

Mjerni sustav za detekciju kvarova u električnim strojevima

Mores, Mislav

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:677112>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-25**

Repository / Repozitorij:

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



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

Stručni studij

MJERNI SUSTAV ZA DETEKCIJU KVAROVA U
ELEKTRIČNIM STROJEVIMA

Završni rad

Mislav Mores

Osijek, 2022.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac Z1S: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za završni ispit na preddiplomskom stručnom studiju**

Osijek, 03.09.2022.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Imenovanje Povjerenstva za završni ispit
na preddiplomskom stručnom studiju**

Ime i prezime Pristupnika:	Mislav Mores
Studij, smjer:	Preddiplomski stručni studij Elektrotehnika, smjer Automatika
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	A 4560, 19.07.2019.
OIB Pristupnika:	14147321636
Mentor:	Dr.sc. Venco Ćorluka
Sumentor:	
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	Dr. sc. Željko Špoljarić
Član Povjerenstva 1:	Dr.sc. Venco Ćorluka
Član Povjerenstva 2:	Mr.sc. Dražen Dorić
Naslov završnog rada:	Mjerni sustav za detekciju kvarova u električnim strojevima
Znanstvena grana završnog rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak završnog rada	U radu potrebno je opisati najčešće moguće kvarove kod električnih strojeva u radnom pogonu. Opisati sve moguće mjerne metode za otkrivanje kvarova te na osnovu svakog mjerenja spektralnom analizom dati ocjenu stanja pojedinog dijela stroja.
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (završnog rada):	Dobar (3)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 1 razina
Datum prijedloga ocjene od strane mentora:	03.09.2022.
<i>Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:</i>	<i>Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.</i>
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 02.10.2022.

Ime i prezime studenta:

Mislav Mores

Studij:

Preddiplomski stručni studij Elektrotehnika, smjer Automatika

Mat. br. studenta, godina upisa:

A 4560, 19.07.2019.

Turnitin podudaranje [%]:

6

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Mjerni sustav za detekciju kvarova u električnim strojevima**

izrađen pod vodstvom mentora Dr.sc. Venco Ćorluka

i sumentora ,

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

Sadržaj

1. UVOD	1
1.1 Zadatak završnog rada	2
2. NAJČEŠĆI KVAROVI ELEKTRIČNIH MOTORA	3
2.1 Izvedba asinkronog stroja	3
2.2 Podjela kvarova	5
2.3 Mehanički kvarovi	5
2.3.1 Kvar ležaja	6
2.3.2 Ekscentricitet	7
2.4 Električni kvarovi	8
2.4.1 Kvar statora	8
2.4.2 Kvar rotora	9
2.4.3 Kvar namota	10
3. DIJAGNOSTIKA	12
4. METODE OTKRIVANJA KVAROVA	14
4.1 Vizualni pregled stroja	14
4.1.1 Termovizijska dijagnostika	14
4.2 Mjerenje temperature	15
4.3 Mjerenje vibracija	18
4.4 Upotreba penetranta	19
4.5 Provjera ultrazvukom	19
4.6 Mjerenje struje rotora	19
4.7 Mjerenje otpora rotora	20
4.8 Mjerenje magnetskog polja	20
4.9 Mjerenje fizikalnih veličina osovine	21
5. SPEKTRALNA ANALIZA - MCSA	23
5.1 Ekscentricitet	24
5.2 Oštećenje štapa rotora	25
5.3 Oštećenje ležaja	26
5.4 Kratki spojevi na namotima statora	27
5.5 Preopterećenje	27
6. ZAKLJUČAK	28
7. LITERATURA	29

SAŽETAK	31
ABSTRACT	31

1. UVOD

Električni motori se u današnje vrijeme najviše koriste u svrhu pogonskih strojeva te su u velikoj količini prisutni u suvremenoj industriji. Razvojem tehnologije povećala se i razina kompleksnosti električnih motora, a samim time i vrste mogućih kvarova.

U ovom radu opisao sam najčešće moguće kvarove kod električnih motora te metode kojima se navedeni kvarovi mogu detektirati. Nadalje, opisao sam detektiranje kvara pojedinog dijela električnog motora metodom spektralne analize. Fokus ovog rada biti će na asinkronim ili indukcijskim motorima. Ovi motori jednostavne su građe te se zbog njihove pouzdanosti najviše koriste u pogonima suvremenih industrija. Električni rotacijski motori neprestano obavljaju zadatke na visokim granicama rada te su zbog tog razloga vjerojatnosti pojave kvarova iznimno visoke. Ovi poremećaji potaknuti su industrijskim uvjetima u kojima strojevi obavljaju rad te mehaničkim i električnim uzrocima. Industrijske uvijete karakteriziraju: velike promjene temperature, promjene tlakova, udari, vibracije, onečišćenja kao što su vlaga, prašina, pijesak i plinovi, elektromagnetske smetnje i udari, te ljudski utjecaj. Proučavanje električnih rotacijskih motora, to jest njihovog rada prilikom nepravilnosti i odstupanja od normalnog načina rada, predstavlja težak zadatak za sve koji se bave tim područjem. Iz tog razloga, velik broj znanstvenika i inženjera doprinio je istraživanjima o otkrivanju kvarova u najranijoj mogućoj fazi te popravku istih s ciljem smanjivanja materijalne štete. Dokazano je da najveću učestalost kvarova predstavljaju kvarovi vezani uz oštećenje ležaja, potom kvarovi paketa statora, kvarovi paketa rotora, te pojava ekscentriciteta [1]. Ukoliko dođe do jednog od navedenih kvarova, uzročno-posljedičnom vezom pojavit će se problemi kao što su povećana vibracija, buka i gubitci, oscilacije, nepravilnosti u radu, nesimetričnost magnetskog polja i struja, smanjenja momenta, i tako dalje.

Ovaj rad pišem s tendencijom na dijagnostiku i otkrivanje svih vrsta kvarova. Uporabom pouzdanih dijagnostičkih sustava, kvarovi se uspješno mogu detektirati na vrijeme. U suvremenom svijetu, dijagnostički sustavi dodaju se u svaki pogon, s ulogom završne kontrole. Tehnike detekcije kvarova rezultat su dugog istraživanja, praćenja stanja strojeva i mjerenja fizikalnih veličina.

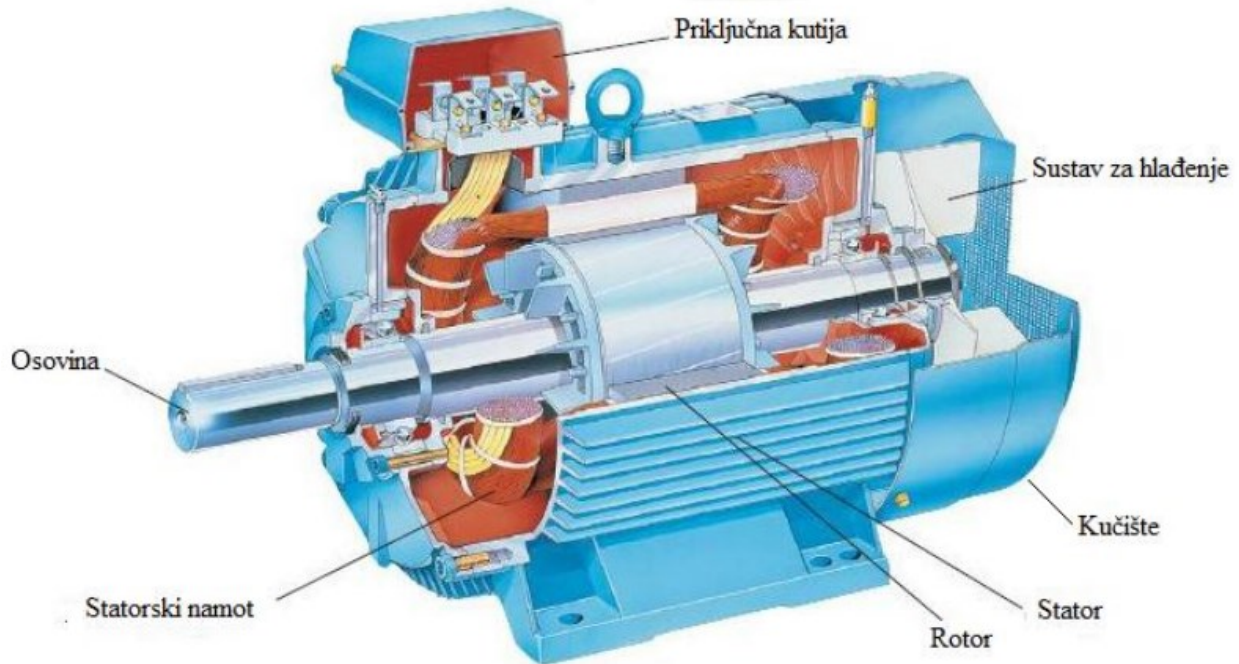
1.1 Zadatak završnog rada

U radu je potrebno opisati najčešće moguće kvarove kod električnih strojeva u radnom pogonu. Opisati sve moguće mjerne metode za otkrivanje kvarova te na osnovu svakog mjerenja spektralnom analizom dati ocjenu stanja svakog pojedinog dijela stroja.

2. NAJČEŠĆI KVAROVI ELEKTRIČNIH MOTORA

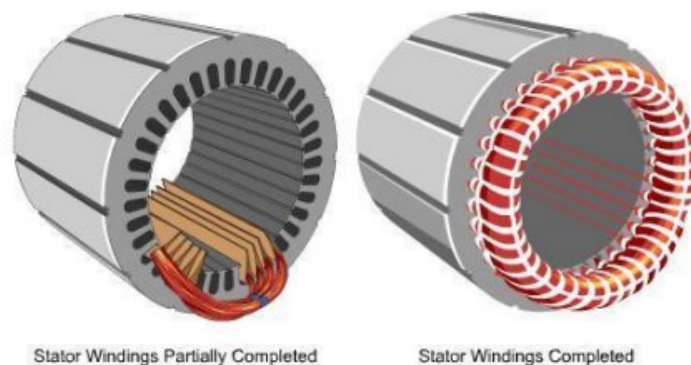
2.1 Izvedba asinkronog stroja

Kako bi znali opisati kvarove električnog stroja, vrlo je bitno da prvo razumijemo njegovu građu, izgled te dijelove od kojih je sastavljen i njegov način rada. Prikaz asinkronog motora možemo vidjeti na slici 2.1.



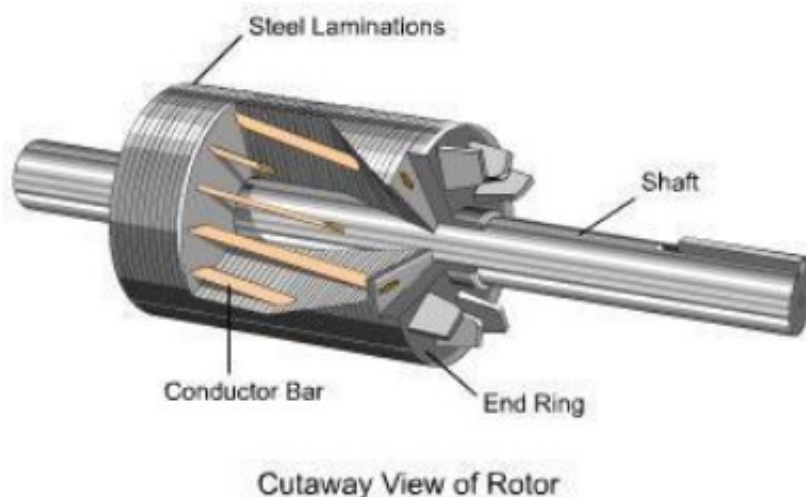
Slika 2.1 Presjek asinkronog motora [12]

Asinkroni motor radi na principu rotacijskog djelovanja, stoga dio koji se okreće nazivamo rotor. U statoru asinkronog stroja stvara se magnetsko polje koje indukcijskim djelovanjem šalje električnu energiju na rotor stroja. Stator motora građen je od namota i paketa statora. Namot statora obično se izvodi od žice koja dobro provodi struju te se namata na statorski paket koji je šupalj i najčešće ima oblik valjka. [10]



Slika 2.2 Namot i paket statora [15]

Rotor motora smješten je na osovini, te je također građen od paketa rotora i namota. Paket rotora izveden je u obliku valjka koji su građeni od dinamo limova, te s njegove vanjske strane sadrži utore u koje se stavlja namot. Namot rotora, kao i statorski namot, može biti građen od svitaka, a može biti izveden i u obliku štapova.

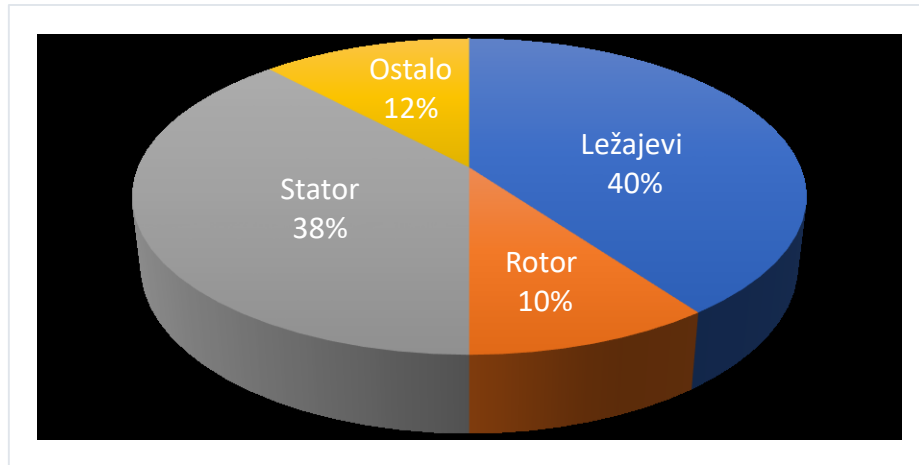


Slika 2.3 Presjek paketa rotora [15]

Kućište motora je najčešće građeno od čelika ili željeza te služi za zaštitu dijelova stroja. Sa statorskim namotom povezane su stezaljke koje se nalaze u priključnoj kutiji smještenoj s gornje strane kućišta. Poveznica između fiksiranog i rotirajućeg dijela motora izvedena je pomoću ležajeva. U radu će se često spominjati i pojam zračni raspor, koji označava mjesto između statora i rotora motora.

2.2 Podjela kvarova

U navedenom odlomku navesti ću i objasniti najčešće kvarove električnih motora. To su mehanički kvarovi, u prvom redu kvarovi ležaja i ekscentricitet, električni kvarovi paketa statora i rotora, te oštećenja i kvarovi namota. Prema istraživanjima iz literature [1], na slici 2.4. prikazana je podjela učestalosti pojave kvarova na različitim dijelovima stroja.



Slika 2.4 Podjela kvarova po dijelovima stroja [1]

Kod kvarova statora najčešće se pojavljuju kvarovi namota, a rotorski kvarovi se dijele na prekid štapa rotora i prekid prstena rotora

2.3 Mehanički kvarovi

Izraz mehanički kvar podrazumijeva da je neki dio, komponenta ili više dijelova mehaničkog sustava, to jest mehanizma, odstupio od svojeg normalnog načina rada. Ako se pojedini dio mehanizma motora ošteti, za posljedicu imamo gubljenje funkcionalnosti električnog motora, smanjenje njegove snage te povećanje razine buke.

Tokom obavljanja funkcije elektromotorni stroj podvrgnut je ogromnim mehaničkim opterećenjima. Segmenti koji su ponajviše izloženi tim opterećenjima, te čine najveći udio mehaničkih kvarova su ležajevi.

Neki tipični problemi mehanizma koje se mogu pojaviti kod rotacijskih strojeva su:

- Kvar i potrošenost ležaja
- Mehanička neravnoteža
- Kvar prijenosnog mehanizma
- Velike vibracije

2.3.1 Kvar ležaja

Ležaj je mehanička komponenta koja u električnim motorima služi u svrhu vođenja dijelova koji se pokreću kao što su osovina ili vratilo na dijelove koji miruju, na primjer kućište motora. Primarni zadatak ležaja je redukcija trenja između navedenih pokretnih i mirujućih dijelova. Dvije osnovne podijele ležajeva su uzdužni i poprečni, a velik dio elektromotornih rotacijskih strojeva koristi ležajeve kugličnog oblika. Građeni su od 2 prstena, unutarnjeg i vanjskog, te reda kugli koje se okreću u kliznoj stazi između 2 prstena.

Prema tome, kvarove ležaja takve građe možemo podijeliti na:

- Kvar unutarnjeg prstena
- Kvar vanjskog prstena
- Oštećenje kugli ležaja
- Kvar klizne staze

Svako od navedenih oštećenja rezultira vibracijom specifične frekvencije. Oštećenje ležaja mogu uzrokovati problemi i mehaničke i električne prirode. Do njih može doći, kako preopterećenjem motora tako i zbog nedovoljnog opterećenja na osovini jer u tom slučaju dolazi do pojave vibracija, nedovoljnim ili pretjeranim podmazivanjem, pojave velikih vibracija, lošeg postavljanja ležaja na osovinu te zbog zastare materijala. Do oštećenja ležaja elektromotora može doći i u slučaju neadekvatnog namota motora jer tada električni tok može preko vanjskog prstena ležaja prijeći na kuglice i kroz unutarnji prsten, te dolazi do iskrenja i uzročno-posljedičnom vezom stvara se električna erozija koja dovodi do oštećenja ležaja. Prema istraživanju [1.] mehanički problemi ležajeva najučestaliji su kvarovi u električnim motorima te se događaju u čak 40-50 posto slučajeva. Na sljedećim slikama možemo vidjeti tipove oštećenja ležaja.



Slika 2.5 Oštećenje ležaja [13]

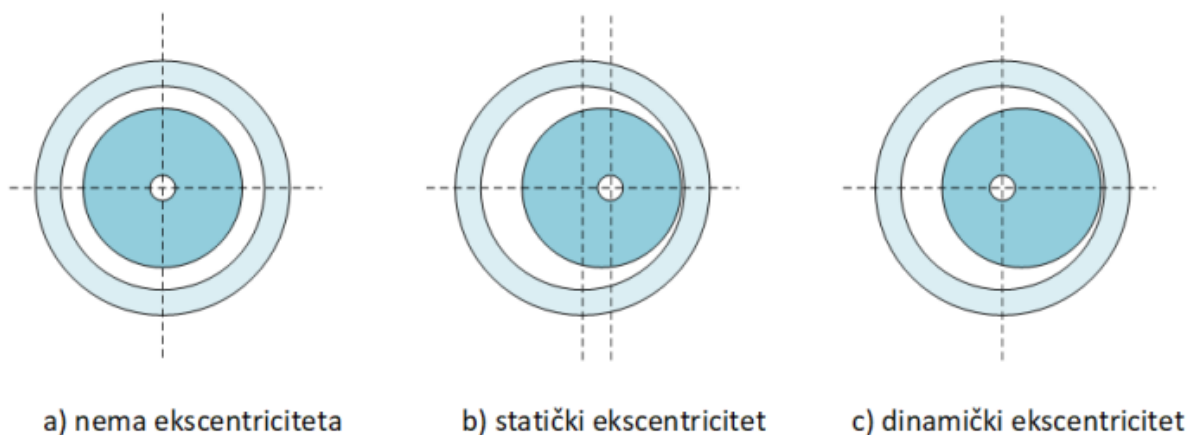


Slika 2.6 Oštećenje ležaja [13]

2.3.2 Ekscentricitet

Ekscentricitet je pojava u kojoj dolazi do nejednakog razmaka između statora i rotora elektromotora. Što je ekscentricitet zračnog raspورا veći, to je veća šansa da se stator i rotor motora dotaknu prilikom čega nastaje velika materijalna šteta. Moguće su tri vrste ekcentriciteta zračnog raspورا, a to su statički, dinamički i mješoviti. Kod statičkog ekscentriciteta, mjesto

najmanjeg zračnog razmaka učvršćeno je u prostoru, te je ovakav ekscentricitet uglavnom uzrokovan krivom ugradnjom statora i rotora prilikom proizvodnje motora. Kod dinamičkog ekscentriciteta osovina motora nije u središtu vrtnje, te mjesto najmanjeg zračnog razmaka nije učvršćeno u prostoru već se vrti s rotorom. Ovu pojavu može uzrokovati savijena osovina rotora i oštećeni ležajevi. Izuzev ove dvije pojave ekscentriciteta, postoji i mješoviti koji je kombinacija statičkog i dinamičkog. U praksi se može tolerirati ekscentricitet do 10 posto, međutim, i to je poželjno ukloniti jer se javljaju vibracije i buka. Ekscentricitet detaljnije možemo podijeliti na paralelni, aksijalni, dijametralni te sedlasti ekscentricitet, ovisno o položaju pomaka rotora.



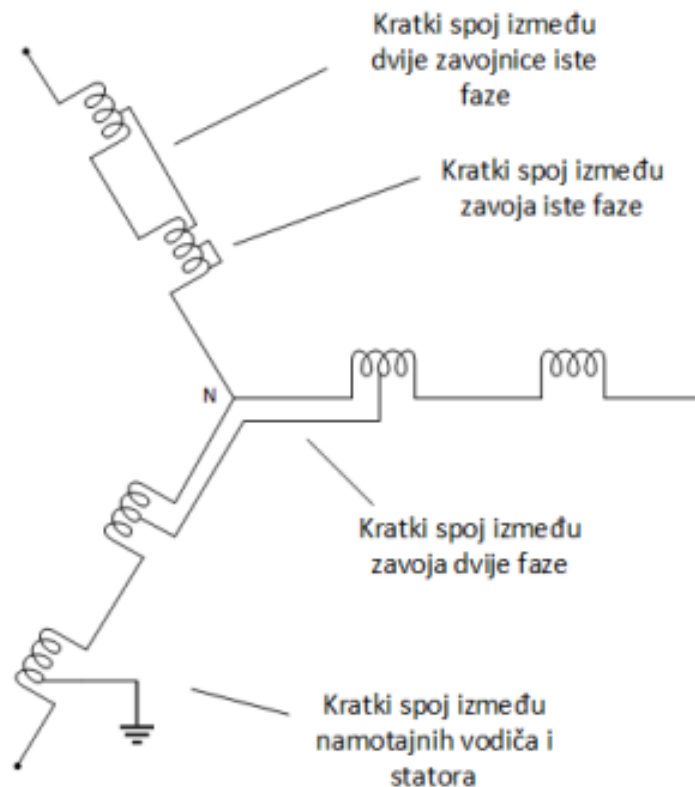
Slika 2.7 Vrste ekscentriteta [14]

2.4 Električni kvarovi

Električni kvarovi: kvar statora i rotora motora, te kvarovi i oštećenja namota

2.4.1 Kvar statora

Prema istraživanju [1], kvar paketa statora električnoga motora pojavljuje se u intervalu od 30 do 40 posto svih kvarova. Kvar paketa statora najčešće je izazvan oštećenjem izolacije namota. Kvar statora uglavnom nastaje kada na oštećenom dijelu namota dođe do kratkog spoja između zavojnica što rezultira pretjeranim zagrijavanjem u slučaju prolaska velike struje. Neki od razloga koji uzrokuju oštećenje izolacije namota su: velike temperature namota statorskog paketa, velike vibracije, degradacija materijala od kojih je stator sačinjen, npr. limovi i spojevi, prljavština u statoru te nakupljanje prašine i vlage, mehanička preopterećenja prilikom pokretanja i zaustavljanja, manjak sustava hlađenja, naponska preopterećenja kod električnih motora koji su napajani preko frekvencijskih pretvarača prilikom brze promjene frekvencije i napona. Ukoliko se ovi problemi ne otkriju na vrijeme, može doći do većih kvarova.

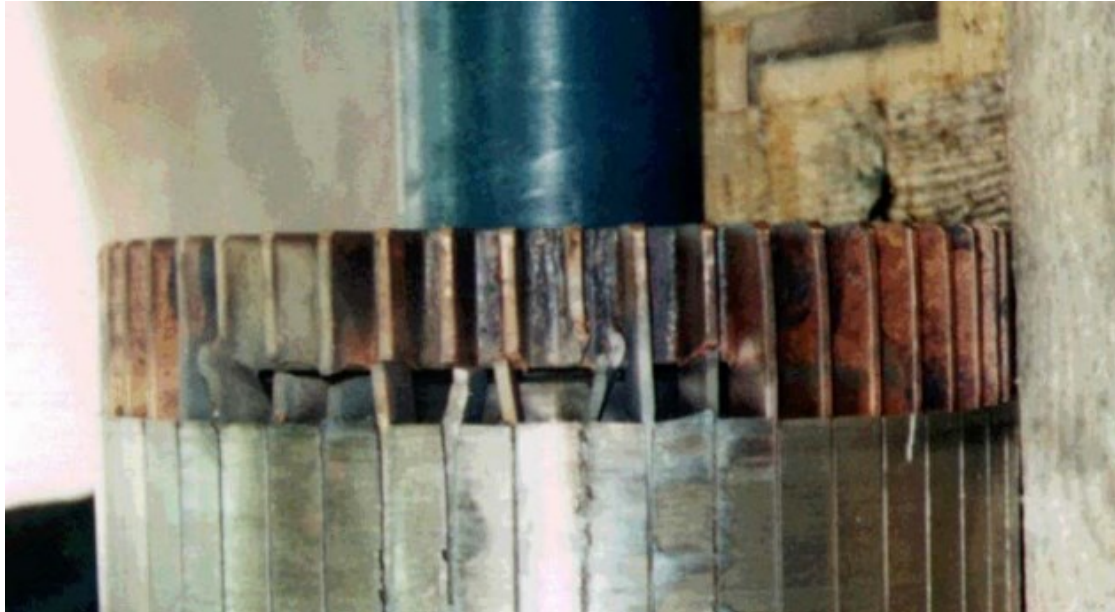


Slika 2.8 Primjeri kratkih spojeva zavojnica [14]

2.4.2 Kvar rotora

Zbog velikih naprezanja uzrokovanih centrifugalnim silama koje se pojavljuju prilikom vrtnje rotora, te mehaničkih preopterećenja, rotor električnog motora također je izložen kvarovima. Prema literaturi [1], rotorski kvarovi, to jest, kvarovi paketa rotora, rotorskog kaveza i namota na rotoru čine 10 posto od ukupnog broja kvarova električnog rotacijskog motora.

Rotorski kavez čine štapovi koji su međusobno spojeni prstenima, te je on najčešće lijevani ili zavareni. Do kvara rotora dolazi prilikom puknuća jednog ili više štapa rotora ili zbog oštećenja prstena koji povezuje štapove. Zbog prisutnosti velike centrifugalne sile, navedena puknuća i oštećenja mogu se brzo proširiti i tako izazvati štetu na ostalim dijelovima motora te ih je radi toga potrebno što prije uočiti. Povećane vibracije su jedni od najranijih indikatora ovog problema.



Slika 2.9 Prikaz oštećenog kaveza rotora [2]

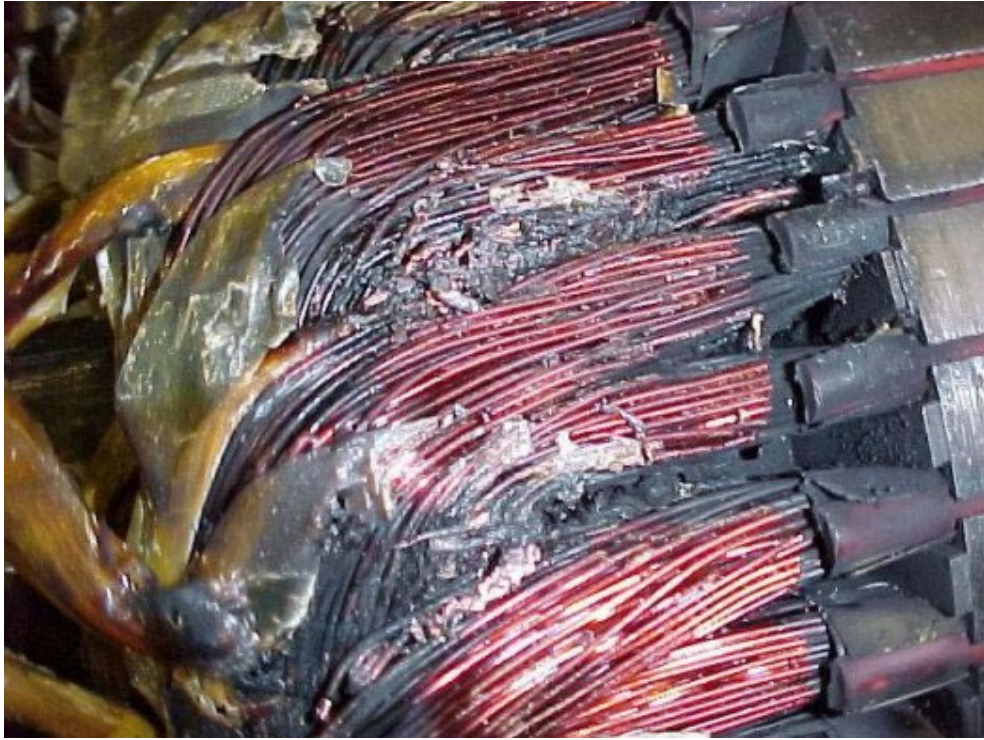
Neki od uzroka pucanja štapa i prstena rotora električnog motora su:

- Velike temperature uzrokovane preopterećenjem stroja
- Ekscentricitet
- Velike elektromagnetske sile koje rezultiraju vibracijama i magnetskim naprežanjem
- Kvarovi ležaja izazvani mehaničkim naprežanjima
- Korozija materijala rotora
- Pretjerano onečišćenje rotora
- Greške u proizvodnji, naprimjer loš var

Prema istraživanju [2], do puknuća štapova rotora najčešće dolazi prilikom pokretanja motora, tj. zaleta jer su u tom trenutku rotorska struja i sile najveće.

2.4.3 Kvar namota

U kvarove namota kod električnog stroja spadaju oštećenja izolacije namota stroja te oštećenje namota rotora kod asinkronog motora. Izolacija namota jako je osjetljiva sastavnica motora te je njeno oštećenje poprilično često. Do oštećenja izolacije namota najčešće dolazi prilikom rada motora na visokim temperaturama. Daljnji razlozi oštećenja izolacije su zastara materijala izolacije, te probijanje stranih tijela u izolaciju kao što je npr. komad metala.



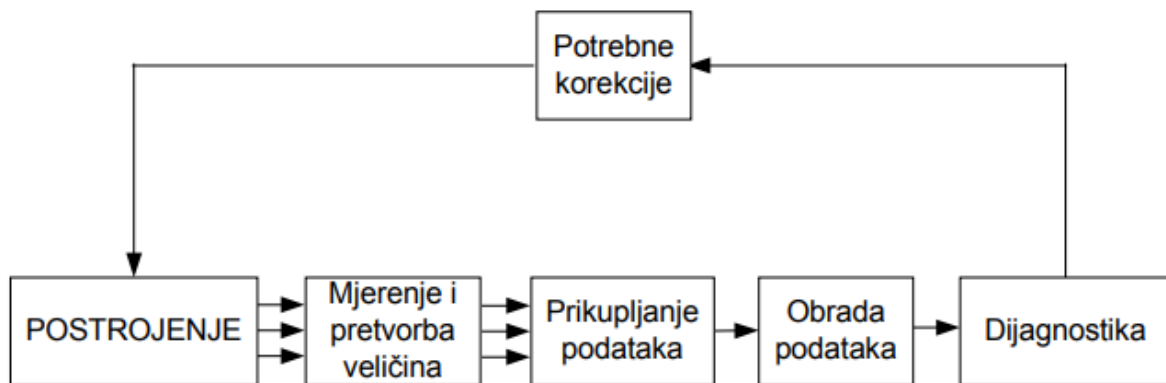
Slika 2.10 Prikaz oštećenog rotorskog namota [2]

3. DIJAGNOSTIKA

Svrha dijagnostike je pravovremena detekcija kvarova pogona ili njegovih dijelova. Otkrivanje nepravilnosti rada stroja u najkraćem mogućem vremenu od iznimne je važnosti u industriji današnjeg svijeta. Kako bi se kvarovi na strojevima otkrili što ranije, uvijek je dobro da pogon bude pod konstantnim nadzorom. Nadzorom pogona uveliko se smanjuje šteta nastala zbog kvara stroja. Temelj dijagnostike je komparacija trenutnih i referentnih parametara električnog stroja, to jest njegovih parametara. Suvremeni načini dijagnostike i velika potreba za korištenje računala olakšali su otkrivanje kvarova u velikom broju pogona. U prošlosti su se uglavnom koristile metode vezane uz mjerenje vibracije i temperature, no u današnje vrijeme, broj mjerenih veličina je puno veći. Uvjeti koji su potrebni da bi sustav za otkrivanje kvarova kod strojeva bio uspješan su: pouzdanost, jednostavnost, prihvatljiva cijena i mogućnost automatizacije dijagnostičkog sustava.

Rad dijagnostike možemo raščlaniti na 4 dijela [4]:

- Mjerenje procesnih veličina
- Prikupljanje informacija
- Obrada informacija
- Dijagnostika



Slika 3.1 Dijagram tijeka rada dijagnostičkog sustava

Fizikalne veličine koje upravljaju radom procesa mjere se bez prestanka. Zatim se dobivene veličine pretvaraju u odgovarajući oblik, šalju na računalo, te se uspoređuju sa referentnim vrijednostima. Ukoliko se pokaže da se izmjerena veličina razlikuje od referentne, to jest da je došlo do odstupanja, dijagnostički sustav šalje povratnu informaciju o mogućem kvaru stroja, te njegovoj poziciji i uzroku. Otkriveni kvar se tada pregledava i na osnovi toga se odlučuje hoće li

pogon nastaviti sa radom ili će doći do prekida. Ukoliko odstupanje dobiveno razlikom između izmjerene i referentne veličine nije veliko, to jest ako je ono unutar predefiniраниh granica, tada ne postoji rizik od većih kvarova, te stoga stroj nastavlja sa radom. Ako je dobiveno odstupanje veliko, to jest ako je ono iznad dopuštenih granica, pogon se mora zaustaviti dok se oštećena komponenta ne popravi.

4. METODE OTKRIVANJA KVAROVA

Pojava svakog kvara rezultira specifičnim problemima. Postoji više načina za otkrivanje kvarova kod električnih strojeva, te ih možemo podijeliti prema sljedećem:

- Vizualni pregled
- Termovizijska dijagnostika
- Mjerenje temperature
- Mjerenje vibracija
- Provjera ultrazvukom
- Upotreba penetranta
- Mjerenje struje rotora
- Mjerenje otpora rotora
- Mjerenje magnetskog polja
- Mjerenje fizikalnih veličina osovine
- Mjerenje momenta i brzine vrtnje
- Spektralna analiza

4.1 Vizualni pregled stroja

Kada bi razmatrali metode otkrivanja kvarova strojeva sa kronološke strane, prva na redu bi se našla metoda vizualnog pregleda stanja stroja. To je temeljna i najjednostavnija tehnika otkrivanja kvara električnog stroja. Kako bi stroj vizualno pregledali, potrebno ga je rastaviti na njegove dijelove, te pregledati dio po dio. U slučaju pronalaska promjene boje ili topljenja materijala na nekom mjestu, vidljivih tragova oštećenja, napuknuća i struganja, možemo lako pronaći mjesto kvara. Mjesta na kojima je promijenjena boja materijala upućuju na pretjerano zagrijavanje, iskrenje, oštećene kontakte ili otapanje kaveza motora u slučaju velikih temperatura. Ako postoje vidljivi tragovi struganja unutar stroja, možemo pretpostaviti da rotor struže od stator, to jest da je došlo do pojave ekscentriteta zračnog rasporeda ili magnetske neuravnoteženosti. Opreznim praćenjem ovih čimbenika možemo dobiti grubu uvid u stanje električnog stroja, pa tako i u uzrok njegovog kvara.

4.1.1. Termovizijska dijagnostika

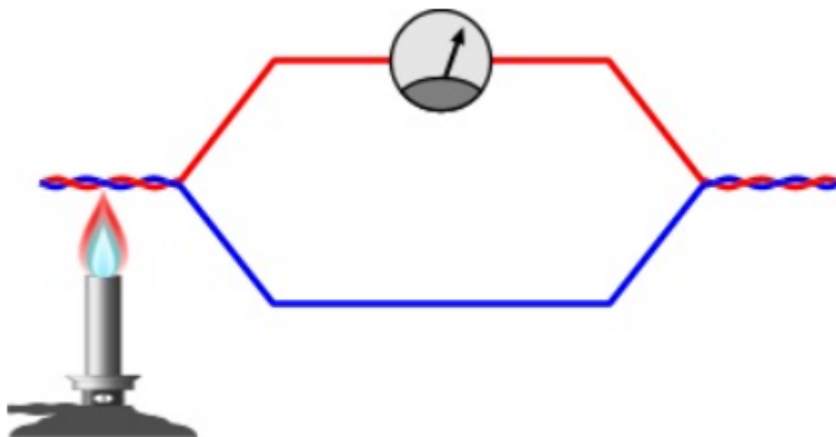
Jedna od vizualnih metoda otkrivanja kvarova je termovizijska dijagnostika. Pregrijavanje stroja ili njegovog pojedinog dijela, jedan je od najranijih pokazatelja kvara. Kod ove metode otkrivanja kvara, pogon se konstantno promatra posebnim termovizijskim kamerama. One nam daju

Termometri – otporni termometri su uređaji koji pomoću promjene veličine otpora definiraju trenutnu temperaturu. Sastoje se od žičanih otpornika te su najčešće napravljeni od materijala koji imaju velik temperaturni koeficijent. Primjeri takvih materijala su slitine, kao što su nikal ili platina. U mjerenju temperature stroja otpornim termometrom najčešće koristimo otpornik Pt100.



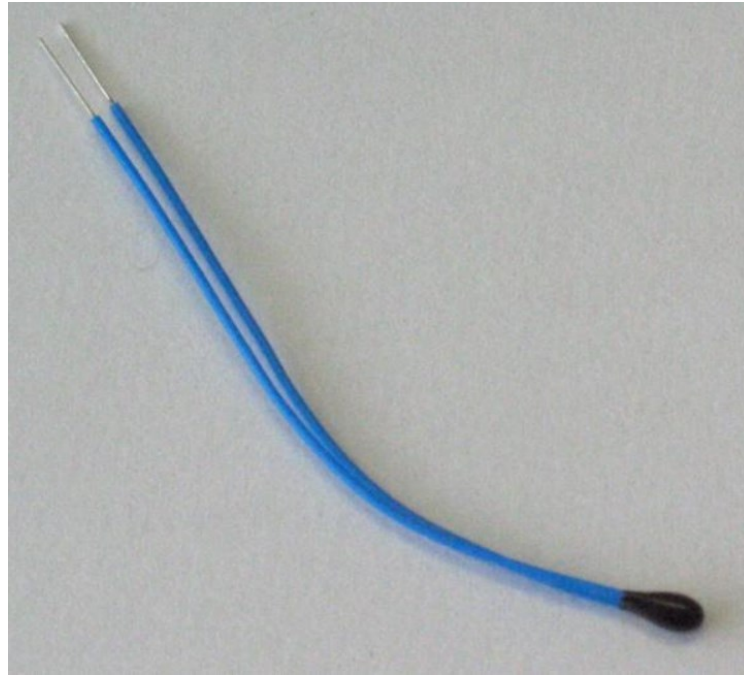
Slika 4.2 Pt100 RTD termometar [16]

Termoparovi – termoparovi ili termoelementi su mjerni pretvornici koji razliku između temperature pretvaraju u razliku između elektromotornih sila. Građeni su od dva različita materijala čije je spojište na različitoj temperaturi. Najpoznatiji termoparovi su: željezo-konstantan, bakar-konstantan, rodij-platina, krom-nikal i krom-alumel.



Slika 4.3 Ilustracija termoelementa [16]

Termistori – termistori su poluvodički termootpornici, imaju veći otpor od metalnih termootpornika (1Ω - 100Ω), veliki temperaturni koeficijent otpora, male vremenske konstante i nelinearnu karakteristiku. Otpor termistora smanjuje se povećanjem temperature, što znači da ima NTC, to jest negativni temperaturni koeficijent. Termistori mogu biti izvedeni u obliku pločice, štapića, kuglice ili zrna, te daju rezultate velike točnosti



Slika 4.4 Prikaz NTC termistora sa negativnim koeficijentom temperaturne promjene [17]

4.3 Mjerenje vibracija

Vibracija je jedan od najčešćih pokazatelja kvara električnog stroja. Mjerenjem ove veličine mogu se otkriti potencijalni kvarovi ležaja, te statorskih i rotorskih paketa. Uz mjerenje temperature, mjerenje vibracija je jedna od najčešćih metoda otkrivanja kvarova i oštećenja u suvremenim pogonima. Povećana vibracija može ukazivati na ekscentricitet, magnetsku nesimetričnost, oštećenja ležaja, temelja i ostalih dijelova motora, neravnotežu rotora i tako dalje.

Kod mjerenja vibracije, proučavaju se 3 temeljne veličine [4]:

- amplituda
- brzina
- ubrzanje

Vibracije se mogu mjeriti vibrometrima, akcelometrima i proksimetrima. Ukoliko je iznos vibracije iznad dopuštene granice definirane propisima, pogon je potrebno zaustaviti te pronaći i otkloniti kvar na stroju.



Slika 4.5 Vibrometar [16]

4.4 Upotreba penetranta

Upotreba penetranta omogućava pronalazak bilo kakvih napuknuća, oštećenja i kratkih spojeva na prstenovima rotora i izolaciji namota. To su posebne tekućine koje mogu biti i u obliku spreja te se njima prskaju dijelovi električnog stroja, uglavnom rotora. Kada se ta tekućina, to jest penetranta zavuče u pukotinu oštećenog dijela, oštećenje bude vidljivo.



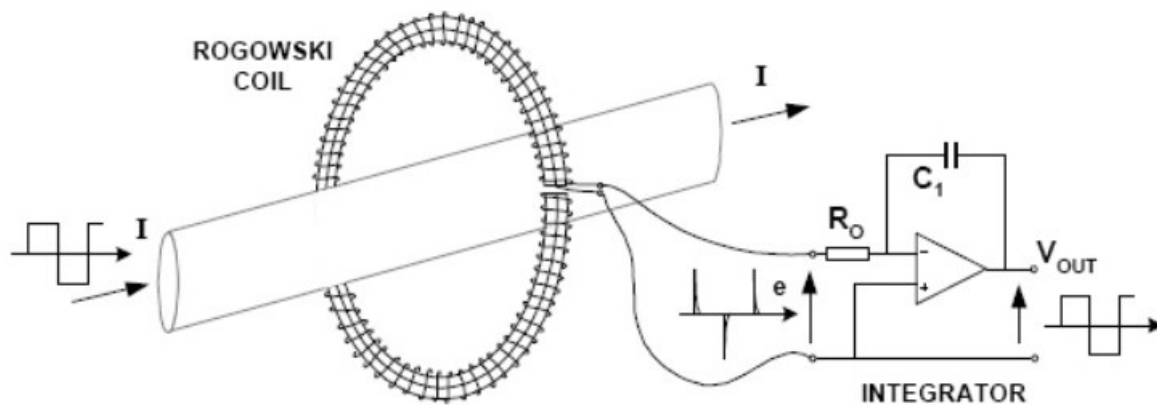
Slika 4.6 Detekcija pukotina pomoću penetranta [2]

4.5 Provjera ultrazvukom

Provjera električnog stroja ultrazvukom omogućava otkrivanje oštećenja i napuknuća dijelova stroja koje ne možemo uočiti golim okom. Osim toga, ova metoda je korisna u uočavanju oštećenja stroja čak i kada je stroj zagrijan i kada su pukotine još zatvorene.

4.6 Mjerenje struje rotora

Kod asinkronih motora vrlo je bitno da su kontakti kliznih prstena i četkica ispravni, jer u suprotnom može doći do smetnja za vrijeme rada. Do pretjeranog zagrijavanja rotora električnog stroja može doći i zbog nesimetričnosti otpora koji su povezani s rotorom. Poteškoća kod mjerenja struje rotora je ta da su te struje jako niske frekvencije, što mjerenje s uobičajenim transformatorom predstavlja problem. Iz tog razloga, struju rotora možemo mjeriti pomoću Rogowski zavojnica [4]. Zavojnicama Rogowski provede se mjerenje na svim rotorskim strujama, zatim se vrši integracija dobivenih signala kako bi se dobio napon koji je proporcionalan struji, te se izračunava srednja vrijednost. Zatim se srednja vrijednost struje komparira sa strujom iz svake pojedine faze. Ako postoji odstupanje, dijagnostički sustav detektirat će kvar.



Slika 4.7 Mjerenje struje sa Rogowski zavojnicama [21]

4.7 Mjerenje otpora rotora

Mjerenjem otpora dijelova rotora, to jest štapa i prstena također se može otkriti kvar. Kako bismo ovo mjerenje proveli, prvo moramo zaustaviti pogon te rastaviti stroj. Mjerenje se jako često obavlja po dijelovima štapa, tako da se ne mjeri otpor na cijelom štapu u isto vrijeme. Ovakvo mjerenje osigurava nam detektiranje točne pozicije kvara.

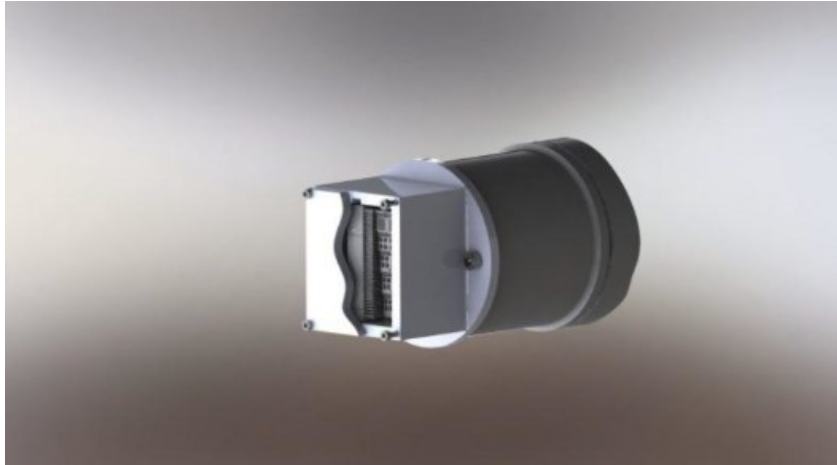
4.8 Mjerenje magnetskog polja

Prema [5], velik broj istraživanja upućuje na to da mjerenje magnetskog polja oko ili unutar stroja može pokazati kvarove.

Neki od najčešćih kvarova su:

- kratki spojevi statora
- kratki spojevi rotora
- oštećeni štapovi i prsteni rotora
- ekscentricitet

Ova metoda otkrivanja kvara zasniva se na rezultatima mjerenja magnetskog polja sa svitkom koji se nalazi u zračnom prostoru stroja. Na sljedećoj slici možemo vidjeti senzor tvrtke KONČAR koji se postavi u zračni raspored stroja i na taj način mjeri magnetsko polje.



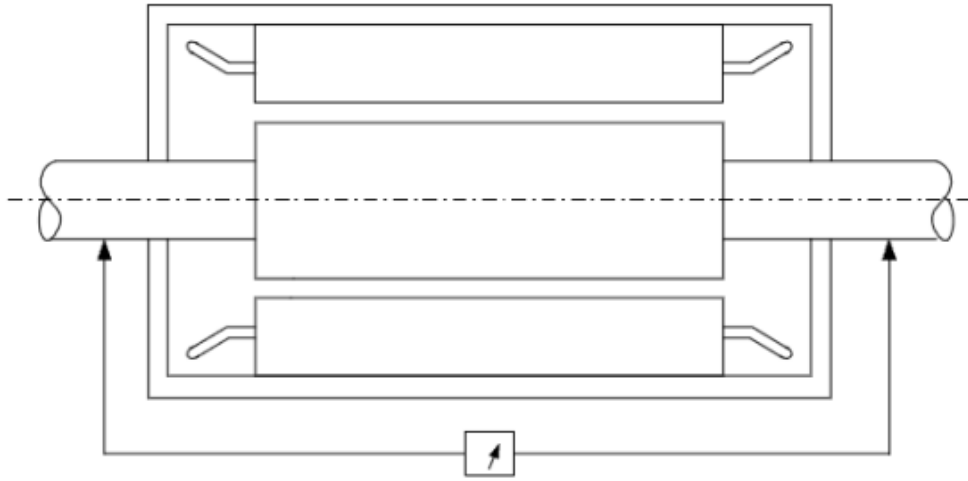
Slika 4.8 Senzor za mjerenje magnetskog polja [5]

4.9 Mjerenje fizikalnih veličina osovine

Jedna od metoda otkrivanja kvarova je mjerenje struje i napona osovine. U ovom mjerenju koristi se inducirani napon osovine i struja osovine koja kod većih strojeva može postati prevelika i tako oštetiti ležajeve. Prema literaturi [4], ova tehnika otkrivanja kvarova nije pouzdana, jer su otpori na osovini i četkicama kod manjih struja preveliki da bi se izmjerila odstupanja u struji i naponu osovine. Zbog tog razloga kvar se detektira prekasno.

Najčešći razlozi pojave napona na osovini su:

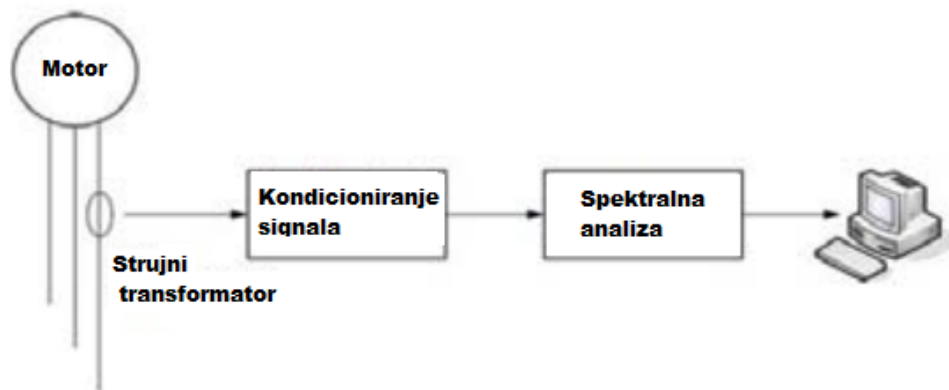
- Pojava magnetskog toka u osovini i oko nje
- Pojava viših harmonika
- Unipolarne struje
- Nesimetričan način rada
- Pojava elektrostatskog naboja
- Pojava vanjskih struja



Slika 4.9 Mjerenje napona na osovini [11]

5. SPEKTRALNA ANALIZA - MCSA

U današnje vrijeme, jedna od najboljih metoda za otkrivanje kvarova je spektralna analiza struje statora. Ovom tehnikom pouzdano se mogu detektirati kvarovi kao što su međuspojevi na zavojnicama, oštećenja ležaja, oštećenja rotorskih štapova te ekscentritet. Spektralna analiza uvelike može doprinijeti detekciji ovih kvarova električnog motora. Ova tehnika otkrivanja kvara temelji se na procjeni spektra struje namota na statora. Spektralna analiza (eng. Motor Current Signature Analysis), skraćeno MCSA, koristi se od 1970. za otkrivanje kvarova u transformatorima, indukcijskim motorima, generatorima i ostalim električnim uređajima, prema [2,6], te mu je prva svrha bila analiza nepristupačnih motora koji su se najčešće nalazili u nuklearnim elektranama[6]. Razvojem tehnologije i znanosti, ova metoda u današnje vrijeme pronašla je primjenu u široj industriji. Prednost ove tehnike je ta što se za analizu stroja ne mora zaustavljati pogon, već se objekt mjerenja analiza pod opterećenjem, to jest u normalnom radu, [6]. Spektralna analiza može se koristiti u svrhu dijagnostičkog sustava, tako da otkrije kvarove i odstupanja u radu prije nego što se oni razviju, te se na taj način smanjuje velika potencijalna materijalna šteta. Također, MCSA je dobar nadomjestak mjerenju vibracija i termovizijskoj dijagnostici. Još jedna od prednosti spektralne analize je ta što za provedbu mjerenja nisu potrebni dodatni kompleksni uređaji, već ovakva mjerenja provodimo pomoću transformatora, to jest strujnih kliješta.



Slika 5.1 Sistem za snimanje statorskih struja

Spektralna analiza temelji se na odstupanjima u zračnom rasporu što se očituje na spektraru struje stroja tako da dolazi do promjene elektromotornih sila. Nad strujom statora obavlja se Furierova transformacija. To je matematički postupak koji podatak o frekvenciji iz vremenskog područja pretvara u frekvencijsko područje, to jest u prikaz ovisnosti amplitude na definiranoj frekvenciji.

Svaki kvar dovodi do jedinstvene promjene u magnetskom polju, te se odražava na promjene spektra struje statora.

Kvarovi koji se detektiraju spektralnom analizom statorske struje su:

- Ekscentricitet
- Oštećenja štapa rotora
- Oštećenja ležaja
- Kratkispojevi na namotima statora
- Preopterećenje

5.1 Ekscentricitet

Radi nesimetričnosti u rasporedu između statora i rotora dolazi do pojave promjene u spektru struje statora. Do dinamičkog ekscentriciteta dolazi kada se os rotora i rotacije ne poklapaju, kod deformiranog oblika rotora, zbog loših ležajeva i tako dalje. Ekscentricitet stvara promjene u frekvenciji koja se očitava spektralnom analizom [2].

Dodatne komponente u frekvencijskom spektru uzrokovane ekscentricitetom možemo prikazati sljedećim izrazom [20]:

$$f_{eksc} = f_1 \left[(k \cdot N_R \pm n_d) \frac{1-s}{p} \pm n_{vh} \right] \quad (5-1)$$

Gdje je:

f_1 - frekvencija napona mreže

k - cijeli broj

N_R - broj utora rotora

n_d – stupanj ekscentriciteta (0-statički, 1-dinamički)

s – klizanje

p – broj pari polova

n_{vh} - red višeg harmonika

5.2 Oštećenje štapa rotora

U slučaju nesimetrije kaveza rotora, koja je uzrokovana puknućem jednog ili više štapa rotora, u rotacijskom polju stvara se inverzna komponenta koja se okreće u suprotnom smjeru naspram rotora. To odstupanje nije dobro za mrežu. Oštećeni štapovi rotora uzrokuju posebne harmonike kod frekvencija koje možemo prikazati sljedećom formulom [20]:

$$f_{bh} = f_1(1 \pm 2s) \quad (5-2)$$

Gdje je:

s – klizanje

f_1 – frekvencija napona mreže

f_{bh} - frekvencija bočnih harmonika

Analizom frekvencija bočnih harmonika, možemo detektirati kvarove električnog stroja, preciznije kvar kaveza rotora u najkraćem mogućem vremenu.

Veličine koje utječu na rezultat spektralne analize te ih je poželjno pratiti su:

- Stupanj kvara rotora
- Izvedba kaveza
- Iznos tereta
- Prijenosni mehanizmi
- Snaga motora

Radi navedenih razloga, poželjno je da se ovakva spektralna analiza provodi pažljivo. Moguć problem nastaje kada u izvedbi motora štapovi rotora i paket rotora nisu međusobno izolirani. Tada dolazi do pojave struje između dva štapa što dovodi do odstupanja u spektralnoj analizi. Zbog toga je ovu metodu poželjno naknadno potvrditi nekom od drugih metoda za otkrivanje rotorskih kvarova. Nadalje, veličina bočnih harmonika raste stupnjem oštećenja rotora. Što je više rotorskih štapova oštećeno, to će vrijednost bočnih harmonika rasti.

Spektralnu analizu oštećenih rotorskih štapova možemo prikazati sljedećom jednadžbom [20]:

$$f_{bh} = \left[\left(\frac{k}{p} \right) (1 - s) \pm s \right] f_1 \quad (5-3)$$

Gdje je:

f_1 – mrežna frekvencija

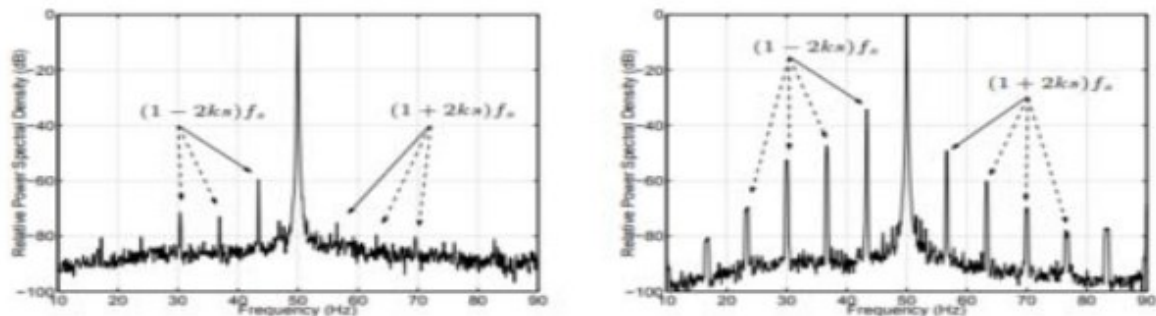
s – klizanje

k- cijeli broj

p- broj pari polova

Kako bi se dobio precizan rezultat mjerenja, motor mora biti opterećen sa minimalno 50 posto iz razloga što bočni harmonici ovise o opterećenju, to jest oni su viši pri većem opterećenju.

Prema literaturi [2], sljedeća slika 5.1 prikazuje spektralnu analizu motora sa ispravnim i neispravnim štapovima rotora.



Slika 5.1 Analiza ispravnog i neispravnog štapa rotora [2]

5.3 Oštećenje ležaja

Metodom spektralne analize moguće je otkriti i kvarove na ležajima motora tako da provedemo analizu frekvencije. Oštećenjem ležaja nastaju vibracije koje utječu na frekvenciju koja se mjeri spektrom struje. Ta frekvencija dana je jednadžbom [20]:

$$f_{lež} = |f_1 \pm m \cdot f_v| \quad (5-5)$$

Gdje su:

$f_{lež}$ – frekvencija kvara ležaja

f_1 – frekvencija napona mreže

f_v – frekvencija vibracije

m – cijeli broj

5.4 Kratki spojevi na namotima statora

Velik broj kvarova električnih motora uzrokovan je nepravilnosti u namotima statora. Međuspojevi u velikoj mjeri uzrokuju pregrijavanje motora. Spektralnom analizom statorskih struja također možemo pravovremeno detektirati ovakve kvarove. To je moguće jer se u namotima induciraju veličine koje možemo pratiti pomoću MCSA. Te veličine su prikazane sljedećom jednačbom [20]:

$$f_{st} = f_g \left[\frac{n}{p} (1 - s) \pm k \right] \quad (5-6)$$

Gdje je:

f_{st} – frekvencija kratkog spoja

f_g – frekvencija napona mreže

p – broj pari polova

n, k – cijeli brojevi

5.5 Preopterećenje

Električni motor je uređaj koji proizvodi mehaničku energiju pomoću dobivene električne energije. Proizvedena energija dalje se prenosi preko osovine i pretvara u sljedeći oblik potreban za daljnji rad pogona. Preopterećenje motora također se može mjeriti pomoću spektralne analize. Promjena opterećenja opisana je sljedećom jednačbom [20]:

$$f_{load} = f_s \pm m f_r = f_s \left[1 \pm m \left(\frac{1-s}{s} \right) \right] \quad (5-7)$$

Gdje je:

f_r – frekvencija rotora

f_s – frekvencija mreže

p – broj pari polova

s – klizanje

m – cijeli broj

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu smo obradili najčešće kvarove kod električnih strojeva u radnom pogonu te sve moguće mjerne metode za otkrivanje tih kvarova. Kako je prikazano na slici 2.1, najveći broj kvarova pojavljuje se u ležajima stroja, zatim na statoru i rotoru stroja, a 12% čine ostali kvarovi kao što je ekscentricitet. Kvarovi rotora povezani su sa štapom rotora i prstenima rotora, a na statoru uglavnom dolazi do oštećenja izolacije namota. U radu je opisan velik broj metoda za otkrivanje kvarova, a to su: vizualni pregled kao najstarija metoda, mjerenje vibracija, mjerenje temperature, termovizijska dijagnostika, upotreba penetranta, metoda provjere utrazvukom, mjerenje struje i otpora rotora, mjerenje magnetskog polja i provjera osovine. Možemo zaključiti da su sve obrađene mjerne metode za otkrivanje kvarova uspješne te da su one vrlo bitan dio dijagnostike današnjih pogona. Posebno korisnom pokazala se metoda spektralne analize (MCSA) čime se mogu detektirati kvarovi kao što su međuspojevi zavojnica, oštećenja ležaja, oštećenja rotorskih štapova te ekscentritet. Velika prednost analize spektra je ta što prekid rada pogona nije neophodan i nije potrebna ugradnja dodatnih uređaja za mjerenje. Spektralna analiza temelji se na pretpostavci da svako odstupanje stroja rezultira stvaranje bočnih harmonika u spektru struje statora.

7. LITERATURA

- [1] S. Nandi, H.A. Toliyat, X. Li: "Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors", 2005
- [2] Alan Miletić: Dijagnostičke metode i kriteriji za ocjenu stanja asinhronih motora, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2002.,
- [3] Ban D. i suradnici, "Tehničke preporuke za redovito održavanje elektrostrojarske opreme u termoelektranama HEP-a, Knjiga 1: OPĆI DIO" , 1999.
- [4] Tavner P. J., Penman J., "Condition Monitoring of Electrical Machines", John Wiley & Sons Inc., New York 1987.
- [5] Preuzeto s web stranice: Končar institut za elektrotehniku
URL: <https://www.koncar-institut.hr/hr/english-self-powered-diagnostic-system/>
Datum pristupa: 12.7.2022.
- [6] Dubravko Miljković: Brief review of Motor current signature analysis, 2015.
- [7] Šemsudin Mašić: Električni strojevi, Elektrotehnički fakultet u Sarajevu, 2006.
- [8] Jurković B., "Elektromotorni pogoni", Školska knjiga Zagreb, 1983.
- [9] Thomson W T., Fenger M., "Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults", 2001
- [10] I. Mandić, V. Tomljenović, M. Pužar: "Udžbenik Tehničkog Veleučilišta u Zagrebu 2012".
- [11] Predoje Zubović, dipl. ing.: "O naponu osovine i ležajnim strujama velikih električnih strojeva (i agregata): uzroci, mjerenje, zaštita i sprječavanje" XI. – Stručno savjetovanje Elektroenergetičara Jugoslavije – Ohrid od 01. do 06. listopada 1972 – Referat broj 11.20
- [11] Preuzeto s web stranice: enciklopedija
URL: <https://enciklopedija.hr/>
Datum pristupa: 20.8.2022.

[12] Preuzeto s WEB stranice:

URL: <http://e-elektro.blogspot.com/2013/08/trofazni-asinkroni-motor-s-kaveznim.html>

Datum pristupa: 20.8.2022.

[13] Preuzeto s WEB stranice:

URL: <https://mgatrgovina.com/news/zbog-cega-dolazi-do-kvara-lezajeva/>

Datum pristupa: 20.8.2022.

[14] T. Juroš: Detekcija kvarnih stanja asinkronog motora analizom strujnog spektra, Osijek, 2019.

[15] M. Vusić: Utjecaj napona mreže na karakteristiku momenta kaveznog asinkronog motora, Varaždin, 2017.

[16] Preuzeto s WEB stranice:

URL: <https://www.automatika.rs/baza-znanja/senzori/termoparovi.html>

Datum pristupa: 20.8.2022.

[17] Preuzeto s WEB stranice:

URL: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Termistor>

Datum pristupa: 20.8.2022.

[19] Preuzeto s WEB stranice:

URL: <http://termovizijsko-snimanje.com/>

Datum pristupa: 20.8.2022.

[20] Polutan, Imamović: Dijagnostika kvarova asinkronih motora na osnovu analize spektra statorskih struja, Zenica, 2018.

[21] Preuzeto s WEB stranice:

URL: <https://www.rs-online.com/designspark/what-is-a-rogowski-coil-current-probe>

Datum pristupa: 20.8.2022.

SAŽETAK

Glavni cilj ovog rada bio je navesti i opisati najčešće moguće kvarove kod električnih strojeva u radnom pogonu, te navesti i opisati sve moguće mjerne metode za otkrivanje kvarova i na osnovu svakog mjerenja spektralnom analizom dati ocjenu stanja svakog pojedinog dijela stroja. U prvom dijelu rada navedene su i opisane vrste kvarova. Kvarovi električnog stroja podijeljeni su po njegovim dijelovima, to jest kvarovi rotora, statora, namota, ležaja i osovine. U drugom dijelu rada opisan je velik broj metoda za otkrivanje kvarova, a to su: vizualni pregled kao najstarija metoda, mjerenje vibracija, mjerenje temperature, termovizijska dijagnostika, upotreba penetranta, metoda provjere ultrazvukom, mjerenje struje i otpora rotora, mjerenje magnetskog polja i mjerenje fizikalnih veličina osovine. Na kraju rada posebno je opisana metoda spektralne analize.

Ključne riječi: dijagnostika, kvar, električni motor, spektralna analiza

ABSTRACT

Topic: Diagnostic system for detecting faults in electrical machines.

The main task of this work was to list and describe the most common possible failures of electrical machines in operation, and to list and describe all possible measurement methods for detecting failures and, based on each measurement, to give an assessment of the condition of each individual part of the machine through spectral analysis. In the first part of the work, the types of failures are listed and described. Electrical machine failures are divided by its parts, i.e. rotor, stator, winding, bearing and shaft failures. In the second part of the paper, a large number of methods for detecting faults are described, like visual inspection as the oldest method, vibration measurement, temperature measurement, thermal imaging diagnostics, use of penetrants, ultrasonic testing method, measurement of rotor current and resistance, measurement of the magnetic field and measurement physical dimensions of the shaft. At the end of the paper, the spectral analysis method is specifically described.

Key words: diagnostics, failure, electric motor, spectral analysis