

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

IGNAS ANDRIJAUSKAS

ELEKTROS MAŠINŲ DIAGNOSTIKOS
PRIEMONIŲ SUKŪRIMAS IR TAIKYMAS

Daktaro disertacija
Technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija (T 001)

Kaunas, 2020

Disertacija rengta 2014–2019 m. Kauno technologijos universiteto Elektros ir elektronikos fakulteto katedroje.

Mokslinis vadovas:

Prof. dr. Rimas Adaškevičius (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija (T 001)), 2017–2019 m.

Doc. dr. Vytautas Šiožinys (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija (T 001)), 2014–2017 m.

Interneto svetainės, kurioje skelbiama disertacija, adresas <http://ktu.edu>

Redagavo Gita Kazlauskaitė

TURINYS

Įvadas	5
1 Literatūros apžvalga	7
1.1 Asinchroniniai elektros varikliai	7
1.2 Asinchroninių variklių gedimai	8
1.2.1 Gedimų statistika	9
1.2.2 Guolių gedimai	10
1.2.3 Rotoriaus juostų skilimas	13
1.2.4 Rotoriaus masės disbalansas	14
1.2.5 Statoriaus gedimai	17
1.2.6 Nesubalansuota maitinimo grandinės įtampa	18
1.3 Nusistovėjusio režimo aptikimo metodai	19
1.4 Asinchroninio variklio būsenos analizė	20
1.4.1 Temperatūros analizė	21
1.4.2 Sukimo momento analizė	22
1.4.3 Vibracijų analizė	23
1.4.4 Statoriaus srovės analizė	24
1.4.5 Signalų apdorojimo metodai	26
1.4.6 Kiti	30
1.5 Rotoriaus masės disbalansas	30
1.6 Išvados	31
2 Darbo metodologija	33
2.1 Diagnozuojami gedimai	33
2.2 Siūlomos metodikos taikymas	34
2.3 Asinchroninio variklio matematinis modelis	34
2.3.1 Maitinimo grandinės parametrai	36
2.3.2 Gedimų modeliavimas	36
2.4 Populiariausių asinchroninio variklio gedimų diagnostavimo algoritmas	38
2.4.1 Taškinio guolių gedimo diagnostavimas	40
2.4.2 Pasiskirsčiusio guolių gedimo diagnostavimas	44
2.5 Išvados	47
3 Eksperimentiniai tyrimai	49
3.1 Laboratorinių eksperimentų aprašymas	49
3.1.1 Tyrimams naudotas asinchroninis variklis	49
3.2 Taškinio guolių gedimo tyrimas	51
3.2.1 Matematinis gedimo modeliavimas	51
3.2.2 Laboratorinis eksperimentas	52
3.3 Pasiskirsčiusio guolių gedimo tyrimas	61

3.3.1	Matematinis gedimo modeliavimas	61
3.3.2	Laboratorinis eksperimentas	62
3.4	Statoriaus apvijų gedimo tyrimas	65
3.4.1	Matematinis gedimo modeliavimas	65
3.5	Rotoriaus juostų gedimo tyrimas	67
3.5.1	Matematinis gedimo modeliavimas	67
3.6	Dinaminio rotoriaus masės disbalanso tyrimas	68
3.6.1	Matematinis gedimo modeliavimas	68
3.6.2	Laboratorinis eksperimentas	69
3.7	Išvados	77
	Bendrosios išvados	78
	Literatūra	79
	Mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas	89
	Priedai	90
	A priedas	91
	B priedas	92
	C priedas	93
	D priedas	94
	E priedas	95
	F priedas	98
	G priedas	101

ĮVADAS

Darbo aktualumas

Norint elektros energiją paversti mechanine energija reikalingas energijos keitiklis – variklis. Patys populiariausi pasaulyje yra asinchroniniai varikliai. Šio tipo varikliai išpopuliarėjo dėl paprastumo, atsparumo aplinkai, efektyvumo ir minimalios priežiūros. Nors šie varikliai ir patikimi, jų gedimų išvengti nepavyksta. Neplanuotas variklio stabdymas dėl gedimo dažnai atneša finansinių nuostolių [1].

Įprastai asinchroninių variklių gedimai skirstomi į dvi grupes: elektrinius ir mechaninius [2]. Elektrinius gedimus sudaro trumpieji jungimai (statoriaus ir rotorius apvijose), nesubalansuota tinklo įtampa, nutūkusi apvija. Šie gedimai yra nesunkiai aptinkami analizuojant pagrindinius elektrinius dydžius: įtampą ir srovę. Prie mechaninių gedimų priskiriamas masės disbalansas, oro tarpo (tarp statoriaus ir rotorius) ekscentriškumas, guolių gedimai ir pan. Diagnozuoti mechaninį gedimą analizuojant įtampos ir srovės signalus yra sudėtingesnis uždavinys.

Skirtingų variklio parametrų pokyčiai mašinai dirbant įvykus gedimui ar susidarius nenormaliajai būsenai – daugelio mokslininkų tyrimų objektas. Pagrindinis šių tyrimų tikslas – asinchroninio variklio būklės vertinimas, leidžiantis diagnozuoti ankstyvos stadijos gedimą [3]. Siekdami diagnozuoti gedimus, tyrėjai naudoja įvairius metodus. Iš populiariausių galima paminėti vibracijų, temperatūros, tepalo cheminės sudėties, variklio skleidžiamo triukšmo registravimą ir analizę. Diagnozuojant gedimus visais minėtais metodais reikia specialių, dažnai brangių, jutiklių. Elektros srovės stiprio matavimu ir registravimu grindžiami metodai yra pranašesni už tuos, kuriuos naudojant analizuojami kiti parametrai. Užregistruotas statoriaus srovės signalas naudojamas diagnozuojant gedimus, apskaičiuojant rotorius sukimosi greitį, apsaugant variklį nuo perkaitimo ir t. t. Elektros variklio valdymo ar apsaugos aparatuose dažnai jau yra įmontuotas srovės transformatorius, naudojamas norint užregistruoti arba išmatuoti srovės stiprį. Taigi norint matuoti (registruoti) elektros srovės signalą papildomas srovės transformatorius nereikalingas [4]. Kadangi srovės transformatorius yra variklio valdiklio komponentas, elektros srovės analizė suteikia galimybę spręsti tiek valdymo, tiek ir diagnostikos uždavinius. Be to, srovė matuojama nekontaktiniu būdu, todėl tai gali būti daroma fiziškai nesant arti variklio. Tai yra dar vienas elektros srovės stiprio matavimu grindžiamų metodų pranašumas, nes juos galima taikyti ypač pavojingose aplinkose (pvz., branduolinėse elektrinėse). Įprastai atliekant elektros srovės analizę tiriamas asinchroninio variklio statoriaus srovės dažnių spektras. Ieškoma pakitimų tam tikruose gedimą indikuojančiuose statoriaus srovės dažnių spektro diapazonuose. Literatūroje galima rasti statoriaus srovės dažnių spektro verčių vertinimo metodų, kuriuos naudojant diagnozuojami rotorius juostų skilimo, trumpojo jungimo, guolių, oro tarpo ekscentriškumo ir netolygios apkrovos gedimai. Įdiegus sukurtus metodus galima stebėti elektros mašinos būklę realiuoju laiku net ir kintant apkrovai (vykstant pereinamiesiems procesams).

Darbo tikslas

Šio darbo tikslas – naudojantis žinomais ir šios disertacijos autoriaus sukurtais metodais parengti naują asinchroninio variklio gedimų diagnostikos metodiką, grindžiamą tik statoriaus srovės signalo analize.

Darbo uždaviniai

- sukurti dinaminio rotoriaus masės disbalanso diagnozavimo taikant tik statoriaus srovės signalą metodą;
- sukurti statoriaus srovės savybių, reikalingų asinchroninio variklio taškiniams guolio gedimams diagnozuoti, atrankos metodiką. Tyrimui reikalingas savybes apskaičiuoti taikant tik statoriaus srovės signalo dažnių spektro reikšmes;
- sukurti pasiskirsčiusių variklio guolių gedimų diagnozavimo metodą, kurį taikant sprendimas apie gedimo buvimą priimamas remiantis tik statoriaus srovės signalo analize;
- sukurti apibendrintą diagnostikos algoritmą, apimančią platų asinchroninio variklio gedimų spektrą.

Mokslinis naujumas

Atlikus progresinį dinaminio rotoriaus masės disbalanso simuliacinio eksperimentą, nustatyta informacijos entropijos priklausomybė nuo disbalanso lygio. Mokslinėje literatūroje informacijos apie minėtos priklausomybės tyrimą nebuvo rasta. Parenkant savybes, skirtas taškiniams guolių gedimams diagnozuoti, naudotas gretimų dedamųjų savybių atrankos (GDSA) (angl. *neighborhood component feature selection (NCFS)*) algoritmas. Sukurtas metodas, kuriuo asinchroninio variklio pasiskirsčiusių guolių gedimą galima diagnozuoti remiantis tik statoriaus srovės signalo reikšmėmis. Informacijos apie veiksmingą tokio tipo gedimo diagnozavimą remiantis tik statoriaus srovės signalu nėra.

Darbo aprobavimas ir publikavimas

Disertacijos tema yra išspausdinti du straipsniai žurnaluose, įtrauktuose į *Clarivate Analytics* duomenų bazę ir turinčiuose citavimo indeksą. Tyrimų rezultatai taip pat paskelbti dviejose tarptautinėse konferencijose.

Ginamieji disertacijos teiginiai

1. Kombinuotas informacijos entropijos ir vilnelių paketų transformacijos metodas yra tinkamas rotoriaus masės disbalanso gedimui diagnozuoti.
2. Svarbiausias savybes parinkus pagal GDSA algoritmą, asinchroninio variklio taškinio guolių gedimo diagnozavimo nenustatant jo kilmės patikimumas nepriklauso nuo rotoriaus sukimosi greičio (darbiniame diapazone).
3. Nustatant taškinio guolio gedimo kilmę, rotoriaus sukimosi greitis (darbiniame diapazone) turi įtakos diagnozavimo tikslumui.
4. Registruojant tik asinchroninio variklio statoriaus srovės signalą ir jam pritaikius vilnelių transformaciją ir Welcho periodogramą, galima diagnozuoti pasiskirsčiusių guolių gedimą.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

Elektros varikliai – tai įrenginiai, elektros energiją keičiantys mechanine energija. Jie veikia kaip tarpinė grandis tarp elektros tiekimo linijos ir mechaninės energijos vartotojo.

1.1. Asinchroniniai elektros varikliai

Asinchroninį elektros variklį galima apibūdinti kaip elektros mašiną, turinčią dvi magnetines grandines. Jos yra skirtingose variklio dalyse: viena – stacionariai įtvirtintoje (nejudančioje) variklio dalyje, vadinamoje statoriumi, kita – besisukančioje dalyje, vadinamoje rotoriumi. Galia tarp variklio komponentų perduodama elektromagnetinės indukcijos principu, todėl asinchroninis (indukcinis) variklis vadinamas elektromechaniniu energijos keitikliu, kuris elektros energiją paverčia mechanine [5]. Variklio korpuso galuose rotorius remiasi į guolius. Įprastai statorius ir rotorius turi dvi elektros srovei ir magnetiniam srautui laidžias grandines. Viena grandinė sudaryta iš izoliuotų varinių arba aliumininių laidininkų, ja teka elektros srovė. Kita grandinė skirta magnetiniam srautui praleisti ir yra pagaminta iš laminuotų, magnetiniam srautui laidžių medžiagų [6].

Energija asinchroniniams (indukciniams) varikliams gali būti tiekiami iš vienfazio arba trifazio elektros tinklo. Tai priklauso nuo variklio konstrukcinių savybių. Naudojant įprastus kištukinius lizdus, variklis gali būti prijungtas tiesiogiai prie skirstomojo tinklo. Ši savybė rodo asinchroninio variklio paprastumą. Palyginti su kitų tipų varikliais, asinchroniniai varikliai plačiausiai naudojami pramonėje.

Šiais laikais labai išstobulintos mikroprocesorinės technologijos leidžia asinchroninius variklius valdyti realiuoju laiku, taikant sudėtingus valdymo algoritmus. Taip valdomi varikliai savo tikslumu ir dinaminėmis savybėmis prilygsta nuolatinės srovės varikliams [7]. Asinchroninių variklių valdymo algoritmai leidžia juos pritaikyti pastoviam arba kintančiam rotoriaus sukimosi greičiui ir įvairaus dydžio apkrovoms. Šio tipo variklių galimumo diapazonas – nuo 0,001 iki 1 MW.

Mažos galios (mažiau kaip 500 W) ar nesudėtingoms operacijoms skirti varikliai įprastai naudojami kaip fiksuoto greičio pavaros. Elektros energija jiems tiekiami tiesiai iš tinklo [5, 6]. Didesnio galimumo varikliai komplektuojami su papildoma įranga, paleidimo metu užtikrinančia izoliacijos atsparumo neviršijančią srovę. Paleidžiant variklį srovės stipris gali net kelis kartus viršyti vardinį, o tai sudaro sąlygas įtampos svyravimams elektros energijos tiekimo tinkle [7].

Asinchroniniams varikliams valdyti naudojami dažnio keitikliai. Priklausomai nuo variklio vardinės galios, jie gali būti įvairios galios. Dažnio keitiklio valdymo algoritmai priklauso nuo variklio taikymui keliamų tikslumo ir stabilumo reikalavimų.

Asinchroniniai varikliai klasifikuojami pagal įvairius požymius ir savybes. Pirmasis kriterijus, pagal kurį varikliai skirstomi į dvi kategorijas, yra maitinimo įtampos fazių skaičius. Antrasis kriterijus – rotoriaus tipas. Jis gali būti fazinis, kai srovė į rotoriaus grandinę teka per šepetėlius, arba narvelinis, kai rotoriaus grandinė yra uždara [5, 6]. Jei kintamoji elektros srovė teka statoriaus apvijomis ir tarp trijų fazių yra 120° skirtumas, statoriuje yra kuriamas besisukantis magnetinis laukas. Šis laukas taip pat skverbiasi ir į rotoriaus narvelį. Besisukantis magnetinis laukas rotoriaus juostose indukuoja elektrovarą. Kadangi juostos yra trumpai jungtos, jomis ima tekėti srovė.

Juostos, kuriomis teka srovė, yra statoriaus magnetiniame lauke. Dėl šios priežasties kiekvieną rotoriaus juostą ima veikti Lorentzo jėga. Jėgos veikia rotorijų liestines kryptimi. Rotorius ima sukintis statoriaus magnetinio lauko kitimo kryptimi, tačiau rotoriaus sukimosi greitis atsilieka nuo statoriaus magnetinio lauko sukimosi

(synchroninio) greičio. Dėl šios priežasties variklis vadinamas asinchroniniu [2].

Santykinis skirtumas tarp statoriaus elektromagnetinio lauko kitimo dažnio ir rotoriaus sukimosi kampinio dažnio vadinamas slydimu, jis apskaičiuojamas [8]:

$$s = \frac{n_d - n_r}{n_d} \cdot 100 \% ; \quad (1.1)$$

čia: s – slydimas, n_d – synchroninis greitis (Hz), n_r – rotoriaus sukimosi greitis (Hz). Slydimo vertė priklauso nuo apkrovos. Esant nulinei apkrovai slydimas būna labai mažas.

Srovei tekant trimis fazinėmis apvijomis, magnetinis statoriaus laukas turi šiaurės ir pietų polių. Tokiu atveju variklis turi vieną polių porą. Esant tam pačiam maitinimo grandinės įtampos dažniui, statoriaus magnetinio lauko sukimosi greitis priklauso nuo polių porų skaičiaus pp . Kadangi rotorius sukasi magnetinio lauko sukimosi greičiui artimu greičiu, tai nuo polių porų skaičiaus priklauso ir mechaninis variklio rotoriaus sukimosi greitis. Magnetinio lauko greitis yra vadinamas synchroniniu greičiu ir žymimas n_d . Jį galima apskaičiuoti naudojantis išraiška [8]:

$$n_d = \frac{60 \cdot f}{pp} ; \quad (1.2)$$

čia: f – maitinimo grandinės įtampos dažnis (Hz).

Eksplotacija

Vienos rūšies energiją keičiant kita nepavyksta išvengti nuostolių. Visi nuostoliai variklyje sudaro suminius nuostolius ir yra žymimi $P_{\Sigma loss}$. Asinchroninių variklių suminius nuostolius sudaro tokios nuostolių grupės [2]:

- trinties ir oro pasipriešinimo nuostoliai, $(5-15 \%) \cdot P_{\Sigma loss}$;
- nuostoliai dėl sūkurinių srovių šerdyje, $(15-25 \%) \cdot P_{\Sigma loss}$;
- statoriaus nuostoliai, $(25-40 \%) \cdot P_{\Sigma loss}$;
- rotoriaus nuostoliai, $(15-25 \%) \cdot P_{\Sigma loss}$;
- nuostoliai, susiję su klaidžiojančiosiomis srovėmis ir laidžiomis korpuso dalimis (angl. *stray load losses*), $(10-20 \%) \cdot P_{\Sigma loss}$.

Visiškai apkrauto, nominaliu greičiu besisukančio asinchroninio variklio naudingumo koeficientas siekia 85–97 %.

Asinchroninis variklis, palyginti su kitais varikliais, išsiskiria paprastumu, pigumu ir efektyvumu. Varikliui su narveliniu rotoriumi, palyginti su varikliu su faziniu rotoriumi, būdingas atsparumas aplinkos poveikiui ir efektyvumas. Jei įtampa maitinimo grandinėje yra pastovaus dažnio, tai asinchroninis variklis su narveliniu rotoriumi sukasi pastoviu greičiu.

1.2. Asinchroninių variklių gedimai

Asinchroniniai varikliai, palyginti su kitų tipų varikliais, yra patikimesni, jiems reikia mažiau priežiūros. Tačiau jie taip pat kartais sugenda ir sustabdo svarbų procesą ar gamybos liniją.

Asinchroninių variklių gedimus galima suskirstyti į tris kategorijas [2]:

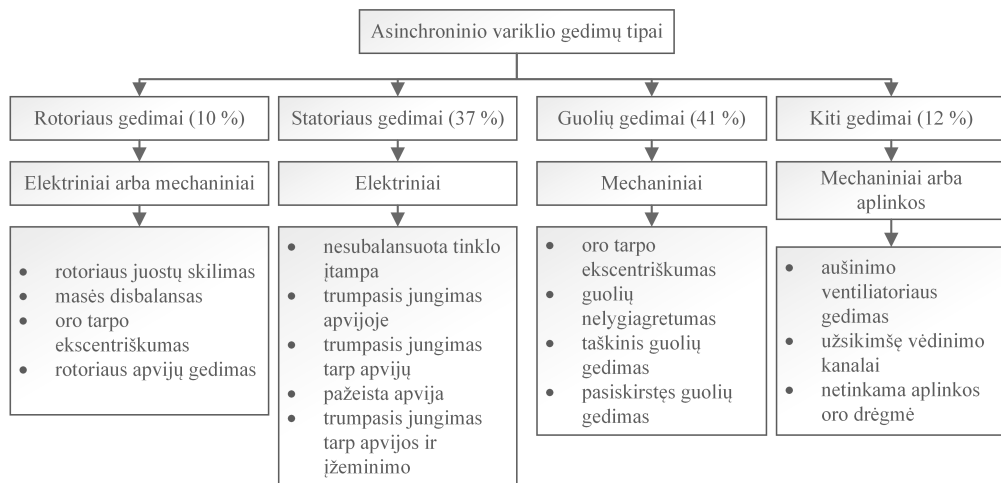
- elektriniai gedimai (nesubalansuota įtampa ar srovė maitinimo grandinėje, viršįtampiai ar per žema maitinimo grandinės įtampa, maitinimo grandinės fazių sekos pakitimas, įžeminimo gedimai, perkrovos, trumpasis jungimas tarp apvijų, dėl 7-os srovės harmoninės dedamosios atsiradęs lėtas rotoriaus sukimasis – savisuka (angl. *crawling*));

- mechaniniai gedimai (rotoriaus juostų skilimas, rotoriaus masės disbalansas, oro tarpo tarp statoriaus ir rotoriaus ekscentriškumas, guolių pažeidimai);
- gedimai dėl aplinkos poveikio (netinkamos aplinkos temperatūros, oro drėgmės; elektros mašinos vibracijos, atsiradusios dėl aplinkos veiksnių).

Vienu metu gali įvykti keletas asinchroninio variklio gedimų, todėl diagnozuoti pirminį gedimą ir jo kilmę ar priežastį dažnai yra sudėtinga [9]. Dėl tokių kompleksinių gedimų statoriaus apvijose pasireiškia srovių ir sukimo momento verčių svyravimai, perkaitimas ir pernelyg didelė vibracija [10]. Minėti gedimai sukelia įtampų ir srovių amplitudinių verčių pokyčius. Bet kuris iš prieš tai minėtų gedimų gali stipriai paveikti sklandų asinchroninio variklio veikimą.

1.2.1. Gedimų statistika

Pramonės įmonėse atliktos apklausos rodo, kad dažniausiai gendančios asinchroninių variklių dalys yra statorius, rotorius ir guoliai [11]. Gedimų priežastys ir dažnis, išreikštas procentais, pateikiami 1.1 paveiksle. Šiame paveiksle gedimų tipai suklasifikuoti pagal gedimų prigimtį. Kitų apklausų rezultatai pateikiami 1.1



1.1 pav. Asinchroninio variklio gedimų tipai ir jų pasiskirstymas

lentelėje [12, 13]. Asinchroninių variklių gedimų dažnio pagal tipą apklausas pramonės įmonėse atliko Elektrotechnikos ir elektronikos inžinierių instituto (angl. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) (IEEE) Taikomosios pramonės draugija (angl. *Industrial Application Society*) ir Elektros energijos tyrimų institutas (angl. *Electrical Power Research Institute*) (EETI). Vienas gedimas gali būti kitų

1.1 lentelė. Asinchroninio variklio gedimų pasiskirstymas (pramonės įmonėse atliktos apklausos rezultatai)

Gedimo tipas	Gedimai pagal IEEE-TPB, %	Gedimai pagal EETI, %
Guolių	44	41
Statoriaus	26	36
Rotoriaus	8	9
Kiti	22	14

variklio gedimų priežastis. Dažnai įvykus smulkiam gedimui, variklis gali veikti toliau, gadindamas kitus variklio komponentus. Pavyzdžiui, atliekant eksperimentą, buvo simuliuojama nesubalansuota tinklo įtampa ir pastebėta, kad skirtingai dyla apvijų izoliacija, o tai lemia trumpąjį jungimą statoriaus apvijose [14].

1.2.2. Guolių gedimai

Asinchroniniame variklyje įprastai yra du guolių komplektai. Išorine dalimi guolis remiasi į variklio dangtelį, pritvirtintą prie statoriaus. Vidine dalimi guolis užmaunamas ant veleno, kuris yra konstrukcinė rotorius dalis. Vienintelės detalės, per kurias statorius yra mechaniškai sujungtas su rotoriumi, yra guoliai [2]. Guolių paskirtis – fiksuoti rotorius padėtį ir sumažinti trintį. Kiekvienas guolis sudarytas iš išorinio ir vidinio bėgelių bei šratų, išdėstytų tarp bėgelių. Įprastai guolio vidinis bėgelis remiasi į veleną ir apkrova perduodama per besisukančius elementus – taip sumažinama trintis. Siekiant dar labiau sumažinti trintį, tarp tarp vidinio ir išorinio bėgelių sutepama specialia alyva. Bet koks fizinis šrato, vidinio ar išorinio žiedų pažeidimas laikomas guolių gedimu [2]. Vertinant visus asinchroninių variklių gedimus, guolius galima laikyti silpniausiu variklio sudedamąjį dalimi (komponentu). Šio tipo gedimų pasitaiko dažniausiai. Apie 41–42 % asinchroninio variklio gedimų yra susiję su guoliais (žr. 1.1 lentelę ir 1.1 paveikslą) [12, 13].

Guolių gedimų klasifikavimas

Guolių gedimus anksčiau buvo įprasta klasifikuoti pagal tai, kurioje tiksliai guolio vietoje jie atsiranda. Šio klasifikavimo trūkumas – tai, kad didelė dalis gedimų tikslios vietos neturi. Šią problemą išvėlgė ir kitokį sprendimą pasiūlė R. Stackas su kolegomis [15]. Pasiūlytas naujas klasifikavimas buvo pripažintas pasaulyje ir nuo 2004 m. yra visuotinai naudojamas aprašant guolių gedimus mokslinėje literatūroje.

Klasifikavimas grindžiamas taisykle, kad visus guolių gedimus galima suskirstyti į dvi pagrindines kategorijas – taškinius (angl. *single-point*) ir pasiskirsčiusius (angl. *generalized roughness*). Taip skirstoma remiantis gedimą indikuojančiais parametrais. Analizuojant statoriaus srovės signalo dažnių spektrą, gedimą indikuojančių parametrų vertės gali būti aiškiai pastebimos (konkretus dažnis) arba pasiskirstę spektro intervaluose. Taikant šį metodą analizuojami statoriaus srovės arba variklio korpuso vibracijos signalai.

Pasiūlytoje klasifikacijoje taškinis gedimas apibrėžiamas kaip gedimas, esantis vienoje aiškioje guolio elemento paviršiaus vietoje. Gedimo vietą supa nepažeisti paviršiai. Kaip pavyzdį galima paminėti griovelį, įbrėžimą ar duobelę. Dėl taškinio gedimo statoriaus srovės ar variklio korpuso vibracijos signale atsiranda specifinio dažnio dedamoji. Specifinis dažnis yra aiškiai apibrėžtas ir priklauso nuo to, kuriame paviršiaus taške atsirado gedimas. Jis gali atsirasti vidiniame arba išoriniame bėgelyje, šrate arba narvelyje, laikančiame šratus [16]. Dauguma mokslininkų, nagrinėjančių guolių gedimus, atlieka taškinių guolių gedimų analizę. Tačiau statoriaus srovė nėra tiesiogiai veikiamą vibracijų. Dažninės dedamosios srovės spektre atsiranda dėl reliatyviojo rotorius judėjimo statoriaus atžvilgiu. Rotoriui judant, keičiasi oro tarpas tarp statoriaus ir rotorius ir dėl to iškraipomas statoriaus srovės signalas. Analizuojant statoriaus srovę vertinama dažninės dedamosios amplitudinė vertė. Ji yra gedimo diagnozavimo kriterijus.

Vienas populiariausių taškinių guolių gedimų diagnozavimo metodų yra vibracijų analizė. Taikant šį metodą galima diagnozuoti ir taškinius [17], ir pasiskirsčiusius [18] guolių gedimus. Pagrindiniai vibracijų analize grindžiamų metodų trūkumai yra būtinybė fiziškai pasiekti variklio korpusą, papildomų jutiklių reikalingumas ir priklausomybė nuo aplinkos triukšmo [19].

Guolių gedimus galima diagnozuoti registruojant akustinę emisiją [20]. Šiam metodui, palyginti su vibracijų analize, būdingas didesnis atsparumas triukšmams. Pagrindiniai metodo trūkumai yra didelė kaina ir specialiųjų žinių poreikis norint taikyti šį metodą. Žinoma, kad sugedęs guolis skleidžia akustinį triukšmą, todėl vienas iš diagnostikos metodų taip pat yra triukšmo matavimas. Svarbu atkreipti dėmesį, kad akustinio triukšmo registravimas yra neinvazinis metodas [21]. Gedimo diagnozavimas gali būti netikslus, jei vienoje patalpoje vienu metu veikia keli varikliai, o tokia situacija pramonėje yra ypač dažna.

Guolių gedimų priežastys ir padariniai

Dažniausi guolių gedimai, jų priežastys ir padariniai yra šie:

1. Pernelyg didelė apkrova, tvirtas įveržimas (angl. *tight fits*) ir pernelyg aukšta aplinkos temperatūra. Dėl visų trijų priežasčių gali perkaisti guolių plienas. Taip pat gali būti pažeista ar net visiškai sunaikinta alyva. Jei apkrova viršija guolių medžiagos elastinį atsparumą, atsiranda išgraužų.
2. Plieno (guolių) mechaninis nuovargis. Tai įvyksta guolius naudojant ilgą laiką. Gedimo priežastis – smulkios dalelės, atsirandančios šratui besitrinant į žiedus. Šio tipo gedimas yra progresuojantis, tai yra atsiradusios smulkios dalelės pradeda ardyti paviršius ir didinti gedimo mastą. Dėl šio gedimo atsiranda vibracijos ir padidėja triukšmo lygis [22].
3. Korozija įvyksta, jei guolis yra neapsaugotas nuo korozinių skysčių (rūgšties ir t. t.) arba korozinės aplinkos. Gedimas taip pat gali įvykti, jei pablogėja tepimas (dėl alyvos lygio, kokybės) arba guoliai montuojami nesilaikant reikalavimų [22]. Dėl korozijos gali pasireikšti ankstyvos stadijos guolių mechaninis nuovargis.
4. Priemaišos alyvoje. Tai vienas iš dažniausių guolių gedimų. Tepamojoje alyvoje atsiranda kietųjų dalelių: dulkių, plieno drožlių, rūdžių, purvo ir kitų pramoninėje aplinkoje pasitaikančių medžiagų. Šio gedimo padariniai yra padidėjusi vibracija ir guolių dilimas.
5. Gedimas dėl padidėjusios trinties guoliuose įvyksta sumažėjus alyvos kiekiui arba esant per aukštai guolių temperatūrai. Esant alyvos trūkumui kyla temperatūra, esant aukštai temperatūrai prastėja alyvos tepimo savybės ir ji lydosi. Lydantis jos kiekis dar labiau mažėja, o temperatūra dar labiau kyla. Šio gedimo simptomas – pakitusi guolių žiedų ir šratų spalva.
6. Guolių asimetrija. Rotoriaus sukimosi ašis ir abi guolių ašys turi sutapti. Jei vienas iš guolių įmontuotas netinkamai, jo ašis nesutampa su kito guolio ašimi. Dėl to guolio žieduose atsiranda griovelų, pažeidžiamas šratų paviršius.

Siekiant diagnozuoti guolių gedimus, dar gali būti analizuojama cheminė guolių alyvos sudėtis [23]. Tiesa, šis metodas taikomas tik sąlygiškai didelės galios (> 35 kW) varikliams su priverstinio tepimo guoliais.

Statoriaus srovė naudojama taikant prognozuojamosios analizės metodą (angl. *predictability analysis method*) [24]. Šis metodas grindžiamas santykinė informacijos entropijos reikšme, apskaičiuojama srovės signalui pritaikius vilnelių paketų transformaciją. Duomenys klasifikuojami naudojantis dirbtiniu neuroniniu tinklu. Metodo rezultatai atrodo teikiantys vilčių, tačiau reikia įvertinti tai, kad duomenys, skirti analizei, buvo simuliuojami taikant matematinius modelius. Vertėtų

atlikti eksperimentą, kurio rezultatai patvirtintų metodo patikimumą. Kitas metodas, grindžiamas statoriaus srovės signalo analize, yra dviejų metodų kombinacija [25]: stacionariosios vilnelių paketų transformacijos ir orientuotųjų aciklinių grafų – atraminių vektorių mašinos (angl. *directed acyclic graph - support vector machine (DAG-SVM)*). Vertinant metodo efektyvumą buvo atliekamas eksperimentas ir dirbtinai sukelti keturi skirtingi guolių gedimai. Šio metodo pranašumu galima laikyti tai, kad eksperimentas atliktas taikant kintamo dydžio apkrovą.

Vertas paminėti dar vienas tyrimas, kuriuo taip pat sujungus skirtingus metodus analizuojami du, skirtingai sugadinti, guoliai [26]. Kaip ir prieš tai minėtame tyrime, autoriai naudoja vilnelių paketų transformaciją ir atraminių vektorių mašinas. Šio tyrimo pranašumas yra tai, kad analizė atliekama esant skirtingam rotorius sukimosi greičiui. Pagrindinis trūkumas – tai, kad klasifikatoriui pateikiama tik efektinė transformuoto signalo vertė. Tai mažina klasifikatoriaus galimybes.

Vertinant pramonėje naudojamus variklius gerokai didesnė tikimybė, kad guolio paviršiuje atsiras įbrėžimas, nei kad jo paviršiuje atsiras skylė [27]. Šiuo metodu autoriai gedimus (guolio paviršiaus įbrėžimus) diagnozuoja kombinuodami sparčiąją Fourier transformaciją ir atraminių vektorių mašinas. Tas pats metodas yra tinkamas ir diagnozuojant dirbtinai sukeltą gedimą, kai guolio paviršiuje išgręžiama skylė [28]. Tai įrodo, kad metodas yra universalus ir tinka nepriklausomai nuo gedimo prigimties. Autoriai taip pat teigia, kad, esant dirbtinai sukeltam gedimui ir jo nesant, lyginamos statoriaus srovės dažnių spektro dedamosios (apskaičiuotos pagal [18]) nesiskyrė.

Pasiskirsčių guolių gedimų grupei priskiriami gedimai yra dažniau pasitaikantys, tačiau mokslinėje literatūroje mažai nagrinėjami. Pasiskirstęs gedimas išsiskiria tuo, kad gedimo vietos guolyje nurodyti negalima. Gedimas yra pasiskirstęs per visą didelę guolio paviršiaus ploto dalį. Prie pasiskirsčių gedimų priskiriamas alyvos trūkumas ar alyvoje atsiradusios priemaišos. Šio gedimo padariniai (indikaciniai ženklai) sunkiai nuspėjami, ir jo identifikavimas esant ankstyvai stadijai yra sudėtingas uždavinys. Svarbu paminėti, kad šio tipo gedimai nesukelia būdingojo dažnio vibracijų. Tačiau esant įsisenėjusiam gedimui (priartėjus prie avarijos), jį galima diagnozuoti naudojant [29] aprašytus, vibracijos matavimais grindžiamus, diagnostikos metodus.

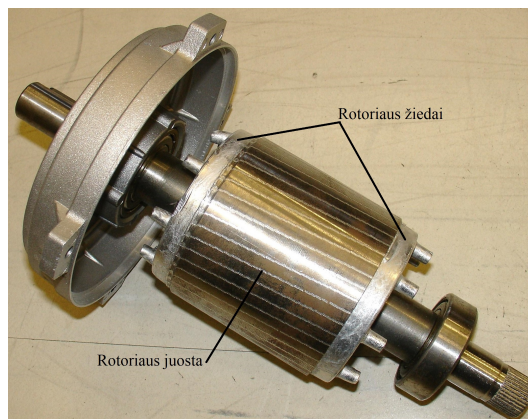
Įvykus pasiskirsčiam guolių gedimui, statoriaus srovė pakinta, tačiau nėra iširta, pagal kokius konkrečius simptomus būtų galima diagnozuoti šį gedimą. Nagrinėtoje literatūroje didelis dėmesys skiriamas srovės signalo filtravimui pašalinant žinomas kilmės dažnines dedamąsias [30, 31]. Viename iš darbų [30] kaip adaptyvųjį statoriaus srovės signalo triukšmo filtrą tyrėjai naudoja Wienerio filtrą. Statoriaus srovė registruojama 15 minučių intervalais, kai variklis veikia nusistovėjusiu režimu. Statoriaus srovės signalui pritaikius filtrą, jis normalizuojamas ir apskaičiuojama efektinė vertė. Efektinė vertė leidžia vertinti guolio degradaciją: statistiškai lyginant efektinę vertę su prieš tai buvusiomis vertėmis, galima diagnozuoti guolio gedimą. Eksperimentas atliktas tam pačiam algoritmui naudojant statoriaus srovės ir variklio vibracijos signalus. Taikant skirtingus signalus gauti analogiški rezultatai leidžia daryti išvadą, kad statoriaus srovės signalas yra tinkamas norint diagnozuoti pasiskirsčius guolių gedimus. Pagrindinis aprašyto metodo trūkumas yra tai, kad gedimui diagnozuoti autoriai naudoja tik vieną parametą (efektinę filtruoto signalo amplitudę) – tai siaurina metodo taikymo galimybes. Dar vienas trūkumas yra tai, kad variklio gedimą galima diagnozuoti nuolat atliekant matavimus ir lyginant rezultatus su sukauptais duomenimis. Daugiau parametų leistų ne tik tiksliau diagnozuoti gedimą, bet ir iširti jų tarpusavio ryšį.

Kitame analizuotame darbe statoriaus srovės signalas filtruojamas taikant

tiesinės prognozės (angl. *linear prediction*) metodą [31]. Apskaičiuojamas filtruoto statoriaus srovės signalo eksceso (angl. *kurtosis*) koeficientas ir dažnių spektras. Pasiskirsčiusiam guolių gedimui diagnozuoti statoriaus srovės dažnių spektras nenaudojamas. Vienintelis parametras, kurį analizuojant atliekama diagnozė, yra eksceso koeficientas. Tyrimo rezultatai rodo, kad įmanoma diagnozuoti pasiskirsčiusį guolių gedimą naudojantis eksceso koeficientu, tačiau neįmanoma išskirti gedimo iš kitų guolių gedimų (taškinių). Šiam metodui būdingas toks pats trūkumas kaip ir prieš tai apžvelgtam, nes gedimui diagnozuoti pasirinktas tik vienas parametras (savybė). Abiejų [30, 31] tyrimų rezultatai leidžia daryti išvadą, kad dėl pasiskirsčiusio gedimo pakinta statoriaus srovės signalas, todėl jis gali būti naudojamas šiam gedimui diagnozuoti. Pastebėta, kad dėl bet kurio guolių gedimo padidėja trintis, dėl kurios kyla guolių temperatūra ir atsiranda vibracija. Dėl to metodai, kuriais galima diagnozuoti guolių gedimus, dažnai yra grindžiami temperatūros ir vibracijos matavimu [22, 32].

1.2.3. Rotoriaus juostų skilimas

Asinchroninio variklio narvelinis rotorius yra sudarytas iš varinių arba aliumininių rotoriaus juostų, kurios abiejuose galuose sujungtos srovei laidžiu žiedu (žr. 1.2 paveikslą). Jei viena arba kelios iš juostų yra įskilusios arba nutrūkusios, diagnozuojamas rotoriaus juostų skilimo gedimas.



1.2 pav. Asinchroninio variklio rotorius su pažymėta juosta, variklio dangtelis, guoliai [33]

Rotoriaus juostos gali skilti dėl daugelio priežasčių. Buvo pastebėta, kad rotoriaus asimetrija dažniausiai atsiranda variklio gamybos proceso metu. Pavyzdžiui, lituojant juostas su žiedais gali pasitaikyti netolygus lydinio metalo įtempis. Be to, sąlygiškai sunkūs galiniai žiedai, esant dideliems sukiamams, yra veikiami išcentrinės jėgos. Jei išcentrinė jėga viršija variklio atsparumą, rotoriaus juostų ir žiedų sujungimo vieta gali skilti. Dažniausiai dėl minėtų priežasčių trūkus rotoriaus juostai, srovė rotoriaus grandinėje ima tekėti nesimetriškai. Be to, kai variklis ilgą laiką veikia esant daliniam skilimu, pažeidimo vieta ima kaisti ir dėl to rotoriaus juosta nutrūksta. Jei viena iš juostų trūksta, ją supančios sveikos juostos praleidžia didesnę srovę ir dėl to pakyla rotoriaus temperatūra. Be to, juostos yra veikiamos didesnės mechaninės jėgos. Jei gedimas ignoruojamas ir variklis toliau naudojamas, taip pat gali skilti perkrautos gretimios juostos [34]. Gedimas plinta, skirtingose vietose sugadinama visa rotoriaus grandinė. Trūkimo vieta sunkiai prognozuojama. Skilimas gali atsirasti juostoje, jungiamuosiuose žieduose ar juostų

ir žiedų sujungimo vietoje. Taip pat verta paminėti, kad skilimo tikimybė padidėja paleidžiant variklį. Dėl to šis gedimas dažniau pasitaiko ilgo paleidimo laiko varikliams (varantiems didelės inercijos apkrovą) arba dažnai stabdomiems ir paleidžiamiems varikliams [35]. Dažniausios rotoriaus juostų skilimo priežastys yra šios:

- gamybos defektai,
- šiluminiai įtempiai,
- mechaniniai įtempiai dėl guolių gedimų,
- dažnas variklio paleidimas naudojant tinklo įtampą (be specialios paleidimo įrangos),
- laidininko mechaninis nuovargis (angl. *fatigue of metal*).

Rotoriaus juostų skilimo gedimo įtaka srovės signalui

Skilus arba trūkus juostai, rotorius generuoja specifines srovės dedamąsias, kurias galima aptikti analizuojant statoriaus srovės dažnių spektrą. Siekdami padidinti diagnozavimo patikimumą, tyrėjai rekomenduoja analizuoti aukšto dažnio harmonines dedamąsias [36]. Analizuotame darbe autoriai įrodo, kad dėl rotoriaus srovės srauto pakitimo indukuojama pagrindinė dedamoji $(1-2s)f$ (kur s – slydimas, f – maitinimo grandinės dažnis), o likusi šalinė juosta (angl. *sideband*) atsiranda dėl greičio ir sukimo momento verčių svyravimo [37]. Taip pat svarbu paminėti, kad likusi šalinė juosta yra jautri asinchroninio variklio rotoriaus inercijai. Siekiant įvertinti gedimo lygį, atliktas tyrimas [38], kuriuo analizuoti elektromagnetinio sukimo momento, erdvinio srovės vektoriaus ir momentinės galios signalai. Pasiūlytas metodas leidžia įvertinti gedimo lygį. Kadangi gedimą indikuojančios dažnių spektro dedamosios, palyginti su fundamentaliojo dažnio dedamąja, amplitudinė vertė yra žema, autoriai [39] siūlo gedimą diagnozuoti registruojant variklio paleidimo momentą, kai srovės stipris gerokai didesnis. Užregistruotoms statoriaus srovės signalo vertėms pritaikoma vilnelių transformacija. Atlikus transformaciją gaunamas koeficientas, atitinkantis analizuojamą signalą konkrečiame dažnio diapazone, į kurį patenka dažnis. Tada analizuojama gauto koeficiento ketera. Parametrai, gauti analizuojant keterą, naudojami gedimui diagnozuoti. Siūlomo metodo trūkumas yra tai, kad nėra eksperimento, kuris patvirtintų jo tinkamumą.

Pagrindinis trūkumas naudojant statoriaus srove grindžiamus rotoriaus juostų gedimų diagnostikos metodus yra tai, kad svyruojanti apkrovos vertė gali indukuoti tokių pačių dažnių sroves kaip ir gedimas [40]. Esant tokiai situacijai galimas klaidingas diagnozavimas.

1.2.4. Rotoriaus masės disbalansas

Iš asinchroninio variklio konstrukcijos (žr. 1.1 skyrių) žinoma, kad rotorius yra statoriaus viduje, o jo sukimosi ašis sutampa su statoriaus ašimi. Rotorius yra simetriškas savo sukimosi ašies atžvilgiu. Subalansuoto asinchroninio variklio rotoriaus sukimosi ašis sutampa su geometrine statoriaus ašimi. Dėl šios priežasties oro tarpas tarp rotoriaus išorinės ir statoriaus vidinės dalies yra tolygus. Tačiau jei rotorius nesimetriškas savo sukimosi ašies atžvilgiu arba sukimosi ašis nesutampa su statoriaus geometrine ašimi, oro tarpas tarp statoriaus ir rotoriaus tampa netolygus. Šis gedimas vadinamas oro tarpo ekscentriškumu (angl. *air gap eccentricity*). Tai dažnas gedimas, priskiriamas prie rotoriaus gedimų kategorijos. Oro tarpo ekscentriškumas gali atsirasti dėl įvairių rotoriaus gedimų, pavyzdžiui, dėl rotoriaus masės disbalanso, rotoriaus išlinkimo ir t. t. Dėl atsiradusio netolygaus oro tarpo elektromagnetinė jėga (angl. *electromagnetic pull*) taip pat bus nesubalansuota.

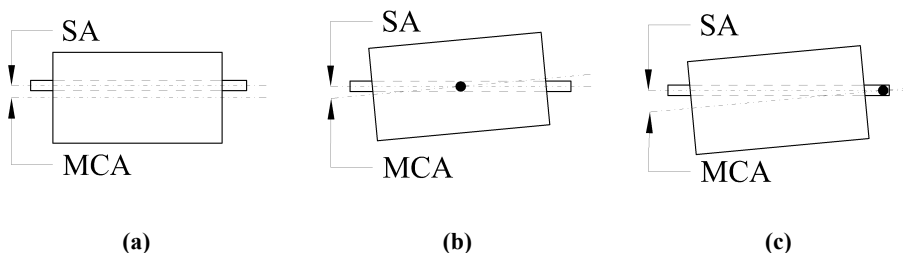
Rotoriaus dalį (pusę), kurioje oro tarpas mažiausias, veiks stipresnė jėga, palyginti su priešinga puse, kurioje oro tarpas didžiausias [35]. Didžiausia rotoriaus išlinkimo (angl. *pull over*) tikimybė yra paleidžiant variklį, kai srovės stipris didžiausias. Išskirtiniais atvejais (ypač kai variklio galia didelė) rotorius gali susiliesti su statoriumi. Įvykus tokiam gedimui pažeidžiami rotoriaus ir statoriaus paviršiai. Oro tarpo ekscentriškumas taip pat gali pasireikšti triukšmu ir (arba) vibracijomis.

Dažniausiai rotoriaus masės disbalansas yra gamybos metu atsiradusių defektų padarinys, tačiau šis gedimas gali atsirasti ir eksploatacijos metu. Priežastis gali būti atsiradusi nesimetriškai pasiskirsčiusi papildoma masė rotoriaus sukimosi ašies atžvilgiu. Disbalanso gedimas taip pat gali atsirasti išlinkus variklio velenui. Rečiau pasitaikanti disbalanso priežastis – nudilęs rotorius. Trindamasis į statorių, jis netenka dalies savo svorio, todėl masės centras nesutampa su sukimosi ašimi. Skiriami trys rotoriaus masės disbalanso tipai:

- statinis rotoriaus masės disbalansas,
- porinis rotoriaus masės disbalansas (angl. *couple unbalance*),
- dinaminis rotoriaus masės disbalansas.

Statinis rotoriaus masės disbalansas

Esant statiniam rotoriaus masės disbalansui, rotoriaus sukimosi ašis (SA) ir jo masės centro ašis (MCA) **nesutampa**, tačiau yra **lygiagrečios** (žr. 1.3 paveikslą (a)). Tokio tipo gedimui diagnozuoti reikia specialios įrangos [41]. Kaip teigia tyrėjai [42], statinis rotoriaus masės disbalansas aptinkamas net ir naujuose asinchroniniuose varikliuose.



1.3 pav. Rotoriaus masės disbalansas: a) statinis; b) porinis; c) dinaminis

Porinis rotoriaus masės disbalansas

Šio tipo rotoriaus disbalanso schema pateikiama 1.3 paveiksle (b). Schemoje matyti, kad rotoriaus masės centro ašis ir sukimosi ašis **susikerta** rotoriaus centre.

Dinaminis rotoriaus masės disbalansas

Gedimo schema pateikiama 1.3 paveiksle (c). Rotoriaus masės centro ašis nesutampa su jo sukimosi ašimi. Šio tipo gedimas yra suminis statinio ir porinio rotoriaus masės disbalansų padarinys.

Pagrindinės rotoriaus masės disbalanso priežastys yra šios:

- gamybos metu atsiradę defektai,
- veleno išlinkimas,

- variklio eksploatavimas esant nesubalansuotai apkrovai.

Rotoriaus masės disbalanso padariniai

Asinchroniniame variklyje atsiradus rotoriaus masės disbalansui, galimi šie padariniai:

- masės disbalanso generuojamas dinaminis ekscentriškumas, dėl kurio kinta oro tarpo dydis;
- oro tarpo dydžio kitimo lemiamas skirtingo oro tarpo srauto tankio atsiradimas ir kartu skirtingų įtampų apvijose sužadinimas;
- sužadintosios įtampos veikia statoriaus srovės, kurių dažnis priklauso nuo oro tarpe veikiančio srovės srauto tankio dažninės harmoninės dedamosios.

Dinaminio rotoriaus masės disbalanso diagnozavimas

Asinchroninio variklio gedimų diagnozavimo galimybes tiriantys autoriai pristato vilnelių paketų transformacijos ir informacijos entropijos metodų kombinaciją [43]. Šis kombinuotasis metodas naudotas dinaminio rotoriaus masės disbalanso, taškinio guolių ir rotoriaus juostų gedimams diagnozuoti. Analizei naudotas tik statoriaus srovės signalas. Signalas registruotas paleidžiant variklį. Anot autorių, metodo patikimumas siekia iki 99,7 %. Kiti autoriai, be srovės signalo, papildomai analizuoja vibracijų signalus ir taip pagerina diagnostinės įrangos patikimumą [44]. Kitame darbe [45] pateikiama detali vibracijų signalų analizė. Šie signalai gaunami iš penkių akcelerometrų, registruojančių pagreičius trimatėje erdvėje. Atliekant tyrimą analizuotas dinaminis ekscentriškumas. Patys autoriai teigia, kad nors esant rotoriaus ekscentriškumui atsiranda vibracijos, tačiau, norint detaliau iširti gedimą, reikia papildomų duomenų. Rotoriaus ekscentriškumui nustatyti siūlomas metodas naudojant papildomą Hallo jutiklį [46]. Nors papildomo jutiklio įmontavimas į variklio korpusą yra esminis metodo trūkumas, šiam metodui būdingas atsparumas apkrovos pokyčiams. Kuo sistema sudėtingesnė, tuo tikslesnius rezultatus galima gauti, tačiau kiekvienas papildomas elementas lemia, kad sistema tampa vis mažiau patikima ir atspari aplinkos poveikiams.

Dėl netolygaus oro tarpo atsiranda rotoriaus srovės srauto harmoninės dedamosios, o dėl jų pakinta statoriaus srovė. Statoriaus srovėje galima aptikti pakitimų tam tikruose dažniuose [47], apskaičiuojamuose [42]:

$$f_e = f \left[1 \pm \left(\frac{1-s}{\frac{p}{2}} \right) \right]; \quad (1.3)$$

čia: f_e – su ekscentriškumu siejama dažnio vertė (Hz), f – maitinimo grandinės dažnis (Hz), s – variklio slydimas, p – polių skaičius. Kiti tyrimai parodė, kad statoriaus srovės harmoninės dedamosios, apskaičiuojamos pagal (1.3), gali būti per mažos amplitudės ir sunkiai aptinkamos, kai variklių parametrai yra specifiniai [48]. Tikslesniam diagnozavimui siūloma naudoti statoriaus srovės Parko vektorių [49], momentinės galios spektrą [50] ir momentinės reaktyviosios galios spektrą [51]. Tačiau metodams, grindžiamiems momentine galia, taip pat būdinga sunkiai išsiskiriančios (amplitudine verte) dažninės dedamosios.

Gedimą atitinkančią dažnį, apskaičiuojamą pagal (1.3), gali lemti ir netolygi apkrova [52, 53]. Tai yra didžiausias apžvelgtų metodų trūkumas. Yra pasiūlytas metodas apkrovos poveikiui pašalinti [54], tačiau jis labai priklauso nuo apkrovos dydžio [55].

Asinchroniniams varikliams, kuriems energija tiekama naudojant dažninį keitiklį, siūlomas signalo injekcijos metodas [56]. Tyrimo autoriai siūlo gedimą diagnozuoti naudojant nulinės sekos įtampą. Tačiau norint sėkmingai pritaikyti metodą, reikia reguliariai stabdyti variklį, be to, variklis turi būti su neutraliu laidininku. Kito metodo autoriai siūlo registruoti statoriaus įtampos ir srovės harmonines vertes ir sprendimą dėl gedimo priimti naudojantis neuroniniu tinklu [57]. Pagrindinis metodo trūkumas – siaura taikymo sritis. Norint sėkmingai pritaikyti minėtą metodą testuojant kiekvieną variklį, reikia „mokyti“ neuroninį tinklą esant skirtingiems apkrovos lygiams.

1.2.5. Statoriaus gedimai

Asinchroninio variklio statorius yra veikiamas mechaninių, elektrinių, temperatūros ir aplinkos veiksnių [35]. Jei minėtų veiksnių vertės viršija statoriaus atsparumą, gali įvykti statoriaus gedimas. Gedimų galima išvengti, jei variklis yra suprojektuotas pakankamai atsparus minėtiems veiksniams. Statoriaus gedimus galima suklasifikuoti į dvi pagrindines grupes:

- statoriaus magnetolaidžio arba rėmo gedimai,
- statoriaus apvijų gedimai.

Dažniausiai pasitaiko antrosios grupės gedimai (apvijų gedimai). 28–36 % asinchroninio variklio gedimų yra susiję su statoriaus apvijomis (žr. 1.1 lentelę ir 1.1 paveikslą).

Statoriaus apvijų gedimas

Statoriaus apvijų gedimas dar plačiau vadinamas trumpuoju jungimu vidinėse apvijose. Galimi šie trumpųjų jungimų tipai:

- trumpasis jungimas vienoje apvijoje, dar vadinamas „vija į viją“ (angl. *turn to turn*);
- trumpasis jungimas tarp dviejų tos pačios fazės apvijų, dar vadinamas „apvija į apviją“ (angl. *coil to coil*);
- trumpasis jungimas tarp skirtingų fazių apvijų, dar vadinamas „faze į fazę“ (angl. *phase to phase*);
- trumpasis jungimas tarp trijų fazių apvijų;
- trumpasis jungimas tarp apvijos laidininko ir statoriaus šerdies, dar vadinamas „apvija į žemę“ (angl. *coil to earth*);
- nutraukta grandinė, kai vienas iš apvijos laidininkų nutraukiamas.

Nesvarbu, ar trumpasis jungimas visiškai eliminuoja likusią vijos dalį, ar srovė pasiskirsto tekėti dvejomis grandinėmis, abu atvejai laikomi statoriaus apvijos gedimais. Analogiškai vertinamas ir nutrauktos grandinės gedimas. Variklis laikomas sugedusiu ir kai laidininkas pažeistas ir ne visiškai atitrūkęs.

Statoriaus apvijų gedimų priežastys ir padariniai

Mechaniniai veiksniai (angl. *mechanical stresses*). Šie veiksniai atsiranda dėl statoriaus apvijos judėjimo ir rotoriaus susilietimų su statoriumi [58]. Apvija statoriuje gali judėti, nes yra veikiamas elektromagnetinės jėgos. Apvija, paveikta jėgos, gali tapti laisvesnė, o jai susidūrus su rotoriumi gali būti pažeista izoliacija ar laidininkas. Rotorius taip pat gali susiliesti su statoriumi dėl ekscentriškumo, veleno išlinkimo ar guolių gedimo. Susilietus rotoriumi ir statoriui pažeidžiami abiejų paviršiai. Pažeidus statoriaus magnetolaidį pažeidžiama ir apvijos izoliacija – tarp

apvijos laidininko ir statoriaus šerdies įvyksta trumpasis jungimas. Dėl didelės vibracijos gali įvykti nutrauktos grandinės gedimas [59].

Elektriniai veiksniai. Pagrindinė šių veiksmių priežastis yra pereinamieji procesai, vykstantys maitinimo grandinėje [58]. Viršįtampiai trumpina apvijų izoliacijos tarnavimo laiką, ji greičiau sensta, didėja trumpojo jungimo vienoje apvijoje arba tarp skirtingų fazių apvijų tikimybė.

Srovės dedamosios, atsiradusios dėl trumpųjų jungimų statoriaus grandinėje

Svarbiausia išskirti srovės dedamąsias, kurių kilmės priežastis yra gedimas. Kaip ir prieš tai aptartuose gedimuose, tyrėjai dažnai analizuoja tam tikrus statoriaus srovės dažnių spektro diapazonus nevertindami, kad srovės signalo pakitimai juose gali atsirasti ne tik dėl numanomo gedimo. Tačiau šiuo atveju yra įrodyta, kad srovės pakitimai konkrečiuose dažnių spektro taškuose atsiranda dėl konkretaus gedimo [60, 61]. Minėti teoriniai tyrimai įrodo, kad trumpasis jungimas statoriaus grandinėje pakeičia oro tarpe (tarp statoriaus ir rotoriaus) veikiančią magnetinį srautą (angl. *air gap flux density*) ir statoriaus srovėje atsiranda papildomos dažninės dedamosios.

1.2.6. Nesubalansuota maitinimo grandinės įtampa

Dėl nesubalansuotos maitinimo grandinės įtampos prastėja variklio darbas ir trumpėja jo eksploatacijos trukmė. Net ir mažas įtampos nesubalansavimas variklio grandinėse gali lemti didelį srovių disbalansą, o dėl jo padidėja temperatūra, gadinama izoliacija. Pavyzdžiui, jei tiekiamos įtampos disbalansas yra 5 %, statoriaus srovės disbalansas gali siekti net 20–30 %. JAV nacionalinė elektros įrenginių gamintojų asociacija (NEMA) ir IEEE yra paskelbę tarpusavyje nesusijusius įtampos disbalanso vertinimus. Taip pat naudojamas tikroju įtampos disbalansu (angl. *true definition of voltage unbalance*) grindžiamas vertinimas. Įprastai analizuojant elektros variklius naudojamosi vienu iš šių vertinimų.

NEMA vertinimas. Įtampos disbalansas vertinamas pagal linijinės įtampos disbalanso koeficientą (angl. *line voltage unbalance rate*) [62]:

$$LVUR = \frac{D_{line.max}}{V_{line.avg}} \cdot 100; \quad (1.4)$$

čia: $D_{line.max}$ – didžiausias linijinės įtampos vidutinės vertės nuokrypis (V), $V_{line.avg}$ – linijinės įtampos vidutinė vertė (V). Taikant šį vertinimą daroma prielaida, kad vidutinė linijinės įtampos vertė yra lygi vardinei (angl. *rated*) vertei. Be to, naudojant šį metodą vertinama tik amplitudinė vertė, faziniai poslinkiai nevertinami.

IEEE vertinimas. Atliekant šį vertinimą apskaičiuojamas dydis, dar žinomas kaip fazinės įtampos disbalanso koeficientas (angl. *phase voltage unbalance rate*) [62]:

$$PVUR = \frac{D_{phase.max}}{V_{phase.avg}} \cdot 100; \quad (1.5)$$

čia: $D_{phase.max}$ – didžiausias fazinės įtampos vidutinės vertės nuokrypis (V), $V_{phase.avg}$ – fazinės įtampos vidutinė vertė (V). IEEE naudoja tokį patį įtampos disbalanso vertinimo metodą kaip ir NEMA. Vienintelis skirtumas yra tai, kad IEEE naudoja fazinės įtampos vertę. Taikant šį metodą taip pat nevertinami faziniai poslinkiai.

Tikrasis įtampos disbalansas. Tikrasis įtampos disbalansas apibrėžiamas kaip santykis tarp atvirkštinės ir tiesioginės sekos įtampų dedamųjų [63]. Procentinė

koeficiento (VUF) reikšmė apskaičiuojama taip:

$$VUF = \frac{V_n}{V_p} \cdot 100; \quad (1.6)$$

čia: V_n – atvirkštinės sekos įtampos dedamoji, V_p – tiesioginės sekos įtampos dedamoji. Tiesioginės ir atvirkštinės sekos įtampos dedamosios apskaičiuojamas žinant linijines įtampų vertes:

$$V_p = \frac{V_{ab} + a \cdot V_{bc} + a^2 \cdot V_{ca}}{3}, \quad (1.7)$$

$$V_n = \frac{V_{ab} + a^2 \cdot V_{bc} + a \cdot V_{ca}}{3}; \quad (1.8)$$

čia: $V_{ab, bc, ca}$ – fazinės įtampos (V), a – operatorius prie 120° kampo ir a^2 – operatorius prie 240° kampo.

Nesubalansuota maitinimo grandinės įtampa sukelia atvirkštinės sekos srovių asimetriją. Tačiau tokį patį padarinį sukelia ir kitas gedimas – trumpasis jungimas statoriaus apvijose. Tyrėjai [64] siūlo registruoti ir analizuoti ne tik statoriaus srovės, bet ir maitinimo grandinės įtampos signalus. Tokiu atveju galima diagnozuoti ir atskirti abu minėtus gedimus. Svarbu atkreipti dėmesį, kad abiejų gedimų simptomai sutampa ir į tai reikia atsižvelgti priimant sprendimus dėl gedimo buvimo.

1.3. Nusistovėjusio režimo aptikimo metodai

Kiekvienas diagnostikos metodas gali būti priskirtas vienai iš dviejų kategorijų. Pirmosios kategorijos metodai naudojami esant nusistovėjusiam variklio darbo režimui, antrosios – esant pereinamajam procesui (variklio paleidimas, kintanti apkrovos vertė ir pan.). Viena svarbiausių prielaidų, daromų nagrinėjant procesus, yra teigimas, kad procesas yra nusistovėjęs arba kintantis. Informacijos, gautos registruojant proceso būklės kintamuosius, analizės metodų parinkimas priklauso nuo proceso būklės. Siekiant aptikti nusistovėjusią ar kintančią būseną yra naudojama keletas metodų.

Polinominės interpoliacijos testas

Algoritmą, kuriuo galima išfiltruoti triukšmų turintį signalą, 1964 m. pasiūlė Savitzky ir Golay [65]. Šį algoritmą jie taikė atlikdami gauto signalo spektroskopiją. Pirmiausia tyrėjai pasirenka lango ilgį n_{poly} (jis turi būti lyginis skaičius). Paskui atliekama kiekvieno lango polinominė p_{poly} laipsnio interpoliacija ($p_{poly} < n_{poly}$). Informacija, gauta atlikus interpoliaciją, turi mažiau pašalinių komponentų (triukšmų). Toliau skaičiuojama kiekvieno lango pirmojo laipsnio išvestinė. Išvestinės reikšmė naudojama kaip statistinis parametras. Ją lyginant su slenkstine verte galima priimti sprendimą dėl signalo pastovumo. Algoritme naudojami kintamieji parametrai yra lango ilgis n_{poly} ir polinominės funkcijos eilė p_{poly} .

Modifikuotas F testas

Kitas metodas, naudojamas proceso būklei vertinti, yra modifikuotas F testas [66]. Taikant šį metodą apskaičiuojamas santykis tarp skirtingais būdais apskaičiuotų triukšmo dispersijų verčių. Kiekviena iš minėtų verčių apskaičiuojama naudojantis eksponentiniu slenkamojo vidurkio filtru. Be to, duomenys papildomai filtruojami slenkamojo vidurkio filtru. Jei apskaičiuoto santykio tarp triukšmo dispersijų vertė

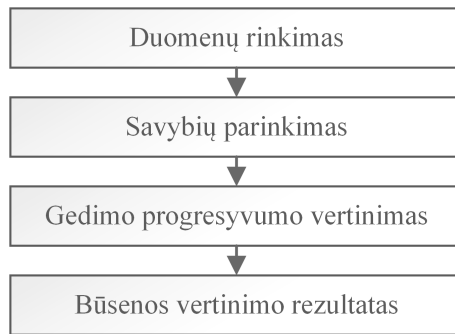
yra artima 1, procesas gali būti vertinamas kaip nusistovėjęs. Autoriai darbe taip pat nurodo, kaip įvertinti slenkstinę ribą, leidžiančią priimti tinkamą sprendimą.

Sudėtinis statistinis testas

Taikant šį metodą ir atliekant statistinius skaičiavimus galima priimti sprendimą dėl proceso būklės [67]. Siūlomas testas sudarytas iš dviejų dalių. Pirmojoje dalyje lyginamos dviejų nuoseklių signalų kovariacijos matricų reikšmės. Jei šios reikšmės sutampa, atliekamas Hotellingo T^2 testas. Testo rezultatai leidžia spręsti, ar abiejų signalų vidurkių vertės yra lygios. Kitu atveju atliekamas necentrinis T^2 testas. Skaičiuojant siūlomu metodu daroma prielaida, kad mėginys yra nusistovėjęs procesas ir jis lyginamas su kitu mėginiu. Autoriai pabrėžia, kad šis metodas tinkamas, kai procesas ilgą laiką yra pastovus, tačiau gali pakisti staiga ir dideliu šuoliu.

1.4. Asinchroninio variklio būsenos analizė

Variklio gedimo diagnozavimas yra procesas, kai nenormaliai variklio būsenai priskiriamas konkretus gedimas. Paprastai variklio būsenos analizė ir gedimo diagnozavimo procesas skirstomas į keturis etapus (žr. 1.4 paveikslą). Variklio



1.4 pav. Būsenos analizės ir diagnozavimo proceso etapai

būklės analizės procesas ypač vertinamas pramonėje. Jis yra naudingas dėl keleto priežasčių [68, 69]:

- sumažina asinchroninio variklio eksploatacijos kainą,
- leidžia prognozuoti įrangos gedimus,
- pagerina įrangos ar jos komponentų patikimumą,
- optimizuoja efektyvų įrangos naudojimą,
- sumažina klaidingų diagnozių skaičių.

Būsenos analizavimas jau kurį laiką yra taikomas asinchroninių variklių diagnostikai. Vienas iš vertinamų dydžių yra statoriaus srovės stipris.

Statoriaus srovės signalas variklių diagnostikai pradėtas naudoti maždaug prieš 30 metų. Pagrindinis signalų apdorojimo įrankis tuo metu buvo sparčioji Fourier transformacija (angl. *fast Fourier transform*). Nors šis metodas efektyvus, jis turi keletą trūkumų. Pagrindinė dažninė dedamoji užgožia mažos amplitudės informatyvias dedamąsias. Šis metodas netinka variklio paleidimo srovės analizei. Dėl minėtų priežasčių statoriaus srovės analizei taikomi kiti metodai.

Šiuo metu dažniau taikomi metodai yra trumpalaikė Fourier transformacija (angl. *short-time Fourier transform*), diskrečioji ir tęstinė (tolydžioji) vilnelių

transformacija (angl. *wavelet transform*), vilnelių paketų dekompozicija (transformacija) (angl. *wavelet packet decomposition*), Wignerio ir Ville'io skirstinys (angl. *Wigner Ville distribution*), spektrinis galios tankis (angl. *power spectral density*), Parko transformacija (angl. *Park transform*), atraminių vektorių mašinos (angl. *support vector machine*), Prony analizė (angl. *Prony analysis*) ir neraiškioji logika (angl. *fuzzy logic*). Taikant didžiąją dalį minėtų metodų galima analizuoti nestacionarųjį signalą. Diagnozuojant rotoriaus juostų skilimą, analizuojama tiek paleidimo, tiek nusistovėjusio režimo srovės. Tikrinant, ar apvijoje neįvykęs trumpasis jungimas, taikomi baigtinių elementų ir diskrečiosios vilnelių transformacijos metodai [2].

Naudojant sparčiąją Fourier transformaciją galima nagrinėti signalo dažnių spektrą. Įprastai atliekant variklio tyrimą reikia nustatyti variklio slydimą. Jo vertę galima apskaičiuoti naudojantis srovės dažnių spektre esančia specifine dedamąja. Šiai dedamajai, palyginti su pagrindine, būdinga maža amplitudė. Taip pat pastebėta, kad, analizuojant skirtingus gedimus, juos indikuojančios būdingosios dedamosios yra ne tik mažos amplitudės, bet ir jų dažnis artimas fundamentaliosios dažniui. Minėtos priežastys apsunkina mažos galios ir mažai apkrautų variklių gedimų diagnostiką. Diagnostikos rezultatams taip pat gali pakenkti papildomos harmonikos, kurių dažnis sutampa su klaidą indikuojančių dedamųjų dažniui. Šios harmonikos atsiranda kintant apkrovai, inercijai, sukimo momentui, tinklo įtampai ar svyruojant rotoriaus sukimosi greičiui. Pagrindinis sparčiosios Fourier transformacijos trūkumas yra tai, kad naudojant šį metodą negalima atskirti gedimą reprezentuojančių dažninių dedamųjų nuo dedamųjų, atsiradusių dėl apkrovos, greičio ar kitų svyravimų. Naudojant trumpalaikę Fourier transformaciją, šios problemos nelieka [2].

Naudojant trumpalaikę Fourier transformaciją, galima analizuoti pereinamuosius procesus. Taikant šį metodą naudojamas fiksuoto dydžio langas ir analizuojami visi signalo dažniai. Žinant tyrimui aktualaus dažnio vertę ir prieš tai atlikus transformaciją, būtų galima parinkti tinkamo dydžio langą. Dėl to fiksuoto dydžio lango apibrėžimas prieš analizę yra vienas iš šio metodo trūkumų. Minėto trūkumo neturi kitas metodas – vilnelių transformacija.

Vilnelių transformacija yra veiksmingas ir pažangus matematinis įrankis. Jį galima naudoti pereinamiesiems procesams analizuoti. Naudojant vilnelių transformaciją signalą galima analizuoti laiko ir dažninėse atskaitose, tačiau verta paminėti ir šio metodo trūkumus. Jis grindžiamas sėkmingai parinkta pagrindine (angl. *mother*) vilnele. Pagrindinės vilnelės parinkimas priklauso nuo tyrėjo kompetencijos, nes jos gali būti labai įvairios formos. Siekiama, kad parinktos vilnelės forma būtų panaši į analizuojamą signalą. Naudojant žemesnės eilės pagrindines vilneles gaunamas transformacijos rezultatas yra blogos kokybės. Dalis fundamentaliojo dažnio patenka į gretimas juostas ir užgožia žemutines dažnines harmonikas. Be to, kai kuriais atvejais analizuojamos juostos kraštuose esantys dažniniai iškraipymai apsunkina žemų (žemesnių nei fundamentalusis) dažnių analizę. Taip nutinka, kai pereinamieji procesai yra ypač spartūs. Metodas, kuriuo galima išvengti dėl pagrindinės vilnelės pasirinkimo atsirandančios klaidos, yra Hilberto transformacija. Atliekant šią transformaciją, viename iš etapų analizuojama signalo gaubtinės forma. Naudojant Hilberto transformaciją, analizuojami ir pereinamieji, ir nusistovėję procesai.

1.4.1. Temperatūros analizė

Asinchroninio variklio temperatūrą galima vertinti dviem būdais. Pirmasis – tiesioginis temperatūros matavimas viename arba keliuose variklio korpuso taškuose. Antrasis – temperatūros apskaičiavimas. Statoriaus apvijose, įvykus trumpajam

jungimui, srovės stiprio vertė išauga, taip pat išsiskiria daugiau šilumos. Jei gedimas nepastebimas, per didelė šiluma gadina izoliaciją ir gedimo tūris plečiasi. Srovės stipris ir temperatūra didėja, kol pasiekiamas žalingas kritinis momentas, kai variklis nebegali veikti. Variklių terminį modeliavimą galima skirstyti į dvi kategorijas:

1. baigtinių elementų analize grindžiamas modeliavimas,
2. suskaidytųjų (angl. *lumped*) parametrų analize grindžiamas modeliavimas.

Baigtinių elementų analize grindžiamas modeliavimas yra tikslesnis, tačiau reikia sudėtingesnių ir ilgiau trunkančių skaičiavimų. Suskaidytųjų parametrų analizės metodas sukurtas vertinant variklio šiluminės varžos, laidumo ir panašius nuostolius. Šio metodo tikslumas tiesiogiai priklauso nuo modeliui naudotų homogeninių komponentų [70, 71]. Parametrai antrajam metodui gali būti parenkami dviem būdais: 1) kai variklio matmenys ir konstrukcinių dalių medžiagos yra žinomos, 2) kai parametrai apskaičiuojami pagal tam tikruose variklio taškuose išmatuotą temperatūrą. Nors variklis yra sudarytas iš skirtingų medžiagų, kurių terminiai parametrai skirtingi, jis įprastai laikomas kūnu, sudarytu iš keleto homogeninių medžiagų. Remiantis šia prielaida, asinchroninis variklio terminis modelis, kurį sudaro dvi dalys, pateikiamas [72, 73]. Temperatūros vertinimo metodu galima netiesiogiai diagnozuoti trumpąjį jungimą statoriaus apvijose (vienos fazės) ir guolių gedimus. Įvykus trumpajam jungimui, statoriaus apvijoje ima kilti temperatūra, tačiau kilimas yra labai lėtas, todėl gali būti nepastebimas. Ilgesnį laiką nepastebėtas gedimas sukelia trumpąjį jungimą tarp dviejų fazių arba įvyksta įžemėjimas. Guolių gedimams taip pat būdinga gedimo vietoje didėjanti temperatūra. Jei guolis pažeistas, padidėja trintis. Dėl padidėjusios trinties padidėja ir temperatūra guolio montavimo į korpusą vietoje.

1.4.2. Sukimo momento analizė

Sukimo momentas yra bet kokio tipo mechaniniam ar elektriniam disbalansui ypač jautrus parametras. Besisukantis tiesioginis ir atvirkštinis statoriaus elektromagnetinis laukas generuoja sukimo momentą. Nors tiesiogiai išmatuoti iš statoriaus į rotorius perduodamo sukimo momento nėra galimybių, jį galima apskaičiuoti išmatavus kitus parametrus:

$$\tau_{AG} = \frac{pp}{\sqrt{2}} \left[(i_a - i_b) \int [V_{ca} - R(i_c - i_a)dt] - (i_c - i_a) \int [V_{ab} - R(i_a - i_b)dt] \right]; \quad (1.9)$$

čia: τ_{AG} – iš statoriaus į rotorius perduodamas sukimo momentas (Nm) i_a, i_b ir i_c – asinchroninio variklio fazinės srovės (A), V_{ab}, V_{ca} – linijinės įtampos (V), pp – polių porų skaičius, R – pusė linijinės varžos (Ω). Apskaičiavus sukimo momentą, galima analizuoti jo spektro harmonines dedamąsias, susijusias su gedimais [74]:

- normaliomis sąlygomis, nesant gedimo, sukimo momento kitimo kampinis dažnis yra lygus 0;
- nutraukus fazinės srovės tekėjimą statoriaus grandinėje, sukimo momento kitimo kampinis dažnis yra lygus $2\omega_s$;
- nutraukus fazinės srovės tekėjimą rotorius grandinėje, sukimo momento kitimo kampinis dažnis yra lygus $2s\omega_s$;

čia: ω_s – maitinimo grandinės įtampos kampinis dažnis (rad/s), s – slydimas. Apibendrinant galima teigti, kad analizuojant iš statoriaus į rotorius perduodamo

sukimo momento signalo dažnių spektro harmonines dedamąsias galima diagnozuoti įvairius variklio gedimus. Yra daugybė darbų, kuriuose analizuojamas iš statoriaus ir rotorijų perduodamo sukimo momento pritaikymas variklio diagnostikai. Autoriai pristatė [75] darbą, kuriame analizuojami rotoriaus gedimai ir jų pėdsakai sukimo momento – greičio kreivėje. Analizuoti duomenys buvo renkami paleidžiant neapkrautą variklį esant penkioms skirtingoms situacijoms. Pirmuoju atveju variklis gedimų neturėjo. Antruoju, trečiuoju ir ketvirtuoju atveju buvo pažeista atitinkamai viena, dvi ir trys rotoriaus juostos. Penktuoju atveju – pažeistas rotoriaus juostas jungiantis žiedas. Analizei atlikti naudota sparčioji Fourier transformacija ir trumpalaikė Fourier transformacija. Rezultatai parodė, kad sukimo momento – greičio kreivės forma priklauso nuo gedimo masto. Siekiant ištirti dažnių spektro dedamųjų prigimtį ir jų amplitudinės vertės priklausomybę nuo gedimo, atliktas tyrimas [76]. Jame autoriai kaip statoriaus srovės signalui alternatyvų parametru analizuoja apkrovos sukimo momento signalą ir nustato apkrovos sukimo momento priklausomybę nuo kintančių parametru (apkrovos, variklio galios, polių skaičiaus, maitinimo grandinės įtampos dažnio). Iš statoriaus ir rotorijų perduodamo sukimo momento normalizacija ir variklio būklės diagnozė pateikiama [77]. Klasifikavimui atlikti ir taip gedimo buvimui ir jo tipui nustatyti naudojamos statoriaus įtampos ir srovės. Įtampos signalui matuoti ir registruoti reikalinga papildoma įranga – tai diagnostikos įrangą daro sudėtingesnę. Dėl minėtų priežasčių sukimo momentas šiame darbe neanalizuojamas.

1.4.3. Vibracijų analizė

Visų tipų elektros varikliai skleidžia triukšmą ir vibraciją. Variklio skleidžiamas triukšmo lygis pakinta esant oro tarpo (tarp rotoriaus ir statoriaus) netolygumui, todėl triukšmo lygio vertinimas yra naudojamas variklio gedimams diagnozuoti. Net ir maža variklio rėmo vibracija generuoja aukštą triukšmo lygį. Įprastai matuojama triukšmo lygio vertė ir analizuojamas signalo spektras. Dėl pašalinių aplinkoje esančių aparatų skleidžiamų triukšmų triukšmo lygio matavimu grindžiama variklio diagnostika nėra tikslus metodas. Vienas iš pagrindinių garsų yra aušinimo sistemos skleidžiamas garsas. Jis siejamas su oro turbulencija, atsirandančia dėl cikliško judėjimo (besisukančių dalių). Kitas garso šaltinis yra metalinių dalių paviršiai. Triukšmas atsiranda, kai statoriaus korpusą veikia Maxwello įtempiai (angl. *Maxwell's stress*). Šio metodo sėkmingas panaudojimas nustatant oro tarpo ekscentriškumą pateikiamas [78].

Analizuojant skleidžiamą vibraciją, galima įvertinti variklio būklę. Triukšmą ir vibraciją elektros mašinose sukelia keletas jėgų. Šios jėgos yra magnetinės, mechaninės ir aerodinaminės prigimties [79]. Oro tarpe veikiančios radialiosios jėgos yra didžiausias triukšmo ir vibracijos asinchroniniame variklyje šaltinis. Srovės srauto tankis, veikiantis oro tarpe tarp statoriaus ir rotoriaus, yra magnetovaros jėgų suma. Suminė magnetovaros jėga taip pat turi dedamųjų, kurios atsiranda dėl statoriaus arba rotoriaus asimetrijos. Dėl to analizuojant vibracijos signalus galima diagnozuoti rotoriaus masės disbalansą, guolių ir kitus asinchroninio variklio gedimus. Vibracijų analizė dažniausiai taikoma diagnozuojant guolių gedimus, rotoriaus ekscentriškumą, pavarų gedimus ir rotoriaus disbalansą. Vibracijų analizė – patikimas ir plačiai taikomas diagnostikos metodas, tačiau jis turi ir trūkumų. Norint tiksliai diagnozuoti gedimus reikia brangių vibracijų jutiklių, akcelerometrų ir papildomų įrenginių. Šie jutikliai turi būti pritvirtinami prie variklio korpuso, o tai kartais neįmanoma dėl aplinkos kenksmingumo (branduolinėse elektrinėse ir pan.). Ypač neracionalu šį metodą naudoti diagnozuojant mažos galios variklių, esančių pavojuje aplinkoje, gedimus.

Guolių ir pavarų gedimams diagnozuoti naudojami vibracijų analizės metodai plačiai aprašomi [80]. Šio darbo autoriai vibracinius diagnostikos metodus skirsto į tris kategorijas: signalų apdorojimu, matematinu modeliu ir mašininu mokymusi grindžiamus metodus. Kaip teigia autoriai, signalų apdorojimas ypač naudingas diagnozuojant ankstyvos stadijos gedimus. Šios grupės metodais iš signalo galima išskirti tik aktualią (informatyviausią) dalį. Tai leidžia eliminuoti aplinkos triukšmų keliamas vibracijas. Modeliu grindžiami metodai naudojami tik reduktorių (pavarų) gedimams diagnozuoti, nes defektų turinčių variklio guolių skleidžiamas vibracijų signalas yra chaotiškesnis nei reduktorių vibracijų signalas ir šiam metodui netinka. Mašininiam mokymuisi priskiriami metodai išsiskiria tuo, kad jiems reikia nepažeisto guolio ar pavaros skleidžiamų vibracijų matavimų. Šie duomenys skiriami statistiniam arba tikimybiniam modeliui „mokyti“. Bet koks nukrypimas nuo duomenų, naudotų modeliams „mokyti“, gali būti gedimo indikatorius. Lygindami daugiau kaip šimtą skirtingų šaltinių, autoriai pastebėjo, kad bene visi guolių gedimams diagnozuoti taikomi metodai yra skirti nusistovėjusiu režimu veikiančiam varikliui ir tik keletas metodų pritaikyta besikeičiančiomis sąlygomis veikiančioms varikliams.

Vibracijų analizės metodas, skirtas guolių gedimams diagnozuoti, pateikiamas [17]. Šiame darbe galutiniam sprendimui priimti pasitelktas dirbtinis neuroninis tinklas. Tyrimui naudoti simuliuoti ir realūs duomenys. Abiem atvejais neuroninis tinklas buvo tinkama priemonė gedimui diagnozuoti. Kaip įėjimo signalas neuroniniam tinklui buvo naudojami šeši kintamieji, gauti iš pagreičio signalo dažnių spektro. Buvo naudojami tokie parametrai, kaip signalo didžiausioji vertė, vidutinė vertė, eksceso koeficientas ir t. t.

Atliekant kitą tyrimą [81], kuriam naudotas dirbtinis neuroninis tinklas, buvo gauti dar geresni rezultatai. Informatyviausioms savybėms atrinkti autoriai pasitelkė genetinius algoritmus. Atrinkus taip pat šešias savybes buvo pasiektas 99,8 % klasifikavimo tikslumas. Pastarieji pavyzdžiai [17, 81] rodo, kaip pasitelkus vibracijų analizę galima diagnozuoti mechaninius gedimus, tačiau taip pat galima diagnozuoti ir elektrinius gedimus.

Pagrindinis šios metodų grupės trūkumas yra didelė diagnostikos priemonių kaina. Kaina tampa didelė darant prielaidą, kad toks jutiklis montuojamas prie kiekvieno variklio pramonės įmonėje, kurioje yra daug variklių. Kitas šių metodų trūkumas – būtinybė fiziškai pasiekti variklį (prijungti vibracijų jutiklį). Jutiklis pagal gamintojo rekomendacijas turi būti tvirtai pritvirtintas prie variklio. Be to, yra tikimybė, kad atliekant matavimus jutiklis gali nukristi.

1.4.4. Statoriaus srovės analizė

Svarbu paminėti, kad taikant beveik visus iki šiol aptartus metodus matuojamam dydžiui fiksuoti reikia papildomų jutiklių. Dažnai norint juos prijungti reikia sustabdyti variklį ir fiziškai prie jo prieiti [82]. Taip pat reikia įvertinti sąlygiškai didelę jutiklių kainą. Registruojant statoriaus srovę šie trūkumai nebūdingi. Dažnai sistemoje jau yra įranga, turinti srovės jutiklį. Tai gali būti paleidimo, valdymo ar apsaugos įranga. Tyrėjai savo darbuose [4] kaip išvadą pateikia tai, kad srovės analizė – bejutiklis metodas. Statoriaus srovė gali būti registruojama ir analizuojama realiuoju laiku, tai yra metodą galima taikyti visada, kai tik variklis veikia. Dėl minėtos priežasties statoriaus srovės analizės taikymas asinchroninio variklio gedimams diagnozuoti labai išpopuliarėjo. Didžioji dalis mechaninių ir elektrinių gedimų, pasitaikančių šio tipo varikliuose, gali būti diagnozuojami analizuojant statoriaus srovę.

Bendruoju atveju statoriaus srovės analizę galima suskirstyti į tris etapus:

1. **Duomenų rinkimas.** Šiame etape registruojamas statoriaus srovės signalas. Jis fiksuojamas naudojant srovės jutiklį. Tai gali būti srovės transformatorius arba Hallo jutiklis. Įprastai registruojama viena statoriaus fazinė srovė, tačiau norint tikslesnių rezultatų gali būti registruojamos ir trys fazinės srovės. Kai kuriais atvejais signalas filtruojamas, eliminuojant analizę trikdančią dažnių juostą. Tai vadinama pirminiu apdorojimu (angl. *pre-processing*). Skaitmeninis srovės signalas yra parengtas tolesniam apdorojimui.
2. **Savybių parinkimas.** Antrajame etape atliekamas skaitmeninių signalų apdorojimas, siekiant parinkti reikiamas savybes (požymius). Signalas gali būti analizuojamas atsižvelgiant į laiką, dažnį arba į laiką ir dažnį kartu. Gali būti naudojami skirtingi apdorojimo įrankiai ir metodai (plačiau žr. 1.4 poskyryje). Verta paminėti, kad šiame etape visi metodai naudojami siekiant išrinkti statoriaus srovės dažnių spektro dedamąsias, kuriomis remiantis būtų galima vertinti variklio būklę.
3. **Būsenos vertinimas.** Paskutinis etapas, kuriame diagnozuojamas gedimas ir jo lygis. Įprastai lyginamos būdingųjų statoriaus srovės dažnių spektro taškų amplitudinės vertės su slenkstinėmis gedimų neturinčio variklio statoriaus srovės dažnių spektro vertėmis. Tiesa, svarbu žinoti gedimų neturinčio variklio specifinio dažnio amplitudines vertes. Tipinė dviejų etapų technologija, grindžiama išankstiniu gedimų neturinčio variklio parametru žinojimu, pateikiama [83].

Literatūroje aptikta, kad statoriaus srovės analizė taikoma šiems gedimams diagnozuoti:

- trūkusioms rotorius narvelio juostoms,
- oro tarpo ekscentriškumo ar masės disbalanso gedimui,
- statoriaus apvijų gedimams.

Metodams, kuriais atliekama statoriaus srovės analizė, būdinga tai, kad jie yra neinvaziniai, tikslūs, pigūs, nesudėtingi ir veiksmingi. Metodų informatyvumas yra prilyginamas vibracijos analizei paremtų metodų efektyvumui [84].

Analizuojama statoriaus srovė gali būti dviejų tipų. Pirmasis – kai analizuojami variklio parametrai (statoriaus srovė, rotorius sukimosi greitis, generuojamas sukimo momentas ir t. t.) nusistovėjus jo darbo režimui nekinta. Antrasis – pereinamojo proceso, kai statoriaus srovė registruojama paleidžiant variklį. Nusistovėjusios būsenos statoriaus srovę išmatuoti lengviau, nes tai galima atlikti varikliui veikiant. Daugelis tyrėjų analizuoja nusistovėjusios būsenos srovę. Guolių gedimų diagnozavimas naudojant statoriaus srovės signalo analizę pateikiamas [32]. Veikiančio variklio diagnostikos metodai pateikiami [85, 86]. Metodai, kuriais galima nustatyti veikiančio variklio oro tarpo ekscentriškumą, aprašomi [87, 88]. Statoriaus srovės gaubtinės panaudojimas asinchroninio variklio gedimams diagnozuoti pateikiamas [89]. Šiame tyrime autoriai sutelkia dėmesį į rotorius juostų trūkumą ir trumpąjį jungimą statoriaus apvijose.

Srovės registravimas, esant nusistovėjusiam režimui, yra nepatikimas. Jei registruojant srovės signalą variklio rotorius sukimosi greitis bent šiek tiek pakinta, gaunamas iškraipytas srovės spektras. Sėkmingai analizuoti tokį signalą naudojant sparčiąją Fourier transformaciją nepavyks. Srovės amplitudė taip pat priklauso nuo apkrovos, todėl jei yra svyruojančios apkrovos tikimybė, reikia naudoti metodus, skirtus pereinamiesiems procesams analizuoti. Minėto trūkumo nėra, jei statoriaus srovė registruojama paleidžiant variklį. Šis signalas yra mažiau iškraipomas dėl

kintančios apkrovos, jis taip pat gali būti naudingas net jei variklis visiškai neapkrautas. Kitas pranašumas – tai, kad paleidžiant variklį srovė yra 7–8 kartus didesnė nei esant nusistovėjusiam režimui. Dėl šios priežasties gedimo nulemtą statoriaus srovės signalo pakitimą galima aptikti net ir mažos galios varikliuose [90]. Yra daugybė mokslinių darbų, kuriuose analizuojami variklio pereinamieji procesai. Variklio gedimus autoriai [91] nustato analizuodami pereinamojo proceso statoriaus srovę. Signalams apdoroti naudojama vilnelių paketų transformacija. Vilnelių paketų transformacija taip pat naudojama analizuojant pereinamuosius procesus [92]. Pastarajame darbe autoriai diagnozuoja mechaninius (rotoriaus juostų trūkimo ir oro tepo ekscentriškumo) asinchroninio variklio gedimus.

1.4.5. Signalų apdorojimo metodai

Vilnelių transformacija

Vilnelių transformacija (VT) (angl. *wavelet transform*) – pažangus ir veiksmingas skaitmeninių signalų apdorojimo įrankis, kuriuo neprarandant nei laiko, nei dažnio informacijos signalas išskaidomas į nuo laiko priklausomą dažnių spektrą. Analizuojamas signalas į skirtingo mastelio ir lygio signalus išskaidomas keičiant pagrindinės vilnelės parametrus. Šis pagrindinės vilnelės derinimas dar vadinamas išsiplėtimu, arba dilatacija (angl. *dilation*). Dėl šio derinimo VT tampa pranašesniu įrankiu nei fiksuoto lango dydžio Fourier transformacija. Vilnelių transformacija yra tinkama neperiodiniams pereinamiesiems procesams analizuoti. Tokie procesai įprastai turi aukšto dažnio dedamųjų. Bendroji vilnelių transformacija atliekama taikant [2]:

$$C(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt. \quad (1.10)$$

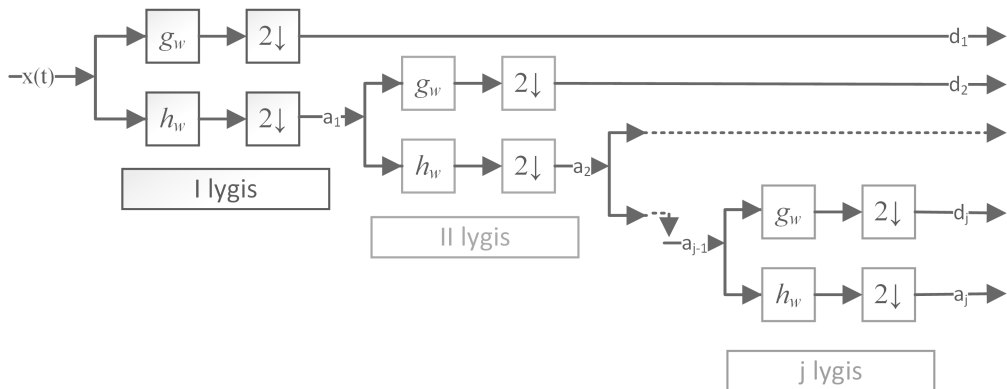
Ši lygtis turi du realiuosius parametrus a – vertimo ir b – išsiplėtimo. Jie dar vadinami atitinkamai vilnelės mastelio ir pozicijos parametrais. Taip pat svarbu paminėti, kad $a \neq 0$. Formulėje (1.10) $x(t)$ – analizuojamas signalas, $\Psi(t)$ – pagrindinės vilnelės funkcija. Praktikoje taikomos dviejų tipų vilnelių transformacijos: tolydžioji (TVT) ir diskrečioji (DVT).

Atliekama signalo $x(t)$ tolydžioji vilnelių transformacija aprašoma tokia priklausomybe [2]:

$$TVT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \Psi_{a,b}^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt; \quad (1.11)$$

čia: $\Psi^*(t)$ – pagrindinės vilnelės funkcijos kompleksinis konjugatas. Atliekama visų galimų mastelio ir pozicijos parametrų tolydžioji vilnelių transformacija. Šie parametrai tampa tęstiniais.

DVT paprastai naudojama jau įrašytiems signalams lyginti, o TVT – realiuoju laiku vykstantiems procesams. Skaiciuojant DVT taikomi signalo žemųjų ir aukštųjų dažnių filtrai. Aukštųjų dažnių filtro koeficientai vadinami detalizavimo koeficientais (angl. *details*), o žemųjų dažnių – aproksimavimo koeficientais (angl. *approximate coefficients*). Kiekvienas signalo dekompozicijos žingsnis atitinka tam tikrą skyrą. Tipinė diskrečiosios vilnelių transformacijos principinė schema pateikiama 1.5 paveiksle. Kiekvieno mastelio DVT koeficientų skaičius yra lygus pusei išskaidyto signalo ilgio. Jei signalas $x(t)$ DVT metodu yra transformuojamas iki j lygio, jį gali

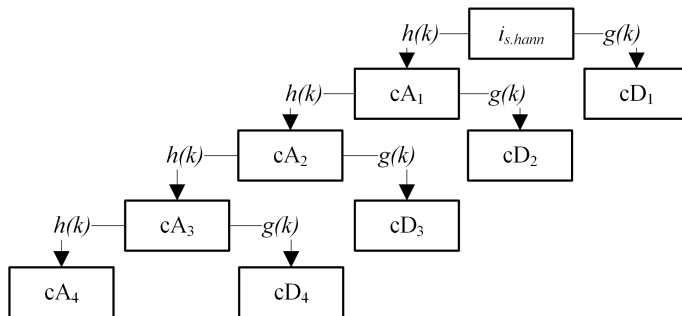


1.5 pav. Diskrečiosios vilnelių transformacijos principinė schema. Čia h_w ir g_w – kvadratinio veidrodinio filtro rinkinys (angl. *quadrature mirror filter (QMF) bank*). h_w seka vadinama žemųjų dažnių filtru, o g_w – aukštųjų dažnių filtru.

atstoti vidutinė vertė [2]:

$$x(t) = \sum_k a_{j_0,k} \phi_{j_0,k}(t) + \sum_{j \geq j_0} \sum_k d_{j,k} \Psi_{j,k}(t); \quad (1.12)$$

čia: mastelio koeficientas (lygis) j_0 yra žemiausia analizuojamo signalo dažnių juosta, o j apima aukštesnių oktavų signalo dažnio juostas, $a_{j_0,k}$ - diskretusis vilnelės mastelio j_0 ir mėginio k koeficientas, $d_{j,k}$ – mastelio koeficientas taikomas visiems kitiems j , išskyrus j_0 ir kitų mėginių k . Mastelio funkcija $\psi_{j_0,k}$ ir vilnelių pagrindinė funkcija $\Psi_{j,k}$ yra ortogonalios bazės. Ketvirtojo lygio DVT schema pateikiama 1.6 paveiksle.



1.6 pav. Ketvirto lygio DVT blokinė schema

Nors vilnelių transformacija yra patogus įrankis, kuriuo galima analizuoti pereinamuosius procesus, verta pabrėžti ir jo trūkumus. Atkreiptinas dėmesys, kad netinkamai pasirinkus pagrindinę vilnelę galimos klaidos, dėl kurių diagnostikos metodai gali būti neveiksmingi [93]. Be to, pasirinkus žemos eilės pagrindinę vilnelę, skirtingų dažnių juostos susiklos viena su kita ir rezultatai bus iškraipyti. Fundamentalusis dažnis ir jo harmoninės dedamosios gali paslėpti gedimą indikuojančius parametrus [94]. Be to, kai kuriais atvejais analizuojant žemo dažnio juostą (žemesnio nei fundamentalusis) dėl transformacijos atsiradęs iškraipymas neleidžia gauti vertingų rezultatų. Tai ypač aktualu, kai pereinamieji procesai yra labai spartūs [95].

Welcho periodograma

Welcho metodas, aprašomas [96], yra naudojamas signalo galios spektrui (periodogramai) apskaičiuoti. Kaip įėjimo signalas naudojamas duomenų masyvas c (diagnozuojant pasiskirsčiusį guolių gedimą masyvą c atitinka cA_s arba cD_s , žr. 1.6 paveikslą) suskaidomas į blokų skaičių P . Tada kiekvienam blokui taikoma lango funkcija ir apskaičiuojama periodograma:

$$S_p(f) = \left| \sum_{m=1}^M c_p(m)q_p(m)e^{-j2\pi fm} \right|^2; \quad (1.13)$$

čia: S_p – periodograma sudaryta iš P blokų, M – signalo ilgis, q_p – lango funkcija, $1 \leq m \leq M$. Galios spektro tankis (Welcho periodograma) yra vidutinė kiekvieno bloko periodogramos vertė:

$$S_c(f) = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P S_p(f). \quad (1.14)$$

Welcho periodogramos metodas yra tinkamas dideliems svyravimams periodogramoje sumažinti [97]. Duomenų skaidymas į blokus padeda tai pasiekti.

Informacijos entropija

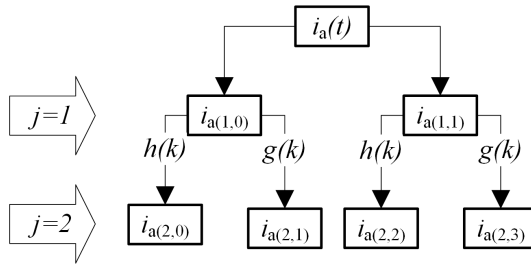
Remiantis entropija galima įvertinti, kiek informacijos teikia signalas ar sistema. Pirmasis šį terminą pradėjo vartoti L. Boltzmanas, nagrinėjęs termodinaminių sistemų chaotiškumo lygį. C. E. Šanonas 1948 m. analizavo Boltzmano principus ir pritaikė entropijos modelį informacijos teorijos mokslams [98]. Tarkime, yra atsitiktinis įvykis i_a ir galimos jo baigtys $i_{a1}, i_{a2}, \dots, i_{an}$. Kai žinoma kiekvienos baigties tikimybė $p(i_{ai})$, įvykio i_a informacijos entropija apskaičiuojama:

$$E(i_a) = - \sum_{i=1}^n p(i_{ai}) \log_2 [p(i_{ai})]. \quad (1.15)$$

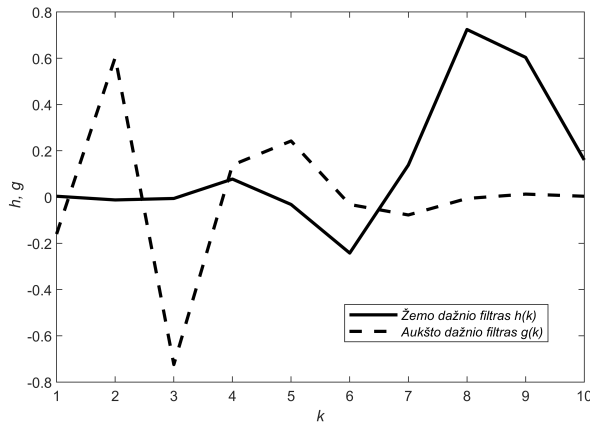
Vilnelių paketų transformacija

Vilnelių paketų transformaciją (VPT) pirmą kartą pristatė R. R. Coifmanas, Y. Mayeris ir M. V. Wickerhauseris [99]. Šie autoriai apibendrino daugiarūšio aproksimavimo ir vilnelių ryšį. Kitais žodžiais tariant, tai galingas įrankis, kuriuo signalą galima išskaidyti į dažnines dedamąsias. Atlikus j lygio išskaidymą, gaunamas 2^j skirtingų koeficientų rinkinys. Koeficientų rinkiniais vadinamos tam tikros signalo dažnių juostos. Antrojo lygio VPT diagrama vaizduojama 1.7 paveiksle. Kvadratūriniai veidrodiniai filtrai (KVF) priklauso nuo to, kokios formos yra pagrindinė vilnelė. A. I. Megahedas su kolegomis išanalizavęs populiariausias pagrindinių vilnelių šeimas (*Haar*, *Daubechies*, *Symlets* ir *Coiflets*) nustatė, kad įtampos signalo analizei tinkamiausia vilnelės funkcija yra *Daubechies 4*, o srovės signalo analizei – *Daubechies 5* [100]. Šiame darbe kaip pagrindinė vilnelė pasirinkta *Daubechies 5* funkcija. Atitinkamos filtro koeficientų reikšmės pateikiamos 1.8 paveiksle. Pirmajame etape taikoma tik mastelio keitimo ir pagrindinės vilnelės funkcija [99]:

$$W_{j,k}^n(t) = 2^{j/2} W^n(2^j t - k); \quad (1.16)$$



1.7 pav. Vilnelių paketų transformacijos diagrama. Čia $i_a(t)$ – analizuojamas signalas, $i_{a(j,k)}$ – koeficientų rinkiniai, j ir k – sveikieji skaičiai, atitinkantys išskaidymo lygį, $h(k)$ ir $g(k)$ – kvadratiniai veidrodiniai filtrai.



1.8 pav. Daubechies 5 funkcijos aukštojo ir žemojo dažnio filtrų koeficientai

čia: W – pagrindinės vilnelės funkcija, n atitinka moduliacijos indeksą. Kai $n = 2, 3, \dots$, vilnelių transformacija atliekama naudojantis [99]:

$$W_{1,k}^{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_k h(k) W_{1,k}^n(2t - k), \quad (1.17)$$

$$W_{1,k}^{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_k g(k) W_{1,k}^n(2t - k). \quad (1.18)$$

Skaičiuojant konkretų koeficientų rinkinį naudojama išraiška, kurioje aptariamam atveju $i_a(t)$ – statoriaus fazės a srovės signalas [99]:

$$i_{a(j,k)} = \int i_a(t) W_{j,k}^n(t) dt. \quad (1.19)$$

1.4.6. Kiti

Cheminė analizė

Siekiant nustatyti asinchroninio variklio gedimą, tiriama cheminė alyvos sudėtis. Šiuo metodu galima nustatyti guolių gedimus. Juodos spalvos nuosėdos guolio bėgelio ir šrato trinties zonoje rodo guolio degradaciją. Šis gedimas būdingesnis vario lydinio guoliams. Cheminė guolių alyvos analizė taikoma tik galingsiems varikliams su priverstinio tepimo guoliais [91].

Sužadintosios įtampos analizė

Variklio gedimą taip pat galima diagnozuoti analizuojant sužadintąją įtampą tarp veleno ir korpuso. Įtampa atsiranda dėl suirusios statoriaus apvijų izoliacijos. Įprastai sužadintoji įtampa yra labai maža ir reikia sąlygiškai didelio gedimo, norint jį diagnozuoti [101]. Dėl šios priežasties šis metodas yra retai taikomas.

Dalinių išlydžių analizė

Maži elektros išlydžiai statoriaus apvijose, atsiradę dėl pasenusios ir susidėvėjusios izoliacijos, vadinami daliniais išlydžiais. Lyginant pablogėjusią apvijų izoliaciją su sveika, dalinių išlydžių skaičius gali skirtis daugiau kaip 30 kartų [35]. Atlikta daug tyrimų, siekiant diagnozuoti gedimą naudojant dalinius išlydžius. Šis metodas plačiau taikomas aukštosios įtampos asinchroniniuose varikliuose. Tyrėjai yra įrodę [102, 103], kad dalinių išlydžių analizė gali padėti diagnozuoti ankstyvos stadijos gedimą ir taip išvengti didelių nuostolių. Šis metodas yra plačiai taikomas pramonėje, o jo veiksmingumas buvo patvirtintas [104]. Statoriaus apvijų izoliacijoje vykstantys daliniai išlydžiai gali būti fiksuojami dalinių išlydžių analizatoriumi (angl. *partial discharge analyzer*) [105].

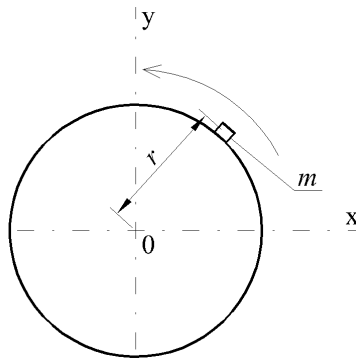
1.5. Rotoriaus masės disbalansas

Subalansuota rotoriaus masė yra ypač svarbi siekiant tolygaus asinchroninio variklio darbo. Išcentrinių jėgų sukelta besisukančios sistemos vibracija, persiduodanti į guolius ir atramas, vadinama disbalansu [106]. Siekiant, kad variklio veikimas būtų sklandus ir ilgaamžis, disbalanso lygis turi neviršyti gamintojo nustatytų normų. Įprastai disbalansas gali atsirasti gamybos proceso arba eksploatacijos metu. Disbalansas apibrėžiamas kaip matas, parodantis rotoriaus masės centro nesutapimą su jo sukimosi ašimi. Idealiu atveju šios ašys turi sutapti. Dėl disbalanso atsiranda išcentrinė jėga, kurios vertę galima apskaičiuoti naudojantis [106]:

$$F = m \cdot r \cdot \omega^2 = U \cdot \omega^2; \quad (1.20)$$

čia: m – disbalansą sukianti kūno masė (kg), r – atstumas nuo sukimosi ašies iki kūno masės centro (m), ω – kampinis sukimosi greitis (rad/s), U – spindulinis (radialinis) disbalansas (kg·m). Besisukantis kūnas, disbalansą sukiantis kūnas ir spindulys pažymėti 1.9 paveiksle. Svarbu atkreipti dėmesį, kad spindulinis disbalansas nepriklauso nuo sukimosi greičio, tačiau išcentrinė jėga, atsiradusi dėl spindulinio disbalanso, yra tiesiogiai proporcinga sukimosi greičio kvadratui.

Pagal ISO 21940-11:2017 disbalansas (balansas) vertinamas klasėmis. Standarte pateikiama vienuolika klasių (G0,4, G1, G2,5, G6,3, G16, G40, G100, G250, G630, G1600, G4000). Jei spindulinis disbalansas U yra mažesnis už leidžiamąjį spindulinį disbalansą U_{per} , sistema atitinka klasę. Skaičiuojant atitiktą klasę įvedamas naujas



1.9 pav. Besisukantis kūnas (rotorius) ir disbalansą sukiantis kūnas, kurio masė m dydis e_{per} , susiejantis disbalansą ir rotoriaus svorį M (kg) [106]:

$$e_{per} = \frac{U_{per}}{M}. \quad (1.21)$$

Šį naują dydį padauginus iš sukimosi greičio gaunama konstanta (mm/s), parodanti disbalanso klasės ribas. Duomenys iš ISO 21940-11:2017 pateikiami A priede.

1.6. Išvados

Ankstyvos stadijos asinchroninio variklio gedimo diagnozavimas dažnai siejamas su ekonomine nauda. Tai ypač svarbus uždavinys, nes asinchroniniai varikliai yra plačiausiai naudojami varikliai pramonėje. Apžvelgti skirtingus parametrus nagrinėjantys metodai turėjo vieną ar daugiau trūkumų. Temperatūros analizės metodus realizuojančios sistemos yra lėtos, todėl netinkamos analizuojant gedimus, kurie laiku nediagnozuoti sukelia neigiamas pasekmes. Cheminė guolių alyvos analizė yra patikimas metodas guolių gedimams diagnozuoti, tačiau guolių sistema turi būti su priverstiniu guolių tepimu. Tokio tipo sistemos taikomos tik sąlygiškai galintiems varikliams (>35 kW). Diagnozavimui taip pat naudojama elektromagnetinio arba mechaninio sukimo momento vertė, tačiau šio parametro analizei būdingi du trūkumai. Pirmiausia norint apskaičiuoti elektromagnetinį sukimo momentą reikia ne tik statoriaus srovės verčių, bet ir maitinimo grandinės įtampos vertės. Antra, jei bandoma registruoti mechaninio sukimo momento signalą, reikia ne tik brangaus jutiklio, bet ir jį įrengti veikiančioje sistemoje, o tai dažnai yra sunkiai įgyvendinama. Analizuojant indukuotą įtampą tarp veleno ir korpuso taip pat galima diagnozuoti gedimus statoriaus grandinėje, tačiau reikia sąlygiškai didelio gedimo, kad indukuota įtampa būtų aptinkama. Gedimą statoriaus apvijose galima diagnozuoti analizuojant dalinius išlydžius, tačiau šio metodo efektyvumas įrodytas tik diagnozuojant aukštosios įtampos asinchroninių variklių gedimus, be to, reikalingas brangus dalinių išlydžių analizatorius. Sugedęs variklio guolis skleidžia triukšmą, dėl to gedimas gali būti diagnozuojamas analizuojant triukšmo lygį. Šis metodas netinkamas aplinkoje, kurioje vienu metu veikia daugiau kaip vienas variklis. Diagnozuojant gedimus pasaukyje bene plačiausiai taikoma vibracijų analizė. Pats didžiausias metodo trūkumas yra tai, kad ganėtinai brangūs jutikliai turi būti pritvirtinami prie variklio korpuso. Tai ypač sudėtinga diagnozuojant asinchroninius variklius veikiančiuose kenksmingose aplinkose. Minėtų trūkumų neturi statoriaus srovės analizė, be to, jai registruoti gali būti naudojamas variklio valdiklyje esantis srovės transformatorius. Išanalizavus naujausią literatūrą, susijusią

su asinchroninio variklio gedimų diagnozavimu, pastebėta, kad nė vienas autorius nesiūlo universalaus diagnostikos metodo, grindžiamo gedimų dažnio statistika. Universaliu diagnostikos metodu šiuo atveju vadinamas metodas, kuriuo galima identifikuoti daugiau nei vieną skirtingo tipo gedimą. Dažniausiai pasitaikanti asinchroninio variklio gedimo kategorija yra guolių gedimas (žr. 1.1 pav. ir 1.1). Šiai kategorijai priklauso du guolių gedimai: tolygiai pasiskirstęs ir taškinis. Nors taškinis gedimas pasitaiko gerokai rečiau, mokslinės literatūros, kurioje nagrinėjamas šis gedimas, yra nepalyginamai daugiau. Patikimo metodo, leidžiančio diagnozuoti tolygiai pasiskirsčiusį guolio gedimą naudojantis tik statoriaus srovės signalu, rasti nepavyko. Nors gedimas yra dažnas, diagnostikos metodai, skirti šio tipo gedimui, yra ankstyvos projektavimo stadijos. Todėl reikia sukurti universalią asinchroninių variklių gedimų diagnozavimo metodiką, skirtą dažniausiai pasitaikantiems gedimams diagnozuoti. Įvertinus aprašytus technologinius pranašumus nuspręsta, kad gedimams diagnozuoti turi būti naudojamas tik statoriaus srovės signalas.

2. DARBO METODOLOGIJA

Šiame skyriuje pristatoma penkių dažniausiai pasitaikančių asinchroninio variklio gedimų diagnozavimo metodika. Iki šiol nėra pasiūlytų metodų, skirtų visų analizuojamų gedimų diagnostikai taikant tik statoriaus srovės signalą. Vieno fizikinio dydžio analize grindžiamai diagnostikai būdingas universalumas, pigumas, bet jo, ji nesunkiai atliekama variklių eksploatavimo vietoje.

Skyrių sudaro penki poskyriai. Pirmajame trumpai pristatyti dažniausiai pasitaikantys diagnozuojami gedimai. Antrajame pateikiama apibendrinta metodika. Trečiajame aprašomas asinchroninio variklio ir gedimų matematinis modeliavimas. Ketvirtajame pateikiamas gedimų diagnozavimo algoritmas. Penktajame glaustai apžvelgiami papildomai taikomi metodai.

2.1. Diagnozuojami gedimai

- **Taškiniai guolių gedimai** yra mechaniniai asinchroninio variklio gedimai, priskiriami guolių gedimų grupei. Šie gedimai įvyksta, kai bet kurio guolio komponento paviršiuje atsiranda netolygumų: įbrėžimų, įskilimų ar skylių. Svarbi šių gedimų savybė yra tai, kad galima nustatyti konkrečią pažeidimo vietą [15]. Eksploatuojant asinchroninius variklius guolių gedimai yra dažniausiai pasitaikantys. Jie sudaro apie 41–44 % visų gedimų (1.1 lentelė) [12, 13].

Taškiniai guolių gedimai pasitaiko rečiau nei pasiskirstę guolių gedimai, tačiau mokslinės literatūros apie juos yra nepalyginamai daugiau.

- **Pasiskirstę guolių gedimai** yra mechaniniai gedimai, kartu su taškiniiais guolių gedimais sudarantys asinchroninio variklio guolių gedimų grupę. Šie gedimai nuo taškinių guolių gedimų skiriasi tuo, kad negalima nustatyti konkrečios pažeidimo vietos. Pasiskirsčiusių guolių gedimų priežasčių pavyzdžiai: alyvos trūkumas, priemaišos alyvoje. Atsiradus šiam gedimui asinchroninis variklis negeneruoja papildomų periodinių vibracijų [15].

Pasiskirstę guolių gedimai dažniausiai diagnozuojami remiantis variklio korpuso vibracijos signalo analize [22]. Yra šaltinių, kuriuose teigiama, kad statoriaus srovės signalas yra tinkamas parametras šiems gedimams diagnozuoti, tačiau tokie tyrimai yra dar ankstyvos stadijos [107]. Mokslinės literatūros, kurioje nagrinėjami pasiskirstę guolių gedimai, yra ypač mažai.

- **Statoriaus apvijų gedimai** yra elektriniai gedimai statoriaus elektrinėje grandinėje. Šie statoriaus gedimai sudaro 28–36 % visų asinchroninio variklio gedimų [12, 13]. Trumpasis jungimas statoriaus grandinėje pakeičia oro tarpe veikiančią magnetinį srautą ir statoriaus srovėje atsiranda gedimą indikuojančios dažninės dedamosios [60, 61]. Analizuojant šias dedamąsias galima diagnozuoti gedimą.
- **Rotoriaus juostų skilimas** priskiriamas prie rotoriaus gedimų grupės. Rotoriaus gedimai sudaro apie 8–10 % visų asinchroninius variklių gedimų [12, 13]. Rotoriaus juostų gedimas įvyksta dėl įvairių priežasčių, pavyzdžiui, rotoriaus asimetrijos, per didelių apkrovų. Nutrūkus vienai juostai, gretimomis juostomis ima tekėti didesnė srovė, todėl pakyla jų temperatūra ir jas pradeda veikti didesnės jėgos [34]. Dėl šių priežasčių gretimos juostos taip pat trūksta ir gedimas plinta.

Trūkus rotoriaus juostai, variklis generuoja specifines statoriaus srovės spektro dedamąsias [36]. Jų dažnį galima apskaičiuoti žinant rotoriaus sukimosi greitį ir maitinimo grandinės įtampos dažnį.

- **Dinaminis rotoriaus masės disbalansas** yra suminis statinio ir porinio rotoriaus masės disbalansų padarinys [35]. Šis gedimas priskiriamas prie mechaninių rotoriaus gedimų. Dinaminis rotoriaus masės disbalansas egzistuoja visuose varikliuose, tačiau esant žemam jo lygiui variklį galima eksploatuoti be jokių trūkumų [42]. Jei disbalanso lygis padidėja, atsiranda vibracijos. Jei disbalansas yra ypač didelis, rotorius ir statorius gali net susiliesti.

2.2. Siūlomos metodikos taikymas

Asinchroninio variklio diagnostiką siūloma atlikti tokia tvarka:

1. Surenkami šie duomenys apie tiriamą variklį ir jo darbo režimus:
 - (a) variklio elektriniai ir mechaniniai parametrai,
 - (b) maitinimo grandinės dažnis,
 - (c) apkrovos dydis.
2. Atliekamas variklio gedimų matematinis modeliavimas:
 - (a) modeliuojant kiekvieną gedimą atskirai analizuojamas statoriaus srovės signalas nesant gedimo ir jam esant. Signalams pritaikius atitinkamo gedimo diagnostavimo algoritmą apskaičiuojamos aktualios vertės ir išskiriamos slenkstinės, dėl gedimo pakitusios, vertės;
 - (b) modeliuojant apskaičiuotos slenkstinės vertės išsaugomos tolesniam naudojimui.
3. Asinchroniniam varikliui veikiant įprastomis sąlygomis registruojama statoriaus srovė. Vienos sekundės trukmės signalas registruojamas modeliuojant naudotu diskretizavimo dažniu.
4. Atliekamas statoriaus srovės signalo mėginio skaitmeninis apdorojimas. Atliekant skaitmeninį signalų apdorojimą kiekvienam gedimui taikomas algoritmas, kuris yra analogiškas algoritmui, naudotam modeliuojant tą gedimą. Apdorojus signalą lyginamos gedimą indikuojančios vertės ir priimamas sprendimas dėl gedimo buvimo. Tokiu būdu diagnozuojami visi analizuojami gedimai: taškinis guolių, pasiskirstęs guolių, statoriaus apvijų, rotoriaus juostų ir dinaminio rotoriaus masės disbalanso gedimai.
5. Informacija dėl gedimų buvimo perduodama vartotojui.

2.3. Asinchroninio variklio matematinis modelis

Asinchroninio variklio matematinis modeliavimas yra skirtas statoriaus srovės atsakui į darbo režimo ar gedimo simuliaciją tirti. Modeliuojant galima įvertinti skirtingų metodų efektyvumą priklausomybę nuo variklio galios ar kitų parametru (maitinimo grandinės, apkrovos dydžio). Taip pat galima prognozuoti statoriaus srovės atsaką į skirtingus darbo režimus ir nustatyti aktualių parametru slenkstines ribas, skirtas gedimui diagnozuoti.

Trifazio asinchroninio variklio matematinis modelis sukurtas aplinkoje „Matlab“ naudojantis keturiomis pagrindinėmis lygtimis (2.1–2.4), kurių detalus išvedimas pateikiamas [8].

Pagrindinė asinchroninio variklio rotoriaus ir statoriaus srovių diferencialinė lygtis, naudota modeliuojant [8]:

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \frac{di_{as}}{dt} \\ \frac{di_{bs}}{dt} \\ \frac{di_{cs}}{dt} \\ \frac{di'_{ar}}{dt} \\ \frac{di'_{br}}{dt} \\ \frac{di'_{cr}}{dt} \end{bmatrix} &= \frac{1}{L_{\Sigma L}} \begin{bmatrix} -r_s L_{\Sigma m} & -\frac{1}{2} r_s L_{ms} & -\frac{1}{2} r_s L_{ms} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2} r_s L_{ms} & -r_s L_{\Sigma m} & -\frac{1}{2} r_s L_{ms} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2} r_s L_{ms} & -\frac{1}{2} r_s L_{ms} & -r_s L_{\Sigma m} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -r_r L_{\Sigma m} & -\frac{1}{2} r_r L_{ms} & -\frac{1}{2} r_r L_{ms} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{2} r_r L_{ms} & -r_r L_{\Sigma m} & -\frac{1}{2} r_r L_{ms} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{2} r_r L_{ms} & -\frac{1}{2} r_r L_{ms} & -r_r L_{\Sigma m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ i'_{ar} \\ i'_{br} \\ i'_{cr} \end{bmatrix} \\
 + \frac{1}{L_{\Sigma L}} &\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & r_r L_{ms} \cos(\theta_r) & r_r L_{ms} \cos(\theta_r + \frac{2}{3}\pi) & r_r L_{ms} \cos(\theta_r - \frac{2}{3}\pi) \\ 0 & 0 & 0 & r_r L_{ms} \cos(\theta_r - \frac{2}{3}\pi) & r_r L_{ms} \cos(\theta_r) & r_r L_{ms} \cos(\theta_r + \frac{2}{3}\pi) \\ 0 & 0 & 0 & r_r L_{ms} \cos(\theta_r + \frac{2}{3}\pi) & r_r L_{ms} \cos(\theta_r - \frac{2}{3}\pi) & r_r L_{ms} \cos(\theta_r) \\ r_s L_{ms} \cos(\theta_r) & r_s L_{ms} \cos(\theta_r - \frac{2}{3}\pi) & r_s L_{ms} \cos(\theta_r + \frac{2}{3}\pi) & 0 & 0 & 0 \\ r_s L_{ms} \cos(\theta_r + \frac{2}{3}\pi) & r_s L_{ms} \cos(\theta_r) & r_s L_{ms} \cos(\theta_r - \frac{2}{3}\pi) & 0 & 0 & 0 \\ r_s L_{ms} \cos(\theta_r - \frac{2}{3}\pi) & r_s L_{ms} \cos(\theta_r + \frac{2}{3}\pi) & r_s L_{ms} \cos(\theta_r) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ i'_{ar} \\ i'_{br} \\ i'_{cr} \end{bmatrix} \\
 + \frac{1}{L_{\Sigma L}} &\begin{bmatrix} 0 & 1,299L_{ms}^2\omega_r & -1,299L_{ms}^2\omega_r & L_{\Sigma ms}\omega_r \sin(\theta_r) & L_{\Sigma ms}\omega_r \sin(\theta_r + \frac{2}{3}\pi) & L_{\Sigma ms}\omega_r \sin(\theta_r - \frac{2}{3}\pi) \\ -1,299L_{ms}^2\omega_r & 0 & 1,299L_{ms}^2\omega_r & L_{\Sigma ms}\omega_r \sin(\theta_r - \frac{2}{3}\pi) & L_{\Sigma ms}\omega_r \sin(\theta_r) & L_{\Sigma ms}\omega_r \sin(\theta_r + \frac{2}{3}\pi) \\ 1,299L_{ms}^2\omega_r & -1,299L_{ms}^2\omega_r & 0 & L_{\Sigma ms}\omega_r \sin(\theta_r + \frac{2}{3}\pi) & L_{\Sigma ms}\omega_r \sin(\theta_r - \frac{2}{3}\pi) & L_{\Sigma ms}\omega_r \sin(\theta_r) \\ L_{\Sigma ms}\omega_r \sin(\theta_r) & L_{\Sigma ms}\omega_r \sin(\theta_r - \frac{2}{3}\pi) & L_{\Sigma ms}\omega_r \sin(\theta_r + \frac{2}{3}\pi) & 0 & -1,299L_{ms}^2\omega_r & 1,299L_{ms}^2\omega_r \\ L_{\Sigma ms}\omega_r \sin(\theta_r + \frac{2}{3}\pi) & L_{\Sigma ms}\omega_r \sin(\theta_r) & L_{\Sigma ms}\omega_r \sin(\theta_r - \frac{2}{3}\pi) & 1,299L_{ms}^2\omega_r & 0 & -1,299L_{ms}^2\omega_r \\ L_{\Sigma ms}\omega_r \sin(\theta_r - \frac{2}{3}\pi) & L_{\Sigma ms}\omega_r \sin(\theta_r + \frac{2}{3}\pi) & L_{\Sigma ms}\omega_r \sin(\theta_r) & -1,299L_{ms}^2\omega_r & 1,299L_{ms}^2\omega_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ i'_{ar} \\ i'_{br} \\ i'_{cr} \end{bmatrix} \\
 + \frac{1}{L_{\Sigma L}} &\begin{bmatrix} 2L_{ms} + L'_{lr} & \frac{1}{2}L_{ms} & \frac{1}{2}L_{ms} & -L_{ms} \cos(\theta_r) & -L_{ms} \cos(\theta_r + \frac{2}{3}\pi) & -L_{ms} \cos(\theta_r - \frac{2}{3}\pi) \\ \frac{1}{2}L_{ms} & 2L_{ms} + L'_{lr} & \frac{1}{2}L_{ms} & -L_{ms} \cos(\theta_r - \frac{2}{3}\pi) & -L_{ms} \cos(\theta_r) & -L_{ms} \cos(\theta_r + \frac{2}{3}\pi) \\ \frac{1}{2}L_{ms} & \frac{1}{2}L_{ms} & 2L_{ms} + L'_{lr} & -L_{ms} \cos(\theta_r + \frac{2}{3}\pi) & -L_{ms} \cos(\theta_r - \frac{2}{3}\pi) & -L_{ms} \cos(\theta_r) \\ -L_{ms} \cos(\theta_r) & -L_{ms} \cos(\theta_r - \frac{2}{3}\pi) & -L_{ms} \cos(\theta_r + \frac{2}{3}\pi) & 2L_{ms} + L'_{lr} & \frac{1}{2}L_{ms} & \frac{1}{2}L_{ms} \\ -L_{ms} \cos(\theta_r + \frac{2}{3}\pi) & -L_{ms} \cos(\theta_r) & -L_{ms} \cos(\theta_r - \frac{2}{3}\pi) & \frac{1}{2}L_{ms} & 2L_{ms} + L'_{lr} & \frac{1}{2}L_{ms} \\ -L_{ms} \cos(\theta_r - \frac{2}{3}\pi) & -L_{ms} \cos(\theta_r + \frac{2}{3}\pi) & -L_{ms} \cos(\theta_r) & \frac{1}{2}L_{ms} & \frac{1}{2}L_{ms} & 2L_{ms} + L'_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{as} \\ u_{bs} \\ u_{cs} \\ u'_{ar} \\ u'_{br} \\ u'_{cr} \end{bmatrix}; \quad (2.1)
 \end{aligned}$$

čia: $L_{\Sigma L} = (3L_{ms} + L'_{lr})$, $L_{\Sigma m} = 2L_{ms} + L'_{lr}$, $L_{\Sigma ms} = \frac{3}{2}L_{ms}^2 + L_{ms}L'_{lr}$, r_s – statoriaus vienos fazės aktyvioji varža (Ω), r_r – rotoriaus aktyvioji varža (Ω), L_{ms} – magnetinis statoriaus induktyvumas (apskaičiuojamas iš variklio parametrų $L_{ms} = L_{mr} = X_M/2\pi f$) (H), X_M – magnetinė reaktyvioji varža (Ω) (angl. *magnetizing reactance*), L_{ls} – statoriaus nuotėkio induktyvumas (H), L_{lr} – rotoriaus nuotėkio induktyvumas (H), θ_r – rotoriaus ašies kampo poslinkis (elektrinis) (rad), ω_r – rotoriaus mechaninis kampinis greitis (rad/s), i_{as}, i_{bs}, i_{cs} – statoriaus fazinės srovės (A), $i'_{ar}, i'_{br}, i'_{cr}$ – rotoriaus fazinės srovės (A), u_{as}, u_{bs}, u_{cs} – statoriaus fazinės įtampos (V), $u'_{ar}, u'_{br}, u'_{cr}$ – rotoriaus fazinės įtampos (V).

Apskaičiavus statoriaus ir rotoriaus srovių stiprį galima apskaičiuoti elektrinį sukimo momentą [8]:

$$T_e = -\frac{p}{2}L_{ms} \begin{bmatrix} i_{as} & i_{bs} & i_{cs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin(\theta_r) & \sin(\theta_r + \frac{2}{3}\pi) & \sin(\theta_r - \frac{2}{3}\pi) \\ \sin(\theta_r - \frac{2}{3}\pi) & \sin(\theta_r) & \sin(\theta_r + \frac{2}{3}\pi) \\ \sin(\theta_r + \frac{2}{3}\pi) & \sin(\theta_r - \frac{2}{3}\pi) & \sin(\theta_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_{ar} \\ i'_{br} \\ i'_{cr} \end{bmatrix}; \quad (2.2)$$

čia: p – polių skaičius.

Rotoriaus kampinio greičio kitimo lygtis [8]:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{p}{2J}T_e - \frac{B_m}{J}\omega_r - \frac{p}{2J}T_L; \quad (2.3)$$

čia: J – asinchroninio variklio rotoriaus inercijos momentas ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$), T_e – elektrinis sukimo momentas ($\text{N} \cdot \text{m}$), B_m – trinties koeficientas ($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{rad}$), T_L – apkrovos

sukimo momentas ($N \cdot m$) (reikšmė įvedama atliekant modeliavimą atsižvelgiant į surinktus tiriama variklio duomenis).

Rotoriaus ašies posūkio kampo pokyčio lygtis [8]:

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r. \quad (2.4)$$

Siekiant, kad asinchroninio variklio darbo modeliavimas naudojant (2.1–2.4) lygtis būtų sėkmingas, reikia žinoti variklio parametrus. Šiame darbe naudotų trijų asinchroninių variklių parametrai pateikiami 2.1 lentelėje [5], [108], [109].

2.1 lentelė. Gedimams modeliuoti naudotų asinchroninių variklių parametrai

Parametras	Žymėjimas	Varikliai, šaltinis		
		VI, [109]	V2, [108]	V3, [5]
Galia, kW	P_n	0,75	2,237	7,5
Vardinė įtampa, V	U_n	240	220	220
Vardinis dažnis, Hz	f_n	50	60	60
Vardinis rotoriaus greitis, rpm	ω_{rn}	1440	1710	1160
Polių skaičius	P	4	4	6
Statoriaus aktyvioji varža, Ω	R_s	2,783333	0,435	0,282
Statoriaus reaktyvioji varža, Ω	X_{ls}	3,351	0,754	0,512
Rotoriaus aktyvioji varža, Ω	R_r	2,81	0,816	0,151
Rotoriaus reaktyvioji varža, Ω	X_{lr}	3,351	0,754	0,268
Tarpusavio reaktyvioji varža, Ω	X_M	62,937	26,13	14,865
Rotoriaus inercijos momentas, $kg \cdot m^2$	J	0,05	0,089	0,4
Trinties koeficientas	B_m	0,001585	0,008	0,124

2.3.1. Maitinimo grandinės parametrai

Modeliuojant asinchroninio variklio darbą būtina naudoti skirtingo dažnio ir amplitudės maitinimo grandinės įtampą. Dažnio keitiklis yra papildomas įrenginys, kuriuo galima reguliuoti rotoriaus sukimosi greičio vertę arba užtikrinti saugų variklio paleidimą. Populiariausias dažnio keitiklio valdymo algoritmas yra $U/f = const$. Taikant šį algoritmą įtampos dažnis ir amplitudinė vertė buvo keičiami dauginant nominalųjį dažnį iš pasirinktos procentinės išraiškos. Pirmojo variklio (2.1 lentelės variklis VI) atveju tai būtų $f = 75\% \cdot 50 = 37,5$ Hz, o $U = 75\% \cdot 240 = 180$ V. Taikant tokius maitinimo grandinės parametrus galima analizuoti variklio darbą esant skirtingam rotoriaus sukimosi greičiui. Taip pat verta pabrėžti, kad naudojant vardines įtampos ir dažnio vertes modeliuojamas variklio darbas yra artimas variklio darbui maitinant iš skirstomojo tinklo.

2.3.2. Gedimų modeliavimas

Asinchroninio variklio gedimai modeliuoti siekiant nustatyti aktualių parametru, apskaičiuojamų naudojant statoriaus srovės signalą, ribines vertes, skirtas gedimui diagnozuoti. Aktualūs parametrai yra statoriaus srovės spektro dedamosios, informacijos entropijos santykio reikšmės ir Welcho periodogramos specifinės vertės.

Trumpasis jungimas statoriaus grandinėje pakeičia oro tarpe veikiančią srovės srautą ir statoriaus srovės spektre atsiranda dažninės dedamosios, kurių dažnio vertė

apskaičiuojama naudojantis [110]:

$$f_{st} = f \left[\frac{n}{pp} (1 - s) \pm k \right]; \quad (2.5)$$

čia: f_{st} – statoriaus srovės dažnių spektro dedamosios, atsiradusios dėl gedimo, vertė (Hz), f – maitinimo grandinės įtampos dažnis (Hz), $n = 1, 2, 3, \dots$ (su statoriumi siejamos specifinės dedamosios harmoninės eilės numeris), $k = 1, 3, 5, \dots$ (su rotoriumi siejamos specifinės dedamosios harmoninės eilės numeris), pp – polių porų skaičius, s – slydimas.

Rotorius, skilus arba trūkus juostai, generuoja specifines srovės dedamąsias, kurias galima aptikti analizuojant statoriaus srovės dažnių spektrą. Šių dedamųjų dažnį galima apskaičiuoti naudojantis [37]:

$$f_{brb} = f(1 \pm 2ns); \quad (2.6)$$

čia: f_{brb} – srovės spektro dažninė dedamoji (Hz), f – maitinimo grandinės įtampos dažnis (Hz), n – teigiamasis sveikasis skaičius (su statoriumi siejamos specifinės dedamosios harmoninės eilės numeris), s – slydimas. Dėl šių specifinių srovės dažnių spektro dedamųjų pasireiškia pulsacijos efektas (angl. *ripple effect*) [37]. Žemesnio dažnio dedamoji $f(1-2s)$ turi didžiausią vertę. Dėl jos sukimo momentas ir greitis tampa nepastovūs. Simetrinė (fundamentaliosios dedamosios atžvilgiu) dedamoji atsikartoja ir aukštesniame dažnyje $f(1 + 2s)$. Efektas pastebimas ir dar aukštesnėse dažnio dedamosiose, apskaičiuojamose naudojantis (2.6). Žemesnio dažnio ir didesnės amplitudės dedamosios $f(1-2s)$ amplitudinę vertę galima naudoti kaip gedimą indikuojantį parametą [111].

Modeliuojant rotoriaus ir statoriaus grandinės gedimus buvo keičiama viena iš trijų fazinių varžų [112]. Modeliuojant statoriaus gedimą buvo keičiama statoriaus fazės a varža $[R_{sa}, X_{lsa}]$, o modeliuojant rotoriaus gedimą buvo keičiama rotoriaus fazės a varža $[R_{ra}, X_{lra}]$. Atlikus matematinį modeliavimą analizuojamos f_{st} ir f_{brb} dažninės dedamosios. Statoriaus elektrinėje grandinėje įvykus trumpajam jungimui srovė gali pradėti tekėti mažesnės varžos grandine (eliminudama dalį grandinės), todėl modeliuojant gedimą mažinama fazinė varža. Kitu atveju, pažeidus statoriaus arba rotoriaus grandinę, srovė ima tekėti alternatyvia grandine (pavyzdžiui, gretimomis rotoriaus juostomis), o grandinės varža padidėja.

Taškinis guolio gedimas aptinkamas analizuojant specifinę dažninę dedamąją statoriaus srovės dažnių spektre. Ši dedamoji išryškėja dėl virpesių, atsiradusių dėl mechaninio guolio pažeidimo. Modeliuojant taškinį guolio gedimą apkrovos sukimo momento signalo vertė papildoma periodine dedamąja, kurios svyravimo dažnis atitinka guolio gedimo sukeltos vibracijos dažnį [32]:

$$F_{CF} = \frac{1}{2} F_R \left(1 - \frac{D_B \cos(\theta)}{D_P} \right), \quad (2.7)$$

$$F_{ORF} = \frac{N_B}{2} F_R \left(1 - \frac{D_B \cos(\theta)}{D_P} \right), \quad (2.8)$$

$$F_{IRF} = \frac{N_B}{2} F_R \left(1 + \frac{D_B \cos(\theta)}{D_P} \right), \quad (2.9)$$

$$F_{BF} = \frac{D_P}{2D_B} F_R \left(1 - \frac{D_B^2 \cos^2(\theta)}{D_P^2} \right); \quad (2.10)$$

čia: $F_{CF,ORF,IRF,BF}$ – parametras, naudojamas vieno iš gedimų sukeltam virpesių dažniui apskaičiuoti (Hz), CF – narvelio gedimas, ORF – išorinio bėgelio gedimas, IRF – vidinio bėgelio gedimas, BF – šrato gedimas, F_R – rotoriaus sukimosi dažnis (Hz), N_B – šratų skaičius, D_B – šratų skersmuo (mm), D_P – šratų judėjimo trajektorijos skersmuo (mm), θ – kampas tarp pažeidimo normalės (F_{RE}) ir šrato ašies. Analizuojant statoriaus srovę vertinama dažninės dedamosios amplitudinė vertė, kuri yra gedimo diagnozavimo kriterijus. Dažninės dedamosios dažnis apskaičiuojamas pagal [113]:

$$F_{BNG} = |F_E \pm m \cdot F_{fault}|; \quad (2.11)$$

čia: F_{BNG} – specifinės, su gedimo buvimu susijusios, dedamosios dažnis (Hz), F_E – maitinimo grandinės įtampos dažnis (Hz), F_{fault} – vienos iš keturių dedamųjų dažnis, apskaičiuotas pagal (2.7 – 2.10) (Hz), m – sveikasis skaičius. Imituojant gedimą apkrovos sukimo momento signalas papildomas šia dedamąja.

Pasiskirstęs guolių gedimas iškraipo statoriaus srovės signalą, bet nenustatyta, kokius konkrečius pokyčius jis sukelia. Tyrėjai [30] teigia, kad dėl gedimo atsiradę signalo pokyčiai yra panašūs į triukšmą. Kadangi nėra duomenų, kokie statoriaus srovės pokyčiai atsiranda įvykus pasiskirsčiusiam guolių gedimui, modeliuojant gedimą buvo nuspręsta generuoti atsitiktinį signalo triukšmą. Signalo atsitiktinio triukšmo lygis keistas prie konkrečios srovės signalo vertės I pridedant dedamąją $k = I \cdot n \cdot L$, čia: I – signalo amplitudinė vertė, n – atsitiktinis skaičius [0; 1] ribose, L – atsitiktinį signalo triukšmą imituojančios dedamosios lygis, išreikštas procentais (%).

Dinaminis rotoriaus masės disbalansas diagnozuojamas analizuojant specifinę statoriaus srovės spektro dažninę dedamąją. Jos vertė pakinta dėl atsiradusių virpesių. Gedimą indikuojančios statoriaus srovės harmoninės dedamosios dažnis apskaičiuojamas pagal tokią išraišką [42, 51, 114]:

$$f_{ubm} = f \left[\frac{k(1-s)}{pp} \right] + 1; \quad (2.12)$$

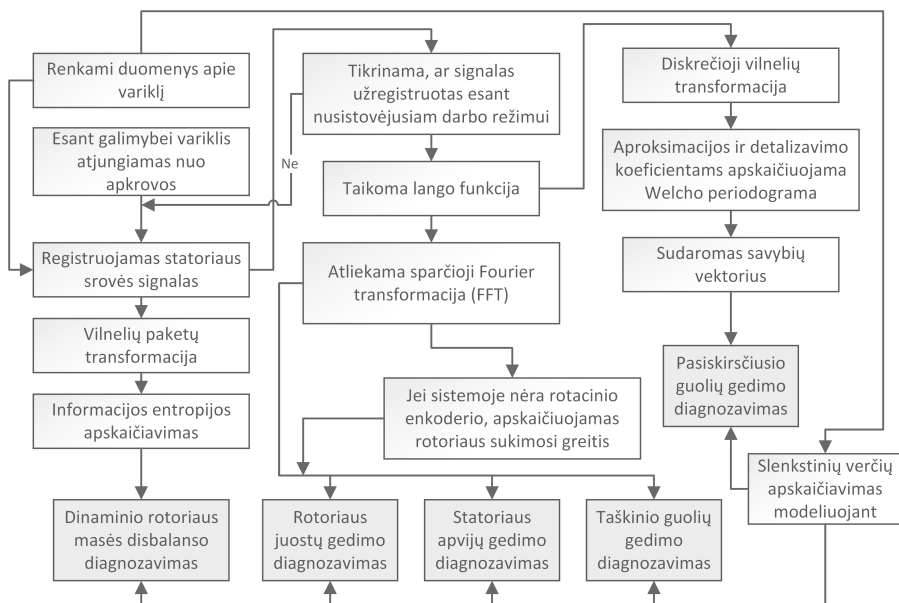
čia: f – maitinimo grandinės įtampos dažnis (Hz), s – variklio slydimas, pp – polių porų skaičius ir k – sveikasis skaičius. Imituojant gedimą apkrovos sukimo momento signalas papildomas šia dedamąja.

2.4. Populiariausių asinchroninio variklio gedimų diagnozavimo algoritmas

Dažniausių asinchroninio variklio gedimų diagnozavimo algoritmas sukurtas siekiant sujungti žinomus ir sukurtus naujus diagnostikos metodus. Gedimai, kuriuos galima diagnozuoti naudojant siūlomą algoritmą, buvo parinkti pagal statistinius apklausų rezultatus. Diagnozavimo proceso žingsniai ir gedimų tipai pateikiami 2.2 lentelėje. Svarbu atkreipti dėmesį, kad procesų sąrašas pateiktas jų atlikimo tvarka. Dažniausių asinchroninio variklio gedimų diagnozavimo algoritmas pateikiamas 2.1 paveiksle. Pirmasis algoritmo žingsnis yra duomenų rinkimas. Variklio techniniai parametrai yra reikalingi atliekant matematinį modeliavimą, taip pat norint sėkmingai įrašyti statoriaus srovės signalą. Paskui eina du lygiagrečiai atliekami veiksmai: tai statoriaus srovės registravimas kartu su konkrečių gedimų diagnozavimo algoritmų taikymu ir matematinis gedimų modeliavimas, siekiant apskaičiuoti gedimą rodančias slenkstines vertes. Algoritmo pabaigoje sumodeliuotos vertės lyginamos su apskaičiuotomis naudojant užregistruotą srovės signalą. Įvertinami gauti rezultatai, ir jei neviršijamos slenkstinės ribos, po tam tikro delsos laiko procesas kartojamas. Jei gedimas aptinkamas, informacija perduodama vartotojui.

2.2 lentelė. Asinchroninio variklio gedimai ir jų diagnostavimo procesai

Procesai	Gedimai				
	Taškinis guolių gedimas	Pasiskirstęs guolių gedimas	Statoriaus apvijų gedimas	Rotoriaus juostų gedimas	Dinaminis rotoriaus m. disb.
Statoriaus srovės signalo registravimas	+	+	+	+	+
Patikrinimas, ar variklio darbo režimas nusistovėjęs	+		+	+	
Statoriaus srovės signalui taikoma lango funkcija	+	+	+	+	
Statoriaus srovės signalui taikoma sparčioji Fourier transformacija	+		+	+	
Rotoriaus sukimosi greičio apskaičiavimas	+		+	+	
Vilnelių transformacija		+			
Welcho periodograma		+			
Vilnelių paketų transformacija					+
Informacijos entropijos apskaičiavimas					+



2.1 pav. Dažniausių asinchroninio variklio gedimų diagnostavimo algoritmas

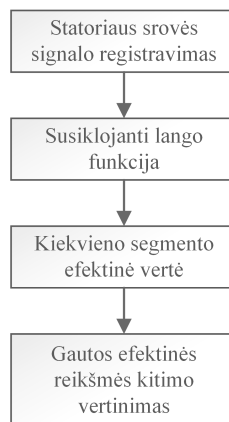
2.4.1. Taškinio guolių gedimo diagnostavimas

Kaip pateikta 2.2 lentelėje ir 2.1 paveiksle, taškiniam guolių gedimui diagnozuoti, naudojant statoriaus srovės signalą, atliekami šie veiksmai:

1. tikrinama, ar užregistruotas nusistovėjusio proceso signalas;
2. statoriaus srovės signalui taikoma lango funkcija. Pasirinkta Hanno lango funkcija, nes jai būdinga didelė skyra, tikslumas ir ji yra tinkama harmoniniams signalams [115];
3. atliekama statoriaus srovės signalo sparčioji Fourier transformacija;
4. skaičiuojamas rotoriaus sukimosi greitis (jei nėra išmatuotos vertės);
5. skaičiuojamos amplitudinės statoriaus srovės spektro vertės.

Analizuojamas dažnių diapazonas $f = 0 \div 500$ (Hz), pasirinktas įvertinus galimus rotoriaus sukimosi greičius. Siekiant užtikrinti raišką siūlomas $F_s = 8192$ Hz diskretizavimo dažnis. Kaip aprašyta 1.2.2 poskyryje, taškiniai guolių gedimai gali būti diagnozuojami analizuojant nusistovėjusio darbo režimo statoriaus srovės signalą. Ar signalas nusistovėjusios būsenos, galima patikrinti naudojant nusistovėjusio asinchroninio variklio darbo režimo aptikimo algoritmą.

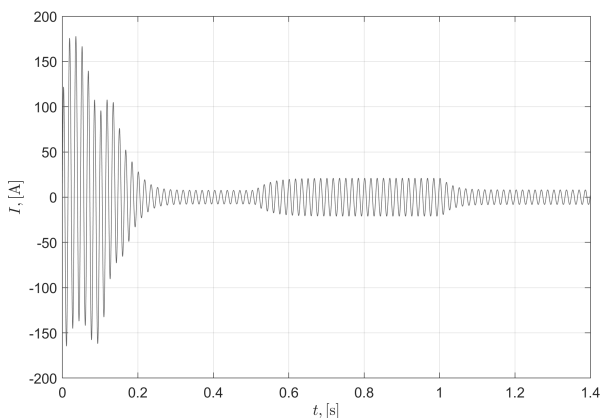
Nusistovėjusio asinchroninio variklio darbo režimo aptikimo algoritmo procesai pateikiami 2.2 paveiksle. Kaip įėjimo dydis algoritme naudojamas statoriaus srovės signalas. Tyrėjas parenka lango funkciją ir jos ilgį. Lango ilgis l turi būti lyginis skaičius ir, kaip parodė bandymai, 10 ar daugiau kartų mažesnis už signalo verčių masyvo dydį N . Parinkus lango ilgį, atskiriems signalo segmentams, kurių ilgis yra lygus lango funkcijos ilgiui, taikoma slenkančio lango funkcija, ją perstumiant puse lango ilgio $l/2$. Taip įvertinamos visos tarpinės vertės. Toliau



2.2 pav. Nusistovėjusio asinchroninio variklio darbo režimo aptikimo algoritmo procesai ir jų atlikimo tvarka

apskaičiuojama kiekvieno gauto signalo komponento efektinė vertė. Po to vertinama efektyvių verčių funkcijos kitimo sparta. Jei kitimo sparta nekinta ir yra lygi nuliui, galima daryti prielaidą, kad procesas nusistovėjęs, o jei kitimo modulio vertė didesnė už slenksstinę ribą (artimą nuliui), procesas nenusistovėjęs. Toliau pateikiamas praktinis pavyzdys, kuriuo parodomas algoritmo efektyvumas.

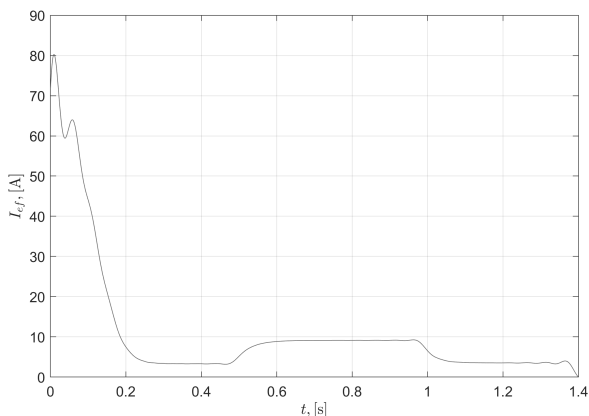
Naudojantis sudarytu variklio matematiniu modeliu apskaičiuojamas statoriaus vienos fazinės srovės stiprio verčių kitimas (žr. 2.3 paveikslą). Modeliuojant naudoti variklio $V2$ parametrai (žr. 2.1 lentelę). Kaip matyti iš paveikslėlio, amplitudinės srovės



2.3 pav. Statoriaus srovė paleidimo ir kintančios apkrovos sąlygomis

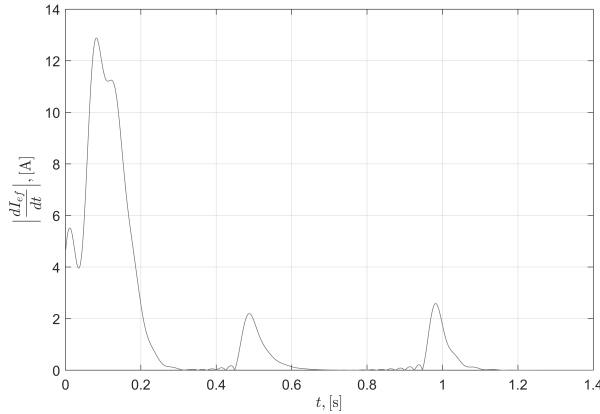
vertės kinta laike. To priežastis – variklio paleidimas. Be to, vykstant modeliavimui kinta apkrovos sukimo momento vertė. Nuo simuliacijos pradžios iki $t = 0,5$ s parinkta apkrovos sukimo momento vertė $\tau_{apk} = 0$ Nm, nuo $t=0,5$ s – $\tau_{apk} = 44$ Nm, o nuo $t = 1$ s – $\tau_{apk} = 4$ Nm. Nurodytos vertės pasirinktos atsitiktinai, kad būtų pastebimas srovės stiprio vertės kitimas.

Toliau signalo segmentams taikoma lango funkcija ir apskaičiuojama efektinė statoriaus srovės segmento vertė. Srovės signalo efektinės vertės kitimas kintant laikui pateikiamas 2.4 paveiksle. Kaip matyti iš paveikslėlio pateikiamų rezultatų, esant



2.4 pav. Statoriaus srovės segmentų efektinės vertės priklausomybė nuo laiko

pereinamajam procesui efektinė srovės stiprio vertė kinta, o esant nusistovėjusiai būsenai efektinė vertė yra pastovi. Toliau skaičiuojama efektinės vertės kitimo sparta. Rezultatai pateikiami 2.5 paveiksle. Analizuojant rezultatus galima pastebėti,



2.5 pav. Statoriaus srovės segmentų efektinės vertės kitimo sparta

kad kitimo spartos modulio reikšmė esant nusistovėjusiam režimui yra artima 0 ($\left| \frac{dI_{ef}}{dt} \right| \approx 0$). Parinkus slenksstinę ribą, galima spręsti, ar procesas yra nusistovėjęs, ar pereinamasis.

Siūlomas algoritmas nėra vienintelis, kurį naudojant galima patikrinti proceso būseną. 1.3 poskyryje pateikiama nuorodų į tyrimus, kuriais analizuojama proceso būseną, tačiau siūlomas algoritmas išsiskiria nesudėtingais skaičiavimais ir yra adaptuotas periodiniams signalams.

Nustačius, ar signalas yra įrašytas esant nusistovėjusiam variklio darbo režimui, vertinamos signalo specifinio dažnio dedamųjų amplitudinės vertės. Jos gaunamos signalo reikšmėms pritaikius lango funkciją ir atlikus sparčiąją Fourier transformaciją. Jei sistemoje nėra rotacinio enkoderio, rotorius sukimosi greičio vertę galima apskaičiuoti remiantis statoriaus srovės spektro dedamosiomis, kurias indukuoja rotorius juostos [116, 117]. Rotoriaus juostų indukuotų harmoninių srovės dedamųjų dažniai apskaičiuojami [117]:

$$f_{sh} = f \left((k \cdot R + m_d) \cdot \left(\frac{1-s}{p/2} \right) + m_w \right); \quad (2.13)$$

čia: f – maitinimo grandinės dažnis (Hz), $k = 0, 1, 2, \dots$, R – rotoriaus juostų skaičius, $m_d = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ – rotoriaus dinaminio ekscentriškumo eilė, s – slydimas, p – polių skaičius, $m_w = 1, \pm 3, \pm 5, \dots$ – rotoriaus statinio ekscentriškumo eilė. Norint apskaičiuoti konkrečios dedamosios dažnį f_{sh} reikia žinoti parametrus R , m_d ir m_w , priklausančius nuo variklio konstrukcinių savybių. Tačiau į lygtį įstačius $k = 0$, $m_d = \pm 1$ ir $m_w = 1$ galima gauti ekscentrinės dedamosios dažnį [118]:

$$f_{ecc} = f \left(1 \pm \frac{1-s}{p/2} \right). \quad (2.14)$$

Į 2.13 išraišką įstačius $k = 1$ ir $m_d = 0$ galima apskaičiuoti statinio ekscentriškumo dedamosios dažnį [118]:

$$f_{eccstatic} = f \left(R \cdot \frac{1-s}{p/2} + m_w \right). \quad (2.15)$$

Statinio ekscentriškumo harmoninė dedamoji yra lengvai aptinkama analizuojant statoriaus srovės spektrą. Ji yra patikimas parametras rotoriaus sukimosi greičio vertei apskaičiuoti [117]. Asinchroninio variklio slydimas apskaičiuojamas žinant sinchroninį greitį m_d (sūk./min) (gaunama pagal (1.2)) ir mechaninį rotoriaus greitį ω_{rot} (sūk./min):

$$s = \frac{m_d - \omega_{rot}}{m_d} \cdot 100. \quad (2.16)$$

Panaudojus (1.2, 2.15 ir 2.16) galima išreikšti mechaninį rotoriaus greitį (sūk./min):

$$\omega_{rot} = \frac{p \cdot m_d \left(f_{eccstatic} - f \left(m_w - \frac{198 \cdot R}{p} \right) \right)}{200 \cdot f \cdot R}. \quad (2.17)$$

Rotoriaus sukimosi greičio vertę galima išmatuoti rotaciniu enkoderiu. Specifinis gedimą indikuojantis dažnis priklauso nuo gedimo vietos ir guolio geometrinių parametru. Dėl gedimo atsiradusios dažninės dedamosios gali būti apskaičiuojamos naudojantis (2.7–2.10) išraiškomis. Slenkstinės vertės nustatomos atliekant matematinį gedimo modeliavimą. Jei specifinio gedimą indikuojančio dažnio vertė yra didesnė nei nustatytos gedimo neturinio guolio specifinio dažnio vertės, priimamas sprendimas, kad įvykęs variklio guolių gedimas. Sprendimams priimti taip pat galima naudoti atraminių vektorių mašinų klasifikatorių. Atraminių vektorių mašinos klasifikatorius (angl. *support vector machine* (SVM)) yra prižiūravimo (angl. *supervised*) mokymosi metodas, iš pradžių pasiūlytas tik binariniam klasifikavimui atlikti. Pirmasis šį metodą 1963 m. sukūrė Vladimiras N. Vapnikas. Šiuo metu naudojamą modifikuotą metodą, kai klasifikavimas atliekamas kategorijų susikirtimo srityje toleruojant mažą neatitiktį (angl. *soft margin*), 1993–1995 m. pasiūlė Corinna Cortes ir Vapnikas [119]. Šio tipo klasifikatoriaus efektyvumas priklauso nuo pasirinktos branduolio funkcijos. Taip pat svarbūs branduolio funkcijos mastelio ir reguliavimo parametrai. Rengiant šį darbą, atlikus tyrimą (žr. 3.2.2 poskyrį) atrinkta tinkamiausia branduolio funkcija ir mastelio bei reguliavimo parametrai. Atliekant tyrimą taikytas kryžminis patikrinimas siekiant gauti rezultatus, kuriuos naudojant pasiekiamas didžiausias tikslumas. Nustačius, kad nagrinėjant asinchroninio variklio guolių gedimus dažniausiai pasitaikė ketvirtosios eilės polinominė ir tiesinė branduolio funkcijos, šiame darbe aprašomiems klasifikatoriams pasirinkta tiesinė branduolio funkcija.

Analizuojant taškinių guolių gedimą išbandytas papildomas metodas. Svarbiausios savybės, skirtos klasifikatoriui, parinktos gretimų dedamųjų savybių atrankos (GDSA) (angl. *neighborhood component feature selection* (NCFS)) metodu [120]. Taikant šį metodą mašininiam mokymui skirtas duomenų rinkinys yra žymimas: $T = (\mathbf{x}_1, y_1), \dots, (\mathbf{x}_i, y_i), \dots, (\mathbf{x}_N, y_N)$. Įprastai toks rinkinys būna sudarytas iš N elementų. Kiekvieną elementą sudaro savybių vektorius \mathbf{x}_i . Jo ilgis yra žymimas d . Kiekvieną savybių vektorių \mathbf{x}_i atitinka kategorija $y_i \in 1, \dots, C$. Taškinių guolių gedimų diagnozavimo atveju savybių vektorius yra statoriaus srovės dažnių spektras, kurio ribos nuo 1 iki 100 Hz, o savybių vektorių atitinkanti kategorija yra dvejetainė reikšmė (0 – gedimo nėra, 1 – gedimas yra). GDSP metodas grindžiamas naujo vektoriaus \mathbf{w} sudarymu. Šis vektorius – tai santykinė kiekvienos savybės vertė – svoris (angl. *weight*), išreiškiamas:

$$\mathbf{w}^{(n_f)} = \mathbf{w}^{(n_f-1)} + \alpha \Delta_l, \quad (2.18)$$

$$\Delta_l = 2 \left(\frac{1}{\sigma} \sum_i (p_i \sum_{j \neq i} p_{ij} |x_{il} - x_{jl}| - \sum_j y_{ij} p_{ij} |x_{il} - x_{jl}|) - \lambda \right) w_l^{n_f}; \quad (2.19)$$

čia: n_f – savybių skaičius, α – pradinio žingsnio ilgis, σ – branduolio plotis (angl. *kernel width*), p_i – tikimybė, kad x_i bus priskirtas tinkamai kategorijai, P_{ij} – tikimybė, kad x_i savo atskaitos tašku (sudarant savybių svorio vektorių) pasirinks x_j , x_i ir x_j yra N -mačiai savybių vektoriai, λ – reguliavimo parametras. Metodo esmė – gradiento kilimo metodu keičiant valdymo parametrus maksimizuoti kryžminio patikrinimo, paliekant vieną mėginį (angl. *LOOCV*), tikslumą. Metodo tikslumas labai priklauso nuo reguliavimo parametro λ .

2.4.2. Pasiskirsčiusio guolių gedimo diagnozavimas

Asinchroninio variklio pasiskirsčiusiam guolių gedimui diagnozuoti, naudojant statoriaus srovės signalą, atliekami šie veiksmai:

1. signalui taikoma lango funkcija. Pasirinkta Hanno lango funkcija;
2. taikant *Daubechies 5* (srovės signalų analizei tinkamiausią [100]) vilnelę kaip pagrindinę, atliekama ketvirtojo lygio diskrečioji vilnelių transformacija;
3. apskaičiuojami aproksimavimo ir detalizavimo koeficientai;
4. apskaičiuojama aproksimavimo ir detalizavimo koeficientų Welcho periodograma;
5. sudaromas savybių vektorius, kurio kintamieji pateikiami 2.3 lentelėje. Jį sudaro periodogramų efektinė ir vidutinė vertės, medianos, mažėjimo tvarka surikiuotos trijų lokaliųjų maksimumų detalizavimo ir šešių lokaliųjų maksimumų aproksimavimo koeficientų vertės, taip pat minėtų lokaliųjų maksimumų srities pločio parametrai. Siekiant pagreitinti skaičiavimus, šis 24 elementų vektorius normuojamas $[-1 \div 1]$ ribose;
6. sprendimui priimti gali būti naudojamas atraminių vektorių mašinų klasifikatorius.

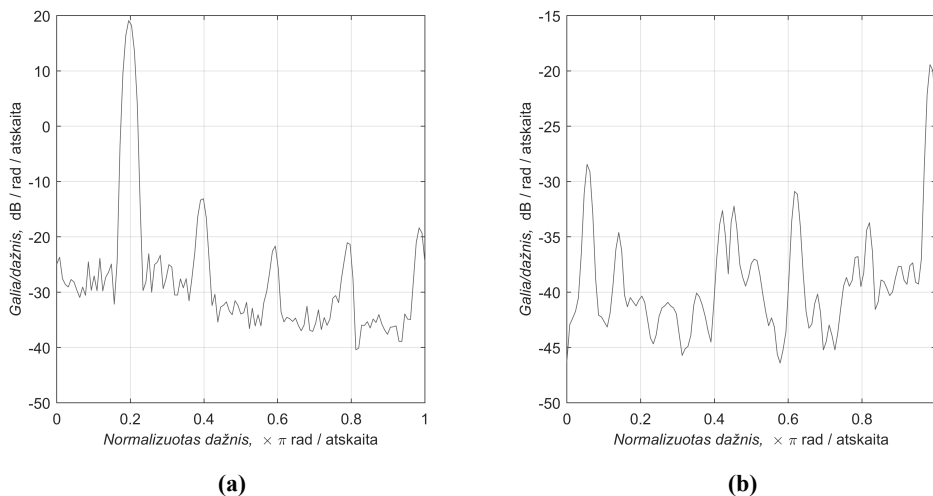
2.3 lentelė. Savybių vektoriaus struktūra

Nr.	Savybė	Šaltinis
1	efektinė vertė	aproksimavimo k.
2	vidurkis	aproksimavimo k.
3	mediana	aproksimavimo k.
4	efektinė vertė	detalizavimo k.
5	vidurkis	detalizavimo k.
6	mediana	detalizavimo k.
7-12	6-ių lokaliųjų maksimumų amplitudinės vertės	aproksimavimo k.
13-18	6-ių lokaliųjų maksimumų pločiai	aproksimavimo k.
19-21	3-ių lokaliųjų maksimumų amplitudinės vertės	detalizavimo k.
22-24	3-ių lokaliųjų maksimumų pločiai	detalizavimo k.

Užregistravus statoriaus srovės signalą ir jam pritaikius lango funkciją atliekama vilnelių transformacija. Vilnelių transformacija plačiau aprašoma 1.4.5 poskyryje. Jei diagnostikos sistema srovės signalą registruoja 8192 Hz

diskretizavimo dažniu, tai ketvirtojo lygio aproksimavimo koeficientą sudarytų signalo dedamosios, kurių dažnio diapazonas yra $[0 \div 512]$ Hz, o detalizavimo – $[512 \div 1024]$ Hz. Pirmiausia atliekama statoriaus srovės signalo transformacija, po to gautų aproksimavimo koeficientų transformacija. Gauti aproksimavimo koeficientai kiekvieną kartą transformuojami tol, kol pasiekiamas tyrėjo pasirinktas transformacijos lygis. Pristatome metode rekomenduojamas ketvirtasis transformacijos lygis parinktas atsižvelgiant į diskretizavimo dažnį ir analizei reikiamą gauti dažnių diapazoną. Aproksimavimo koeficientas atitinka didelio mastelio ir žemo dažnio dedamąsias, o detalizavimo – mažo mastelio ir aukšto dažnio dedamąsias. Dažnai signalą sudarantys žemo dažnio komponentai yra esminiai.

Atlikus transformaciją apskaičiuojama koeficientų cA_4 ir cD_4 Welcho periodograma. Welcho periodograma plačiau aprašoma 1.4.5 poskyryje. Gedimo neturintio variklio statoriaus srovės signalo ketvirtojo lygio vilnelių transformacijos aproksimavimo ir detalizavimo koeficientų Welcho periodogramos pavyzdžiai pateikiami 2.6 paveiksle.



2.6 pav. Ketvirtojo lygio aproksimavimo (a) ir detalizavimo (b) koeficientų Welcho galios spektro tankis

Apskaičiuojami gautų periodogramų lokaliųjų maksimumų parametrai. Lokaliųjų maksimumų parametru skaičiavimo metodika pateikiama [121]. Periodogramų lokaliųjų maksimumų parametrai naudojami kaip savybės, skirtos tiesiogiai pasiskirsčiusiam guolių gedimui nustatyti. Savybių vektorių sudarantys elementai su kilmės nuoroda pateikiami 2.3 lentelėje. Savybių vektorių sudaro periodogramos efektinė ir vidutinė vertės, mediana, mažėjimo tvarka surikiuotos trijų lokaliųjų maksimumų detalizavimo ir šešių lokaliųjų maksimumų aproksimavimo koeficientų vertės, taip pat minėtų lokaliųjų maksimumų srities pločio parametrai [121]. Siekiant pagreitinti skaičiavimus, šis 24 elementų vektorius normalizuojamas $[-1 \div 1]$ ribose.

Statoriaus apvijų gedimo diagnostika

Statoriaus gedimai klasifikuojami į dvi grupes: magnetolaidžio arba korpuso gedimus ir apvijų gedimus (plačiau žr. 1.2.5 poskyryje). Šiame poskyryje pateikiamas

algoritmas trumpajam jungimui statoriaus apvijose diagnozuoti.

Trumpajam jungimui statoriaus apvijose diagnozuoti, naudojant statoriaus srovės signalą, atliekami šie veiksmai:

1. patikrinama, ar užregistruotas nusistovėjęs proceso signalas;
2. taikoma lango funkcija (pasirenkama Hanno lango funkcija);
3. taikoma sparčioji Fourier transformacija;
4. skaičiuojamas rotoriaus sukimosi greitis (jei nėra išmatuotos vertės);
5. skaičiuojama specifinės dedamosios (apskaičiuojamos pagal (2.5)) amplitudinė vertė.

Ar variklio darbo režimas nusistovėjęs, galima patikrinti naudojantis metodu, analogišku naudotam taškinių gedimų diagnostikai. Pritaikius lango funkciją atliekama signalo Fourier transformacija. Analizuojamas dažnių diapazonas $f=0\div 500$ (Hz) pasirinktas įvertinus galimus rotoriaus sukimosi greičius. Rotoriaus sukimosi greitį galima apskaičiuoti naudojantis metodu, analogišku naudotam taškinių gedimų diagnostikai. Slenkstinės, gedimą indikuojančios, amplitudinės vertės nustatomos atliekant matematinį gedimo modeliavimą. Modeliuojant skirtingo lygio gedimus vertinama specifinės dedamosios amplitudinė vertė. Specifinės, gedimą indikuojančios, dedamosios dažnis apskaičiuojamas naudojantis (2.5) išraiška. Gedimo modeliavimas aprašytas 2.3.2 poskyryje.

Rotoriaus juostų gedimo diagnozavimas

Rotorius, skilus arba trūkus juostai, generuoja specifines srovės dedamąsias, kurias galima aptikti analizuojant statoriaus srovės dažnių spektrą. Šių dedamųjų dažnį galima apskaičiuoti naudojantis (2.6) formule. Rotoriaus juostų skilimo gedimui diagnozuoti, naudojant statoriaus srovės signalą, atliekami veiksmai, analogiški aprašytiems statoriaus apvijų gedimo diagnozavimo tvarkoje.

Dinaminio rotoriaus disbalanso diagnozavimas

Dinaminis rotoriaus masės disbalansas, priskiriamas rotoriaus gedimų grupei (žr. 1.1 paveikslą), sudaro iki 10 % visų asinchroninio variklio gedimų. Šiam gedimui būdinga tai, kad dėl jo atsiranda vibracijos ir papildoma guolių apkrova. Tai trumpina jų eksploatacijos laiką ir sudaro kenksmingas sąlygas personalui, dirbančiam šalia gedimo paveikto variklio.

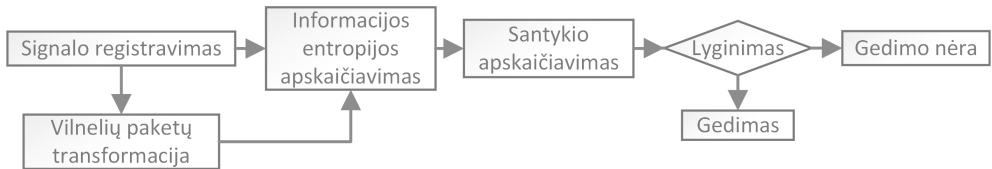
Motyvacija kurti informacijos entropijos (plačiau žr. 1.4.5 skyrių) įvertinimo metodą atsirado analizuojant [43] darbą. Metodas yra patikimas, tačiau baigtinių informacijos entropijos reikšmių naudojimas gedimams diagnozuoti labai siaurina jo taikymo sritį.

Dėl atsiradusio gedimo sužadintos įtampos veikia statoriaus srovės, kurių dažnis priklauso nuo oro tarpe veikiančio srauto tankio dažninės harmoninės dedamosios. Diagnozuojant dinaminį rotoriaus masės disbalansą, naudojant statoriaus srovės signalą, atliekami šie veiksmai:

1. skaičiuojama registruoto signalo informacijos entropija ($E(i_a)$);
2. naudojant vilnelių paketų transformaciją (antrojo lygio) signalas išskaidomas į dažnines dedamąsias;

3. skaičiuojama išskaidytos signalo dalies informacijos entropija (pavyzdžiui, $E(i_{a(2,1)})$);
4. skaičiuojamas santykis tarp informacijos entropijos prieš transformaciją ($E(i_a)$) ir po jos (pavyzdžiui, $E(i_{a(2,1)})$).

Struktūrinė algoritmo schema pateikiama 2.7 paveiksle. Informacijos entropija



2.7 pav. Struktūrinė algoritmo procesų schema

apskaičiuojama naudojantis (1.15) formule. Pristatomam metodui kaip atsitiktinis įvykis (plačiau žr. 1.4.5 skyrių) naudojamas tiek statoriaus srovės signalas (i_a), tiek ir signalo koeficientai (pvz.: $i_{a,j,k}$). Signaluose esantis informacijos kiekis naudojamas skirtingiems masės disbalanso lygiams vertinti. Vilnelių paketų transformacijos ir informacijos entropijos metodų kombinacija pasirinkta siekiant išskaidyti signalą į dažnines dedamąsias ir įvertinti signaluose esantį informacijos kiekį. Šiame darbe naudojama antrojo lygio vilnelių paketų transformacija. Koeficientų rinkiniai, dar vadinami mazgais (angl. *nodes*), yra žymimi $i_{a,j,k}$. Mazgai ir juos atitinkantys dažnių diapazonai (registruojant signalą 1,5 kHz dažniu) pateikiami 2.4 lentelėje. Kadangi atlikta 2^j lygio transformacija, o $j = 2$, gauti keturi skirtingi koeficientų rinkiniai (mazgai). Pusę diskretizavimo dažnio vertės padalijus į keturias dalis gaunami keturi diapazonai (pateikiami lentelėje).

2.4 lentelė. Mazgai ir atitinkantys dažnių diapazonai registruojant signalą 1,5 kHz dažniu

Mazgas	$i_{a(2,0)}$	$i_{a(2,1)}$	$i_{a(2,2)}$	$i_{a(2,3)}$
Dažnio juosta, Hz	0÷187	188÷374	375÷562	563÷750

Turint skirtingus koeficientų rinkinius (išskaidytą signalą) galima apskaičiuoti jų informacijos entropijos reikšmę. Tai atliekama tokiu pačiu metodu, kaip ir skaičiuojant pirminio signalo informacijos entropijos reikšmę (žr. 1.4.5 poskyrį). Tada skaičiuojamas informacijos entropijos prieš transformaciją ($E(i_a)$) santykis su reikšme po jos (pavyzdžiui, $E(i_{a(2,1)})$). Gautas dydis naudojamas gedimams diagnozuoti. Gedimą indikuojančios slenksinės vertės gaunamos atlikus matematinį gedimo modeliavimą (plačiau žr. 2.3.2 skyrių).

2.5. Išvados

Šiame skyriuje pristatyta penkių asinchroninio variklio gedimų diagnostikos metodika. Esminis siūlomos metodologijos pranašumas yra tai, kad gedimams diagnozuoti naudojamas tik vienas parametras – statoriaus srovės signalas. Kuriant integruotą metodiką, skirtą dažniausiai pasitaikantiems gedimams diagnozuoti naudoti žinomi ir sukurti nauji metodai. Vienas dažniausiai pasitaikančių

asinchroninio variklio gedimų yra pasiskirstęs guolių gedimas. Šis gedimas iki šiol diagnozuojamas naudojant prie variklio korpuso pritvirtintus akcelerometrus. Tai apsunkina diagnozavimo galimybes varikliams veikiant pavojingose aplinkose. Skyriuje taip pat pristatytas sukurtas naujas metodas, kurį taikant galima diagnozuoti minėtą gedimą naudojant statoriaus srovės signalą. Statoriaus srovės signalui pritaikius skaitmeninių signalų apdorojimo metodų kombinaciją aptinkamos savybės, susijusios su gedimu. Apibendrinant diagnostikos metodų esmė yra diagnozuojamo variklio statoriaus srovės signalo modeliavimas ir jam vykstant apskaičiuojamos ribinės, gedimus indikuojančių parametrų vertės, kurios lyginamos su registruojamomis vertėmis.

3. EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI

Eksperimentiniai tyrimai atliekami siekiant patikrinti siūlomų metodų tinkamumą. Aprašytus tyrimus sudaro teoriniai ir laboratoriniai eksperimentai.

3.1. Laboratorinių eksperimentų aprašymas

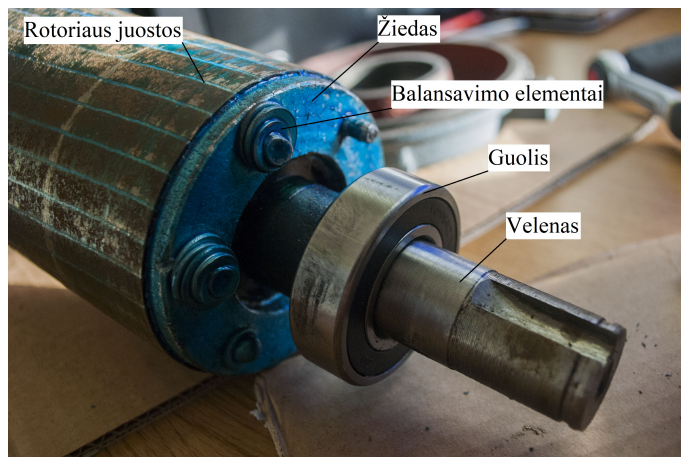
3.1.1. Tyrimams naudotas asinchroninis variklis

Eksperimentams naudotas trifazis asinchroninis variklis „TM 90 L-6“, turintis šešis polių – tris polių poras. Synchroninis variklio greitis yra 1000 sūkių per minutę, asinchroninis – 910 sūkių per minutę. Galia, efektyvumas, sukimo momentas ir kiti parametrai pateikiami C priedo C.3 lentelėje. Variklio padas su tvirtinimo taškais yra apatinėje (lygiagrečioje su rotoriaus sukimosi ašimi) rėmo dalyje, todėl jis yra skirtas tvirtinti ant plokštumos. Vientisas rėmas ir dangteliai pagaminti iš ketaus lydinio. Kiekvienas dangtelis prie rėmo tvirtinamas trimis varžtais. Statorius turi 36 apvijų lizdus (žr. 3.1 paveikslą). Rotoriaus su statoriumi sujungtas per abiejuose



3.1 pav. Asinchroninio variklio statoriaus lizdai ir apvijos

dangteliuose esančius rutulinius guolius. Rotorius sudarytas iš 30 juostų, galuose sujungtų žiedais. Žieduose taip pat yra papildomi elementai, skirti rotoriaus masės balansui. Šie elementai pritvirtinami gamybos metu. Rotorius, juostos, žiedas, balansavimo elementai, velenas ir guolis matomi 3.2 paveiksle. Atliekant



3.2 pav. Asinchroninio variklio rotorius

eksperimentus velenas sukosi laisvai, apkrovos nebuvo. Atliekant visus eksperimentus prie veleno buvo pritvirtintas tik ketinis skriemulys „SPZ80-1“. Jo išorinis skersmuo 84 mm.

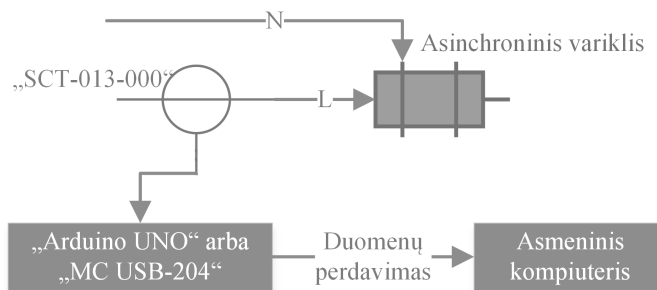
Variklio paleidimo ir valdymo įranga

Atliekant eksperimentus naudoti du variklio paleidimo metodai. Pirmasis metodas – variklio jungimas tiesiai į elektros tinklą. Jis yra populiarus naudojant mažos galios variklius. Šiam metodui nereikia jokios papildomos įrangos. Atliekant eksperimentą variklis buvo dažnai paleidžiamas ir stabdomas automatinio jungiklio. Antrasis metodas – variklio paleidimas naudojant dažnio keitiklį (angl. *variable frequency drive*). Šiuo metodu galima ne tik sklandžiai valdyti variklio rotorius sukimosi greitį, bet ir, paleidžiant variklį, išvengti didelių statoriaus srovių. Naudotas dažnio keitiklis „Emerson M200-022 00075“. Visiems eksperimentams buvo parinktas $U/f = const$ valdymo algoritmas.

Statoriaus srovės matavimas ir registravimas

Statoriaus srovės stipriui matuoti buvo naudojamas srovės transformatorius „YHDC SCT013-000“, skirtas iki 100 A kintamajai srovei. Kiti svarbūs srovės transformatoriaus parametrai pateikiami C priedo C.2 lentelėje. Naudotas srovės transformatorius yra greitai montuojamas. Jo magnetolaidis montuojant padalijamas į dvi dalis. Ši savybė leidžia išmatuoti srovės stiprį nestabdant variklio ar kito elektrinio prietaiso. Ilgam laikui montuojamą srovės transformatorių reikėtų rinktis neišardomą, nes jis atsparesnis aplinkos veiksniams (mechaniniams pažeidimams, aplinkos oro dulkėms ir t. t.)

Statoriaus srovė buvo registruojama naudojant skaitmeninį analoginį keitiklį (angl. *analog to digital converter, ADC*). Skirtingiems eksperimentams buvo naudojami du skirtingi keitikliai. Pirmojo keitiklio funkciją atliko mikrovaldiklio plokštė „Arduino UNO“, antrojo – specializuota duomenų registravimo plokštė „Measurement Computing USB-204“. Statoriaus srovės registravimo schema pateikiama 3.3 paveiksle. Atliekant eksperimentus buvo registruojamos trys fazinės



3.3 pav. Statoriaus srovės registravimo schema

srovės, tačiau atliekant tyrimus naudotas tik vienos fazės statoriaus srovės signalas. Papildomai kaupti fazinių srovių įrašai praplėtė duomenų bazę, pravertė testuojant siūlomus metodus.

Signalams registruoti naudojant mikrovaldiklio plokštę „Arduino UNO“ buvo pasirinktas $F_s = 1,5$ kHz signalo diskretizavimo dažnis. Antrasis keitiklis yra specializuotas duomenų registravimo įrenginys (angl. *data acquisition (DAQ)*)

board), kuriuo signalą galima registruoti aukštu diskretizavimo dažniu (iki $F_s = 500$ kHz). Naudojant šią plokštę registruoti buvo pasirinktas $F_s = 8,192$ kHz dažnis. Signalų registravimo įrangos parametrai pateikiami 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Tyrimuose naudotos registravimo įrangos parametrai

Skaitmeninis analoginis keitiklis	Kvantų skaičius	Įtampos intervalas, V	Skyla, V	Didžiausias diskretizavimo dažnis, kHz
„Arduino uno“	1024	[0÷5]	0,0049	10
„MC USB-204“	4096	[-10÷10]	0,0049	500

3.2. Taškinio guolių gedimo tyrimas

3.2.1. Matematinis gedimo modeliavimas

Asinchroninio variklio darbas ir jo reakcija į gedimą modeliuoti naudojantis 2.3 poskyryje aprašomu variklio matematiniu modeliu. Šiam gedimui modeliuoti buvo reikalingas konkretus guolis, todėl pasirinktas guolis 6205. Gedimus indikuojančių statoriaus srovės signalo spektro dedamųjų dažniai gali būti apskaičiuojami naudojantis šiomis išraiškomis (gautomis pagal (2.7 – 2.10)):

$$F_{CF} = 0,294 \cdot F_R, \quad (3.1)$$

$$F_{ORF} = 2,644 \cdot F_R, \quad (3.2)$$

$$F_{IRF} = 6,356 \cdot F_R, \quad (3.3)$$

$$F_{BF} = 1,006 \cdot F_R; \quad (3.4)$$

čia: $F_{CF,ORF,IRF,BF}$ – parametras, naudojamas vieno iš gedimų sukeltam dažniui (Hz) apskaičiuoti, CF – narvelio gedimas, ORF – išorinio bėgelio gedimas, IRF – vidinio bėgelio gedimas, BF – šrato gedimas (jo reikšmė naudojama (2.11) išraiškoje skaičiuojant spektro dedamosios gedimo dažnį), F_R – rotoriaus sukimosi dažnis (Hz). Modeliuojant keistų parametų vertės pateikiamos 3.2 lentelėje. Kadangi modeliuojant naudotų variklių (V1, V2 ir V3) nominalusis dažnis skyrėsi (50, 60 Hz), keičiant parametrus naudota procentinė nominaliojo dažnio vertė (pavyzdžiui, $f = f_{nom} \cdot 60\%$). Modeliuojant narvelio gedimą (F_{CF}), buvo

3.2 lentelė. Modeliuojant keisti parametrai

Parametrai	Vertės	Parametų skaičius
Variklis	V1, V2, V3	3
Maitinimo grandinės dažnis, %	60, 70, ..., 100	5
Gedimas	Nėra, CF, ORF, IRF, BF	5

lyginamos signalo dažniųjų dedamųjų vertės prieš gedimą ir jam įvykus. Modeliuojant kitus gedimus – išorinio bėgelio (F_{ORF}), vidinio bėgelio (F_{IRF}) ir šrato (F_{BF}) gedimą – lokaliojo maksimumo amplitudinė vertė buvo lyginama su gretimomis dedamosiomis. Kai kurios dažninės dedamosios registruojamos vienodu intervalu tiek į žemesnio, tiek į aukštesnio dažnio pusę, todėl, siekiant nustatyti

didesnį skirtumą tarp gedimą turinčio ir jo neturinčio bandinio, buvo fiksuojama didesnė iš šių dviejų dedamųjų. Atlikus taškinio guolio gedimo modeliavimą su trimis skirtingais varikliais ir esant skirtingiems sūkiams gautos specifinių dažnių lokaliųjų maksimumų amplitudinės vertės. Gauti rezultatai yra parametrai (ribinės slenkstinės vertės), kuriais remiantis galima priimti sprendimą dėl gedimo. Užfiksuotų specifinių dažnio taškų amplitudinių verčių vidurkiai, kurių 95 % pasiklovimo intervalas, standartinis nuokrypis ir Stjudento kriterijus priklausomoms imtims pateikiami 3.3 lentelėje. Visi rezultatai pateikiami D priede. Nors lyginant

3.3 lentelė. Asinchroninio variklio taškinio guolių gedimo modeliavimo rezultatų suvestinė

Gedimas	Imties vidurkis	Standartinis nuokrypis	Stjudento kriterijus priklausomoms imtims
	\bar{x}	σ	$t_{0,95}$
Yra F_{CF} gedimas	0,037±0,005	0,010	3,578
F_{CF} gedimo nėra	0,026±0,004	0,007	-
Yra F_{ORF} gedimas	1,139±0,049	0,088	5,354
F_{ORF} gedimo nėra	1,001±0,026	0,046	-
Yra F_{IRF} gedimas	1,117±0,054	0,098	2,804
F_{IRF} gedimo nėra	1,033±0,035	0,063	-
Yra F_{BF} gedimas	1,094±0,054	0,098	3,706
F_{BF} gedimo nėra	1±0,004	0,007	-

rezultatus imties vidurkiai susikloja (paklaidų ribose), tačiau Stjudento kriterijaus reikšmės ($|t_{0,95}| \geq 1,96$) rodo, kad tarp imčių yra aiškus skirtumas. Kuo Stjudento kriterijaus reikšmė didesnė, tuo didesnis skirtumas tarp lyginamųjų imčių.

3.2.2. Laboratorinis eksperimentas

Nors atlikus teorinį tyrimą pavyko sėkmingai atskirti gedimą turinčius atvejus nuo jo neturinčio, nuspręsta atlikti papildomą tyrimą, kurio rezultatai padėtų įvertinti informatyviausias gedimą indikuojančias statoriaus srovės spektro dedamąsias. Siekiant atrinkti informatyviausius statoriaus srovės dažnių spektro taškus laboratorinėmis sąlygomis buvo atliktas eksperimentas.

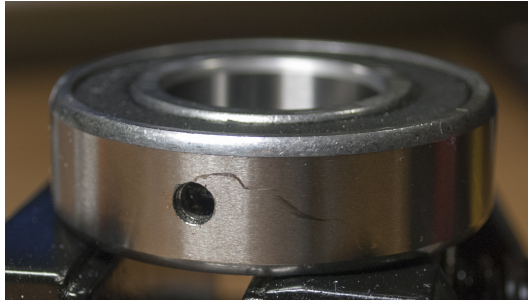
Imituojant taškinį guolių gedimą reikia pažeisti guolio bėgelių, rėmelio (laikančio šratų) arba šrato paviršių. Atliekant eksperimentą buvo pažeisti išoriniai ir vidiniai bėgeliai bei rėmelis.

Guolis, turintis imituotą išorinio bėgelio taškinį gedimą, pateikiamas 3.4 paveiksle. Paveiksle matomas rutulinis guolis, kurio išorinis bėgelis pažeistas pragrežus skylę. Jos skersmuo 4 mm. Imituojant antrąjį taškinį gedimą buvo mechaniškai pažeistas šratas laikantis rėmelis. Jo pagrindinė funkcija yra vienodo atstumo tarp šratų užtikrinimas. Pažeidus rėmelį, vienas iš šratų, palyginti su gretimais šratais, judėjo laisviau.

Trečiasis taškinis gedimas – vidinio rėmelio pažeidimas – buvo imituotas atliekant 1 mm pločio pjūvį, lygiagrečių su sukimosi ašimi. Analogišką taškinį gedimų imitavimą atlieka ir kiti tyrėjai: [25], [26], [27], [28].

Atliekant eksperimentą testuotas asinchroninis variklis, kurio parametrai pateikiami C.3 lentelėje. Varikliui valdyti naudotas dažnio keitiklis, kurio valdymo algoritmo tipas $U/f = const$. Statoriaus srovė buvo registruojama eksploatuojant variklį su skirtingų savybių guoliais. Naudoti keturi guoliai:

1. sveikas guolis, neturintis pažeidimų ($F0$);



3.4 pav. Guolis, kurio išoriniame bėgelyje imituotas taškinis gedimas

2. taškinį gedimą turintis guolis, kurio pažeistas vidinis guolio bėgelis ($F1$);
3. taškinį gedimą turintis guolis, kurio pažeistas guolio narvelis ($F2$);
4. taškinį gedimą turintis guolis, kurio pažeistas išorinis guolio bėgelis ($F3$).

Kiekvieno guolio atveju statoriaus srovė registruota rotoriumi sukantis įvairiu greičiu. Sukimosi greitis buvo keičiamas siekiant iširti jo poveikį klasifikatoriaus tikslumui ir svarbiausių savybių atrankai. Skirtingą rotoriaus sukimosi greitį užtikrino dažnio keitiklis. Atliekant eksperimentą parinktas $f_s = [10, 20, 30, 40, 50]$ Hz maitinimo grandinės dažnis. Didžiausias maitinimo grandinės dažnis parinktas atsižvelgiant į variklio gamintojo nurodymus. Nors naudojant dažnio keitiklį šį dažnį galima viršyti, tačiau įprastai varikliai yra subalansuoti nominaliajam maitinimo grandinės dažniui. Viršijus šį dažnį greičiau dyla guoliai, gali pasireikšti dinaminis rotoriaus masės disbalansas. Atliekant kiekvieną bandymą buvo registruojama 100 signalų. Kiekvieno signalo trukmė $t = 1$ s. Iš viso užregistruota ir analizuota 2000 signalų. Statoriaus srovės signalo pavyzdys pateikiamas B priede.

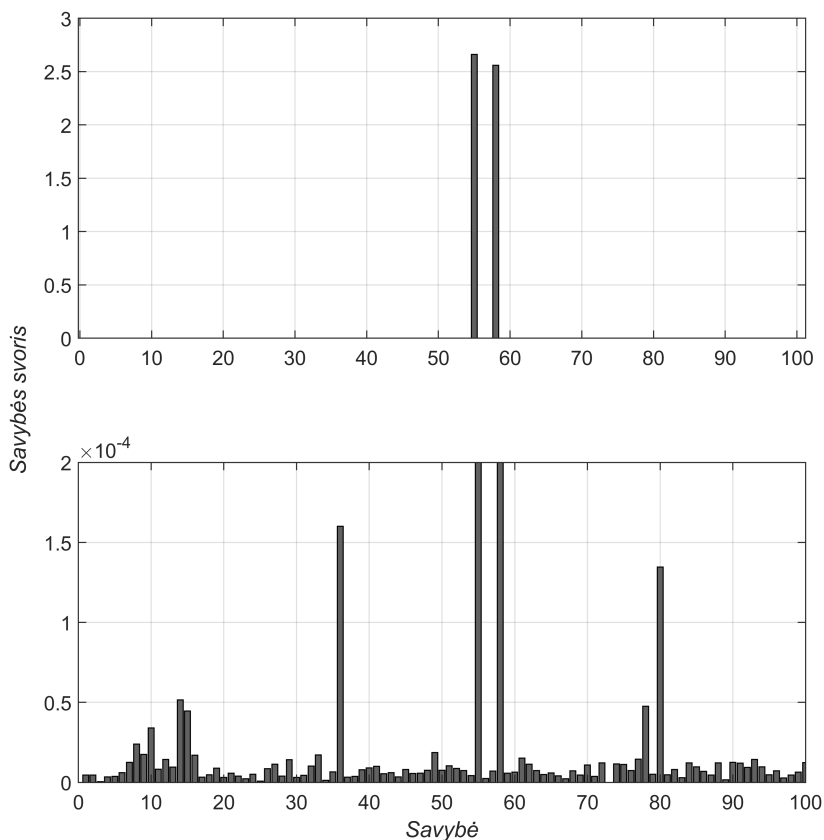
Savybių atranka

Atliekant šį tyrimą naudotos dvejetainės kategorijas žyminčios reikšmės, pateikiamos 3.4 lentelėje. Kaip įėjimo dydis GDSA metodui naudotas statoriaus srovės dažnių spektras, kurio ribos nuo 1 iki 100 Hz. Savybės (angl. *feature*) numeris atitinka konkrečią dažninę dedamąją. Siekiant kuo tikslesnių rezultatų λ parametro

3.4 lentelė. Bandymų eilės nr. ir atitinkamos klasifikuojant naudotos dvejetainės reikšmės

Eil. nr.	$F0$	$F1$	$F2$	$F3$	Paaiškinimas
1	0	1	1	1	taškinio gedimo identifikavimas
2	0	1	0	0	gedimo F1 išskyrimas
3	0	0	1	0	gedimo F2 išskyrimas
4	0	0	0	1	gedimo F3 išskyrimas

reikšmė buvo keičiama ir atliekamas kryžminis patikrinimas. Pakeitus λ (žr. 2.4.1 poskyrį), metodo tikslumas perskaiciuotas ir išsaugotas. Taip parinkta λ parametro reikšmė, kurią naudojant buvo pasiektas didžiausias tikslumas, ir ji naudota tolimesniems GDSA metodo skaičiavimams. Savybių reikšmių vektorius pateikiamas 3.5 paveiksle. Pateikiamame pavyzdyje tik dvi savybės (55 ir 58) turi sąlygiškai didelę reikšmę. Kitų reikšmės gerokai mažesnės, bet nelygios nuliui. Pritaikius GDSA metodą ir apskaičiavus savybių reikšmes lieka tik nuspręsti, kiek



3.5 pav. Savybių svoriai (reikšmės) skirtingų mastelių grafikuose

svarbiausių savybių naudoti klasifikatoriui.

Atliekant šio metodo tyrimą buvo pastebėta, kad sąlygiškai aukštą reikšmę turi 2–4 savybės, todėl šiam tyrimui nutarta naudoti penkias didžiausias reikšmę turinčias savybes, atrinktas iš statoriaus srovės spektro. Pateikiamame savybių vektoriaus svorio grafike (žr. 3.5 paveikslą) šios savybės svorio mažėjimo tvarka būtų nr. 55, 58, 36, 80 ir 14.

Mašininis mokymas

Šiam tyrimui SVM klasifikatoriaus mokymas ir testavimas atliktas naudojantis programų paketu „Matlab“. Klasifikatoriui mokyti parinkta optimali branduolio funkcija taikant kryžminį patikrinimą. Taip kiekvienu atveju parinktas parametras C , apibrėžiantis Lagrange'o daugiklį $[0; C]$ ribose. Dvejetainės reikšmės, kurios buvo naudotos tyrimui, pateikiamos 3.4 lentelėje. Iš duomenų, pateikiamų lentelėje, matyti, kad tirti keturi skirtingi atvejai. Pirmuoju atveju bandoma išskirti taškinį guolių gedimą, nenustatant jo kilmės. Antruoju, trečiuoju ir ketvirtuoju atveju bandoma išskirti konkretų taškinį guolio gedimą. Simboliais $F0$, $F1$, $F2$ ir $F3$ žymima guolių būklė, čia: F – gedimas (angl. *fault*), o skaičiai nuo 0, 1, 2 ir 3 reiškia atitinkamai *nera gedimo*, *vidinio bėgelio gedimas*, *narvelio gedimas* ir *išorinio bėgelio gedimas*. Toliau bus apžvelgiamas šiame darbe naudotas klasifikatoriaus kokybės vertinimas.

Rezultatų vertinimas

Klasifikatoriui mokyti buvo naudojami trijų fazių statoriaus srovės signalai. Duomenys buvo suskaidyti į dvi lygias dalis: skirtus mokyti ir testuoti. Siekiant įvertinti klasifikatoriaus modelio efektyvumą buvo skaičiuojami trys parametrai: *tikslumas*, *jautrumas* ir *specifiškumas* (atitinkamai angl. *accuracy*, *sensitivity*, *specificity*). Šie parametrai apskaičiuojami naudojantis klaidų matrica (angl. *confusion matrix*) (3.5 lentelė). Klaidų matricoje *TP* – tikri teigiamieji (angl. *true*

3.5 lentelė. Klaidų matrica

	Tikrai „nėra gedimo“	Tikrai „yra gedimas“
Priskirta „nėra gedimo“	TP	FP
Priskirta „yra gedimas“	FN	TN

possitive), t. y. grupei „nėra gedimo“ teisingai priskirtų bandinių (angl. *sample*) skaičius; *FP* – klaidingi teigiamieji (angl. *false positive*), t. y. grupei „nėra gedimo“ klaidingai priskirtų bandinių skaičius; *FN* – klaidingi neigiamieji (angl. *false negative*), t. y. grupei „yra gedimas“ klaidingai priskirtų bandinių skaičius; *TN* – tikri neigiamieji (angl. *true negative*), t. y. grupei „yra gedimas“ teisingai priskirtų bandinių skaičius. Naudojant šiuos keturis dydžius galima apskaičiuoti klasifikatoriaus kokybės parametrus. *Tikslumas*, *jautrumas* ir *specifiškumas* apskaičiuojami atitinkamai naudojantis:

$$tiksl. = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN}, \quad (3.5)$$

$$jautr. = TPR = \frac{TP}{TP + FN}, \quad (3.6)$$

$$spec. = TNR = \frac{TN}{TN + FP}. \quad (3.7)$$

Tikslumas atitinka grupei teisingai priskirtų ir visų bandinių santykį. *Jautrumas* ir *specifiškumas* atitinka teigiamųjų bandinių, priskirtų prie teigiamosios grupės, ir neigiamųjų bandinių, priskirtų prie neigiamosios grupės, santykį. Literatūros šaltiniuose *jautrumas* ir *specifiškumas* dar vadinami tikrų teigiamųjų santykiu (angl. *true positive rate*) ir tikrų neigiamųjų santykiu (angl. *true negative rate*).

Kitas svarbus parametras, pagal kurį vertinama klasifikatoriaus kokybė, yra Matthewso koreliacijos koeficientas (MKK) (angl. *Matthews correlation coefficient*). Jis apskaičiuojamas [122]:

$$MKK = \frac{TP \cdot TN - FP \cdot FN}{\sqrt{(TP + FP)(TP + FN)(TN + FP)(TN + FN)}}. \quad (3.8)$$

MKK reikšmė svyruoja tarp -1 ir $+1$, kur $+1$ – idealus klasifikavimas, 0 – atsitiktiniam pasirinkimui artimas klasifikavimas, o -1 – visiškai atvirkštinis klasifikavimas (kai grupei „yra gedimas“ priskiriamas bandinys „nėra gedimo“ ir atvirkščiai). Šis koeficientas yra laikomas geriausiu parametru, pagal kurį vienu rodikliu galima įvertinti klasifikatoriaus kokybę. Pavyzdžiui, MKK lyginant su *tikslumu*, pastarasis iškreipia rezultata, kai teigiamųjų ir neigiamųjų bandinių kiekis labai skiriasi. Kaip savo darbe teigia D. Chicco [123], MKK yra informatyvesnis koeficientas už kitus parametrus, apskaičiuojamus naudojantis klaidų matrica. Taip

yra dėl to, kad skaičiuojant MKK įtraukiami keturi subalansuoti klaidų matricos parametrų santykiai.

Rezultatai, gauti tiriant informatyviausias savybes, skirtas guolių gedimams klasifikuoti

Svarbiausi tyrimo rezultatai pateikiami 3.6 ir 3.7 lentelėse. Abiejose lentelėse stulpelyje *Žym.* surašyti visi tirti bandymų tipai, kur pirmasis skaičius – maitinimo grandinės įtampos dažnis, o antrasis – gedimo tipas. Antrąjį 3.6 lentelės stulpelį sudaro atrinktos savybės, nuo svarbiausios rikiuojamos mažėjimo tvarka. Jos buvo renkamos iš statoriaus srovės dažnių spektro, kurio ribos nuo 1 iki 100 Hz. Toliau pateikiamas parametras λ , kurį naudojant rastos didžiausią reikšmę turinčios savybės. Po to pateikiama su klasifikatoriumi susijusi duomenų grupė. Šią grupę sudaro *branduolio funkcijos, funkcijos eilės nr.* ir parametro *C* reikšmė. Siekiant kokybiškesnių rezultatų, šie trys dydžiai parenkami atliekant kryžminį patikrinimą. 3.7 lentelėje pateikiami keturi parametrai, rodantys klasifikatoriaus kokybę naudojant parinktą *branduolio funkciją* ir *C* parametras. Kokybė vertinama skaičiuojant *tikslumą, jautrumą, specifiškumą* ir *Matthewso koreliacijos koeficientą* naudojant klaidų matricą (žr. 3.2.2 poskyrį).

3.6 lentelė. Atrinktos savybės

<i>Žym.</i>	<i>Savybės</i>	λ	<i>Branduolio f.</i>	<i>Eilė</i>	<i>C</i>
10-1	55,58,36,14,78	0,0E+00	polinominė	4	6,3E+00
10-2	79,77,55,14,10	0,0E+00	polinominė	2	1,5E+01
10-3	1,33,23,79,14	1,8E-04	polinominė	4	5,5E+01
10-4	1,34,23,35,14	1,8E-04	polinominė	4	1,5E+01
20-1	24,25,15,20,84	0,0E+00	tiesinė	-	6,3E-02
20-2	1,43,64,15,20	1,8E-04	polinominė	4	5,7E+02
20-3	24,15,20,80,90	1,8E-04	polinominė	3	1,0E+02
20-4	1,43,64,20,24	1,8E-04	polinominė	4	1,6E-01
30-1	34,2,93,4,97	1,8E-04	tiesinė	-	4,5E-01
30-2	34,22,35,93,13	1,8E-04	polinominė	4	1,9E+01
30-3	22,64,30,35,34	3,5E-04	polinominė	3	3,1E+02
30-4	63,30,34,22,53	1,8E-04	tiesinė	-	2,7E+02
40-1	40,83,60,1,61	1,8E-04	polinominė	3	6,4E+01
40-2	40,83,1,69,60	1,8E-04	polinominė	2	7,7E+00
40-3	43,28,84,80,59	1,8E-04	tiesinė	-	3,1E-02
40-4	40,1,83,45,28	3,5E-04	polinominė	2	2,6E+01
50-1	50,93,53,95,24	1,8E-04	tiesinė	-	1,2E-01
50-2	12,20,19,11,84	8,8E-04	polinominė	3	1,0E-03
50-3	53,35,95,81,68	1,8E-04	tiesinė	-	3,6E+00
50-4	81,1,71,69,20	8,8E-04	polinominė	2	2,6E+02

Atliktas tyrimas parodė, kad dažniausiai pasitaikė klasifikatoriaus ketvirtosios eilės polinominė ir tiesinė branduolio funkcijos. Jos abi pasikartojo po šešis kartus. Toliau pateikiami kiekvieno bandymo detalesni rezultatai.

Pirmuoju bandymu siekta išskirti gedimą turinčius bandinius neatsižvelgiant į gedimo tipą. Atliekant bandymą klasifikatorius dirbo idealiai ir nepriklausomai nuo rotorius sukimosi greičio analizuotame diapazone. Visų pirmųjų bandymų (10-1, 20-

3.7 lentelė. Klasifikatoriaus rezultatai (pasiklovimo intervalo reikšmingumo lygis 0,95)

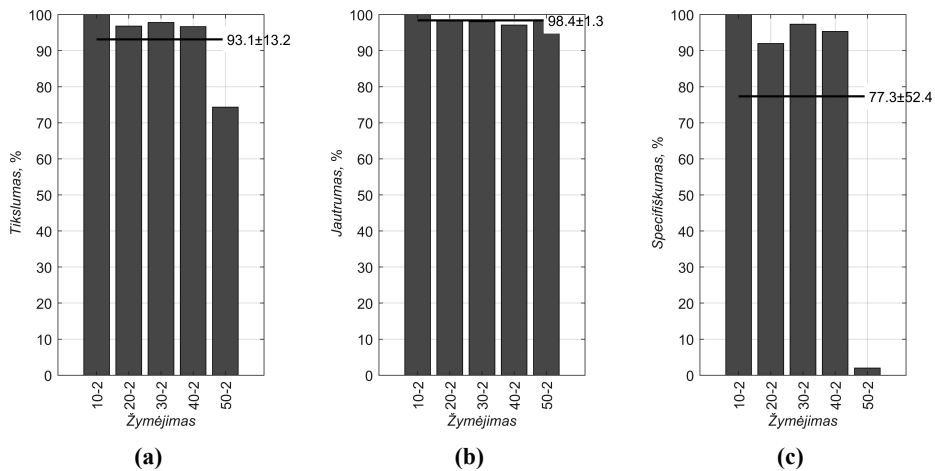
<i>Žym.</i>	<i>Tikslumas</i>	<i>Jautrumas</i>	<i>Specifiškumas</i>	<i>MCC</i>
10-1	1±0	1±0	1±0	1±0
10-2	1±0	1±0	1±0	1±0
10-3	0,992±0,009	1±0,005	0,97±0,02	0,98±0,01
10-4	0,997±0,006	1±0	0,99±0,01	1±0,01
20-1	1±0	1±0	1±0	1±0
20-2	0,97±0,02	0,98±0,01	0,92±0,03	0,92±0,03
20-3	0,98±0,01	0,98±0,01	0,97±0,02	0,93±0,03
20-4	0,97±0,02	0,98±0,01	0,94±0,02	0,91±0,03
30-1	1±0	1±0	1±0	1±0
30-2	0,98±0,01	0,98±0,01	0,97±0,02	0,93±0,02
30-3	0,97±0,02	0,99±0,01	0,91±0,03	0,93±0,02
30-4	0,97±0,02	0,97±0,02	0,97±0,02	0,91±0,03
40-1	1±0	1±0	1±0	1±0
40-2	0,97±0,02	0,97±0,02	0,95±0,02	0,9±0,03
40-3	1±0	1±0	1±0	1±0
40-4	0,96±0,02	0,96±0,02	0,94±0,02	0,88±0,03
50-1	1±0	1±0	1±0	1±0
50-2	0,74±0,04	0,98±0,01	0,02±0,01	0±0
50-3	0,99±0,01	0,99±0,01	0,98±0,01	0,95±0,02
50-4	0,83±0,04	0,92±0,03	0,56±0,05	0,57±0,05

1, 30-1, 40-1, 50-1) kokybės rezultatai yra 1 (arba 100 %), t. y. visi 2000 bandinių (5 sukimosi greičiai, po 400 bandinių) priskirti tinkamai klasei.

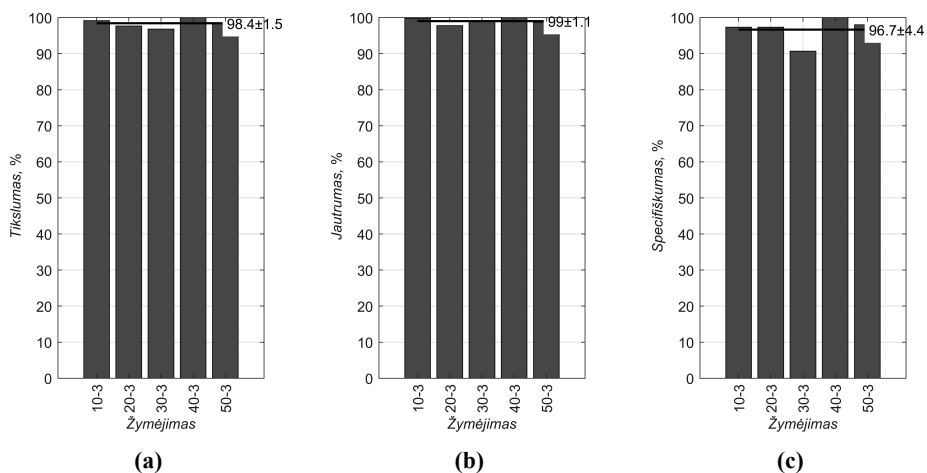
Kitu bandymu siekta išskirti konkretų guolio gedimą – vidinio bėgelio pažeidimą. Antrojo bandymo rezultatai pateikiami 3.6 paveiksle. Analizuojant rezultatus galima pastebėti, kad klasifikatoriaus tikslumas priklauso nuo rotorius sukimosi greičio analizuotame diapazone (žr. 3.6 paveikslo (a)). Palyginti su kitais, 50 Hz bandymo atveju ypač išsiskiria *specifiškumas* (žr. 3.6 paveikslo (c) 50-2). Žema *specifiškumo* reikšmė (2 ± 1 %) reiškia, kad sugedusio guolio bandiniai buvo priskiriami sveiko guolio grupei. Kitų bandymų ($f_s=[10\div 40]$ Hz) gauta žymiai aukštesnė *specifiškumo* reikšmė (>90 %). Horizontali tiesė grafikuose rodo vidutinę dydžių reikšmę, kurios pasiklovimo intervalo reikšmingumo lygis 0,95.

Trečiuoju bandymu taip pat siekta diagnozuoti konkretų guolio gedimą – pažeistą narvelį. Šio bandymo rezultatai pateikiami 3.7 paveiksle. Apžvelgiant rezultatus galima paminėti 30-3 atveju aiškiai matomą žemesnę *specifiškumo* reikšmę (žr. 3.7 paveikslo (c)). Šiuo atveju *specifiškumo* reikšmė yra $91\div 3$ %, t. y. $91\div 3$ % sugadinto guolio bandinių buvo priskirta gedimą turinčių guolių grupei. Palyginti su trečiojo bandymo *specifiškumo* vidurkiu ($96,7\div 4,4$ %), šis bandymas skiriasi 5,7 %.

Ketvirtuoju bandymu iš kitų bandinių siekta išskirti guolio išorinio bėgelio gedimą (3.8 paveikslas). Vidutinė *tikslumo* reikšmė yra $94,5\div 8,2$ %. Galima pastebėti tikslumo tendenciją mažėti didėjant sukimosi greičiui. Didėjant sukimosi greičiui mažėja ir *jautrumas*. Vidutinė jo reikšmė yra $96,7\div 3,6$ %. *Specifiškumas*, kaip ir antrojo tipo gedimo (vidinio guolio bėgelio gedimo) bandyme, išsiskyrė rotorius sukantis greičiausiai, kai maitinimo grandinės įtampos dažnis buvo $f_s = 50$ Hz. Šiuo atveju *specifiškumo* reikšmė yra $56\div 5$ %, t. y. tik $56\div 5$ % gedimą turinčių bandinių buvo priskirti gedimą turinčių bandinių grupei. Tačiau, kaip ir antrojo



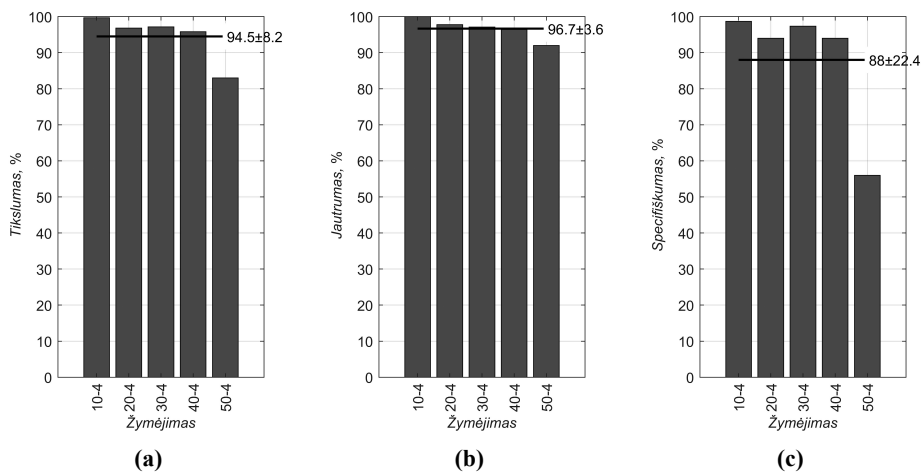
3.6 pav. Antro bandymo rezultatai



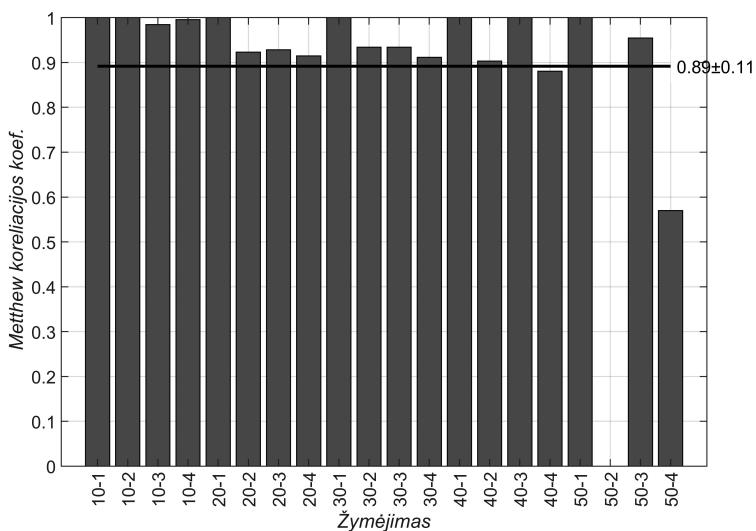
3.7 pav. Trečio bandymo rezultatai

bandymo atveju, likę ($f_s=[10\div 40]$ Hz) bandiniai suskirstyti sėkmingai – daugiau kaip 90 % tikslumu. Vidutinė *specifiškumo* reikšmė $88\div 22,4$ %. Kitas parametras, pagal kurį galima objektyviai įvertinti klasifikatoriaus darbo kokybę, yra Matthewso koreliacijos koeficientas (MKK). Visų bandymų MKK pateikiamas 3.9 paveiksle. Analizuojant šį parametą taip pat matyti žemas 50-2 ir 50-4 bandymų rezultatas. Reikia paminėti, kad 50-2 reikšmė yra 0, vadinasi, klasifikatorius klasifikuoja atsitiktinam įvykiui artimu tikslumu. Taip pat galima matyti, kad lėtesnis rotoriaus sukimosi greitis leidžia klasifikuoti tiksliau ($f_s=[10\div 30]$ Hz). 40-2 ir 40-4 bandymų rezultatai žymiai prastesni, artimi vidurkiui arba žemesni už jį.

Vienas iš savybių (55 ir 58 Hz) pasiskirstymo grafikų pateikiamas 3.10 paveiksle. Kaip matyti, dvi klases galima atskirti nubrėžus tarp jų tiesę. Grafikas rodo, kad sėkmingai parinkus tinkamus parametrus galima parinkti informatyviausias savybes, kuriomis remiantis galima diagnozuoti gedimą.



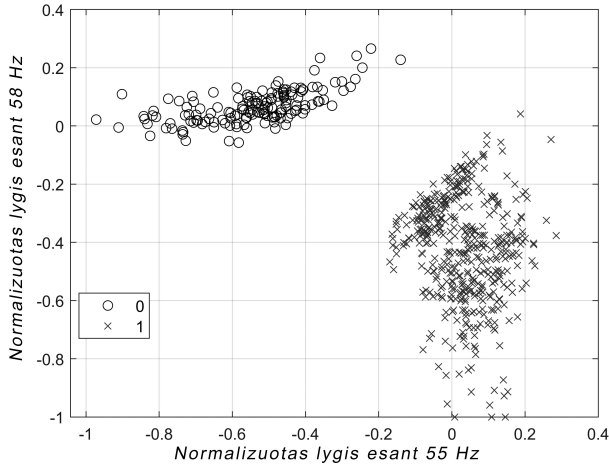
3.8 pav. Ketvirto bandymo rezultatai



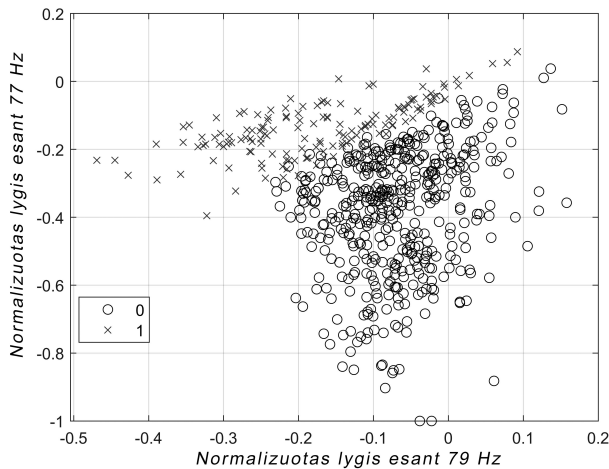
3.9 pav. Matthewso koreliacijos koeficientas

Kitų savybių (77 ir 79 Hz) pasiskirstymo grafikas pateikiamas 3.11 paveiksle. Šiame pavyzdyje klases taip pat būtų galima atskirti brėžiant tiesę, tačiau dalis bandinių būtų priskirti klaidingai klasei (leidžiant mažą neatitiktį, angl. *soft margin*). Atlikus mašininį mokymą ir parinkus optimalius parametrus matyti, kad minėtu atveju klasifikavimo tikslumas yra 100 % (žr. 3.6 lentelę), MKK taip pat yra 1 (žr. 3.9 paveikslą). Reikia atkreipti dėmesį, kad klasifikavimo tikslumui reikšmės turėjo naudojamų savybių skaičius – penkios. Vaizdžiai parodyti penkių savybių pasiskirstymo viename grafike yra neįmanoma, todėl 3.10–3.12 paveiksluose pateikiamas tik dviejų savybių pasiskirstymas.

Kitame pateikiamame pavyzdyje (žr. 3.12 paveikslą) tos pačios 10-2 bandymo didžiausią vertę turinčios savybės (77 ir 79 Hz) pateikiamos su kitą gedimą

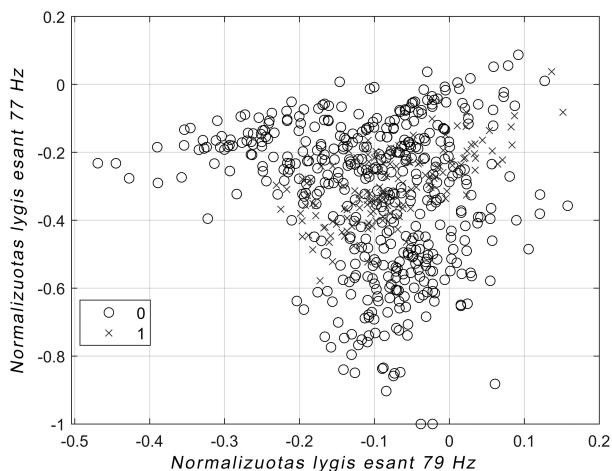


3.10 pav. Normalizuoto signalo spektro amplitudinės vertės pasiskirstymas esant 55 ir 58 Hz (10-1 bandymas)



3.11 pav. Normalizuoto signalo spektro amplitudinės vertės pasiskirstymas esant 77 ir 79 Hz (10-2 bandymas)

atitinkančiomis grupėmis (vietoje *gedimo F1 išskyrimas* naudojamos *gedimo F2 išskyrimas* grupės (angl. *target*) 3.4 lentelė). Iš paveikslėlio matyti, kad negalima nustatyti jokių aiškių ribų, skiriančių skirtingus bandinius. Tai taip pat reiškia, kad gedimas negali būti diagnozuojamas sėkmingai. Šis pavyzdys rodo, kaip tos pačios statoriaus srovės dažnių spektro taškų vertės vienu atveju yra informatyvios, o kitu visiškai nereikšmingos. Atlikus tyrimą gauti rezultatai rodo, kad naudojant GDSA metodą iš statoriaus srovės dažnių spektro atrinktos savybės yra tinkamos asinchroninio variklio guolių gedimams diagnozuoti.



3.12 pav. Normalizuoto signalo spektro amplitudinės vertės pasiskirstymas esant 77 ir 79 Hz (taikant 3 bandymo grupes)

3.3. Pasiskirsčiusio guolių gedimo tyrimas

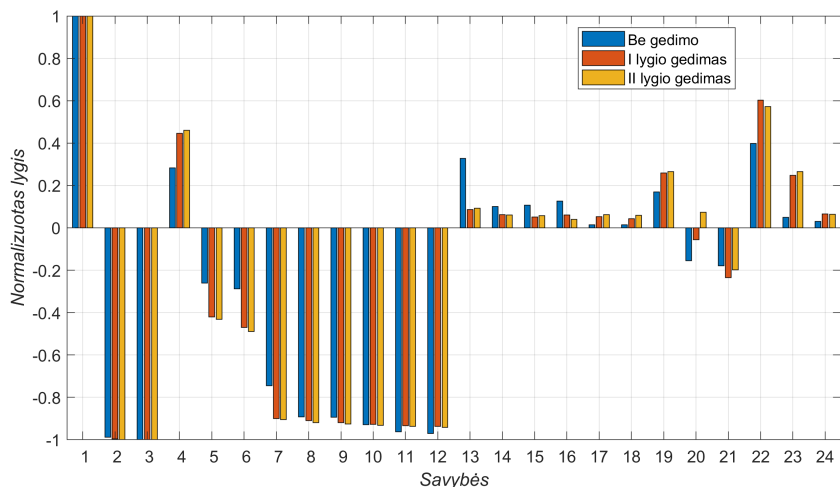
3.3.1. Matematinis gedimo modeliavimas

Asinchroninio variklio darbas ir jo reakcija į pasiskirsčiusį guolių gedimą modeliuoti naudojantis 2.3 skyriuje aprašomu variklio matematiniu modeliu. Pasirinkti trys skirtingų parametų varikliai, skirtingas rotoriaus sukimosi greitis, skirtingas gedimo intensyvumas. Keisti parametrai pateikiami 3.8 lentelėje. Modeliuojant kiekvienu atveju keičiant parametrus (žr. 3.8 lentelę) buvo sudarytas

3.8 lentelė. Modeliuojant keisti parametrai

Parametrai	Vertės	Parametų skaičius
Variklis	V1, V2, V3	3
Maitinimo grandinės dažnis, %	60, 65, ..., 100	9
Atsitiktinio triukšmo signale lygis, %	0, 1, 2	3

savybių vektorius. Jis normalizuotas $[-1 \div 1]$ ribose ir jo reikšmės išsaugotos. Baigus 27 gedimo neturinčių ir 54 jų turinčių variklių darbo matematinį modeliavimą, atlikta statistinė rezultatų analizė. Gedimo neturinčių variklių rezultatai naudojami kaip ribinės slenkstinės vertės, kurioms pakitus diagnozuojamas gedimas. Rezultatų suvestinė pateikiama 3.9 lentelėje. Lentelėje esantys žymėjimai: *ef. v.* – efektinė aproksimavimo arba detalizavimo koeficiento vertė, *vid.* – vidurkis, *d. v.* – didžiausia (lokaliojo maksimumo) amplitudinė vertė, *d. v. p.* – lokaliojo maksimumo, turinčio didžiausią amplitudinę vertę, srities plotis. Grafinis vidutinių reikšmių atvaizdavimas pateikiamas 3.13 paveiksle. Visos modeliuojant gautos reikšmės pateikiamos G priedo G.1–G.3 lentelėse. Vertinant rezultatus galima daryti išvadą, kad parinktos savybės yra informatyvios. Jas naudojant statoriaus srovės signale gali būti sėkmingai pastebimas atsiradęs triukšmas, o kartu ir pasiskirstęs guolių gedimas. Rezultatams suskirstyti ir sprendimui priimti sėkmingai gali būti



3.13 pav. Savybių (atrinktų iš statoriaus srovės signalo) priklausomybė nuo gedimo lygio naudojamas klasifikatorius.

3.3.2. Laboratorinis eksperimentas

Kaip ir prieš tai pristatytam laboratoriniam eksperimentui, šiam buvo naudotas 1,1 kW galios asinchroninis variklis. Variklio parametrai pateikiami 3.1.1 poskyryje. Energija varikliui buvo tiekama naudojant dažnio keitiklį, kurio valdymo algoritmo tipas – $U/f = const$. Savybių atrankai buvo naudojamas užregistruotas statoriaus srovės signalas. Minėtas signalas registruotas eksploatuojant variklį su skirtingais guoliais.

Pasiskirstęs guolių gedimas buvo imituotas esant dviem sąlygoms. Pirmoji sąlyga – alyvos pašalinimas iš guolio. Antroji – papildomų medžiagų į alyvą pridėjimas. Pirmasis guolio pažeidimas atliktas plaunant guolį specialiose cheminėse priemonėse, padedančiose pašalinti alyvą. Antrasis pažeidimas atliktas pridėdant į guolio alyvą smulkių plieno drožlių. Iš viso naudoti šešių tipų guoliai. Jie aprašyti 3.11 lentelėje. Šioje lentelėje antrame stulpelyje pateikiamas gedimo tipas (TG – taškinis guolių gedimas, PG – pasiskirstęs guolių gedimas), pažeista guolio vieta ir ar gedimas turi PG gedimo požymių. Trečiame stulpelyje pateikiamos klasifikatoriui mokytui naudotos binarinės reikšmės. Kaip matyti iš lentelės, klasifikatoriaus užduotis – išskirti tik PG gedimą. Vadinasi, analizuodamas taškinį gedimą turintį atvejį klasifikatorius turėtų jį priskirti gedimų neturinčių atvejų grupei. Tokia užduotis buvo išsikelta siekiant ištirti PG gedimo atskyrimo galimybes.

Atliekant eksperimentą buvo keičiami ne tik guoliai, bet ir rotorius sukimosi greitis. Tai pavyko atlikti naudojantis dažnio keitikliu, kurio viena iš pagrindinių funkcijų ir yra rotoriaus sukimosi greičio reguliavimas. Buvo pasirinkti $f_s = [10; 20; 30; 40; 50]$ Hz maitinimo grandinės įtampos dažniai. Didžiausia rotoriaus sukimosi greičio riba buvo pasirinkta atsižvelgiant į variklio gamintojo pateiktus parametrus (žr. C.3 lentelę). Statoriaus srovei registruoti naudotas $F_s = 8192$ Hz diskretizavimo dažnis. Siekiant padidinti tikslumą kiekvienas bandymas buvo pakartotas 100 kartų. Kiekvieno užregistruoto signalo trukmė – 1 s. Iš viso atliekant eksperimentą užregistruota 3000 signalų.

Klasifikatoriaus tikslumas vertintas naudojantis klaidų matrica, pateikiama

3.9 lentelė. Asinchroninio variklio pasiskirsčiusio guolių pirmojo lygio gedimo modeliavimo rezultatų suvestinė

Šaltinis	Dydis	Gedimo nėra		I lygio gedimas		Studento kriterijus prik. imtims
		<i>Imties vidurkis</i>	<i>Standartinis nuokrypis</i>	<i>Imties vidurkis</i>	<i>Standartinis nuokrypis</i>	
		\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	
<i>Ap. k.</i>	ef. v.	1±0	0	1±0	0	0
<i>Ap. k.</i>	vid.	-0,988±0,001	0,001	-0,998±0,001	0,002	15,172
<i>Ap. k.</i>	med.	-1±0	0	-0,999±0	0,001	-3,167
<i>D. k.</i>	ef. v.	0,283±0,006	0,006	0,451±0,012	0,029	-26,214
<i>D. k.</i>	vid.	-0,261±0,006	0,006	-0,426±0,011	0,028	26,959
<i>D. k.</i>	med.	-0,287±0,008	0,008	-0,476±0,013	0,034	25,428
<i>Ap. k.</i>	I d.v.	-0,744±0,019	0,019	-0,898±0,008	0,021	15,119
<i>Ap. k.</i>	II d.v.	-0,892±0,002	0,002	-0,911±0,006	0,015	6,176
<i>Ap. k.</i>	III d.v.	-0,894±0,002	0,002	-0,918±0,006	0,016	7,694
<i>Ap. k.</i>	IV d.v.	-0,929±0,001	0,001	-0,927±0,005	0,014	-0,542
<i>Ap. k.</i>	V d.v.	-0,962±0,001	0,001	-0,935±0,005	0,014	-9,987
<i>Ap. k.</i>	VI d.v.	-0,97±0,002	0,002	-0,939±0,004	0,011	-13,404
<i>Ap. k.</i>	I d.v. p.	0,327±0,017	0,017	0,09±0,015	0,038	21,706
<i>Ap. k.</i>	II d.v. p.	0,1±0,015	0,015	0,066±0,011	0,028	3,833
<i>Ap. k.</i>	III d.v. p.	0,108±0,013	0,013	0,055±0,013	0,033	5,81
<i>Ap. k.</i>	IV d.v. p.	0,126±0,001	0,001	0,05±0,01	0,024	15,899
<i>Ap. k.</i>	V d.v. p.	0,015±0,001	0,001	0,049±0,013	0,034	-5,233
<i>Ap. k.</i>	VI d.v. p.	0,014±0,002	0,002	0,056±0,014	0,035	-6,111
<i>D. k.</i>	I d.v.	0,169±0,002	0,002	0,259±0,007	0,018	-24,691
<i>D. k.</i>	II d.v.	-0,156±0,006	0,006	-0,059±0,074	0,188	-2,653
<i>D. k.</i>	III d.v.	-0,179±0,006	0,006	-0,234±0,018	0,044	6,042
<i>D. k.</i>	I d.v. p.	0,399±0,008	0,008	0,599±0,019	0,047	-20,214
<i>D. k.</i>	II d.v. p.	0,05±0,01	0,01	0,25±0,073	0,185	-5,576
<i>D. k.</i>	III d.v. p.	0,031±0,009	0,009	0,073±0,026	0,065	-3,191

3.2.2 poskyryje. Vertinant klasifikatorius lyginti *tikslumas, jautrumas, specifiskumas* ir *MKK* koeficientas.

Pasiskirsčiusio guolio gedimo diagnostikos analizės rezultatai

Iš statoriaus srovės spektro parinktų (žr. 2.4.2 skyrių) savybių vektorius normalizuotas [-1÷1] ribose. Dviejų savybių – 7-os ir 20-os – pasiskirstymas pateikiamas 3.14 paveiksle. Pagal 2.3 lentelę, 7-oji savybė atitinka vilnelių transformacijos (statoriaus srovės signalo) aproksimavimo koeficiento didžiausio lokaliojo maksimumo amplitudę, o 20-oji – detalizavimo koeficiento antrojo pagal dydį lokaliojo maksimumo amplitudę. Iš savybių pasiskirstymo matyti, kad nors yra kelios neatitiktys, didžioji dalis 0 ir 1 grupei priskirtų bandinių sudaro dvi atskiras nesunkiai atskiriamas grupes.

Klasifikavimo rezultatai pateikiami 3.12 lentelėje. Kaip matyti iš lentelėje pateikiamų duomenų, prasčiausiai klasifikatorius suklasifikavo $f_s = 30$ Hz duomenis. Šis bandymas neturėjo sėkmingai diagnozuotų gedimų turinčių atvejų. Panašus rezultatas ir esant $f_s = [10; 20]$ Hz. Vertinant pagal Matthewso koreliacijos koeficientą, $f_s = 10$ Hz bandymo atveju klasifikavimas atliktas tvarka, artima atsitiktinei ($MKK = 0$), o esant $f_s = 20$ Hz bandymas turėjo priešingą ryšį ($MKK = -0,41 \div 0,04$), kai klasifikatorius buvo linkęs bandinius priskirti priešingoms grupėms. Apžvelgiant atvejus, kai maitinimo grandinės įtampos dažnis buvo $f_s = [40; 50]$ Hz,

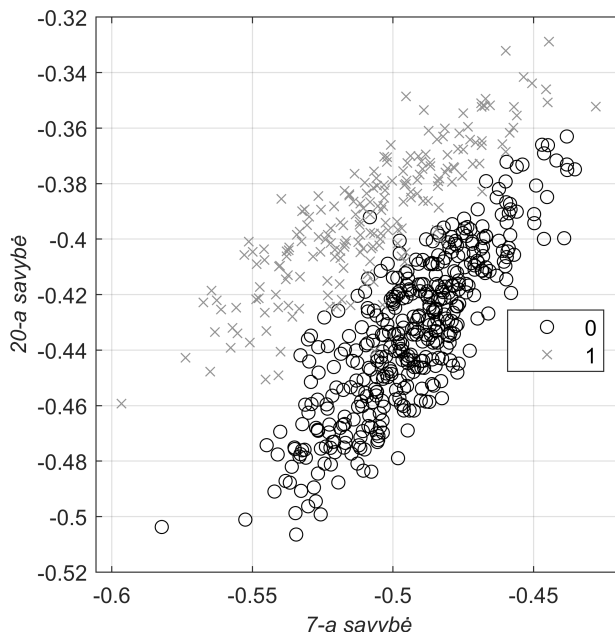
3.10 lentelė. Asinchroninio variklio pasiskirsčiusio guolių antrojo lygio gedimo modeliavimo rezultatų suvestinė

Šaltinis	Dydis	Gedimo nėra		II lygio gedimas		Stjudento kriterijus prik. imtims
		Imties vidurkis	Standartinis nuokrypis	Imties vidurkis	Standartinis nuokrypis	
		x	σ	x	σ	t
Ap. k.	ef. v.	1±0	0	1±0	0	0
Ap. k.	vid.	-0,988±0,001	0,001	-0,999±0,001	0,002	20,779
Ap. k.	med.	-1±0	0	-0,999±0	0,001	-4,038
D. k.	ef. v.	0,283±0,006	0,006	0,468±0,015	0,037	-23,75
D. k.	vid.	-0,261±0,006	0,006	-0,439±0,014	0,036	23,321
D. k.	med.	-0,287±0,008	0,008	-0,497±0,017	0,042	23,663
Ap. k.	I d.v.	-0,744±0,019	0,019	-0,907±0,004	0,011	17,053
Ap. k.	II d.v.	-0,892±0,002	0,002	-0,919±0,004	0,011	12,158
Ap. k.	III d.v.	-0,894±0,002	0,002	-0,926±0,004	0,009	15,478
Ap. k.	IV d.v.	-0,929±0,001	0,001	-0,932±0,004	0,011	1,776
Ap. k.	V d.v.	-0,962±0,001	0,001	-0,938±0,004	0,009	-12,953
Ap. k.	VI d.v.	-0,97±0,002	0,002	-0,943±0,003	0,008	-15,266
Ap. k.	I d.v. p.	0,327±0,017	0,017	0,104±0,017	0,042	19,362
Ap. k.	II d.v. p.	0,1±0,015	0,015	0,071±0,013	0,034	3,042
Ap. k.	III d.v. p.	0,108±0,013	0,013	0,049±0,011	0,029	6,985
Ap. k.	IV d.v. p.	0,126±0,001	0,001	0,056±0,014	0,034	10,545
Ap. k.	V d.v. p.	0,015±0,001	0,001	0,04±0,011	0,027	-4,87
Ap. k.	VI d.v. p.	0,014±0,002	0,002	0,06±0,016	0,041	-5,749
D. k.	I d.v.	0,169±0,002	0,002	0,266±0,006	0,015	-31,864
D. k.	II d.v.	-0,156±0,006	0,006	0,074±0,071	0,181	-6,57
D. k.	III d.v.	-0,179±0,006	0,006	-0,206±0,025	0,062	2,192
D. k.	I d.v. p.	0,399±0,008	0,008	0,572±0,018	0,046	-17,956
D. k.	II d.v. p.	0,05±0,01	0,01	0,254±0,052	0,131	-7,973
D. k.	III d.v. p.	0,031±0,009	0,009	0,063±0,018	0,045	-3,323

3.11 lentelė. Atliktų bandymų guolių tipai, PG gedimo simptomų buvimas ir binarinės reikšmės

Nr.	Gedimo tipas, vieta	PG gedimas
1	Gedimų neturintis guolis	Ne / 0
2	TG, vidinio bėgelio, PG simptomų nėra	Ne / 0
3	TG, narvelio, PG simptomų nėra	Ne / 0
4	TG, išorinio bėgelio, PG simptomų nėra	Ne / 0
5	PG, alyvos trūkumas, PG simptomai	Taip / 1
6	PG, priemaišos alyvoje, PG simptomai	Taip / 1

rezultatai teigiami. Kai $f_s = 40$ Hz, $MKK = 0,46 \div 0,04$ – tai rodo esant vidutinio stiprumo teigiamąjį ryšį, o kai $f_s = 50$ Hz, rezultatai dar geresni, t. y. $MKK = 0,99 \div 0,01$, – tai rodo beveik idealiai veikiančią klasifikatorių ir stiprų teigiamąjį ryšį. Vertinant rezultatus tarpusavyje, matyti, kad skirstydamas signalus, užregistruotus esant sąlygiškai lėtam rotoriaus sukimosi greičiui, klasifikatoriaus veikia blogai, tačiau nuo tam tikros ribos (tiekiimo įtampos dažnis $f_s = 30 \div 40$ Hz ribose) klasifikatorius ima veikti gerai ar net labai gerai. Analizuojamame statoriaus srovės signale yra dėl gedimo atsiradusių dedamųjų ir jos savo parametrais yra panašios į triukšmus signale. Tikėtina, kad šių dedamųjų amplitudė arba koncentracija tos



3.14 pav. 7-os ir 20-os savybių pasiskirstymas

3.12 lentelė. Klasifikatoriaus kokybės parametrai (pasiklojimo intervalo reikšmingumo lygis 0,95)

f_s , Hz	Tikslumas	Jautrumas	Specifiškumas	MKK
10	0,69±0,04	0,87±0,03	0,33±0,04	0±0
20	0,68±0,04	0,89±0,03	0,28±0,04	-0,41±0,04
30	0,67±0,04	1±0	0±0	0±0
40	0,68±0,04	0,92±0,02	0,22±0,03	0,46±0,04
50	0,99±0	0,99±0,01	0,99±0,01	0,99±0,01

pačios trukmės signale padidėja didėjant rotorius sukimosi greičiui. Tai galbūt veikia ir pastebimą klasifikatoriaus tikslumo augimą. Detaliau analizuojant metodą vertėtų atsižvelgti į sėkmingo diagnostavimo ir signalo įrašo trukmės priklausomybę. Atlikus tiriamojo variklio analizę pastebėta, kad konkrečiu atveju metodo patikimumas priklauso nuo rotorius sukimosi greičio analizuotame diapazone.

3.4. Statoriaus apvijų gedimo tyrimas

3.4.1. Matematinis gedimo modeliavimas

Asinchroninio variklio darbas ir jo reakcija į gedimą modeliuoti naudojantis 2.3 skyriuje aprašomu variklio matematinio modeli. Pasirinkti trys skirtingų parametru varikliai, skirtingas rotorius greitis, skirtingas gedimo intensyvumas. Keistos parametru vertės pateikiamos 3.13 lentelėje. Rezultatai, gauti modeliuojant, pateikiami 3.14 lentelėje ir 3.15 paveiksle. Kaip matyti iš rezultatų, net ir labai mažas 0,5 % statoriaus fazės apvijų varžos pokytis yra pastebimas analizuojant trečiąją statoriaus srovės signalo harmoniką. Kai modeliuojamas variklio darbas be

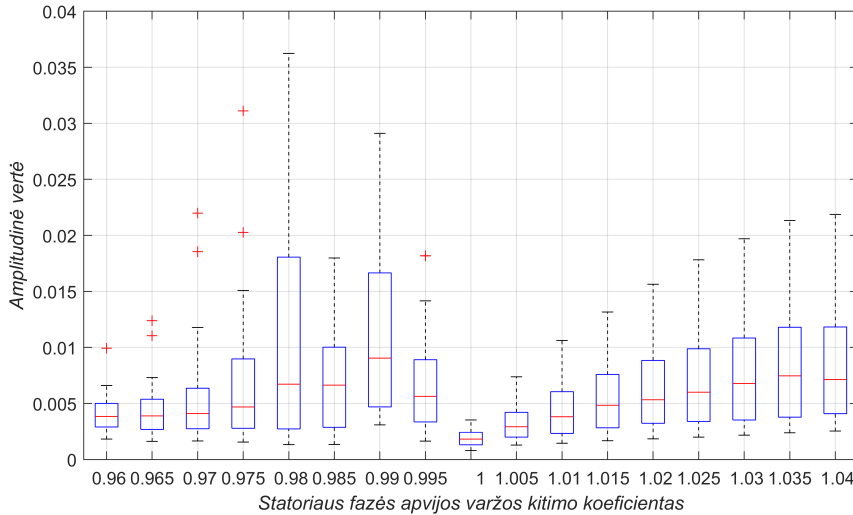
3.13 lentelė. Modeliuojant keisti parametrai

Parametrai	Vertės	Parametų skaičius
Variklis	V1, V2, V3	3
Maitinimo grandinės dažnis, %	60, 65, ..., 100	9
Statoriaus varžos kitimo koeficientas, %	96, 96, 5, ..., 104	17

3.14 lentelė. Asinchroninio variklio statoriaus trumpojo jungimo modeliavimo rezultatų suvestinė

Gedimas	Imties vidurkis	Standartinis nuokrypis	Stjudento kriterijus priklausomoms imtims
	\bar{x}	σ	$t_{0,95}$
0,96 Rs	0,004±0,001	0,002	-5,936
0,965 Rs	0,004±0,001	0,003	-4,959
0,97 Rs	0,006±0,002	0,005	-3,956
0,975 Rs	0,009±0,005	0,012	-3,279
0,98 Rs	0,021±0,018	0,045	-2,177
0,985 Rs	0,007±0,002	0,004	-6,1
0,99 Rs	0,019±0,012	0,031	-2,795
0,995 Rs	0,007±0,002	0,004	-5,759
1 Rs	0,002±0	0,001	0
1,005 Rs	0,003±0,001	0,002	-4,104
1,01 Rs	0,004±0,001	0,003	-5,128
1,015 Rs	0,006±0,001	0,003	-5,494
1,02 Rs	0,006±0,002	0,004	-5,71
1,025 Rs	0,007±0,002	0,005	-5,864
1,03 Rs	0,008±0,002	0,005	-6,013
1,035 Rs	0,009±0,002	0,006	-6,145
1,04 Rs	0,009±0,002	0,005	-6,33

gedimo, aktualios statoriaus srovės dažninės dedamosios amplitudinės vertės vidurkis yra 0,002, o modeliuojant skirtingo lygio gedimą ši vertė svyruoja nuo 0,003±0,001 iki 0,021±0,018. Stjudento kriterijaus absoliučios reikšmės yra didesnės nei 1,96, o tai reiškia, kad lyginant skirtumus tarp imčių pasiklovimo intervalo reikšmingumo lygis yra $\geq 0,95$. Modeliuota amplitudinė statoriaus srovės vertė nesant gedimo yra naudojama kaip ribinė slenkstinė vertė gedimui diagnozuoti. Įvertinus gautus rezultatus galima teigti, kad šios dedamosios amplitudinė vertė yra tinkamas parametras, kuriuo remiantis galima diagnozuoti gedimą.



3.15 pav. Statoriaus srovės signalo amplitudinės vertės esant skirtingiems statoriaus fazės apvijų varžos kitimo koeficientams

3.5. Rotoriaus juostų gedimo tyrimas

3.5.1. Matematinis gedimo modeliavimas

Asinchroninio variklio darbas ir jo reakcija į gedimą modeliuoti naudojantis 2.3 skyriuje aprašomu variklio matematiniu modeliu. Pasirinkti trys skirtingų parametų varikliai, skirtingas rotoriaus greitis, skirtingas gedimo intensyvumas. Keisti parametrai pateikiami 3.15 lentelėje. Rezultatai, gauti modeliuojant, pateikiami 3.16

3.15 lentelė. Rotoriaus juostų gedimo modeliavimo metu keisti parametrai

Parametrai	Vertės	Parametų skaičius
Variklis	V1, V2, V3	3
Maitinimo grandinės dažnis, %	60, 65, ..., 100	9
Rotoriaus varžos kitimo koeficientas, %	100, 120, ..., 400	16

lentelėje. Kaip matyti iš rezultatų, rotoriaus varžos pokytis aiškiai matomas analizuojant specifinio dažnio amplitudinę vertę. Apskaičiavus visų gedimo modeliavimo atvejų specifinio dažnio (jis rodo gedimo buvimą ir yra apskaičiuojamas naudojantis (2.6) išraiška) amplitudinių verčių vidurkį gauta $f_{gedimas} = 0,080 \pm 0,0058$. Visų gedimo neturintio variklio darbo modeliavimo atvejų statoriaus srovės specifinio dažnio amplitudinės vertės vidurkis $f_{be_gedimo} = 0,26 \pm 0,06$. Gautas aiškus verčių skirtumas, rezultatai nesuskloja. Stjudento kriterijaus absoliučiosios reikšmės didesnės už 1,96. Modeliuota amplitudinė statoriaus srovės vertė nesant gedimo yra naudojama kaip ribinė slenkstinė vertė gedimui diagnozuoti. Rezultatai patvirtinta, kad tirtu specifinio dažnio amplitudinė vertė yra tinkamas parametras diagnozuojant asinchroninio variklio rotoriaus juostų gedimą.

3.16 lentelė. Asinchroninio variklio rotoriaus juostų gedimo modeliavimo rezultatų suvestinė

Gedimas	Imties vidurkis	Standartinis nuokrypis	Stjudento kriterijus priklausomoms imtis
	\bar{x}	σ	$t_{0,95}$
1 R_r	0,269±0,057	0,144	0
1,2 R_r	0,048±0,005	0,012	7,969
1,4 R_r	0,042±0,003	0,008	8,178
1,6 R_r	0,043±0,003	0,008	8,170
1,8 R_r	0,046±0,004	0,009	8,029
2 R_r	0,055±0,005	0,013	7,690
2,2 R_r	0,056±0,005	0,014	7,648
2,4 R_r	0,064±0,007	0,016	7,376
2,6 R_r	0,071±0,01	0,024	7,056
2,8 R_r	0,081±0,013	0,033	6,625
3 R_r	0,101±0,022	0,055	5,672
3,2 R_r	0,145±0,05	0,127	3,358
3,4 R_r	0,149±0,043	0,109	3,465
3,6 R_r	0,11±0,02	0,050	5,438
3,8 R_r	0,1±0,009	0,022	6,040
4 R_r	0,094±0,007	0,018	6,276

3.6. Dinaminio rotoriaus masės disbalanso tyrimas

3.6.1. Matematinis gedimo modeliavimas

Asinchroninio variklio darbas ir jo reakcija į dinaminio rotoriaus masės disbalanso gedimą modeliuoti naudojantis 2.3 skyriuje aprašomu variklio matematinio modeliu. Kaip ir modeliuojant kitus gedimus, pasirinkti trijų skirtingų parametrų varikliai, kurių rotoriaus sukimosi greitis kito. Modeliuotam statoriaus srovės signalui atliekama antrojo lygio vilnelių paketų transformacija. Nagrinėjami (2, 0), (2, 1), (2, 2) ir (2, 3) mazgai. Atliekant matematinį modeliavimą, siekiant nustatyti gedimą indikuojančias slenkstines vertes, pasirinktas $f_s = 1500$ Hz diskretizavimo dažnis. Modeliavimo rezultatai pateikiami 3.17 lentelėje. Šiam

3.17 lentelė. Asinchroninio variklio dinaminio rotoriaus disbalanso modeliavimo rezultatų suvestinė

Mazgas	Gedimo nėra		Gedimas yra		Stjudento kriterijus prik. imtims
	Imties vidurkis	Standartinis nuokrypis	Imties vidurkis	Standartinis nuokrypis	
	x	σ	x	σ	$t_{0,95}$
(2, 0)	1,646±0,004	0,016	1,669±0,006	0,027	6,513
(2, 1)	1,523±0,009	0,042	1,496±0,009	0,04	-4,069
(2, 2)	1,387±0,009	0,041	1,412±0,011	0,048	3,499
(2, 3)	1,352±0,008	0,037	1,386±0,01	0,043	5,438

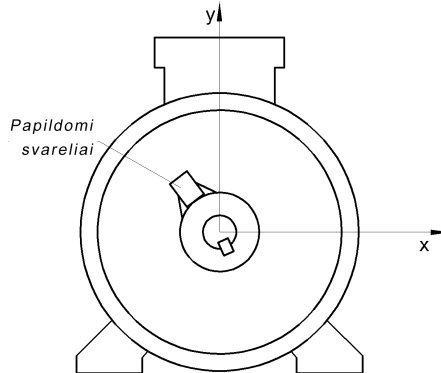
darbui pasirinktas 0,95 pasiklovimo intervalo reikšmingumo lygis. Atlikta analizė leidžia daryti išvadą, kad visi analizuoti mazgai yra tinkami dinaminiam rotoriaus

disbalansui diagnozuoti. Vertinant pagal Stjudento kriterijų priklausomoms imtims, mazgai išsidėsto rezultato mažėjimo tvarka atitinkamai: (2,0), (2,3), (2,1) ir (2,2). Tačiau nors kriterijaus reikšmės yra skirtingos, visų jų absoliučioji reikšmė yra didesnė už 1,96, t. y. lyginant skirtumus tarp imčių pasiklovimo intervalo reikšmingumo lygis $\geq 0,95$. Modeliuota entropijų santykio reikšmė nesant gedimo yra naudojama kaip ribinė slenkstinė reikšmė gedimui diagnozuoti.

3.6.2. Laboratorinis eksperimentas

Siekiant patikrinti siūlomą metodą, laboratorijoje buvo atliktas eksperimentas. Siekiant nustatyti, kuri statoriaus srovės dažnių spektro juosta yra tinkamiausia siūlomam metodui, esant skirtingam asinchroninio variklio rotoriaus masės disbalanso lygiui, registruotas statoriaus srovės signalas. Be to, nagrinėtas ir tinkamiausias analizuoto signalo laiko intervalas (laikas nuo variklio paleidimo). Visa aktuali informacija apie variklį pateikiama 3.1.1 poskyryje (tas pats variklis naudotas keliems eksperimentams). Svarbu paminėti, kad buvo tyrinėtas progresuojantis gedimas, nenaudota jokia papildoma variklio paleidimo įranga. Fazinės srovės signalas buvo registruojamas ir perduodamas į asmeninį kompiuterį (žr. 3.3 paveikslą). Kompiuteriu skaitmeniniai signalai buvo apdorojami programine įranga „Matlab“.

Visą eksperimentą galima suskirstyti į du etapus. Pirmasis etapas – duomenų rinkimas, t. y. su subalansuotu ir su išbalansuotu rotoriumi veikiančio variklio statoriaus srovių registravimas. Antrasis etapas – duomenų apdorojimas, metodo taikymas ir rezultatų vertinimas. Siekiant dinamiškai išbalansuoti rotorius prie skriemulio buvo tvirtinami papildomi svareliai (žr. 3.16 paveikslą). Eksperimentui



3.16 pav. Asinchroninio variklio su pritvirtintais papildomais svareliais brėžinys

naudotų svarelių aprašymai pateikiami 3.18 lentelėje. Iš viso per eksperimentą atlikta 11 bandymų. Juos sudarė variklio su subalansuotu rotoriumi bandymas ir 10 variklio su skirtingai išbalansuotu rotoriumi bandymų. Antrame lentelės stulpelyje pateikiama svarelių, kurie buvo tvirtinami prie rotoriaus, masė. Atliekant tolesnį bandymą prie skriemulio pritvirtinti svareliai buvo papildomi naujais, todėl trečiame stulpelyje pateikiama suminė konkretaus bandymo atveju prie skriemulio pritvirtintų svarelių masė. Ketvirtame stulpelyje pateikiamas pagal (1.21) apskaičiuota parametro vertė e_{per} , susiejanti disbalansą ir rotoriaus svorį ($m_{rotoriaus} = 6,114$ kg). Šį parametą padauginus iš sukimosi greičio ($\omega = 95,277$ rad/s) gaunamas dydis, kuris pagal ISO 21940-11:2017 naudojamas disbalanso klasei nustatyti (penktas

stulpelis). Šeštame stulpelyje pateikiamos klasės, kurias atitinka atliekant bandymą išbalansuotas rotorius. Nustačius klases matyti, kad tik pirmojo bandymo atveju (išbalansuoti skirta masė 5 g) sistema priskiriama G6,3 klasei. Pagal ISO 21940-11:2017 asinchroniniai varikliai, naudojami pramonėje, priklausomai nuo sukimosi greičio ir paskirties, priskiriami G2,5 ir G6,3 klasei (žr. A priedą). Siekiant

3.18 lentelė. Papildomi svareliai, naudoti varikliui išbalansuoti

<i>Bandymo nr.</i>	<i>Masė, g</i>	<i>Suminė masė, g</i>	<i>e_{per}, mm</i>	<i>$e_{per} \cdot \omega$</i>	<i>Klasė</i>
1	5	5	0,04	3,66	G6,3
2	7	12	0,09	8,79	G16
3	6	18	0,14	13,18	G16
4	6	24	0,18	17,58	G40
5	7	31	0,24	22,71	G40
6	6	37	0,28	27,10	G40
7	7	44	0,34	32,23	G40
8	5	49	0,38	35,89	G40
9	6	55	0,42	40,28	G100
10	7	62	0,48	45,41	G100

padidinti patikimumą kiekvienas bandymas buvo kartojamas 10 kartų. Iš viso registruojant visus bandymus buvo sukaupta 110 įrašų.

Siekiant nustatyti metodo tinkamumą pereinamiesiems ir nusistovėjusiems procesams, eksperimentas buvo praplėstas. Analizuotas 3 s trukmės nuo variklio paleidimo momento statoriaus srovės signalas. Pirminiam signalo apdorojimui buvo sukurta speciali programinė įranga, kuria aptinkamas ir iškerpamas norimos trukmės nuo variklio paleidimo momento signalas. Siekiant nustatyti diagnostikai tinkamiausią laiko intervalą, signalai buvo suskaidyti į penkis susiklojančius laiko intervalus. Šie intervalai pateikiami 3.19 lentelėje. Vienas iš analizuotų srovės signalų su dviem susiklojančiais laiko intervalais pateikiamas 3.17 paveiksle.

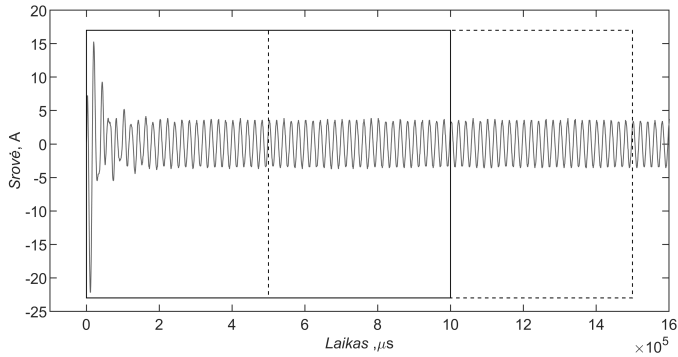
3.19 lentelė. Analizuoti signalo laiko intervalai

<i>Nr.</i>	<i>Laiko intervalas, s</i>
I	0÷1
II	0,5÷1,5
III	1÷2
IV	1,5÷2,5
V	2÷3

Užregistruotus statoriaus srovės signalus suskaidžius į laiko intervalus apskaičiuota informacijos entropija ir atlikta vilnelių paketų transformacija.

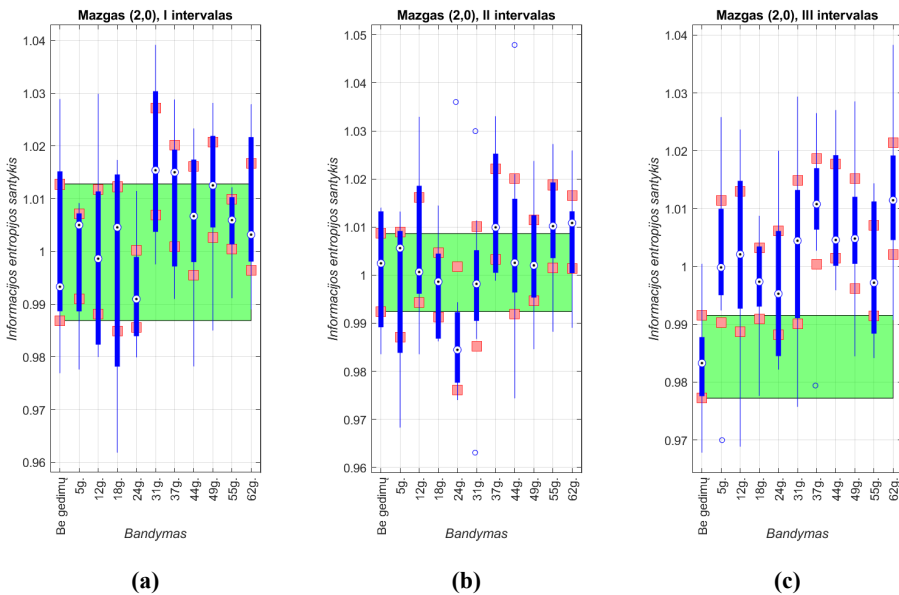
Rezultatai, gauti tiriant informacijos entropijos metodą, skirtą dinaminiam statoriaus masės disbalansui diagnozuoti

Eksperimento rezultatai pateikiami grafikuose (žr. 3.18–3.25 paveikslus), kuriuose mėlyna linija vaizduojamas statoriaus srovės signalo informacijos entropijos prieš vilnelių paketų transformaciją ir po jos santykis. Taškas linijos ribose yra rezultatų mediana, ryškesnė linijos dalis žymi apatinį ir viršutinį informacijos entropijos santykio kvartilius. Rausvos spalvos kvadratai žymi duomenų



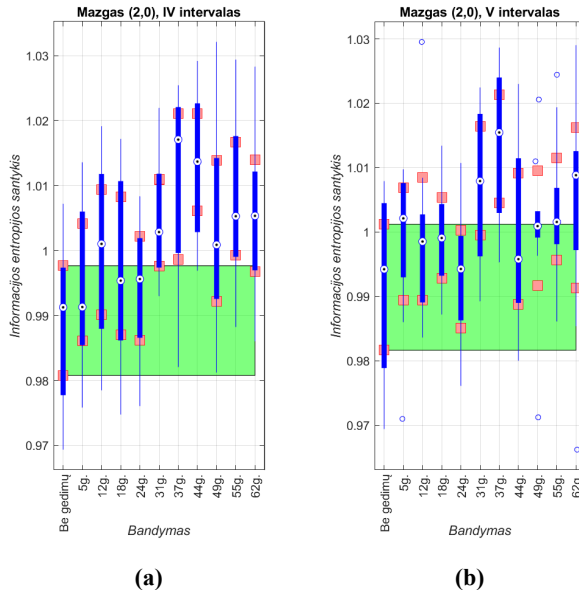
3.17 pav. Srovės signalas su pažymėtais susiklojančiais laiko intervalais

pasiklovimo intervalo reikšmingumo lygį $p = 0,95$. Siekiant palengvinti vizualinę rezultatų analizę pirmojo bandymo, kai imituotas gedimo neturinio variklio darbas, pasiklovimo intervalo ribos pažymėtos žaliu stačiakampiu. Visa analizuojama dažnių juosta mazgais suskirstyta į diapazonus (žr. 2.4 lentelę), laiko intervalai dalija 3 sekundžių trukmės signalą į 5 susiklojančias dalis (žr. 3.19 lentelę).



3.18 pav. (2,0) mazgo I, II ir III laiko intervalai (atitinkamai a–c)

Kaip matyti iš 3.18 ir 3.19 paveiksluose pateikiamų grafikų, gedimų neturinio variklio informacijos entropijos santykis išsiskiria tik vienu atveju – (2,0) mazgo trečiajame analizuojamame intervale (3.18 paveikslo (c)). Ketvirtajame ir penktajame laiko intervale gedimą turinio variklio ir jo neturinio variklio statoriaus srovės informacijos entropijos santykis susikloja ir aiškaus skirtumo nematyti. Bendrai vertinant (2,0) mazgo (dažnių diapazonas $0 \div 187$ Hz) rezultatus galima teigti, kad skirtumas tarp entropijos santykio matomas tik kai kuriais išbalansavimo atvejais trečiajame analizuojamame laiko intervale.



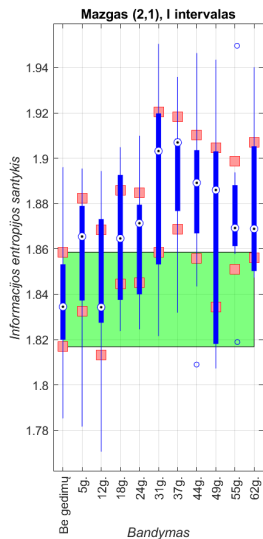
3.19 pav. (2,0) mazgo IV ir V laiko intervalai (atitinkamai a–b)

Antrasis analizuotas mazgas yra (2,1). Šiuo atveju srovės signalo dažnių juosta – $188 \div 374$ Hz (3.20 ir 3.21 paveikslai). Galima paminėti antrojo intervalo didelio išbalansavimo atvejus 6, $8 \div 10$ (37, $49 \div 62$ g). Jų skirtumas, palyginti su kitais pirmojo ir antrojo intervalo atvejais, buvo didesnis. Kiek kitokie rezultatai gauti analizuojant trečią, ketvirtą ir penktą laiko intervalus (žr. 3.20 paveikslą (c), 3.21 paveikslą (a) ir (b)). Beveik visais išbalansavimo atvejais yra skirtumas tarp gedimo neturinčio ir jį turinčio variklio statoriaus srovės informacijos entropijos santykio kvartilų. Kaip prasčiau išsiskiriančius atvejus reikia paminėti ketvirtą (24 g) bandymą trečiame intervale, aštuntą (49 g) bandymą ketvirtame intervale ir pirmą (5 g) bandymą penktame intervale.

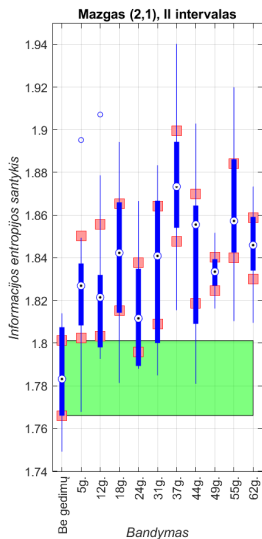
Trečioji dažnių juosta $375 \div 562$ Hz priklauso (2,2) mazgui. Šio mazgo informacijos entropijos santykio rezultatai pateikiami 3.22 ir 3.23 paveiksluose. Juose visų bandymų atvejais gedimų neturinčio variklio entropijos santykio viršutinis kvartilis nesusikloja su išbalansuotų rotorių bandymų rezultatų apatiniais kvartiliais. Kai kuriais atvejais skirtumas tarp minėtų kvartilų yra didesnis, pavyzdžiui, trečiojo laiko intervalo 6 (37 g) bandymo. Pirmojo ir ketvirtojo laiko intervalų rezultatai taip pat skiriasi, tačiau kelių bandymų rezultatų skirtumas yra ne toks aiškus, palyginti su kitais laiko intervalais. Bendrai vertinant (2,2) mazgo rezultatai yra tinkamesni nei prieš tai aptartų mazgų (2,0 ir 2,1). Galima išskirti trečiąjį ir penktąjį laiko intervalus, kurie yra tinkamiausi tirtu variklio dinaminio rotoriaus masės disbalanso gedimui diagnozuoti.

Paskutinis nagrinėtas mazgas yra (2,3). Jam priskiriamas dažnių diapazonas yra $563 \div 750$ Hz. Lyginant rezultatus, pirmojo laiko intervalo rezultatai daugiausia susikloja tarpusavyje (žr. 3.24 paveikslą (a)). Antramjam laiko intervalui būdingas didesnis skirtumas tarp gedimo neturinčio ir jį turinčio variklio lyginamųjų kvartilų (žr. 3.24 paveikslą (b)). Bendrai vertinant (2,3) mazgą, galima sakyti, kad jis iš dalies tinkamas dinaminiam rotoriaus masės disbalansui diagnozuoti.

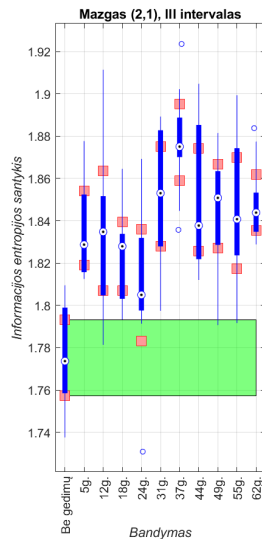
Pagal Stjudento kriterijų priklausomoms imtims (3.20 lentelė) geriausi (2,2) mazgo rezultatai: kriterijaus absoliučiuųjų reikšmių, viršijusių 1,96 ribą (lyginant



(a)

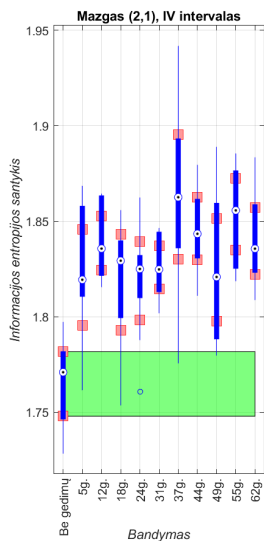


(b)

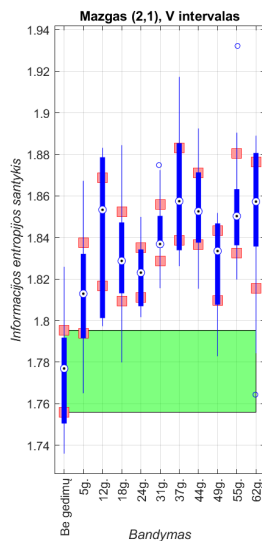


(c)

3.20 pav. (2,1) mazgo I, II ir III laiko intervalai (atitinkamai a–c)



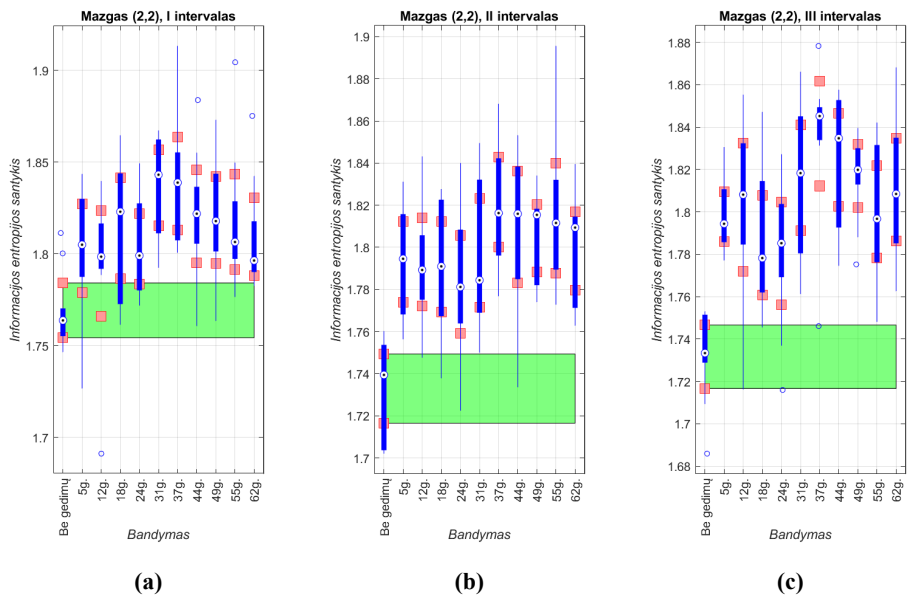
(a)



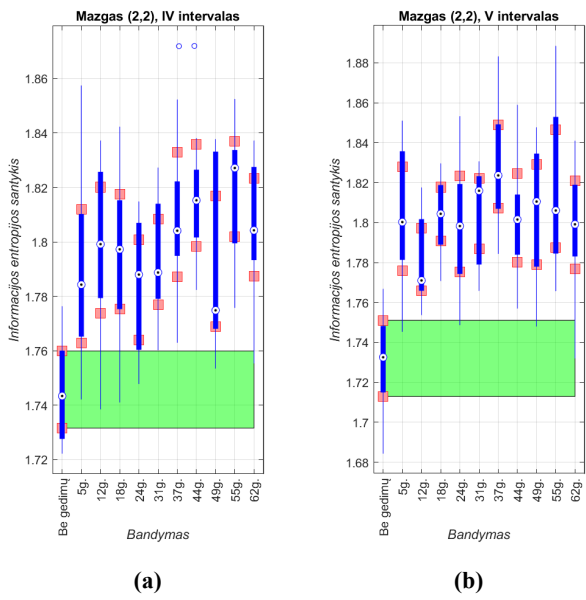
(b)

3.21 pav. (2,1) mazgo IV ir V laiko intervalai (atitinkamai a–b)

skirtumus tarp imčių pasiklojimo intervalo reikšmingumo lygis yra $\geq 0,95$), buvo gauta 49 iš 50. Vertinant (2,1) mazgą kriterijaus absoliučiuųjų reikšmių, viršijusių 1,96 ribą, buvo gauta 47 iš 50. Toliau eina (2,3) ir (2,0) mazgai, kurių 1,96 ribą viršijusių kriterijaus absoliučiuųjų reikšmių buvo gauta atitinkamai 42 ir 21 iš 50. Laiko intervalai vertinant tą patį rodiklį pasiskirstė taip: trečias intervalas (40 iš 40),

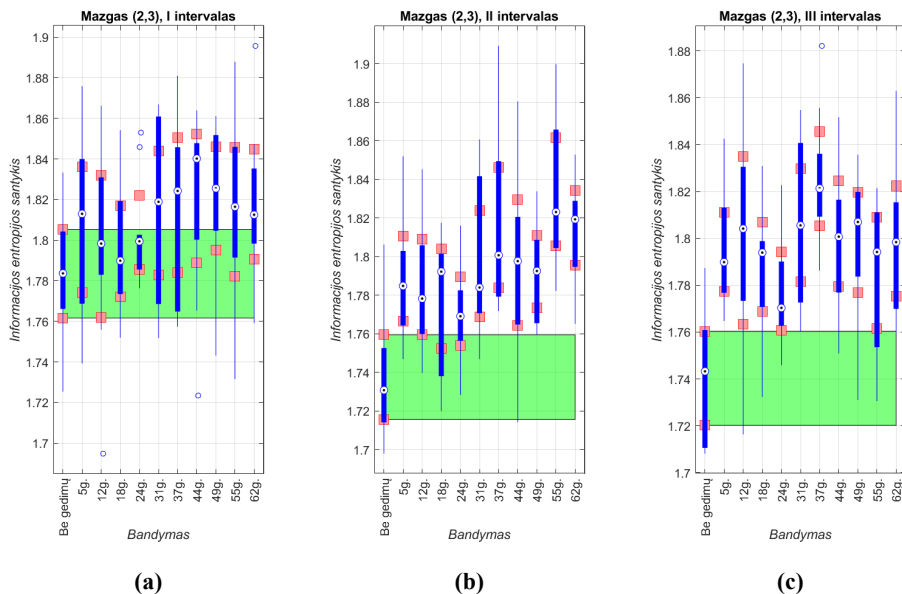


3.22 pav. (2,2) mazgo I, II ir III laiko intervalai (atitinkamai a–c)

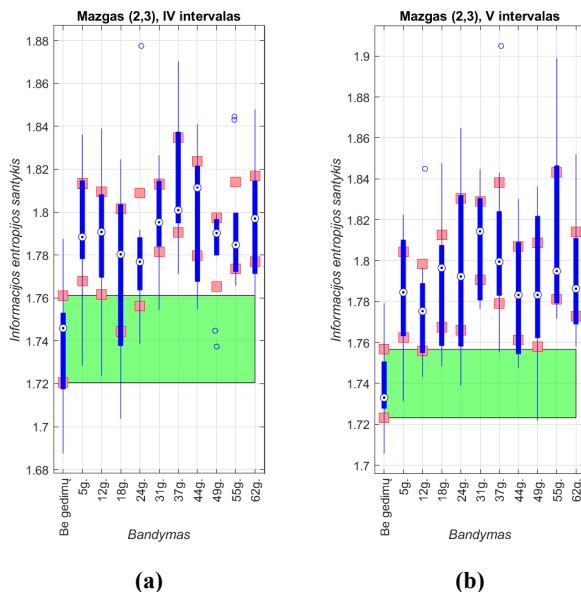


3.23 pav. (2,2) mazgo IV ir V laiko intervalai (atitinkamai a–b)

penktas intervalas (33 iš 40), ketvirtas intervalas (35 iš 40), antras intervalas (31 iš 40) ir pirmas intervalas (20 iš 40). Apibendrinant galima išskirti (2,1) ir (2,2) mazgus ir trečiąjį laiko intervalą kaip tinkamiausius vertinant pagal Stjudento kriterijų priklausomoms imtims. Visų eksperimento tyrimų Stjudento kriterijai priklausomoms imtims pateikiami F priede.



3.24 pav. (2,3) mazgo I, II ir III laiko intervalai (atitinkamai a–c)



3.25 pav. (2,3) mazgo IV ir V laiko intervalai (atitinkamai a–b)

Vertinant pagal kvartilų reikšmes tyrimo rezultatai rodo, kad geriausias mazgas tirtu variklio rotoriaus masės disbalansui diagnozuoti yra (2,2). Visi šio mazgo laiko intervalai yra tinkami diagnostikai. Tinkamumas diagnostikai vertintas lyginant išbalansuoto variklio informacijos entropijos santykio apatinio kvartilio reikšmę su gedimo neturinčio variklio informacijos entropijos santykio viršutinio kvartilio

3.20 lentelė. Studento kriterijų priklausomoms imtis (atitinkančių sąlygą $|t| \geq 1,96$ pasiklovimo intervalo reikšmingumo lygis 0,95) skaičius atitinkamuose mazguose ir laiko intervaluose

Mazgai	Laiko intervalas				
	I	II	III	IV	V
(2,0)	1	1	10	6	3
(2,1)	7	10	10	10	10
(2,2)	9	10	10	10	10
(2,3)	3	10	10	9	10

reikšme. Bandymas laikomas sėkmingu, jei skirtumas yra teigiamas. Sėkmingų rezultatų suvestinė pateikiama 3.21 lentelėje. Iš šios lentelės matyti, kad mazgas, kurio rezultatai geriausi, yra (2,2) – 100 % sėkmingų bandymų. Kiek prastesnis (2,1) ir (2,3) mazgų rezultatas – sėkmingų bandymų buvo $76 \div 12$ %. Prasčiausias (2,0) mazgo rezultatas – $26 \div 12$ % sėkmingų bandymų. Rezultatų analizė taip pat parodė, kad tiksliausi laiko intervalai yra trečias ($1 \div 2$ s.) – $92,5 \div 8,2$ %, ketvirtas ($1,5 \div 2,5$ s.) – $82,5 \div 11,8$ % ir penktas ($2 \div 3$ s.) – $72,5 \div 13,8$ %. Prastesnis rezultatas gautas antrojo laiko intervalo ($0,5 \div 1,5$ s.) – $65 \div 15$ % ir pirmojo laiko intervalo ($0 \div 1$ s.) – $35 \div 15$ %. 3.21 lentelėje paryškintuoju šriftu pažymėti bandymai, kuriuos atliekant buvo diagnozuoti visi išbalansavimo atvejai. Analizuojant skirtumo tarp kvartilų reikšmes iširta, kad pats didžiausias skirtumų vidurkis yra (2,2) mazgo trečiame laiko intervale. Šio vidurkio reikšmė $0,04 \div 0,01$ 3.22 lentelėje. Minėtoje lentelėje paryškintuoju šriftu pažymėti aukščiausių reikšmių rezultatai (nebuvo nesėkmingų bandymų). Svarbu paminėti, kad atliekant eksperimento šesťą (37 g) bandymą

3.21 lentelė. Bandymų, kurių skirtumas buvo teigiamas (sėkmingų), skaičius (pasiklovimo intervalo reikšmingumo lygis 0,95)

Mazgai	Laiko intervalas					Mazgo sėkmingi bandymai, %
	I	II	III	IV	V	
(2,0)	0	0	9	4	0	26 ± 12
(2,1)	3	7	9	10	9	76 ± 12
(2,2)	10	10	10	10	10	100 ± 0
(2,3)	1	9	9	9	10	76 ± 12
Intervalo sėkmingi bandymai, %	35 ± 15	65 ± 15	$92,5 \pm 8,2$	$82,5 \pm 11,8$	$72,5 \pm 13,8$	

3.22 lentelė. Skirtumo tarp kvartilų vidurkis (pasiklovimo intervalo reikšmingumo lygis 0,95)

Mazgai	Laiko intervalas				
	I	II	III	IV	V
(2,0)	$-0,02 \pm 0,006$	$-0,02 \pm 0,005$	$0,008 \pm 0,004$	$-0,004 \pm 0,004$	$-0,01 \pm 0,003$
(2,1)	$-0,01 \pm 0,01$	$0,01 \pm 0,01$	$0,02 \pm 0,01$	$0,034 \pm 0,009$	$0,03 \pm 0,01$
(2,2)	$0,024 \pm 0,007$	$0,023 \pm 0,006$	$0,04 \pm 0,01$	$0,022 \pm 0,009$	$0,034 \pm 0,006$
(2,3)	$-0,02 \pm 0,009$	$0,02 \pm 0,01$	$0,01 \pm 0,009$	$0,02 \pm 0,009$	$0,02 \pm 0,006$

žmogaus juntama vibracija buvo ypač stipri, palyginti su kitais bandymais. Tai

atsispindi ir rezultatai – šio bandymo mediana yra didesnė už kitų bandymų (žr. 3.22 paveikslo (c)).

Atraminių vektorių mašinų (tiesinės branduolio funkcijos [124]) klasifikatoriumi suklasifikavus bandinius, gauti rezultatai pateikiami 3.23 lentelėje. Žemą specifiškumo vertę galima paaiškinti mažu gedimo neturinio variklio bandinių kiekiu. Bendrai vertinant pagal MKK, galima daryti išvadą, kad klasifikatorius veikia kokybiškai. Aprašomam klasifikatoriui mokyti ir testuoti naudoti (2,2) mazgo ketvirto laiko intervalo informacijos entropijos santykio duomenys. Klasifikavimas atliktas naudojant tik vieną savybę. Atlikus progresyvaus

3.23 lentelė. Klasifikatoriaus kokybės parametrai (pasiklivimo intervalo reikšmingumo lygis 0,95)

<i>Tikslumas</i>	<i>Jautrumas</i>	<i>Specifiškumas</i>	<i>MKK</i>
0,96±0,04	1±0	0,60±0,09	0,96±0,04

gedimo modeliavimo eksperimentą nustatyta, kad naudojant kombinuotą informacijos entropijos ir vilnelių paketų transformacijos metodą galima sėkmingai diagnozuoti rotoriaus masės disbalanso gedimą, nepriklausomai nuo jo laipsnio. Išanalizavus eksperimento rezultatus nustatyta, kad tirtam varikliui tinkamiausias dažnių diapazonas šio tipo metodikai yra 375÷562 Hz, o laiko intervalas – 1÷2 s skaičiuojant nuo variklio paleidimo momento. Nors esant minėtam mazgui ir laiko diapazonui gauta daugiausia sėkmingo diagnozavimo atvejų, kiti mazgai ir laiko intervalai taip pat yra tinkami diagnostikai. Diagnozuojant netirto variklio gedimą rekomenduojama naudoti esant nusistovėjusiai proceso būsenai registruotą signalą ir (2,1), (2,2) arba (2,3) mazgus. Tyrimo rezultatai įrodo, kad nėra tiesinės priklausomybės tarp informacijos entropijos santykio (naudoto diagnozuojant gedimą) ir išbalansavimo lygio. Vienas iš pagrindinių metodo pranašumų yra mažo mechaninio gedimo diagnozavimas remiantis elektriniu signalu.

3.7. Išvados

Atlikus teorinius ir laboratorinius eksperimentus nustatyta, kad naudojant universalų gedimų diagnozavimo algoritmą galima sėkmingai diagnozuoti visus nagrinėtus gedimus. Pasiskirsčiusio guolių gedimo eksperimento rezultatai rodo, kad metodas yra efektyvus rotoriaus sukimosi greičio vertei esant arti nominaliosios. Kai maitinimo grandinės dažnis yra 50 Hz, klasifikatoriaus tikslumas siekia 99 %. Taškinio guolių gedimo diagnozavimo eksperimento rezultatai rodo, kad diagnozavimas esant sąlygiškai lėtam rotoriaus sukimosi greičiui yra tikslesnis. Analizuojant 10÷40 Hz maitinimo grandinės dažnių diapazoną, visų nagrinėtų gedimų diagnozavimo tikslumas viršijo 95 % vertę. Analizuojant 50 Hz maitinimo grandinės dažnio atvejus, tikslumas svyravo tarp 83 ir 100 %. Ištyrus dinaminio rotoriaus masės disbalanso diagnozavimo galimybes nustatyta, kad efektyviausius diagnozavimo rezultatus galima gauti naudojant signalą, registruotą esant nusistovėjusiai būsenai, ir (2,1), (2,2) arba (2,3) mazgus. Atlikus eksperimentą naudojant (2,2) mazgo informacijos entropijos santykio duomenis, bandinius pavyko suklasifikuoti 95 % tikslumu. Dėl minėtų rezultatų rekomenduojama statoriaus srovių signalus registruoti esant žemiems rotoriaus sūkiams ir tai pakartoti esant nominaliesiems sūkiams. Naudojant signalus, užregistruotus esant skirtingiems rotoriaus sūkiams, galima gauti tikslesnius universalaus diagnozavimo algoritmo rezultatus.

BENDROSIOS IŠVADOS

1. Sukurtas metodas, skirtas asinchroniniam variklio dinaminiam rotoriaus masės disbalansui diagnozuoti remiantis statoriaus srovės signalo vertėmis. Tikslūs diagnostikos rezultatus pavyko gauti sujungus vilnelių paketų transformacijos ir informacijos entropijos metodus. Siūlomo metodo efektyvumą patvirtina laboratorinis eksperimentas. Atlikus eksperimentą, konkretaus variklio atveju nustatytas 95 % gedimo diagnostikos tikslumas. Eksperimento rezultatai įrodo, kad metodas yra tinkamas diagnozuojant net ir silpną (asinchroniniams varikliams leistiną) disbalansą ($e_{per} \cdot \omega \leq G6,3$). Mechaninio gedimo diagnostikos naudojant elektrinį signalą yra šio metodo pranašumas.
2. Sukurta nauja srovės savybių, reikalingų asinchroninio variklio taškiniams guolių gedimams diagnozuoti, atrankos metodika. Atliktas tyrimas, kuriuo pagrįsta, kad statoriaus srovės spektro dedamosios turi skirtingos informacijos, reikalingos taškiniam guolių gedimui diagnozuoti. Darbe įrodyta, kad taikant siūlomą savybių atrankos metodiką galima sėkmingai nustatyti konkrečiam taškinių guolių gedimo tipui aktualias statoriaus srovės signalo dažnines dedamąsias. Atlikus eksperimentą pavyko pasiekti ne mažesnę nei 95 % taškinių guolių gedimų diagnostikos tikslumą (10÷40 Hz maitinimo grandinės dažnių diapazone).
3. Į universalų asinchroninio variklio gedimo diagnostikos algoritmą įtraukti žinomi statoriaus apvijų ir rotoriaus juostų gedimų diagnostikos metodai. Gedimai diagnozuoti remiantis statoriaus srovės signalo vertėmis. Atlikus teorinį tyrimą sėkmingai diagnozuoti net ir smulkiausi modeliuoti gedimai (statoriaus ir rotoriaus gedimų atveju atitinkamai 0,5 % ir 20 % varžos pokyčiai).
4. Sukurtas naujas pasiskirsčiusio guolių gedimo diagnostikos metodas. Atlikus diagnostikos metodo tyrimą nustatyta, kad rotoriaus sukimosi greitis analizuotame diapazone lemia diagnostikos patikimumą. Sėkmingų diagnostikos atvejų skaičius didėja rotoriaus sukimosi greičiui artėjant prie nominaliosios vertės. Eksperimentu nustatyta, kad, esant 50 Hz maitinimo grandinės dažniui, klasifikatoriaus tikslumas siekia 99 %. Taip pat patvirtinta, kad šio tipo gedimą galima atskirti nuo taškinių guolių gedimo. Vienas iš pagrindinių metodo pranašumų – smulkaus mechaninio gedimo diagnostikos remiantis elektriniu signalu.

LITERATŪRA

1. T. Petsche, A. Marcantonio, C. Darken, S. J. Hanson, G. M. Kuhn, and N. I. Santoso, "A neural network autoassociator for induction motor failure prediction," in *Advances in Neural Information Processing Systems* 8, D. S. Touretzky, M. C. Mozer, and M. E. Hasselmo, Eds. MIT Press, 1996, pp. 924–930. [Online]. Available: <http://papers.nips.cc/paper/1077-a-neural-network-autoassociator-for-induction-motor-failure-prediction.pdf>
2. S. Karmakar, S. Chattopadhyay, M. Mitra, and S. Sengupta, *Induction Motor Fault Diagnosis*. Springer Singapore, 2016.
3. "Detection and classification of induction motor faults using motor current signature analysis and multilayer perceptron," in *2014 IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2014)*. IEEE, mar 2014.
4. G. B. Kliman and J. Stein, "Methods of motor current signature analysis," *Electric Machines & Power Systems*, vol. 20, no. 5, pp. 463–474, sep 1992.
5. P. C. Krause, O. Wasynczuk, and S. D. Sudhoff, *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*. Wiley-IEEE Press, 2002. [Online]. Available: <https://www.amazon.com/Analysis-Electric-Machinery-Drive-Systems/dp/047114326X?SubscriptionId=AKIAIOBINVZYXZQZ2U3A&tag=chimbori05-20&linkCode=xm2&camp=2025&creative=165953&creativeASIN=047114326X>
6. P. C. Sen, *Principles of Electric Machines and Power Electronics*. John Wiley & Sons, 2013. [Online]. Available: https://www.ebook.de/de/product/20997442/p_c_sen_principles_of_electric_machines_and_power_electronics.html
7. B. D. Austin Hughes, *Electric Motors and Drives*. Elsevier LTD, Oxford, 2013. [Online]. Available: https://www.ebook.de/de/product/19896683/austin_hughes_bill_drury_electric_motors_and_drives.html
8. V. Giurgiutiu and S. E. Lyshevski, *Micromechatronics: Modeling, Analysis, and Design with MATLAB, Second Edition (Nano- and Microscience, Engineering, Technology and Medicine)*. CRC Press, 2009. [Online]. Available: <https://www.amazon.com/Micromechatronics-Modeling-Microscience-Engineering-Technology/dp/1420065629?SubscriptionId=AKIAIOBINVZYXZQZ2U3A&tag=chimbori05-20&linkCode=xm2&camp=2025&creative=165953&creativeASIN=1420065629>
9. A. Bonnett and G. Soukup, "Analysis of rotor failures in squirrel-cage induction motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 24, no. 6, pp. 1124–1130, nov 1988.
10. H. Su, K. T. Chong, and R. R. Kumar, "Vibration signal analysis for electrical fault detection of induction machine using neural networks," *Neural Computing and Applications*, vol. 20, no. 2, pp. 183–194, jan 2011.
11. P. Zhang, Y. Du, T. G. Habetler, and B. Lu, "A survey of condition monitoring and protection methods for medium-voltage induction motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, no. 1, pp. 34–46, jan 2011.
12. G. Singh and S. A. S. A. Kazzaz, "Induction machine drive condition monitoring and diagnostic research—a survey," *Electric Power Systems Research*, vol. 64, no. 2, pp. 145–158, feb 2003.

13. P. Albrecht, J. Appiarius, R. McCoy, E. Owen, and D. Sharma, "Assessment of the reliability of motors in utility applications - updated," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. EC-1, no. 1, pp. 39–46, mar 1986.
14. M. Ojaghi, M. Sabouri, and J. Faiz, "Diagnosis methods for stator winding faults in three-phase squirrel-cage induction motors," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 24, no. 6, pp. 891–912, jun 2013.
15. J. Stack, T. Habetler, and R. Harley, "Fault classification and fault signature production for rolling element bearings in electric machines," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 40, no. 3, pp. 735–739, may 2004.
16. R. A. Collacott, *Vibration monitoring and diagnosis: Techniques for cost-effective plant maintenance*. Wiley, 1979. [Online]. Available: <https://www.amazon.com/Vibration-monitoring-diagnosis-cost-effective-maintenance/dp/0470265248?SubscriptionId=AKIAIOBINVZYXZQZ2U3A&tag=chimbori05-20&linkCode=xm2&camp=2025&creative=165953&creativeASIN=0470265248>
17. B. Li, M.-Y. Chow, Y. Tipsuwan, and J. Hung, "Neural-network-based motor rolling bearing fault diagnosis," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 47, no. 5, pp. 1060–1069, 2000.
18. J. Stack, T. Habetler, and R. Harley, "Fault classification and fault signature production for rolling element bearings in electric machines," in *4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, 2003. SDEMPED 2003*. IEEE.
19. M. Hawman and W. Galinaitis, "Acoustic emission monitoring of rolling element bearings," in *IEEE 1988 Ultrasonics Symposium Proceedings*. IEEE.
20. K. Xue, Z. Wu, H. Li, and G. Yang, "Research on identification method of aero-engine bearing fault using acoustic emission technique based on wavelet packet and rough set," in *2017 IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*. IEEE, mar 2017.
21. D. Sun, Z. Xu, and Y. J. Yuan, "Detection of abnormal noises from tapered roller bearings by a sound sensing system," in *2017 24th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP)*. IEEE, nov 2017.
22. J. Brändlein, P. Eschmann, L. Hasbargen, and K. Weigand, *Ball and Roller Bearings: Theory, Design and Application*. Wiley, 1999. [Online]. Available: <https://www.amazon.com/Ball-Roller-Bearings-Theory-Application/dp/0471984523?SubscriptionId=AKIAIOBINVZYXZQZ2U3A&tag=chimbori05-20&linkCode=xm2&camp=2025&creative=165953&creativeASIN=0471984523>
23. A. Joshi and J. Blennow, "Electrical characterization of bearing lubricants," in *2014 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*. IEEE, oct 2014.
24. H. L. Schmitt, L. R. B. Silva, P. R. Scalassara, and A. Goedel, "Bearing fault detection using relative entropy of wavelet components and artificial neural networks," in *2013 9th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*. IEEE, aug 2013.

25. F. B. Abid, S. Zgarni, and A. Braham, "Bearing fault detection of induction motor using SWPT and DAG support vector machines," in *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE, oct 2016.
26. K. Teotrakool, M. J. Devaney, and L. Eren, "Bearing fault detection in adjustable speed drives via a support vector machine with feature selection using a genetic algorithm," in *2008 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*. IEEE, may 2008.
27. S. E. Pandarakone, K. Akahori, T. Matsumura, Y. Mizuno, and H. Nakamura, "Development of a methodology for bearing fault scrutiny and diagnosis using SVM," in *2017 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. IEEE, mar 2017.
28. S. E. Pandarakone, Y. Mizuno, and H. Nakamura, "Distinct fault analysis of induction motor bearing using frequency spectrum determination and support vector machine," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 3, pp. 3049–3056, may 2017.
29. *Mechanical vibration – Measurement and evaluation of machine vibration – Part 1: General guidelines*. International Organization for Standardization, 2016.
30. B. Lu, M. Nowak, S. Grubic, and T. Habetler, "An adaptive noise-cancellation method for detecting generalized roughness bearing faults under dynamic load conditions," in *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. IEEE, sep 2009.
31. F. Dalvand, M. Kang, S. Dalvand, and M. Pecht, "Detection of generalized-roughness and single-point bearing faults using linear prediction-based current noise cancellation," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 12, pp. 9728–9738, dec 2018.
32. R. Schoen, T. Habetler, F. Kamran, and R. Bartheld, "Motor bearing damage detection using stator current monitoring," in *Proceedings of 1994 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. IEEE, 1995.
33. Zureks, "Wirnik by zureks," 2008, [žiūrėta 2019-01-01]. [Online]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wirnik_by_Zureks.jpg
34. P. J. Tavner, L. Ran, and J. Penman, *Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines*. INSTITUTION OF ENGINEERING & T, 2008. [Online]. Available: https://www.ebook.de/de/product/21923273/peter_john_tavner_li_ran_jim_penman_condition_monitoring_of_rotating_electrical_machines.html
35. A. Bonnett and G. Soukup, "Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 28, no. 4, pp. 921–937, 1992.
36. C. Bruzzese, "Analysis and application of particular current signatures (symptoms) for cage monitoring in nonsinusoidally fed motors with high rejection to drive load, inertia, and frequency variations," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 12, pp. 4137–4155, dec 2008.
37. F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, and P. Vas, "AI techniques in induction machines diagnosis including the speed ripple effect," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 34, no. 1, pp. 98–108, 1998.

38. A. Bellini, F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, and G. Kliman, "Quantitative evaluation of induction motor broken bars by means of electrical signature analysis," in *Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy (Cat. No.00CH37129)*. IEEE.
39. Y. Wei, B. Shi, G. Cui, and J. Yin, "Broken rotor bar detection in induction motors via wavelet ridge," in *2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*. IEEE, 2009.
40. R. Schoen and T. Habetler, "Effects of time-varying loads on rotor fault detection in induction machines," in *Conference Record of the 1993 IEEE Industry Applications Conference Twenty-Eighth IAS Annual Meeting*. IEEE.
41. M. Bradford, "Unbalanced magnetic pull in a 6-pole induction motor," *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 115, no. 11, p. 1619, 1968.
42. D. Dorrell, W. Thomson, and S. Roach, "Analysis of airgap flux, current, and vibration signals as a function of the combination of static and dynamic airgap eccentricity in 3-phase induction motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 33, no. 1, pp. 24–34, 1997.
43. E. Cabal-Yepez, R. Romero-Troncoso, A. Garcia-Perez, and R. Osornio-Rios, "Single-parameter fault identification through information entropy analysis at the startup-transient current in induction motors," *Electric Power Systems Research*, vol. 89, pp. 64–69, aug 2012.
44. A. H. li and S. Li-ping, "Fault diagnosis of induction motor based on information entropy fusion," in *2010 2nd International Conference on Advanced Computer Control*. IEEE, 2010.
45. J. Sobra, T. Vaimann, and A. Belahcen, "Mechanical vibration analysis of induction machine under dynamic rotor eccentricity," in *2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. IEEE, may 2016.
46. Y. Park, D. Fernandez, S. B. Lee, D. Hyun, M. Jeong, S. K. Kommuri, C. Cho, D. Reigosa, and F. Briz, "On-line detection of rotor eccentricity for PMSMs based on hall-effect field sensor measurements," in *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. IEEE, oct 2017.
47. J. Cameron, W. Thomson, and A. Dow, "Vibration and current monitoring for detecting airgap eccentricity in large induction motors," *IEE Proceedings B Electric Power Applications*, vol. 133, no. 3, p. 155, 1986.
48. S. Nandi and H. Toliyat, "Detection of rotor slot and other eccentricity related harmonics in a three phase induction motor with different rotor cages," in *1998 International Conference on Power Electronic Drives and Energy Systems for Industrial Growth, 1998. Proceedings*. IEEE.
49. A. Cardoso and E. Saraiva, "Computer aided detection of airgap eccentricity in operating three-phase induction motors, by park's vector approach," in *Conference Record of the 1991 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. IEEE.

50. Z. Liu, X. Yin, Z. Zhang, D. Chen, and W. Chen, "Online rotor mixed fault diagnosis way based on spectrum analysis of instantaneous power in squirrel cage induction motors," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 19, no. 3, pp. 485–490, sep 2004.
51. M. Drif and A. Cardoso, "Airgap-eccentricity fault diagnosis, in three-phase induction motors, by the complex apparent power signature analysis," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 3, pp. 1404–1410, mar 2008.
52. R. Schoen and T. Habetler, "Evaluation and implementation of a system to eliminate arbitrary load effects in current-based monitoring of induction machines," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 33, no. 6, pp. 1571–1577, 1997.
53. R. Obaid, T. Habetler, and D. Gritter, "A simplified technique for detecting mechanical faults using stator current in small induction motors," in *Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy (Cat. No.00CH37129)*. IEEE.
54. L. Wu, T. Habetler, and R. Harley, "Separating load torque oscillation and rotor fault effects in stator current-based motor condition monitoring," in *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, 2005*. IEEE, 2005.
55. L. Wu, T. G. Habetler, and R. G. Harley, "A review of separating mechanical load effects from rotor faults detection in induction motors," in *2007 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*. IEEE, sep 2007.
56. G. Bossio, C. D. Angelo, J. Solsona, G. Garcia, and M. Valla, "Application of an additional excitation in inverter-fed induction motors for air-gap eccentricity diagnosis," in *2003 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (Cat. No.03TH8692)*. IEEE.
57. X. Huang, T. G. Habetler, and R. G. Harley, "Detection of rotor eccentricity faults in a closed-loop drive-connected induction motor using an artificial neural network," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, no. 4, pp. 1552–1559, jul 2007.
58. A. Siddique, G. Yadava, and B. Singh, "A review of stator fault monitoring techniques of induction motors," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, no. 1, pp. 106–114, mar 2005.
59. J. Aguayo, A. Claudio, L. Vela, S. Lesecq, and A. Barraud, "Stator winding fault detection for an induction motor drive using actuator as sensor principle," in *IEEE 34th Annual Conference on Power Electronics Specialist, 2003*. IEEE, 2003.
60. J. Penman, H. Sedding, B. Lloyd, and W. Fink, "Detection and location of interturn short circuits in the stator windings of operating motors," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 9, no. 4, pp. 652–658, 1994.
61. S. Fruchtenicht, E. Pittius, and H. O. Seinsch, "A diagnostic system for three-phase asynchronous machines," in *1989 Fourth International Conference on Electrical Machines and Drives Conf. Publ. No. ??*, Sep. 1989, pp. 163–171.
62. "Definitions of voltage unbalance," *IEEE Power Engineering Review*, vol. 21, no. 5, pp. 49–51, 2001.

63. R. C. Dugan, M. F. Mcgranaghan, and S. Santoso, *Electrical Power Systems Quality, Third Edition*. MCGRAW HILL BOOK CO, 2012. [Online]. Available: https://www.ebook.de/de/product/16346256/roger_c_dugan_mark_f_mcgranaghan_surya_santoso_electrical_power_systems_quality_third_edition.html
64. A. Jacob, V. Jose, and D. Sebastian, "Stator fault detection in induction motor under unbalanced supply voltage," in *2014 Annual International Conference on Emerging Research Areas: Magnetics, Machines and Drives (AICERA/iCMMMD)*. IEEE, jul 2014.
65. A. Savitzky and M. J. E. Golay, "Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures." *Analytical Chemistry*, vol. 36, no. 8, pp. 1627–1639, jul 1964.
66. S. Cao and R. Rhinehart, "An efficient method for on-line identification of steady state," *Journal of Process Control*, vol. 5, no. 6, pp. 363–374, dec 1995.
67. S. Narasimhan, R. S. H. Mah, A. C. Tamhane, J. W. Woodward, and J. C. Hale, "A composite statistical test for detecting changes of steady states," *AIChE Journal*, vol. 32, no. 9, pp. 1409–1418, sep 1986.
68. Tavner, *Condition Mon of Elect Mach (Electronic and Electrical Engineering Research Studies: Electrical Machines)*. Research Studies Pre, 1987. [Online]. Available: <https://www.amazon.com/Condition-Electronic-Electrical-Engineering-Research/dp/0863800610?SubscriptionId=AKIAIOBINVZYXZQZ2U3A&tag=chimb05-20&linkCode=xm2&camp=2025&creative=165953&creativeASIN=0863800610>
69. P. Vas, *Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines*. OXFORD UNIV PR, 1996. [Online]. Available: https://www.ebook.de/de/product/3604147/peter_vas_parameter_estimation_condition_monitoring_and_diagnosis_of_electrical_machines.html
70. P. Mellor, D. Roberts, and D. Turner, "Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design," *IEE Proceedings B Electric Power Applications*, vol. 138, no. 5, p. 205, 1991.
71. O. Okoro, "Steady and transient states thermal analysis of a 7.5-kW squirrel-cage induction machine at rated-load operation," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, no. 4, pp. 730–736, dec 2005.
72. Z. Gao, T. Habetler, and R. Harley, "An online adaptive stator winding temperature estimator based on a hybrid thermal model for induction machines," in *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, 2005*. IEEE, 2005.
73. J. Moreno, F. Hidalgo, and M. Martinez, "Realisation of tests to determine the parameters of the thermal model of an induction machine," *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, vol. 148, no. 5, p. 393, 2001.
74. S. R. Kapoor, "Commonly occurring faults in three phase induction motors—causes, effects and detection—a review," *J Inf Knowl Res Electr Eng*, vol. 2, no. 2, pp. 178–185, 2013.
75. H. Arabaci and O. Bilgin, "Effects of rotor faults in squirrel-cage induction motors on the torque-speed curve," in *The XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010*. IEEE, sep 2010.

76. M. M. Stopa and B. de Jesus Cardoso Filho, "Load torque signature analysis: An alternative to MCSA to detect faults in motor driven loads," in *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. IEEE, sep 2012.
77. A. M. da Silva, Povinelli, and Demerdash, "Rotor bar fault monitoring method based on analysis of air-gap torques of induction motors," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 9, no. 4, pp. 2274–2283, nov 2013.
78. A. Ellison and S. Yang, "Effects of rotor eccentricity on acoustic noise from induction machines," *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 118, no. 1, p. 174, 1971.
79. D. Dorrell and A. Smith, "Calculation and measurement of unbalanced magnetic pull in cage induction motors with eccentric rotors. part 2: Experimental investigation," *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, vol. 143, no. 3, p. 202, 1996.
80. D. Wang, K.-L. Tsui, and Q. Miao, "Prognostics and health management: A review of vibration based bearing and gear health indicators," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 665–676, 2018.
81. L. Jack and A. Nandi, "Genetic algorithms for feature selection in machine condition monitoring with vibration signals," *IEE Proceedings - Vision, Image, and Signal Processing*, vol. 147, no. 3, p. 205, 2000.
82. J. Watson and N. Paterson, "Improved techniques for rotor fault detection in three-phase induction motors," in *Conference Record of 1998 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Third IAS Annual Meeting (Cat. No.98CH36242)*. IEEE.
83. F. Filippetti, M. Martelli, G. Franceschini, and C. Tassoni, "Development of expert system knowledge base to on-line diagnosis of rotor electrical faults of induction motors," in *Conference Record of the 1992 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. IEEE.
84. M. E. H. Benbouzid, "A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 47, no. 5, pp. 984–993, 2000.
85. J.-H. Jung, J.-J. Lee, and B.-H. Kwon, "Online diagnosis of induction motors using MCSA," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 6, pp. 1842–1852, dec 2006.
86. I. Ahmed, R. Supangat, J. Grieger, N. Ertugrul, and W. L. Soong, "A baseline study for on-line condition monitoring of induction machines," in *Australian universities power engineering conference (AUPEC)*, 01 2004.
87. W. Thomson, D. Rankin, and D. Dorrell, "On-line current monitoring to diagnose airgap eccentricity in large three-phase induction motors-industrial case histories verify the predictions," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 14, no. 4, pp. 1372–1378, 1999.
88. W. Thomson and A. Barbour, "On-line current monitoring and application of a finite element method to predict the level of static airgap eccentricity in three-phase induction motors," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 13, no. 4, pp. 347–357, 1998.

89. A. da Silva, R. Povinelli, and N. Demerdash, "Induction machine broken bar and stator short-circuit fault diagnostics based on three-phase stator current envelopes," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 3, pp. 1310–1318, mar 2008.
90. A. Gandhi, T. Corrigan, and L. Parsa, "Recent advances in modeling and online detection of stator interturn faults in electrical motors," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 5, pp. 1564–1575, may 2011.
91. J. C. i Roura and J. L. R. Martnez, "Transient analysis and motor fault detection using the wavelet transform," in *Discrete Wavelet Transforms - Theory and Applications*. InTech, apr 2011.
92. Z. Ye, B. Wu, and A. Sadeghian, "Current signature analysis of induction motor mechanical faults by wavelet packet decomposition," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 50, no. 6, pp. 1217–1228, dec 2003.
93. H. Douglas and P. Pillay, "The impact of wavelet selection on transient motor current signature analysis," in *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, 2005*. IEEE, 2005.
94. J. A. Antonino, M. Riera, J. Roger-Folch, and M. Molina, "Validation of a new method for the diagnosis of rotor bar failures via wavelet transformation in industrial induction machines," in *2005 5th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*. IEEE, sep 2005.
95. J. Antonino-Daviu, M. Riera-Guasp, J. Roger-Folch, F. Martínez-Giménez, and A. Peris, "Application and optimization of the discrete wavelet transform for the detection of broken rotor bars in induction machines," *Applied and Computational Harmonic Analysis*, vol. 21, no. 2, pp. 268–279, sep 2006.
96. P. Welch, "The use of fast fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms," *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, vol. 15, no. 2, pp. 70–73, jun 1967.
97. P. Stoica, *Spectral Analysis of Signals*. Prentice Hall, 2005. [Online]. Available: <https://www.amazon.com/Spectral-Analysis-Signals-Petre-Stoica/dp/0131139568?SubscriptionId=AKIAIOBINVZYXZQZ2U3A&tag=chimbori05-20&linkCode=xm2&camp=2025&creative=165953&creativeASIN=0131139568>
98. C. E. Shannon, "A mathematical theory of communication," *Bell System Technical Journal*, vol. 27, no. 4, pp. 623–656, oct 1948.
99. R. R. Coifman, Y. Meyer, and V. Wickerhauser, "Wavelet analysis and signal processing," in *In Wavelets and their Applications*, 1992, pp. 153–178.
100. A. Megahed, A. M. Moussa, H. B. Elrefaie, and Y. Marghany, "Selection of a suitable mother wavelet for analyzing power system fault transients," in *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*. IEEE, jul 2008.
101. P. Tavner, B. Gaydon, and D. Ward, "Monitoring generators and large motors," *IEE Proceedings B Electric Power Applications*, vol. 133, no. 3, p. 169, 1986.
102. D. Edwards, "Planned maintenance of high voltage rotating machine insulation based upon information derived from on-line discharge measurements," in *International Conference on Life Management of Power Plants*. IEE, 1994.

103. G. Stone, B. Lloyd, S. Campbell, and H. Sedding, "Development of automatic, continuous partial discharge monitoring systems to detect motor and generator partial discharges," in *1997 IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record*. IEEE.
104. G. Stone, H. Sedding, and M. Costello, "Application of partial discharge testing to motor and generator stator winding maintenance," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, no. 2, pp. 459–464, 1996.
105. S. Tetrault, G. Stone, and H. Sedding, "Monitoring partial discharges on 4 kV motor windings," in *Record of Conference Papers. IEEE Industry Applications Society 44th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference*. IEEE.
106. *Mechanical vibration – Rotor balancing*. International Organization for Standardization, 2017.
107. J. Stack, T. Habetler, and R. Harley, "Bearing fault detection via autoregressive stator current modeling," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 40, no. 3, pp. 740–747, may 2004.
108. M. T and R. Ramesh, "Pv powered direct torque controlled induction motor without ac phase current sensors," *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 3297, pp. 2320–3765, 04 2014.
109. T. F. Chan and K. Shi, *Applied Intelligent Control of Induction Motor Drives*. Wiley-IEEE Press, 2011. [Online]. Available: <https://www.amazon.com/Applied-Intelligent-Control-Induction-Drives/dp/0470825561?SubscriptionId=AKIAIOBINVZYXZQZ2U3A&tag=chimbori05-20&linkCode=xm2&camp=2025&creative=165953&creativeASIN=0470825561>
110. W. Thomson, "On-line MCSA to diagnose shorted turns in low voltage stator windings of 3-phase induction motors prior to failure," in *IEMDC 2001. IEEE International Electric Machines and Drives Conference (Cat. No.01EX485)*. IEEE.
111. A. Bellini, C. Concari, G. Franceschini, E. Lorenzani, C. Tassoni, and A. Toscani, "Thorough understanding and experimental validation of current sideband components in induction machines rotor monitoring," in *IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*. IEEE, nov 2006.
112. S. Chen and R. Zivanovic, "Modelling and simulation of stator and rotor fault conditions in induction machines for testing fault diagnostic techniques," *European Transactions on Electrical Power*, pp. n/a–n/a, 2009.
113. J. Stack, T. Habetler, and R. Harley, "Experimentally generating faults in rolling element bearings via shaft current," in *4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, 2003. SDEMPED 2003*. IEEE.
114. D.-H. Hwang, K.-C. Lee, J.-H. Lee, D.-S. Kang, J.-H. Lee, and K.-H. Choi, "Analysis of a three phase induction motor under eccentricity condition," in *31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005*. IEEE, 2005.
115. [Online]. Available: <http://download.ni.com/evaluation/pxi/Understanding%20FFTs%20and%20Windowing.pdf>

116. A. Ferrah, K. Bradley, and G. Asher, "Sensorless speed detection of inverter fed induction motors using rotor slot harmonics and fast fourier transform," in *PESC '92 Record. 23rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*. IEEE.
117. L. A. Roque, J. G. B. da Silva, and L. E. B. da Silva, "Sensorless speed estimation for inductions motors using slot harmonics and time-based frequency estimation," in *IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE, oct 2014.
118. Z. Yu, D. Chen, and R. Geiger, "A computationally efficient method for accurate spectral testing without requiring coherent sampling," in *2004 International Conferce on Test*. IEEE.
119. C. Cortes and V. Vapnik, "Support-vector networks," *Machine Learning*, vol. 20, no. 3, pp. 273–297, sep 1995.
120. W. Yang, K. Wang, and W. Zuo, "Neighborhood component feature selection for high-dimensional data," *Journal of Computers*, vol. 7, no. 1, jan 2012.
121. [Online]. Available: <https://uk.mathworks.com/help/signal/ug/prominence.html>
122. B. Matthews, "Comparison of the predicted and observed secondary structure of t4 phage lysozyme," *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Protein Structure*, vol. 405, no. 2, pp. 442–451, oct 1975.
123. D. Chicco, "Ten quick tips for machine learning in computational biology," *BioData Mining*, vol. 10, no. 1, dec 2017.
124. I. Andrijauskas and R. Adaskevicius, "SVM based bearing fault diagnosis in induction motors using frequency spectrum features of stator current," in *2018 23rd International Conference on Methods & Models in Automation & Robotics (MMAR)*. IEEE, aug 2018.

MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS

Straipsniai

„Clarivate Analytics Web of Science“ pagrindinio sąrašo leidiniuose:

1. Andrijauskas, Ignas; Adaskevicius, Rimas. Analysis of progressively unbalanced induction motor current signals based on information entropy // *Elektronika ir elektrotechnika*. Kaunas : KTU. ISSN 1392-1215. eISSN 2029-5731. 2018, vol. 24, iss. 4, p. 15-19. DOI: 10.5755/j01.eie.24.4.21472.
2. Andrijauskas, Ignas; Vaitkunas, Mindaugas; Adaskevicius, Rimas. Generalized roughness bearing faults diagnosis based on induction motor stator current // *Radioengineering*. Brno : Brno University of Technology. ISSN 1210-2512. eISSN 1805-9600. 2018, vol. 27, iss. 4, p. 1166-1173. DOI: 10.13164/re.2018.1166.

Kituose recenzuojamuose mokslo leidiniuose.
Konferencijų pranešimų medžiagoje:

1. Andrijauskas, Ignas; Adaskevicius, Rimas. SVM based bearing fault diagnosis in induction motors using frequency spectrum features of stator current // *MMAR 2018: 23rd international conference on methods and models in automation and robotics*, August 27-30, 2018, Międzyzdroje, Poland / organized by Faculty of Electrical Engineering West Pomeranian University of Technology. Piscataway, NJ : IEEE, 2018. ISBN 9781538643242. eISBN 9781538643259. p. 826-831. DOI: 10.1109/MMAR.2018.8485986.

Pranešimai konferencijose

1. 2018 23rd International Conference on Methods & Models in Automation & Robotics (MMAR) Poland, SVM Based Bearing Fault Diagnosis in Induction Motors Using Frequency Spectrum Features of Stator Current.
2. 22nd International Conference ELECTRONICS 2018, Analysis of progressively unbalanced induction motor current signals based on information entropy.

Priedai

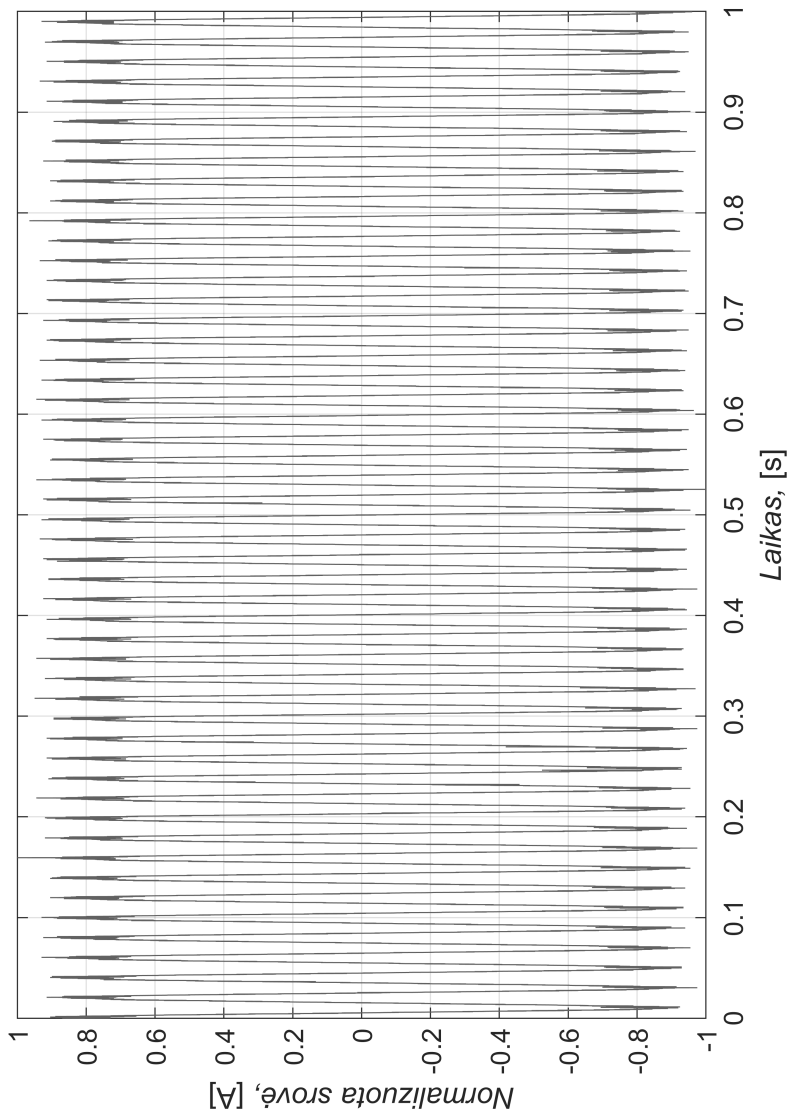
A. PRIEDAS

ISO 21940-11:2017 Pastoviu greičiu besisukančių rotorių balansavimo kokybės (klasės) rekomendacijos

Machinery types: General examples	Balance quality grade G	Magnitude $e_{\text{per}} \cdot \Omega$ mm/s
Crankshaft drives for large slow marine diesel engines (piston speed below 9 m/s), inherently unbalanced	G 4000	4 000
Crankshaft drives for large slow marine diesel engines (piston speed below 9 m/s), inherently balanced	G 1600	1 600
Crankshaft drives, inherently unbalanced, elastically mounted	G 630	630
Crankshaft drives, inherently unbalanced, rigidly mounted	G 250	250
Complete reciprocating engines for cars, trucks and locomotives	G 100	100
Cars: wheels, wheel rims, wheel sets, drive shafts Crankshaft drives, inherently balanced, elastically mounted	G 40	40
Agricultural machinery Crankshaft drives, inherently balanced, rigidly mounted Crushing machines Drive shafts (cardan shafts, propeller shafts)	G 16	16
Aircraft gas turbines Centrifuges (separators, decanters) Electric motors and generators (of at least 80 mm shaft height), of maximum rated speeds up to 950 r/min Electric motors of shaft heights smaller than 80 mm Fans Gears Machinery, general Machine-tools Paper machines Process plant machines Pumps Turbo-chargers Water turbines	G 6,3	6,3
Compressors Computer drives Electric motors and generators (of at least 80 mm shaft height), of maximum rated speeds above 950 r/min Gas turbines and steam turbines Machine-tool drives Textile machines	G 2,5	2,5
Audio and video drives Grinding machine drives	G 1	1
Gyroscopes Spindles and drives of high-precision systems	G 0,4	0,4

P.1 pav. Pastoviu greičiu besisukančių rotorių balansavimo kokybės (klasės) rekomendacijos

B. PRIEDAS



P.1 pav. Statoriaus srovės signalo pavyzdys

C. PRIEDAS

C.1 lentelė. Eksperimentuose naudoto asinchroninio variklio „6205“ parametrai

<i>Guolio tipas</i>	6205
<i>Veleno skersmuo, mm</i>	25
<i>Išorinis skersmuo, mm</i>	52
<i>Plotis, mm</i>	15
<i>Briaunų apvalinimo spindulys, mm</i>	1
<i>Dinaminė apkrova, kN</i>	14,8
<i>Statinė apkrova, kN</i>	7,8
<i>Šratų skaičius, vnt</i>	9
<i>Šrato skersmuo, mm</i>	7,938
<i>Didžiausias leistinas sukimosi greitis, min⁻¹</i>	18000
<i>Guolio svoris, kg</i>	0,13

C.2 lentelė. Srovės transformatoriaus parametrai

<i>Nominali didžiausia matavimo srovė (efektinė vertė), A</i>	100
<i>Didžiausia leistina matavimo srovė, A</i>	120
<i>Nominali srovė išėjimo kanale, mA</i>	50
<i>Transformatoriaus apvijų santykis</i>	1:2000
<i>Paklaida, %</i>	±1
<i>Tiesiškumas, %</i>	≤0,2
<i>Svoris, g</i>	50

C.3 lentelė. Eksperimentuose naudoto asinchroninio variklio „TM 90 L - 6“ parametrai

<i>Vardinė galia, kW</i>	1,1
<i>Vardinis greitis, min⁻¹</i>	910
<i>Vardinė srovė (esant 400V), A</i>	3,1
<i>Galios koeficientas, $\cos(\phi)$</i>	0,71
<i>Efektyvumas</i>	0,73
<i>Vardinis sukimo momentas, Nm</i>	11,5
<i>Pradinio ir vardinio sukimo momento santykis M_a/M_n</i>	2,1
<i>Pradinės ir vardinės srovės santykis I_a/I_n</i>	4,2
<i>Didžiausio ir vardinio sukimo momento santykis M_x/M_n</i>	2,2
<i>Inercijos momentas, kg m²</i>	0,005
<i>Svoris, kg</i>	15,5
<i>Rotoriaus svoris, kg</i>	6,114

D. PRIEDAS

D.1 lentelė. Asinchroninio variklio taškinio guolių gedimo simuliacijos rezultatų suvestinė, būdingųjų statoriaus srovės spektro taškų amplitudinės vertės

$F_{rotoriaus}$	Nėra gedimo			Gedimas CF		
	$V1$	$V2$	$V3$	$V1$	$V2$	$V3$
60 % f_n	0,0336	0,0323	0,0433	0,0442	0,0379	0,0639
70 % f_n	0,0239	0,0240	0,0291	0,0395	0,0367	0,0481
80 % f_n	0,0282	0,0262	0,0254	0,0368	0,0365	0,0385
90 % f_n	0,0273	0,0196	0,0240	0,0375	0,0312	0,0235
100 % f_n	0,0234	0,0200	0,0155	0,0336	0,0257	0,0267
	Nėra gedimo			Gedimas ORF		
60 % f_n	1,0093	0,9857	1,0047	1,1305	1,2353	1,0114
70 % f_n	1,0022	1,0146	0,9790	1,1363	1,1769	0,9963
80 % f_n	0,9967	0,9676	1,0513	1,1349	1,2414	1,1617
90 % f_n	0,9608	1,0180	1,0418	1,2191	1,2574	1,0202
100 % f_n	1,0816	0,9872	1,0137	1,1923	1,1272	1,1919
	Nėra gedimo			Gedimas IRF		
60 % f_n	1,0376	0,9857	1,1268	1,1543	1,1244	1,0461
70 % f_n	1,0555	1,0218	1,0133	1,0951	1,2620	1,0749
80 % f_n	0,9694	1,4157	0,8639	1,0660	1,4934	1,0618
90 % f_n	1,0450	1,1519	0,9302	1,6194	0,9803	1,2019
100 % f_n	0,9679	0,9011	1,0155	1,1759	1,0249	1,1654
	Nėra gedimo			Gedimas BF		
60 % f_n	0,9967	0,9952	0,9987	1,0171	1,0873	1,0346
70 % f_n	0,9981	0,9981	0,9998	1,0847	1,2553	1,2890
80 % f_n	1,0093	0,9956	1,0089	1,2680	1,0129	1,0306
90 % f_n	0,9967	0,9958	1,0025	1,0140	1,0366	1,0739
100 % f_n	1,0048	0,9840	1,0085	1,0169	1,0629	1,1721

E. PRIEDAS

E.1 lentelė. Asinchroninio variklio dinaminio rotoriaus disbalanso gedimo modeliavimo rezultatai. Variklis V1

Greitis, Hz	(2,0)	(2,0)	(2,1)	(2,1)	(2,2)	(2,2)	(2,3)	(2,3)
	Gedimo nėra	Gedimas yra	Gedimo nėra	Gedimas yra	Gedimo nėra	Gedimas yra	Gedimo nėra	Gedimas yra
$0,95 f_n$	1,650	1,680	1,493	1,400	1,358	1,392	1,362	1,406
$0,952 f_n$	1,620	1,665	1,434	1,455	1,311	1,412	1,371	1,324
$0,954 f_n$	1,644	1,666	1,484	1,462	1,348	1,371	1,256	1,342
$0,956 f_n$	1,650	1,679	1,458	1,431	1,427	1,390	1,390	1,421
$0,958 f_n$	1,643	1,666	1,472	1,482	1,351	1,473	1,343	1,345
$0,96 f_n$	1,644	1,648	1,478	1,435	1,369	1,397	1,322	1,354
$0,962 f_n$	1,686	1,645	1,519	1,462	1,404	1,395	1,360	1,427
$0,964 f_n$	1,642	1,654	1,491	1,471	1,377	1,391	1,375	1,394
$0,966 f_n$	1,643	1,659	1,463	1,491	1,384	1,360	1,372	1,364
$0,968 f_n$	1,674	1,699	1,474	1,531	1,466	1,416	1,363	1,404
$0,97 f_n$	1,647	1,659	1,478	1,446	1,343	1,397	1,362	1,389
$0,972 f_n$	1,621	1,651	1,430	1,441	1,278	1,469	1,361	1,367
$0,974 f_n$	1,647	1,616	1,427	1,424	1,452	1,402	1,410	1,350
$0,976 f_n$	1,643	1,669	1,492	1,477	1,293	1,354	1,377	1,415
$0,978 f_n$	1,652	1,660	1,496	1,460	1,443	1,316	1,303	1,381
$0,98 f_n$	1,635	1,662	1,502	1,479	1,415	1,444	1,350	1,318
$0,982 f_n$	1,685	1,656	1,490	1,442	1,437	1,386	1,372	1,388
$0,984 f_n$	1,637	1,658	1,479	1,424	1,345	1,324	1,315	1,422
$0,986 f_n$	1,642	1,677	1,455	1,432	1,351	1,421	1,294	1,391
$0,988 f_n$	1,644	1,668	1,489	1,444	1,388	1,376	1,421	1,419
$0,99 f_n$	1,646	1,683	1,474	1,490	1,413	1,425	1,341	1,420
$0,992 f_n$	1,615	1,669	1,500	1,488	1,398	1,308	1,338	1,394
$0,994 f_n$	1,647	1,650	1,434	1,489	1,371	1,427	1,325	1,293
$0,996 f_n$	1,642	1,655	1,436	1,454	1,416	1,413	1,325	1,372
$0,998 f_n$	1,652	1,645	1,477	1,444	1,398	1,390	1,395	1,324
$1 f_n$	1,637	1,641	1,476	1,448	1,414	1,411	1,365	1,340

E.2 lentelė. Asinchroninio variklio dinaminio rotoriaus disbalanso gedimo modeliavimo rezultatai. Variklis V2

Greitis, Hz	(2,0)	(2,0)	(2,1)	(2,1)	(2,2)	(2,2)	(2,3)	(2,3)
	Gedimo nėra	Gedimas yra	Gedimo nėra	Gedimas yra	Gedimo nėra	Gedimas yra	Gedimo nėra	Gedimas yra
0,95 f_n	1,642	1,647	1,546	1,494	1,342	1,400	1,345	1,315
0,952 f_n	1,639	1,653	1,544	1,476	1,421	1,396	1,294	1,394
0,954 f_n	1,639	1,696	1,517	1,512	1,381	1,485	1,358	1,392
0,956 f_n	1,654	1,677	1,543	1,521	1,350	1,373	1,350	1,363
0,958 f_n	1,649	1,681	1,546	1,519	1,391	1,402	1,321	1,400
0,96 f_n	1,621	1,640	1,502	1,436	1,383	1,390	1,330	1,378
0,962 f_n	1,642	1,680	1,542	1,540	1,347	1,391	1,363	1,364
0,964 f_n	1,646	1,641	1,543	1,508	1,346	1,403	1,383	1,384
0,966 f_n	1,640	1,728	1,535	1,523	1,362	1,477	1,285	1,449
0,968 f_n	1,677	1,672	1,579	1,499	1,343	1,434	1,329	1,413
0,97 f_n	1,648	1,675	1,519	1,547	1,405	1,428	1,321	1,389
0,972 f_n	1,645	1,662	1,550	1,486	1,417	1,386	1,364	1,312
0,974 f_n	1,656	1,709	1,504	1,556	1,401	1,487	1,415	1,458
0,976 f_n	1,613	1,680	1,513	1,542	1,412	1,398	1,355	1,394
0,978 f_n	1,641	1,692	1,554	1,553	1,349	1,355	1,340	1,371
0,98 f_n	1,638	1,683	1,537	1,521	1,402	1,467	1,357	1,384
0,982 f_n	1,656	1,659	1,535	1,506	1,312	1,471	1,294	1,386
0,984 f_n	1,686	1,720	1,580	1,545	1,432	1,407	1,331	1,466
0,986 f_n	1,631	1,648	1,535	1,505	1,386	1,449	1,338	1,346
0,988 f_n	1,654	1,724	1,562	1,540	1,408	1,372	1,272	1,367
0,99 f_n	1,652	1,739	1,544	1,553	1,313	1,464	1,347	1,450
0,992 f_n	1,614	1,644	1,516	1,498	1,405	1,395	1,332	1,366
0,994 f_n	1,641	1,641	1,542	1,508	1,345	1,423	1,373	1,335
0,996 f_n	1,646	1,665	1,533	1,532	1,355	1,370	1,342	1,406
0,998 f_n	1,641	1,630	1,549	1,480	1,395	1,310	1,401	1,357
1 f_n	1,669	1,678	1,572	1,531	1,468	1,433	1,267	1,428

E.3 lentelė. Asinchroninio variklio dinaminio rotoriaus disbalanso gedimo modeliavimo rezultatai. Variklis V3

Greitis, Hz	(2,0)	(2,0)	(2,1)	(2,1)	(2,2)	(2,2)	(2,3)	(2,3)
	Gedimo nėra	Gedimas yra	Gedimo nėra	Gedimas yra	Gedimo nėra	Gedimas yra	Gedimo nėra	Gedimas yra
$0,95 f_n$	1,680	1,675	1,584	1,478	1,352	1,482	1,416	1,425
$0,952 f_n$	1,639	1,676	1,530	1,521	1,323	1,420	1,385	1,363
$0,954 f_n$	1,644	1,723	1,558	1,529	1,384	1,451	1,393	1,350
$0,956 f_n$	1,656	1,715	1,565	1,511	1,344	1,500	1,361	1,452
$0,958 f_n$	1,620	1,669	1,525	1,496	1,348	1,464	1,379	1,420
$0,96 f_n$	1,633	1,670	1,533	1,515	1,378	1,420	1,335	1,381
$0,962 f_n$	1,635	1,639	1,554	1,526	1,419	1,441	1,372	1,319
$0,964 f_n$	1,644	1,637	1,551	1,484	1,415	1,420	1,359	1,382
$0,966 f_n$	1,642	1,669	1,564	1,507	1,371	1,317	1,374	1,388
$0,968 f_n$	1,649	1,651	1,544	1,500	1,388	1,430	1,343	1,347
$0,97 f_n$	1,635	1,615	1,544	1,435	1,396	1,347	1,386	1,370
$0,972 f_n$	1,656	1,654	1,572	1,514	1,432	1,356	1,372	1,379
$0,974 f_n$	1,643	1,699	1,544	1,538	1,396	1,437	1,361	1,409
$0,976 f_n$	1,633	1,636	1,543	1,454	1,377	1,402	1,341	1,385
$0,978 f_n$	1,643	1,692	1,566	1,529	1,433	1,448	1,299	1,415
$0,98 f_n$	1,651	1,668	1,545	1,490	1,389	1,398	1,362	1,318
$0,982 f_n$	1,654	1,655	1,570	1,511	1,453	1,487	1,359	1,332
$0,984 f_n$	1,672	1,666	1,579	1,520	1,377	1,435	1,391	1,411
$0,986 f_n$	1,635	1,660	1,560	1,542	1,440	1,476	1,315	1,481
$0,988 f_n$	1,653	1,745	1,546	1,598	1,427	1,483	1,348	1,512
$0,99 f_n$	1,660	1,633	1,572	1,485	1,411	1,332	1,329	1,447
$0,992 f_n$	1,615	1,688	1,534	1,560	1,383	1,381	1,348	1,335
$0,994 f_n$	1,647	1,654	1,558	1,507	1,429	1,374	1,290	1,406
$0,996 f_n$	1,643	1,659	1,554	1,539	1,397	1,461	1,427	1,395
$0,998 f_n$	1,647	1,705	1,546	1,526	1,413	1,545	1,355	1,438
$1 f_n$	1,689	1,675	1,612	1,553	1,462	1,371	1,440	1,440

F. PRIEDAS

F.1 lentelė. Stjudento kriterijus priklausomoms imtis, rotoriaus disbalanso laboratorinis eksperimentas

L. int.	Maz.	Bandymas										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
I	(2, 0)	0,00	- 0,11	0,02	- 0,15	- 1,06	2,37	1,50	0,82	1,70	0,87	0,92
I	(2, 1)	0,00	- 0,41	0,77	- 0,55	- 1,74	- 0,44	2,21	0,75	0,50	1,83	1,71
I	(2, 2)	0,00	2,92	2,65	3,04	2,52	2,87	4,89	5,25	4,04	3,18	5,15
I	(2, 3)	0,00	1,09	1,85	1,40	0,97	3,17	3,32	4,89	2,27	3,50	3,03
II	(2, 0)	0,00	1,16	1,25	1,50	0,23	2,89	3,76	1,21	1,56	2,18	1,76
II	(2, 1)	0,00	1,37	0,20	2,12	2,14	3,13	3,89	2,99	1,76	2,65	3,01
II	(2, 2)	0,00	3,25	3,28	4,20	2,74	3,66	6,50	4,41	5,76	6,28	6,08
II	(2, 3)	0,00	5,52	4,05	4,48	2,43	5,84	9,02	5,59	6,08	4,87	7,46
III	(2, 0)	0,00	4,16	7,54	3,99	4,60	6,79	6,03	7,83	4,26	7,93	6,94
III	(2, 1)	0,00	3,09	4,65	4,29	4,65	6,30	6,47	6,76	4,45	5,89	4,39
III	(2, 2)	0,00	2,69	1,79	3,24	3,13	5,93	5,34	3,95	3,99	3,63	3,52
III	(2, 3)	0,00	5,40	5,11	4,84	3,94	4,77	7,43	5,55	7,03	5,95	5,96
IV	(2, 0)	0,00	7,86	4,72	4,26	3,87	6,56	8,26	7,89	9,14	5,85	6,25
IV	(2, 1)	0,00	3,32	4,26	4,52	3,57	5,00	5,41	6,89	3,82	7,39	5,89
IV	(2, 2)	0,00	4,90	4,55	6,98	4,96	6,32	7,71	5,44	5,19	5,47	5,18
IV	(2, 3)	0,00	1,30	0,74	0,80	1,61	1,80	1,92	2,18	2,51	1,79	2,22
V	(2, 0)	0,00	3,70	3,20	2,72	2,73	3,77	4,60	3,42	4,29	6,09	5,98
V	(2, 1)	0,00	4,66	3,25	3,89	3,22	4,71	6,78	4,63	4,48	3,27	4,29
V	(2, 2)	0,00	3,71	3,23	2,07	2,85	4,98	5,41	4,62	3,55	4,17	4,46
V	(2, 3)	0,00	3,66	3,13	4,02	3,64	6,20	4,56	3,53	3,24	4,65	4,55

F.2 lentelė. Vidutinės informacijos entropijos santykio reikšmės, 1–5 bandymas (pasiklivimo intervalo reikšmingumo lygis 0,95). Rotoriaus disbalanso laboratorinis eksperimentas

L, int,	Maz,	Bandymas				
		1	2	3	4	5
I	(2, 0)	1±0,003	0,999±0,003	1±0,003	0,999±0,003	0,993±0,003
I	(2, 1)	1,001±0,003	0,998±0,003	1,005±0,003	0,998±0,003	0,989±0,003
I	(2, 2)	0,984±0,003	1,001±0,003	1,001±0,003	0,997±0,003	0,997±0,003
I	(2, 3)	0,989±0,003	0,995±0,003	1±0,003	0,998±0,003	0,994±0,003
II	(2, 0)	0,991±0,003	0,998±0,003	0,999±0,003	0,999±0,003	0,993±0,003
II	(2, 1)	1,838±0,007	1,857±0,007	1,841±0,007	1,865±0,007	1,865±0,007
II	(2, 2)	1,784±0,007	1,826±0,007	1,829±0,007	1,84±0,007	1,817±0,007
II	(2, 3)	1,775±0,007	1,836±0,007	1,835±0,007	1,823±0,007	1,81±0,007
III	(2, 0)	1,765±0,007	1,821±0,007	1,839±0,007	1,818±0,007	1,819±0,007
III	(2, 1)	1,776±0,007	1,816±0,007	1,843±0,007	1,831±0,007	1,823±0,007
III	(2, 2)	1,769±0,007	1,803±0,007	1,795±0,007	1,814±0,007	1,803±0,007
III	(2, 3)	1,733±0,007	1,793±0,007	1,793±0,007	1,791±0,007	1,782±0,007
IV	(2, 0)	1,732±0,008	1,798±0,008	1,802±0,008	1,784±0,008	1,78±0,008
IV	(2, 1)	1,746±0,006	1,787±0,006	1,797±0,006	1,797±0,006	1,782±0,006
IV	(2, 2)	1,732±0,007	1,802±0,007	1,781±0,007	1,804±0,007	1,799±0,007
IV	(2, 3)	1,783±0,008	1,805±0,008	1,797±0,008	1,795±0,008	1,804±0,008
V	(2, 0)	1,738±0,008	1,788±0,008	1,784±0,008	1,778±0,008	1,772±0,008
V	(2, 1)	1,74±0,007	1,794±0,007	1,799±0,007	1,788±0,007	1,778±0,007
V	(2, 2)	1,741±0,006	1,791±0,006	1,786±0,006	1,773±0,006	1,783±0,006
V	(2, 3)	1,74±0,007	1,783±0,007	1,777±0,007	1,79±0,007	1,798±0,007

F.3 lentelė. Vidutinės informacijos entropijos santykio reikšmės, 6–11 bandymas (pasikliovimo intervalo reikšmingumo lygis 0,95). Rotoriaus disbalanso laboratorinis eksperimentas

L, int,	Maz,	Bandymas					
		6	7	8	9	10	11
I	(2, 0)	1,017±0,003	1,011±0,003	1,006±0,003	1,012±0,003	1,005±0,003	1,007±0,003
I	(2, 1)	0,998±0,003	1,013±0,003	1,006±0,003	1,003±0,003	1,01±0,003	1,009±0,003
I	(2, 2)	1,003±0,003	1,009±0,003	1,01±0,003	1,006±0,003	0,999±0,003	1,012±0,003
I	(2, 3)	1,004±0,003	1,01±0,003	1,014±0,003	1,003±0,003	1,008±0,003	1,005±0,003
II	(2, 0)	1,008±0,003	1,013±0,003	0,999±0,003	1,001±0,003	1,004±0,003	1,004±0,003
II	(2, 1)	1,889±0,007	1,893±0,007	1,883±0,007	1,869±0,007	1,875±0,007	1,882±0,007
II	(2, 2)	1,837±0,007	1,874±0,007	1,844±0,007	1,832±0,007	1,862±0,007	1,844±0,007
II	(2, 3)	1,852±0,007	1,877±0,007	1,85±0,007	1,847±0,007	1,844±0,007	1,849±0,007
III	(2, 0)	1,826±0,007	1,863±0,007	1,846±0,007	1,825±0,007	1,854±0,007	1,84±0,007
III	(2, 1)	1,842±0,007	1,861±0,007	1,854±0,007	1,826±0,007	1,857±0,007	1,846±0,007
III	(2, 2)	1,836±0,007	1,838±0,007	1,821±0,007	1,819±0,007	1,818±0,007	1,809±0,007
III	(2, 3)	1,797±0,007	1,821±0,007	1,81±0,007	1,804±0,007	1,814±0,007	1,798±0,007
IV	(2, 0)	1,816±0,008	1,837±0,008	1,825±0,008	1,817±0,008	1,8±0,008	1,811±0,008
IV	(2, 1)	1,793±0,006	1,81±0,006	1,817±0,006	1,793±0,006	1,819±0,006	1,805±0,006
IV	(2, 2)	1,805±0,007	1,828±0,007	1,802±0,007	1,804±0,007	1,817±0,007	1,799±0,007
IV	(2, 3)	1,813±0,008	1,817±0,008	1,821±0,008	1,821±0,008	1,814±0,008	1,818±0,008
V	(2, 0)	1,796±0,008	1,815±0,008	1,797±0,008	1,792±0,008	1,834±0,008	1,815±0,008
V	(2, 1)	1,806±0,007	1,825±0,007	1,802±0,007	1,798±0,007	1,785±0,007	1,799±0,007
V	(2, 2)	1,797±0,006	1,813±0,006	1,802±0,006	1,781±0,006	1,794±0,006	1,797±0,006
V	(2, 3)	1,81±0,007	1,809±0,007	1,784±0,007	1,783±0,007	1,812±0,007	1,793±0,007

F.4 lentelė. Informacijos entropijos santykio standartinis nuokrypis. Rotoriaus disbalanso laboratorinis eksperimentas

L, int,	Maz,	Bandymas										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
I	(2, 0)	0,018	0,011	0,017	0,019	0,010	0,014	0,014	0,014	0,013	0,007	0,014
I	(2, 1)	0,011	0,015	0,015	0,009	0,018	0,017	0,013	0,020	0,012	0,012	0,011
I	(2, 2)	0,010	0,015	0,017	0,009	0,013	0,017	0,013	0,011	0,013	0,011	0,014
I	(2, 3)	0,012	0,013	0,014	0,015	0,011	0,009	0,016	0,010	0,015	0,012	0,012
II	(2, 0)	0,014	0,012	0,013	0,009	0,011	0,012	0,012	0,014	0,012	0,011	0,017
II	(2, 1)	0,029	0,035	0,039	0,029	0,028	0,043	0,035	0,038	0,049	0,033	0,036
II	(2, 2)	0,025	0,033	0,037	0,035	0,029	0,039	0,036	0,036	0,011	0,031	0,020
II	(2, 3)	0,025	0,024	0,040	0,023	0,037	0,033	0,025	0,034	0,028	0,037	0,018
III	(2, 0)	0,024	0,035	0,020	0,035	0,029	0,016	0,046	0,023	0,038	0,026	0,025
III	(2, 1)	0,028	0,030	0,036	0,030	0,017	0,019	0,031	0,024	0,023	0,034	0,043
III	(2, 2)	0,021	0,034	0,040	0,038	0,027	0,029	0,035	0,035	0,033	0,036	0,030
III	(2, 3)	0,023	0,027	0,029	0,030	0,032	0,036	0,030	0,037	0,022	0,036	0,026
IV	(2, 0)	0,021	0,016	0,042	0,033	0,034	0,035	0,035	0,031	0,021	0,030	0,034
IV	(2, 1)	0,020	0,034	0,032	0,030	0,026	0,022	0,032	0,026	0,034	0,025	0,025
IV	(2, 2)	0,027	0,036	0,022	0,019	0,034	0,025	0,029	0,031	0,035	0,041	0,031
IV	(2, 3)	0,031	0,043	0,049	0,031	0,026	0,043	0,046	0,044	0,035	0,044	0,038
V	(2, 0)	0,031	0,031	0,035	0,036	0,025	0,039	0,044	0,046	0,026	0,039	0,027
V	(2, 1)	0,028	0,024	0,050	0,027	0,023	0,034	0,028	0,032	0,030	0,033	0,033
V	(2, 2)	0,028	0,032	0,033	0,040	0,037	0,022	0,031	0,031	0,022	0,028	0,028
V	(2, 3)	0,023	0,029	0,030	0,032	0,045	0,027	0,041	0,032	0,035	0,043	0,029

G. PRIEDAS

G.1 lentelė. Simuliuojant pasiskirsčiusį guolių gedimą gautos savybių vertės (nesant gedimo)

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>
1,000	-0,993	-1,000	0,276	-0,259	-0,287	-0,869	-0,891	-0,893	-0,927	-0,965	-0,966
1,000	-0,988	-1,000	0,279	-0,258	-0,284	-0,721	-0,889	-0,892	-0,927	-0,963	-0,964
1,000	-0,988	-1,000	0,277	-0,254	-0,280	-0,711	-0,889	-0,893	-0,928	-0,962	-0,962
1,000	-0,989	-1,000	0,351	-0,326	-0,361	-0,760	-0,890	-0,891	-0,926	-0,965	-0,965
1,000	-0,986	-1,000	0,286	-0,262	-0,289	-0,712	-0,890	-0,891	-0,927	-0,966	-0,968
1,000	-0,983	-1,000	0,283	-0,256	-0,283	-0,699	-0,885	-0,889	-0,925	-0,959	-0,970
1,000	-0,987	-1,000	0,287	-0,264	-0,290	-0,733	-0,890	-0,892	-0,927	-0,965	-0,966
1,000	-0,986	-1,000	0,294	-0,270	-0,301	-0,724	-0,889	-0,891	-0,926	-0,964	-0,965
1,000	-0,985	-1,000	0,279	-0,254	-0,283	-0,709	-0,886	-0,890	-0,925	-0,959	-0,970
1,000	-0,987	-1,000	0,277	-0,254	-0,282	-0,726	-0,891	-0,892	-0,927	-0,964	-0,965
1,000	-0,988	-1,000	0,273	-0,252	-0,270	-0,737	-0,891	-0,891	-0,927	-0,964	-0,968
1,000	-0,986	-1,000	0,276	-0,252	-0,274	-0,717	-0,887	-0,890	-0,925	-0,959	-0,969
1,000	-0,988	-1,000	0,285	-0,262	-0,285	-0,714	-0,892	-0,892	-0,928	-0,965	-0,970
1,000	-0,991	-1,000	0,280	-0,260	-0,287	-0,794	-0,892	-0,892	-0,928	-0,962	-0,970
1,000	-0,989	-1,000	0,272	-0,252	-0,277	-0,770	-0,889	-0,892	-0,927	-0,962	-0,969
1,000	-0,987	-1,000	0,286	-0,263	-0,291	-0,727	-0,891	-0,892	-0,927	-0,962	-0,970
1,000	-0,990	-1,000	0,280	-0,260	-0,286	-0,807	-0,892	-0,893	-0,928	-0,960	-0,972
1,000	-0,991	-1,000	0,271	-0,251	-0,277	-0,780	-0,893	-0,894	-0,930	-0,967	-0,968
1,000	-0,989	-1,000	0,274	-0,253	-0,270	-0,744	-0,892	-0,893	-0,928	-0,962	-0,972
1,000	-0,988	-1,000	0,271	-0,250	-0,269	-0,749	-0,893	-0,896	-0,930	-0,959	-0,976
1,000	-0,987	-1,000	0,271	-0,249	-0,271	-0,722	-0,897	-0,898	-0,933	-0,966	-0,973
1,000	-0,990	-1,000	0,283	-0,262	-0,289	-0,801	-0,891	-0,892	-0,926	-0,958	-0,972
1,000	-0,989	-1,000	0,288	-0,266	-0,296	-0,719	-0,896	-0,900	-0,932	-0,959	-0,981
1,000	-0,986	-1,000	0,273	-0,249	-0,282	-0,691	-0,890	-0,905	-0,936	-0,964	-0,982
1,000	-0,993	-1,000	0,314	-0,293	-0,330	-0,870	-0,892	-0,894	-0,928	-0,958	-0,974
1,000	-0,989	-1,000	0,283	-0,260	-0,289	-0,710	-0,897	-0,903	-0,934	-0,956	-0,977
1,000	-0,987	-1,000	0,273	-0,250	-0,277	-0,683	-0,904	-0,912	-0,940	-0,960	-0,977
<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>	<i>16</i>	<i>17</i>	<i>18</i>	<i>19</i>	<i>20</i>	<i>21</i>	<i>22</i>	<i>23</i>	<i>24</i>
0,223	0,064	0,134	0,126	0,011	0,018	0,160	-0,155	-0,156	0,347	0,032	0,037
0,353	0,067	0,136	0,129	0,006	0,014	0,174	-0,168	-0,179	0,383	0,028	0,049
0,356	0,065	0,132	0,128	0,015	0,007	0,172	-0,107	-0,165	0,365	0,048	0,006
0,326	0,067	0,137	0,128	0,010	0,013	0,171	-0,165	-0,178	0,382	0,025	0,037
0,345	0,068	0,140	0,129	0,014	0,013	0,172	-0,151	-0,189	0,400	0,037	0,013
0,349	0,067	0,136	0,128	0,016	0,012	0,171	-0,144	-0,185	0,393	0,041	0,014
0,332	0,068	0,139	0,129	0,006	0,014	0,172	-0,149	-0,189	0,387	0,033	0,012
0,356	0,069	0,138	0,128	0,016	0,015	0,164	-0,152	-0,162	0,382	0,058	0,029
0,376	0,067	0,134	0,128	0,016	0,013	0,161	-0,151	-0,152	0,378	0,041	0,038
0,344	0,069	0,140	0,128	0,015	0,006	0,164	-0,151	-0,159	0,377	0,045	0,027
0,343	0,069	0,139	0,128	0,014	0,013	0,171	-0,146	-0,208	0,425	0,110	0,016
0,362	0,066	0,133	0,128	0,015	0,012	0,168	-0,148	-0,179	0,402	0,079	0,012
0,351	0,069	0,141	0,129	0,015	0,013	0,176	-0,172	-0,186	0,390	0,028	0,053
0,282	0,139	0,068	0,126	0,014	0,012	0,173	-0,177	-0,186	0,402	0,027	0,067
0,314	0,064	0,133	0,124	0,013	0,010	0,169	-0,171	-0,180	0,390	0,027	0,064
0,338	0,142	0,071	0,127	0,016	0,013	0,173	-0,154	-0,190	0,410	0,042	0,013
0,268	0,140	0,070	0,125	0,015	0,011	0,170	-0,156	-0,190	0,422	0,053	0,012
0,303	0,065	0,133	0,123	0,012	0,011	0,165	-0,151	-0,184	0,406	0,051	0,011
0,335	0,141	0,070	0,127	0,016	0,012	0,172	-0,145	-0,221	0,433	0,123	0,019
0,328	0,142	0,072	0,125	0,018	0,012	0,163	-0,147	-0,168	0,441	0,058	0,014
0,358	0,136	0,068	0,124	0,015	0,014	0,158	-0,148	-0,152	0,406	0,040	0,032
0,273	0,142	0,071	0,126	0,016	0,012	0,175	-0,178	-0,187	0,406	0,028	0,068
0,345	0,146	0,074	0,125	0,018	0,022	0,172	-0,160	-0,176	0,406	0,067	0,011
0,361	0,143	0,072	0,118	0,017	0,023	0,167	-0,150	-0,174	0,394	0,081	0,013
0,206	0,141	0,070	0,125	0,016	0,010	0,162	-0,151	-0,174	0,396	0,078	0,013
0,349	0,145	0,076	0,121	0,021	0,028	0,175	-0,183	-0,186	0,427	0,031	0,076
0,360	0,147	0,077	0,116	0,022	0,030	0,169	-0,175	-0,178	0,412	0,031	0,074

G.2 lentelė. Simuliuojant pasiskirsčiusį guolių gedimą gautos savybių vertės (I lygio gedimas)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1,000	-0,998	-1,000	0,416	-0,397	-0,440	-0,889	-0,902	-0,914	-0,919	-0,947	-0,948
1,000	-0,997	-1,000	0,439	-0,417	-0,461	-0,883	-0,889	-0,893	-0,906	-0,931	-0,933
1,000	-1,000	-0,999	0,426	-0,399	-0,445	-0,934	-0,944	-0,945	-0,946	-0,957	-0,958
1,000	-0,999	-1,000	0,537	-0,511	-0,570	-0,920	-0,922	-0,925	-0,932	-0,941	-0,944
1,000	-0,997	-1,000	0,451	-0,429	-0,473	-0,893	-0,906	-0,910	-0,916	-0,933	-0,935
1,000	-1,000	-0,999	0,428	-0,401	-0,454	-0,905	-0,912	-0,920	-0,932	-0,938	-0,941
1,000	-0,996	-1,000	0,431	-0,409	-0,449	-0,895	-0,916	-0,936	-0,941	-0,942	-0,944
1,000	-0,998	-1,000	0,472	-0,449	-0,504	-0,890	-0,891	-0,895	-0,925	-0,928	-0,935
1,000	-1,000	-0,997	0,429	-0,402	-0,459	-0,924	-0,930	-0,937	-0,937	-0,949	-0,952
1,000	-1,000	-0,999	0,422	-0,404	-0,448	-0,923	-0,930	-0,937	-0,941	-0,941	-0,941
1,000	-0,994	-1,000	0,438	-0,412	-0,451	-0,869	-0,882	-0,883	-0,901	-0,903	-0,915
1,000	-0,999	-1,000	0,460	-0,430	-0,484	-0,908	-0,920	-0,922	-0,924	-0,937	-0,948
1,000	-1,000	-0,999	0,433	-0,415	-0,450	-0,917	-0,922	-0,925	-0,929	-0,938	-0,941
1,000	-1,000	-1,000	0,459	-0,437	-0,484	-0,915	-0,919	-0,925	-0,927	-0,928	-0,929
1,000	-1,000	-0,999	0,425	-0,397	-0,447	-0,888	-0,888	-0,919	-0,940	-0,952	-0,953
1,000	-0,994	-1,000	0,443	-0,418	-0,463	-0,919	-0,923	-0,924	-0,929	-0,930	-0,933
1,000	-0,995	-1,000	0,467	-0,441	-0,491	-0,877	-0,907	-0,912	-0,924	-0,924	-0,924
1,000	-1,000	-0,997	0,429	-0,401	-0,460	-0,912	-0,922	-0,925	-0,949	-0,950	-0,951
1,000	-0,997	-1,000	0,424	-0,403	-0,434	-0,878	-0,909	-0,910	-0,915	-0,934	-0,942
1,000	-1,000	-0,998	0,446	-0,425	-0,464	-0,857	-0,903	-0,909	-0,911	-0,919	-0,924
1,000	-0,999	-1,000	0,464	-0,431	-0,495	-0,895	-0,905	-0,940	-0,942	-0,953	-0,954
1,000	-0,994	-1,000	0,444	-0,419	-0,464	-0,882	-0,908	-0,909	-0,921	-0,921	-0,930
1,000	-0,996	-1,000	0,493	-0,466	-0,529	-0,870	-0,896	-0,901	-0,911	-0,919	-0,924
1,000	-0,998	-1,000	0,440	-0,409	-0,468	-0,906	-0,916	-0,921	-0,941	-0,945	-0,946
1,000	-0,992	-1,000	0,501	-0,471	-0,529	-0,888	-0,910	-0,914	-0,923	-0,928	-0,941
1,000	-0,996	-1,000	0,480	-0,452	-0,507	-0,872	-0,886	-0,905	-0,905	-0,909	-0,928
1,000	-1,000	-0,998	0,493	-0,459	-0,531	-0,931	-0,933	-0,941	-0,944	-0,949	-0,949
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
0,055	0,129	0,100	0,078	0,092	0,083	0,240	-0,212	-0,240	0,511	0,058	0,052
0,064	0,047	0,083	0,035	0,098	0,073	0,272	-0,150	-0,290	0,600	0,165	0,069
0,052	0,078	0,075	0,032	0,016	0,059	0,239	0,201	-0,145	0,552	0,503	0,174
0,056	0,047	0,126	0,095	0,023	0,007	0,255	-0,238	-0,265	0,585	0,040	0,020
0,132	0,035	0,026	0,063	0,010	0,086	0,270	-0,171	-0,246	0,640	0,134	0,015
0,092	0,084	0,058	0,023	0,032	0,031	0,236	0,201	-0,175	0,532	0,492	0,138
0,081	0,025	0,024	0,069	0,101	0,024	0,257	-0,202	-0,341	0,550	0,080	0,018
0,156	0,101	0,074	0,027	0,082	0,026	0,259	-0,177	-0,276	0,612	0,133	0,047
0,095	0,078	0,081	0,040	0,099	0,096	0,226	0,201	-0,168	0,529	0,499	0,145
0,061	0,070	0,061	0,036	0,093	0,048	0,247	-0,232	-0,240	0,591	0,049	0,056
0,085	0,044	0,034	0,070	0,036	0,028	0,277	-0,112	-0,245	0,648	0,224	0,174
0,093	0,070	0,002	0,055	0,012	0,055	0,241	0,201	-0,170	0,586	0,533	0,263
0,106	0,062	0,014	0,022	0,039	0,050	0,264	-0,248	-0,262	0,597	0,057	0,018
0,113	0,054	0,096	0,053	0,126	0,038	0,283	-0,128	-0,315	0,631	0,216	0,101
0,083	0,044	0,084	0,111	0,019	0,085	0,248	0,197	-0,197	0,568	0,477	0,133
0,054	0,058	0,072	0,044	0,017	0,059	0,266	-0,227	-0,233	0,596	0,082	0,005
0,047	0,052	0,008	0,024	0,013	0,014	0,284	-0,110	-0,239	0,685	0,217	0,049
0,094	0,073	0,026	0,036	0,022	0,009	0,245	0,196	-0,207	0,554	0,500	0,130
0,025	0,068	0,055	0,037	0,073	0,012	0,267	-0,232	-0,243	0,668	0,155	0,007
0,201	0,088	0,021	0,047	0,045	0,103	0,269	-0,154	-0,254	0,677	0,138	0,103
0,110	0,010	0,015	0,029	0,054	0,049	0,234	0,194	-0,196	0,587	0,514	0,027
0,063	0,013	0,014	0,091	0,031	0,082	0,274	-0,234	-0,250	0,592	0,063	0,029
0,141	0,075	0,055	0,027	0,029	0,132	0,291	-0,166	-0,252	0,620	0,157	0,039
0,110	0,098	0,088	0,068	0,047	0,081	0,249	0,192	-0,216	0,558	0,477	0,055
0,074	0,097	0,065	0,031	0,043	0,123	0,259	-0,216	-0,233	0,615	0,117	0,029
0,113	0,094	0,066	0,075	0,046	0,021	0,298	-0,163	-0,207	0,678	0,197	0,024
0,081	0,076	0,076	0,042	0,024	0,036	0,254	0,188	-0,207	0,602	0,482	0,044

G.3 lentelė. Simuliuojant pasiskirsčiusį guolių gedimą gautos savybių vertės (II lygio gedimas)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1,000	-1,000	-0,999	0,447	-0,428	-0,475	-0,899	-0,910	-0,928	-0,938	-0,942	-0,944
1,000	-0,996	-1,000	0,423	-0,392	-0,445	-0,915	-0,916	-0,919	-0,930	-0,934	-0,937
1,000	-0,997	-1,000	0,437	-0,405	-0,466	-0,904	-0,933	-0,940	-0,945	-0,951	-0,951
1,000	-1,000	-0,999	0,582	-0,553	-0,622	-0,917	-0,930	-0,932	-0,938	-0,938	-0,947
1,000	-0,999	-1,000	0,479	-0,448	-0,512	-0,897	-0,898	-0,941	-0,947	-0,948	-0,953
1,000	-0,999	-1,000	0,470	-0,439	-0,502	-0,918	-0,933	-0,934	-0,935	-0,938	-0,946
1,000	-1,000	-0,997	0,464	-0,444	-0,490	-0,907	-0,933	-0,935	-0,938	-0,941	-0,942
1,000	-1,000	-0,998	0,442	-0,414	-0,467	-0,916	-0,932	-0,940	-0,941	-0,945	-0,949
1,000	-1,000	-0,997	0,430	-0,402	-0,461	-0,920	-0,927	-0,931	-0,942	-0,943	-0,946
1,000	-1,000	-0,998	0,448	-0,428	-0,477	-0,922	-0,925	-0,933	-0,935	-0,940	-0,941
1,000	-1,000	-1,000	0,444	-0,415	-0,477	-0,918	-0,919	-0,933	-0,934	-0,939	-0,941
1,000	-0,997	-1,000	0,450	-0,417	-0,472	-0,914	-0,932	-0,932	-0,933	-0,937	-0,945
1,000	-1,000	-1,000	0,465	-0,444	-0,489	-0,914	-0,915	-0,928	-0,929	-0,934	-0,936
1,000	-1,000	-0,997	0,568	-0,531	-0,612	-0,902	-0,904	-0,908	-0,916	-0,932	-0,941
1,000	-1,000	-0,999	0,454	-0,424	-0,482	-0,904	-0,921	-0,922	-0,925	-0,942	-0,947
1,000	-0,998	-1,000	0,473	-0,450	-0,501	-0,895	-0,917	-0,920	-0,927	-0,931	-0,934
1,000	-1,000	-0,999	0,467	-0,437	-0,498	-0,872	-0,919	-0,921	-0,936	-0,947	-0,951
1,000	-1,000	-0,998	0,468	-0,437	-0,501	-0,924	-0,926	-0,934	-0,939	-0,943	-0,943
1,000	-0,999	-1,000	0,449	-0,426	-0,466	-0,903	-0,919	-0,923	-0,924	-0,933	-0,935
1,000	-1,000	-0,998	0,446	-0,417	-0,474	-0,907	-0,928	-0,933	-0,942	-0,942	-0,946
1,000	-0,996	-1,000	0,456	-0,421	-0,476	-0,905	-0,916	-0,926	-0,958	-0,960	-0,961
1,000	-1,000	-0,996	0,473	-0,450	-0,502	-0,903	-0,910	-0,915	-0,915	-0,917	-0,920
1,000	-0,996	-1,000	0,461	-0,427	-0,484	-0,913	-0,919	-0,920	-0,937	-0,937	-0,938
1,000	-0,997	-1,000	0,479	-0,445	-0,517	-0,904	-0,904	-0,918	-0,920	-0,922	-0,939
1,000	-0,998	-1,000	0,533	-0,505	-0,573	-0,902	-0,909	-0,914	-0,915	-0,926	-0,933
1,000	-0,998	-1,000	0,456	-0,425	-0,482	-0,906	-0,921	-0,922	-0,923	-0,943	-0,951
1,000	-1,000	-0,997	0,464	-0,434	-0,498	-0,892	-0,895	-0,907	-0,912	-0,928	-0,940
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
0,100	0,055	0,103	0,132	0,055	0,011	0,257	-0,218	-0,261	0,536	0,035	0,062
0,107	0,044	0,073	0,062	0,019	0,017	0,245	0,213	-0,242	0,527	0,213	0,096
0,115	0,034	0,009	0,041	0,093	0,090	0,265	0,183	-0,106	0,479	0,344	0,043
0,124	0,070	0,060	0,021	0,035	0,113	0,273	-0,183	-0,272	0,569	0,095	0,004
0,145	0,096	0,033	0,120	0,008	0,116	0,244	0,212	-0,211	0,542	0,217	0,041
0,165	0,127	0,068	0,043	0,063	0,015	0,264	0,183	-0,102	0,484	0,361	0,108
0,034	0,067	0,052	0,116	0,018	0,041	0,276	-0,149	-0,332	0,565	0,135	0,005
0,143	0,114	0,012	0,064	0,048	0,062	0,233	0,212	-0,226	0,500	0,238	0,037
0,088	0,063	0,049	0,111	0,035	0,037	0,251	0,180	-0,128	0,584	0,364	0,110
0,104	0,141	0,040	0,014	0,047	0,030	0,263	-0,170	-0,254	0,575	0,106	0,056
0,071	0,089	0,008	0,049	0,029	0,096	0,250	0,217	-0,239	0,537	0,272	0,032
0,154	0,080	0,019	0,055	0,046	0,012	0,271	0,183	-0,131	0,609	0,369	0,137
0,102	0,014	0,043	0,065	0,083	0,043	0,285	-0,165	-0,293	0,590	0,095	0,078
0,069	0,057	0,118	0,003	0,016	0,069	0,258	0,217	-0,238	0,575	0,273	0,030
0,089	0,070	0,023	0,057	0,046	0,056	0,274	0,179	-0,121	0,574	0,396	0,072
0,121	0,037	0,067	0,071	0,055	0,123	0,285	-0,190	-0,239	0,587	0,099	0,036
0,219	0,061	0,038	0,028	0,103	0,020	0,256	0,213	-0,227	0,533	0,265	0,043
0,032	0,074	0,079	0,062	0,007	0,011	0,273	0,180	-0,137	0,551	0,443	0,117
0,054	0,031	0,020	0,071	0,018	0,046	0,286	-0,173	-0,187	0,644	0,079	0,005
0,154	0,113	0,073	0,027	0,015	0,075	0,245	0,219	-0,248	0,546	0,315	0,047
0,056	0,093	0,046	0,030	0,064	0,082	0,261	0,182	-0,148	0,621	0,406	0,138
0,068	0,027	0,059	0,024	0,002	0,066	0,292	-0,155	-0,239	0,620	0,104	0,008
0,075	0,028	0,036	0,036	0,035	0,006	0,264	0,217	-0,243	0,583	0,281	0,022
0,127	0,104	0,059	0,084	0,048	0,139	0,278	0,181	-0,148	0,639	0,436	0,136
0,095	0,052	0,073	0,041	0,003	0,021	0,276	-0,180	-0,189	0,630	0,133	0,065
0,106	0,053	0,060	0,007	0,052	0,120	0,270	0,220	-0,260	0,615	0,307	0,026
0,092	0,113	0,003	0,072	0,036	0,107	0,283	0,179	-0,147	0,621	0,475	0,135

SL344. 2020-*-* , * leidyb. apsk. 1. Tiražas * egz.
Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas