



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

Eugenijus Kišūnas

**ASINCHRONINIO VARIKLIO ORO TARPO TYRIMAS
KONTROLINĖMIS VIJOMIS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

lekt. dr. Jonas Vanagas

KAUNAS, 2017

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

ASINCHRONINIO VARIKLIO ORO TARPO TYRIMAS
KONTROLINĖMIS VIJOMIS

Baigiamasis magistro projektas
Elektros energetikos inžinerija (kodas 621H63003)

Vadovas

lekt. dr. Jonas Vanagas

Recenzentas

doc. dr. Artūras Kalvaitis

Projektą atliko

Eugenijus Kišūnas

KAUNAS, 2017



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Eugenijus Kišūnas

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos inžinerija, 621H63003

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Asinchroninio variklio oro tarpo tyrimas kontrolinėmis vijomis“

AKADEMINIO SAŽINGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. gegužės 31 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Eugenijaus Kišūno** baigiamasis projektas tema „Asinchroninio variklio oro tarpo tyrimas kontrolinėmis vijomis“ 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)

Kišūnas, Eugenijus. Asinchroninio variklio oro tarpo tyrimas kontrolinėmis vijomis. 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: *kontrolinės vijos, oro tarpas, trifazis asinchroninis variklis, vibracija, vibrodaviklis, Park vektorius, Clarke vektorius, defektai, metodas, eksperimentas, Furjė transformacija, grafikas, analizė, magnetinis srautas.*

Kaunas, 2017. 47 p.

SANTRAUKA

Šio darbo tikslas - Ištirti trifazį asinchroninį elektros variklį kontrolinėmis vijomis ir nustatyti metodo tikslumą.

Uždaviniai: Apžvelgti esamus asinchroninio variklio diagnostikos metodus. Ištirti asinchroninį variklį kontrolinėmis vijomis, bei vibrodavikliu. Palyginti kontrolinių vijelių tikslumą su gautais vibrodaviklio duomenimis. Nustatyti įgyvendinto metodo privalumus ir trūkumus. Pateikti rekomendacijas.

Eksperimentiniam tyrimui naudojamas trifazis asinchroninis variklis. Guoliai su išorinio žiedo, bei rutuliuko ir separatoriaus defektais. Clarke ir Park'o transformacijos.

Atliekant diagnostiką guoliams, vijelių metodu, gana sudėtinga nustatyti guolio gedimus, nes oro tarpo magnetinis srautas kinta nedaug ir vijelių elektrovara kinta tik 0.005 mV arba 0.0025 mV. Todėl nustatyta jog guolių vibracijų stebėjimui patikimiau naudoti vibrodaviklius.

Vijelių pagrindinis privalumas yra nustatant elektrinius gedimus, netgi neapkrauto variklio rotoriaus su statoriaus gedimais iškart duoda pokytį oro tarpo magnetiniam srautui ir vijelių indukuota įtampa nėra simetriška. Todėl atlikus Clarke ir Park transformaciją iškart matomas gedimas.

Vijeles galima kloti tik gaminant variklius gamykloje arba atliekant planinius remonto darbus, nes tam reikia išardyti variklį, o įmonėje veikiantys varikliai stabdomi tik planinių darbų metu, nes kitu atveju patiriami dideli nuostoliai.

Kišūnas, Eugenijus. Title of the final project Analysis of Air Gap of Induction Motor Using Control Windings: Master's thesis in Electrical Power Engineering/ supervisor lekt. Dr. Jonas Vanagas. Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Electric Power Systems

Research area and field: Electrical and Electronics Engineering, Technological Sciences
Kaunas, 2017. 47 p.

SUMMARY

The purpose of this thesis is analysis of air gap of induction motor using control windings and determine the accuracy of the method.

Stages of research: To review the existing induction motor diagnostic methods. To make research induction motor using control windings and vibro-sensor. Compare accuracy between control windings and vibro-sensor. Set implemented method pros and cons. Make recommendations.

For experimental study is used: three phase induction motor, ball bearings with outer ring defect, ball bearings with ball and separator defect. Clark's and Park vector transformations.

Using control windings diagnosis for ball bearing defects it's quite difficult to determine bearing failures, because the air gap magnetic flux varies a little and induced voltage of control windings changing only 0.005 mV. And it is determined that bearing vibration monitoring using vibro-sensors is more reliable to use.

Control windings main advantage is determining electrical faults of induction motor, even the motor have no load, rotor or stator faults immediately brings change in the air gap magnetic flux and control windings induced voltage is asymmetrical. After using Clark's and Park transformation on control windings induced voltage, it is easy to determine fault of induction motor.

Control windings in stator can be laid only in the production at the factory or during scheduled maintenance work because of the need to dismantle induction motor.

Turinys

| | |
|--|----|
| <i>ĮVADAS</i> | 7 |
| <i>1. LITERATŪROS APŽALGA</i> | 8 |
| 1.1. <i>Variklių gedimai ir jų priežastys</i> | 8 |
| 1.2. <i>Variklių gedimų tipai</i> | 9 |
| 1.3. <i>Variklių stebėsena ir diagnostikos metodai</i> | 14 |
| 1.4. <i>Guolių vibracijų diagnostika</i> | 15 |
| 1.5. <i>Variklio diagnostika naudojant Park'o vektorių</i> | 16 |
| 1.6. <i>Variklio diagnostika naudojant srovės parašo analizę</i> | 18 |
| 1.7. <i>Temperatūros stebėjimas</i> | 20 |
| 1.8. <i>Variklio oro tarpo magnetinis srautas</i> | 21 |
| 1.9. <i>Variklio oro tarpo magnetinio srauto pakitimas nutrūkusių rotoriaus strypų atveju</i> | 26 |
| <i>2. METODINĖ DALIS</i> | 27 |
| <i>3. TYRIMŲ REZULTATAI</i> | 34 |
| <i>IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS</i> | 46 |
| <i>LITERATŪROS SARAŠAS</i> | 47 |

IVADAS

Pastovi elektros variklio parametrų stebėseną ilgina jų veikimo trukmę ir gerina bet kokios darbo srities našumą. Labai svarbu nustatyti variklio gedimą kol nėra sukeliama avarinė būklė. Tai vadinama pradiniu klaidų diagnozavimu. Pradinis klaidų diagnozavimas suteikia saugią darbo aplinką. Tai tampa labai svarbu kai reikia naudoti išsamių būklės tyrimų schemas pastoviam elektros variklių stebėjimui. Pastoviai stebint variklio esamą būklę galima lengvai nustatyti kada įvyks rimtas gedimas kuris visiškai sustabdys variklio darbą. Tai taip pat padeda sudaryti variklių grafiką planiniams remontams. Tai suteikia galimybę per kuo trumpesnį laiko tarpą sutaisyti elektros variklį planiškai, negu visiškai jam sugedus. Be to operatorius visada gali pasiruošti remonto darbui ir visada turėti sutaisyti reikiamų atsarginių dalių, kol elektros variklis visiškai nesugedo. Tai trumpina remonto laiką. Pagrindinis nuolatinės variklio stebėsenos tikslas yra suteikti kuo efektyvesnį darbo našumą, saugumą ir patikimumą.

Tyrimo objektas. Trifazis asinchroninis elektros variklis

Tyrimo tikslas. Ištirti trifazį asinchroninį elektros variklį kontrolinėmis vijomis ir nustatyti metodo praktiškumą.

Uždaviniai.

- Apžvelgti esamus asinchroninio variklio diagnostikos metodus.
- Ištirti asinchroninį variklį kontrolinėmis vijomis ir vibrodavikliu.
- Palyginti kontrolinių vijelių metodo tikslumą su vibrodaviklio gautais duomenimis.
- Nustatyti įgyvendinto metodo privalumus ir trūkumus.

1. LITERATŪROS APŽALGA

1.1. VARIKLIŲ GEDIMAI IR JŲ PRIEŽASTYS

Asinchroniniai varikliai yra patikimi, mažai kainuojantys, lyginant pagal galią mažų gabaritų, turintys didelį naudingumo koeficientą, paprastai eksploatuojami ir remontuojami, be to panaudojus dažnio keitiklį galimi pritaikyti įvairiems mechanizmams. Nors asinchroniniai varikliai ir yra patikimi, tačiau taip pat yra ir nepageidaujamų gedimų. Atlikus tyrimus su varikliais[1] nustatyta, kad dažniausi gedimai būna guolių, statoriaus apvijojų, rotorius stropo ir veleno. Be to dar dažnai pasitaikantis gedimas būna dėl variklio dangčių guoliaviečių išsidėvėjimo kai atsiranda oro tarpo tarp rotorius magnetolaidžio ir statoriaus magnetolaidžio netolygumas ar netgi kontaktas. Be to buvo atlikti ir statistiniai tyrimai, kuriuos atlikinėjo „Elektros energijos tyrimų institutas“ (ang. EPRI) ir Elektros ir elektronikos inžinierių institutas (ang. IEEE). Atliktais tyrimais[2] buvo suklasifikuoti gedimai ir išreikšti procentaliai pagal gedimo dažnumą palyginus su visu gedimų skaičiumi. Šie tyrimai buvo atlikinėjami įmonėse visų tipų ir galių varikliams, kada varikliai buvo pilnai eksploatuojami. Šių tyrimų rezultatai pavaizduoti lentelėje 1.1. Gedimų tikimybė išreikšta procentais pateikta lentelėje 1.2.

Lentelė 1.1 Gedimų skaičius elektros varikliuose

| Gedimų tipai | Gedimų skaičius | | | | |
|------------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------|
| | Asinchroniniai varikliai | Sinchroniniai varikliai | Rotoriai su nuolatine apvija | Nuolatinės srovės varikliai | Visi varikliai |
| Guolio | 152 | 2 | 10 | 2 | 166 |
| Apvijos | 75 | 16 | 6 | — | 97 |
| Rotorius | 8 | 1 | 4 | - | 13 |
| Veleno | 19 | - | — | - | 19 |
| Šepetėlių arba slydimo žiedo | - | 6 | 8 | 2 | 16 |
| External device | 40 | 7 | 1 | - | 18 |
| Kiti | 10 | 9 | - | 2 | 51 |

Lentelė 1.2 Gedimų tikimybė asinchroniniame variklyje

| Tyrėjas | Guolių gedimas, % | Statoriaus gedimas, % | Rotorius gedimas, % | Kiti, % |
|---------|-------------------|-----------------------|---------------------|---------|
| EPRI | 42 | 28 | 8 | 22 |
| IEEE | 41 | 36 | 9 | 14 |

Gedimai asinchroniniame variklyje skirstomi į 3 dalis:

Gedimai elektrinėje dalyje, tai dėl fazių asimetriškumo, viršįtampių, blogos fazių sekos, atsiradusio įžemėjimo, perkrovos, tarpavijinių trumpų jungimų, bei netinkamai pariktų dažnių keitiklių.

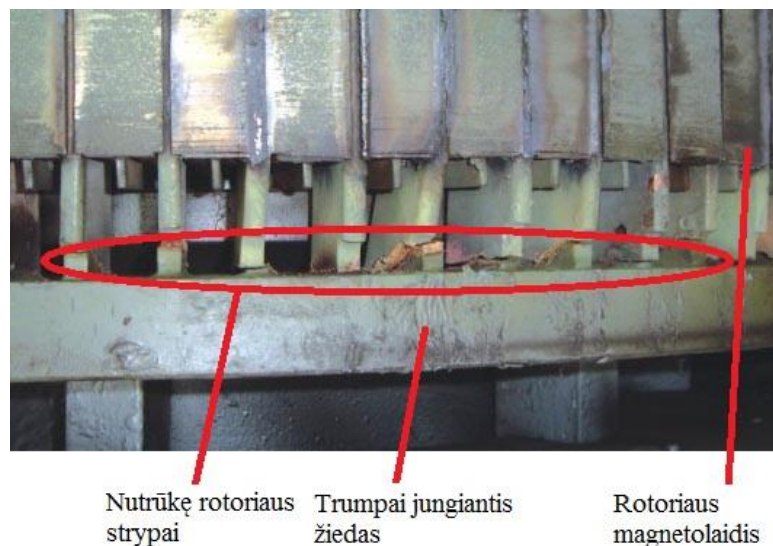
Gedimai dėl mechaninių priežasčių, tai dėl nutrūkusio rotoriaus strypo, netinkamo balansavimo, oro tarpo ekscentriteto, guolių susidėvėjimo, rotoriaus apvijos įtrūkimo, bei statoriaus apvijų bandažų ar pačios apvijos pažeidimo.

Gedimai atsirandantys dėl aplinkos poveikio, tai netinkama temperatūra, dulkės, drėgmė. Netinkamai pritvirtintas variklio padas, ar parinktas variklis.

Dažnai gedimas variklyje būna ne vienas, nes pavyzdžiui uždelsiant nustatyti guolio gedimą, atsiranda guoliaviečių išsidėvėjimas, oro tarpo ekscentritetas, todėl nustatyti tikslų gedimą nesustabdžius variklio yra gana sudėtinga. Tai pat atsiradus vienam gedimui neišvengiant seka kiti. Ypač tokie gedimai, kaip statoriaus apvijų srovių bei įtampų asimetriškumas sukelia momento šuolius ir sumažėjusį momentą, sumažėjus momentui atsiranda perkaitimas ir nelyginių harmonikų išaugimas. Tai sukelia didelius galios nuostolius, didina elektros energijos suvartojimą ir didina tikimybę variklio visiškai ir nepataisomam sugedimui.

1.2. VARIKLIŲ GEDIMŲ TIPAI

Asinchroninio variklio rotorius sudarytas iš magnetolaidžio, strypų(apvijų) ir strypus sujungiančio žiedo. Todėl dažniausi gedimai pasitaikantys asinchroninio variklio rotoriuje būna strypo trūkis arba rotoriaus disbalansas pav. 1.1.



1.1 pav. Nutrūkę rotoriaus strypai. Šaltinis <http://www.hfwhdj.com>

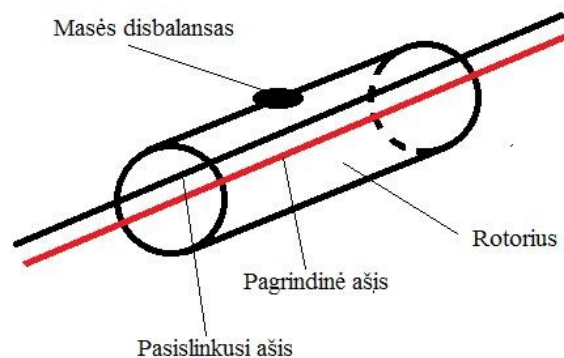
Šiam gedimo atsiradimui yra kelios priežastys. Ištirta [3], kad narvelio tipo asinchroninių variklių rotorinių strypų trūksta dėl gamybos defekto lituojant strypus prie žiedo, kuris sukelia strypo trūkį sukantis rotoriumi. Turi įtakos ir sunkūs trumpinantys žiedai, kurie sukantis rotoriumi kuria dideles sukimo jėgas. Kita priežastis yra rotoriaus srovių asimetriškumas, esant neasimetriškumui vieni strypai kaista labiau už kitus, todėl per ilgą laiko tarpą sukelia strypo trūkį. Be to nutrūkus vienam rotoriaus apvijai, šoniniams strypams tenka didesnė srovė ir dirbant tokiu režimu nutrūks ir kiti. Toks trūkis gali atsirasti ne tik strypuose bet ir galiniuose apvijose trumpinančiuose žieduose. Tokių trūkių tikimybė padidėja starto metu, nes paleidimo momentu rotoriaus apvijose sukuriama didžiausia paleidimo srovė [4].

Įtrūkę ir nutrūkę rotoriaus strypai sukelia pašalinius dažnius. [5].

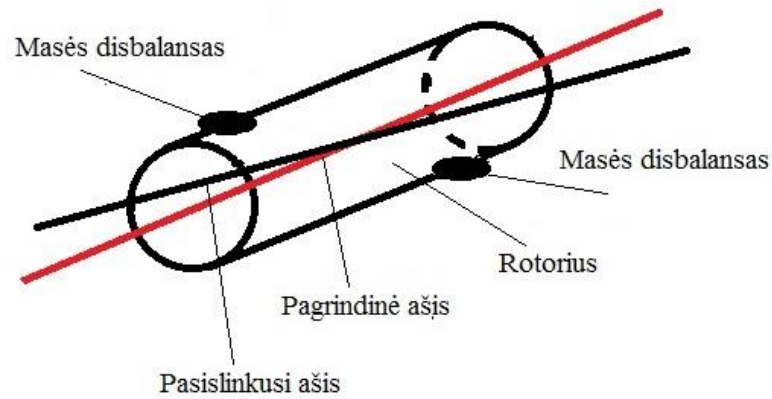
$$f_{sb} = f(1 \pm 2s), Hz, \quad (1)$$

Tai sukuria $\pm 2sf$ pašalinius dažnius, prie esamo maitinamo dažnio kaip komponentė. Taip atsiranda dvigubas slydimo dažnis dėl nutrūkusių rotoriaus strypų. Remiantis šia formule yra sukurtas pagrindinis variklio stebėsenos metodas – Variklio srovės parašo analizė (ang. MCSA).

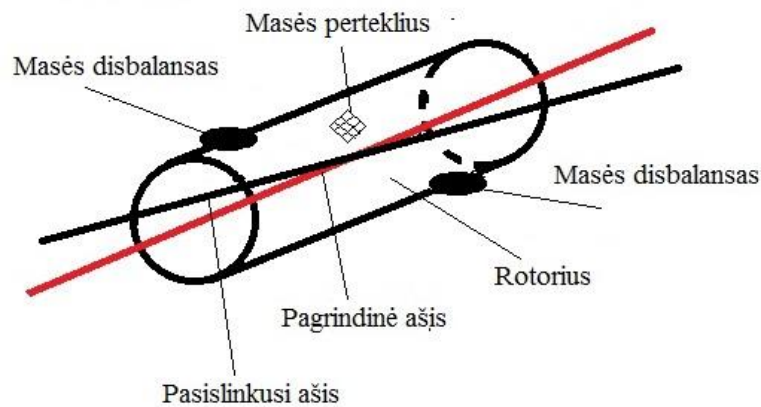
Kitas iš gedimų yra rotoriaus masės disbalansas. Toks reiškinys dažniausiai atsiranda dėl gamintojo padarytų klaidų, veleno metalo nuovargio, ar guoliaviečių ašies neatitikimo. Atsiranda oro tarpo ecentricitetas ir variklio statoriaus magnetinio lauko kuriama jėga bus netolygi, kas turės įtaką asinchroninio variklio slydimui, bei kuriamam momentui. Masės disbalansas yra trijų rūšių: statiškai išbalansuotas pav. 1.3, išbalansuotas iš abiejų ašių pusių pav. 1.4 ir dinamiškai pav. 1.5. Statinis disbalansas tai rotoriaus ašies lygiagretus pasislinkimas nuo vidurio ašies. Dinaminis disbalansas tai išbalansuoto nuo savo ašies dėl taške atsiradusios masės.



1.3 pav. Statinis rotoriaus disbalansas



1.4 pav. Ašinis rotoriaus disbalansas



1.5 pav. Dinaminis statoriaus disbalansas

Sukuriamas masės disbalansas sukuria dinaminį ekscentricitetą [6]. Taip oro tarpe atsiranda netolygumas, kuris daro įtaką oro tarpo magnetiniam tankiui ir apvijoje indukuotos įtampos svyravimą. Indukuota įtampa sukuria sroves, kurių dažniai priklauso nuo oro tarpe kuriamų magnetinio tankio harmonikų[1]:

$$f_{ubm} = f \left[\frac{k(1-s)}{p} \right] + 1, \quad (2)$$

Dažniausiai pasitaikantis asinchroninių ir kitų elektros variklių gedimas dėl guolių[7]. Pagal atliktus tyrimus [2] guoliai yra silpniausias komponentas visame variklyje. Nes net 42% visų variklių gedimų buvo dėl guolių. Guolio gedimas pav 1.6. Pagrindinės priežastys guolių gedimo yra:

- Perkrovos, netinkamo tipo guoliai, virštemperatūriai, dėl kurių sudeginamas guolių tepalas ir pažeidžiami guolių rutuliukai.

- Guolių susidėvėjimas, ilgai nekeičiamuose guoliuose atsiranda laisvumas tarp viršutinio ir apatinio guolio žiedo ir apsidėvėjusių rutuliukų. Taip į guolio tepalą pradeda patekti smulkios guolių rutuliukų ir žiedų dalys, sukeldamos variklio vibracijas.
- Korozija, tai dažnai pasitaikantis guolio gedimas kai ant guolių dažnai patenka rūgščių, šarmų ar vandens
- Užteršimas, toks gedimas pasitaiko kai guolio tepale atsiranda šiukšlių, purvo, žvyro. Dažniausiai taip eksploatuojami guoliai greičiausiai subyra sugadinami variklį.
- Dėl tepimo problemų, kai guolyje nekeičiamas tepalas, arba jo mažai. Tokiuose guoliuose ima didėti temperatūra dėl kurios įtakos atsiranda guolio laisvumas.

Visais gedimo atvejais guolyje kyla temperatūra ir dar labiau paskatina guolio susidėvimą. Tai yra pagrindinė variklio keliamų vibracijų priežastis.



Išorinio žiedo susidėvėjimas



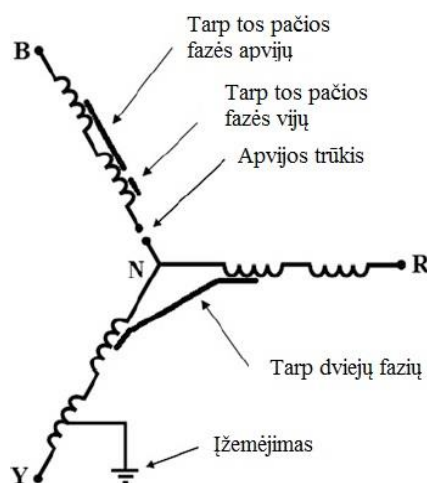
Vidinio žiedo susidėvėjimas



Rutuliuko susidėvėjimas

1.6 pav. Guolių gedimai

Statoriaus gedimai pagal dažnumą ir atliktus tyrimus[3] sudaro 36%. Statoriaus gedimai klasifikuojami į bandažų, magnetolaidžio gedimus ir apvijų gedimus. Apvijų gedimai būna įvairių tipų[8] paveiklėlyje 1.7: Trumpas jungimas toje pačioje apvijoje tarp vijų, trumpas jungimas tarp skirtingų apvijų, bet tos pačios fazės, trumpas jungimas tarp skirtingų fazių, trumpas jungimas tarp visų trijų fazių, trumpas jungimas tarp fazės ir statoriaus korpuso, vadinamas įžemėjimas ir visiškai kurios apvijos nutrūkimas.

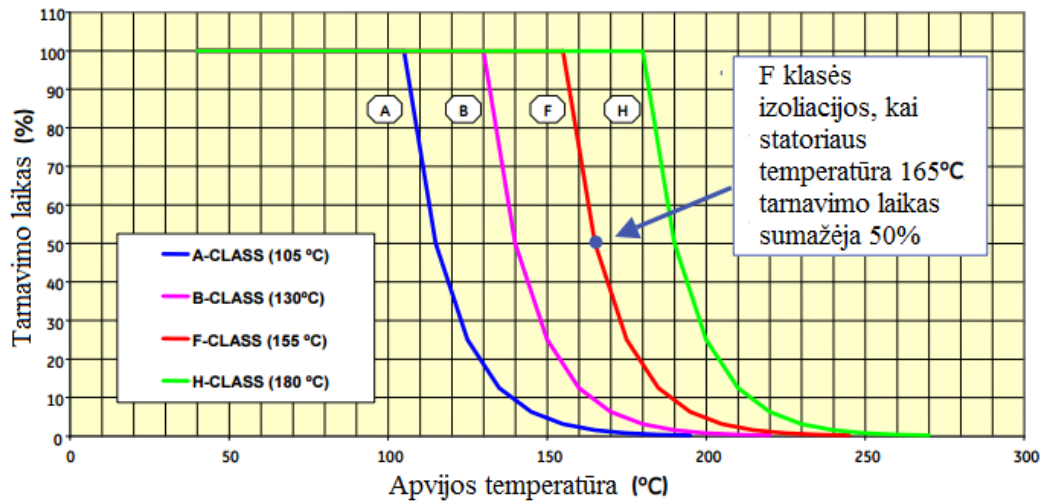


1.7 pav. Statoriaus apvijų trumpieji jungimai

Statoriaus gedimai skirstomi į mechaninius, elektrinius, temperatūrinius ir aplinkos. Dažniausi mechaniniai pažeidimai atsiranda rotorui susidūrus su statoriumi dėl netolygaus oro tarpo arba dėl statoriaus apvijų veikiančios mechaninės jėgos atsipalaidavus bandažui. Taip rotorius pažeidžia statoriaus apvijos izoliaciją ir sukelia įžemėjimą tarp statoriaus korpuso ir apvijos. Dėl vibracijos, kurią sukelia sudilę guoliai dažnai nutrūksta apvija. Tarpfaziniai trumpieji jungimai dažniausiai įvyksta dėl įtampos šuolių, kuriuos sukelia žaibų išlydžiai, jungtuvų jungimai arba dažnio keitikliai. Temperatūriniai pažeidimai atsiranda perkaitus apvijų izoliacijai. Tokie perkaitimai dažni dėl variklio perkrovimo, blogos variklio ventiliacijos, fazių nesimetriškumo. Esant 3.5% fazių nesimetrijai statoriaus apvijų temperatūra pakyla 25% [9]. Taip pat temperatūra priklauso kokiomis sąlygomis dirba variklis, kuo dažniau stabdomas ir vėl paleidžiamas tuo labiau kaista apvijos. Nustatyta [10], kad 10 C pakilusi statoriaus avijos temperatūra nuo nominalo, apvijos izoliacijos tarnavimo laiką mažina 50% lentelė 1.3. A B F ir H klasės izoliacijų virštemperatūriai ir nominali temperatūra pavaizduota 1.8 paveiksle.

Lentelė 1.3 Izoliacijos tarnavimo laikas

| Temperatūrinis paviršius C | Izoliacijos tarnavimo laikas, valandomis |
|----------------------------|--|
| 30 | 250000 |
| 40 | 125000 |
| 50 | 60000 |
| 60 | 30000 |



1.8 pav. Izoliacijos klasių temperatūrų kreivės[10]

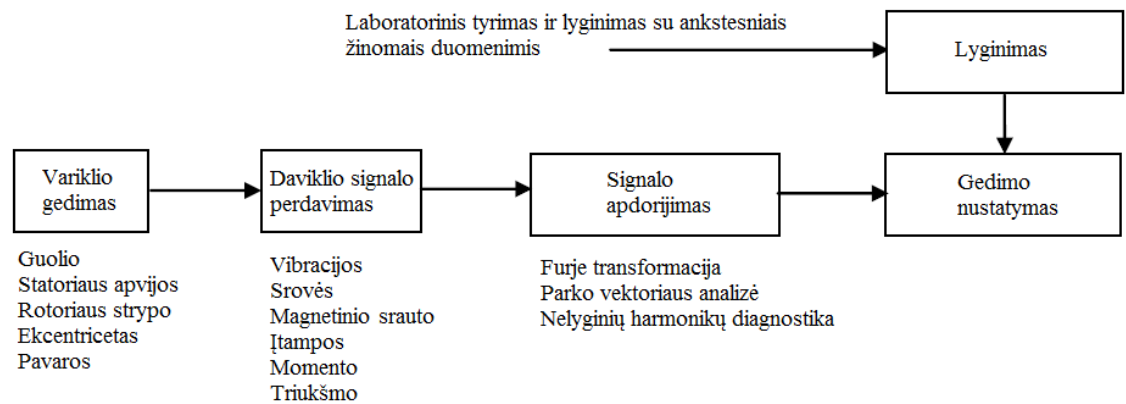
1.3. VARIKLIŲ STEBĖSENA IR DIAGNOSTIKOS METODAI

Asinchroniniai varikliai plačiausiai naudojami varikliai įmonėse ir pramonėje dėl jų paprastos konstrukcijos, mažesnių gabaritų lyginant su kitais varikliais, nereikalaujantys dažnos priežiūros, plataus įtampų maitinimo spektro ir nesudėtingo remonto. Tačiau pramonėje dažnai negalima bet kuriuo momentu sustabdyti variklio ir jo taisyti kai jis visiškai sugenda, nes prarandama labai daug laiko, o visas įmonės darbas sustoja. Taip išauga įmonės nuostoliai, bei prarandama daug pinigų. Todėl atsiranda poreikis išvengti, bet kokio panašaus gedimo. Tam reikalinga pastovi variklių stebėseną ir nustatant atsirandantį gedimą ir didėjant tikimybei jam labiau išsiplėtoti[11].Svarbiausia pastoviai stebint variklį tiksliai identifikuoti kiekvieną gedimą. Tiksliai identifikuojant besiplečiantį arba tik atsiradusį gedimą galima numatyti planinį remontą arba iškart imtis veiksmų, kad būtų išvengta didesnių nuostolių.

Pagrindinės pastovaus elektros variklio stebėjimo priežastys yra:

- Sumažinti atparnavimo kainą.
- Numatyti įrangos gedimą.
- Padidinti variklių ir įrangos patikimumą.
- Optimizuoti įrangos charakteristiką.
- Didinti tikslumą gedimų nustatyme.

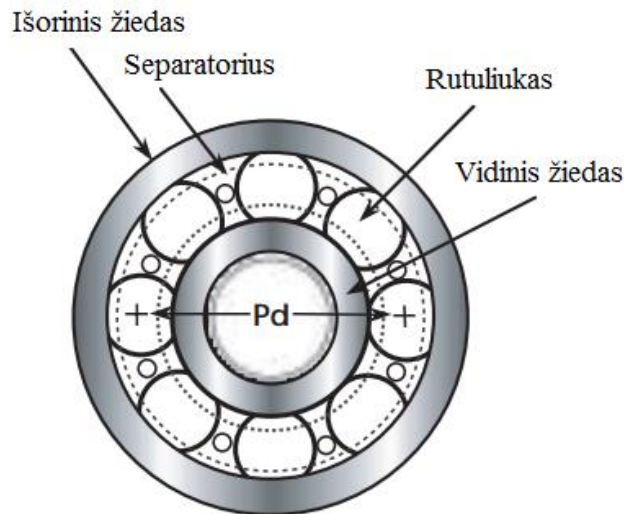
Visų diagnostikos metodų stebėseną susideda iš keturių etapų, kurie vaizduojami 1.9 paveikslėlyje



1.9 pav. Gedimų stebėsenos procesas[2]

1.4. GUOLIŲ VIBRACIJŲ DIAGNOSTIKA

Rutuliniai guoliai veikiančiame elektros variklyje kuria skirtingų vibracijų kompleksą, kurias sukelia vidinis guolio žiedas, išorinis guolio žiedas, rutuliukai ir separatorius. Kiekvienas šių elementų turi savo vibracijos spektrą[12]. Nors guoliai gaminami labai tiksliai ir kiekvienas iš elementų kruopščiai tikrinamas, tačiau dėl nanometrų netikslumų kiekviena atskira guolio dalis kuria dažnį (20Hz – 20 kHz). Dažnio spektras priklauso nuo guolio pažeidimo vietos, pažeidimo dydžio ir pačios guolio konstrukcijos 1.10 paveikslėlyje.



1.10 pav. Guolio sandara[12]

Pavyzdžiui guolio rutuliukas yra pažeistas ir kiekvieną kartą riedėdamas pažeista vieta sukuria trumpo laiko jėgą kuri verčia guolį vibruoti. Taip riedėdamas pažeistas rutuliukas guolyje sukuria savo vibracijos dažnį, kurį galima nustatyti pagal vidinio žiedo ir išorinio žiedo sukimosi atžvilgiu. Taip galima nustatyti ir kitų guolio elementų dažnius. Guolio kuriamus dažnius galima išskirti į 4 charakteristikas: [13]

Rutuliuko sukimosi dažnis(BSF):

$$BSF = f_s \frac{P_d}{2B_d} \left(1 - \frac{B_d^2}{P_d^2} \cos^2 \phi \right), \quad (3)$$

Vidinio žiedo dažnis rutuliukui riedant juo (BSFI):

$$BSFI = f_s \frac{N_b}{2} \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cos \phi \right), \quad (4)$$

Išorinio žiedo dažnis rutuliukui riedant juo (BSFO):

$$BSFO = f_s \frac{N_b}{2} \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \phi \right), \quad (5)$$

Separatoriaus kuriamas dažnis (FTF):

$$FTF = \frac{f_s}{2_d} \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \phi \right), \quad (6)$$

P_d = Guolio vidurio diametras, mm B_d = Rutuliuko diametras, mm N_b = Rutuliukų skaičius f_s = Vidinio žiedo greitis, rpm

Norint nustatyti guolio gedimą, gaunamą virpesių spektrą reikia išskleisti Furjė eilute(7)[14]

$$X(f) = \int_f^{-\infty} X(t) e^{j\omega t} dt, \text{ čia } \omega = 2\pi f, \text{ } f \text{ signalo dažnis,} \quad (7)$$

1.5. VARIKLIO DIAGNOSTIKA NAUDOJANT PARKO VEKTORIŲ

Ttifazių asinchroninių variklių diagnostikai galima naudoti dvidimencį Parko vektorių. Parko transformacija tai matematinė išraiška naudojama nustatyti asinchroninio variklio fazių asimetriškumą, rotoriaus disbalančą, guolių gedimus. Pagrindinis Parko vektoriaus principas yra perskaičiuoti statoriaus sroves iš trifazės sistemos (i_a, i_b, i_c) į Parko vektoriaus komponentes (i_d, i_q) [15]

$$i_d = \sqrt{\frac{2}{3}}i_a - \frac{1}{\sqrt{6}}i_b - \frac{1}{\sqrt{6}}i_c, \quad (8)$$

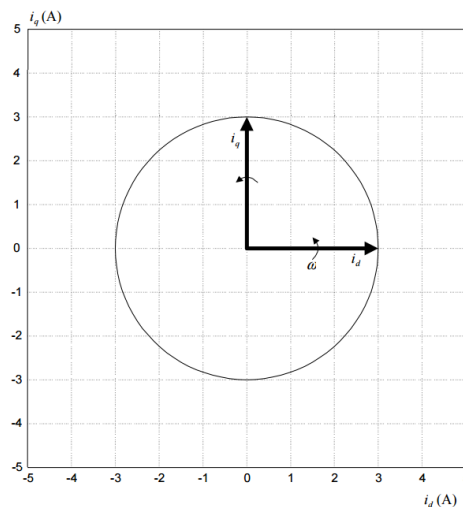
$$i_q = \frac{1}{\sqrt{2}}i_b - \frac{1}{\sqrt{2}}i_c, \quad (9)$$

Idealiomis sąlygomis, trifazės sistemos srovės persiskaičiuoja į Parko vektorių taip[16]

$$i_d = \frac{\sqrt{6}}{2} I \sin \omega t, \quad (10)$$

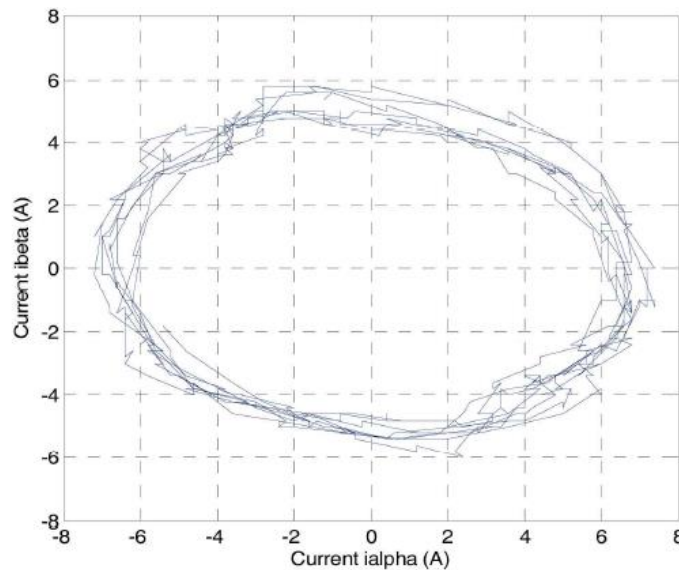
$$i_q = \frac{\sqrt{6}}{2} I \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right), \quad (11)$$

Čia I maksimali maitinimo fazės srovės vertė, ω kampinis perdavimo dažnis, t laiko kintamasis. Norint nustatyti variklio gedimą, plokštumoje, kiekvienam laiko kintamajam braižomas Parko vektorius, o plotas kuris yra tarp srovių i_d , i_q vadinamas Concordia vektoriumi. Idealiu atveju Parko vektorius nubrėžia idealų apskritimą 1.11 paveikslėlyje.



1.11 pav. Parko vektorius idealiu atveju[16]

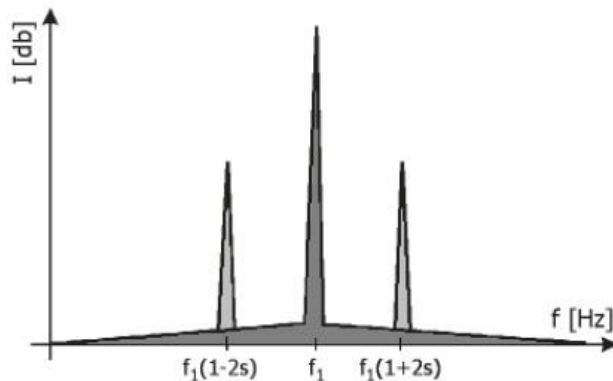
Variklio gedimų atveju plokštumoje pavaizduotas 1.12 paveikslėlyje. Naudojant Parko vektorius diagnostikos metodu galima nustatyti rotoriaus strypų trūkį, statoriaus apvijų gedimus, ekscentritetą, guolių gedimus, tačiau visais atvejais gana sunku tiksliai įvardinti gedimo pobūdį, nes gautą Parko vektorių reikia ilgiau analizuoti. Be to Parko vektorius nustatymo metodo tikslumas priklauso nuo fazių asimetriškumo, nes nustatinėjant variklio gedimą, fazių asimetriškumas stipriai įtakoja Parko vektorių.



1.12 pav. Parko vektorius variklio gedimo atvėju[16]

1.6. VARIKLIO DIAGNOSTIKA NAUDOJANT SROVĖS PARAŠO ANALIZĘ

Dažniausiai naudojamas variklių gedimų diagnostikos metodas yra srovės parašo analizė (ang. MCSA). Šis metodas paremtas spektro analize, kurioje nustatomos specifinės harmonikų komponentės sukurtos srovės skirtingo sukamojo srauto komponentių, atsiradusių dėl gedimų tokių kaip trūkės rotoriaus strypas, oro tarpo ekcentricitetas ir trumpi jungimai statoriaus vijose. Šiam metodui užtenka vienos fazės srovės. Naudojant srovės parašo analizę galima išvengti visiško variklio sugedimo, net menkiausias defektas matomas spektro analizėje. Svarbiausias šio metodo plusas, kad nereikia ardyti variklio ir visą stebėseną galima vykdyti jam veikiant ir pastoviai. Idealus srovės spektras parodytas Pav 1.13. Paveiksle matomi du šalutiniai dažniai šalia pagrindinės harmonikos atsiradę dėl rotoriaus strypų trūkio. Spektro analizei braižomas grafikas decibelai (dB) nuo dažnio spektro (Hz). Tai suteikia platų dinaminį rėžį nustatyti skirtingus pašalinius dažnius skirtingiems gedimams.[17]



1.13 pav. Idealus srovės spektras[17]

Idealiai subalansuoto ir be jokių gedimų trifazio asinchroninio variklio sukuriamas tik vienpusis sukamasis magnetinis laukas(magnetovara). Jis sukasi sinchroniniu greičiu $n_1=f/p$, kur f = dažnis, o p polių porų skaičius. Rotorius asinchroniniame variklyje visada sukasi lėčiau negu sinchroninis greitis, taip atsiranda slydimas s . $s=(n_1-n)/n_1$. Slydimas tai skirtumas tarp sukamojo magnetinio lauko ir rotoriaus greičio. Rotoriaus srovių dažnis vadinamas slydimo dažniu ir askaičiuojamas[18]

$$f_2 = n_2 p = s n_1 p , \quad (12)$$

Statoriaus kuriamas sukamasis magnetinis laukas lygus rotoriaus sukamajam magnetiniam laukui, šie abu laukai asinchroniniame variklyje sukuria tolygų momentą. Nutrūkus rotoriaus strypams atsiranda atgalinis sukamasis magnetinis laukas:

$$n_b = n_1 (1 - 2s) , \quad (13)$$

Išreiškiamas dažniu:

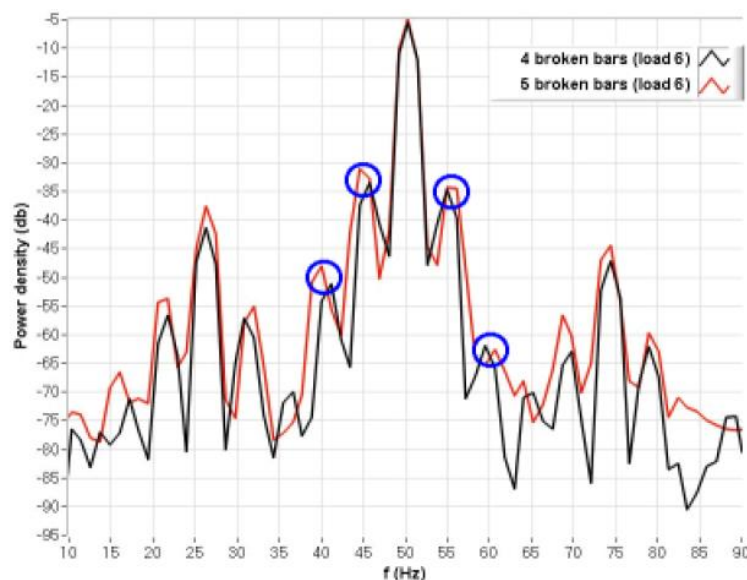
$$f_b = f_1 (1 - 2s) , \quad (14)$$

Tai reiškia, kad sukamasis magnetinis laukas tame dažnyje kerta statoriaus apvijas ir indukuoja sroves dažnyje (f_b). Kitaip tariant kad f_b yra dvipusio dažnio komponentė išsidėsčiusi $2sf_1$ prie f_1 . Tai sukuria du dažnius $\pm 2sf_1$ šalia maitinimo dažnio:

$$f_b = f_1 (1 \pm 2s) , \quad (14)$$

Taip pat šis dažnis dažniausia atsikartoja ir harmonikos spektruose ir aiškiai parodo jog variklis turi rotoriaus gedimą 1.14 paveikslėlyje :

$$f_b = f_1 (1 \pm 2ks) , \quad k = 1,2,3... , \quad (14)$$



1.14 pav. Rotorius su 4 ir 5 nutrūkusiais strypais

1.7. TEMPERATŪROS STEBĖJIMAS

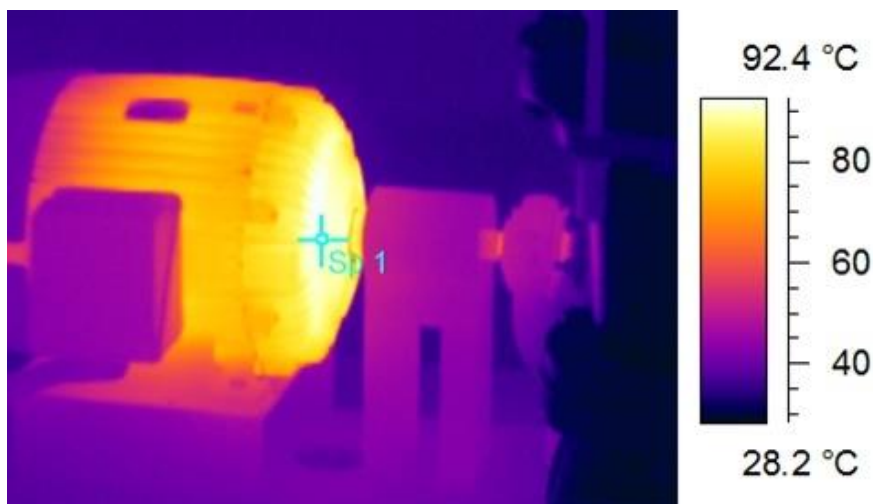
Elektros variklio temperatūros diagnostika paremta matuojant vieną konkretų variklio tašką arba bendrą variklio temperatūros kitimą, bei parametrų įvertinimą. Dėl statoriaus apvijų trumpinimo, srovė sukuria didelius temperatūros pokyčius, tai galima greitai pastebėti, kol kylanti temperatūra nepažeidė statoriaus apvijų izoliacijos arba kol visiškai nesudegino elektros variklio[19].

Pagrinde temperatūros diagnostikoje naudojami 2 modelių būdai:

- Modelis paremtas baigtinių elementų analizė
- Grupuojamų parametrų terminė analizė

Baigtinių elementų analizė tikslesnė, tačiau reikalauja labai daug laiko skaičiavimams ir modelio kūrimui. Grupuojamų parametrų modelis lyginamas su šilumos tinklu kuris sudarytas iš terminių varžų, talpų ir galios nuostolių. Šio modelio tikslumas priklauso nuo to kiek pasirenkama vertinti termiškai kintančių dalių. Šio diagnostikos būdo variklio parametrai gaunami dviem būdais. Pirmas tai naudojant išsamius variklio parametrus - tai išmatavimai ir konstrukciniai elementai. Antras parametrų nustatymo būdas - tai matuojant temperatūrą daugumoje variklio taškų ir daug kartų. Nors elektros variklis sudarytas iš skirtingų medžiagų, kurios turi skirtingas charakteristikas, galima suskirstyti į 2 skirtingus termiškai kintačius kūnus, tai rotorius ir statorius. Taip sukuriamas supaprastintas elektros variklio modelis. Tokio modelio principu galima nustatyti temperatūros pokyčius ir gedimo pobūdį.

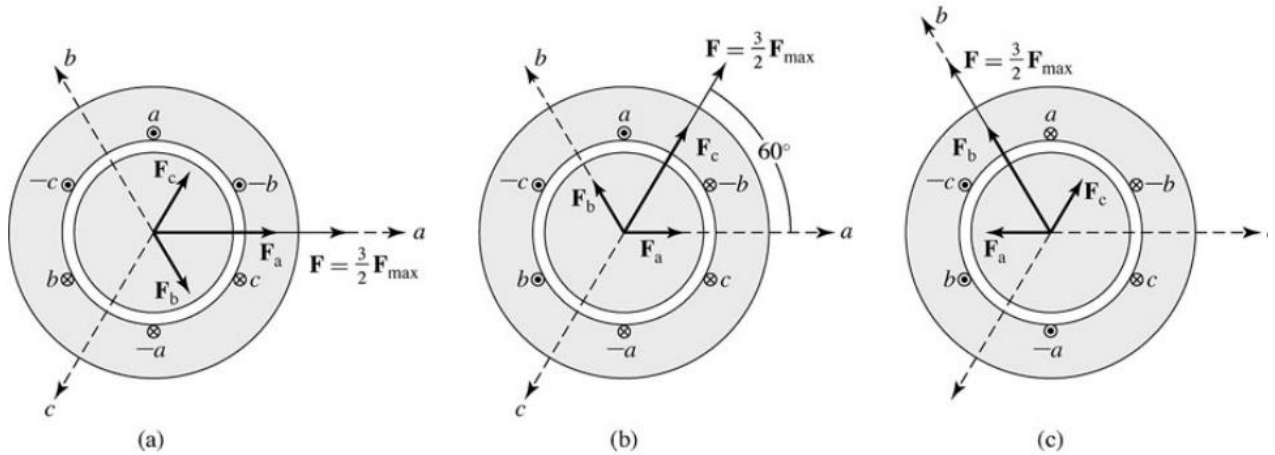
Termine diagnostika galima netiesiogiai nustatyti statoriaus gedimus ir guolių gedimus[20]. Statoriaus apvijų gedimo vietoje greitai kyla temperatūra, tačiau tai per lėtas nustatymo būdas, kol neįvyko trumpas jungimas tarp fazių. Tokiu diagnostikos būdu labai patogu nustatyti guolio gedimus, kadangi padidėjusi trintis guolyje sukelia tempertūrą. 1.15 paveikslėlis termovizija.



1.15 pav. guolio termovizija. <http://www.nautic-service.net/en/thermovision>

1.8. VARIKLIO ORO TARPO MAGNETINIS SRAUTAS

Grafiškai magnetovaros jėga F , išreikšta kaip erdvės vektorius parodyta 1.16 paveiksle.



1.16 pav. Magnetovaros jėga[21]

Vijų skaičius, dN_s , nuo kampo $d\theta$ yra sinusinė kampo θ išraiška. Tada vijų tankis $n_{s1}(\theta)$ yra:

$$\frac{dN_s}{d\theta} = n_{s1}(\theta) = \hat{n}_s \sin \theta, \quad (15)$$

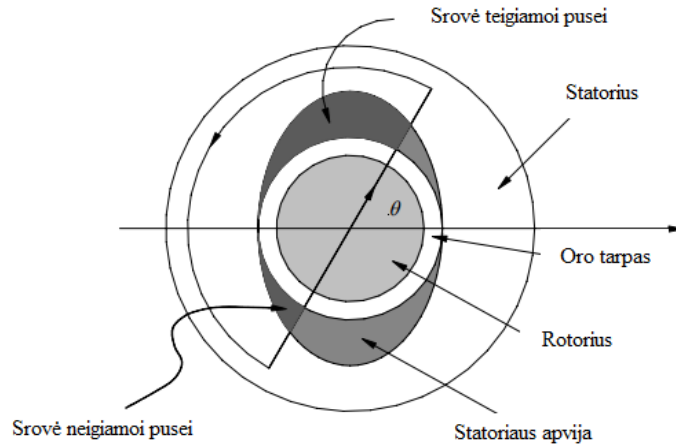
Pilnas vijų skaičius apvijoje N_s :

$$N_s = \int_0^{\pi} n_{s1}(\theta) d\theta, \quad (16)$$

Iš čia:

$$n_{s1}(\theta) = \frac{N_s}{2} \sin(\theta), \quad (17)$$

Tekant srovei i_1 per apviją, magnetinio srauto tankis oro tarpe tarp rotoriaus ir statoriaus galima rasti integravimo metodu, parodytu paveiksliuke 1.17. Integruojant pagal kampą q galima pastebėti kad magnetinio srauto tankis oro tarpe simetriškas abiejuose segmentuose.[21]



1.17 pav. Integravimas skirtas skaičiuoti oro tarpo magnetinį srautą [21]

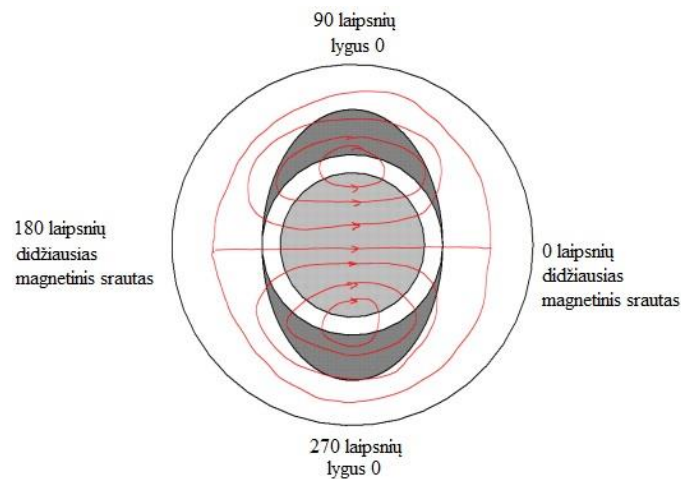
$$2H_{g1}(\theta)g = \int_{\theta}^{\theta+\pi} i_1 n_{s1}(\phi) d\phi$$

$$\frac{2B_{g1}(\theta)}{\mu_0} g = i_1 N_s \cos \theta, \quad (18)$$

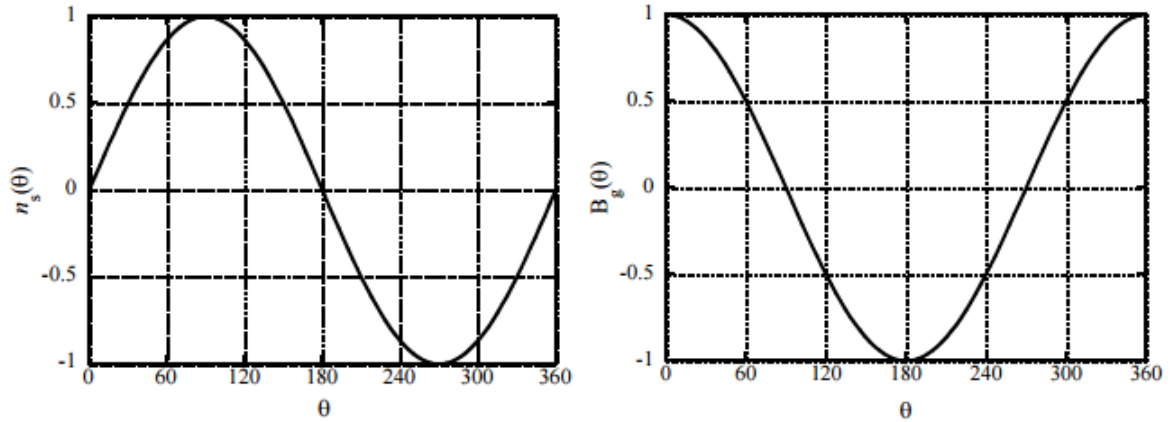
$$B_{g1}(\theta) = i_1 \frac{N_s \mu_0}{2g} \cos \theta$$

Tekant srovei i_1 apvijoje, oro tarpe magnetinis srautas kinta sinusoidiškai kampu, tačiau kaip parodyta paveiksle 1.18 didžiausias srautas būnais kai kampas θ lygus 0. Grafikai paveikslėlyje 1.19 vaizduoja sūkių dažnį $n_{s1}(\theta)$ ir magnetinį srauto tankį $B_g(\theta)$.

Vienoje apvijoje tekant srovei i_1 sinusoidiškai magnetinis srautas kinta taip pat. Vektoriškai didžiausias srautas bus 0° ir 180° (2 polių), o lygus 0 bus 90° ir 270° (2 polių).



1.18 pav. Raudonai pažymėtas magnetinis srautas oro tarpe [21]



1.19 pav. Sūkių dažnis $n_{s1}(\theta)$ ir magnetinis srauto tankis $B_g(\theta)$ nuo kampo θ

Kitai statoriaus apvijai, bet pasuktai 120° oro tarpo magnetinis srautas bus lygiai toks pat tik nulinės reikšmės persislinkusios 120° ($90^\circ + 120^\circ$ ir $270^\circ + 120^\circ$). Tai tekanti srovė i_2 bus persislinkusi 120° arba $2\pi/3$. Antros apvijos oro tarpo magnetinio srauto lygtis:

$$B_{g2}(\theta) = i_2 \frac{N_s \mu_0}{2g} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right), \quad (19)$$

Trečioje apvijoje kuri persukta 240° , tai tekanti srovė i_3 bus persislinkusi arba $4\pi/3$. Antros apvijos oro tarpo magnetinio srauto lygtis[20] (Fitzgerald, Kingsley, Uman, Electric machinery):

$$B_{g3}(\theta) = i_3 \frac{N_s \mu_0}{2g} \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right), \quad (20)$$

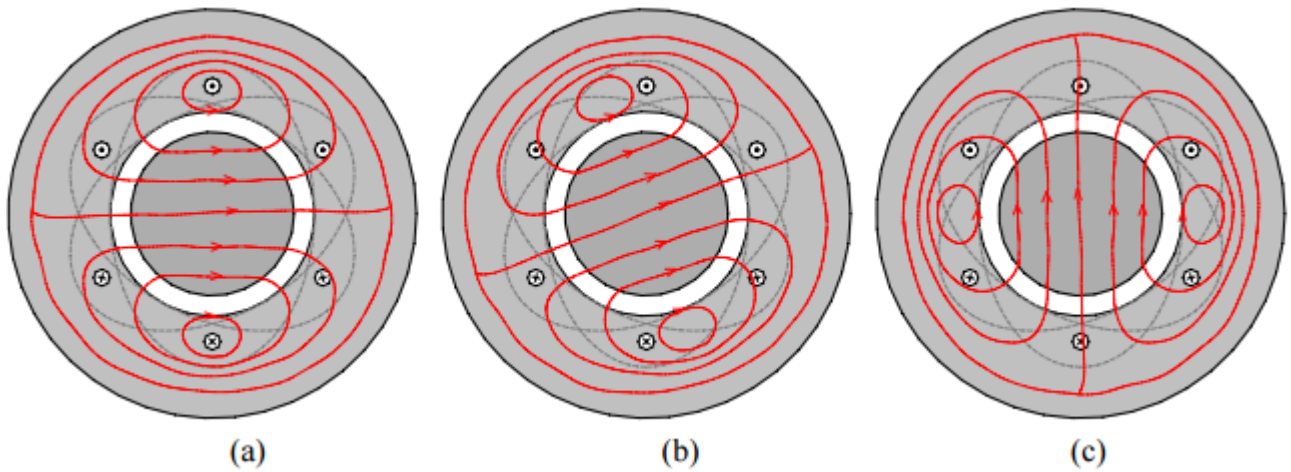
Susumavus visas fazių oro tarpo magnetinio srauto lygtis (18), (19), (20) gaunamas sinusoidinis oro tarpo magnetinis srautas kuris ekvivalentiškai lygus kampui ϕ kuriame yra apvija ir indukuoja srovę i :

$$B_g(\theta) = i \frac{N_s \mu_0}{2g} \cos(\theta + \phi), \quad (21)$$

$$i(t) = i(t) \angle \phi = i_1(t) + i_2(t)e^{j120^\circ} + i_3(t)e^{j240^\circ}, \quad (22)$$

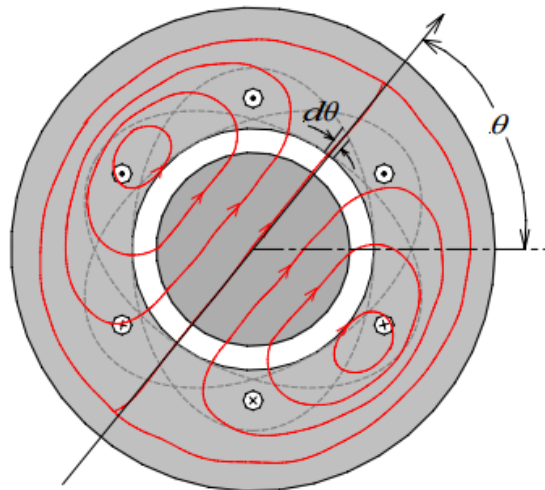
Norint matyti kokią įtaką apvijoms daro sukamasis magnetinis laukas reikia naudoti Fradėjaus dėsnį. Kaip veikia apvijas sukamasis magnetinis laukas parodyta paveiksluke 1.20. Kai srovė pirmoje apvijoje didžiausia magnetinis srautas parodytas paveiksluke 1.20(a), sukantis toliau magnetinis laukas silpnėja 1.20(b), kai magnetinis srautas pasisuka 90° ir pirmos fazės apvijoje srovė lygi 0 parodyta pav.

1.20(c).



1.20 pav. Sukamasis magnetinis srautas ir srauto sąveika su apvijomis [21]

Norint suskaičiuoti srauto sąveiką, sukamąjį magnetinį srautą reikia vertinti pagal kampo pokytį, kaip parodyta paveikslėlyje 1.21.



1.21 pav. Srauto ryšys su apvijomis skirtingu posūkiu kampu [21]

Srautas ritei:

$$\phi(t, \theta) = \int_{\theta-\pi}^{\theta} B_g(t, \theta) dA = Ir \int_{\theta-\pi}^{\theta} lr(t, \theta) d\theta, \quad (23)$$

Čia l ašinis ritės ilgis, r ritės kampas.

Vijų skaičiaus magnetinis srautas susijęs su $dn_s(\theta) = n_s(\theta)d\theta$, taigi kelioms vijoms $d\lambda = n_s(\theta)d\theta \cdot \phi(\theta)$, norint rasti visus pirmos apvijos magnetinio srauto ryšius, reikia integruoti visam periodui:

$$\lambda_1 = \int d\lambda = \int_0^{\pi} n_s(\theta)d\theta \cdot \phi(\theta), \quad (24)$$

Išintegravus:

$$\lambda_1(t) = \frac{N_s^2 l r}{8g} 3\pi\mu_0 \sqrt{2}I \cos(\omega_s t + \phi_1) = L_M \sqrt{2}I \cos(\omega_s t + \phi_1), \quad (25)$$

Tai reiškia, kad pirmos fazės apvijoje magnetinis srautas proporcingas srovei. Taip pat yra ir antroje, bei trečioje fazėse, tik laike atsilieka 120o ir 240o. Susumavus gaunamas magnetinio srauto sąveikos vektorius, λ .

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 e^{j120^\circ} + \lambda_3 e^{j240^\circ} = L_M i, \quad (26)$$

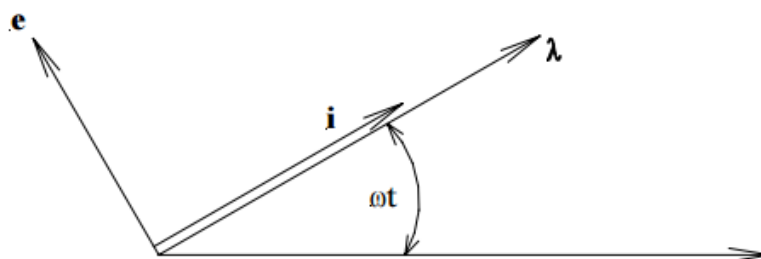
Kadangi kiekvienai apvijai srautas skiriasi, ir jis yra sinusoidiškas, indukuota įtampa kiekvienoje ritėje yra 90° persislinkus į priekį negu srovė. Kadangi dižiausią įtaką magnetiniam srautui turi srovė visose trijose apvijose, o ne įtampa, L_M yra magnetizmo induktyvumas, ir indukuotas įtampas kiekvienoje ritėje galima apskaičiuoti:

$$\begin{aligned} e_1(t) &= \frac{d\lambda_1}{dt} = \omega\sqrt{2}I \cos(\omega t + \phi_1 + \frac{\pi}{2}) \\ e_2(t) &= \frac{d\lambda_2}{dt} = \omega\sqrt{2}I \cos(\omega t + \phi_2 + \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3}), \\ e_3(t) &= \frac{d\lambda_3}{dt} = \omega\sqrt{2}I \cos(\omega t + \phi_3 + \frac{\pi}{2} - \frac{4\pi}{3}) \end{aligned} \quad (27)$$

Indukuotos įtampos erdvės vektorius e :

$$e = e_1 + e_2 e^{j120^\circ} + e_3 e^{j240^\circ} = j\omega L_M i, \quad (28)$$

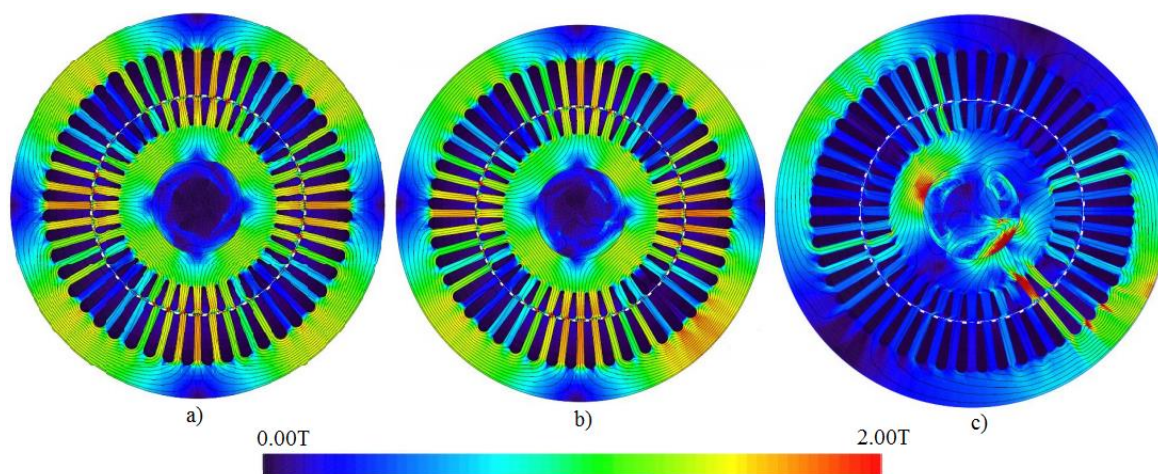
Magnetinio srauto erdvės vektorius sutampa su srovės erdvės vektoriumi, o indukuotos įtampos vektorius e atsilenkęs 90° į priekį, kaip pavaizduota paveikslėlyje 1.22.



1.22 pav. Magnetizmo srovė i , srauto erdvės vektorius λ , indukuotos įtampos erdvės vektorius e [21]

1.9. VARIKLIO ORO TARPO MAGNETINIO SRAUTO PAKITIMAS NUTRŪKUSIŲ ROTORIAUS STRYPŲ ATVEJU

Įtrūkus ar nutrūkus rotorius strypams, tose vietose smarkiai išauga varža. Dėl to žymiai krenta indukuota srovė būtent tokiuose strypuose, todėl atsiranda sukamojo magnetinio lauko asimetrija. Tokiu atveju rotoriumi sukantis trūkio vieta šalia statoriaus dantų sukuriama netolygus magnetinis srautas oro tarpe. Tam turi įtakos ir didesnis srovės tankis.[22] Kaip atrodo nepažeisto variklio magnetinio srauto tankis pavaizduotas paveikslėlyje 1.23 a) Variklio su pažeistu rotoriumi (nutrūkę 3 strypai) magnetinio srauto tankis pavaizduotas paveikslėlyje 1.23 b) Ir paveikslėlyje 1.23 c) pavaizduotas palyginimas tarp variklio su pažeistu rotoriumi (nutrūkę 3 strypai) ir variklio be gedimo, kai lyginant rotoriume magnetinis srautas išauga 0.4T.



1.23 pav. Magnetinis srauto tankis nepažeistame variklyje.[22]

2. METODINĖ DALIS

Tyrinėjant literatūrą apie variklio diagnostikos metodus ir magnetinį srautą asinchroninio variklio oro tarpe, gedimus tirsiu kontrolinės vijelės metodu, kuris leidžia pastebėti oro tarpe kintantį magnetinį srautą. Šiuo metodu bus bandoma nustatyti guolio gedimus, kai guoliui pažeistas išorinis žiedas ir rutuliukas su separatoriumi. Bus bandoma nustatyti statoriaus vijų trumpą jungimą ir rotoriaus 3 strypų nutrūkimą. Guolių gedimai taip pat tiriama ir vibrodavikliu. Tiriamasis trifazis asinchroninis variklis WEG al132m-04 7.5 kW galios. Gamyklinė lentelė lentelėje 2.1.

Lentelė 2.1 Variklio gamykliniai parametrai

| V | | Hz | kW | RPM | A | | PF |
|-----|-----|------------|-----------|------|-----------|------|------|
| 400 | 690 | 50 | 7.5 | 1455 | 14.8 | 8.58 | 0.84 |
| | | | | | | | |
| 400 | IE1 | 86.0(100%) | 85.5(75%) | | 84.0(50%) | | |

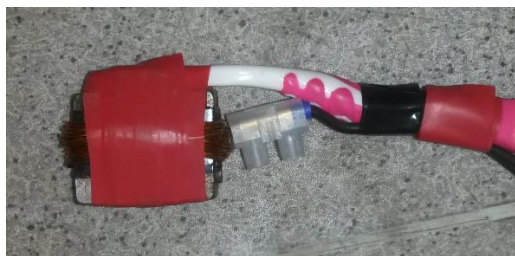
Tyrimui naudojamas vienfazis autotransformatorius JERDIN 2.1 paveikslėlis



2.1 pav. Autotransformatorius

Ampermetras

Apvija suvyniota ant magnetolaidžio kaip pavaizduota Pav. 2.2



2.2 pav. apvija suvyniota ant magnetolaidžio

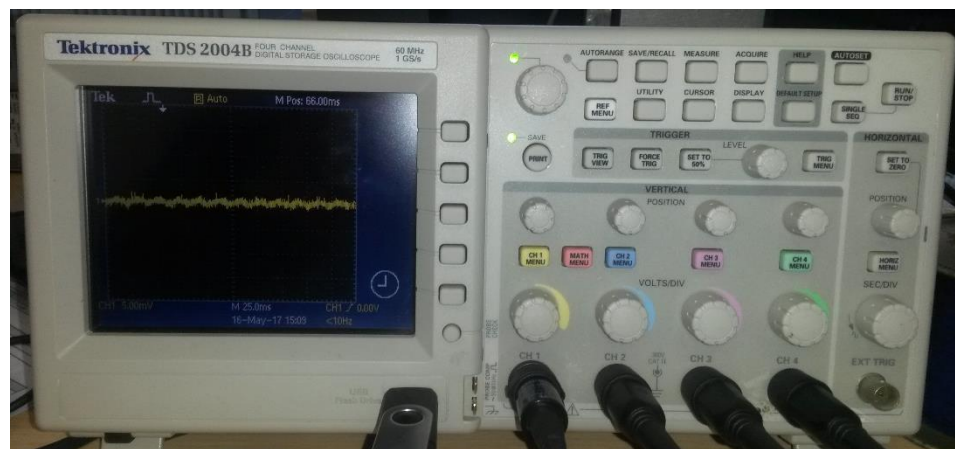
Voltmetras

Trifazis sinchroninis generatorius STC-20 gamykliniai parametrai lentelėje 2.3

Lentelė 2.3 Generatoriaus gamykliniai parametrai

| | |
|-------------|----------------------|
| P 20 kW | Cosfi 0.8 |
| U 400V | Žadinimo įtampa 94 V |
| I 36.1 A | Žadinimo srovė 6.4 A |
| f 50 Hz | IP 21 |
| n 1500r/min | 3 fazės |

Osciloskopas Tektronix TDS 2004B (paveikslėlis 2.4)



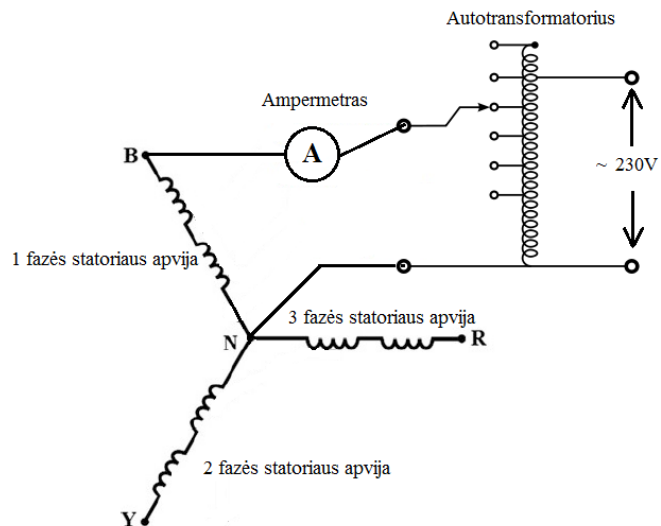
2.4 pav. Osciloskopas

Vibrodaviklis IT 12.35.000 iki 7000hz

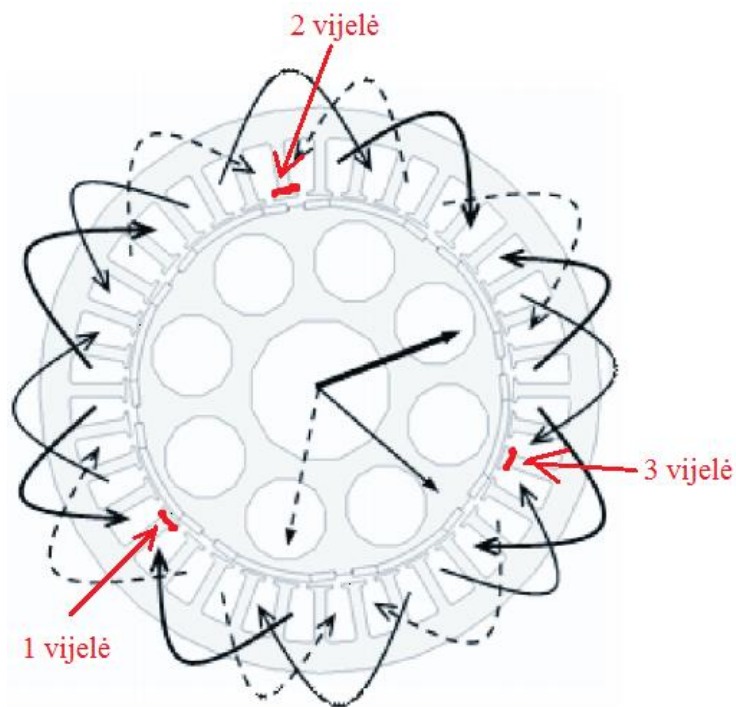
Norint pasiruošti tyrimui asinchroninį variklį reikia išardyti ir išimti rotorius, tada vieną statoriaus apviją reikia užmaitinti iki nominalios (šiuo atveju iki 14.8 A) srovės autotransformatoriumi kaip parodyta schemoje Pav 2.5. Taip užmaitinta viena apvija sukuria magnetinį srautą (18).

Norint tiksliai pakloti vijeles reikia statoriuje susirasti fazės polių kas 120° laipsnių ir kloti ant didžiausią magnetinį srautą turinčių statoriaus dantų kaip parodytas Pav 2.6.

Tam naudojama apvija suvyniota ant magnetolaidžio. Priglaudus apviją su magnetolaidžiu (Pav 2.2) prie statoriaus danties magnetinis srautas indukuoja elektrovarą (27) ir prijungus apviją su magnetolaidžiu prie voltmetro galima nustyti poliaus vidurį.

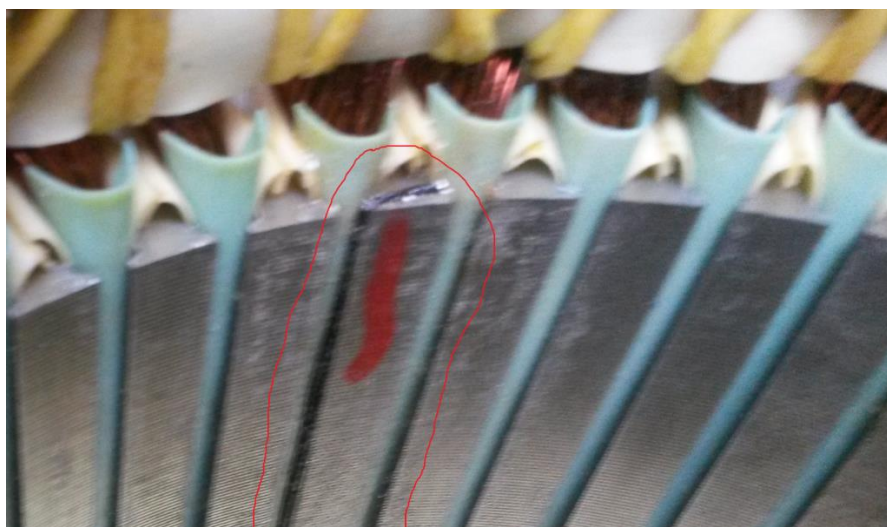


2.5 pav. Schema vijelių vyniojimui



2.6 pav. Vijelių vyniojimo vietos. Rodyklės vaizduoja statoriaus apvijų jungimo schemą

Suvyniojus vijeles statorius atrodo kaip pavaizduota paveikslėlyje 2.7. Taip suvyniotos vijalet laikė bus persislinkusios kas 120° ir osciloskope bus matoma trifazė sistema.



2.7 pav. Apvyniota vijelė aplink statoriaus magnetolaidžio dantį

Taip suvyniotos trys vijelės prijungiamos prieš osciloskopo (Pav 2.4). Vijelėse indukuojama elektrovara dėl kuriamo magnetinio srauto oro tarpe (21). Taip galima matyti menkiausią oro tarpo pokytį, dėl ekcentriciteto, statoriaus apvijų gedimų ar rotoriaus gedimų.

Analizuoti variklio gedimams bus naudojama Clarke transformacija:

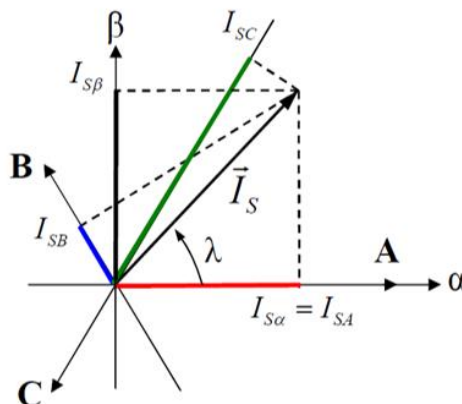
$$X_{\alpha} = \frac{2}{3} \left(x_a - \frac{1}{2} x_b - \frac{1}{2} x_c \right)$$

$$X_{\beta} = \frac{2}{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} x_b - \frac{\sqrt{3}}{2} x_c \right)$$

Verčiant į sroves (paveikslėlis 2.8):

$$I_{s\alpha} = I_{SA}$$

$$I_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{SA} + \frac{2}{\sqrt{3}} I_{SB}$$



2.8 pav. Clarke transformacija

Panaudojus Clarke transformaciją tikslumui nustatyti galima naudoti parko transformaciją (8), (9). Šios abi transformacijos bus atliktos MatLab programa, kurios kodas:

```
Valfa=va  
Vbeta=(1/sqrt(3))*(va+2*vb)  
Vd=(sqrt(2/3)*va)-(1/sqrt(6)*vb)-(1/sqrt(6)*vc)  
Vq=(1/sqrt(2)*vb)-(1/sqrt(2)*vc)  
plot(Valfa, Vbeta) ; nubraižomas Clarke vektorius  
xlabel('Va (mV)')  
ylabel('Vb (mV)')  
figure  
plot(Vd, Vq, 'r') ; nubraižomas Park'o vektorius  
xlabel('Vd (mV)')  
ylabel('Vq (mV)')  
figure ; abu grafikai palyginami  
plot(Valfa, Vbeta)  
xlabel('Va (mV)')  
ylabel('Vb (mV)')  
hold on  
plot(Vd, Vq, 'r')  
xlabel('Vd (mV)')  
ylabel('Vq (mV)')
```

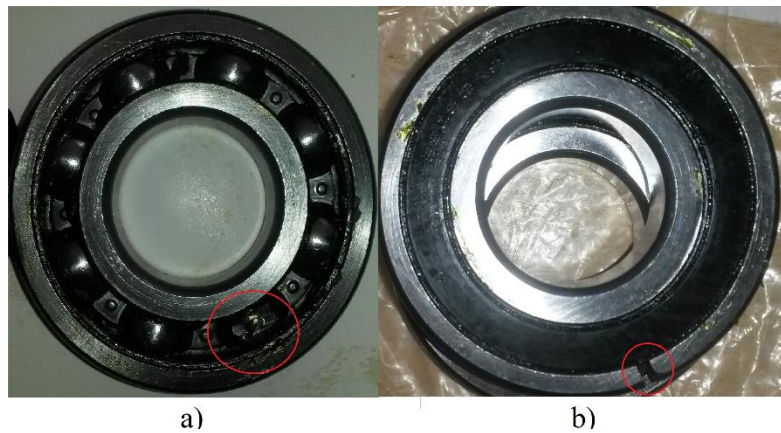
Taip bus ištirtas geras variklis ir lyginamas su trumpai jungtomis statoriaus vijomis (Pav 2.9) ir su rotoriumi su nugręžtais trimis strypais (Pav 2.10). Toks ekperimentas bus atliktas su pilnai apkrautu varikliu ir tuščioje eigoje. Tai pat vijelėmis bus tiriamas ir guolis su sugadintu išoriniu žiedu (Pav 2.11 a)) ir guolis su sugadintu separatoriumi ir rutuliuku (Pav 2.11 b)). Apkrovimui bus naudojamas generatorius (2.3 lentelė)



2.9 pav. Statorius su trumpai jungtomis vijomis



2.10 pav. Rotorius su nugręžtais trimis strypais



2.11 pav. a) Guolis su separatoriaus ir guolio defektu, b) guolis su išorinio žiedo defektu

Tiriamąjį variklio guolių gedimui nustatyti taip but naudojamas ir vibrodaviklis IT 12.35.000 iki 7000hz. Jis bus prijungtas prie osciloskopo, o gautas spektras išskleidžiamas Furje eilute pasinaudojus MatLab programa, kodas:

`smdl=0.00004;` Intervalas tarp taškų

`fs=1/smdl;` Taškų įrašymo dažnis

`NFFT=2500;` Taškų skaičius

`X = fft(x,NFFT);` Skleidimas furjė eilute

`X = X(1:NFFT/2+1);` Furjė eilutės atvaizdavimas teigiamoje dažnio ašyje

`Pxx=X.*conj(X)/(NFFT*NFFT);` Decibelai

`f = fs*(0:NFFT/2)/NFFT;` Dažnio vektorius

`plot(f,10*log10(Pxx),'r');`

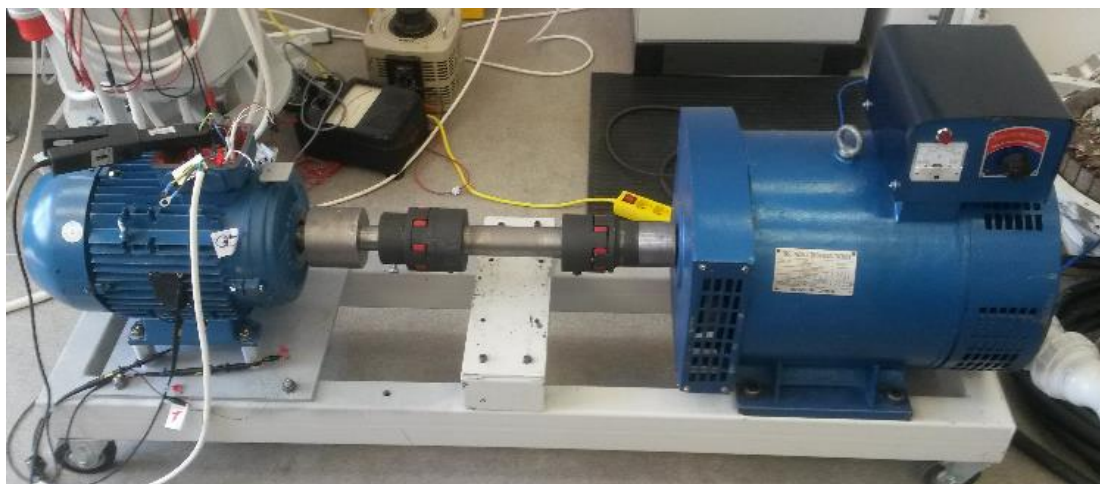
`xlabel('Daznis (Hz)')`

`ylabel('dB');`

Išskleidus Furje eilute ir sulyginus paskaičiuotus guolio gedimų dažnius (3), (4), (5), (6) galima nustatyti guolio gedimą ir jo didumą. Kaip atrodo vibrodaviklis uždėtas ant variklio pavaizduotas 2.12 paveikslėlyje. Visas stendas tyrimui atlikti pavaizduotas paveikslėlyje 2.13



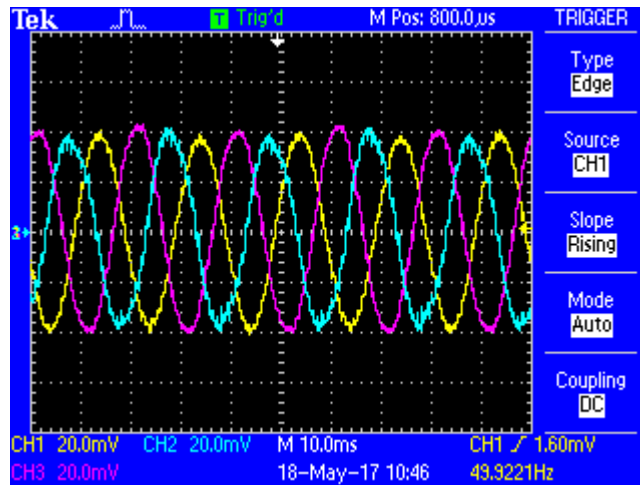
2.12 pav. Vibrodaviklis primontuotas prie variklio



2.13 pav. Stendas eksperimentui atlikti

3. TYRIMŲ REZULTATAI

Atliekant asinchroninio variklio tyrimus pirmiausiai apskaičiuota įtampų asimetrija pagal vijelių indukuotą evj. oscilografe nustačius 20mV amplitudę bei 10 ms laiko intervalą kaip pavaizduota paveikslėlyje 3.1.



3.1 pav. Vijelių indukuota evj

Vijelių indukuotos įtamos:

1 fazėje 0.03920 mV

2 fazėje 0.04000 mV

3 fazėje 0.04080 mV

Santykiniais vienetais skaičiuojant priimama, kad 1 fazės indukuota įtampa lygi $V_a = 1$.

Iš čia antros fazės įtampa santykiniais vienetais:

$$V_b = \frac{0.04000}{0.03920} = 1.02 \text{ s.v.}$$

Trečios:

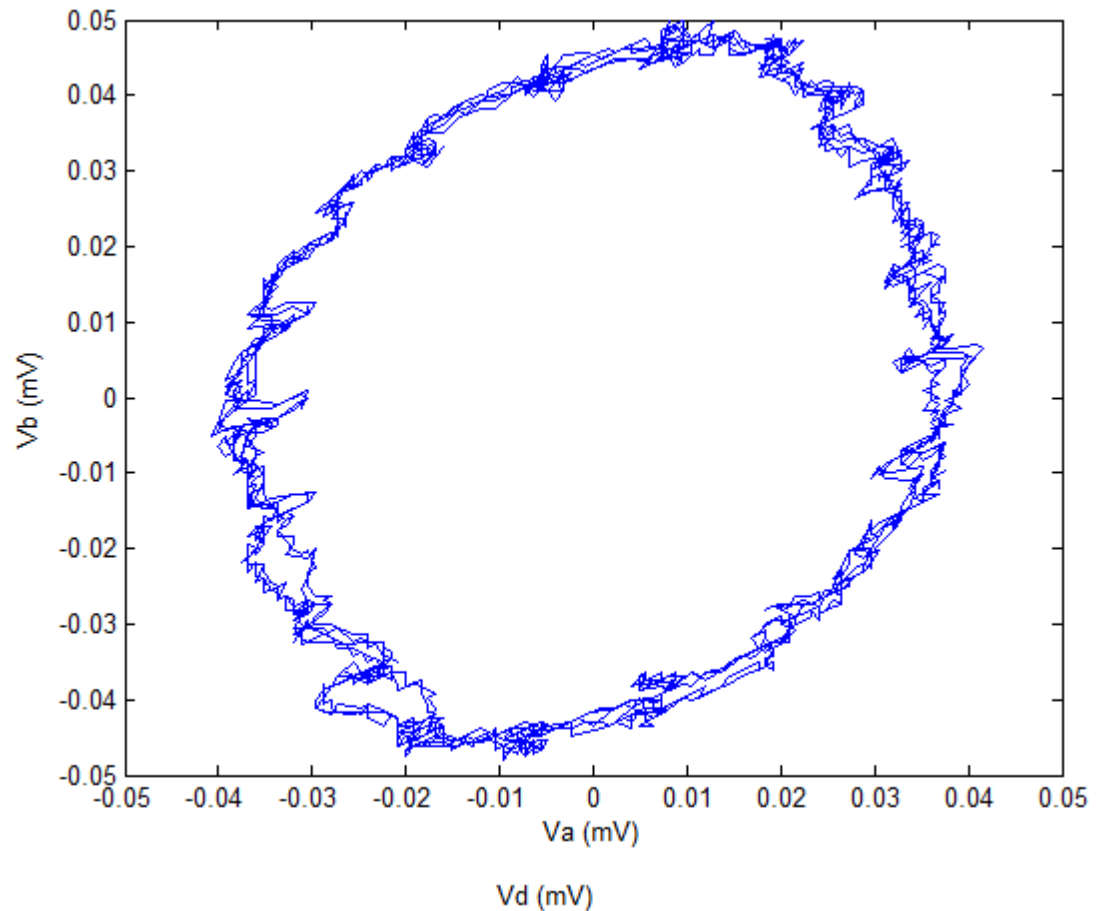
$$V_c = \frac{0.0408}{0.03920} = 1.04 \text{ s.v.}$$

Iš čia galima daryti išvadą jog atliekant eksperimentą buvo įtampų asimetriškumas. Tarp 1 ir 2 fazės 2 % asimetriškumas, tarp 1 ir 3 fazės 4 % asimetriškumas. Todėl eksperimento metu perskaičiuotams Clarke ir Park vektoriams yra atsiradęs elipsiškumas.

Tokiomis pačiomis sąlygomis eksperimentas buvo atliekamas varikliui veikiant tuščiąja veika ir apkrautam. Tuščiąja veika veikiant varikliui buvo keičiami guoliai su blogu guoliu ir separatoriumi ir pažeistu išoriniu žiedu, rotoriumi pragrėžtu 3-mis strypais, bei statoriumi su tarpvijiniu jungimu.

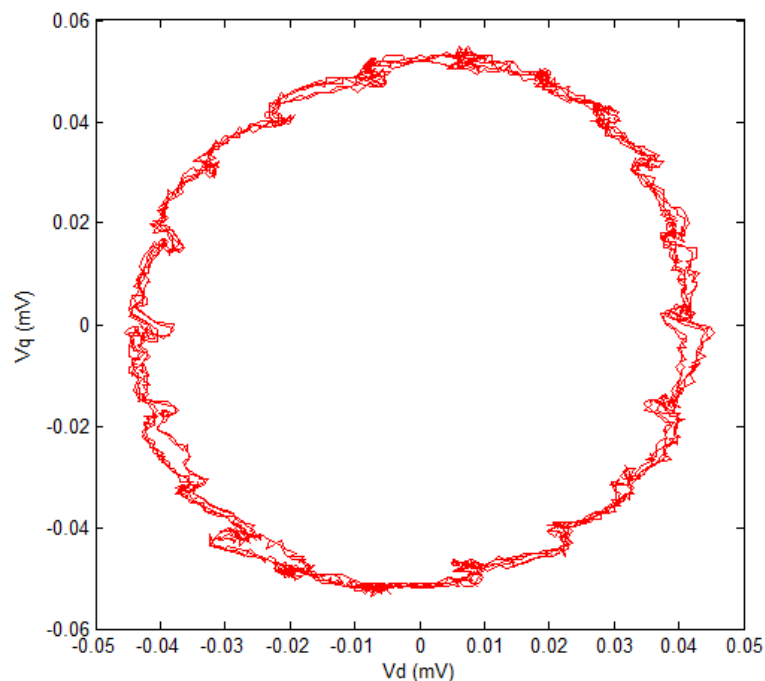
Apkrautam varikliui nominaliai bandymas buvo atliekamas su rotoriumi pragrėžtu 3-mis strypais ir statoriumi su tarpvijiniu jungimu.

Atlikta Clarke transformacija(pav 3.2) ir Park transformacija(pav 3.3) tolimesniam lyginimui ir defektų nustatymui.



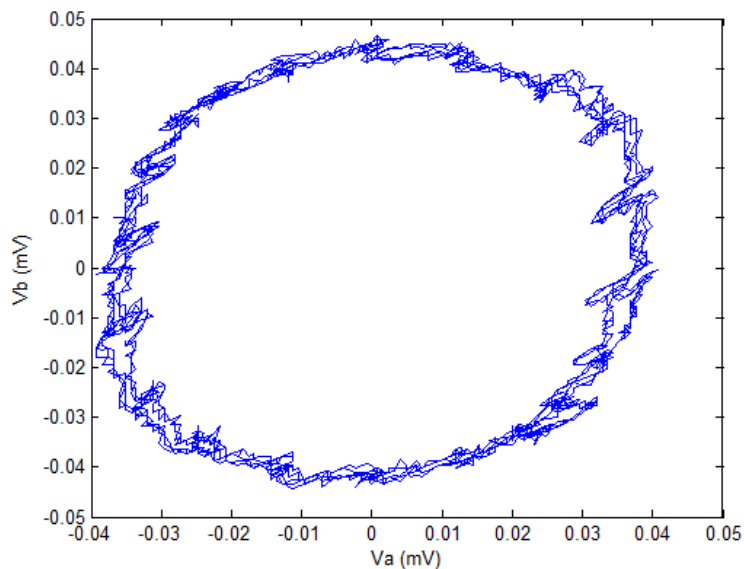
3.2 pav. Clarke transformacija kai guolis nepažeistas

Atlikus Clarke transformaciją matomas elipsiškumas tai dėl prieš tai apskaičiuotų įtampos asimetrijų

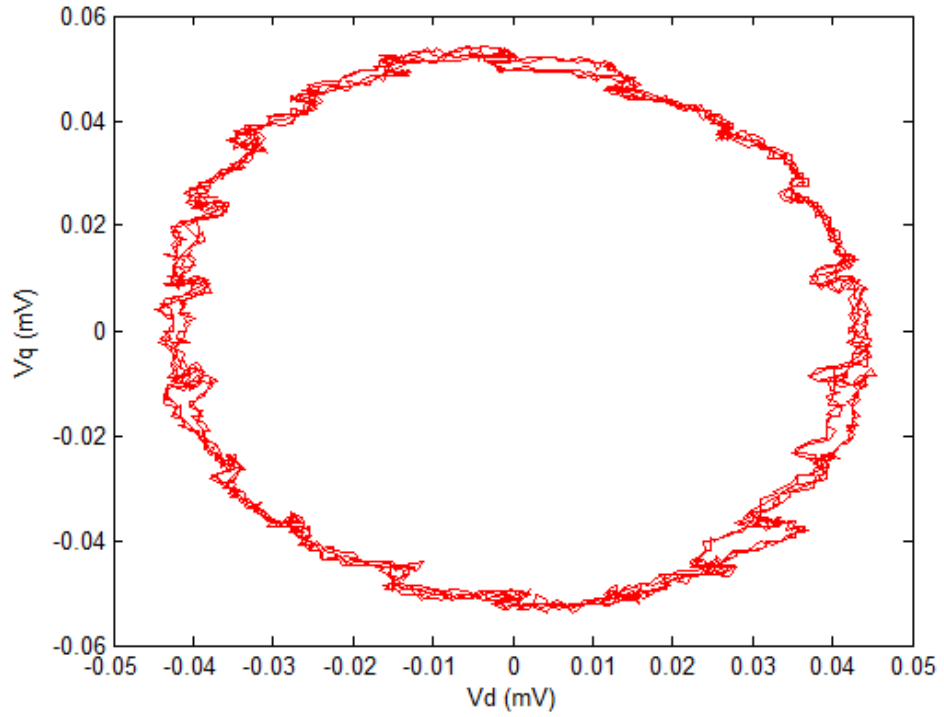


3.3 pav. Park transformacija kai guolis nepažeistas

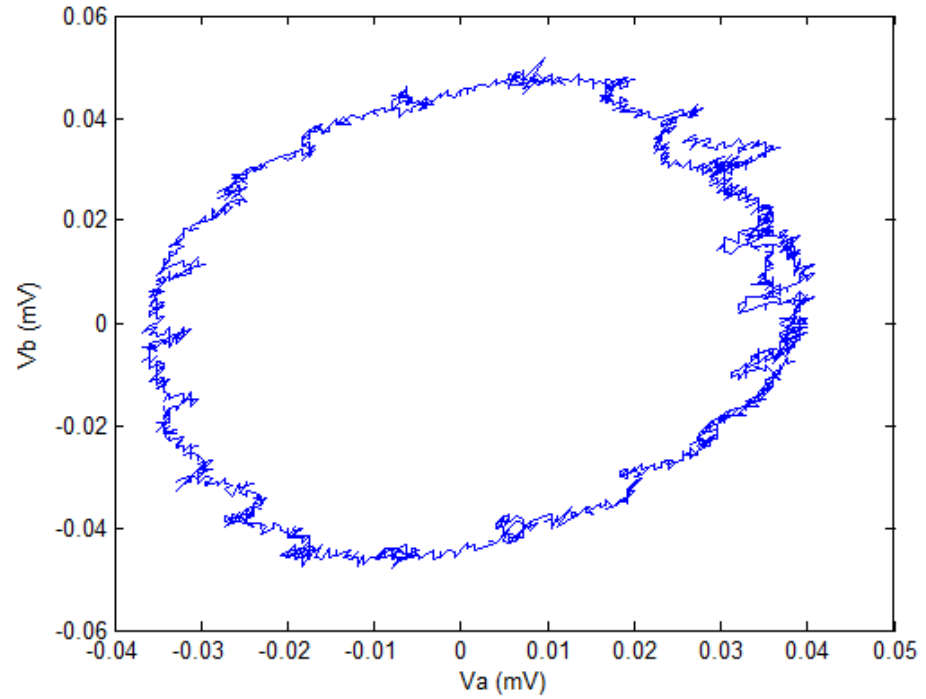
Atlikus Park ir Clark transformaciją matomi 0.005 mV šiuoliai dėl įtampos asimetrijos. Kadangi paklotos vijelės oro tarpe reaguoja dėl menkiausiai pasikeitusio magnetinio srauto oro tarpe, indukuojama vijelių įtampa skiriasi. Kaip ir buvo tikėtasi gautas 0.05 mV amplitudės apskritimas yra simetriškas, kas įrodo jog variklis yra nepažeistas. Variklyje pakeitus gerą guolį į guolį su sugadintu išoriniu žiedu ir po to į guolį su sugadintu separatoriumi buvo taip pat atliktos Clarke ir Park transformacijos (Pav 3.4, 3.5, 3.6, 3.7).



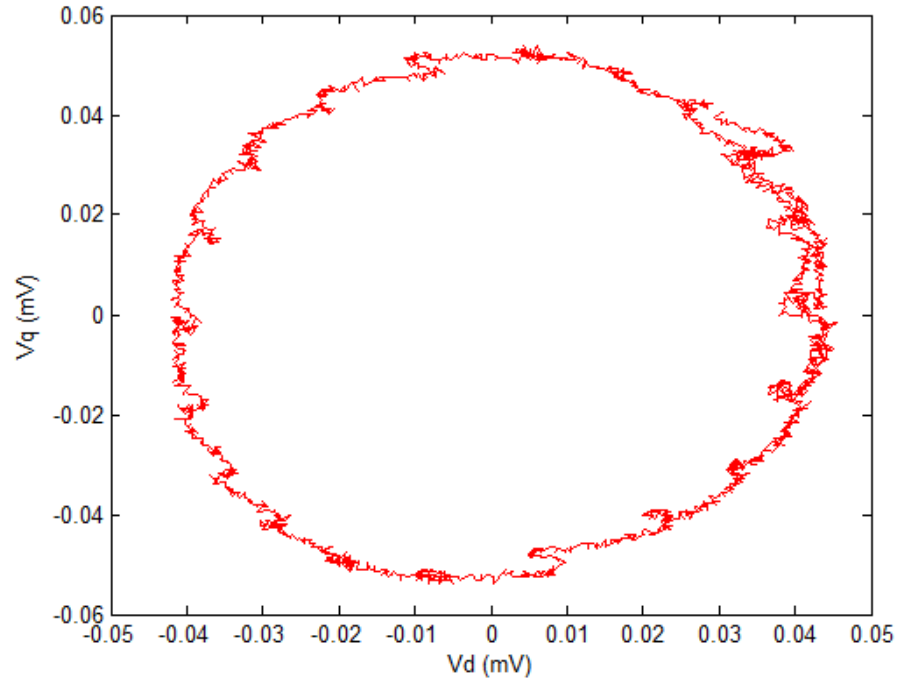
3.4 pav. Clarke transformacija kai pažeistas guolio išorinis žiedas



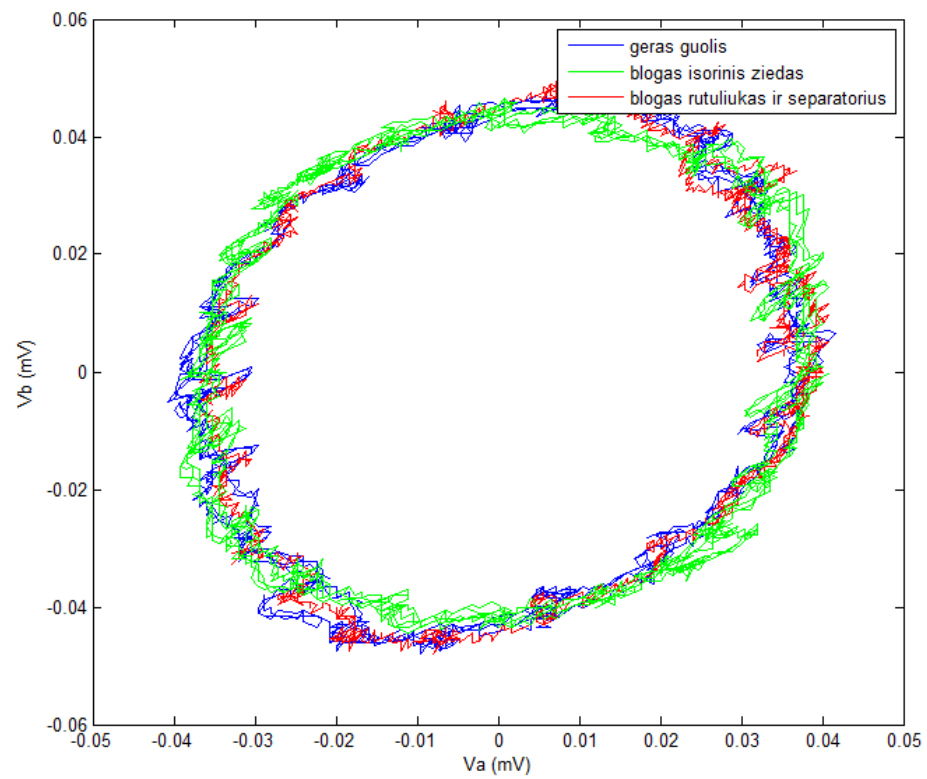
3.5 pav. Park transformacija kai pažeistas guolio išorinis žiedas



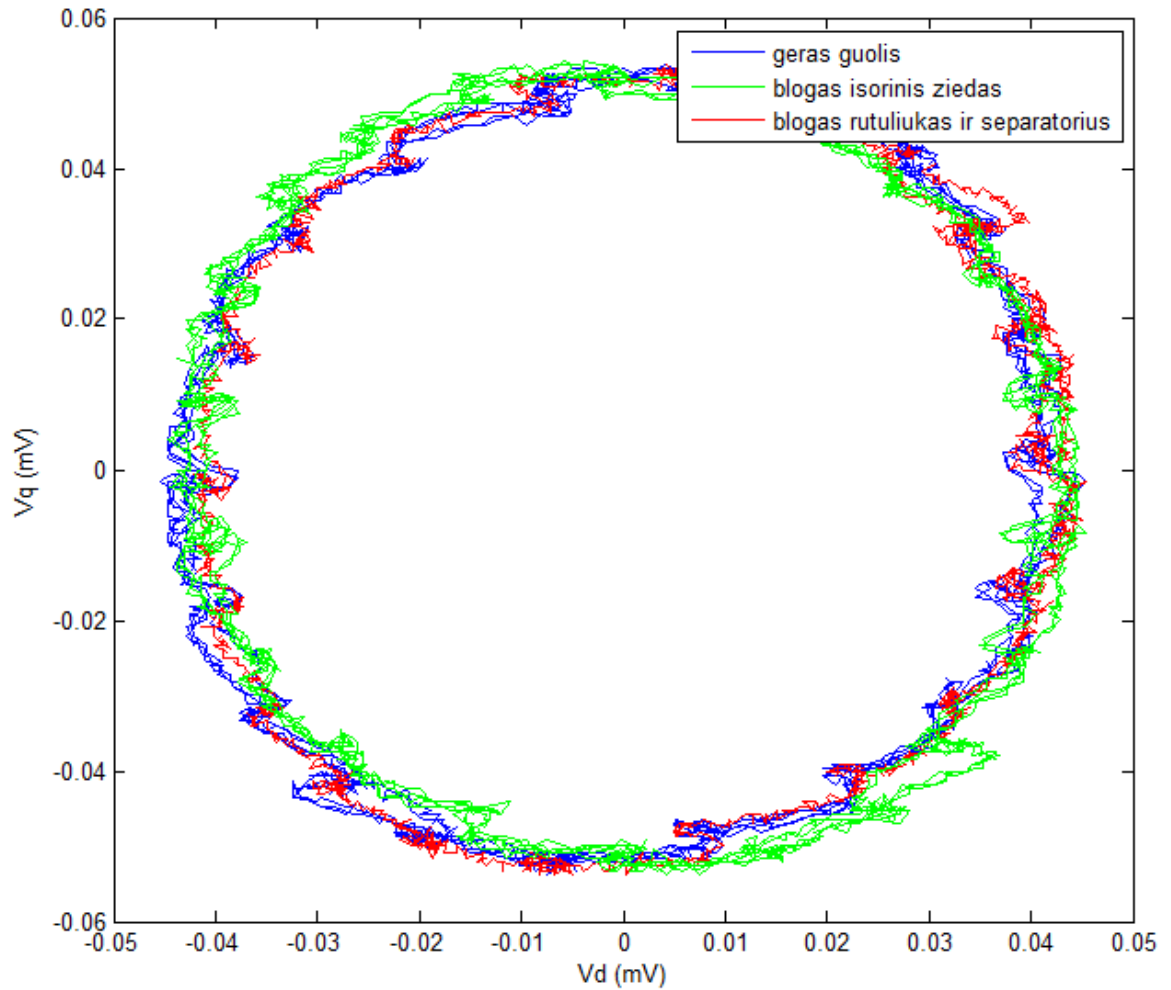
3.6 pav. Clarke transformacija kai pažeistas guolio rutuliukas ir separatorius



3.7 pav. Park transformacija kai pažeistas guolio rutuliukas ir separatorius

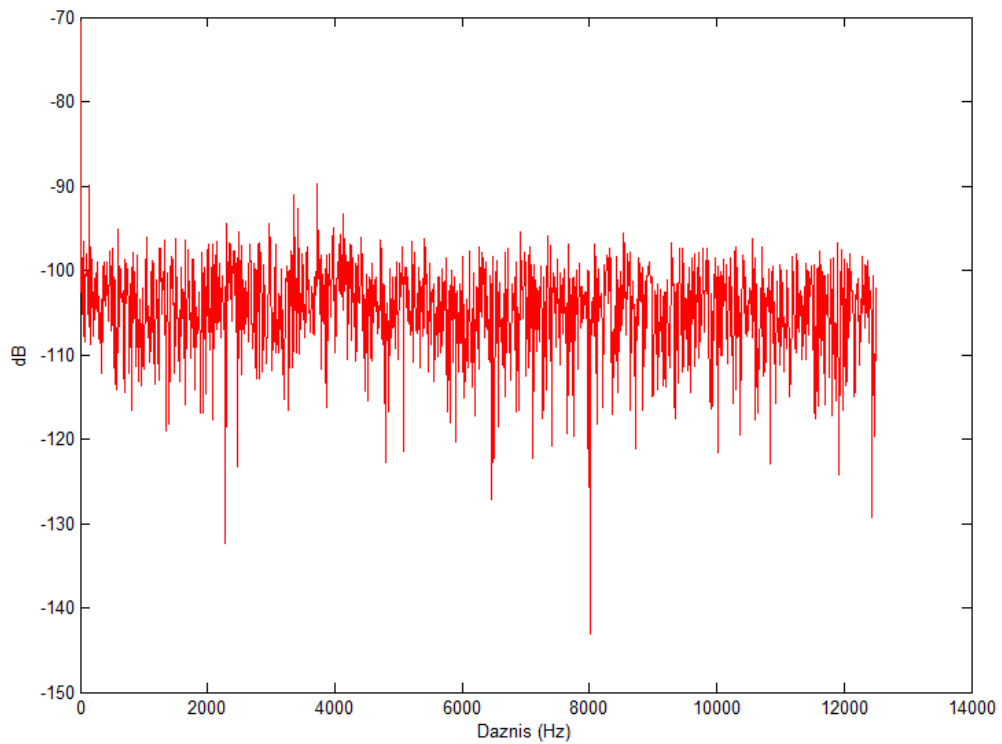


3.8 pav. Clarke transformacija gero guolio ir pažeistų guolių palyginimas naudojant vijelių metodą

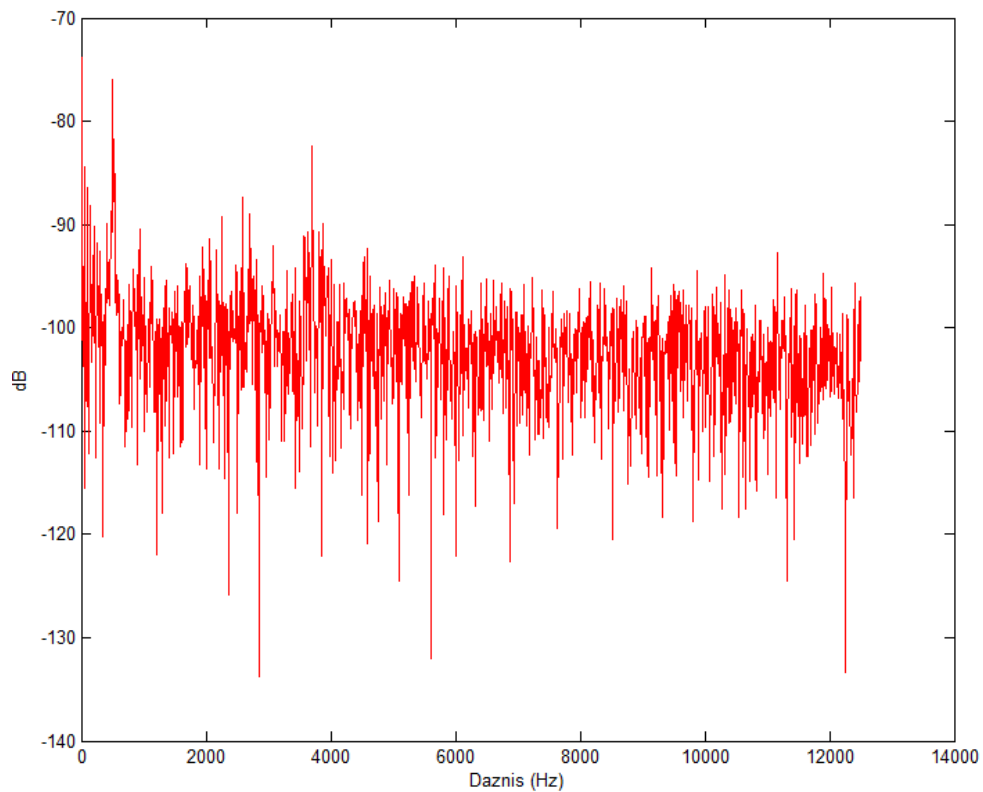


3.9 pav. Park transformacija gero guolio ir pažeistų guolių palyginimas naudojant vijelių metodą

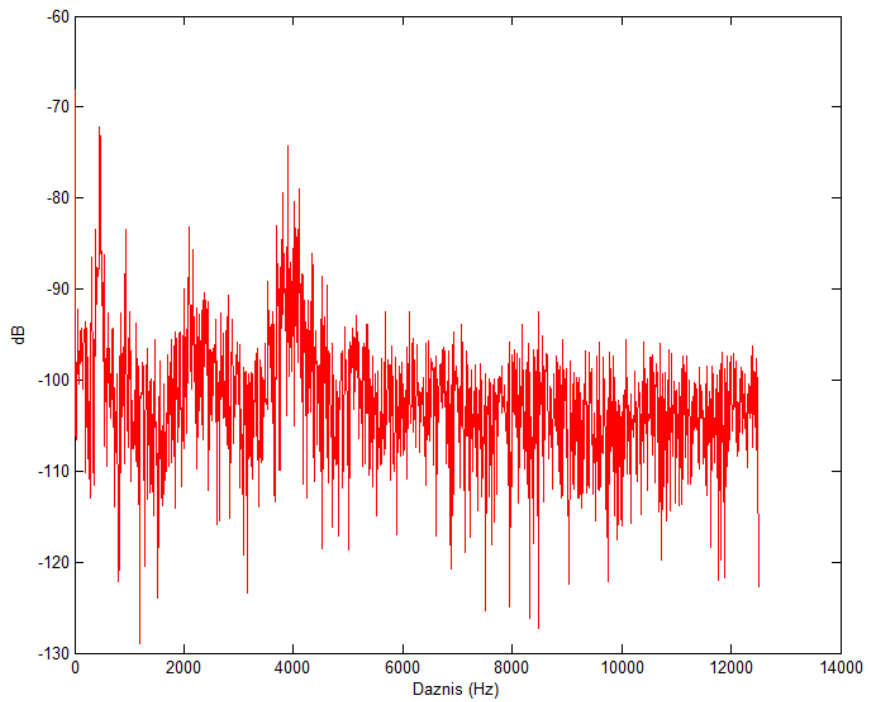
Paveikslėliuose 3.8 ir 3.9 sulygintas geras guolis su pažeistais ir atliktos Clarke ir Parko transformacijos gautoms vijelių įtampoms. Didžiausią įtaką oro tarpo magnetiniam turi guolis su blogu išorinio guolio žiedu, atsirado 0.005 mV nukrypimas. Tačiau guolis su blogu rutuliuku ir separatoriumi įtakos oro tarpo magnetiniam srautui neturėjo ir sutampa su gero guolio Park ir Clark transformacija. Atliekant diagnostiką guoliams vijelių metodu, gana sudėtinga nustatyti guolio gedimus, nes oro tarpo magnetinis srautas kinta nedaug ir vijelių elektrovara kinta tik 0.005 mV arba 0.0025 mV. Todėl guolių diagnostikai buvo panaudotas vibrodaviklis ir jo signalas buvo apdorotas Furjė analize. Gero guolio Furjė analizė pavaizduota 3.10 paveikslėlyje. Guolio su sugadintu rutuliuku ir separatoriumi 3.11 paveikslėlyje. Guolio su sugadintu išoriniu žiedu 3.12 paveikslėlyje ir 3.13 paveikslėlyje guolių triukšmo palyginimas.



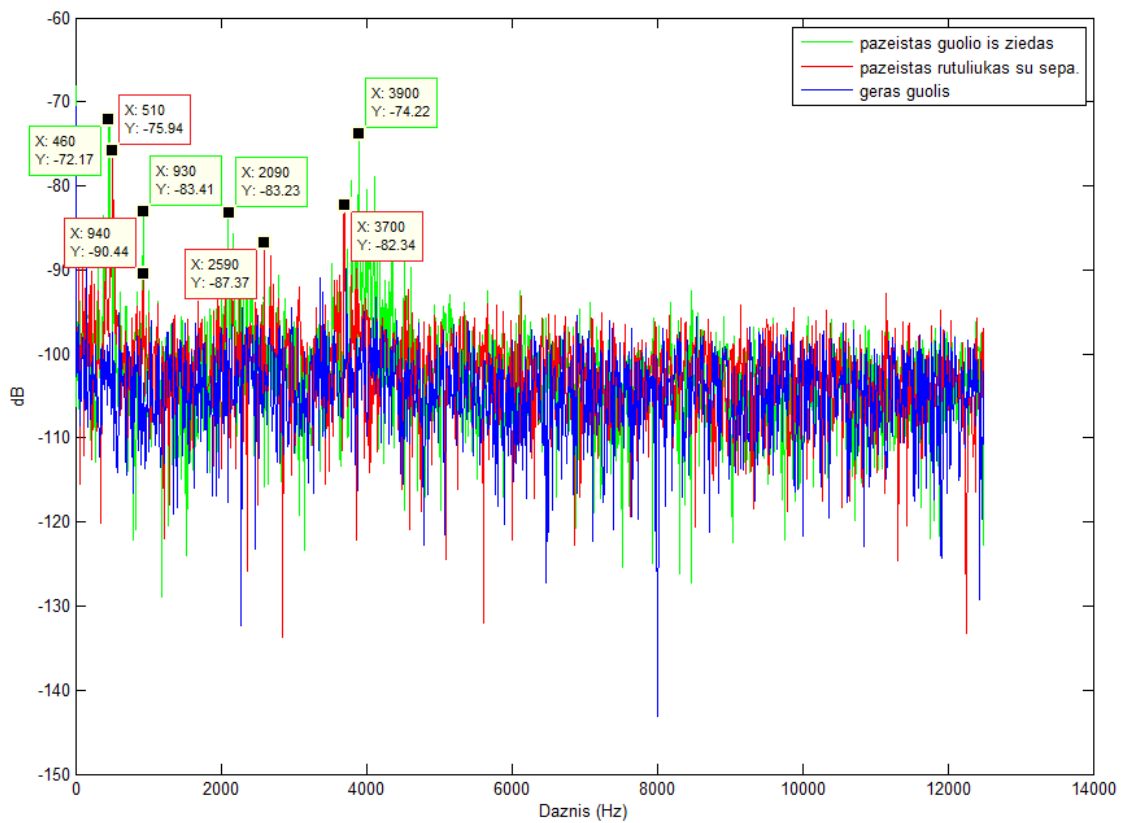
3.10 pav. gero guolio vibracijų analizė išskleista Furjė eilute



3.11 pav. Guolio su sugadintu rutuliuku ir separatoriumi vibracijų analizė išskleista Furjė eilute



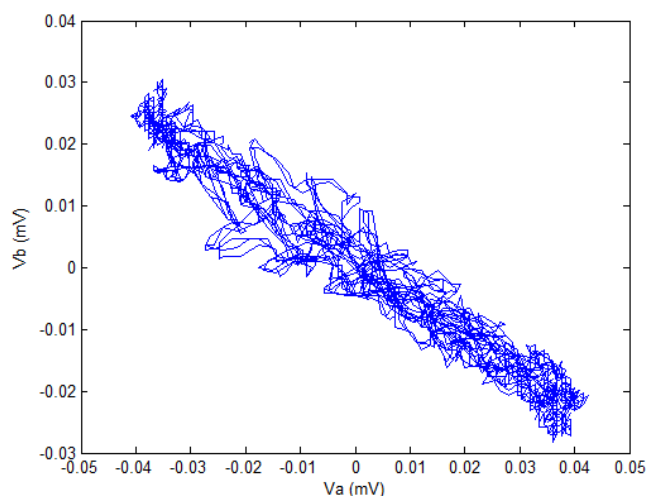
3.12 pav. Guolio su sugadintu išoriniu žiedu vibracijų analizė išskleista Furjė eilute



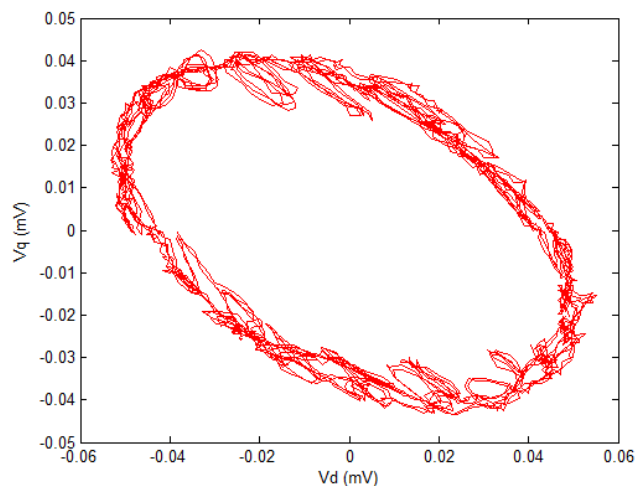
3.13 pav. Visų guolių vibracijų analizė išskleista Furjė eilute. Žali kvadratėliai tai pažeisto guolio dažnių pikai, o raudoni guolio su pažeistu rutuliuku ir separatoriumi

Išskleidus Furjė eilute visus guolių vibracijų spektrus ir juos palyginus, didžiausią įtaką visam varikliui turi pažeistas išorinis guolio žiedas. Didžiausi vibracijų Furjė spektro dažnių pikai kai rutuliukas rieda per pažeistą guolio išorinį žiedą yra 460 Hz dažnyje, 930 Hz dažnyje. Harmonikos atsikartoja 2090Hz dažnyje ir 3900Hz. Taip pat lygininant ir su kontrolinių vijelių metodu išorinio guolio žiedo defektas yra pastebimas, kad turi įtakos oro tarpo magnetinio srauto simetriškumui. Kontrolinių vijelių metodu tiriant variklį guolio rutuliuko ir separatoriaus gedimas nepastebimas, o tiriant vibro davikliu nustatyti 510 Hz, 940 Hz dažnių pikai kada rutuliukas rieda pažeista vieta per griovelį. Dar pastebimos ir atsikartojančios 2590Hz, bei 3700 Hz harmonikos.

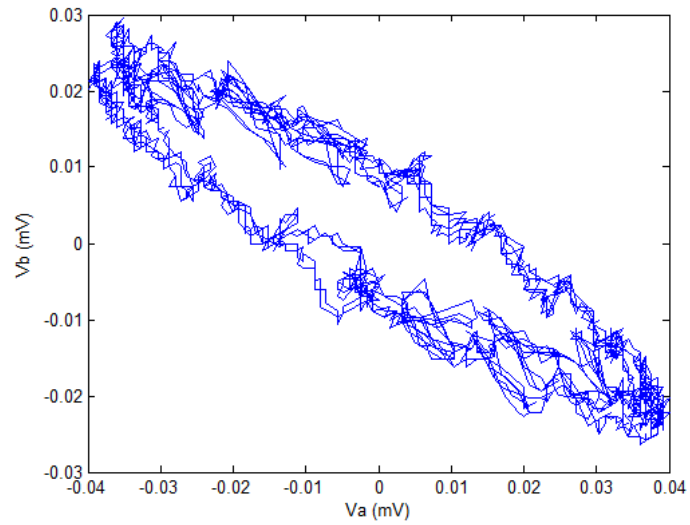
Kontrolinių vijelių metodu variklis ištirtas ir elektrinių gedimų nustatymui. Tuščioje eigoje ir apkrautas, kai yra nutrūkę trys rotoriaus strypai ir yra statoriaus trumpas tarpavijinis jungimas.



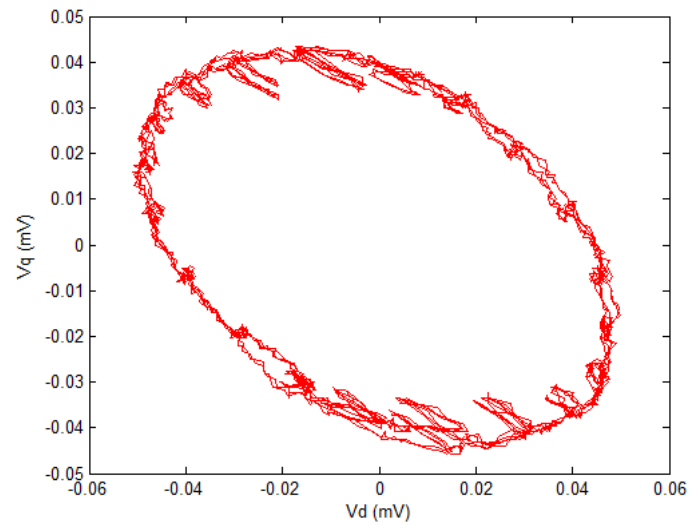
3.14 pav. Clarke transformacija nutrūkusio rotoriaus tuščioje eigoje



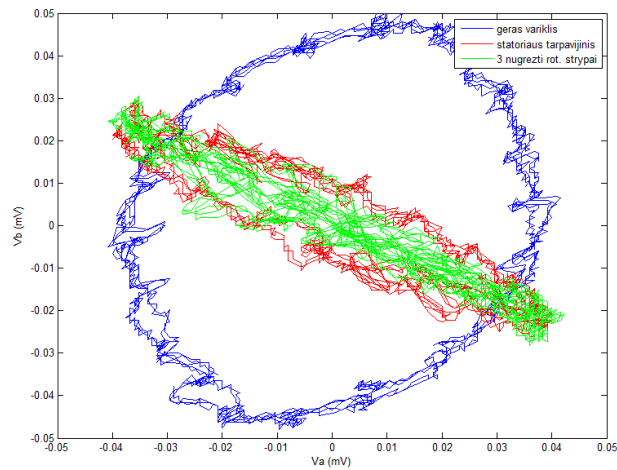
3.15 pav. Park transformacija nutrūkusio rotoriaus tuščioje eigoje



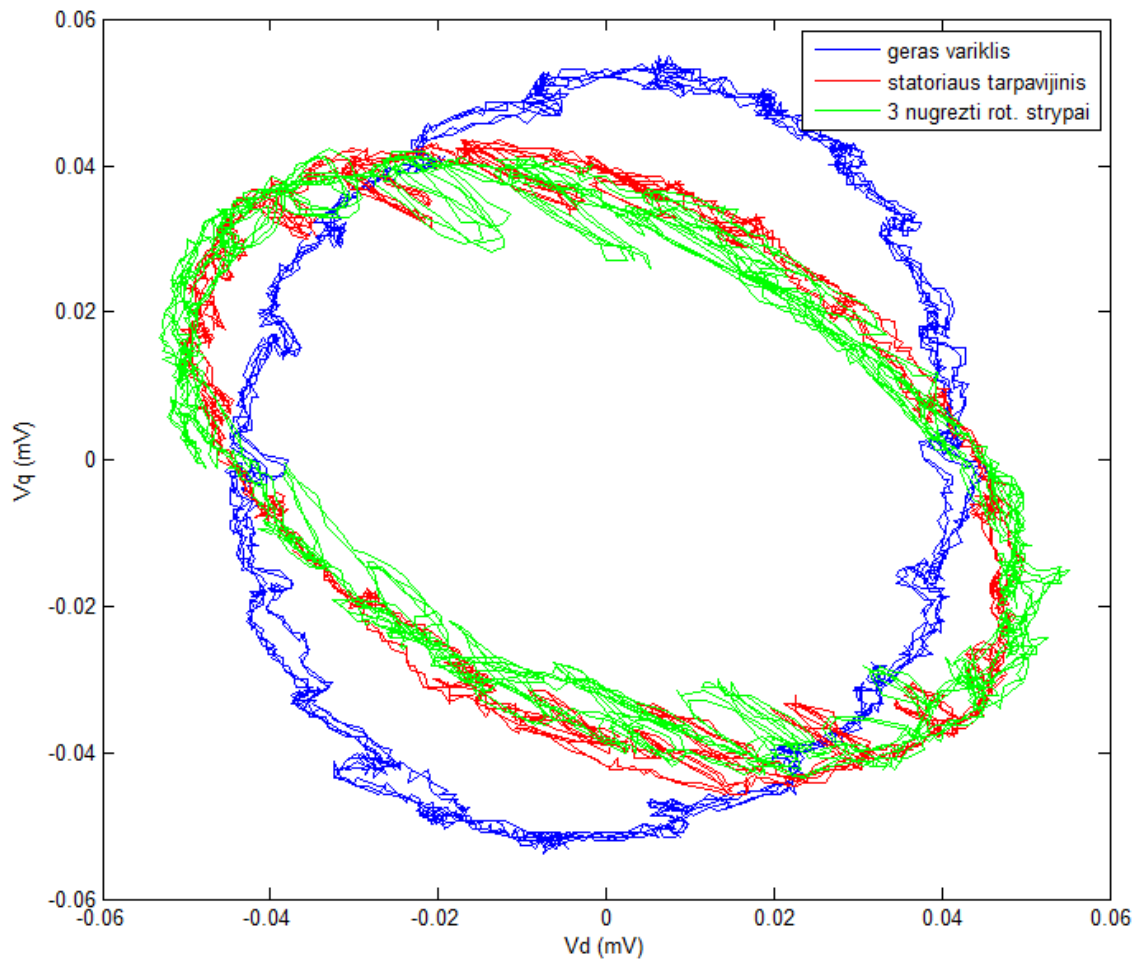
3.16 pav. Clarke transformacija statoriaus tarpvjinio jungimo tuščioje eigoje



3.17 pav. Park transformacija statoriaus tarpvjinio jungimo tuščioje eigoje

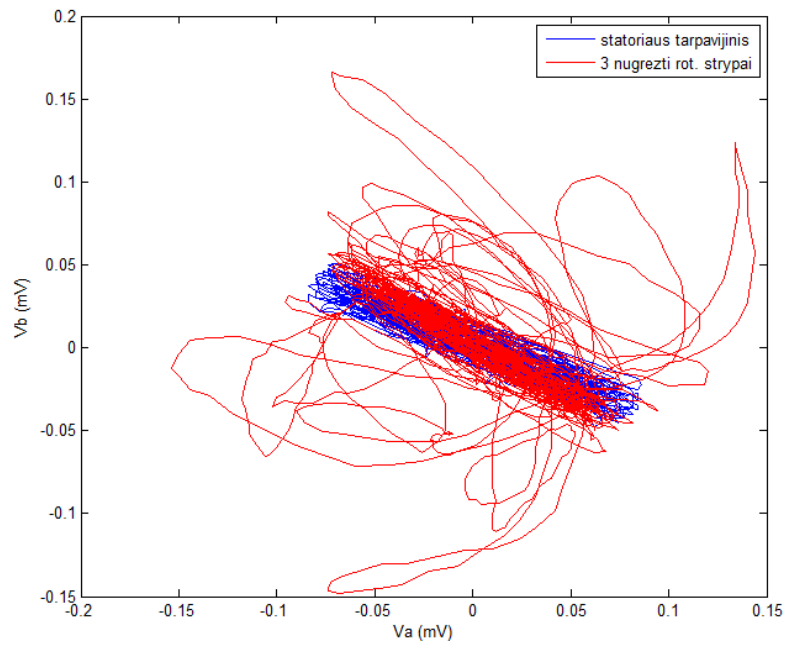


3.18 pav. Clarke transformacija palyginti statoriaus tarpvjininį jungimą su rotoriaus nugrežtais strypais su varikliu be gedimų tuščioje eigoje

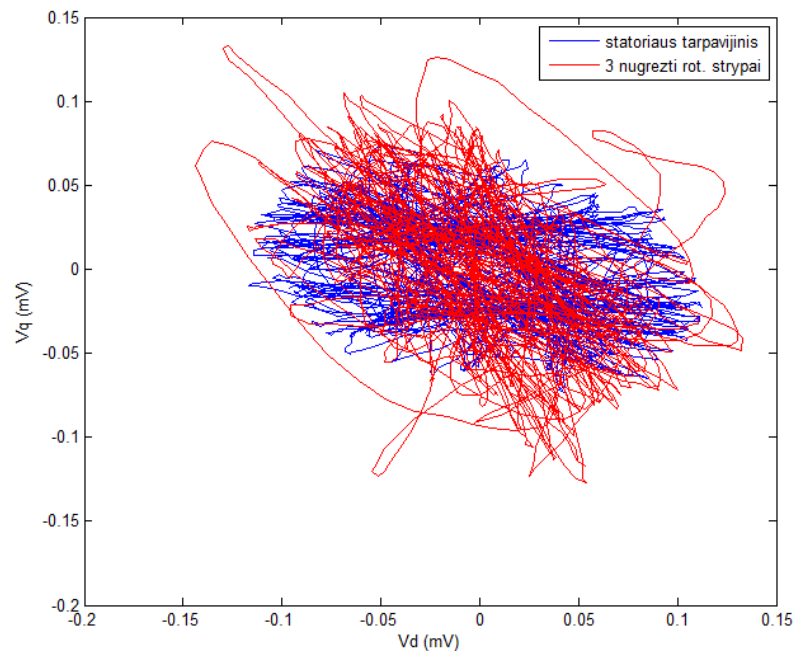


3.19 pav. Park transformacija palyginti statoriaus tarpavijinį jungimą su rotoriaus nugręžtais strypais su varikliu be gedimų tuščioje eigoje

Ištyrus variklį su rotoriaus nugręžtais strypais ir su statoriaus tarpavijiniu jungimu, gautas kontrolinių vijelių įtampas transformavus Clarke ir Parko vektorius matosi elipsiškumas (paveikslėlis 3.18, 3.19). Tai reiškia jog oro tarpe magnetinis srautas nėra simetriškas ir vijelėse indukuojama įtampa nėra simetriška. Rotoriaus su nugręžtais 3-mis strypais y ašyje Parko vektorius lyginant su nesugedusiu varikliu sutrumpėja 0.02 mV, o x ašyje pailgėja 0.015 mV. O kai statoriaus su tarpavijinio trumpo jungimo atveju, Park vektorius y ašyje 0.015 mV trumpesnis, o x ašyje pailgėja 0.012 mV. Taip yra dėl kad šalia rotoriaus nugręžtų strypų šalia esančiuose išauga srovė ir sukdamasis rotorius kuria netolygų oro tarpo magnetinį srautą. Dar labiau matomas oro tarpo nesimetriškumas kai variklis apkrautas numinalia srove, paveikslėliai 3.20 ir 3.21. Pilnai apkrauto variklio su statoriaus tarpavijiniu trumpu jungimu ir nugręžtais 3-mis strypais atlikus vijelių įtampų Park ir Clark transformacijas asimetrija išryškėja dar labiau ir Park vektorius nuokrypa iki 0.125 mV abiejose ašyse.



3.20 pav. Clarke transformacija palyginti statoriaus tarpavijinį jungima su rotoriaus nugrežtais strypais



3.21 pav. Park transformacija palyginti statoriaus tarpavijinį jungima su rotoriaus nugrežtais strypais

IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS

Šiame darbe buvo apžvelgti diagnostikos būdai skirti nustatyti asinchroninių elektros variklių visų tipų gedimams. Išnagrinėjus literatūrą apie variklio oro tarpo magnetinį srautą, pasirinktas metodas ištirti asinchroninį variklį kontrolinių vijelių metodu.

Pasirinktame 7.5 kW galios asinchroniniame variklyje WEG al132m-04 buvo suklotos kontrolinės vijelės ir uždėtas vibrodaviklis. Eksperimentas buvo atliktas su geru guoliu, su guoliu kuriam pažeistas išorinis žiedas, su rotoriumi, kurio 3 strypai buvo nugręžti ir kai variklio statoriuje yra tarpvijinis trumpas jungimas. Variklis su tarpvijiniu jungimu ir nugręžtu rotoriumi buvo bandomas tuščioje veikoje ir nominaliai apkrautas.

Ištyrus nepažeistą variklį matomi 0.005 mV šuoliai dėl įtampos asimetrijos, o Parko vektorius 0.05 mV amplitudės. Atliekant eksperimentą su blogais guoliais didžiausią įtaką oro tarpo magnetiniam srautui turėjo guolis su blogu išorinio guolio žiedu, atsirado 0.005 mV Park vektoriaus šuolis. Ištyrus vibrodavikliu taip pat didžiausi vibracijų Furjė spektro dažnių pikai buvo kai pažeistas guolio išorinis žiedas ir matomi 460 Hz dažnyje, bei 930 Hz dažnyje, o guolio su pažeistu rutuliuku ir separatoriumi nustatyti 510 Hz, 940 Hz dažnių pikai.

Atliekant eksperimentą tuščioje veikoje kai rotorius su nugręžtais 3-mis strypais y ašyje Parko vektorius lyginant su nesugedusiu varikliu sutrumpėja 0.02 mV, o x ašyje pailgėja 0.015 mV. O statoriaus tarpvijinio trumpo jungimo atveju, Park vektorius y ašyje 0.015 mV trumpesnis, o x ašyje pailgėja 0.012 mV. Apkrovus variklį Park vektoriaus nuokrypa padidėja iki 0.125 mV abiejose ašyse.

Rekomendacijos:

Atliekant diagnostiką guoliams vijelių metodu, gana sudėtinga nustatyti guolio gedimus, nes oro tarpo magnetinis srautas kinta nedaug ir vijelių elektrovara kinta tik 0.005 mV arba 0.0025 mV. O iš eksperimento matoma jog guolis su blogu rutuliuku ir separatoriumi įtakos oro tarpo magnetiniam srautui neturėjo ir sutampa su gero guolio Park ir Clark transformacija. Todėl geriau naudoti vibrodaviklius guolių gedimų nustatymui.

Vijelių privalumas yra nustatant elektrinius gedimus, netgi neapkrauto variklio rotoriaus su statoriaus gedimais iškart duoda pokytį oro tarpo magnetiniam srautui ir vijelių indukuota įtampa nėra simetriška. Todėl atlikus Clarke ir Park transformaciją iškart matomas gedimas.

Vijeles galima kloti tik gaminant variklius gamykloje arba atliekant planinius remonto darbus, nes tam reikia išardyti variklį, o įmonėje veikiantys varikliai stabdomi tik planinių darbų metu, nes kitu atveju patiriami dideli nuostoliai.

LITERATŪROS SARAŠAS

1. KARMAKAR. S., S CHATTOPADHYAY S., MITRA M. , SENGUPTA S., Induction Motor and Faults, 2016
2. SIDDIQUI K. M., SAHAY K., V.K.GIRI, Health Monitoring and Fault Diagnosis in Induction Motor, 2014.
3. DIDIER G., TERNISIEN E., CASPARY O., AND RAZIK H., Fault Detection of Broken Rotor Bars in Induction Motor, 2006
4. Schneider Electric , 2003 [žiūrėta 2017m. Gegužės 26 d.] Prieiga per internetą <http://www.schneider-electric.hu/documents/automation-and-control/asg-4-motor-starting-and-protection.pdf>
5. WILLIAM T. THOMPSON, RONALD J. GILMORE, Motor current signature analysis to detect faults in induction machines, 2014.
6. GUNTER E. J., Critical Speed and Unbalance Response Analysis, 2014
7. SHRIVASTAVA A., WADHWANI S., Vibration signature analysis for Ball Bearing of Three Phase Induction Motor, 2012.
8. SHASHIDHARA S.M., RAJU P.S., Stator winding fault diagnosis of three-phase induction motor by Park's vector approach, 2012.
9. FAIZ J., EBRAHIMI B. M., Mixed fault diagnosis in three-phase squirrel-cage induction motor using analysis of air-gap magnetic field, 2006.
10. WESTER C., Motor Protection Principles, 2016.
11. FILIPPETTI F., Induction Motor Diagnosis in Variable Speed Drives, 2010.
12. LACEY S. J., Bearing vibration analysis, 2008.
13. RAVINDRA A. T., NILESH K.K., SHYAM P. M., Vibration analysis of ball bearing, 2014.
14. SHRIVASTAVA A., WADHWANI S., Vibration signature analysis for Ball Bearing of Three Phase Induction Motor, 2012.
15. MEHALA N., Short winding fault detection using Park's vector, 2012.
16. HADEF M., DJERDIR A., IKHLEF N., MEKIDECHE M.R., N'DIAYE A. O., Fault Severity Index for Stator Winding Faults Detection in Vector Controlled PM Synchronous Motor, 2015
17. MILJKOVIĆ D., Brief review of motor current signature analysis, 2015.
18. D. M. SONJE., MUNJE R. K., Rotor cage fault detection in induction motors by current signature analysis, 2011.

19. PECHANEK R., KINDL V., SKALA B., Transient thermal analysis of small squirrel cage motor , 2006.
20. STATON D., ŠUŠNJIĆ L., Induction Motors Thermal Analysis, 2009.
21. HOGAN T., Energy Conversion and Power Electronics, 2009.
22. VAIMANN T., BELAHCENI A., KALLASTE A., Changing of Magnetic Flux Density Distribution in a Squirrel-Cage Induction Motor with Broken Rotor Bars, 2014.