



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Ravil Sadykov

**ASINCHRONINIO VARIKLIO MECHANINIŲ IR ELEKTRINIŲ
VIRPESIŲ KORELIACIJOS TYRIMAS IR TAIKYMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Andrius Knyš

KAUNAS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
AUTOMATIKOS KATEDRA

ASINCHRONINIO VARIKLIO MECHANINIŲ IR ELEKTRINIŲ
VIRPESIŲ KORELIACIJOS TYRIMAS IR TAIKYMAS

Baigiamasis magistro projektas
Valdymo technologijos (kodas 621H66001)

Vadovas

Doc. dr. Andrius Knyš

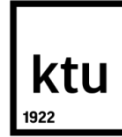
Recenzentas

.....

Projektą atliko

Ravil Sadykov

KAUNAS, 2015



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

(Fakultetas)

Ravil Sadykov

(Studento vardas, pavardė)

Valdymo technologijos (kodas 621H66001)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

ASINCHRONINIO VARIKLIO MECHANINIŲ IR ELEKTRINIŲ VIRPESIŲ
KORELIACIJOS TYRIMAS IR TAIKYMAS
AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 15 m. birželio 3 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Ravil Sadykov** baigiamasis projektas tema „ASINCHRONINIO VARIKLIO MECHANINIŲ IR ELEKTRINIŲ VIRPESIŲ KORELIACIJOS TYRIMAS IR TAIKYMAS“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Sadykov, R. Asinchronio variklio mechaninių ir elektrinių virpesių tyrimas ir taikymas. *Magistro* baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Andrius Knyš; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Automatikos katedra.

Kaunas, 2015. 43 psl.

SANTRAUKA

Šio darbo tikslas – rasti koreliaciją tarp asinchroninio variklio vibracijų ir vartojamos srovės spektrinių dedamųjų, atsirandančių dėl skirtingų variklio defektų. Darbe apžvelgti vibracijos ir srovės diagnostikos metodai. Suprojektuota ir sukurta sistema, leidžianti matuoti ir analizuoti variklio vibracijas ir srovės. Atlikti bandymai su skirtingais variklio defektais ir skirtingomis apkrovomis. Gauti bandymų rezultatai patvirtina esančią koreliaciją tarp variklio vibracijų ir vartojamos srovės spektrinių dedamųjų.

Reikšminiai žodžiai: Asinchroninis variklis, vibracijos, srovė, būsenos stebėjimas

Sadykov, Ravil. Analysis and Application of Induction Motor Mechanical and Electrical Vibrations Correlation. Final project of *master* / supervisor doc. dr. Andrius Knyš; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Automation

Kaunas, 2015. 43 psl.

SUMMARY

Objective of this work is to find correlation between induction motor vibrations and consumed current spectral components, caused by various motor defects. This work takes review on vibration and current diagnostic methods. During this project, the system that lets measure and analyze motor vibrations and current was created. Experimental tests with various motor defects and loads was executed. Test results confirmed, that correlation between motor vibration and current spectral components exist.

Keywords: Induction motor, vibrations, current, condition monitoring.

Turinys

Įvadas.....	7
1. Mašinų mechaninių ir elektrinių virpesių stebėjimo tikslai.....	8
2. Vibracijos asinchroninėse mašinose	9
2.1 Asinchroninė mašina	9
2.2 Vibracijos mašinose ir jų šaltiniai	9
2.2.1 Mechaninės ir elektromagnetinės prigimties vibracijos	10
2.3 Mašinos defektų sukeltos vibracijos.....	11
2.3.1 Guolių gedimų dažniai	11
2.3.2 Rotoriaus ir statoriaus gedimų dažniai	13
2.4 Vibracijų matavimas	14
3. Srovės asinchroniniuose mašinose	16
4. Variklio parametrų matavimas ir analizavimas	18
4.1 Techninės įrangos parinkimas	18
4.2 Programinė įranga	20
4.2.1 Dažninė analizė	20
4.2.2 Langų funkcijos	21
4.2.3 Dažninės analizės realizavimas programoje.....	22
4.2.4 Programos testavimas	24
4.3 Parinktos matavimo įrangos testavimas	26
5 Asinchroninio variklio su defektu eksperimentinis tyrimas	28
5.1 Asinchroninio variklio su defektu eksperimentinių tyrimo stendas.....	28
5.2 Eksperimentinio tyrimo rezultatai	30
5.2.1 Variklis be defektų	31
5.2.2 Įtampos asimetrija	32
5.2.3 Rotoriaus masės disbalansas	33
5.2.4 Išorinio žiedo defektas.....	35

5.2.5 Vidinio žiedo defektas.....	37
5.2.6 Riedėjimo kūno defektas	39
5.3 Eksperimentinių rezultatų apibendrinimas.....	41
Išvados.....	42
Naudotos literatūros sąrašas	43
Priedai.....	46
1 priedas. Vibracijų jutiklio Monitran MTN/2200C techniniai duomenys.	47
2 priedas. Matavimo modulio Beckhoff EL3632 techniniai duomenys.....	48
3 priedas. Srovės jutiklio LEM IT 60-S techniniai duomenys	49
4 priedas. Matavimo modulio Beckhoff EL3742 techniniai duomenys.....	50
5 priedas. TwinCAT 2 parašytos programos fragmentai.....	51
6 priedas. MATLAB parašytos programos fragmentas.....	53
7 priedas. Variklio ir generatoriaus pajungimo schema	54

Ivadas

Asinchroniniai elektros varikliai – tai kritinis komponentas daugelyje pramoninių procesų. Nepaisant jų tvirtumo, jie kartais sugenda, ko pasekoje atsiranda neplanuotos prastovos, kurios gali brangiai kainuoti.

Elektros variklio gedimai atsiranda dėl jo pastovaus susidėvėjimo ir dėl tokių priežasčių kaip neleistinai ilgas variklio funkcionavimas be remonto, blogas eksploatacinis aptarnavimas, apskaičiuotų darbo režimų nesilaikymas, įvairūs išoriniai poveikiai.

Šie gedimai gali būti elektriniai ir mechaniniai. Prie mechaninių gedimų galima priskirti rotoriaus veleno deformavimą, guolių susidėvėjimą, statoriaus tvirtinimo susilpnėjimą ir kitus. Prie elektrinių gedimų galima priskirti laidininkų nutrūkimą statoriaus arba rotoriaus apvijose, trumpuosius jungimus tarp apvijų ir kitus.

Kai kurie gedimai padidina elektros energijos vartojimą, kiti gali privesti prie mašinos defektų, dėl kurių tolimesnis mašinos eksploatavimas tampa neįmanomas. Todėl yra svarbu laiku aptikti ir panaikinti gedimą.

Yra daug skirtingų būdų aptikti elektrines ir mechanines problemas asinchroniniuose varikliuose, kurie paremti skirtingų parametrų (pvz. vibracijos, temperatūra) stebėjimu. Šių parametrų stebėjimo sistemos gali būti labai brangios ir ekonomiškai naudingos tik taikant dideliems varikliams arba varikliams atliekantiems svarbias užduotis[15].

Remiantis anksčiau atliktais tyrimais, manoma, kad statoriaus srovės stebėjimas gali duoti panašius diagnostikos rezultatus, kaip ir vibracijų stebėjimas. Toks variklio stebėjimo metodas būtų ekonomiškai ir praktiškai naudingesnis[19][20].

Šiuo darbo uždaviniai – sukurti sistemą variklio vibracijų bei vartojamos srovės matavimui, registravimui ir analizavimui ir nustatyti ar variklio defekto sukeliama mechaniniai virpesiai koreliuoja su statoriaus srovės spektrinėmis dedamosiomis.

1. Mašinų mechaninių ir elektrinių virpesių stebėjimo tikslai.

Racionalios gamybos įrangos, ypač automatizuotos, stebėjimo organizavimas, efektyvus faktinės būsenos kontrolės užtikrinimas ir būsenos pasikeitimo prognozavimas leidžia ženkliai sumažinti materialinius ir darbinius įrangos remonto ir priežiūros kaštus, užtikrinti stabilų brangios ir unikalios įrangos darbą.[3]

Todėl reikia greitai pastebėti ir pašalinti atsiradusius variklyje defektus bei poveikius galinčius sukelti defektus. Tam reikalingos priemonės galinčios stebėti variklio būseną. Šiuo metu yra gana paplitę ir gerai išvystyti variklio būsenos diagnostikos metodai paremti vibracijų spektrine analize. Tokie analizės metodai yra gana brangūs, reikalaujantys daug darbo ir specialios matavimo įrangos. Be to, naudojant šiuos analizės metodus, turi būti numatyta prieiga prie tiriamo objekto, kurią kai kuriais atvejais sunku aprūpinti dėl techninių priežasčių.

Šiuos trūkumus gali pašalinti paskutiniu metu pradėti vystyti diagnostikos metodai, paremti vartojama elektros srove ir jos spektrine analize. Tokie metodai leidžia nustatyti skirtingų elektros variklių elementų būseną pasiekiant aukštą patikimumo laipsnį. Vienas iš didžiausių tokio metodo privalumų – tai kad asinchroninio variklio srovės monitoringas gali būti atliekamas ne tik prie pat variklio, bet ir maitinimo skyde [14]

Taigi dirbant elektros mašinos kyla klausimų apie tai, kaip keičiasi jo vartojama srovė atsiradus defektui. Šiuos pasikeitimus patogiau analizuoti lyginant juos su vibracijų pasikeitimais, kadangi vibracijų analizės metodai yra gana išvystyti, o srovės pasikeitimai atsiranda dėl tarpo tarp variklio statoriaus ir rotorius pasikeitimu, kuris įtakojamas vibracijų.

2. Vibracijos asinchroninėse mašinose

2.1 Asinchroninė mašina

Kaip ir visi elektromechaniniai keitikliai, asinchroninės mašinos susideda iš dviejų mazgų: statoriaus ir rotoriaus. Statorius sudarytas iš feromagnetinio magnetolaidžio, kuris sutelkia magnetinį lauką, ir apvijos, kuria teka kintamoji srovė. Rotorius taip pat dažniausiai sudarytas iš feromagnetinio magnetolaidžio kuriame suklotą apviją. Daugiafazė statoriaus apvija sukuria asinchroninės mašinos oro tarpe sukamąjį magnetinį lauką. Oro tarpo sukamasis magnetinis laukas kerta rotoriaus apvijos laidininkus ir juose indukuoja elektrovarą pagal dešinėsios rankos taisyklę. Jeigu rotoriaus apvija sujungta taip, kad ja ima tekėti srovė, tai ši srovė, sąveikaudama su statoriaus sukurtu magnetiniu lauku, pagal kairiosios rankos taisyklę sukuria elektromagnetines jėgas, kurios stengiasi pasukti rotorių statoriaus magnetinio lauko sukimosi kryptimi. Taigi rotoriaus laidininkus veikiančių elektromagnetinių jėgų visuma sudaro rotoriaus elektromagnetinį momentą, kuris suka rotorių. Tokiu būdu statoriaus apvijos imama iš tinklo elektros energija transformuojama į mechaninę energiją, kuri per rotoriaus veleną perduodama pavarai.[6]

2.2 Vibracijos mašinose ir jų šaltiniai

Vibracija – tai įprastas procesas atsirandantis asinchroniniuose varikliuose ir sukiamas tomis pačiomis jėgomis, kurios sukelia mašinų dalių nusidėvėjimą ir defektus. Bet kokie variklio parametrų ir struktūros nukrypimai nuo normų priveda prie jo elementų sąveikos pasikeitimo, kas priveda prie variklio vibracijų signalo pasikeitimo.

Viena iš svarbiausių vibracijų diagnostikos ypatybių – yra tai, kad stebimi parametrai yra ne statiniai, kaip temperatūra ar spaudimas, o dinaminiai, kurie atsiranda dėl variklio detalių sąveikos tarpusavyje, jam dirbant.[3]

Platus dažniniai ir dinaminiai virpėjimo proceso režiai, mažas inertiškumas ir didelis virpesių sklidimo greitis mašinų konstrukcijose leidžia tiksliai ir greitai išmatuoti vibracijos parametrus.[3]

Vibracijų signalai – tai poveikio (šaltinio) ir perdavimo (terpės) funkcijų derinys. Yra du pagrindiniai vibracijų šaltinių tipai asinchroniniuose varikliuose: mechaniniai – tipiniai visoms besisukančioms mašinoms ir elektromagnetiniai – specifiniai skirtingoms elektros mašinoms.[2]

2.2.1 Mechaninės ir elektromagnetinės prigimties vibracijos

Pagrindiniai mechaninių vibracijų šaltiniai besisukančiose mašinose, tame tarpe ir asinchroniniuose varikliuose tai : rotoriaus disbalansas, veleno paslinkimas, guolių mechaniniai gedimai, diržai ir kiti prijungiami mechaniniai besisukantys elementai. Mechaninis pralaidumas, mašinos pagrindo tvirtumas, struktūriniai mašinos rezonansai gali ženkliai pakeisti vibracijos signalo amplitudes ir formą. [1]

Elektromagnetinės vibracijos asinchroniniuose varikliuose atsiranda dėl elektromagnetinių jėgų veikimo mašinos statoriuje ir rotoriuje. [2]

Yra du pagrindiniai elektromagnetinių triukšmų šaltiniai: radialinės ir tangentinės elektromagnetinės jėgos. Gerai suprojektuotos, normaliomis sąlygomis veikiančios elektros mašinos turi palyginamai mažai kintančių elektromagnetinių jėgų komponentų. Tuo tarpų skirtingos vidinės ir išorinės problemos, tokios kaip netinkama maitinimo šaltinio kokybė, apkrova arba elektromagnetinės vibracijos, gali sukelti rimtų variklio veikimo problemų. [2]

Klasikinė elektromagnetinių virpesių teorija matematiškai išreiškia radialines elektromagnetinių jėgų bangas:[2]

$$P(\alpha, t) = P(r, \omega)\cos(r\alpha - \omega t - \Psi_p) \quad (2.1)$$

Čia

$P(r, \omega)$ – jėgos bangos amplitudė;

r – jėgos bangos eilė;

ω – jėgos bangos kampinis dažnis;

Ψ_p – fazės kampas;

α – kampinė koordinatė;

t – laikas;

Jėgos banga apibrėžiama amplitude, dažnių ir eile. Jėgos bangos eilė – tai pilnų bangų skaičius paskirstytas statoriaus šerdies apskritime. Statoriaus šerdies savieji dažniai priklauso nuo jėgos bangos eilės.[2]

Tangentinės elektromagnetinės jėgos gali sukurti ženkliai sukimo momento pulsacijas. Šios pulsacijos yra susijusios su variklio korpuso vibracijomis. Tokios pulsacijos taip pat gali

iššaukti variklio gedimus, tokius kaip statoriaus deformavimas. Sukimo momento pulsacijos prisideda prie pastovaus sukimo momento, dėl to atsiranda greičio pulsacijos, triukšmas ir vibracijos.[2]

2.3 Mašinos defektų sukeltos vibracijos

Dažniausiai naudojamas būdas tirti mašinų vibracijas – tai vibracijos pagreičio ar greičio analizavimas dažnių srityje, stebint tam tikro dažnio dedamąsias.

Signalų analizavimas šiame darbe remiasi standartine greitąja Furje transformacija (FFT), kuri gali suteikti vertingą ir tikslią informaciją apie signalą signalo dažnio amplitudes.

2.3.1 Guolių gedimų dažniai

Defektiniai riedėjimo guolio elementai žadina keturių skirtingų dažnių virpesius, teorinės šių virpesių dažnių reikšmės apskaičiuojamos pagal formules:[13]

- Separatoriaus sukimosi dažnis f_{sp} parodo, kad sugedo separatorius:[13]

$$f_{sp} = \frac{f_r}{2} \left(1 - \frac{d_r}{d_{vid}} * \cos\beta \right) \quad (2.3)$$

- Rutuliukų probėgų išorinio žiedo riedėjimo riedėjimo takeliu dažnis f_l , parodo, kad ištrupėjęs arba kitaip sužalotas guolio išorinio žiedo riedėjimo takelis:[13]:

$$f_l = z * \frac{f_r}{2} \left(1 - \frac{d_r}{d_{vid}} * \cos\beta \right) \quad (2.4)$$

- Rutuliukų probėgų vidinio žiedo riedėjimo riedėjimo takeliu dažnis f_V , parodo kad ištrupėjęs arba kitaip sužalotas guolio vidinio žiedo riedėjimo takelis:[13]:

$$f_V = z * \frac{f_r}{2} \left(1 + \frac{d_r}{d_{vid}} * \cos\beta \right) \quad (2.5)$$

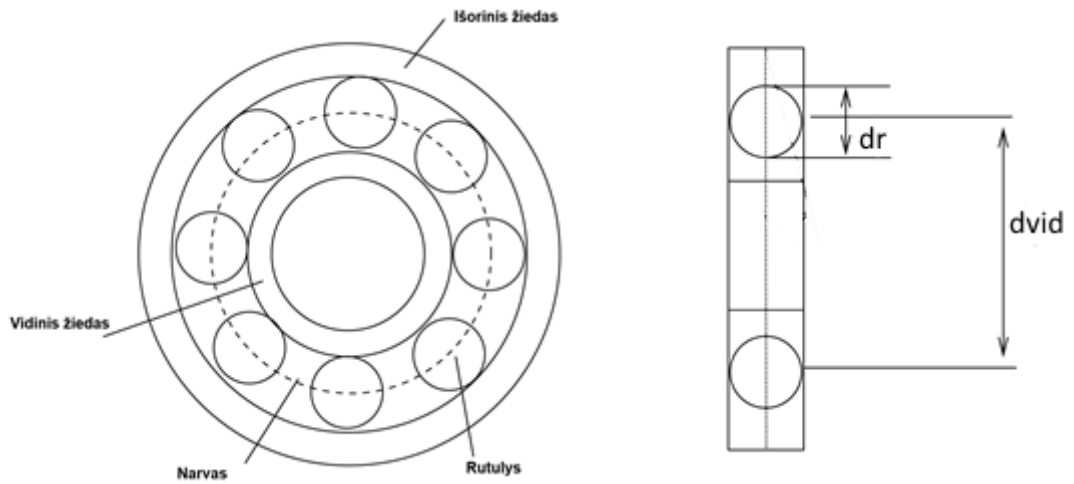
- Riedėjimo kūnų (rutuliukų arba ritinukų) sukimosi dažnis f_{rk} , parodo esamus defektus riedėjimo kūne:[13]:

$$f_{rk} = f_r * \frac{d_r}{d_{vid}} \left[1 - \left(\frac{d_r}{d_{vid}} \right)^2 * \cos^2\beta \right] \quad (2.6)$$

Čia

- f_{sp} – narvo gedimų sukiamų mechaninių virpesių dažnis;
- f_I – išorinio žiedo gedimų sukiamų mechaninių virpesių dažnis;
- f_V – vidinio žiedo gedimų sukiamų mechaninių virpesių dažnis;
- f_{rk} – riedėjimo kūno gedimų sukiamų mechaninių virpesių dažnis;
- f_r – rotoriaus arba veleno dažnis;
- d_r – rutulio skersmuo;
- d_{vid} – dalinančio apskritimo skersmuo;
- z – riedėjimo kūnų skaičius;
- β – riedėjimo kūno kontakto su žiedu kampas;

d_r, d_{vid} pavaizduoti guolio brėžinyje (2.1 pav.)



2.1 pav. Riedėjimo guolis

Pateiktos lygybės gali būti supaprastintos guoliams turintiems nuo šešių iki dvylikos rutulių:[1]

$$f_I = 0.4 * z * f_r \quad (2.7)$$

$$f_V = 0.6 * z * f_r \quad (2.8)$$

$$f_{rk} = (0.4n_1 + 0.6n_2) * f_r \quad (2.9)$$

Kur

n_1, n_2 – sveikėji skaičiai (1, 2, 3, ...)

2.3.2 Rotoriaus ir statoriaus gedimų dažniai

Defektuotas rotoriaus strypas iššaukia šio dažnio padidėjusia amplitudę:[1]

$$f_{rot} = (R * f_r) \quad (2.10)$$

Čia

R – rotoriaus strypų skaičius;

f_r – rotoriaus apsisukimų dažnis.

Rotoriaus ekscentritetas padidina rotoriaus apsisukimo dažnio kartotinių dažnių amplitudę.[5]

Statoriaus apvijų trūkimas arba trumpas jungimas, gali sukelti padidintas vibracijas elektromagnetinių jėgų dažnyje, kuris lygus dvigubam maitinimo tinklo dažniui.[5]

Statoriaus ekscentritetas pasireiškia rotoriaus sukimosi dažniuose ir elektromagnetinių jėgų dažnyje.[5]

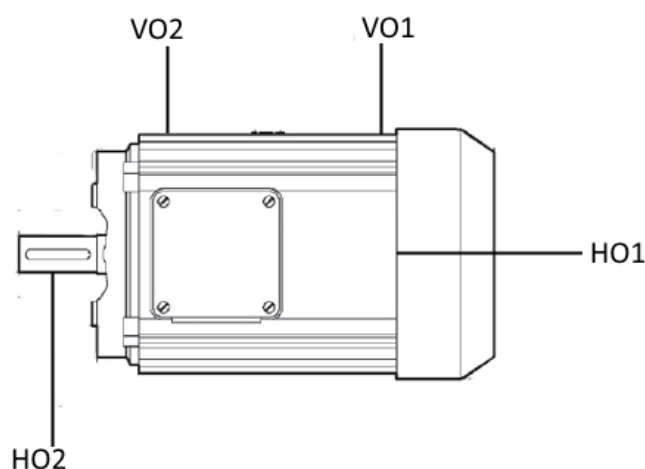
2.4 Vibracijų matavimas

Vibracijos išmatavimui dažniausiai naudojami vibracijos pagreičio jutikliai, veikiantys pjezo efekto pagrindu. Tokiuose jutikliuose elektrinis krūvis išėjime proporcingas jutiklio veikiančiai jėgai.

Gavus elektrinį signalą iš vibracijos, reikia jį kruopščiai išanalizuoti norint neprarasti ir gauti diagnostinę informaciją. Analizuojanti įranga turi gebėti atlikti vibracijų spektrinę analizę t.y. vibracijos išskyrimą į skirtingo dažnio dedamąsias, kurias sukelia skirtingos prigimties jėgos;

Norint teisingai nustatyti vibracijų parametrus reikia teisingai parinkti vibracijos daviklio tvirtinimo vietą ir būdą.

2.2 paveiksle pavaizduoti rekomenduojami vibracijų matavimo taškai, tinkamiausi atlikti rotorinių mašinų vibracijų būklės analizę ir diagnostiką[18]



2.2 pav. Rekomenduojami matavimo taškai. HO – horizontali kryptis, VO – vertikali kryptis

Mechanizmo vibracijos signalas turi pakankamai sunkią struktūrą, kuri priklauso nuo mechanizmo dinamikos ir sąveikaujančių mazgų. Naudingo signalo gavimas sudėtingėja mažėjant matavimo taškams. [3]

Iš esmės, visapusiškai vibracijų analizei matavimo taške turi būti atlikti matavimai trijuose ašyse. Praktiškai ta pati informacija gali būti gauta atliekant matavimą vienoje ašyje. Matavimo taško ir ašies parinkimas – atsakinga operacija. Jeigu pradinis signalas neturės pakankamai informacijos apie tiriamo mechanizmo būseną, tai jokia sudėtingiausia analizė irgi negalės suteikti šios informacijos. [3]

Trikdžių įtaką galima sumažinti, suskaldžius mechanizmą į kelias matavimo zonas, pritvirtinant jutiklius labiausiai informatyviausiuose konstrukcijos taškuose. Rotoriniuose mašinosiose tokie taškai – tai guolių atramos.[3]

Guoliai – informatyvi vibracijų matavimo vieta dėl to, kad būtent šiuose taškuose pridedamos pagrindinės dinaminės apkrovos ir jėgos. Taip pat guolis – tai rotorinio mechanizmo silpniausia grandis, dėl to davikliai turi būti montuojami kuo arčiau guolių.[3]

Patikimiausias daviklio tvirtinimo būdas - specialiu smeigtuku arba specialiais klijais. Pagrindiniai tokio tvirtinimo būdo pranašumai – tikslūs žemųjų ir aukštųjų dažnių vibracijų matavimai.[4]

Kitas tvirtinimo būdas – specialiu magnetu. Tvirtinant daviklį magnetu dalis vibracijos energijos yra prarandama, bet toks tvirtinimas yra paprastesnis ir jį galima naudoti periodiniams vibracijų signalo nuėmimams.[4]

Kadangi vibracijos signalo energijos lygio pasikeitimą gali iššaukti visa veiksnių eilė, defekto progresavimo įvertinimui tikslinga naudoti ne tik absoliučius vibracijos parametrų lygius, bet ir tų lygių pasikeitimo tendencijos stebėjimą.[4]

Remtis absoliučiais parametrų lygiais galima tik tada, kai jau yra sukaupta pakankama patirtis aptarnaujant vieno tipo mašinas, o ši patirtis įgyjama tiriant parametrų pasikeitimo tendencijas.[4]

3. Srovės asinchroniniuose mašinosė

Bet kokie pasikeitimai asinchroninio variklio elektrinėje arba mechaninėje dalyse arba prijungto prie jo įtaiso iššaukia magnetinio lauko tarpe pasikeitimą, dėl kurio gali keistis variklio vartojama srovė. Tai reiškia, kad papildomų dažnio dedamųjų atsiradimas statoriaus apvijų srovių spektre gali reikšti variklio arba prie jo prijungto įtaiso gedimus. [20]

Defektų žadinamų virpesių statoriaus srovėje dažnius galima apskaičiuoti remiantys šiomis formulėmis:

- Rotoriaus masės disbalansu sukeliama virpesių dažniai f_{eccs} : [20]:

$$f_{eccs} = f_e \pm kf_r \quad (3.1)$$

- Guolio išorinio žiedo defektų sukeliama virpesių dažniai f_{Is} : [19]:

$$f_{Is} = f_e \pm kf_I \quad (3.2)$$

- Guolio vidinio žiedo defektų sukeliama virpesių dažniai f_{Vs} : [19]:

$$f_{Vs} = f_e \pm f_r \pm kf_V \quad (3.3)$$

- Guolio riedėjimo kūnų defektų sukeliama virpesių dažniai f_{rks} : [19]:

$$f_{rks} = f_e \pm f_{sp} \pm kf_{rk} \quad (3.4)$$

Čia

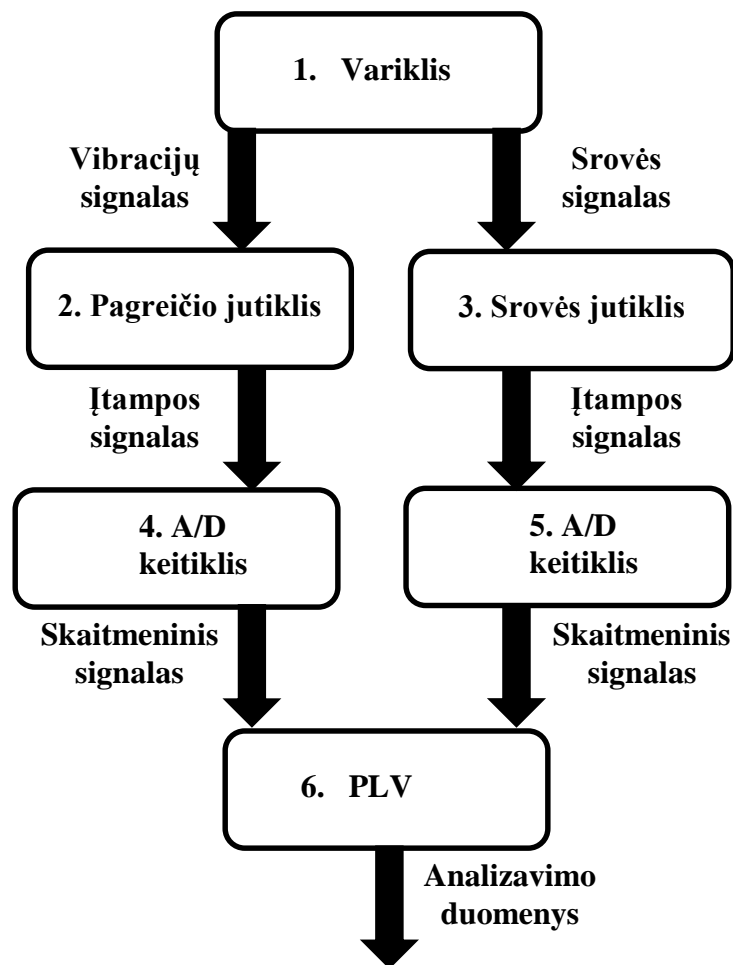
- f_{sp} – narvo gedimų sukeliama mechaninių virpesių dažnis;
- f_I – išorinio žiedo gedimų sukeliama mechaninių virpesių dažnis;
- f_V – vidinio žiedo gedimų sukeliama mechaninių virpesių dažnis;

f_{rk} –	riedėjimo kūno gedimų sukeliama mechaninių virpesių dažnis;
f_r –	rotoriaus arba veleno dažnis;
f_e –	maitinimo tinklo dažnis;
f_{eccs} –	rotoriaus masės disbalanso sukeliama virpesių dažnis srovėje;
f_{Is} –	išorinio žiedo gedimų sukeliama virpesių dažnis srovėje;
f_{Vs} –	vidinio žiedo gedimų sukeliama virpesių dažnis srovėje;
f_{rks} –	riedėjimo kūno gedimų sukeliama virpesių dažnis srovėje;

Detalesni šių formulų skaičiavimai pateikti [19] ir [20] literatūros šaltiniuose.

4. Variklio parametrų matavimas ir analizavimas

Variklio mechaninių virpesių ir statoriaus srovių stebėjimui buvo suprojektuota signalų surinkimo ir analizavimo sistema (4.1 pav.): pagreičio(2) ir srovės(3) jutikliai matuoja pagreičio ir srovės signalus, kuriuos konvertuoja į įtampos signalus. Įtampos signalai diskretizuojami A/D keitikliuose(4,5), tuomet diskretizuotas signalas apdorojamas programuojamajame valdiklyje(6), kurio programinė įranga analizuoja duomenis ir pateikia analizavimo rezultatus.



4.1 pav. Signalų matavimo ir analizavimo sistema

4.1 Techninės įrangos parinkimas

Vibracijų signalo matavimui buvo parinktas vibracijų pagreičio jutiklis Monitran MTN/2200C ir signalo matavimo modulis (A/D keitiklis) Beckhoff EL3632. Šių įrenginių

pagrindiniai techniniai duomenys pateikti lentelėse 4.1 ir 4.2. Detalesni duomenys pateikti 1 ir 2 prieduose.

4.1 lentelė. Vibracijų jutiklis Monitran MTN/2200C

Parametras	Reikšmė
Matavimo diapazonas	-80 – 80g
Dažninis diapazonas	0,8 – 10kHz
Matavimo paklaida	< 10%
Rezonanso dažnis	18kHz

4.2 lentelė. Matavimo modulis Beckhoff 3632

Parametras	Reikšmė
Diskretizavimo dažnis	iki 50kHz
Matavimo paklaida	< 0,5%
Skiriamoji geba	16bit

Srovės signalo matavimui buvo parinktas LEM HAL IT 60-S srovės jutiklis ir signalo matavimo modulis (A/D keitiklis) Beckhoff EL3742. Šių įrenginių pagrindiniai techniniai duomenys pateikti lentelėse 4.3 ir 4.4. Detalesni duomenys pateikti 3 ir 4 prieduose.

4.3 lentelė. Srovės jutiklis LEM IT 60-S

Parametras	Reikšmė
Matavimo diapazonas	-60 – 60A
Dažninis diapazonas	0 - 500kHz
Matavimo paklaida	< 0,03%

4.4 lentelė. Matavimo modulis Beckhoff 3742

Parametras	Reikšmė
Diskretizavimo dažnis	iki 100kHz
Matavimo paklaida	< 0,3%
Skiriamoji geba	16bit

Duomenų surinkimui ir analizavimui parinktas pramoninis valdiklis Beckhoff CX9020, turintis 1Ghz ARM procesorių. Minimalus programos ciklo laikas – 1ms. Techninė šio valdiklio specifikacija pateikta priede 5.

4.2 Programinė įranga

Po vibracijos ir elektros signalo konvertavimo į elektrinį signalą, šį reikia išanalizuoti. Visu pirma reikia atlikti dažninę vibracijų analizę, t.y. išskaldyti vibraciją į skirtingų dažnių dedamąsias, kurios iššaukiamos skirtingų prigimčių jėgomis. Toliau reikia nustatyti tam tikrų dedamųjų svyravimų amplitudę. Šie analizės metodai griežtai apibrėžiami matematiškai, todėl juos atliekant galima taikyti programinę įrangą.

Kaip buvo minėta anksčiau plačiausiai taikomas vibracijų analizės metodas – tai spektrinė (dažninė). Tokia analizė susideda iš signalo transformavimo į dažnių spektrą ir šio spektro charakteringų dažnių analizavimo.

4.2.1 Dažninė analizė

Signalų laiko srityje konvertavimui į signalą dažnio srityje šiame darbe bus taikoma diskrečioji Furje transformacija (DFT). Šis metodas labai paplitęs skaitmeninių signalų apdorojime. DFT reikalauja diskretinio signalo, kaip įėjimo funkcijos. DFT programoje realizuota taikant šią formulę[8]:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i}{N} kn} \quad (4.1)$$

Čia

N – išmatuotų signalų kiekis per matavimo periodą, taip pat ir dažnio dedamųjų skaičius;

x_n – išmatuotų signalų (diskretiniuose taškuose $n = 0, \dots, N - 1$) reikšmės;

X_k – N kompleksinių signalo amplitudžių, kurios kartu sudaro išėjimo signalo masyvą ($k = 0, \dots, N - 1$). Įprasta k signalo amplitudė paskaičiuojama kaip $\frac{|X_k|}{N}$;

k – įėjimo masyvo indeksas. Taip pat dažnio indeksas. k elemento dažnis lygus $\frac{k}{T}$, kur T – matavimo laiko periodas.

Naudojant DFT vienos spektrinės atskaitos skaičiavimui reikia atlikti N kompleksinio dauginimo ir pridėjimo operacijų. Norint paskaičiuoti visą galimą signalo spektrą, reikia atlikti N^2 tokių operacijų. Kad atlikti kokybišką analizę reikia pakankamai ilgo ir dažnai diskretizuoto signalo, tam kad užtikrintai atskirti artimų sinusoidžių signalus ir sumažinti dažnio žingsnį išėjime. Taigi viso signalo spektro skaičiavimui atlikti reikia didelio operacijų skaičiaus, todėl skaičiavimas pasidaro labai sudėtingas ir tam reikia didelių įrangos skaičiavimo galimybių. Vienas iš šios problemos sprendimų – naudoti greitosios Furje transformacijos (FFT) algoritmus.

Yra daugybė skirtingų FFT algoritmų pasižyminčių skirtingomis savybėmis. Šiame darbe buvo parinktas „Split-radix“ algoritmas. Šis algoritmas pasižymi sąlyginai mažu aritmetinių operacijų skaičiumi. Naudojant šį algoritmą viso spektro skaičiavimui bendras dauginimo ir pridėjimo operacijų skaičius lygus: $4N \log_2 N - 6N + 8$ [11]. Realizuotas FFT algoritmas aprašomas [11] literatūros šaltinyje.

Taigi užduotims, kurioms reikia paskaičiuoti visą spektrą naudingiau naudoti FFT, tuo tarpų jei reikia paskaičiuoti kelias tam tikras dažnio dedamąsias, naudingiau atlikti DFT.

4.2.2 Langų funkcijos

Langų funkcijos – tai matematinės funkcijos kurios lygios nuliui už tam tikrų pasirinktų ribų. Pavyzdžiui funkcija kuri lygi konstantai pasirinktuose ribose ir nuliui už jų vadinama

stačiakampio langas. Atliekant Furjė transformaciją, langų funkcijos panaudotos kaip svorio funkcijos įeinančiam signalui gali vienaip ar kitaip įtakoti skaičiuojamą rezultatą.

Šiame darbe apdorojant signalą naudojama Hanno lango funkcija[12]:

$$w_k = 1 - \cos\left(\frac{k}{N-1}\right) \quad (4.2)$$

Čia

N – išmatuotų signalų kiekis per matavimo periodą, taip pat ir dažnio dedamųjų skaičius;

k – sudaromos signalo masyvo indeksas;

Naudojant šį langą sumažėja dažnių persidengimas [12].

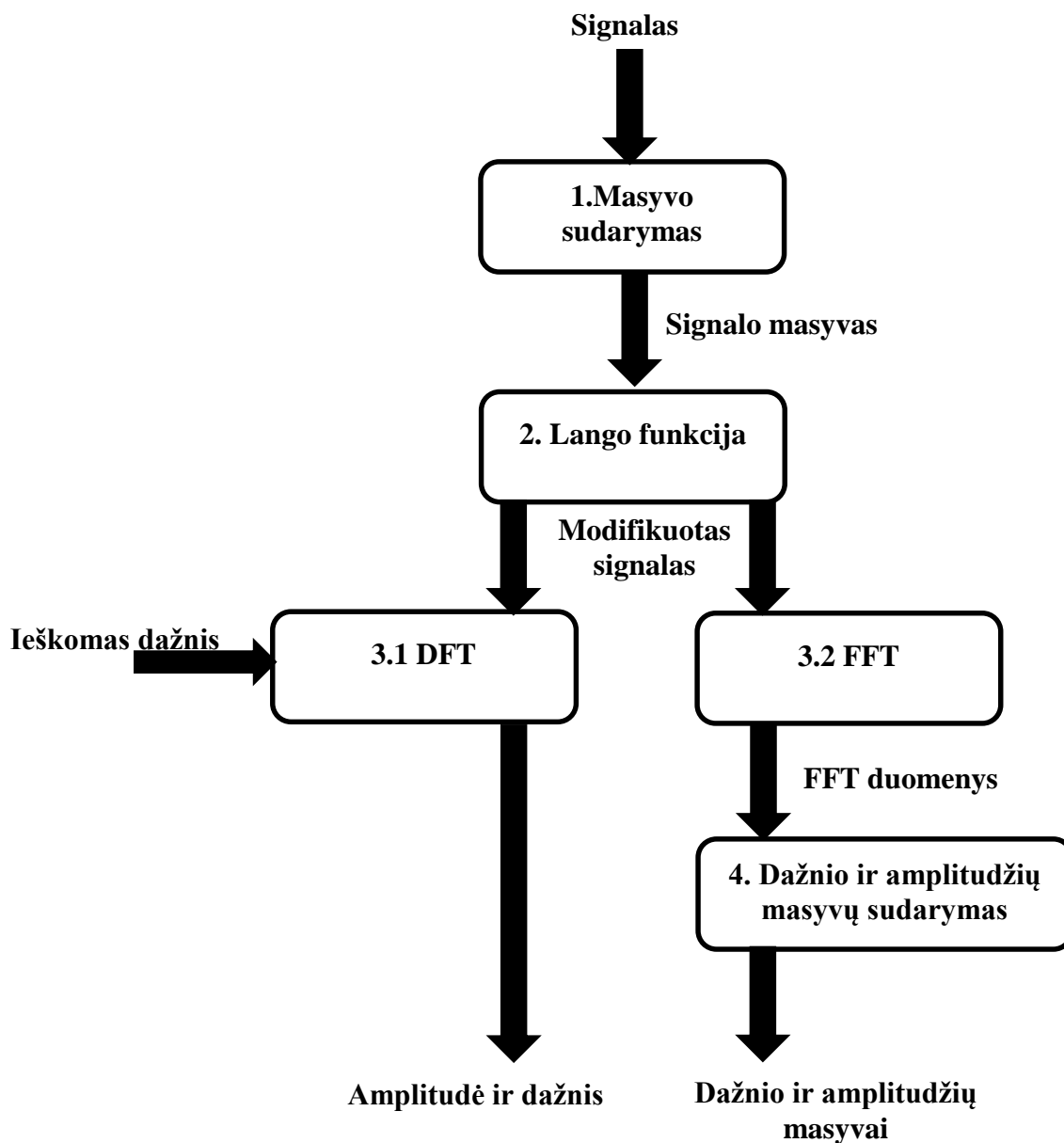
4.2.3 Dažninės analizės realizavimas programoje

Žinant reikalingų funkcijų matematinius modelius, jas galima realizuoti programavimo terpėje. Programos rašymas buvo atliekamas TwinCAT 2 programinėje įrangoje, skirtoje Beckhoff programuojamųjų loginių valdiklių (PLV) programavimui bei konfigūravimui. Joje galima sudaryti programas standartinėmis IEC-61131-3 kalbomis. Programa buvo kuriama naudojant nepriklausomus funkcinis blokus, kiekvienas iš kurių atsako už tam tikrą funkciją, naudoja įėjimo, išėjimo ir vidinius kintamuosius. FFT ir DFT realizavimui buvo naudojamos tik standartinės aritmetinių operacijų ir sinusų bei kosinusų funkcijos. Taip palengvinamas programos eksportavimas į kitą PLV.

Sukurtos programos funkciniai blokai ir ryšiai tarp jų pavaizduoti 4.3 paveiksle.

Programos įėjime paduodami realaus laiko duomenys. Pirmas funkcinis blokas atlieka nustatyto dydžio išmatuotų reikšmių masyvo sudarymą. Šiam masyvui taikoma Hanno lango svorio funkciją, tada jau modifikuotam signalui atliekama Furjė analizė. Tuo atveju, kai reikia paskaičiuoti vieną ar kelias dažnio dedamąsias, naudojama DFT, kitu atveju, kai reikia paskaičiuoti visas galimas signalo dažnio dedamąsias, naudojama FFT. DFT blokas išėjime išduoda dažnį, arčiausią galimą ieškomam dažniui (kadangi signalas diskretinis, spektre skaičiuojami tik tam tikrų

dažnio atskaitų amplitudžių lygiai), kuris apskaičiuojamas kaip $\frac{k}{T}$, k – tai dažnio indeksas, apskaičiuojamas suapvalinus iki sveiko skaičių gautą iš išraiškos $N * F_F / F_S$, kur F_F – ieškomas dažnis, N - išmatuotų signalų kiekis per matavimo periodą, F_S – signalo diskretizavimo dažnis. Parašytos programos svarbiausi fragmentai pateikiti priede 5.



4.3 pav. Programos funkciniai blokai

4.2.4 Programos testavimas

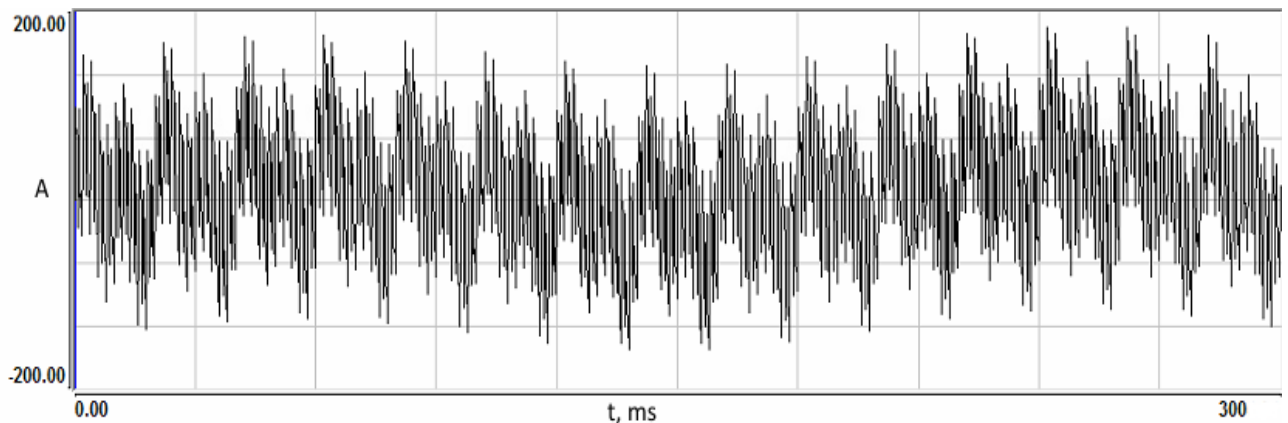
Programos testavimo tikslams buvo sukurtas atskiras funkcinis blokas imituojantis pasirinkto dažnio ir amplitudės sinusinių signalų sumą, kurios algoritmas apibrėžtas šia formule:

$$F_k = \sum_n^{n=m} A_n \sin\left(\frac{k * f_n}{F_s}\right) \quad (4.3)$$

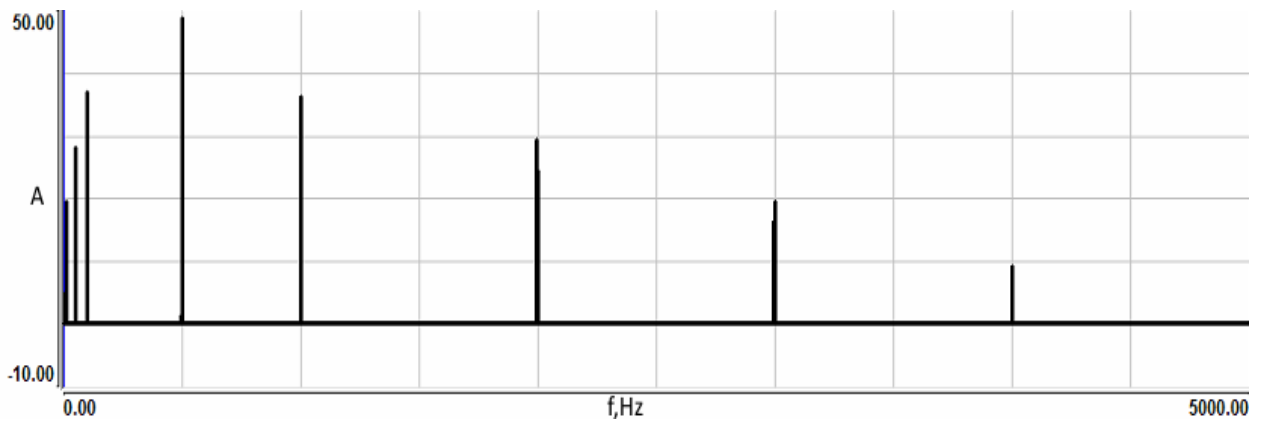
Čia

- F_k – sinusinių signalų sumos reikšmė k-tojoje diskretizavimo atskaitoje;
- m – sumuojamų sinusinių signalų kiekis;
- A_n – n-tojo sinusinės signalo amplitudė;
- k – sudaromos signalo masyvo indeksas;
- f_n – n-tojo sinusinės signalo dažnis;
- F_s – signalo diskretizavimo dažnis;

Taikant šia matematinę išraišką buvo sudarytas signalas iš dešimties skirtingų dažnių ir amplitudžių sinusinių signalų sumos. Gautas signalas buvo išanalizuotas taikant sukurtus FFT ir DFT funkcinis blokus. Analizuojamas signalas laiko atžvilgiu pavaizduotas 4.3 paveiksle, o gautas jo spektras 4.4 paveiksle. Lentelėje 4.5 pateikti bandymo rezultatai. Kadangi FFT ir DFT analizių gauti duomenys nesiskiria, lentelėje pateikti tik FFT analizės duomenys.



4.3 pav. Analizuojamas signalas



4.4 pav. FFT analizės rezultatas – signalo spektras

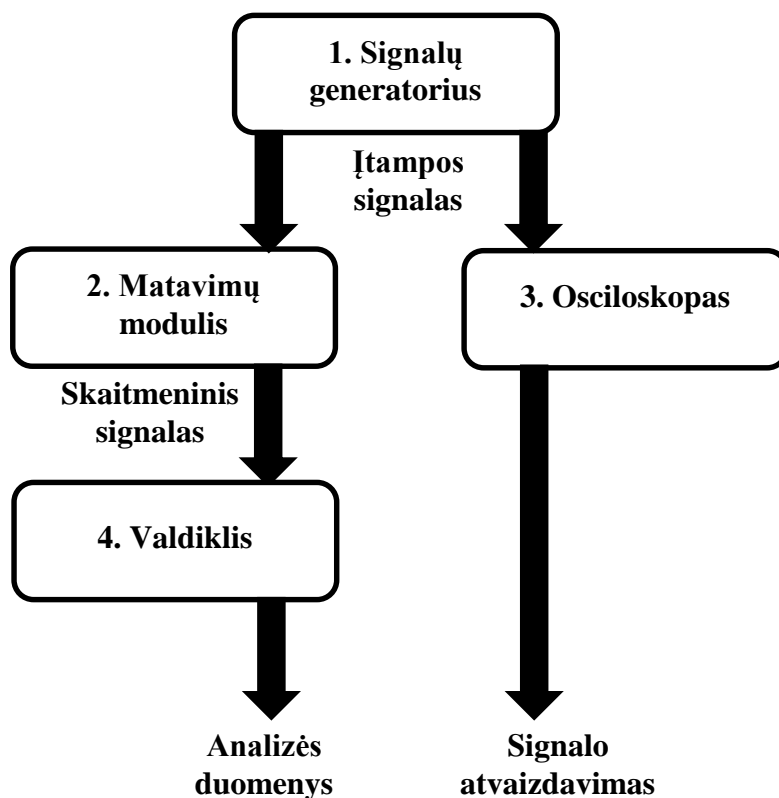
4.5 lentelė. FFT analizės rezultatai

Generuojamo sinusinio signalo dažnis, Hz	Generuojamo sinusinio signalo amplitudė	Atitinkantis gauto spektro dažnis, Hz	Paskaičiuota atitinkamo dažnio amplitudė
1	10	1,068	9,03
5	20	5,035	19,32
50	30	50,049	28,07
100	40	99,945	36,77
500	50	500,03	48,71
500,5	5	500,488	4,78
1000	40	1000,06	36,04
2000	30	1999,96	29,23
3000	20	3000,03	19,49
4000	10	3999,93	9,01

Iš gautų rezultatų galima pastebėti, kad kuo atitinkančios gauto spektro dažnio atskaitos dažnis mažiau skiriasi nuo generuojamo sinusinės signalo dažnio, tuo tiksliau paskaičiuota amplitudė atitinka generuojamą amplitudę. Tai reiškia, kad didinant diskretizavimo taškų skaičių ir/arba mažinant diskretizavimo dažnį didėja ir paskaičiuotos amplitudės dažnio tikslumas. Šiuo eksperimento metu buvo paimti 65536 diskretizavimo taškai, diskretizuojant signalą 10kHz dažniu. Skaičiuojamos amplitudės paklaida neviršija 10%.

4.3 Parinktos matavimo įrangos testavimas

Įrangos testavimas buvo atliktas imituojant signalą generatoriumi Радиоприбор ГЗ-112. Tam kad įsitikinti, jog signalas atitinka užduotajam jis buvo stebimas laiko atžvilgiu osciloskope RIGOL DS1102E. Sudarytas bandymo stendas pavaizduotas 4.5 paveiksle.



4.5 pav. Testavimo stendo schema

Testavimo metu buvo generuojamas skirtingų dažnių sinusinis įtampos signalas. Bandymo rezultatai pateikti lentelėje 4.6.

4.6 lentelė. Bandomo rezultatai

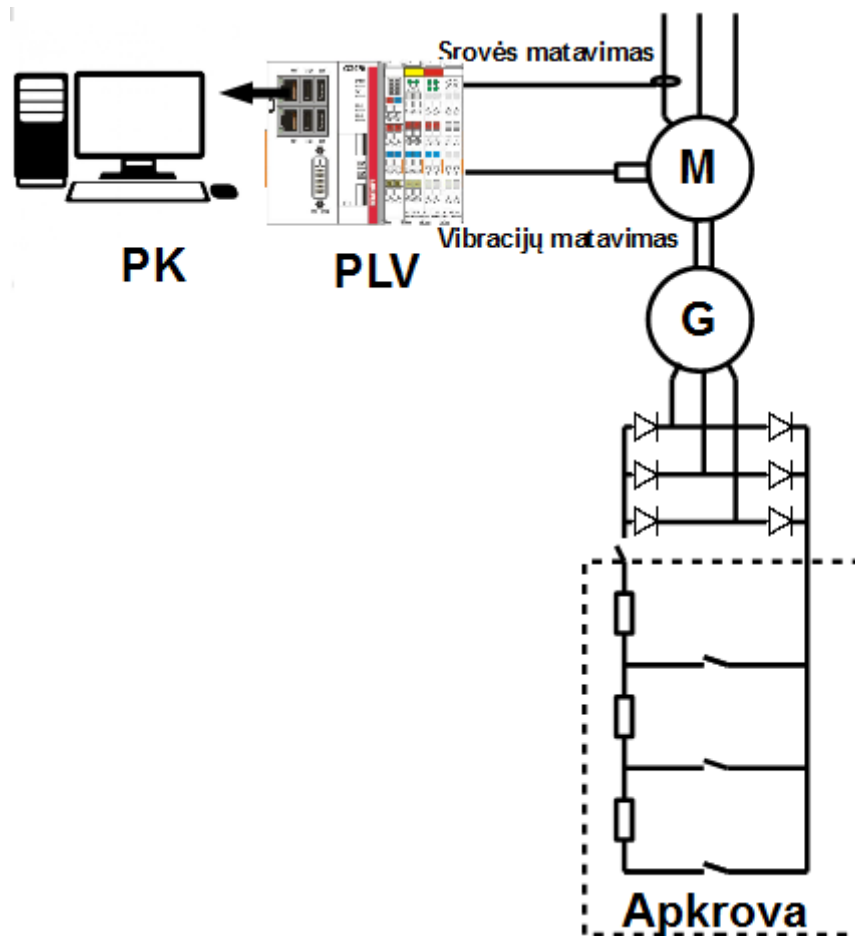
Generuojamo sinusinio signalo dažnis, Hz	Generuojamo sinusinio signalo amplitudė, V	Gauto spektro maksimalios amplitudės atskaitos dažnis, Hz	Paskaičiuota atitinkamo dažnio amplitudė, V
2	3	1,984	2,94
5	3	5,035	2,88
100	3	99,945	2,40
1000	3	1000,06	2,37
2000	3	1999,96	2,81

Šio bandomo rezultatai panašūs į 4.2 punkte aprašyto bandomo rezultatus. Surastos spektro maksimalios amplitudės atskaitos dažnis atitinka generuojamo sinusinio signalo dažniui (su spektro gebos paklaida). Maksimali paklaida padidėjo lyginant su praeitu bandymu iki 20%, tai galima paaiškinti prietaisų matavimo paklaidomis bei generatoriaus išėjimo įtampos nestabilumu.

5 Asinchroninio variklio su defektu eksperimentinis tyrimas

5.1 Asinchroninio variklio su defektu eksperimentinių tyrimo stendas

Asinchroninio variklio elementų būsenos analizės įrangos kompleksą sudaro variklis (5.1 lent.), generatorius, vibracijų daviklis, srovės daviklis, analoginiai – skaitmeniniai keitikliai, valdiklis ir personalinis kompiuteris su programinės įrangos paketu, leidžiančiu redaguoti valdiklio programą ir kaupti duomenis (pav. 5.1, 5.2). Variklio ir generatoriaus pajungimo elektrinė schema pateikta priede 7.



5.1 pav. Eksperimentinio tyrimo stendo schema. PK – personalinis kompiuteris, PLV – valdiklis, M – variklis, G – generatorius.



PK

PLV

M

G

5.2 pav. Eksperimentinių tyrimų stendas. PK – personalinis kompiuteris, PLV – valdiklis, M – variklis, G – generatorius.

5.1 lent. Bandomojo variklio parametrai.

Parametras	Reikšmė
Vardinis galingumas	1,5 kW
Vardinė linijinė įtampa	380 V
Vardinis įtampos dažnis	50 Hz
Polių porų skaičius	1

Asinchroninio variklio techniniai duomenys pateikti lentelėje 5.1. Kaip generatorius naudojama sinchroninė pastoviųjų magnetų trifazė mašina, prie kurios per trifazį įtampos lygintuvą nuosekliai prijungtos trys varžos (kiekvienos varža 40Ω).

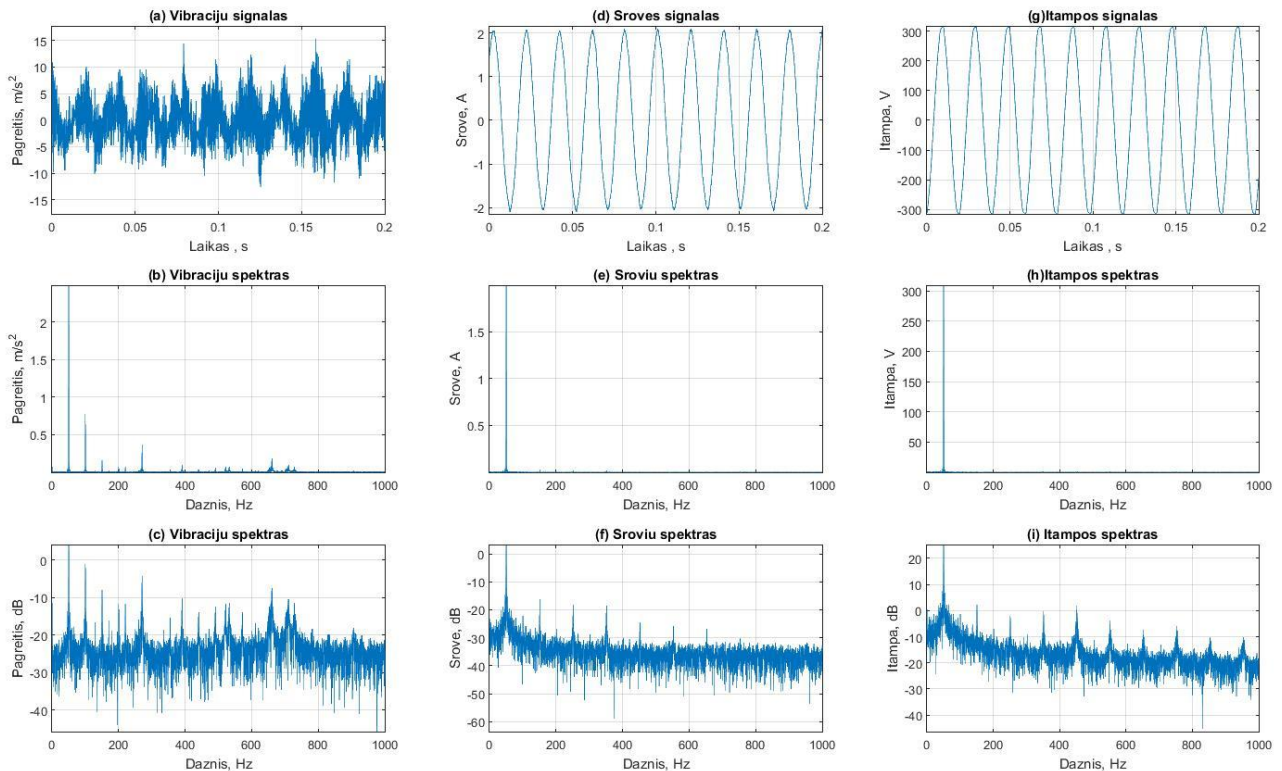
Diagnostinio komplekso fizikinis principas paremtas tuo, kad bet kokie pokyčiai variklio mechaninės ar elektrinės dalies darbe priveda prie magnetinio srauto mašinoje pasikeitimų, taip keičiant ir vartojamą elektros srovę.

Taigi, tam tikrų dažnių dedamųjų srovės spektre atsiradimas arba padidėjimas gali reikšti elektrinės arba mechaninės dalies defektą.

Patogumui gauti vibracijų ir srovės duomenys buvo analizuojami MATLAB programiniu paketu. MATLAB aplinkoje realizuotas programinis kodas, pateiktas priede 6.

5.2 Eksperimentinio tyrimo rezultatai

Pirmas matavimas buvo atliekamas neimituojant jokių gedimų ir be apkrovos. Paveiksle 5.3 pavaizduoti vibracijų pagreičio, vienos fazės srovės ir įtampos reikšmės laiko ir dažnių srityse.



5.3 pav. Variklio be defekto ir be apkrovos parametrai: a) vibracijų pagreičio signalas, b) vibracijų pagreičio spektras, c) vibracijų pagreičio spektras logaritminiame mastelyje, d) vienos fazės srovės signalas, e) vienos fazės srovės spektras, f) vienos fazės srovės spektras logaritminiame mastelyje, g) vienos fazės įtampos signalas, h) vienos fazės įtampos spektras, i) vienos fazės įtampos spektras logaritminiame mastelyje.

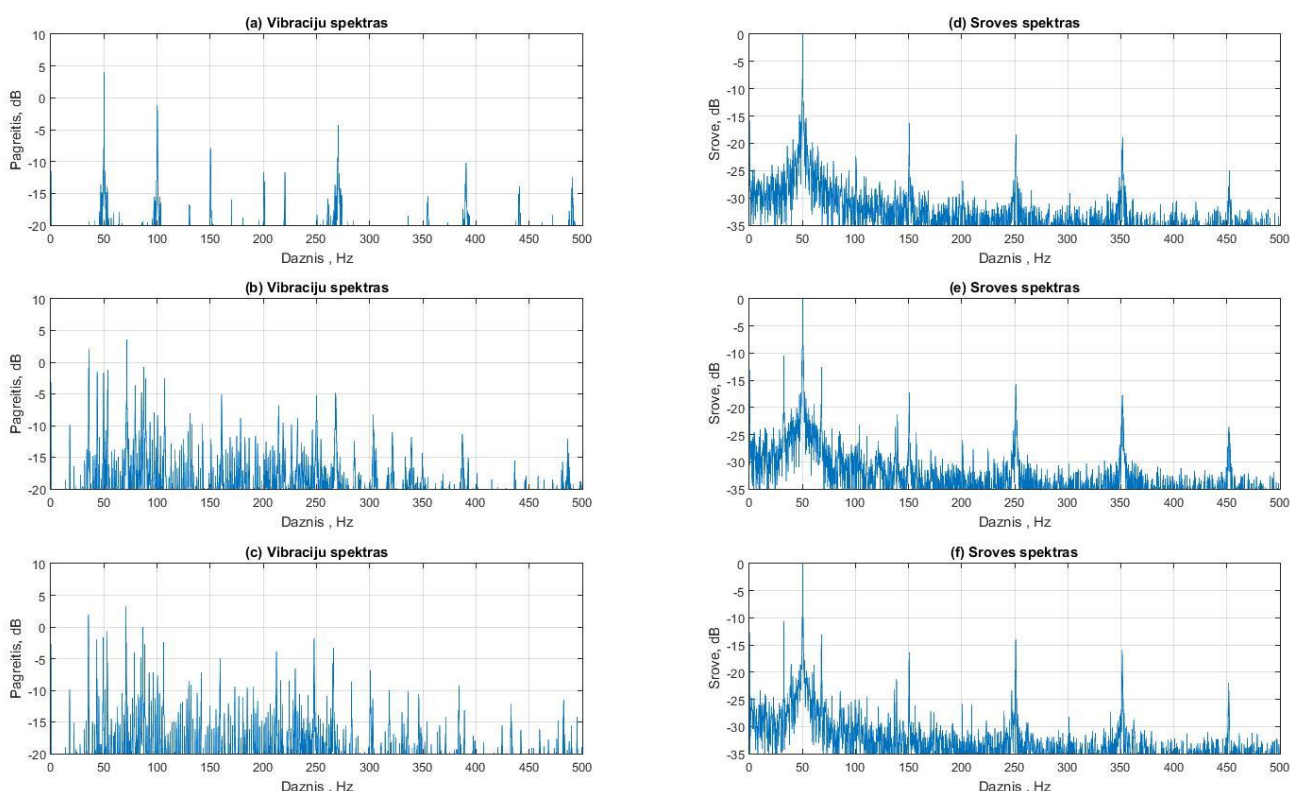
Atsiradus variklio ar maitinimo defektams srovėse ir vibracijose gali atsirasti papildomų virpesių, kuriuos galima aptikti vibracijų bei srovių spektruose.

Kadangi matuojamų parametrų intervalas yra labai platus, tiek virpesių tiek srovių linijiniuose spektruose sunku atskirti kai kurias dažnių dedamąsias, todėl toliau darbe bus vaizduojami spektrai tik logaritminėje skalėje.

5.2.1 Variklis be defektų

Norint nustatyti ir suprasti kaip keičiasi variklio parametrai atsirandant įvairiems variklio ir maitinimo gedimams pirmiausia reikia nustatyti sveiko variklio parametrus, kurie gali būti laikomi etaloniniais. Tuomet bet kuris nukrypimas nuo šių parametrų reiškia pakeitimus sistemoje, kai kurie iš šių pakeitimų gali būti diagnozuojami kaip mechaniniai arba elektriniai gedimai.

Pirmas bandymas buvo atliekamas esant sveikam varikliui be apkrovos, ir su dvejomis skirtingomis apkrovomis (pav. 5.4).



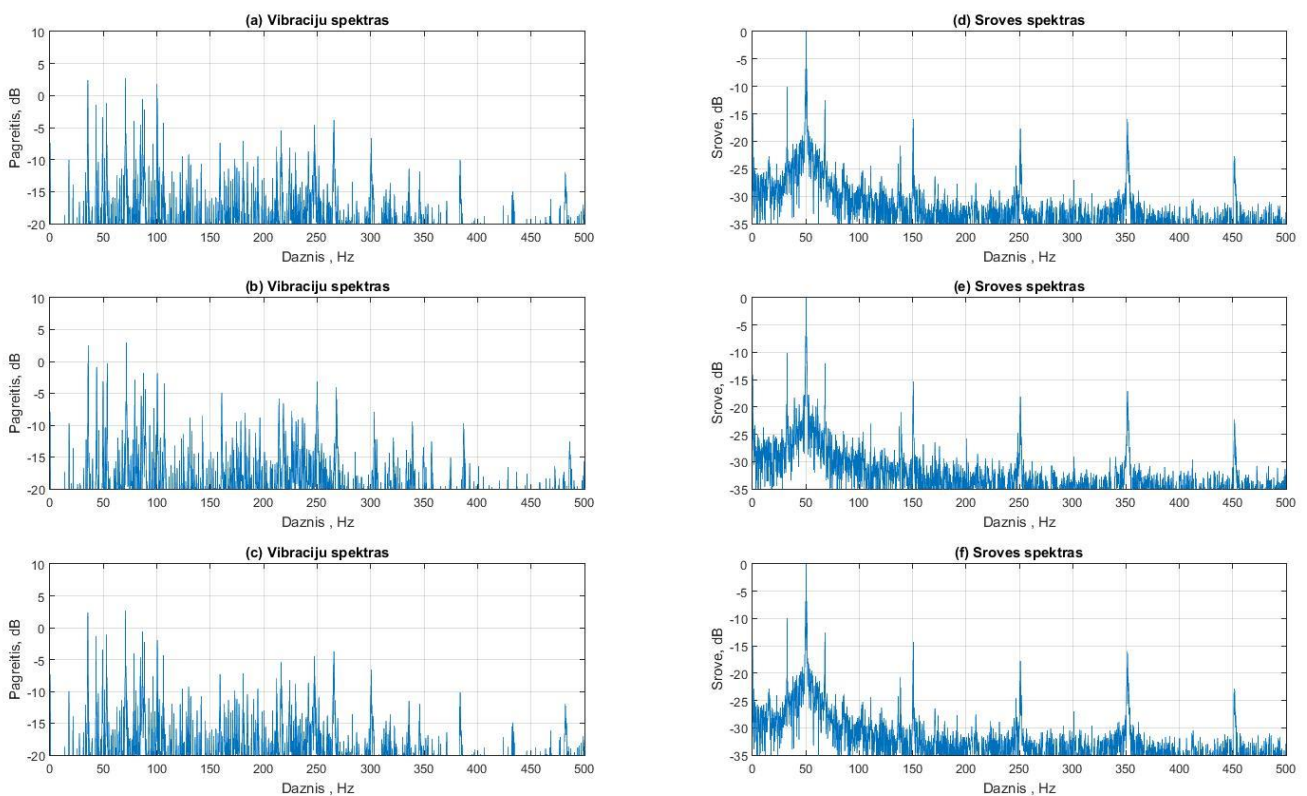
5.4 pav. Variklio be defekto, be apkrovos ir su apkrovomis parametrai: a) vibracijų pagreičio spektras be apkrovos, b) vibracijų pagreičio spektras su 150W apkrova, c) vibracijų pagreičio spektras su 450W apkrova, d) vienos fazės srovės spektras be apkrovos, e) vienos fazės srovės spektras su 150W apkrova, f) vienos fazės srovės spektras su 450W apkrova.

Remiantys vibracijų spektru nustatomas rotoriaus sukimosi dažnis, pagal artimiausios teoriniam dažniui spektro dedamosios dažnį. Be apkrovos rotorius sukasi 50Hz dažniu, su 150W apkrova – 49,7Hz, su 450W apkrova – 49,3Hz. Rotoriaus sukimosi dažnis bus reikalingas apskaičiuojant guolių gedimų žadinamų virpesių dažnius pagal 2.4-2.6 formules.

Žinant variklio be defektų parametrus, su jais galima lyginti tuos pačius parametrus esant defektams. Šiuo darbo metu buvo imituojami 1 elektrinis ir 4 mechaniniai gedimų tipai. Elektrinis gedimas buvo imituojamas sumažinant vienos fazės įtampą taip sukuriant įtampos asimetriją. Vienas iš mechaninių gedimų tipų – rotoriaus masės disbalansas, kiti – skirtingi guolių defektai.

5.2.2 Įtampos asimetrija

Įtampos asimetrija buvo imituojama nuosekliai prijungus varžą prie vienos variklio fazės. Tokiu būdu vienos fazės įtampa buvo sumažinta 5V. Gauti vibracijų ir srovių spektrai prie skirtingų variklio apkrovų pateikti 5.5 paveiksle.



5.5 pav. Variklio esant įtampos asimetrijai be apkrovos ir su apkrovomis parametrai: a) vibracijų pagreičio spektras be apkrovos, b) vibracijų pagreičio spektras su 150W apkrova, c) vibracijų pagreičio spektras su 450W apkrova, d) vienos fazės srovės spektras be apkrovos, e) vienos fazės srovės spektras su 150W apkrova, e) vienos fazės srovės spektras su 450W apkrova.

5.5 paveiksle galima pastebėti, kad vibracijų spektre padidėjo spektrinė dedamoji, lygi dviem rotoriaus sukimosi dažniams (~100 Hz), tuo metu srovių spektre padidėjo trečioji tinklo dažnio harmonika (~150Hz). Šių spektrinių dedamųjų dažniai ir amplitudės pateikti 5.2 lentelėje.

5.2 lentelė. Matavimų rezultatai esant tinklo įtampos asimetrijai.

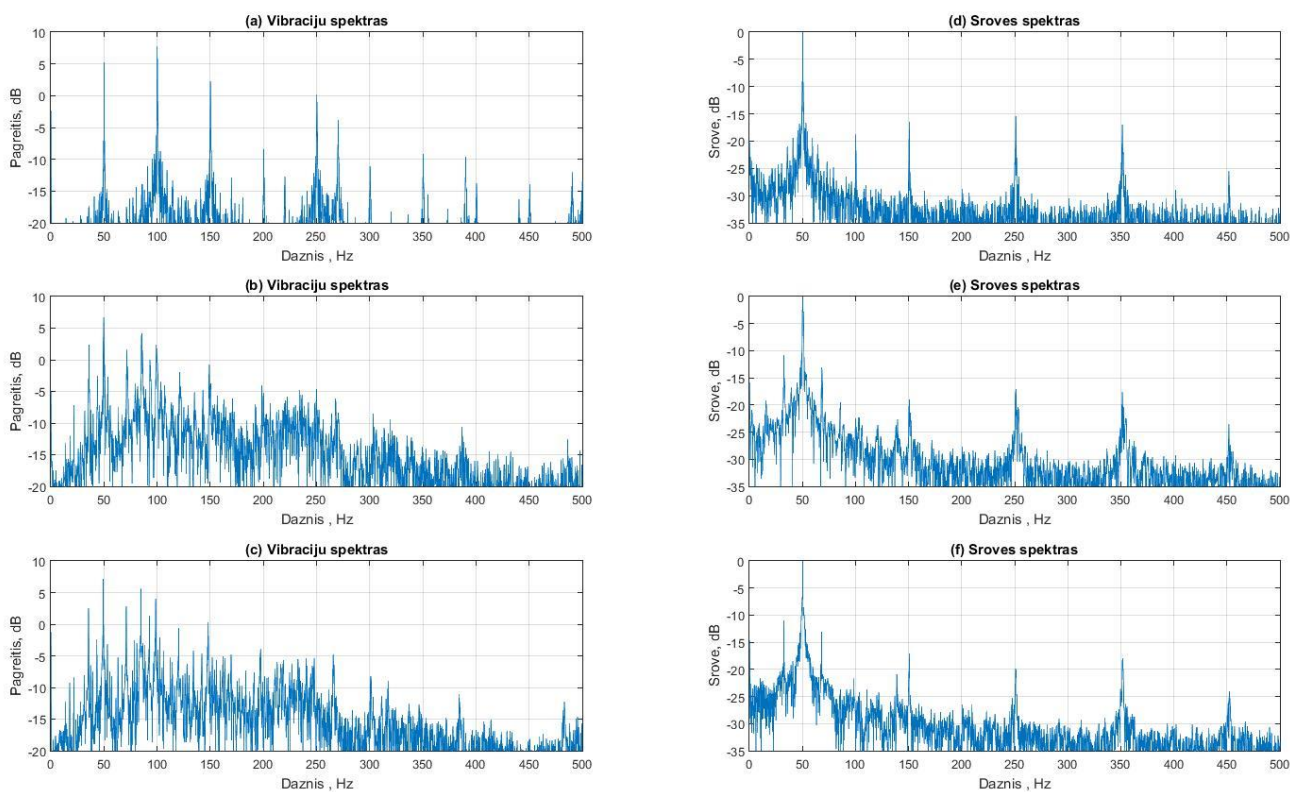
Apkrova, W	Matuojamas parametras	Teorinis defekto dažnis, Hz	Išmatuotas defekto dažnis, Hz	Apskaičiuota išmatuoto dažnio amplitudė	Variklio be defekto išmatuoto dažnio amplitudė
0	Vibracijos	100	100,1	1239 mm/s ²	769 mm/s ²
	Srovė	150	150,6	32 mA	23 mA
150	Vibracijos	99,4	99,5	650 mm/s ²	147 mm/s ²
	Srovė	150	150,6	29,2 mA	18,7 mA
450	Vibracijos	97,9	98,6	644 mm/s ²	191 mm/s ²
	Srovė	150	150,6	30,2 mA	22,5 mA

5.2.3 Rotoriaus masės disbalansas

Disbalanso imitavimui prie variklio aušinimo sparnuotės buvo pritvirtintas papildomas svoris (pav. 5.6). Gauti vibracijų ir srovės duomenys prie skirtingų variklio apkrovų pavaizduoti 5.7 paveiksle.



5.6 pav. Masę pritvirtinta prie variklio aušinimo sparnuotės



5.7 pav. Variklio su rotoriaus disbalansu be apkrovos ir su apkrovomis parametrai: a) vibracijų pagreičio spektras be apkrovos, b) vibracijų pagreičio spektras su 150W apkrova, c) vibracijų pagreičio spektras su 450W apkrova, d) vienos fazės srovės spektras be apkrovos, e) vienos fazės srovės spektras su 150W apkrova, f) vienos fazės srovės spektras su 450W apkrova.

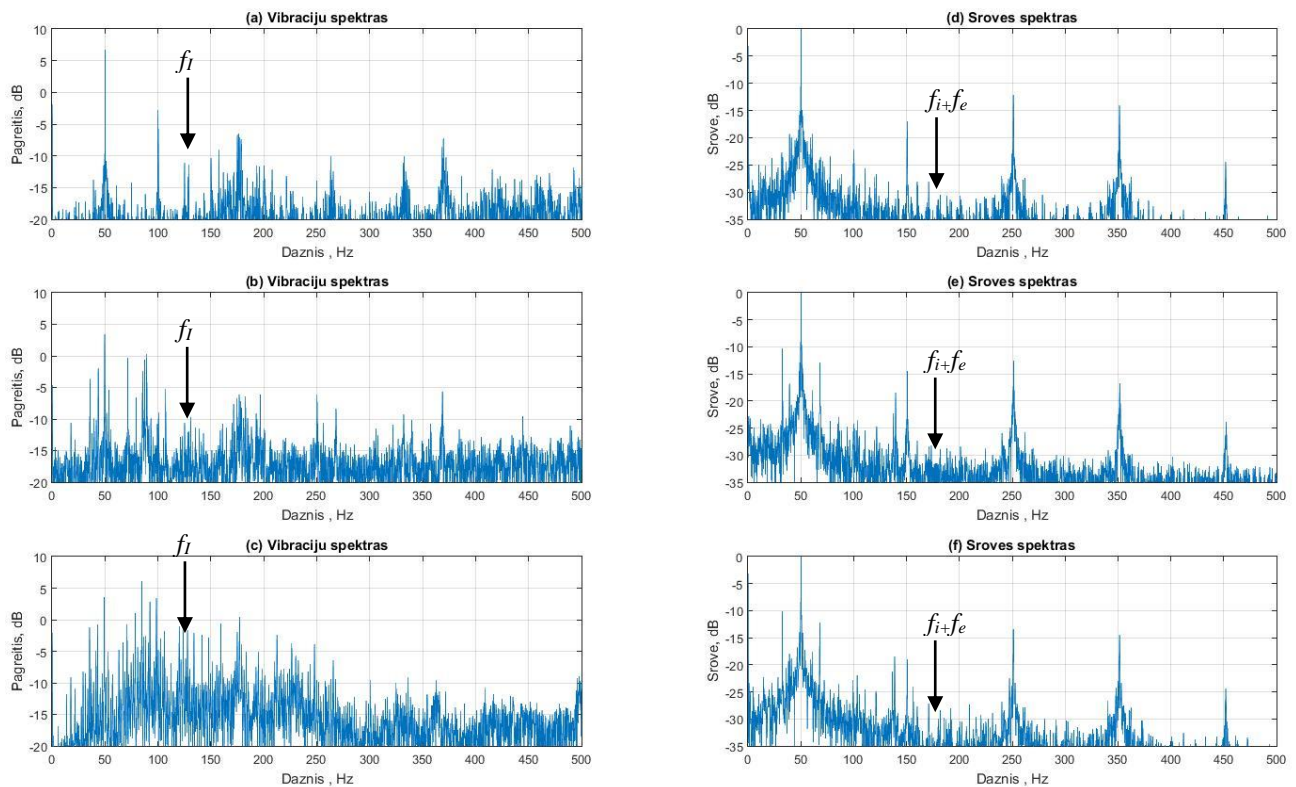
5.6 paveiksle galima pastebėti, kad vibracijų spektre ženkliai išaugo dvigubo sukimosi dažnio dedamoji (~100Hz), o srovės spektre padidėjo dedamoji, kurios dažnis gaunamas sudėjus rotoriaus sukimosi dažnį ir tinklo įtampos dažnį (3.1 formulė) (~100Hz). Šių spektrinių dedamųjų dažniai ir amplitudės pateikti 5.3 lentelėje.

5.3 lentelė. Matavimų rezultatai rotoriaus masės disbalansui

Apkrova, W	Matuojamas parametras	Teorinis defekto dažnis, Hz	Išmatuotas defekto dažnis, Hz	Apskaičiuota išmatuoto dažnio amplitudė	Variklio be defekto išmatuoto dažnio amplitudė
0	Vibracijos	100	100,1	5957 mm/s ²	769 mm/s ²
	Srovė	100	100,3	13,4 mA	4,7 mA
150	Vibracijos	100	99,5	1710 mm/s ²	147 mm/s ²
	Srovė	100	100,1	6,79 mA	1,95 mA
450	Vibracijos	100	98,6	2208 mm/s ²	191 mm/s ²
	Srovė	100	99,5	6,98 mA	3,02 mA

5.2.4 Išorinio žiedo defektas

Guolio išorinio žiedo gedimui imituoti buvo pažeistas išorinio žiedo riedėjimo takelis, užnešus vietinio įdubimo formos defektą, naudojant rankinį frezavimo įrenginį. Gauti vibracijų ir srovės duomenys prie skirtingų variklio apkrovų pavaizduoti 5.8 paveiksle.



5.8 pav. Variklio su defektiniu guolio (išorinio žiedo defektas) be apkrovos ir su apkrovomis parametrai: a) vibracijų pagreičio spektras be apkrovos, b) vibracijų pagreičio spektras su 150W apkrova, c) vibracijų pagreičio spektras su 450W apkrova, d) vienos fazės srovės spektras be apkrovos, e) vienos fazės srovės spektras su 150W apkrova, e) vienos fazės srovės spektras su 450W apkrova.

Remiantys 2.4 formule ir guolio konstrukcija bei jo detalių išmatavimais buvo surasti išorinio žiedo riedėjimo takelio žadinami virpesių dažniai – 128,7Hz, esant 50Hz rotoriaus sukimosi dažniui, 127,9Hz, esant 49,7Hz rotoriaus sukimosi dažniui ir 126,8Hz, esant 49,3Hz rotoriaus sukimosi dažniui. Taip pat remiantys 3.2 formule, apskaičiuoti srovės spektrinių dedamųjų, kurias įtakoja gedimas, dažniai - 178,7Hz, esant 50Hz rotoriaus sukimosi dažniui, 177,9Hz, esant 49,7Hz rotoriaus sukimosi dažniui ir 176,8Hz, esant 49,3Hz rotoriaus sukimosi dažniui.

Defekto žadinami teoriniai ir išmatuoti dažniai ir jų amplitudės pateiktos 5.4 lentelėje.

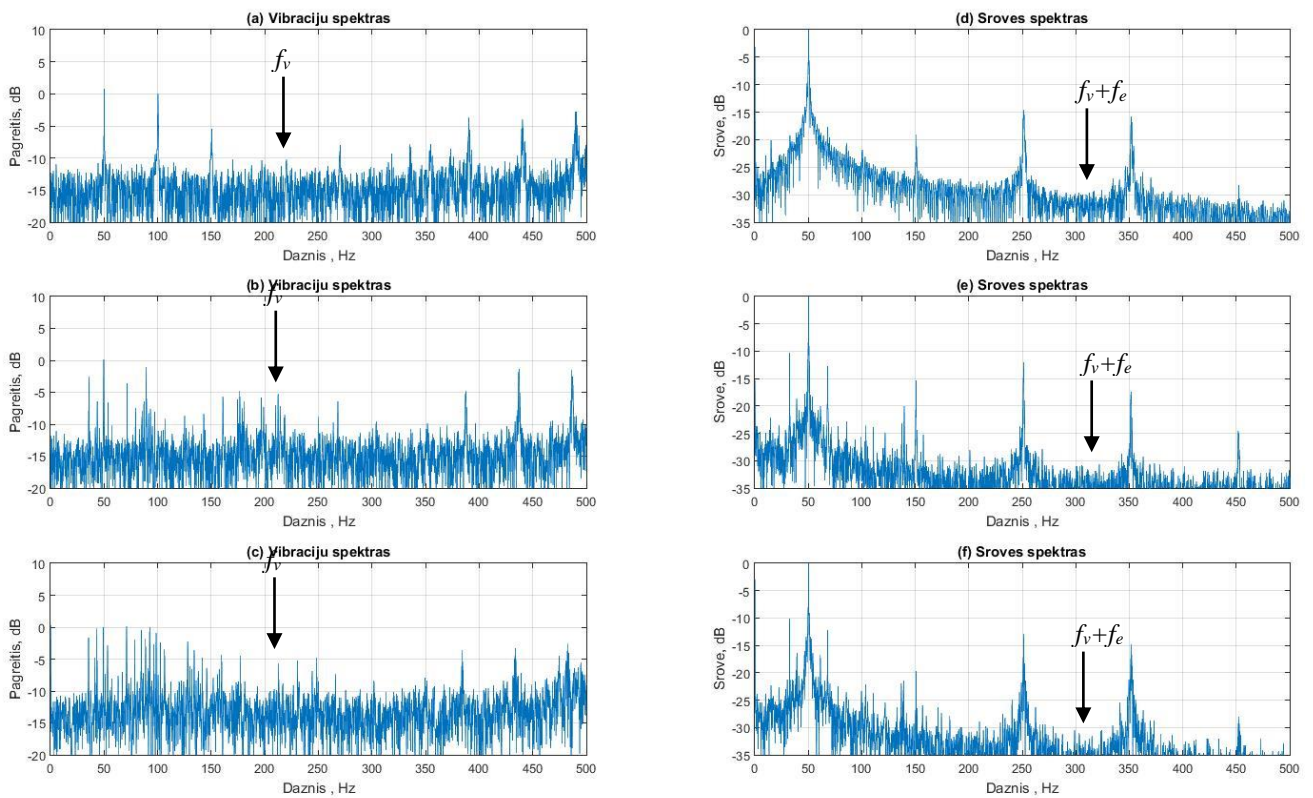
5.4 lentelė. Matavimų rezultatai esant guolio išorinio žiedo pažeidimui

Apkrova, W	Matuojamas parametras	Teorinis defekto dažnis, Hz	Išmatuotas defekto dažnis, Hz	Apskaičiuota išmatuoto dažnio amplitudė	Variklio be defekto išmatuoto dažnio amplitudė
0	Vibracijos	128,7	128,9	63,1 mm/s ²	18,6 mm/s ²
	Srovė	178,7	100,3	1,95 mA	0,6 mA
150	Vibracijos	127,9	99,5	288,5 mm/s ²	67,6 mm/s ²
	Srovė	178,1	100,1	2,93 mA	1,7 mA
450	Vibracijos	126,9	98,6	660,7 mm/s ²	69,2 mm/s ²
	Srovė	177,1	99,5	3,19 mA	1,87 mA

5.2.5 Vidinio žiedo defektas

Guolio vidinio žiedo gedimui imituoti buvo pažeistas vidinio žiedo riedėjimo takelis užnešus vietinio įdubimo formos defektą, naudojant rankinį frezavimo įrenginį. Gauti vibracijų ir srovės duomenys prie skirtingų variklio apkrovų pavaizduoti 5.9 paveiksle.

Remiantys 2.5 formule ir guolio konstrukcija bei jo detalių išmatavimais buvo surasti vidinio žiedo riedėjimo takelio žadinami virpesių dažniai – 221,3Hz, esant 50Hz rotoriaus sukimosi dažniui, 220Hz, esant 49,7Hz rotoriaus sukimosi dažniui ir 218,2Hz, esant 49,3Hz rotoriaus sukimosi dažniui. Taip pat remiantys 3.3 formule, apskaičiuoti srovės spektrinių dedamųjų, kurias įtakoja gedimas, dažniai - 321,3Hz, esant 50Hz rotoriaus sukimosi dažniui, 319,7Hz, esant 49,7Hz rotoriaus sukimosi dažniui ir 317,5Hz, esant 49,3Hz rotoriaus sukimosi dažniui.



5.9 pav. Variklio su defektiniu guolio (vidinio žiedo defektas) be apkrovos ir su apkrovomis parametrai: a) vibracijų pagreičio spektras be apkrovos, b) vibracijų pagreičio spektras su 150W apkrova, c) vibracijų pagreičio spektras su 450W apkrova, d) vienos fazės srovės spektras be apkrovos, e) vienos fazės srovės spektras su 150W apkrova, e) vienos fazės srovės spektras su 450W apkrova.

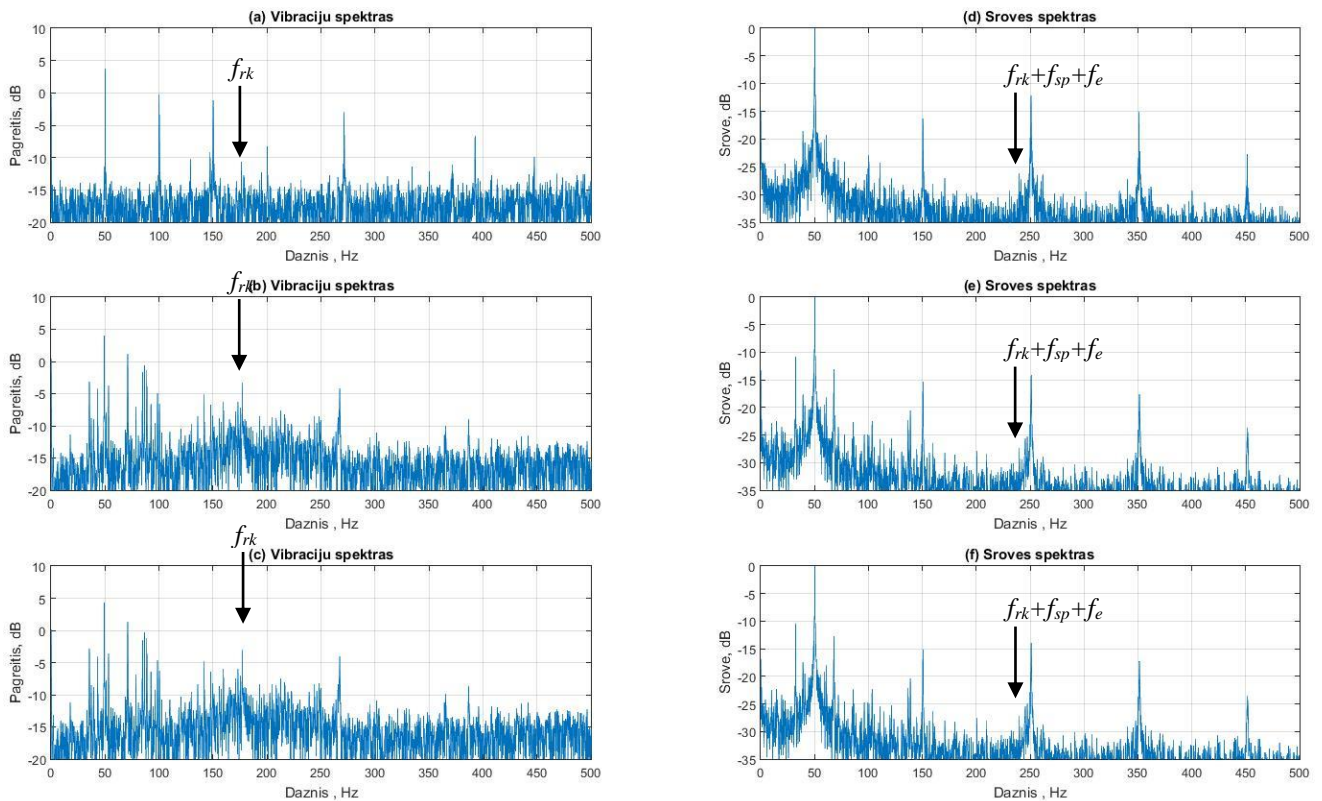
Defekto žadinami teoriniai ir išmatuoti dažniai ir jų amplitudės pateiktos 5.5 lentelėje.

5.5 lentelė. Matavimų rezultatai esant guolio vidinio žiedo pažeidimui

Apkrova, W	Matuojamas parametras	Teorinis defekto dažnis, Hz	Išmatuotas defekto dažnis, Hz	Apskaičiuota išmatuoto dažnio amplitudė	Variklio be defekto išmatuoto dažnio amplitudė
0	Vibracijos	221,3	220	87,1 mm/s ²	46,8 mm/s ²
	Srovė	321,3	317	1,15 mA	0,63 mA
150	Vibracijos	220	218	158 mm/s ²	89 mm/s ²
	Srovė	319,3	322	1,35 mA	0,89 mA
450	Vibracijos	217,2	212,8	398,1 mm/s ²	97,7 mm/s ²
	Srovė	317,5	323,5	1,34 mA	0,89 mA

5.2.6 Riedėjimo kūno defektas

Guolio riedėjimo kūno gedimui imituoti buvo pažeistas vienas guolio rutuliukas užnešus vietinio įdubimo formos defektą, naudojant rankinį frezavimo įrenginį. Gauti vibracijų ir srovės duomenys prie skirtingų variklio apkrovų pavaizduoti 5.10 paveiksle.



5.10 pav. Variklio su defektiniu guolio (riedėjimo kūno defektas) be apkrovos ir su apkrovomis parametrai: a) vibracijų pagreičio spektras be apkrovos, b) vibracijų pagreičio spektras su 150W apkrova, c) vibracijų pagreičio spektras su 450W apkrova, d) vienos fazės srovės spektras be apkrovos, e) vienos fazės srovės spektras su 150W apkrova, e) vienos fazės srovės spektras su 450W apkrova.

Remiantys 2.6 formule ir guolio konstrukcija bei jo detalių išmatavimais buvo surasti riedėjimo kūno žadinami virpesių dažniai – 175,6Hz, esant 50Hz rotoriaus sukimosi dažniui, 174,6Hz, esant 49,7Hz rotoriaus sukimosi dažniui ir 173,2Hz, esant 49,3Hz rotoriaus sukimosi dažniui. Taip pat remiantys 3.4 formule, apskaičiuoti srovės spektrinių dedamųjų, kurias įtakoja gedimas, dažniai – 244,1Hz, esant 50Hz rotoriaus sukimosi dažniui, 242,9Hz, esant 49,7Hz rotoriaus sukimosi dažniui ir 241,4Hz, esant 49,3Hz rotoriaus sukimosi dažniui.

Defekto žadinami teoriniai ir išmatuoti dažniai ir jų amplitudės pateiktos 5.6 lentelėje.

5.6 lentelė. Matavimų rezultatai esant guolio riedėjimo kūno pažeidimui

Apkrova, W	Matuojamas dydis	Teorinis dažnis	Išmatuotas dažnis	Amplitudė	Sveiko variklio amplitudė
0	Vibracijos	175,6	176,4	75,9 mm/s ²	5,37 mm/s ²
	Srovė	244,1	245,7	2,04 mA	1,04 mA
150	Vibracijos	174,6	177,3	398,1 mm/s ²	97,7 mm/s ²
	Srovė	238,9	245,4	3,02 mA	1,58 mA
450	Vibracijos	173,2	177,3	416,9 mm/s ²	79,4 mm/s ²
	Srovė	237,4	245,4	3,16 mA	1,58 mA

5.3 Eksperimentinių rezultatų apibendrinimas

Atsižvelgiant į gautus eksperimentų rezultatus galima sakyti, kad sukurta vibracijų matavimo ir analizės sistema teisingai atlieka numatytą darbą. Elektriniai ir mechaniniai defektai iššaukia atitinkamų vibracijos spektro dedamųjų pakeitimus lyginant jas su tomis pačiomis dedamosiomis gautomis matuojant variklio be defektų vibracijas ir sroves. Šie pasikeitimai pastebimi tiek varikliui dirbant su apkrova, tiek be jos. Šių spektrinių dedamųjų teoriniai dažniai nežymiai skiriasi nuo gautų eksperimentiniu būdu. Šiuos nesutapimus galima paaiškinti variklio greičio nepastovumu, guolių riedėjimo kūnų slydimu ir matavimo be apskaičiavimo paklaidomis. Remiantis [17] [18] literatūros šaltiniais, galima teigti, jog toks dažnių nesutapimas tarp teorinių apskaičiavimu ir matavimu yra įprastas vibracijų diagnostikoje.

Analizuojant gautus srovės ir vibracijų diagnostikos duomenis, matoma, kad srovės dydžiai charakteringuose dažniuose koreliuoja su vibracijomis, tačiau jų pasikeitimai yra mažesni, nei vibracijų spektre. Dėl to analizuojant sroves gali būti sunkiau diagnozuoti defekto degradavimą.

Visi imituoti mechaniniai gedimai iššaukia skirtingų dažnių vibracijų ir srovių dedamųjų pasikeitimus, todėl analizuojant tiek vibracijas, tiek sroves galima diagnozuoti ne tik gedimą, bet ir jo tipą. Įtampos asimetrijos ir rotoriaus masės disbalanso įtakojami vibracijų spektro dažniai yra arti vienas kito (dėl to kad variklio apsisukimų dažnis artimas maitinimo tinklo įtampos dažniui), tačiau šiuos gedimus galima atskirti pagal tos dedamosios pasikeitimo dydį – esant rotoriaus disbalansu jis ženkliai didesnis, negu esant tinklo asimetrijai. Tuo tarpu srovėse šie gedimai įtakoja skirtingų dažnių spektro dedamąsias.

Išvados

1. Darbe apžvelgti tokie asinchroninio variklio vibracijų variklyje prigimtis ir atsiradimo priežastys. Paaiškinta kaip stebimos vibracijos, kaip jos analizuojamos ir kaip pagal šią analizę galima nusakyti variklio būseną.

Nustatytos variklio vibracijos ir srovės signalų priklausomybės nuo gedimų. Remiantis šiomis priklausomybėmis galima teigti, jog apžvelgtų variklio defektų įtakojamų spektrinių dedamųjų atpažinimui užtenka žinoti variklio parametrus, tai reiškia kad šie dažniai gali būti gauti neatliekant papildomų variklio bandymų.

2. Suprojektuota ir sukurta sistema, leidžianti stebėti ar analizuoti variklio vibracijas ir srovę. Atlikti įrangos bandomai parodo, kad ji gali būti taikoma keliamų tikslų įgyvendinimui (vibracijų ir sroviu analizavimui). Analizavimo programa sukurta taip, kad galima būtų keisti analizės parametrus, prisitaikant prie keliamų reikalavimų ar taikant naują funkcionalumą. Programa parašyta standartinėmis IEC-61131-3 programavimo kalbomis, todėl gali būti adaptuojama skirtingiems valdikliams.

3. Norint nustatyti ar mechaniniai virpesiai, atsiradę dėl mašinos defektų koreliuoja su srovėje atsiradusiais virpesiais, buvo atlikti bandymai kurių metu buvo matuojamos ir analizuojamos variklio vibracijos, bei srovės, varikliui dirbant su skirtingomis apkrovomis ir skirtingais defektais.

Gauti rezultatai rodo, kad vibracijų ir srovių virpesiai, atsiradę dėl skirtingų defektų koreliuoja tarpusavyje, todėl atliekant srovės analizę, galima gauti panašius duomenys apie gedimą, kaip ir analizuojant vibracijas. Tačiau srovės pasikeitimai yra mažesni, negu vibracijų, dėl to, analizuojant sroves, gali būti sunku nustatyti defekto degradavimą.

Naudotos literatūros sąrašas

1. Bakhri, S.; Ertugrul, N.; Soong, W.L.; Al-Sarawi, S., Investigation and development of a real-time on-site condition monitoring system for induction motors [interaktyvus] [žiūrėta 2014 m. Gegužės 25d.]. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/icp.jsp?arnumber=4548089>
2. Tsyarkin, M., Induction motor condition monitoring: Vibration analysis technique - A practical implementation [interaktyvus] [žiūrėta 2014 m. Gegužės 25d.]. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/icp.jsp?arnumber=5994629>
3. Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов, 1987
4. IRD company, Обнаружение дефектов подшипников качения [interaktyvus] [žiūrėta 2014 m. Gegužės 25d.]. Prieiga per internetą: http://vibration.ru/obnar_defekt.shtml
5. Русов В.А. "Спектральная вибродиагностика" [interaktyvus] [žiūrėta 2014 m. Gegužės 25d.]. Prieiga per internetą: <http://vibrocenter.ru/book8.htm>
6. Kostrauskas P., Asinchroninės elektros mašinos, "Technologija", 2004.
7. Diskrečioji Furjė transformacija [interaktyvus] [žiūrėta 2015 m. Sausio 17d.]. Prieiga per internetą: https://lt.wikipedia.org/wiki/Diskrečioji_Furjė_transformacija
8. А.В. Барков, Н.А. Баркова, Интеллектуальные системы мониторинга и диагностики машин по вибрации, Sankt Peterburgas, 1999 [interaktyvus] [žiūrėta 2015 m. Sausio 17d.]. Prieiga per internetą: <http://www.vibrotek.ru/russian/biblioteka/book16>
9. У. М. Сиберт. Цепи сигналы системы 1, Москва, 1988
10. Алгоритмы быстрого преобразования Фурье FFT (fast Fourier transform). Принцип построения [interaktyvus] [žiūrėta 2015 m. Sausio 17d.]. Prieiga per internetą: <http://www.dsplib.ru/content/fft/fft.html>
11. Split-radix FFT algorithm [interaktyvus] [žiūrėta 2015 m. Sausio 17d.]. Prieiga per internetą: http://en.wikipedia.org/wiki/Split-radix_FFT_algorithm
12. Hann function [interaktyvus] [žiūrėta 2015 m. Sausio 17d.]. Prieiga per internetą: http://en.wikipedia.org/wiki/Hann_function
13. Barzdaitis Vytautas, Činikas Gintautas, Rotorinių mašinų monitoringas ir diagnostika : monografija, Kaunas : Technologija, 1998.

14. П.А. Ряполов, В.В Рыженко. Диагностика асинхронных электродвигателей на основе спек-трального анализа тока статора. [interaktyvus] [žiūrėta 2015 m. Gegužės 25d.]. Prieiga per internetą: <http://www.cs-alternativa.ru/text/2104>
15. S. Nandi, H. A. Toliyat, Condition monitoring and fault diagnosis of electrical machine – a review , vol. 1, Phoenix, AZ, Oct. 1999.
16. Потапов, Смердев. Устройство диагностирования шарикоподшипников электрической машины. [interaktyvus] [žiūrėta 2015 m. Gegužės 25d.]. Prieiga per internetą: <http://patentdb.su/4-1107220-ustrojstvo-diagnostirovaniya-sharikopodshipnikov-ehlektricheskoyj-mashiny.html>
17. Обнаружение дефектов подшипников качения. [interaktyvus] [žiūrėta 2015 m. Gegužės 25d.]. Prieiga per internetą: http://vibration.ru/obnar_defekt.shtml
18. Didžiokas Rimantas, Rotorinių mašinų dinamikos tyrimai ir gedimų prevencija, 2006
19. Rodriguez, I., Bearing Damage Detection of the Induction Motors using Current Analysis, Univ. de Carabobo. [interaktyvus] [žiūrėta 2015 m. Gegužės 25d.]. Prieiga per internetą:
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4104541&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fexpls%2Ficp.jsp%3Farnumber%3D4104541>
20. Randy R. Schoen. Motor bearing damage detection using stator current monitoring.
21. Pineda-Sanchez, M. Motor condition monitoring of induction motor with programmable logic controller and industrial network. Univ. Politec. de Valencia, Valencia. [interaktyvus] [žiūrėta 2015 m. Gegužės 25d.]. Prieiga per internetą:
22. Tsytkin, M. Induction motor condition monitoring: Vibration analysis technique - A practical implementation. Philadelphia. [interaktyvus] [žiūrėta 2015 m. Gegužės 25d.]. Prieiga per internetą:
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5994629&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fexpls%2Ficp.jsp%3Farnumber%3D5994629>
23. Barzdaitis Vytautas, Mašinų elementų diagnostika, Kaunas, Technologija 2008
24. Jonušas Remigijus, Rotorinių sistemų dinamika ir diagnostika, Kaunas, Technologija 2001
25. Krishna, Merugu Siva Rama. Fault diagnosis of induction motor using Motor Current Signature Analysis, Andhra Pradesh, India. [interaktyvus] [žiūrėta 2015 m. Gegužės 25d.]. Prieiga per internetą:
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6528849&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fexpls%2Ficp.jsp%3Farnumber%3D6528849>

26. Zagirnyak, M. Induction motor diagnostic system based on spectra analysis of current and instantaneous power signals. Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi Nat. Univ., Kremench, Ukraine. [interaktyvus] [žiūrėta 2015 m. Gegužės 25d. .]. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6950721&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fexpls%2Ficp.jsp%3Farnumber%3D6950721>
27. А.В. Барков, Н.А. Баркова, Интеллектуальные системы мониторинга и диагностики машин по вибрации. [interaktyvus] [žiūrėta 2015 m. Sausio 17d.]. Prieiga per internetą: <http://www.vibrotek.ru/russian/biblioteka/book16>
28. Jonušas Remigijus, Rotorinių sistemų virpesių šaltiniai, jų mažinimo būdai ir priemonės, Kaunas, Technologija 1991

Priedai

1 priedas. Vibracijų jutiklio Monitran MTN/2200C techniniai duomenys.



MTN/2200C Series

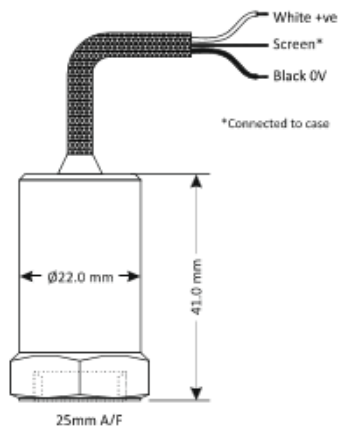
General purpose industrial accelerometer

General purpose top-entry constant current accelerometer with isolated AC outputs. Made from robust stainless steel throughout for long term vibration analysis in harsh environments. Internal electronics are isolated to minimise noise with increased bias voltage stability. Sealed to IP67 and includes integral stainless steel overbraided ETFE cable. Available with a wide range of mountings.

MTN2200C



Dimensions



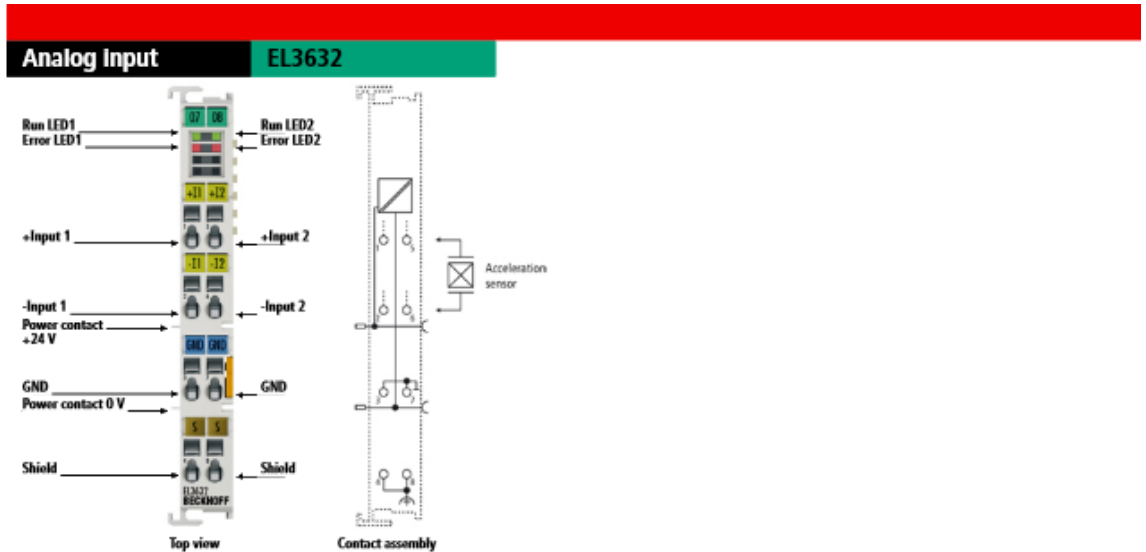
Applications

- Paper machinery
- General industry
- Pumps, fans, etc
- Air handling units
- Machine tools

Technical

Standard sensitivity	100mV/g $\pm 10\%$ nominal @ 80Hz
Frequency response	2Hz to 10kHz $\pm 5\%$ (-3dB @ 0.8Hz)
Mounted base resonance	18kHz (nominal)
Isolation	Base isolated
Dynamic range	$\pm 80g$
Transverse sensitivity	Less than 5%
Electrical noise	0.1mg max
Current range	0.5 to 8mA
Temperature range	-55 to 140°C
Bias voltage	12V DC (nominal)
Case material	Stainless steel
Cable	Integral stainless steel overbraided ETFE
Standard cable length	5m
Maximum cable length	100m
Mounting torque	8Nm
Weight	110g (nominal)
Sealing	IP67

2 priedas. Matavimo modulio Beckhoff EL3632 techniniai duomenys.



EL3632 | 2-channel analog input terminal for Condition Monitoring (IEPE)

Accelerometers with IEPE interface can be directly connected to the EL3632 EtherCAT Terminal. The measuring signals are analysed on the PC via the TwinCAT library. This enables all benefits of the PC platform, such as performance and flexibility, to be fully utilised. Alternatively, custom software can be used for the analysis. The terminal can be adapted to individual requirements through configurable filters and supply currents.

A galvanically isolated measurement configuration can be achieved using the EL9560. Through interfacing via EtherCAT and support of the distributed clocks function, the measurement results – and any detected defects – can be precisely allocated to an axis position.

Technical data	EL3632
Number of inputs	2
Technology	Condition Monitoring (IEPE), oversampling recording
Signal voltage	IEPE constant current supply and recording of modulated AC voltage
Distributed clocks	yes
Input filter limit frequency	analog parameterisable 5th order low-pass filter up to 25 kHz, typically 0.05 Hz high-pass filter
Conversion time	20 µs (max. 50 ksamples/s)
Measuring range	default ±5 V up to 25 kHz, ±250 mV up to 10 Hz
Power supply Uv	24 V DC via power contacts
Sensor voltage	max. power contact voltage less 1 V
Sensor state monitoring	yes, through monitoring of the bias voltage
Supply current IEXCIE	typ. 2/4/8 mA (separately configurable for both channels)
Input	single-ended
Resolution	16 bit (incl. sign)
Measuring error	< ±0.5 % (DC; relative to full scale value)
Current consumption power contacts	24 V, typ. 20 mA + load
Current consumption E-bus	typ. 220 mA
Special features	automatic anti-aliasing function, wire breakage detection
Weight	approx. 60 g
Operating/storage temperature	0...+55 °C/-25...+85 °C
Relative humidity	95 %, no condensation
Vibration/shock resistance	conforms to EN 60068-2-6/EN 60068-2-27
EMC immunity/emission	conforms to EN 61000-6-2/EN 61000-6-4
Protect. class/installation pos.	IP 20/see documentation
Approvals	CE, UL, Ex

3 priedas. Srovės jutiklio LEM IT 60-S techniniai duomenys



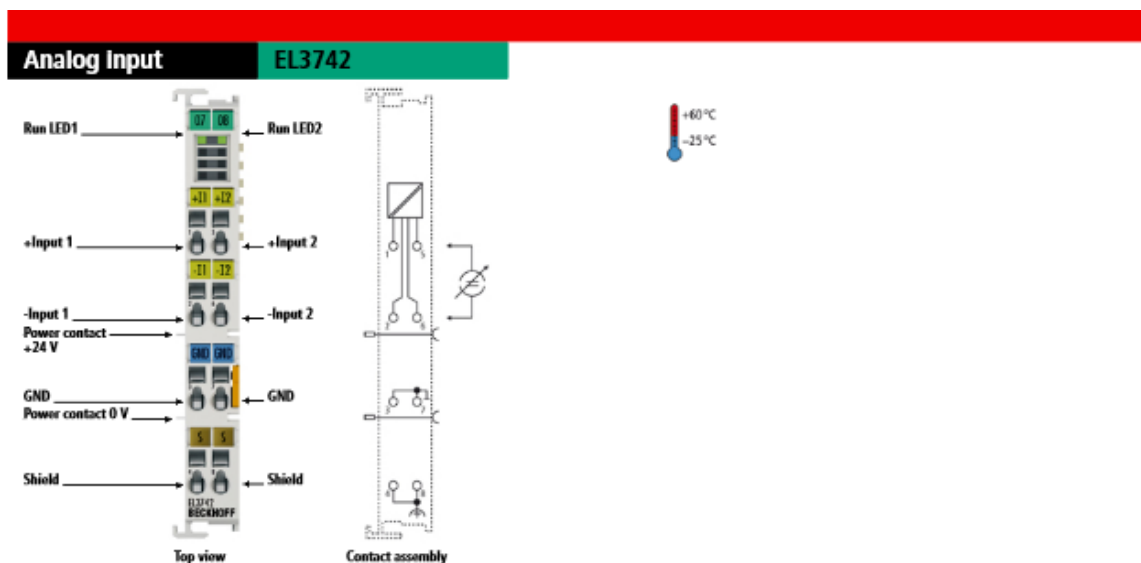
IT 60-S ULTRASTAB

Electrical data

At $T_A = 25\text{ }^\circ\text{C}$, $\pm U_C = \pm 15\text{ V}$, unless otherwise noted.

Parameter	Symbol	Unit	Min	Typ	Max	Comment
Primary continuous direct current	$I_{PN\ DC}$	A	-60		60	
Primary nominal rms current	I_{PN}	A			42	
Primary current, measuring range	I_{PM}	A	-60		60	
Measuring resistance over operating current temperature and supply voltage range	R_M	Ω	0		60	See graph page 5
Secondary current	I_S	mA	-100		100	
Conversion ratio	K_N			1:600		
Resistance of secondary winding	R_S	Ω		28		
Overload capability ¹⁾	I_p	A	-300		300	@ pulse of 100 ms
Supply voltage DC	U_C	V	± 14.25	± 15	± 15.75	
Current consumption	I_C	mA			80	Add I_S for total current consumption
Output rms noise 0 .. 10 Hz ²⁾	V_{no}	ppm			1	
Output rms noise 0 .. 100 Hz ²⁾					1	
Output rms noise 0 .. 1 kHz ²⁾					4	
Output rms noise 0 .. 10 kHz ²⁾					6	
Output rms noise 0 .. 50 kHz ²⁾					15	
Re-injected rms noise on primary bus bar		μV			30	0 .. 50 kHz
Electrical offset current + self magnetization + effect of earth magnetic field ²⁾	I_{OE}	ppm			250	
Temperature coefficient of I_{OE} ²⁾	TCI_{OE}	ppm/K			2.5	10 °C .. 50 °C
Offset stability ²⁾		ppm/month			2.5	
Linearity error ²⁾	ϵ_L	ppm			20	
Step response time to 90 % of $I_{PN\ DC}$	t_r	μs			1	di/dt of 25 A/ μs
di/dt accurately followed	di/dt	A/ μs	25			
Frequency bandwidth ($\pm 1\text{ dB}$)	BW	kHz	0	500		Small-signal bandwidth, 0.5% of I_{PM}
Frequency bandwidth ($\pm 3\text{ dB}$)	BW	kHz	0	800		Small-signal bandwidth, 0.5% of I_{PM}

4 priedas. Matavimo modulio Beckhoff EL3742 techniniai duomenys.



EL3742 | 2-channel analog input terminal 0...20 mA, differential input, with oversampling



The EL3742 analog input terminal handles signals in the range between 0 and 20 mA. The voltage is digitised to a resolution of 16 bits, and is transmitted, electrically isolated, to the controller. The input channels of the EtherCAT Terminal have differential inputs and possess a common, internal ground potential. The signals are oversampled with an adjustable, integer multiple (oversampling factor: n) of the bus cycle time (n microcycles per bus cycle). For each microcycle, the EtherCAT Terminal generates a process data block that is collected and transferred during the next bus cycle. The time base of the terminal can be synchronised precisely with other EtherCAT devices via distributed clocks. This procedure enables the temporal resolution of the analog input signals to be increased to n times the bus cycle time. In conjunction with the EL47xx (analog output terminal with oversampling), responses with equidistant time intervals, e.g. in the event of a threshold value being exceeded, become possible. The distributed clocks function enables several EL3742 devices to be synchronised in almost any configuration. The maximum sampling rate per channel is 100 ksamples/s (100,000 samples/s).

Technical data	EL3742 ES3742
Number of inputs	2 (differential)
Power supply	via the E-bus
Technology	differential input, oversampling
Signal current	0...20 mA
Oversampling factor	$n = 1 \dots 100$ selectable
Distributed clocks	yes
Distributed clock precision	$\ll 1 \mu\text{s}$
Internal resistance	85Ω typ. + diode voltage
Input filter limit frequency	80 kHz
Common-mode voltage U_{cm}	10 V max.
Conversion time	min. 10 μs
Input signal bandwidth	0...30 kHz recommended
Resolution	16 bit (incl. sign)
Measuring error	$< \pm 0.3 \%$ (relative to full scale value) up to 10 Hz input signal
Surge voltage resistance	35 V max.
Electrical isolation	500 V (E-bus/signal voltage)
Current consumption power contacts	–
Current consumption E-bus	typ. 200 mA
Bit width in the process image	input: $n \times 2 \times 16$ bit data; optionally 2 x 16 bit cycle counter, 4 byte StartNextLatch time
Special features	oversampling
Weight	approx. 60 g
Operating/storage temperature	$-25 \dots +60 \text{ }^\circ\text{C} / -40 \dots +85 \text{ }^\circ\text{C}$
Relative humidity	95 %, no condensation

5 priedas. TwinCAT 2 parašytos programos fragmentai

Greitoji Furje Transformacija

```
N := 2;
WHILE N <= L DO
    FOR k := 0 TO N/8 DO
        CosArray[k] := COS(2*pi*k/N);
        SinArray[k] := SIN(2*pi*k/N);
    END_FOR;
    i := 0;
    freq := 0;
    gap := 1;
    Discr := L/N;
    FOR k := 0 TO L-1 DO
        IF freq <= N/2 THEN
            IF freq <= N/8 THEN
                RealP := CosArray[ freq ];
                Complex := -SinArray[ freq ];
            ELSIF freq <= N/4 THEN
                RealP := SinArray[ N/4-freq ];
                Complex := -CosArray[ N/4-freq ];
            ELSIF freq <= 3*N/8 THEN
                RealP := -SinArray[ freq-N/4 ];
                Complex := -CosArray[ freq-N/4 ];
            ELSE
                RealP := -CosArray[ N/2-freq ];
                Complex := -SinArray[ N/2-freq ];
            END_IF;
        ELSE
            IF freq <= 5*N/8 THEN
                RealP := -CosArray[ freq-N/2 ];
                Complex := SinArray[ freq-N/2 ];
            ELSIF freq <= 3*N/4 THEN
                RealP := -SinArray[ 3*N/4-freq ];
                Complex := CosArray[ 3*N/4-freq ];
            ELSIF freq <= 7*N/8 THEN
                RealP := SinArray[ freq-3*N/4 ];
                Complex := CosArray[ freq-3*N/4 ];
            ELSE
                RealP := CosArray[ N-freq ];
                Complex := SinArray[ N-freq ];
            END_IF;
        END_IF;
        EvenReal := InRealP[ i ];
        EvenComplex := InComplex[ i ];
        OddReal := InRealP[ i+Discr ];
        OddComplex := InComplex[ i+Discr ];
        RealP_Inter[ k ] := EvenReal + OddReal*RealP -
OddComplex*Complex;
        complex_Inter[ k ] := EvenComplex + OddReal*Complex +
OddComplex*RealP;
        i := i + 1;
    IF i + Discr = L THEN
        i := 0;
        freq := freq + 1;
        gap := 1;
    ELSIF i + Discr = gap*Discr*2 THEN
        i := i + Discr;
        freq := freq + 1;
        gap := gap + 1;
    END_IF;
    END_FOR;
END WHILE;
```

```

                                END_IF;
    END_FOR;
    N := N*2;
    FOR k := 0 TO L-1 DO
        InRealP[ k ] := RealP_Inter[ k ];
        InComplex[ k ] := complex_Inter[ k ];
    END_FOR;
END_WHILE;
FOR k := 0 TO L DO
    RealOut[ k ] := InRealP[ k ];
    ComplexOut[ k ] := InComplex[ k ];
    InRealP[ k ] := 0;
    InComplex[ k ] := 0;
END_FOR;

```

Diskretine Furje transformacija

```

FOR n:= 0 TO L DO
    CosArray[n] :=COS((2*pi*k*n)/L);
    SinArray[n] := SIN((2*pi*k*n)/L);
END_FOR
OutReal := 0;
OutComplex := 0;
FOR i := 0 TO L DO
    OutReal := OutReal + (In[i]*CosArray[i]);
    OutComplex := OutComplex + (In[i]*(-SinArray[i]));
END_FOR

```

6 priedas. MATLAB parašytos programos fragmentas

```
Table = readtable('File.csv','Delimiter', ',');
Data = table2array(Table);
Vibration = Data(:,1);
Current = Data(:,2);
Voltage1 = Data(:,3);

L = size(Vibration,1);
Fs = 10000;
T = 1/Fs;
t = (0:L-1)*T;
figure(1)
Maxf = 1000;

VibrGain = 0.015;
CurrentGain = 0.00381;
VoltageGain = 0.0125;
VibrOffset = 1.14;
CurrentOffset = 0.275;
VoltageOffset = 0;
HannB = 2;

NFFT = 2^nextpow2(L);
Window = hann(NFFT);
f = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);

for i = 1:L
    Vibration(i) = ((Vibration(i)*VibrGain)+VibrOffset);
    Current(i) = ((Current(i)*CurrentGain)+CurrentOffset);
    Voltage1(i) = ((Voltage1(i)*VoltageGain)+VoltageOffset);

    Vibration(i) = Vibration(i) * Window(i) *HannB;
    Current(i) = Current(i) * Window(i) *HannB;
    Voltage1(i) = Voltage1(i) * Window(i) *HannB;
end

VibrFFT = fft(VibrWindow,NFFT)/L;
CurrentFFT = fft(CurrentWindow,NFFT)/L;
Voltage1FFT = fft(VoltageWindow,NFFT)/L;

VibrFFT_Ampl = 2*abs(VibrFFT(1:NFFT/2+1));
CurrentFFT_Ampl = 2*abs(CurrentFFT(1:NFFT/2+1));
Voltage1FFT_Ampl = 2*abs(Voltage1FFT(1:NFFT/2+1));

VibrFFT_Log = 10*log10(VibrFFT_Ampl);
CurrentFFT_Log = 10*log10(CurrentFFT_Ampl);
Voltage1FFT_Log = 10*log10(Voltage1FFT_Ampl);
```

7 priedas. Variklio ir generatoriaus pajungimo schema

