

OBRAZLOŽENJE PRIJEDLOGA TEME DOKTORSKE DISERTACIJE

Kandidat:

Mr. Edin Hadžimustafić, dipl.el.ing.

Radni naslov teme doktorske disertacije:

Algoritam za identifikaciju promjene stanja trofaznog kaveznog asinhronog motora zasnovan na diskretnim waveletovim transformacijama

Sadržaj:

1. Obrazloženje teme doktorske disertacije
2. Pregled stanja u oblasti istraživanja
3. Zadaci i ciljevi istraživanja
4. Metodologija istraživanja
5. Izvorni znanstveni doprinosi

1. Obrazloženje teme doktorske disertacije

Razvoj tehnologije, kako u tehničkom tako i u komercijalnom smislu, doprinio je da se monitoringu stanja elektroenergetske opreme počne pristupati i sa drugog aspekta u odnosu na prijašnju praksu. Stanje elektroenergetske opreme ovisi o više faktora: starosti opreme, pogonskim uslovima, opterećenju, atmosferskom uticaju i dr. Dosadašnji način održavanja je podrazumijevao planirano periodično održavanje kojima se nije moglo predvidjeti stanje elektroenergetske opreme u međuperiodu redovnog održavanja, te je bilo jako teško predvidjeti kvar i preventivno djelovati. Svaki kvar dovodi do zastoja rada pogona ili postrojenja što dodatno povećava gubitke.

Istraživanjama je utvrđeno da se većina kvarova kod električnih motora odražava u frekventnom spektru struje statora, bilo da se radi o električnim ili mehaničkim kvarovima [1,2,3,4,7,8,19,20,21,22]. Monitoring električnih motora u radnom režimu uveliko pomaže pravovremenom dijagnosticanju potencijalnih kvarova i sprečavanju kvarova većih obima. Međutim invazivne tehnike koje su korištene do sada zahtijevaju dodatnu mjernu opremu na samom električnom motoru. Takođe i ugradnja ove opreme zahtijeva praktične probleme u smislu promjene dizajna motora, odobrenja od proizvođača opreme, te zadovoljenje ostalih propisa.

Razvoj tehnologije i komercijalizacija elektroničke opreme koja omogućava praćenje i analizu signala u realnom vremenu pruža mogućnosti da metode i načini dijagnostike, koji su

dosad bili poznati u laboratorijskim uslovima i modelima za simulaciju, budu primjenjene i u praksi.

Monitoring struje i napona statora električnog motora u smislu primjene novih tehnologija i hardverskih platformi za obradu signala predstavlja osnov za on-line monitoring u stacionarnom stanju, analizom struje, napona, odnosno njihovog frekventnog spektra kako za nadzor stanja el.motora tako i za preventivno održavanje. Ovakva analiza je poznata pod imenom ESA (Electrical Signature Analysis) [10], a u bukvalnom prevodu znači „analiza električnog potpisa“. Ovaj naziv je nastao iz činjenice da svaki električni motor ostavlja određeni trag u obliku struje i napona statora sa aspekta monitoringa rada električnog motora. Jedna od metoda koje pripadaj ESA analizi je MCSA (Motor Current Signature Analysis) [17,19,20,22]. Koristeći MCSA analizu moguće je vršiti monitoring stanja električnog motora sa aspekta: namotaja statora, ispravnosti rotora, statičke i dinamičke ekcentričnosti zračnog rasporeda između rotora i statora, opterećenje, te ispravnost ležajeva [11].

Dosadašnja istraživanja i rezultati koji se oslanjaju na ESA analizi za detekciju određenih kvarova električnih motora analizom struje statora većinom su realizovana koristeći laboratorijske uslove, specijalne programe za simulaciju i specijalne uređaje za detekciju i analizu signala [17,19,20,22]. Specijalna laboratorijska oprema kojom se vrše eksperimentalna ispitivanja je obično multifunkcionalna, modularna i dimenziono neprilagođena za stalnu upotrebu u nekom pogonu ili postrojenju.

Analiza frekventnog spektra struje i napona statora električnog motora koristeći pomenute metode se u većini slučajeva realizuje pomoću Fourierove transformacije. Ovakav način daje zadovoljavajuće rezultate u stacionarnim režimima rada, međutim, ukoliko dođe do dinamičkih promjena u radu motora prilikom uzorkovanja valnog oblika struje, tada postoji mogućnost da rezultati dobijeni Fourierovim transformacijama ne budu vjerodostojni iz razloga što u periodu između dva uzastopna uzorkovanja dolazi do dinamičkih promjena u valnom obliku struje.

Napredovanje mikroprocesorske tehnologije i mogućnost brze obrade signala omogućilo je u zadnje vrijeme primjenu waveletovih transformacija pri obradi signala za analizu valnog oblika struje električnog motora. Ovakav pristup omogućava vjerodostojniju analizu signala pri dinamičkim promjenama i mogućnost analize signala kako u vremenskom, tako i u frekventnom domenu sa multirezolucijskom karakteristikom [26].

Istraživanja koja se predlažu ovom doktorskom disertacijom imaju za cilj realizaciju algoritma za identifikaciju promjene stanja (poremećaja) u radu električnog motora. Analiza valnog oblika struje bi se zasnivala na obradi signala primjenom wavelet-ovih transformacija. Implementacija i verifikacija predloženog algoritma bi se obavile na trofaznom asinhronom motoru sa kaveznim rotorom iz razloga što su ovakvi tipovi motora najzastupljeniji u pogonima i postrojenjima. Rezultati istraživanja dobijeni kompjuterskom simulacijom i eksperimentalnim istraživanjem bi se koristili kao osnova za realizaciju algoritma koji bi bilo moguće implementirati na hardverskoj platformi zasnovanoj na mikrokontrolerskoj tehnologiji. Ovako realizovani algoritam bi svoju primjenu našao prvenstveno za identifikaciju mogućih kvarova sa određenom tačnošću i preventivno djelovanje na električnim motorima sa promjenljivim opterećenjima, kao što su mlinovi, transporter i sl. Razvojem tehnologije i komercijalizacijom mikrokontrolera sa zavidnim performansama ovaj model bi bilo moguće implementirati i koristiti za primjenu u pogonima i postrojenjima za

motore različitih snaga. Primjena ovog modela kao kompaktnog rješenja bi pružila mogućnost stalnog uvida u stanje motora, te preventivnog djelovanja sa ciljem sprječavanja većih kvarova, havarija i zastoja postrojenja. Ova rješenja bi također dala bolju sliku u smislu planiranja održavanja opreme i smanjenja troškova održavanja.

2. Pregled stanja u oblasti istraživanja

Trofazni asinhroni motori sa kaveznim rotorom su najviše primjenjivani motori kako u industriji, tako i u domaćinstvu i komercijalnoj upotrebi [34]. Obzirom na ovu činjenicu, potrebno je obratiti pažnju i sa aspekta njihovog održavanja. Kao i svaki drugi elektromehanički uređaj i ova vrsta motora su podložni različitim kvarovima. U procentualnom prikazu prema podacima IEEE-a [34], kvarovi ovih motora su:

1. kvarovi na ležajima 44%,
2. karovi na statoru 26%,
3. kvarovi na rotoru 8%,
4. ostali kvarovi 22%.

Dosadašnji razvoj i istraživanje u oblasti monitoringa stanja električnih motora rezultirao je različitim pristupima i tehnikama. Veoma je važno detektovati kvar pri samom nastanku kako bi se spriječila oštećenja i kvarovi većih razmjera.

U zadnjih četrdesetak godina razvijene su mnoge tehnike detekcije stanja električnih motora, za čiju primjenu su potrebni ulazni parametri (signali) nad kojima se vrši monitoring. Signali nad kojima se vrši monitoring mogu biti [34]: temperatura, magnetni fluks, vibracije, parcijalno pražnjenje, moment u zračnom rasporu motora, šum, napon i struja.

Takođe su razvijene i tehnike obrade pomenutih signala koje se dijele na [34]:

RMS (Root mean square)

Računanje efektivne vrijednosti signala kao gruba procjena promjene stanja električnog motora. Kod mjerenja vibracija efektivna vrijednost brzine vibracija je prikladno mjerenje ukupne jačine vibracija. Na sličan način, efektivna vrijednost struje statora može dati grubu procjenu promijene opterećenja [34].

Analiza u vremenskoj domeni

Ova analiza predstavlja moćan alat za primjenu kod trofaznih asinhronih motora sa kaveznim rotorom. Na ovaj način je moguće pratiti frekvenciju i klizanje, te izračunati diagnostički indeks bez korištenja spektralne analize [34].

Frekventna analiza

Frekventna analiza koristi brze Fourierove transformacije kao najčešći metod obrade signala za „on-line“ monitoring. Mnogi mehanički i električni kvarovi rezultiraju signalima čije frekvencije mogu biti određene poznavanjem parametara motora. Frekventna analiza daje informacije o različitim vrstama kvarova. Neki kvarovi generiraju slične frekvencije, pa je potrebna dodatna determinacija konkretne vrste kvara. Ova analiza je primjenjiva kod monitoringa stacionarnih stanja električnog motora, dok za dinamička stanja ne daje tačne rezultate [34].

Metoda vremensko-frekventne analize

Konvencionalnom FFT (Fast Fourier Transform) analizom je moguće detektovati kvarove pri konstantnom momentu, dok za prelazne procese ova analiza ne daje zadovoljavajuće rezultate [1,4,21,34]. Pokušaj prevazilaženja ovog problema je rezultirao primjenom SFFT (Short Term Fast Fourier Transform), skraćenim brzim Fourierovim transformacijama koje su primjenjive kod tranzijentnih (dinamičkih) stanja, ali rezultiraju slabijom rezolucijom.

Mnogo bolji rezultati kod analize stanja motora pri dinamičkom režimu rada se postižu korištenjem metoda zasnovanih na waveletovim transformacijama [23,34,36,39,43]. Waveletove transformacije predstavljaju malo drugačiji metod vremensko-frekventne analize. Konvencionalne brze Fourierove transformacije su bazirane na dekompoziciji signala na sinusoide različitih frekvencija. Wavelet-ove transformacije dekompoziraju signal na komponente nesinusoidalnog oblika. Mnogi istraživači koriste struju statora kao signal na kojem se vrši analiza ovim metodom. Otuda potiče naziv za ovakve tehnike analize MCSA (Motor Current Signature Analysis) [1,11,34].

Parkovljev vektor struje statora

Ova tehnika se zasniva na analizi signala pomoću Parkovljevog vektora prikazanog krivuljom koja predstavlja sumu trenutnih prostornih vektora statorskih struja trofaznog motora. Na oblik pomenute krivulje utiču kvarovi na namotajima statora i ekscentričnost u zračnom rasporu statora i rotora. Parkovljev vektor može biti analiziran grafički ili pomoću frekventnog spektra i on je primjenljiv samo za stacionarna stanja motora [26,34].

Struje negativne sekvence

Kod nesimetričnog opterećenja trofaznog električnog motora, kvarovi na statoru ili ekscentričnost rezultiraju nesimetričnim opterećenjem što se matematički može opisati komponentama struje negativne sekvence. Nesimetrično opterećenje takođe može biti prouzrokovano nesimetričnim izvorom napajanja što takođe treba uzeti u obzir ukoliko se koristi ovakav metod analize signala [34].

Posljednji korak u procesu monitoringa stanja električnog motora je ispitivanje i provjera parametara dobijenih tehnikama obrade signala u svrhu određivanja postojanja kvara i vrste kvara. Ovo se obično radi na osnovu stručnog iskustva, ali se ide u smjeru automatskog

prepoznavanja i određivanja vrste kvara klasifikacijskim tehnikama kao što su umjetna inteligencija i raspoznavanje uzorka. Metode koje se koriste u ovu svrhu u dosadašnjoj praksi su sljedeće [34]:

Metoda zasnovana na modelu

Ukoliko su poznati detaljni podaci o dizajnu nekog električnog motora, tada je moguće analitički odrediti vrijednost parametara za unaprijed predviđene kvarove. Ova metoda nije primjenljiva sa aspekta određivanja graničnih vrijednosti parametara za različite električne motore [34,44].

Metoda po trendovima

Ovakva metoda predstavlja observaciju određenih parametara za neki vremenski period. Ukoliko dođe do promjene vrijednosti parametara koji se posmatraju moguće je pretpostaviti da je došlo i do promjena u stanju posmatranog električnog motora [34,44].

Metoda sa graničnim vrijednostima

Najjednostavniji algoritam za detekciju kvara je postavljanje graničnih vrijednosti za parametre kvara. Ukoliko vrijednost parametara u određenom trenutku pređe neku graničnu vrijednost može se pretpostaviti da je došlo do kvara na koji se taj parametar odnosi [1,8,34].

Metoda multidimenzionalnog prostora

Višestruki parametri kvara mogu biti promatrani pojedinačno pri čemu svaki parametar kvara pripada jednoj dimenziji multidimenzionog prostora. Određeni skup parametara odgovara tačkama u prostoru. Tačke u prostoru za ispravan motor se nalaze na različitim mjestima u prostoru u odnosu na tačke za neispravan motor [34].

Metoda zasnovana na neuronskim mrežama

Umjetne neuronske mreže su bazirane na neuronskim vezama u mozgu čovjeka. Svaki umjetni neuron prihvata nekoliko ulaza, dodjeljuje težinski faktor svakom ulazu i generiše nelinearan izlazni signal. Neuroni su povezani slojevima između ulaza i izlaza. Učenje neuronskih mreža se zasniva na korištenju određenog skupa parametara koji se odnose na ispravan i neispravan motor i podešavanju težinskih koeficijenata kako bi se na izlazu dobio očekivani rezultat [34].

Metoda neizrazite (fuzzy) logike

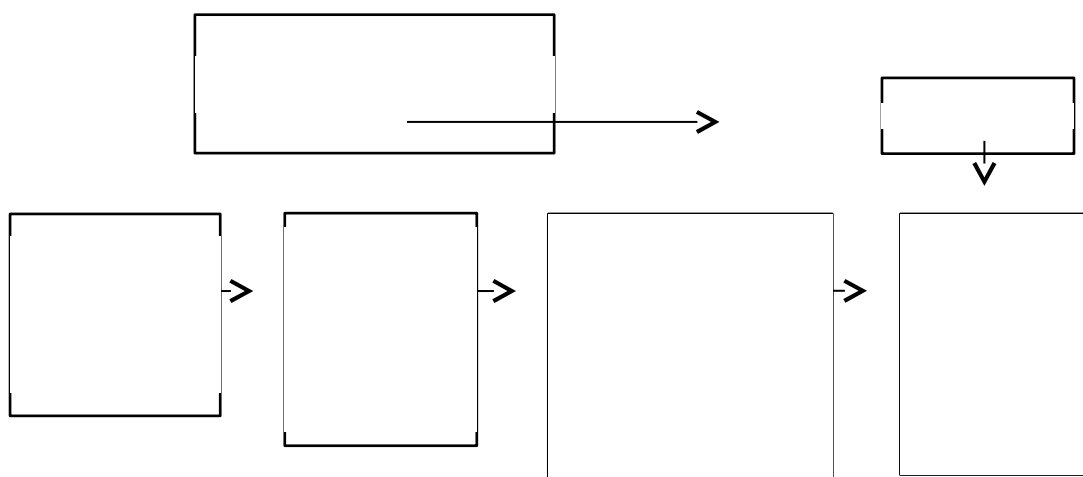
Ova metoda je bazirana na donošenju odluka klasificiranjem signala u serije opsega (neizrazite vrijednosti), što omogućava kombiniranje neizrazitih informacija od različitih

signala zajedno, što rezultira tačnijom prosudbom o stanju motora u odnosu na stanje ispravnog motora [34].

Ekspertni sistemi

Ekspertni sistemi predstavljaju iskustveno znanje ljudskih eksperata u pokušaju da definišu seriju pravila iz kojih treba da se donese zaključak. Ovako definisana pravila mogu da se zasnivaju na kombinaciji podataka dobijenim koristeći različite metode [34,45].

Na slici 1. je prikazan procesni blok dijagram za on-line monitoring stanja električnog motora koji sumarno predstavlja već pomenute vrste kvarova, senzore signala, tehnike obrade signala, te metode za detekciju kvara. Kvalitetnim odabirom možemo optimizirati on-line monitoring stanja motora. U današnje vrijeme najperspektivnije metode monitoringa stanja električnog motora se zasnivaju na waveletovim transformacijama koje omogućavaju vremensko-frekventnu obradu signala sa poboljšanom rezolucijom. Koristeći ovu metodu moguće je detektovati kvarove na motoru u početnoj fazi i time spriječiti teže posljedice prouzrokovane kvarom [34].

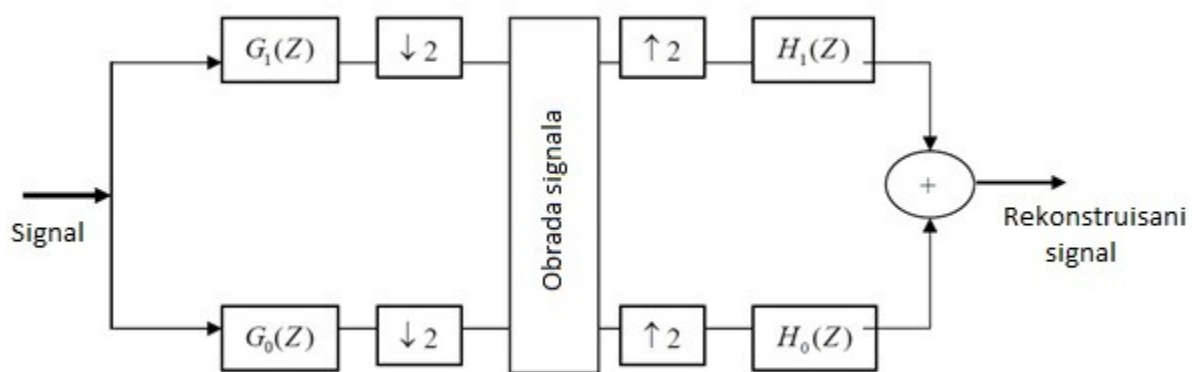


Slika 1: Procesni blok dijagram za on-line monitoring stanja električnog motora

Waveletove transformacije

Ovaj metod je baziran na waveletovim funkcijama za dekompoziciju signala slično kao što se koriste komponente sinusoidalnog oblika pri dekompoziciji signala primjenom Fourierovih transformacija. Waveletove transformacije proračunavaju unutrašnji produkt analiziranog signala i porodice valića (wavelets) [35,36,37,38,39]. Za razliku od Fourierovih transformacija, valići su prisutni kako u vremenskom, tako i u frekventnom domenu, pri čemu je obrada signala waveletovim transformacijama pogodna za signale čiji se spektralni sadržaj mijenja u vremenu. Kao što Fourierove transformacije dekompoziraju signal u familiju kompleksnih sinusoida, tako wavelet-ove transformacije dekompoziraju signal u familiju

valića. Dok su sinusoide simetrične, glatke i pravilne, valići mogu biti simetrični i asimetrični, glatki ili oštri, pravilni ili nepravilni. Familija valića sadrži rastegnute (dilatirane) i preslikane verzije funkcije prototipa. Funkcija prototipa se tradicionalno naziva osnovna funkcija, odnosno osnovni valić (mother wavelet). Skaliranje i pomjeranje valića određuje koliko se osnovni valić rasteže i preslikava u skladu s vremenom ili prostornim osima. U zavisnosti od vrste signala koriste se različiti oblici osnovnih valića kako bi bili što prikladniji pri analiziranju datog signala. Valići su prisutni i u vremenskom i u frekventnom domenu zbog toga što imaju određeno vrijeme trajanja i frekventni opseg. Waveletove transformacije mogu prikazati signal sa nekoliko koeficijenata zbog pravila lokalizacije valića.



Slika 2. Opći princip obrade signala pomoću waveletovih transformacija [35]

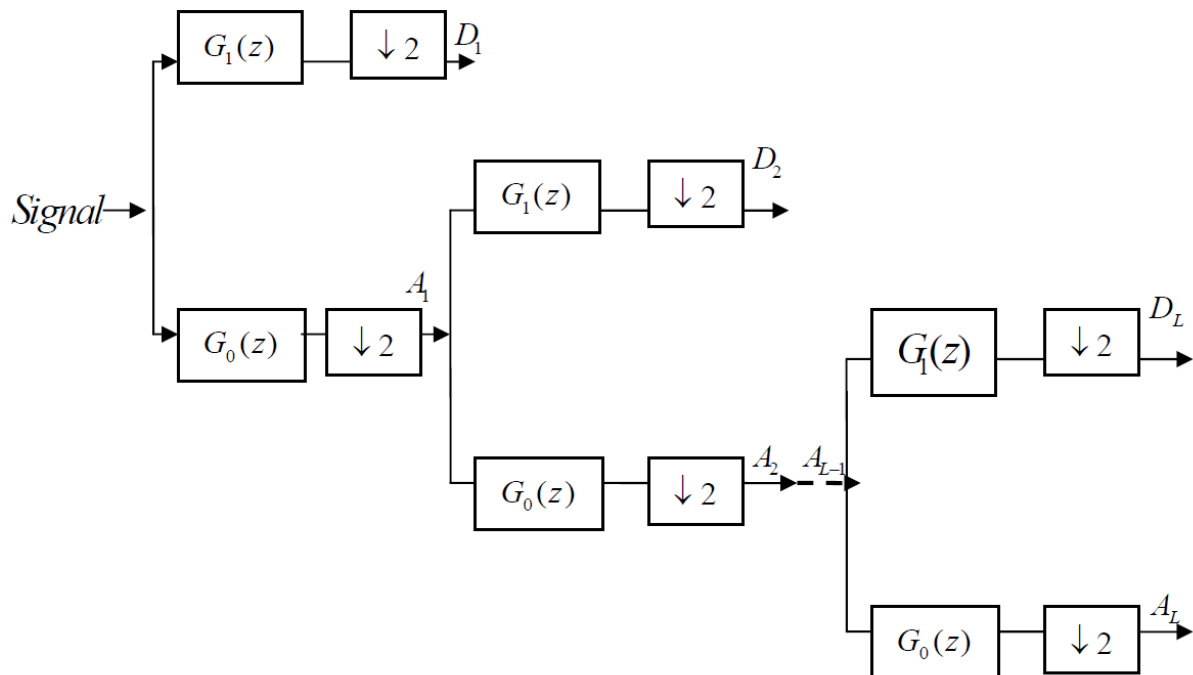
Na slici 2. prikazan je opći princip obrade signala pomoću waveletovih transformacija. $G_1(Z)$ predstavlja visokopropusni filterski slog, dok je $G_0(Z)$ niskopropusni filterski slog uz dijeljenje uzoraka signala sa faktorom 2. Broj uzorkovanih signala nakon oba filterska sloga mora biti jednak broju uzoraka ulaznog signala. Nakon obrade signala, uzorci se ponovno množe sa faktorom 2 te filtriraju kroz filterske slogove $H_1(Z)$ i $H_0(Z)$, nakon čega se sumiraju u zajednički signal koji mora biti identičan ulaznom sa vremenskom razlikom.

Diskretne waveletove transformacije nisu u stvarnosti diskretna verzija kontinuiranih waveletovih transformacija kao što je to slučaj sa Fourierovim transformacijama. Za implementaciju diskretnih waveletovih transformacija diskretni filterski slogovi se koriste za proračun diskretnih waveletovih koeficijenata

Na slici 3. je prikazan opći princip obrade signala sa diskretnim waveletovim transformacijama. Niskopropusni filtri eliminišu fluktuacije visokih frekvencija iz signala i obezbjeđuju prikaz promjene signala sa sporim trendom, dok visokopropusni filtri imaju suprotnu ulogu. Izlaz iz visokopropusnog filtera obezbjeđuje detaljne informacije o signalu. Izlazi iz niskopropusnih filtera definišu koeficijente aproksimacije (A), a izlazi iz visokopropusnih filtera koeficijene detalja. Kaskadna dekompozicija signala određuje do kojeg nivoa se vrši dekompozicija signala u svrhu što bolje analize detalja i aproksimiranog signala.

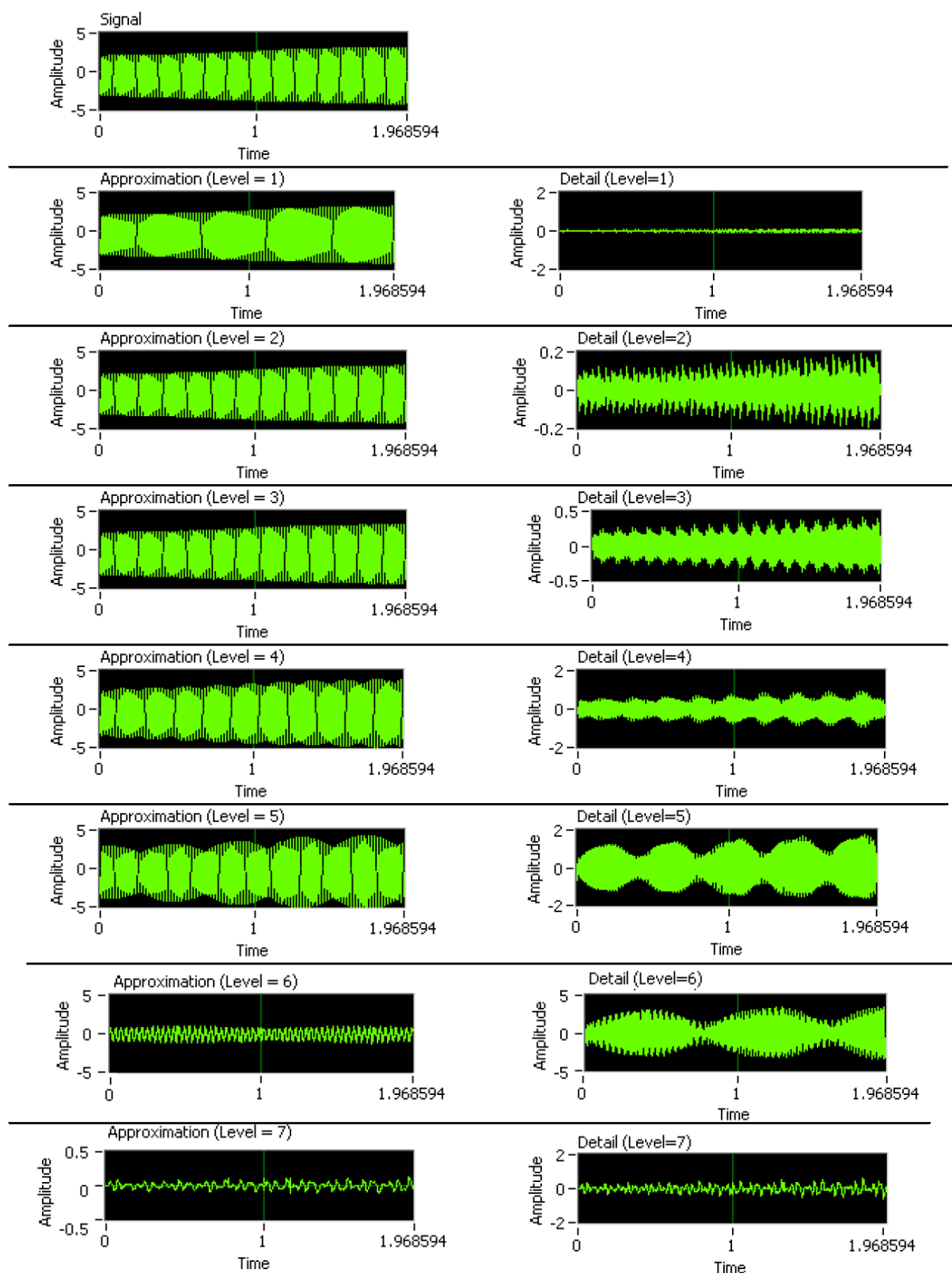
Signali obično sadrže i niskofrekventne i visokofrekventne komponente. Niskofrekventne komponente se vremenski sporo mijenjaju, pa je u ovom slučaju bitnija kvalitetna frekventna rezolucija u odnosu na vremensku. Visokofrekventne komponente signala zahtijevaju kvalitetnu vremensku rezoluciju jer se frekvencija brzo mijenja u vremenu. Ovakav način rezolucije signala se naziva multirezolucijska analiza.

Prednosti ove analize su što je moguće analizirati signal i u frekventnom u i vremenskom domenu što je jako bitno kod signala koji nisu stacionarni, već se mijenjaju u vremenu.



Slika 3. Opći princip obrade signala pomoću diskretnih waveletovih transformacija [35]

Ovakav način analize signala je u skorije vrijeme našao primjenu i u analizi signala koji se dobija mjerenjem struje statora trofaznog asinhronog motora. Ukoliko su na takvom motoru prisutni električni ili mehanički kvarovi, analiziranjem signala i njegovom usporedbom moguće je primjetiti razliku u signalu prije i poslije nastanka kvara. Na slici 4. je prikazan jedan od primjera oblika signala struje statora trofaznog asinhronog motora sa kaveznim rotorom u ispravnom stanju koristeći diskretne waveletove transformacije [35,36]. Dekompozicija signala je vršena do sedmog nivoa. Motor koji je korišten u konkretnom slučaju je trofazni, nazivnog napona 0,4kV, snage 700W, konstrukcije sa dva para polova. Mjerenje je izvršeno pri promjenljivom opterećenju. Frekvencija uzorkovanja je 6400Hz, a broj korištenih uzoraka je $N = 12600$. Na slici 5. [35] moguće je uočiti frekventni opseg analiziranog signala prema nivou dekompozicije.

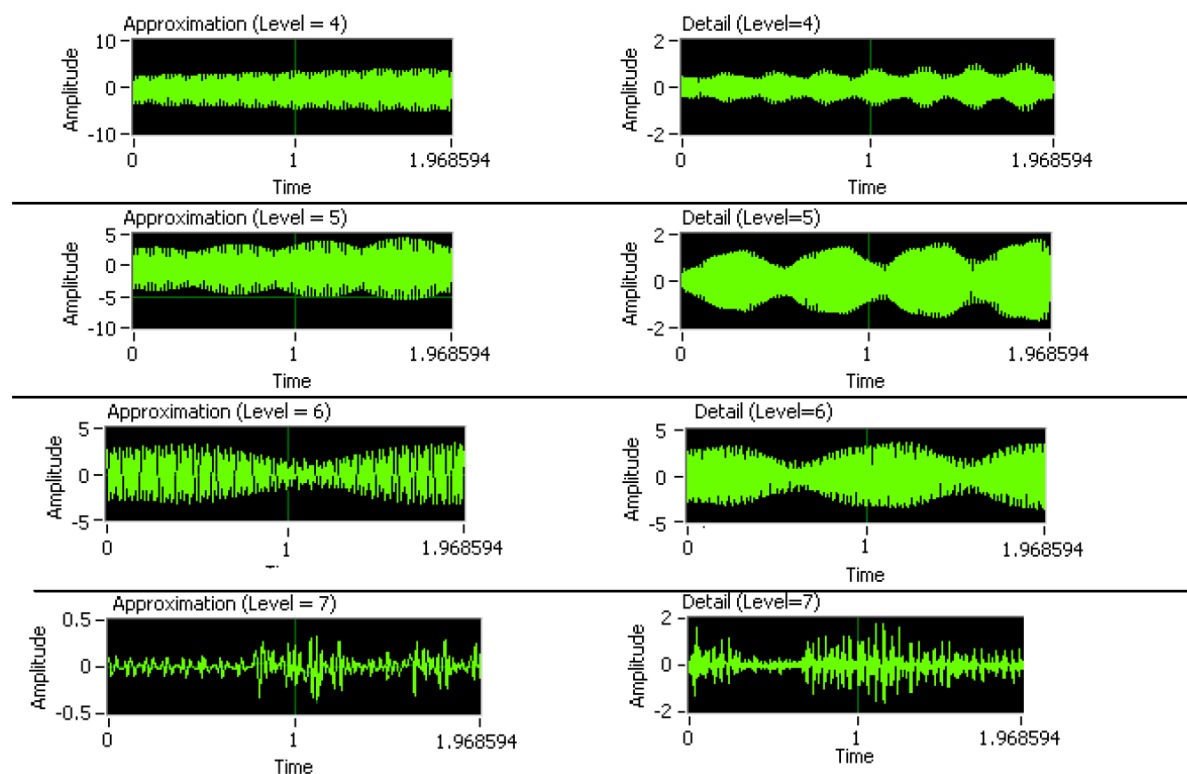


Slika 4. Oblik signala struje statora trofaznog asinhronog motora sa kaveznim rotorom u ispravnom stanju koristeći diskretne waveletove transformacije do sedmog nivoa dekompozicije ulaznog signala[35]

Sr. no.	Decomposition Details	Frequency bands (Hz)
1	Detail at level1	3200-1600 Hz
2	Detail at level 2	1600-800 Hz
3	Detail at level 3	800-400 Hz
4	Detail at level 4	400-200 Hz
5	Detail at level 5	200-100 Hz
6	Detail at level 6	100-50 Hz
7	Detail at level 7	50-25 Hz

Slika 5. Frekventni opseg analiziranog signala prema nivou dekompozicije za konkretan slučaj[35]

Na slici 6. je prikazan oblik signala za mjerenje struje statora u slučaju prekida na jednom od rotorskih štapova [35]. Način mjerenja i uslovi su isti kao za slučaj ispravnog motora. Evidentno je da je prisutna razlika u obliku signala na nivoima dekompozicije 4,5,6 i 7. Ovdje je prikazana promjena u obliku signala za konkretnu vrstu kvara, ali je takođe moguće primjetiti i promjenu oblika signala i za druge vrste kvarova koristeći ovu metodu.



Slika 6. Oblik signala za mjerenje struje statora u slučaju prekida na jednom od rotorskih štapova[35]

Dosadašnja istraživanja iz oblasti obrade signala struje statora trofaznog asinhronog električnog motora korištenjem diskretnih waveletovih transformacija uglavnom su bazirana na obradi i prikazu oblika signala za različita stanja motora. Buduća istraživanja na ovom polju zahtijevaju realizaciju algoritama koji bi omogućavali što tačnije i efektivnije automatsko prepoznavanje promjena stanja motora.

Iz dostupne literature [24,35,36,37,38,39,40,41,42,43], a koja se bavi konkretno diskretnim waveletovim transformacijama, koristeći pritom određene tipove valića iz „Dabechies“ familije za dekompoziciju signala, moguće je primjetiti da su eksperimentalna istraživanja za sve identifikacije kvarova vršene u laboratorijskim uslovima za samo jednu vrstu kvara. Također se može primijetiti da su za istu vrstu kvara korišteni različiti tipovi osnovnog valića iz „Dabechies“ familije za dekompoziciju signala. Svaki od tipova korištenih osnovnih valića, u pomenutoj literaturi, se pokazao kao primjenljiv za identifikaciju određenih kvarova u laboratorijskim uslovima.

Kvarovi koji su analizirani u dostupnoj literaturi se odnose na kvarove kugličnih ležajeva, kvarove statorskog i rotorskog namotaja, što su i najčešće zastupljeni kvarovi kod asinhronih motora sa kaveznom rotorom.

Iz dostupne literature je moguće zaključiti da nije vršena analiza identifikacije različitih vrsti kvarova istovremeno prisutnih na nekom motoru. Ova činjenica ostavlja prostora za dalja istraživanja u smislu analiziranja signala i njegove dekompozicije za pomenutu situaciju, te komparaciju sa signalima mjerenim pri pojedinačnim kvarovima. Eksperimentalna istraživanja u ovom slučaju bi pokazala koliko prisutnost više različitih kvarova istovremeno utiču na oblik signala na određenim frekvencijama, što bi predstavljalo polaznu osnovu za istraživački pristup pri identifikaciji kvarova u pomenutom slučaju.

U gore pomenutoj literaturi, također se može primijetiti da su sva eksperimentalna istraživanja vršena u laboratorijskim uslovima, a da su mjerenja struje i napona statora vršena u neposrednoj blizini motora. Ovakva činjenica ostavlja dodatni motiv za istraživanje sa aspekta mjerenja signala na napojnom vodu motora na različitim udaljenostima od motora. Ovom dodatnom analizom bi se razmotrio uticaj kapaciteta i induktiviteta napojnog voda motora na oblik mjerenog signala. Poznato je da je u realnim uslovima rada ponekad praktično neizvodljivo mjerenje struje i napona statora motora na samom motoru, pa bi stoga i ova analiza rezultantski doprinijela boljem algoritamskog pristupu za identifikaciju prisutnih kvarova na motoru u realnim uslovima rada. Ovo bi se odnosilo na mjerenja struja i napona indirektnom metodom u radu motora na pristupačnim mjestima kao što su upravljački i razvodni ormari i sl.

3. Zadaci i ciljevi istraživanja

Istraživanje u ovome radu obuhvata eksperimentalno ispitivanje i obradu signala pomoću diskretnih waveletovih transformacija. Eksperimentalno ispitivanje bi se zasnivalo na mjerenju struje i napona statora trofaznog asinhronog električnog motora sa kaveznim rotorom pri različitim opterećenjima. Ispitivanje bi bilo izvršeno za različita stanja električnog motora, odnosno za ispravno stanje motora i za stanje motora kada su na njemu prisutni određeni kvarovi, pri različitim opterećenjima motora.

Pored gore navedenog, težište ispitivanja bi bilo usmjereno na istovremeno prisutne različite vrste kvarova. Također bi bilo izvršeno eksperimentalno ispitivanje u smislu mjerenja signala na stezaljkama motora i na početku napojnog voda određene dužine, nakon čega bi bila izvršena komparacija dobijenih signala.

Cilj ovog istraživanja je, da se koristeći rezultate dobijene eksperimentalnim istraživanjem i obradom signala pomoću diskretne waveletove transformacije, realizuje algoritam koji bi mogao određenom tačnošću automatski identificirati moguće kvarove na električnom motoru, te preventivno djelovati. U odnosu na dostupne informacije o dosadašnjim istraživanjima, fokus prilikom realizacije algoritma bi bio na njegovoj primjeni u realnom okruženju. Pod ovim se smatra da algoritam, koji bi bio realizovan, ima sposobnost identifikacije sa određenom tačnošću bilo da se mjerenje vrši na stezaljkama motora ili u razvodnom ormaru, odnosno da se izbjegne uticaj impedanse napojnog voda. Isto tako bi se primjenom ovog algoritma ostvario uvid i u trenutno stanje električnog motora, što bi doprinijelo boljem planiranju prilikom održavanja. Analizom dobijenih rezultata bilo bi pokazano koji su to harmonici, odnosno koji su to valni oblici struje prisutni prilikom mogućih kvarova električnog motora u odnosu na njegovu snagu, opterećenje i stanje pri kojem se vrši analiza. Dobijeni rezultati bi predstavljali osnovu za definisanje kriterija prilikom realizacije algoritma, koje bi bilo potrebno ispuniti da bi došlo do detekcije određenih kvarova na motoru prilikom identifikacije stanja električnog motora u realnom vremenu.

4. Metodologija istraživanja

Eksperimentalna istraživanja na trofaznom asinhronom električnom motoru sa kaveznim rotorom će biti izvršena u laboratorijskim uslovima koristeći primjerenu mjernu opremu. Mjerenja u svrhu istraživanja će biti izvršena na ispravnom motoru pri različitim opterećenjima, te na motoru sa eksperimentalno izazvanim kvarovima, takođe pri različitim opterećenjima motora. Planirano je i eksperimentalno mjerenje na stvarnom pogonu, te komparacija dobijenih rezultata sa rezultatima laboratorijskog ispitivanja.

Mjerna oprema koja bi se koristila bila bi namjenjena mjerenju signala sa potrebnom frekvencijom uzorkovanja, a uzorci dobijeni mjerenjem bi bili obradjeni u nekom od softverskih alata namjenjenom za obradu signala upotrebom diskretnih waveletovih transformacija.

Rezultati dobijeni eksperimentalnim istraživanjem bi bili iskorišteni kao osnova za realizaciju algoritma koji bi vršio automatsku detekciju promjene stanja motora. Za realizaciju

ovog algoritma bi bili korišteni adekvatni matematički alati u svrhu prepoznavanja promjene stanja motora sa što manjim procentom pogreške. Algoritam bi trebao biti multifunkcionalan sa aspekta mogućnosti detekcije različitih uzroka koji rezultiraju promjenom stanja motora.

5. Izvorni znanstveni doprinosi

Istraživanjima predloženim u ovoj disertaciji – teorijska podloga, eksperimenti na realnim modelima, te obrada signala sa nekim od softverskih alata bili bi iskorišteni kao osnova za realizaciju pomenutog algoritma koji bi dao doprinos u automatskoj detekciji promjena stanja trofaznog asinhronog električnog motora sa kaveznom rotorom. Ovakav algoritam bi bilo moguće primijeniti kako na softverskim platformama današnjih modernih računara, tako i na individualnim hardverskim platformama baziranim na mikrokontrolerskoj tehnologiji. Razvijeni algoritam bi omogućio tačniju identifikaciju mogućih promjena stanja trofaznog asinhronog električnog motora sa kaveznom rotorom, analizom struje statora, kako u stacionarnim, tako i u dinamičkim uslovima rada.

Rezultati dobijeni istraživanjem bi predstavljali osnovu u postavljanju kriterija pri realizaciji kompaktnih rješenja za identifikaciju mogućih kvarova trofaznih električnih motora sa kaveznom rotorom.

Prijedlog ovakvog rješenja bi se zasnivao na podacima dobijenim konkretnim eksperimentalnim istraživanjem, te bi kao takav predstavljao izvorni doprinos u oblasti monitoringa i dijagnostike trofaznih asinhronih električnih motora sa kaveznom rotorom. Osim toga, ovo rješenje bi predstavljalo jednu neinvanzivnu metodu za monitoring i dijagnostiku baziranu na analizi oblika mjernih veličina, odnosno struje statora.

U odnosu na dosadašnja istraživanja prema dostupnoj literaturi, rješenje koje bi bilo prikazano u ovom radu, kroz realizaciju algoritma za identifikaciju stanja el. motora, bi imalo mogućnost prepoznavanja istovremeno prisutnih različitih vrsta kvarova. Pored ovog, realizacija algoritma bi uzela u obzir i uticaj impedanse napojnog voda u slučaju da se mjerni podaci prikupljaju na mjestima koja su pristupačna u realnom okruženju.

Rješenje bi bilo optimizirano i prilagođeno primjeni u radnom okruženju, a ujedno bi bilo i ekonomski isplativo, jer bi se za realizaciju koristile nove tehnologije predviđene za komercijalnu i industrijsku upotrebu.

6. Korištena literatura

- [1] Rubén Puche Panadero, Joan Pons Llinares, Vicente Climente Alarcon y Manuel Pineda Sánchez, Review Diagnosis Methods of Induction Electrical Machines based on Steady State Current, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica de Valencia, Campus de Vera – Valencia, 2007.
- [2] Somaya A. M. Shehata, Hamdy S. El-Goharey, Mostafa I. Marei, Ahmed K. Ibrahim, Detection of Induction Motors Rotor/Stator Faults Using Electrical Signatures Analysis, Department of Electrical Power and Machines Engineering, Ain-Shams University, Cairo, Egypt, ISSN 2172-038 X, No.11, March 2013.
- [3] Intesar Ahmed, Manzar Ahmed, M. Shuja Khan, Kashif Imran, Investigation of Multiple Faults Detection in Electric Machine Using Broken Rotor Bar and

Eccentricity Fault Frequencies Techniques, International Journal of Electrical & Computer Sciences IJECS-IJENS Vol:10 No:05, October 2010.

- [4] D. M. Sonje, R. K. Munje, Rotor Cage Fault Detection in Induction Motors by Motor Current Signature Analysis, International Journal of Computer Applications (0975 – 8887), 2011.
- [5] Peter Tavner, Li Ran, Jim Penman and Howard Sedding, Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines, The Institution of Engineering and Technology, 2008.
- [6] Martin Blodt, Pierre Granjon, Bertrand Raison and Jeremi Regnier (2010). Mechanical Fault Detection in Induction Motor Drives through Stator Current Monitoring - Theory and Application Examples, Fault Detection, Wei Zhang (Ed.), ISBN: 978-953-307-037-7, 2010.
- [7] Martin BLÖDT, Ph.D. thesis, Condition Monitoring of Mechanical Faults in Variable Speed Induction Motor Drives, DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE, Specialite : Genie Electrique, 2006.
- [8] Manoj Kumar Sah- Siemens, ELECTRICAL SIGNATURE ANALYSIS, 2011.
- [9] Christian Kral and Thomas G. Habetler (2010). Condition Monitoring and Fault Detection of Electric Drives, Fault Detection, Wei Zhang (Ed.), ISBN: 978-953-307-037-7, 2010.
- [10] Erik Leandro Bonaldi, Levy Ely de Lacerda de Oliveira, Jonas Guedes Borges da Silva, Germano Lambert-Torres and Luiz Eduardo Borges da Silva, Predictive Maintenance by Electrical Signature Analysis to Induction Motors, Itajuba Federal University, Brazil, 2012.
- [11] Neelam Mehala, Ratna Dahiya, Motor Current Signature Analysis and its Applications in Induction Motor Fault Diagnosis, INTERNATIONAL JOURNAL OF SYSTEMS APPLICATIONS, ENGINEERING & DEVELOPMENT Volume 2, Issue 1, 2007.
- [12] Martin Blödt, *Member, IEEE*, Pierre Granjon, Bertrand Raison, *Member, IEEE*, and Gilles Rostaing, Models for Bearing Damage Detection in Induction Motors Using Stator Current Monitoring, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 55, NO. 4, APRIL 2008.
- [13] Martin Blödt, *Student Member, IEEE*, David Bonacci, J'ér'emi Regnier, Marie Chabert, and Jean Faucher, On-line Monitoring of Mechanical Faults in Variable-Speed Induction Motor Drives Using the Wigner Distribution, MANUSCRIPT SUBMISSION TO IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS SPECIAL ISSUE ON ELECTRICAL MACHINERY, 2006.
- [14] Marian Dumitru Negrea, Doctoral Dissertation, ELECTROMAGNETIC FLUX MONITORING FOR DETECTING FAULTS IN ELECTRICAL MACHINES, TKK Dissertations 51 Espoo 2006.

- [15] Ewen Ritchie, Krisztina Leban, Introduction to monitoring and diagnosis of electrical machines and apparatus, 2010.
- [16] Thomas G. Habetler, On-Line Condition Monitoring and Diagnostics of Electric Machines, School of Electrical and Computer Engineering Georgia Institute of Technology, 2005.
- [17] William T. Thomson, Ronald J. Gilmore, Motor Current signature analysis to detect faults in induction motor drives-fundamentals, data interpretation and industrial case histories, 2005.
- [18] B.Hulugappa, Tajmul Pashab, Dr.K.M.Ramakrishnac, Condition Monitoring of Induction Motor Ball Bearing Using Monitoring Techniques, International Journal of Scientific and Research Publications, 1 ISSN 2250-3153, Volume 2, Issue 11, November 2012.
- [19] Akshat Singhal, Meera A. Khandekar, BEARING FAULT DETECTION IN INDUCTION MOTOR USING MOTOR CURRENT SIGNATURE ANALYSIS, International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, Vol. 2, Issue 7, July 2013.
- [20] Neelam Mehala, CONDITION MONITORING AND FAULT DIAGNOSIS OF INDUCTION MOTOR USING MOTOR CURRENT SIGNATURE ANALYSIS, Electrical Engineering Department National Institute of Tehnology, Kurukshetra India, October 2013.
- [21] Aderiano M. da Silva, B.S., INDUCTION MOTOR FAULT DIAGNOSTIC AND MONITORING METHODS, Faculty Of the Graduate School, Marquette University, Milwaukee, Wisconsin, May 2006.
- [22] José Ignacio Terra, Marcelo Castelli, Juan Pablo Fossati, Marcos Andrade, Analía Conde, Universidad de Montevideo, Miguel Martínez-Iturralde, TECNUN, Universidad de Navarra, Faults Detection and Remote Monitoring System for Induction Motors using MCSA Technique, 2010.
- [23] Discrete Wavelet Transforms - Theory and Applications, Edited by Juuso Olkkonen, March, 2011.
- [24] Jordi Cusidó i Roura and Jose Luis Romeral Martínez, Transient Analysis and Motor Fault Detection using the Wavelet Transform, MCIA Group, Technical University of Catalonia, Spain, April 2011.
- [25] Dr. Mustafa M. Ibrahim, Habeeb J. Nekad, Broken Bar Fault Detection Based on the Discrete Wavelet Transform and Artificial Neural Network, Electrical Engineering Department- College of Engineering University of Basrah, Basrah-Iraq, May 2013.
- [26] HARLIȘCA Ciprian, SZABÓ Loránd, Wavelet Analysis and Park's Vector Based Condition Monitoring of Induction Machines, Technical University of Cluj-Napoca, Romania, Department of Electrical Machines and Drives, 2013.

- [27] Ahcène Bouzida, Omar Touhami, Radia Abdelli, Rotor Fault Diagnosis in Three Phase Induction Motors Using the Wavelet Transform, International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT'13) Proceedings Engineering & Technology - Vol.1, pp. 186-191, 2013
- [28] H Douglas, P.Pillay, A Ziarani, DETECTION OF BROKEN ROTOR BARS IN INDUCTION MOTORS USING WAVELET ANALYSIS Clarkson University, on leave from the Department of Electrical Engineering, University of Cape Town, IEEE 2003.
- [29] U. E. Hiwase & S. B. Warkad, Fault Detection (Condition Monitoring) of Induction Motor based on Wavelet Transform Department of Electrical Engineering, PCE, Nagpur, India, International Journal of Electrical and Electronics Engineering (*IJEEE*) ISSN (*PRINT*): 2231 – 5284, Vol-1, Iss-3, 2012.
- [30] Jagadanand G, Lalgy Gopi, Saly George, Jeevamma Jacob⁴, INTER-TURN FAULT DETECTION IN INDUCTION MOTOR USING STATOR CURRENT WAVELET DECOMPOSITION, International Journal of Electrical Engineering and Technology (IJEET), ISSN 0976 – 6545(Print), ISSN 0976 – 6553(Online) Volume 3, Issue 2, July- September 2012.
- [31] Syed Kamruddin Ahamed, Diagnosis of Broken Rotor Bar Fault of Induction Motor through Envelope Analysis of Motor Startup Current using Hilbert and Wavelet Transform, Innovative Systems Design and Engineering, ISSN 2222-1727 (Paper) ISSN 2222-2871 (Online), Vol 2, No 4, 2011.
- [32] Hocine Bendjama, Salah Bouhouche, and Mohamed Seghir Boucherit, Application of Wavelet Transform for Fault Diagnosis in Rotating Machinery, International Journal of Machine Learning and Computing, Vol. 2, No. 1, February 2012.
- [33] Marius MEDIA, Bogdan VENESCU, INDUCTION MOTOR ROTOR CAGE FAULT DIAGNOSIS WITH STOCKWELL AND WAVELET TIME-FREQUENCY STATOR CURRENT ANALYSIS, U.P.B. Sci. Bull., Series C, Vol. 75, Iss. 4, 2013.
- [34] Khadim Moin Siddiqui, Kuldeep Sahay, V.K.Giri, HEALTH MONITORING AND FAULT DIAGNOSIS IN INDUCTION MOTOR, IJAREEIE, January 2014
- [35] Neelam Mehala, Ratna Dahiya, ROTOR FAULTS DETECTION IN INDUCTION MOTOR BY WAVELET ANALYSIS, International Journal of Engineering Science and Technology Vol.1(3), 2009
- [36] A.U.Jawadekar, G.M.Dhole, S.R.Paraskar, M.A.Beg, A WAVELET BASED DIAGNOSIS AND CLASSIFICATION OF RACEWAY DEFECTS IN BEARINGS OF AN INDUCTION MOTOR, International Journal on “Technical and Physical Problems of Engineering” (IJTPE), March 2011.
- [37] Dr. Mustafa M. Ibrahim, Habeeb J. Nekad, Induction Motor Bearing Fault Detection under Transient Conditions, International Journal of Current Engineering and Technology, October 2013.

- [38] Vinay Kumar Singh, Dr. S. Chatterji, Dr. Lini Mathew, Bearing Fault Detection of an Induction Motor Using Non-Stationary Signal Analysis, International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering, August 2014.
- [39] Loránd SZABÓ, Jenő Barna DOBAI, Károly Ágoston BIRÓ, Discrete Wavelet Transform Based Rotor Faults Detection Method for Induction Machines, Department of Electrical Machines, Marketing and Management Technical University of Cluj
- [40] Marius Media, Bogdan Venescu, INDUCTION MOTOR ROTOR CAGE FAULT DIAGNOSIS WITH STOCKWELL AND WAVELET TIME-FREQUENCY STATOR CURRENT ANALYSIS, U.P.B. Sci. Bull., Series C, Vol. 75, Iss. 4, 2013.
- [41] Shahab Hasanzadeh Ghafari, A Fault Diagnosis System for Rotary Machinery Supported by Rolling Element Bearings, A thesis presented to the University of Waterloo in fulfillment of the thesis requirement for the degree of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering Waterloo, Ontario, Canada, 2007.
- [42] S.M. Shashidhara, Member, IEEE and Dr. P. Sangameswara Raju, Tradeoff Analysis of Wavelet Transform Techniques for the Detection of Broken Rotor Bars in Induction Motors, Advance in Electronic and Electric Engineering. ISSN 2231-1297, Volume 3, Number 8 (2013).
- [43] *A.U.Jawadekal, Dr G.M.Dhole, S.R.Paraskar*, Signal Processing based Wavelet Approach for Fault Detection of Induction Motor, PRATIBHA: INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENCE, SPIRITUALITY, BUSINESS AND TECHNOLOGY (IJSSBT), Vol. 1, No.1, March 2012.
- [44] *N.Halem,S.E. Zouzou K. Srairi*, Analysis of Induction Motor With Broken Bars and Constant Speed Using Circuit-Field Coupled Method , ELECTRICAL ENGINEERING LABORATORY OF BISKRA , BISKRA UNIVERSITY, ALGERIA, june 2011.
- [45] *Alka Thakur, Dr.Sulochana Wadhwani, Vandana Sondhiya*, Health Monitoring of Rotating Electrical Machine Using Soft Computing Techniques:A Review, International Journal of Scientific and Research Publications, Volume 3, Issue 11, November 2013

