

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Mantas Jatautas

TRIFAZIŲ ASINCHRONINIŲ VARIKLIŲ DIAGNOSTIKOS
METODŲ TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Lekt. dr. Jonas Vanagas

KAUNAS, 2017

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

TRIFAZIŲ ASINCHRONINIŲ VARIKLIŲ DIAGNOSTIKOS
METODŲ TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas
Elektros energetikos inžinerija (kodas 612H63003)

Vadovas

Lekt. dr. Jonas Vanagas
2017-06-02

Recenzentas

Prof. dr. Renaldas Raišutis

Projektą atliko

Mantas Jatautas
2017-06-02

KAUNAS, 2017



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Mantas Jatautas

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos inžinerija, 621H63003

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Trifazių asinchroninių variklių diagnostikos metodų tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. birželio 2 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Manto Jatauto** baigiamasis projektas tema „Trifazių asinchroninių variklių diagnostikos metodų tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Jatautas, Mantas. Trifazių asinchroninių variklių diagnostikos metodų tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas lekt. dr. Jonas Vanagas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

Mokslo kryptis ir sritis: Elektros ir elektronikos inžinerija, Technologiniai mokslai

Reikšminiai žodžiai: asinchroninis variklis, monitoringas, diagnostika, vibracijos, srovės spektras.

Kaunas, 2017. 66 p.

SANTRAUKA

Šiame darbe analizuojami šiuolaikiniai trifazių asinchroninių variklių diagnostikos metodai, jų privalumai bei trūkumai. Trifazio asinchroninio variklio guolių defektai diagnozuojami statoriaus fazinės srovės spektro analizės ir vibracijos spektro analizės metodais. Trumpieji tarpapvijiniai sujungimai variklio statoriaus apvijose ir nutrūkę rotoriaus strypai nustatomi statoriaus fazinės srovės spektro analizės metodu.

Tyrimo metu gauti rezultatai leidžia teigti, kad patikimai diagnozuoti trifazių asinchroninių variklių guolių defektus galima vibracijos spektro analizės metodu, o trumpuosius tarpapvijinius sujungimus statoriaus apvijose bei nutrūkusius rotoriaus strypus galima patikimai nustatyti variklio statoriaus fazinės srovės spektro analizės metodu.

Jatautas, Mantas. Analysis of Condition Monitoring Methods for Three-Phase Induction Motors: Master's thesis in Electrical Power Engineering / supervisor lect. dr. Jonas Vanagas. Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Electrical Power Systems.

Research area and field: Electrical and Electronics Engineering, Technological Sciences

Key words: induction motor, monitoring, diagnostics, vibrations, current spectrum.

Kaunas, 2017. 66 p.

SUMMARY

The work analyses state-of-the-art methods for asynchronous induction motors faults diagnosis and their merits and demerits. Three-phase asynchronous induction motor bearing faults are diagnosed using motor current signature analysis and vibration spectrum analysis methods. Turn-to-turn short circuits in motors stator windings and broken rotor bars are identified using motor current signature analysis method.

The results of this research affirm, that three-phase asynchronous induction motors bearings faults can be reliably diagnosed using vibration spectrum analysis method and turn-to-turn short circuits in motors stator windings and broken rotor bars can be reliably identified using motor current signature analysis method.

TURINYS

ĮVADAS.....	8
1. TRIFAZIŲ ASINCHRONINIŲ VARIKLIŲ GEDIMŲ RŪŠIŲ IR JŲ DIAGNOSTIKOS METODŲ LITERATŪROS APŽVALGA.....	10
1.1 Trifazių asinchroninių variklių gedimų rūšys	10
1.1.1 Rotoriaus gedimai	10
1.1.2 Statoriaus gedimai	11
1.1.3 Oro tarpo ekscentricitetas.....	12
1.1.4 Guolių gedimai.....	13
1.2 Trifazių asinchroninių variklių diagnostikos metodai.....	15
1.2.1 Statoriaus fazinės srovės dažnių spektro analizė (MCSA)	15
1.2.2 Vibracijos dažnių spektro analizė	23
1.2.3 Park'o vektorinis (PVA) ir išplėstasis Park'o vektorinis (EPVA) metodai	25
1.2.4 Momentinės galios spektro analizė (IPSA).....	30
1.2.5 Šiluminės būsenos monitoringas.....	33
1.2.6 Radialinio magnetinio srauto tyrimas stebėjimo ritėmis.....	38
1.2.7 Magnetinio sklaidos srauto dažnių spektro analizė.....	42
2. TYRIMO ATLIKIMO METODIKA.....	46
2.1 Gedimų diagnostikos metodika tiriant MCSA būdu	46
2.2 Gedimų diagnostikos metodika tiriant vibracijos spektro analizės būdu.....	49
2.3 Tyrimo metu varikliui sukelti defektai.....	50
3. DIAGNOSTIKOS METODŲ TYRIMAS IR REZULTATAI	53
3.1 Variklio guolių gedimų diagnostika MCSA metodu	53
3.2 Variklio guolių gedimų diagnostika vibracijos spektro analizės metodu	56
3.3 Variklio statoriaus gedimų diagnostika MCSA metodu	59
3.4 Variklio rotoriaus gedimų diagnostika MCSA metodu	60
IŠVADOS IR PASIŪLYMAI.....	62
LITERATŪRA.....	63

SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS

f_s – maitinimo įtampos dažnis, Hz;

f_r – rotoriaus sukimosi dažnis, Hz;

p – polių porų skaičius;

s – slydimas;

k – teigiamas nelyginis sveikasis skaičius ($k = 1, 3, 5, \dots$);

n – teigiamas sveikasis skaičius ($n = 1, 2, 3, \dots$);

R – rotoriaus griovelių skaičius.

IVADAS

Trifaziai asinchroniniai elektros varikliai plačiai naudojami pramonėje dėl paprastos konstrukcijos, patikimumo ir sąlyginio pigumo bei valdymo galimybės naudojant dažnio keitiklius.

Galimybė nuolat stebėti ir vertinti elektros mašinų būklę yra labai svarbi, nes netikėti gamybos procese dalyvaujančių variklių gedimai dažnai sąlygoja didelius finansinius nuostolius tiek dėl pačių elektros mašinų remonto ir su tuo susijusių išlaidų, tiek ir dėl gamybos proceso sustabdymo. Neretai nuostoliai dėl gamybos proceso sustabdymo yra daug kartų didesni nei pačios sugedusios įrangos vertė. Todėl šiuolaikinėje pramonėje yra didelis sistemų, kuriomis būtų galima stebėti ir iš anksto numatyti netrukus įvyksiančius rimtus elektros variklių gedimus, poreikis. Taip būtų taupomos lėšos, kurias tenka skirti skubiam įrangos remontui ar keitimui nauja įranga bei sumažėtų nuostoliai dėl neplanuotų gamybos proceso stabdymų ir potencialios grėsmės darbuotojų saugai. Be to, būtų išvengiama papildomo kenksmingų medžiagų išmetimo į aplinką stabdant bei iš naujo paleidžiant visą gamybos procesą ar jo dalį.

Statistiškai guolių gedimai sudaro apie 40 % visų variklių gedimų, statoriaus gedimai 38 %, rotoriaus 10 %, visi kiti gedimai 12 %. Vienas iš faktorių, kuris stebėjimą ir išankstinę diagnostiką daro įmanoma, yra tas, kad gedimai neretai įvyksta ne staiga, o palaipsniui – pavyzdžiui, pamažu blogėja guolių ar statoriaus apvijų izoliacijos būklė. Paprastai yra pastebimi šie efektai: nesubalansuotos statoriaus fazinės srovės, išaugusios sukimo momento pulsacijos, sumažėjęs vidutinis sukimo momentas, padidėję nuostoliai ir variklio kaitimas. Šių problemų priežastys gali būti įvairios – smulkios variklio gamybos klaidos, priežiūros stoka, neteisingai parinktas variklis, sunkios paleidimo ir eksploatacijos sąlygos, nepakankama ventiliacija ir t. t. Dažnio keitiklių naudojimas taip pat neretai paspartina guolių ir statoriaus apvijų gedimus. Pastovus variklio būsenos stebėjimas suteiktų aiškų pranašumą – atvertų galimybę atlikti priežiūros ir techninio aptarnavimo darbus dar prieš įvykstant rimtam gedimui, taip išvengiant daug didesnių nuostolių bei leistų iš anksto numatyti ir paskirti laiką planiniam remontui.

Yra nemažai diagnostikos metodų išvardintiems gedimams identifikuoti ir atskirti vienos rūšies gedimą nuo kitos. Tai temperatūros matavimas, termografija, elektromagnetinės emisijos matavimas, triukšmo monitoringas, cheminė analizė, ritės variklio ašiniam magnetiniam srautui stebėti, vibracijos matavimas, variklio statoriaus fazinės srovės spektro analizė (MCSA – *Motor Current Signature Analysis*), Park'o srovių vektoriaus (PVC – *Park's Vector Current*) stebėseną, taip pat dirbtiniu intelektu paremti metodai.

Tyrimo objektas. Trifazis asinchroninis elektros variklis.

Tyrimo tikslas. Ištirti galimybes diagnozuoti trifazio asinchroninio variklio gedimus statoriaus fazinės srovės dažnių spektro analizės bei vibracijų spektro analizės metodais.

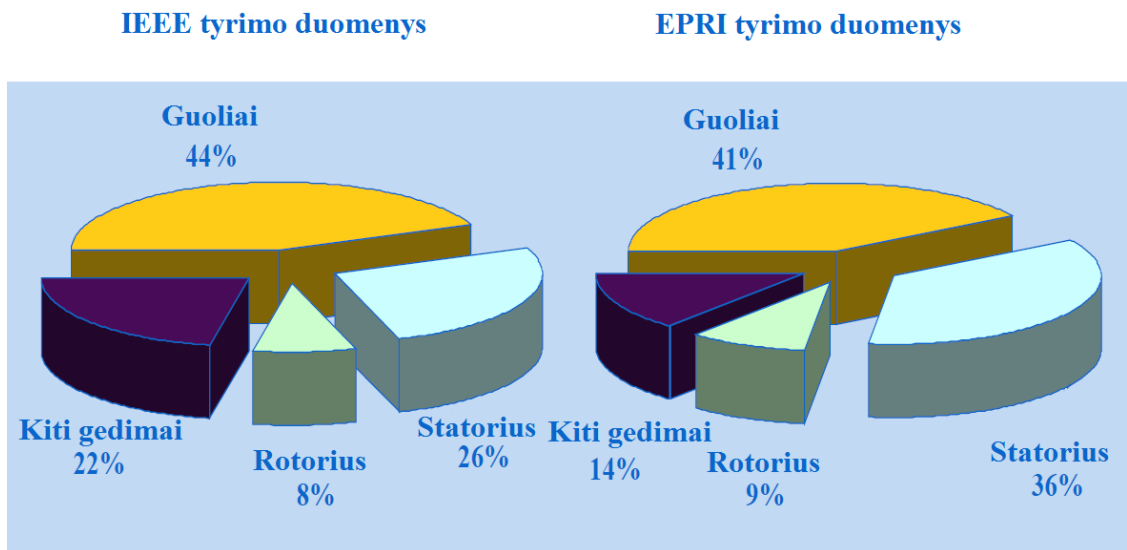
Tyrimo uždaviniai:

- Išanalizuoti trifazių asinchroninių variklių gedimų rūšis bei šiuolaikinius jų diagnostikos būdus.
- Diagnozuoti variklio guolių defektus statoriaus fazinės srovės dažnių spektro analizės ir vibracijų spektro analizės metodais.
- Diagnozuoti statoriaus ir rotoriaus gedimus statoriaus fazinės srovės dažnių spektro analizės būdu.
- Palyginti pritaikytų diagnostikos metodų efektyvumą.

1. TRIFAZIŲ ASINCHRONINIŲ VARIKLIŲ GEDIMŲ RŪŠIŲ IR JŲ DIAGNOSTIKOS METODŲ LITERATŪROS APŽVALGA

1.1 Trifazių asinchroninių variklių gedimų rūšys

Trifazių asinchroninių variklių gedimai skirstomi į rotoriaus, statoriaus ir guolių gedimus.



1.1 pav. Variklių gedimų pasiskirstymas pagal dažnumą, šaltinis <https://www.rroj.com>

1.1.1 Rotoriaus gedimai

Paprastai mažos galios variklių rotoriai gaminami liejimo būdu ir tai jau gamybos proceso metu sąlygoja tam tikrą rotoriaus asimetriją. Taip pat gaminant rotorių jo narvelyje gali susidaryti mechaniniai įtempimai, kurie variklio eksploatacijos metu irgi neretai tampa gedimų priežastimi. Sunkūs rotoriaus žiedai sąlygoja išcentrines jėgas, kurios gali sukelti įtrūkimus strypuose. Trūkus rotoriaus strypui atsiranda disbalansas, o narvelio asimetrija savo ruožtu lemia rotoriaus strypais tekančių srovių asimetriškumą. Dėl šios priežasties gedimas gali plisti į gretimus strypus. Įtrūkus strypui jis pradeda kaisti, o toliau eksploatuojant variklį dažnai nutrūksta visai. Didžioji juo turėjusios tekėti srovės dalis ima tekėti abipus trūkusio strypo esančiais strypais. Dėl atsiradusio papildomo šiluminio ir mechaninio poveikio jie irgi gali trūkti. Dėl rotoriaus asimetrijos jame pakinta ir šilumos pasiskirstymas. Didžiausia tikimybė rotoriaus strypams trūkti yra tuomet, kai variklio paleidimo laikas ilgas, apkrovos inercija didelė, o pakartotiniai paleidimai dažni.



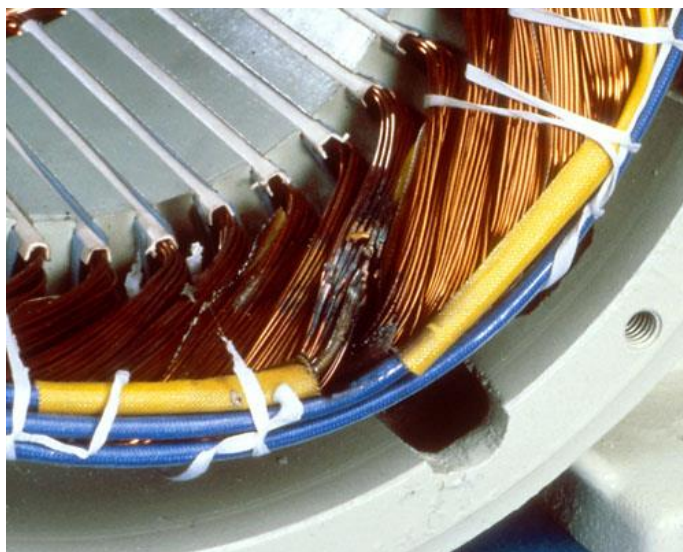
1.2 pav. Nutrūkęs rotoriaus strypas, šaltinis <http://www.kalmer.si>

1.1.2 Statoriaus gedimai

Didžiąją statoriaus gedimų dalį sudaro apvijų izoliacijos pažeidimai, kurie sąlygoja trumpus sujungimus tarp keleto tos pačios fazės vijų. Šis gedimas dar vadinamas tarpapvijiniu trumpuoju sujungimu. Tarpapvijinio trumpojo sujungimo vietoje pradeda tekėti didelė srovė ir ta apvijų vieta pradeda kaisti. Organines medžiagas, iš kurių gaminama apvijų izoliacija, variklio darbo metu neigiamai veikia pasikartojančios šiluminės perkrovos, įtampos šuoliai, mechaniniai įtempimai ir cheminė aplinkos tarša. Visgi dažniausia statoriaus apvijų izoliacijos gedimo priežastis yra šiluminis poveikis. Jei variklio darbinė temperatūra bus viršyta – net ir pati geriausia izoliacija suges labai greitai. Laikoma, kad izoliacijos amžius sutrumpėja perpus temperatūrai pakilus 10°C virš maksimalios leistinos statoriaus apvijų temperatūros. Todėl statoriaus apvijų temperatūrą reikia stebėti. Tačiau įvairių temperatūros stebėjimo būdų bendras trūkumas yra tas, kad juos naudojant sudėtinga iškart pastebėti pradėjusią kaisti apvijų vietą, taip vadinamą „karštąjį tašką“. Apvijų izoliacijos gedimus sukelia ir ričių judėjimas, sąlygotas vibracijos, atsiradusios dėl disbalanso, susidėvėjusių guolių, oro tarpo ekscentriciteto ar trūkusių rotoriaus strypų. Srovei tekant statoriaus apvijų rities veikia jėga, proporcinga tekančios srovės kvadratui. Ši jėga didžiausia perkrovų metu ir dėl jos poveikio statoriaus rities vibruoja dažniu, lygiu sinchroniniam dažniui padaugintam iš dviejų. Rities vibruoja tiek ašine, tiek radialine kryptimis. Tai taip pat kenkia apvijų izoliacijai. Tokie gedimai, kaip nutrūkę rotoriaus strypai, susidėvėję guoliai ar didelis oro tarpo ekscentricitetas yra pagrindinės galimo rotoriaus kontaktavimo su statoriaus šerdimi priežastys. Tai taip pat gali tapti statoriaus apvijų izoliacijos pažeidimo priežastimi. Todėl šių mechaninių gedimų priežastis būtina pašalinti kuo ankstyvesnėje stadijoje, kol nepadaryta dar didesnė žala. Variklio užteršimas įvairiomis medžiagomis blogina šilumos atidavimą į aplinką ir tai taip pat gali

būti apvijų perkaitimo priežastimi. Nepriklausomai nuo statoriaus apvijos gedimą sukėlusios priežasties juos galima suskirstyti į šias grupes:

- Tarpapvijiniai trumpieji sujungimai
- Tarpfaziniai trumpieji sujungimai
- Trumpieji sujungimai į variklio korpusą
- Nutrūkusi apvijos ritės grandinė



1.3 pav. Tarpapvijinis trumpasis sujungimas statoriaus apvijoje, šaltinis <http://www.easa.com>

Iš visų statoriaus gedimų rūšių svarbiausi yra tarpapvijiniai trumpieji sujungimai, nes paprastai jie būna visų likusių gedimų pirminė priežastis. Šios rūšies gedimus pradinėje stadijoje aptikti sudėtinga.

1.1.3 Oro tarpo ekscentricitetas

Tai dažnai pasitaikanti elektros mašinų gedimo rūšis. Sukelia padidėjusią vibraciją ir triukšmą. Idealiu atveju rotoriaus sukimosi ašis yra centruota statoriaus šerdies vidinio paviršiaus atžvilgiu. Kai rotorius nėra tiksliai centruotas, disbalanso sukeltos radialinės jėgos gali sąlygoti statoriaus šerdies mechaninį kontaktą su rotoriumi. Oro tarpo ekscentricitetas būna trijų rūšių: statinis, dinaminis ir mišrus. Minimalaus oro tarpo pozicija yra susieta su statiniu ekscentricitetu ir ši minimalaus oro tarpo pozicija sukasi kartu su rotoriumi, sudarydama dinaminį ekscentricitetą. Statinio ekscentriciteto lygis paprastai nekinta. Jis gali būti sukeltas statoriaus šerdies ovališkumo arba neteisingos statoriaus ar rotoriaus padėties dėl surinkimo netikslumų. Dinaminis ekscentricitetas gali būti sukeltas veleno išlinkimo, guolių susidėvėjimo, didelio statinio

ekscentriciteto. Ekscentricitetas sąlygoja netolygią magnetinę trauką, o tai savo ruožtu įtakoja variklio vibraciją, akustinį triukšmą, pagreitintą guolių susidėvėjimą ir/arba rotoriaus įlinkį. Tuomet atsiranda rizika rotoriumi mechaniškai kontaktuoti su statoriumi, o tai gali padaryti didelę žalą tiek statoriui, tiek rotoriumi. Paprastai statinis ir dinaminis ekscentricitetas variklyje egzistuoja vienu metu, nes idealiai tiksliai pagaminti ir surinkti variklį nėra įmanoma. Leistina oro tarpo asimetrija paprastai siekia iki 10%.



1.4 pav. Guolio gedimo sukulto oro tarpo ekscentriciteto žala rotoriumi, šaltinis

<http://motormaintain.blogspot.lt>

1.1.4 Guolių gedimai

Guolių gedimai yra dažniausiai pasitaikanti variklių gedimo priežastis. Jų paskirtis yra mažinti ašies sukimosi trintį. Guoliai besisukančius velenus išlaiko reikiamoje padėtyje ir priimdami juos veikiančias apkrovas perduoda jas variklio korpusui. Guolį sudaro išorinis ir vidinis žiedai, tarp žiedų yra riedėjimo kūnai, kurie velenui sukantis rieda žiedų vidiniais paviršiais. Riedėjimo kūnus vieną nuo kito vienodais tarpais atskiria separatorius. Slydimo trintis riedėjimo guoliuose pakeičiama riedėjimo trintimi, todėl riedėjimo guolių trinties koeficientas 20-25% mažesnis negu slydimo guolių. Jų trinties momentas mažai priklauso nuo sukimosi dažnio. Guolių gedimus dažniausiai sukelia nuolatinės perkrovos, užteršimas, korozija, montavimo klaidos, guoliais tekančios srovės, netinkamas tepimas, pernelyg aukšta temperatūra. Kai guolis yra veikiamas perkrovų, nuo jo vidinių ir išorinių žiedų ar riedėjimo kūnų atitrūksta nedidelės metalo dalys. Tai savo ruožtu sukelia guolio vibracijas ir triukšmo lygio padidėjimą. Guoliai dažniausiai užteršiami aplaidaus montavimo ar tepimo metu. Korozija guolį paprastai paveikia tuomet, kai variklis dirba chemiškai agresyvioje aplinkoje arba kai į guolį patenka vanduo. Dažnai

guolis, vietoje to, kad prieš montuojant būtų įkaitintas iki reikiamos temperatūros ir tuomet tiesiog užmautas ant veleno yra užkalamas šaltas. Taip guolio resursas ženkliai sumažinamas, kartais sugadinant netgi visiškai naują guolį. Variklio veleno ir guoliais tekančios srovės irgi gali būti guolio gedimo priežastimi. Taip dažniausiai atsitinka, kai variklis yra valdomas dažnio keitikliu. Pernelyg mažas ar pernelyg didelis tepalo kiekis arba neteisingai parinktas tepalas taip pat sutrumpina guolio resursą. Kita gedimų priežastis – pernelyg aukšta guolio temperatūra. Pvz. naftos ir chemijos pramonėje guolių temperatūrą reglamentuoja standartas IEEE841, kuriame teigiama, kad nusistovėjusi guolių temperatūra, kai apkrova nominali, neturi viršyti aplinkos temperatūros daugiau nei 45°C. Kaitimą gali įtakoti guolio susidėvėjimas, rotorius kaitimas, pernelyg didelis sukimosi greitis ar neteisingas šilumos pasiskirstymas variklyje. Taip pat ir prasta tepalo kokybė, pernelyg didelis ar pernelyg mažas jo kiekis. Guolių temperatūros stebėjimas gali suteikti naudingos informacijos apie guolių ir tuo pačiu viso variklio būklę. Netgi esant normalioms variklio darbo sąlygoms, kai apkrova subalansuota ir centravimas tikslus, laikui bėgant ant guolių žiedų vidinių paviršių ir riedėjimo elementų atsiranda nedideli įtrūkimai, kuriems progresuojant stiprėja vibracija ir auga triukšmo lygis. Vėliau ateina momentas, kai guolio fragmentai atitrūksta. Tuomet atitrūkusiomis metalo dalelėmis užteršiamas tepalas ir pažeidimas ima plisti. Nepriklausomai nuo gedimo priežasčių sugedę guoliai skleidžia tam tikrų dažnių mechanines vibracijas, o jas analizuojant diagnostikos metu galima nustatyti gedimo pobūdį.

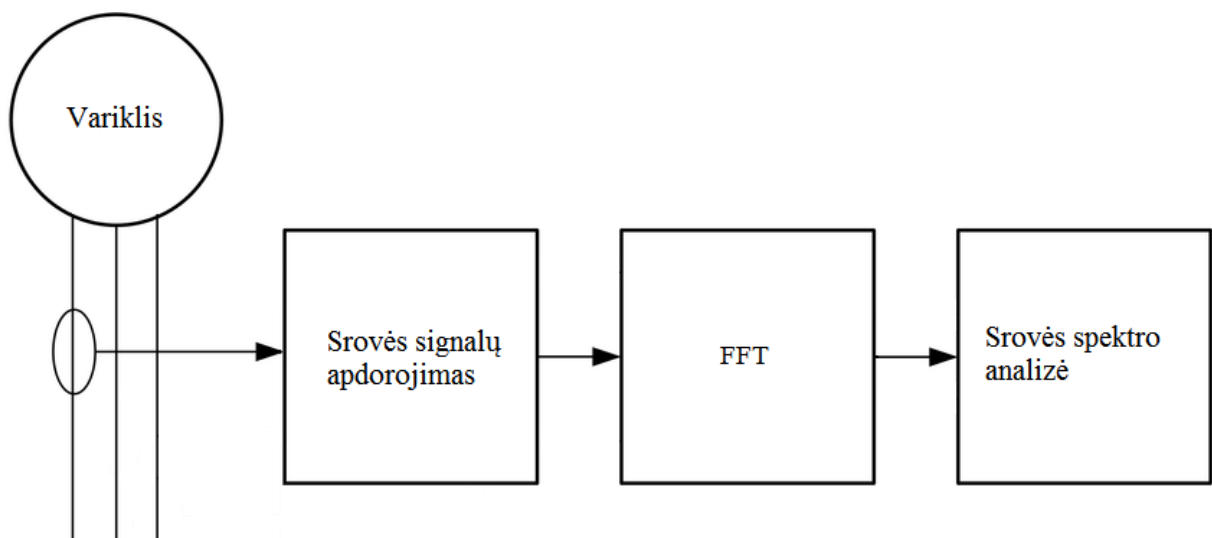


1.5 pav. Sugedęs guolis, šaltinis <http://www.maintenance.org>

1.2 Trifazių asinchroninių variklių diagnostikos metodai

1.2.1 Statoriaus fazinės srovės dažnių spektro analizė (MCSA)

Šio diagnostikos metodo ištakos siekia apie 1970m., kuomet iškilo būtinybė stebėti variklių, dirbančių pavojuose sąlygose – pvz. atominėse elektrinėse ar naftos platformose, būklę. MCSA gali būti taikoma kaip preventyvi priemonė, leidžianti nestabdant variklio iš anksto įspėti apie atsiradusius variklio gedimus, nelaukiant kol gedimas galutinai sugadins variklį. Srovės spektro analizės metodo pagrindas yra tai, kad tiek elektriniai, tiek mechaniniai variklio gedimai įtakoja magnetinį srautą oro tarpe, o tai sąlygoja naujų harmoninių dedamųjų atsiradimą statoriaus srovės dažnių spektre. Tam, kad gauti statoriaus srovės dažnių spektrą, pirmiausia turime išmatuoti ir įrašyti skaitmenizuotas statoriaus fazinės srovės vertes, joms pritaikyti Furjė transformaciją (FFT – *Fast Fourier Transform*) ir tuomet išanalizuoti gauto spektro sudėtį, ieškant jame gedimą indikuojančių dažninių dedamųjų. Metodo pritaikymui užtenka tik vieno srovės daviklio (pvz. srovės transformatoriaus ar Holo efekto principu veikiančio) ir nėra svarbu, kurios statoriaus fazės fazinė srovė bus matuojama. Taip yra todėl, kad besisukančios magnetinio srauto bangos, sukeltos vienokio ar kitokio gedimo, kerta visų trijų statoriaus fazių apvijas, ir visose indukuoja harmonines dedamąsias [29]. Taikant šią metodiką reikia turėti omenyje, kad maitinimo įtampos harmonikos gali sutapti su gedimą indikuojančiomis harmonikomis. Taip pat netgi nauji varikliai dėl gamybos netikslumų yra kažkiek asimetriški ir tas rotorius bei statoriaus asimetriškumas (siekiantis iki 10%) įtakoja harmonikų amplitudes. Harmonikų amplitudės priklauso ir nuo variklio apkrovos bei slydimo.



1.6 pav. Statoriaus fazinės srovės dažnių spektro analizės metodas (MCSA), parengta autoriaus

Kai variklio statoriaus apvijos yra simetriškos ir variklio maitinimo įtampos yra sinusinės bei subalansuotos, vienos iš fazių srovę galima apskaičiuoti taip [2]:

$$i(t) = I_{max} \cos(2\pi f_s t) \quad (1)$$

čia I_{max} – didžiausia srovės vertė.

Tokiu atveju susidarys tik viena kryptimi sinchroniniu greičiu besisukantis magnetinis laukas ir idealios simetrijos atveju priešinga kryptimi besisukantis magnetinis laukas arba kitaip – inversinis magnetis laukas (IMF – *inverse magnetic field*) nesusidarys. Bet kokia maitinimo įtampų ar statoriaus impedansų asimetrija sąlygos priešinga kryptimi besisukantį magnetinį lauką statoriaus apvijoje.

Įvykus tarpapvijiniam trumpajam sujungimui statoriaus apvijoje išauga fazių asimetrija ir pasikeičia statoriaus srovės harmoninių dedamųjų amplitudė. Trumpuosius tarpapvijinius sujungimus statoriaus apvijoje indikuojančių harmoninių dedamųjų dažnius galima rasti pagal šią formulę [1] [2] [23] [27][28]:

$$f_{st} = f_s \left(k \pm n \frac{1-s}{p} \right) = k f_s \pm n f_r \quad (2)$$

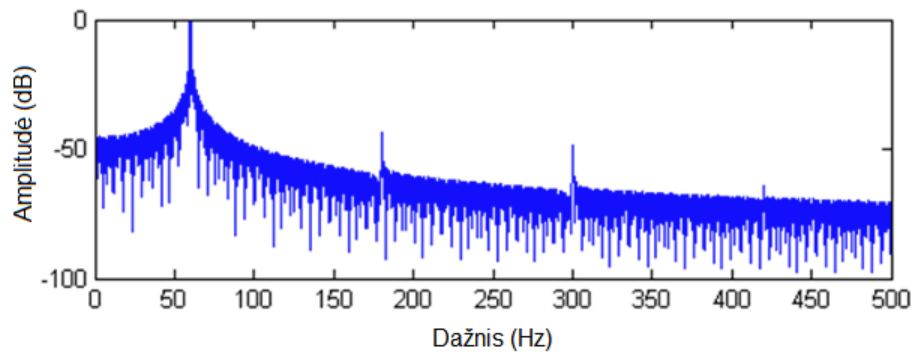
Arba pagal [1][30] pateikiamą formulę:

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

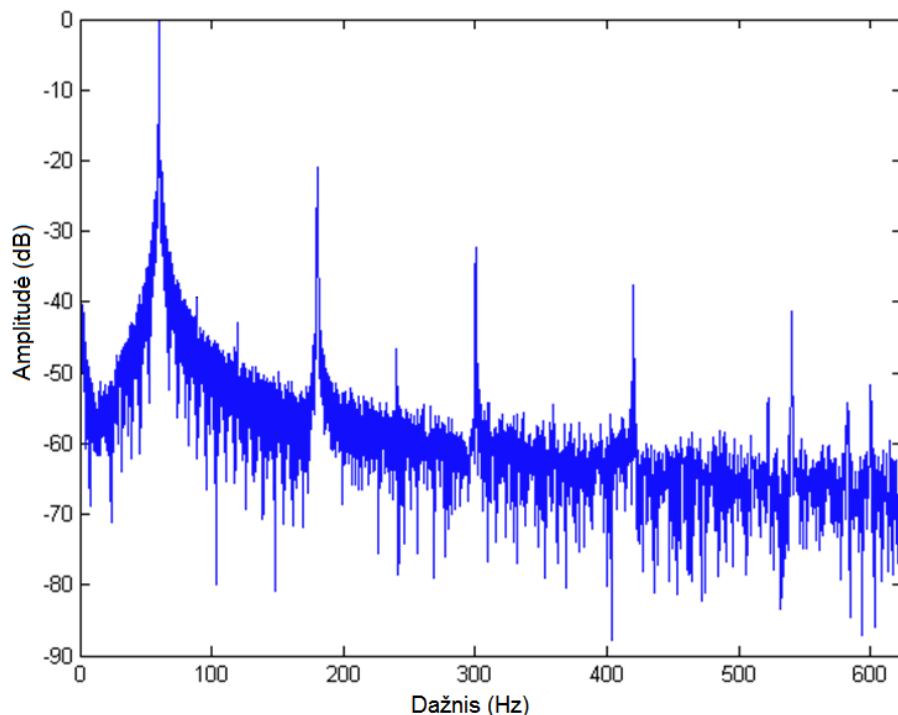
Tarpapvijinio trumpojo sujungimo įtaka variklio statoriaus fazinei srovei gali būti išreikšta taip [2]:

$$i(t) = I_{max} \cos(2\pi f_s t) + I_{lsb} \cos \left(2\pi \left(\frac{n}{p} (1-s) f_s - k f_s \right) t \right) + I_{usb} \cos \left(2\pi \left(\frac{n}{p} (1-s) f_s - k f_s \right) t \right) \quad (4)$$

čia I_{lsb} – maksimali pirmosios (žemesnio dažnio) harmonikos srovės vertė, I_{usb} – maksimali pirmosios (aukštesnio dažnio) harmonikos srovės vertė.



1.7 pav. Tvarkingo variklio statoriaus fazinės srovės dažnių spektras, šaltinis [26]



1.8 pav. Variklio, kurio statoriuje yra tarpapvijinis trumpas sujungimas, statoriaus fazinės srovės dažnių spektras, šaltinis [26]

1.8 pav. galima pastebėti, kad tarpapvijiniai trumpieji sujungimai statoriaus apvijoje pasireiškia ir 3-iosios harmonikos amplitudės padidėjimu dažnių spektre. Tačiau panašų efektą sukelia ir variklio maitinimo įtampos asimetrija.

Variklio statoriaus fazinės srovės spektro analizės metodu galima nustatyti ir rotoriaus gedimus, kurie pasireiškia harmoninėmis dedamosiomis statoriaus fazinės srovės dažnių spektre. Šių pašalinių dažnių amplitudės yra proporcingos nutrūkusių strypų skaičiui [23].

Kai variklio rotoriaus strypai įtrūksta ar netgi nutrūksta rotoriaus impedansas išsibalansuoja. Šio disbalanso tiesioginė pasekmė yra atvirkštinės sekos srovių atsiradimas. Šių srovių dažnis gaunamas iš slydimo s ir maitinimo dažnio f_s . Jos generuoja magnetinį lauką, kuris sukasi

priešinga variklio sukimosi kryptčiai kryptimi. Šis magnetinis laukas vadinamas inversiniu magnetiniu lauku. Šio lauko greitis yra lygus [4]:

$$\omega_i^r = -s\omega_s \quad (5)$$

čia ω_s – kampinis maitinimo įtampos dažnis.

Pavertus į stacionarias koordinates, šis greitis gali būti išreikštas taip [4]:

$$\omega_i^s = -s\omega_s + \omega_r = (1 - 2s)\omega_s \quad (6)$$

čia ω_r – rotoriaus kampinis greitis.

IMF amplitudė priklauso nuo dviejų dalykų. Pirmas – tai disbalanso lygis rotoriuje (įtrūkusių strypų skaičius), antras – rotoriaus strypų srovė. Ji priklauso nuo variklio apkrovos. Inversinis magnetinis laukas, sukeltas rotoriaus impedanso disbalanso, statoriaus apvijose sukelia srovės harmonikas, kurių dažnis yra $(1 - 2s)f_s$. Jos sąveikauja su pagrindiniu magnetiniu lauku ir kuria rotoriaus sukimo momentą, kuris svyruoja dažniu $2sf_s$. Šis pulsuojantis sukimo momentas sukelia rotoriaus greičio svyravimus. Šių svyravimų amplitudė yra variklio apkrovos inercijos funkcija. Reakcija į šį greičio trikdį yra naujų srovių, kurių dažnis $(1 \pm 2s)f_s$ atsiradimas statoriuje. Nauja srovės dedamoji, kurios dažnis $(1 \pm 2s)f_s$ „užsideda“ ant pagrindinės harmonikos ir pakeičia jos amplitudę. Taigi galima daryti išvadą, kad rotoriaus gedimai variklyje gali būti nustatyti iš statoriaus fazinės srovės spektre atsiradusių papildomų harmonikų [3][4][9][10][11][16][23][29]:

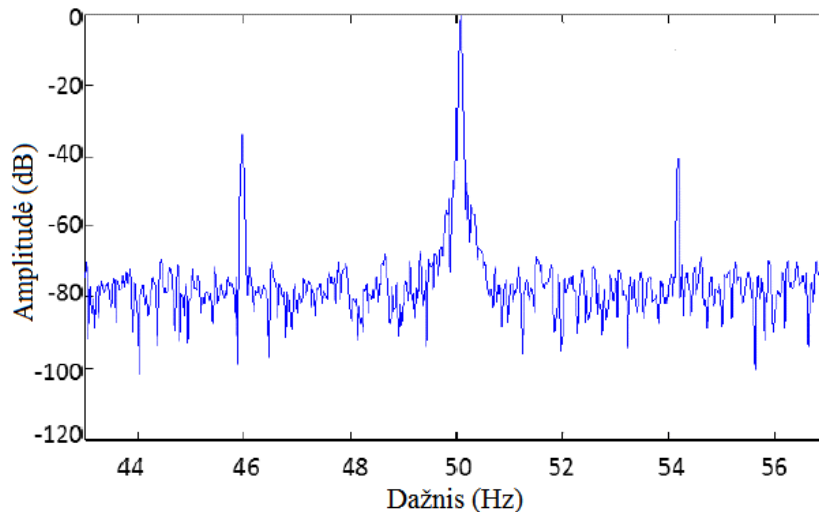
$$f_{rot} = (1 \pm 2s)f_s. \quad (7)$$

Arba [3][8][13][15][18][27]:

$$f_{rot} = (1 \pm 2ns)f_s. \quad (8)$$

Taip pat ir [3][4][18][30]:

$$f_{rot} = \left[\left(\frac{n}{p} \right) (1 - s) \pm s \right] f_s \quad (9)$$



1.9 pav. Variklio, kurio du rotoriaus strypai yra nutrūkę, statoriaus fazės dažnių spektras, šaltinis [3]

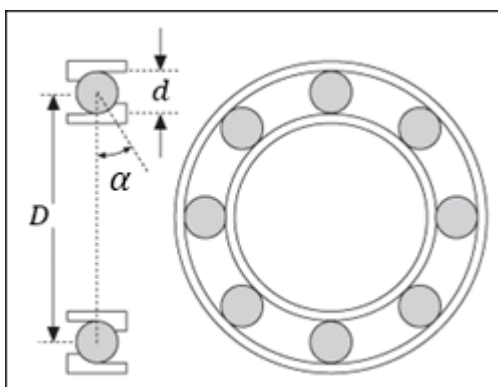
Šių statoriaus fazinės srovės harmonikų amplitudės priklauso nuo trijų faktorių: variklio apkrovos inercijos, variklio apkrovos sukimo momento ir nuo paties gedimo masto (nutrūkusių strypų skaičiaus). Taigi, pirmieji du faktoriai turi būti susilpninti tam, kad būtų galima diagnozuoti, kiek tai yra įmanoma, nepriklausomai nuo jų.

Variklio apkrovos inercijos galima nepaisyti, jeigu abiejų šoninių dažninių dedamųjų suma yra įvertinama. Kalbant apie variklio apkrovos sukimo momentą, visuomet yra ryšys tarp šoninių dažninių dedamųjų amplitudės ir statoriaus pagrindinės srovės harmonikos amplitudės. Tuomet, dirbant su normalizuotos amplitudės vertėmis, galima iš dalies išvengti antrojo faktoriaus įtakos. Šoninės dažninės dedamosios daug aiškiau parodo gedimus esant didelėms slydimo vertėms. Todėl rotoriaus gedimus rekomenduojama diagnozuoti esant beveik nominaliai variklio apkrovai. Variklio apkrovos svyravimai taip pat sukelia srovės harmonikas ties tais pačiais dažniais, o tai apsunkina diagnostiką [27]. Statoriaus gedimo masto faktorius gali būti apibrėžtas taip [4]:

$$S_{RF} = I_{(1\pm 2s)f_s} / I_1 \cdot 100 \quad (10)$$

čia $I_{(1\pm 2s)f_s}$ yra šoninių dažninių dedamųjų amplitudžių suma ir I_1 yra statoriaus fazinės srovės pagrindinės harmonikos amplitudė.

MCSA metodu taip pat įmanoma diagnozuoti ir guolių gedimus. Dėl guolių defektų prasideda radialinis rotoriaus judėjimas statoriaus atžvilgiu. Oro tarpo kitimas sukelia magnetinio srauto netolygumus variklio oro tarpe, kurie įtakoja statoriaus fazinės srovės dažnių spektrą [27]. Jame atsiranda papildomos harmoninės dedamosios, simetriškos pagrindinei harmonikai. Teoriškai, visi gedimai, kurie sukelia šį radialinį judėjimą, pasireiškia tam tikro dažnio harmonikomis statoriaus fazinės srovės dažnių spektre [7].



1.10 pav. Tipinė rutulinio guolio struktūra, šaltinis [27]

Bendruoju atveju lokalių (dar vadinamų cikliniais) guolių defektų dažniai apskaičiuojami pagal šią formulę [6][15][18][23][27]:

$$f_p = |f_s \pm n f_v| \quad (11)$$

čia f_v – vienas iš keturių žemiau pateiktų guolio gedimą indikuojančių dažnių (f_o , f_i , f_b arba f_c).

Guolių defektus parodantys dažniai gali būti apskaičiuoti šiomis formulėmis [6]:

$$f_o = N/2 \cdot f_r (1 - d/D \cdot \cos \alpha) \quad (12)$$

$$f_i = N/2 \cdot f_r (1 + d/D \cdot \cos \alpha) \quad (13)$$

$$f_b = D/2d \cdot f_r (1 - (d/D)^2 \cdot \cos^2 \alpha) \quad (14)$$

$$f_c = 1/2 \cdot f_r (1 - d/D \cdot \cos \alpha) \quad (15)$$

čia N – riedėjimo kūnų skaičius guolyje, d – riedėjimo kūno diametras, D – atstumas tarp dviejų riedėjimo kūnų centrų, α – kontakto kampas, f_o – išorinio guolio žiedo defekto dažnis, f_i – vidinio guolio žiedo defekto dažnis, f_b – riedėjimo kūno sukimosi dažnis, f_c – guolio separatoriaus defekto dažnis. Riedėjimo kūno defekto dažnis gaunamas f_b padauginus iš 2.

Jei riedėjimo kūnų skaičius guolyje yra tarp 6 ir 12 galima naudoti šias supaprastintas formules [18]:

$$f_o = 0.4 \cdot N \cdot (1 - s) f_r \quad (16)$$

$$f_i = 0.6 \cdot N \cdot (1 - s) f_r \quad (17)$$

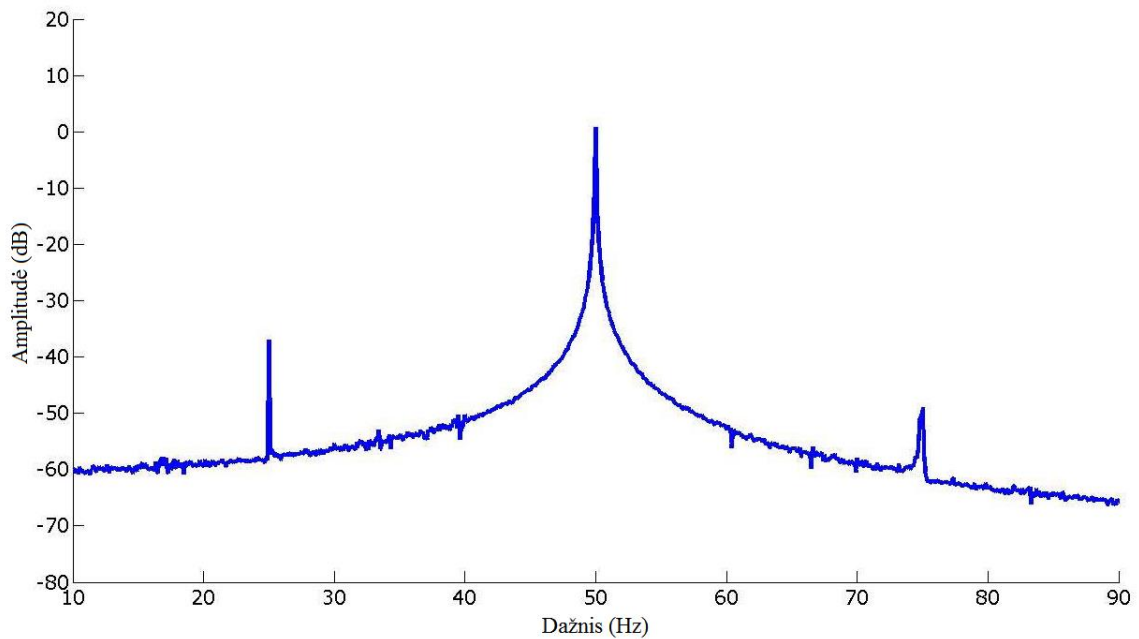
$$f_B = (0.4n_1 + 0.6n_2) \cdot (1 - s) f_r \quad (18)$$

čia n_1 ir n_2 yra teigiami sveikieji skaičiai (1, 2, 3...), f_B – guolio gedimo dažnis.

Kituose šaltiniuose [20][30] siūloma naudoti dar paprastesnes formules guolių defektų dažniams apskaičiuoti:

$$f_o = 0.4 \cdot N \cdot f_r \quad (19)$$

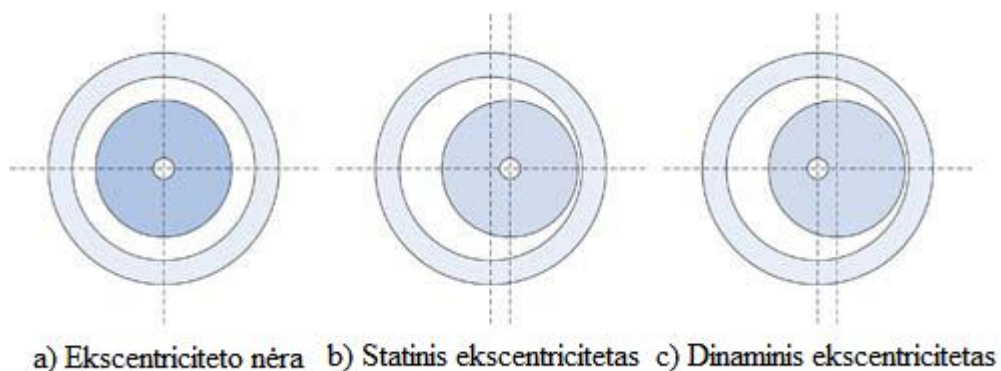
$$f_i = 0.6 \cdot N \cdot f_r \quad (20)$$



1.11 pav. Variklio su defektiniu guoliu statoriaus fazinės srovės dažnių spektras, šaltinis [19]

Paskirstytuosius guolių defektus identifikuoti MSCA metodu sudėtinga, nes jų sukeltos harmonikos plačiai pasklinda po statoriaus fazinės srovės dažnių spektrą. Didžiausias iššūkis praktiniam statoriaus fazinės srovės spektro analizės metodo pritaikymui guolių gedimams diagnozuoti yra guolių defektą indikuojančius dažnius atskirti nuo kitų dedamųjų ir triukšmų, kurių dažniai gali būti artimi gedimą nurodantiems, ar netgi tokie pat.

MCSA metodas gali būti pritaikytas ir oro tarpo ekscentriciteto diagnostikai.



1.12 pav. Ekscentriciteto rūšys, šaltinis [30]

Statoriaus srovės spektre dėl statinio, dinaminio ir mišraus oro tarpo ekscentriciteto rotorui judant radialiai statoriaus atžvilgiu atsiranda charakteringos dažninės dedamosios, kurias galima apskaičiuoti taip [20][27]:

$$f_{ect} = f_s \left(1 \pm \frac{n(1-s)}{p} \right) \quad (21)$$

Kituose šaltiniuose [18] ekscentricitetą identifikuojančius dažnius siūloma skaičiuoti taip:

$$f_{ect} = f_s \left[(nR \pm n_{ecc}) \frac{(1-s)}{p} \pm k \right] \quad (22)$$

čia R – rotoriaus griovelių skaičius, n_{ecc} – “0” statinio ekscentriciteto atveju, “1” – dinaminio ekscentriciteto atveju.

Arba taip [29][30]:

$$f_{ect} = f_s \left[(R \pm 1) \frac{(1-s)}{p} \pm k \right] \quad (23)$$

Dar viena formulė ekscentricitetą identifikuojantiems dažniams apskaičiuoti pateikiama [26]:

$$f_{ect} = k_1 f_s \pm \frac{n(1-s)}{p} f_s \quad (24)$$

čia $k_1 = 1, 5, 7, 9, 11..$

Taip pat literatūroje [7] siūloma statinio ir dinaminio ekscentriciteto dažnius skaičiuoti pagal atskiras formules:

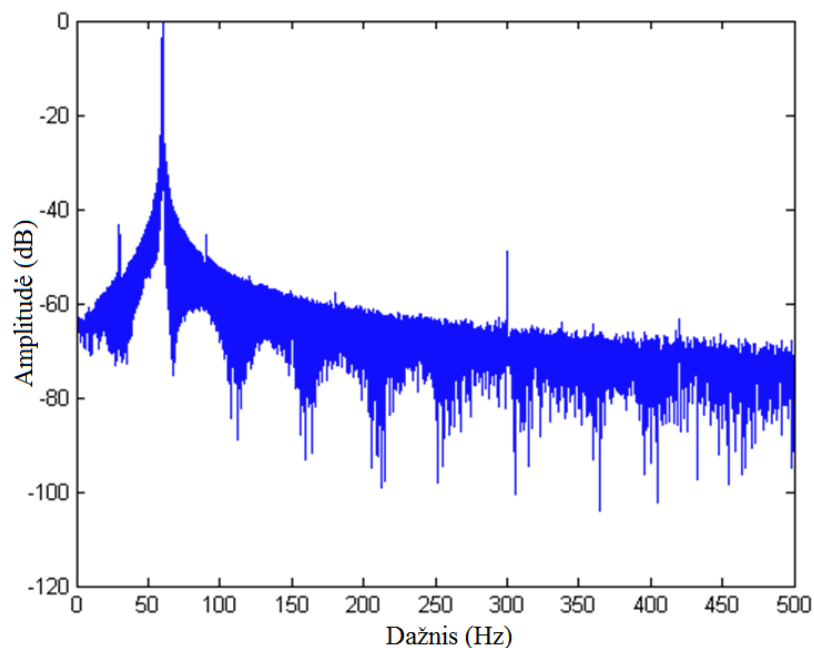
$$f_{stat} = k f_s \pm n R f_r \quad (25)$$

$$f_{dynam} = k f_s \pm (nR \pm v) f_r \quad (26)$$

čia v – teigiamas sveikas skaičius (1, 2, 3,..).

Mišraus ekscentriciteto atveju, žemo dažnio harmonikos, simetriškos pagrindinei harmonikai, gali būti rastos taip [7][18][27]:

$$f_{mec} = |f_s \pm n f_r| \quad (27)$$



1.13 pav. Variklio, turinčio oro tarpo ekscentriciteto defektą, statoriaus fazinės srovės dažnių spektras, šaltinis [26]

1.2.2 Vibracijos dažnių spektro analizė

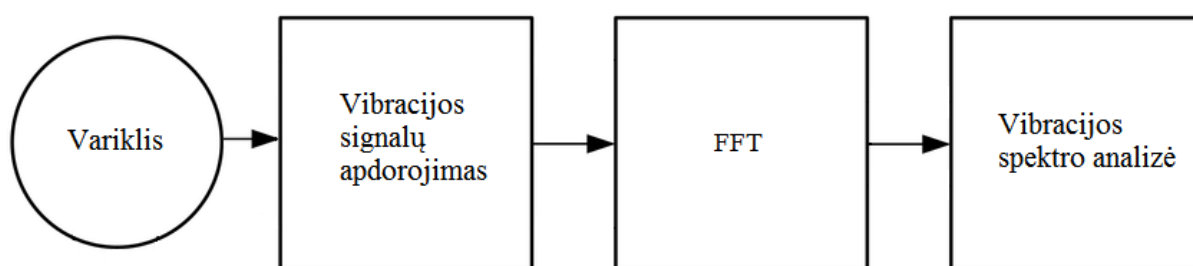
Taikant vibracijos dažnių spektro analizės metodą galima stebėti elektros mašinų būklę ir diagnozuoti gedimus. Tai daroma matuojant variklio korpuso vibracijas ir analizuojant gautų signalų spektrinę sudėtį. Pakankamai paprastas vibracijos analizės metodas yra aprašytas ISO 10816 standarte (1.14 pav.).

ISO 10816					
		I klasė	II klasė	III klasė	VI klasė
		in/s	mm/s		
Vibracijos greitis V_{rms}	0.01	0.28			
	0.02	0.45			
	0.03	0.71			
	0.04	1.12			
	0.07	1.80			
	0.11	2.80			
	0.18	4.50			
	0.28	7.10			
	0.44	11.2			
	0.70	18.0			
	0.71	28.0			
1.10	45.0				

1.14 pav. ISO 10816 standartas, šaltinis <https://www.iso.org>

Vadovaujantis šiuo standartu diagnozuojamos elektros mašinos būklė vertinama pagal vibracijos greičio RMS (*root mean square*) vertę. Greičio RMS vertė skaičiuojama tarp 10 ir 1000 Hz. Taip gaunama informacija apie bendrą elektros mašinos būklę. Tačiau diagnozuojant šiuo metodu negalima sužinoti gedimo priežasties.

Tam, kad atlikti tikslesnę vibracijos analizę, reikia tirti jos spektrinę sudėtį. Tokie gedimai, kaip mechaninis disbalansas ar guolio defektas sukelia tam tikrų dažnių vibracijas, kurios persiduoda per statoriaus korpusą ir jas galima užfiksuoti akcelerometru. Matavimus geriausia atlikti tuomet, kai variklis neapkrautas, nes dinaminis ekscentricitetas didėjant apkrovai mažėja, tuo pačiu mažėja ir gedimus identifikuoti padedančių dažninių dedamųjų amplitudės [19].



1.15 pav. Vibracijos dažnių spektro analizės metodas, parengta autoriaus

Gedimų sukeltus vibracijų dažnius galima apskaičiuoti remiantis šiomis formulėmis[7]:

$$f_{recc} = n \cdot f_r \quad (28)$$

$$f_i = n \cdot f_r \cdot N/2 \cdot (1 + d/D \cdot \cos \beta) \quad (29)$$

$$f_o = n \cdot f_r \cdot N/2 \cdot (1 - d/D \cdot \cos \beta) \quad (30)$$

$$f_c = n \cdot f_r \cdot 1/2 \cdot (1 - d/D \cdot \cos \beta) \quad (31)$$

$$f_b = n \cdot f_r \cdot D/2d \cdot (1 - [d/D \cdot \cos \beta]^2) \quad (32)$$

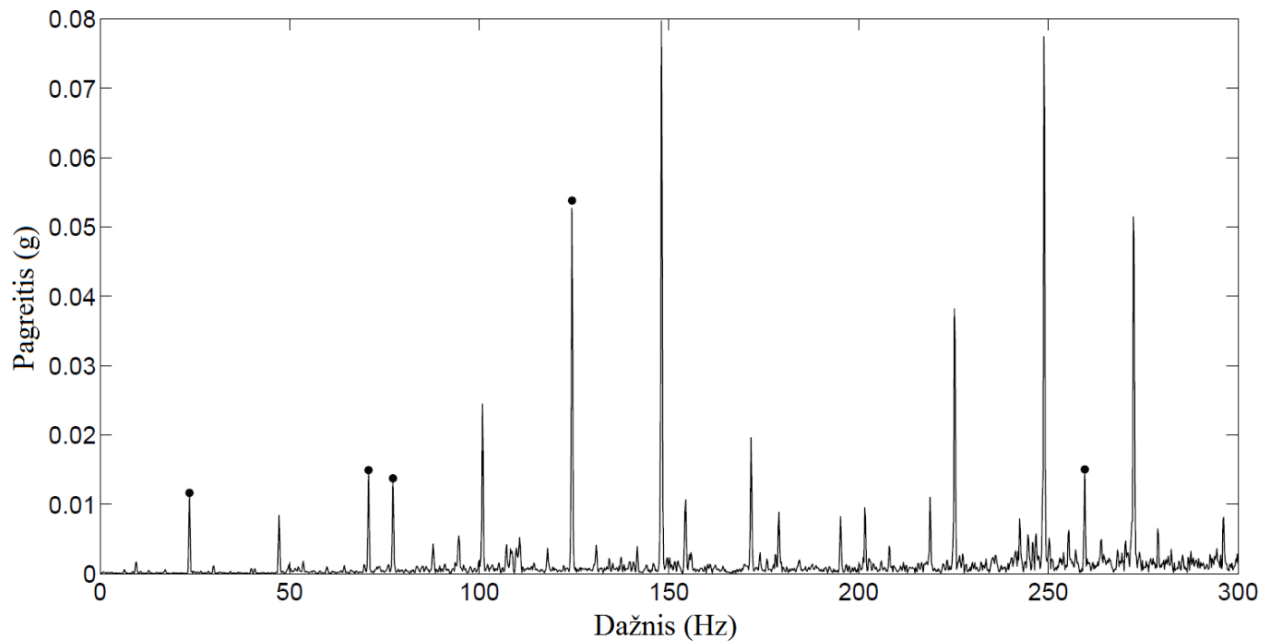
čia f_{recc} – rotoriaus ekscentriciteto dažnis, N – riedėjimo kūnų skaičius guolyje, d – riedėjimo kūno diametras, D – atstumas tarp dviejų riedėjimo kūnų centrų, β – kontakto kampas, f_o – išorinio guolio žiedo defekto dažnis, f_i – vidinio guolio žiedo defekto dažnis, f_b – riedėjimo kūno sukimosi dažnis, f_c – guolio separatoriaus defekto dažnis. Riedėjimo kūno defekto dažnis gaunamas f_b padauginus iš 2.

Taip pat literatūroje [15] teigiama, kad bet kuris rotoriaus defektas gali būti aptiktas stebint rotoriaus strypo praėjimo dažnį (RBPF – *rotor bar pass frequency*), kuris gaunamas taip [15]:

$$N_s = 120f_s/p \quad (33)$$

$$RBPF = (N_s \cdot N_r) \quad (34)$$

čia N_s – sinchroninis greitis, p – rotoriaus polių skaičius, N_r – rotoriaus strypų skaičius.



1.16 pav. Defekčio guolio dažnių spektras, šaltinis [7]

1.2.3 *Park*'o vektorinis (PVA) ir išplėstasis *Park*'o vektorinis (EPVA) metodai

Park'o transformacija leidžia trifazio asinchroninio variklio statoriaus fazinių srovių kintamuosius pavaizduoti koordinačių sistemoje, turinčioje dvi statmenas ašis. Variklio fazines sroves galima išreikšti taip [4]:

$$i_A = i_{max} \cos(\omega t - \alpha) \quad (35)$$

$$i_B = i_{max} \cos(\omega t - \alpha - 2\pi/3) \quad (36)$$

$$i_C = i_{max} \cos(\omega t - \alpha + 2\pi/3) \quad (37)$$

čia i_{max} yra didžiausia fazinės srovės vertė, ω – kampinis dažnis rad/s, α – pradinis fazės kampas, išreikštasadianais, i_A , i_B , i_C – momentinės statoriaus fazinių srovių A, B ir C vertės.

Statoriaus srovių dedamosios ašyse D ir Q yra apskaičiuojamos naudojantis šiomis išraiškomis [4] :

$$i_D = \sqrt{\frac{2}{3}}i_A - \sqrt{\frac{1}{6}}i_B - \sqrt{\frac{1}{6}}i_C \quad (38)$$

$$i_Q = \sqrt{\frac{1}{2}}i_B - \sqrt{\frac{1}{2}}i_C \quad (39)$$

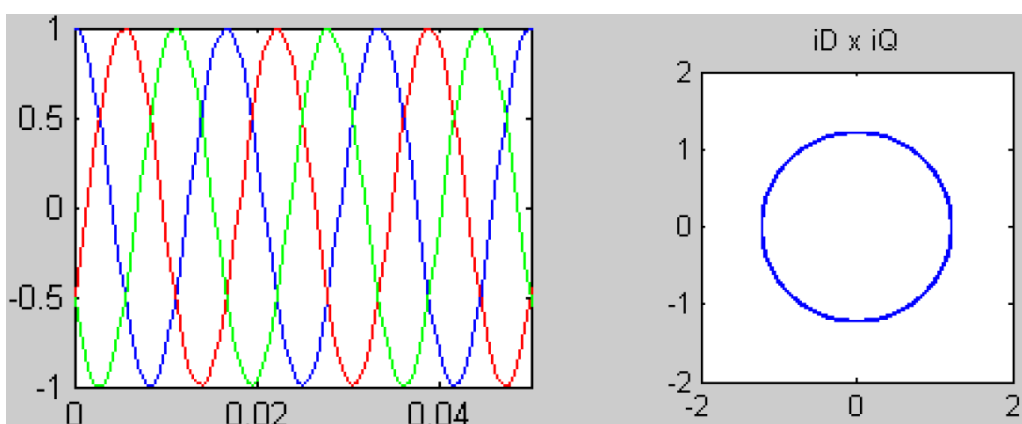
Esant idealioms sąlygoms, tai yra, kai tvarkingas variklis maitinamas iš sinusinės, subalansuotos ir teigiamo eiliškumo trifazės sistemos, *Park'o* dedamosios arba kitaip *Park'o* srovių vektorius (PVC - *Park's Current Vector*) gaunamas taip [4]:

$$i_D = \frac{\sqrt{6}}{2} I_{max} \sin(\omega_s t) \quad (40)$$

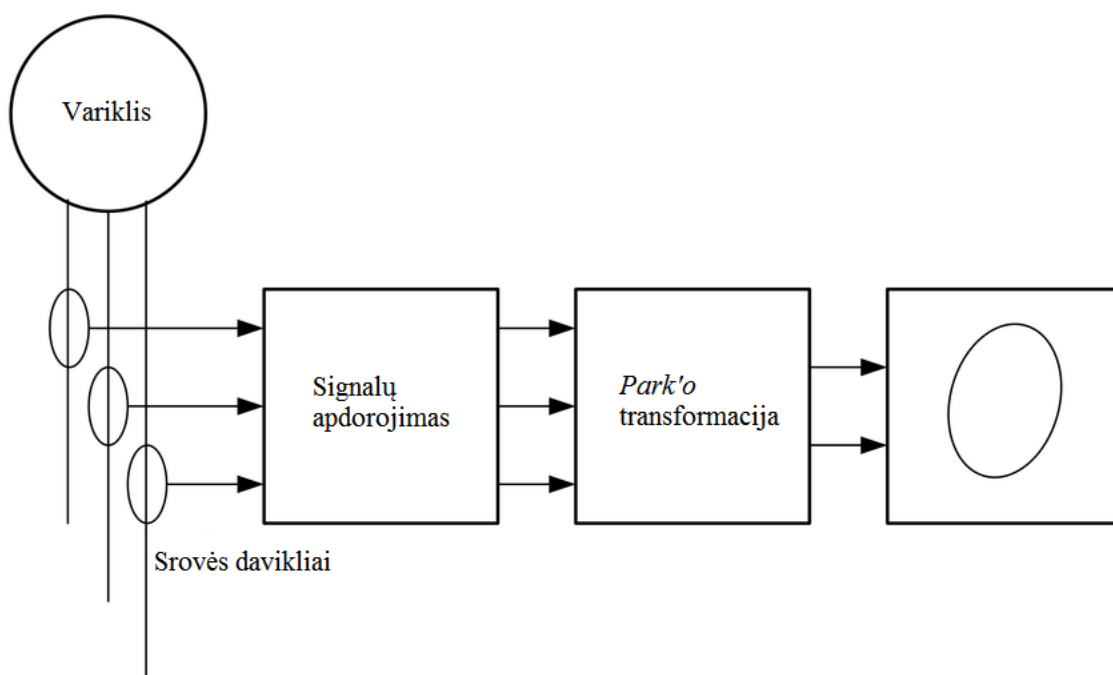
$$i_Q = \frac{\sqrt{6}}{2} I_{max} \sin(\omega_s t - \pi/2) \quad (41)$$

čia I_{max} – maksimali statoriaus fazinės srovės vertė, ω_s – kampinis maitinimo įtampos dažnis.

Lygtys (40) ir (41) aprašo idealų apskritimą, kurio centras yra plokštumos D – Q koordinačių pradžia, o spindulys yra konstanta, lygi $\sqrt{6}/2$.



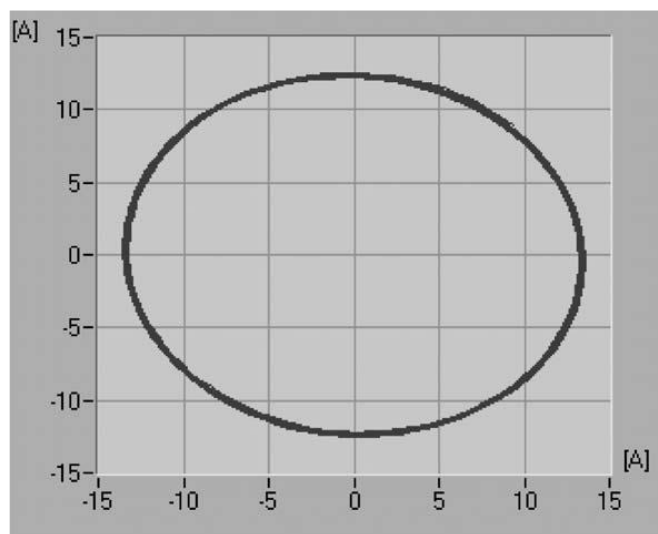
1.17 pav. *Park'o* apskritimas idealiu atveju, šaltinis [31]



1.18 pav. *Park'o* vektorinis metodas (PVA), parengta autoriaus

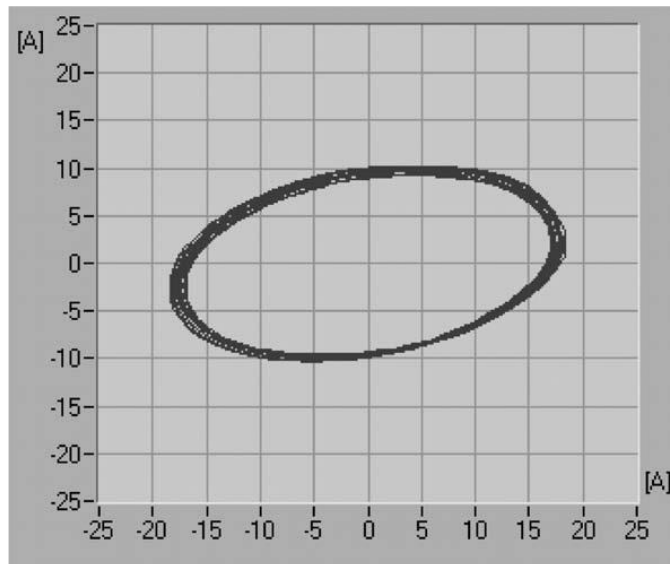
PVA (*Park's Vector Approach*) metodas gali būti pritaikytas tiek statoriaus, tiek rotoriaus, tiek ir guolių gedimams nustatyti. Esant idealioms elektros mašinos darbo sąlygoms, įtampos ir srovės yra subalansuotos ir perstumtos 120° laipsnių kampų. Kai vienoje iš statoriaus fazių apvijų įvyksta trumpas tarpapvijinis sujungimas, ja ima tekėti daug stipresnė srovė nei kitomis. Dėl atsiradusio srovių disbalanso vektoriaus spindulys kinta ir gaunamas jau ne apskritimas, o elipsė. Elipsės ekscentriškumą apsprendžia atvirkštinės sekos dedamosios vertė teigiamos sekos dedamosios atžvilgiu. Elipsės posvyrį nulemia fazės skirtumas tarp teigiamos ir neigiamos sekų dedamųjų (1.20 pav.). Rotoriaus ir guolių gedimų atveju stebimas PVC vektoriaus brėžiamo apskritimo sąlyginis storis (1.21 pav.). Dėl gedimo sukeliama harmoninių dedamųjų apskritimo sąlyginis storis kinta, ir kuo jis storesnis, tuo gedimo mastas didesnis.

1.19 pav. pavaizduotas PVC, gautas atlikus eksperimentą su varikliu esant normalioms sąlygoms. Nedideli vektoriaus spindulio svyravimai yra sukelti nežymaus įtampų disbalanso maitinimo šaltinyje. Nežymius vektoriaus spindulio svyravimus taip pat sukelia erdvinės ir griovelinių harmonikos.

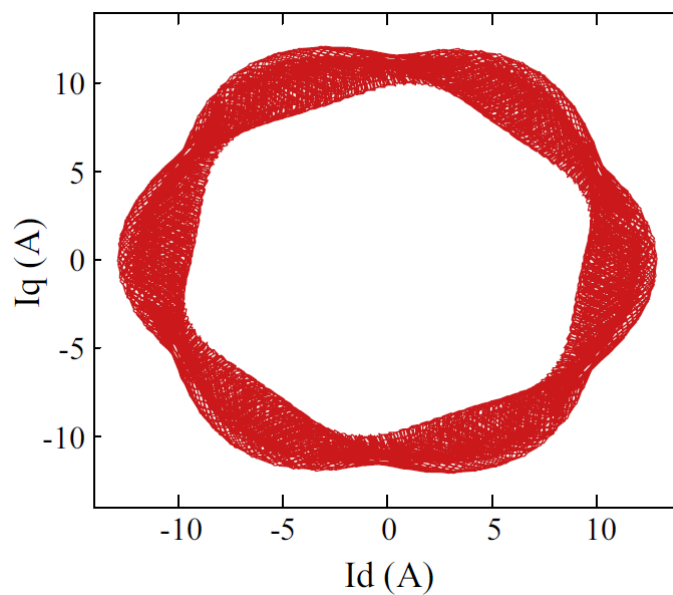


1.19 pav. Geometrinė *Park'o* srovių vektoriaus (PVC) padėtis esant tvarkingam varikliui, šaltinis [4]

1.20 pav. pavaizduotas variklis, kurio dvejose A fazės ritėse (iš šešiolikos) yra tarpvijinių trumpųjų sujungimų. Elipsės pagrindinės ašies posvyris rodo fazę, kurioje yra gedimas.



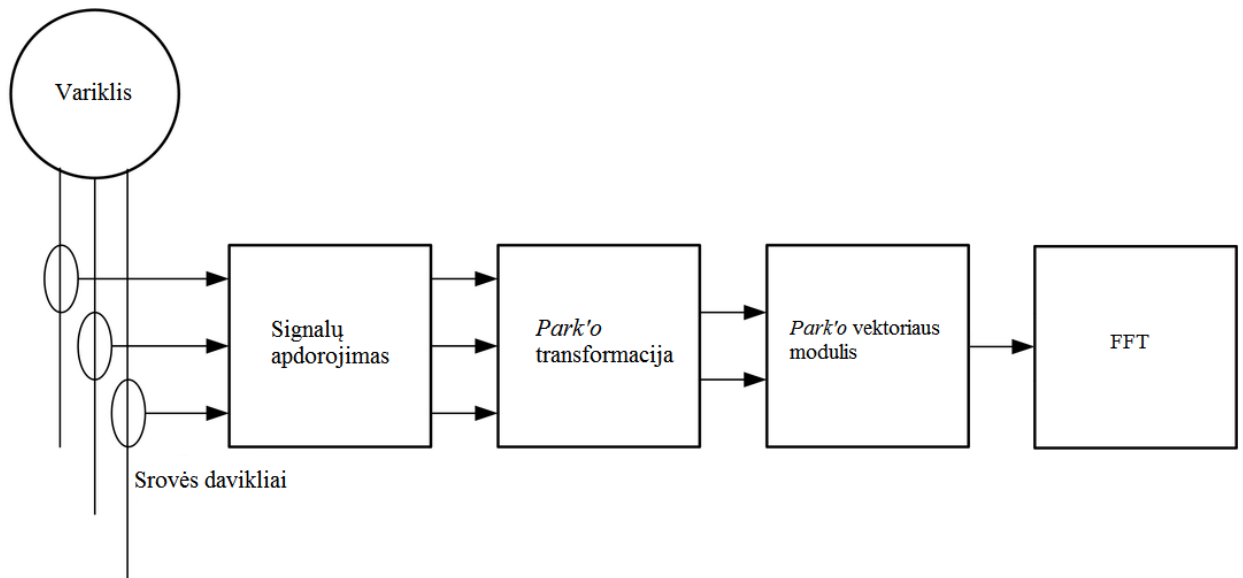
1.20 pav. Geometrinė *Park*'o srovių vektoriaus (PVC) padėtis, kai variklyje yra ričių, turinčių tarpavijinių trumpųjų sujungimų, šaltinis [4]



1.21 pav. Geometrinė *Park*'o srovių vektoriaus (PVC) padėtis, kai variklio rotoriuje yra nutrūkusių strypų, šaltinis [32]

Išplėstojo *Park*'o vektorinio metodo (EPVA – *Extended Park's Vector Approach*) taikymo atveju atliekama *Park*'o vektoriaus modulio (PVM – *Park's Vector Module*) spektrinė analizė. Jis apskaičiuojamas taip [12]:

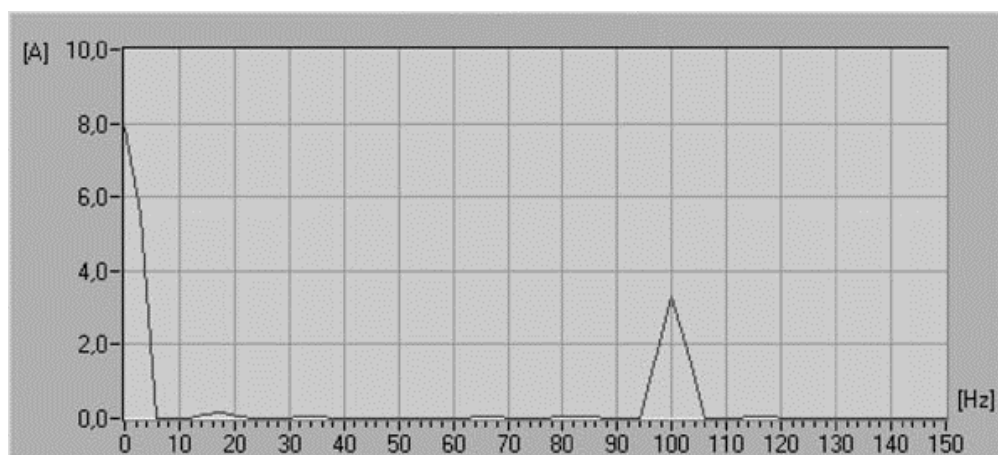
$$PVM = \sqrt{i_D^2 + i_Q^2} \quad (42)$$



1.22 pav. Išplėstasis *Park'o* vektorinis metodas (EPVA), parengta autoriaus

Kai variklio maitinimo įtampos nesimetriškos arba variklyje yra defektas, PVM iš konstantos virsta harmoniškai kintančiu kintamuoju, kurį sudaro dvi dedamosios. Tai pagrindinė nuolatinės srovės dedamoji plus dvigubo tinklo dažnio dedamoji $2f_s$, kuri yra tiesiogiai susijusi su atvirkštine srovės seka. Kadangi PVM svyruoja tarp maksimumo ir minimumo dukart per vieną maitinimo dažnio taktą, jis gali būti išskleistas Furjė eilute. Tai parodyta 1.23 pav., kuriame pavaizduota PVM harmoninė analizė variklio, kurio statoriaus apvijose yra trumpųjų tarpapvijinių sujungimų. $2f_s$ amplitudė yra tiesiogiai susijusi su gedimo mastu. Gedimo masto faktorius gali būti išreikštas $2f_s$ ir pagrindinės nuolatinės srovės dedamosios I_{cc} santykiu [4]:

$$S_{SF} = 2f_s / I_{cc} \cdot 100 \quad (43)$$



1.23 pav. *Park'o* Vektoriaus modulio harmoninė analizė, šaltinis [4]

Svarbu turėti omenyje, kad gedimo masto faktorius kinta priklausomai nuo variklio apkrovos ir mažėja, variklio apkrovai artėjant prie nominalios.

Naudojant EPVA metodą gedimo išskyrimo dažnis visada yra fiksuotas ir lygus $2f_s$. EPVA naudoja tik pagrindinę srovės dedamąją Park'o vektoriaus geometrinei padėčiai pavaizduoti. Taigi yra įmanoma nufiltruoti bet kokią aukštesnę dažnį, o tai daro diagnostikos procedūrą atsparesne triukšmams ir trikdžiams. Tačiau tam, kad pritaikyti šį metodą, reikia trijų srovės daviklių.

1.2.4 Momentinės galios spektro analizė (IPSA)

Variklio momentinės galios spektro analizės (IPSA - *Instantaneous Power Signature Analysis*) metodu galima aptikti tiek rotoriaus, tiek statoriaus gedimus bei identifikuoti ekscentricitetą oro tarpe.

Jei trifazio asinchroninio variklio maitinamo įtampos yra simetriškos, o įtampa tarp dviejų statoriaus išvadų yra u_{ab} ir srovė, įtekanti į vieną iš išvadų yra i_a – tuomet momentinę galią galime apibrėžti taip [13]:

$$p(t) = \sqrt{3}u_{ab}i_a \quad (44)$$

Jei nekreipsime dėmesio į neišvengiamą variklio asimetriją, u_{ab} ir i_a galime išreikšti taip:

$$u_{ab} = U_m \cos \omega t \quad (45)$$

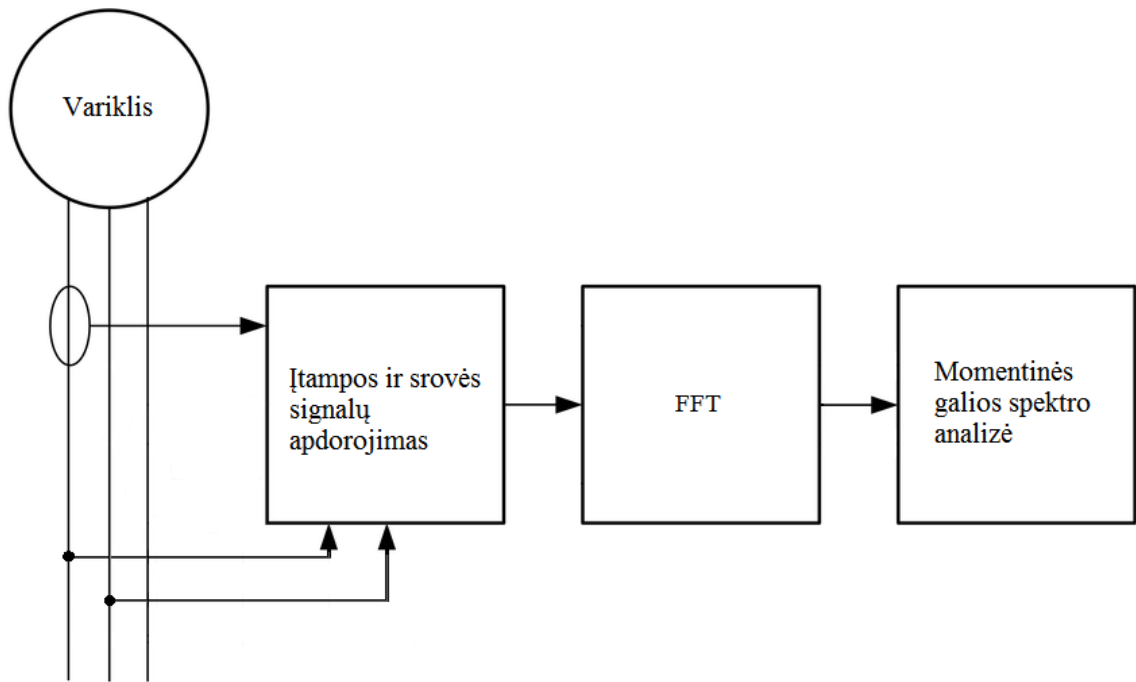
$$i_a = I_m \cos(\omega t - \varphi) \quad (46)$$

čia U_m maksimali linijinės įtampos vertė, I_m – maksimali srovės vertė, ω – maitinimo šaltinio kampinis dažnis, φ – pradinė srovės fazė.

Tuomet momentinė galia gali būti išreikšta taip:

$$p(t) = \frac{\sqrt{3}}{2}U_m I_m [\cos(2\omega t - \varphi) + \cos \varphi] \quad (47)$$

Iš lygties (46) matome, kad srovės spektre yra tik pagrindinė harmonika, kurios dažnis $f_s = \omega/(2\pi)$, o iš (47) galima spręsti, kad momentinės galios spektre yra harmoninė dedamoji $2f_s$ ir nuolatinės srovės dedamoji.



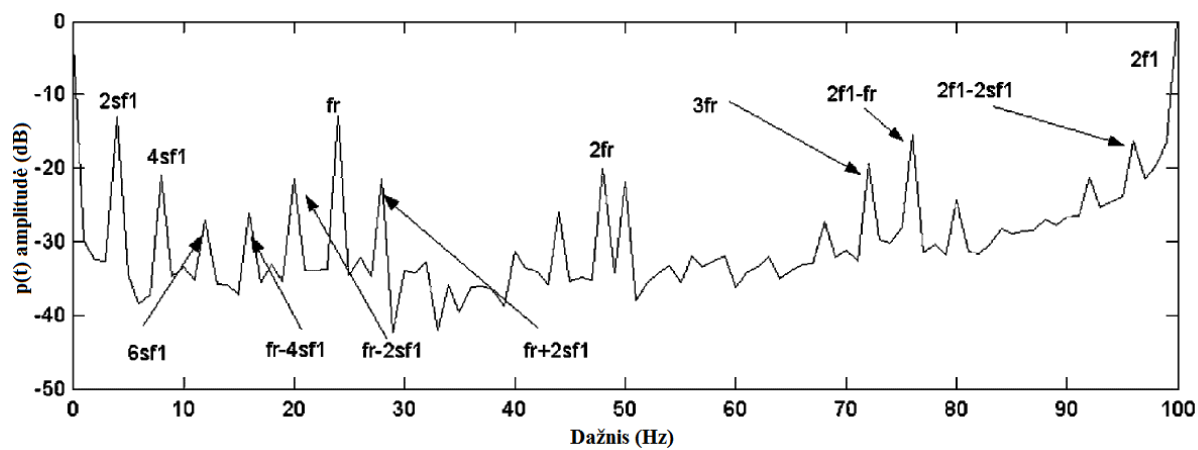
1.24 pav. Momentinės galios spektro analizės metodas (IPSA), parengta autoriaus

Harmoninės dedamosios momentinės galios spektre, pagal kurias galima identifikuoti variklio gedimą, yra du kartus aukštesnio dažnio, nei harmonikos statoriaus fazinės srovės dažnių spektre.

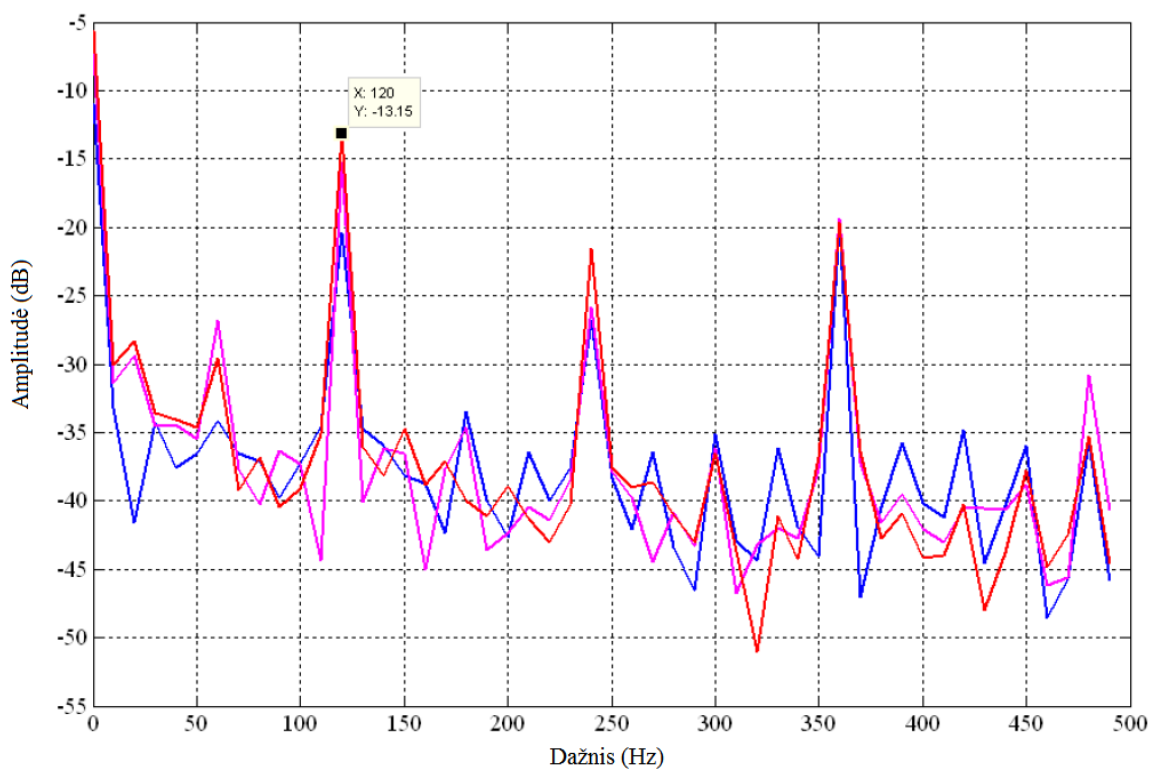
1.1 lentelė. Gedimus identifikuojančių harmonikų dažniai diagnozuojant IPSA metodu, parengta autoriaus pagal [13]

Harmonikos dažnis momentinės galios spektre	Gedimas
$2f_s$	Trumpieji tarpapvijiniai sujungimai statoriaus apvijose, trūkė rotoriaus strypai
$2ksf_s$ $2f_s \pm 2ksf_s$	Trūkė rotoriaus strypai
mf_r $2f_s \pm mf_r$	Oro tarpo ekscentricitetas

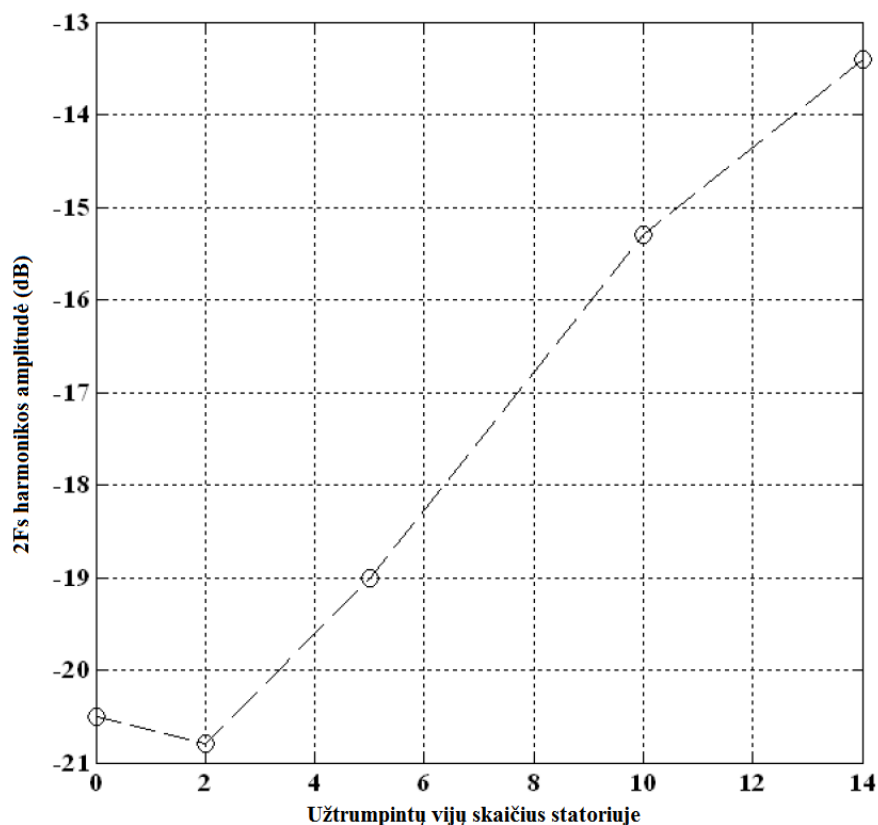
čia k, m – teigiamas sveikasis skaičius (1, 2, 3, ..).



1.25 pav. IPSA metodu gautas variklio su trimis trūkisiais rotoriaus strypais momentinės galios dažnių spektras, šaltinis [13]



1.26 pav. IPSA metodu gautas variklio momentinės galios dažnių spektras. Tvarkingo variklio kreivė mėlynos spalvos, variklio su 14 užtrumpintų statoriaus vijų – raudonos, šaltinis [12]



1.27 pav. $2f_s$ harmonikos amplitudės priklausomybė nuo trumpai sujungtų vijų statoriuje skaičiaus, šaltinis [12]

Variklio gedimo lygio faktorius gali būti susietas su $2f_s$ harmoninės dedamosios amplitude momentinės elektrinės galios spektre [12]. Metodas leidžia išvengti interferencijos su pagrindine srovės harmonika, ir tuo jis yra pranašesnis už MCSA, tačiau jam pritaikyti reikalingi tiek įtampos, tiek srovės davikliai bei reikia atlikti daugiau skaičiavimų.

1.2.5 Šiluminės būsenos monitoringas

Nuolatinis variklio šiluminės būsenos stebėjimas leidžia apsaugoti jį nuo ilgalaikių perkrovų, pernelyg aukštos aplinkos temperatūros ar užsikirtusio rotoriaus sukkelto temperatūros šuolio. Statoriaus izoliacijos klasės remiantis IEC60085 standartu pateiktos 1.2 lentelėje.

1.2 lentelė. Statoriaus apvijų izoliacijos klasės, parengta autoriaus pagal IEC60085 standartą

IEC 60085 izoliacijos klasė	IEC 60085 izoliacijos klasė (senesnis standartas)	Maksimali leistina karštojo taško temperatūra	Santykinis temperatūros indeksas	Izoliacinės medžiagos
90	Y	90 °C	>90 – 105	Neimpregnuotas popierius, šilkas,

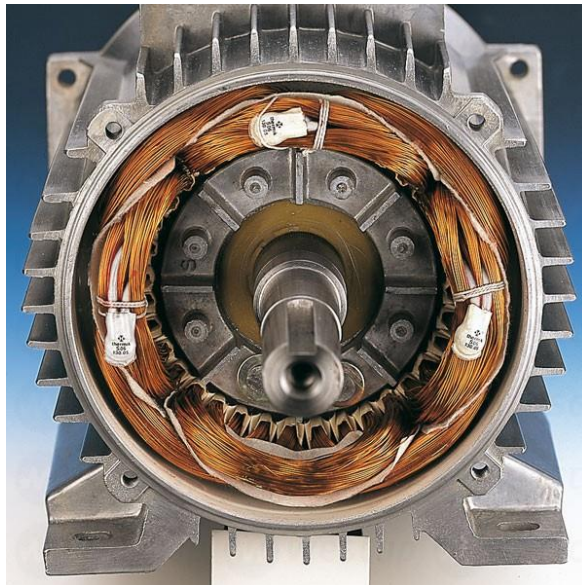
				medvilnė, natūrali guma, termoplastikai
105	A	105 °C	>105 – 120	Medvilnė, šilkas, popierius, sintetinis pluoštas
120	E	120 °C	>120 – 130	Poliuretanas, epoksidinės dervos ir kt.
130	B	130 °C	>130 – 155	Žerutis, stiklo pluoštas
155	F	155 °C	>155 – 180	130 klasės medžiagos, bandažams naudojant šią temperatūrą atlaikančias medžiagas
180	H	180 °C	>180 – 200	Silikono elastomerai ir 130 klasės neorganinės medžiagos, bandažams naudojant šią temperatūrą atlaikančias medžiagas
200		200 °C	>200 – 220	Tokios pat, kaip 130 klasės, taip pat teflonas
220		220 °C	>220 – 250	Tokios pat, kaip 200 klasės
250		250 °C	>250	Tokios pat, kaip 200 klasės

Viršijus maksimalią leistiną temperatūrą izoliacija dažniausiai iškart nesugenda. Tačiau laikoma, kad 10 °C viršijus maksimalią leistiną temperatūrą izoliacijos tarnavimo laikas sutrumpėja per pusę. Izoliacijos tarnavimo laikas metais gali būti apskaičiuotas taip [17]:

$$ke^{\alpha\theta} \quad (48)$$

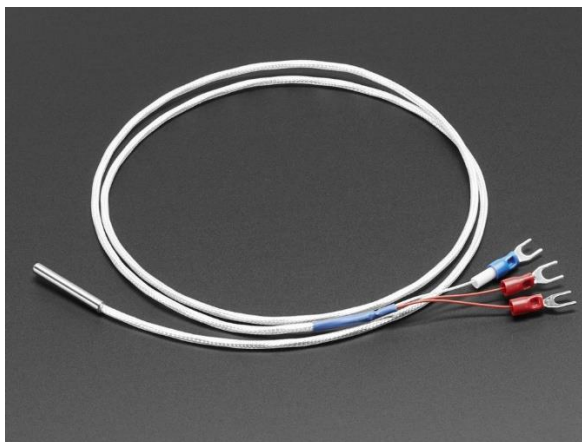
čia $k = 7.15 \cdot 10^4$, $\alpha = 0.08$ ir θ – izoliacijos temperatūros pokytis °C. Taigi, jei variklio temperatūra pakyla nuo 100 °C iki 105 °C, izoliacijos tarnavimo laikas nuo 24 metų sumažėja iki 16 metų.

Statoriaus apvijų temperatūra matuojama termodavikliais, priklijuojamais prie apvijų. Davikliai gali būti įmontuojami ir į statoriaus griovelius.



1.28 pav. Variklio statorius su įmontuotais termodavikliais, šaltinis www.wescap.eu

Temperatūros matavimui statoriaus apvijose ir guoliuose dažniausiai naudojami PT100 temperatūros davikliai. Jų varža, kai temperatūra yra 0 °C lygi 100 Ω, o kai temperatūra yra 100 °C lygi 138.4 Ω. Santykis tarp temperatūros ir varžos yra beveik linijinis tam tikrame diapazone. Pavyzdžiui, temperatūrai kintant nuo 0 iki 100 °C, paklaida ties 50 °C sudaro 0.4 °C. 1 °C temperatūros pasikeitimas šių daviklių varžą pakeičia 0.384 Ω. Todėl netgi maža varžos matavimo paklaida (pvz. dėl jungiamųjų laidų varžos) gali labai iškreipti temperatūros matavimus. Preciziniai davikliai būna keturių laidų, paprastesni – trijų.

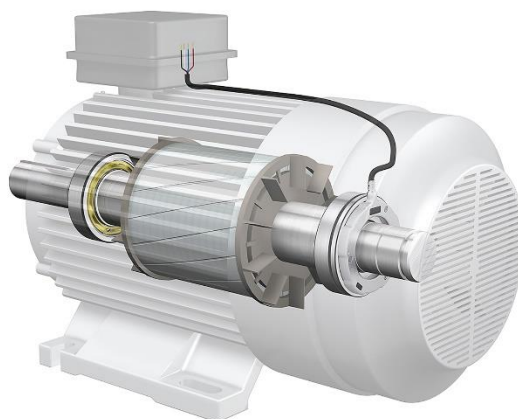


1.29 pav. Standartinis PT100 temperatūros daviklis, šaltinis PT100 www.adafruit.com

Srovės tekėjimas davikliu jį šildo. Pavyzdžiui, 1 mA srovei tekant 100 Ω varža išsiskirs 100 μW šilumos. Jei daviklis negalės šios šilumos išsklaidyti, temperatūros matavimas bus netikslus. Problemą galima išspręsti didinant daviklio matmenis, arba užtikrinant gerą daviklio šiluminį kontaktą su paviršiumi, kurio temperatūra matuojama. Kadangi signalų lygiai maži, svarbu, kad

šalia daviklių laidų nebūtų elektros kabelių ar kitų prietaisų, taip išvengiant interferencijos. Taip pat svarbu naudoti ekranuotus jungiamuosius kabelius, kuriuos reikia viename gale įžeminti. Svarbu ir tinkamas kabelių ilgio parinkimas.

Varikliuose dažniausiai naudojami iš anksto sutepti, dengti guoliai. Jų normali darbo temperatūra paprastai yra nuo 60 iki 70°C. Dažniausiai matuojama išorinio žiedo temperatūra. Jeigu neįmanoma įrengti daviklio išorinio žiedo temperatūros matavimui, temperatūrą galima matuoti ir ties variklio korpusu, prie išmatuotos temperatūros vertės pridėdant 10°C. Yra gaminami ir specialūs guolių temperatūros davikliai, kurie sumontuojami variklio surinkimo metu.

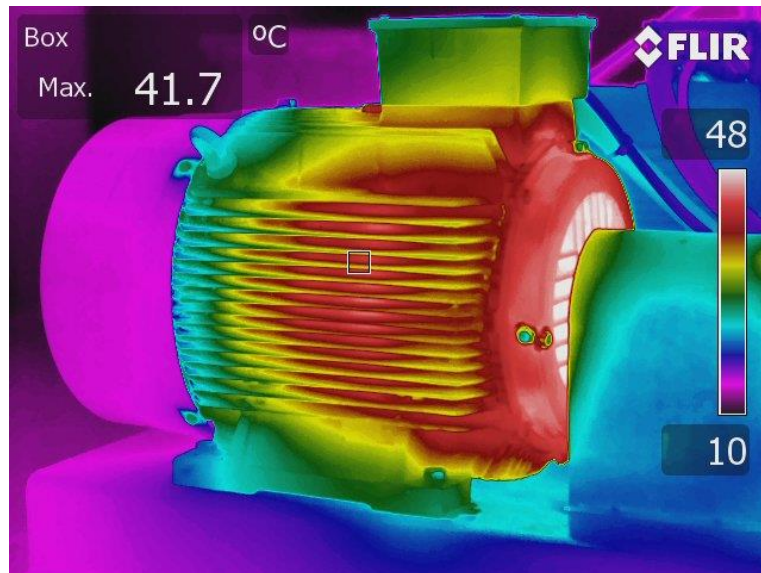


1.30 pav. Daviklis guolio temperatūrai matuoti, šaltinis www.skf.com

Rotoriaus temperatūrą matuoti sudėtingiau. Tokiu atveju temperatūros duomenų perdavimui galima pritaikyti optinius ar bevielius būdus. Taip pat galima sumontuoti specialius žiedus ant rotoriaus veleno, kurie būtų sujungti su temperatūros davikliais.

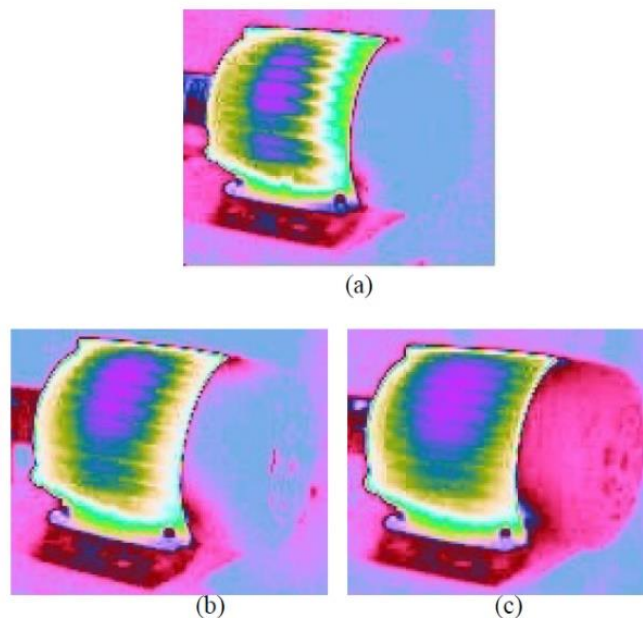
Guolių, rotoriaus ir statoriaus apvijų temperatūras matuojančių daviklių signalus galima sujungti su valdikliu, kuriame temperatūros signalai būtų skaitmenizuojami, temperatūros rodomos operatoriui kompiuterio ekrane ir tam tikrais laiko intervalais išsaugomos. Tokiu atveju būtų galima sekti temperatūros pokyčius laikui bėgant ir pastebėti nuokrypius nuo normalių reikšmių. Galima užprogramuoti valdiklį taip, kad šis automatiškai sustabdytų variklį temperatūroms pasiekus pavojingą ribą. Tačiau temperatūros davikliai dažniausiai neleidžia laiku pastebėti statoriaus apvijose dėl tarpapvijinių trumpųjų sujungimų atsiradusių karštųjų taškų.

Bendrą variklio šiluminės būklės vaizdą galima gauti termografijos būdu.



1.31 pav. Variklio termografinė nuotrauka, šaltinis www.techtransfer.com

Termografijos būdu galima aptikti statoriaus apvijų gedimus, neteisingą velenų centravimą, disbalansą bei guolių gedimus. 1.32 pav. pateiktos termografinės nuotraukos, rodančios (a) tvarkingo, (b) su 26% trumpai sujungtų vienos statoriaus fazės vijų ir (c) su 60% trumpai sujungtų vienos statoriaus fazės vijų variklio šiluminę būseną po 20min. veikimo [14]. Akivaizdu, kad įkaitęs plotas auga didėjant trumpai sujungtų statoriaus fazės vijų skaičiui.



1.32 pav. Variklio termografinės nuotraukos, esant skirtingam trumpai sujungtų vienos statoriaus fazės vijų skaičiui, šaltinis [14]

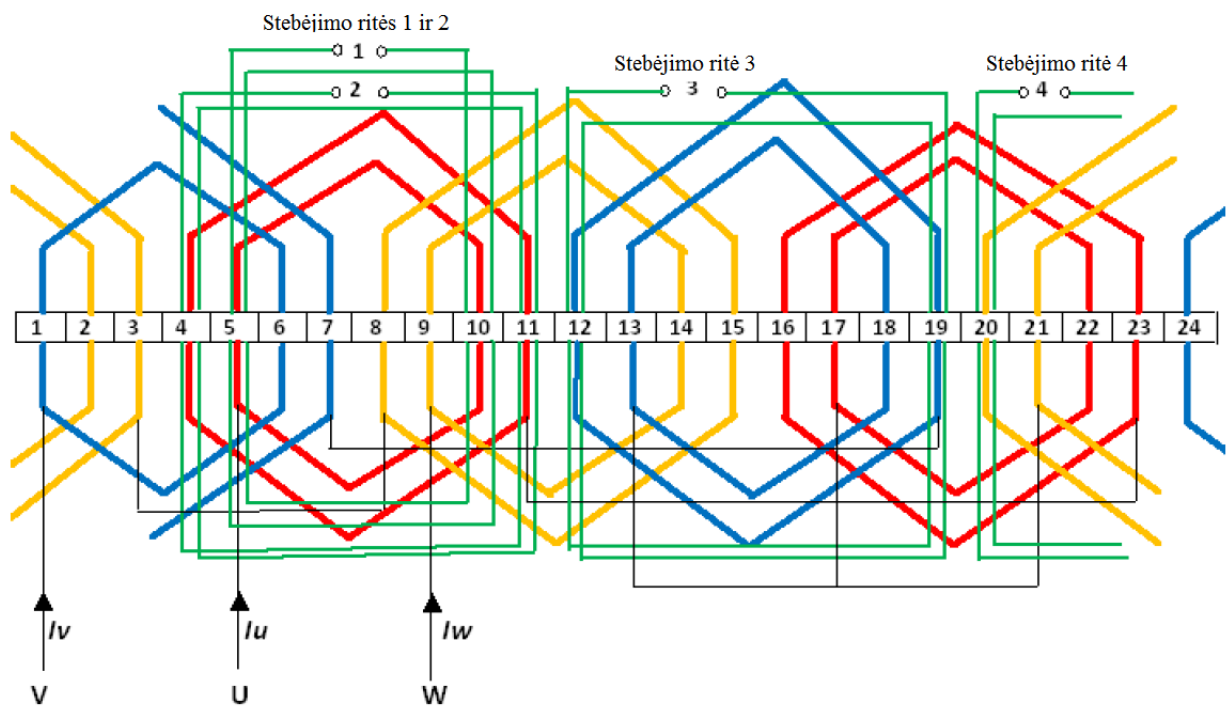
Tam, kad pritaikyti termografiją variklio diagnostikai, reikia, kad variklio apkrova siektų bet 30 – 40% nominalios apkrovos. Ji tuo pat metu gali parodyti ir bendrą variklio šiluminę būseną, ir vadinamuosius karštuosius taškus. Metodas tinkamas ne tik žemos, bet ir aukštos įtampos varikliams. Variklis gali būti maitinamas tiek tiesiogiai iš tinklo, tiek per dažnio keitiklį. Naudojant kompiuterinius termografinių vaizdų apdorojimo metodus galima nustatyti gedimo lygį. Taip pat didelis metodo privalumas yra tai, kad duomenys gaunami netiesiogiai ir per tam tikrą atstumą, kas kartais yra labai svarbu darbų saugos prasme.

1.2.6 Radialinio magnetinio srauto tyrimas stebėjimo ritėmis

Metodo pagrindas yra tai, kad stebėjimo ritėse, suvyniotose į statoriaus griovelius išilgai statoriaus apvijų, dėl elektromagnetinės indukcijos yra indukuojama sinusinė įtampa. Atlikus šiose stebėjimo ritėse indukuotos įtampos spektro analizę galima diagnozuoti variklio statoriaus apvijų gedimus. Analizuojami pagrindinės ir trečiosios harmonikos lygių pokyčiai, indukuotos įtampos kvadratinio vidurkio (RMS – *root mean square*) vertės kitimas ir bendro harmoninių iškraipymų lygio (THD – *total harmonic distortion*) kitimas. Šiuo metodu galima diagnozuoti ne tik patį statoriaus apvijų gedimą, bet ir apytiksliai nustatyti jo lygį bei vietą.

Trumpieji tarpapvijiniai sujungimai statoriaus apvijose sąlygoja statoriaus apvijomis tekančių srovių asimetriją. Tai galima įsivaizduoti kaip vijų skaičiaus sumažėjimą fazės, kurioje įvyko trumpasis tarpapvijinis sujungimas, ritėse. Ši asimetrija lemia magnetinio srauto pasiskirstymo pokyčius oro tarpe. Tai taip pat įtakoja įtampos, indukuojamos stebėjimo ritėse, dažnių spektrą.

Autorių [33] atliktame eksperimente į statoriaus griovelius suvyniojamos keturios stebėjimo ritės. 1-a ir 2-a į "U" fazės griovelius. 2-a stebėjimo ritė yra suvyniojama išilgai tos "U" fazės ritės, kurioje bus imituojami tarpapvijiniai trumpieji sujungimai. Kitos dvi stebėjimo ritės, 3-a ir 4-a, suvyniojamos atitinkamai išilgai "V" ir "W" fazių apvijų. Stebėjimo ričių išvadai išvedami per variklio išvadų dėžutę. 1.33 pav. pateikta apvijų ir stebėjimo ričių schema.



1.33 pav. Viensluoksnės, koncentriškos statoriaus apvijos su stebėjimo ritėmis, šaltinis [33]

Trifazio asinchroninio variklio statoriaus ir rotoriaus įtampų lygtys gali būti išreikštos taip [33]:

Statoriui:

$$V_{SA} = R_{SA}i_{SA} + d\lambda_{SA}/dt \quad (49)$$

$$V_{SB} = R_{SB}i_{SB} + d\lambda_{SB}/dt \quad (50)$$

$$V_{SC} = R_{SC}i_{SC} + d\lambda_{SC}/dt \quad (51)$$

Rotoriui:

$$V_{RA} = R_{RA}i_{RA} + d\lambda_{RA}/dt \quad (52)$$

$$V_{RB} = R_{RB}i_{RB} + d\lambda_{RB}/dt \quad (53)$$

$$V_{RC} = R_{RC}i_{RC} + d\lambda_{RC}/dt \quad (54)$$

Stebėjimo ritėje indukuota įtampa:

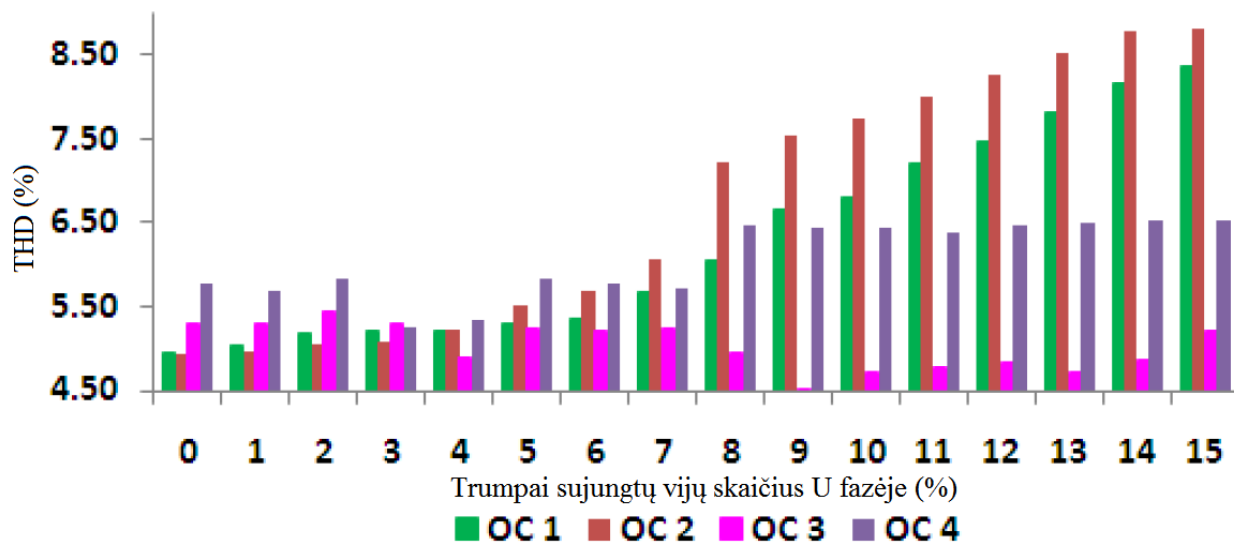
$$V_O = R_O i_O + d\lambda_O/dt \quad (55)$$

λ_O priklauso nuo abipusio induktyvumo tarp stebėjimo ritės ir statoriaus su rotorium:

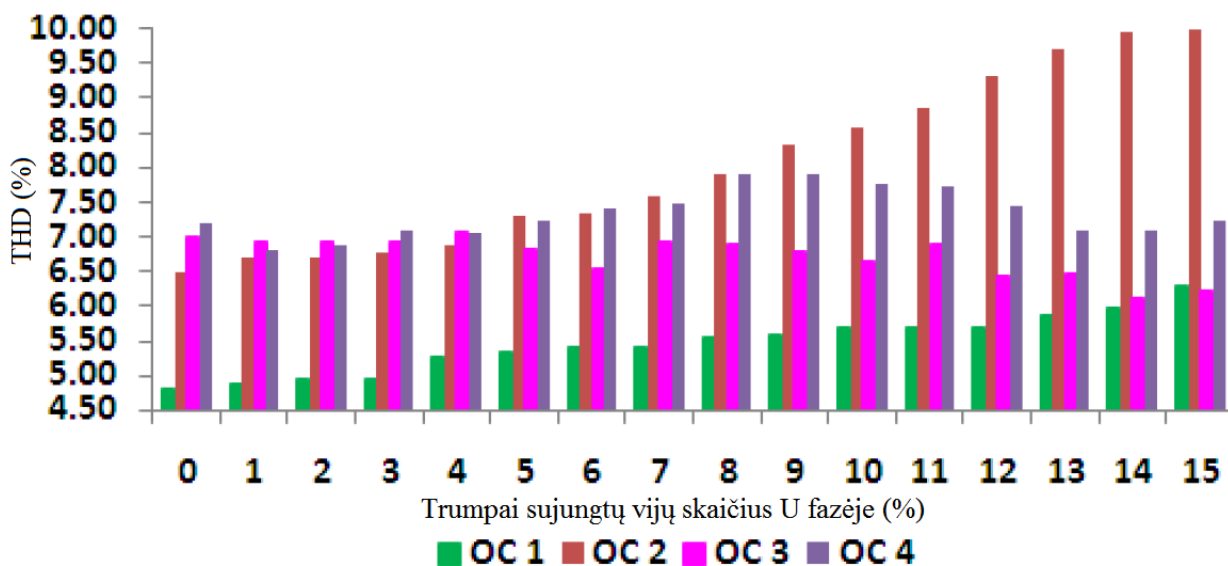
$$d\lambda_O/dt = d\lambda_{OS}/dt + d\lambda_{OR}/dt \quad (56)$$

čia V – įtampa, i – srovė, λ – surištas srautas, L – induktyvumas, R – varža. Sufiksai R , O ir S reiškia rotorų, stebėjimo ritę arba statorių.

1.34 ir 1.35 pav. parodyta kaip kinta THD vertė priklausomai nuo trumpai sujungtų vijų skaičiaus procentais vienoje iš variklio fazių neapkrauto ir nominaliai apkrauto variklio atvejais.



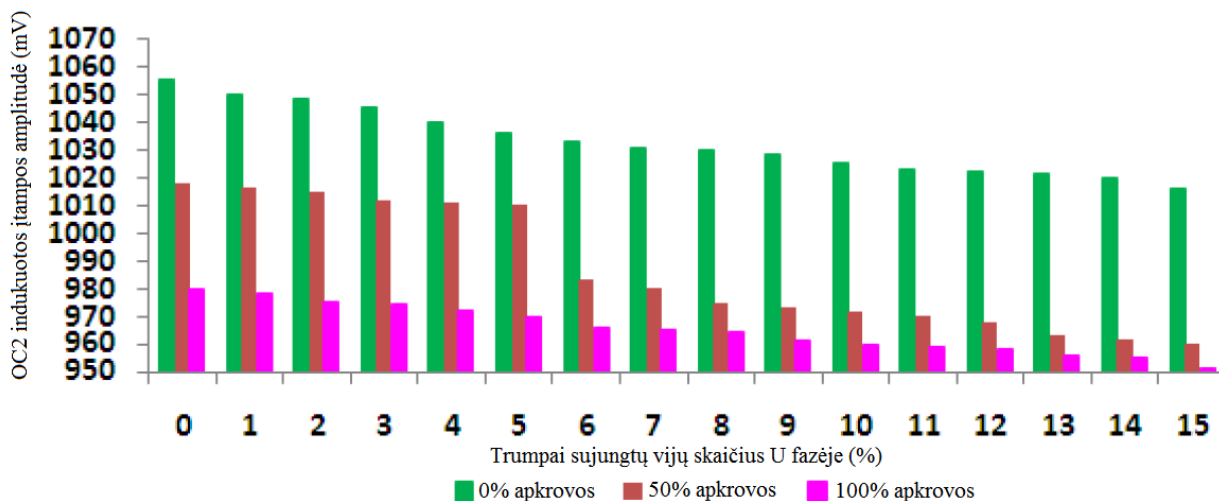
1.34 pav. THD kitimas keičiant trumpai sujungtų vijų skaičių U fazėje, kai variklis neapkrautas, šaltinis [33]



1.35 pav. THD kitimas keičiant trumpai sujungtų vijų skaičių U fazėje, kai variklis nominaliai apkrautas, šaltinis [33]

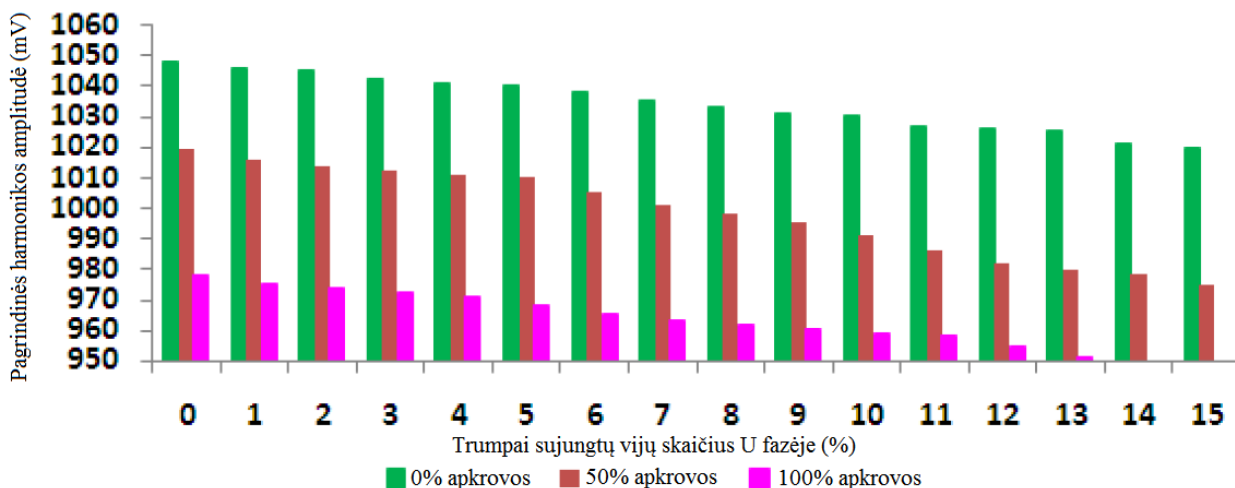
Iš 1.34 pav. ir 1.35 pav. galima spręsti, kad labiausiai harmonikų bendras lygis išaugo OC 1 ir ypač OC 2 stebėjimų ritėse indukuotose įtampose, kurios yra toje pačioje statoriaus fazėje U, kurioje ir yra trumpai sujungtų vijų. OC 3 ir OC 4 stebėjimo ritėse, esančiose V ir W fazėse,

indukuotose įtampose THD lygis kito mažai. Harmoninių iškraipymų daugėjo didėjant trumpai sujungtų vijų skaičiui. 1.36 pav. pavaizduotas OC2 stebėjimo ritėje indukuotos įtamos RMS lygio kitimas priklausomai nuo apkrovos bei trumpai sujungtų vijų skaičiaus statoriaus U fazėje.



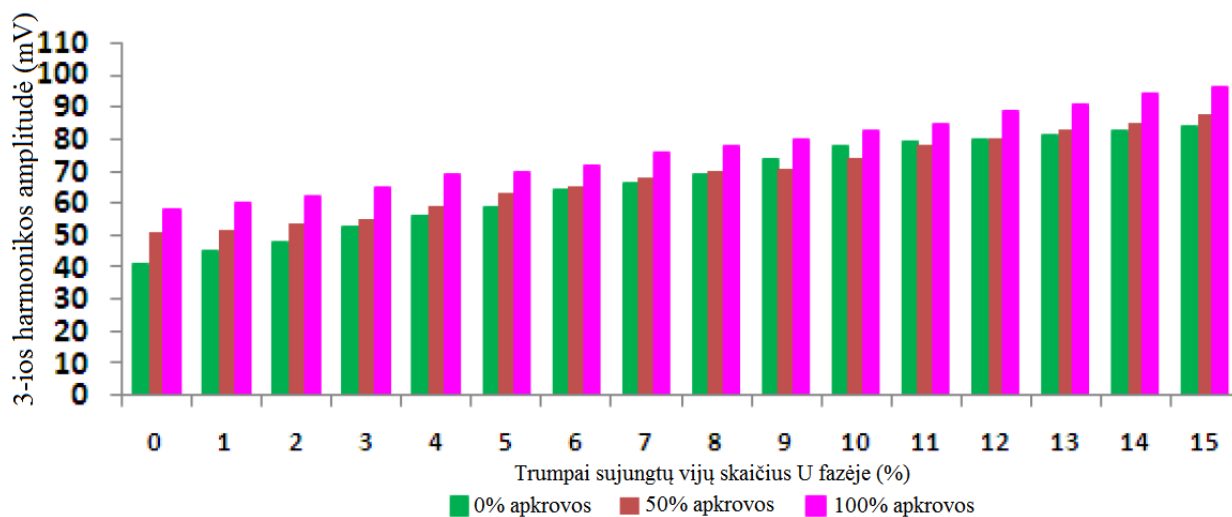
1.36 pav. OC2 indukuotos įtamos RMS lygio kitimas priklausomai nuo apkrovos bei trumpai sujungtų vijų skaičiaus statoriaus U fazėje, šaltinis [33]

Kaip matome 1.36 pav. OC2 stebėjimo ritėje indukuotos įtamos RMS vertė mažėja didėjant trumpai sujungtų vijų skaičiui statoriaus U fazėje.



1.37 pav. Pagrindinės harmonikos amplitudės OC2 stebėjimo ritės įtampoje kitimas, šaltinis [33]

1.37 pav. galima pastebėti, kad pagrindinės harmonikos lygis OC2 stebėjimo ritės įtampoje didėjant trumpai sujungtų vijų skaičiui U fazėje mažėja.



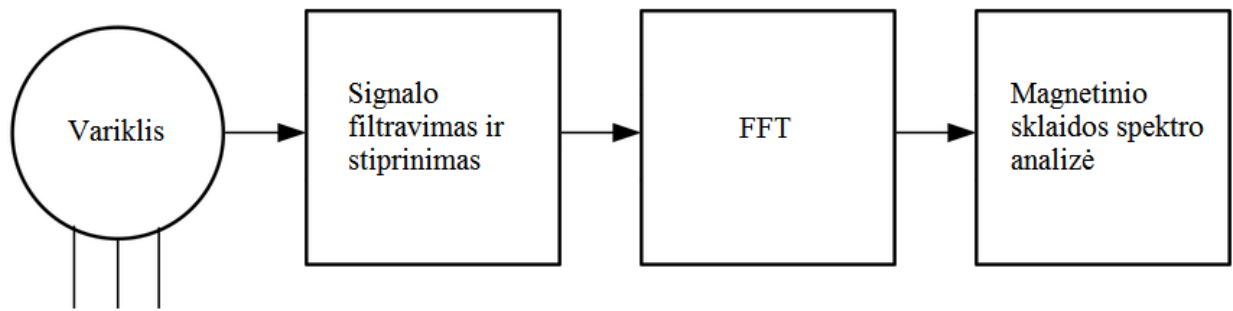
1.38 pav. 3-ios harmonikos amplitudės OC2 stebėjimo ritės įtampoje kitimas, šaltinis [33]

Iš 1.38 pav. galima spręsti, kad didėjant trumpai sujungtų vijų skaičiui U fazėje bei didėjant variklio apkrovai 3-ios harmonikos lygis auga.

Variklio diagnostikos stebėjimo ritėmis metodas yra pakankamai efektyvus diagnozuojant trumpus sujungimus statoriaus apvijose. Didžiausias šio diagnostikos būdo minusas yra tai, kad metodas yra invazinis ir tam, kad jį pritaikyti, reikia išardyti variklį ir suvynioti papildomas stebėjimo rites, o tai ne visuomet yra įmanoma. Metodą galima taikyti įvairios galios ir maitinimo įtampos varikliams.

1.2.7 Magnetinio sklaidos srauto dažnių spektro analizė

Elektros variklio magnetinis sklaidos srautas yra toks magnetinis srautas, kuris yra išspinduliuojamas už variklio rėmo ribų. Idealioms elektros mašinoms šis sklaidos srautas lygus nuliui [25]. Jį indukuoja statoriaus ir rotoriaus srovės, tačiau vyrauja statoriaus srovių indukuotas srautas, nes statorius veikia kaip magnetinis ekranas ir nepraleidžia rotoriaus sklaidos srauto. Iš esmės magnetinio sklaidos srauto daviklyje indukuojama EVJ teikia tą pačią informaciją, kaip ir statoriaus fazinė srovė, nes ši EVJ yra srauto išvestinė. Priklausomai nuo to, kurioje vietoje variklio atžvilgiu montuojamas daviklis, juo galima matuoti ašinį arba radialinį magnetinės sklaidos srautą. Indukuojamos EVJ amplitudė priklauso nuo vietos, kurioje pritvirtinamas srauto daviklis.



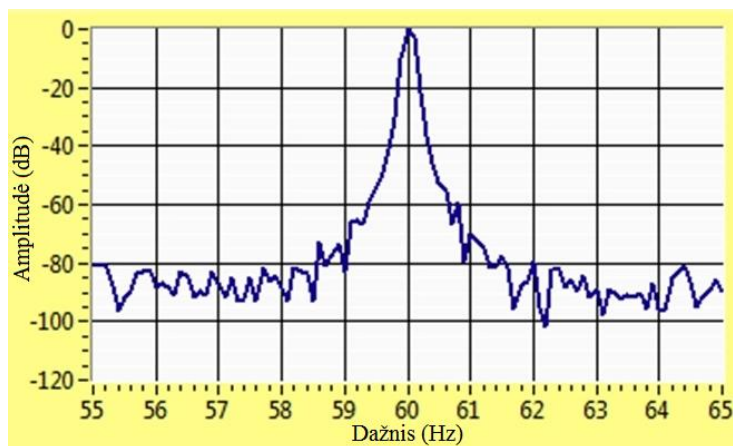
1.39 pav. Magnetinio sklaidos srauto dažnių spektro analizės metodas, parengta autoriaus

Daviklis (1.40 pav.) dažniausiai būna pagamintas iš feritinės C formos šerdies, ant kurios suvyniojami keli šimtai vijų plono varinio laido. Savadarbį daviklį reikia kalibruoti, tačiau galima įsigyti ir jau sukalibruotą standartinį daviklį. Daviklyje indukuojamas signalas būna labai silpnas (nuo kelių mikrovoltų iki keleto milivoltų), jame būna gausu triukšmų ir iškreipimų. Pavyzdžiui, 300W tvarkingo variklio signalo lygis eksperimento, atlikto [25] metu, buvo 5 mV, 2.2 kW – jau 100 mV. Kuo variklis galingesnis, tuo gautas signalas bus stipresnis. Daviklio jautrumas priklauso ir nuo medžiagos, iš kurios pagamintas variklio rėmas, bei nuo atstumo iki statoriaus vijų galų. Jei variklis yra skirtas naudoti sprogiroje aplinkoje, tuomet signalas gali būti toks silpnas, kad jo diagnostikai panaudoti nepavyks. Kartais triukšmų amplitudė būna didesnė nei paties signalo amplitudė. Todėl prieš apdorojant signalą jį būtina filtruoti ir sustiprinti. Signalų filtravimui paprastai naudojami RC filtrai. Nufiltruotas ir sustiprintas signalas perduodamas į duomenų surinkimo plokštę (DAQ board – *data acquisition board*) arba oscilografą, kur gautas signalas iš analoginio paverčiamas skaitmeniniu. Tuomet specialia programine įranga (labWIEV arba MatLAB) skaitmenizuotoms signalo vertėms pritaikoma Furjė transformacija ir analizuojamas gautas signalo spektras. Metodo pagalba galima aptikti rotoriaus ir statoriaus defektus bei dinaminį ekscentricitetą.

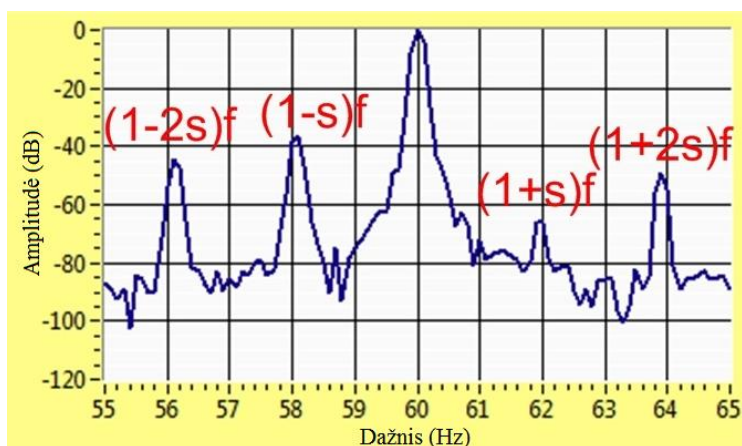


1.40 pav. Savadarbis magnetinio sklaidos srauto daviklis, šaltinis [9]

Trūkusių rotoriaus strypų sukelta asimetrija lemia trikdžius ne tik statoriaus srovėse, bet ir variklio magnetiniame sklaidos sraute. Srauto dažnių spektre aplink pagrindinę harmoniką atsiranda papildomos šoninės dažninės dedamosios. Taikant šį metodą trūkusiems rotoriaus strypams diagnozuoti, šių šoninių dedamųjų dažniams apskaičiuoti galioja ta pati (7) formulė, kaip ir MCSA metodo atveju [5], [9], [16].



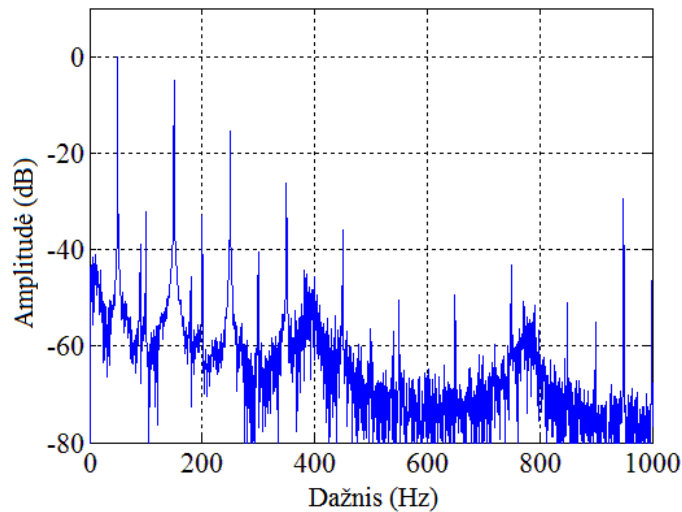
1.41 pav. Neapkrauto variklio su 3 trūkusiais rotoriaus strypais magnetinio sklaidos srauto dažnių spektras, šaltinis [5]



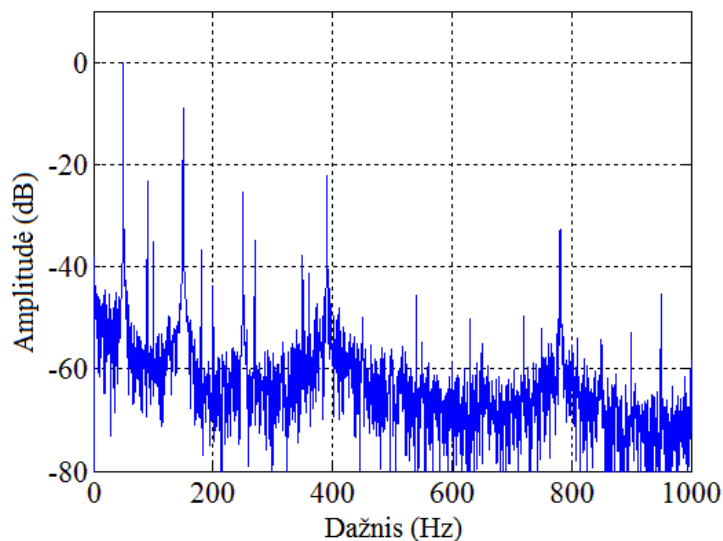
1.42 pav. Nominaliai apkrauto variklio su 3 trūkusiais rotoriaus strypais magnetinio sklaidos srauto dažnių spektras, šaltinis [5]

Kaip ir taikant MCSA metodą, čia šoninių dažniųjų dedamųjų amplitudės rotoriaus defektu atveju priklauso nuo variklio apkrovos. Dešinėsios dedamosios amplitudė didėjant slydimui didėja labiau, nei kairioji, todėl, kad diagnozuojant naudojama daviklyje indukuota EVJ, kuri yra srauto išvestinė, o ne pats srautas [9].

Taikant šį metodą trumpiesiems sujungimams statoriaus apvijose diagnozuoti, taip pat galioja tos pačios (2) ir (3) formulės dažniųjų dedamųjų dažniams apskaičiuoti, kaip ir MCSA metodo atveju [1][21][25].



1.43 pav. Neapkrauto variklio, kurio statorius tvarkingas, magnetinio sklaidos srauto dažniųjų spektras, šaltinis [25]



1.44 pav. Neapkrauto variklio, kurio statoriaus apvijose yra trumpųjų tarpapvijinių sujungimų, magnetinio sklaidos srauto dažniųjų spektras, šaltinis [25]

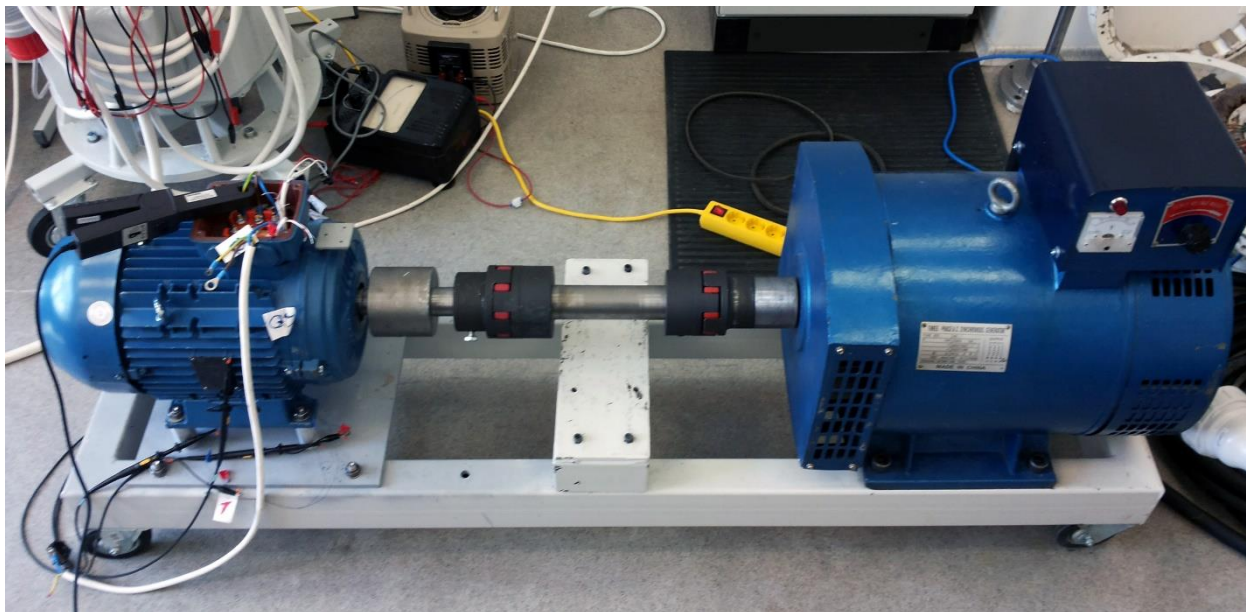
Paprastai esant trumpiesiems sujungimams statoriaus apvijoje yra pastebimas trečiosios harmonikos (150 Hz) amplitudės padidėjimas magnetinio sklaidos srauto dažniųjų spektre.

Šis diagnostikos metodas geras tuo, kad yra neinvazinis, tačiau dėl silpno signalo ne visuomet pritaikomas, ypač pramoninėje aplinkoje, kur gausu triukšmų. Taip pat signalo stiprumas priklauso nuo daviklio padėties ant variklio korpuso ir yra sudėtinga tiksliai parinkti jam geriausią vietą.

2. TYRIMO ATLIKIMO METODIKA

2.1 Gedimų diagnostikos metodika tiriant MCSA būdu

Nagrinėjant literatūrą buvo nuspręsta variklio statoriaus fazinės srovės dažnių spektro analizės metodą pritaikyti variklio guolių defektams, trumpiesiems tarpapvijiniams sujungimams statoriaus apvijoje bei trūkusiems rotoriaus strypams nustatyti.



2.1 pav. Tyrimo stendas, nuotrauka autoriaus

Tyrimo objektu pasirinktas trifazis asinchroninis WEG variklis. Elektros variklio nurodytieji parametrai yra šie:

Galia $P_n = 7.5 \text{ kW}$;

Įtampa $U_n = 400 \text{ V}$;

Fazinė srovė $I_n = 14.8 \text{ A}$;

Sukimosi greitis $n_n = 1455 \text{ min}^{-1}$;

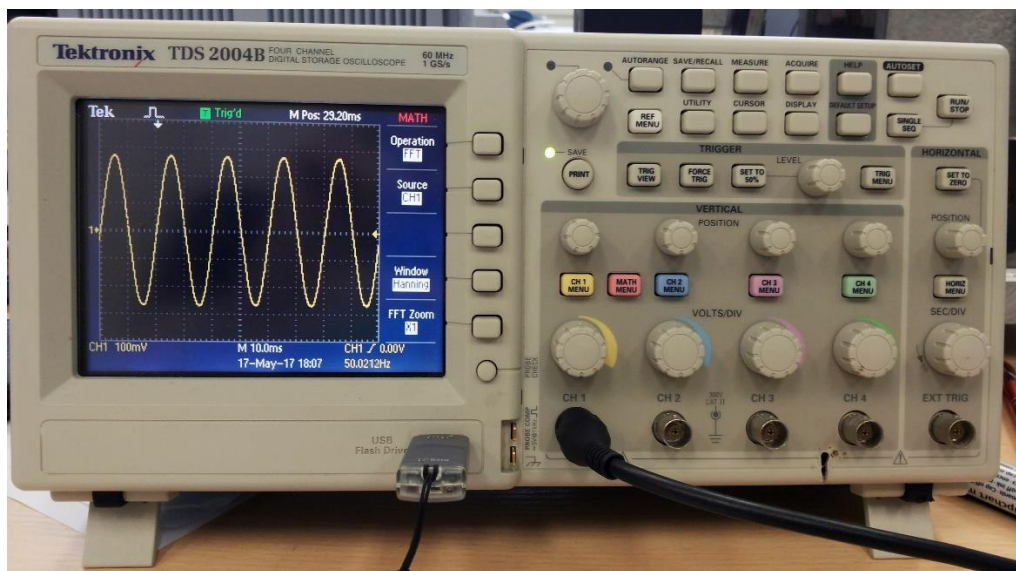
Galios faktorius $\cos \varphi = 0.84$;

Naudingumo koeficientas $\eta_n = 0.86$.

Variklio fazinės srovės matavimai buvo atliekami Tektronix A622 srovės matavimo davikliu. Daviklis veikia Holo efekto principu. Juo galima matuoti tiek nuolatinę, tiek kintamąją

srovę iki 100 kHz dažnio, nuo 50 mA iki 100 A. Daviklio išėjime gaunama 10 mV/A arba 100 mV/A įtampa.

Tektronix A622 srovės daviklis buvo sujungtas su skaitmeniniu oscilografu Tektronix TDS 2004B. Tai keturių kanalų, 60 MHz, 1 GS/s oscilografas, turintis galimybę į USB raktą įrašyti 2500 taškų ekrane matomo signalo skaitmeniniu CSV formatu.



2.2 pav. Oscilografas Tektronix TDS 2004B, nuotrauka autoriaus

Variklio apkrovos stebėjimui jo fazinė srovė buvo matuojama srovės replėmis Sonel CMP-1006.

Varikliui apkrauti naudotas trifazis sinchroninis generatorius, kurio nurodytieji parametrai yra šie:

Tipas: STC – 20;

Galia $P_n = 20 \text{ kW}$;

Įtampa $U_n = 400 \text{ V}$;

Fazinė srovė $I_n = 36.1 \text{ A}$;

Dažnis $F_n = 50 \text{ Hz}$;

Sukimosi greitis $n_n = 1500 \text{ min}^{-1}$;

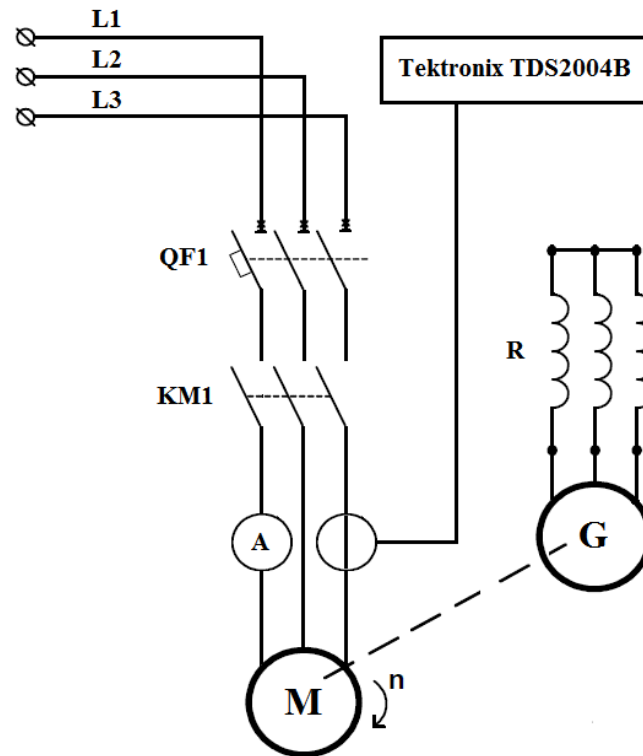
Galios faktorius $\cos \varphi = 0.8$;

Žadinimo įtampa $U_{\text{žad.}} = 94 \text{ V}$;

Žadinimo srovė $I_{\text{žad.}} = 6.4 \text{ A}$.

Generatoriui apkrauti buvo naudojamas 15 kW galios šildytuvai, perjungtas veikti 7.5 kW galia.

Variklio tyrimo MCSA metodu principinė schema pateikta 2.3 pav.



2.3 pav. Variklio tyrimo MCSA metodu principinė schema, parengta autoriaus: QF1 – automatinis išjungiklis, KM1 – magnetinis paleidiklis, M – variklis, G – generatorius, R – aktyvioji apkrova

Iš oscilografo į USB raktą įrašytas skaitmenizuotas fazinės srovės signalas .CSV formatu perkeliamas į kompiuterį. Po to šie duomenys importuojami į MATLAB 2013 programų paketą. Jame paleidus specialiai parašytą programą iš fazinės srovės signalo verčių pritaikius Furjė transformaciją gaunamas variklio fazinės srovės dažnių spektras. Žemiau pateiktas MATLAB kodas variklio statoriaus fazinės srovės dažnių spektrui gauti:

```
xdft = fft(X);
DT = 0.00004;
Fs = 1/DT;
DF = Fs/size(X,1);
freq = 0:DF:Fs/2;
xdft = xdft (1:length(xdft)/2+1);
absxdft = abs (xdft);
log=10*log10(absxdft(:,1)/Y);
plot (freq, log);
xlabel('Dažnis (Hz)');
ylabel('Amplitudė (dB)').
```


Guolio defektus variklio fazinės srovės dažnių spektre identifikuojančių harmonikų dažniai apskaičiuojami pagal (12) – (15) formules, trumpuosius tarpapvijinius sujungimus statoriaus apvijose nurodančių dažninių dedamųjų dažniai apskaičiuojami pagal (2) formulę, rotoriaus gedimus identifikuojančių harmonikų dažniai randami pagal (8) formulę. Variklio guolio defektai MCSA metodu tirti neapkrovus variklio (fazinė srovė 2.1A), statoriaus ir rotoriaus defektai – esant nominaliai variklio apkrovai (fazinė srovė 14.8A)

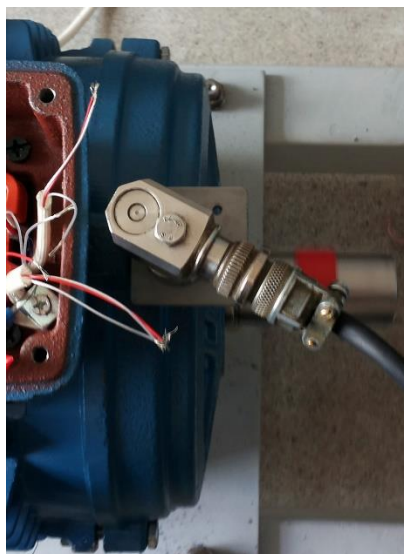
2.2 Gedimų diagnostikos metodika tiriant vibracijos spektro analizės būdu

Analizuojant literatūrą buvo nuspręsta vibracijos spektro analizės metodą pritaikyti variklio guolių defektų nustatymui.

Eksperimentams naudojamas tas pats WEG 7.5 kW variklis. Guolių vibracijos matuojamos pjezoakcelerometru A104. Jo parametrai yra šie:

Jautris – 100 mV/g;

Rezonanso dažnis – 22000 Hz.



2.4 pav. Pjezoakcelerometras A104, nuotrauka autoriaus

Pjezoakcelerometras sujungtas su vibracijų analizatoriumi Adash 4101 CZ. Analizatoriaus parametrai yra šie:

Vibracijų greičio matavimas mm/s diapazone 10 – 1000 Hz;

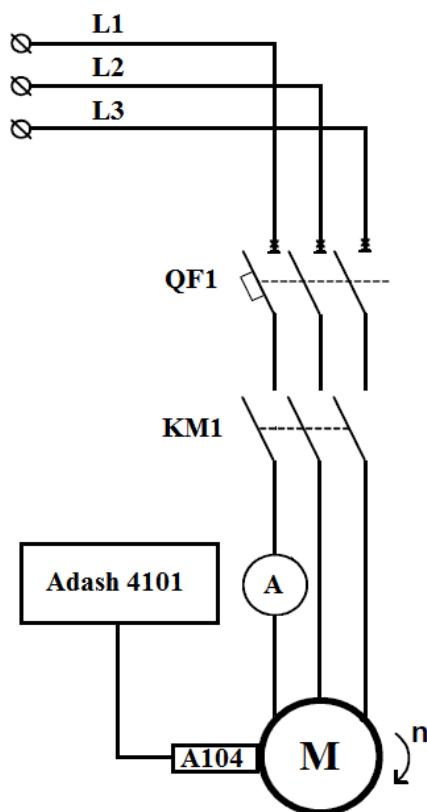
Vibracijų pagreičio matavimas mm/s² diapazone 0.8 – 16.000 Hz;

Vibracijų pagreičio matavimas g (9.81 m/s²) diapazone 5 – 16 kHz;

Vibracijų pagreičio gaubiančiosios matavimas m/s^2 diapazone 5 – 16 kHz.

Vibracijų spektro FFT analizė.

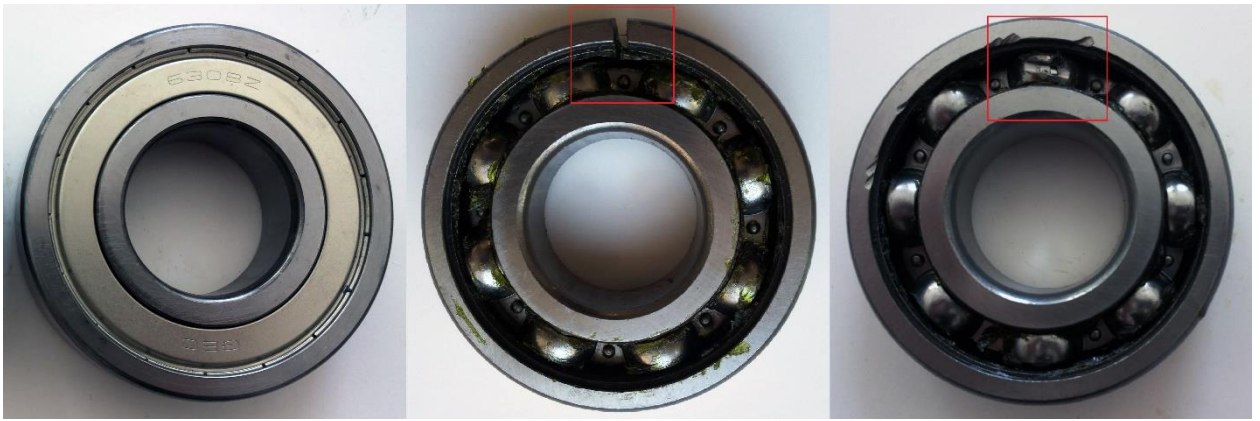
Vibracijų dažnių spektrų grafikai gauti vibracijų analizatoriumi Adash 4101 CZ, iš kurio jie perkelti į kompiuterį. Variklio guolio defektai vibracijos spektro analizės metodu tirti neapkrovus variklio (fazinė srovė 2.1A).



2.5 pav. Variklio tyrimo vibracijos spektro analizės metu principinė schema, parengta autoriaus: QF1 – automatinis išjungiklis, KM1 – magnetinis paleidiklis, M – variklis, A104 – pjezoakcelerometras, Adash 4101 – vibracijų analizatorius.

2.3 Tyrimo metu varikliui sukelti defektai

Tyrimo metu naudoti trys 6308 guoliai. Pirmas guolis buvo be pažeidimų, antras su pažeistu išoriniu žiedu, trečias su pažeistu riedėjimo kūnu ir separatoriumi. Naudotų guolių nuotrauka pateikta 2.6 pav.



2.6 pav. Tyrimo metu naudoti guoliai, nuotraukos autoriaus

Guolio 6308 duomenys:

Riedėjimo kūnų skaičius guolyje – 8;

Atstumas tarp riedėjimo kūnų centrų $D = 65 \text{ mm}$;

Riedėjimo kūno diametras $d = 15.081 \text{ mm}$;

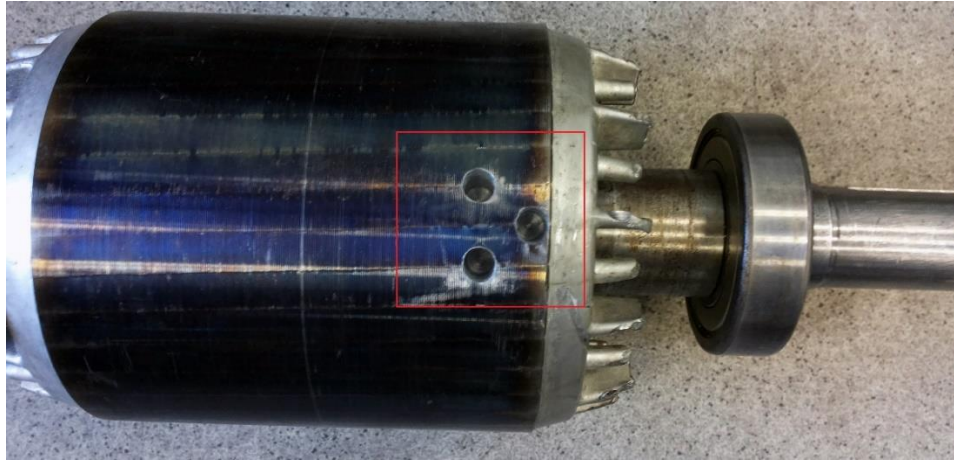
Kontakto kampas $\alpha = 0^\circ$.

Tyrimo metu naudoto variklio statoriaus, pažeisto trumpųjų tarpapvijinių sujungimų nuotrauka pateikta 2.7 pav.



2.7 pav. Variklio statorius, kuriame yra trumpųjų tarpapvijinių sujungimų, nuotrauka autoriaus

Tyrimo metu naudoto variklio rotoriaus su 3 nugręžtais strypais nuotrauka pateikta 2.8 pav.



2.8 pav. Variklio rotorius su 3 nugręžtais strypais, nuotrauka autoriaus

3. DIAGNOSTIKOS METODŲ TYRIMAS IR REZULTATAI

3.1 Variklio guolių gedimų diagnostika MCSA metodu

Variklio guolių defektus identifikuojantys dažniai apskaičiuoti naudojant (12) – (15) formules. Variklio veleno sukimosi dažnis $f_r = 24.250$ Hz.

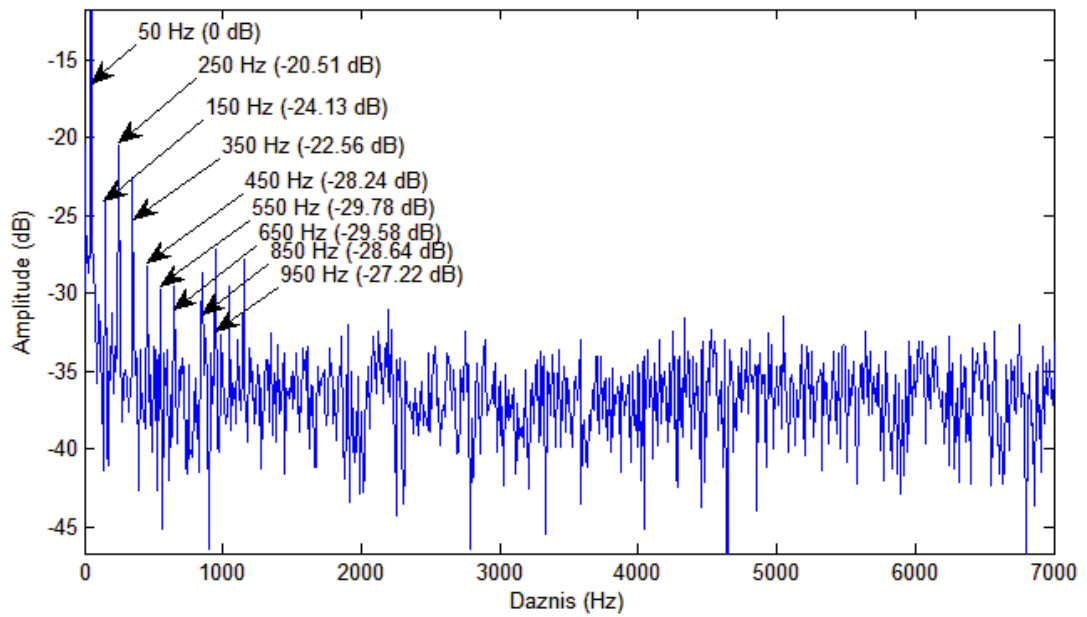
$$f_o = \frac{8}{2} \cdot 24.250 \left(1 - \frac{15.081}{65} \cdot \cos 0^\circ \right) = 74.495 \text{ Hz.}$$
$$f_b = \frac{65}{2 \cdot 15.081} \cdot 24.250 \left(1 - \left(\frac{15.081}{65} \right)^2 \cdot \cos^2 0^\circ \right) = 49.446 \text{ Hz.}$$

Norint gauti riedėjimo kūno defekto dažnį, jo sukimosi dažnį f_b reikia dauginti iš 2, taigi riedėjimo kūno defekto dažnis lygus 98.893 Hz.

$$f_c = \frac{1}{2} \cdot 24.250 \left(1 + \frac{15.081}{65} \cdot \cos 0^\circ \right) = 9.312 \text{ Hz.}$$
$$f_i = \frac{8}{2} \cdot 24.250 \left(1 + \frac{15.081}{65} \cdot \cos 0^\circ \right) = 119.505 \text{ Hz.}$$

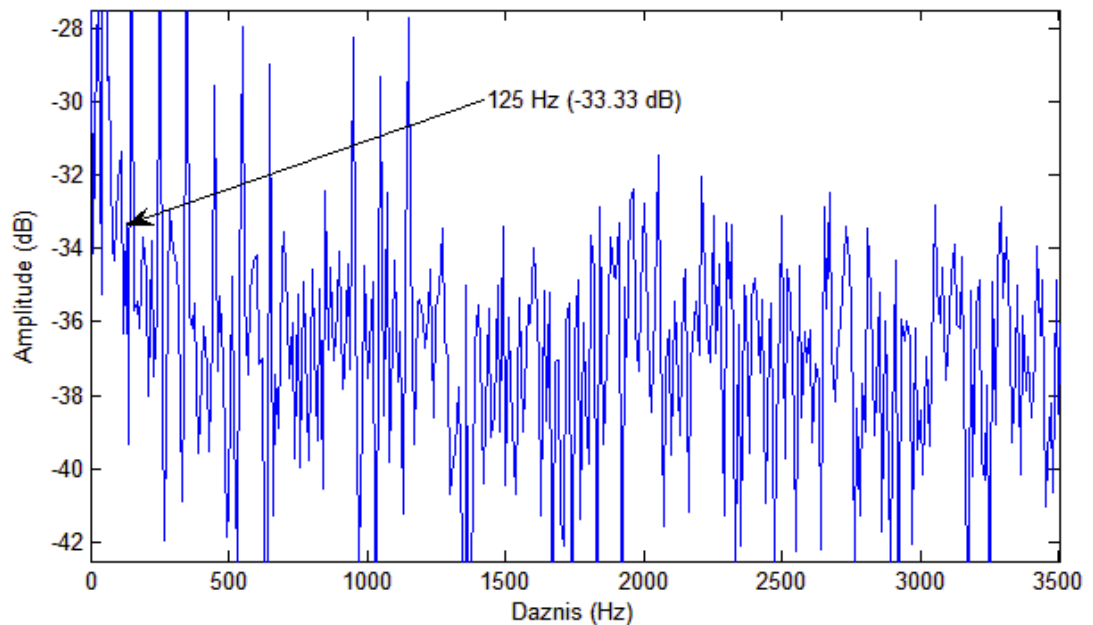
Pagal (11) formulę, statoriaus fazinės srovės dažnių spektre išorinio guolio žiedo defekto dažnio pirmoji harmonika lygi 124.495 Hz, riedėjimo kūno defekto dažnio pirmoji harmonika lygi 148.893 Hz, separatoriaus defekto dažnio pirmoji harmonika lygi 59.312 Hz, vidinio žiedo defekto pirmoji harmonika lygi 169.505 Hz.

3.1 pav. pateiktas statoriaus fazinės srovės dažnių spektras, kai variklio guoliai tvarkingi.



3.1 pav. Statoriaus fazinės srovės dažnių spektras, kai variklio guoliai tvarkingi, parengta autoriaus

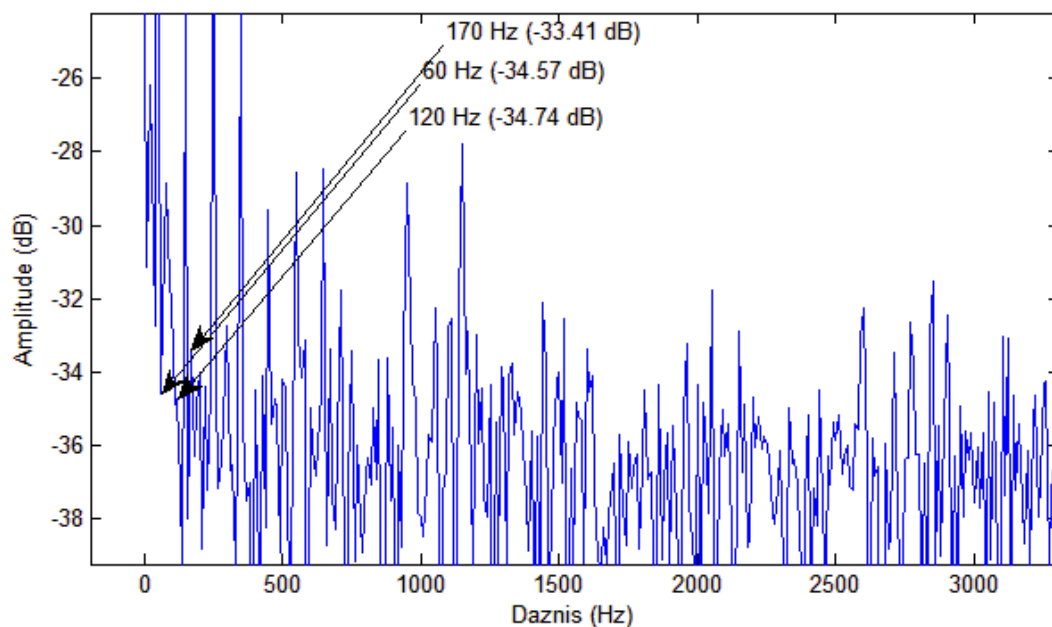
3.2 pav. pateiktas statoriaus fazinės srovės dažnių spektras, kai priekiniame (antrame) variklio guolyje yra pažeistas išorinis žiedas.



3.2 pav. Statoriaus fazinės srovės dažnių spektras, kai priekiniame (antrame) variklio guolyje pažeistas išorinis žiedas, parengta autoriaus

Kai variklio priekinio (antro) guolio žiedas yra pažeistas, jo fazinės srovės dažnių spektre atsiranda papildoma 125 Hz dažnio harmoninė dedamoji. Šis dažnis yra artimas apskaičiuotajam (124.495 Hz). Dedamosios amplitudė labai maža (-33.33 dB).

3.3 pav. pateiktas statoriaus fazinės srovės dažnių spektras, kai priekiniame (antrame) variklio guolyje pažeistas riedėjimo kūnas ir separatorius.



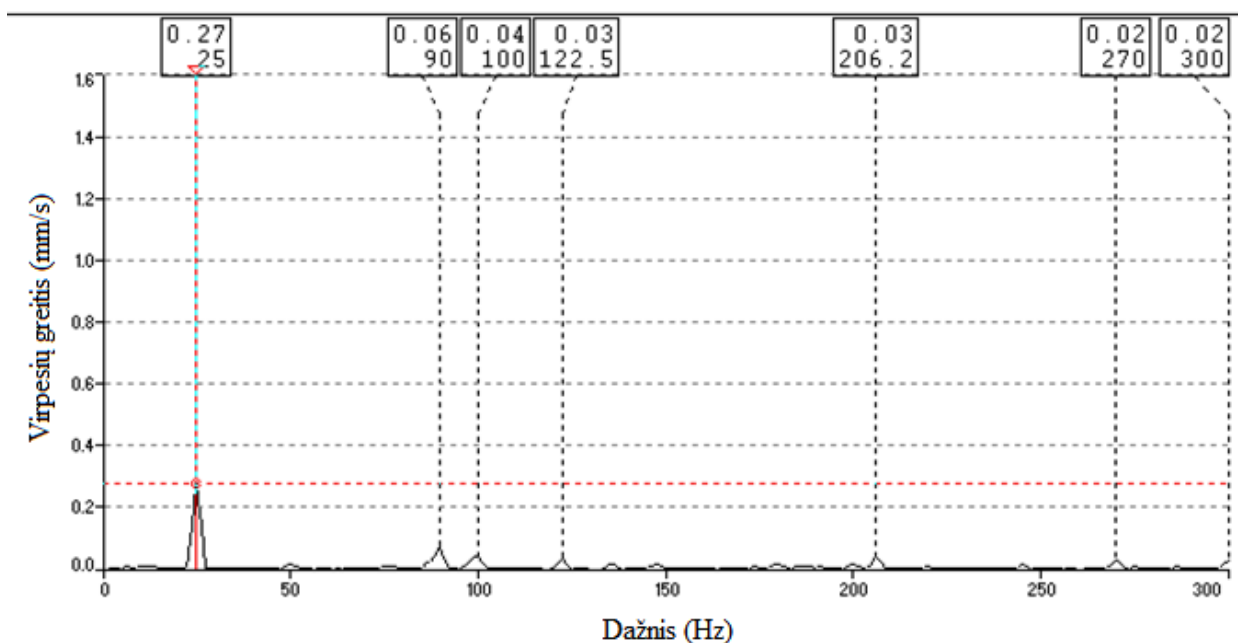
3.3 Statoriaus fazinės srovės dažnių spektras, kai priekiniame (antrame) variklio guolyje pažeistas riedėjimo kūnas ir separatorius, parengta autoriaus

Esant pažeistam guolio riedėjimo kūnui ir separatoriui statoriaus fazinės srovės dažnių spektre atsiranda papildomos 60 Hz ir 120 Hz dažninės dedamosios, kurių dažniai beveik sutampa su pirma ir antra guolio separatoriaus gedimą indikuojančių harmonikų apskaičiuotaisiais dažniais (59.312 Hz ir 118.624 Hz). Tačiau dedamųjų amplitudės labai mažos (-34.57 ir -34.74 dB). Riedėjimo kūno gedimą indikuojančią 148.893 Hz dažnio harmoniką užgožia trečia harmonika (150 Hz dažnio). Taip pat atsiranda su vidinio žiedo defekto apskaičiuotuoju dažniu (169.505 Hz) beveik sutampanti 170 Hz harmonika (-33.41 dB). Nors vidinis žiedas defektų neturi, tačiau pažeistas riedėjimo kūnas riedėdamas vidiniu guolio žiedu taip pat žadina ir jo virpesius.

Variklio guolių gedimus indikuojančių harmonikų amplitudės statoriaus fazinės srovės dažnių spektre gautos labai mažos, nes guolių gedimai paprastai daro nedidelę įtaką oro tarpo kitimui. Taip pat jų dažniai gali sutapti su trikdžiais tinkle bei kitomis, žymiai didesnės amplitudės harmonikomis. Todėl statoriaus srovės spektro analizės metodu patikimai diagnozuoti guolių gedimus sudėtinga.

3.2 Variklio guolių gedimų diagnostika vibracijos spektro analizės metodu

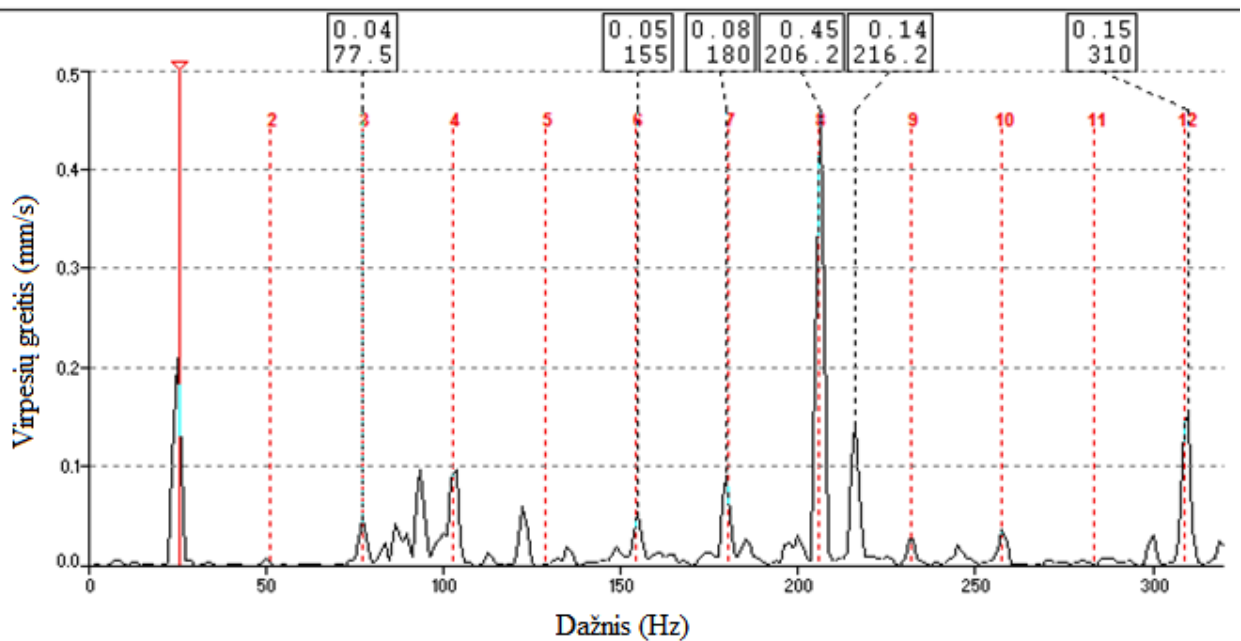
3.4 pav. pateiktas variklio guolio virpesių greičio dažnių spektras, kai variklio guoliai tvarkingi ir juose nėra defektų.



3.4 pav. Variklio guolio virpesių greičio dažnių spektras, kai variklio guoliai be defektų, parengta autoriaus

Kaip matome 3.4 pav. tvarkingo variklio guolių virpesių greičio dažnių spektre nėra gedimą nurodančių dažnių, kurių vibracijos greičio amplitudės būtų didelės. Išsiskiria tik veleno sukimosi 25 Hz dažniu žadinami virpesiai, kurių amplitudė siekia 0.27 mm/s.

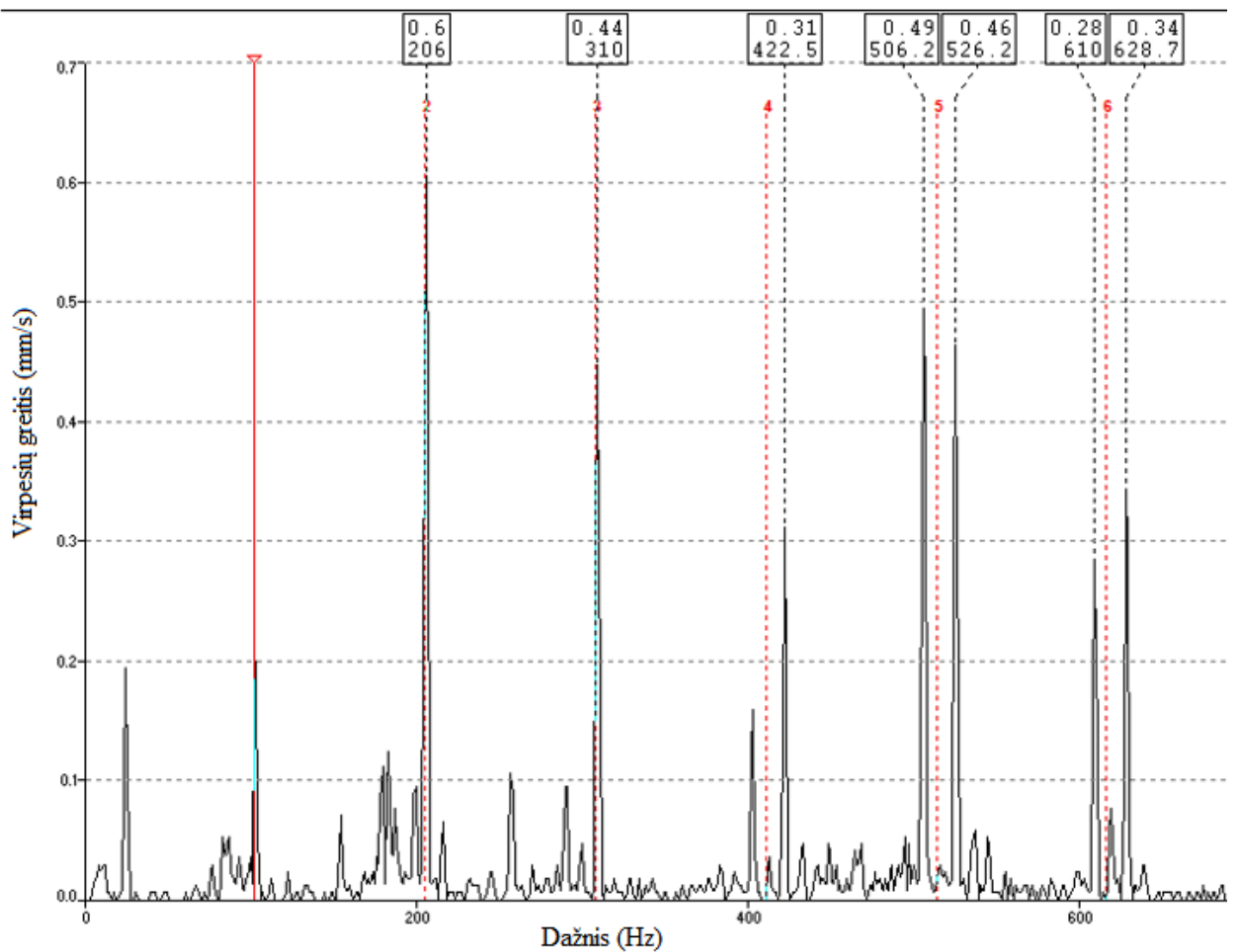
3.5 pav. pateiktas variklio guolio virpesių greičio dažnių spektras, kai variklio priekinio (antro) guolio išorinis žiedas pažeistas.



3.5 pav. Guolio virpesių greičio dažnių spektras, kai variklio priekinio (antro) guolio išorinis žiedas pažeistas, parengta autoriaus

Dėl guolio išorinio žiedo defekto spektre atsiranda gedimą indikuojančios harmonikos ties šiais dažniais: 77.5 Hz/0.04 mm/s (pirmoji harmonika), 155 Hz/0.05mm/s (antroji harmonika), 216 Hz/0.14 mm/s (trečioji harmonika), 310 Hz/0.15 mm/s (ketvirtoji harmonika). Pirmosios harmonikos dažnis beveik sutampa su teoriškai apskaičiuotu (74.495 Hz). Kadangi guolio defektas labai didelis, riedėjimo kūnas, riedėdamas per jį, į pažeistą vietą smūgiuoja du kartus, o tai sukuria papildomas harmonikas ir apsunkina diagnostiką. 206 Hz/0.45mm/s – tai sukimosi dažnio 8-oji harmonika ir ji nesusijusi su guolio defektu.

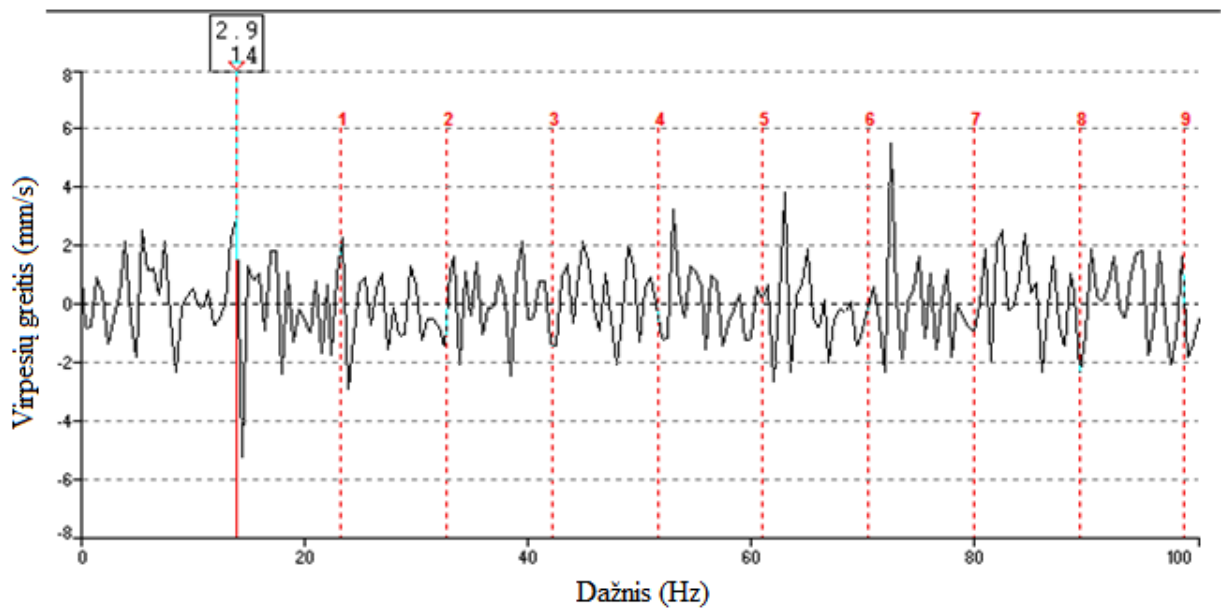
3.6 pav. pateiktas guolio virpesių greičio dažnių spektras, kai variklio priekinio (antro) guolio vienas riedėjimo kūnas ir separatorius pažeisti.



3.6 pav. Guolio virpesių greičio dažnių spektras, kai variklio priekinio (antro) guolio vienas riedėjimo kūnas ir separatorius pažeisti, parengta autoriaus

Dėl guolio riedėjimo kūno defekto spektre atsiranda gedimą indikuojančios harmonikos ties šiais dažniais: 102.85 Hz/0.17 mm/s (pirmoji harmonika), 206 Hz/0.6 mm/s (antroji harmonika), 310 Hz/0.44 mm/s (trečioji harmonika), 422.5 Hz/0.31 mm/s (ketvirtoji harmonika) ir t.t. Iš spektre esančių smulkių dažninių dedamųjų galima spręsti, kad guolis užterštas metalinėmis dalimis. Gautas riedėjimo kūno defekto dažnis (102.85 Hz) nedaug skiriasi nuo teoriškai apskaičiuoto (98.893 Hz).

3.7 pav. pateiktas defekčio guolio separatoriaus virpesių greičio dažnių spektras.



3.7 pav. Defekčio guolio separatoriaus virpesių greičio dažnių spektras, parengta autoriaus

Dėl guolio separatoriaus defekto spektre atsiranda gedimą indikuojančios harmonikos ties šiais dažniais: 13.89 Hz/2.92 mm/s (pirmoji harmonika) ir t.t. Gautas separatoriaus defekto dažnis (13.89 Hz) nedaug skiriasi nuo teoriškai apskaičiuoto (9.312 Hz).

Vibracijos dažnių spektro analizės būdas yra patikimas metodas variklio guolių gedimams nustatyti. Tyrimo metu apskaičiuoti ir eksperimento metu gauti defektų dažniai beveik sutapo.

3.3 Variklio statoriaus gedimų diagnostika MCSA metodu

Statoriaus apvijose atsiradus trumpųjų tarpapvijinių sujungimų, statoriaus fazinės srovės dažnių spektre atsiranda papildomos harmoninės dedamosios, kurių dažnius galima apskaičiuoti pagal (2) formulę:

$$f_{st1} = 1 \cdot 50 \pm 1 \cdot 25 = 75 \text{ Hz.}$$

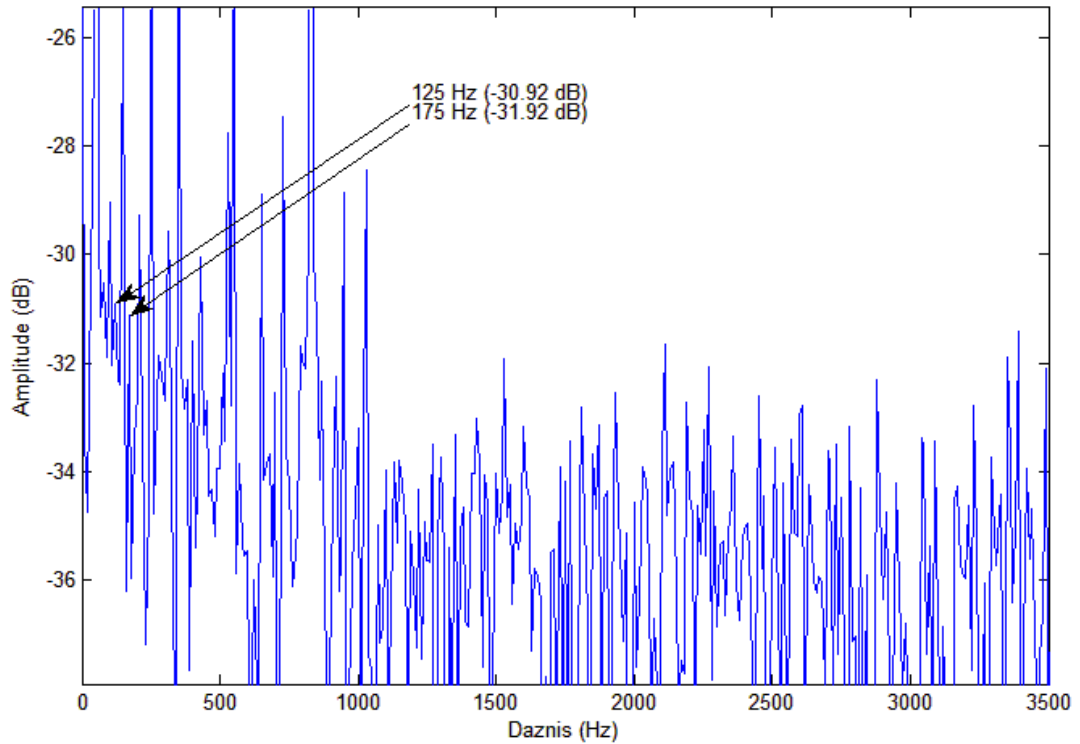
$$f_{st2} = 1 \cdot 50 \pm 2 \cdot 25 = 100 \text{ Hz.}$$

$$f_{st3} = 1 \cdot 50 \pm 3 \cdot 25 = 125 \text{ Hz.}$$

$$f_{st4} = 1 \cdot 50 \pm 4 \cdot 25 = 150 \text{ Hz.}$$

$$f_{st5} = 1 \cdot 50 \pm 5 \cdot 25 = 175 \text{ Hz.}$$

Paprastai, kai variklio statoriuje yra trumpųjų tarpapvijinių sujungimų, fazinės srovės dažnių spektre atsiranda 125 Hz ir 175 Hz dažninės dedamosios [28][29][30]. 3.8 pav. pateiktas variklio statoriaus fazinės srovės dažnių spektras, kai statoriaus apvijose yra trumpųjų tarpapvijinių sujungimų.



3.8 pav. Variklio statoriaus fazinės srovės dažnių spektras, kai statoriaus apvijose yra trumpųjų tarpapvijinių sujungimų, parengta autoriaus

Kaip matome 3.8 pav. variklio statoriaus fazinės srovės dažnių spektre atsiranda papildomos 125 Hz ir 175 Hz dažninės dedamosios, indikuojančios trumposius tarpapvijinius sujungimus statoriaus apvijose. Tvarkingo statoriaus fazinės srovės dažnių spektre šių harmonikų nebūna.

3.4 Variklio rotoriaus gedimų diagnostika MCSA metodu

Kai variklis nominaliai apkrautas, jo slydimas lygus:

$$s = \frac{n_s - n_n}{n_s} = \frac{1500 - 1455}{1500} = 0.03.$$

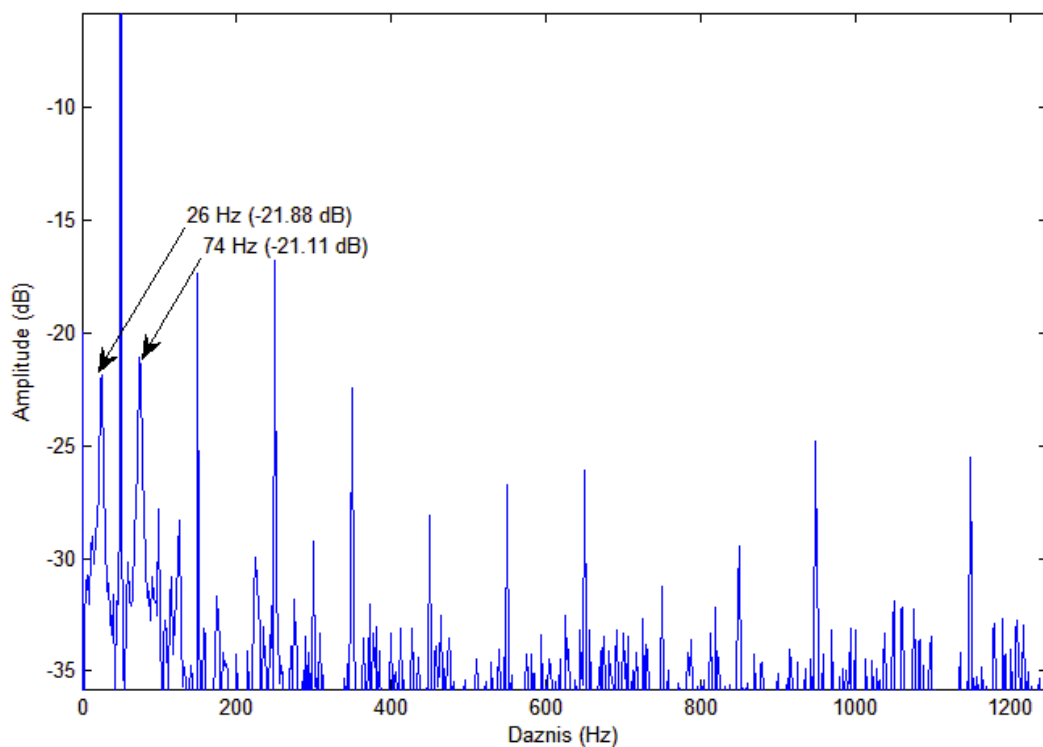
čia n_s – sinchroninis magnetinio lauko sukimosi greitis.

Variklio, kurio rotoruje yra nutrūkusių strypų, statoriaus fazinėje srovėje atsirandančių gedimą indikuojančių harmonikų dažnius galima apskaičiuoti pagal (8) formulę. Kai $n = 8$ rotoriaus gedimą indikuojančių harmonikų dažniai:

$$f_{rot1} = (1 + 2 \cdot 8 \cdot 0.03) \cdot 50 = 74 \text{ Hz.}$$

$$f_{rot2} = (1 - 2 \cdot 8 \cdot 0.03) \cdot 50 = 26 \text{ Hz.}$$

3.9 pav. pateiktas variklio statoriaus fazinės srovės dažnių spektras, kai 3 rotoriaus stypai yra nutrūkę.



3.9 pav. Variklio statoriaus fazinės srovės dažnių spektras, kai 3 rotoriaus stypai yra nutrūkę,
parengta autoriaus

Kaip matyti 3.9 pav. abipus pagrindinės 50 Hz harmonikos atsiranda dvi jai simetriškos 26 Hz ir 74 Hz dažninės dedamosios, aiškiai indikuojančios trūkumus rotoriaus strypus.

IŠVADOS IR PASIŪLYMAI

1. Atlikto tyrimo rezultatai rodo, kad variklio statoriaus fazinės srovės spektro analizės metodu patikimai diagnozuoti guolių defektus sudėtinga, nes spektre atsirandančių gedimus nurodančių harmonikų amplitudės būna labai mažos (-33 dB, -34dB), be to, jų dažniai gali sutapti su visada spektre esančių didelės amplitudės harmonikų (50Hz, 150 Hz, 250Hz ir t.t) dažniais. Trikdžiai tinkle, sukelti pvz. dažnio keitiklių, taip pat gali persidengti su gedimą indikuojančiomis harmonikomis ir taip trukdyti diagnostikai.

2. Variklio guolių defektus patikimai diagnozuoti galima vibracijos spektro analizės metodu. Teoriškai apskaičiuoti gedimus indikuojantys dažniai buvo atitinkamai 74.495 Hz išorinio žiedo gedimui, 98.893 Hz riedėjimo kūno defektui, 9.312 Hz separatoriaus pažeidimui, o eksperimento metu gauti guolių gedimus indikuojantys dažniai buvo atitinkamai 77.5 Hz išorinio žiedo gedimui, 102.85 Hz riedėjimo kūno defektui ir 13.89 Hz separatoriaus pažeidimui.

3. Variklio fazinės srovės spektro analizės metodu galima patikimai diagnozuoti nutrūkusius rotoriaus strypus, nes šį gedimą nurodančios dažninės dedamosios išsidėsto simetriškai pirmosios harmonikos (50 Hz) atžvilgiu ir jų amplitudės būna gana didelės (-21 dB) bei aiškiai išsiskiria dažnių spektre.

4. Variklio fazinės srovės spektro analizės metodu galima diagnozuoti trumpuosius tarpapvijinius sujungimus statoriaus apvijose, nes šiuos gedimus identifikuojančių harmonikų (125 Hz, 175 Hz) tvarkingo variklio fazinės srovės dažnių spektre nebūna. Tačiau jų amplitudės gautos gana mažos (-30dB, -31dB).

5. Diagnostikos efektyvumui fazinės srovės spektro analizės metodu pagerinti reiktų įrašyti bent 40.000 skaitmenizuotų efektinių statoriaus fazinės srovės verčių (eksperimento metu naudotu oscilografu buvo galima įrašyti tik 2500), vienam periodui skiriant bent 200 verčių. Tuomet būtų gaunama geresnė fazinės srovės dažnių spektro skiriamoji geba, o tai padidintų diagnostikos tikslumą ir patikimumą.

LITERATŪRA

1. L. FROSINI, M. MAGNAGHI, A. ALBINI. *An Improved Diagnostic System to Detect Inter-turns Short Circuits in Low Voltage Stator Windings*, Electrical Machines Design, Control and Diagnosis, IEEE Workshop, 2015. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7194533/>
2. V. F. PIRES, D. FOITO, J. F. MARTINS, A. J. PIRES. *Detection of Stator Winding Fault in Induction Motors Using a Motor Square Current Signature Analysis (MSCSA)*, Power Engineering, Energy and Electrical Drives, IEEE 5th International Conference, 2015. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7266369/>
3. J. A. A. DAVIU, A. Q. LOPEZ, V. F. ROIG. *Case Stories of Induction Motors Fault Diagnosis Based on Current Analysis*, Petroleum and Chemical Industry Conference Europe, 2016. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7604635/>
4. G. G. ACOSTA, C. J. VERUCCI, E. R. GELSO. *A Current Monitoring System for Diagnosing Electrical Failures in Induction Motors*, ScienceDirect, 2004. Prieiga per internetą: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S088832700400161X>
5. M. RIGONI, N. SADOWSKI, N. J. BATISTELA, J. P. A. BASTOS. *Detection and Analysis of Rotor Faults in Induction Motors by the Measurement of the Stray Magnetic Flux*, Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, 2012. Prieiga per internetą: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2179-10742012000100006
6. L. FROSINI, M. MAGNAGHI, A. ALBINI, G. MAGROTTI. *A New Diagnostic Instrument to Detect Generalized Roughness in Rolling Bearings for Induction Motors*, IEEE 10th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, 2015. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7303696/>
7. B. CORNE, B. VERVISCH, C. DEBRUYNE, J. KNOCKHAERT, J. DESMET. *Comparing MCSA with Vibration Analysis in Order to Detect Bearing Faults – a Case Study*, IEEE International Electric Machines & Drives Conference, 2015. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7409240/>
8. V. F. PIRES, J. F. MARTINS, A. J. PIRES, L. RODRIGUES. *Induction Motor Broken Bar Fault Detection Based on MCSA, MSCSA and PCA: A Comparative Study*, 10th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering, 2016. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7544203/>
9. A. BELLINI, C. CONCARI, G. FRANCESCHINI, C. TASSONI, A. TOSCANI. *Vibrations, Currents, and Stray Flux Signals to Assess Induction Motors Rotor Conditions*, IECON 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, 2006. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4153242/>
10. O. D. PEREZ, L. A. G. ESCUDERO, D. M. SOTELO, P. E. GARDEL, M. P. ALONSO. *Condition Monitoring of Induction Motors Fed by Voltage Source Inverters. Statistical Analysis of Spectral Data*, XXth International Conference on Electrical Machines, 2012. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6350232/>

11. F. M. JANEIRO, J. F. MARTINS, V. F. PIRES, P. M. RAMOS, A. J. PIRES. *Induction Motor Broken Bars Online Detection*, IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2008. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4547401/>
12. A. P. PARRA, M. C. A. ENCISO, J. O. OCHOA, J. A. P. PENARANDA. *Stator Fault Diagnosis on Squirrel Cage Induction Motors by ESA and EPVA*, Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA), 2013. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6614937/>
13. Z. LIU, X. YIN, Z. ZHANG, D. CHEN, W. CHEN. *Online Rotor Mixed Fault Diagnosis Way Based on Spectrum Analysis of Instantaneous Power in Squirrel Cage Induction Motors*, IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1325285/>
14. M. EFTEKHARI, M. MOALLEM, S. SADRI, A. SHOJAEI. *Review of Induction Motor Testing and Monitoring Methods for Inter-turn Stator Winding Faults*, 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), 2013. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6599713/>
15. T. Ch. A. KUMAR, G. SINGH, V. N. A. NAIKAN. *Effectiveness of Vibration and Current Monitoring in Detecting Broken Rotor Bar and Bearing Faults in an Induction Motor*, IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS), 2016. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7584030/>
16. I. AHMED, M. AHMED. *Comparison of Stator Current, Axial Leakage Flux and Instantaneous Power to Detect Broken Rotor Bar Faults in Induction Machines*, Australasian Universities Power Engineering Conference, 2008. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4812970/>
17. H. HAFEZI, A. JALILIAN. *Design and Construction of Induction Motor Thermal Monitoring System*, Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference, 2007. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4218771/>
18. S. BAKHRI, N. ERTUGRUL, W. L. SOONG, S. Al-SARAWI. *Investigation and Development of a Real-Time On-Site Condition Monitoring System for Induction Motors*, Australasian Universities Power Engineering Conference, 2007. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4548089/>
19. G. S. MARUTHI, V. HEGDE. *Preliminary Investigation on Bearing Fault Analysis in Three Phase Induction Motor by MEMS Accelerometer*, International Conference on Advances in Electronics Computers and Communications, 2014. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7002478/>
20. M. IRFAN, N. SAAD, R. IBRAHIM, V. S. ASIRVADAM. *Development of an Intelligent Condition Monitoring System for AC Induction Motors Using PLC*, IEEE Business Engineering and Industrial Applications Colloquium (BEIAC), 2013. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6560243/>
21. L. FROSINI, A. BORIN, L. GIROMETTA, G. VENCHI. *A Novel Approach to Detect Short Circuits in Low Voltage Induction Motor by Stray Flux Measurement*, XXth

- International Conference on Electrical Machines, 2012. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6350083/>
22. S. GRUBIC, J. M. ALLER, B. LU, T. G. HABETLER. *A Survey on Testing and Monitoring Methods for Stator Insulation Systems of Low-Voltage Induction Machines Focusing on Turn Insulation Problems*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4624549/>
 23. J. ROYO, F. J. ARCEGA. *Reversibility in the Application of Machine Current Signature Analysis in Squirrel Cage Machines*, 18th International Conference on Electrical Machines, 2008. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4799838/>
 24. M. TSYPKIN. *Induction Motor Condition Monitoring: Vibration Analysis Technique – a Twice Line Frequency Component as a Diagnostic Tool*, International Electric Machines & Drives Conference, 2013. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6556242/>
 25. L. FROSINI, A. BORIN, L. GIROMETTA, G. VENCHI. *Development of a Leakage Flux Measurement System for Condition Monitoring of Electrical Drives*, 8th IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics & Drives, 2011. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6063648/>
 26. A. S. FONTES, C. A. V. CORDOSO, L. P. B. OLIVEIRA. *Comparison of Techniques Based on Current Signature Analysis to Fault Detection and Diagnosis in Induction Electrical Motors*, Electrical Engineering Conference (EECon), 2016. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7830938/>
 27. S. BINDU, T. V. VINOD. *Diagnosis of Internal Faults of Three Phase Squirrel Cage Induction Motor – a Review*, International Conference on Advances in Energy Conversion Technologies (ICAECT), 2014. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6757060/>
 28. W. T. THOMSON. *On-Line MCSA to Diagnose Shorted Turns in Low Voltage Stator Windings of 3-Phase Induction Motors Prior to Failure*, IEEE International Electric Machines and Drives Conference (Cat. No.01EX485), 2001. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/document/939425/>
 29. W. T. THOMSON, R. J. GILMORE. *Motor Current Signature Analysis to Detect Faults in Induction Motor Drives – Fundamentals, Data Interpretation and Industrial Case Histories*, Proceedings of The Thirty-Second Turbomachinery Symposium, 2003. Prieiga per internetą: <https://pdfs.semanticscholar.org>
 30. D. MILKOVIC. *Brief Review of Motor Current Signature Analysis*, CrSNDT Journal, Vol.5 No.1, 2015. Prieiga per internetą: <http://hrcak.srce.hr/148715?lang=en>
 31. E. L. BONALDI, L. E. de L. de OLIVEIRA, J. G. B. da SILVA, G. LAMBERT-TORRES, L. E. B. da SILVA. *Predictive Maintenance by Electrical Signature Analysis to Induction Motors*, Induction Motors – Modelling and Control, 2012. Prieiga per internetą: <https://pdfs.semanticscholar.org/a6e5/498615277bf4bd039cd0add89e97b5ecfa40.pdf>
 32. K. N. GYFTAKIS, A. J. M. CARDOSO, J. A. ANTONINO-DAVIU. *Introducing the Filtered Park's and Filtered Extended Park's Vector Approach to Detect Broken Rotor*

Bars in Induction Motors Independently From the Rotor Slots Number, ScienceDirect, 2017. Prieiga per internetą: sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327017300481

33. G. N. SURYA, Z. J. KHAN, M. S. BALLAL. *A Novel Radial Flux Sensing Technique for Stator Turn Fault Detection in Induction Motors in Online Mode Using Observer Coil*, International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems, 2015. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7449515/>