u takvim uslovima, te predlažu analizu struje u prelaznom režimu. Ipak, ovde treba istaći da su neka predložena rešenja iznetih problema metode spektralne analize signala struje motora često protivrečna. Tako je, na primer, za potrebe postizanja zadovoljavajuće

frekvencijske rezolucije neophodan dovoljno dug vremenski zapis struje motora, ali je to s druge strane potencijalni problem zbog moguće pojave oscilacija momenta opterećenja. Zapravo, u industrijskim pogonima je često teško obezbediti traženo stabilno stacionarno stanje u dužem vremenskom periodu. Takođe, u spektru signala struje motora su prisutne i komponente koje nastaju kao posledica mehaničkih izvora smetnji. Prenosnici snage (reduktori) [104] ili motori specijalne konstrukcije [100] mogu proizvesti komponente u spektru struje motora koje su slične ili bliske komponentama koje nastaju usled kvara rotora. Da bi se prevazišlo ovo ograničenje, autori u [104] predlažu sprovođenje dva testa, ali za značajno različite vrednosti momenta opterećenja. Posebne poteškoće u primeni metode spektralne analize struje motora se imaju u pogonima promenljive brzine obrtanja [115].

Iako se spektralne analize struje motora za potrebe otkrivanja kvara rotora najčešće sprovodi primenom Furijeove transformacije, u literaturi se mogu pronaći i drugi napredni postupci obrade signala. U [116] su korišćene različite neparametarske metode, ali se pokazalo da one imaju problem sa ostvarivanjem željene frekvencijske rezolucije. Parametarska tehnika zasnovana na metodi autoregresije predstavljena je u [117]. Autori su ostvarili zadovoljavajuću frekvencijsku rezoluciju, uz sniženu učestanost uzorkovanja, što je značajno za praktičnu implementaciju metode. Ipak, parametarske metode ne daju uvek bolji rezultat u odnosu na neparametarske metode. Primenom MUSIC metode visoke rezolucije, autori u [118] su registrovali postojanje obeležja kvara rotora u spektru signala struje motora. Ovom metodom se ostvaruje najbolja frekvencijska rezolucija u poređenju sa neparametarskim, parametarskim i svim drugim metodama zasnovanim na Furijeovoj analizi [116]. Uprkos svojoj efikasnosti, MUSIC tehnika je izuzetno računski zahtevna, te stoga nije pogodna za implementaciju u realnom vremenu. Da bi se prevazišlo ovo ograničenje, autori u [108] predlažu primenu *zoom* MUSIC algoritma (ZMUSIC). Kod ove tehnike postoji mana jer se učestanost komponenti u spektru signala struje dobija iz pseudospektra [119]. Osim toga, kvantifikacija kvara rotora se ne vrši na osnovu amplitude komponente obeležja kvara rotora, već na osnovu procene pseudospektra [120]. S druge strane, autori u [120] koriste ESPRIT (engl. *estimation of signal parameters via rotational invariance techniques*) kako bi se direktno estimirale karakteristične komponente iz spektra struje motora u zadatom frekvencijskom opsegu. Metoda je nešto manje numerički zahtevna u odnosu na MUSIC tehniku [120], ali je njena praktična implementacija u sistemima za *on-line* detekciju kvara rotora i dalje izazov.

Nezavisno od primenjene tehnike obrade signala, metoda spektralne analize struje motora u stacionarnom stanju se nije pokazala uspešnom u detekciji oštećenja štapnih provodnika rotora kod neopterećenog motora [121]. Ovo je analizirano od strane autora u [122]. Ukoliko je motor neopterećen, karakteristične komponente kvara u spektru struje su bliske osnovnoj komponenti, te ih je teško izdvojiti (problemi curenja spektra i frekvencijske rezolucije). Osim toga, njihova amplituda je mala, što dodatno otežava njihovo izdvajanje iz spektra. S druge strane, otkrivanje kvara rotora neopterećenog motora nudi brojne prednosti [123]: mogućnost kontrole kvaliteta

izrade novih i remontovanih motora, analiza u režimu praznog hoda, izbegavanje mehaničkih izvora smetnji i smanjenje troškova otkrivanja kvara. Shodno tome, interesovanje za unapređenjem ove metode je i dalje veliko. U tom kontekstu, u [113] se primenjuje Hilbertova transformacija na signal struje motora, a potom se sprovodi spektralna analiza modula analitičkog signala. Za to se koristi Furijeova transformacija, kojom se vrši izdvajanje samo jedne komponente spektra čiji je uzrok kvar rotora [59]. Na ovaj način se prevazilaze poteškoće otkrivanja kvara rotora neopterećenog motora. Međutim, kako je frekvencijska rezolucija od izuzetne važnosti, potrebno je duže vremena snimati signal struje motora, što je ujedno i osnovni nedostatak predloženog rešenja. Ovo je posebno problematično kod motora velikih snaga (izuzetno mala vrednost klizanja) gde mala varijacija učestanosti izvora napajanja može imati uticaja na obeležja kvara rotora. Autori u [124] kombinuju Hilbertovu transformaciju i ESPRIT i prijavljuju značajna poboljšanja u odnosu na rezultate prikazane u [113]. Ipak, ESPRIT zahteva dodatno vreme obrade signala u odnosu na Furijeovu transformaciju, što predloženo rešenje čini nepraktičnim. Tehnika BDS (engl. *bi-spectrum diagonal slice*) je predložena od strane autora u [125]. Ona kombinuje informacije o amplitudi i faznom stavu komponenti obeležja kvara iz spektra struje motora kako bi se detektovala oštećenja štapnih provodnika rotora. Navedena tehnika se pokazala uspešnom u otkrivanju kvara rotora opterećenog i delimično opterećenog motora. Međutim, na osnovu priloženih eksperimentalnih rezultata, može se zaključiti da predloženo rešenje nije sasvim pouzdano u detekciji kvara rotora neopterećenog motora.

Drugačiji pristup otkrivanju kvara rotora kaveznog asinhronog motora u stacionarnom stanju izložen je u [126], [127], [128]. Predloženi metod je zasnovan na transformisanju signala struja iz originalnog abc područja u stacionarno dq područje, gde dq komponente struja predstavljaju projekciju obrtnog vektora struje motora na ose dq koordinatnog sistema (engl. *Park's vector approach*). Ukoliko se posmatra uravnotežena trofazna asinhrona mašina, napajana prostoperiodičnim trofaznim simetričnim naponom, uz zanemarenje složenoperiodične prostorne raspodele magnetnopobudne sile po obodu zazora i usvajanjem idealno cilindričnog zazora u mašini, nakon prevođenja signala struja motora u dq područje one formiraju kružnicu sa centrom u koordinatnom početku. U slučaju pojave kvara rotora kružnica se deformiše, pri čemu nivo njene izobličenosti zavisi od veličine kvara. Međutim, otkrivanje kvara primenom ove metode je izuzetno teško, jer i druge vrste kvarova u motoru stvaraju izobličenja kružnice koja su sličnog oblika. Zbog toga ovaj koncept nije naišao na značajniju praktičnu primenu. Zato su autori u [129] predložili pristup koji je zasnovan na spektralnoj analizi modula obrtnog vektora struje (engl. *extended Park's vector approach*). Oni su ukazali na to da u slučaju postojanja kvara rotora, u spektru modula obrtnog vektora signala struje (u stacionarnom referentnom sistemu) se pojavljuje jednosmerna komponenta struje, uključujući i dve dodatne komponente koje su funkcija klizanja, a mogu se lako izdvojiti u spektru. Pa ipak, autori u [130] navode da se komponente obeležja kvara rotora analizirane u [129] ne mogu izdvojiti kod slabo opterećenog motora, što predstavlja nedostatak metode. Problem je i potreba za

poznavanjem signala sve tri struje motora, a i sam postupak je računski zahtevan [71]. Pojedini autori smatraju da je izloženi metod prikladniji za praćenje stanja namotaja statora nego za ranu detekciju kvara rotora [91].

Da bi se prevazišli problemi spektralne analize signala struje motora u stacionarnom stanju, u literaturi se predlaže analiza signala struje motora u prelaznom režimu (engl. *transient motor current signature analysis – TMCSA*). Ovakav pristup se najčešće zasniva na analizi spektra struje motora snimljene tokom njegovog zaleta direktnim priključenjem na mrežu [131], [132], [133]. Takva analiza pruža veću mogućnost za rano otkrivanje kvara rotora. Tokom zaleta klizanje je veliko (u trenutku pokretanja motora iznosi jedan), a veliki je i odnos signala i šuma (engl. *signal-to-noise ratio*), te se komponente obeležja kvara rotora u spektru signala struje motora lakše izdvajaju [133]. Tako, na primer, ako se razmatra struja motora koji je priključen na mrežu učestanosti 50 Hz, učestanost komponente struje donjeg bočnog pojasa menja se u opsegu od 0 Hz do 50 Hz, te se ona može jednostavno identifikovati [134]. Ovde treba istaći da primenom metode analize struje motora u prelaznom režimu detekcija kvara rotora nije zasnovana samo na otkrivanju komponente struje donjeg bočnog pojasa, već i na njenoj karakterističnoj propagaciji u vremenu. Dodatno, metoda je nezavisna od vrednosti momenta opterećenja [135], te je moguće otkriti kvar rotora neopterećenog motora, što je od izuzetne važnosti. Međutim, sama metoda je složenija u pogledu obrade signala i interpretacije dobijenih rezultata analize jer se oslanja se na tehnike vremensko-frekvencijske dekompozicije signala struje, kao što su vremenski kratka Furijeova [136] i vejevlet transformacija [135], [137], [138], [139], [140], [141], [142], [143], [144], [145]. Vremenski kratka Furijeova transformacija deli signal na segmente tačno određene dužine (širine prozora) unutar kojih se signal može smatrati stacionarnim, a zatim se primenjuje Furijeova transformacija [101]. Osnovni nedostatak vremenski kratke Furijeove transformacije je fiksna širina prozora. Pored toga, frekvencijska rezolucija je ograničena širinom prozora (širi prozor daje bolju frekvencijsku rezoluciju, ali je lošija vremenska rezolucija – Hajzenbergov princip neodređenosti). U cilju prevazilaženja ovih ograničenja, najčešće se koristi vejevlet transformacija, kojom se postiže dobra vremenska rezolucija na visokim učestanostima i dobra frekvencijska rezolucija na niskim učestanostima (uži prozor za signale više, a širi za signale niže učestanosti). Primenom vejevlet transformacije na signalu struje motora koji se pokreće direktnim priključenjem na mrežu lokalizuju se obeležja kvara rotora u vremenskom i frekvencijskom domenu.

Ipak, glavna prepreka primeni metode spektralne analize signala struje zaleta motora ima se u slučaju kada je trajanje pokretanja motora kratko. Tada se ne može ostvariti potrebna frekvencijska rezolucija za sprovođenje dijagnostike [22]. Autor u [146] je uveo vremenski promenljivi spektar, što je na određeni način omogućilo analizu spektra signala struje motora. Međutim, ostvarena frekvencijska rezolucija nije zadovoljavajuća da bi se sa sigurnošću moglo tvrditi da je predloženo rešenje pouzdano u otkrivanju kvara rotora. Pored toga, treba imati na umu da elektromagnetski prelazni proces može u potpunosti maskirati obeležje kvara u spektru

struje motora [141]. Kako bi se ostvarilo duže vreme zaleta motora, u [147] se neopterećen ispitivani motor snage 1,1 kW (sa jednim oštećenim štapnim provodnikom rotora) napaja sniženim naponom preko regulacionog autotransformatora u laboratorijskim uslovima. No, jasno je da je ovakvo rešenje nepraktično u industrijskim uslovima. Nešto drugačiji pristup ponudili su autori u [138], [148], gde se analizira signal struje motora u režimu protivstrujnog kočenja. Međutim, izražena termička i mehanička naprezanja motora tokom ovog prelaznog režima čine predloženi pristup neprihvatljivim, pogotovo kod motora velikih snaga. Treba istaći i to da metoda spektralne analize signala struje u prelaznom režimu kod motora koji se napajaju uređajima energetske elektronike (soft starteri ili invertori) i dalje predstavlja veliki izazov.

1.3.7 Metode zasnovane na analizi signala potencijala zvezdišta namotaja motora

Štapni provodnici rotora koji su u prekidu stvaraju neuravnoteženost rotorskog kola, što po pravilu ima direktnog uticaja na promene potencijala zvezdišta motora. Spektralnom analizom signala ovog potencijala moguće je izdvojiti mnogo veći broj karakterističnih komponenti značajnijih amplituda (u odnosu na metodu spektralne analize signala struje motora), a koje predstavljaju obeležja kvara rotora [149]. Tako autori u [149], [150] tvrde da je ova metoda osetljivija na kvar rotora od metoda spektralne analize signala struje motora. U [149], [150], [151] dat je matematički model asinhronne mašine koji uzima u obzir potencijal zvezdišta, čijom se analizom otkriva delimično ili potpuno oštećenje štapnih provodnika rotora i to bez promene strukture modela mašine. Sprovedene su i teorijske analize sa ciljem pojašnjenja nastanka komponenti u spektru, a koje su posledice kvara rotora. Analizirane su amplitude ovih komponenti, ali su kao obeležja kvara rotora u [150] korišćeni i fazni stavovi modula analitičkog signala, dobijenog iz signala potencijala zvezdišta motora primenom Hilbertove transformacije. Metod je eksperimentalno potvrđen, ne samo u uslovima mrežnog napajanja, već i za skalarno i vektorski upravljane motore. Ispitivani su motori sa jednim, odnosno tri štapna provodnika rotora u prekidu. Pri tom je momenat opterećenja iznosio 25% nazivnog. Konstatovano je da se spektralnom analizom signala potencijala zvezdišta motora mogu izdvojiti pouzdani pokazatelji kvara rotora čak i pri malim opterećenjima. Ipak, ne postoje pouzdana saznanja o mogućoj upotrebi ove metode za neopterećen motor. Metoda je relativno nova i nedovoljno istražena, ali pruža mogućnost daljeg proširenja istraživanja. Međutim, njena primena je ograničena samo na slučaj motora čiji su namotaji statora spregnuti u zvezdu i čije je zvezdište pristupačno.

1.3.8 Metode zasnovane na analizi signala električnih snaga motora

Deo trenutne vrednosti električne snage motora jednak je proizvodu trenutne vrednosti napona između bilo koja dva priključna kraja motora i trenutne vrednosti struje na jednom od tih priključnih krajeva [152]. Generisani signal snage se potom analizira primenom odgovarajućih tehnika sa ciljem utvrđivanja određenih obeležja i karakterističnih komponenti u njenom spektru (engl. *instantaneous power signature analysis*) koje su posledica kvara rotora. Ipak, u literaturi

postoje različiti pristupi u realizaciji ove metode. Tako se može analizirati ne samo deo, već i ukupna trenutna vrednost električne snage motora [153]. Spektar signala dela trenutne vrednosti električne snage motora u prisustvu kvara rotora sadrži jednosmernu komponentu, komponentu na dvostrukoj učestanosti izvora, ali i komponente oko dvostruke učestanosti izvora (funkcije su klizanja) i dodatnu komponentu na učestanosti dvostruke vrednosti klizanja [153], [154]. Komponente snage oko dvostruke učestanosti izvora i komponenta snage na učestanosti dvostruke vrednosti klizanja motora su isključive posledice oštećenja štapnih provodnika rotora [153]. S druge strane, samo jedna karakteristična komponenta kvara rotora postoji u spektru signala ukupne trenutne vrednosti signala električne snage motora i to je komponenta na učestanosti dvostruke vrednosti klizanja motora [153], [155]. Autori u [156] su došli do zaključka da je metoda zasnovana na analizi spektra signala dela trenutne vrednosti električne snage najosetljivija na kvar rotora, a autori u [103] su uspeli da detektuju i delimično oštećenje štapnog provodnika rotora pri opterećenju motora od 25% nazivnog.

U daljim istraživanjima, autori u [157], [158] izlažu drugačiji koncept zasnovan na tzv. teoriji trenutne snage [159], [160], [161], [162]. Oni predlažu da se vrši spektralna analiza signala trenutne vrednosti neaktivne snage motora u cilju praćenja karakteristične komponente kvara rotora na učestanosti dvostruke vrednosti klizanja. Primenom ove metode uspešno je detektovan prekid jednog štapnog provodnika rotora neopterećenog mrežno napajanog motora. Međutim, s obzirom na to da je otkrivanje kvara rotora zasnovano na otkrivanju niskofrekvencijske komponente na učestanosti dvostruke vrednosti klizanja motora, postavlja se pitanje uticaja potencijalnih oscilacija momenta opterećenja na ovu karakterističnu komponentu snage u spektru. Autori u [163] su analizirali ovu pojavu i došli su do zaključka da oscilacije momenta opterećenja nemaju uticaja na amplitudu karakteristične komponente kvara u spektru signala trenutne neaktivne snage motora, što nije slučaj ako se analizira signal trenutne vrednosti aktivne snage. Ovo je potvrđeno na sprovedenim eksperimentalnim istraživanjima.

Uprkos prednostima metoda detekcije kvara rotora na bazi analize spektra signala električnih snaga motora, one nisu naišle na širu primenu. Njihov osnovni nedostatak je potreba za poznavanjem signala struje i napona (metoda zasnovana na analizi dela trenutne električne snage) ili signala sve tri struje i napona motora (metoda zasnovana na teoriji trenutne snage), što uvećava broj potrebnih senzora. Ipak, u [10] se navodi da i pored tih nedostataka ove metode daju pouzdanije rezultate u odnosu na danas najzastupljenije tehnike analize spektra signala struje motora.

Pored prethodno opisanih metoda, koje čine osnov tehnika za ranu otkrivanje kvara rotora, potrebno je istaći da je moguća i njihova sinteza u cilju uvećanja pouzdanosti rezultata sprovedenih analiza [164]. Posebno interesantnu oblast čini upotreba veštačke inteligencije koja vodi ka automatizovanoj dijagnostici kvara rotora, pri čemu prepoznavanje oblika (engl. *pattern recognition*) predstavlja ključnu tehniku. U prilog tome govore i brojni objavljeni radovi [57], [165], [166], [167], [168], [169], [170].

1.4 Kratak sadržaj i organizacija disertacije

Disertacija se sastoji iz osam poglavlja. Prvo poglavlje predstavlja uvod u kojem je ukazano na značaj i potrebu ranog otkrivanja oštećenja štapnih provodnika rotora (u daljem tekstu će se koristiti i termin “kvar rotora”) trofaznog kaveznog asinhronog motora. Definisani su predmet i cilj istraživanja, sa naglaskom na očekivane rezultate. Dat je pregled literature koja izučava predmetnu oblast, uz kratak opis strukture i sadržaja disertacije.

U drugom poglavlju je dat teorijski osvrt na postojanje karakterističnih obeležja neuravnoteženosti električnog kola rotora trofaznog kaveznog asinhronog motora napajanog trofaznim simetričnim naponom. Za potrebe modelovanja električnog kola rotora uveden je pojam rotorskih petlji. Pojava oštećenja jednog ili više štapnih provodnika rotora remeti uravnoteženost njegovog električnog kola, što se manifestuje u pojavi nesimetrije struja rotorskih petlji, a time i struja štapnih provodnika rotora. Ključni momenat za analizu ovakvog nesimetričnog režima u rotorskom kolu jeste transformacija struja štapnih provodnika iz faznog domena u domen simetričnih komponenti. Zatim je ovakav pristup korišćen u analitičkim dokazima postojanja obeležja kvara rotora u spektru struja motora. Pokazaće se da, zbog prisustva ovih komponenti u struji motora, dolazi do pojave pulsiranja elektromagnetskog momenta, a time i brzine obrtanja motora. Način na koji je iznet teorijski dokaz o postojanju obeležja kvara rotora u spektru signala struje, elektromagnetskog momenta i brzine obrtanja motora se ne nalazi u literaturi iz predmetne oblasti. Na kraju poglavlja izložene su najčešće korišćene neinvazivne tehnike otkrivanja kvara rotora koje su zasnovane na detekciji obeležja kvara u spektru signala od interesa i to u stacionarnom stanju pogona. Ukazano je na osnovne nedostatke metoda u smislu nemogućnosti otkrivanja kvara rotora kod neopterećenog motora u stacionarnom stanju pogona, jer je u tom režimu klizanje blisko nuli (obeležja kvara su funkcija klizanja motora).

Zbog evidentne potrebe za unapređenjem tehnika za rano otkrivanje kvara rotora, u trećem poglavlju je predloženo da se, u svrhu testa, namotaji statora na odgovarajući način vežu na red i napoje jednofaznim naponom. Na taj način će se smanjiti brzina obrtanja motora i povećati njegovo klizanje, pa se pretpostavlja da će se obeležja kvara rotora, čije je postojanje dokazano u prethodnom poglavlju, moći otkriti i kod neopterećenog motora. Nakon toga, pristupilo se analizi obeležja neuravnoteženosti električnog kola rotora. Međutim, ispostavilo se da se u ovako izmenjenim uslovima napajanja pojavljuju i dodatna obeležja kvara rotora u spektru signala struje motora, ali i elektromagnetskog momenta, brzine obrtanja i električne snage motora, a koja se u slučaju trofaznog napajanja ne mogu sa sigurnošću registrovati. Na osnovu ovih rezultata istraživanja, postavljena je hipoteza i formulisan predlog nove metode za pouzdano i rano otkrivanje kvara rotora. Metod se zasniva na detekciji značajnih obeležja kvara rotora u spektru signala terminalnih veličina jednofazno napajanog trofaznog kaveznog motora u stacionarnom stanju i to bez prisustva momenta opterećenja.

Četvrto poglavlje je posvećeno matematičkom modelovanju kvara rotora u radu neopterećenog trofaznog kaveznog motora napajanog jednofaznim naponom. Prethodno je definisan model motora koji se oslanja na višestruko spregnuta električna kola. Zapravo, reč je o modelu mašine u originalnom (netransformisanom) domenu koji, iako složen, omogućava da se istraži uticaj kvara rotora na spektar statorske struje, elektromagnetskog momenta i brzine obrtanja motora putem računarskih simulacija. To je osnovna prednost ovakvog modela u poređenju sa postojećim koji nisu sasvim validni za analizu kvarova mašina. Treba napomenuti da su elementi matrice induktivnosti u matematičkom modelu mašine određeni linearnim magnetostatičkim simulacijama u programu *FEMM 4.2*, koji se oslanja na metode konačnih elemenata, dok je celokupan model motora sa kvarom rotora realizovan u programu *MATLAB/Simulink*. Kvar rotora se u matematičkom modelu opisuje na jednostavan način, uvećanjem otpornosti štapnog provodnika ili više njih. Sprovedenim računarskim simulacijama provereni su rezultati teorijskih razmatranja iz prethodnog poglavlja. Time je učinjen prvi korak u potvrdi postavljene hipoteze istraživanja.

Uzimajući u obzir značaj savremenih tehnika dijagnostike, a bez kojih se u današnje vreme ne može zamisliti održavanje industrijskih sistema, u petom poglavlju je predloženo unapređenje izložene metode za rano otkrivanje kvara rotora uvođenjem postupka za procenu oštećenja štapnih provodnika. Predloženo rešenje se zasniva na primeni veštačke inteligencije, odnosno veštačke neuronske mreže koja ocenu oštećenja rotora prevodi na prepoznavanja oblika (klasifikaciju uzoraka). Ulaz u neuronsku mrežu čine reprezentativna obeležja kvara rotora koja su ustanovljena na osnovu izvršenih računarskih simulacija iz prethodnog poglavlja. To su obeležja iz frekvencijskog domena signala terminalnih veličina (struje i trenutne vrednosti električne snage motora), uz dodatak obeležja signala struje motora iz vremenskog domena. Na izlazu mreže vrši se klasifikacija stanja rotora u nekoliko predefinisanih grupa. Primenom ovakvog rešenja moguće je značajno popraviti efikasnost procesa održavanja modernih elektromotornih pogona.

Eksperimentalna postavka na kojoj je urađena provera prethodno iznetih teorijskih i simulacionih razmatranja opisana je u šestom poglavlju. Eksperimenti su izvršeni na trofaznom kaveznom motoru sa ispravnim rotorom i rotorom sa prekidom jednog, odnosno tri susedna štapna provodnika. Saglasno dobijenim rezultatima, zaključeno je da je postavljena hipoteza ispravna, tj. predložena metoda za rano otkrivanje kvara rotora neopterećenog trofaznog kaveznog asinhronog motora u potpunosti je potvrđena. Takođe, u istom poglavlju predstavljeni su rezultati eksperimentalne verifikacije predloženog postupka za ocenu oštećenja štapnih provodnika rotora. Na kraju poglavlja ukazano je na značaj dobijenih rezultata.

U sedmom poglavlju su izneti zaključci o ostvarenim rezultati istraživanja. Takođe, daju se smernice za dalja istraživanja u oblasti.

Osmo poglavlje sadrži spisak literature koja je korišćena u ovoj doktorskoj disertaciji.

2. OBELEŽJA NEURAVNOTEŽENOSTI ELEKTRIČNOG KOLA ROTORA U UOBIČAJENIM POGONSKIM USLOVIMA

U ovom poglavlju se daje teorijski osvrt na postojanje karakterističnih obeležja neuravnoteženosti električnog kola rotora trofaznog kaveznog asinhronog motora napajanog trofaznim simetričnim naponom. Neuravnoteženost električnog kola rotora se javlja u slučaju oštećenja i/ili prekida jednog ili više štapnih provodnika i/ili kratkospojnih prstenova, što vodi ka nesimetriji struja rotora. Analiza ovakvog režima je vršena metodom simetričnih komponenti. Za potrebe modelovanja električnog kola rotora uveden je pojam rotorskih petlji. Jednu rotorsku petlju čine dva susedna štapna provodnika rotora sa dva naspramna dela kratkospojnih prstenova. Ovakav pristup predstavlja pogodan način za opisivanje kola rotora jer se mogu definisati fluksni obuhvati, kao i sopstvene i međusobne induktivnosti unutar rotora, ali i prema namotajima statora [171]. Predloženi koncept će biti korišćen u analitičkim dokazima postojanja obeležja kvara rotora u spektru struja motora, fluksnih obuvata namotaja statora, elektromagnetskog momentu i brzini obrtanja motora. Sam dokaz se izlaže u više koraka. U prvom koraku se utvrđuje postojanje obeležja kvara rotora u spektru struja statorskih namotaja motora. Potom se pokazuje da zbog prisustva ovih komponenti struja dolazi do pojave pulsacije elektromagnetskog momenta motora, a koji će dalje stvoriti oscilacije u brzini obrtanja. Konačno, zbog pojave oscilacije brzine obrtanja nastaju dodatne komponente (obeležja) u spektru struja namotaja statora motora.

Treba napomenuti da je uvođenjem rotorskih petlji primat dat strujama u samom kavezu uz zanemarenje postojanja struja između štapnih provodnika kroz magnetsko kolo rotora, indukovanih struja u vratilu i ležajnih struja. Uzevši u obzir da je specifična provodnost kaveza veća od specifične provodnosti feromagnetskih limova magnetskog kola rotora i specifične provodnosti materijala od koga je izrađeno vratilo motora, te da je električna otpornost kola kroz koje se zatvaraju ležajne struje relativno velika, usvojena zanemarenja su sasvim opravdana.

2.1 Obeležja kvara rotora u spektru struja motora

U ovom odeljku se iznosi dokaz o postojanju komponenti u spektru struje motora kao obeležja kvara rotorskog kaveza (oštećenja štapnih provodnika i/ili kratkospojnog prstena). Prvobitno se izlaže dokaz zasnovan na obrtnim poljima, a potom se daje analitički potvrda postojanja obeležja kvara rotora u spektru struje motora. Ne gubeći na opštosti dokaza, pretpostavlja se da je razmatrani motor dvopolni.

Kada se trofazni uravnotežen namotaj statora asinhronog motora priključi na trofazni simetričan napon, u namotajima statora će se uspostaviti simetričan režim struja. Ove prostoperiodične struje u namotajima statora će formirati resultantnu magnetnopobudnu silu koja će uspostaviti obrtno magnetsko polje. Usvojiće se da je smer obrtanja ovog magnetskog polja pozitivan (obrnuto smeru kazaljke na satu), a ugaona brzina obrtanja je određena ugaonom učestanošću ω_s napona napajanja (slika 2.1 (a)). Usled promene magnetskog fluksa, u kratkospojenim štapnim provodnicima rotora (tj. rotorskim petljama) se indukuju elektromotorne sile, koje u slučaju ispravnog rotora imaju jednake amplitude [172] i fazne stavove koji su sukcesivno pomereni za ugao $2\pi/N_B$, gde je N_B broj štapnih provodnika kaveza. Indukovane elektromotorne sile u kratkospojenim provodnicima rotora uspostavljaju prostoperiodične struje ugaone učestanosti ω_r (učestanost klizanja), pri čemu je:

$$\omega_r = s\omega_s, \quad (2.1)$$

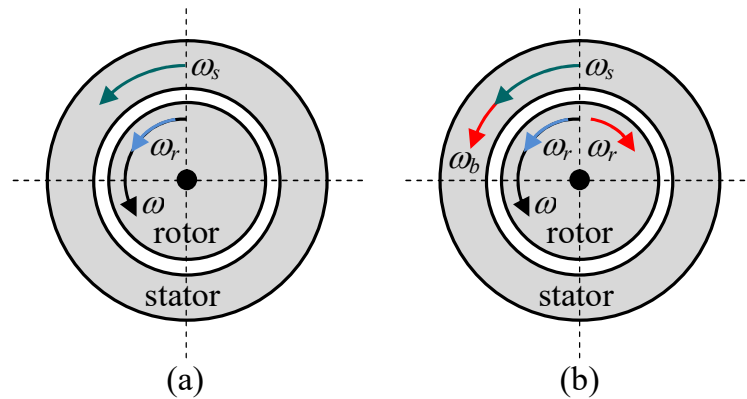
gde je s klizanje motora. Ukoliko je rotorski kavez ispravan struje u štapnim provodnicima formiraju simetričan režim i rotor stvara svoju resultantnu magnetnopobudnu silu koja uspostavlja obrtno magnetsko polje rotora. Ovo polje se obrće u smeru obrtanja rotora i to ugaonom brzinom ω_r u odnosu na rotor. Ako se ugaona brzina obrtanja rotora označi sa ω , tada je brzina obrtnog polja rotora u odnosu na nepokretni referentni sistem statora jednaka sa ω_s (slika 2.1 (a)).

U slučaju pojave oštećenja ili prekida nekog od štapnih provodnika, odnosno oštećenja kaveza, električno kolo rotora prestaje da bude uravnoteženo i struje u preostalim provodnicima više nemaju iste amplitude, stvarajući nesimetričan režim. Kao posledica toga, na rotoru nastaje obrtno polje koje se obrće brzinom ω_r u odnosu na rotor, ali u suprotnom smeru (slika 2.1 (b)). U odnosu na nepokretni stator, ovo polje se obrće ugaonom brzinom ω_b :

$$\omega_b = -\omega_r + \omega = -s\omega_s + (1-s)\omega_s = (1-2s)\omega_s. \quad (2.2)$$

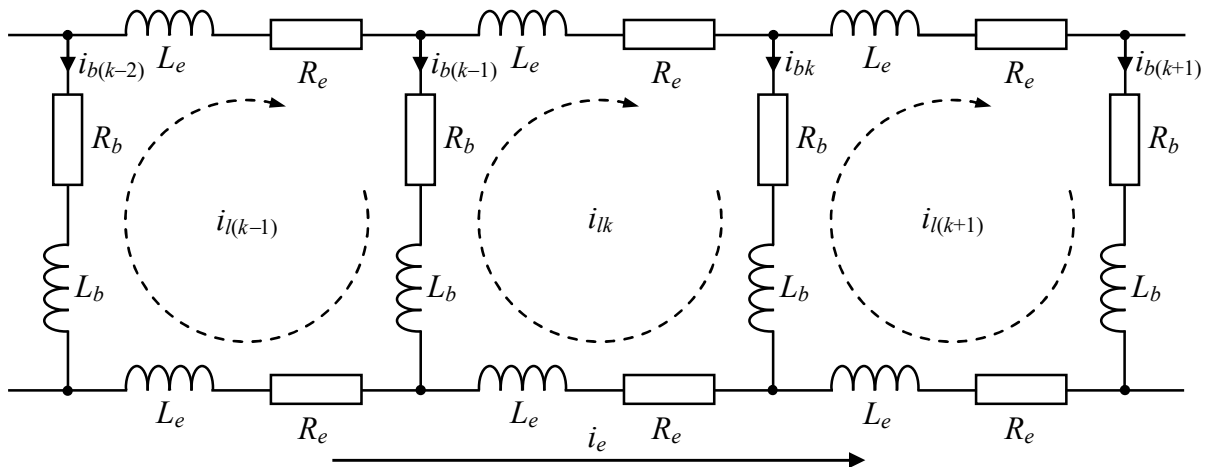
Kao posledica ovog obrtnog polja u namotajima statora će se indukovati elektromotorne sile ugaone učestanosti ω_b , te će se u spektru struja motora pored osnovne komponente na učestanosti ω_s pojaviti i komponente struja na učestanosti ω_b . Ove struje formiraju obrtno polje koje se obrće ugaonom brzinom ω_b (slika 2.1 (b)).

Ipak, od interesa je analitički dokazati postojanje komponente struje na učestanosti datoj izrazom (2.2), ali i drugih komponenti u spektru struje motora koje se na prethodno izloženi uprošćen način ne mogu jednostavno ustanoviti. Dalje, neophodno je utvrditi kakve posledice na pogonske osobine motora ostavljaju dodatne komponente u spektru struje motora. Dokaz koji sledi u nastavku oslanja se na model mašine u kome se električno kolo rotora predstavlja preko rotorskih petlji. Ovakav pristup je krajnje praktičan jer omogućava definisanje fluksnih obuhvata, te sopstvenih i međusobnih induktivnosti unutar rotora i prema statorskim namotajima.



Slika 2.1 Ilustracija obrtnih polja asinhronog motora.
(a) Ispravan rotor. (b) Rotor sa oštećenim kavezom.

Na slici 2.2 je ilustrovan detalj električnog kola ispravnog rotorskog kaveza [172], [173]. Na toj slici su sa L_b i R_b označene induktivnost rasipanja i otpornost rotorskog provodnika, dok su sa L_e i R_e označene induktivnost rasipanja i otpornost dela kratkospojnog čeonog prstena koji pripada jednoj petlji. Struje u štapnim provodnicima su označene sa i_b , struje u rotorskim petljama su obeležene sa i_l , a sa i_e je označena struja kroz kratkospojni prsten. Indeks k se odnosi na tekuću rotorsku petlju. Rotorske petlje su spregnute međusobno kao i sa namotajima statora. Ako se sa N_b označi broj štapnih provodnika rotora i uzimajući u obzir kratkospojne prstenove, to se električna šema rotorskog kaveza može predstaviti sa N_b+1 nezavisnih strujnih petlji. Struje u petljama su posledice postojanja indukovanih elektromotornih sila u njima.



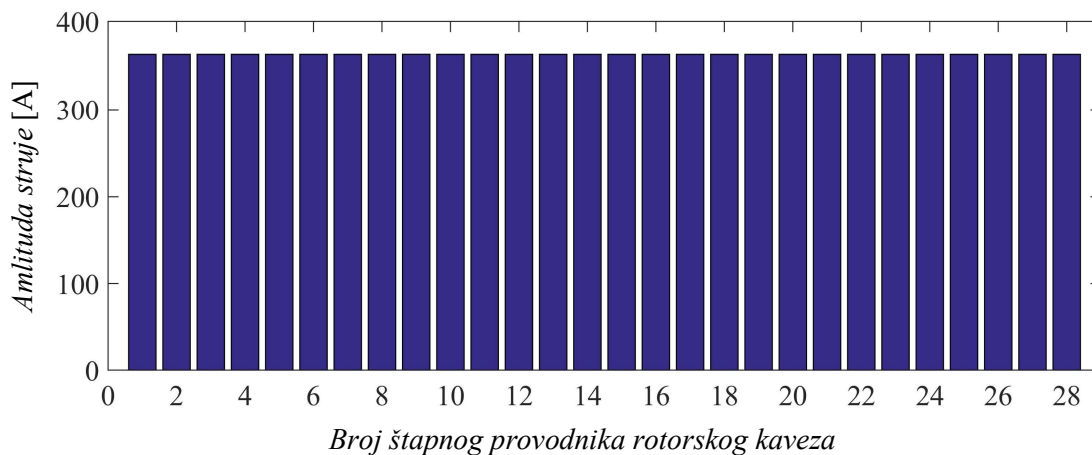
Slika 2.2 Detalj razvijene električne šeme ispravnog rotorskog kaveza.

Prema električnoj šemi sa slike 2.2, struje u štapnim provodnicima rotora jednake su razlici konturnih struja dve susedne rotorske petlje, što se može zapisati na sledeći način:

$$\begin{bmatrix} i_{b1} \\ i_{b2} \\ \vdots \\ i_{b(N_B-1)} \\ I_{bN_B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{l1} \\ i_{l2} \\ \vdots \\ i_{l(N_B-1)} \\ i_{lN_B} \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

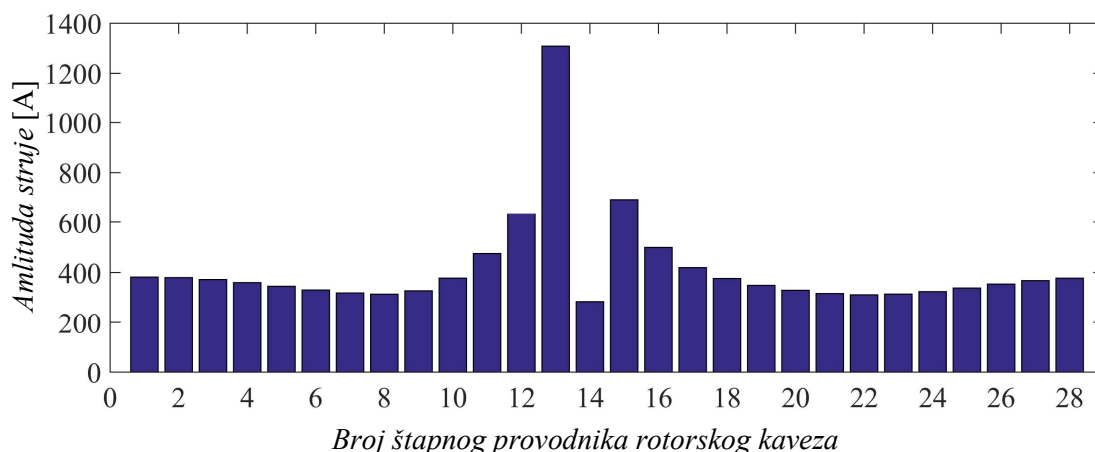
Slično kao u izrazu (2.3) mogu se izračunati i struje u delovima kratkospojnog prstena kaveza i to kao razlika konturne struje posmatrane petlje i struje kratkospojnog prstena.

Kod ispravnog rotorskog kaveza struje u štapnim provodnicima formiraju simetričan režim. Ovo je ilustrovano na slici 2.3 gde je prikazana raspodela struja u provodnicima ispravnog rotorskog kaveza opterećenog motora u stacionarnom stanju, dobijena računarskom simulacijom na modelu asinhronne mašine koji je definisan u četvrtom poglavlju.

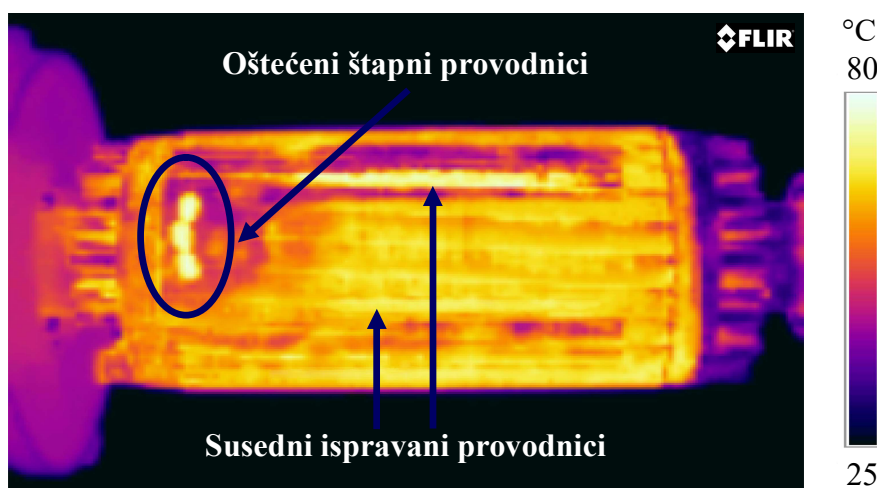


Slika 2.3 Ilustracija raspodela struja u provodnicima ispravnog rotorskog kaveza.

Pojava oštećenja jednog ili više štapnih provodnika rotora (i/ili dela kratkospojnog prstena) remeti uravnoteženost njegovog električnog kola, što se manifestuje u nesimetriji struja rotorskih petlji, a time i struja provodnika rotora (relacija 2.3). Ilustracija ove pojave prikazana je na slici 2.4. Na njoj je prikazana raspodela struja u provodnicima rotorskog kaveza opterećenog motora u stacionarnom stanju, dobijena računarskom simulacijom na modelu asinhronne mašine sa delimičnim oštećenjem štapnog provodnika br. 14. Ovo oštećenje izaziva uvećanje struja u susednim ispravnim provodnicima rotora i njihovo intenzivnije zagrevanje, dok se sam rotorski kavez nejednako zagreva (slika 2.5). Sem toga, veliki su i iznosi termičkih dilatacija ispravnih provodnika (sa znatno uvećanim strujama) u odnosu na lim paket rotora, kao i mehanička naprezanja u vezi sa tim. Sve ovo može dovesti do krivljenja rotora i pojave njegovog ekscentriciteta. Ukoliko motor ostane u pogonu, tokom vremena se dešava progresija oštećenja i na susedne štapne provodnike, što u krajnjem ishodu može dovesti do višestrukih oštećenja kaveza (slika 2.6), pa čak i do uništenja namotaja statora.



Slika 2.4 Ilustracija raspodele struja u provodnicima rotorskog kaveza sa oštećenjem štapnog provodnika br. 14 (u simulaciji je otpornost oštećenog provodnika uvećana nekoliko puta).



Slika 2.5 Termovizijski snimak rotora sa oštećenjem – tri provodnika u prekidu [174]. Sa slike se uočava značajan porast temperature susednog ispravnog štapnog provodnika (kao posledica povećanja struje – ilustrovano na slici 2.4) kao i neravnomerno zagrevanje rotora.



Slika 2.6 Fotografija trajnog oštećenja kaveza rotora.

Ključni momenat za analizu nesimetričnog režima, koji se ima u slučaju oštećenja kaveza, jeste transformacija struja štapnih provodnika rotora u domen simetričnih komponenti. Ideja

simetričnih komponenti se vezuje za višefazne sisteme, a rotorski kavez je primer takvog sistema. Transformacija se izvodi primenom odgovarajuće matrice raspredanja. Uzimajući u obzir da je broj štapnih provodnika rotora N_B , matrica raspredanja \mathbf{F} se definiše na sledeći način:

$$\mathbf{F} = \frac{1}{N_B} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 & \dots & a^{(N_B-2)1} & a^{(N_B-1)1} \\ 1 & a^2 & a^4 & \dots & a^{(N_B-2)2} & a^{(N_B-1)2} \\ 1 & a^3 & a^6 & \dots & a^{(N_B-2)3} & a^{(N_B-1)3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & a^{1(N_B-1)} & a^{2(N_B-1)} & \dots & a^{(N_B-2)(N_B-1)} & a^{(N_B-1)(N_B-1)} \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \end{bmatrix}, a = e^{-j\frac{2\pi}{N_B}}, \quad (2.4)$$

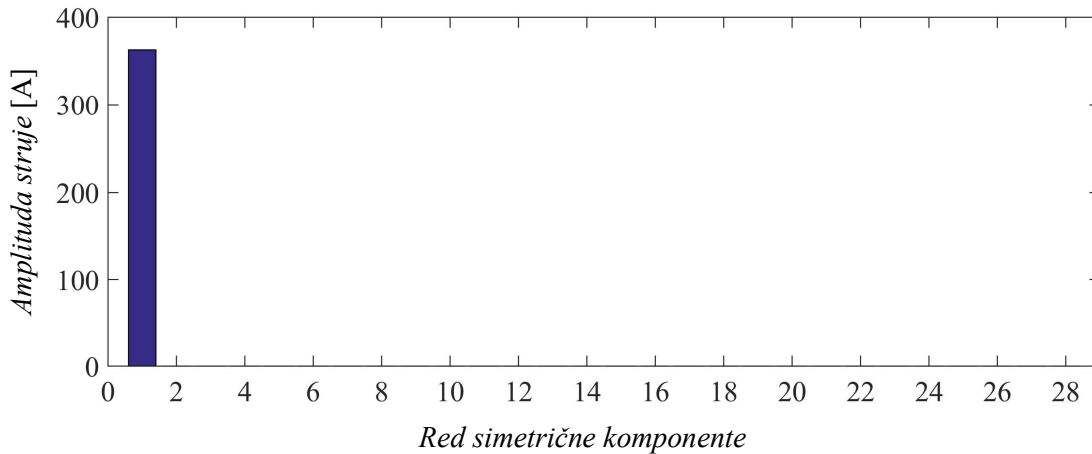
gde operator a definiše fazne pomeraje između komponenti simetričnih fazora. Matrica raspredanja, definisana relacijom (2.4), primenjuje se na vektor struja štapnih provodnika rotora preveden u domen fazora (\mathbf{I}^B), pa je izraz za vektor simetričnih komponenti struja štapnih provodnika rotora (\mathbf{I}^{SB}):

$$\mathbf{I}^{SB} = \mathbf{F}\mathbf{I}^B, \quad (2.5)$$

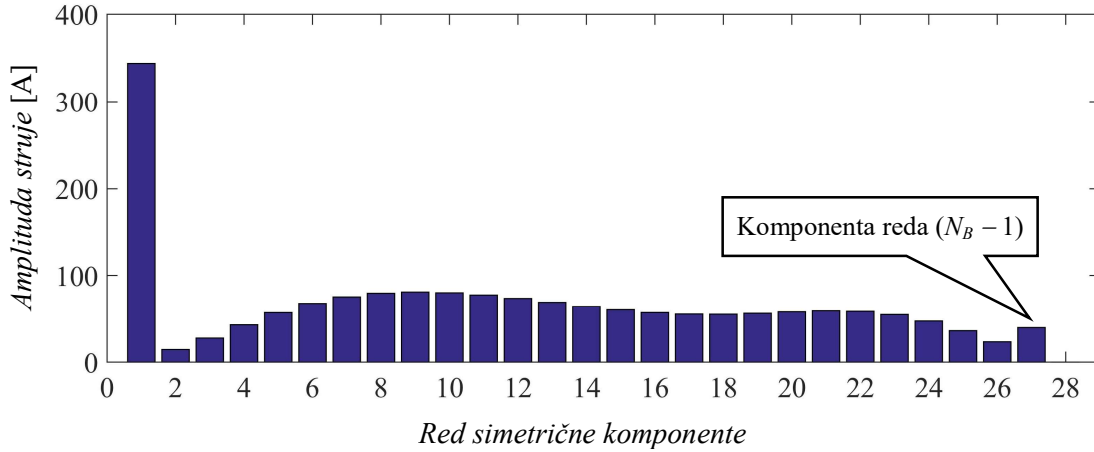
gde su:

$$\mathbf{I}^{SB} = [I_{b1}^S \ I_{b2}^S \ I_{b3}^S \ \dots \ I_{b(N_B-1)}^S \ I_{bN_B}^S]^T \text{ i } \mathbf{I}^B = [I_{b1} \ I_{b2} \ I_{b3} \ \dots \ I_{b(N_B-1)} \ I_{bN_B}]^T. \quad (2.6)$$

Kada se transformacioni obrazac dat relacijom (2.5) primeni na slučajeve ilustrovane slikama 2.3 i 2.4, dobijaju se simetrične komponente struja rotorskih provodnika, čije su vrednosti redom prikazane na slikama 2.7 i 2.8. U navedenom primeru rotor ima 28 štapnih provodnika. Jasno je da u slučaju ispravnog kaveza postoji samo jedna simetrična komponenta struja provodnika rotora i to je komponenta 1. reda (slika 2.7). Bitno drugačija situacija se ima kod postojanja oštećenja štapnog provodnika, jer sada postoje i sve ostale simetrične komponente, izuzev nulte (slika 2.8). U nastavku će se utvrditi uticaj kojeg ove simetrične komponente imaju na spektar struja statorskih namotaja motora.



Slika 2.7 Simetrične komponente struja štapnih provodnika ispravnog rotora.



Slika 2.8 Simetrične komponente struja štapnih provodnika rotora sa oštećenjem jednog provodnika (oštećen provodnik br. 14).

Dokaz o postojanju obeležja kvara rotora u spektru struje motora oslanja se na postojanje magnetske sprege između rotorskih petlji i namotaja statora (iskazane preko međusobne induktivnosti između bilo koje rotorske petlje i namotaja statora), te se sva dalja analiza premešta na rotorske petlje. Komponente koje postoje u strujama provodnika rotora moraju postojati i u strujama rotorskih petlji, gde je vektor simetričnih komponenti struja rotorskih petlji dat sa:

$$\mathbf{I}^{SL} = \left[I_{l1}^S \ I_{l2}^S \ I_{l3}^S \ \dots \ I_{l(N_B-1)}^S \ I_{lN_B}^S \right]^T. \quad (2.7)$$

Deo fluksnog obuhvata statorskog namotaja a , koji je posledica struja rotorskih petlji (tačnije simetričnih komponenti struja rotorskih petlji), definisan je sledećom relacijom:

$$\Psi_{adeo} = \sum_{n=1}^{N_B} \sum_{k=1}^{N_B} M_{rsk}(\mathcal{G}) \cdot I_{ln}^S. \quad (2.8)$$

Kada se međusobna induktivnost između namotaja statora i bilo koje rotorske petlje $M_{rsk}(\mathcal{G})$ predstavi kao prostoperiodična funkcija pozicije \mathcal{G} (što je za potrebe dokaza sasvim opravdano), a umesto simetričnih komponenti struja uvedu njihovi oblici u vremenskom domenu (sa zanemarenim početnim faznim stavovima) i vodeći računa o pomerajima, dobija se sledeći izraz:

$$\Psi_{adeo} = \sum_{n=1}^{N_B} \sum_{k=1}^{N_B} M_{rs} \cos\left(\mathcal{G} + \frac{2\pi(k-1)}{N_B}\right) \cdot I_{ln} \cos\left(\omega_r t - \frac{n \cdot 2\pi(k-1)}{N_B}\right). \quad (2.9)$$

Kako je:

$$\mathcal{G} = (1-s)\omega_s t, \quad (2.10)$$

i uzevši u obzir relaciju (2.1), izraz (2.9) se nakon trigonometrijskih transformacija svodi na:

$$\Psi_{adeo} = \sum_{n=1}^{N_B} \sum_{k=1}^{N_B} \left\{ \frac{M_{rs} I_{ln}}{2} \left(\cos\left((1-2s)\omega_s t + \frac{2\pi(k-1)(1+n)}{N_B} \right) + \cos\left(\omega_s t + \frac{2\pi(k-1)(1-n)}{N_B} \right) \right) \right\}. \quad (2.11)$$

Komponente fluksnog obuhvata iz (2.11) sa faznim stavovima $2\pi(k-1)(1+n)/N_b$, za $1 \leq k \leq N_B$, $2 \leq n \leq N_B-2$ i $n=N_B$ se međusobno poništavaju. Slično važi i za komponente fluksnog obuhvata sa faznim stavovima $2\pi(k-1)(1-n)/N_b$, za $1 \leq k \leq N_B$ i $2 \leq n \leq N_B$. Konačno, deo fluksnog obuhvata statorskog namotaja a se nakon sređivanja može predstaviti sledećim izrazom:

$$\Psi_{adeo} = \frac{N_B M_{rs}}{2} \left(I_{l1} \cos(\omega_s t) + I_{l(N_B-1)} \cos((1-2s)\omega_s t) \right). \quad (2.12)$$

Sličnim postupkom mogu se izvesti i izrazi za delove fluksnih obuhvata statorskih namotaja b i c :

$$\Psi_{bdeo} = \frac{N_B M_{rs}}{2} \left(I_{l1} \cos\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right) + I_{l(N_B-1)} \cos\left((1-2s)\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right) \right), \quad (2.13)$$

$$\Psi_{cdeo} = \frac{N_B M_{rs}}{2} \left(I_{l1} \cos\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}\right) + I_{l(N_B-1)} \cos\left((1-2s)\omega_s t + \frac{2\pi}{3}\right) \right). \quad (2.14)$$

Iz delova fluksnih obuhvata (2.12) – (2.14) će se u namotajima statora indukovati odgovarajuće elektromotorne sile, a potom uspostaviti i struje. Očigledno je da će se slučaju oštećenja štapnog provodnika rotora (i/ili kratkospojnog prstena) u frekvencijskom domenu struja namotaja statora pored osnovne komponente na učestanosti ω_s pojaviti i dodatne komponente na učestanosti $(1-2s)\omega_s$ (tzv. donji bočni pojas). Amplituda ove komponente struje zavisi od vrednosti simetrične komponente struje rotorskih petlji reda N_B-1 (obeležje kvara) i u direktnoj je srazmeri sa stepenom oštećenja kaveza. Nasuprot tome, ostale simetrične komponente struja rotorskih petlji nemaju uticaja na pojavu dodatne komponente u struji motora.

Ovim je objašnjen mehanizam nastanka obeležja kvara rotora u spektru struje motora i potvrđen je izraz (2.2). U nastavku će se analizirati uticaj ove komponente struje na elektromagnetski momenat motora. Pokazaće se da zbog njenog prisustva dolazi do pulsacije elektromagnetskog momenta, što se manifestuje pojavom oscilacija brzine obrtanja motora, te stvaranjem novih komponenti (obeležja) u spektru struja namotaja statora.

2.2 Obeležja kvara rotora u spektru elektromagnetskog momenta motora

U prethodnom delu je ukazano na postojanje karakteristične komponente u spektru struje motora koja je u direktnoj vezi sa oštećenjem rotorskog kaveza. Ispostavlja se da ova komponenta ima uticaja i na pulsacije elektromagnetskog momenta motora. Oslanjajući se na deo matematičkog modela mašine, ovde će se to analitički dokazati.

Za potrebe uvida u spektar elektromagnetskog momenta motora, u ovom delu je neophodno uvesti fluksne obuhvate namotaja statora. Zanemarujući magnetsku spregu između

statorskih namotaja i petlje kratkospojnog prstena rotora [171], fluksni obuhvati (Ψ_a , Ψ_b i Ψ_c) se mogu prikazati u matricnoj formi:

$$\begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L & M_{ss} & M_{ss} \\ M_{ss} & L & M_{ss} \\ M_{ss} & M_{ss} & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Psi_{adeo} \\ \Psi_{bdeo} \\ \Psi_{cdeo} \end{bmatrix}, \quad (2.15)$$

gde su sa L i M_{ss} definisane sopstvene i međusobne induktivnosti namotaja statora, pri čemu je $M_{ss} = -L/2$.

Uvažavajući činjenicu da se u spektru struja namotaja statora usled kvara rotora pojavljuje dodatna komponenta na učestanosti $(1-2s)\omega_s$, to će se pretpostaviti da su struje namotaja motora (i_a , i_b i i_c) oblika:

$$i_a = I_m \cos(\omega_s t + \gamma_m) + I_{mlsb} \cos((1-2s)\omega_s t + \gamma_{sb}), \quad (2.16)$$

$$i_b = I_m \cos\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3} + \gamma_m\right) + I_{mlsb} \cos\left((1-2s)\omega_s t - \frac{2\pi}{3} + \gamma_{sb}\right), \quad (2.17)$$

$$i_c = I_m \cos\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3} + \gamma_m\right) + I_{mlsb} \cos\left((1-2s)\omega_s t + \frac{2\pi}{3} + \gamma_{sb}\right), \quad (2.18)$$

gde je sa I_m označena amplituda struje motora na osnovnoj učestanosti, a I_{mlsb} predstavlja amplitudu komponente struje koja je posledica kvara rotora, a γ_{sb} početnu fazu.

Postoji više načina na koje je moguće izračunati vrednost elektromagnetskog momenta (T_e) asinhronne mašine [175]. Za potrebe ovog istraživanja krenuće se od sledećeg izraza:

$$T_e = 2\hat{I}_s \hat{\Psi}_s \sin(\mu_s), \quad (2.19)$$

gde \hat{I}_s i $\hat{\Psi}_s$ predstavljaju redom polifazore statorske struje i statorskog fluksnog obuhvata, a μ_s je ugao koga oni zaklapaju između sebe. Kako je ovde od primarnog interesa dokaz o postojanju oscilatorne komponente u spektru elektromagnetskog momenta motora, to će se po uzoru na izraz (2.19) definisati sledeći relacija kojom se može opisati momenat motora:

$$T_{ef} = i_a \Psi_a + i_b \Psi_b + i_c \Psi_c. \quad (2.20)$$

Smisao izraza (2.20) nije u izračunavanju vrednosti elektromagnetskog momenta, već isključivo sticanje uvida u njegov spektar kod postojanja kvara rotora, što on i omogućava.

U cilju daljeg pojednostavljenja dokaza, a u skladu sa prethodnim uprošćenjem, početni fazni stavovi struja iz (2.16) – (2.18) će se izopštiti iz daljeg razmatranja. Ovo je dozvoljeno učiniti jer se dokaz usmerava ka potvrdi postojanja talasnosti momenta. Zamenom relacija (2.12) – (2.14) i (2.16) – (2.18) u (2.15) dolazi se do sledećih pojednostavljenih izraza za fluksne obuhvate namotaja statora kod postojanja kvara rotora:

$$\Psi_a = \left(\left(\frac{3}{2} LI_m + \frac{N_B M_{rs}}{2} I_{l1} \right) \cos(\omega_s t) + \left(\frac{3}{2} LI_{mlsb} + \frac{N_B M_{rs}}{2} I_{l(N_B-1)} \right) \cos((1-2s)\omega_s t) \right), \quad (2.21)$$

$$\Psi_b = \left(\left(\frac{3}{2} LI_m + \frac{N_B M_{rs}}{2} I_{l1} \right) \cos\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right) + \left(\frac{3}{2} LI_{mlsb} + \frac{N_B M_{rs}}{2} I_{l(N_B-1)} \right) \cos\left((1-2s)\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right) \right), \quad (2.22)$$

$$\Psi_c = \left(\left(\frac{3}{2} LI_m + \frac{N_B M_{rs}}{2} I_{l1} \right) \cos\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}\right) + \left(\frac{3}{2} LI_{mlsb} + \frac{N_B M_{rs}}{2} I_{l(N_B-1)} \right) \cos\left((1-2s)\omega_s t + \frac{2\pi}{3}\right) \right). \quad (2.23)$$

Uvrštavanjem izraza (2.16) – (2.18) i (2.21) – (2.23) u relaciju (2.20), sređivanjem se dobija sledeće:

$$T_{ef} = \left(\left(\frac{3}{2} I_m \left(\frac{3}{2} LI_m + \frac{N_B M_{rs}}{2} I_{l1} \right) + \frac{3}{2} I_{mlsb} \left(\frac{3}{2} LI_{mlsb} + \frac{N_B M_{rs}}{2} I_{l(N_B-1)} \right) \right) + \left(\frac{3}{2} I_m \left(\frac{3}{2} LI_{mlsb} + \frac{N_B M_{rs}}{2} I_{l(N_B-1)} \right) + \frac{3}{2} I_{mlsb} \left(\frac{3}{2} LI_m + \frac{N_B M_{rs}}{2} I_{l1} \right) \right) \cos(2s\omega_s t) \right). \quad (2.24)$$

Prethodni izraz jasno ukazuje na prisustvo oscilatorne komponente na učestanosti $2s\omega_s$. S obzirom na to da izraz interpretira spektar elektromagnetskog momenta motora, to postaje očigledno da komponenta na učestanosti $2s\omega_s$ predstavlja obeležje kvara rotora. Amplituda oscilacija momenta motora zavisi od vrednosti komponente struje donjeg bočnog pojasa, kao i iznosa simetrične komponente struja rotorskih petlji reda N_B-1 , tj. od stepena oštećenja rotora.

Ovim razmatranjem je pokazano da se postojanje kvara rotora preslikava u spektar elektromagnetskog momenta motora. U nastavku će se analizirati uticaj talasnosti momenta motora na njegovu brzinu obrtanja.

2.3 Obeležja kvara rotora u spektru brzine obrtanja motora

Za nastavak izlaganja potrebno je uvesti Njutnovu jednačinu za slučaj rotacionog kretanja:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - T, \quad (2.25)$$

gde je sa T označen momenat opterećenja, a J je ukupni momenat inercije pogona (smatraće se konstantnim). Član sa izvodom momenta inercije u izrazu (2.25) je izostavljen jer se retko javlja, tj. izraz (2.25) zadovoljava potrebe dokaza. Kada se u obzir uzmu rezultati prethodnog dokaza, odnosno relacija (2.24), elektromagnetski momenat motora se može predstaviti na sledeći način:

$$T_e = T_{e1} + T_{e2} \cos(2s\omega_s t), \quad (2.26)$$

U prethodnom izrazu T_{e1} predstavlja srednju vrednost elektromagnetskog momenta motora i brojno je jednaka vrednosti momenta opterećenja u stacionarnom stanju pogona, a komponenta T_{e2} je posledica postojanja kvara rotora.

Zamenom relacije (2.26) u (2.25) dolazi se do sledeće diferencijalne jednačine:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_{e1} + T_{e2} \cos(2s\omega_s t) - T, \quad (2.27)$$

čijim se rešavanjem (uz pretpostavku stacionarnog stanja pogona) dolazi do sledećeg izraza za brzinu obrtanja motora u funkciji vremena:

$$\omega = \frac{T_{e2}}{J \cdot 2s\omega_s} \sin(2s\omega_s t) + \omega_{const}, \quad (2.28)$$

pri čemu je sa ω_{const} označena srednja vrednost brzine obrtanja ω u stacionarnom stanju.

Ovim je predočeno da u slučaju kvara rotora u spektru brzine obrtanja motora se javlja komponenta oscilatornog karaktera čija je učestanost $2s\omega_s$. Ova komponenta se može smatrati obeležjem kvara rotora. Amplituda oscilacije brzine obrtanja u stacionarnom stanju prevashodno zavisi od stepena oštećenja rotora i momenta inercije pogona. Za veća oštećenja rotora veća je vrednost komponente T_{e2} , te je i amplituda oscilacije brzine obrtanja motora izraženija. S druge strane, amplituda oscilacije brzine obrtanja je obrnuto srazmerna momentu inercije pogona.

Najzad, potrebno je ustanoviti kako se manifestuje oscilatorna komponenta brzine obrtanja motora iz (2.28) u poziciji rotora prema statoru (\mathcal{G}). Ovo se može utvrditi ako se krene od poznatog izraza:

$$\omega = \frac{d\mathcal{G}}{dt}. \quad (2.29)$$

Kada se (2.28) uvrsti u (2.29) i reši tako dobijena diferencijalna jednačina, dolazi se do sledećeg izraza kojim se opisuje pozicija rotora prema statoru u funkciji vremena:

$$\mathcal{G} = \omega_{stac} t - \frac{T_{e2}}{J \cdot 4s^2\omega_s^2} \cos(2s\omega_s t). \quad (2.30)$$

S obzirom na to da je međusobna induktivnost između namotaja statora i bilo koje rotorske petlje funkcija pozicije rotora, u nastavku će biti iskazan povratni uticaj komponenti datih relacijom (2.30) na struje u namotajima statora.

2.4 Uticaj oscilacija brzine obrtanja na struju motora

Ako se uvaži izraz (2.30), kao i (2.1), tada relacija (2.9) koja opisuje deo fluksnog obuhvata statorskog namotaja a dobija sledeću formu:

$$\Psi_{adeo} = \sum_{n=1}^{N_B} \sum_{k=1}^{N_B} \left\{ \begin{array}{l} M_{rs} \cos \left((1-s)\omega_s t - k_g \cos(2s\omega_s t) + \frac{2\pi(k-1)}{N_B} \right) \\ I_{ln} \cos \left(s\omega_s t - \frac{n \cdot 2\pi(k-1)}{N_B} \right) \end{array} \right\}, \quad (2.31)$$

pri čemu je:

$$k_g = \frac{T_{e2}}{J \cdot 4s^2 \omega_s^2}. \quad (2.32)$$

Transformisanjem proizvoda trigonometrijskih funkcija u zbir, relacija (2.31) dobija sledeći oblik:

$$\Psi_{adeo} = \sum_{n=1}^{N_B} \sum_{k=1}^{N_B} \left\{ \frac{M_{rs} I_{ln}}{2} \left(\begin{array}{l} \cos \left((1-2s)\omega_s t - k_g \cos(2s\omega_s t) + \frac{2\pi(k-1)(1+n)}{N_B} \right) + \\ \cos \left(\omega_s t - k_g \cos(2s\omega_s t) + \frac{2\pi(k-1)(1-n)}{N_B} \right) \end{array} \right) \right\}. \quad (2.33)$$

Kada se uvaži da se komponente fluksnog obuhvata iz (2.33) sa faznim stavovima $2\pi(k-1)(1+n)/N_b$ (za $1 \leq k \leq N_B$, $2 \leq n \leq N_B - 2$ i $n = N_B$) i komponente sa faznim stavovima $2\pi(k-1)(1-n)/N_b$ (za $1 \leq k \leq N_B$ i $2 \leq n \leq N_B$) poništavaju u zbiru, to se prethodni izraz može dalje razviti primenom adicionih formula, čime se dolazi do relacije:

$$\Psi_{adeo} = \frac{N_B M_{rs}}{2} \left(\begin{array}{l} I_{l1} \left(\begin{array}{l} \cos(\omega_s t) \cos(k_g \cos(2s\omega_s t)) + \\ \sin(\omega_s t) \sin(k_g \cos(2s\omega_s t)) \end{array} \right) + \\ I_{l(N_B-1)} \left(\begin{array}{l} \cos((1-2s)\omega_s t) \cos(k_g \cos(2s\omega_s t)) + \\ \sin((1-2s)\omega_s t) \sin(k_g \cos(2s\omega_s t)) \end{array} \right) \end{array} \right). \quad (2.34)$$

Da bi se izraz (2.34) mogao uprostiti, potrebno je izvršiti razvoj trigonometrijskih funkcija $\cos(x)$ i $\sin(x)$ u Tejlorov red [176]:

$$\cos(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n)!} x^{2n} = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \dots, \quad (2.35)$$

$$\sin(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)!} x^{2n+1} = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \dots \quad (2.36)$$

Uz pomoć relacija (2.35) i (2.36), funkcije $\cos(k_g \cos(2s\omega_s t))$ i $\sin(k_g \cos(2s\omega_s t))$ iz (2.34) se mogu aproksimirati uzimanjem prva dva člana razvoja u Tejlorov red:

$$\cos(k_g \cos(2s\omega_s t)) \approx \left(1 - \frac{k_g^2}{4} \right) - \frac{k_g^2}{4} \cos(4s\omega_s t), \quad (2.37)$$

$$\sin(k_g \cos(2s\omega_s t)) \approx k_g \left(1 - \frac{k_g^2}{24}\right) \cos(2s\omega_s t) - \frac{k_g^3}{24} \cos(6s\omega_s t). \quad (2.38)$$

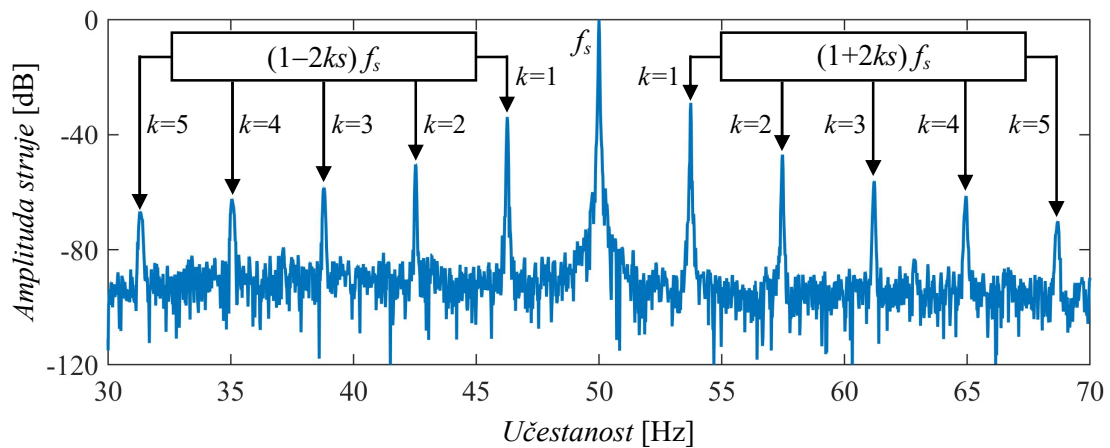
Uvrštavanjem prethodnih izraza u relaciju (2.34) i transformacijom proizvoda trigonometrijskih funkcija u zbir, nakon daljeg sređivanja deo fluksnog obuhvata statorskog namotaja a se može prikazati relacijom (2.39).

$$\Psi_{adeo} = \frac{N_B M_{rs}}{2} \left(\begin{array}{l} I_{l1} \left(1 - \frac{k_g^2}{4}\right) \cos(\omega_s t) + I_{l(N_B-1)} \frac{k_g \left(1 - \frac{k_g^2}{24}\right)}{2} \sin(\omega_s t) + \\ I_{l1} \frac{k_g \left(1 - \frac{k_g^2}{24}\right)}{2} \sin((1-2s)\omega_s t) + I_{l(N_B-1)} \left(1 - \frac{k_g^2}{4}\right) \cos((1-2s)\omega_s t) + \\ I_{l1} \frac{k_g \left(1 - \frac{k_g^2}{24}\right)}{2} \sin((1+2s)\omega_s t) - I_{l(N_B-1)} \frac{k_g^2}{8} \cos((1+2s)\omega_s t) - \\ I_{l1} \frac{k_g^2}{4} \cos((1-4s)\omega_s t) + I_{l(N_B-1)} \frac{k_g \left(1 - \frac{k_g^2}{24}\right)}{2} \sin((1-4s)\omega_s t) - \\ I_{l1} \frac{k_g^2}{4} \cos((1+4s)\omega_s t) - I_{l(N_B-1)} \frac{k_g^3}{48} \sin((1+4s)\omega_s t) - \\ I_{l1} \frac{k_g^3}{48} \sin((1-6s)\omega_s t) - I_{l(N_B-1)} \frac{k_g^2}{8} \cos((1-6s)\omega_s t) - \\ I_{l1} \frac{k_g^3}{48} \sin((1+6s)\omega_s t) \end{array} \right). \quad (2.39)$$

Sličnim postupkom bi se moglo doći i do izraza za delove fluksnih obuhvata statorskih namotaja b i c , koji bi se razlikovali jedino za iznose faznih pomaka, dok bi se komponente od interesa mogle prepoznati kao u (2.39). Delovi fluksnih obuhvata će posredstvom indukovane elektromotorne sile uspostaviti struje u namotajima statora na istim učestanostima kao u (2.39), tj. javlja se dodatna komponenta struje motora na učestanosti $(1+2s)\omega_s$, kao i komponente na učestanostima $(1+4s)\omega_s$ i $(1+6s)\omega_s$ (komponente gornjeg bočnog pojasa). Takođe, u spektru struje motora se pojavljuju i komponente na učestanostima $(1-2s)\omega_s$, $(1-4s)\omega_s$ i $(1-6s)\omega_s$ (komponente donjeg bočnog pojasa). Ukoliko bi se uzeo veći broj članova razvoja u Tejlorov red u (2.37) i (2.38), postalo bi očigledno da je odgovor rotorskog kola na oštećenje kaveza pojava komponenti u spektru struja motora na učestanostima $(1\pm 2ks)\omega_s$, $k \in \{1, 2, 3, \dots\}$ i zato predstavljaju obeležja kvara rotora. Ovo je ilustrovano na slici 2.9, gde je prikazan deo amplitudskog spektra struje motora sa neispravnim rotorom koji je korišćen u ovom istraživanju.

Karakteristične komponente u spektru su normalizovane vrednošću komponente struje na osnovnoj učestanosti napajanja ($f_s=50$ Hz) i izražene su u dB. Vrednosti komponenti struja bočnih pojasa su u direktnoj srazmeri sa stepenom oštećenja kaveza, s tim što su najizraženije komponente na učestanostima $(1\pm 2s)\omega_s$, odnosno $(1\pm 2s)f_s$.

Ovim je analitički pokazano kakav uticaj ima pulsiranje brzine obrtanja motora na spektar struja namotaja statora. Treba istaći da pojava dodatnih obeležja kvara rotora u spektru struje motora stvara nove komponente u spektru elektromagnetskog momenta i brzine obrtanja motora na učestanostima $2ks\omega_s$, $k\in\{2,3,\dots\}$.



Slika 2.9 Amplitudski spektar signala struje motora sa oštećenim rotorom.

U nastavku ovog poglavlja razmotriće se najčešće korišćene neinvazivne tehnike detekcije kvara rotora u stacionarnom stanju pogona.

2.5 Neinvazivne metode za detekciju kvara rotora

Neinvazivne metode podrazumevaju izdvajanje i praćenje obeležja čiji je uzročnik kvar rotora i to iz izmerenih signala motora (električnih i/ili neelektričnih). Na osnovu prethodno iznetih teorijskih razmatranja postaje jasno da se ove tehnike mogu osloniti na detekciju obeležja kvara rotora u spektru signala struje, momenta i brzine obrtanja motora. Svaka dalja progresija oštećenja može se pratiti na osnovu porasta amplituda ovih komponenti u spektru. Praćenje stanja rotora moguće je sprovesti i analizom amplitudskog spektra signala trenutne električne snage, polja rasutog magnetskog fluksa, kao i signala buke i mehaničkih vibracija motora, jer i oni sadrže informacije o stanju rotora. Spektralna analiza se sprovodi prevođenjem signala struje iz vremenskog domena u frekvencijski i to primenom različitih tehnika obrade signala. Za te potrebe najčešće se koristi diskretna Furijeova transformacija (engl. *discrete Fourier transform*):

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j \frac{2\pi kn}{N}}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1, \quad (2.40)$$

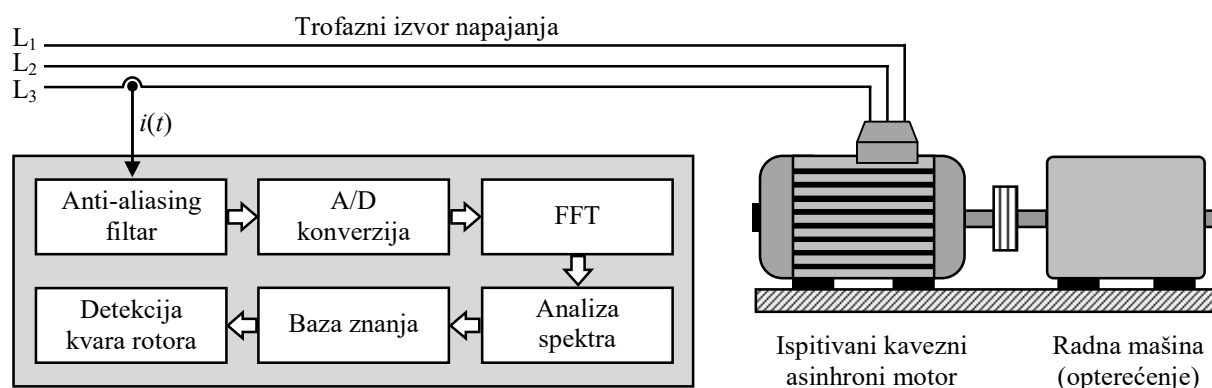
gde $x[n]$ predstavlja odbirke analognog signal $x(t)$, a N broj tačaka u kojima se izračunava spektar. Vrednost $X[k]$ je srazmerna vrednosti spektra analognog signala $x(t)$ na učestanosti

jednakoj $(F_s/N) \cdot k$, gde je F_s učestanost uzorkovanja. Diskretna Furijeova transformacija spada u kategoriju neparametarskih metoda obrade stacionarnih signala, pri čemu se najčešće koriste brzi algoritmi za njeno izračunavanje, koji se nazivaju brza Furijeova transformacija (engl. *fast Fourier transform*). U literaturi se mogu susresti i druge tehnike frekvencijske analize koje su zamišljene kao alternativa Furijeovoj transformaciji.

U cilju ocene stanja rotora, može se vršiti i provera ponašanja signala od interesa (npr. signala struje, vibracije motora i sl.) koristeći se obeležjima deskriptivne statistike kao što su faktor spljoštenosti (engl. *kurtosis*), faktor iskrivljenja (engl. *skewness*) i sl. Međutim, ova obeležja su karakteristična za vremenski domen i sama nisu dovoljna da bi se sa sigurnošću mogla utvrditi pojava i vrsta kvara [58], te se često kombinuju sa pokazateljima kvara iz frekvencijskog domena. Treba istaći i to da se za pravovremenu detekciju kvara rotora može vršiti praćenje i više karakterističnih obeležja iz različitih signala (električnih i/ili neelektričnih), čime se postupak ranog otkrivanja kvara rotora značajno unapređuje. Ovde će se pažnja usmeriti na tehnike koje su pouzdane, praktične, ekonomski isplative, te imaju relativno male zahteve u pogledu potrebne ispitne opreme.

2.5.1 Metoda spektralne analiza signala struje motora

Kao najzastupljeniji princip za detekciju oštećenja štapnih provodnika rotora koristi se tehnika spektralne analize signala struje motora u stacionarnom stanju. Blok šema takvog sistema prikazana je na slici 2.10. Dovoljno je analizirati samo jednu struju motora, što je posebna pogodnost. Struja se najčešće meri strujnim mernim kleštima, a izmereni signal se pre A/D konverzije propušta kroz analogni anti-aliasing NF filter da bi se potisnula pojava lažnih učestanosti (engl. *aliasing*) u spektru. Zatim se vrši diskretizacija signala struje A/D konvertorom i sprovodi brza Furijeova transformacija (FFT). Dobijeni spektar se potom analizira u cilju otkrivanja obeležja kvara rotora.



Slika 2.10 Principijelna šema sistema za spektralnu analizu signala struje motora.

Kako bi se metoda mogla uspešno primeniti, neophodno je da ispitivani motor bude opterećen (poželjno nazivnim momentom tereta) da bi se obeležja kvara rotora u spektru struje motora mogla izdvojiti od komponente na osnovnoj učestanosti. S tim u vezi, uvodi se pojam

frekvencijske rezolucije (Δf) koja predstavlja mogućnost razdvajanja bliskih komponenti u frekvencijskom domenu. Ako se vremenski interval merenja označi sa T_m , tada važi [113]:

$$\Delta f = \frac{F_s}{N} = \frac{F_s}{T_m F_s} = \frac{1}{T_m}. \quad (2.41)$$

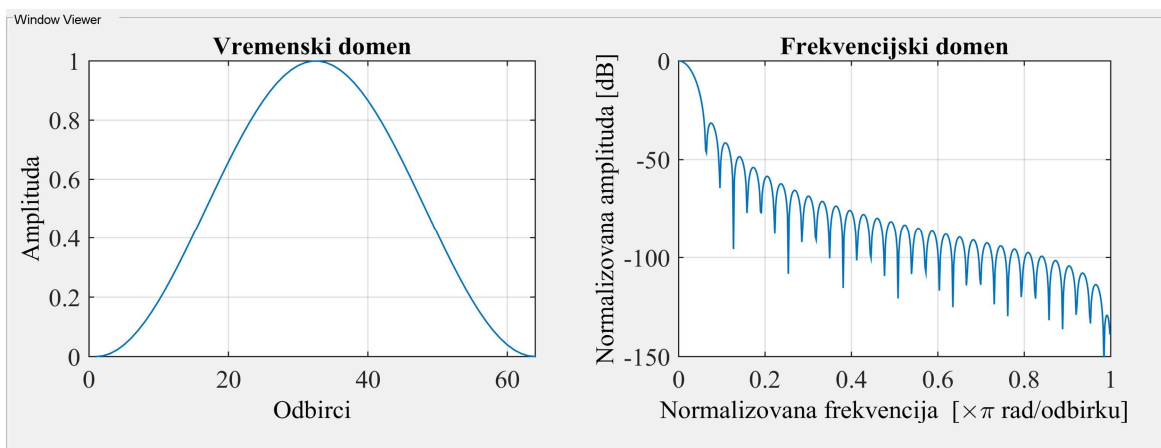
Izrazom (2.41) definisano je teorijsko ograničenje koje ukazuje na sposobnost izdvajanja dve bliske frekvencijske komponente u spektru signala. Prema tom izrazu, vremenski interval merenja se treba odabrati tako da se ostvari potrebna frekvencijska rezolucija, dok učestanost uzorkovanja mora zadovoljiti Nikvistov kriterijum. Potrebna vrednost frekvencijske rezolucije zavisi od veličine momenta opterećenja motora: što je opterećenje manje, to je potrebna finija rezolucija, a samim tim vremenski interval merenja duže traje. U [104] se predlaže da se za potrebe otkrivanja kvara rotora izabere frekvencijska rezolucija od bar 10 mHz, što prema (2.41) podrazumeva da se snimanje signala struje obavlja u trajanju od makar 100 s, tokom kojeg je neophodno obezbediti stacionarno stanje pogona. Ukoliko postoji mogućnost merenja klizanja motora (npr. stroboskopom), tada se na osnovu njega može definisati potrebna frekvencijska rezolucija koja je neophodna za otkrivanje obeležja kvara rotora u spektru signala struje motora, a time i odrediti interval snimanja signala struje. Vrednost klizanja motora može se i proceniti na osnovu poznavanja veličine momenta opterećenja.

Drugo ograničenje koje treba uzeti u obzir odnosi se na pojavu curenja spektra, a koja nastaje ako dužina analiziranog signala ne obuhvati ceo broj perioda signala. Ova pojava uzrokuje razlivanje energije signala u širem opsegu učestanosti. Generišu se komponente na učestanostima koje ne postoje u originalnom spektru signala, te se pojavljuje glavni luk (engl. *main lobe*) i bočni lukovi (engl. *side lobe*). To će pogoršati razlučivost komponenti u frekvencijskom domenu signala struje motora, što može otežati identifikaciju obeležja kvara rotora, pogotovo kod motora velikih snaga koji imaju malu vrednost klizanja čak i pri nazivnom teretu (bočni lukovi osnovne komponente signala struje mogu prekriti glavne lukove susednih komponenti koje potiču od kvara rotora). Zbog toga se u [104] daje preporuka da se detekcija kvara rotora ne vrši pri opterećenju motora manjem od 35% nazivnog momenta. Sem toga, da bi se ublažio efekat curenja spektra, signal se pre primene diskretne Furijeove transformacije modifikuje tako što se množi prozorskom funkcijom konačnog trajanja (tzv. prozoriranje signala). Prozorske funkcije treba da obezbede da se bočni lukovi što više oslabe i na taj način omoguće preciznije uočavanje centralne frekvencije i amplitude komponente na učestanosti od interesa. Često korišćene prozorske funkcije su Hanova i Hemingova, definisane sa [177]:

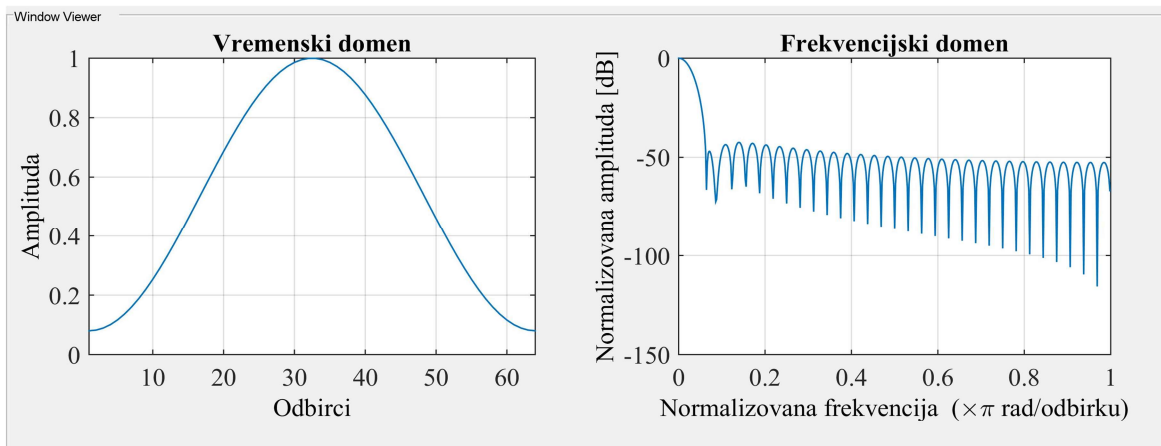
$$w[n] = \sin^2\left(\frac{n\pi}{N}\right), 0 \leq n \leq N-1 \quad \text{i} \quad (2.42)$$

$$w[n] = 0,54 - 0,46 \cos\left(\frac{2n\pi}{N-1}\right), 0 \leq n \leq N-1, \quad (2.43)$$

pri čemu je $w[n]=0$ za $n<0$ i $n>N$. Hanova i Hemingova prozorska funkcija, analizirane za dužinu od 64 odbirka u vremenskom i frekvencijskom domenu, ilustrovane su na slikama 2.11 i 2.12. Osnovna karakteristika Hanove prozorske funkcije je da je amplituda najvećeg bočnog luka potisnuta za $-31,5$ dB u odnosu na amplitudu glavnog luka, dok bočni lukovi opadaju sa -18 dB/oktavi. S druge strane, kod Hemingove prozorske funkcije amplituda najvećeg bočnog luka je potisnuta za $-42,5$ dB u odnosu na amplitudu glavnog luka, a bočni lukovi opadaju sa nagibom od -6 dB/oktavi. Širina glavnog luka za obe funkcije je približno ista i iznosi $8\pi/N$. Treba imati na umu da širina glavnog luka ograničava frekvencijsku rezoluciju prozoriranog signala. Izbor prozorske funkcije određen je kompromisom između potrebe za što tačnijim očitavanjem amplitude komponente signala u spektru i željene rezolucije. Primera radi, širina glavnog luka pravougaone prozorske funkcije je $4\pi/N$ (bolja frekvencijska rezolucija u odnosu na prethodno navedene prozorske funkcije), ali je malo slabljenje bočnih lukova (amplituda najvećeg bočnog luka potisnuta je svega za $-13,3$ dB u odnosu na amplitudu glavnog luka), što onemogućava detekciju slabijih signala u prisustvu jačih, te se iz tog razloga ređe koristi. U ovom radu će se koristiti Hanova prozorska funkcija jer se za veliki broj uzetih odbiraka njome postiže brže opadanje bočnih lukova, a time i bolja razlučivost komponenti od interesa.

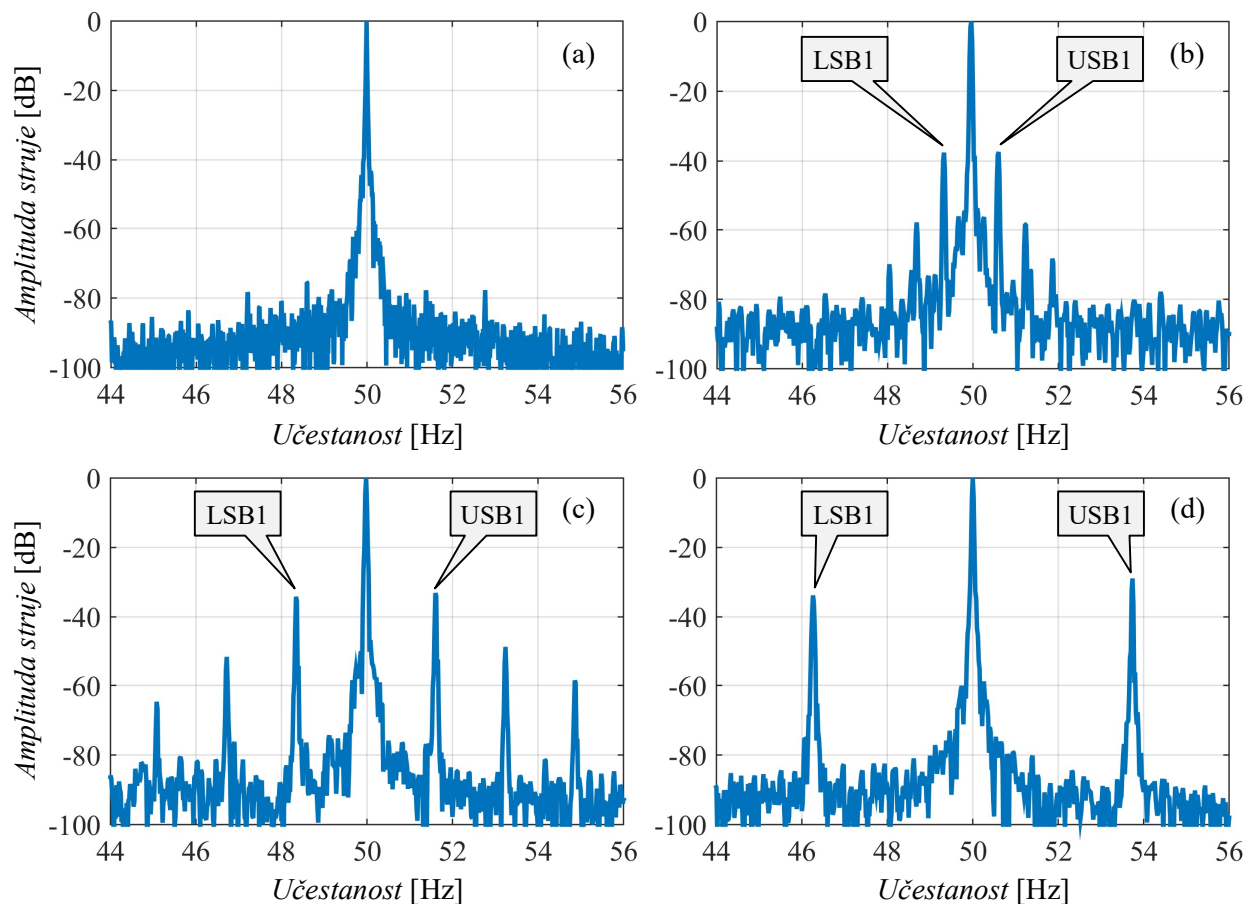


Slika 2.11 Hanova prozorska funkcija u vremenskom domenu i njen amplitudski spektar.



Slika 2.12 Hemingova prozorska funkcija u vremenskom domenu i njen amplitudski spektar.

Efikasnost metode ilustrovana je na slici 2.13 gde su prikazani delovi amplitudskog spektra signala struje motora sa oštećenjem nekoliko susednih štapnih provodnika rotora i to za različite vrednosti momenta opterećenja (od praznog hoda do punog tereta) ispitivanog mrežno napajanog četvoropolnog asinhronog motora snage 11 kW. Rezultati su dobijeni eksperimentalnim putem. Komponenta donjeg bočnog pojasa je označen sa LSB1, a komponenta gornjeg bočnog pojasa sa USB1. Pored ovih komponenti, na slici 2.13 (b), (c) i (d) mogu se uočiti i ostale komponente bočnih pojasa (prema $(1 \pm 2ks)f_s$, $k \in \{2, 3, \dots\}$). Pomak komponenti bočnih pojasa u odnosu na osnovnu komponentu struje na 50 Hz proporcionalan je opterećenju motora, tj. njegovom klizanju. Ista zavisnost se može uočiti i u amplitudama komponenti bočnih pojasa, što je u skladu sa izloženom teorijskom analizom. Komponente bočnih pojasa su izraženije pri većim vrednostima klizanja, te se preporučuje da se dijagnostika kvara rotora vrši kada je motor opterećen približno nazivnim momentom [91]. Međutim, kada je motor neopterećen (klizanje blisko nuli), amplitude bočnih pojasa iz spektra struje motora imaju veoma male vrednosti i bliske su učestanosti osnovne komponente struje, te se zbog uticaja curenja spektra ne mogu uočiti (slika 2.13 (a)). Upravo ovo je jedno od osnovnih ograničenja primene metode spektralne analize struje motora u stacionarnom stanju u cilju otkrivanja kvara rotora.



Slika 2.13 Amplitudski spektar signala struje motora sa oštećenim rotorom. (a) Neopterećen motor. (b) Opterećenje motora 25% nazivnog momenta. (c) Opterećenje motora 50% nazivnog momenta. (d) Motor opterećen nazivnim momentom.

Vrednosti komponenti bočnih pojasa koji su od primarnog interesa za detekciju kvara rotora (LSB1 i USB1) pregledno su izložene u tabeli 2.1. Empirijski je utvrđeno da ukoliko je amplituda komponente donjeg bočnog pojasa struje motora iznad -45 dB, tada postoji oštećenje rotorskog kaveza [93]. Rezultati iz tabele 2.1 to potvrđuju.

Tabela 2.1 Vrednosti komponenti bočnih pojasa amplitudskog spektra signala struje motora.

R. br.	Opterećenje motora [% nazivnog tereta]	Pozicija LSB1 [Hz]	Pozicija USB1 [Hz]	Vrednost LSB1 [dB]	Vrednost USB1 [dB]
1.	0	-	-	-	-
2.	25	49,32	50,68	-37,6	-38,3
3.	50	48,34	51,66	-34,2	-33,1
4.	100	46,22	53,78	-33,8	-28,9

U tabeli 2.2 navedeni su iskustvena pravila za ocenu stanja rotorskog kaveza na osnovu vrednosti komponente donjeg bočnog pojasa struje motora [178].

Tabela 2.2 Ocena stanja rotorskog kaveza analizom spektra struje motora.

Moduo amplitude komponente bočnog pojasa [dB]	Ocena stanja rotorskog kaveza
>54	Odlično
48 – 54	Dobro
42 – 48	Umereno dobro
36 – 42	Oštećenje kaveza (naprsnuće provodnika/kratkospojnog prstena)
30 – 36	Višestruka oštećenja kaveza (naprsnuće nekoliko provodnika/kratkospojnog prstena)
<30	Ozbiljna oštećenja kaveza

Izloženi postupak predstavlja osnovu metode spektralne analize struje motora za rano otkrivanje kvara rotora. Metoda se može primeniti i za analizu spektra signala struje motora u prelaznom režimu (npr. zalet motora koji se direktno priključuje na mrežu), s tim što ovakav pristup zahteva vremensko-frekvencijsku dekompoziciju signala struje motora primenom adekvatnih tehnika obrade signala.

2.5.2 Metoda spektralne analize signala električne snage motora

Deo trenutne električne snage motora definiše se kao proizvodu trenutne vrednosti napona između bilo koja dva priključna kraja motora i trenutne vrednosti struje na jednom od tih krajeva [152]. Polazeći od ove definicije i pretpostavljajući da se motor napaja prostoperiodičnim naponom, uz činjenicu da se u spektru struje motora usled kvara rotora pojavljuju komponente struje na učestanostima $(1 \pm 2s)\omega_s$ (užeće se u obzir samo najizraženija obeležja kvara), talasni oblici napona (u), struje (i) i dela trenutne električne snage (p) motora dati su sledećim relacijama:

$$u = U_m \cos(\omega_s t), \quad (2.44)$$

$$i = \left(\begin{array}{l} I_m \cos\left(\omega_s t - \varphi - \frac{\pi}{6}\right) + I_{mlsb} \cos\left((1-2s)\omega_s t - \varphi_{lsb} - \frac{\pi}{6}\right) \\ + I_{musb} \cos\left((1+2s)\omega_s t - \varphi_{usb} - \frac{\pi}{6}\right) \end{array} \right), \quad (2.45)$$

$$p = \left(\begin{array}{l} U_m I_m \cos(\omega_s t) \cos\left(\omega_s t - \varphi - \frac{\pi}{6}\right) + \\ U_m I_{mlsb} \cos(\omega_s t) \cos\left((1-2s)\omega_s t - \varphi_{lsb} - \frac{\pi}{6}\right) + \\ U_m I_{musb} \cos(\omega_s t) \cos\left((1+2s)\omega_s t - \varphi_{usb} - \frac{\pi}{6}\right) \end{array} \right). \quad (2.46)$$

U prethodnim izrazima U_m je amplituda linijskog napona na priključnim krajevima motora, I_m je amplituda struje motora na učestanosti ω_s (osnovna komponenta), a I_{mlsb} i I_{musb} su amplitude komponenti struja na učestanostima $(1-2s)\omega_s$ i $(1+2s)\omega_s$ (obeležja kvara rotora). Ugao φ u (2.45) zavisi od veličine momenta opterećenja motora.

Transformisanjem proizvoda trigonometrijskih funkcija u (2.46) u zbir, dobija se sledeći izraz za deo trenutne električne snage motora:

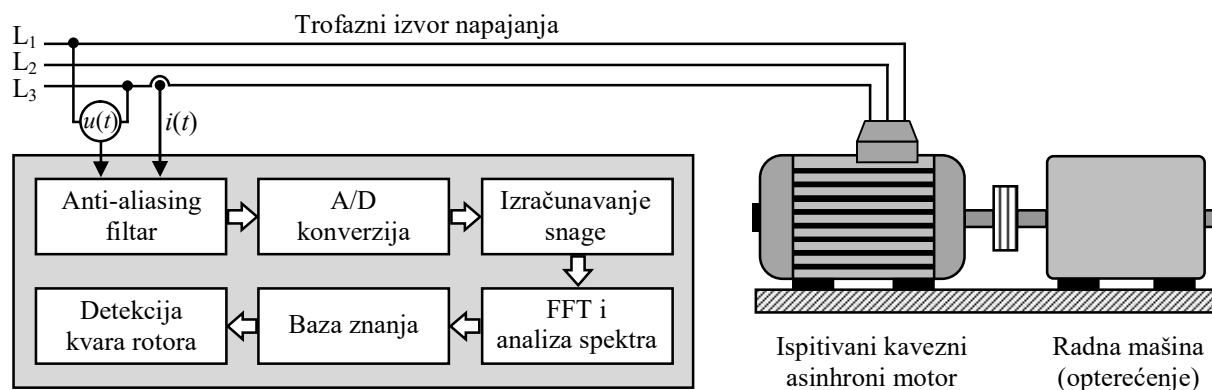
$$p = \left(\begin{array}{l} \frac{U_m I_m}{2} \left(\cos\left(\varphi + \frac{\pi}{6}\right) + \cos\left(2\omega_s t - \varphi - \frac{\pi}{6}\right) \right) + \\ \frac{U_m I_{mlsb}}{2} \left(\cos\left(2s\omega_s t + \varphi_{lsb} + \frac{\pi}{6}\right) + \cos\left((1-s)2\omega_s t - \varphi_{lsb} - \frac{\pi}{6}\right) \right) + \\ \frac{U_m I_{musb}}{2} \left(\cos\left(2s\omega_s t - \varphi_{usb} - \frac{\pi}{6}\right) + \cos\left((1+s)2\omega_s t - \varphi_{usb} - \frac{\pi}{6}\right) \right) \end{array} \right). \quad (2.47)$$

Pažljivim proučavanjem prethodno izvedenog izraza mogu se uočiti tri osnovna obeležja kvara rotora u spektru dela trenutne vrednosti električne snage motora: komponente oko dvostruke učestanosti izvora napajanja ($(1\pm s)2\omega_s$) i komponenta na učestanosti dvostruke vrednosti klizanja ($2s\omega_s$). Ova poslednja komponenta pruža dodatne informacije o stanju rotora, što metodu čini pouzdanijom u otkrivanju kvara rotorskog kaveza u odnosu na tehniku analize spektra signala struje motora.

Blok šema sistema za spektralnu analizu signala dela trenutne električne snage motora prikazana je na slici 2.14. Postupak prikupljanja i obrade signala struje i napona je isti kao i u slučaju metode zasnovane na spektralnoj analizi signala struje motora, pa se ovde to neće posebno naglašavati.

Efikasnost metode ilustrovana je na slici 2.15 gde su prikazani delovi amplitudskog spektra dela trenutne vrednosti električne snage ispitivanog mrežno napajanog četvoropolnog asinhronog motora snage 11 kW sa oštećenjem nekoliko susednih štapnih provodnika rotora i to

za različite vrednosti momenta opterećenja (od praznog hoda do punog tereta). Rezultati su dobijeni eksperimentalnim putem. Amplitude karakterističnih komponenti u spektru su normalizovane vrednošću komponente na dvostrukoju učestanosti napajanja ($2f_s \approx 100$ Hz) i iskazane su u dB, pri čemu je prethodno iz signala snage uklonjena njegova srednja vrednost.



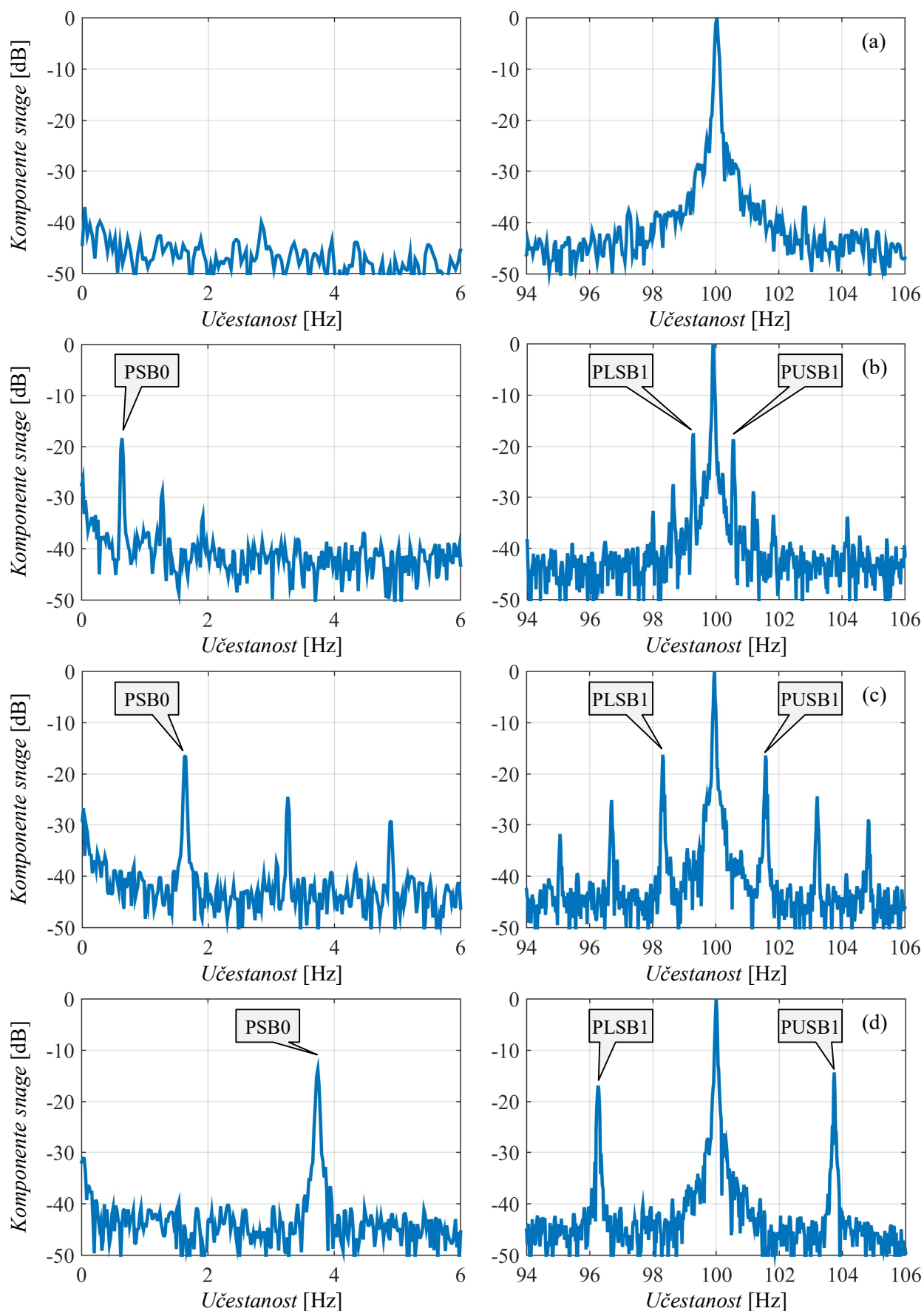
Slika 2.14 Principijelna šema sistema za spektralnu analizu signala dela trenutne vrednosti električne snage motora.

Vrednosti osnovnih obeležja kvara rotora, PSB0 (na učestanosti $2sf_s$), PLSB1 (na učestanosti $(1-s)2f_s$) i PUSB1 (na učestanosti $(1+s)2f_s$) sa slike 2.15, pregledno su izložene u tabeli 2.3. Na slici se mogu uočiti i dodatna obeležja kvara rotora na učestanostima $2ksf_s$ i $(1\pm ks)2f_s$, $k \in \{2,3,\dots\}$, ali su njihove amplitude srazmerno manje. Na osnovu prikazanih rezultata (slika 2.15 i tabela 2.3) može se zaključiti da su vrednosti obeležja kvara rotora proporcionalne opterećenju motora, tj. njegovom klizanju. Karakteristične komponente kvara su izraženije pri većim vrednostima klizanja, te se preporučuje da se dijagnostika i procena oštećenja kaveza rotora vrši kada je motor opterećen (poželjno nazivnim momentom). U praznom hodu klizanje motora je blisko nuli, pa se obeležja kvara rotora u spektru dela trenutne vrednosti električne snage motora ne mogu registrovati (slika 2.15 (a)), što je osnovni nedostatak metode.

Ovde treba istaći da se stepen oštećenja rotorskog kaveza ne procenjuje samo na osnovu amplituda osnovnih obeležja kvara rotora (PSB0, PLSB1 i PUSB1), već i povećanim brojem komponenti bočnih pojasa u spektru signala dela trenutne vrednosti električne snage motora. Njihov povećan broj ukazuje na značajna oštećenja rotorskog kaveza.

Tabela 2.3 Vrednosti obeležja kvara rotora u amplitudskom spektru signala dela trenutne vrednosti električne snage motora.

R. br.	Opterećenje motora [% nazivnog]	Pozicija PSB0 [Hz]	Pozicija PLSB1 [Hz]	Pozicija PUSB1 [Hz]	Vrednost PSB0 [dB]	Vrednost PLSB1 [dB]	Vrednost PUSB1 [dB]
1.	0	-	-	-	-	-	-
2.	25	0,64	99,36	100,64	-18,3	-17,4	-18,6
3.	50	1,64	98,36	101,64	-16,5	-16,2	-16,4
4.	100	3,74	96,26	103,74	-13,8	-16,9	-14,3



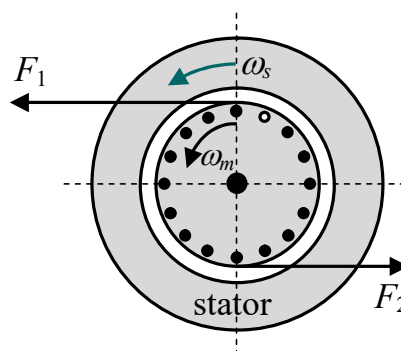
Slika 2.15 Amplitudski spektar signala dela trenutne vrednosti električne snage motora sa oštećenim rotorom. (a), (b), (c), (d) Opterećenje motora 0%, 25%, 50% i 100% nazivnog momenta, redom.

2.5.3 Metoda spektralne analize signala mehaničkih vibracija kućišta motora

Analizom signala elektromagnetskog momenta motora moguće je otkriti postojanje oštećenja kaveza rotora. Kako je prethodno pokazano, postojanje frekvencijske komponente jednake dvostrukoj vrednosti klizanja motora u spektru signala elektromagnetskog momenta (relacija 2.24) posledica je oštećenja rotora. Snimanjem momenta na vratilu motora posredstvom odgovarajućih merača momenta, te analizom njegovog spektra, moguće je otkriti ovu vrstu kvara. Međutim, cena merača momenta je izuzetno visoka, pa se ovakav pristup retko koristi. Umesto toga, kvar rotora se može otkriti merenjem i analizom signala brzine obrtanja motora, jer se obeležja ove vrste kvara iz elektromagnetskog momenta preslikavaju u brzinu obrtanja (izraz (2.28)). Ipak, u određenim slučajevima merenje brzine obrtanja motora nije moguće izvesti ili je nepraktično (nepostojanje senzora brzine obrtanja na vratilu motora ili nemogućnost njegove montaže). Alternativni pristup u tom slučaju može biti sprovođenje vibrodijagnostičke analize.

Tehnika podrazumeva analizu spektra signala mehaničkih vibracija kućišta motora sa ciljem otkrivanja obeležja kvara rotora. Usled oštećenja (ili prekida) štapnih provodnika kaveza remeti se raspodela magnetske indukcije u vazдушnom zazoru mašine. To se ogleda u pojavi komponenti magnetske indukcije koje su posledica kvara rotora. Kako je radijalna sila koja deluje na magnetsko kolo statora proporcionalna kvadratu intenziteta normalne komponente vektora magnetske indukcije u međugvožđu [179], to će se pojaviti i komponente sile koje stvaraju dodatne vibracije kućišta motora. Drugim rečima, signali vibracija će sadržati i komponente koje su posledica kvara rotora.

Pojava obeležja kvara rotora u spektru signala mehaničkih vibracija može se pojednostavljeno objasniti i na sledeći način. Naime, direktna posledica kvara rotorskog kaveza je pojava neuravnoteženih elektromagnetskih sila koje deluju na rotor (slika 2.16). Sila koja deluje na rotor sa strane gde postoji oštećenje štapnog provodnika razlikuje se po vrednosti od sile koja deluje sa dijametralne strane (F_1 i F_2 na slici 2.16), formirajući neuravnotežen spreg sila. Ova neuravnoteženost dovodi do pulsacija elektromagnetskog momenta i brzine obrtanja motora, što pojačava nivo vibracija koje se preko ležaja prenose i na kućište mašine.

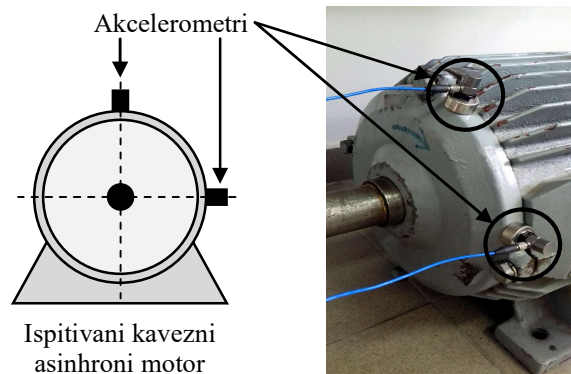


Slika 2.16 *Ilustracija dejstva elektromagnetskih sila na rotor sa oštećenjem.*

Brzina obrtanja rotora se moduliše na učestanosti oscilacija elektromagnetskog momenta, te se u spektru signala radijalnih mehaničkih vibracija mogu uočiti komponente ω_{rbb} na sledećim učestanostima [180]:

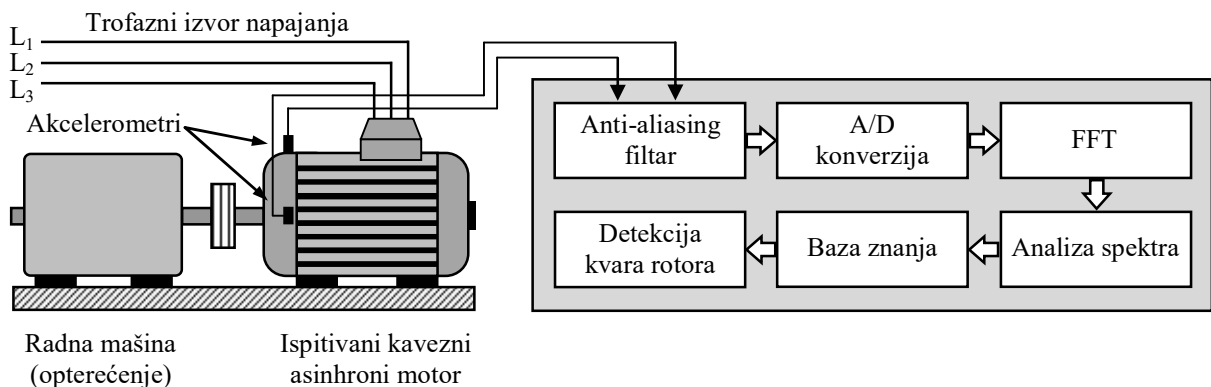
$$\omega_{rbb} = \omega_m \pm 2ks\omega_s, k \in \{1,2,3,\dots\} . \quad (2.48)$$

Prema prethodnom izrazu obeležja kvara rotora predstavljaju komponente bočnih pojasa oko brzine obrtanja motora. Prisustvo ovih komponenti u spektru signala mehaničkih vibracija merenih u radijalnom pravcu ukazuje na postojanje oštećenja kaveza rotora. Metoda zahteva fizički pristup motoru kako bi se postavili senzori za merenje vibracija (npr. akcelerometri) na njegovo kućište (bočni poklopac na slici 2.17).

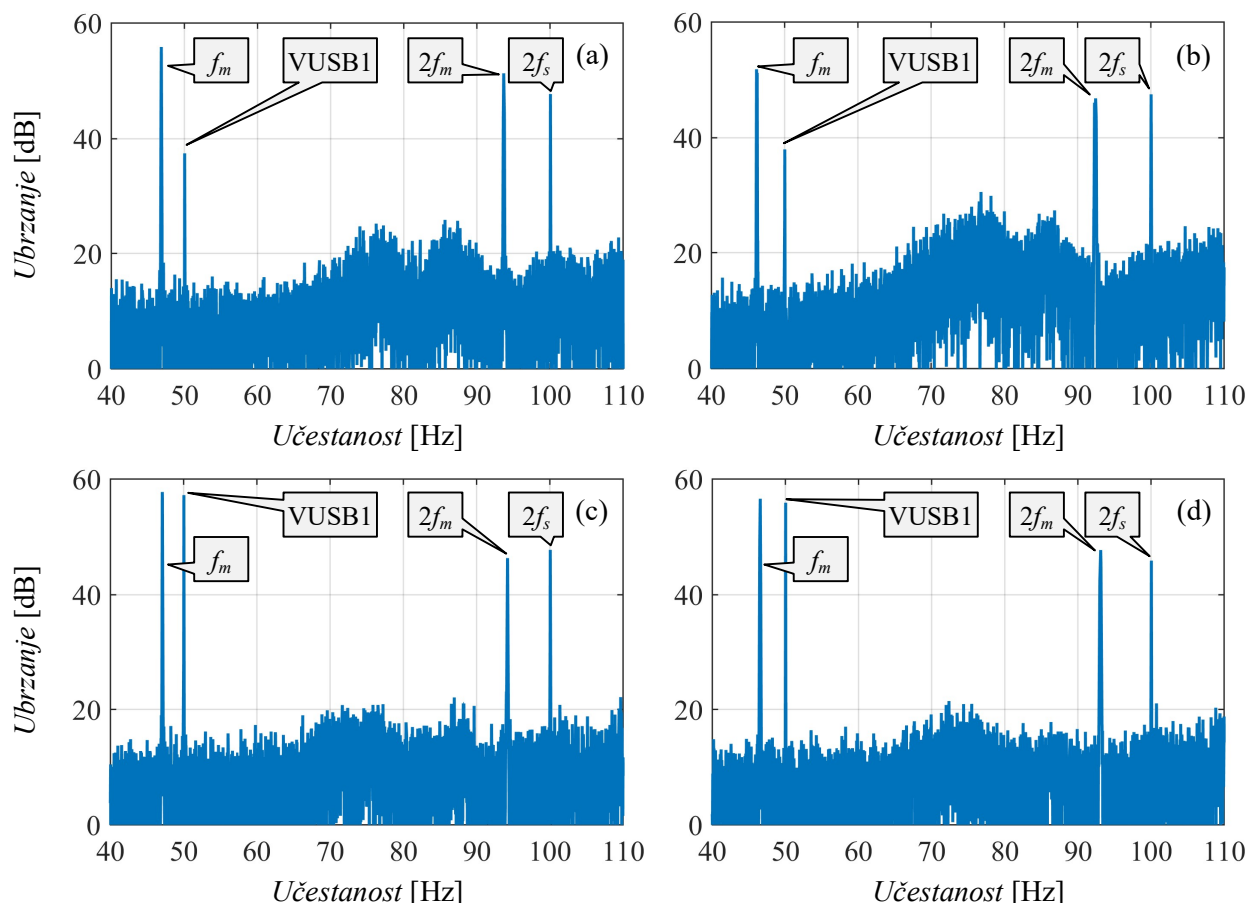


Slika 2.17 Ilustracija postavke akcelerometara za merenje mehaničkih vibracija u horizontalnoj i vertikalnoj ravni.

Blok šema sistema za analizu spektra signala mehaničkih vibracija kućišta motora prikazana je na slici 2.18. Na slici 2.19 prikazani su delovi amplitudskog spektra signala mehaničkih vibracija mrežno napajanog dvopolnog asinhronog motora snage 1,5 kW sa ispravnim rotorom i rotorom sa oštećenjem štapnog provodnika. Rezultati su dobijeni eksperimentalnim putem. Signali su snimljeni pomoću akcelerometra i to u vertikalnoj ravni. Veličina koja je korišćena za opisivanje vibracija je ubrzanje. Prilikom konverzije vrednosti ubrzanja iz m/s^2 u dB za referentni nivo je uzeta vrednost od $10^{-6} m/s^2$ (definisano u standardu ISO 1683).



Slika 2.18 Principijelna šema sistema za spektralnu analizu signala mehaničkih vibracija kućišta motora.



Slika 2.19 Amplitudski spektar signala mehaničkih vibracija ispitivanog motora. (a) Ispravan rotor, opterećenje motora 50% nazivnog momenta. (b) Ispravan rotor, opterećenje motora 75% nazivnog momenta. (c) Rotor sa oštećenjem, opterećenje motora 50% nazivnog momenta. (d) Rotor sa oštećenjem, opterećenje motora 75% nazivnog momenta.

Na slikama 2.19 (a) i (b) prikazan je amplitudski spektar signala mehaničkih vibracija motora sa ispravnim rotorom. Jasno se uočava komponenta na učestanosti obrtanja motora (označena sa f_m) koja može biti posledica debalansa rotora (ekscentricitet centra mase rotora u odnosu na njegovu osu obrtanja), budući da nije moguće njegovo idealno uravnoteženje, ali i nesaosnosti vratila motora i radne mašine. Sa desne strane je evidentno prisustvo komponente gornjeg bočnog pojasa (VUSB1) koji se prema 2.48 dovodi u vezu sa oštećenjem rotora. Ova komponenta je prisutna za obe vrednosti momenta opterećenja, iako je reč o ispravnom kavezu, što se može objasniti nesavršenošću njegove konstrukcije. Međutim, kod rotora sa oštećenjem štapnog provodnika (slika 2.19 (b) i (c)), ova komponenta je drastično veća (gotovo za 20 dB). Osim navedenih komponenti, u prikazanom spektru na slici 2.19 se uočava i komponenta na učestanosti dvostruke brzine obrtanja motora (označena sa $2f_m$ i posledica je paralelne nesaosnosti), kao i komponenta na dvostrukoj učestanosti izvora napajanja (označena sa $2f_s$ i nastaje usled dejstva magnetske sile koju stvara osnovna komponenta vektora magnetske indukcije u međugvožđu, ali može biti i posledica nejednakog vazdušnog zazora). Najvažniji rezultati sa slike 2.19 pregledno su izloženi u tabeli 2.4.

Tabela 2.4 *Vrednosti karakterističnih obeležja kvara rotora u amplitudskom spektru signala radijalnih mehaničkih vibracija kućišta motora.*

Stanje motora	Opterećenje motora [% nazivnog]	Učestanost obrtanja [Hz]	Klizanje motora [%]	Pozicija VUSB1 [Hz]	Vrednost VUSB1 [dB]
Ispravan	50	46,84	3,18	50,03	37,5
	75	46,25	3,77	50,02	38,0
Sa oštećenjem štapnog provodnika rotora	50	46,92	3,12	50,04	57,1
	75	46,32	3,71	50,03	56,9

Treba napomenuti da se stepen oštećenja rotorskog kaveza ne procenjuje samo na osnovu amplituda komponenti bočnih pojasa, već i njihovim brojem u spektru signala vibracija. Naime, povećan broj komponenti bočnih pojasa i njihovo ponašanje može biti indikativno za potvrdu prisustva kvara rotora. S druge strane, zanemarljiva amplituda komponenti bočnih pojasa, kao i njihovo odsustvo, ukazuje na ispravan rotor.

Amplitude komponenti signala mehaničkih vibracija izraženije su pri većim vrednostima klizanja motora, pa se preporučuje da se dijagnostika i procena oštećenja rotora vrši kada je motor opterećen (poželjno nazivnim momentom). U praznom hodu klizanje motora je zanemarljivo, te se obeležja kvara rotora u amplitudskom spektru signala radijalnih mehaničkih vibracija ne mogu jednostavno identifikovati, što je nedostatak metode.

Vredi napomenuti da je današnja tendencija vibrodijagnostičke analize usmerena na kontinualno praćenje promene i trenda rasta mehaničkih vibracija tokom vremena, kako bi se oštećenja pouzdano otkrila u ranoj fazi nastanka. Pri tome je poželjno posedovati vremenski zapis signala vibracija kada je motor bio u ispravnom stanju, da bi se mogla sprovesti poređenja i analize vrednosti karakterističnih komponenti kvara u spektru.

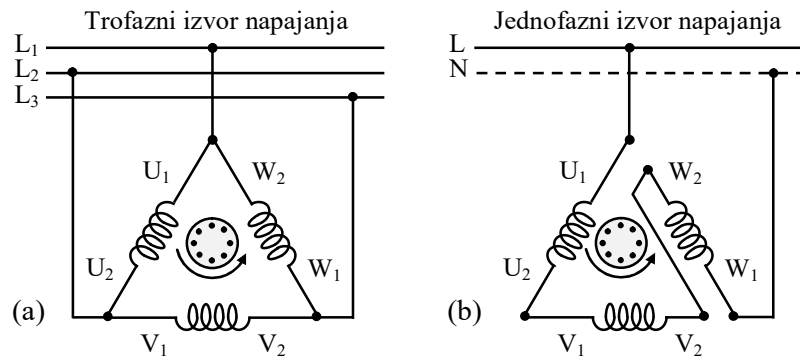
3. OBELEŽJA NEURAVNOTEŽENOSTI ELEKTRIČNOG KOLA ROTORA U IZMENJENIM USLOVIMA NAPAJANJA

U prethodnom poglavlju je iznet analitički dokaz o postojanju komponenti kvara rotora u spektru struja motora, fluksnih obuhvata namotaja statora, kao i elektromagnetskom momentu i brzini obrtanja trofaznog kaveznog asinhronog motora napajanog trofaznim simetričnim naponom. Konstatovano je da su obeležja kvara rotora funkcija klizanja motora, te da se praktično ne mogu identifikovati kod neopterećenog motora u stacionarnom stanju pogona, jer je tada klizanje blisko nuli. S tim u vezi, u ovom poglavlju će se sprovesti teorijska analiza obeležja kvara rotora trofaznog kaveznog asinhronog motora koji se napaja jednofaznim naponom. Nakon kratkog teorijskog izlaganja o radu trofaznog kaveznog asinhronog motora na jednofaznoj mreži, utvrdiće se postojanje obeležja kvara rotora u spektru struja statorskih namotaja kada se motor napaja jednofaznim naponom. Ispostaviće se da se u ovako izmenjenim uslovima napajanja pojavljuju obeležja kvara rotora koja se u slučaju trofaznog napajanja ne mogu sa sigurnošću otkriti, što predstavlja važan momenat istraživanja jer pruža mogućnost unapređenja postojećih postupaka u otkrivanju oštećenja štapnih provodnika rotora. Iako su pokazatelji kvara rotora funkcija klizanja motora, za isti iznos momenta opterećenja klizanje je nešto veće kod jednofazno napajanog motora nego u slučaju trofaznog napajanja. Na osnovu svega toga, formulisaće se hipoteza istraživanja i dati predlog metode za otkrivanje kvara rotora neopterećenog trofaznog kaveznog asinhronog motora.

Kao i u prethodnom poglavlju, dokazi koji se iznose oslanjaju se na koncept rotorskih petlji i primenu teorije simetričnih komponenti. I ovde treba naglasiti da je primat dat strujama u kavezu rotora, uz zanemarenje postojanja struja između štapnih provodnika kroz magnetsko kolo rotora, indukovanih struja u vratilu i ležajnih struja. Usvojena zanemarenja su sa aspekta pojava koje se ovde analiziraju u potpunosti opravdana.

3.1 Trofazni kavezni asinhroni motor napajan jednofaznim naponom

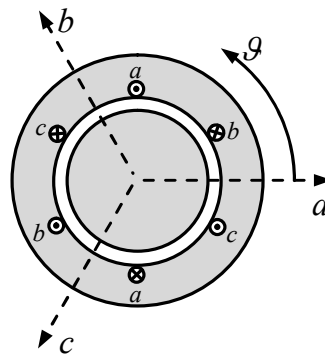
Stator trofaznog asinhronog motora ima tri namotaja (sa po dva kraja) koji se vezuju u zvezdu ili trougao, a ulazni krajevi se uobičajeno priključuju na trofazni izvor naizmeničnog napona. Analize sprovedene u prethodnom poglavlju počivaju upravo na toj pretpostavci. Ipak, u određenim slučajevima (kada su svi priključni krajevi statorskih namotaja dostupni) moguće je njihovo priključenje i na jednofazni napon. Analiza jednofaznog rada trofaznog asinhronog motora ovde će se sprovesti samo u cilju proučavanja ponašanja motora kod postojanja kvara rotora, tj. u svrhu otkrivanja karakterističnih obeležja kvara rotora u spektru struje namotaja statora. Njegove radne karakteristike se neće razmatrati jer se u ovom režimu ne predviđa terećenje motora. Slika 3.1 daje uvid u predloženi način prevezivanja namotaja statora i njihovog priključenja na izvor jednofaznog napajanja.



Slika 3.1 Električna šema trofaznog asinhronog motora.

(a) Trofazni priklučak (sprega Δ). (b) Predloženi jednofazni priklučak. Isto važi i za spregu Y.

U nastavku izlaganja će se razmotriti pulsirajuća polja koja nastaju kada se kroz sinusno raspodeljene namotaje statora sa slike 3.1 (b) propušta naizmenična struja. Jednostavnosti radi i bez umanjavanja opštosti, posmatraće se dvopolna mašina (slika 3.2).



Slika 3.2 Uprošćen prikaz statorskog namotaja dvopolne mašine.

Ukoliko se kroz rednu vezu namotaja statora sa slike 3.1 (b) kao posledica jednofaznog napajanja uspostavi struja oblika:

$$i = I_m \cos(\omega_s t), \quad (3.1)$$

nastaće tri magnetnopobudne sile koje se menjaju u prostoru (koordinati ϑ) u vremenu t , a čije su osnovne komponente date sledećim relacijama:

$$F_{U_1U_2} = F_{\max} \cos(\vartheta) \cos(\omega_s t), \quad (3.2)$$

$$F_{V_1V_2} = F_{\max} \cos\left(\vartheta + \frac{2\pi}{3}\right) \cos(\omega_s t), \quad (3.3)$$

$$F_{W_1W_2} = F_{\max} \cos\left(\vartheta - \frac{2\pi}{3}\right) \cos(\omega_s t - \pi), \quad (3.4)$$

gde F_{\max} predstavlja amplitudu osnovne komponente magnetnopobudne sile svakog od namotaja ponaosob i iznosi [181]:

$$F_{\max} = \frac{4}{\pi} \left(\frac{k_w N_s}{2} \right) I_m. \quad (3.5)$$

U prethodnom izrazu k_w predstavlja navojni sačinilac, N_s je broj redno vezanih navojaka po fazi, a I_m predstavlja amplitudu struje u redno vezanim namotajima.

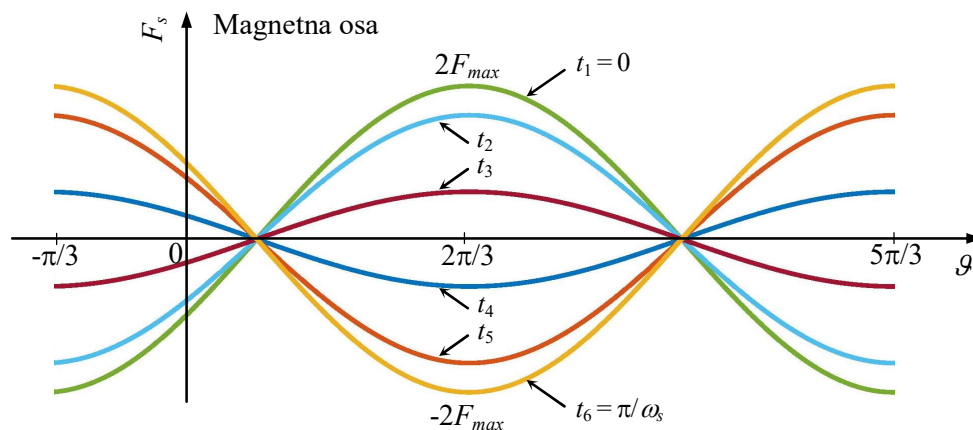
Zbrajanjem magnetnopobudnih sila datim izrazima (3.2) – (3.4) dolazi se do rezultantne magnetnopobudne sile, čija je osnovna komponenta:

$$F_s = \frac{F_{\max}}{2} \left(\cos(\omega_s t - \vartheta) + \cos(\omega_s t + \vartheta) + \sqrt{3} \sin(\omega_s t - \vartheta) - \sqrt{3} \sin(\omega_s t + \vartheta) \right). \quad (3.6)$$

Nakon sređivanja, prethodni izraz se može zapisati u sledećem obliku:

$$F_s = 2F_{\max} \cos(\omega_s t) \cos\left(\frac{\pi}{3} + \vartheta\right). \quad (3.7)$$

Dobijena magnetnopobudna sila je pulsirajuća. Nepokretna je u prostoru, ali se njena amplituda menja sa promenom trenutne vrednosti struje (pulsira). Na slici 3.3 prikazana je njena prostorna i vremenska promena za nekoliko karakterističnih trenutaka.

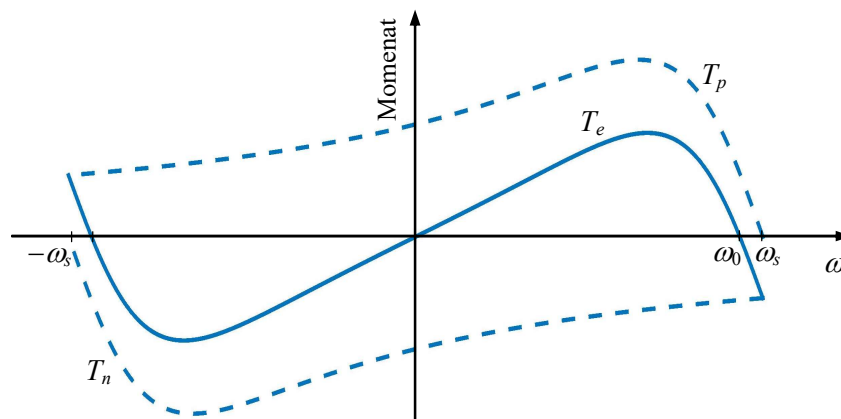


Slika 3.3 Pulsirajuća magnetnopobudna sila prema izrazu (3.6) za nekoliko karakterističnih vremenskih trenutaka ($t_1 < t_2 < t_3 < t_4 < t_5 < t_6$).

Primenom trigonometrijskih transformacija magnetnopoludna sila data izrazom (3.7) može se predstaviti kao zbir dve obrtne magnetnopoludne sile (F_p i F_n) koje se obrću u suprotnim smerovima ugaonom brzinom koja je jednaka učestanosti struje, a njihove amplitude su upola manje od amplitude pulsirajuće magnetnopoludne sile (engl. *double revolving theory*):

$$F_s = F_{\max} \cos\left(\omega_s t + \frac{\pi}{3} + \mathcal{G}\right) + F_{\max} \cos\left(-\omega_s t + \frac{\pi}{3} + \mathcal{G}\right) = F_p + F_n. \quad (3.8)$$

Dobijeni rezultat je poznat i kao Leblanova teorema koja kaže da se svako pulsirajuće magnetsko polje razlaže na dva obrtna magnetska polja jednakih amplituda, ali suprotnih smerova obrtanja [182]. Ova suprotnorotirajuća obrtna polja izazivaju suprotnorotirajuće obrtne magnetske flukseve statora koji u rotorskim petljama indukuju elektromotorne sile, te se u njima uspostavljaju struje. Ove struje u sadejstvu sa suprotnorotirajućim fluksevima proizvode obrtne momente (T_p i T_n na slici 3.4) koji su međusobno suprotstavljeni. Stoga će se ukratko analizirati mehanička karakteristika motora u uslovima jednofaznog napajanja. Kada rotor miruje elektromagnetski obrtni momenti su međusobno jednaki, ali deluju u suprotnim smerovima, te će motor ostati u stanju mirovanja. Ukoliko se rotor obrće, svaka od komponenti obrtnog fluksa će sa rotorskim strujama proizvesti svoju komponentu obrtnog momenta, ali se one sada razlikuju po vrednosti. Rezultantni obrtni momenat je algebarski zbir ove dve komponente momenata. Ovo je grafički ilustrovano na slici 3.4 gde je, između ostalog, prikazana i zavisnost momenta motora (T_e) od brzine obrtanja (ω). Jasno je da rotor nakon odgovarajućeg pokretanja može nastaviti da se obrće. No, bitno je primetiti da je brzina motora čak i u idealnom praznom hodu (ω_0 na slici 3.4) manja u odnosu na sinhronu brzinu obrtanja, što nije slučaj kada se motor napaja trofaznim naizmeničnim naponom (u idealnom praznom hodu brzina obrtanja rotora je bliska sinhronoj). Upravo ova činjenica može biti od ključnog značaja za unapređenje postojećih tehnika za rano otkrivanje kvara rotora kod neopterećenog motora u stacionarnom stanju pogona.



Slika 3.4 Ilustracija mehaničke karakteristike (puna linija) jednofazno napajanog trofaznog asinhronog motora.

U nastavku će se analizirati pojava obeležja kvara rotora u spektru struja, fluksnih obuvata namotaja statora, elektromagnetskom momentu i brzini obrtanja jednofazno napajanog trofaznog motora.

3.2 Obeležja kvara rotora u spektru struje motora

U prethodnom odeljku je pokazano da ukoliko se trofazni motor priključi na izvor jednofaznog napona, struje u namotajima statora će formirati pulsirajuću magnetnopobudnu silu (zbir dve obrtne), te će rotor, nakon odgovarajućeg pokretanja, moći da se obrće. Sada će se razmotriti kakav efekat stvara rotor sa oštećenim kavezom (prekid štapnog provodnika) na struje u namotajima statora koji su povezani redno (slika 3.1 (b)) i napajaju se jednofaznim naponom.

U drugom poglavlju je izložen analitički dokaz o postojanju karakterističnih komponenti kvara rotora u spektru struja trofazno napajanog kaveznog asinhronog motora. Pokazano je da se usled oštećenja štapnih provodnika u spektru struja namotaja statora pojavljuju komponente na učestanostima $(1 \pm 2ks)\omega_s$, $k \in \{1, 2, 3, \dots\}$, čije su amplitude u direktnoj korelaciji sa oštećenjem rotorskog kaveza. Da bi se pojednostavio dokaz koji se izlaže, postojanje ovih obeležja kvara rotora se neće iznova dokazivati, tj. jasno je da postoje i u slučaju jednofaznog napajanja. Pažnja će biti usmerena na druge karakteristične komponente koje nastaju u spektru struje motora kod rotora sa oštećenim kavezom. I ovde će se, jednostavnosti radi, posmatrati dvopolna mašina.

Dokaz koji se izlaže oslanja se na postojanje magnetske sprege između rotorskih petlji i namotaja statora. Magnetska sprega se iskazuje preko međusobne induktivnosti između bilo koje rotorske petlje i namotaja statora. Kako je vektor simetričnih komponenti struja rotorskih petlji:

$$\mathbf{I}^{SL} = \left[I_{l1}^S \ I_{l2}^S \ I_{l3}^S \ \dots \ I_{l(N_B-1)}^S \ I_{lN_B}^S \right]^T, \quad (3.9)$$

to je deo fluksnog obuhvata statorskog namotaja a , koji je posledica struja rotorskih petlji (tačnije simetričnih komponenti struja rotorskih petlji), definisan sledećom relacijom:

$$\Psi_{adeo} = \sum_{n=1}^{N_B} \sum_{k=1}^{N_B} M_{rsk}(\mathcal{G}) \cdot I_{ln}^S. \quad (3.10)$$

Kada se međusobna induktivnost između namotaja statora i bilo koje rotorske petlje $M_{rsk}(\mathcal{G})$ predstavi kao prostoperiodična funkcija pozicije \mathcal{G} (što je za potrebe dokaza sasvim opravdano), a umesto simetričnih komponenti struja uvedu njihovi oblici u vremenskom domenu (sa zanemarenim početnim faznim stavovima) i vodeći računa o pomerajima, dobija se sledeći izraz:

$$\Psi_{adeo} = \sum_{n=1}^{N_B} \sum_{k=1}^{N_B} M_{rs} \cos\left(\mathcal{G} + \frac{2\pi(k-1)}{N_B}\right) \cdot I_{ln} \cos\left(\omega_r t - \frac{n \cdot 2\pi(k-1)}{N_B}\right). \quad (3.11)$$

Kako je:

$$\mathcal{G} = (1-s)\omega_s t, \quad (3.12)$$

i kada se uvaži da je učestanost klizanja rotora u odnosu na obrtno polje statora (komponenta pulsirajućeg polja) koje se obrće u suprotnom smeru u odnosu na smer obrtanja motora:

$$\omega_r = (2-s)\omega_s, \quad (3.13)$$

to se njihovom zamenom u izraz (3.11) deo fluksnog obuhvata statorskog namotaja a , nakon trigonometrijskih transformacija, svodi na:

$$\Psi_{adeo} = \sum_{n=1}^{N_B} \sum_{k=1}^{N_B} \frac{M_{rs} I_{ln}}{2} \left\{ \cos \left((3-2s)\omega_s t + \frac{2\pi(k-1)(1-n)}{N_B} \right) + \cos \left(\omega_s t - \frac{2\pi(k-1)(1+n)}{N_B} \right) \right\}. \quad (3.14)$$

Komponente fluksnog obuhvata iz (3.14) sa faznim stavovima $2\pi(k-1)(1-n)/N_B$, za $1 \leq k \leq N_B$, $2 \leq n \leq N_B-2$ i $n=N_B$ se međusobno poništavaju. Slično važi i za komponente fluksnog obuhvata sa faznim stavovima $2\pi(k-1)(1+n)/N_B$, za $1 \leq k \leq N_B$ i $2 \leq n \leq N_B$. Konačno, deo fluksnog obuhvata statorskog namotaja a se nakon sređivanja može predstaviti sledećim izrazom:

$$\Psi_{adeo} = \frac{N_B M_{rs}}{2} (I_{l1} \cos(\omega_s t) + I_{l(N_B-1)} \cos((3-2s)\omega_s t)). \quad (3.15)$$

Sličnim postupkom mogu se izvesti i izrazi za delove fluksnih obuhvata statorskih namotaja b i c :

$$\Psi_{bdeo} = \frac{N_B M_{rs}}{2} \left(I_{l1} \cos \left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3} \right) + I_{l(N_B-1)} \cos \left((3-2s)\omega_s t - \frac{2\pi}{3} \right) \right), \quad (3.16)$$

$$\Psi_{cdeo} = \frac{N_B M_{rs}}{2} \left(I_{l1} \cos \left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3} \right) + I_{l(N_B-1)} \cos \left((3-2s)\omega_s t + \frac{2\pi}{3} \right) \right). \quad (3.17)$$

Iz delova fluksnih obuhvata (3.15) – (3.17) će se u namotajima statora indukovati elektromotorne sile, a potom uspostaviti i struje. Očigledno je da će se slučaju oštećenja štapnog provodnika rotora (i/ili kratkospojnog prstena) u spektru struja namotaja statora pored osnovne komponente na učestanosti ω_s pojaviti i dodatne komponente na učestanosti $(3-2s)\omega_s$ (komponenta donjeg bočnog pojasa u okolini trećeg harmonika struje motora). Amplituda ovih komponenti zavisi od vrednosti simetrične komponente struje rotorskih petlji reda N_B-1 (obeležje kvara) i u direktnoj je srazmeri sa stepenom oštećenja kaveza. Ne treba smetnuti sa uma da će se u spektru struja motora pojaviti i komponenta na učestanosti $(1-2s)\omega_s$, čiji je nastanak objašnjen u drugom poglavlju.

Ovim je pokazano da u slučaju jednofaznog (u opštem slučaju nesimetričnog) napajanja trofaznog kaveznog asinhronog motora u spektru struja namotaja statora se pojavljuje komponenta struje koja predstavlja obeležje kvara rotora i koja je pomerena u odnosu na treći harmonik struje motora za iznos dvostrukog klizanja. U nastavku će se razmotriti uticaj ove komponente struje na elektromagnetski momenat motora. I ovde će pokazati da dolazi do pulsiranja elektromagnetskog momenta motora, što će se manifestovati pojavom talasnosti brzine obrtanja, a krajnji ishod će biti stvaranje dodatnih komponenti u spektru struja namotaja statora motora.

3.3 Obeležja kvara rotora u spektru elektromagnetskog momenta motora

Da bi se stekao uvid u spektar elektromagnetskog momenta motora sa rotorom u kvaru, potrebno je definisati fluksne obuhvate namotaja statora. Uz opravdano zanemarenje magnetske sprege između statorskih namotaja i kratkospojnog prstena rotora, fluksni obuhvati se mogu prikazati relacijom 2.15. Uvažavajući činjenicu da će se u spektru struja namotaja statora usled kvara rotora pojaviti komponenta na učestanosti $(3-2s)\omega_s$, to će se pretpostaviti da su struje motora čiji su namotaji spregnuti prema slici 3.1 (b) sledećeg oblika:

$$i_a = I_{md} \cos(\omega_s t - \gamma_d) + I_{mi} \cos(\omega_s t - \gamma_i) + I_{m0} \cos(\omega_s t + \gamma_0) + I_{mlsb} \cos((3-2s)\omega_s t), \quad (3.18)$$

$$i_b = I_{md} \cos(\omega_s t - \gamma_d) + I_{mi} \cos(\omega_s t - \gamma_i) + I_{m0} \cos(\omega_s t + \gamma_0) + I_{mlsb} \cos((3-2s)\omega_s t), \quad (3.19)$$

$$i_c = -I_{md} \cos(\omega_s t - \gamma_d) - I_{mi} \cos(\omega_s t - \gamma_i) - I_{m0} \cos(\omega_s t + \gamma_0) - I_{mlsb} \cos((3-2s)\omega_s t), \quad (3.20)$$

gde su sa I_{md} , I_{mi} i I_{m0} označene amplitude komponenti struja koje se dobijaju primenom matrice raspredanja (2.4), prilagođene trofaznom sistemu, na fazor struje motora koja postoji u redno vezanim namotajima statora, dok I_{mlsb} predstavlja amplitudu komponente struje koja je posledica kvara rotora, a γ_d , γ_i i γ_0 početne faze. Skreće se pažnja da je u izrazima (3.18) – (3.20) izostavljena komponenta struje na učestanosti $(1-2s)\omega_s$, s obzirom na to da je u prethodnom poglavlju pokazano kakav efekat ona ima na momenat motora. Time će se analiza značajno pojednostaviti.

Fluksni obuhvati namotaja statora se na osnovu izraza 2.15, 3.15 – 3.17 i 3.18 – 3.20 mogu zapisati u sledećoj formi:

$$\Psi_a = \left(\begin{aligned} & LI_{md} \cos(\omega_s t - \gamma_d) + LI_{mi} \cos(\omega_s t - \gamma_i) + LI_{m0} \cos(\omega_s t + \gamma_0) + \\ & LI_{mlsb} \cos((3-2s)\omega_s t) + \frac{N_B M_{rs}}{2} I_{l1} \cos(\omega_s t) + \frac{N_B M_{rs}}{2} I_{l(N_B-1)} \cos((3-2s)\omega_s t) \end{aligned} \right), \quad (3.21)$$

$$\Psi_b = \left(\begin{aligned} & LI_{md} \cos(\omega_s t - \gamma_d) + LI_{mi} \cos(\omega_s t - \gamma_i) + LI_{m0} \cos(\omega_s t + \gamma_0) + \\ & LI_{mlsb} \cos((3-2s)\omega_s t) + \frac{N_B M_{rs}}{2} I_{l1} \cos\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{N_B M_{rs}}{2} I_{l(N_B-1)} \cos\left((3-2s)\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right), \quad (3.22)$$

$$\Psi_c = \left(\begin{aligned} & -2LI_{md} \cos(\omega_s t - \gamma_d) - 2LI_{mi} \cos(\omega_s t - \gamma_i) - 2LI_{m0} \cos(\omega_s t + \gamma_0) - \\ & 2LI_{mlsb} \cos((3-2s)\omega_s t) + \frac{N_B M_{rs}}{2} I_{l1} \cos\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{N_B M_{rs}}{2} I_{l(N_B-1)} \cos\left((3-2s)\omega_s t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right). \quad (3.23)$$

Postupak za utvrđivanje spektra elektromagnetskog momenta i otkrivanje obeležja kvara rotora u njemu, identičan je postupku sprovedenom u drugom poglavlju. U tom smislu će se i ovde koristiti relacija (2.20). Iako nije namenjena za izračunavanje vrednosti elektromagnetskog momenta, na osnovu te relacije je moguće sagledati spektar elektromagnetskog momenta motora i izvesti odgovarajuće zaključke jer je relacija definisana na takav način da obuhvata sve relevantne pojave koje su ovde od interesa. Uvrštavanjem izraza (3.18) – (3.20) i (3.21) – (3.23) u relaciju (2.20), sređivanjem se dolazi do sledećeg:

$$T_{ef} = \left(\begin{aligned}
 & 2LI_{md}I_{md} + 2LI_{mi}I_{mi} + 2LI_{m0}I_{m0} + 2LI_{mlsb}I_{mlsb} + \\
 & 4LI_{md}I_{mi} \cos(\gamma_d - \gamma_i) + 4LI_{md}I_{m0} \cos(\gamma_d + \gamma_0) + 4LI_{mi}I_{m0} \cos(\gamma_i + \gamma_0) - \\
 & \frac{N_B M_{rs} I_{l1} I_{md}}{2} \cos\left(\gamma_d - \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{N_B M_{rs} I_{l1} I_{mi}}{2} \cos\left(\gamma_i - \frac{2\pi}{3}\right) - \\
 & \frac{N_B M_{rs} I_{l1} I_{m0}}{2} \cos\left(\gamma_0 + \frac{2\pi}{3}\right) + \\
 & \left(2LI_{md}I_{md} + \frac{N_B M_{rs} I_{l1} I_{md}}{4} \right) \cos(2\omega_s t - 2\gamma_d) + \\
 & \left(2LI_{mi}I_{mi} + \frac{N_B M_{rs} I_{l1} I_{mi}}{4} \right) \cos(2\omega_s t - 2\gamma_i) + \\
 & \left(2LI_{m0}I_{m0} + \frac{N_B M_{rs} I_{l1} I_{m0}}{4} \right) \cos(2\omega_s t + 2\gamma_0) + \\
 & 4LI_{md}I_{mi} \cos(2\omega_s t - \gamma_d - \gamma_i) + 4LI_{md}I_{m0} \cos(2\omega_s t - \gamma_d + \gamma_0) + \\
 & 4LI_{mi}I_{m0} \cos(2\omega_s t - \gamma_i + \gamma_0) + \\
 & \frac{\sqrt{3} N_B M_{rs} I_{l1} I_{md}}{4} \cos\left(2\omega_s t - \gamma_d + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{\sqrt{3} N_B M_{rs} I_{l1} I_{mi}}{4} \cos\left(2\omega_s t - \gamma_i + \frac{\pi}{2}\right) + \\
 & \frac{\sqrt{3} N_B M_{rs} I_{l1} I_{m0}}{4} \cos\left(2\omega_s t + \gamma_0 + \frac{\pi}{2}\right) - \\
 & \frac{N_B M_{rs} I_{l1} I_{mlsb}}{2} \cos\left((1-s)2\omega_s t + \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{N_B M_{rs} I_{l(N_B-1)} I_{md}}{2} \cos\left((1-s)2\omega_s t + \gamma_d + \frac{2\pi}{3}\right) - \\
 & \frac{N_B M_{rs} I_{l(N_B-1)} I_{mi}}{2} \cos\left((1-s)2\omega_s t + \gamma_i + \frac{2\pi}{3}\right) - \\
 & \frac{N_B M_{rs} I_{l(N_B-1)} I_{m0}}{2} \cos\left((1-s)2\omega_s t - \gamma_0 + \frac{2\pi}{3}\right) + \\
 & 4LI_{md}I_{mlsb} \cos((1-s)2\omega_s t + \gamma_d) + 4LI_{mi}I_{mlsb} \cos((1-s)2\omega_s t + \gamma_i) + \\
 & 4LI_{m0}I_{mlsb} \cos((1-s)2\omega_s t - \gamma_0) - \\
 & \frac{N_B M_{rs} I_{l1} I_{mlsb}}{2} \cos\left((2-s)2\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{N_B M_{rs} I_{l(N_B-1)} I_{md}}{2} \cos\left((2-s)2\omega_s t - \gamma_d + \frac{2\pi}{3}\right) - \\
 & \frac{N_B M_{rs} I_{l(N_B-1)} I_{mi}}{2} \cos\left((2-s)2\omega_s t - \gamma_i + \frac{2\pi}{3}\right) - \\
 & \frac{N_B M_{rs} I_{l(N_B-1)} I_{m0}}{2} \cos\left((2-s)2\omega_s t + \gamma_0 + \frac{2\pi}{3}\right) + \\
 & 4LI_{md}I_{mlsb} \cos((2-s)2\omega_s t - \gamma_d) + 4LI_{mi}I_{mlsb} \cos((2-s)2\omega_s t - \gamma_i) + \\
 & 4LI_{m0}I_{mlsb} \cos((2-s)2\omega_s t + \gamma_0) + \\
 & 2LI_{mlsb}I_{mlsb} \cos((3-2s)2\omega_s t) - \frac{N_B M_{rs} I_{l(N_B-1)} I_{mlsb}}{2} \cos\left((3-2s)2\omega_s t + \frac{2\pi}{3}\right)
 \end{aligned} \right). \quad (3.24)$$

Prethodno dobijeni izraz je relativno složen, ali se za potrebe uvida u spektar elektromagnetskog momenta motora može prikazati u preglednijoj (ekvivalentnoj) formi:

$$T_{ef} = \left(C_0 + C_1 \cos(2\omega_s t + \mu_1) + C_2 \cos((1-s)2\omega_s t + \mu_2) + C_3 \cos((2-s)2\omega_s t + \mu_3) + C_4 \cos((3-2s)2\omega_s t + \mu_4) \right). \quad (3.25)$$

Sada se jasno uočavaju oscilatorne komponente koje postoje u momentu motora. Komponenta na učestanosti $2\omega_s$ je posledica jednofaznog napajanja, dok su komponente na učestanostima $(1-s)2\omega_s$, $(2-s)2\omega_s$ i $(3-2s)2\omega_s$ posledica oštećenja kaveza, te se mogu smatrati obeležjima kvara rotora. Njihova učestanost je funkcija klizanja motora, dok amplitude (C_2 , C_3 i C_4) zavise od vrednosti komponente struje I_{mlsb} i vrednosti simetrične komponente struja rotorskih petlji reda N_B-1 (stepen oštećenja kaveza), što se može zaključiti ukoliko se dublje analizira izraz (3.24). Međutim, ovde ne treba ispustiti iz vida i postojanje karakteristične komponente kvara rotora u spektru elektromagnetskog momenta motora na učestanosti $2s\omega_s$. Ona nije vidljiva u izrazu 3.24 jer je u izrazima za struje motora (3.18) – (3.20) izostavljena komponenta na učestanosti $(1-2s)\omega_s$, ne bi li se dokaz pojednostavio. No, njeno postojanje je evidentno i pokazano u drugom poglavlju (videti izraz (2.24)).

3.4 Obeležja kvara rotora u spektru brzine obrtanja motora

Pulsiranje elektromagnetskog momenta će izazvati pojavu talasnosti brzine obrtanja motora. Stoga će se u daljem izlaganju pažnja posvetiti otkrivanju obeležja kvara rotora u spektru brzine obrtanja motora. Njutnova jednačina kretanja, data izrazom (2.25), predstavlja polazište za dalju analizu. No, da bi se analitički došlo do relativno jednostavnog i upotrebljivog rešenja, ovde će se uvesti izvesna uprošćenja. Na osnovu dubljeg razmatranja sistema definisanog izrazima (2.24) i (3.24), za dalju analizu će se kao komponenta od interesa uzeti samo obeležje kvara rotora u spektru elektromagnetskog momenta motora na učestanosti $2s\omega_s$. Naravno, u obzir se mora uzeti i komponenta na učestanosti $2\omega_s$ koja je posledica jednofaznog napajanja, jer će pulsacije brzine obrtanja motora na ovoj učestanosti biti izražene.

Kada se uvažavaju komponente elektromagnetskog momenta motora koje su od značaja, dalje se elektromagnetski momenat može predstaviti u sledećem obliku:

$$T_e = T_{e1} + T_{e2} \cos(2s\omega_s t) + T_{e3} \cos(2\omega_s t), \quad (3.26)$$

gde je T_{e1} srednja vrednost elektromagnetskog momenta motora i brojno je jednaka vrednosti momenta opterećenja (T), T_{e2} je posledica postojanja kvara rotora, a T_{e3} je rezultat jednofaznog napajanja. Početni fazni stavovi su zanemareni. Međutim, treba skrenuti pažnju na iznos momenta opterećenja. Kako se motor napaja jednofazno, prema šemi sa slike 3.1 (b), jasno je da se ne može opteretiti značajnijim teretom. No, ovde je osnovna ideja da se predloženi test izvede kada je motor neopterećen. U tom slučaju teret čine samo mehanički gubici koji su procentualno mali deo nazivnog momenta motora.

Zamenom relacije (3.26) u (2.25) dolazi se do sledeće diferencijalne jednačine:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_{e1} + T_{e2} \cos(2s\omega_s t) + T_{e3} \cos(2\omega_s t) - T, \quad (3.27)$$

čijim se rešavanjem (uz pretpostavku stacionarnog stanja pogona) dolazi do sledećeg izraza za brzinu obrtanja motora u funkciji vremena:

$$\omega = \frac{T_{e2}}{J \cdot 2s\omega_s} \sin(2s\omega_s t) + \frac{T_{e3}}{J \cdot 2\omega_s} \sin(2\omega_s t) + \omega_{const}, \quad (3.28)$$

pri čemu je sa ω_{const} označena srednja vrednost brzine obrtanja ω u stacionarnom stanju.

Ovim je pokazano da će se u slučaju kvara rotora u spektru brzine obrtanja jednofazno napajnog motora pojaviti komponenta oscilatornog karaktera čija je učestanost $2s\omega_s$. Ova komponenta se može smatrati osnovnim obeležjem kvara rotora u spektru brzine obrtanja. Njena amplituda prevashodno zavisi od stepena oštećenja rotora i momenta inercije pogona. Za veća oštećenja rotora veća je vrednost komponente T_{e2} , te je i amplituda oscilacije brzine obrtanja motora izraženija. S druge strane, amplituda oscilacije brzine obrtanja je obrnuto srazmerna momentu inercije pogona. Vredi napomenuti da će se u spektru brzine motora pojaviti i komponente na učestanostima $(1-s)2\omega_s$, $(2-s)2\omega_s$ i $(3-2s)2\omega_s$ koje su takođe posledica kvara rotora, ali su njihove amplitude srazmerno manje. Komponenta brzine na učestanosti $2\omega_s$ iz izraza (3.28) je posledica jednofaznog napajanja.

Sada je potrebno ustanoviti kakav uticaj imaju komponente brzine obrtanja motora iz (3.28) na poziciju rotora prema statoru (\mathcal{G}). Kada se relacija (3.28) uvrsti u (2.29) i reši tako dobijena diferencijalna jednačina, dolazi se do sledećeg izraza kojim se opisuje pozicija rotora prema statoru u funkciji vremena:

$$\mathcal{G} = \omega_{stac} t - \frac{T_{e2}}{J \cdot 4s^2\omega_s^2} \cos(2s\omega_s t) - \frac{T_{e3}}{J \cdot 4\omega_s^2} \cos(2\omega_s t). \quad (3.29)$$

Prethodni izraz se može zapisati u preglednijoj formi:

$$\mathcal{G} = \omega_{stac} t - k_{g1} \cos(2s\omega_s t) - k_{g2} \cos(2\omega_s t), \quad (3.30)$$

pri čemu je:

$$k_{g1} = \frac{T_{e2}}{J \cdot 4s^2\omega_s^2}, \text{ i } k_{g2} = \frac{T_{e3}}{J \cdot 4\omega_s^2}. \quad (3.31)$$

Budući da je međusobna induktivnost između namotaja statora i bilo koje rotorske petlje funkcija pozicije rotora, u nastavku će biti izučen povratni uticaj komponenti datih relacijom (3.30) na struje u namotajima statora.

3.5 Uticaj oscilacija brzine obrtanja na struju motora

Kada se uvažavaju izrazi (3.30) i (3.13), tada relacija (3.11), koja opisuje deo fluksnog obuhvata statorskog namotaja a , dobija sledeću formu:

$$\Psi_{adeo} = \sum_{n=1}^{N_B} \sum_{k=1}^{N_B} \left\{ \begin{array}{l} M_{rs} \cos \left(\left((1-s)\omega_s t - k_{g1} \cos(2s\omega_s t) - k_{g2} \cos(2\omega_s t) \right) + \frac{2\pi(k-1)}{N_B} \right) \\ I_{ln} \cos \left((2-s)\omega_s t - \frac{n \cdot 2\pi(k-1)}{N_B} \right) \end{array} \right\}. \quad (3.32)$$

Nakon sređivanja, prethodni izraz se svodi na sledeći oblik:

$$\Psi_{adeo} = \frac{N_B M_{rs}}{2} \left(\begin{array}{l} \left(\begin{array}{l} \cos(\omega_s t) \cos(k_{g1} \cos(2s\omega_s t)) \cos(k_{g2} \cos(2\omega_s t)) - \\ \sin(\omega_s t) \sin(k_{g1} \cos(2s\omega_s t)) \cos(k_{g2} \cos(2\omega_s t)) - \\ \sin(\omega_s t) \cos(k_{g1} \cos(2s\omega_s t)) \sin(k_{g2} \cos(2\omega_s t)) - \\ \cos(\omega_s t) \sin(k_{g1} \cos(2s\omega_s t)) \sin(k_{g2} \cos(2\omega_s t)) \end{array} \right) I_{l1} + \\ \left(\begin{array}{l} \cos((3-2s)\omega_s t) \cos(k_{g1} \cos(2s\omega_s t)) \cos(k_{g2} \cos(2\omega_s t)) + \\ \sin((3-2s)\omega_s t) \sin(k_{g1} \cos(2s\omega_s t)) \cos(k_{g2} \cos(2\omega_s t)) + \\ \sin((3-2s)\omega_s t) \cos(k_{g1} \cos(2s\omega_s t)) \sin(k_{g2} \cos(2\omega_s t)) - \\ \cos((3-2s)\omega_s t) \sin(k_{g1} \cos(2s\omega_s t)) \sin(k_{g2} \cos(2\omega_s t)) \end{array} \right) I_{l(N_B-1)} \end{array} \right). \quad (3.33)$$

Uz pomoć relacija (2.35) i (2.36), funkcije $\cos(k_{g1} \cos(2s\omega_s t))$, $\sin(k_{g1} \cos(2s\omega_s t))$, $\cos(k_{g2} \cos(2\omega_s t))$, i $\sin(k_{g2} \cos(2\omega_s t))$ iz (3.33) mogu se aproksimirati uzimanjem prva dva člana njihovog razvoja u Tejlorov red:

$$\cos(k_{g1} \cos(2s\omega_s t)) \approx \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{4} \right) - \frac{k_{g1}^2}{4} \cos(4s\omega_s t), \quad (3.34)$$

$$\sin(k_{g1} \cos(2s\omega_s t)) \approx k_{g1} \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{24} \right) \cos(2s\omega_s t) - \frac{k_{g1}^3}{24} \cos(6s\omega_s t), \quad (3.35)$$

$$\cos(k_{g2} \cos(2\omega_s t)) \approx \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{4} \right) - \frac{k_{g2}^2}{4} \cos(4\omega_s t), \quad (3.36)$$

$$\sin(k_{g2} \cos(2\omega_s t)) \approx k_{g2} \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{24} \right) \cos(2\omega_s t) - \frac{k_{g2}^3}{24} \cos(6\omega_s t), \quad (3.37)$$

Uvrštavanjem prethodnih izraza u relaciju (3.33) i transformacijom proizvoda trigonometrijskih funkcija u zbir, nakon daljeg sređivanja deo fluksnog obuhvata statorskog namotaja a može se prikazati relacijom:

$$\Psi_{adeo} = \frac{N_B M_{rs}}{2} (A \cdot I_{l1} + B \cdot I_{l(N_B-1)}), \quad (3.38)$$

gde su A i B definisani sa:

$$A = \left(\begin{aligned}
 & \frac{k_{g2}}{2} \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{4} \right) \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{24} \right) \sin(\omega_s t) + \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{4} \right) \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{4} \right) \cos(\omega_s t) - \\
 & \frac{k_{g1}}{2} \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{24} \right) \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{4} \right) \sin((1-2s)\omega_s t) - \frac{k_{g1}k_{g2}}{4} \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{24} \right) \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{24} \right) \cos((1-2s)\omega_s t) - \\
 & \frac{k_{g1}}{2} \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{24} \right) \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{4} \right) \sin((1+2s)\omega_s t) - \frac{k_{g1}k_{g2}}{4} \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{24} \right) \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{24} \right) \cos((1+2s)\omega_s t) - \\
 & \frac{k_{g1}^2}{16} k_{g2} \sin((1-4s)\omega_s t) - \frac{k_{g1}^2}{8} \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{4} \right) \cos((1-4s)\omega_s t) - \\
 & \frac{k_{g1}^2}{16} k_{g2} \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{24} \right) \sin((1+4s)\omega_s t) - \frac{k_{g1}^2}{8} \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{4} \right) (\cos((1+4s)\omega_s t)) + \\
 & \frac{k_{g1}^3}{48} \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{4} \right) \sin((1-6s)\omega_s t) + \frac{k_{g1}^3}{48} \frac{k_{g2}}{2} \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{24} \right) \cos((1-6s)\omega_s t) + \\
 & \frac{k_{g1}^3}{48} \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{4} \right) \sin((1+6s)\omega_s t) + \frac{k_{g1}^3}{48} \frac{k_{g2}}{2} \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{24} \right) \cos((1+6s)\omega_s t) - \\
 & \frac{k_{g2}}{2} \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{4} \right) \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{24} \right) \sin(3\omega_s t) - \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{4} \right) \frac{k_{g2}^2}{8} \cos(3\omega_s t) - \\
 & \frac{k_{g1}}{4} \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{24} \right) \frac{k_{g2}^2}{4} \sin((3-2s)\omega_s t) + \frac{k_{g1}k_{g2}}{4} \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{24} \right) \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{24} \right) \cos((3-2s)\omega_s t) - \\
 & \frac{k_{g1}}{4} \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{24} \right) \frac{k_{g2}^2}{4} \sin((3+2s)\omega_s t) - \frac{k_{g1}k_{g2}}{4} \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{24} \right) \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{24} \right) (\cos((3+2s)\omega_s t)) + \\
 & \frac{k_{g1}^2}{16} k_{g2} \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{24} \right) \sin((3-4s)\omega_s t) + \frac{k_{g1}^2}{8} \frac{k_{g2}^2}{8} \cos((3-4s)\omega_s t) + \\
 & \frac{k_{g1}^2}{16} k_{g2} \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{24} \right) \sin((3+4s)\omega_s t) + \frac{k_{g1}^2}{8} \frac{k_{g2}^2}{8} \cos((3+4s)\omega_s t) + \\
 & \frac{k_{g1}^3}{24} \frac{k_{g2}^2}{16} \sin((3-6s)\omega_s t) + \frac{k_{g1}^3}{48} \frac{k_{g2}}{2} \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{24} \right) \cos((3-6s)\omega_s t) + \\
 & \frac{k_{g1}^3}{24} \frac{k_{g2}^2}{16} \sin((3+6s)\omega_s t) + \frac{k_{g1}^3}{48} \frac{k_{g2}}{2} \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{24} \right) \cos((3+6s)\omega_s t) - \\
 & \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{4} \right) \frac{k_{g2}^3}{48} \sin(5\omega_s t) - \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{4} \right) \frac{k_{g2}^2}{8} \cos(5\omega_s t) + \\
 & + \frac{k_{g1}}{4} \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{24} \right) \frac{k_{g2}^2}{4} \sin((5-2s)\omega_s t) + \frac{k_{g1}}{4} \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{24} \right) \frac{k_{g2}^3}{24} \cos((5-2s)\omega_s t) + \\
 & \frac{k_{g1}}{4} \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{24} \right) \frac{k_{g2}^2}{4} \sin((5+2s)\omega_s t) + \frac{k_{g1}}{4} \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{24} \right) \frac{k_{g2}^3}{24} \cos((5+2s)\omega_s t) - \\
 & \dots
 \end{aligned} \right) \quad (3.39)$$

$$\left. \begin{aligned}
 & \dots \\
 & \frac{k_{g1}^2 k_{g2}^3}{16 \cdot 24} \sin((5-4s)\omega_s t) + \frac{k_{g1}^2 k_{g2}^2}{8 \cdot 8} \cos((5-4s)\omega_s t) + \\
 & \frac{k_{g1}^2 k_{g2}^3}{16 \cdot 24} \sin((5+4s)\omega_s t) + \frac{k_{g1}^2 k_{g2}^2}{8 \cdot 8} \cos((5+4s)\omega_s t) - \\
 & \frac{k_{g1}^3 k_{g2}^2}{24 \cdot 16} \sin((5-6s)\omega_s t) - \frac{k_{g1}^3 k_{g2}^3}{48 \cdot 48} \cos((5-6s)\omega_s t) - \\
 & \frac{k_{g1}^3 k_{g2}^2}{24 \cdot 16} \sin((5+6s)\omega_s t) - \frac{k_{g1}^3 k_{g2}^3}{48 \cdot 48} \cos((5+6s)\omega_s t) + \\
 & \dots \\
 & + \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{4}\right) \frac{k_{g2}^3}{48} \sin(7\omega_s t) + \\
 & \frac{k_{g1}}{4} \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{24}\right) \frac{k_{g2}^3}{24} \cos((7-2s)\omega_s t) + \frac{k_{g1}}{4} \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{24}\right) \frac{k_{g2}^3}{24} \cos((7+2s)\omega_s t) - \\
 & \frac{k_{g1}^2 k_{g2}^3}{16 \cdot 24} \sin((7-4s)\omega_s t) - \frac{k_{g1}^2 k_{g2}^3}{16 \cdot 24} \sin((7+4s)\omega_s t) - \\
 & \frac{k_{g1}^3 k_{g2}^3}{48 \cdot 48} \cos((7-6s)\omega_s t) - \frac{k_{g1}^3 k_{g2}^3}{48 \cdot 48} \cos((7+6s)\omega_s t)
 \end{aligned} \right\} \quad (3.39)$$

$$B = \left. \begin{aligned}
 & \frac{k_{g1}}{2} \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{24}\right) \frac{k_{g2}^2}{8} \sin(\omega_s t) - \frac{k_{g1} k_{g2}}{4} \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{24}\right) \cos(\omega_s t) + \\
 & \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{4}\right) \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{24}\right) \frac{k_{g2}}{2} \sin((1-2s)\omega_s t) + \frac{k_{g1}^2 k_{g2}^2}{8 \cdot 8} \cos((1-2s)\omega_s t) - \\
 & \frac{k_{g1}^2}{16} \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{24}\right) k_{g2} \sin((1+2s)\omega_s t) - \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{4}\right) \frac{k_{g2}^2}{8} \cos((1+2s)\omega_s t) \\
 & - \frac{k_{g1}^3 k_{g2}^2}{24 \cdot 16} \sin((1-4s)\omega_s t) - \frac{k_{g1} k_{g2}}{4} \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{24}\right) \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{24}\right) \cos((1-4s)\omega_s t) + \\
 & \frac{k_{g1}}{2} \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{24}\right) \frac{k_{g2}^2}{8} \sin((1+4s)\omega_s t) + \frac{k_{g1}^3 k_{g2}}{48 \cdot 2} \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{24}\right) \cos((1+4s)\omega_s t) - \\
 & \frac{k_{g1}^2}{16} \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{24}\right) k_{g2} \sin((1-6s)\omega_s t) + \frac{k_{g1}^2 k_{g2}^2}{8 \cdot 8} \cos((1+6s)\omega_s t) + \\
 & \frac{k_{g1}^3 k_{g2}}{48 \cdot 2} \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{24}\right) \cos((1-8s)\omega_s t) - \frac{k_{g1}^3 k_{g2}^2}{24 \cdot 16} \sin((1+8s)\omega_s t) + \\
 & \frac{k_{g1}}{2} \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{24}\right) \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{4}\right) \sin(3\omega_s t) + \frac{k_{g1}}{4} \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{24}\right) \frac{k_{g2}^3}{24} \cos(3\omega_s t) - \\
 & \dots
 \end{aligned} \right\} \quad (3.40)$$

$$\begin{aligned}
 & \dots \\
 & \frac{k_{g1}^2 k_{g2}^3}{16 \cdot 24} \sin((3-2s)\omega_s t) + \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{4}\right) \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{4}\right) \cos((3-2s)\omega_s t) + \\
 & \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{4}\right) \frac{k_{g2}^3}{48} \sin((3+2s)\omega_s t) - \frac{k_{g1}^2}{8} \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{4}\right) \cos((3+2s)\omega_s t) + \\
 & \frac{k_{g1}}{2} \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{24}\right) \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{4}\right) \sin((3-4s)\omega_s t) - \frac{k_{g1}^3 k_{g2}^3}{48 \cdot 48} \cos((3-4s)\omega_s t) - \\
 & \frac{k_{g1}^3}{48} \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{4}\right) \sin((3+4s)\omega_s t) + \frac{k_{g1}}{4} \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{24}\right) \frac{k_{g2}^3}{24} \cos((3+4s)\omega_s t) - \\
 & \frac{k_{g1}^2}{8} \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{4}\right) \cos((3-6s)\omega_s t) - \frac{k_{g1}^2 k_{g2}^3}{16 \cdot 24} \sin((3+6s)\omega_s t) - \\
 & \frac{k_{g1}^3}{48} \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{4}\right) \sin((3-8s)\omega_s t) - \frac{k_{g1}^3 k_{g2}^3}{48 \cdot 48} \cos((3+8s)\omega_s t) - \\
 & \frac{k_{g1} k_{g2}}{4} \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{24}\right) \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{24}\right) \cos(5\omega_s t) + \\
 & \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{4}\right) \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{24}\right) \frac{k_{g2}}{2} \sin((5-2s)\omega_s t) - \frac{k_{g1}^2}{16} \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{24}\right) k_{g2} \sin((5+2s)\omega_s t) - \\
 \dots & \frac{k_{g1} k_{g2}}{4} \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{24}\right) \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{24}\right) \cos((5-4s)\omega_s t) + \frac{k_{g1}^3 k_{g2}}{48 \cdot 2} \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{24}\right) \cos((5+4s)\omega_s t) - \\
 & \frac{k_{g1}^2}{16} \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{24}\right) k_{g2} \sin((5-6s)\omega_s t) + \frac{k_{g1}^3 k_{g2}}{48 \cdot 2} \left(1 - \frac{k_{g2}^2}{24}\right) (\cos((5-8s)\omega_s t)) - \\
 & \frac{k_{g1}}{2} \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{24}\right) \frac{k_{g2}^2}{8} \sin(7\omega_s t) - \\
 & \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{4}\right) \frac{k_{g2}^2}{8} (\cos((7-2s)\omega_s t)) + \frac{k_{g1}^2 k_{g2}^2}{8 \cdot 8} \cos((7+2s)\omega_s t) - \\
 & \frac{k_{g1}}{2} \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{24}\right) \frac{k_{g2}^2}{8} \sin((7-4s)\omega_s t) + \frac{k_{g1}^3 k_{g2}^2}{24 \cdot 16} \sin((7+4s)\omega_s t) + \\
 & \frac{k_{g1}^2 k_{g2}^2}{8 \cdot 8} \cos((7-6s)\omega_s t) + \frac{k_{g1}^3 k_{g2}^2}{24 \cdot 16} (\sin((7-8s)\omega_s t)) + \\
 & \frac{k_{g1}}{4} \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{24}\right) \frac{k_{g2}^3}{24} \cos(9\omega_s t) - \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{4}\right) \frac{k_{g2}^3}{48} \sin((9-2s)\omega_s t) + \frac{k_{g1}^2 k_{g2}^3}{16 \cdot 24} \sin((9+2s)\omega_s t) + \\
 & \frac{k_{g1}}{4} \left(1 - \frac{k_{g1}^2}{24}\right) \frac{k_{g2}^3}{24} \cos((9-4s)\omega_s t) - \frac{k_{g1}^3 k_{g2}^3}{48 \cdot 48} \cos((9+4s)\omega_s t) + \\
 & \left. \frac{k_{g1}^2 k_{g2}^3}{16 \cdot 24} (\sin((9-6s)\omega_s t)) - \frac{k_{g1}^3 k_{g2}^3}{48 \cdot 48} (\cos((9-8s)\omega_s t)) \right) \quad (3.40)
 \end{aligned}$$

Sličnim postupkom bi se moglo doći i do izraza za delove fluksnih obuhvata statorskih namotaja b i c , te bi se i u njima prepoznale komponente spektra kao u (3.38). Međutim, uzevši u obzir složenost matematičkog dokaza i činjenicu da se nikakva nova informacija od interesa za ovo istraživanje ne bi dobila, to će se dokaz izostaviti.

Da bi se izraz (3.38) mogao analizirati, predstaviće se u sledećoj pojednostavljenoj formi:

$$\Psi_{adeo} = \frac{N_B M_{rs}}{2} \left(\begin{array}{l} \left(\begin{array}{l} A_1 \cos(\omega_s t + \alpha_1) + \\ A_2 \cos((1-2s)\omega_s t + \alpha_2) + A_3 \cos((1+2s)\omega_s t + \alpha_3) + \\ A_4 \cos((1-4s)\omega_s t + \alpha_4) + A_5 \cos((1+4s)\omega_s t + \alpha_5) + \\ A_6 \cos((1-6s)\omega_s t + \alpha_6) + A_7 \cos((1+6s)\omega_s t + \alpha_7) + \\ A_8 \cos(3\omega_s t + \alpha_8) + \\ A_9 \cos((3-2s)\omega_s t + \alpha_9) + A_{10} \cos((3+2s)\omega_s t + \alpha_{10}) + \\ A_{11} \cos((3-4s)\omega_s t + \alpha_{11}) + A_{12} \cos((3+4s)\omega_s t + \alpha_{12}) + \\ A_{13} \cos((3-6s)\omega_s t + \alpha_{13}) + A_{14} \cos((3+6s)\omega_s t + \alpha_{14}) + \\ A_{15} \cos(5\omega_s t + \alpha_{15}) + \\ A_{16} \cos((5-2s)\omega_s t + \alpha_{16}) + A_{17} \cos((5+2s)\omega_s t + \alpha_{17}) + \\ A_{18} \cos((5-4s)\omega_s t + \alpha_{18}) + A_{19} \cos((5+4s)\omega_s t + \alpha_{19}) + \\ A_{20} \cos((5-6s)\omega_s t + \alpha_{20}) + A_{21} \cos((5+6s)\omega_s t + \alpha_{21}) + \\ A_{22} \cos(7\omega_s t + \alpha_{22}) + \\ A_{23} \cos((7-2s)\omega_s t + \alpha_{23}) + A_{24} \cos((7+2s)\omega_s t + \alpha_{24}) + \\ A_{25} \cos((7-4s)\omega_s t + \alpha_{25}) + A_{26} \cos((7+4s)\omega_s t + \alpha_{26}) + \\ A_{27} \cos((7-6s)\omega_s t + \alpha_{27}) + A_{28} \cos((7+6s)\omega_s t + \alpha_{28}) \end{array} \right) I_{11} + \\ \left(\begin{array}{l} B_1 \cos(\omega_s t + \beta_1) + \\ B_2 \cos((1-2s)\omega_s t + \beta_2) + B_3 \cos((1+2s)\omega_s t + \beta_3) + \\ B_4 \cos((1-4s)\omega_s t + \beta_4) + B_5 \cos((1+4s)\omega_s t + \beta_5) + \\ B_6 \cos((1-6s)\omega_s t + \beta_6) + B_7 \cos((1+6s)\omega_s t + \beta_7) + \\ B_8 \cos(3\omega_s t + \beta_8) + \\ B_9 \cos((3-2s)\omega_s t + \beta_9) + B_{10} \cos((3+2s)\omega_s t + \beta_{10}) + \\ B_{11} \cos((3-4s)\omega_s t + \beta_{11}) + B_{12} \cos((3+4s)\omega_s t + \beta_{12}) + \\ B_{13} \cos((3-6s)\omega_s t + \beta_{13}) + B_{14} \cos((3+6s)\omega_s t + \beta_{14}) + \\ B_{15} \cos(5\omega_s t + \beta_{15}) + \\ B_{16} \cos((5-2s)\omega_s t + \beta_{16}) + B_{17} \cos((5+2s)\omega_s t + \beta_{17}) + \\ B_{18} \cos((5-4s)\omega_s t + \beta_{18}) + B_{19} \cos((5+4s)\omega_s t + \beta_{19}) + \\ B_{20} \cos(7\omega_s t + \alpha_{20}) + \\ B_{21} \cos((7-2s)\omega_s t + \alpha_{21}) + B_{22} \cos((7+2s)\omega_s t + \alpha_{22}) + \\ B_{23} \cos((7-4s)\omega_s t + \alpha_{23}) + B_{24} \cos((7+4s)\omega_s t + \alpha_{24}) + \\ B_{25} \cos(9\omega_s t + \beta_{25}) + \\ B_{26} \cos((9-2s)\omega_s t + \beta_{26}) + B_{27} \cos((9+2s)\omega_s t + \beta_{27}) + \\ B_{28} \cos((9-4s)\omega_s t + \beta_{28}) + B_{29} \cos((9+4s)\omega_s t + \beta_{29}) \end{array} \right) I_{l(N_B-1)} \end{array} \right) \quad (3.41)$$

Smisao izraza (3.41) je da se lakše uoče komponente u spektru dela fluksnog obuhvata. Dalje će delovi fluksnih obuhvata posredstvom indukovane elektromotorne sile u namotajima statora uspostaviti struje na istim učestanostima kao u (3.41). Sem komponenti struje na učestanostima $(1 \pm 2ks)\omega_s$, $k \in \{1, 2, 3, \dots\}$, o čijem nastanku je diskutovano u prethodnom poglavlju, u spektru je prisutno i mnoštvo dodatnih komponenti koje su takođe posledica neuravnoteženosti električnog kola rotora. Tako se u odnosu na slučaj analize sprovedene pod pretpostavkom konstantne brzine obrtanja ovde pojavljuju i komponente struje motora na učestanostima $(3+2s)\omega_s$, $(3+4s)\omega_s$ i $(3+6s)\omega_s$, kao i na učestanostima $(3-2s)\omega_s$, $(3-4s)\omega_s$ i $(3-6s)\omega_s$. One čine komponente gornjeg i donjeg bočnog pojasa u okolini trećeg harmonika struje motora. Sem njih, na osnovu izraza (3.41) se može zaključiti da su komponente bočnih pojasa prisutne i u okolini petog, sedmog i devetog harmonika struje motora. Zapravo, ukoliko bi se uzeo veći broj članova razvoja u Tejlorov red u (3.34) – (3.37), pokazalo bi se da je odgovor rotorskog kola na oštećenje kaveza pojava komponenti u spektru struja motora na učestanostima $((2m-1) \pm 2ks)\omega_s$, $m, k \in \{1, 2, 3, \dots\}$ i zato predstavljaju obeležja kvara rotora jednofazno napajanog trofaznog kaveznog motora. Vrednosti ovih komponenti zavise od veličine simetrične komponente struje rotorskih petlji reda N_B-1 (obeležje kvara) i u direktnoj su srazmeri sa stepenom oštećenja kaveza. Komponente struje čija je učestanost jednaka celobrojnim umnošcima osnovne učestanosti struje motora nisu pouzdan pokazatelj kvara rotora jer one inače postoje u mašini zbog jednofaznog napajanja ($2\omega_s$), nesinusne prostorne raspodele magnetnopobudne sile, uticaja žlebova, ali i postojanja viših harmonika u izvoru napajanja. Iz tog razloga se ne razmatraju.

Na osnovu sprovedene teorijske analize i iznetih zaključaka, struja jednofazno napajanog trofaznog kaveznog motora sa postojanjem kvara rotora može se analitički uprošćeno iskazati u sledećoj opštoj formi:

$$i = I_m \cos(\omega_s t - \psi) + \left(\begin{array}{l} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} I_{lsbmk} \cos(((2m-1)-2ks)\omega_s t - \psi_{lmk}) + \\ \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} I_{usbmk} \cos(((2m-1)+2ks)\omega_s t - \psi_{umk}) \end{array} \right). \quad (3.42)$$

Treba naglasiti da ukoliko bi se uvažile i ostale komponente iz spektra elektromagnetskog momenta datog izrazom (3.24), spektar struje motora bi bio sadržajniiji.

Ovim je analitički pokazano kako oscilacije brzine obrtanja motora utiču na spektar struje jednofazno napajanog trofaznog kaveznog motora. Vredi istaći i to da će pojava dodatnih obeležja kvara rotora u spektru struje motora generisati nove komponente u spektru elektromagnetskog momenta i brzine obrtanja. One će se grupisati oko jednosmerne komponente i svih parnih umnožaka osnovne učestanosti napajanja, pri čemu su komponente unutar bočnog pojasa međusobno pomerene za iznos $2s\omega_s$.

3.6 Obeležja kvara rotora u spektru trenutne vrednosti električne snage motora

Ukoliko se iskoriste rezultati prethodnih teorijskih razmatranja, postaje jasno da će se obeležja kvara rotora iz spektra struje motora preslikati u spektar trenutne vrednosti električne snage motora. Ako se pretpostavi da se motor napaja prostoperiodičnim naponom (izraz 2.44) i uvaži izraz (3.42), tada se trenutna električna snaga motora može iskazati sledećom relacijom:

$$p = \left(\begin{array}{l} \frac{U_m I_m}{2} (\cos(\psi) + \cos(2\omega_s t - \psi)) + \\ \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{U_m I_{lsbmk}}{2} (\cos((1-m+ks)2\omega_s t + \psi_{lmk}) + \cos((m-ks)2\omega_s t - \psi_{lmk})) + \\ \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{U_m I_{usbmk}}{2} (\cos((1-m-ks)2\omega_s t + \psi_{umk}) + \cos((m+ks)2\omega_s t - \psi_{umk})) \end{array} \right). \quad (3.43)$$

Proučavanjem prethodnog izraza mogu se uočiti obeležja kvara rotora u spektru trenutne vrednosti električne snage motora i to u vidu komponenti bočnih pojasa u okolini jednosmerne komponente i oko svih parnih umnožaka osnovne učestanosti napajanja. Prema izrazu (3.43) to su komponente na učestanostima $2ks\omega_s$ i $(m\pm ks)2\omega_s$, gde su $m, k \in \{1, 2, 3, \dots\}$. Komponente unutar bočnih pojasa su međusobom pomerene za iznos $2s\omega_s$.

3.7 Predlog nove metode za otkrivanje kvara rotora

Zahvaljujući prethodnim opsežnim teorijskim analizama utvrđeno je da se u uslovima jednofaznog napajanja trofaznog kaveznog motora, pored uobičajenih, pojavljuju i dodatna obeležja kvara rotora u spektru signala struje, trenutne vrednosti električne snage, elektromagnetskog momenta i brzine obrtanja motora. Obeležja kvara rotora su funkcija klizanja, ali je ono za isti iznos momenta opterećenja nešto veće kod jednofazno napajanog motora nego u slučaju trofaznog napajanja. Uzevši u obzir ovu bitnu činjenicu, postavlja se hipoteza istraživanja koja se zasniva na stavu da se pokazatelji kvara rotora iz frekvencijskog domena signala terminalnih veličina motora mogu identifikovati u stacionarnom stanju pogona bez obzira na iznos momenta opterećenja, te da je ovako izdvojene pokazatelje kvara dalje moguće iskoristiti za neinvazivnu detekciju oštećenja štapnih provodnika.

Izneta hipoteza istraživanja ujedno predstavlja osnov za predlog nove metode za otkrivanje kvara rotora neopterećenog trofaznog kaveznog asinhronog motora. Izuzev toga, ova metoda podrazumeva i kvantifikaciju oštećenja štapnih provodnika rotora analizom signala terminalne struje motora u vremenskom domenu, koristeći se obeležjima deskriptivne statistike.

Sve iznete pretpostavke će prvo biti proverene računarskim simulacijama nad razvijenim matematičkim modelom motora sa kvarom, o čemu će biti reči u narednom poglavlju.

4. MATEMATIČKO MODELOVANJE KVARA ROTORA U RADU TROFAZNOG KAVEZNOG MOTORA

Da bi se proverili zaključci teorijskih razmatranja iz prethodnog poglavlja, ovde će se definisati matematički model trofaznog kaveznog motora napajanog jednofaznim naponom. Sam model se oslanja na skup relacija koje su poznate pod imenom višestruko spregnuta električna kola (engl. *multiple coupled circuit approach*) [173], [183]. Zapravo, reč je o modelu mašine u originalnom (netransformisanom) domenu koji, iako složen, omogućava da se istraži uticaj kvara rotora na spektar statorske struje, elektromagnetskog momenta i brzine obrtanja motora putem računarskih simulacija. Model je realizovan u programskom paketu *MATLAB/Simulink*, pri čemu su vrednosti elemenata matrice induktivnosti mašine određeni na osnovu sprovedenih linearnih magnetostatičkih simulacija izvedenih u programu *FEMM 4.2* zasnovanom na metodi konačnih elemenata. Treba napomenuti da su induktivnosti mašine u opštem slučaju složeno periodična funkcija položaja rotora, ali su u modelu uvaženi samo osnovni harmonici statorsko-rotorskih induktivnosti, a sve ostale induktivnosti imaju konstantnu vrednost. Ovakav pristup problemu predstavlja kompromis između nivoa tačnosti modela mašine i brzine izvršavanja simulacija. Kvar rotora modelovan je promenom otpornosti odgovarajućih elemenata u rotorskoj matrici otpornosti. To je suštinska prednost ovakvog modela u poređenju sa postojećim modelima koji nisu sasvim validni za analizu kvarova motora. Zbog pojednostavljenja modela, zasićenje magnetskog kola je zanemareno, kao i zakošenje štapnih provodnika rotora, jer su od sekundarnog značaja kada je reč o problematici koja se ovde razmatra. Kasnije će se eksperimentalnim putem potvrditi da su usvojena zanemarenja sasvim opravdana. Sem toga, prilikom modelovanja zanemarene su i kapacitivne sprege između namotaja, struje koje se zatvaraju van štapnih provodnika rotora (kroz magnetsko kolo i vratilo), snaga gubitaka u magnetskom kolu mašine i nelinearnost karakteristike magnetskog materijala. Takođe, vrednosti otpornosti namotaja se smatraju konstantnim (zanemaruje se uticaj temperature i efekat potiskivanja), kao i momenat inercije motora.

4.1 Matematički model trofaznog kaveznog motora

U ovom odeljku će se uspostaviti matematički model trofaznog kaveznog motora napajanog trofaznim naponom u originalnom (faznom) domenu.

U uvodnom delu ovog poglavlja naglašeno je da se model motora oslanja na višestruko spregnuta električna kola. Kako bi se metod mogao primeniti, električno kolo rotora će se predstaviti preko rotorskih petlji, o čemu je već bilo reči u drugom poglavlju. Jednu rotorsku petlju čine dva susedna štapna provodnika rotora sa dva naspramna dela kratkospojnih prstenova. Uvođenjem ovakvog koncepta mogu se definisati fluksni obuhvati, kao i sopstvene i međusobne induktivnosti unutar rotora, ali i prema namotajima statora [171]. Detalj električnog kola rotorskog kaveza prikazan je na slici 2.2 u drugom poglavlju. Rotorske petlje su spregnute međusobno kao i sa namotajima statora. Struje u petljama su posledice postojanja indukovanih elektromotornih sila u njima. Ako se sa N_b označi broj štapnih provodnika rotora i uzimajući u obzir kratkospojne prstenove, to se električna šema rotorskog kaveza može predstaviti sa (N_b+1) nezavisnih strujnih petlji, tj. neophodno je izračunati isto toliko struja u kolu rotora da bi se došlo do vrednosti struja u štapnim provodnicima i kratkospojnim prstenovima.

Diferencijalne jednačine ravnoteže napona svih električnih kola kojima se motor modeluje imaju oblik:

$$\mathbf{U} = \mathbf{R}\mathbf{I} + \frac{d(\mathbf{L}\mathbf{I})}{dt}, \quad (4.1)$$

gde je \mathbf{U} vektor napona koji se sastoji se od vektora napona električnih kola statora (\mathbf{U}_s) i rotora (\mathbf{U}_r):

$$\mathbf{U} = [\mathbf{U}_s \ \mathbf{U}_r]^T, \quad (4.2)$$

$$\mathbf{U}_s = [u_a \ u_b \ u_c], \quad (4.3)$$

$$\mathbf{U}_r = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0]_{N_b+1}. \quad (4.4)$$

Postoje tri napona statorskih namotaja (u_a , u_b i u_c) i (N_b+1) napona rotorskih petlji jednakih nuli.

Slično se definiše i vektor struje \mathbf{I} iz (4.1):

$$\mathbf{I} = [\mathbf{I}_s \ \mathbf{I}_r]^T, \quad (4.5)$$

$$\mathbf{I}_s = [i_a \ i_b \ i_c], \quad (4.6)$$

$$\mathbf{I}_r = [i_{l1} \ i_{l2} \ \dots \ i_{lN_b} \ i_e]_{N_b+1}, \quad (4.7)$$

gde je \mathbf{I}_s vektor struje statora, a \mathbf{I}_r vektor struje rotora. Postoje tri struje statorskih namotaja (i_a , i_b i i_c) i N_b struja rotorskih petlji (i_{l1} , i_{l2} , ..., i_{lN_b}), uključujući struju u kratkospojnom prstenu (i_e).

Matrica otpornosti \mathbf{R} iz (4.1) sastoji se iz dve submatrice: matrice statorskih otpornosti (\mathbf{R}_s) koja je dijagonalna i dimenzija 3×3 i matrice rotorskih otpornosti (\mathbf{R}_r) dimenzija $(N_B+1) \times (N_B+1)$:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_s & \\ & \mathbf{R}_r \end{bmatrix}, \quad (4.8)$$

$$\mathbf{R}_s = \begin{bmatrix} R_s & & \\ & R_s & \\ & & R_s \end{bmatrix}, \quad (4.9)$$

$$\mathbf{R}_r = \begin{bmatrix} R_{l1} & -R_{b2} & 0 & \dots & 0 & -R_{bN_B} & -R_e \\ -R_{b1} & R_{l2} & -R_{b3} & \dots & 0 & 0 & -R_e \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & R_{l(N_B-1)} & -R_{bN_B} & -R_e \\ -R_{b1} & 0 & 0 & \dots & -R_b & R_{lN_B} & -R_e \\ -R_e & -R_e & -R_e & \dots & -R_e & -R_e & N_B R_e \end{bmatrix}_{(N_B+1) \times (N_B+1)}. \quad (4.10)$$

U matrici (4.9) R_s predstavlja otpornost namotaja statora, a procedura njenog generisanja je trivijalna. Da bi se objasnio način formiranja rotorske matrice, kreneće se od rotorske petlje sa oznakom $(k+1)$ na slici 2.2. Jednačina naponske ravnoteže za izabranu rotorsku petlju glasi:

$$0 = -R_b i_{lk} + (2R_b + 2R_e) i_{l(k+1)} - R_b i_{l(k+2)} - R_e i_e + \frac{d\psi_{l(k+1)}}{dt}. \quad (4.11)$$

Kako će se kvar rotora modelovati povećanjem otpornosti štapnog provodnika, to je poželjno da se svakom od elemenata R_b dodeli i odgovarajući indeks koji je u vezi sa tekućom rotorskom petljom. Tako će se elementima u grani između petlji k i $(k+1)$ dodeliti indeks k . Slično je i sa elementima u ostalim granama. Tada jednačina naponske ravnoteže (4.11) poprima oblik:

$$0 = -R_{bk} i_{lk} + (R_{bk} + R_{b(k+1)} + 2R_e) i_{l(k+1)} - R_{b(k+1)} i_{l(k+2)} - R_e i_e + \frac{d\psi_{l(k+1)}}{dt}, \quad (4.12)$$

Isti princip bi se primenio i za potrebe modelovanja kvara segmenta kratkospojnog prstena otpornosti R_e . Na osnovu izraza (4.12) uvešće se pojam ukupne otpornosti rotorske petlje k :

$$R_{lk} = R_{bk} + R_{b(k+1)} + 2R_e. \quad (4.13)$$

Sada se jednačina naponske ravnoteže rotorske petlje $(k+1)$ može zapisati u obliku:

$$0 = -R_{bk} i_{lk} + R_{lk} i_{l(k+1)} - R_{b(k+1)} i_{l(k+2)} - R_e i_e + \frac{d\psi_{l(k+1)}}{dt}. \quad (4.14)$$

Jednačina ravnoteže napona za konturu kratkospojnog prstena glasi:

$$0 = R_e(i_e - i_{lk}) + R_e(i_e - i_{l(k+1)}) + R_e(i_e - i_{l(k+2)}) + \dots + R_e(i_e - i_{lN_B}) + \frac{d\psi_{le}}{dt}. \quad (4.15)$$

Kada se po uzoru na (4.14) ispišu jednačine naponske ravnoteže za sve rotorske petlje i uvaži jednačina (4.15), matrica rotorskih otpornosti dobija formu predstavljenu izrazom (4.10).

Kvar rotora se modeluje na krajnje jednostavan način, povećanjem otpornosti štapnog provodnika (ili više njih). Kako su u matrici rotorskih otpornosti rotorske petlje u vezi sa susednim petljama, treba voditi računa da se u matrici menjaju i vrednosti elemenata koji su pod uticajem promene otpornosti datog provodnika. Ovo je ilustrovano na slici 4.1 na primeru uvećanja otpornosti štapnog provodnika k [184].

$$\mathbf{R}_r = \begin{bmatrix} \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ \dots & R_{l(k-1)} & -R_{bk} & 0 & \dots & \dots \\ \dots & -R_{b(k-1)} & R_{lk} & -R_{b(k+1)} & 0 & \dots \\ \dots & 0 & -R_{bk} & R_{l(k+1)} & -R_{b(k+2)} & \dots \\ \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}$$

Slika 4.1 Detalj matrice rotorskih otpornosti sa uokvirenim elementima čije se vrednosti menjaju zbog uvećanja otpornosti provodnika k .

Matricom induktivnosti (\mathbf{L}) iz (4.1) opisuje se magnetska sprega između namotaja (petlji). Sastoji se iz četiri submatrice: matrice statorskih induktivnosti (\mathbf{L}_{ss}) dimenzije 3×3 , matrice rotorskih induktivnosti (\mathbf{L}_{rr}) dimenzije $(N_B+1) \times (N_B+1)$ i matrica statorsko-rotorskih (\mathbf{L}_{sr}) i rotorsko-statorskih (\mathbf{L}_{rs}) induktivnosti:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{ss} & \mathbf{L}_{sr} \\ \mathbf{L}_{rs} & \mathbf{L}_{rr} \end{bmatrix}. \quad (4.16)$$

Matrica statorskih induktivnosti sadrži u sebi sopstvene induktivnosti namotaja statora (L_a , L_b i L_c), kao i njihove međusobne induktivnosti ($M_{ab}=M_{ba}$, $M_{ac}=M_{ca}$ i $M_{bc}=M_{cb}$):

$$\mathbf{L}_{ss} = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_b & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_c \end{bmatrix}, \quad (4.17)$$

Ako se zanemare razlike u magnetskoj permeabilnosti po obodu vazdušnog zazora (tj. postojanje žlebova) i pojava zasićenja magnetskog kola, to se može smatrati da su elementi matrice \mathbf{L}_{ss} konstantni. Takođe, važi $L_a=L_b=L_c=L_{ss}$ i $M_{ab}=M_{ba}=M_{ac}=M_{ca}=M_{bc}=M_{cb}=M_{ss}$.

Matrica rotorskih induktivnosti definisana je izrazom (4.18) [171], [173]. Sopstvene induktivnosti rotorskih petlji označene su sa L_l , pri čemu je $L_l=L_{ml}+2(L_b+L_e)$, L_{ml} je induktivnost magnećenja za svaku rotorsku petlju, L_b je rasipna induktivnost štapnog provodnika, L_e je induktivnost rasipanja dela kratkospojnog prstena, dok je sa M_{lkj} ($1 \leq k, j \leq N_B$) u (4.18) označena međusobna induktivnost između pojedinih rotorskih petlji. Matrica se generiše se po sličnom

principu kao i matrica rotorskih otpornosti, s tim što je njena forma dosta složenija zbog postojanja magnetskih sprega između svih rotorskih petlji. Izuzetak čini odsustvo sprege između kratkospojnih prstenova i rotorskih petlji sačinjenih od štapnih provodnika (posledica geometrije), što se odražava na način formiranja poslednje vrste i kolone u (4.18).

$$\mathbf{L}_{rr} = \begin{bmatrix} L_l & M_{l12} - L_b & M_{l13} & \dots & M_{l1(N_B-1)} & M_{l1N_B} - L_b & -L_e \\ M_{l21} - L_b & L_l & M_{l23} - L_b & \dots & M_{l2(N_B-1)} & M_{l2N_B} & -L_e \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{l(N_B-1)1} & M_{l(N_B-1)2} & M_{l(N_B-1)3} & \dots & L_l & M_{l(N_B-1)N_B} & -L_e \\ M_{lN_B1} & M_{lN_B2} & M_{lN_B3} & \dots & M_{lN_B(N_B-1)} & L_l & -L_e \\ -L_e & -L_e & -L_e & \dots & -L_e & -L_e & N_B L_e \end{bmatrix}_{(N_B+1) \times (N_B+1)}. \quad (4.18)$$

Ako se uvedu iste pretpostavke kao i za matricu \mathbf{L}_{ss} (zanemarenje postojanja žlebova i pojava zasićenja magnetskog kola), to se i ovde može smatrati da su elementi matrice rotorskih induktivnosti konstantni. Prilikom matematičkog modelovanja kvara rotora vrednosti njenih elementa se ne menjaju.

Matrice statorsko-rotorskih i rotorsko-statorskih induktivnosti opisuju magnetsku spregu između namotaja statora i rotorskih petlji:

$$\mathbf{L}_{sr} = \mathbf{L}_{rs}^T = \begin{bmatrix} M_{al1}(\vartheta) & M_{al2}(\vartheta) & \dots & M_{alN_B}(\vartheta) & 0 \\ M_{bl1}(\vartheta) & M_{bl2}(\vartheta) & \dots & M_{blN_B}(\vartheta) & 0 \\ M_{cl1}(\vartheta) & M_{cl2}(\vartheta) & \dots & M_{clN_B}(\vartheta) & 0 \end{bmatrix}_{3 \times (N_B+1)}. \quad (4.19)$$

U prethodnom izrazu su sa M_{alk} , M_{blk} i M_{clk} ($1 \leq k \leq N_B$) označene međusobne induktivnosti između namotaja statora i rotorskih petlji. One su složenoperiodična funkcija položaja rotora prema statoru. Pa ipak, za potrebe ovog istraživanja, sasvim je opravdano uzeti da su međusobne induktivnosti iz (4.19) prostoperiodične funkcije položaja rotora. Talasni oblici ovih međuinduktivnosti su identični, sa odgovarajućim faznim pomakom (elementi vrsta matrice (4.19) su međusobno fazno pomereni za ugao $2\pi/N_B$, dok su elementi kolona međusobno fazno pomereni za $2\pi/3$) [184]. Poslednja kolona u (4.19) ukazuje na odsustvo magnetske sprege između statorskih namotaja i petlje kratkospojnog prstena.

Elektromagnetski momenat (T_e) određen je sledećom relacijom:

$$T_e = \frac{1}{2} p \begin{bmatrix} \mathbf{I}_s \\ \mathbf{I}_r \end{bmatrix}^T \frac{d}{d\vartheta} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{L}_{ss} & \mathbf{L}_{sr} \\ \mathbf{L}_{rs} & \mathbf{L}_{rr} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \mathbf{I}_s \\ \mathbf{I}_r \end{bmatrix} = \frac{1}{2} p \begin{bmatrix} \mathbf{I}_s \\ \mathbf{I}_r \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 0 & \frac{d}{d\vartheta}(\mathbf{L}_{sr}) \\ \frac{d}{d\vartheta}(\mathbf{L}_{rs}) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_s \\ \mathbf{I}_r \end{bmatrix}. \quad (4.20)$$

U prethodnom izrazu elektromagnetski momenat motora je označen sa T_e , p predstavlja broj pari polova, a ϑ je električni ugao položaja rotora.

Mehanički podsistem se opisuje Njutnovom diferencijalnom jednačinom, koja za slučaj rotacionog kretanja glasi:

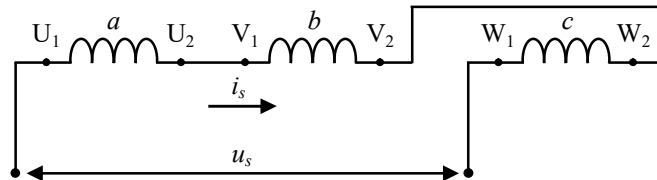
$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T, \quad (4.21)$$

gde je sa J označen ukupni (svedeni) momenat inercije pogona, ω_m je mehanička ugaona brzina obrtanja motora, a momenat opterećenja (sa uvaženim mehaničkim gubicima) je predstavljen veličinom T .

Relacijama (4.1) – (4.10) i (4.16) – (4.21) definisan je matematički modela trofaznog kaveznog motora napajanog trofaznim naponom. Uz tu definiciju, na primeren i jednostavan način, objašnjeno je kako se promenom određenih elemenata u matrici rotorske otpornosti (izraz (4.10) i slika 4.1) model može prilagoditi za analizu rada kaveznog motora u režimu sa postojanjem kvara na rotoru (prekid štapnih provodnika).

4.2 Uvažavanje konfiguracije statorskih namotaja

U ovom odeljku će se pristupiti prilagođenju prethodno definisanog matematičkog modela trofaznog kaveznog motora kako bi se uvažilo redno vezivanje namotaja statora na način kako je to predloženo u trećem poglavlju, kao i njihovo priključenje na izvor jednofaznog napona napajanja (slika 4.2). Ovo je neophodno učiniti jer predstavljeni model ne uzima u obzir način povezivanja statorskih namotaja međusobno.



Slika 4.2 Šema vezivanja statorskih namotaja za priključenje na jednofazni izvor napajanja.

Prilikom sprežanja namotaja statora na red (slika 4.2), očividno je da struje u njima ne mogu biti nezavisne, tj. uspostavlja se jedinstvena struja i_s . Ovo treba uvažiti u jednačinama naponske ravnoteže statora i rotora. Sem toga, zbog promene redosleda priključenja namotaja c (slika 4.2), matrice statorskih i statorsko-rotorskih (rotorsko-statorskih) induktivnosti će pretrpeti izvesne izmene. Tako se jednačine fluksnih obuhvata statorskih namotaja i rotorskih petlji (uz opravdano zanemarenje postojanja magnetske sprege između namotaja statora i kratkospojnog prstena) mogu iskazati u sledećoj formi:

$$\begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} & M_{ss} & -M_{ss} \\ M_{ss} & L_{ss} & -M_{ss} \\ -M_{ss} & -M_{ss} & L_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_s \\ i_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{al1}(\vartheta) & M_{al2}(\vartheta) & \dots & M_{alN_b}(\vartheta) \\ M_{bl1}(\vartheta) & M_{bl2}(\vartheta) & \dots & M_{blN_b}(\vartheta) \\ -M_{cl1}(\vartheta) & -M_{cl2}(\vartheta) & \dots & -M_{clN_b}(\vartheta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{l1} \\ \vdots \\ i_{lN_b} \end{bmatrix}, \quad (4.22)$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_{I1} \\ \Psi_{I2} \\ \vdots \\ \Psi_{I(N_B-1)} \\ \Psi_{IN_B} \\ \Psi_{Ie} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_l & M_{I12} - L_b & M_{I13} & \dots & M_{I1(N_B-1)} & M_{I1N_B} - L_b & -L_e \\ M_{I21} - L_b & L_l & M_{I23} - L_b & \dots & M_{I2(N_B-1)} & M_{I2N_B} & -L_e \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{I(N_B-1)1} & M_{I(N_B-1)2} & M_{I(N_B-1)3} & \dots & L_l & M_{I(N_B-1)N_B} & -L_e \\ M_{IN_B1} & M_{IN_B2} & M_{IN_B3} & \dots & M_{IN_B(N_B-1)} & L_l & -L_e \\ -L_e & -L_e & -L_e & \dots & -L_e & -L_e & N_B L_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{I1} \\ i_{I2} \\ \vdots \\ i_{I(N_B-1)} \\ i_{IN_B} \\ i_{Ie} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{al1}(\vartheta) & M_{bl1}(\vartheta) & -M_{cl1}(\vartheta) \\ M_{al2}(\vartheta) & M_{bl2}(\vartheta) & -M_{cl2}(\vartheta) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{al(N_B-1)}(\vartheta) & M_{bl(N_B-1)}(\vartheta) & -M_{cl(N_B-1)}(\vartheta) \\ M_{alN_B}(\vartheta) & M_{blN_B}(\vartheta) & -M_{clN_B}(\vartheta) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_s \\ i_s \end{bmatrix}. \quad (4.23)$$

Sređivanjem relacija (4.22) i (4.23) dolazi se do sledećih izraza za fluksne obuhvate:

$$\begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} \\ L_{ss} \\ L_{ss} - 2M_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_s \\ i_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{al1}(\vartheta) & M_{al2}(\vartheta) & \dots & M_{alN_B}(\vartheta) \\ M_{bl1}(\vartheta) & M_{bl2}(\vartheta) & \dots & M_{blN_B}(\vartheta) \\ -M_{cl1}(\vartheta) & -M_{cl2}(\vartheta) & \dots & -M_{clN_B}(\vartheta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{I1} \\ \vdots \\ i_{IN_B} \end{bmatrix}, \quad (4.24)$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_{I1} \\ \Psi_{I2} \\ \vdots \\ \Psi_{I(N_B-1)} \\ \Psi_{IN_B} \\ \Psi_{Ie} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_l & M_{I12} - L_b & M_{I13} & \dots & M_{I1(N_B-1)} & M_{I1N_B} - L_b & -L_e \\ M_{I21} - L_b & L_l & M_{I23} - L_b & \dots & M_{I2(N_B-1)} & M_{I2N_B} & -L_e \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{I(N_B-1)1} & M_{I(N_B-1)2} & M_{I(N_B-1)3} & \dots & L_l & M_{I(N_B-1)N_B} & -L_e \\ M_{IN_B1} & M_{IN_B2} & M_{IN_B3} & \dots & M_{IN_B(N_B-1)} & L_l & -L_e \\ -L_e & -L_e & -L_e & \dots & -L_e & -L_e & N_B L_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{I1} \\ i_{I2} \\ \vdots \\ i_{I(N_B-1)} \\ i_{IN_B} \\ i_{Ie} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{al1}(\vartheta) + M_{bl1}(\vartheta) - M_{cl1}(\vartheta) \\ M_{al2}(\vartheta) + M_{bl2}(\vartheta) - M_{cl2}(\vartheta) \\ \vdots \\ M_{al(N_B-1)}(\vartheta) + M_{bl(N_B-1)}(\vartheta) - M_{cl(N_B-1)}(\vartheta) \\ M_{alN_B}(\vartheta) + M_{blN_B}(\vartheta) - M_{clN_B}(\vartheta) \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_s \\ i_s \end{bmatrix}. \quad (4.25)$$

Na ovaj način uvaženo je povezivanje statorskih namotaja na red. Uzevši u obzir relacije (4.24) i (4.25), matematički model trofaznog kaveznog motora napajanog jednofaznim naponom definisan je sledećim skupom jednačina:

$$\mathbf{U} = \mathbf{RI} + \frac{d(\mathbf{LI})}{dt}, \quad (4.26)$$

$$\mathbf{U} = [\mathbf{U}_s \ \mathbf{U}_r]^T, \quad (4.27)$$

$$\mathbf{U}_s = [u_s], \quad (4.28)$$

$$\mathbf{U}_r = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0]_{N_B+1}, \quad (4.29)$$

$$\mathbf{I} = [\mathbf{I}_s \ \mathbf{I}_r]^T, \quad (4.30)$$

$$\mathbf{I}_s = [i_s], \quad (4.31)$$

$$\mathbf{I}_r = [i_{l1} \ i_{l2} \ \dots \ i_{lN_B} \ i_e]_{N_B+1}, \quad (4.32)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_s & \\ & \mathbf{R}_r \end{bmatrix}, \quad (4.33)$$

$$\mathbf{R}_s = [3\mathbf{R}_s], \quad (4.34)$$

$$\mathbf{R}_r = \begin{bmatrix} R_{l1} & -R_{b2} & 0 & \dots & 0 & -R_{bN_B} & -R_e \\ -R_{b1} & R_{l2} & -R_{b3} & \dots & 0 & 0 & -R_e \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & R_{l(N_B-1)} & -R_{bN_B} & -R_e \\ -R_{b1} & 0 & 0 & \dots & -R_b & R_{lN_B} & -R_e \\ -R_e & -R_e & -R_e & \dots & -R_e & -R_e & N_B R_e \end{bmatrix}_{(N_B+1) \times (N_B+1)}, \quad (4.35)$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{ss} & \mathbf{L}_{sr} \\ \mathbf{L}_{rs} & \mathbf{L}_{rr} \end{bmatrix}, \quad (4.36)$$

$$\mathbf{L}_{ss} = [(3\mathbf{L}_{ss} - 2\mathbf{M}_{ss})], \quad (4.37)$$

$$\mathbf{L}_{rr} = \begin{bmatrix} L_l & M_{l12} - L_b & M_{l13} & \dots & M_{l1(N_B-1)} & M_{l1N_B} - L_b & -L_e \\ M_{l21} - L_b & L_l & M_{l23} - L_b & \dots & M_{l2(N_B-1)} & M_{l2N_B} & -L_e \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{l(N_B-1)1} & M_{l(N_B-1)2} & M_{l(N_B-1)3} & \dots & L_l & M_{l(N_B-1)N_B} & -L_e \\ M_{lN_B1} & M_{lN_B2} & M_{lN_B3} & \dots & M_{lN_B(N_B-1)} & L_l & -L_e \\ -L_e & -L_e & -L_e & \dots & -L_e & -L_e & N_B L_e \end{bmatrix}_{(N_B+1) \times (N_B+1)}, \quad (4.38)$$

$$\mathbf{L}_{sr} = \begin{bmatrix} M_{al1}(\vartheta) & M_{al2}(\vartheta) & \dots & M_{alN_B}(\vartheta) & 0 \\ M_{bl1}(\vartheta) & M_{bl2}(\vartheta) & \dots & M_{blN_B}(\vartheta) & 0 \\ -M_{cl1}(\vartheta) & -M_{cl2}(\vartheta) & \dots & -M_{clN_B}(\vartheta) & 0 \end{bmatrix}_{3 \times (N_B+1)}, \quad (4.39)$$

$$\mathbf{L}_{rs} = \begin{bmatrix} M_{al1}(\vartheta) + M_{bl1}(\vartheta) - M_{cl1}(\vartheta) \\ M_{al2}(\vartheta) + M_{bl2}(\vartheta) - M_{cl2}(\vartheta) \\ \vdots \\ M_{al(N_B-1)}(\vartheta) + M_{bl(N_B-1)}(\vartheta) - M_{cl(N_B-1)}(\vartheta) \\ M_{alN_B}(\vartheta) + M_{blN_B}(\vartheta) - M_{clN_B}(\vartheta) \\ 0 \end{bmatrix}_{(N_B+1) \times 1}, \quad (4.40)$$

$$T_e = \frac{1}{2} p \begin{bmatrix} \mathbf{I}_s \\ \mathbf{I}_r \end{bmatrix}^T \frac{d}{d\vartheta} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{L}_{ss} & \mathbf{L}_{sr} \\ \mathbf{L}_{rs} & \mathbf{L}_{rr} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \mathbf{I}_s \\ \mathbf{I}_r \end{bmatrix} = \frac{1}{2} p \begin{bmatrix} \mathbf{I}_s \\ \mathbf{I}_r \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 0 & \frac{d}{d\vartheta}(\mathbf{L}_{sr}) \\ \frac{d}{d\vartheta}(\mathbf{L}_{rs}) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_s \\ \mathbf{I}_r \end{bmatrix}, \quad (4.41)$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T. \quad (4.42)$$

Značenje pojedinih veličina dato je u prethodnom odeljku. Treba primetiti da se kao posledica konfigurisanja namotaja statora na red smanjuje broj jednačina u matematičkom modelu trofaznog kaveznog motora. Tako se tri statorske jednačine naponske ravnoteže svode na jednu. Sem toga, redukuju se i dimenzije matrica statorske otpornosti (izraz (4.34)), statorske induktivnosti (izraz (4.37)) i rotorsko-statorske induktivnosti (izraz (4.40)). Jasno je da izabrani način povezivanja namotaja statora ne utiče na jednačine (4.41) i (4.42), koje su po formi identične jednačinama (4.20) i (4.21), ali su zarad preglednosti ponovo navedene.

Predstavljeni matematički model (relacije (4.26) – (4.42)) će se koristiti za sprovođenje računarskih simulacija kvara rotora u radu trofaznog kaveznog motora napajanog jednofaznim naponom. Kako je to već objašnjeno u prethodnom odeljku, kvar rotora se modeluje uvećanjem otpornosti štapnog provodnika, tj. promenom vrednosti odgovarajućih elemenata u matrici rotorske otpornosti (izraz (4.10) i slika 4.1). Ova matrica ne trpi nikakve izmene usled promene konfiguracije namotaja, tj. izraz (4.35) je identičan izrazu (4.10). Takođe, matrica rotorskih induktivnosti je ostala nepromenjena, pa je izraz (4.38) identičan sa (4.18).

4.3 Određivanje električnih parametara kaveznog asinhronog motora

Da bi se mogle izvršiti računarske simulacije nad razvijenim matematičkim modelom trofaznog kaveznog motora koji se napaja jednofaznim naponom, neophodno je poznavanje svih njegovih električnih parametara. Motor koji se koristi za potrebe istraživanja je četvoropolni, kavezni, sledećih nazivnih vrednosti: 11 kW, 400 V, 22 A, 50 Hz, 1454 o/min.

Otpornost namotaja statora se može utvrditi eksperimentalno merenjem na razmatranom motoru. S druge strane, otpornost štapnih provodnika rotora (R_b) može se izračunati na osnovu poznavanja geometrije kaveza i materijala od koga je izrađen, prema poznatoj relaciji:

$$R_b = \rho \frac{l}{S}, \quad (4.43)$$

gde je ρ specifična električna otpornost provodnika (za aluminijum je $2,903 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ na 20°C), l predstavlja njegovu dužinu (205 mm), a S označava površinu poprečnog preseka ($67,7 \text{ mm}^2$). Slično se izračunava i otpornost segmenata kratkospojnog prstena.

Ipak, sa aspekta parametara modela motora, najveći problem predstavlja nepoznavanje vrednosti sopstvenih i međusobnih induktivnosti namotaja statora i rotorskih petlji, kao i međusobne induktivnosti između njih. Naime, njihovo eksperimentalno određivanje nije u

potpunosti moguće izvesti. U ovoj disertaciji njihov proračun je izveden primenom metode konačnih elemenata. Za to je bilo neophodno poznavati geometriju mašine, konfiguraciju namotaja statora i vrste materijala i njihove karakteristike (tj. poznavanje podataka o konstrukciji motora). Ideja je da se iz serija magnetostatičkih simulacija odrede fluksni obuhvati, a potom iz njih izračunaju vrednosti traženih induktivnosti. U tabeli 4.1 naznačeni su osnovni konstrukcioni podaci razmatranog motora.

Tabela 4.1 Osnovni podaci o konstrukciji razmatranog motora.

Spoljašnji prečnik lim paketa statora	105 mm
Spoljašnji prečnik lim paketa rotora	68 mm
Unutrašnji prečnik lim paketa statora	68,5 mm
Unutrašnji prečnik lim paketa rotora	28,5 mm
Dužina statorskog/rotorskog lim paketa	205 mm
Broj žlebova statora	36
Korak namotavanja	7/9
Broj žlebova rotora	28
Zakošenje	1/28

Za potrebe izračunavanja elemenata matrica induktivnosti, u ovoj tezi je upotrebljen programski paket *FEMM 4.2* [185] sa pripadajućim modulom za proračun dvodimenzionalnih problema (2D). Program je dostupan za besplatno preuzimanje, a svoju primenu je između ostalog našao i u rešavanju problema iz oblasti elektromagnetike i električnih mašina. Ovde se neće ulaziti u opis postupka definisanja problema u navedenom programskom okruženju (dostupno je u [185]), već će se ukratko izložiti način određivanja vrednosti induktivnosti primenom izabranog programa zasnovanog na metodi konačnih elemenata. Za te potrebe sprovode se linearne magnetostatičke simulacije koje podrazumevaju pobuđivanje odabranog namotaja (ili rotorske petlje) jednosmernom strujom, a potom se na bazi izračunatih fluksnih obuhvata određuju vrednosti sopstvenih i međusobnih induktivnosti. Pošto su induktivnosti u mašini složenoperiodične funkcije položaja rotora prema statoru (kako zbog promene pozicije namotaja statora u odnosu na rotorske petlje, kada je reč o statorsko-rotorskim i rotorsko-statorskim induktivnostima, tako i zbog uticaja žlebova i zubaca u slučaju ostalih induktivnosti), to je potrebno izvršiti niz magnetostatičkih simulacija sa dovoljno malim korakom obrtanja rotora do jednog punog obrtaja. Ugao rotacije je odabran da bude od 1° , što je sasvim zadovoljavajuće za potrebe rekonstruisanja induktivnosti, s obzirom na problematiku koja se analizira u ovom radu. Prethodno je naglašeno da će se za potrebe ovog istraživanja u matematičkom modelu motora zanemariti sve varijacije statorskih i rotorskih induktivnosti (uzeće se njihove srednje vrednosti), dok će se međusobne induktivnosti između namotaja statora i rotorskih petlji (kao i između rotorskih petlji i statorskih namotaja) opisati kao prostoperiodična funkcija položaja rotora. Ceo proces magnetostatičkih simulacija se može automatizovati pisanjem odgovarajuće skripte u tzv. *Lua* programskom jeziku, čime se dobijeni podaci nakon svake pojedinačne simulacije upisuju u izlaznu datoteku, te se kasnije mogu koristiti za obradu.

Treba pomenuti da efekti zakošenja provodnika rotora i zasićenja magnetskog kola nisu

uzeti u obzir (odabran je 2D modul u *FEMM 4.2* i sprovode se magnetostatičke simulacije u linearnoj sredini). Zakošenje se može uvažiti ukoliko bi se koristio modul za proračun trodimenzionalnih problema, ali je sam postupak izuzetno numerički zahtevan. Sem toga, jasno je da bi induktivnosti postale i funkcija aksijalne dužine lim paketa, što predstavljeni matematički model ne može da uzme u obzir. Međutim, kako efekat zakošenja ima najveći uticaj na smanjenje viših harmonijskih članova u spektru induktivnosti [171], a koji svakako nisu od interesa u ovom radu, to se zakošenje provodnika u potpunosti može zanemariti. Opravdanje za zanemarenje uticaja zasićenja magnetskog kola nalazi se u činjenici da su namotaji statora povezani na red i napajaju se jednofaznim naponom, čime je obezbeđeno da radna tačka bude u linearnom delu karakteristike magnetskog materijala.

Za određivanje fluksnih obuhvata statorskih namotaja i rotorskih petlji u 2D modelu motora u *FEMM 4.2* koristi se srednja vrednost magnetskog vektor potencijala (A) po poprečnom preseku žleba [186]. U tom smislu se koristiti sledeći izraz [187]:

$$\Psi_{ij} = \oint_c \vec{A} \cdot d\vec{l}, \quad (4.44)$$

gde Ψ_{ij} označava fluksni obuhvat namotaja ($i, j=a, b, c, l_1, l_2, \dots, l_{N_b}, l_e$), a c označava konturu koja oivičava površ. Za izračunavanje fluksnog obuhvata prema (4.44) u programskom paketu *FEMM 4.2* postoje gotove softverske rutine.

Iz izraza za fluksni obuhvat određuju se sopstvene i međusobne induktivnosti [182], [187]:

$$L_{ii} = \frac{\Psi_{ii}}{i_i} \Big|_{i_j=0}, \quad (4.45)$$

$$M_{ij} = \frac{\Psi_{ij}}{i_i} \Big|_{i_j=0, i \neq j}, \quad (4.46)$$

gde i_i predstavlja vrednost jednosmerne struje kojom se pobuđuje i -ti namotaj (petlja). Njena vrednost se može proizvoljno odabrati jer su permeabilnosti svih materijala u modelu konstantne (linearna sredina). Struja namotaja (petlje) j ima nultu vrednost. U prikazanom postupku za izračunavanje induktivnosti udeo bočnih veza namotaja se ne može uvažiti (2D model).

Nakon sprovedenog postupka na način kako je prethodno objašnjeno, dobijaju se vrednosti induktivnosti za različite položaje rotora prema statoru. U matematičkom modelu motora, definisanom relacijama (4.26) – (4.42), elementi u matricama statorske i rotorske induktivnosti se uzimaju da su konstantni (zanemaruje se uticaj žlebova), te će se iz prethodno izračunatih induktivnosti uzeti samo njihove srednje vrednosti. Elementi statorsko-rotorske (rotorsko-statorske) matrice induktivnosti su složenoperiodične funkcije položaja rotora, ali se za potrebe analize kvara rotora ova zavisnost može uprošćeno opisati kao prostoperiodična. Naime, vrednosti induktivnosti dobijene magnetostatičkim simulacijama se mogu predstaviti preko koeficijenata Furijeovog reda, a potom uzeti samo njihove osnovne komponente. Ako se

posmatra periodična funkcija $g(x)$ na intervalu $[-\pi \pi]$, ona se može izraziti u obliku sledećeg trigonometrijskog reda [176]:

$$g(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx)), \quad (4.47)$$

koji predstavlja Furijeov red funkcije $g(x)$ ako važe sledeći obrasci za koeficijente:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} g(x) dx, \quad (4.48)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} g(x) \cos(nx) dx, \quad (4.49)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} g(x) \sin(nx) dx. \quad (4.50)$$

Primenom razvoja u Furijeov red (4.47) i uzimanjem samo osnovne komponente, međusobne induktivnosti između statorskih namotaja (a , b , c) i rotorskih petlji ($k=1, \dots, N_b$) mogu se predstaviti sledećim relacijama [171]:

$$M_{alk}(\vartheta) = M_{sr} \cos\left(\vartheta - (k-1) \frac{2\pi}{N_B} p\right), \quad (4.51)$$

$$M_{blk}(\vartheta) = M_{sr} \cos\left(\vartheta - \frac{2\pi}{3} - (k-1) \frac{2\pi}{N_B} p\right), \quad (4.52)$$

$$M_{clk}(\vartheta) = M_{sr} \cos\left(\vartheta + \frac{2\pi}{3} - (k-1) \frac{2\pi}{N_B} p\right). \quad (4.53)$$

U prethodnim relacijama p predstavlja broj pari polova motora.

Vrednosti pojedinih karakterističnih induktivnosti motora, dobijene opisanim postupkom, ilustrovane su u tabeli 4.2. Pored toga, u tabeli su navedene i vrednosti otpornosti statorskog namotaja i otpornosti štapnog provodnika rotora i segmenta kratkospojnog prstena.

Tabela 4.2 *Električni parametri razmatranog motora.*

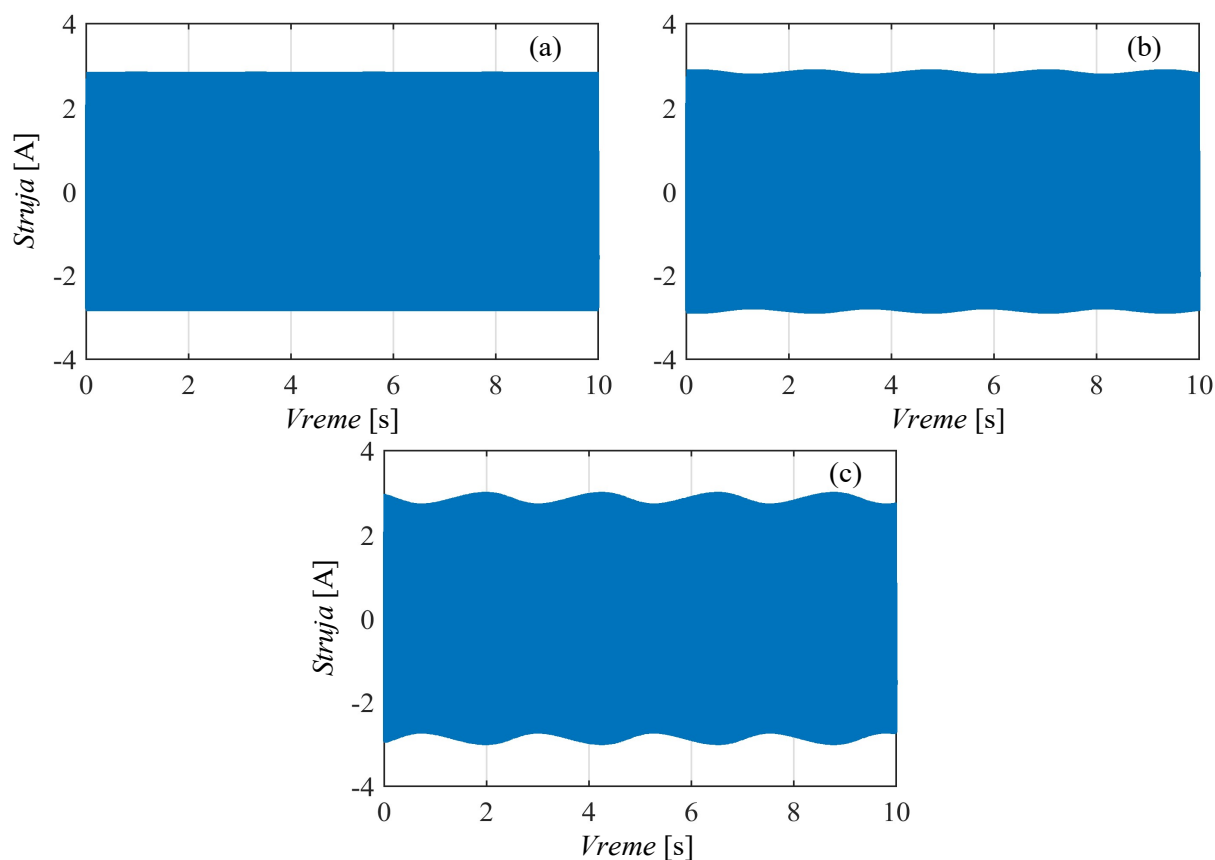
R. br.	Parametar	Vrednost
1.	L_{ss}	0,1807 H
2.	L_l	$7,6 \cdot 10^{-6}$ H
3.	L_b	$1 \cdot 10^{-8}$ H
4.	L_e	$1 \cdot 10^{-9}$ H
5.	M_{l12}	$-1,12 \cdot 10^{-6}$ H
6.	M_{sr}	$2,733 \cdot 10^{-4}$ H
7.	R_s	1,23 Ω
8.	R_b	$8,79 \cdot 10^{-5}$ Ω
9.	R_e	$1 \cdot 10^{-5}$ Ω

Na kraju, važno je istaći da zbog neizbežne greške numeričkog rešavanja magnetskog polja u mašini po metodi konačnih elemenata u programu *FEMM 4.2*, postoje izvesne međusobne razlike u vrednostima pojedinih sopstvenih induktivnosti rotorskih petlji, kao i u vrednostima međusobnih induktivnosti rotorskih petlji prema namotajima statora. No, ovo će biti iskorišćeno za modelovanje nesavršenosti konstrukcije ispravnog rotorskog kaveza.

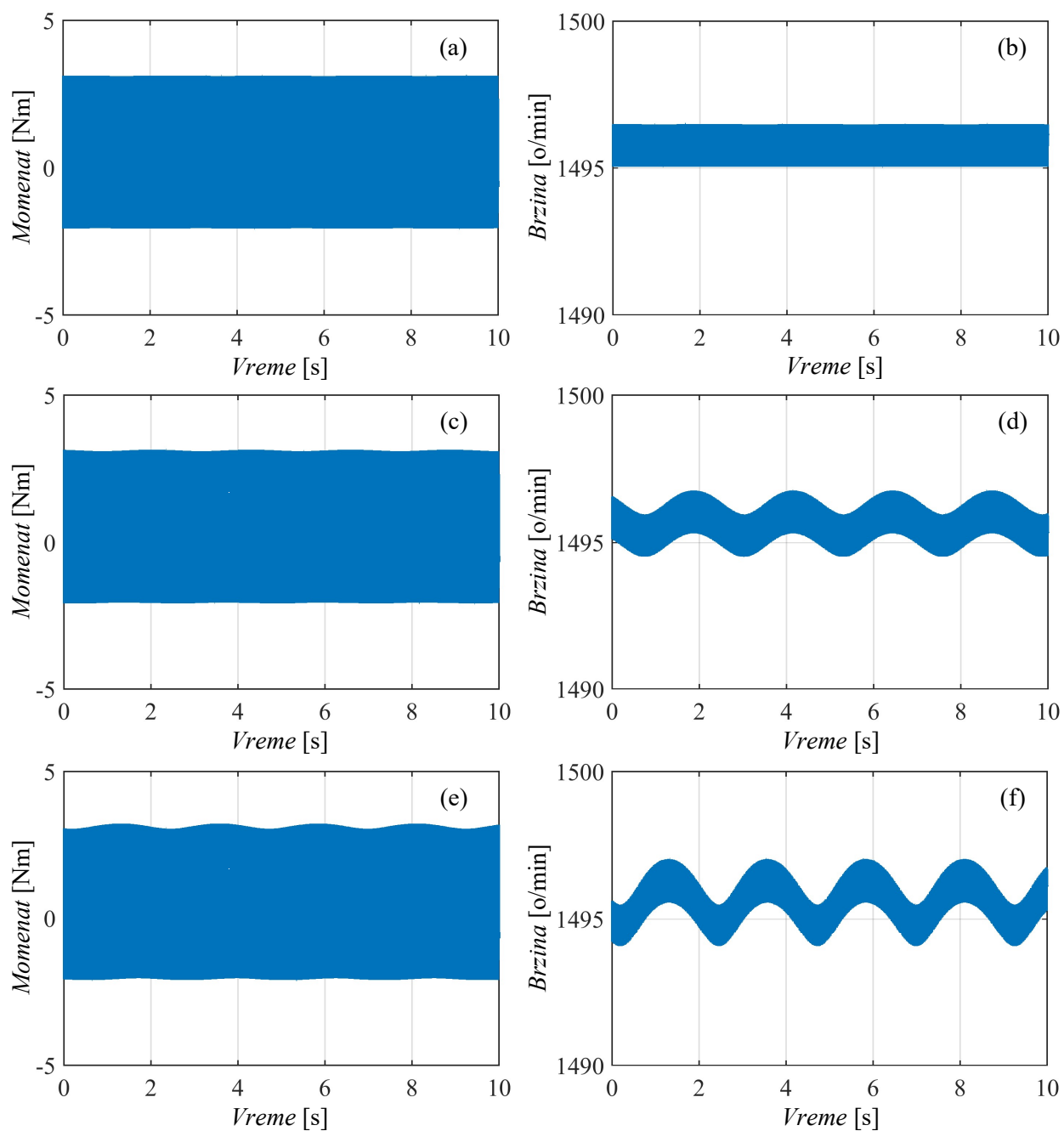
4.4 Rezultati simulacija

Nakon uspostavljanja matematičkog modela i određivanja parametara motora, izvršiće se simulacije kvara rotora u radu trofaznog kaveznog motora napajanog jednofaznim naponom. Cilj je da se provere rezultati teorijske analize sprovedene u prethodnom poglavlju. Kompletan matematički model motora realizovan je u programu *Matlab/Simulink*. Sprovedeće se tri simulacije: sa ispravnim rotorom, rotorom sa jednim i tri susedna provodnika u prekidu. Prekid štapnih provodnika rotorskog kaveza modelovan je uvećanjem njihovih otpornosti na vrednosti koje su nekoliko puta veće od one iz tabele 4.2. Sve simulacije se izvode za mrežno napajan ($f_s=50$ Hz) neopterećen motor, ali sa uvažanim mehaničkim gubicima koji su procenjeni na vrednost 0,7% nazivnog momenta pri nazivnoj brzini obrtanja. Fazni napon napajanja je prostoperiodičan, efektivne vrednosti 230 V.

Na slikama 4.3 i 4.4 su prikazani vremenski zapisi struje, elektromagnetskog momenta i brzine obrtanja motora dobijeni simulacijama za tri prethodno navedena slučaja.



Slika 4.3 Struja motora. (a) Ispravan rotor. (b) Prekid jednog štapnog provodnika. (c) Tri susedna štapna provodnika rotora u prekidu.



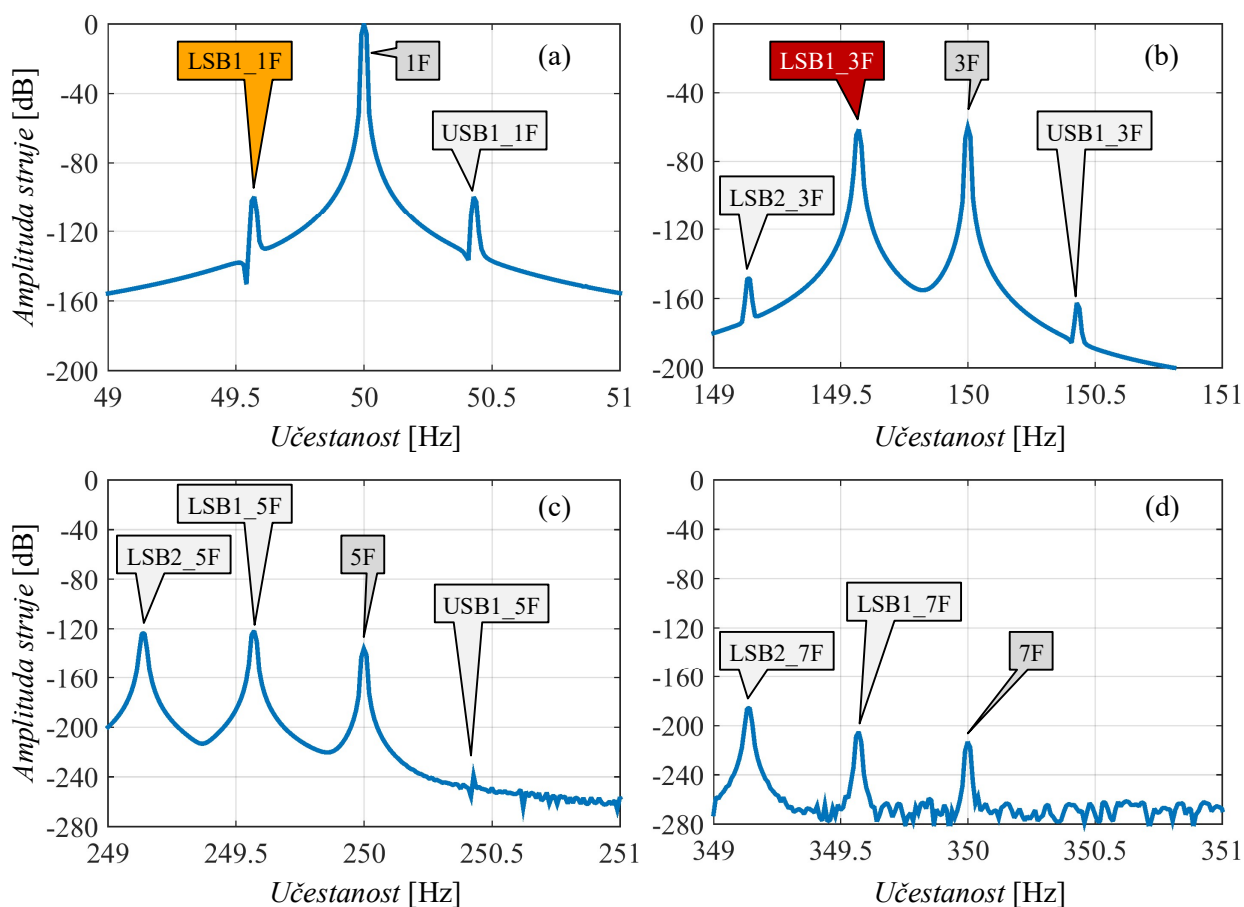
Slika 4.4 Elektromagnetski momenat i brzina obrtanja motora. (a), (b) *Ispravan rotor.* (c), (d) *Prekid jednog provodnika.* (e), (f) *Tri susedna provodnika u prekidu.*

Sa slike 4.3 moguće je uočiti da talasnost struje motora postaje izraženija sa povećanjem broja provodnika u prekidu, tj. intenziteta oštećenja kaveza (prisustvo modulacije). Slično se uočava i na slici 4.4, s tim da su pulsacije jasno vidljive i kod ispravnog rotora, što je posledica jednofaznog napajanja. Vrednost klizanja motora u svim prethodnim slučajevima je oko 0,44%.

U nastavku će se izvršiti analiza amplitudskog spektra struje, trenutne vrednosti električne snage, elektromagnetskog momenta i brzine obrtanja motora primenom Furijeove transformacije na navedene veličine iz vremenskog domena. Da bi se ostvarila što finija frekvencijska rezolucija, sve simulacije su vršene u trajanju od 100 s.

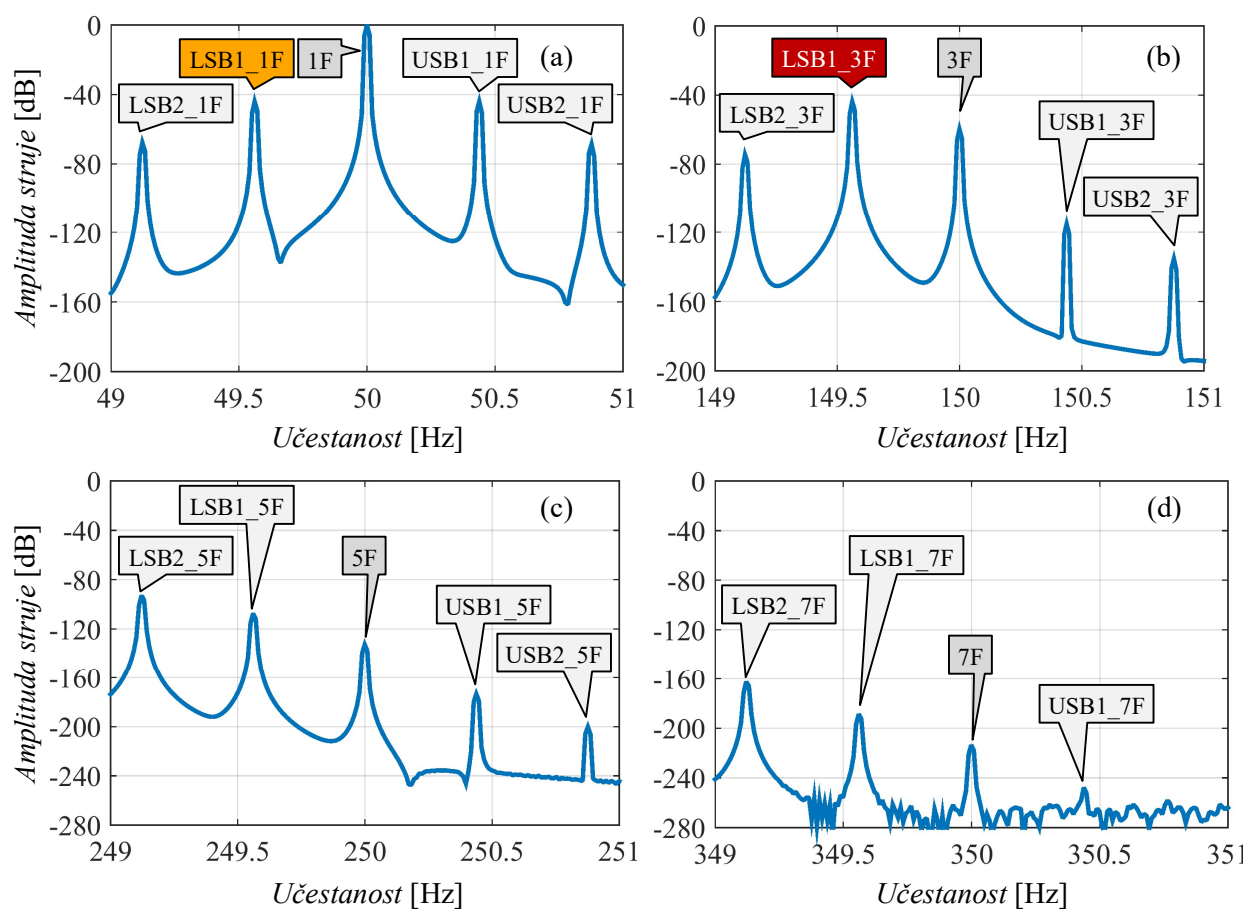
Na slikama 4.5, 4.6 i 4.7 predstavljeni su delovi amplitudskog spektra struje motora dobijene simulacijom nad razvijenim matematičkim modelom motora sa ispravnim rotorom i rotorom sa prekidom jednog i tri susedna provodnika, redom. Za prikaz su odabrani bočni pojasi u okolini osnovne komponente struje motora (oznaka 1F na slikama), njenog trećeg (3F), petog (5F) i sedmog (7F) harmonika. Komponente bočnih pojasa u spektru struje motora obeležene su sa LSB i USB.

Kada ne postoji oštećenje štapnih provodnika rotora očigledno je da amplituda komponente struje na osnovnoj učestanosti ima dominantnu vrednost u odnosu na komponente bočnih pojasa (LSB1_1F i USB1_1F), što je ilustrovano na slici 4.5 (a). Na slici 4.5 su takođe prikazani bočni pojasi u okolini komponenti 3F, 5F i 7F. Komponente bočnih pojasa u okolini 3F, prikazane na slici 4.5 (b), označene su sa LSB1_3F, LSB2_3F i USB1_3F. Može se uočiti da je komponenta obeležena sa LSB1_3F približne vrednosti kao i komponenta struje 3F, dok preostale dve komponente imaju niže vrednosti za ispravan rotor. Teorijska razmatranja, kao i do sada, važe i za komponente bočnih pojasa u okolini komponenti 5F i 7F (slika 4.5 (c) i (d)), ali su njihove amplitude značajno manje. Sve komponente bočnih pojasa su pomerene za iznos $\pm 2ksf_s$ ($k=1,2,\dots$ i $s=0,0044$) u odnosu na komponente 1F, 3F, 5F i 7F. Važno je napomenuti da prikazani rezultati u izvesnoj meri uzimaju u obzir nesavršenost konstrukcije rotora, ali na način kako je to opisano na kraju prethodnog odeljka.



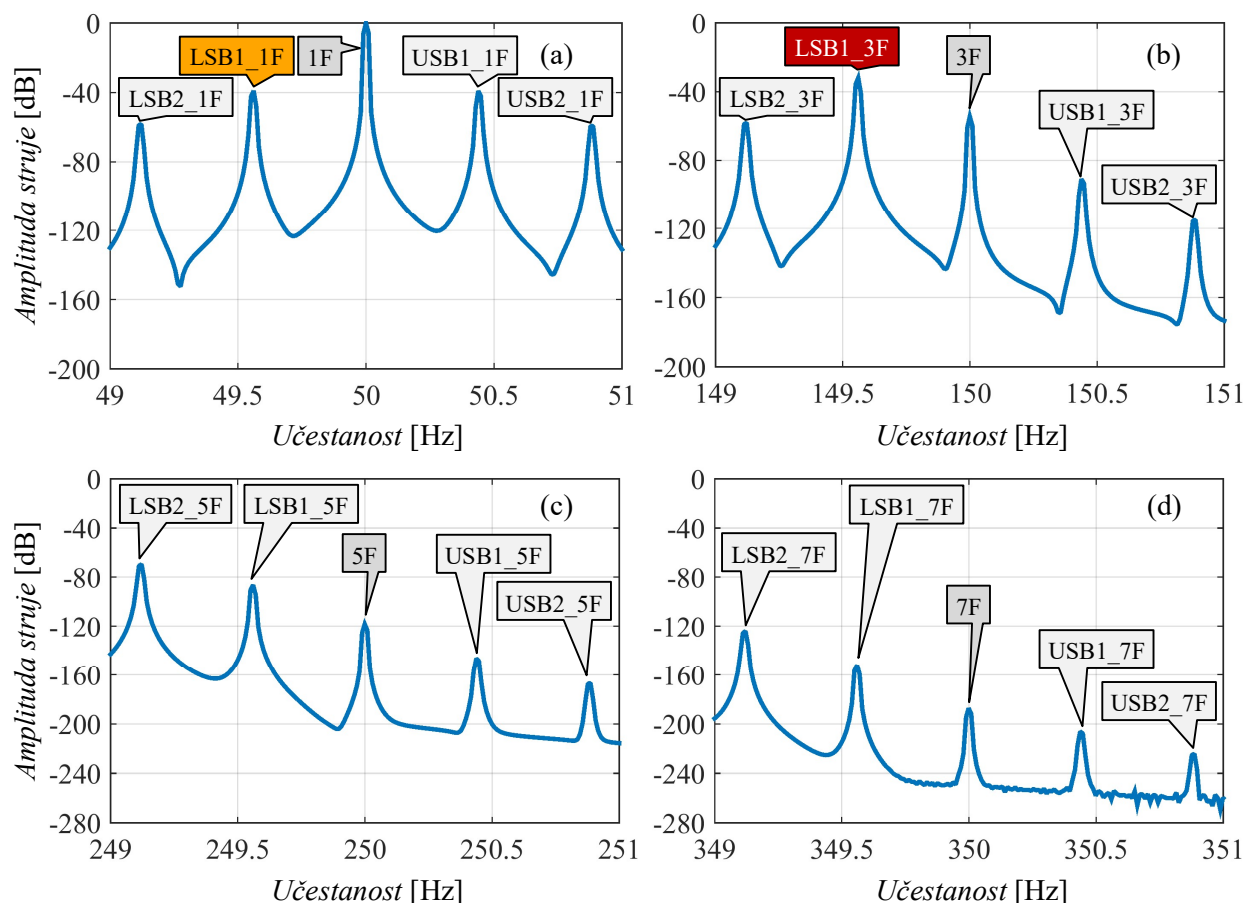
Slika 4.5 Amplitudski spektar struje motora – ispravan rotor. (a) Okolina 50 Hz. (b) Okolina 150 Hz. (c) Okolina 250 Hz. (d) Okolina 350 Hz.

U slučaju prekida jednog štapnog provodnika rotora uvećava se broj komponenti bočnih pojasa u okolini osnovne komponente struje motora (LSB1_1F, LSB2_1F, USB1_1F i USB2_1F na slici 4.6 (a)), a njihove amplitude postaju izraženije. Isto se uočava i na slici 4.6 (b) na kojoj su prikazane komponente bočnih pojasa u okolini 3F, označene sa LSB1_3F, LSB2_3F, USB1_3F i USB2_3F. Primetno je da komponenta obeležena sa LSB1_3F sada ima veću vrednost u odnosu na komponentu struje 3F, ali je i komponenta LSB2_3F značajno porasla u odnosu na slučaj koji se imao kod ispravnog rotora (slike 4.5 (b)). Sličan trend važi i za komponente bočnih pojasa u okolini komponenti 5F i 7F (slika 4.6 (c) i (d)). Sve komponente bočnih pojasa sa slike 4.6 pomerene su za iznos $\pm 2ksf_s$ ($k=1,2,\dots$ i $s=0,0044$) u odnosu na komponente 1F, 3F, 5F i 7F.



Slika 4.6 Amplitudski spektar struje motora – prekid jednog provodnika. (a) Okolina 50 Hz. (b) Okolina 150 Hz. (c) Okolina 250 Hz. (d) Okolina 350 Hz.

Treća simulacija je izvršena za slučaj prekida tri susedna štapna provodnika. I ovde su uočljiva obeležja kvara rotora u spektru struje motora (slika 4.7). Amplitude komponenti bočnih pojasa LSB1_1F, LSB2_1F, USB1_1F i USB2_1F sa slike 4.7 (a) su porasle u odnosu na slučajevne sa slika 4.5 (a) i 4.6 (a). Značajan porast vrednosti komponenti bočnih pojasa u okolini komponenti struje 3F, 5F i 7F (slike 4.6 (b), (c) i (d)) je takođe vidljiv, pre svega LSB1_3F i LSB2_3F (slika 4.6 (c)). Ovo je i očekivano s obzirom na značajnije oštećenje rotora. I ovde su sve komponente bočnih pojasa pomerene za iznos $\pm 2ksf_s$ ($k=1,2,\dots$ i $s=0,0044$) u odnosu na komponente 1F, 3F, 5F i 7F.



Slika 4.7 Amplitudski spektar struje motora – tri susedna provodnika u prekidu. (a) Okolina 50 Hz. (b) Okolina 150 Hz. (c) Okolina 250 Hz. (d) Okolina 350 Hz.

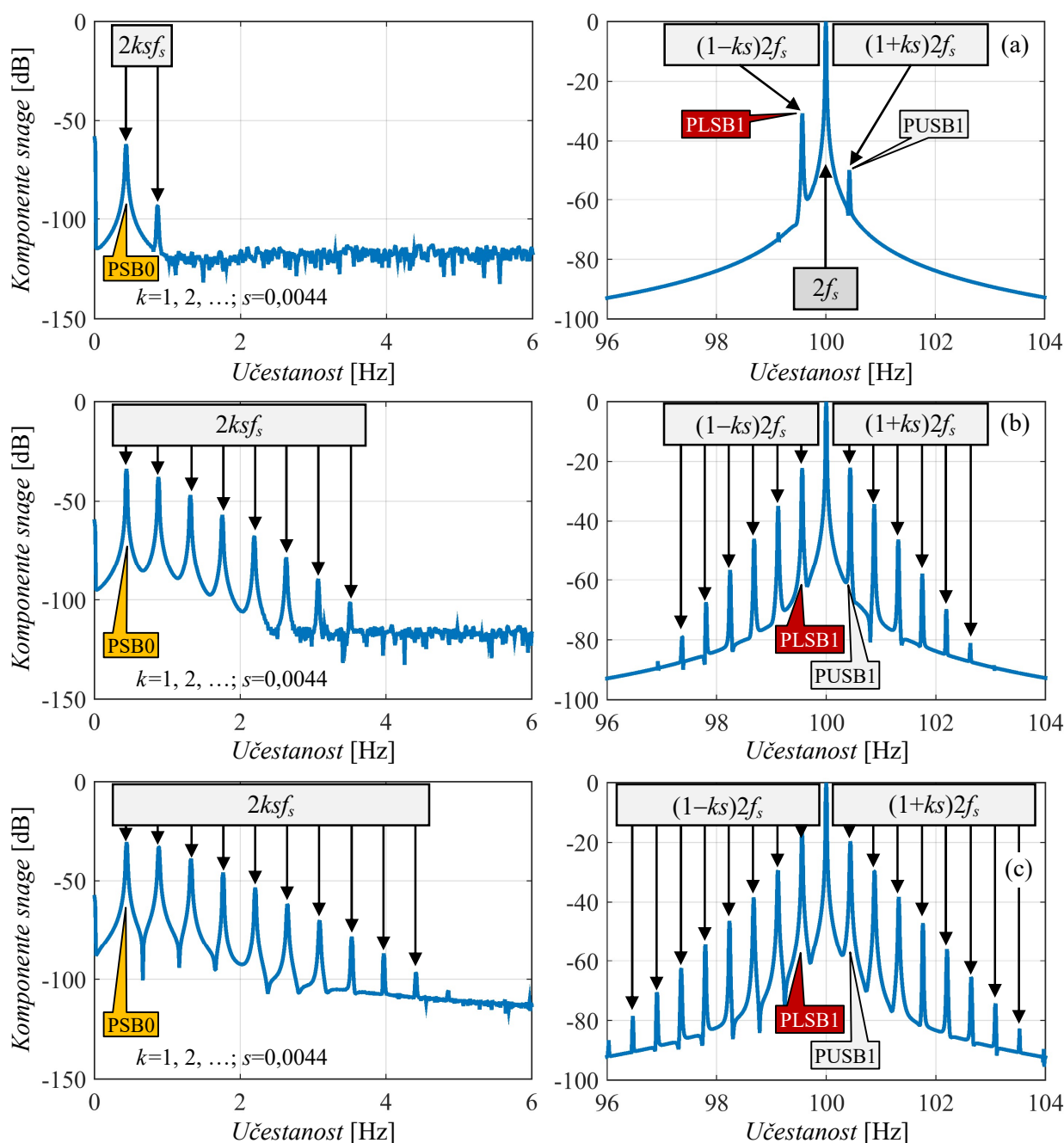
Rezultati spektralne analize struje motora su u potpunosti u skladu sa teorijskim razmatranjima koja su izneta u prethodnom poglavlju. Simulacijama je potvrđeno postojanje bočnih pojasa u okolini komponente struje motora na osnovnoj učestanosti, kao i na njenim celobrojnim umnošcima. Komponente ovih bočnih pojasa predstavljaju obeležja kvara rotora, te se praćenjem njihovih amplituda može detektovati prekid štapnih provodnika.

Ipak, za ocenu stanja rotorskog kaveza treba pratiti samo one komponente koje se mogu izmeriti u realnim uslovima, ali i čija se amplituda značajnije menja sa porastom oštećenja rotora. S tim u vezi, komponente bočnih pojasa u okolini 5F i 7F (slike 4.5, 4.6 i 4.7), kao i komponente svakog narednog bočnog pojasa, nisu pogodne zbog male amplitude. Komponente koje se mogu uzeti u razmatranje se nalaze u okolini 1F i 3F. U tabeli 4.3 su navedene vrednosti izabranih karakterističnih komponenti struje sa slika 4.5, 4.6 i 4.7 koje ispunjavaju navedene uslove.

Tabela 4.3 Vrednosti karakterističnih komponenti amplitudskog spektra struje motora.

Broj provodnika u prekidu	Vrednost LSB1_1F [dB]	Vrednost USB1_1F [dB]	Vrednost LSB1_3F [dB]	Vrednost LSB2_3F [dB]
0	-99,60	-99,63	-61,51	-148,6
1	-44,08	-44,14	-43,63	-74,34
3	-39,07	-39,13	-32,03	-58,94

Od interesa je analizirati i signal trenutne vrednosti električne snage motora u frekvencijskom domenu. Na slici 4.8 dat je prikaz dela amplitudskog spektra trenutne vrednosti električne snage motora dobijene na osnovu prethodno izvršenih simulacija nad razvijenim matematičkim modelom motora sa ispravnim rotorom i rotorom sa prekidom jednog i tri susedna štapna provodnika, redom. Za prikaz su odabrani bočni pojasi u okolini 0 Hz i 100 Hz jer su oni najizraženiji, a to je bitno za praktičnu realizaciju metode (bočni pojasi postoje i u okolini svih ostalih parnih umnožaka učestanosti napajanja). Amplitude komponenti u spektru sa slike 4.8 normalizovane su vrednošću komponente snage na dvostrukoj učestanosti napajanja ($2f_s=100$ Hz), pri čemu je prethodno iz vrednosti proizvoda struje i napona motora uklonjena srednja vrednost snage.



Slika 4.8 Amplitudski spektar trenutne vrednosti električne snage motora. (a) Ispravan rotor. (b) Prekid jednog provodnika. (c) Tri susedna provodnika u prekidu.

Kada ne postoje oštećenja štapnih provodnika rotora, komponente bočnih pojasa trenutne vrednosti električne snage motora u okolini 0 Hz (komponente $2ksf_s$) i 100 Hz (komponente $(1\pm ks)2f_s$) nisu značajnije izražene, što je ilustrovano na slici 4.8 (a). Zapravo, komponente koje su vidljive su isključivo posledica nesavršenosti konstrukcije rotora, a koja je modelovana na način kako je to opisano na kraju odeljka 4.3. Na istoj slici su označene najznačajnije komponente u spektru bočnih pojasa: PSB0 (okolina 0 Hz), PLSB1 i PUSB1 (okolina 100 Hz). Male vrednosti ovih komponenti (tabela 4.4) ukazuju na ispravan rotor.

Na slici 4.8 (b) dati su rezultati simulacije prekida jednog štapnog provodnika rotora. Na prikazanom amplitudskom spektru trenutne vrednosti električne snage motora uočljivo je uvećanje broja komponenti bočnih pojasa u okolini 0 Hz (komponente $2ksf_s$) i 100 Hz (komponente $(1\pm ks)2f_s$), uz značajniji porast njihovih amplituda u odnosu na slučaj sa slike 4.8 (a). Ovo je očekivano s obzirom na prisustvo kvara rotora i u potpunosti je u skladu sa teorijskim razmatranjima iz prethodnog poglavlja. Vrednosti važnijih komponenti iz spektra (PSB0, PLSB1 i PUSB1) su navedene u tabeli 4.4. Sve komponente bočnih pojasa sa slike 4.8 (b) (kao i sa slike 4.8 (a)) pomerene su za iznos $2ksf_s$ ($k=1,2,\dots$ i $s=0,0044$) u odnosu na komponentu na 0 Hz, odnosno $\pm 2ksf_s$ u odnosu na komponentu snage na 100 Hz, što je saglasno sa iznetom teorijom.

Slika 4.8 (c) prikazuje deo amplitudskog spektra signala trenutne vrednosti električne snage motora dobijen simulacijom prekida tri susedna štapna provodnika. Usled značajnog kvara, primetno je povećanje broja komponenti bočnih pojasa u okolini 0 Hz (komponente $2ksf_s$) i 100 Hz (komponente $(1\pm ks)2f_s$). Sem toga, amplitude ovih komponenti su bitno veće u odnosu na slučajevne ispravnog rotora i rotora sa prekidom jednog štapnog provodnika. Ovo se jasno uočava ukoliko se izvrše poređenja pojedinačnih komponenti bočnih pojasa u spektru snage sa slike 4.8. Vrednosti važnijih komponenti iz spektra (PSB0, PLSB1 i PUSB1) date su u tabeli 4.4. Pomeraj komponenti bočnih pojasa u odnosu na komponente na 0 Hz i 100 Hz iznosi $2ksf_s$ ($k=1,2,\dots$ i $s=0,0044$), te se i ovim primerom potvrđuju teorijska razmatranja iz prethodnog poglavlja.

I ovom diskusijom, kao i u slučaju analize spektra struje motora, potvrđeni su rezultati iznesene teorije. Računarskim simulacijama je ustanovljeno postojanje bočnih pojasa oko jednosmerne komponente (0 Hz) i parnih umnožaka osnovne učestanosti napajanja (nf_s , $n=2,4,\dots$). Prateći trenda rasta komponenti bočnih pojasa u spektru signala trenutne vrednosti električne snage motora može se ustanoviti prisustvo kvara rotora, tj. prekid štapnih provodnika.

Tabela 4.4 Vrednosti karakterističnih komponenti amplitudskog spektra trenutne vrednosti električne snage motora.

Broj provodnika u prekidu	Vrednost PSB0 [dB]	Vrednost PLSB1 [dB]	Vrednost PUSB1 [dB]
0	-61,99	-30,74	-49,77
1	-33,78	-22,27	-22,07
3	-30,53	-16,77	-18,61

Ukoliko se izvrše poređenja vrednosti komponenti bočnih pojasa iz tabele 4.4 za slučaj tri susedna provodnika u prekidu sa vrednostima iz tabele 2.3 (nekoliko susednih provodnika u prekidu), zapaža se da komponente bočnih pojasa oko dvostruke učestanosti napajanja imaju slične brojne vrednosti, ali sa veoma važnom razlikom da ovog puta motor nije terećen.

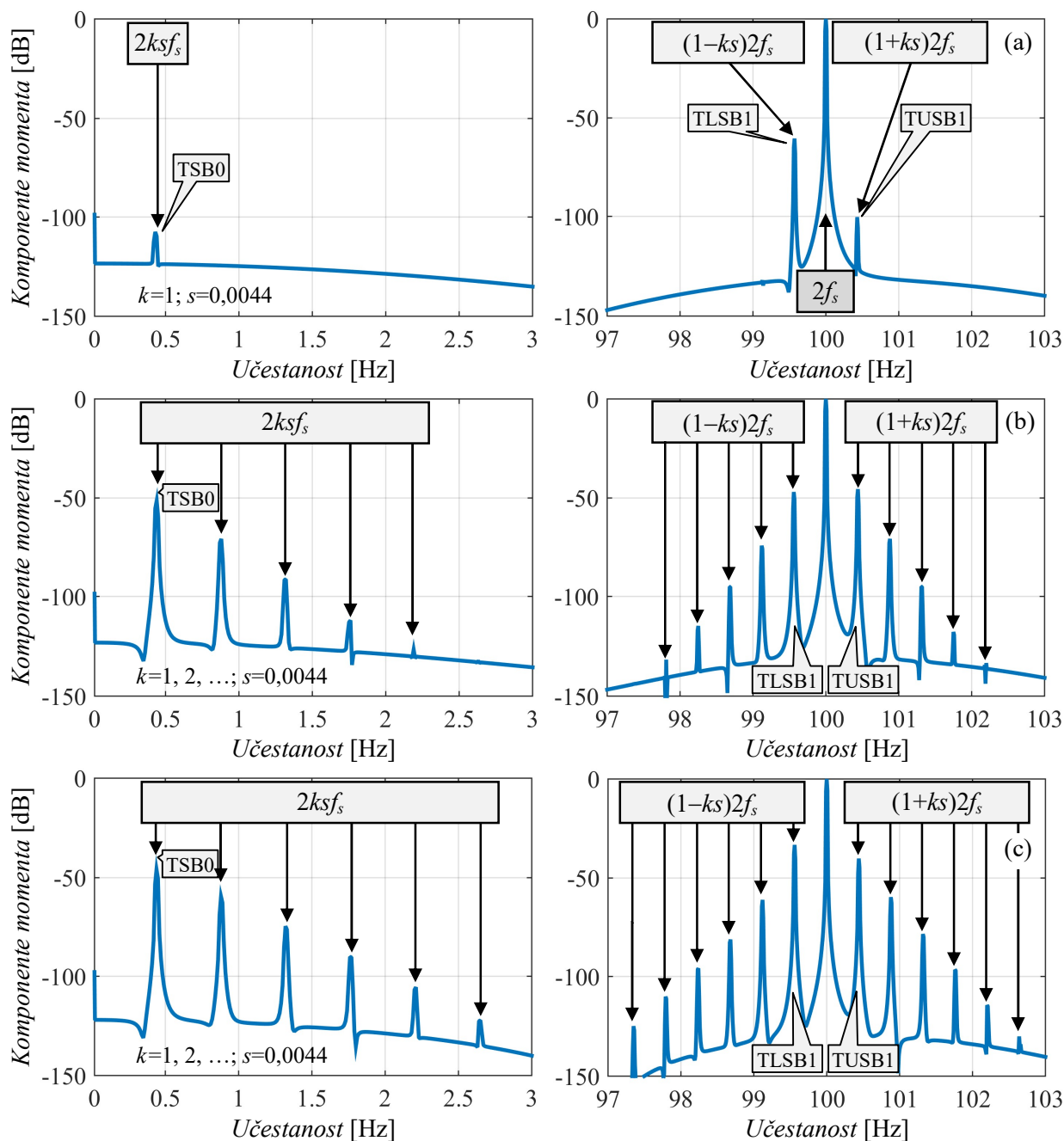
Kako bi se upotpunila teorijska razmatranja iz prethodnog poglavlja, sprovede se spektralna analiza elektromagnetskog momenta i brzine obrtanja motora, čiji su talasni oblici ilustrovani na slici 4.4.

Slika 4.9 daje prikaz dela amplitudskog spektra elektromagnetskog momenta motora koji je dobijen na osnovu izvršenih simulacija nad razvijenim matematičkim modelom motora sa ispravnim rotorom i rotorom sa prekidom jednog i tri susedna štapna provodnika, redom. Za prikaz su odabrani bočni pojasi u okolini 0 Hz i 100 Hz jer su oni najizraženiji, što je primarnog interesa za praktičnu realizaciju metode. Amplitude komponenti u spektru sa slike 4.9 su normalizovane vrednošću komponente momenta na dvostrukoj učestanosti napajanja ($2f_s=100$ Hz), pri čemu je prethodno uklonjena njena srednja vrednost.

Ono što se može primetiti sa slike 4.9 (a) je da kada ne postoje oštećenja štapnih provodnika rotora komponente bočnih pojasa u spektru elektromagnetskog momenta u okolini 0 Hz (komponente $2ksf_s$) i 100 Hz (komponente $(1\pm ks)2f_s$) nisu značajnije izražene. Komponente bočnih pojasa koje su vidljive obeležene su sa TSB0 (okolina 0 Hz), TLSB1 i TUSB1 (okolina 100 Hz). One su isključivo posledica nesavršenosti konstrukcije rotora koja je u modelu motora uzeta u obzir na način kako je to predloženo na kraju odeljka 4.3. Vrednosti ovih komponenti navedene su u tabeli 4.5. Bitno je napomenuti da je komponenta vidljiva na 100 Hz u spektru elektromagnetskog momenta motora posledica jednofaznog napajanja.

U slučaju prekida jednog štapnog provodnika rotora uvećava se broj komponenti bočnih pojasa u spektru elektromagnetskog momenta u okolini 0 Hz (komponente $2ksf_s$) i 100 Hz (komponente $(1\pm ks)2f_s$), a njihove amplitude postaju izraženije, što je prikazano na slici 4.9 (b). Pomeraj komponenti bočnih pojasa u odnosu na komponente na 0 Hz i 100 Hz iznosi $2ksf_s$ ($k=1,2,\dots$ i $s=0,0044$). Primetno je da su komponente obeležene sa TSB0 (okolina 0 Hz), TLSB1 i TUSB1 (okolina 100 Hz) porasle u odnosu na slučaj koji se ima kod ispravnog rotora (slika 4.9 (a)). Njihove vrednosti su navedene u tabeli 4.5.

Trend povećanja broja komponenti bočnih pojasa u okolini 0 Hz (komponente $2ksf_s$) i 100 Hz (komponente $(1\pm ks)2f_s$) se uočava i na slici 4.9 (c), gde je prikazan deo amplitudskog spektra elektromagnetskog momenta motora koji se ima za slučaj prekida tri susedna štapna provodnika rotora. Kao i u prethodnim slučajevima, pomak komponenti bočnih pojasa u odnosu na komponente na 0 Hz i 100 Hz iznosi $2ksf_s$ ($k=1,2,\dots$ i $s=0,0044$). Značajan porast vrednosti ovih komponenti je jasno vidljiv, pre svega komponenti TSB0 (okolina 0 Hz), TLSB1 i TUSB1 (okolina 100 Hz), što je i očekivano s obzirom na značajnije oštećenje rotora. Vrednosti komponenti TSB0, TLSB1 i TUSB1 navedene su u tabeli 4.5.



Slika 4.9 Amplitudski spektar elektromagnetskog momenta motora. (a) Ispravan rotor. (b) Prekid jednog provodnika. (c) Tri susedna provodnika u prekidu.

Tabela 4.5 Vrednosti karakterističnih komponenti amplitudskog spektra elektromagnetskog momenta motora.

Broj provodnika u prekidu	Vrednost TSB0 [dB]	Vrednost TLSB1 [dB]	Vrednost TUSB1 [dB]
0	-107,5	-60,41	-100,4
1	-51,35	-46,98	-45,53
3	-45,78	-33,28	-40,17

Predstavljeni rezultati simulacija potvrđuju postojanja bočnih pojasa oko jednosmerne komponente (0 Hz) i komponente na dvostrukoj učestanosti napajanja (100 Hz) u spektru

momenta motora. Štaviše, bočni pojasi postoje oko svih parnih umnožaka osnovne učestanosti napajanja ($n:f_s$, $n=2,4,\dots$), pri čemu su njihove komponente pomerene za iznos $2ksf_s$ ($k=1,2,\dots$). Naravno, ovde su za prikaz izabrani samo najizraženiji bočni pojasi (slika 4.9). Pa ipak, rezultati izvršene spektralne analize elektromagnetskog momenta motora u potpunosti potvrđuju teorijska razmatranja izneta u prethodnom poglavlju. Može se zaključiti da se praćenjem vrednosti komponenti bočnih pojasa iz spektra elektromagnetskog momenta motora (koji se jednofazno napaja) može ustanoviti postojanje kvara rotora, odnosno prekid (oštećenje) štapnih provodnika.

Za kraj izlaganja će se izvršiti analiza amplitudskog spektra brzine obrtanja motora, čiji su talasni oblici ilustrovani na slici 4.4. I u ovom slučaju će se obeležja u spektru brzine razmotriti za tri slučaja: ispravan rotor, rotor sa prekidom jednog i tri susedna štapna provodnika. Ovo je ilustrovano na slici 4.10, s tim da je prikazan samo istaknuti deo amplitudskog spektra brzine obrtanja motora (okolina 0 Hz i 100 Hz). Amplitude komponenti brzine obrtanja su normalizovane njenom vrednošću na dvostrukoj učestanosti napajanja ($2f_s=100$ Hz), pri čemu je prethodno uklonjena srednja vrednost brzine.

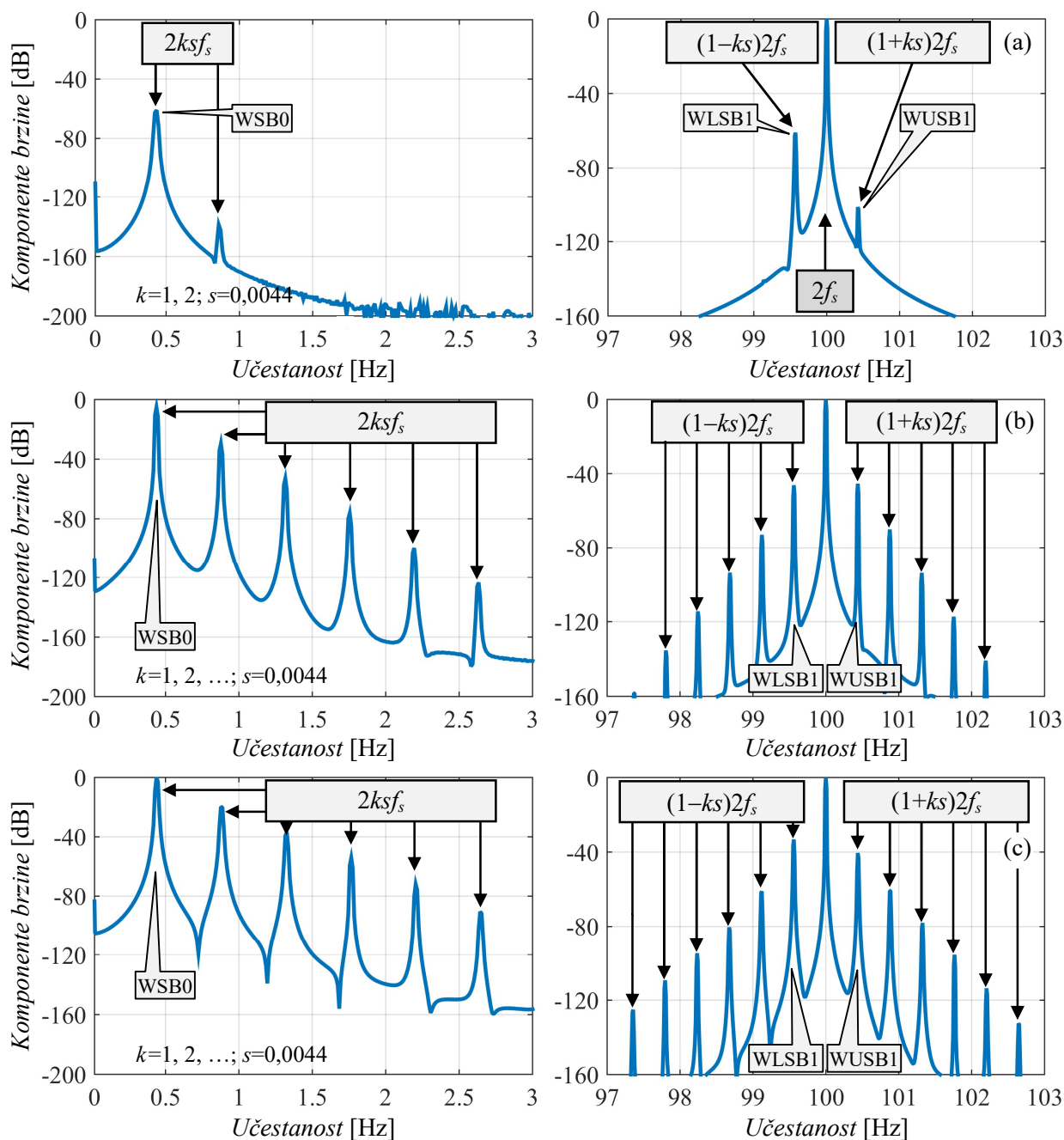
Na slici 4.10 (a) dat je prikaz dela amplitudskog spektra brzine obrtanja motora sa ispravnim rotorom. Dominantna komponenta u spektru je na učestanosti 100 Hz ($2f_s$), što je posledica jednofaznog napajanja motora. Komponente bočnih pojasa u okolini 0 Hz (komponente $2ksf_s$) i 100 Hz (komponente $(1\pm ks)2f_s$), WSB0, WLSB1 i WUSB1, nisu značajnije izražene. One su isključiva posledica nesavršenosti konstrukcije rotora koja je u matematičkom modelu motora na izvestan način uzeta u obzir. Vrednosti ovih komponenti navedene su u tabeli 4.6.

Kada postoji prekid jednog štapnog provodnika rotora, broj komponenti bočnih pojasa u okolini 0 Hz (komponente $2ksf_s$) i 100 Hz (komponente $(1\pm ks)2f_s$) se bitno uvećava, što se jasno uočava na slici 4.10 (b). Sem toga, karakteristične komponente iz spektra brzine, WSB0, WLSB1 i WUSB1, dostižu značajne vrednosti (tabela 4.6). Vrednosti komponente WSB0 i komponente na dvostrukoj učestanosti napajanja su postale uporedive.

U slučaju prekida tri susedna štapna provodnika (slika 4.10 (c)), broj komponenti bočnih pojasa nastavlja da se povećava uz dalji značajan porast njihovih amplituda (tabela 4.6). U svim slučajevima sa slike 4.10 pomak komponenti bočnih pojasa u odnosu na komponente na 0 Hz i 100 Hz iznosi $2ksf_s$ ($k=1,2,\dots$ i $s=0,0044$).

Tabela 4.6 Vrednosti karakterističnih komponenti amplitudskog spektra brzine obrtanja motora.

Broj provodnika u prekidu	Vrednost WSB0 [dB]	Vrednost WLSB1 [dB]	Vrednost WUSB1 [dB]
0	-60,92	-60,99	-101,4
1	-5,12	-46,23	-45,42
3	0	-33,24	-40,51



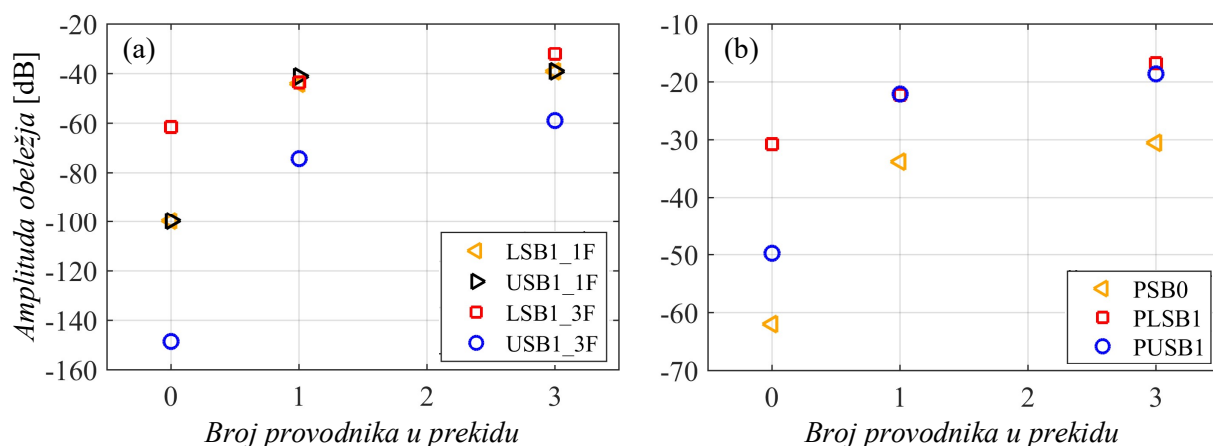
Slika 4.10 Amplitudski spektar brzine obrtanja motora. (a) Ispravan rotor. (b) Prekid jednog provodnika. (c) Tri susedna provodnika u prekidu.

Prezentovani rezultati sa slike 4.10 potvrđuju postojanje bočnih pojava u spektru brzine obrtanja motora i to u okolini jednosmerne komponente (0 Hz) i komponente na dvostrukoj učestanosti napajanja (100 Hz). Iako svi bočni pojasi ovde nisu predstavljeni (odabrani su samo najizraženiji), oni postoje oko svih parnih umnožaka osnovne učestanosti napajanja ($n \cdot f_s$, $n=2,4,\dots$), pri čemu su njihove komponente pomerene za iznos $2ksf_s$ ($k=1,2,\dots$). Može se konstatovati da su rezultati izvršene spektralne analize brzine obrtanja motora u skladu sa teorijskim predviđanjima. Ovim se ujedno završava verifikacija teorijskih izlaganja iz prethodnog poglavlja.

4.5 Diskusija rezultata

Nakon potvrde iznetih teorijskih razmatranja putem računarskih simulacija nad razvijenim matematičkim modelom motora sa kvarom, za kraj ovog poglavlja će se dati kratak osvrt na dobijene rezultate sa aspekta predložene metode za detekciju kvara rotora. Dobijeni rezultati računarske provere, između ostalog, potvrdili su i iznesenu pretpostavku istraživanja da se primenom navedene metode obeležja kvara rotora iz frekvencijskog domena signala terminalnih veličina trofaznog kaveznog asinhronog motora mogu identifikovati i kada je motor neopterećen. Praćenjem vrednosti komponenti bočnih pojasa, tj. obeležja kvara rotora iz spektra signala struje i trenutne vrednosti električne snage motora, moguće je otkriti kvar rotora, pri čemu se akcenat stavlja samo na one komponente koje će se moći izmeriti u realnim uslovima i čije se amplitude značajnije menjaju sa porastom oštećenja rotora. To su komponente bočnih pojasa iz spektra signala struje (LSB1_1F, USB1_1F, LSB1_3F i USB1_3F) i trenutne vrednosti električne snage motora (PSB0, PLSB1 i PUSB1). Promena iznosa amplitude prethodno spomenutih obeležja kvara rotora, u funkciji broja provodnika u prekidu, ilustrovana je na slici 4.11. Posebnu važnost u okviru predložene metode imaju komponente struje bočnih pojasa koje se javljaju u okolini trećeg harmonika struje motora (komponente LSB1_3F i USB1_3F na slici 4.11 (a)). Kako su rezultati simulacija pokazali, vrednost ovih komponenti se značajno uvećava sa povećanjem broja provodnika rotora u prekidu. Takođe, veće promene sa progresijom oštećenja rotora beleže i komponente iz spektra trenutne vrednosti električne snage motora (slika 4.11 (b)).

Iznosi amplituda navedenih obeležja kvara rotora mogu se iskoristiti i za kvantitativnu procenu iznosa oštećenja štapnih provodnika, o čemu će biti reči u narednom poglavlju. Takođe, sprovedeće se i eksperimentalna provera predložene metode za detekciju kvara rotora.



Slika 4.11 Obeležja kvara rotora. (a) Obeležja iz spektra signala struje motora. (b) Obeležja iz spektra signala trenutne vrednosti električne snage motora.

5. POSTUPAK ZA PROCENU OŠTEĆENJA ROTORA TROFAZNOG KAVEZNOG MOTORA

Održavanje elektromotornih pogona u okviru savremenih industrijskih sistema je od velikog značaja. Važnost održavanja se može sagledati kroz relevantne tehničke pokazatelje, ali i kroz proistekle ekonomske indikatore. Otkrivanje kvarova u ranoj fazi nastanka ključno je za pravovremeno preduzimanje odgovarajućih mera kako bi se sprečila pojava otkaza u pogonu. Na ovaj način se ne smanjuje samo ukupna cena održavanja pogona, već i mogući finansijski gubici nastali kao posledica otkaza. Uzimajući u obzir značaj savremenih tehnika dijagnostike, a bez kojih se u današnje vreme ne može zamisliti održavanje industrijskih sistema, u nastavku rada se predlaže unapređenje izložene metode za rano otkrivanje kvara rotora uvođenjem postupka za procenu oštećenja štapnih provodnika. Predloženo rešenje se oslanja na primenu veštačke inteligencije, odnosno neuronske mreže koja procenu oštećenja rotora prevodi na prepoznavanja oblika, tj. klasifikaciju uzoraka. Ulaz u veštačku neuronsku mrežu čine reprezentativna obeležja kvara rotora koja su ustanovljena na osnovu sprovedenih računarskih simulacija iz prethodnog poglavlja, a na izlazu se vrši klasifikacija stanja rotora u više grupa. Primenom ovakvog rešenja moguće je značajno popraviti efikasnost procesa održavanja modernih elektromotornih pogona.

5.1 Strategije održavanja industrijskih sistema

Tehničko održavanje industrijskih sistema čini skup aktivnosti, mera i postupaka u sprečavanju pojave stanja pogona u otkazu ili zastoju, kao i vraćanje sistema po pojavi stanja u otkazu u operativno stanje u što kraćem vremenu i sa što manjim troškovima [188]. U praksi održavanja industrijskih sistema najčešće se primenjuju sledeće strategije: rad do zastoja (korektivno održavanje) i preventivno održavanje.

Rad do zastoja se ima kada se održavanje sistema ne primenjuje sve do momenta nastanka kvara i otkaza pojedinih pogona (princip “ne diraj dok radi”). Trajanje zastoja se ne može predvideti kao ni vreme potrebno za otklanjanje kvara. Posledica ovakvog neplanskog

zaustavljanja proizvodnih i transportnih sistema su značajne materijalne štete i finansijski gubici, kao i veliki troškovi otklanjanja kvara. Samim tim postaje jasno da primena korektivnog održavanja u većini slučajeva nije prihvatljiva za industrijske sisteme.

U savremenim industrijskim pogonima najčešće se koristi strategija preventivnog održavanja koja podrazumeva da se sistem održava pre nego nastane kvar. Na taj način se obezbeđuje pouzdanost i raspoloživost instalirane proizvodne opreme i uređaja, kao i bezbednost i sigurnost u radu industrijskih sistema. Preventivno održavanje se može realizovati kao plansko ili prediktivno održavanje (održavanje po stanju).

Plansko održavanje podrazumeva unapred planirane aktivnosti na zamenu opreme i uređaja, tj. delova sistema, kako bi se korektivno održavanje svelo na minimum. Većina industrijskih pogona se oslanja na ovu tradicionalnu vrstu održavanja. Ipak, plansko održavanje može biti ekonomski neisplativo. Prerana zamena delova sistema (koji mogu biti ispravni), kao i prevremena zaustavljanja pogona, čine osnovne nedostatke ovog vida održavanja. Sem toga, planskim održavanjem nije moguće u potpunosti izbeći otkaze u sistemu.

Prediktivno održavanje je zasnovano na poznavanju stvarnog stanja delova sistema, a predstavlja skup aktivnosti i mera koje imaju za cilj identifikaciju komponenti koje moraju biti popravljene (zamenjene) uz definisanje optimalnog vremena za izvršenje tih poslova. S obzirom na to da se na ovaj način smanjuje broj nepotrebnih zastoja pogona, to se značajno redukuju troškovi održavanja. Tehnološki napredak učinio je da primena prediktivnog održavanja postane održiva i finansijski opravdana. Međutim, da bi se strategija prediktivnog održavanja mogla efikasno implementirati, neophodno je prikupiti informacije o stanju pojedinačnih komponenti vitalnih elemenata industrijskih sistema i to kroz njihovo stalno nadgledanje. Potom se informacije šalju u kontrolere koji putem odgovarajućih komunikacionih protokola prosleđuju informacije na nivo uređaja za vizualizaciju. Njihovo krajnje odredište je sistem za upravljanje resursima industrijskog sistema gde se donosi pravovremena odluka o servisiranju (remontu). Na ovaj način se izbegavaju nepotrebna zaustavljanja pogona i pojava većih otkaza, a samo održavanje se planira i sprovodi tek kada postoje jasne naznake kvara. Prema tome, osnovni koraci prediktivnog održavanja su: prikupljanje informacija (pokazatelja) o stanju sistema, njihova analiza i donošenje odluke o održavanju [189].

U ovoj tezi se neće ulaziti u detalje strategije prediktivnog održavanja, već se na osnovu prethodno izloženog želi istaći važnost nadgledanja, ali i rane dijagnostike stanja rotora kaveznih asinhronih motora kao važnih činilaca u industrijskim sistemima od čije raspoloživosti zavise mnogi procesi. Otkrivanje kvara rotora u ranoj fazi nastanka ključno je za blagovremeno preduzimanje odgovarajućih mera u cilju sprečavanja širenja oštećenja ili otkaza pogona. Ovo je naročito važno u sistemima sa visokim zahtevima za pouzdanost i sigurnost u radu.

5.2 Primena metoda veštačke inteligencije u strategiji prediktivnog održavanja

Klasifikacija uzoraka čini deo sistema za prepoznavanja oblika (engl. *pattern recognition*) koji predstavlja postupak svrstavanja ulaznih podataka u predefinisane izlazne klase na osnovu odgovarajućih obeležja (engl. *features*). Sa razvojem računara ova oblast dobija na velikom praktičnom značaju. Neke od oblasti u kojima se koriste tehnike prepoznavanje oblika su: obrada slike, sinteza i prepoznavanje govora i znakova, otkrivanje kvarova kod električnih mašina i sl.

Teorija prepoznavanja oblika najčešće se oslanja na primenu metoda veštačke inteligencije (engl. *artificial intelligence*). To je posebna oblast računarske nauke koja se bavi izučavanjem i razvojem računarskih sistema koji poseduju neke karakteristike na osnovu kojih bi se mogli okarakterisati inteligentnim (npr. učenje, zaključivanje i sl.) [190]. Sam pojam je uveo John McCarty, a prema njemu veštačka inteligencija predstavlja pojavu inteligencije koja je ostvarena upotrebom računara. Postoje i brojne druge definicije veštačke inteligencije, ali nezavisno od načina na koji se taj pojam definiše, važno je istaći da razvoj računarskih programa predstavlja samo tehnički aspekt realizacije veštačke inteligencije. Od suštinskog značaja je i teorijski deo, a koji se odnosi na istraživanja kognitivnih procesa. Današnje tendencije u razvoju sistema veštačke inteligencije su najčešće usmerene na ekspertne sisteme (engl. *expert systems*) i veštačke neuronske mreže (engl. *artificial neural networks*). Ekspertni sistemi oponašaju rešavanje zadataka na način na koji to čine eksperti (stručnjaci u oblasti), a oslanjaju se na predstavljanje numeričkim simbolima i korišćenje heuristike. Njihovo proširenje predstavljaju sistemi zasnovani na znanju (engl. *knowledge-based systems*). Drugim rečima, ekspertni sistem predstavlja računarski program koji koristi prethodno stečeno znanje i postupke prosuđivanja i zaključivanja u procesu rešavanja složenih problema. Veštačke neuronske mreže su drugačiji oblik realizacije veštačke inteligencije, a čine jedan od najrasprostranjenijih sistema mašinskog učenja. One su apstrakcija bioloških neurona realizovanih programski. U rešavanju zadataka veštačke neuronske mreže su osmišljene tako da oponašaju način na koji te iste zadatke rešava čovek. Mreže su adaptivne (učenjem se prilagođavaju veze između neurona), čime su stekle veliku popularnost i primenljivost u rešavanju različitih problema u mnogim oblastima.

Primena metoda veštačke inteligencije u strategiji prediktivnog održavanja pruža veliki potencijal. Opravdanje za njihovu primenu treba tražiti u stalnoj potrebi za smanjenjem ukupnih troškova održavanja industrijskih sistema i to kroz brzu identifikaciju problema. Osim toga, prednost ovakvih programskih rešenja ogleda se u brzini donošenja zaključaka i smanjenju potreba za angažmanom eksperata od čije raspoloživosti (između ostalog) zavisi visina njihove novčane naknade za sprovođenje ekspertize. Uvođenjem veštačke inteligencije, za potrebe procene oštećenja kaveza rotora, čini se iskorak u strategiji prediktivnog održavanja asinhronih motora kao bitnih elemenata u industrijskom okruženju. U tom smislu, a prateći ciljeve istraživanja, u nastavku rada se predlaže veštačka neuronska mreža koja procenu oštećenja

kaveza rotora prevodi na problematiku prepoznavanja oblika (klasifikaciju uzoraka). Glavni cilj ovakvog pristupa jeste da se predložena metoda za rano otkrivanje kvara rotora neopterećenog trofaznog kaveznog motora dodatno unapredi i stvore osnovni preduslovi za realizaciju automatizovanog sistema za rano otkrivanje prekida štapnih provodnika. Prednost rešenja ogleda se u jednostavnosti upotrebe. Poznati skup pogodno odabranih obeležja kvara rotora prosleđuje se algoritmu za obuku mreže (nadgledano učenje) na osnovu kojih ona prepoznaje relacije između ulaznih i izlaznih veličina sistema, tj. njegovo ponašanje. Na ovaj način se izbegava uspostavljanje izuzetno složenih i često nepraktičnih analitičkih modela sistema za koje cena razvoja aplikacije može biti prilično visoka jer iziskuju značajan utrošak računarskih resursa.

5.3 Veštačke neuronske mreže u proceni oštećenja rotora trofaznog kaveznog motora

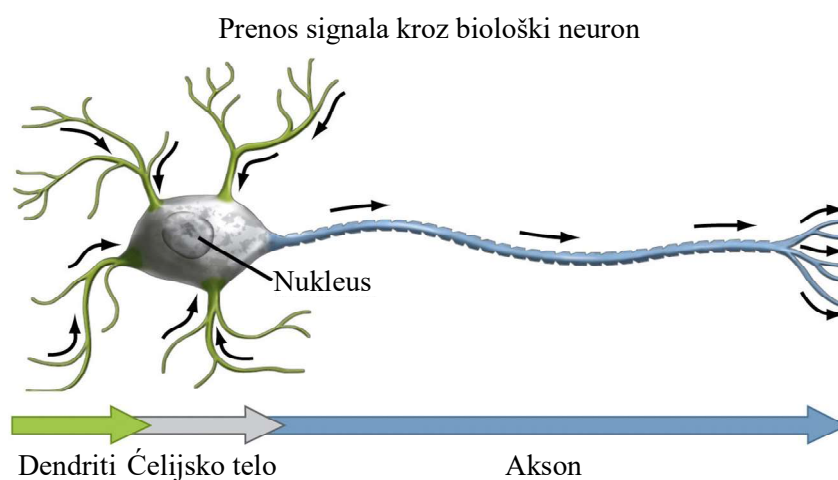
Na osnovu iznetih teorijskih razmatranja iz prethodnih poglavlja pokazalo se da problem analitičke formulacije oštećenja rotora kaveznog asinhronog motora uz pomoć jednostavnih matematičkih modela nije moguć. Ovo predstavlja glavni ograničavajući faktor u praktičnoj realizaciji sistema za pouzdanu procenu oštećenja štapnih provodnika, te se iz tog razloga industrijski sistemi najčešće oslanjaju na znanja eksperata iz oblasti. Ipak, sa razvojem računarske tehnologije i primenom različitih metoda veštačke inteligencije, ovi problemi se unekoliko mogu umanjiti. Tako je postalo moguće kreirati inteligentne računarske sisteme koji koriste različite algoritme klasifikacije i koji se manje oslanjaju na ekspertska znanja, čime postaju upotrebljivi i od strane korisnika koji nisu stručnjaci u oblasti.

Zahvaljujući svojoj strukturi, veštačke neuronske mreže predstavljaju važan i efikasan alat u prevazilaženju teškoća u modelovanju i rešavanju ovako složenih problema. Postupak koji se u ovoj disertaciji predlaže za procenu oštećenja rotora, tj. broja štapnih provodnika u prekidu, zasniva se na primeni veštačke neuronske mreže za prepoznavanje uzoraka. Na ulaz mreže dovode se reprezentativna obeležja kvara rotora koja su ustanovljena na osnovu sprovedenih računarskih simulacija nad razvijenim matematičkim modelom motora sa kvarom (prethodno poglavlje), a na izlazu se daje rezultat klasifikacije stanja rotora: ispravan rotor, jedan provodnik u prekidu, dva provodnika u prekidu, tri i više provodnika u prekidu. U nastavku će se dati teorijske osnove o neuronskim mrežama, da bi se potom objasnila njihova primena u okviru sistema za procenu oštećenja rotora trofaznog kaveznog asinhronog motora.

5.3.1 Osnovni pojmovi o neuronskim mrežama

Neuronske mreže se mogu podeliti u dve grupe: biološke i veštačke [191]. Biološke neuronske mreže čine nervni sistem živih bića i sačinjene su od bioloških neurona (nervnih ćelija). Oni imaju ulogu u prihvatanju, obradi i provođenju nadražaja (signala), tj. vrše procesiranje informacija. Biološki neuron je sačinjen iz tri osnovna dela: dendrita, ćelijskog tela

i aksona (slika 5.1). Dendriti su skup razgranatih vlakana koji čine ulazni deo ćelije, a predstavljaju vezu kojom se prenose signali do tela ćelije. Ćelijsko telo potom obrađuje pristigle signale, formirajući izlazni impuls koji se prosleđuje na krajeve razgranate niti koja se naziva akson, a u vezi je sa sledećim neuronom. Mesto komunikacije aksona jedne ćelije i dendrita neke druge naziva se sinapsa. Na tom se mestu prenosi impuls sa jedne ćelije na drugu putem neurotransmitera. Neuroni povezani jedni sa drugima čine složenu strukturu biološke neuronske mreže. Veštačke neuronske mreže su osmišljene tako da oponašaju biološke, ali se značajno razlikuju od njih jer predstavljaju samo njihov uprošćen (programski) oblik. U strukturi veštačke neuronske mreže emuliraju se samo pojedini mehanizmi i funkcije koje su prisutne kod biološke mreže. U daljem tekstu će se pod terminom neuronska mreža podrazumevati veštačka neuronska mreža.

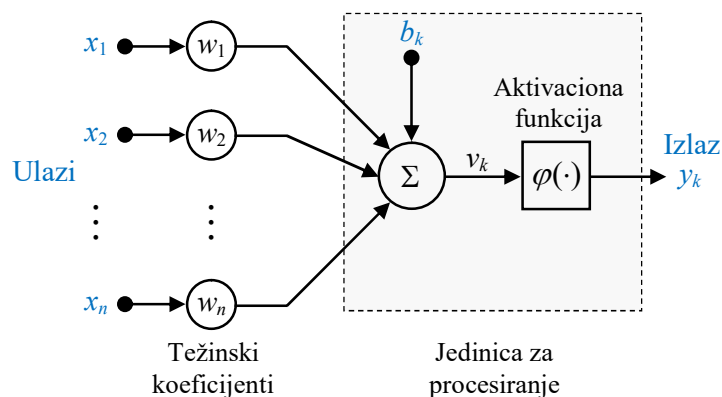


Slika 5.1 Struktura biološkog neurona [192].

Jednostavan model veštačkog neurona kojeg su predložili McCulloch i Pitts predstavljen je na slici 5.2. Matematička opis ovog modela opisana je sledećom funkcijom:

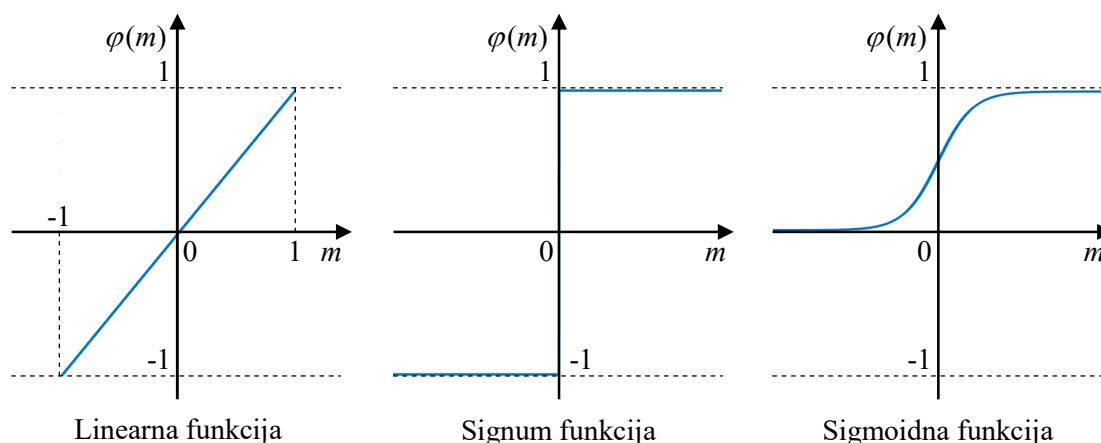
$$y_k = \varphi \left(\left(\sum_{i=1}^n (x_i \cdot w_i) \right) + b_k \right), \quad (5.1)$$

gde x_i predstavlja ulazne, a y_k izlazne podatke, w_i označava težinske koeficijente, a $\varphi(\cdot)$ definiše tzv. aktivacionu funkciju. U predstavljenom modelu neurona izračunava se težinska suma ulaznih podataka koja se potom menja za iznos definisanog praga (engl. *bias*) b_k , a zatim putem aktivacione funkcije transformiše u prihvatljivu vrednost izlaza (npr. konačan podinterval skupa realnih brojeva ili binarni skup izlaznih vrednosti). Odgovarajućim povezivanjem većeg broja neurona mogu se formirati različite strukture neuronskih mreža koje u potpunosti mogu obavljati složene računarske funkcije. U skladu sa tim, neuronska mreža se može definisati kao skup međusobno povezanih neurona koji rade paralelno (paralelno distribuirana struktura).



Slika 5.2 McCulloch–Pitts model veštačkog neurona (jednoslojni perceptron).

Jedinica za procesiranje obrađuje ulazne signale pri čemu je način na koji ona formira izlazni signal određen pravilom aktivacione funkcije (funkcije prenosa). Drugim rečima, uloga jedinice za procesiranje je da sumu ulaznih signala prenese do izlaza, tj. ažurira izlazni signal na način na koji to određuje aktivaciona funkcija. U modelu perceptrona sa slike 5.2 izvorno je korišćena funkcija praga. Međutim, u praksi se najčešće koriste druge funkcije prenosa. To može biti linearna funkcija, linearna po delovima, odskočna, signum funkcija, radijalna, sigmoidna i dr. Prikaz pojedinih aktivacionih funkcija dat je na slici 5.3. Od izbora aktivacione funkcije zavise karakteristike projektovane neuronske mreže.



Slika 5.3 Grafička ilustracija pojedinih aktivacionih funkcija.

Neuronske mreže su sačinjene od velikog broja neurona koji su povezani po odgovarajućim principima. Uzimajući u obzir vrstu veza između neurona, mreže se mogu kategorisati u slojevito organizovane, potpuno povezane, lestvičaste i celularne [40], [41]. Slojevite mreže su organizovane tako da neuroni unutar jednog sloja obavljaju tačno određenu funkciju. Prema broju slojeva mreže se mogu klasifikovati na jednoslojne i višeslojne. Najčešće se koriste višeslojne mreže bez povratnih veza (tzv. višeslojni perceptroni) i to sa tri sloja. Svaki sloj čini zasebnu celinu, pri čemu veze između neurona u okviru istog sloja ne postoje. Svaki neuron je povezan sa svim neuronima u susednim slojevima. Prvi sloj je ulazni. On prihvata ulazne podatke i prosleđuje ih drugom, tzv. skrivenom sloju koji ih obrađuje i pronalazi određene zakonitosti ponašanja. Nakon obrade, rezultati se prosleđuju trećem, izlaznom sloju

koji čini poslednji sloj u mreži. Na izlazu neurona trećeg sloja dobija se konačan rezultat. Neuronske mreže bez povratnih veza su statičke i kod njih se informacije prostiru u jednom smeru. To su mreže sa prosleđivanjem unapred (engl. *feedforward*). Spadaju u kategorije najjednostavnijih neuronskih mreža. Na bazi ulaznih podataka ove mreže generišu samo jednu grupu izlaznih vrednosti. Iako jednostavne, ovim mrežama se mogu rešavati složeni nelinearni problemi. S druge strane, neuronske mreže sa povratnom vezom (rekurentne, rekurzivne) svrstavaju se u kategoriju dinamičkih mreža. Kod njih se podaci ne prosleđuju samo od ulaza ka izlazu, već se mogu usmeriti i ka nekom od ranijih koraka u njihovoj obradi. S obzirom na to da se neuronske mreže neprestano razvijaju, vredi napomenuti da postoje i drugačije topologije (bočno povezane, kaskadne, hibridne, neuro-fazi mreže, samoorganizujuće mape itd.). Struktura mreže se odabira prema vrsti problema koji se želi rešiti.

Da bi se izvršila klasifikacija uzoraka ili rešio neki drugi problem primenom neuronske mreže, potrebno je izvršiti njenu obuku (učenje). To je proces koji podrazumeva podešavanja vrednosti težinskih koeficijenata čime mreža postiže željeno ponašanje. Težinski koeficijenti predstavljaju realne brojeve kojima se iskazuje jačina veze između neurona. Za obuku je potrebno obezbediti obučavajući skup uzoraka koji se dovode na ulaz mreže. Sam proces obuke može biti sa nadzorom (engl. *supervised*) ili bez nadzora (engl. *unsupervised*). Ako se prilikom obuke mreže raspolaže i skupom očekivanih vrednosti izlaza, tada se radi o obuci sa nadzorom (nadgledano učenje). U suprotnom, reč je o obuci mreže bez nadzora (nenadgledano učenje). S obzirom na problematiku istraživanja, ovde se pažnja usmerava na tehniku obuke višeslojnih mreža primenom učenja sa nadzorom.

Višeslojne mreže koriste različite tehnike obuke. Među njima, najpopularniji i konceptualno najjednostavniji je algoritam propagacije unazad. Ideja algoritma je izračunavanje grešaka i gradijenata u svakom sloju mreže (prvo na izlaznom), a potom se propagacijom greške unazad vrši podešavanje težinskih koeficijenata i tako vrši smanjenje greške neuronske mreže. Ova opšta metoda poznata je pod imenom gradijentni spust. Postupak je iterativan i ponavlja se za svaki ulaz sve dok se greška ne smanji na prihvatljivu vrednost, čime neuronska mreža dostiže željene karakteristike. U postupku ažuriranja težinskih koeficijenata najčešće se koriste metode za nelinearnu optimizaciju u višedimenzionalnom prostoru (dimenzija odgovara broju težinskih koeficijenata). Propagacija unazad predstavlja efikasan algoritam za trening neuronske mreže, ali treba uzeti u obzir da vreme trajanja učenja mreže zavisi kako od broja skrivenih slojeva, tako i od broja neurona u njima.

Da bi neuronska mreža stekla dobra svojstva generalizacije (davanje dobrih predviđanja za podatke koji nisu korišćeni u postupku njene obuke), potrebno je obezbediti reprezentativni skup obučavajućih podataka (trening skup). U tom smislu poželjno je da taj skup bude dovoljno veliki i raznovrstan. Obuka neuronske mreže se izvodi sve dok greška validacije ne počne da raste. Tada se predlaže da se obučavanje zaustavi kako bi se sprečila pojava preobuke mreže (lošije

sposobnosti generalizacije). U tu svrhu se koristi validacioni skup podataka. Konačno, neuronska mreža se proverava na skupu podataka za testiranje.

5.3.2 Procena oštećenja štapnih provodnika primenom neuronske mreže

Za potrebe procene oštećenja štapnih provodnika rotora u okviru ovog istraživanja će se koristiti postupak zasnovan na raspoznavanju uzoraka. U tom kontekstu, predlaže se višeslojna neuronska mreža sa prosleđivanjem unapred. Njen zadatak je da na osnovu određenih ulaznih uzoraka (tj. obeležja kvara rotora) izvrši grupisanje stanja rotora po pitanju oštećenja štapnih provodnika u više klasa. Ovde se predlaže da se izaberu četiri binarna klasifikatora koji opisuju stanje rotora: ispravan rotor, jedan provodnik u prekidu, dva provodnika u prekidu i tri i više provodnika u prekidu (tabela 5.1). Izlaz mreže određuje kojoj klasi pripada ulazni uzorak.

Tabela 5.1 Klasifikacija stanja rotora.

Stanje rotora	Binarni klasifikatori
Ispravan rotor	1000
Prekid (oštećenje) jednog provodnika	0100
Prekid (oštećenje) dva provodnika	0011
Prekid (oštećenje) tri i više provodnika	0001

Predložena neuronska mreža šematski je prikazana na slici 5.4. Mreža ima jedan skriveni sloj i jedan izlazni sloj koji se koristi za klasifikaciju uzoraka. Broj neurona u izlaznom sloju jednak je broju klasa. Kako ne postoji egzaktan matematički alat po pitanju odabira broja neurona u skrivenom sloju, korišćene su praktične preporuke. Njihov početni broj se izabira tako da odgovara dimenziji uzoraka, a potom se uvećava sve dok neuronska mreža ne postigne dobre rezultate klasifikacije. U skrivenom sloju mreže sa slike 5.4 nalaze se simetrične sigmoidne funkcije (hiperbolički tangens), a definisane su sledećim izrazom:

$$\varphi(m) = \frac{e^m - e^{-m}}{e^m + e^{-m}}. \quad (5.2)$$

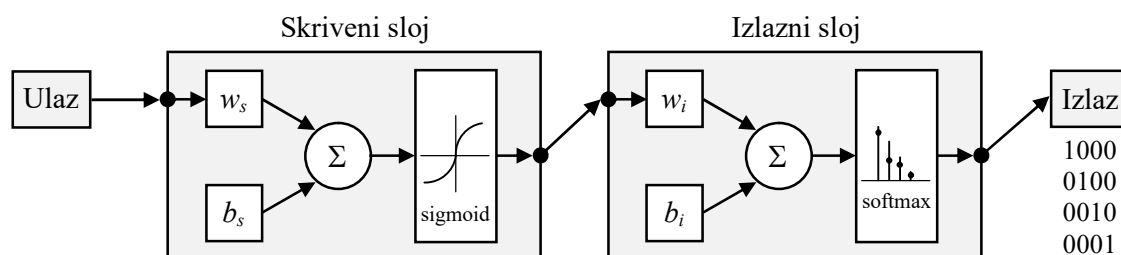
Kako će se predložena neuronska mreža koristiti u problematici klasifikacije uzoraka, to se u njenom izlaznom sloju nalazi vektorska funkcija *softmax*, opisana sa:

$$\text{softmax}(m) = \left(\frac{e^{m_1}}{\sum_i e^{m_i}}, \dots, \frac{e^{m_i}}{\sum_i e^{m_i}} \right), \text{ gde su } m = m_1, m_2, \dots, m_i \wedge i = 1, 2, \dots \quad (5.3)$$

Ova funkcija transformiše izlaze iz mreže tako da su nenegativni (zbir pojedinačnih izlaznih vrednosti neurona je ograničen na 1), a mogu se interpretirati kao raspodela verovatnoće po mogućim klasama koje su definisane u tabeli 5.1.

Predložena tehnika za procenu oštećenja štapnih provodnika rotora oslanja se na rezultate metode koja je u okviru disertacije predložena za rano otkrivanje kvara rotora. Skup ulaznih

podataka za obuku, validaciju i testiranje predložene neuronske mreže će se prikupiti sprovođenjem dodatnih računarskih simulacija nad razvijenim matematičkim modelom jednofazno napajanog trofaznog kaveznog motora. Simulacije će se izvršiti za ispravan rotor, rotor sa oštećenjem i prekidom jednog, dva i tri susedna štapna provodnika, uz delimično oštećenje četvrtog provodnika. Kako je već objašnjeno u prethodnom poglavlju, ova oštećenja se modeluju povećanjem otpornosti štapnih provodnika, tj. promenom vrednosti odgovarajućih elemenata u matrici rotorske otpornosti u (4.10). Uzimajući u obzir i tehničko-tehnološke postupke u izradi rotorskog kaveza (nesavršenost materijala i izrade), kao i radne uslove, ovde će se dozvoliti varijacija otpornosti ispravnih štapnih provodnika rotora u iznosu do 5%. Na taj način se želi što verodostojnije predstaviti nesavršenost konstrukcije rotora.



Slika 5.4 Šematski prikaz strukture neuronske mreže za procenu oštećenja štapnih provodnika rotora.

Nakon izvršenja niza simulacija potrebno je izabrati reprezentativne uzorke, tj. obeležja kvara rotora. Jasno je da je ovo izuzetno značajan momenat, jer se na osnovu odabranih obeležja vrši obuka predložene neuronske mreže, a koja se kasnije koristi za procenu oštećenja rotora. Oslanjajući se na rezultate simulacija iz prethodnog poglavlja, odlučeno je da se za pouzdane pokazatelje kvara rotora iz frekvencijskog domena izaberu komponente struje donjeg bočnog pojasa u okolini učestanosti osnovne komponente struje motora i njenog trećeg harmonika (komponente označene sa LSB1_1F i LSB1_3F, redom), kao i komponenta trenutne električne snage motora u okolini jednosmerne komponente (oznaka PSB0) i komponenta donjeg bočnog pojasa snage u okolini dvostruke učestanosti napajanja (oznaka PLSB1). Pokazano je da se amplitude ovih komponenti značajno menjaju sa porastom oštećenja rotora (tabele 4.3 i 4.4 u prethodnom poglavlju), što je osnovni razlog za njihov odabir. Karakteristične komponente kvara rotora iz spektra elektromagnetskog momenta i brzine obrtanja motora nisu izabrane u reprezentativni skup uzoraka, jer se ujedno vodilo računa i o ekonomskim i praktičnim aspektima predložene metode za rano otkrivanje kvara rotora. Naime, ispostavlja se da je cena ispitne opreme za potrebe merenja i analize signala elektromagnetskog momenta i brzine obrtanja motora značajno viša u odnosu na opremu za analizu signala struje i trenutne električne snage motora. Osim toga, u obzir treba uzeti i činjenicu da motori u industrijskom okruženju često nisu pristupačni za ugradnju senzora momenta ili brzine obrtanja. Sve ovo daje prednost metodi zasnovanoj na analizi spektra signala terminalnih veličina motora: struje i trenutne vrednosti električne snage.

U cilju ispravnog odabira važnih komponenti obeležja kvara rotora, od interesa je sprovesti i analizu u vremenskom domenu kako bi se odredile karakteristične osobine iz talasnog oblika signala. Potom će se razmotriti mogućnost proširenja skupa reprezentativnih uzoraka za ocenu stanja štapnih provodnika rotora. U tu svrhu će se analizirati struja motora čiji su talasni oblici prikazani na slici 4.3 u prethodnom poglavlju. Vizuelnim pregledom oblika vremenskog zapisa struje motora jasno se uočava prisustvo modulacije, tj. pulsiranje anvelope struje kod motora sa postojanjem kvara na rotoru. Za potrebe opisivanja osobina struje motora iz vremenskog domena izabran je krest faktor (engl. *crest factor*), s tim što će se izvršiti i provera vrednosti statističkih pokazatelja višeg reda: faktora spljoštenosti (engl. *kurtosis*) i faktora iskrivljenja (engl. *skewness*). Reč je o deskriptivnim obeležjima kojima se želi opisati deformacija talasnog oblika, odnosno raspodela podataka iz signala struje motora.

Krest faktor (CF) predstavlja odnos amplitude signala $x(t)$ i njegove efektivne vrednosti:

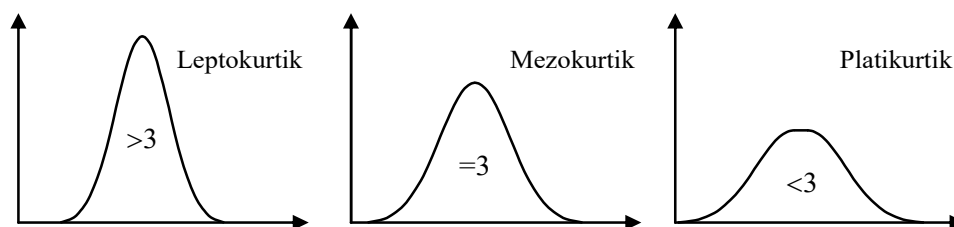
$$CF = \frac{|x_{peak}|}{x_{rms}}. \quad (5.4)$$

Ovo obeležje ukazuje na pojave visokih vršnih vrednosti signala. Za prostoperiodičan signal krest faktor ima vrednost $\sqrt{2}$.

Faktor spljoštenosti ($Kurt$) raspodele podataka definiše se na sledeći način :

$$Kurt = \frac{E(x - \mu)^4}{\sigma^4}, \quad (5.5)$$

gde je μ srednja vrednost od x , σ je standardna devijacija od x , a $E(X)$ predstavlja matematičko očekivanje promenljive X definisane odgovarajućim prostorom verovatnoće. U izrazu (5.5) x predstavlja skup podataka (vrednosti) signala $x(t)$. U matematičkoj teoriji verovatnoće i statistike faktor spljoštenosti predstavlja meru odstupanja distribucije podataka od normalne raspodele i govori u kojoj meri je raspodela zaravnjena (slika 5.5). Faktor spljoštenosti za normalnu distribuciju podataka iznosi 3 (mezokurtik na slici 5.5), a za skup podataka koji imaju prostoperiodičnu prirodu on iznosi 1,5 (U raspodela).

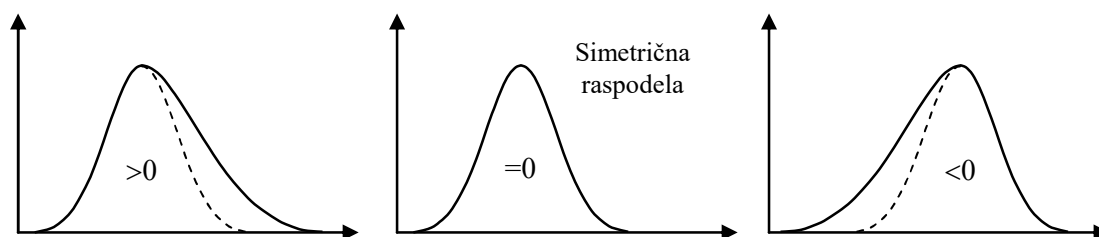


Slika 5.5 Graficka predstava faktora spljoštenosti.

Faktor iskrivljenja ($Skew$) raspodele podataka definisan je sa:

$$Skew = \frac{E(x - \mu)^3}{\sigma^3}. \quad (5.6)$$

Značenja pojedinih veličina iz prethodnog izraza su kao i kod faktora spljoštenosti. Faktor iskrivljenja predstavlja meru nedostatka simetrije i za unimodalnu raspodelu podataka (aritmetička sredina, mod i medijana imaju jednake vrednosti) ima vrednost 0. Pozitivne vrednosti ovog faktora ukazuju da je raspodela podataka “iskrivljena” u desno, a negativne vrednosti da je raspodela “iskrivljena” na levo. Ovo je grafički ilustrovano na slici 5.6. Za skup podataka koji imaju prostoperiodičnu prirodu faktor iskrivljenja iznosi 0.



Slika 5.6 Grafička predstava faktora iskrivljenja.

Prilikom izračunavanja predloženih obeležja, signal struje motora se prethodno propušta kroz digitalni filter propusnik opsega učestanosti od 46 Hz do 54 Hz. Ovim se želi izbeći uticaj komponenti struja viših harmonika s obzirom na to da i one značajno utiču na pojavu deformacija talasnog oblika struje motora, a što bi dovelo do pogrešnih zaključaka o kvaru rotora. Izabranim propusnim opsegom osigurano je da će se u signalu struje zadržati komponente donjeg i gornjeg bočnog pojasa struje motora u okolini osnovne učestanosti napajanja (50 Hz). Ispostavlja se, međutim, da u signalu struje nije moguće zadržati značajne komponente donjeg i gornjeg bočnog pojasa koje se nalaze u okolini trećeg harmonika struje, jer se upravo on želi izbeći zbog eventualnog postojanja trećeg harmonika napona u izvoru napajanja (što je u praksi čest slučaj). Nažalost, time je bitno umanjena količina informacija od interesa.

Vrednosti predloženih obeležja kvara rotora, određene iz signala struje motora (slika 4.3), navedene su u tabeli 5.2. Može se uočiti da se vrednosti ovih pokazatelja ne menjaju značajnije sa porastom oštećenja rotora. Za tri susedna provodnika u prekidu iznos krest faktora signala struje promenio se za približno 2% u odnosu na ispravan rotor, dok su promene još manje izražene za faktore spljoštenosti i iskrivljenja (ispod 0,2%). Štaviše, faktor iskrivljenosti ima zanemarivo odstupanje od simetrične raspodele podataka. Može se zaključiti da se pouzdana detekcija kvara i procena oštećenja rotora ne može ostvariti samo na osnovu praćenja navedenih skalarnih obeležja struje iz vremenskog domena. Umesto toga, predlaže se da se prethodno definisani skup reprezentativnih uzoraka, tj. skalarnih obeležja kvara rotora iz frekvencijskog domena, proširi dodavanjem skalarnog obeležja struje motora iz vremenskog domena iskazanog preko krest faktora. Cilj je da se sa što većom sigurnošću utvrdi iznos oštećenja rotora. Preostala statistička obeležja kvara rotora u ovom slučaju se neće uzeti u razmatranje zbog male promene njihovog iznosa sa porastom oštećenja rotora. Međutim, ovi parametri mogu biti od značaja kada se analiziraju podaci sakupljeni na većem broju uzoraka, tj. ispitivanih motora, što može biti tema daljih istraživanja.

Tabela 5.2 Vrednosti obeležja kvara rotora iz vremenskog domena signala struje motora.

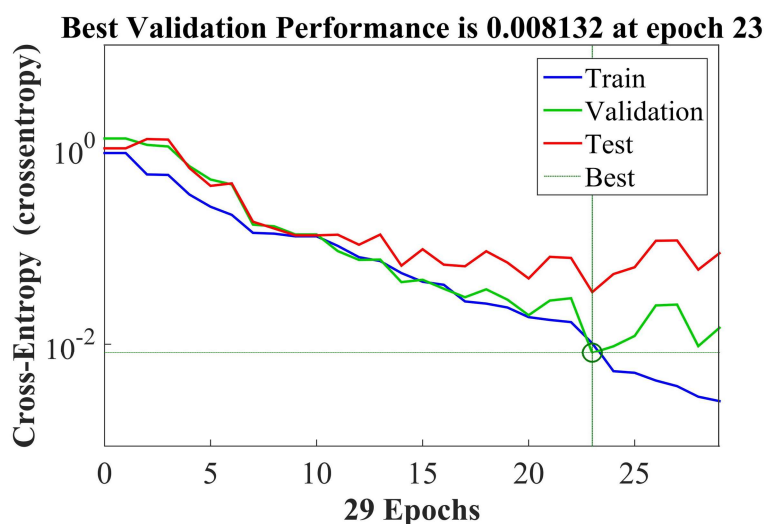
Broj provodnika u prekidu	CF [r.j.]	$Kurt$ [r.j.]	$Skew$ [r.j.]
0	1,417	1,5000	$-61,818 \cdot 10^{-6}$
1	1,431	1,5004	$-61,885 \cdot 10^{-6}$
3	1,447	1,5015	$-61,931 \cdot 10^{-6}$

Nakon definisanja značajnih obeležja kvara rotora, sprovode se preostale računarske simulacije nad razvijenim matematičkim modelom jednofazno napajanog trofaznog motora kako bi se formirao skup ulaznih podataka za obuku prethodno definisane neuronske mreže. Rezultati simulacija su predstavljeni u tabeli 5.3. Oznaka "3+" u datoj tabeli se odnosi na oštećenja (prekid) tri i više štapnih provodnika rotora.

Tabela 5.3 Vrednosti karakterističnih obeležja kvara rotora za potrebe obuke neuronske mreže.

Broj oštećenih provodnika	CF [dB]	LSB1_1F [dB]	LSB1_3F [dB]	PSB0 [dB]	PLSB1 [dB]
0	3,0274	-99,61	-61,51	-61,99	-30,74
0	3,0991	-63,43	-64,05	-43,28	-29,36
0	3,0920	-65,16	-59,26	-44,43	-29,62
0	3,1064	-61,66	-77,03	-42,22	-30,27
0	3,1085	-58,54	-58,08	-41,11	-28,04
0	3,1203	-54,46	-53,70	-38,66	-33,01
0	3,1255	-50,42	-51,98	-36,91	-25,57
0	3,1373	-48,25	-49,21	-36,11	-24,72
1	3,1715	-44,08	-43,63	-33,78	-22,27
1	3,1446	-45,25	-45,69	-34,08	-23,33
1	3,1445	-46,42	-46,41	-34,37	-23,21
1	3,1356	-44,53	-44,21	-33,09	-22,18
1	3,1589	-44,09	-44,54	-33,53	-22,63
1	3,1552	-44,31	-43,07	-33,48	-22,25
2	3,1681	-41,73	-42,64	-31,80	-21,67
2	3,1991	-40,38	-35,84	-31,51	-18,58
2	3,2062	-39,94	-35,88	-30,72	-18,47
2	3,1919	-40,88	-37,08	-31,32	-19,01
2	3,1859	-41,09	-37,06	-31,05	-18,95
2	3,1698	-41,71	-37,91	-31,78	-19,45
2	3,1965	-40,28	-36,97	-31,12	-19,11
2	3,1994	-40,16	-35,96	-31,01	-18,72
3+	3,2068	-39,76	-34,71	-30,64	-17,99
3+	3,2094	-39,58	-33,63	-30,44	-17,34
3+	3,2094	-39,58	-32,89	-30,43	-17,17
3+	3,2197	-39,07	-32,03	-30,53	-16,77
3+	3,2282	-39,02	-32,65	-30,12	-17,11
3+	3,2405	-38,77	-32,21	-29,89	-16,78
3+	3,2364	-38,82	-31,73	-29,77	-16,73
3+	3,2646	-38,25	-31,32	-28,91	-16,49
3+	3,2056	-40,06	-32,57	-30,74	-17,11

Za generisanje, obuku i testiranje izabrane strukture neuronske mreže sa slike 5.4 korišćeno je programsko okruženje *Matlab*, odnosno njegov modul *Neural Network Toolbox*. Tokom obuke, skup uzoraka iz tabele 5.3 je podeljen na tri podskupa: skup za obučavanje (65%), validacioni skup (20%) i test skup (15%). Nadzirana obuka mreže sprovodi se iterativno primenom algoritma propagacije greške unazad na bazi gradijentnog spusta, a postupak traje sve dok se ne dobiju zadovoljavajuće karakteristike. Učenje mreže se prekida kada sposobnost njene generalizacije počne da opada. Ovo je iskazano kroz porast greške unakrsne entropije (engl. *cross-entropy error*) validacionog uzorka koja predstavlja izabranu funkciju cene (engl. *cost function*) za binarnu klasifikaciju. Nakon povećanja ove greške u šest uzastopnih iteracija (epoha) u odnosu na najbolje ostvaren rezultat, obuka se obustavlja. Time se sprečava preobučenosť mreže. Na slici 5.7 prikazana je promena greške unakrsne entropije tokom obuke, validacije i testiranja generisane neuronske mreže koja ima 25 neurona unutar skrivenog sloja i 4 neurona u izlaznom sloju. Sa iste slike se uočava trend opadanja greške tokom faze učenja mreže. Isti trend prate i greške na validacionom i test skupu uzoraka, sve do 23. epohe kada su ostvarene najmanje vrednosti ovih grešaka.



Slika 5.7 Promena greške unakrsne entropije tokom obuke, validacije i testiranja predložene neuronske mreže.

Na osnovu rezultata greške unakrsne entropije (slika 5.7), može se smatrati da su osnovni kriterijumi u pogledu performansi predložene neuronske mreže sa prosleđivanjem unapred ostvareni. Ovako definisana i obučena neuronska mreža će se verifikovati u postupku klasifikacije skupa uzoraka, tj. obeležja kvara rotora, dobijenih eksperimentalnim putem.

6. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Cilj ovog poglavlja jeste potvrda postavljene hipoteze istraživanja. Dat je opis eksperimentalne postavke na kojoj je vršena provera predložene metode za rano otkrivanje kvara rotora. Ogledi su izvršeni na jednofazno napajanom neopterećenom trofaznom kaveznom motoru sa ispravnim rotorom i rotorom sa prekidom jednog, odnosno tri susedna štapna provodnika. Rezultati su prikazani u vidu snimaka talasnih oblika signala od interesa i njihovog amplitudskog spektra. Konačno, dati su i rezultati eksperimentalne verifikacije predloženog postupka za ocenu oštećenja štapnih provodnika rotora. Na kraju poglavlja dat je kratak osvrt i ukazano je na značaj dobijenih rezultata.

6.1 Opis postavke i tok eksperimenta

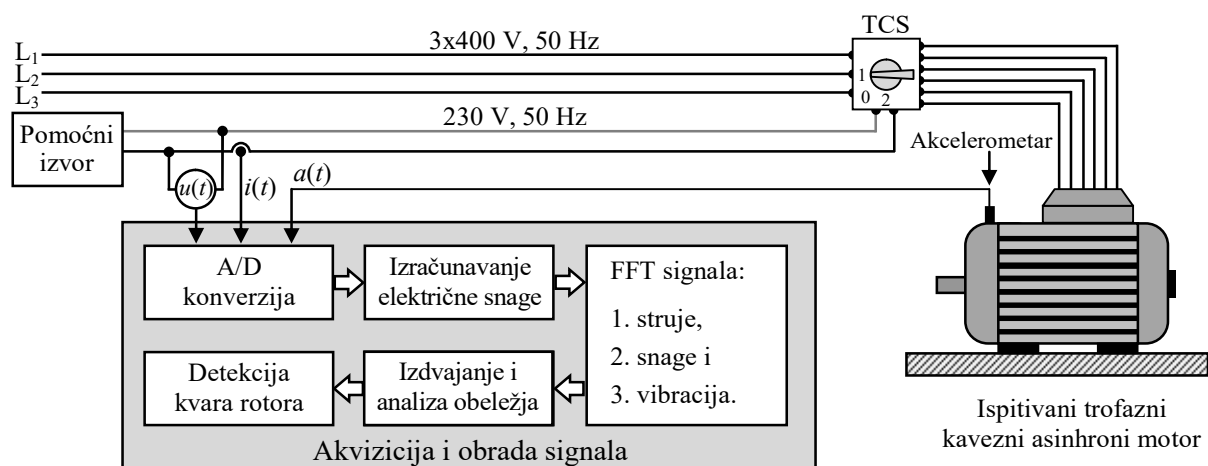
Blok šema postavke na kojoj su vršena eksperimentalna istraživanja prikazana je na slici 6.1, a izgled postavke dat je na slici 6.2. Postavku čine ispitivani motor, sklopni uređaj za prevezivanje statorskih namotaja, pomoćni izvor napajanja (izvor jednofaznog napona), merna oprema i sistem za akviziciju i obradu rezultata merenja.

Eksperimenti su vršeni na četvoropolnom trofaznom kaveznom asinhronom motoru (u nastavku ispitivani motor), sledećih nazivnih podataka: 11 kW, 400 V, 22 A, 50 Hz, 1454 o/min. Za potrebe oglada korišćena su tri rotora iste konstrukcije koja se umeću u ispitivani motor. Prvi rotor je sa ispravnim kavezom, drugi ima prekid jednog štapnog provodnika, a treći je sa tri susedna provodnika u prekidu (slika 6.3). Prekid štapnih provodnika rotora izveden je njihovim bušenjem do dubine rotorskog žleba (≈ 22 mm). Tokom obavljanja eksperimenata ispitivani motor je sve vreme bio neopterećen. Važno je istaći i to da je sa rotora uklonjen ventilator, čime su značajno smanjeni mehanički gubici, a time i klizanje motora (ovim se postižu nepovoljniji uslovi detekcije kvara nego li u eksploataciji, tj. izabran je najnepovoljniji scenario za proveru metode). Za beskontaktno merenje brzine obrtanja rotora korišćen je merač obrtaja DT-2268 proizvođača *Lutron*.

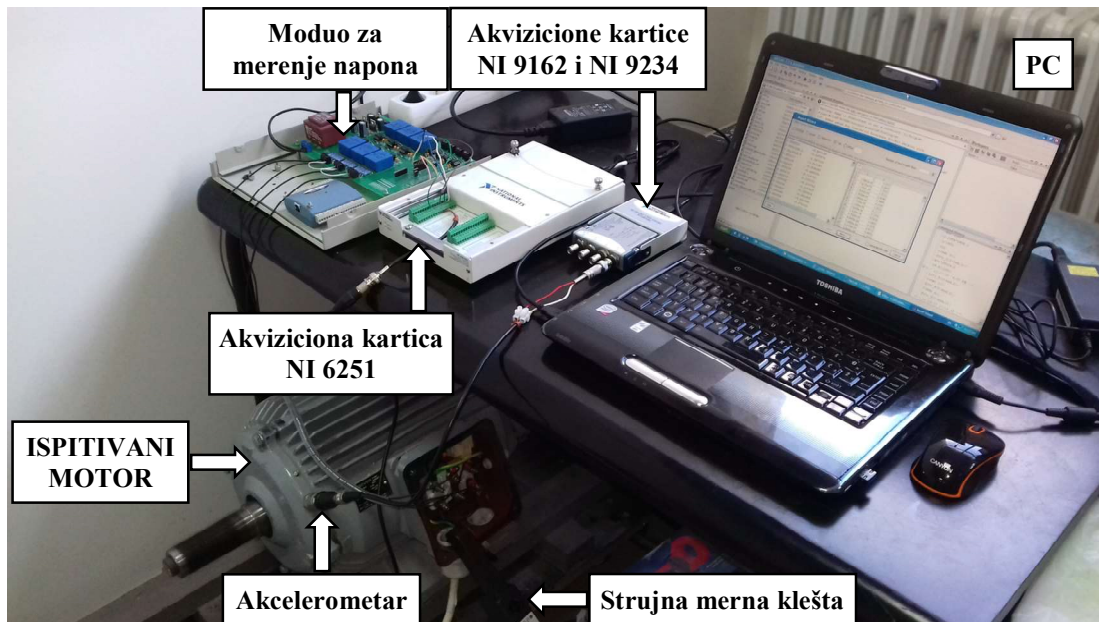
Budući da motor sa redno vezanim namotajima koji se napajaju iz jednofaznog izvora nije u stanju da se pokrene iz mirovanja, problem je rešen klasičnim trofaznim napajanjem. Svi priključni krajevi ispitivanog motora izvedeni su do sklopnog uređaja koji je na slici 6.1 simbolički označen sa TCS. Kada se on nalazi u položaju 1, statorski namotaji su spregnuti u trougao. Tada se vrši pokretanje motora njegovim priključenjem na izvor trofaznog napona. Nakon obavljenog zaleta, statorski namotaji se odvajaju od izvora (TCS se dovodi u položaj 0), a neposredno zatim se, putem sklopnog uređaja, vrši njihovo prevezivanje na red i priključenje na izvor jednofaznog napona (TCS je u položaju 2), čime se motor nastavlja obrtati. S obzirom na to da je lako dostupan, u eksperimentu je kao pomoćni izvor, tj. izvor jednofaznog napona, korišćen fazni napon mreže niskog napona, čija je nazivna vrednost 230 V. Nazivna učestanost napajanja je 50 Hz.

Merna oprema koja je korišćena za eksperimentalna istraživanja obuhvata: strujna merna klešta (model A622 proizvođača *Tektronix*; propusni opseg klešta je 100 kHz) kojima se meri struja motora, modul za merenje napona na priključnim krajevima jednofazno napajanog motora (zasnovan na naponskoj sondi LV 25-P proizvođača *Lem*; propusni opseg sonde je oko 10 kHz), kao i akcelerometar (model AC102-1A proizvođača *Connection Technology Center*; propusni opseg senzora je 15 kHz) za merenje ubrzanja, tj. mehaničkih vibracija kućišta motora. Parametri vibracija koji se mogu meriti su pomeraj, brzina i ubrzanje, a ovde je zbog dostupne opreme mereno ubrzanje. Akcelerometar je pomoću usadnog zavrtnja montiran u radialnom pravcu na bočnom poklopcu motora (slika 6.2). Zbog nedostupnosti adekvatnog davača momenta i senzora brzina obrtanja motora, ove veličine nisu snimljene. Međutim, treba imati u vidu da će se pulsacije elektromagnetskog momenta i brzine obrtanja registrovati kroz pojačane vibracije kućišta motora.

Merni sistem je u direktnoj vezi sa sistemom za akviziciju signala, a kojeg čine USB (engl. *Universal Serial Bus*) akvizicione kartice visokih performansi proizvođača *National Instruments*, kao i standardna računarska (PC) konfiguracija (slika 6.2). Za akviziciju signala struje i napona motora korišćena je 16-bitna kartica NI 6251, dok je za pobuđivanje akcelerometra i pretvaranje ulaznog signala u naponski opsega ± 5 V korišćena 24-bitna kartica NI 9234 u kombinaciji sa karticom NI 9162. Akvizicija signala je obavljena uz pomoć *LabVIEW* programskog okruženja.



Slika 6.1 Blok šema postavke za proveru predložene metode za otkrivanje kvara rotora.



Slika 6.2 Izgled eksperimentalne postavke.

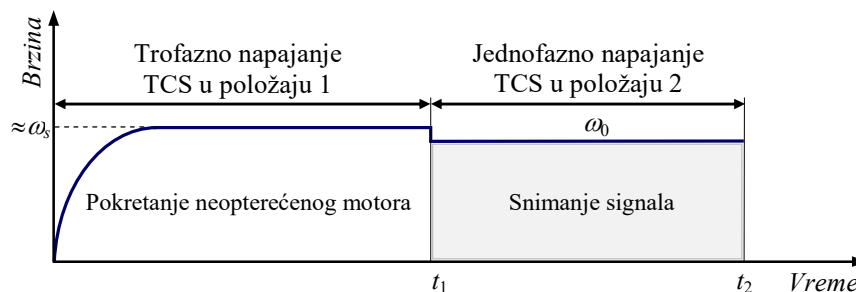


Slika 6.3 Ispravan rotor i rotor sa prekidom jednog i tri susedna štapna provodnika.

Kako se za potrebe ovog eksperimenta koriste akvizicione kartice visokih performansi, to je primenjena tehnika prekomernog uzorkovanja (engl. *oversampling*) ulaznog signala. Na ovaj način se izbegava upotreba analognog anti-aliasing NF filtra. S obzirom na opseg učestanosti veličina od interesa i vodeći računa da Nikvistov uslov bude zadovoljen, izabrana je učestanost uzorkovanja od 6,4 kHz za akviziciju signala struje i napona motora i 25,6 kHz za akviziciju signala mehaničkih vibracija. Nakon obavljene A/D konverzije može se, po potrebi, izvršiti decimacija signala (redukcija njihove učestanosti uzorkovanja za neki celobrojni faktor) da bi se smanjila potreba za memorijskim resursima za pohranjivanje i kasniju obradu podataka na računaru.

Svi eksperimenti su obavljani u Laboratoriji za električne mašine, koja je osnovana pri Katedri za energetska elektronika i pretvarače na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu. Ogledi su vršeni na realizovanoj postavci i to pojedinačnim umetanjem sva tri rotora sa slike 6.3 u ispitivani motor. Ukupno su obavljene tri grupe eksperimenata na ispitivanom motoru i to za ispravan rotor, rotor sa prekidom jednog, odnosno tri susedna štapna provodnika. Procedura izvođenja samog eksperimenta ilustrovana je na slici 6.4. Nakon montaže izabranog rotora u ispitivani motor, vrši se njegov zalet do brzine praznog hoda, koja je gotovo jednaka sinhronoj brzini (što je potvrđeno i merenjem brzine obrtanja). Potom se statorski namotaji odvajaju od

izvora trofaznog napajanja, vrši se njihovo prevezivanje na red i istovremeno priključenje na izvor jednofaznog napona, na način kako je to prethodno objašnjeno. Neposredno zatim započinje se akvizicija signala (trenutak označen sa t_1 na slici 6.4). Da bi se odredilo potrebno trajanje vremenskog zapisa signala, neophodno je proceniti klizanje motora. U tu svrhu je izmerena brzina obrtanja koja je iznosila približno 1497 o/min. Pod pretpostavkom učestanosti izvora napajanja od 50 Hz, klizanje motora iznosi 0,2%. Nešto manja brzina (a time i veće klizanje) se imala kod rotora sa prekidom jednog provodnika (≈ 1492 o/min), što se može objasniti drugačijim karakteristikama ležaja. Na osnovu procenjene vrednosti klizanja motora i prateći preporuke date u [104], za ostvarivanje potrebne frekvencijske rezolucije ovom prilikom bi bilo dovoljno izvršiti snimanja signala u trajanju od 100 s. Ipak, vremenski zapisi signala struje, napona i mehaničkih vibracija kućišta motora pribavljeni su u trajanju od 2×100 s, kako bi se izvršilo usrednjavanje spektra i time umanjio uticaj prisutnih smetnji.



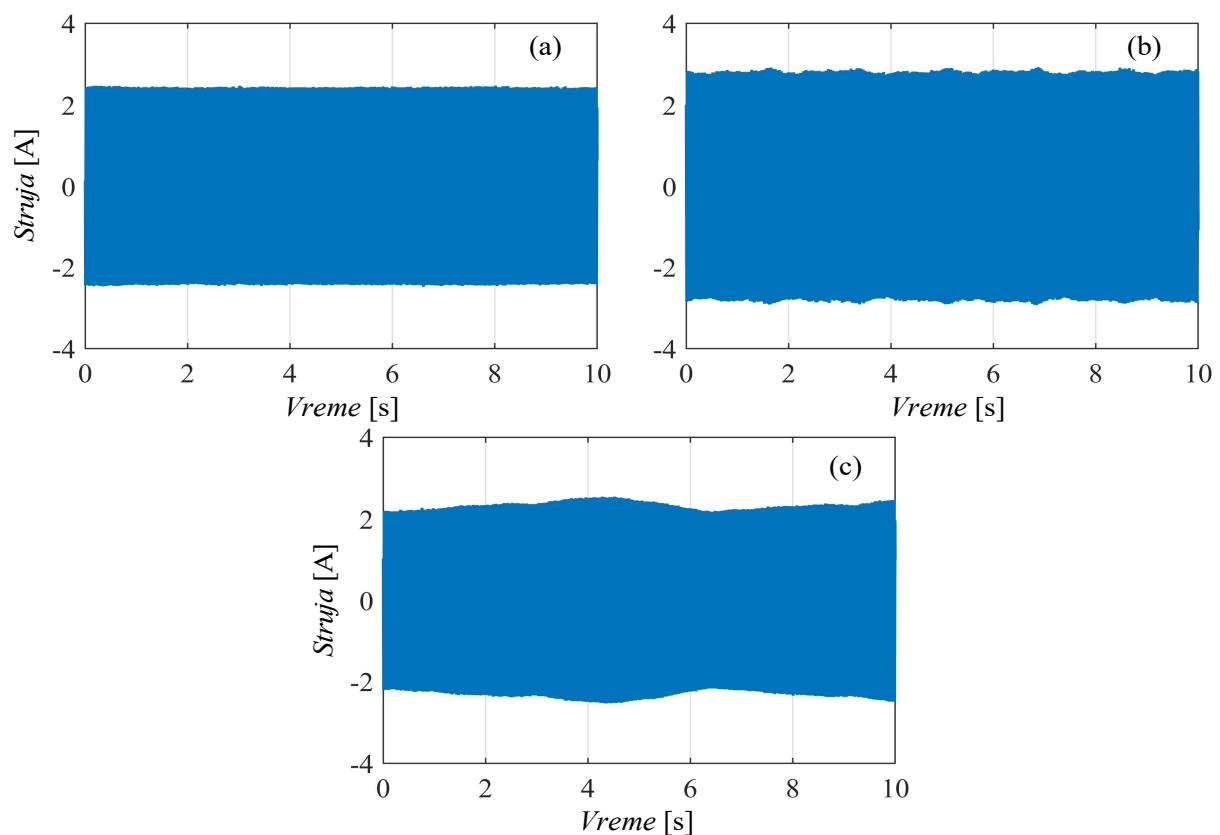
Slika 6.4 Vremenski tok izvođenja eksperimenta.

6.2 Eksperimentalna verifikacija predložene metode

U ovom delu su predstavljeni rezultati eksperimenata koji su dobijeni primenom predložene metode za otkrivanje kvara rotora, na način kako je to prethodno opisano. Rezultati su dobijeni numeričkom obradom snimljenih signala na računaru u programskom paketu *Matlab*, a biće izloženi u dva koraka. Prvo se daju rezultati analize signala struje motora u vremenskom domenu. Ovi rezultati imaju za cilj proveru pokazatelja stanja rotora dobijenih iz signala struje kod ispravnog motora i motora kod kojeg postoji prekid štapnih provodnika. Obradom prikupljenih signala struje motora za tri sprovedena oglada (ispravan rotor, rotor sa prekidom jednog, odnosno tri provodnika) dobijen je skup obeležja kvara rotora iz vremenskog domena. Iz datog skupa izdvajaju se relevantna obeležja koja se potom koriste u predloženom modelu za procenu oštećenja štapnih provodnika. U drugom koraku predstavljeni su rezultati spektralne analize signala struje i trenutne električne snage motora, kao i signala mehaničkih vibracija njegovog kućišta za tri gore navedena oglada. Ovaj korak omogućava neposrednu proveru efikasnosti predložene metode za otkrivanje kvara rotora.

Radi sticanja uvida u iznos skalarnih obeležja kvara rotora iz vremenskog domena, na slici 6.5 je prikazan talasni oblik struje ispitivanog motora za izvršene eksperimente (zarad preglednosti prikazano je svega 10 s). Ono što se sa date slike može zapaziti je prisustvo modulacije u signalima, tj. pulsiranje anvelope struje kod motora sa postojanjem kvara na rotoru.

Primetno je da je ova pojava izraženija sa porastom oštećenja kaveza. Za ovako snimljene signale struje motora treba izračunati vrednosti izabranih skalarnih obeležja kvara rotora iz vremenskog domena: krest faktor, faktor spljoštenosti i faktor iskrivljenja. Međutim, u prethodnom poglavlju je diskutovano da je pre sračunavanja ovih pokazatelja potrebno izvršiti filtriranje signala da bi se on oslobodio komponenti koje nisu od interesa, a mogu nepovoljno uticati na iznose navedenih obeležja, te donošenja pogrešnih zaključaka. To su struje viših harmonika koje su posledica složenoperiodičnog napona napajanja, ali i same konstrukcije mašine. Za te potrebe signal struje motora je propušten kroz digitalni Batervortov (engl. *Butterworth*) filter propusnik opsega učestanosti od 46 Hz do 54 Hz. Realizovani filter je 50-og reda i identičnih je karakteristika kao i filter korišćen u izdvajanju obeležja iz rezultata računarskih simulacija. Njime se obezbeđuje sigurno propuštanje komponenti donjeg i gornjeg bočnog pojasa struje motora u okolini osnovne učestanosti napajanja, a vrši slabljenje svih ostalih komponenti u spektru u iznosu od -300 dB/oct. Na ovako filtriranom signalu su određene i tabelom 6.1 priložene vrednosti pokazatelja kvara rotora. Poredeći ovako dobijene rezultate sa onima dobijenim na osnovu računarskih simulacija (tabela 5.2 iz prethodnog poglavlja), može se konstatovati da se vrednosti krest faktora i faktora spljoštenosti slažu u zadovoljavajućoj meri. Određena odstupanja postoje u iznosu faktora iskrivljenja, ali u oba slučaja (eksperiment i simulacija) on ima vrednost blisku nuli. Zaključak iz prethodnog poglavlja se potvrđuje, a to je da se vrednosti ovih pokazatelja ne menjaju značajnije sa progresijom oštećenja rotora, te se ne mogu koristiti kao siguran pokazatelj kvara rotora.



Slika 6.5 Vremenski zapis signala struje motora – eksperimentalni rezultati.
 (a) Ispravan rotor. (b) Prekid jednog provodnika. (c) Tri susedna provodnika u prekidu.

Tabela 6.1 Vrednosti obeležja kvara rotora iz signala struje motora – eksperimentalni rezultati.

Broj provodnika u prekidu	CF [r.j.]	$Kurt$ [r.j.]	$Skew$ [r.j.]
0	1,419	1,5000	$-7,23 \cdot 10^{-6}$
1	1,432	1,5002	$33,79 \cdot 10^{-6}$
3	1,439	1,5005	$51,53 \cdot 10^{-6}$

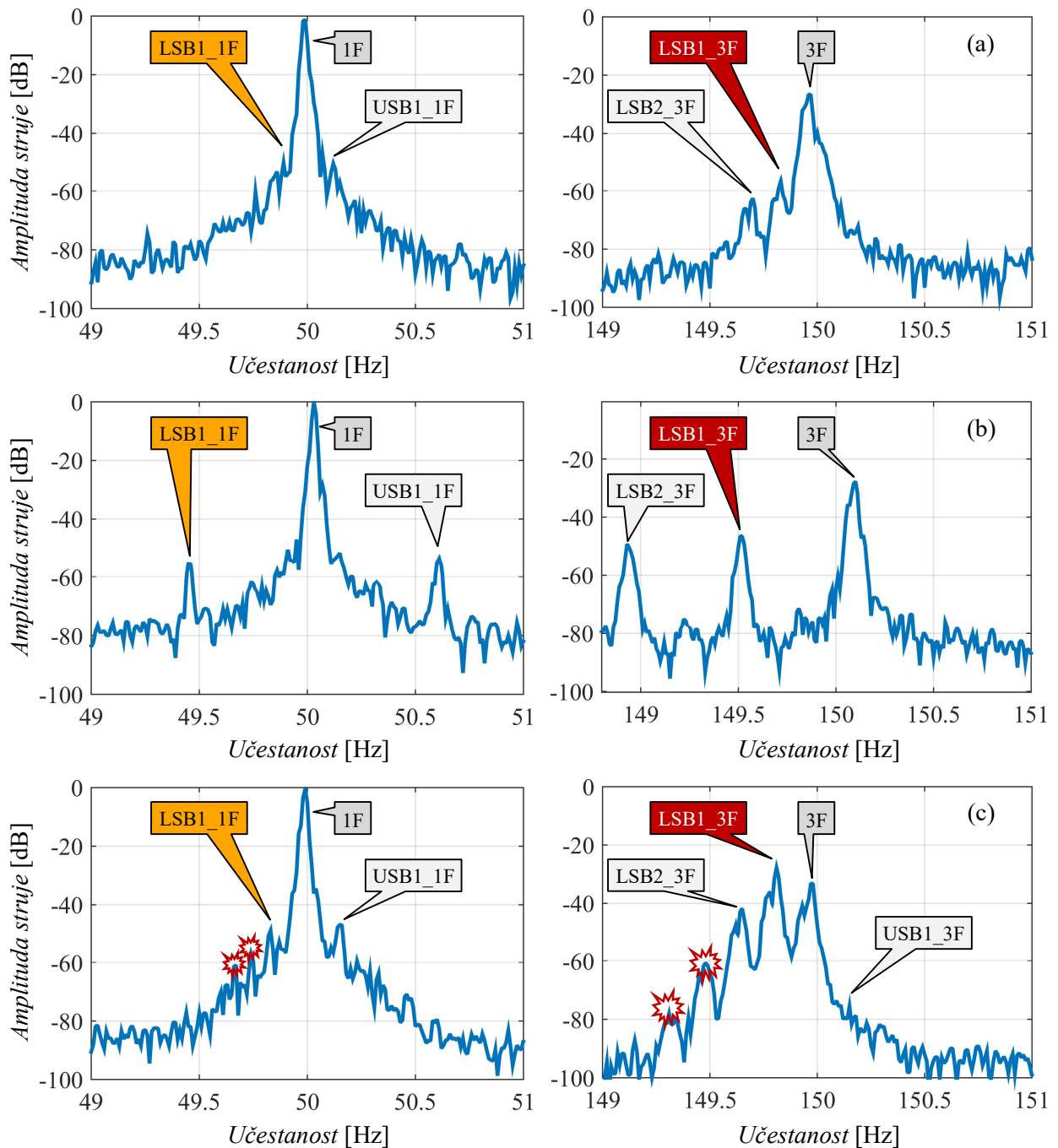
Pre nego se izloži naredna grupa rezultata, zgodno je ukazati na jednu osobenost predložene metode za otkrivanje kvara rotora. Naime, tokom trajanja oglada, struja ispitivanog motora je imala vrednost koja je ispod 10% njegove nazivne vrednosti (1,61 A na slici 6.5 (a) i (c) i 1,85 A na slici 6.5 (b)). Budući da se motor napaja faznim naponom mreže nazivne vrednosti 230 V, to je snaga pomoćnog izvora napajanja ispod 3% nazivne prividne snage motora. Drugim rečima, eksperiment se može izvršiti upotrebom pomoćnog izvora relativno male snage.

Nakon izlaganja rezultata obrade signala struje motora u vremenskom domenu, u nastavku sledi prikaz rezultata izračunavanja amplitudskog spektra signala struje i trenutne vrednosti električne snage motora, kao i signala mehaničkih vibracija njegovog kućišta. Kao što je naglašeno, ovo su najznačajniji rezultati sprovedenog eksperimentalnog istraživanja jer se na osnovu njih vrši provera ranije iznetih teorijskih tvrdnji i rezultata sprovedenih računarskih simulacija. Važno je još jednom napomenuti da su ogledi obavljani sa uklonjenim ventilatorom. Time su značajno smanjeni mehanički gubici i klizanje motora, što je najnepovoljniji scenario za proveru predložene metode.

Na slici 6.6 predstavljen je deo amplitudskog spektra signala struje motora sa ispravnim rotorom i rotorom sa prekidom jednog i tri štapna provodnika, redom. Prikazani su bočni pojasi od interesa i to u okolini osnovne komponente struje motora (oznaka 1F na istoj slici) i njenog trećeg harmonika (oznaka 3F). Za označavanje komponenti struja bočnih pojasa korišćena je notacija usvojena u prethodnim poglavljima (LSB i USB).

Kada ne postoje oštećenja štapnih provodnika rotora, amplituda komponente struje na osnovnoj učestanosti ima dominantnu vrednost u odnosu na komponente svojih bočnih pojasa (LSB1_1F i USB1_1F) koje se nešto teže uočavaju zbog curenja spektra, što je ilustrovano na slici 6.6 (a) levo. Problem njihovog izdvajanja može biti rešen primenom Hilbertove transformacije na signal struje motora, što se ovde neće razmatrati jer nije primarni cilj istraživanja (nešto više o toj tehnici može se pronaći u [113]). Na istoj slici desno uočava se komponenta struje trećeg harmonika (3F), ali su jasno izražene i komponente njenog donjeg bočnog pojasa (LSB1_3F i LSB2_3F). Problem curenja spektra ovde nije izražen jer komponenta 3F nije dominantna u odnosu na komponente postojećeg bočnog pojasa. Kako je eksperiment obavljen na motoru sa ispravnim rotorom, komponente ovih bočnih pojasa ne bi trebalo da postoje, ali se njihovo prisustvo može objasniti nesavršenošću konstrukcije rotora, što je u saglasnosti i sa rezultatima simulacija datim u četvrtom poglavlju (slika 4.5 (b)). No, za razliku od simulacija, ovde treba skrenuti pažnju da je komponenta 3F istovremeno i rezultat postojanja trećeg harmonika napona u pomoćnom, tj. mrežnom napajanju. Merenjem je ustanovljeno da je udeo trećeg harmonika u

naponu napajanja 2,67%, pri čemu je njegovo ukupno harmonijsko izobličenje iznosilo 3,95%. Zbog toga se komponenta 3F ne može smatrati pouzdanim obeležjem kvara rotora. Sve prisutne komponente bočnih pojasa sa slike 6.6 (a) pomerene su za iznose $\pm 2ksf_s$ ($k=1,2,\dots$, $s=0,0014$ i $f_s=49,99$ Hz) u odnosu na komponente struje 1F i 3F, što je u saglasnosti sa iznetim teorijskim razmatranjima i rezultatima simulacija. Treba napomenuti da je vrednost klizanja sada precizno određena i to na osnovu stvarne učestanosti izvora napajanja (49,99 Hz) i brzine obrtanja motora (1497,6 o/min) koja je izračunata na osnovu učestanosti žlebnih harmonika. Vrednosti komponenti bočnih pojasa od interesa iz amplitudskog spektra struje motora sa slike 6.6 (a) date su u tabeli 6.2.



Slika 6.6 Amplitudski spektar signala struje motora – eksperimentalni rezultati.

(a) Ispravan rotor. (b) Prekid jednog provodnika. (c) Tri susedna provodnika u prekidu.

Rezultati spektralne analize struje motora sa jednim štapnim provodnikom u prekidu predstavljeni su na slici 6.6 (b). U ovom slučaju, komponente bočnih pojasa LSB1_1F i LSB2_1F su jasno izražene u okolini osnovne komponente struje motora (1F). Jedan od razloga je svakako i nešto veći iznos klizanja zbog drugačijih karakteristika korišćenih ležaja. Slično se uočava i na slici 6.6 (b) desno, na kojoj su prikazane komponente bočnih pojasa u okolini komponente struje 3F (LSB1_3F i LSB2_3F). Primetno je da su one značajno porasle (prevažodno komponenta LSB1_3F) u odnosu na vrednosti koje su imale u slučaju ispravnog rotora (slika 6.6 (a)). No, komponenta 3F se nije značajnije promenila sa pojavom oštećenja rotora. Udeo trećeg harmonika u naponu napajanja se neznatno promenio (2,71 %), a ukupno harmonijsko izobličenje napona izvora iznosilo je 3,79%. Međutim, u spektru je primetno odsustvo komponenti gornjeg bočnog pojasa u okolini komponente 3F, a koje su, iako male amplitude, prisutne u rezultatima simulacija datim u vidu amplitudskog spektra na slici 4.6 (b) u četvrtom poglavlju. Ovo se može objasniti karakteristikom A/D konvertora korišćene 16-bitne kartice za akviziciju signala struje motora. Ako se pretpostavi da je sistemski šum znatno manji od šuma kvantizacije, tada je maksimalni odnos signal/šum (engl. *signal-to-noise ratio*) idealnog 16-bitnog A/D konvertor približno 98,1 dB. Dominantna komponenta struje gornjeg bočnog pojasa u okolini komponente 3F, koja je na slici 4.6 (b) označena sa USB1_3F, ima vrednost od -115 dB (za vrednost momenta inercije koja odgovara razmatranom, tj. ispitivanom motoru). Kako je to ispod -98,1 dB, postaje jasno da se korišćenim merno-akvizicionim sistemom ova komponenta ne može registrovati. Isto važi i za sve preostale komponente struje iz gornjeg bočnog pojasa u okolini komponente 3F. Ipak, sagledavajući prikazane rezultate sa slike 6.6 (b) u celini, može se zaključiti da su oni saglasni sa teorijskim razmatranjima. Sve prisutne komponente bočnih pojasa su pomerene za iznose $\pm 2ksf_s$ ($k=1,2,\dots$, $s=0,00584$ i $f_s=50,03$ Hz) u odnosu na komponente 1F i 3F. Ove komponente se mogu smatrati obeležjem kvara rotora i njihove amplitude rastu sa progresijom oštećenja rotora (tabela 6.2). Vrednost klizanja motora je i u ovom slučaju određena na osnovu stvarne učestanosti izvora napajanja (50,03 Hz) i brzine obrtanja (1492,2 o/min) koja je izračunata na osnovu učestanosti žlebnih harmonika.

Rezultati oglada sa tri susedna štapna provodnika rotora u prekidu pokazali su da se uvećava broj komponenti bočnih pojasa u okolini komponenti struja 1F i 3F (uokvireno crvenim na slici 6.6 (c)). Sem toga, amplitude komponenti bočnih pojasa LSB1_1F i LSB2_1F su porasle u odnosu na vrednosti koje su imale na slici 6.6 (b). Značajan porast vrednosti beleže i komponente bočnih pojasa u okolini komponente struje 3F, pre svega LSB1_3F i LSB2_3F (slika 6.6 (c) desno), s tim da se sada nazire i komponenta struje gornjeg bočnog pojasa u okolini komponente 3F (USB1_3F). Ovo je i očekivano s obzirom na značajno oštećenje rotora. Izuzetak čini komponenta struje 3F čija se vrednost smanjila, što je naizgled u suprotnosti sa rezultatima simulacije gde se beležio blagi porast sa povećanjem broja provodnika u prekidu (slika 4.7 (b) u četvrtom poglavlju). Međutim, kako je prethodno već naglašeno, ova komponenta struje nije isključiva posledica kvara rotora, već je i rezultat postojanja trećeg harmonika napona u izvoru

napajanja. Njegov udeo ovog puta je značajno manji nego u prethodna dva slučaja i iznosio je 1,34%. Takođe, primetno je i smanjenje ukupnog harmonijskog izobličenja napona na vrednost od 2,24%. Ovim je još jednom pokazano da treći harmonik napona napajanja ima dominantan uticaj na iznos trećeg harmonika struje, tj. komponente 3F, te da ona nije pouzdan pokazatelj kvara rotora. S druge strane, komponente bočnih pojasa se mogu smatrati pouzdanim pokazateljem kvara rotora. Sve prisutne komponente bočnih pojasa sa slike 6.6 (c) pomerene su za iznose $\pm 2ksf_s$ ($k=1,2,\dots$, $s=0,00165$ i $f_s=49,99$ Hz) u odnosu na komponente 1F i 3F. Njihove amplitude rastu sa progresijom kvara rotora, prevashodno komponenta LSB1_3F (tabela 6.2), te se na osnovu vrednosti obeležja može vršiti ocena stanja rotora. Vrednost klizanja motora je i u ovom slučaju određena na osnovu stvarne učestanosti izvora napajanja (49,99 Hz) i brzine obrtanja (1497,2 o/min) koja je izračunata na osnovu učestanosti žlebnih harmonika. Na osnovu prikazanih rezultata, može se konstatovati da su i u ovom slučaju potvrđene teorijske pretpostavke, ali i rezultati sprovedenih simulacija predložene metode za otkrivanje kvara rotora.

Ovde se treba podsetiti da je u slučaju kvara rotora sprovedena teorijska analiza predvidela postojanje komponenti struja bočnih pojasa u okolini svih neparnih umnožaka osnovne učestanosti napajanja. Ipak, eksperimentalno je verifikovano njihovo postojanje oko osnovne komponente struje i njenog trećeg harmonika, dok se ostali bočni pojasi nisu mogli sa sigurnošću potvrditi zbog specifičnosti merno-akvizicionog sistema. Naime, na osnovu rezultata simulacija prikazanih u vidu amplitudskog spektra struje motora na slikama 4.5, 4.6 i 4.7 (četvrto poglavlje), primetno je da amplitude komponenti bočnih pojasa iznad trećeg harmonika struje (okolina petog i sedmog) značajno slabe. Zbog toga se one nisu mogle registrovati korišćenom merno-akvizicionom opremom. Međutim, ono što je suštinski važno za predloženu metodu je činjenica da je komponenta u neposrednoj okolini trećeg harmonika struje motora, LSB1_3F sa slike 6.6, prilično vidljiva i da se njena vrednost značajno menja sa progresijom oštećenja rotora (slika 6.6 i tabela 6.2). Zbog toga ona predstavlja pogodno obeležje na osnovu kojeg se može vršiti nadzor stanja rotora, kao i rano otkrivanje prekida štapnih provodnika.

Tabela 6.2 Vrednosti karakterističnih komponenti amplitudskog spektra signala struje motora – eksperimentalni rezultati.

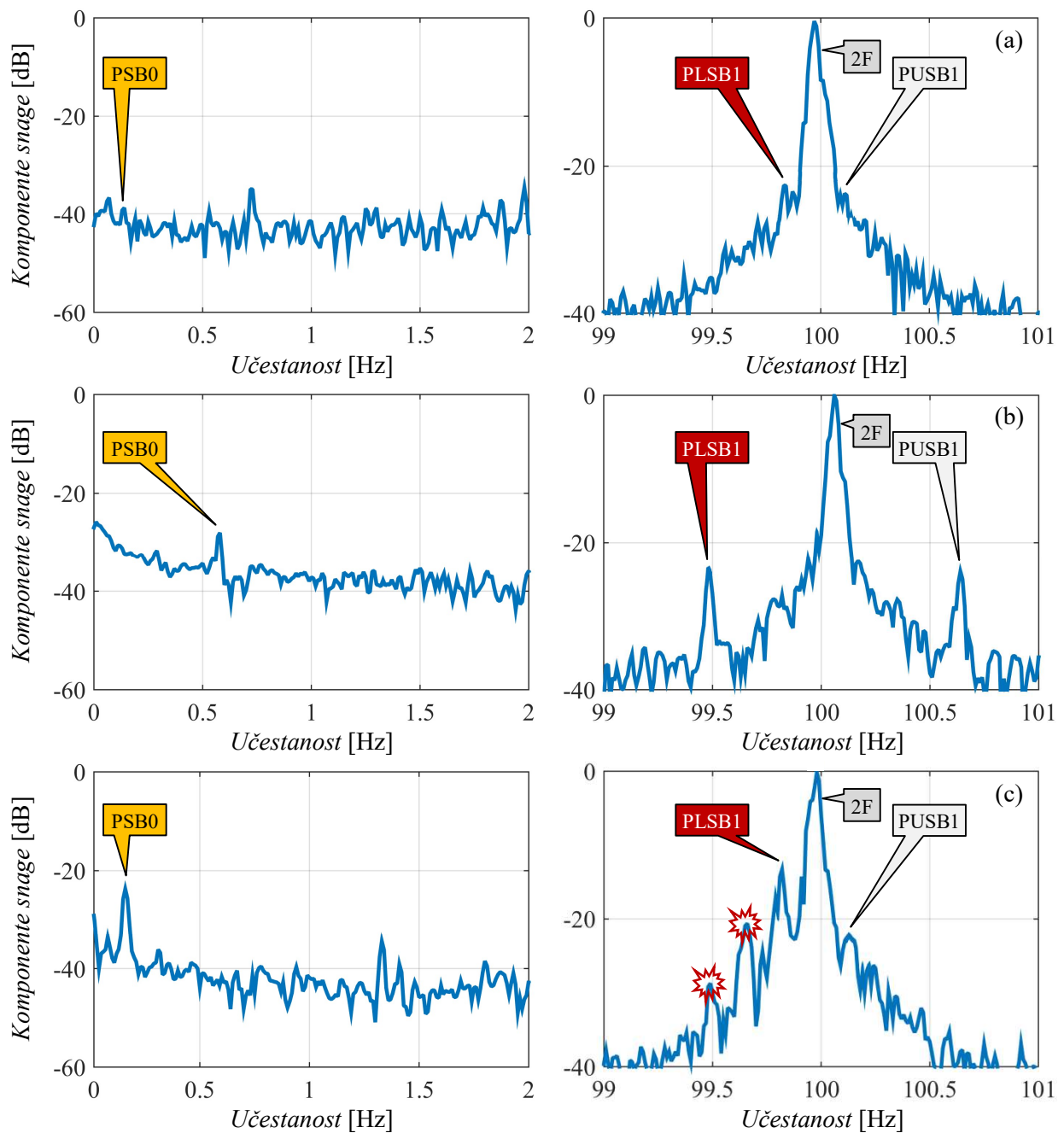
Broj provodnika u prekidu	Pozicija obeležja				Vrednost obeležja			
	LSB1_1F [Hz]	USB1_1F [Hz]	LSB1_3F [Hz]	LSB2_3F [Hz]	LSB1_1F [dB]	USB1_1F [dB]	LSB1_3F [dB]	LSB2_3F [dB]
0	49,85	50,13	149,83	149,69	-53,05	-50,39	-56,71	-62,52
1	49,45	50,61	149,51	148,92	-51,92	-48,53	-46,42	-49,17
3	49,83	50,16	149,81	149,64	-48,99	-46,50	-27,79	-41,74

Dalji rezultati sprovedenih eksperimenata prikazani su na slici 6.7, gde je predstavljen deo amplitudskog spektra signala trenutne električne snage ispitivanog motora. Amplitude komponenti u spektru su normalizovane vrednošću komponente snage na dvostrukoj učestanosti napajanja, pri čemu je prethodno iz vrednosti proizvoda struje i napona motora uklonjena srednja vrednost snage.

Kada ne postoje oštećenja štapnih provodnika rotora, značajne komponente bočnih pojasa signala trenutne električne snage motora u okolini jednosmerne komponente (označena sa PSB0) i dvostruke učestanosti napajanja (obeležene sa PLSB1 i PUSB1) nisu toliko izražene, što je ilustrovano na slici 6.7 (a). Iako njihovo postojanje teorijski nije opravdano, usled nesavršenosti konstrukcije rotora ove komponente se mogu pojaviti, što je pokazano i u rezultatima simulacija na slici 4.8 (a) u četvrtom poglavlju. No, treba imati na umu da, usled curenja spektra, njihovo prepoznavanje u ovom slučaju ne bi bilo moguće bez poznavanja vrednosti klizanja motora. Sve prisutne komponente bočnih pojasa sa slike 6.7 (a) pomerene su za iznose $2ksf_s$ ($k=1,2,\dots$, $s=0,0014$ i $f_s=49,99$ Hz) u odnosu na jednosmernu komponentu, tj. za $\pm 2ksf_s$ u odnosu na komponentu snage 2F (komponenta na dvostrukoj učestanosti napajanja). Ovo je saglasno sa rezultatima računarske simulacije. Vrednosti najvažnijih komponenti kvara rotora iz spektra signala trenutne električne snage motora navedene su u tabeli 6.3. Primetno je da su one nešto više u poređenju sa rezultatima simulacija (tabela 4.4 u četvrtom poglavlju), što se može objasniti postojanjem razlike u vrednostima stvarnih i modelovanih mehaničkih gubitaka ispitivanog motora.

Na slici 6.7 (b) prikazan je amplitudski spektar signala trenutne električne snage motora kod prekida jednog štapnog provodnika rotora. Može se primetiti da su obeležja kvara rotora sada jasno izražena, što je svakako posledica postojanja prekida rotorskog provodnika, ali i nešto veće vrednosti klizanja motora zbog drugačijih karakteristika ležaja. Sa iste slike se uočava značajan porast vrednosti komponente snage PSB0 u odnosu na vrednost koja se imala u slučaju ispravnog rotora (za približno 10 dB), dok ostale komponente (PLSB1 i PUSB1) ne beleže značajnije promene. I u ovom slučaju sve prisutne komponente snage bočnih pojasa pomerene su za iznose $2ksf_s$ ($k=1,2,\dots$, $s=0,00584$ i $f_s=50,03$ Hz) u odnosu na jednosmernu komponentu i $\pm 2ksf_s$ u odnosu na komponentu snage 2F, što je saglasno sa iznetom teorijskom i rezultatima simulacija (slika 4.8 (b) u četvrtom poglavlju). Vrednosti obeležja kvara rotora iz amplitudskog spektra signala trenutne električne snage motora sa prekidom jednog štapnog provodnika predstavljene su u tabeli 6.3.

Rezultati ogleđa sa tri susedna štapna provodnika rotora u prekidu predstavljeni su na slici 6.7 (c). Komponente bočnih pojasa, PSB0, PLSB1 i PUSB1 jasno su uočavaju u prikazanom amplitudskom spektru signala trenutne električne snage ispitivanog motora. Posebno je značajno da su njihove vrednosti sada mnogo veće u odnosu na vrednosti koje se imaju u slučaju ispravnog rotora, odnosno rotora sa prekidom jednog provodnika. Ovo je sasvim očekivano s obzirom na prisustvo značajnog oštećenja rotora i u potpunosti se slaže sa teorijskim navodima. Sem toga, na istoj slici se zapaža i uvećanje broja komponenti donjeg bočnog pojasa u okolini dvostruke učestanosti napajanja (uokvireno crvenim). Sve prisutne komponente snage bočnih pojasa pomerene su za iznose $2ksf_s$ ($k=1,2,\dots$, $s=0,00165$ i $f_s=49,99$ Hz) u odnosu na jednosmernu komponentu i $\pm 2ksf_s$ u odnosu na komponentu snage 2F. Ovim rezultatima se potvrđuju teorijska razmatranja i rezultati sprovedenih simulacija. Vrednosti komponenti kvara rotora iz spektra signala trenutne električne snage motora sa slike 6.7 (c) date su u tabeli 6.3.



Slika 6.7 Amplitudski spektar signala trenutne električne snage motora – eksperimentalni rezultati. (a) Ispravan rotor. (b) Prekid jednog provodnika. (c) Tri susedna provodnika u prekidu.

Tabela 6.3 Vrednosti karakterističnih komponenti amplitudskog spektra signala trenutne električne snage motora – eksperimentalni rezultati.

Broj provodnika u prekidu	Pozicija obeležja			Vrednost obeležja		
	PSB0 [Hz]	PLSB1 [Hz]	PUSB1 [Hz]	PSB0 [dB]	PLSB1 [dB]	PUSB1 [dB]
0	0,14	99,84	100,12	-38,79	-22,44	-23,92
1	0,58	99,48	100,64	-27,99	-23,49	-23,18
3	0,16	99,82	100,14	-23,69	-13,29	-22,32

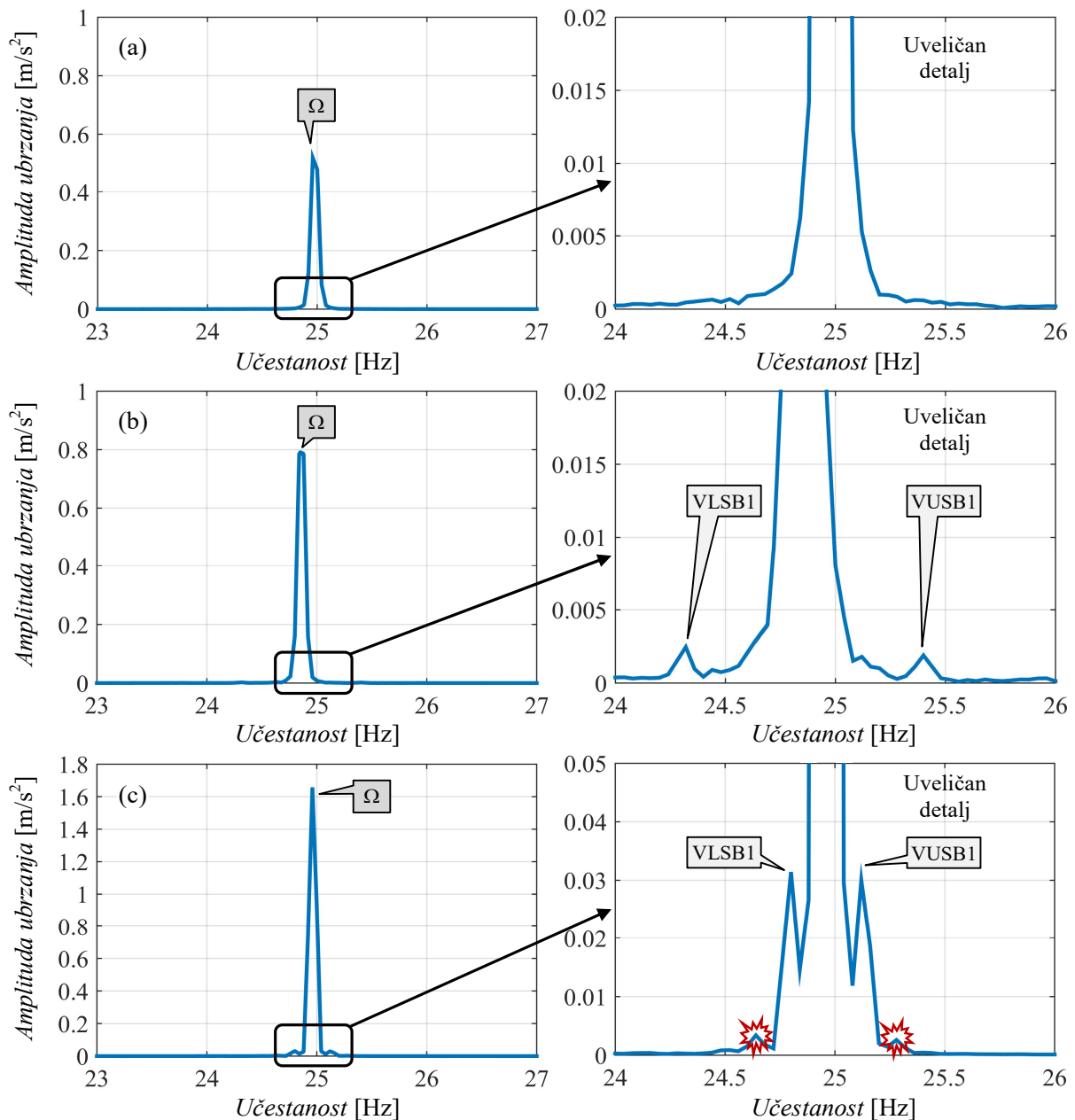
Izdvojeni rezultati analize spektra signala trenutne vrednosti električne snage motora potvrđuju teorijske navode i u skladu su sa rezultatima računarskih simulacija. Međutim, teorijskom analizom je utvrđeno postojanje komponenti snage bočnih pojasa ne samo u okolini jednosmerne komponente i komponente na dvostrukoj učestanosti napajanja (koje su prikazane na slici 6.7), već i oko svih ostalih parnih umnožaka osnovne učestanosti napajanja. Njihovo postojanje nije manje značajno, ali imajući u vidu praktične aspekte realizacije predložene metode, ove komponente nisu razmatrane jer je njihova amplituda suviše mala. S druge strane, komponente snage u okolini jednosmerne komponente i komponente na dvostrukoj učestanosti napajanja (PSB0, PLSB1 i PUSB1 na slici 6.7) predstavljaju pogodna obeležja na osnovu kojih se može vršiti nadzor stanja rotora. Prateći njihov trend može se ustanoviti prisustvo kvara rotora, tj. prekid štapnih provodnika kaveza.

Svi do sada izloženi rezultati sprovedenih eksperimentalnih istraživanja pokazuju visok stepen podudarnosti sa rezultatima simulacija i u potpunosti potvrđuju iznete teorijske tvrdnje. Ipak, da bi se upotpunila postavljena hipoteza istraživanja, u nastavku su prikazani i rezultati spektralne analize signala mehaničkih vibracija kućišta motora. Na ovaj način će se predloženi metod za detekciju kvara rotora u potpunosti verifikovati.

Kako je i napomenuto, eksperimentalnim ispitivanjima su obuhvaćena tri stanja rotora: ispravan, prekid jednog, odnosno tri susedna štapna provodnika. Za svaki od pojedinačnih oglada dobijeni rezultati su predstavljeni u formi amplitudskog spektra signala mehaničkih vibracija i prikazani su na slici 6.8. Vredi spomenuti da su vibracije kućišta motora merene u njegovom radijalnom pravcu, a korišćeni parametar za njihovo opisivanje je ubrzanje. Konverzija vrednosti ubrzanja iz m/s^2 u dB nije vršena.

Slika 6.8 (a) prikazuje deo amplitudskog spektra signala mehaničkih vibracija kućišta motora sa ispravnim rotorom. Jasno se uočava komponenta na učestanosti obrtanja motora (označena sa Ω) koja iznosi 24,96 Hz i čija je amplituda $0,52 \text{ m/s}^2$. Ova komponenta je posledica debalansa rotora, budući da nije moguće njegovo idealno uravnoteženje. Komponente bočnih pojasa koje se dovode u vezu sa oštećenjem rotora nisu vidljive u okolini komponente vibracija na učestanosti obrtanja motora (uveličan detalj na slici 6.8 (a) desno). Međutim, u amplitudskom spektru signala mehaničkih vibracija motora sa prekidom jednog štapnog provodnika rotora (slika 6.8 (b)), jasno se uočavaju komponente donjeg i gornjeg bočnog pojasa (VLSB1 i VUSB1) u neposrednoj okolini komponente vibracija na učestanosti obrtanja motora (uveličan detalj na slici 6.8 (b) desno) koja iznosi 24,87 Hz. Navedene komponente predstavljaju obeležja kvara rotora, a njihov pomak u odnosu na komponentu Ω iznosi tačno $\pm 2ksf_s$ ($k=1$; $s=0,00584$ i $f_s=50,03 \text{ Hz}$), što je u punoj saglasnosti sa teorijskim postavkama. Amplitude ovih komponenti navedene su u tabeli 6.4. Inače, na slici 6.8 (b) se zapaža i nešto veća amplituda komponente Ω ($0,79 \text{ m/s}^2$) u odnosu na vrednost koju je imala u prethodnom slučaju ($0,52 \text{ m/s}^2$). Ovo je posledica povećanog debalansa rotora. Rezultati spektralne analize signala mehaničkih vibracija motora sa

tri susedna štapna provodnika u prekidu predstavljani su na slici 6.8 (c). I u ovom slučaju su jasno vidljive komponente bočnih pojasa, VLSB1 i VUSB1 (uveličan detalj na slici 6.8 (c) desno), s tim da su njihove vrednosti sada daleko veće nego u prethodna dva oglada (tabela 6.4). Štaviše, u prikazanom amplitudskom spektru se uočava i povećanje broja komponenti bočnih pojasa (uokvireno crvenim na slici 6.8 (c) desno), što je posledica značajnog oštećenja rotora ispitivanog motora. Navedene komponente predstavljaju obeležja kvara rotora, a njihov pomak u odnosu na komponentu Ω , koja se u prikazanom spektru nalazi na 24,95 Hz, iznosi tačno $\pm 2ksf_s$ ($k=1,2$; $s=0,00165$ i $f_s=49,99$ Hz). Budući da je za potrebe eksperimenta prekid štapnih provodnika izveden njihovim bušenjem, značajno je povećan i debalans rotora, što sa može zaključiti na osnovu iznosa amplitude komponente Ω sa slike 6.8 (c), koja je sada porasla na $1,66 \text{ m/s}^2$.



Slika 6.8 Amplitudski spektar signala mehaničkih vibracija kućišta motora – eksperimentalni rezultati. (a) Ispravan rotor. (b) Prekid jednog provodnika. (c) Tri susedna provodnika u prekidu.

Tabela 6.4 *Vrednosti karakterističnih komponenti amplitudskog spektra signala mehaničkih vibracija kućišta motora – eksperimentalni rezultati.*

Broj provodnika u prekidu	Pozicija obeležja		Vrednost obeležja	
	VLSB1 [Hz]	VUSB1 [Hz]	VLSB1 [mm/s ²]	VUSB1 [mm/s ²]
1	24,29	25,45	2,456	1,889
3	24,79	25,12	31,42	30,01

Tumačenjem dobijenih rezultata amplitudskog spektra signala mehaničkih vibracija motora može se konstatovati da su oni sasvim u skladu sa teorijskim zaključcima koji su izloženi u ovom istraživanju. Rezultati su pokazali da je predloženom metodom moguće identifikovati obeležja kvara rotora u spektru signala mehaničkih vibracija neopterećenog kaveznog motora kod postojanja oštećenja štapnih provodnika. Štaviše, pokazano je da nivo vibracija, odnosno iznos amplituda komponenti bočnih pojasa, oslikava stanje rotora. Ujedno, ovi rezultati i predložena metoda su utoliko vredniji ako se zna da je analiza mehaničkih vibracija u današnje vreme jedna od najvažnijih metoda tehničke dijagnostike koja se koristi u identifikaciji kvarova rotirajućih mašina u industrijskim pogonima.

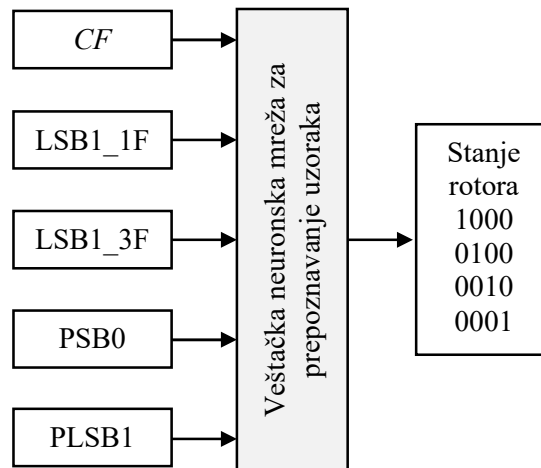
Imajući u vidu sve prethodno izložene rezultate eksperimenta, može se izneti zaključak da se predložena metoda pokazala kao efikasna u otkrivanju kvara rotora neopterećenog trofaznog kaveznog asinhronog motora.

6.3 Provera predloženog postupka za procenu oštećenja štapnih provodnika rotora

Nakon što je metoda za otkrivanje kvara rotora potvrđena eksperimentalnim putem, u nastavku se pristupilo proveriti validnosti predloženog postupka za procenu oštećenja štapnih provodnika rotora. Korišćeni model predstavlja unapređenje prikazane metode za otkrivanje kvara rotora neopterećenog trofaznog kaveznog asinhronog motora, a zasnovan je na primeni veštačke neuronske mreže u prepoznavanju uzoraka. Zadatak mreže, tj. predloženog algoritma postupka sa slike 6.9, jeste da na osnovu ustanovljenih ulaznih obeležja izvrši grupisanje stanja rotora po pitanju oštećenja štapnih provodnika u četiri predefinisane klase prema tabeli 5.1 iz prethodnog poglavlja. Provera je vršena na skupu (vektoru) obeležja kvara rotora koji su dobijeni prethodnom numeričkom obradom signala struje i trenutne električne snage ispitivanog motora i to za sve sprovedene oglede (tabela 6.5).

Tabela 6.5 *Vrednosti karakterističnih obeležja kvara rotora za proveru predloženog modela.*

Broj provodnika u prekidu	CF [dB]	LSB1_1F [dB]	LSB1_3F [dB]	PSB0 [dB]	PLSB1 [dB]
0	3,0396	-53,05	-56,71	-38,79	-22,44
1	3,1189	-51,92	-46,42	-27,99	-23,49
3	3,1612	-48,99	-27,79	-23,69	-13,29



Slika 6.9 Algoritam predloženog postupka za procenu oštećenja štapnih provodnika rotora.

Rezultati testiranja predloženog modela sa vektorom obeležja iz tabele 6.5 pregledno su izloženi u tabeli 6.6. U istoj tabeli je za različit broj provodnika u prekidu naznačena i očekivana vrednost izlaza iz neuronske mreže, te se na taj način jednostavno proverava ispravnost klasifikacije uzoraka primenom predloženog postupka. Pošto je u izlaznom sloju neuronske mreže korišćena *softmax* aktivaciona funkcija, izlazne vrednosti pojedinačnih neurona su ograničene na interval $[0, 1]$, ali je zbir vrednosti svih izlaza uvek jednak 1. Stoga se izlazne vrednosti mreže mogu interpretirati kao raspodela verovatnoće da će ulazni vektor obeležja pripadati nekoj od predefinisanih klasa iz tabele 5.1. Tako se u slučaju ulaznog vektora obeležja koji odgovara ispravnom rotoru ispitivanog motora ima verovatnoća od 99,60% da je rotor ispravan, a svega 0,4% da postoji prekid jednog provodnika. Za ulazni vektor obeležja koji odgovara rotoru sa prekidom jednog štapnog provodnika, ishod primene predloženog postupka je verovatnoća od 98,18% da je jedan provodnik u prekidu, 0,25% da su dva provodnika u prekidu i 1,57% da je rotor ispravan. U trećem slučaju (tri provodnika u prekidu) vektor obeležja je svrstan u klasu “prekid tri i više provodnika” sa verovatnoćom od 100%.

Tabela 6.6 Rezultati predloženog postupka za procenu oštećenja štapnih provodnika rotora.

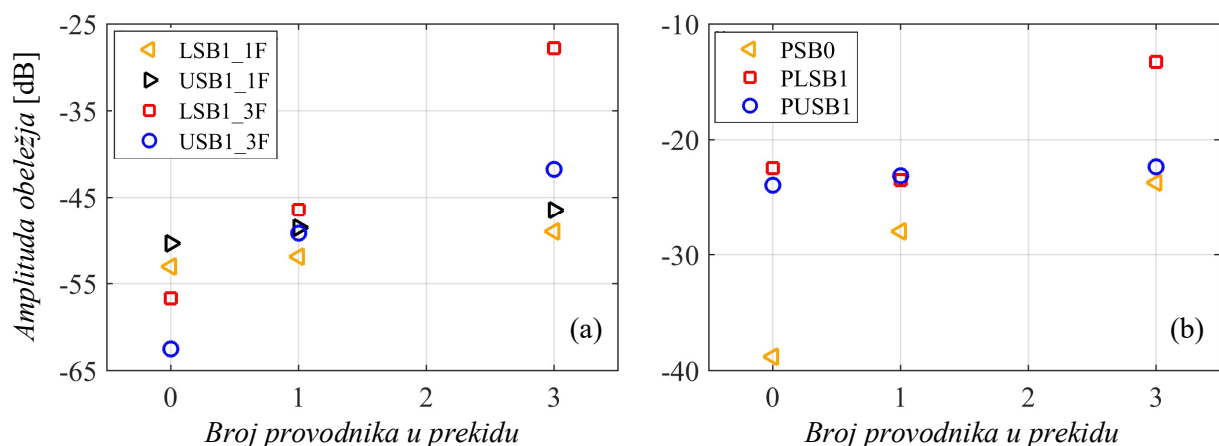
Broj rotorskih provodnika u prekidu	Očekivani izlaz neuronske mreže				Stvarni izlaz neuronske mreže			
	1	0	0	0	0,9960	0,0040	0,0000	0,0000
0	1	0	0	0	0,9960	0,0040	0,0000	0,0000
1	0	1	0	0	0,0157	0,9818	0,0025	0,0000
3	0	0	0	1	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000

Na osnovu dobijenih rezultata (tabela 6.6) može se zaključiti da, iako je neuronska mreža obučena na uzorcima dobijenim na osnovu računarskih simulacija, model daje zadovoljavajuće rezultate za posmatranu grupu uzoraka. Time se potvrđuje primenljivost predloženog postupka za procenu oštećenja provodnika rotora. Ipak, ne treba smetnuti s uma da je bitan preduslov za ispravnu klasifikaciju uzoraka upotreba većeg broja obeležja, što je ovde i učinjeno kombinujući obeležja kvara rotora iz vremenskog i frekvencijskog domena signala terminalnih veličina motora.

6.4 Završna razmatranja

Glavni cilj istraživanja u okviru disertacije jeste provera iznesene pretpostavke da se obeležja kvara rotora iz frekvencijskog domena signala terminalnih veličina trofaznog kaveznog asinhronog motora mogu identifikovati ukoliko se izvrši njegovo napajanje jednofaznim naponom, sa odgovarajućom konfiguracijom statorskih namotaja. U cilju evaluacije predložene metode, izvršena su eksperimentalne provere na proizvodnom uzorku trofaznog kaveznog asinhronog motora nazivne snage 11 kW u kojeg se pojedinačno umetao ispravan rotor, rotor sa prekidom jednog, odnosno tri susedna provodnika. Sva tri rotora su iste konstrukcije. Rezultati spektralne analize snimljenih signala struje i trenutne električne snage motora, kao i signala mehaničkih vibracija njegovog kućišta, potvrdili su u potpunosti iznete teorijske tvrdnje, tj. hipotezu istraživanja. Pokazano je da se komponente izazvane prekidom štapnih provodnika mogu identifikovati u spektru navedenih signala kod neopterećenog motora, što je osnovna prednost ove metode u odnosu na postojeće tehnike otkrivanja kvara rotora.

Budući da vrednosti pokazatelja kvara rotora rastu sa progresijom njegovog oštećenja, to se praćenjem njihovih amplituda može ustanoviti ispravnost rotorskog kaveza. U tu svrhu je korišćen postupak za procenu oštećenja štapnih provodnika koji je zasnovan na primeni veštačke neuronske mreže u prepoznavanju (klasifikaciji) uzoraka. Ulazni vektor obeležja, tj. uzoraka, čine vrednosti komponenti struje LSB1_1F i LSB1_3F, zatim vrednosti komponenti snage PSB0 i PLSB1, kao i iznos krest faktora struje. Značaj izbora relevantnih pokazatelja kvara objašnjen je u petom poglavlju, gde je navedeno da se biraju obeležja iz frekvencijskog domena koja se značajno menjaju sa porastom oštećenja rotora. Komponenta struje LSB1_3F predstavlja najvažnije obeležje kvara rotora predložene metode, jer se njena vrednost značajno menja sa porastom oštećenja rotora, što se jasno uočava na slici 6.10 (a). Na istoj slici je ilustrovana i promena iznosa komponente struje LSB1_1F. Osim komponente LSB1_3F, značajne promene beleži i komponenta snage PSB0, dok se kod komponente PLSB1 uočavaju veće promene tek sa pojavom višestrukih oštećenja rotora (tri provodnika u prekidu). Ovo je ilustrovano na slici 6.10 (b).



Slika 6.10 Obeležja kvara rotora – eksperimentalni rezultati. (a) Obeležja iz spektra signala struje motora. (b) Obeležja iz spektra signala trenutne vrednosti električne snage motora.

Konačno, vektor obeležja je proširen dodavanjem skalarnog pokazatelja kvara iz vremenskog domena iskazanog preko krest faktora struje motora. Iako se vrednost ovog obeležja nije značajnije promenila sa porastom oštećenja (za tri susedna provodnika u prekidu iznos krest faktora signala struje se povećao za približno 1,4% u odnosu na vrednost koju je imao za ispravan rotor), kombinovanjem različitih pokazatelja ostvaruje se pouzdano i pravovremeno otkrivanje kvara rotora, kao i dobra procena oštećenja štapnih provodnika, što je i potvrđeno rezultatima testiranja. Naime, eksperimentalni rezultati dobijeni primenom predloženog postupka pokazali su izuzetno visoku tačnost klasifikacije, čime je potvrđena primenljivost rešenja u otkrivanju ove vrste kvara. U predloženom postupku za ocenu stanja rotora komponente gornjih bočnih pojasa, USB1_1F, USB1_3F i PUSB1 (slika 6.10), nisu razmatrane jer amplituda ovih komponenti zavisi ne samo od stepena oštećenja rotora već i od momenta inercije motora, pa su samim tim manje pogodne za identifikaciju kvara i procenu oštećenja.

Na kraju, treba imati u vidu činjenicu da je provera iznetog postupka izvršena za ulazni vektor obeležja koji je dobijen samo na jednom ispitivanom uzorku motora. Za punu proveru predloženog postupka za procenu oštećenja štapnih provodnika rotora potrebno je analizirati veći uzorak. Osim toga, u cilju poboljšanja postupka klasifikacije i unapređenja predloženog rešenja, moguće je izvršiti povećanje dimenzionalnosti vektora obeležja dodavanjem pokazatelja kvara rotora iz spektra signala mehaničkih vibracija kućišta motora. To će, uz adekvatnu obuku predložene veštačke neuronske mreže, svakako doprineti većoj tačnosti klasifikacije.

7. ZAKLJUČAK

Naučna rasprava koja je izložena u ovoj disertaciji bavi se predlogom neinvazivne metode za pravovremeno i pouzdano otkrivanje kvara rotora trofaznog kaveznog asinhronog motora primenom tehnika analize signala terminalnih veličina motora.

Pregledom literature iz predmetne oblasti ustanovljeno je da se većina postojećih tehnika za praćenje i dijagnostiku stanja rotora zasniva na identifikaciji komponenti u spektru signala izmerenih veličina motora koje nastaju kao posledica kvara rotora. Međutim, glavna prepreka u uspešnoj primeni ovih tehnika leži u činjenici da su obeležja kvara rotora funkcija klizanja, te je otežana njihova identifikacija kod neopterećenog motora u stacionarnom stanju pogona, jer je tada klizanje blisko nuli. Hipoteza postavljena tokom izrade disertacije pretpostavlja da se pokazatelji kvara rotora iz frekvencijskog domena signala terminalnih veličina motora mogu identifikovati u stacionarnom stanju pogona ukoliko se statorski namotaji odvoje od izvora trofaznog napona, izvrši njihovo prevezivanje na red i istovremeno priključe na izvor jednofaznog napona. Na ovaj način moguće je identifikovati pokazatelje kvara rotora nezavisno od iznosa momenta opterećenja. Pretpostavka je izneta na osnovu rezultata opsežnih teorijskih analiza i predstavlja osnov metode koja je u okviru disertacije predložena za otkrivanje kvara rotora. Efikasnost metode potvrđena je računarskim simulacijama nad razvijenim modelom mašine sa kvarom rotora, a potom je izvršena i eksperimentalna verifikacija, čime je potvrđena hipoteza istraživanja. Metoda nije invazivna i ne zahteva terećenje ispitivanog motora, što su njene osnovne prednosti. Osim toga, ispitivanjem neopterećenog motora lako se ostvaruje neophodno stacionarno stanje pogona (što je inače teško obezbediti u industrijskim pogonima kada je motor opterećen) i umnogome se izbegavaju mehanički izvori smetnji čiji bi uticaj mogao dovesti do pogrešnih zaključaka u vezi sa oštećenjem rotora. Nadalje, predloženom metodom se na jednostavan način može izvršiti provera kvaliteta izrade novih i stanja remontovanih motora. Sa praktičnog aspekta, metoda je posebno interesantna kod elektromotornih pogona sa sistemom pokretanja zvezda-trougao, jer su u tom slučaju svi priključni krajevi motora izvedeni do napojnog ormana. Naravno, ovo ne umanjuje opštost predložene metode.

Dodatni doprinos istraživanja predstavlja izneti predlog postupka za kvantitativnu procenu iznosa oštećenja štapnih provodnika, a koji je zamišljen kao unapređenje izložene metode za rano otkrivanje kvara rotora. Dati postupak se oslanja na primenu neuronske mreže za klasifikaciju. Zadatak obučene mreže je da na osnovu odabranih obeležja signala kvara rotora izvrši grupisanje stanja štapnih provodnika rotora u više klasa. Korišćena su četiri binarna klasifikatora koji opisuju: ispravan rotor, rotor sa prekidom jednog provodnika, rotor sa prekidom dva provodnika i rotor sa prekidom tri i više provodnika. Mreža je testirana na skupu relevantnih obeležja kvara rotora koji su dobijeni numeričkom obradom snimljenih signala terminalnih veličina ispitivanog motora. Za izabranu konfiguraciju neuronske mreže i sva tri sprovedena testa postignuta je visoka tačnost klasifikacije. Time je ukazano na mogućnost uspešne primene neuronskih mreža u okviru sistema za pouzdanu i pravovremenu detekciju kvara rotora. Predloženi pristup nudi i tu prednost što se od krajnjeg korisnika ne zahteva nivo ekspertskeg znanja u predmetnoj oblasti. Dalje je moguće automatizovati proces identifikacije oštećenja provodnika rotora, što će smanjiti cenu ispitivanja, ali i izbeći izvođenja pogrešnih zaključaka, što je čest slučaj u praksi. Na taj način bi se učinio iskorak u strategiji prediktivnog održavanja asinhronih motora kao bitnih elemenata u industrijskim sistemima.

Praktičnu implementaciju predložene metode moguće je unaprediti svodeći se na jednofazni sistem napajanja isključenjem jedne faze izvora napajanja. Prednost ovakvog načina izvedbe predložene metode za detekciju kvara rotora ogleda se u tome da nije nužno vršiti promenu topologije statorskih namotaja, čime bi se izbegla i upotreba pomoćnog izvora napajanja. Takođe, predložena metoda neinvazivne dijagnostike stanja štapnih provodnika rotora može biti dopunjena uvođenjem dodatnih pokazatelja u proces detekcije kvara. Svakako, treba voditi računa da se prilikom uvođenja pokazatelja biraju samo oni koji će doprineti preciznosti i pouzdanosti detekcije, ali tako da je prošireni skup obeležja moguće obraditi u realnom vremenu.

Dalji pravci istraživanja u ovoj oblasti se mogu usmeriti na otkrivanje kvara rotora kod pogona napajanih uređajima energetske elektronike. Ovim nisu iscrpljene sve mogućnosti, s obzirom na to da pretvarači energetske elektronike omogućavaju razvoj novih metoda detekcije kvara rotora, zasnovanih na različitim tehnikama modulacije izlaznih veličina. Ova problematika predstavlja atraktivnu oblast istraživanja, a rešenja mogu biti primenjena ne samo u pogonima savremenih industrijskih sistema, već i u oblasti pogona električnih automobila i obnovljivih izvora električne energije.

8. LITERATURA

- [1] R Crowder: *Electric Drives and Electromechanical Systems*, 1st edition, Elsevier, Oxford, Great Britain, 2006.
- [2] B. Ayhan, H. J. Trussell, M. Y. Chow, and M. H. Song, "On the Use of a Lower Sampling Rate for Broken Rotor Bar Detection With DTFT and AR-Based Spectrum Methods," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 3, pp. 1421–1434, Mar. 2008.
- [3] S. K. Bhattacharya: *Electrical machines*, 3rd edition, Tata McGraw-Hill Education, New Delhi, India, 2009.
- [4] M. E. H. Benbouzid and G. B. Kliman, "What stator current processing based technique to use for induction motor rotor faults diagnosis?" *IEEE Trans. on Energy Conv.*, vol. 18, no. 2, pp. 238-244, Jun. 2003.
- [5] M. T. Güneşer, A. Dalcali, T. Öztürk, C. Ocak, and M. Cernat, "An induction motor design for urban use electric vehicle," in *2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, 2016, pp. 261-266.
- [6] A. K. Singh, A. Dalal, and P. Kumar, "Analysis of induction motor for electric vehicle application based on drive cycle analysis," in *2014 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, 2014, pp. 1-6.
- [7] S. Liwei, Z. Wei, Z. Chunbo, L. Weiliang, and C. Shukang, "The research of induction motor driving system for hybrid electric vehicle," in *2006 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2006, pp. 1-4.
- [8] M Haji, H. A. Toliyat, "Pattern Recognition – A Technique for Induction Machines Rotor Broken Bar Detection," *IEEE Trans. on Energy Conv.*, vol. 16, no. 4, pp. 312-317, Dec. 2001.
- [9] D. Z. Li, W. Wang, and F. Ismail, "A Spectrum Synch Technique for Induction Motor Health Condition Monitoring," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 30, no. 4, pp. 1348-1355, Dec. 2015.
- [10] M. E. H. Benbouzid, "A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 47, no. 5, pp. 984-993, Oct. 2000.
- [11] P. Vas: *Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical machines*, Clarendon Press, Oxford, United Kingdom, 1993.
- [12] S. Nandi, H. A. Toliyat, X. Li, "Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors – A Review, " *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, no. 4, pp. 719-729, Dec. 2005.

-
- [13] P. J. Tavner, "Review of condition monitoring of rotating electrical machines," *IET Elect. Power Appl.*, vol. 2, no. 4, pp. 215-247, 2008.
- [14] M. A. Awadallah and M. M. Morcos, "Application of AI tools in fault diagnosis of electrical machines and drives-an overview," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 18, no. 2, pp. 245-251, Jun. 2003.
- [15] "Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations, Part II," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-21, no. 4, pp. 865-872, Jul. 1985.
- [16] P. F. Albrecht, J. C. Appiarius, R. M. McCoy, E. L. Owen, and D. K. Sharma, "Assessment of the Reliability of Motors in Utility Applications - Updated," *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. PER-6, no. 3, pp. 31-32, Mar. 1986.
- [17] P. Zhang, Y. Du, T. G. Habetler, and B. Lu, "A survey of condition monitoring and protection methods for medium voltage induction motors," in *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2009, pp. 3165-3174.
- [18] A. Bellini, F. Filippetti, C. Tassoni, and G. A. Capolino, "Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 12, pp. 4109-4126, Dec. 2008.
- [19] A.B. Sasi, F. Gu, Y. Li, A.D. Ball, "A validated model for the prediction of rotor bar failure in squirrel-cage motors using instantaneous angular speed," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20, no. 7, pp.1572-1589, 2006.
- [20] A. H. Bonnett and G. C. Soukup, "Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 28, no. 4, pp. 921-937, Jul. 1992.
- [21] A. Miletić: Dijagnostičke metode i kriteriji za ocjenu elektromehaničkog stanja asinkronog stroja, magistarski rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, Hrvatska, 2002.
- [22] M. R. Mehrjou, N. Mariun, M. Hamiruce Marhaban, and N. Misron, "Rotor fault condition monitoring techniques for squirrel-cage induction machine – A review," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 25, no. 8, pp. 2827-2848, Nov. 2011.
- [23] M. Seera, C. P. Lim, D. Ishak, and H. Singh, "Offline and online fault detection and diagnosis of induction motors using a hybrid soft computing model," *Appl. Soft Comput.*, vol. 13, no. 12, pp. 4493–4507, Dec. 2013.
- [24] N. Tandon and A. Choudhury, "A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings," *Tribol. Int.*, vol. 32, no. 8, pp. 469-480, Aug. 1999.
- [25] R. S. Curiac, S. Singhal, "Magnetic noise in induction motors," in *Proceedings of NoiseCon2008-ASME NCAD*, 2008, pp.1-5.
- [26] P. Tavner, L. Ran, J. Penman and H. Sedding: Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines, The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, 2008.
- [27] A. Garcia-Perez, R. J. Romero-Troncoso, E. Cabal-Yepez, R. A. Osornio-Rios, and J. A. Lucio-Martinez, "Application of high-resolution spectral analysis for identifying faults in induction motors by means of sound," *J. Vib. Control*, vol. 18, no. 11, pp. 1585-1594, Oct. 2012.
- [28] D.-H. Seo, J.-H. Jeon, and Y.-H. Kim, "A novel sensing method of fault in moving machine," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 45, no. 1, pp. 154-169, Mar. 2014.
- [29] A. J. Ellison and S. J. Yang, "Effects of rotor eccentricity on acoustic noise from induction machines," *Proc. Inst. Electr. Eng.*, vol. 118, no. 1, pp. 174-184, Jan. 1971.
- [30] A. Glowacz, "Diagnostics of DC and Induction Motors Based on the Analysis of Acoustic Signals," *Meas. Sci. Rev.*, vol. 14, no. 5, pp. 257-262, Jan. 2014.
-

-
- [31] E. Germen, M. Bařaran, and M. Fidan, "Sound based induction motor fault diagnosis using Kohonen self-organizing map," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 46, no. 1, pp. 45-58, May 2014.
- [32] H. Akçay and E. Germen, "Identification of acoustic spectra for fault detection in induction motors," in *2013 Africon*, 2013, pp. 1-5.
- [33] P. A. Delgado-Arredondo, D. Morinigo-Sotelo, R. A. Osornio-Rios, J. G. Avina-Cervantes, H. Rostro-Gonzalez, and R. de J. Romero-Troncoso, "Methodology for fault detection in induction motors via sound and vibration signals," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 83, pp. 568-589, Jan. 2017.
- [34] W. Li, "Detection of Induction Motor Faults: A Comparison of Stator Current, Vibration and Acoustic Methods," *J. Vib. Control*, vol. 12, no. 2, pp. 165-188, Feb. 2006.
- [35] A. Gaylard, A. Meyer, and C. Landy, "Acoustic evaluation of faults in electrical machines," in *1995 Seventh International Conference on Electrical Machines and Drives (Conf. Publ. No. 412)*, 1995, pp. 147-150.
- [36] S. P. Verma and W. Li, "Measurement of vibrations and radiated acoustic noise of electrical machines," in *Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2003.*, 2003, vol. 2, pp. 861-866.
- [37] S.P. Verma, "Noise and vibrations of electrical machines and drives; their procedure and means of reduction," in *Proceedings of the International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth*, vol. 2, 1996, pp. 1031-1037.
- [38] C. Kral et al., "A comparison of rotor fault detection techniques with respect to the assessment of fault severity," in *4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED 2003.*, 2003, pp. 265-270.
- [39] A. Glowacz and Z. Glowacz, "Diagnostics of stator faults of the single-phase induction motor using acoustic signals," *Applied Acoustics*, vol. 117, no. A, pp. 20-27, Feb. 2017.
- [40] Bajrić Rusimir: Prilog identifikaciji oštećenja zupčastih parova primenom tehnika analize signala mehaničkih vibracija, doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija, 2016.
- [41] Zuber Ninoslav: Automatizacija identifikacije otkaza rotirajućih mašina analizom mehaničkih vibracija, doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija, 2010.
- [42] C. Wang and R. X. Gao, "Sensor placement strategy for in-situ bearing defect detection," in *Proceedings of the 17th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2000, vol. 3, pp. 1463-1467.
- [43] F. C. Trutt, J. Sottile, and J. L. Kohler, "Condition monitoring of induction motor stator windings using electrically excited vibrations," in *Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference*, 2002, vol. 4, pp. 2301-2305.
- [44] P. J. McCully, C. F. Landy, "Evaluation of current vibration signals for squirrel cage induction motors condition monitoring," in *Proceedings of the Eighth International IEE Conference on Electrical Machines and Drives*, 1997, pp. 331-355.
- [45] I. Kerszenbaum and C. F. Landy, "The existence of large inter-bar currents in three phase squirrel cage motors with rotor-bar and/or end-ring faults," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-103, pp. 1854-1861, July 1984.
- [46] G. H. Muller and C. F. Landy, "A novel method to detect broken rotor bars in squirrel cage induction motors when interbar currents are present," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 18, no. 1, pp. 71-79, Mar. 2003.
-

-
- [47] Ž. Kanović, D. Matić, Z. Jeličić, M. Rapaić, B. Jakovljević, and M. Kapetina, "Induction motor broken rotor bar detection using vibration analysis – A case study," in *9th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, 2013, pp. 64–68.
- [48] Y. Gritli, A. O. D. Tommaso, R. Miceli, F. Filippetti, and C. Rossi, "Closed-loop bandwidth impact on MVSA for rotor broken bar diagnosis in IRFOC double squirrel cage induction motor drives," in *2013 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, 2013, pp. 529-534.
- [49] G. Betta, C. Liguori, A. Paolillo, and A. Pietrosanto, "A DSP-based FFT-analyzer for the fault diagnosis of rotating machine based on vibration analysis," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 51, no. 6, pp. 1316-1321, Dec. 2002.
- [50] J. Rangel-Magdaleno, H. Peregrina-Barreto, J. Ramirez-Cortes, R. Morales-Caporal, and I. Cruz-Vega, "Vibration Analysis of Partially Damaged Rotor Bar in Induction Motor under Different Load Condition Using DWT," *Shock Vib.*, vol. 2016, pp. 1-11, 2016.
- [51] R. Yan, R. X. Gao, and X. Chen, "Wavelets for fault diagnosis of rotary machines: a review with applications," *Signal Processing*, vol. 96, no. A, pp. 1–15, March 2014.
- [52] R. Miceli, Y. Gritli, A. di Tommaso, F. Filippetti, and C. Rossi, "Vibration signature analysis for monitoring rotor broken bar in double squirrel cage induction motors based on wavelet analysis," *COMPEL*, vol. 33, no. 5, pp. 1625-1641, 2014.
- [53] P. A. Delgado-Arredondo et al., "Comparative Study of Time-Frequency Decomposition Techniques for Fault Detection in Induction Motors Using Vibration Analysis during Startup Transient," *Shock Vib.*, vol. 2015, pp. 1-14, 2015.
- [54] G. F. Bin, J. J. Gao, X. J. Li, and B. S. Dhillon, "Early fault diagnosis of rotating machinery based on wavelet packets – empirical mode decomposition feature extraction and neural network," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 27, no. 1, pp. 696-711, 2012.
- [55] H. Su, K. T. Chong, and R. Ravi Kumar, "Vibration signal analysis for electrical fault detection of induction machine using neural networks," *Neural Computing and Applications*, vol. 20, no. 2, pp. 183–194, 2011.
- [56] D. P. Winston and M. Saravanan, "Single parameter fault identification technique for DC motor through wavelet analysis and fuzzy logic," *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 8, no. 5, pp. 1049–1055, 2013.
- [57] D. Matić, F. Kulić, M. Pineda-Sanchez, I. Kamenko, "Support vector machine classifier for diagnosis in electrical machines: Application to broken bar", *Expert Systems with Applications*, vol. 39, no. 10, pp. 8681-8689, 2012.
- [58] Željko Kanović: Modifikacija algoritma optimizacije rojem čestica sa primenom u detekciji kvarova na objektima automatskog upravljanja sa kontinualnom dinamikom, doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija, 2012.
- [59] Dragan Matić: Detekcija otkaza tipa slomljene šipke kod asinhronih motora primenom metoda računarske inteligencije, doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija, 2012.
- [60] L. Li, C. K. Mechevske, and W. Li, "Electric motor faults diagnosis using artificial neural networks," *Insight - Non-Destr. Test. Cond. Monit.*, vol. 46, no. 10, pp. 616-621, Oct. 2004.
- [61] D. Camarena-Martinez, M. Valtierra-Rodriguez, J. P. Amezquita-Sanchez, D. Granados-Lieberman, R. J. Romero-Troncoso, and A. Garcia-Perez, "Shannon Entropy
-

- and K -Means Method for Automatic Diagnosis of Broken Rotor Bars in Induction Motors Using Vibration Signals,” *Shock Vib.*, vol. 2016, pp. 1-10, 2016.
- [62] I. Aydin, M. Karakose, and E. Akin, “Artificial immune based support vector machine algorithm for fault diagnosis of induction motors,” in *2007 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics*, 2007, pp. 217-221.
- [63] S. Pöyhönen, P. Jover, and H. Hyötyniemi, “Independent component analysis of vibrations for fault diagnosis of an induction motor,” in *Proceedings of the IASTED International Conference*, 2003, pp. 203-208.
- [64] J. S. Hsu, H. H. Woodson, and W. F. Weldon, “Possible errors in measurement of air-gap torque pulsations of induction motors,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 7, no. 1, pp. 202-208, Mar. 1992.
- [65] J. S. Hsu, “Monitoring of defects in induction motors through air-gap torque observation,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 31, no. 5, pp. 1016-1021, Sep. 1995.
- [66] R. S. Wieser, M. Schagginger, C. Kral, and F. Pirker, “The integration of machine fault detection into an indirect field oriented induction machine drive control scheme-the Vienna Monitoring Method,” in *Conference Record of 1998 IEEE Industry Applications Conference*, 1998, vol. 1, pp. 278-285.
- [67] R. Wieser, C. Kral, F. Pirker, and M. Schagginger, “On-line rotor cage monitoring of inverter-fed induction machines by means of an improved method,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 14, no. 5, pp. 858-865, Sep. 1999.
- [68] C. Kral, F. Pirker, and G. Pascoli, “Detection of rotor faults in squirrel-cage induction machines at standstill for batch tests by means of the Vienna monitoring method,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 38, no. 3, pp. 618-624, May 2002.
- [69] C. Kral, F. Pirker, and G. Pascoli, “Model-based detection of rotor faults without rotor position sensor-the sensorless Vienna monitoring method,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 41, no. 3, pp. 784-789, May 2005.
- [70] A. M. da Silva, R. J. Povinelli, and N. A. O. Demerdash, “Rotor Bar Fault Monitoring Method Based on Analysis of Air-Gap Torques of Induction Motors,” *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 9, no. 4, pp. 2274-2283, Nov. 2013.
- [71] A. Bellini, F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, and G. B. Kliman, “Quantitative evaluation of induction motor broken bars by means of electrical signature analysis,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 37, no. 5, pp. 1248-1255, Sep. 2001.
- [72] B.E. Gaydon, “An instrument to detect induction motor rotor circuit defects by speed fluctuation measurements,” in *Proceedings of the Electric Test and Measuring Equipment Conference*, 1979, pp. 5-8.
- [73] A. Ben Sasi, B.S. Payne, F. Gu, A.D. Ball, “The exploitation of instantaneous angular speed for condition monitoring of electric motors,” in *Proceedings of the 14th International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management (COMADEM 2001)*, 2001, pp. 311-318.
- [74] A. Yousef Ben Sasi, F. Gu, B. Payne, and A. Ball, “Instantaneous angular speed monitoring of electric motors,” *J. Qual. Maint. Eng.*, vol. 10, no. 2, pp. 123-135, Jun. 2004.
- [75] V. Ghorbanian and J. Faiz, “A survey on time and frequency characteristics of induction motors with broken rotor bars in line-start and inverter-fed modes,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 54-55, pp. 427-456, Mar. 2015.
- [76] P.J. Sweeney, R.B. Randall, “Sources of gear signal modulation,” in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1995, pp. 183-198.
- [77] O. V. Thorsen and M. Dalva, “Failure identification and analysis for high-voltage induction motors in the petrochemical industry,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 35, no. 4, pp. 810-818, Jul. 1999.

-
- [78] N. M. Elkasabgy, A. R. Eastham, and G. E. Dawson, "Detection of broken bars in the cage rotor on an induction machine," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 28, no. 1, pp. 165-171, Jan. 1992.
- [79] A. Yazidi, H. Henao, and G. A. Capolino, "Broken rotor bars fault detection in squirrel cage induction machines," in *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives*, 2005, pp. 741-747.
- [80] K. Bacha, H. Henao, M. Gossa, and G.-A. Capolino, "Induction machine fault detection using stray flux EMF measurement and neural network-based decision," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 78, no. 7, pp. 1247-1255, Jul. 2008.
- [81] Žarko Janda, Marko Janković, Mladen Milošević, Blagota Jovanović, "Napredna dijagnostika ekscentriciteta i loma kaveza visokonaponskih asinhronih motora," *Zbornik radova, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“*, vol.22, pp. 235-249, 2012.
- [82] S. Nandi, H. A. Toliyat, "Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Machines – A Review," in *IEEE Industry Applications Conference*, 1999, pp. 197-204.
- [83] K. Bacha, H. Henaob, M. Gossa, G. A. Capolino, "Induction machine fault detection using stray flux EMF measurement and neural network-based decision," *Electric Power Systems Research*, vo. 78, no. 7, pp. 1247-1255, Jul. 2008.
- [84] P. Bikfalvi, M. Imecs, "Rotor fault detection in induction machines: Methods and techniques – State-of-the-Art," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics*, 2006, pp.199-204.
- [85] I. Gavranić: Dijagnostika protueksplozijski zaštićenih elektromotornih pogona, magistarski rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, Hrvatska, 2002.
- [86] A. Korde, "On-Line Condition Monitoring of Motors Using Electrical Signature Analysis," in *Recent Advances in Condition Based Plant Maintenance*, 2002, pp. 1-10.
- [87] J. A. Antonino-Daviu, M. Riera-Guasp, J. R. Folch, and M. P. M. Palomares, "Validation of a new method for the diagnosis of rotor bar failures via wavelet transform in industrial induction machines," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 42, no. 4, pp. 990-996, Aug. 2006.
- [88] 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 Trans. Energy Convers.*, vol. 3, no. 4, pp. 873–879, Dec. 1988.
- [89] G. Didier, E. Ternisien, O. Caspary, and H. Razik, "A new approach to detect broken rotor bars in induction machines by current spectrum analysis," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 21, no. 2, pp. 1127-1142, Feb. 2007.
- [90] J. M. B. Siau, A. L. Graff, W. L. Soong, and N. Ertugrul, "Broken bar detection in induction motors using current and flux spectral analysis," *Aust. J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 1, no. 3, pp. 171-177, 2004.
- [91] G.G. Acosta, C.J. Verucchi, E.R. Gelso, "A current monitoring system for diagnosing electrical failures in induction motors," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 20, no. 4, pp. 953-965, 2006.
- [92] F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, and P. Vas, "AI techniques in induction machines diagnosis including the speed ripple effect," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 34, no. 1, pp. 98-108, Jan. 1998.
- [93] S. L. Sin, W. L. Soong, N. Ertugrul, "Induction Machine On-line Condition Monitoring and Fault Diagnosis – A Survey," in *Australasian Universities Power Engineering Conference*, 2003, pp. 1-6.
- [94] R. Hirvonen, "On-line condition monitoring of defects in squirrel cage motors," in *Proc. 1994 Int. Conf. Electrical Machines*, 1994, pp. 267–272.
-

-
- [95] W. T. Thomson and M. Fenger, "Current signature analysis to detect induction motor faults," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 7, no. 4, pp. 26-34, Jul. 2001.
- [96] D. Reljić, D. Matić, Đ. Oros: Izveštaj o izvršenim merenjima na visokonaponskim elektromotorima napojnih pumpi kotlova K1 i K2 u TE-TO Zrenjanin, Novi Sad, 2012.
- [97] C. Hargis, B. Gaydon, K. Kamash, "The detection of rotor defects in induction motors, in Proceedings of the IEE Conference Electrical Machine," 1982, pp. 216-220.
- [98] F. Filippetti, M. Martelli, G. Franceschini, and C. Tassoni, "Development of expert system knowledge base to on-line diagnosis of rotor electrical faults of induction motors," in *Conference Record of the 1992 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1992, pp. 92-99.
- [99] C. Bruzzese, O. Honorati, E. Santini, and D. Sciunnache, "New Rotor Fault Indicators for Squirrel Cage Induction Motors," in *Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference*, 2006, vol. 3, pp. 1541-1548.
- [100] A. Bellini et al., "On-field experience with online diagnosis of large induction motors cage failures using MCSA," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 38, no. 4, pp. 1045-1053, Jul. 2002.
- [101] Knežević Jovan: Novi metod za analizu harmonijskog izobličenja signala kod ocene kvaliteta električne energije, doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija, 2016.
- [102] M. E. H. Benbouzid, M. Vieira, and C. Theys, "Induction motors' faults detection and localization using stator current advanced signal processing techniques," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 14, no. 1, pp. 14-22, Jan. 1999.
- [103] G. Didier, E. Ternisien, O. Caspary, and H. Razik, "Fault detection of broken rotor bars in induction motor using a global fault index," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 42, no. 1, pp. 79-88, Jan. 2006.
- [104] I. M. Culbert and W. Rhodes, "Using Current Signature Analysis Technology to Reliably Detect Cage Winding Defects in Squirrel-Cage Induction Motors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 43, no. 2, pp. 422-428, Mar. 2007.
- [105] M. Aiello, A. Cataliotti, and S. Nuccio, "An induction motor speed measurement method based on current harmonic analysis with the chirp-Z transform," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 54, no. 5, pp. 1811-1819, Oct. 2005.
- [106] A. Yazidi, H. Henao, G. A. Capolino, M. Artioli, and F. Filippetti, "Improvement of frequency resolution of three-phase induction machine fault diagnosis," in *Proc. 40th IAS Ann. Meeting Conf. Rec.*, Oct. 2005, pp. 20-25.
- [107] A. Bellini, F. Filippetti, D. Casadei, A. Yazidi, and G. A. Capolino, "Monitoring of induction machines currents by high frequency resolution analysis," in *Proc. 41st IAS Ann. Meeting. Conf. Rec.*, Oct. 2006, pp. 2320-2325.
- [108] S. H. Kia, H. Henao, and G. A. Capolino, "A High-Resolution Frequency Estimation Method for Three-Phase Induction Machine Fault Detection," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 4, pp. 2305-2314, Aug. 2007.
- [109] A. Bellini, G. Franceschini, and C. Tassoni, "Monitoring of induction machines by maximum covariance method for frequency tracking," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 42, no. 1, pp. 69-78, Jan./Feb. 2006.
- [110] J. H. Jung, J. J. Lee, and B. H. Kwon, "Online diagnosis of induction motors using MCSA," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 6, pp. 1842-1852, Dec. 2006.
- [111] A. Bellini, A. Yazidi, F. Filippetti, C. Rossi, and G. A. Capolino, "High frequency resolution techniques for rotor fault detection of induction machines," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 12, pp. 4200-4209, Dec. 2008.
-

-
- [112] H. Douglas, P. Pillay, and A. K. Ziarani, "Broken rotor bar detection in induction machines with transient operating speeds," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 20, no. 1, pp. 135-141, Mar. 2005.
- [113] R. Puche-Panadero, M. Pineda-Sanchez, M. Riera-Guasp, J. Roger-Folch, E. Hurtado-Perez, and J. Perez-Cruz, "Improved Resolution of the MCSA Method Via Hilbert Transform, Enabling the Diagnosis of Rotor Asymmetries at Very Low Slip," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 24, no. 1, pp. 52-59, Mar. 2009.
- [114] J. A. Antonino-Daviu, M. Riera-Guasp, J. R. Folch, and M. P. M. Palomares, "Validation of a new method for the diagnosis of rotor bar failures via wavelet transform in industrial induction machines," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 42, no. 4, pp. 990-996, Jul. 2006.
- [115] Z. Ye, A. Sadeghian, B. Wu, "Mechanical fault diagnostics for induction motor with variable speed drives using Adaptive Neuro-fuzzy Inference System," *Electric Power Systems Research*, vol 76, no. 9-10, pp. 742-752, 2006.
- [116] F. Cupertino, E. de Vanna, L. Salvatore, and S. Stasi, "Comparison of spectral estimation techniques applied to induction motor broken bars detection," in *Proc. IEEE SDEMPED*, 2003, pp. 129-134.
- [117] B. Ayhan, H. J. Trussell, M.-Y. Chow, and M.-H. Song, "On the use of a lower sampling rate for broken rotor bar detection with DTFT and AR-based spectrum methods," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 3, pp. 1421-1434, Mar. 2008.
- [118] A. Garcia-Perez, R. J. Romero-Troncoso, E. Cabal-Yepez, and R. A. Osornio-Rios, "The application of high-resolution spectral analysis for identifying multiple combined faults in induction motors," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 5, pp. 2002-2010, May 2011.
- [119] A. L. Swindlehurst, B. Ottersten, R. Roy, and T. Kailath, "Multiple invariance ESPRIT," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 40, no. 4, pp. 867-881, Apr. 1992.
- [120] Y. H. Kim, Y. W. Youn, D. H. Hwang, J. H. Sun, D. S. Kang, "High-resolution parameter estimation method to identify broken rotor bar faults in induction motors," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 9, pp. 4103-4117, Sept. 2013.
- [121] M. Pineda-Sanchez et al., "Application of the Teager-Kaiser Energy Operator to the Fault Diagnosis of Induction Motors," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 28, no. 4, pp. 1036-1044, Dec. 2013.
- [122] M. Pineda-Sanchez, J. Perez-Cruz, J. Roger-Folch, M. Riera-Guasp, A. Sapena-Bano, and R. Puche-Panadero, "Diagnosis of induction motor faults using a DSP and advanced demodulation techniques," in *Proc. IEEE Int. SDEMPED*, 2013, pp. 69-76.
- [123] I. Aydin, M. Karakose, E. Akin, "A new method for early fault detection and diagnosis of broken rotor bars," *Energy Conversion and Management*, vol. 52, no. 4, pp. 1790-1799. April 2011.
- [124] B. Xu, L. Sun, L. Xu and G. Xu, "Improvement of the Hilbert Method via ESPRIT for Detecting Rotor Fault in Induction Motors at Low Slip," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 28, no. 1, pp. 225-233, March 2013.
- [125] L. Saidi, F. Fnaiech, G-A. Capolino, H. Henao, "Diagnosis of broken bars fault in induction machines using higher order spectral analysis," *ISA Transactions*, vol. 52, pp. 140-148, Jan. 2013.
- [126] A. J. M. Cardoso, S. M. A. Cruz, J. F. S. Carvalho, and E. S. Saraiva, "Rotor cage fault diagnosis in three-phase induction motor by Park's vector approach," in *Proc. IEEE-IAS Annu. Meeting*, 1995, pp. 642-646.
- [127] J. Zarei, H. Hassani, Z. Wei, and H. R. Karimi, "Broken rotor bars detection via Park's vector approach based on ANFIS," in *2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2014, pp. 2422-2426.
-

- [128] S. Bouslimani, S. Drid, L. Chrifi-Alaoui, P. Bussy, M. Ouriagli, and L. Delahoche, "An extended Park's vector approach to detect broken bars faults in Induction Motor," in *15th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, 2014, pp. 411-416.
- [129] S. M. A. Cruz, A. J. Marques Cardoso, "Rotor Cage Fault Diagnosis in Three-Phase Induction Motors by Extended Park's Vector Approach," *Electr. Mach. Power Syst.*, vol. 28, no. 4, pp. 289-299, Apr. 2000.
- [130] J. Zhang, N. Zhu, L. Yang, Q. Yao, and Q. Lu, "A Fault Diagnosis Approach for Broken Rotor Bars Based on EMD and Envelope Analysis," *J. China Univ. Min. Technol.*, vol. 17, no. 2, pp. 205-209, Jun. 2007.
- [131] W.T. Thomson, N.D. Deans, R.A. Leonard, A.J. Milne, "Monitoring strategy for discriminating between different types of rotor defects in induction motors," in *Proceedings of the University Power Engineering Conference*, 1983, pp. 241-246.
- [132] S. Elder, J.F. Watson, W.T. Thomson, "Fault detection in induction motors as a result of transient analysis," in *Proceedings of the Fourth International Conference Electrical Machines and Drives*, 1989, pp. 182-186.
- [133] F. Briz, M. W. Degner, P. Garcia, and D. Bragado, "Broken Rotor Bar Detection in Line-Fed Induction Machines Using Complex Wavelet Analysis of Startup Transients," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 44, no. 3, pp. 760-768, May 2008.
- [134] I. P. Tsoumas, G. Georgoulas, E. D. Mitronikas, and A. N. Safacas, "Asynchronous Machine Rotor Fault Diagnosis Technique Using Complex Wavelets," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 23, no. 2, pp. 444-459, Jun. 2008.
- [135] H. Douglas, P. Pillay, A. Ziarani, "A new algorithm for transient motor current signature analysis using wavelets," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 40, no. 5, pp. 1361-1368, Sept. 2004.
- [136] B. Yazici and G. B. Kliman, "An adaptive statistical time-frequency method for detection of broken bars and bearing faults in motors using stator current," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 35, no. 2, pp. 442-452, Mar./Apr. 1999.
- [137] H. Keskes and A. Braham, "Recursive Undecimated Wavelet Packet Transform and DAG SVM for Induction Motor Diagnosis," *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 11, no. 5, pp. 1059-1066, Oct. 2015.
- [138] M. Riera-Guasp, J. A. Antonino-Daviu, M. Pineda-Sanchez, R. Puche-Panadero, and J. Perez-Cruz, "A general approach for the transient detection of slip-dependent fault components based on the discrete wavelet transform," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 12, pp. 4167-4180, Dec. 2008.
- [139] J. Pons-Llinares, J. A. Antonino-Daviu, M. Riera-Guasp, M. Pineda-Sanchez, and V. Climente-Alarcon, "Induction Motor Diagnosis Based on a Transient Current Analytic Wavelet Transform via Frequency B-Splines," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 5, pp. 1530-1544, May 2011.
- [140] A. Sapena-Bañó, M. Pineda-Sanchez, R. Puche-Panadero, J. Martinez-Roman, and D. Matic, "Fault diagnosis of rotating electrical machines in transient regime using a single stator current's FFT," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 64, no. 11, pp. 3137-3146, Nov. 2015.
- [141] M. Pineda-Sanchez, M. Riera-Guasp, J. A. Antonino-Daviu, J. Roger-Folch, J. Perez-Cruz, and R. Puche-Panadero, "Instantaneous Frequency of the Left Sideband Harmonic During the Start-Up Transient: A New Method for Diagnosis of Broken Bars," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 11, pp. 4557-4570, Nov. 2009.
- [142] D. Matic, Ž. Kanović, D. Reljić, F. Kulić, D. Oros, and V. Vasić, "Broken bar detection using current analysis – A case study," in *9th IEEE International Symposium*

- on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, 2013, pp. 407-411.
- [143] D. Matić, Ž. Kanović, V. Bugarski, F. Kulić, D. Reljić, Đ. Oros, V. Vasić, “Detection of the Broken Bar Fault. A Case Study for a 3.2 MW Induction Motor,” *Journal on Processing and Energy in Agriculture*, vol. 17, no. 3, pp. 134-137, 2013.
- [144] D. Matić, Ž. Kanović, F. Kulić, D. Reljić, Đ. Oros, V. Vasić, “Induction Motor Broken Bar Detection for a Thermal Power-Plant Application. A Case Study,” *Elektrotehniški vestnik*, vol. 80, no. 1-2, pp. 45-49, 2013.
- [145] V. Lazarević, D. Reljić, D. Matić, “Dijagnostika kvara visokonaponskog asinhronog motora analizom signala struje statora – primer iz prakse,” *32. savetovanje Cigre Srbija*, 2015, str. A1 11 1-8.
- [146] Q. Qiu Arui, “Diagnosis of rotor fault in squirrel cage induction motors using time-varying frequency spectrum of starting stator current,” in *Proc. Chinese Soc. Elect. Eng.*, vol. 15, Jul. 1995, pp. 267-273
- [147] M. Pineda-Sanchez, M. Riera-Guasp, J. Roger-Folch, J. A. Antonino-Daviu, J. Perez-Cruz, and R. Puche-Panadero, “Diagnosis of Induction Motor Faults in Time-Varying Conditions Using the Polynomial-Phase Transform of the Current,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 4, pp. 1428-1439, Apr. 2011.
- [148] V. Climente-Alarcon, J. A. Antonino-Daviu, M. Riera-Guasp, R. Puche-Panadero, and L. Escobar, “Application of the Wigner–Ville distribution for the detection of rotor asymmetries and eccentricity through high-order harmonics,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 91, pp. 28-36, Oct. 2012.
- [149] M. E. K. Oumaamar, A. Khezzer, M. Boucherma, H. Razik, R. N. Andriamalala, and L. Baghli, “Neutral Voltage Analysis for Broken Rotor Bars Detection in Induction Motors Using Hilbert Transform Phase,” in *2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting*, 2007, pp. 1940-1947.
- [150] A. Khezzer, M. E. K. Oumaamar, M. Hadjami, M. Boucherma, and H. Razik, “Induction Motor Diagnosis Using Line Neutral Voltage Signatures,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 11, pp. 4581-4591, Nov. 2009.
- [151] I. Ouachtouk, S. El Hani, S. Guedira, K. Dahi, and L. Sadiki, “Advanced Model of Squirrel Cage Induction Machine for Broken Rotor Bars Fault Using Multi Indicators,” *Adv. Electr. Electron. Eng.*, vol. 14, no. 5, Dec. 2016.
- [152] S. F. Legowski, A. H. M. S. Ula, and A. M. Trzynadlowski, “Instantaneous power as a medium for the signature analysis of induction motors,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 32, no. 4, pp. 904-909, Jul. 1996.
- [153] A. M. Trzynadlowski and E. Ritchie, “Comparative investigation of diagnostic media for induction motors: a case of rotor cage faults,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 47, no. 5, pp. 1092-1099, Oct. 2000.
- [154] Z. Liu, X. Yin, Z. Zhang, D. Chen, and W. Chen, “Online rotor mixed fault diagnosis way based on spectrum analysis of instantaneous power in squirrel cage induction motors,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 19, no. 3, pp. 485-490, Sep. 2004.
- [155] S. M. A. Cruz and A. J. M. Cardoso, “Rotor cage fault diagnosis in three-phase induction motors by the total instantaneous power spectral analysis,” in *Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Forth IAS Annual Meeting*, 1999, pp. 1929-1934.
- [156] M. Eltabach, A. Charara, and I. Zein, “A comparison of external and internal methods of signal spectral analysis for broken rotor bars detection in induction motors,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 51, no. 1, pp. 107-121, Feb. 2004.

-
- [157] M. Drif and A. J. M. Cardoso, "Rotor Cage Fault Diagnostics in Three-Phase Induction Motors, by the Instantaneous Non-Active Power Signature Analysis," in *2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2007, pp. 1050-1055.
- [158] M. Drif and A. J. M. Cardoso, "The Use of the Instantaneous-Reactive-Power Signature Analysis for Rotor-Cage-Fault Diagnostics in Three-Phase Induction Motors," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 11, pp. 4606-4614, Nov. 2009.
- [159] H. Akagi, A. Nabae, "The p-q theory in three-phase systems under non-sinusoidal conditions," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 3, no. 1, pp. 27-31, Jan. 1993.
- [160] A. Ferrero and G. Superti-Furga, "A new approach to the definition of power components in three-phase systems under nonsinusoidal conditions," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 40, no. 3, pp. 568-577, Jun. 1991.
- [161] F. Z. Peng and J.-S. Lai, "Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase power systems," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 45, no. 1, pp. 293-297, Feb. 1996.
- [162] L. M. Tolbert and T. G. Habetler, "Comparison of time-based nonactive power definitions for active filtering," in *7th IEEE International Power Electronics Congress Technical Proceedings*, 2000, pp. 73-79.
- [163] C. H. D. Angelo, G. R. Bossio, and G. O. Garcia, "Discriminating broken rotor bar from oscillating load effects using the instantaneous active and reactive powers," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 4, no. 4, pp. 281-290, Apr. 2010.
- [164] J. d J. Rangel-Magdaleno, R. d J. Romero-Troncoso, R. A. Osornio-Rios, E. Cabal-Yepez, and L. M. Contreras-Medina, "Novel Methodology for Online Half-Broken-Bar Detection on Induction Motors," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, no. 5, pp. 1690-1698, May 2009.
- [165] C. G. Dias and L. E. Chabu, "A fuzzy logic approach for the detection of broken rotor bars in squirrel cage induction motors," in *2008 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (IEEE World Congress on Computational Intelligence)*, 2008, pp. 1987-1991.
- [166] D. Matic, F. Kulic, V. Climente-Alarcon, and R. Puche-Panadero, "Artificial neural networks broken rotor bars induction motor fault detection," in *10th Symposium on Neural Network Applications in Electrical Engineering*, 2010, pp. 49-53.
- [167] P. Gardel, D. Morinigo-Sotelo, O. Duque-Perez, M. Perez-Alonso, and L. A. Garcia-Escudero, "Neural network broken bar detection using time domain and current spectrum data," in *2012 XXth International Conference on Electrical Machines*, 2012, pp. 2492-2497.
- [168] A. Widodo, B.-S. Yang, and T. Han, "Combination of independent component analysis and support vector machines for intelligent faults diagnosis of induction motors," *Expert Syst. Appl.*, vol. 32, no. 2, pp. 299-312, Feb. 2007.
- [169] A. Widodo and B.-S. Yang, "Application of nonlinear feature extraction and support vector machines for fault diagnosis of induction motors," *Expert Syst. Appl.*, vol. 33, no. 1, pp. 241-250, Jul. 2007.
- [170] V. T. Tran, B.-S. Yang, M.-S. Oh, and A. C. C. Tan, "Fault diagnosis of induction motor based on decision trees and adaptive neuro-fuzzy inference," *Expert Syst. Appl.*, vol. 36, no. 2, Part 1, pp. 1840-1849, Mar. 2009.
- [171] Dejan Jerkan: Dinamički model trofazne kavezne asinhronne mašine zasnovan na metodi konačnih elemenata, doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija, 2016.
-

- [172] S. Williamson, A. C. Smith, "Steady-state analysis of 3-phase cage motors with rotor-bar and end-ring faults," *IEE Proceedings B - Electric Power Applications*, vol. 129, no. 3, pp. 93-100, May 1982.
- [173] A. Ceban, R. Pusca, and R. Romary, "Study of Rotor Faults in Induction Motors Using External Magnetic Field Analysis," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 5, pp. 2082-2093, May 2012.
- [174] D. Reljic, D. Jerkan, D. Marcetic, and Dj. Oros, "Broken Bar Fault Detection in IM Operating Under No-Load Condition," *Adv. Electr. Comput. Eng.*, vol. 16, no. 4, pp. 63-70, 2016.
- [175] V. Vučković: Opšta teorija električnih mašina, Nauka, Beograd, 1992.
- [176] N. Adžić, V. Marić, I. Kovačević, V. Ungar: Matematička analiza II, Stylos, Novi Sad, 1996.
- [177] Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schaffer, John R. Buck: Discrete-Time Signal Processing, Prentice Hall, New Jersey, 1999.
- [178] [http://www02.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/f604827aa01a85e1c1257a4700827b3e/\\$file/ABB+MACHsense+Solution_Customer.pdf](http://www02.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/f604827aa01a85e1c1257a4700827b3e/$file/ABB+MACHsense+Solution_Customer.pdf)
- [179] J. R. Cameron, W. T. Thomson, and A. B. Dow, "Vibration and current monitoring for detecting airgap eccentricity in large induction motors," *IEE Proc. B - Electr. Power Appl.*, vol. 133, no. 3, pp. 155-163, May 1986.
- [180] A. Sadoughi, M. Ebrahimi, and E. Rezaei, "A New Approach for Induction Motor Broken Bar Diagnosis by Using Vibration Spectrum," in *2006 SICE-ICASE International Joint Conference*, 2006, pp. 4715-4720.
- [181] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley, S. D. Umans: Electric Machinery, McGraw-Hill, New York, 2003.
- [182] P. Matic: Električne mašine 1, Akademska misao, Banja Luka, 2016.
- [183] S. Nandi, "A detailed model of induction machines with saturation extendable for fault analysis," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 40, no. 5, pp. 1302-1309, Sep. 2004.
- [184] D. Jerkan, D. Reljic, and D. Marcetic, "Broken Rotor Bar Fault Detection of IM Based on the Counter-Current Braking Method," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. PP, no. 99, pp. 1-11, 2017.
- [185] D. Meeker: Finite Element Method Magnetics (Version 4.2) – User's Manual, October 25, 2015.
- [186] I. Kiralj: Proširena teorija prostornih vektora za određivanje parametara ekvivalentne šeme asinhronih mašina, doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija, 2016.
- [187] H. H. Hanafy, T. M. Abdo, and A. A. Adly, "2D finite element analysis and force calculations for induction motors with broken bars," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 5, no. 2, pp. 421-431, Jun. 2014.
- [188] Ž. Adamović, G. Nestorović, M. Radojević, Lj. Paunović: Menadžment industrijskog održavanja, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Zrenjanin, 2008.
- [189] E. A. Kisić: Primena T² kontrolnih dijagrama i skrivenih Markovljevih modela na prediktivno održavanje tehničkih sistema, doktorska disertacija, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija, 2016.
- [190] Barr, E. Feigenbaum: The Handbook of Artificial Intelligence, Vol. 1, William Kaufmann, Los Altos, 1981.
- [191] L. H. Tsoukalas, R. E. Uhrig: Fuzzy And Neural Approaches in Engineering, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 1996.
- [192] S. Freeman: Biological Science, 2nd Edition, Prentice Hall, 2005.