

**KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS**

Jūros technologijų ir gamtos mokslų fakultetas

Inžinerijos katedra

Modestas Vaitkus

**Rotorinės sistemos su keliais  
defektais virpesių signalų tyrimas**

Gamybos inžinerijos studijų programos  
magistro baigiamasis darbas

KLAIPĖDA, 2016

## SANTRAUKA

Vaitkus M. *Rotorinės sistemos su keliais defektais virpesių signalų tyrimas*. Gamybos inžinerijos studijų programos magistro baigiamasis darbas. Darbo vadovas Doc. dr. M. Vasylius, Klaipėdos universitetas: Klaipėda, 2016. – 65 p.

Magistro baigiamojo darbo teorinėje dalyje išsiaiškinama rotorinės sistemos ir jos diagnostikos samprata. Aprašoma mokslininkų atlikti tyrimai virpesių signalų apdorojimo metodų tema. Apžvelgiama ir parenkama virpesių signalo matavimo ir apdorojimo įranga tolimesniems virpesių signalų tyrimams.

Eksperimentinėje dalyje pateikiama rotorinės sistemos su keliais defektais virpesių signalų tyrimų metodika. Nagrinėjama virpesių signalų tyrimo metu gauti rezultatai. Pagrindinis šių tyrimų tikslas pritaikyti patikimą diagnostikos tyrimų metodiką rotorinės sistemos su keliais defektais techninei būklei įvertinti. Darbo pabaigoje pateikiamos išvados.

*Raktažodžiai:* virpesiai, rotorinė sistema, virpesių tyrimai, diagnostikos metodai, defektai.

## SUMMARY

Vaitkus M. *Study of vibration signals of rotor system with multiple defects*. Manufacturing engineering Master's degree thesis. Supervisor Doc. Dr. M. Vasylius, Klaipeda University: Klaipeda. 2015. – 65 p.

In the theoretical part of Master's thesis is clarified the rotor system and the diagnostic concept. Describes the scientist studies carried out of vibrations signal processing techniques topic. Provides an overview and selected vibration measurement as well a signal processing equipment for vibration signals for further research.

In the experimental part includes rotor system with multiple defects vibration signal research methodology. Analyzed results of vibration signals obtained during an investigation. The main objective of this study is to adjust reliable diagnostic research methodology for rotor system with multiple defects for technical condition assessment. In the end of work conclusions are given.

*KEY WORDS:* vibrations, rotor system, vibration investigations, diagnostic methods, defects.

## Lentelių sąrašas

1 lentelė. Algoritmo parinkimas virpesių signalo kategorijai. ....	27
2 lentelė. OROS NVGate ir NI LabVIEW virpesių apdorojimo programų trūkumai ir privalumai. ....	28
3 lentelė. Daugiakanalio virpesių analizatoriaus OROS Mobi Pack OR36 techninės charakteristikos. .....	30
4 lentelė. Pagreičio keitlio Wilcoxon 793 techninės charakteristikos. ....	31
5 lentelė. Optinio fazės jutiklio Optel – Thevon 152 G7 techninės charakteristikos. ....	32
6 lentelė. Pradiniai virpesių tyrimo duomenys. ....	33
7 lentelė. Guolio 6004-2Z/C3 pagrindiniai parametrai. ....	34
8 lentelė. PT500 rotorinės sistemos tyrimo duomenys. ....	38
9 lentelė. Guolių apskaičiuotos DAR reikšmės. ....	50

## Paveikslų sąrašas

1 pav. Laiko grafikas. ....	10
2 pav. FFT spektrai. ....	10
3 pav. Vandens krioklio diagrama. ....	11
4 pav. FFT eilutės. ....	11
5 pav. Guolio defektų vystymosi 1-oji stadija. ....	11
6 pav. Guolio defektų vystymosi 2-oji stadija. ....	12
7 pav. Guolio defektų vystymosi 3-oji stadija. ....	12
8 pav. Guolio defektų vystymosi 4-oji stadija. ....	12
9 pav. Harmoninių virpesių pagrindiniai parametrai. ....	13
10 pav. Trys stebimi virpesių signalai ir atskirti virpesių signalai pritaikius BSS algoritmą. ....	15
11 pav. Stebimas guolio virpesių signalas ir gautas galutinis virpesių signalas pritaikius BE algoritmą kartu su tikrinio vektoriaus algoritmu. ....	15
12 pav. BSS signalų atskyrimo sistema. ....	17
13 pav. Duomenų apdorojimo schema. ....	17
14 pav. Pavarų dėžės virpesių matavimo schema. ....	17
15 pav. LMS metodo schema. ....	18
16 pav. Virpesių signalo apdorojimas pagal ORDWT metodo algoritmą. ....	19
17 pav. Traukinio lokomotyvo pavarų dėžės virpesių pagreičio signalas. ....	19
18 pav. Išmatuotas virpesių pagreičio signalas be triukšmo taikant ORDWT metodą su kaimyninio koeficiento mažinimo strategija (angl. neighboring coefficient shrinkage strategy - NCSS) ir be subdiapazono pasirinkimo. ....	20
19 pav. Susimuliuotas signalas su kelias defektų signalais. ....	21
20 pav. Kurtograma. ....	21
21 pav. HHT spektrograma. ....	22
22 pav. Kartojamo BSS metodo algoritmas. ....	23
23 pav. OROS NVGate virpesių signalų apdorojimo programos langas. ....	24
24 pav. Programos OROS NVGate veikimo schema. ....	24
25 pav. LabVIEW programos langai. ....	25
26 pav. Virpesių signalų tipai. ....	26
27 pav. Stendas PT500. ....	29
28 pav. Virpesių tyrimo įranga. ....	30
29 pav. Stendo PT500 virpesių tyrimas. ....	32
30 pav. Stendo PT500 kinematinė schema. ....	33
31 pav. Guolių defektai. ....	34

32 pav. Rotorių veikianti disbalanso jėga.....	36
33 pav. Rotoriaus sukimosi greičio kitimas laike grafikas.....	39
34 pav. Virpesių pagreičio kitimo laike grafikas.....	39
35 pav. Virpesių greičio kitimas laike grafikas.....	40
36 pav. $V_{RMS}$ kitimo laike grafikas.....	40
37 pav. Virpesių greičio $V_{RMS}$ FFT spektrai .....	41
38 pav. Didžiausios $V_{RMS}$ reikšmės x ir y ašimi.....	42
39 pav. B guolio su išorinio žiedo defektu, nesant disbalansui X ir Y ašimis virpesių signalo kitimo laike grafikas.....	43
40 pav. Virpesių signalai B guolio su išorinio žiedo defektu, nesant disbalansui X ir Y ašimis .....	43
41 pav. Virpesių pagreičių $a_{RMS}$ FFT spektrai x ir y ašimis, kai nėra disbalanso. ....	44
42 pav. Virpesių greičio $V_{RMS}$ FFT spektrai B guolio (su išorinio žiedo defektu), kai nėra disbalanso. ....	45
43 pav. Virpesių greičių $V_{RMS}$ FFT spektrai x ašimi, kai nėra disbalanso ir yra (82,6g·mm ir 177g·mm).....	46
44 pav. B, C ir D guolių defektų harmonikos x ašimi. ....	47
45 pav. Virpesių greičių $V_{RMS}$ FFT spektrai x ašimi, kai nėra disbalanso ir yra (82,6g·mm ir 177g·mm).....	48
46 pav. A, B, C, D, E ir F guolių rotoriaus 1X harmonikos x ašimi. ....	48
47 pav. E guolio defektų harmonikos x ašimi. ....	49
48 pav. B, C, D ir E guolių DAR x ašimi. ....	51
49 pav. B, C, D ir E guolių DAR y ašimi. ....	52
50 pav. Virpesių pagreičio grafiko gavimo programos algoritmas. ....	53
51 pav. Virpesių pagreičio FFT spektro gavimo programos algoritmas. ....	53
52 pav. Virpesių greičio grafiko ir FFT spektro gavimo programos algoritmas. ....	54
53 pav. Filtruoto virpesių greičio grafiko ir FFT spektro gavimo programos algoritmas.....	54
54 pav. Virpesių signalo apdorojimo programos algoritmas blokinėje diagramoje.....	55
55 pav. Virpesių signalo apdorojimo programos vartotojo sąsajos langas. ....	55
56 pav. Virpesių pagreičio laiko grafikai x ašimi be disbalanso. ....	56
57 pav. Virpesių greičio laiko grafikai x ašimi be disbalanso. ....	57
58 pav. Virpesių pagreičių FFT spektrai x ašim, kai nėra disbalanso. ....	58
59 pav. Virpesių greičių FFT spektrai x ašim, kai nėra disbalanso. ....	59
60 pav. Guolio E defektų harmonikų reikšmės x ašimi.....	60
61 pav. E guolio virpesių greičių FFT spektrų palyginimas. ....	60

# TURINYS

<b>IVADAS</b> .....	7
<b>I. ANALITINĖ DALIS</b> .....	8
1.1. Rotorinių sistemų defektai ir virpesių parametrai.....	8
1.2. Virpesių signalų apdorojimo metodų apžvalga .....	14
1.3. Virpesių signalų apdorojimo programinės įrangos .....	23
1.3.1. OROS NVGate virpesių signalų apdorojimo programa .....	23
1.3.2. NI LabVIEW virpesių signalų apdorojimo programa .....	25
1.3.3. OROS NVGate ir NI LabVIEW virpesių signalų apdorojimo programų trūkumai ir privalumai.....	27
<b>II. METODINĖ DALIS</b> .....	29
2.1. Tyrimo objekto aprašymas.....	29
2.2. Tyrimo įranga .....	29
2.3. Stendo PT500 virpesių tyrimas.....	32
<b>III. EKSPERIMENTINĖ DALIS</b> .....	39
3.1. Virpesių signalų apdorojimas OROS NVGate programa .....	39
3.1.1. Virpesių signalo apdorojimo technika.....	39
3.1.2. Virpesių lygio $V_{RMS}$ didžiausios reikšmės x ir y ašimis analizė .....	41
3.1.3. Virpesių signalų kitimo laike grafikai .....	42
3.1.4. Virpesių pagreičių $a_{RMS}$ FFT spektrai.....	44
3.1.5. Virpesių greičių $V_{RMS}$ FFT spektrinė analizė .....	45
3.2. Virpesių signalų apdorojimas NI LabVIEW programa .....	52
3.2.1. Virpesių signalo apdorojimo technika.....	52
3.2.2. Virpesių signalų kitimo laike grafikai .....	56
3.2.3. Virpesių pagreičių FFT spektrai .....	57
3.2.4. Virpesių greičių FFT spektrinė analizė .....	58
3.3. NVGate ir LabVIEW virpesių greičių FFT spektrų palyginimas.....	59
<b>IŠVADOS</b> .....	62
<b>Literatūra</b> .....	64

## IVADAS

Viena iš patikimiausių mašinos techninės būklės įvertinimo, eksploatavimo ir defektų diagnostikos technologijų yra dirbančios mašinos virpesių matavimo ir analizavimo technologija (virpesių monitoringas), kuomet tai atliekama nestabdant ir neardant mašinos. Taikant šią technologiją galime dar ankstyvojoje defekto vystymosi stadijoje nustatyti mašinoje besivystantį defektą ir stebėti jį. Tada galime laiku sustabdyti mašiną, taip išvengiant mašinos netikėto sustojimo ar avarijos.

Kaip bebūtų, pramonėje mašinos dažniausiai dirba viena šalia kitos, todėl matuojant vienos mašinos virpesius yra išmatuojami ir šalia esančių mašinų virpesiai bei kiti virpesių šaltiniai, kurie apsunkina tiriamos mašinos defektų nustatymą. Sustabdyti kitas mašinas, kad būtų galima išmatuoti tiriamos mašinos virpesius yra neekonomiška, nes yra stabdomas gamybos procesas, atsiranda prastovos. Dėl šios priežasties yra kuriami įvairūs algoritmai ir metodai kaip pašalinti pašalinius virpesius ir gauti tik matuojamos mašinos virpesius.

Todėl darbe atliekami rotorinės sistemos su keliais defektais virpesių signalų tyrimai. Aprašomi virpesių signalų tyrimo prietaisai ir metodai, kuriais remiantis buvo renkama ir analizuojama informacija apie rotorinių sistemų su keliais defektais techninę būklę ir defektų identifikavimą. Darbe aprašoma rotorinės sistemos su keliais defektais identifikavimo metodika pagrįsta laiko grafikų ir greitos Furje transformacijos (angl. FFT – Fast Fourier Transform) spektrų analizės principais. Taip pat darbe atlikta eksperimentinių matavimų duomenų analizė.

Darbo metodai. Atliekant mokslinės bei informacinės literatūros analizę, naudotasi Lietuvos ir užsienio autorių moksliniais darbais. Dauguma mokslinių straipsnių rasta, naudojantis ScienceDirect ir EBSCO duomenų bazėmis.

**Darbo tikslas:** pritaikyti patikimą diagnostikos tyrimų metodiką rotorinės sistemos su keliais defektais techninei būklei įvertinti.

### **Darbo uždaviniai:**

1. Apžvelgti rotorinių sistemų defektus ir virpesių parametrus;
2. Išanalizuoti mokslinius straipsnius apie virpesių signalų apdorojimo metodus ir apžvelgti virpesių signalų apdorojimo programines įrangas;
3. Parinkti rotorinės sistemos tyrimo standą ir virpesių matavimo tyrimo įrangą bei sukurti rotorinės sistemos su keliais defektais virpesių signalų eksperimentinių tyrimų metodiką;
4. Atlikti rotorinės sistemos su keliais defektais virpesių signalų eksperimento rezultatų analizę naudojantis skirtingomis programinėmis įrangomis ir metodais.

# I. ANALITINĖ DALIS

## 1.1. Rotorinių sistemų defektai ir virpesių parametrai

Dauguma mechaninių virpesių gamtoje ir technikos procesuose yra periodiškai pasikartojantys, svyruojamieji, pavyzdžiui: širdies plakimas, kietojo kūno atomų judėjimas, žemės drebėjimai, rotorinių sistemų virpesiai ir pan. Virpesiai gali būti žadinami išorinių, vidinių jėgų arba kinematiškai (suteikiant kūnui priverstinį judėjimą). Virpantį kūną veikia išorės ir vidinės žadinančios (laikui bėgant periodiškai kintančios), pozicinės (priklausančios tik nuo padėties, pavyzdžiui, spyruoklės tamprumo, sunkio arba Archimedo) ir trinties jėgos. (Barzdaitis, 2006, 75p.).

Rotorinių sistemų viduje sukasi įvairūs rotoriai, kuriuos veikia įvairios dinaminės jėgos t.y. žadina mechaninius ar skysčio virpesius ar keičia jų dydžius, todėl kiekviena rotorinė sistema vibruoja ir žadina virpesius. Taip pat defektai rotorinėse sistemose gali atsirasti, dėl perkrovos, medžiagų dilimo, nuovargio ir korozijos.

Rotorinių sistemų defektus galime suskirstyti į šias grupes:

- 1) Rotorių defektai:
  - a. Disbalansas;
  - b. Įlinkis;
  - c. Rotorių bendraašiškumų nuokrypiai;
  - d. Besisukančių dalių kliuvinimas už korpusinių;
  - e. Įtrūkimai.
- 2) Slydimo guolių defektai:
  - a. Tepalo sužadinti virpesiai guolyje padaro rotoriaus sukimąsi nestabiliu;
  - b. Antifrikinio metalo ištrupėjimas radialiniame ir atraminiame guolio paviršiuje, ypač tepalo pleišto susidarymo vietose;
  - c. Padidinti tarpai slydimo guolį laikančiose dalyse, pavyzdžiui, guolio apkaboje.
- 3) Riedėjimo guolių defektai:
  - a. Guolio elementų suirimas;
  - b. Guoliaviečių cilindrinų paviršių ašių sutapimo nuokrypiai;
  - c. Nepakankamas arba per didelis tepimas;
  - d. Guolio žiedų sujungimo su korpuso su veleno dalimis suleidimų pažeidimai.
- 4) Elektros variklių defektai:
  - a. Rotoriaus ekscentricitetas;
  - b. Atramų - guolių defektai;

- c. Elektrinės grandinės defektai;
- d. Disbalansas.

5) Kiti defektai:

- a. Blogas mašinų tvirtinimas ant pamato;
- b. Siurblys nesuderintas su vamzdynu;
- c. Projektavimo, montavimo ir remonto klaidos.

Trumpai apžvelkime guolių vibracijų atsiradimo priežastis. Guolių vibracijos gali būti klasifikuojamos į (Jonušas, 2001, 41p.):

- Vibracijos atsirandančios dėl blogo guolio pagaminimo, montavimo ir tepimo;
- Vibracijos atsirandančios riedėjimo kūnams pereinant apkrovos pridėjimo vietą;
- Vibracijų atsiradimas, veikiant būdingiems dažniams: rotoriaus sukimosi; guolio separatoriaus sukimosi; riedėjimo kūno sukimosi; riedėjimo kūno skriejimo išoriniu ar vidiniu žiedu.
- Vibracijos atsirandančios guolį veikiant pašaliniais šaltiniais, kurių poveikis gali būti periodinis, stacionarus, atsitiktinis.

Taip pat įvairūs virpesių parametrai nusako mašinos viduje besisukančių elementų ir mazgų techninę būklę. Pasinaudojus specialiomis virpesių matavimo priemonėmis ir virpesių analizės programine įranga t.y. virpesių monitoringu galime atlikti rotorinių sistemų virpesių tyrimus ir įvertinti mašinų techninę būklę, nustatyti jų defektus, defektų išsivystymo lygį ar priežastis.

Mašinų eksploatacija ir remontas priklauso nuo jų atsakingumo ir skirstoma į tris lygius (Barzdaitis, 1998, 13p.):

- 1-asis lygis. Įrenginys dirba tol, kol sugenda – tai darbas iki gedimo. Netikėtai sugedusi mašina yra remontuojama. Šiuolaikinėms gamybos technologijoms tokių įrenginių eksploatacija netinkama.
- 2-asis lygis. Sistemingas periodinis remontas. Ekologine ir ekonomine prasme naudingiau sustabdyti mašiną remontui prieš tai, dar neįvykus netikėtam gedimui ar avarijai.
- 3-asis lygis. Tai mašinų techninės būklės monitoringo ir defektų diagnostikos technologija pagrįsta virpesių matavimu ir jų analize. Naudojant šią technologiją galima nustatyti kiek mašiną dar galima eksploatuoti, o kada ją reikėtų sustabdyti techniniam aptarnavimui ar remontui.

Pasak Barzdaičio mašinų ir jų elementų vibracija - tai sudėtingas, kompleksinis mechaninės energijos perdavimo reiškinys, sudarytas iš daugelio virpesių komponenčių, besiskiriančių savo parametrais: virpesių amplitudėmis, virpesių dažniais bei fazėmis.

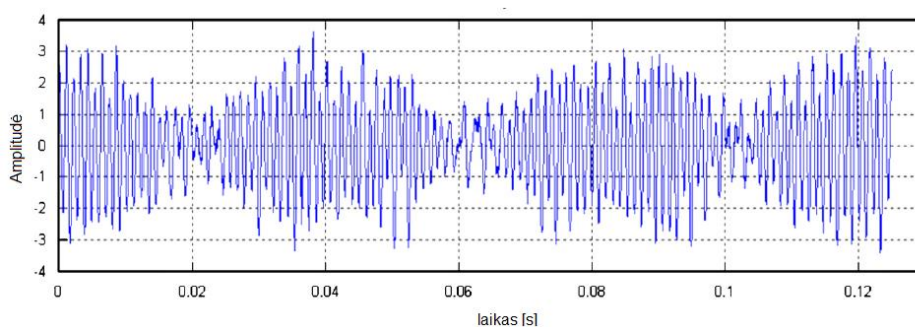
*Virpesių amplitudė* – tai didžiausias periodiškai kintančio dydžio nuokrypis nuo pusiausvyros padėties. Virpesių amplitudė kiekybiškai nusako mašinos virpesių lygį.

*Virpesių dažnis* – tai virpesių pasikartojimas per laiko vienetą. Virpesių dažnis apibūdina virpesių amplitudės kitimo greitį taip pat nusakomi mašinos virpesių šaltiniai.

*Rotoriaus fazė* – tai intervalas skiriantis du įvykius.

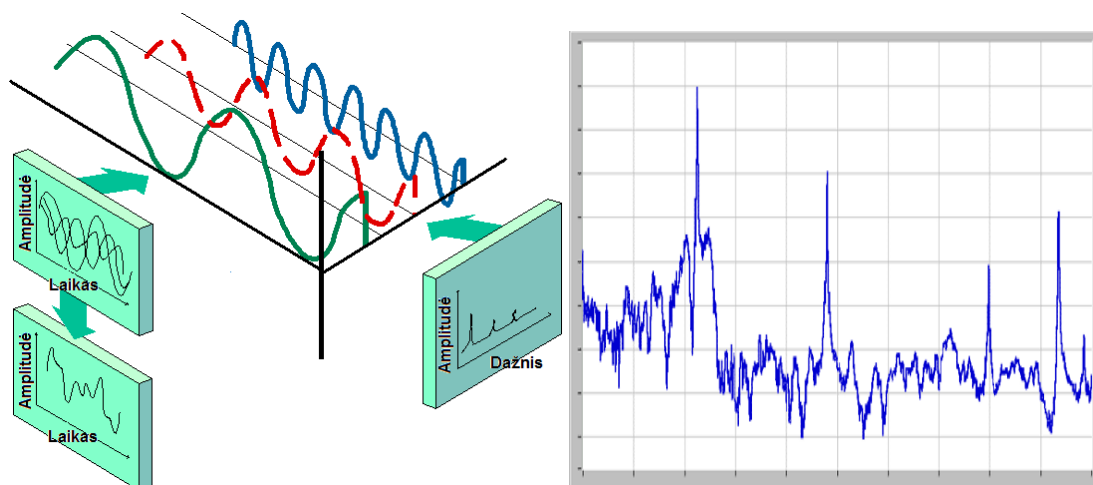
Virpesių formatai leidžia gautus matavimo rezultatus interpretuoti taip, kad būtų galima greitai ir tiksliai nustatyti mašinos defektus ir esamą techninę būklę. Virpesių formatai skiriami į laiko grafikus, virpesių spektrus, vandens krioklio diagramas, FFT eilutės, Trend'us (kurio nors virpesių parametro kitimas laiko grafike), orbitą ir kitus.

Laiko grafikai (1 pav.) leidžia pastebėti virpesius besikeičiančius laike. Yra pakankamai informatyvūs virpesių tyrimuose. Dažniausia naudojami kai rotorius sukimosi greičiai kinta.



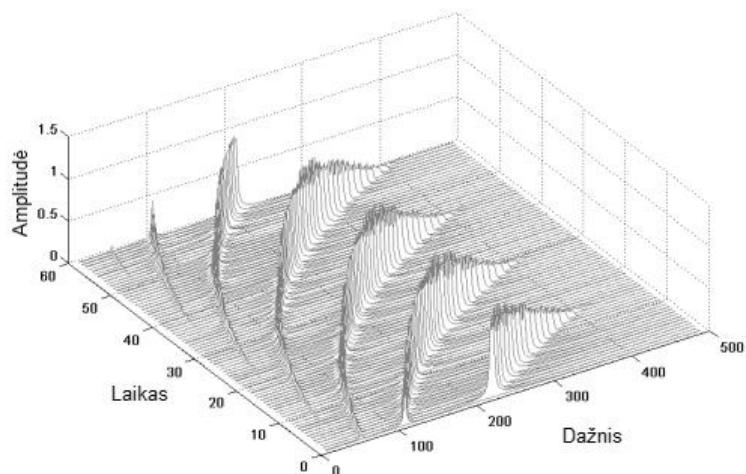
1 pav. Laiko grafikas.

Greitos Furjė transformacijos (angl. FFT – Fast Fourier Transform) virpesių spektras (2 pav.) gali būti gaunami tik iš nefiltruoto nekintančio virpesių signalo (mašinai dirbant tik nusistovėjusiu darbo režimu).



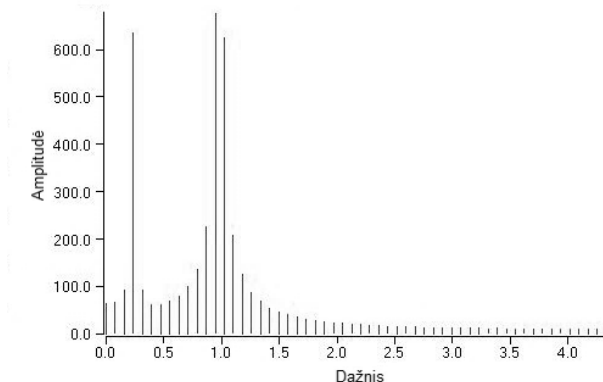
2 pav. FFT spektrai.

Vandens krioklio diagrama (3 pav.) sudaro tie patys FFT spektrai, tik panaudojama dar viena koordinatė laikas.



3 pav. Vandens krioklio diagrama.

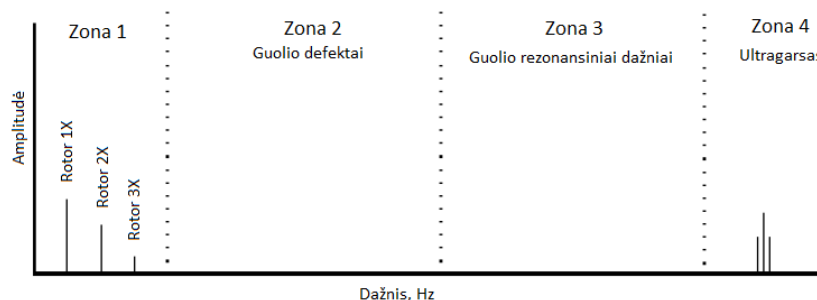
FFT eilutės (4 pav.) – supaprastintas FFT spektras, kad būtų lengviau analizuoti duomenis.



4 pav. FFT eilutės.

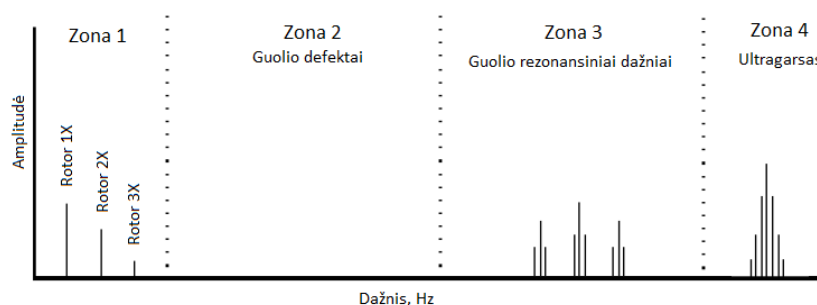
Pagal FFT spektrus galima nustatyti guolių defektų vystymosi stadijas kurios yra keturios (STI Vibration monitoring, <http://www.stiweb.com/appnotes/Rolling-Element-Bearings.html>).

1-oji stadija (5 pav.). Ankstyvojoje defektų vystymosi stadijoje guolis žadina ypač aukšto dažnio virpesius (ultragarsą). Šiems defektams yra naudojami specialūs metodai. Standartiniai duomenų formatai, tokie kaip FFT spektrai šiuo atveju neinformatyvūs ir defektai sunkiai aptinkami.



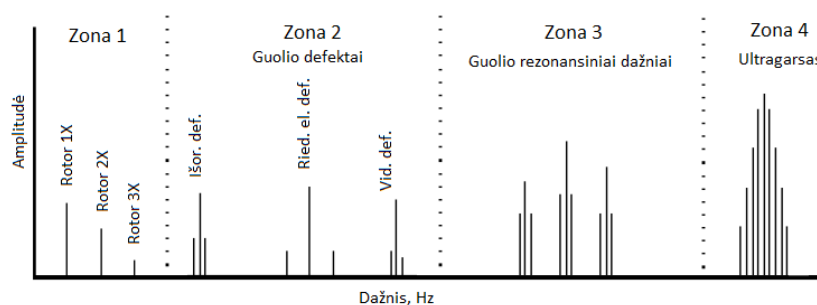
5 pav. Guolio defektų vystymosi 1-oji stadija.

2-oji stadija (6 pav.). FFT spektre galima pastebėti guolio rezonansinius dažnius ir padidėja ketvirtos zonos ultragarso virpesiai. Šioje stadijoje jau galime pastebėti guolių defektų pradžią.



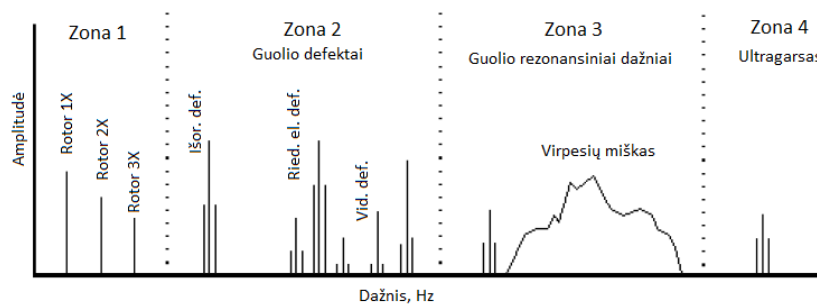
6 pav. Guolio defektų vystymosi 2-oji stadija.

3-oji stadija (7 pav.). Pasireiškia guolio defektas pavyzdžiui: riedėjimo elemento, vidinio ar išorinio žiedo defektai. Taip pat dar labiau padidėja ketvirtos zonos ultragarso virpesiai. Šioje stadijoje išmatavus guolio virpesius galima identifikuoti guolio kinematinį dažnį, t.y. nustatyti jo defektą.



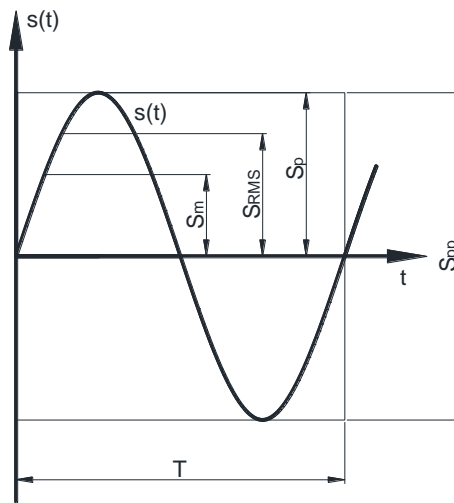
7 pav. Guolio defektų vystymosi 3-oji stadija.

4-oji stadija (8 pav.). Vystantis defektui pasireiškia kartotinis defektinio guolio dažnis, o tai parodo, kad defektas progresuoja. Taip pat padidėja rotorius harmonikų amplitudės, dėl guolio dilimo ir atsiranda virpesių „miškas“, kurio sunkiau pastebimos kitos defektų harmonikos. Šioje stadijoje jau galima ir „plicka akimi“ pamatyti guolio defektus ir rekomenduojama guolį pakeisti nauju.



8 pav. Guolio defektų vystymosi 4-oji stadija.

Harmoninių virpesių poslinkių  $s(t)$  sinusinės funkcijos kitimo grafikas pateiktas 9 paveikslėlyje. Grafike nurodyti standartizuoti virpesius apibūdinantys parametrai. Šie parametrai tiek virpesių greičio  $v(t)$ , tiek virpesių pagreičio  $a(t)$  atveju. Jais naudojamosi praktikoje. (Barzdaitis, 2006, 78p; SKF, 2000, 2p.).



9 pav. Harmoninių virpesių pagrindiniai parametrai.  $s_p$ , – harmoninių virpesių poslinkių didžiausia reikšmė;  $s_{pp}$  – dvigubas harmoninių virpesių poslinkis, vadinamas moju;  $s_m$  – virpesių poslinkių vidutinė vertė;  $s_{RMS}$  – virpesių poslinkių verčių kvadratinis vidurkis;  $t$  – virpesių veikimo laikas,  $s$ ;  $T$  – periodas.

Poslinkio amplitudė naudojama rotorių balansavime ir pereinamiesiems mašinos dinaminiais režimams įvertinti jos paleidimo ir stabdymo metu.

Dvigubas harmoninių virpesių poslinkis arba mojis  $s_{pp} = 2s_p$  – tai skirtumas tarp didžiausios ir mažiausios virpesių poslinkių reikšmių. Mojis naudojamas tada, kai svarbu žinoti didžiausią mašinos detalės poslinkį. Virpesių poslinkių vidutinė vertė apskaičiuojama pagal šią formulę (Barzdaitis, 2006, 78p.):

$$s_m = \frac{2}{\pi} s_p \quad (1)$$

Čia:  $s_p$  – harmoninių virpesių poslinkių didžiausia reikšmė.

Virpesių poslinkių verčių kvadratinis vidurkis (angliškai root mean square – RMS) –  $s_{RMS}$  apskaičiuojamas pagal šią formulę (Barzdaitis, 2006, 79p.):

$$s_{RMS} = \frac{1}{\sqrt{2}} s_p = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} s_m \quad (2)$$

Čia:  $s_p$  – harmoninių virpesių poslinkių didžiausia reikšmė;  
 $s_m$  – virpesių poslinkių vidutinė vertė.

Virpesių vidutinė reikšmė įvertina virpesių intensyvumą per laiką  $t$ .

Pažymėtina, kad, matuojant virpesių greitį  $v(t)$  ir virpesių pagreitį  $a(t)$ , parametrai, taikytini virpesių poslinkiui  $s(t)$ , naudojami apibūdinti virpesių greičiams ir virpesių pagreičiams, t.y.  $s_p, v_p, a_p, s_{pp}, v_{pp}, a_{pp}, s_{RMS}, v_{RMS}, a_{RMS}, s_m, v_m, a_m$ . Jie interpretuojami analogiškai, kaip ir virpesių poslinkių parametrai, pavaizduoti anksčiau 5 pav. (Barzdaitis, 2006, 79p.).

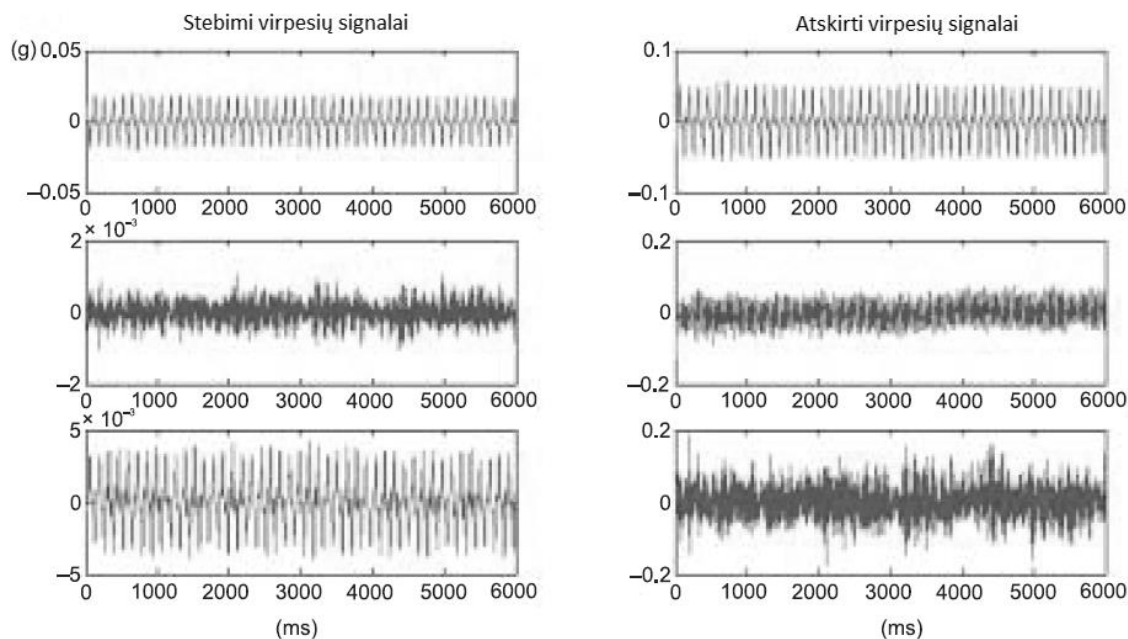
Virpesių monitoringas (stebėseną) leidžia nustatyti daug įvairių defektų: blogą velenų centruotę, rotoriaus disbalansą, defektinius guolius, laisvumus, pavarų dėžės defektus ir t.t. Tačiau pramonėje mašinos dažniausiai dirba viena šalia kitos, todėl matuojant vienos mašinos virpesius yra išmatuojami ir šalia esančių mašinų virpesiai bei kiti virpesių šaltiniai, kurie apsunkina tiriamos mašinos defektų nustatymą ir gautas virpesių signalas yra sudėtingas.

Taip pat žalingi virpesiai kelia tiesioginį pavojų svarbiems įrenginiams, mašinoms ir jų dalims bei trukdo normaliai eksploatuoti mašinas ir įrenginius (Augustaitis, 2000, 7p.). Todėl yra kuriami įvairūs algoritmai ir metodai kaip pašalinti pašalinius virpesius (triukšmą) ir gauti tik matuojamos mašinos virpesius ir taip tiksliau nustatyti mašinos gedimus. Toliau apžvelgsime mokslininkų siūlomus metodus rotorinių sistemų virpesių signalų apdorojimui.

## **1.2. Virpesių signalų apdorojimo metodų apžvalga**

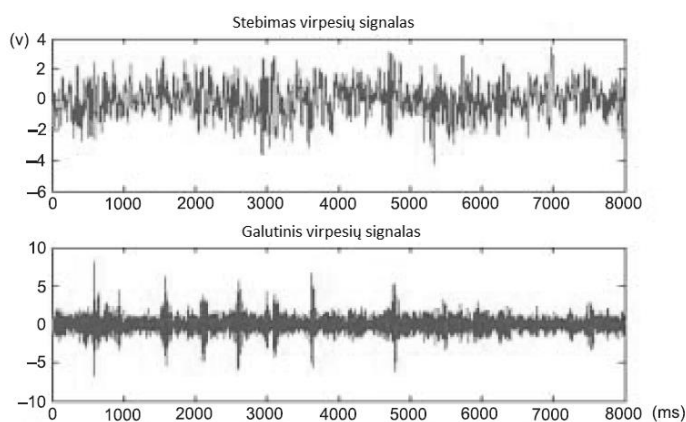
P. W. Tse et al. (2006, 2 p.) teigia, kad kelių šaltinių generuojamus virpesių signalus galima apdoroti BSS (angl. Blind Source Separation – aklas šaltinių atskyrimas) ir BE (angl. Blind Equalization – aklas išlyginimas) algoritmais. BSS reikalinga daug virpesių jutiklių (ne mažiau nei yra virpesių šaltinių) ir kad kiekvieno virpesių šaltinio generuojami virpesiai būtų statistiškai nepriklausomi, o BE užtenka vieno virpesių jutiklio ir siekia atkurti gautą signalą esant laiko uždelsimui. Autoriai taip pat siūlo BSS algoritmą papildyti SOS (angl. Second-Order Statistics – antros eilės statistinis) metodu kuris padėtų atskirti panašius virpesių signalus bei FP (angl. Fixed-Point – fiksuoto taško) ir JADE (angl. Joint Approximate Diagonalization of Eigenmatrices - jungtinis apytikslis diagonalizavimas matricių) algoritmais kurie padeda lengviau apdoroti impulsyvius signalus (esant aukšto dažnio virpesiams), kuriuos skleidžia defektiniai guoliai. Taip pat autoriai teigia, kad abu BSS ir BE algoritmai yra daug žadantys norint nustatyti mašinos gedimus.

Pritaikius BSS algoritmą gauti rezultatai pateikti 10 paveikslėlyje.



10 pav. Trys stebimi virpesių signalai ir atskirti virpesių signalai pritaikius BSS algoritmą.

Taikant BE algoritmą kartu su tikrinio vektoriaus algoritmu (11 pav.) yra veiksmingas metodas aptinkant prasidedančius virpesių signalus sukeltus atsirandančių gedimų mašinoje.



11 pav. Stebimas guolio virpesių signalas ir gautas galutinis virpesių signalas pritaikius BE algoritmą kartu su tikrinio vektoriaus algoritmu.

Y. Hongxian et al. (2013, 1 p.) siūlo paprastą ir lengvai įgyvendinamą BSS metodą virpesiams atskirti. Šis metodas atliekamas pagal dvi procedūras:

- Pirmoji procedūra yra nustatyti filtrų koeficientus. Nepriklausomi kriterijai naudojami, kad gauti nežinomos filtrų koeficientus;
- Antroji procedūra yra nustatyti virpesių šaltinio signalą. Naudojant filtrus yra gaunamas virpesių signalas.

Tam yra naudojami įvairūs matematiniai modeliai. Vienas jų filtrų koeficientų apskaičiavimui randamas pagal formulę:

$$C_{ij}(n+1, k) = C_{ij}(n, k) + \mu f(s_i(n))g(s_j(n-k)), k \in [0, L] \quad (3)$$

Čia:  $C_{ij}(n, k)$  – yra  $k$  elemento filtro matrica taške  $n$ ;  
 $\mu$  – mokymosi koeficientas;  
 $f$  ir  $g$  – netiesinė funkcija;  
 $s_i$  ir  $s_j$  – virpesių signalai.

O dviejų šaltinių virpesių signalų sistemos išvestis yra:

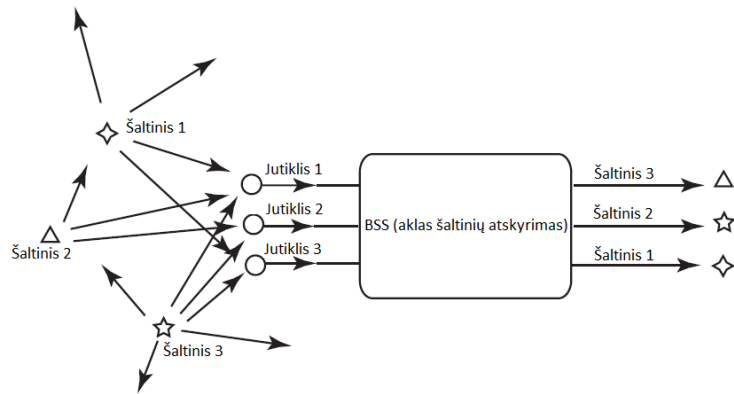
$$\begin{bmatrix} s_1(n) \\ s_2(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & C_{12}(n, 0) \\ C_{21}(n, 0) & 1 \end{bmatrix}^{-1} \times \left( \begin{bmatrix} x_1(n) \\ x_2(n) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^L C_{12}(n, k) \cdot s_2(n-k) \\ \sum_{k=1}^L C_{21}(n, k) \cdot s_1(n-k) \end{bmatrix} \right) \quad (4)$$

Čia:  $C_{12}(n, k)$  ir  $C_{21}(n, k)$  – yra  $k$  elemento filtro matrica taške  $n$ ;  
 $x_1(n)$  ir  $x_2(n)$  – išmatuoti virpesių signalai;  
 $s_1(n)$  ir  $s_2(n)$  – virpesių signalai.

W. Zhou et al. (2007, 3072 p.) siūlo naują indentifikavimo LNM (angl. linear normal mode – tiesinis normalus būdas), kuris yra paremtas BSS. Šiam būdui yra naudojami du algoritmai:

- AMUSE (angl. algorithm for multiple unknown signals extraction – algoritmas daug nežinomų signalų išgavimui);
- SOBI (angl. second order blind identification – antros eilės aklas indentifikavimas).

BSS signalų atskirimo sistema pavaizduota 12 paveikslėlyje.



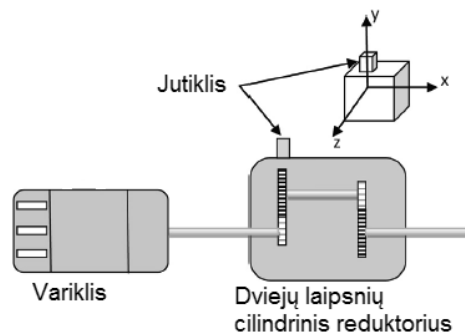
12 pav. BSS signalų atskyrimo sistema.

T. D. Popescu (2010, 3408 p.) siūlo naudoti BSS kuomet aptinkami virpesių signalo pokyčiai (13 pav.). Šiuo atveju būtų signalų išskyrimas ir pokyčių aptikimas. Paprastai naudojant daugiakanalius virpesių matavimo prietaisus ant mašinos korpuso yra gaunami sumaišyti įvairūs virpesių signalai, tai būtų pačios mašinos ir aplinkiniai pašaliniai virpesiai. Atliekant analizę pirmiausiai atskiriami pagrindiniai mašinos virpesių šaltiniai, tuomet šie virpesių signalai yra analizuojami, kad nustatyti mašinos gedimus.

$$\begin{bmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_n \end{bmatrix} = \mathbf{s} \rightarrow \boxed{\mathbf{A}} \rightarrow \mathbf{x} \rightarrow \boxed{\mathbf{W}} \rightarrow \hat{\mathbf{s}} = \begin{bmatrix} \hat{s}_1 \\ \vdots \\ \hat{s}_n \end{bmatrix}$$

13 pav. Duomenų apdorojimo schema.  $\mathbf{s}$  –  $n \times 1$  vektorius gautų virpesių signalų;  $\mathbf{A}$  –  $n \times n$  matrica sudaryta iš susimaišymo koeficientų;  $\mathbf{W}$  –  $n \times n$  atskyrimo matrica;  $\hat{\mathbf{s}}$  –  $n \times 1$  vektorius apdorotų virpesių signalų.

Pasak G. Ibrahim et al. (2013, 2029 p.) išmatavus virpesius pavarų dėžėje (14 pav.) yra sunku nustatyti koks tai gedimas, nes pavarų dėžėje yra daug virpesių šaltinių (kabinantis krumpliaračiams, sukantis velenui, pavarų dėžės rezonansiniai virpesiai ir kiti).



14 pav. Pavarų dėžės virpesių matavimo schema.

Autorius siūlo modifikuotą LMS (angl. least mean square – mažiausių kvadratų) metodą (15 pav.) kuomet naudojamas tik vienas pagreičio matavimo jutiklis (įprastai naudojami du) kaip pagrindinio signalo šaltinis ir dirbtinai sukurtas signalas pagal matuojamo veleno sukimosi greitį ir krumplių kabinimosi dažnį.



15 pav. LMS metodo schema.

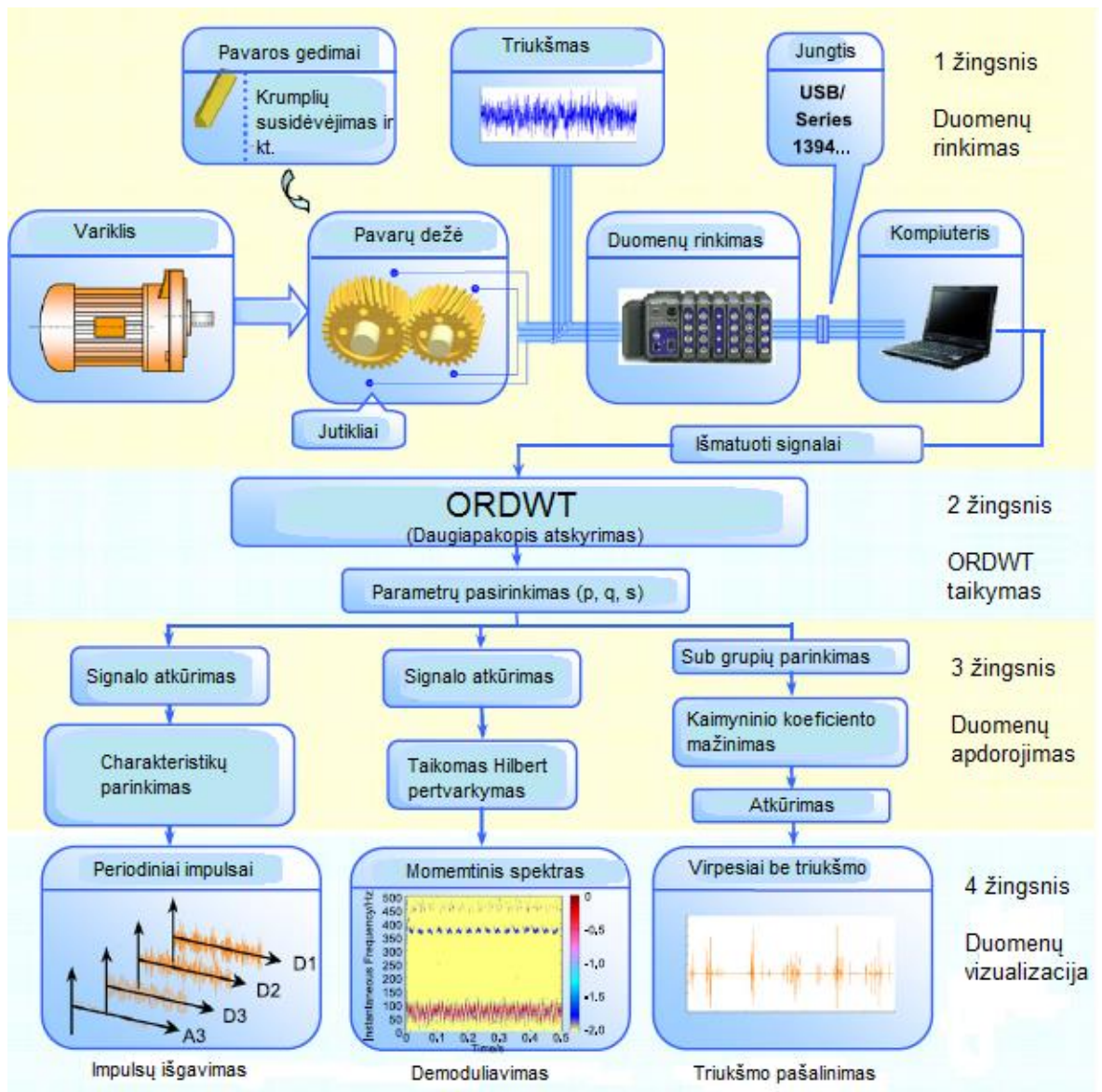
B. Chen et al. (2012, 275 p.) teigia, kad ORDWT (angl. Overcomplete rational dilation discrete Wavelet transform – pilnai racionalus išplėstinis atskyrimas bangelių transformacijos) turi daugiau galimybių nei įprastas DWT (angl. dyadic wavelet transform – dviejų bangelių transformacija) nustatant pavarų dėžės gedimus. Dėl savo privalumų ORDWT yra universalesnis įrankis, kurio pagalba galime nustatyti įvairius pavaros dėžės gedimus ypač esant trumpalaikiams virpesių signalams. Siūlomas gedimų aptikimo metodas skiriamas į tris požymius:

- **Periodinius impulsus.** Norint išgauti nematomą periodinį impulsą laiko grafike, reikia išskaidyti signalą į pagrindinius ORDWT parametrus. Kiekvienas parametras yra susijęs su atitinkamu „būdingu kurtosis“ indeksu. Pateiktame impulsų atitikimo algoritme optimalus ORDWT parametras geriausiai atitinka nematomą impulsą signale kai yra pasirenkama didžiausia duota kurtosis reikšmė.

- **AM/FM (angl. amplitude/frequency modulation – amplitudės/dažnio moduliavimo) turinius.** Tiriant AM/FM įtaka virpesių signalui, įvesties daugiakomponentis signalas yra išskaidomas ORDWT į žemo dažnio virpesių sub grupes ir generuoja momentines amplitudes ir dažnius.

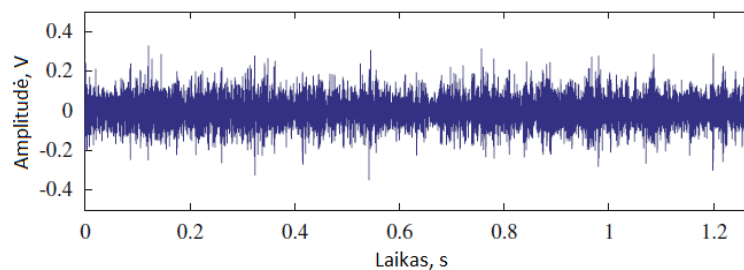
- **Virpesių signalus su trumpalaikiu triukšmu.** Matuojant virpesius esant dideliame aplinkos triukšmui vien tik ORDWT signalo atskyrimo neužteks. Pagerinto triukšmo šalinimo metodu kartu su ORDWT, kaimyninio koeficiento sumažinimu ir laiko grafiko išskaidymo į sub grupes pagalba galime pastebėti virpesius, kurių nesimatė, dėl didelio virpesių triukšmo.

Šie ORDWT metodai (16 pav.) padeda sėkmingai nustatyti pavarų dėžės gedimus esant įvairiems gedimams.



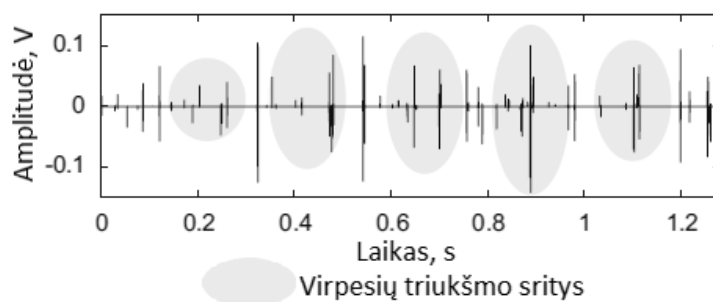
16 pav. Virpesių signalo apdorojimas pagal ORDWT metodo algoritmą.

Autoriai tiria traukinio lokomotyvo pavarų dėžės virpesių pagreičio signalą (17 pav.).



17 pav. Traukinio lokomotyvo pavarų dėžės virpesių pagreičio signalas.

Išmatavę traukinio lokomotyvo pavarų dėžės virpesius taiko triukšmo mažinimo metodą, kad gautu virpesių pagreičio signalą be triukšmo (18 pav.).



18 pav. Išmatuotas virpesių pagreičio signalas be triukšmo taikant ORDWT metodą su kaimyninio koeficiento mažinimo strategija (angl. neighboring coefficient shrinkage strategy - NCSS) ir be subdiapazono pasirinkimo.

D. Wang et al. (2012, 4956 p.) siūlo BCS (angl. blind component separation – aklas komponentų atskyrimas) metodą kurio pagalba būtų galima nustatyti įvairius mechaninius gedimus. Naudojantis šiuo metodu gautas virpesių grafikas (naudojantis vieno signalo kanalu) gali būti išskirtas į periodinius ir trumpalaikius pogrupius. Periodiniam pogrupiui priklauso rotorijų defektai: disbalansas, ekscentricitetas, bendraašiškumo nuokrypis. Trumpalaikiam pogrupiui priklauso guolių defektai. Siūlomas metodas yra sudarytas iš dviejų individualių strategijų. Pirmiausia gaunamas sub-Gauso periodinis signalas sumažinant kurtosis (ekscesą) suvienodinto signalo. Tuomet aptinkamas super-Gauso trumpalaikis signalas sumažinus skirstinio dažnių kreivės viršūnės aštrumo laipsnį išlyginto signalo. Tada išlygintas signalas yra gaunamas taikant tikrinio vektoriaus algoritimą. Galiausiai susimuliuotas ir tikrasis signalai yra patikrinami autorių pasiūlytu metodu ir nustatomas rotoriaus ar guolio defektas.

Autoriai signalo simuliacijai naudoja matematinę modelį su kelių defektų signalais susidedančių iš aukštų trumpalaikių ir žemų periodinių dažnių komponentų:

$$v(k) = \sum_r e^{-\lambda \cdot \frac{k-r \cdot \frac{Fs}{f_m} - \tau_T}{Fs}} \cdot \sin(2\pi f_0 \cdot (k - r \cdot Fs/f_m - \tau_T)/Fs) + \sin(2\pi f_1 k/Fs) + 0,8 \cdot \sin(2\pi f_2 k/Fs) \quad (5)$$

Čia:  $\lambda$  – koeficientas, (priima  $\lambda=900$ );

$f_m$  – defekto dažnis, Hz, (priima  $f_m=100$ Hz);

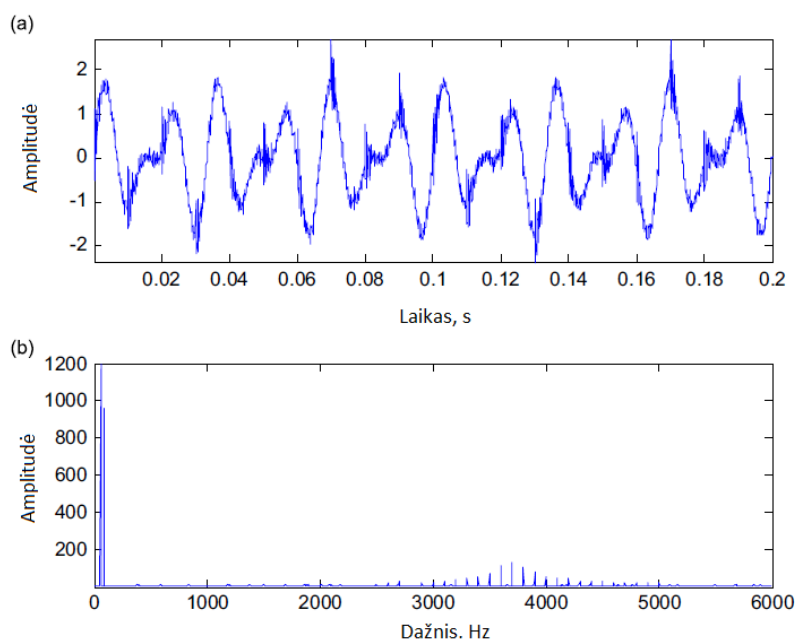
$Fs$  – imties dažnis, Hz, (priima  $Fs=12\ 000$ Hz);

$f_0$  – rezonansinis dažnis, Hz, (priima  $f_0=3700$ Hz);

$f_1$  ir  $f_2$  – žemo dažnio komponentai, Hz, (priima  $f_1=60$ Hz ir  $f_2=90$ Hz);

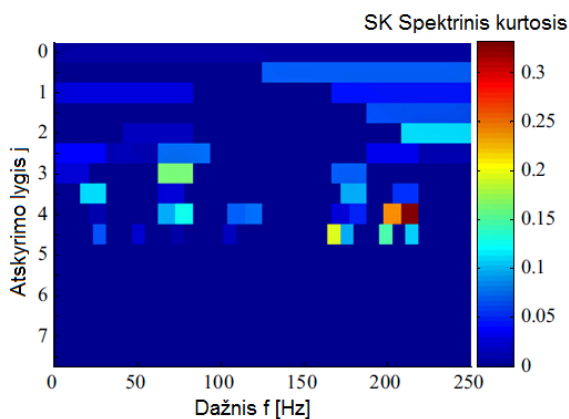
$k$  – mėginių skaičius simuliuojame signale, (priima  $k=2400$ ).

Gautas susimuliuotas signalas su kelias defektų signalais naudojant matematinį modelį pateiktas 19 paveikslėlyje.



19 pav. Susimuliuotas signalas su kelias defektų signalais: a – laiko grafikas; b – FFT spektras.

X. Xiong et al. (2012, 306p.) siūlo naują procedūrą, kuri susideda iš reguliuojamo HHT (angl. Hilbert–Huang transform – Hilberto Huang transformacijos) su ketvirtos eilės spektrinės analizės įrankiu vadinamu Kurtograma (20 pav.).

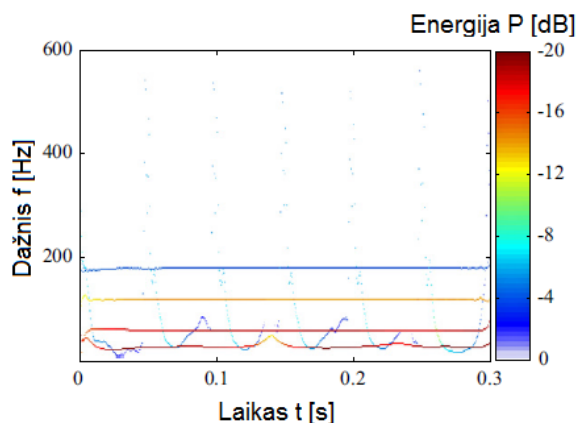


20 pav. Kurtograma.

Šią autorių siūlomą procedūrą sudaro trys žingsniai:

- Pirmasis žingsnis. Sukuriamas virpesių dažnio praeinamumo filtras naudojantis Kurtograma. Į tai įeina optimaliai pasirinktas dažnių ir dažnių juostos plotis. Remiantis šiuo pasirinkimu SK (angl. spectral kurtosis – spektrinis kurtosis) reikšmė nestacionarių komponentų virpesių dažnių yra padidinimą ir tai leidžia surasti nematomus jų tikruosius virpesių dažnio signalus.

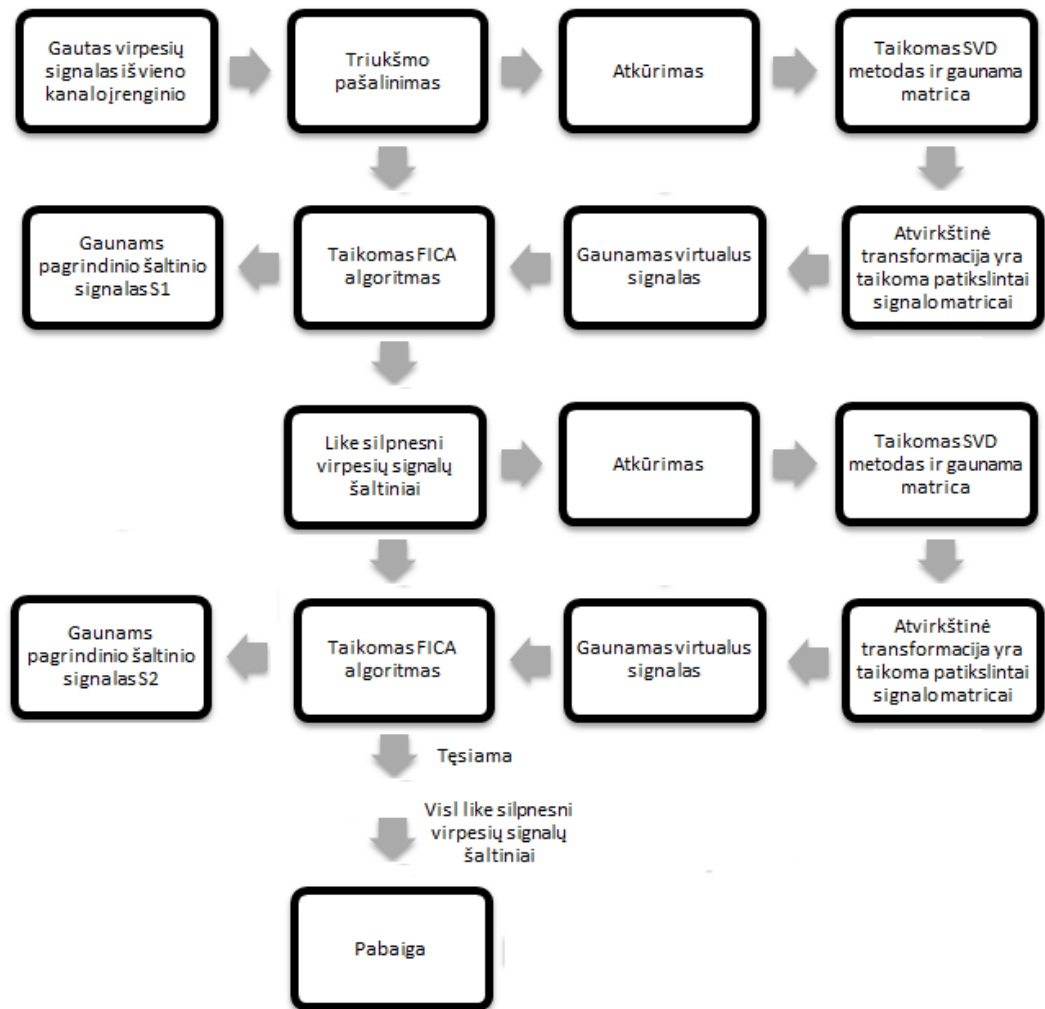
- Antrasis žingsnis. Naudojami sukurti virpesių filtrai ir jų pagalba galime rasti keletą dominuojančių dažnių laiko grafike.
- Trečias žingsnis. Reguluojamas HHT yra pritaikomas kiekvienam laiko grafikui ir gaunama HHT spektrograma (21 pav.) visų signalų.



21 pav. HHT spektrograma.

D. Wang et al. (2013, 6871 p.) siūlo naują AWSA (angl. adaptive wavelet stripping algorithm – prisitaikančio grafiko atkarpos algoritmas) algoritmą, kuris iš gautų virpesių atskiria susimuliuotus virpesius ir gali nustatyti guolio defektą. Pirmiausia parametrinis modelis ARLW (angl. anti-symmetric real Laplace wavelet – nesimetrinis tikrasis Laplaso grafikas) ar IRW (angl. impulse response wavelet – impulsų atsako grafikas) yra paremtas tikrais trumpalaikiais signalais. Tuomet iš gautų virpesių ir susimuliuotų virpesių yra gaunamas naujas virpesių grafikas iš kurio galima nustatyti guolio defektus.

Pasak S. Dong et al. (2012, 2052 p.) vieno kanalo išmatuotus virpesius galime atskirti iš bendro virpesių signalo kartojamu BSS metodu paremtu morfologiniu atskyrimu ir SVD (angl. singular value decomposition – vienos reikšmės atskyrimu). Pirmiausia yra atskiriamas triukšmas iš virpesių signalo morfologinių filtrų pagalba. Tuomet išfiltruotas signalas yra atkuriamas pasinaudojant SVD metodu ir gaunama matrica. Tada atvirkštinė transformacija yra taikoma patikslintai signalo matricai. Iš čia pseudo signalas yra gaunamas. Gautas pseudo signalas ir išfiltruotas signalas yra naudojami gauti pagrindiniam virpesių signalo šaltiniui naudojantis FICA (angl. fast independent component analysis – greita nepriklausomų komponentų analizė) algoritmu. Tuomet šis metodas (22 pav.) ir vėl kartojamas, jei norima išskirti daugiau virpesių signalų šaltinių iš likusių silpnesnių virpesių signalų.



22 pav. Kartojamo BSS metodo algoritmas.

### 1.3. Virpesių signalų apdorojimo programinės įrangos

Virpesių signalus apdoroti galima firmos OROS programa NVGate ir firmos NI programa LabVIEW (angl. Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench – virtualių instrumentų projektavimo laboratorijos darbastalis) su priedu Advanced Signal Processing Toolkit.

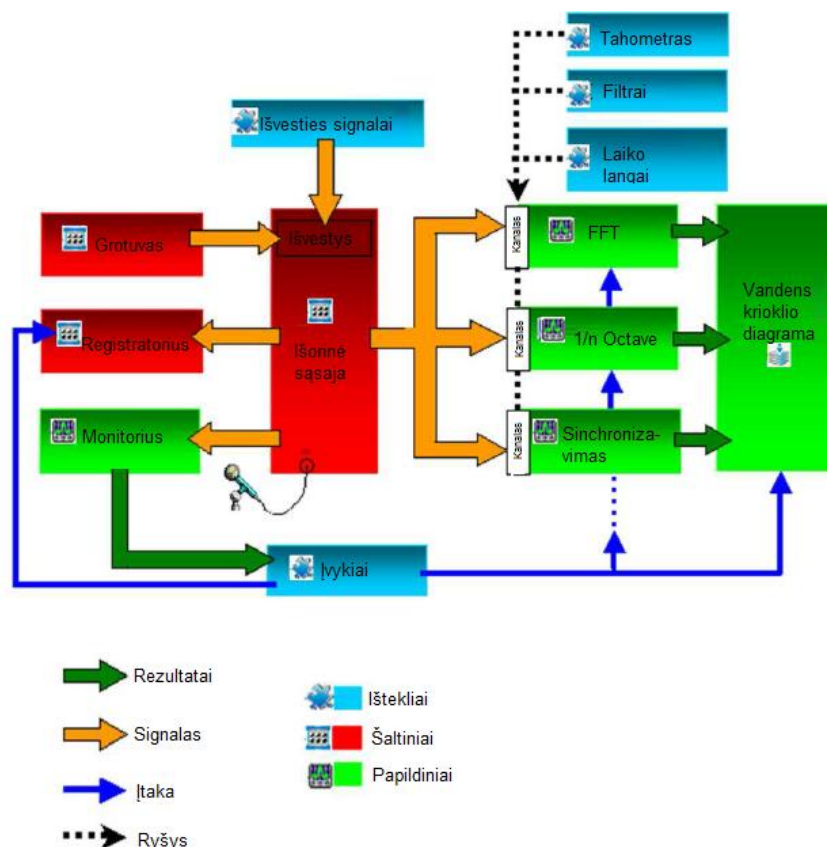
#### 1.3.1. OROS NVGate virpesių signalų apdorojimo programa

Apžvelgsime firmos OROS programą NVGate (23 pav.). Ši programa yra įprasta virpesių apdorojimo programa, kuri virpesių signalus gali apdoroti juos matuojant arba po matavimo priklausomai nuo poreikio. Ši programa leidžia stebėti ir analizuoti virpesių signalus standartiniuose virpesių formatuose tokiose kaip laiko grafikai, virpesių spektrai, FFT ir kiti.



23 pav. OROS NVGate virpesių signalų apdorojimo programos langas.

OROS NVGate programos veikimas (24 pav.): virpesių signalas gaunamas matuojant arba iš seniau įrašyto signalo grotuvo. Gauti virpesių signalai yra papildomi kitais ištekliais tokiais kaip filtrai, įvykiai (mašinos paleidimas, sustojimas ir kt.), tachometro duomenimis (sukimosi greitis) ar laiko langais, kad virpesių signalas būtų kuo informatyvesnis ir tiksliau apdorotas. Vandens krioklio diagramos papildinys gauna apdorotus duomenis iš FFT ir kitų papildinių ir juos vizualizuoja grafiškai, kur galime stebėti vieno ar kito parametro įtaka mašinos darbui, bei nustatyti jos defektus (NVGate Reference Manual, 6p.).



24 pav. Programos OROS NVGate veikimo schema.

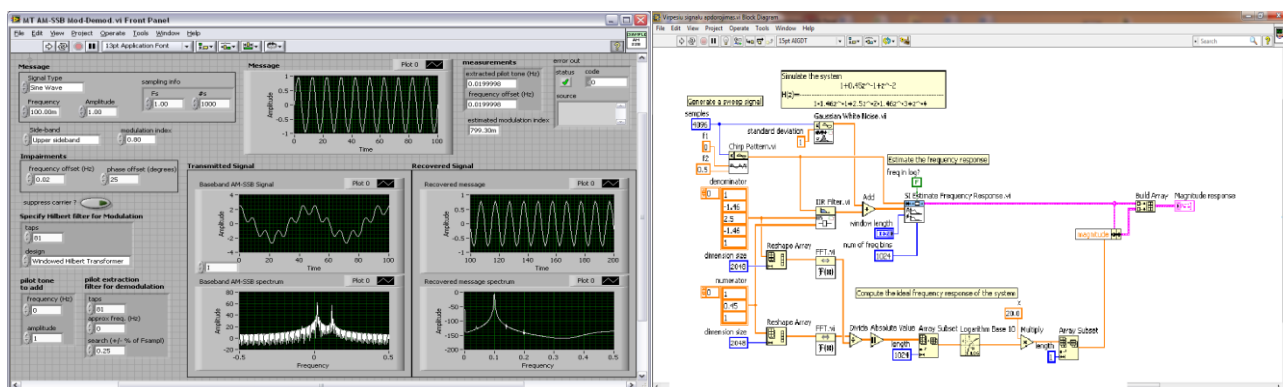
### 1.3.2. NI LabVIEW virpesių signalų apdorojimo programa

Toliau apžvelgsime firmos NI (National Instruments) programą LabVIEW. Ši programa sukurta 1986 metais tuo metu populiariam Apple Macintosh kompiuteriui. Vėliau ji buvo pritaikyta kitoms operacinėms sistemoms ir šiuo metu tinka Microsoft Windows, Linux ir Mac OS. LabVIEW yra programinė terpė, kurioje kuriamos programos grafinėje terpėje. LabVIEW turi platų funkcijų ir priedų pasirinkimą, kurie padeda daugumoje programavimo uždavinių bei duomenų apdorojime.

Norint apdoroti virpesių signalus LabVIEW 2015 programa tam reikia sukurti joje virpesių signalo apdorojimo programą. Kadangi kitų programavimo kalbų (C, Java ir kitos) pagrindas yra kalbos, kurios remiasi tekstinėmis linijomis, kad sukurtų kodų eilutes, LabVIEW naudoja grafinę programavimo kalbą, kad sukurtų programas vaizdiniu pavidalu – blokine diagrama, atmetant sintaksines smulkmenas ([http://www2.el.vgtu.lt/dist\\_mok/LabVIEW/index.html](http://www2.el.vgtu.lt/dist_mok/LabVIEW/index.html)).

Kiekvienas virtualus instrumentas LabVIEW aplinkoje, panašiai kaip ir kiekvienas elektroninis prietaisas, turi vartotojo sąsajos langą (angl. front panel), kuris pavaizduotas 25a paveikslėlyje, atitinkantį elektroninio prietaiso panelį, kuriame sumontuoti valdymo ir stebėjimo elementai, ir programos langą sudarytą iš blokinių diagramų (angl. block diagram), kuris pavaizduotas 25b paveikslėlyje, atitinkantį elektroninio prietaiso vidinius tarpelementinius sujungimus. Pastarajame lange ir atliekamas programavimas – elementų arba objektų išvadų sujungimas, konstruojant virtualių instrumentų veikimo algoritmą (Gurskas, 2010, 45p.).

Blokinė diagrama yra virtualaus instrumento pirminis kodas, sudarytas LabVIEW 2015 grafinėje programavimo terpėje. Blokinės diagramos komponentai yra žemesnio lygio virtualieji prietaisai su standartinėmis funkcijomis, konstantomis ir programos vykdymo valdymo struktūromis ([http://www2.el.vgtu.lt/dist\\_mok/LabVIEW/index.html](http://www2.el.vgtu.lt/dist_mok/LabVIEW/index.html)).



a)

b)

25 pav. LabVIEW programos langai: a - vartotojo sąsajos langas; b – blokinių diagramų langas.

Norint geriau apdoroti virpesių signalus šiai programai reikalingas priedas Advanced Signal Processing Toolkit. Su šiuo programos priedu galime panaudoti esamus ir sukurti naujus algoritmus ar metodus apdoroti virpesių signalams

Šiame LabVIEW Advanced Signal Processing Toolkit programos priede yra įdiegta laiko – dažnio, laiko eilučių ir bangelių analizės įrankiai. Laiko – dažnio analizės įrankio pagalba galime stebėti kaip keičiasi virpesių signalas laikui bėgant. Šis įrankis suteikia daugiau informacijos nei standartiniai dažnio analizės įrankiai tokie kaip FFT spektrai (National Instruments LabVIEW, 1p.).

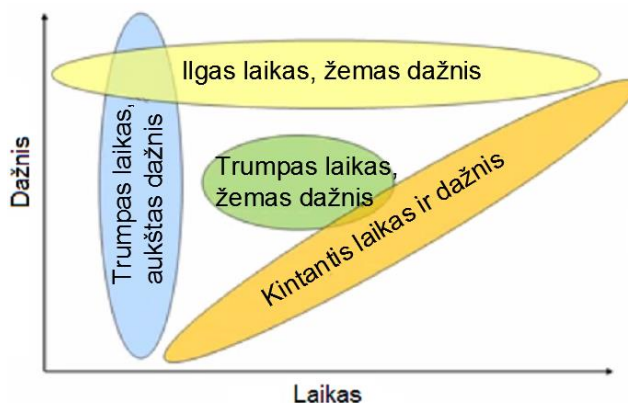
Laiko eilučių analizės įrankį sudaro trys kategorijos: statistinė analizė, spektrinis įvertinimas ir modeliavimas. Statistinė analizė naudojama suprasti koreliacija ir pašalinti nereikalingus kintamuosius (National Instruments LabVIEW, 2p.):

Bangelių analizės įrankio privalumai (National Instruments LabVIEW, 2p.):

- Puikia tinka aptikti pertrūkimus, šuolius, smailias viršūnes, kraštus ir kitus laikinus signalus;
- Puikiai suspaudžia retus signalus;
- Puikiai tinka mažinti virpesių triukšmą.

Šiuos programos įrankius galime naudoti: triukšmo sumažinimui; netolydumo, šuolių, pikinių reikšmių ir viršūnių aptikimui spektriniam įvertinimui, signalo suspaudimui, mašinos defektų aptikimui.

Galimi virpesių signalų tipai pateikti 26 paveiksle.

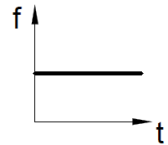
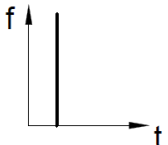
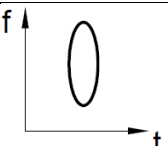
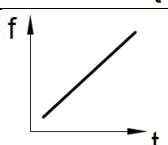


26 pav. Virpesių signalų tipai.

Algoritmo parinkimas tam tikrai virpesių signalo kategorijai 1 lentelė (National Instruments LabVIEW, 3p.):

- 1-as tipas. Ilga laiko trukmė ir žemas dažnis pavyzdžiui vieno tono signalas;
- 2-as tipas. Trumpa laiko trukmė ir aukštas dažnis pavyzdžiui signalas su šuoliais;
- 3-as tipas. Trumpa laiko trukmė ir žemas dažnis pavyzdžiui virpesių svyravimas;
- 4-as tipas. Kintančio laiko ir dažnio pavyzdžiui rotoriaus disbalansas.

1 lentelė. Algoritmo parinkimas virpesių signalo kategorijai.

Virpesių signalo kategorija	Virpesių signalas	Dažnių analizė	Eilučių analizė	Laiko – dažnio analizė	Bangelių analizė	Modelio analizė
1-as tipas		✓				✓
2-as tipas					✓	✓
3-as tipas					✓	
4-as tipas			✓	✓		

### 1.3.3. OROS NVGate ir NI LabVIEW virpesių signalų apdorojimo programų trūkumai ir privalumai

Lyginant NI LabVIEW su OROS NVGate virpesių apdorojimo programas pastebime, kad su NVGate programa yra lengviau pradėti dirbti, tačiau LabVIEW privalumas tas, kad ir pradžioje sugaišus daugiau laiko galima pačiam susikurti reikiamą virpesių apdorojimo programą, kuri galės tiksliau juos apdoroti nei standartinė NVGate programa. LabVIEW programos kūrimas atliekamas grafinėje terpėje, dėl ko nereikia rašyti programos tekstu ir sugaišti daug laiko bei nereikia gilių programavimo žinių. Dėl savo lanksčios vartotojo sąsajos ir nesudėtingo programavimo LabVIEW vartotojo sukurta programa gali atlikti išsamesnę matavimų analizę ir jų palyginimą. 2 lentelėje pateikiami OROS NVGate ir NI LabVIEW virpesių apdorojimo programų trūkumai ir privalumai.

2 lentelė. OROS NVGate ir NI LabVIEW virpesių apdorojimo programų trūkumai ir privalumai.

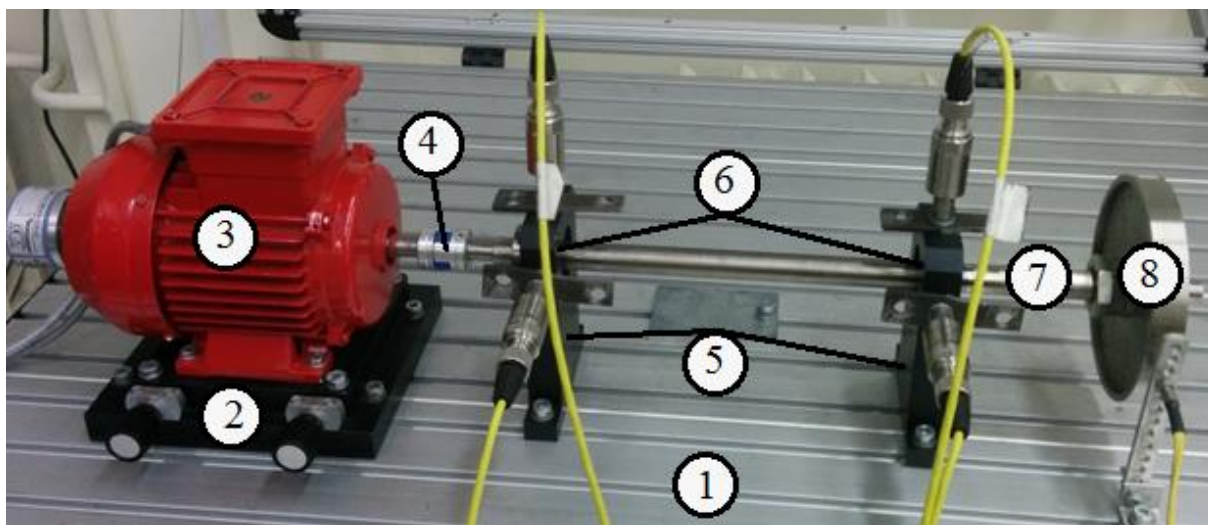
OROS NVGate privalumai:	NI LabVIEW privalumai:
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Paprasta vartotojo sąsaja;</li> <li>• Specialios sąsajos su programų paketu MATLAB ir NVDdrive funkcijų bibliotekomis.</li> <li>• Greitai gaunami rezultatai.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Programavimas grafinėje aplinkoje;</li> <li>• Galima susikurti įvairius virpesių signalo apdorojimo metodus;</li> <li>• Integruotos galingos klaidų paieškos priemonės;</li> <li>• Vienoda grafine vartotojo sąsaja ir sąsajos, ir programos languose populiariausiose operacinėse sistemose;</li> <li>• Specialios sąsajos su programų paketu MATLAB ir MS Windows dll funkcijų bibliotekomis.</li> </ul>
OROS NVGate trūkumai:	NI LabVIEW trūkumai:
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Leidžia stebėti ir analizuoti virpesių signalus tik gamintojo sukurtuose virpesių formatuose tokiose kaip laiko grafikai, virpesių spektrai, FFT spektrai ir kiti;</li> <li>• Ribotas filtrų taikymas virpesių signalų apdorojimui.</li> <li>• Virpesių signalų analizavimui reikalingas prijungtas OROS analizatorius arba USB atmintukas su specialiu raktu;</li> <li>• Įprasta virpesių apdorojimo programa, kuri virpesių signalus gali apdoroti juos matuojant arba po matavimo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Virtualieji instrumentai LabVIEW terpėje veikia interpretavimo principu, todėl nereikia tikėtis įspūdingos greitaveikos;</li> <li>• Didelė LabVIEW kaina;</li> <li>• Reikia gilesnių žinių virpesių signalų apdorojime ir programavime.</li> </ul>

## II. METODINĖ DALIS

### 2.1. Tyrimo objekto aprašymas

Eksperimentinių tyrimų objektas yra vokiečių firmos GUNT stendas PT500 (27 pav.). Stendą sudaro rotorinė sistema ant pamato. Pamatas yra laikančioji dalis, užtikrinanti rotorinės sistemos pakankamą standumą, o rotorinė sistema yra sukamoji variklio arba darbo mašinos dalis, turinti detalių, kurios gauna energiją iš darbo kūnų. Tyrimo objektas, esantis Klaipėdos universitete, Jūrų technologijų ir gamtos mokslų fakulteto laboratorijoje, naudojamas kaip mokomoji priemonė atlikti įvairiems tyrimams, siekiant imituoti tam tikrų junginių žalą ir ištirti jos poveikį, rezultatus pateikiant tam tikru virpesių spektru. Taip pat atliekant tyrimus šiuo stendu galima atlikti rotorinių sistemų virpesių matavimo eksperimentus: virpesių poslinkio, pagreičio ir greičio matavimus gaunamus laiko ar dažnio diapazonu.

Stendą PT500 sudaro: pamatas iš aliuminio specialaus profilio (1 poz.), elektros variklio padas (2 poz.), asinchroninis elektros variklis su dažnių keitikliu (3 poz.), lankstaus tipo mova (4 poz.), guolių atramos (5 poz.), guoliai 6004-2Z/C3 (6 poz.), velenas (7 poz.) ir rotorius (8 poz.) ant kurio gali būti tvirtinama įvairi disbalanso masė.

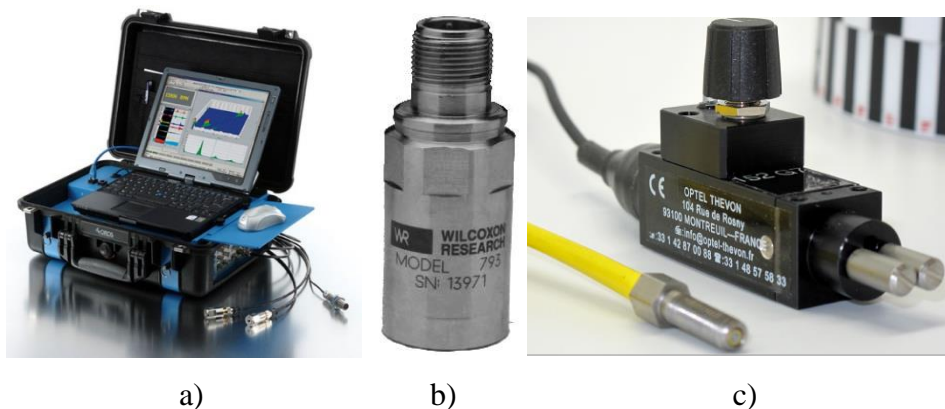


27 pav. Stendas PT500.

### 2.2. Tyrimo įranga

Tiriant virpesių poveikio mašinai, prietaisui ir jų elementams intensyvumą, matuojami mechaninių virpesių parametrai, sudaromi virpesių matavimo duomenų formatai ir kartu su technologinio proceso parametrais įvertinama techninė mašinos būklė, nustatomi defektai ir sekamas jų vystymasis iki gedimo (Barzdaitis, 1998, 48 p.).

Eksperimentiniams virpesių tyrimams atlikti naudojama įranga (28 pav.): daugiakanalis virpesių analizatorius OROS Mobi Pack OR36 (Prancūzija), pagreičio jutiklis Wilcoxon 793 (JAV), optinis fazės jutiklis Optel – Thevon 152 G7 (Prancūzija). Gautiems virpesių signalams analizuoti naudojama kompiuterinė programinė įranga NVGate, kuri leidžia gauti įvairius virpesių tyrimams skirtus duomenų formatus ir spektrus.



28 pav. Virpesių tyrimo įranga: a – virpesių analizatorius OROS Mobipack OR36, b – virpesių pagreičio keitlis Wilcoxon 793, c – optinis fazės jutiklis Optel – Thevon 152 G7.

Kompiuterinės virpesių signalų analizavimo sistemos, susideda iš virpesių matavimo technikos, sujungtos su kompiuteriais. Čia kompiuteris naudojamas eksperimento rezultatų saugojimui ir pateikimui duomenų formatuose. Tai daugiakanalės sistemos, turinčios 4 arba daugiau matavimo kanalus ir galinčios atlikti keliais kanalais gaunamų signalų analizę tuo pačiu laiko momentu. Naudojamas daugiakanalis virpesių analizatorius OROS Mobi Pack OR36 (28a pav.). Atliekanti eksperimentinius tyrimus, bus panaudoti 5 virpesiu lygio analizatoriaus kanalai. Keturi kanalai skirti virpesių pagreičio matavimo keitikliams ir 1 kanalas skirtas jutikliui matuojančiam rotorius sūkius. Daugiakanalio virpesių analizatoriaus OROS Mobi Pack techninės charakteristikos pateiktos 3 lentelėje.

3 lentelė. Daugiakanalio virpesių analizatoriaus OROS Mobi Pack OR36 techninės charakteristikos.

Masė	10 kg
Dažnis	25,6-40 kHz
Matmenys	470x180x360 mm
Kanalų skaičius	16
Maitinimo šaltinis/ vidinė baterija	AC/DC
Kietojo disko talpa	60 Gb
Duomenų perdavimo sparta per Ethernet jungtį	100 Mbits/s

Pagrindinė pagreičio keitlio detalė yra sensorius, pjezokristalas (dirbtinai poliarizuota keramika). Poliarizuotą keramiką veikiant dinaminei apkrovai, keramika deformuojas, dėl to generuoja elektros krūvį, kurio dydis proporcingas įtempimams, atsiradusiems kristalą veikiant apkrovai, pjezoelektrinėje medžiagoje, kuris yra proporcingas virpesių pagreičiui (Barzdaitis, 2008, 138p.). Naudojamas pagreičio keitlis yra Wilcoxon 793 (28b pav.) ir pasižymi šiomis savybėmis: atsparus korozijai, tvirtas, sandarus, apsauga jungiamiesiems laidams nuo viršsrovių. Pagreičio keitlio Wilcoxon 793 techninės charakteristikos pateiktos 4 lentelėje.

4 lentelė. Pagreičio keitlio Wilcoxon 793 techninės charakteristikos.

Jautrumas, $\pm 5\%$ , $25^{\circ}\text{C}$	100 mV/g
Įsibėgėjimo diapazonas	80 g piko
Amplitudės netiesiškumas	1 %
Dažnio jautrumas:	
$\pm 5\%$	1,5-5000 Hz
$\pm 10\%$	1,0-7000 Hz
$\pm 3\text{ dB}$	0,5-15000 Hz
Rezonansinis dažnis	25 kHz
Skersinis jautrumas, maks.	5 % ašies kryptimi
Temperatūrinis jautrumas:	
$-50^{\circ}\text{C}$	-15 %
$+120^{\circ}\text{C}$	+20 %
Temperatūrų intervalas	-50 iki $120^{\circ}\text{C}$
Masė	112 g
Korpuso medžiaga	316L nerūdijantis plienas

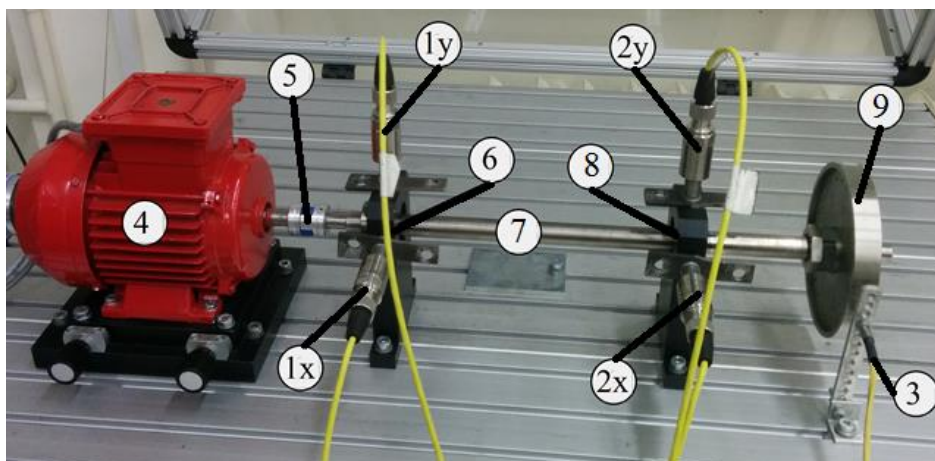
Optiniuose atspindžio jutikliuose šviesos šaltinis ir imtuvas sumontuoti viename korpuse, todėl reikalingas papildomas atspindžio elementas. Tuomet yra fiksuojamas šviesos spindulio pertraukimas. Optiniai jutikliai gali būti raudonos ir infraraudonos šviesos. Derinant optinius jutiklius, išryškėja raudonos šviesos privalumas prieš infraraudonąją, nes ji yra matoma. Veleno sukimosi greičiui ir virpesių fazei nustatyti naudojamas optinis fazės jutiklis Optel – Thevon 152 G7 (28c pav.). Optinio fazės jutiklio Optel – Thevon 152 G7 techninės charakteristikos pateiktos 5 lentelėje.

5 lentelė. Optinio fazės jutiklio Optel – Thevon 152 G7 techninės charakteristikos.

Veikimo atstumas:	
Difuzinis atspindys	1-5 mm
Naudojant šviesą	40 mm
Apskaičiuojami impulsai per sekundę	100 000
Imtuvas (jautrus šviesai)	Didelės spartos komponentas
Dažnis	0-100 kHz
Reakcijos laikas įsijungiant	$1,5 \cdot 10^{-7}$ s
Reakcijos laikas išsijungiant	$5,0 \cdot 10^{-7}$ s
Masė	150 g
Temperatūrų intervalas	-50 iki 135°C

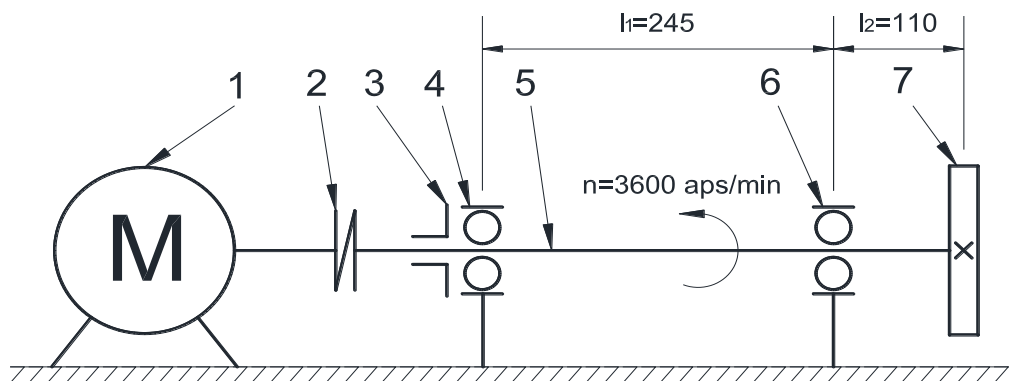
### 2.3.Stendo PT500 virpesių tyrimas

Praktinio eksperimentinio tyrimo metu buvo matuojami guolio 6004-2Z/C3 (su defektu ir be) ir disko (su disbalansu ir be) virpesiai su išdėliotais virpesių pagreičių keitliais ant guoliaviečių x ir y ašimis (statmena viena kitos atžvilgiu) vadovaujantis tarptautinio standarto ISO 10816-3 rekomendacijomis ir matuojamas disko sukimosi greitis su optiniu fazės jutikliu kaip pavaizduota 29 paveikslėlyje.



29 pav. Stendo PT500 virpesių tyrimas: 1x ir 2y – pirmo guolio virpesių pagreičių keitlius matuojantis virpesius x ir y ašimis; 2x ir 2y – antro guolio virpesių pagreičių keitlius matuojantis virpesius x ir y ašimis; 3 – fazės ir greičio matavimo jutiklis; 4 – elektros variklis; 5 – mova; 6 – pirmasis guolis (tipas 6004-2Z/C3); 7 – velenas; 8 – antrasis guolis (tipas 6004-2Z/C3); 9 – rotorius ant kurio gali būti tvirtinama įvairi disbalanso masė.

Stendo PT500 kinematinė schema pateikta 30 paveikslėlyje.



30 pav. Stendo PT500 kinematinė schema: 1 - elektros variklis; 2 – mova; 3 – atraminis guolis; 4 - pirmasis guolis; 5 – velenas; 6 – antrasis guolis; 7 – rotorius ant kurio gali būti tvirtinama įvairi disbalanso masė.

Tyrimo metu buvo keičiamas antrasis guolis (6004-2Z/C3) į be defektų, su defektais (riedėjimo elementų, išorinio ir vidinio žiedo) ir į išsidėvėjusį guolį taip pat pakeitus guolį buvo keičiamas disko disbalanso masės (1,4g; 3g) ir be disbalanso. Viso šešiams guoliams buvo atlikta 18 virpesių matavimo (po 3 matavimus vienam guoliui be disbalanso ir su dviem skirtingais disbalansais). Rotoriaus sukimosi greitis 3600 aps/min, 60 Hz. Duomenys buvo įrašyti OROS Mobipack daugiakanalio virpesių duomenų kaupiklio – analizatoriaus pagalba, vėliau duomenys buvo analizuojami NVGate V9.10 ir LabVIEW 2015 programinės įrangos pagalba.

Pradiniai stendo PT500 virpesių tyrimo duomenys pateikti 6 lentelėje.

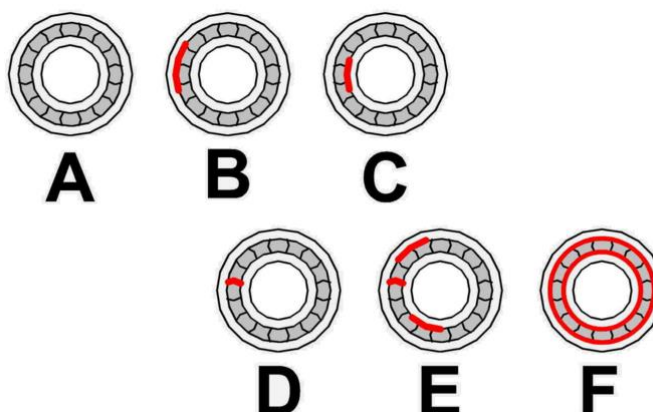
6 lentelė. Pradiniai virpesių tyrimo duomenys.

Eil. nr.	Guolis	Disbalanso masė, g	Rotoriaus sukimosi greitis, aps/min	Guolio defektas
1	A	3	3600	-
2		1,4		
3		-		
4	B	-		Išorinio žiedo
5		1,4		
6		3		
7	C	3		Vidinio žiedo
8		1,4		
9		-		
10	D	-		Riedėjimo elemento
11		1,4		
12		3		

6 lentelės tęsinys. Pradiniai virpesių tyrimo duomenys.

Eil. nr.	Guolis	Disbalanso masė, g	Rotoriaus sukimosi greitis, aps/min	Guolio defektas
13	E	3	3600	Išorinio žiedo + Vidinio žiedo + Riedėjimo elemento
14		1,4		
15		-		
16	F	-		Išsidėvėjęs
17		1,4		
18		3		

Tyrimo metu buvo naudojami 6 guoliai (tipas 6004-2Z/C3) su skirtingais defektais, kurių defektai buvo sukurti dirbtinai. Guolių defektai pavaizduoti 31 paveikslėlyje.



31 pav. Guolių defektai: A – be defektų; B – su išorinio žiedo defektu; C – su vidinio žiedo defektu; D – su riedėjimo elemento defektu; E – su riedėjimo elemento, išorinio ir vidinio žiedo defektu; F – išsidėvėjęs guolis.

Riedėjimo guolio elementų defektai žadina skirtingų dažnių virpesius. Guolio 6004-2Z/C3 pagrindiniai parametrai pateikti 7 lentelėje.

7 lentelė. Guolio 6004-2Z/C3 pagrindiniai parametrai.

Pagrindiniai parametrai	Vienetai
Riedėjimo elementų skaičius, $z$	9
Riedėjimo elemento skersmuo, $d_r$	6,24 mm
Vidurinis atstumas tarp riedėjimo kūnų centrų, $d_{vid}$	31 mm
Vidinio žiedo sukimosi dažnis, $f_r$	3600/60 Hz
Riedėjimo kūnų kontakto su žiedu kampas, $\beta$	0°

Kai riedėjimo kūnai neslysta riedėjimo takeliais, teorinės šių virpesių dažnių reikšmės apskaičiuojamos pagal šias formules (Barzdaitis, 1998, 242p.):

1. Rutuliukų probėgų išorinio žiedo riedėjimo takeliu dažnis  $f_I$ , parodo, kad ištrupėjęs ar kitaip pažeistas guolio išorinio žiedo riedėjimo takelis:

$$f_I = z \cdot \frac{f_r}{2} \left( 1 - \frac{d_r}{d_{vid}} \cdot \cos \beta \right) = 9 \cdot \frac{3600}{2} \left( 1 - \frac{6,24}{31} \cdot \cos 0 \right) = 214,7 \text{ Hz} \quad (6)$$

Čia:  $z$  – riedėjimo elementų skaičius guolyje;

$d_r$  – riedėjimo elementų skersmuo, mm;

$d_{vid}$  – vidurinis atstumas tarp riedėjimo kūnų centrų, mm;

$f_r$  – vidinio žiedo sukimosi dažnis, Hz;

$\beta$  – riedėjimo kūnų kontakto su žiedu kampas.

2. Rutuliukų probėgų vidinio žiedo riedėjimo takeliu dažnis  $f_V$ , parodo, kad ištrupėjęs ar kitaip pažeistas guolio vidinio žiedo riedėjimo takelis:

$$f_V = z \cdot \frac{f_r}{2} \left( 1 + \frac{d_r}{d_{vid}} \cdot \cos \beta \right) = 9 \cdot \frac{3600}{2} \left( 1 + \frac{6,24}{31} \cdot \cos 0 \right) = 325,3 \text{ Hz} \quad (7)$$

Čia:  $z$  – riedėjimo elementų skaičius guolyje;

$d_r$  – riedėjimo elementų skersmuo, mm;

$d_{vid}$  – vidurinis atstumas tarp riedėjimo kūnų centrų, mm;

$f_r$  – vidinio žiedo sukimosi dažnis, Hz;

$\beta$  – riedėjimo kūnų kontakto su žiedu kampas.

3. Riedėjimo kūnų sukimosi dažnis  $f_{rk}$ , parodo esamus defektus riedėjimo kūne:

$$f_{rk} = f_r \cdot \frac{d_{vid}}{d_r} \left( 1 - \left( \frac{d_r}{d_{vid}} \right)^2 \cdot \cos^2 \beta \right) = \frac{3600}{60} \cdot \frac{31}{6,24} \left( 1 - \left( \frac{6,24}{31} \right)^2 \cdot \cos^2 0 \right) = 280,5 \text{ Hz} \quad (8)$$

Čia:  $z$  – riedėjimo elementų skaičius guolyje;

$d_r$  – riedėjimo elementų skersmuo, mm;

$d_{vid}$  – vidurinis atstumas tarp riedėjimo kūnų centrų, mm;

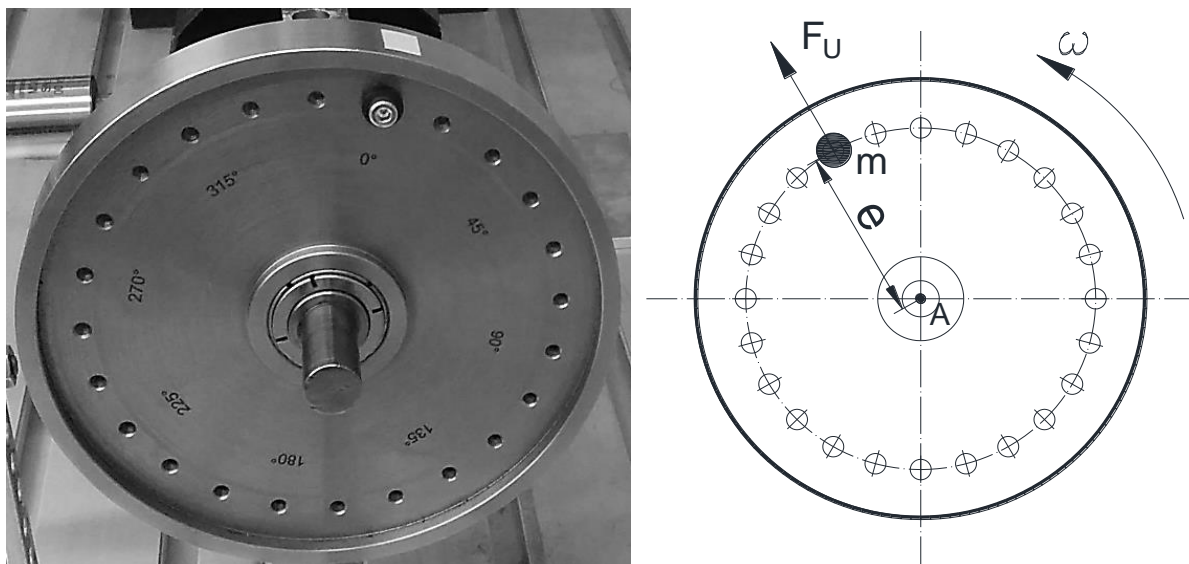
$f_r$  – vidinio žiedo sukimosi dažnis, Hz;

$\beta$  – riedėjimo kūnų kontakto su žiedu kampas.

Rotorinėse mašinos ir kinematinėse pavarose neišvengiamas slydimas tarp riedėjimo kūnų ir takelių. Be to keičiasi kūnų kontakto kampas  $\beta$ . Todėl pagal formules apskaičiuoti dažniai skiriasi

nuo virpesių matavimo metu gautų dydžių, dėl to gautos reikšmės bus naudojamos kaip orientacinės ieškant išmatuoto virpesių dažnio.

Rotorius disbalansas pasireiškia tada, kai rotoriaus geometrinė ašis nesutampa su masės centru arba kai masės centras nesutampa su sukimosi ašimi. Tyrimo metu ant rotoriaus disko buvo dedama papildoma masė  $m$  (0g, 1,4g ir 3g) 59mm atstumu ( $e$ ) nuo rotoriaus sukimosi ašies (32 pav.). Rotoriaus disbalanso sužadinti virpesiai yra priverstiniai virpesiai. Virpesių dažnis yra sinchroninis rotoriaus sukimosi dažniui 1X.



32 pav. Rotorių veikianti disbalanso jėga. A – rotoriaus sukimosi ašis;  $e$  - atstumas nuo rotoriaus sukimosi ašies iki disbalanso masės;  $m$  – disbalanso masė;  $F_U$  – rotoriaus disbalanso jėgos dydis;  $\omega$  – rotoriaus sukimosi kampinis greitis.

Rotoriaus disbalansas apskaičiuojamas pagal formulę (Barzdaitis, 1998, 209p.):

$$U = m \cdot e \quad (9)$$

Čia:  $m$  – disbalanso masė, g;

$e$  – atstumas nuo rotoriaus sukimosi ašies iki disbalanso masės, mm.

Kai disbalanso masė  $m_1=1,4$ g ir atstumas nuo disbalanso masės iki rotoriaus sukimosi ašies  $e=59$ mm, tai rotoriaus disbalansas bus pagal 9 formulę:

$$U_1 = m_1 \cdot e = 1,4 \cdot 59 = 82,6 \text{ g} \cdot \text{mm}$$

Kai disbalanso masė  $m_2=3\text{g}$  ir atstumas nuo disbalanso masės iki rotoriaus sukimosi ašies  $e=59\text{mm}$ , tai rotoriaus disbalansas bus pagal 9 formulę:

$$U_2 = m_2 \cdot e = 3 \cdot 59 = 177 \text{ g} \cdot \text{mm}$$

Rotoriaus disbalanso jėgos dydis apskaičiuojamas pagal formulę (Barzdaitis, 1998, 209p.):

$$F_U = U \cdot \omega^2 \quad (10)$$

Čia:  $\omega$  – rotoriaus sukimosi kampinis greitis, rad/s;

$U$  – rotoriaus disbalansas, g · mm.

Kampinį greitį galime gauti pagal formulę:

$$\omega = \frac{n \cdot 2\pi}{60} = \frac{3600 \cdot 2\pi}{60} = 377 \text{ rad/s} \quad (11)$$

Čia:  $n$  – rotoriaus sukimosi greitis, aps/min.

Kai rotoriaus disbalansas  $U_1=82,6\text{g} \cdot \text{mm} = 82,6 \cdot 10^{-6}\text{kg} \cdot \text{m}$  ir sukimosi kampinis greitis  $\omega = 377\text{rad/s}$ , tai rotoriaus disbalanso jėga bus randama pagal 10 formulę:

$$F_{U1} = U_1 \cdot \omega^2 = 82,6 \cdot 10^{-6} \cdot 377^2 = 11,74\text{N}$$

Kai rotoriaus disbalansas  $U_2=177\text{g} \cdot \text{mm} = 177 \cdot 10^{-6}\text{kg} \cdot \text{m}$  ir sukimosi kampinis greitis  $\omega = 377\text{rad/s}$ , tai rotoriaus disbalanso jėga bus randama pagal 10 formulę:

$$F_{U2} = U_2 \cdot \omega^2 = 177 \cdot 10^{-6} \cdot 377^2 = 25,16\text{N}$$

Apskaičiuotas guolio disbalansas ir kinematiniai guolio dažniai pateikti 8 lentelėje.

8 lentelė. PT500 rotorinės sistemos tyrimo duomenys.

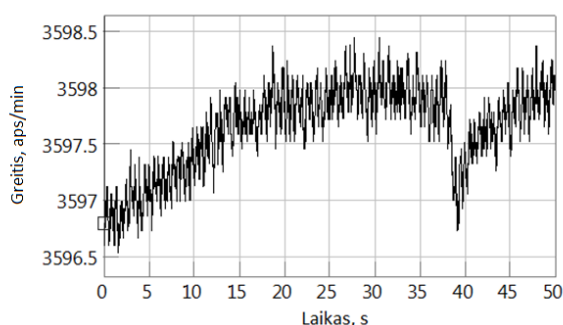
Eil. nr.	Guolis	Disbalansas, g · mm	Kinematiniai guolio dažniai, Hz	Rotoriaus sukimosi greitis, aps/min	Guolio defektas
1	A	177	-	3600	-
2		82,6			
3		-			
4	B	-	214,7		Išorinio žiedo
5		82,6			
6		177			
7	C	177	325,3		Vidinio žiedo
8		82,6			
9		-			
10	D	-	280,5		Riedėjimo elemento
11		82,6			
12		177			
13	E	177	214,7		Išorinio žiedo + Vidinio žiedo + Riedėjimo elemento
14		82,6	325,3		
15		-	280,5		
16	F	-	-		Išsidėvėjęs
17		82,6			
18		177			

### III. EKSPERIMENTINĖ DALIS

#### 3.1. Virpesių signalų apdorojimas OROS NVGate programa

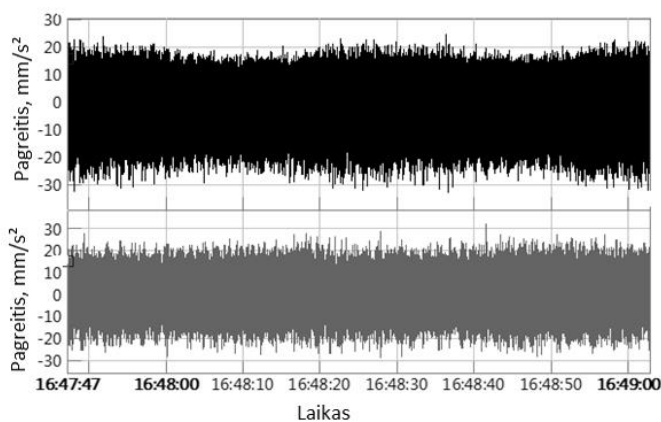
##### 3.1.1. Virpesių signalo apdorojimo technika

Ekspimento metu yra matuojami tiriamos rotorinės sistemos dviejų guolių virpesiai x ir y kryptimis (horizontalia ir vertikalia kryptimis), keičiant disbalansą ( $0 \text{ g} \cdot \text{mm}$ ,  $82,6 \text{ g} \cdot \text{mm}$  ir  $177 \text{ g} \cdot \text{mm}$ ) bei matuojamas rotoriaus sukimosi greitis, kuris nustatytas iš anksto  $\sim 3600 \text{ aps/min}$  arba  $60 \text{ Hz}$  ir nežymiai kinta (33 pav.). Tačiau analizuojami bus antrosios guoliavietės virpesių signalai, nes šią guoliavietę labiau apkrauna rotoriaus disbalansas.



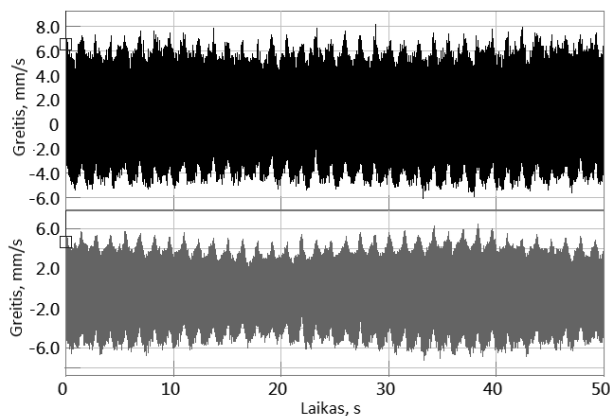
33 pav. Rotoriaus sukimosi greičio kitimas laike grafikas.

Virpesių signalai apdorojami naudojantis OROS NVGate V9.10 kompiuterine programa. Naudojant virpesių pagreičio keitlius (pjezoelektrinius akselerometrus) gaunamas virpesių pagreičių signalas (34 pav.). Pagreičio signalas yra svarbūs, nes pagreitis yra proporcingas jėgoms veikiančioms mašinoje. Taip pat pagreičių reikšmės labiausiai informatyvios atliekant greitaeigių rotorių virpesių tyrimus.



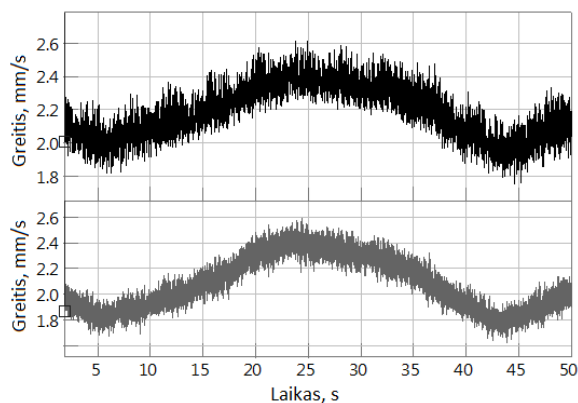
34 pav. Virpesių pagreičio kitimo laike grafikas.

Gavus virpesių pagreičio signalo duomenis galime juos apdoroti ir gauti kitus virpesių duomenų formatus, kurie suteikia daugiau informacijos apie mašinos defektus. Vienas jų yra virpesių greičio signalas (35 pav.), kuris gaunamas integruojant virpesių pagreičių signalo duomenis.



35 pav. Virpesių greičio kitimas laike grafikas.

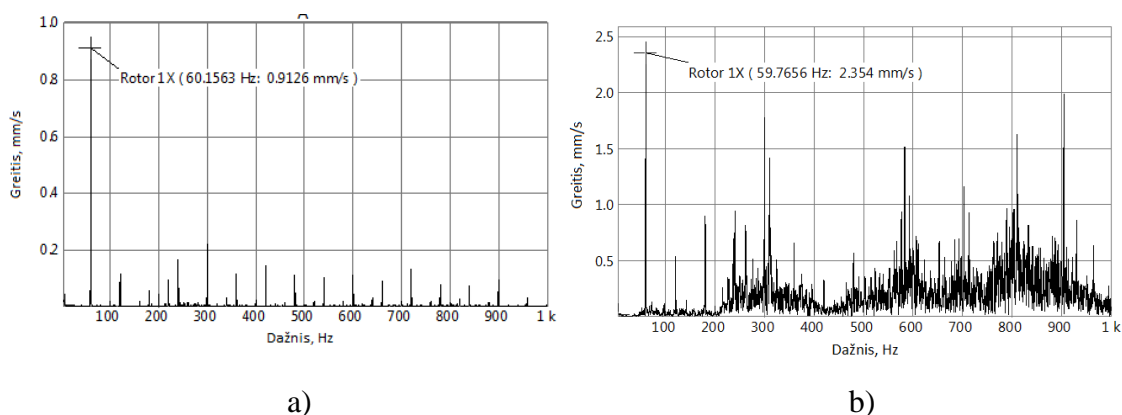
Tuomet virpesių signalo laikas yra vidurkinamas 20ms intervalais ir iš gautų reikšmių yra nustatomos virpesių greičio maksimalios reikšmės bei virpesių greičio reikšmių kvadratinis vidurkis  $V_{RMS}$ . Iš gautų  $V_{RMS}$  reikšmių sudaromi  $V_{RMS}$  kitimo laike grafikai (36 pav.).  $V_{RMS}$  kiekybiškai įvertina virpesių energiją laiko bėgyje ir laikomas virpesių intensyvumo mašinai daromos žalos matu (Barzdaitis, 1998, 54p).



36 pav.  $V_{RMS}$  kitimo laike grafikas.

Tačiau vienas virpesių signalo matavimas statistškai nėra tikslus, todėl bendras triukšmo lygis (nereikalingi virpesių signalai) gali sukelti didelius virpesių spektro komponenčių kitimus pagal amplitudes. Virpesių signalų komponenčių lygių kitimas yra suvidurkinimas ir nustatoma jų vidurkio reikšmė pagal kelis ar keliolika virpesių signalų matavimų. Tikslesnį virpesių spektrą gauname įtraukus didesnį matavimų skaičių į vidurkinimą.

Taip pat iš virpesių pagreičio matavimo duomenų galime gauti greitųjų Furjė transformacijų (angl. FFT – Fast Fourier Transform) virpesių spektrą. Šis spektras gali būti gaunamas tik iš nefiltruoto nesikeičiančio virpesių signalo, kai mašina dirba nusistovėjusiu darbo režimu. Virpesių tyrimo metu matuojami virpesiai iki 5kHz, tačiau virpesių greičių FFT spektrai pateikiami iki 1kHz, nes už 1kHz esančios reikšmės yra santykinai mažos ir neinformatyvios. OROS NVGate programa šį spektrą sudaro iš 12801 linijų. Linijos naudojamos tam, kad po įrašymo būtų gaunamas didelės skiriamosios gebos matavimas. Taip pat programa išskaido sudėtingą, poliharmoninį virpesių signalą į sinusinės formos signalą – harmonikas: pirmąją 1X, antrąją 2X ir t.t. Transformavus šiuos sinusinės formos ir skirtingų virpesių dažnių signalus iš laiko koordinatės į dažnių gausime FFT spektrą. Tai grafikas, kuriame ordinačių ašyje atidedama virpesių amplitudė (virpesių greitis  $V_{RMS}$ , mm/s), o absčių ašyje – virpesių dažnis (Barzdaitis, 1998, 75p.) kaip 37 paveikslėlyje.

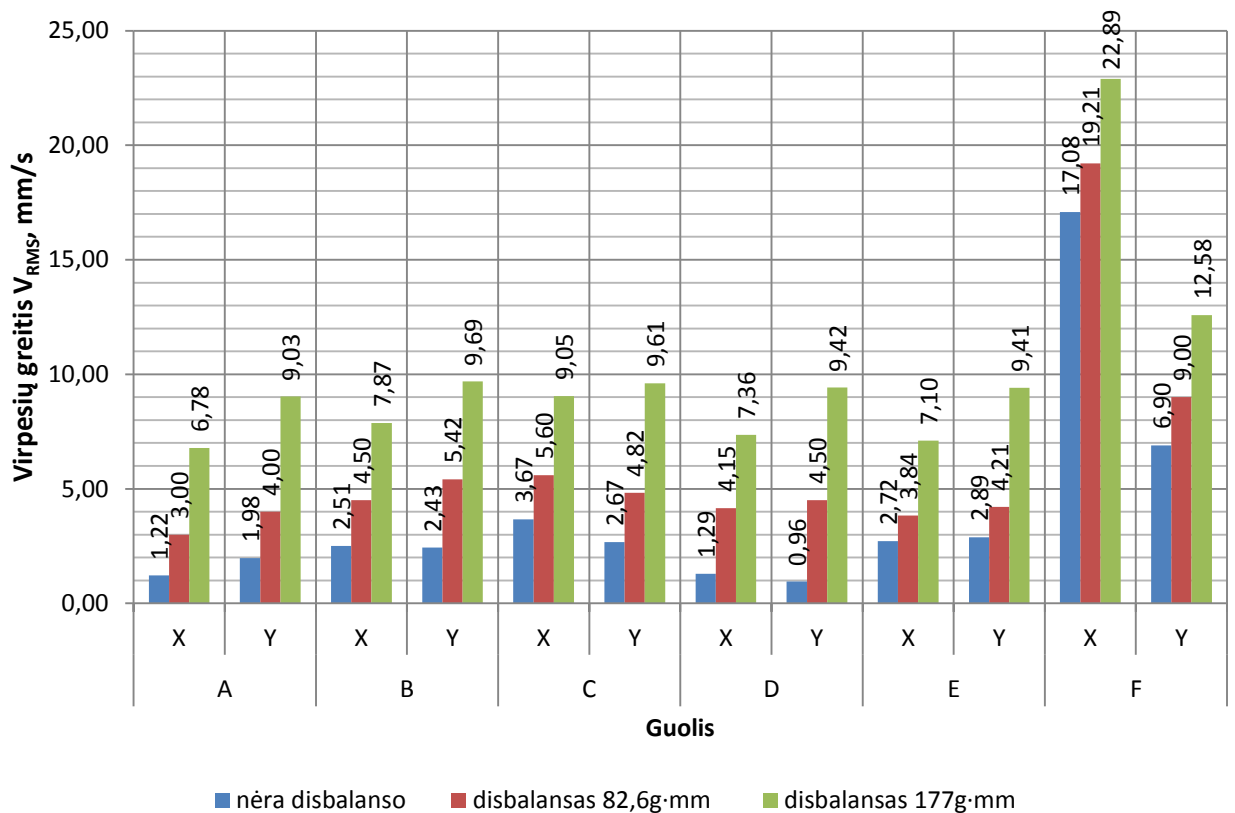


37 pav. Virpesių greičio  $V_{RMS}$  FFT spektrai: a – guolio be defektų (A guolio virpesių spektras x kryptimi, kai disbalansas 0g·mm); b – išsidėvėjusio guolio (F guolio virpesių spektras x kryptimi, kai disbalansas 0g·mm).

### 3.1.2. Virpesių lygio $V_{RMS}$ didžiausios reikšmės x ir y ašimis analizė

Didžiausios  $V_{RMS}$  reikšmės gaunamos atliekant keletą žingsnių. Pirmą iš  $V_{RMS}$  virpesių signalo gauto naudojant programą NVGate V9.10 yra gaunamos atitinkamo  $V_{RMS}$  virpesių signalo taškų reikšmės. Tuomet šiuos  $V_{RMS}$  taškų reikšmės įkeliamos į elektroninės skaičiuoklės programą MS Excel 2010 ir funkcijos MAX pagalba randama didžiausia  $V_{RMS}$  virpesių signalo taško reikšmė.

Gautos rotorinės sistemos visų tirtų guolių (A, B, C, D, E ir F) didžiausias  $V_{RMS}$  reikšmės pateiktos 38 paveikslėlyje, kai nėra rotoriaus disbalanso ir yra 82,6g·mm ir 177g·mm X ir Y ašimi.



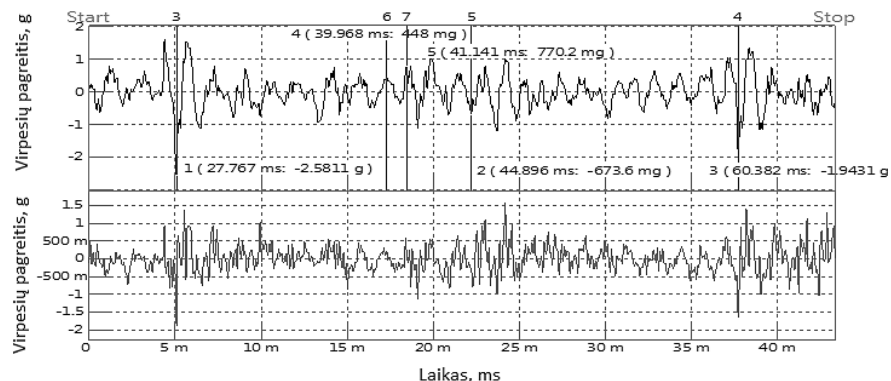
38 pav. Didžiausios  $V_{RMS}$  reikšmės x ir y ašimi.

Pastebime, kad didėjant disbalansui didėja ir  $V_{RMS}$  reikšmės, X ašimi vidutiniškai 1,97 karto, o Y ašimi 2,26 karto. Mažiausios  $V_{RMS}$  reikšmės yra rotorinės sistemos su guoliais D ir E esančius su defektais. Didžiausios  $V_{RMS}$  reikšmės yra su išsidėvėjusiu guoliu F. Pastebime, kad su išsidėvėjusiu guoliu F  $V_{RMS}$  reikšmės x ašimi dvigubai didesnės negu y ašimi, kai tuo tarpu lyginant su kitais guoliais tokių ženklų skirtumų nėra X ir Y ašimis. Taip pat pastebime, kad lyginant guolį A be defekto su guoliais turinčius defektus (B,C,D ir E)  $V_{RMS}$  reikšmės padidėja vidutiniškai 1,53 karto, o lyginant guolį A su F  $V_{RMS}$  reikšmės padidėja vidutiniškai 5,72 karto. Lyginant guolius esant defektams (B,C,D ir E) tarpusavyje pastebime, kad  $V_{RMS}$  reikšmės yra panašios ir sunku pasakyti koks tai defektas esat vienam ar keliems guolio defektams. Galime daryti išvada, kad pagal didžiausias absoliučiąjų virpesių  $V_{RMS}$  reikšmes yra sunku įvertinti ir nustatyti ar rotorinės sistemos guoliai yra geri, ar su defektu, nes tai yra bendrieji, netiesioginiu būdu išmatuoti antrosios guoliavietės virpesiai, taip pat vidurkinimo metodas nesumažina virpesių triukšmo įtakos matavimų rezultatams. Siekiant tiksliau nustatyti rotorinės sistemos defektus virpesių signaluose, tikslingiau atlikti tiriamos guoliavietės virpesių signalų kitimo laike grafikų ir FF spektrų analizę.

### 3.1.3. Virpesių signalų kitimo laike grafikai

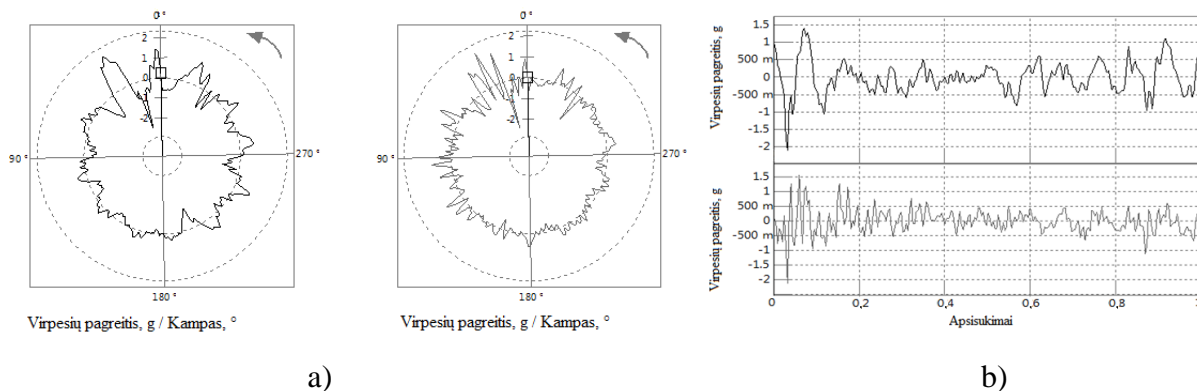
Laiko grafikai yra pakankamai informatyvūs rotorinių sistemų virpesių tyrimuose, nes leidžia pastebėti virpesius besikeičiančius laike. Šie grafikai gauti naudojant NVGate programos priedą

OrbiGate V6.0. Analizuojant B guolį su išorinio žiedo defektu, nesant disbalansui galime pastebėti riedėjimo elementų smūgius į išorinio žiedo defekto vietą laiko grafike (39 pav.). Taip pat laiko grafike matome daugiau nei du rotoriaus apsisukimus, kurie trunka apie 17ms (1/60Hz).



39 pav. B guolio su išorinio žiedo defektu, nesant disbalansui X ir Y ašimis virpesių signalo kitimo laike grafikas.

Laiko grafikus galima pateikti polinėje koordinatinių sistemoje (40a pav.). Pagal rotoriaus pasisukimo kampą ir virpesių pagreičio amplitudę (g) ir dvimatėje koordinatinių sistemoje (40b pav.), kur X ašis parodo kiek kartų yra pasisukęs rotorius, o Y yra virpesių pagreičio amplitudė (g). Abiejuose grafikuose matome vieną rotoriaus apsisukimą ir rotoriaus su guolio išorinio žiedo defekto žadinamus virpesius.

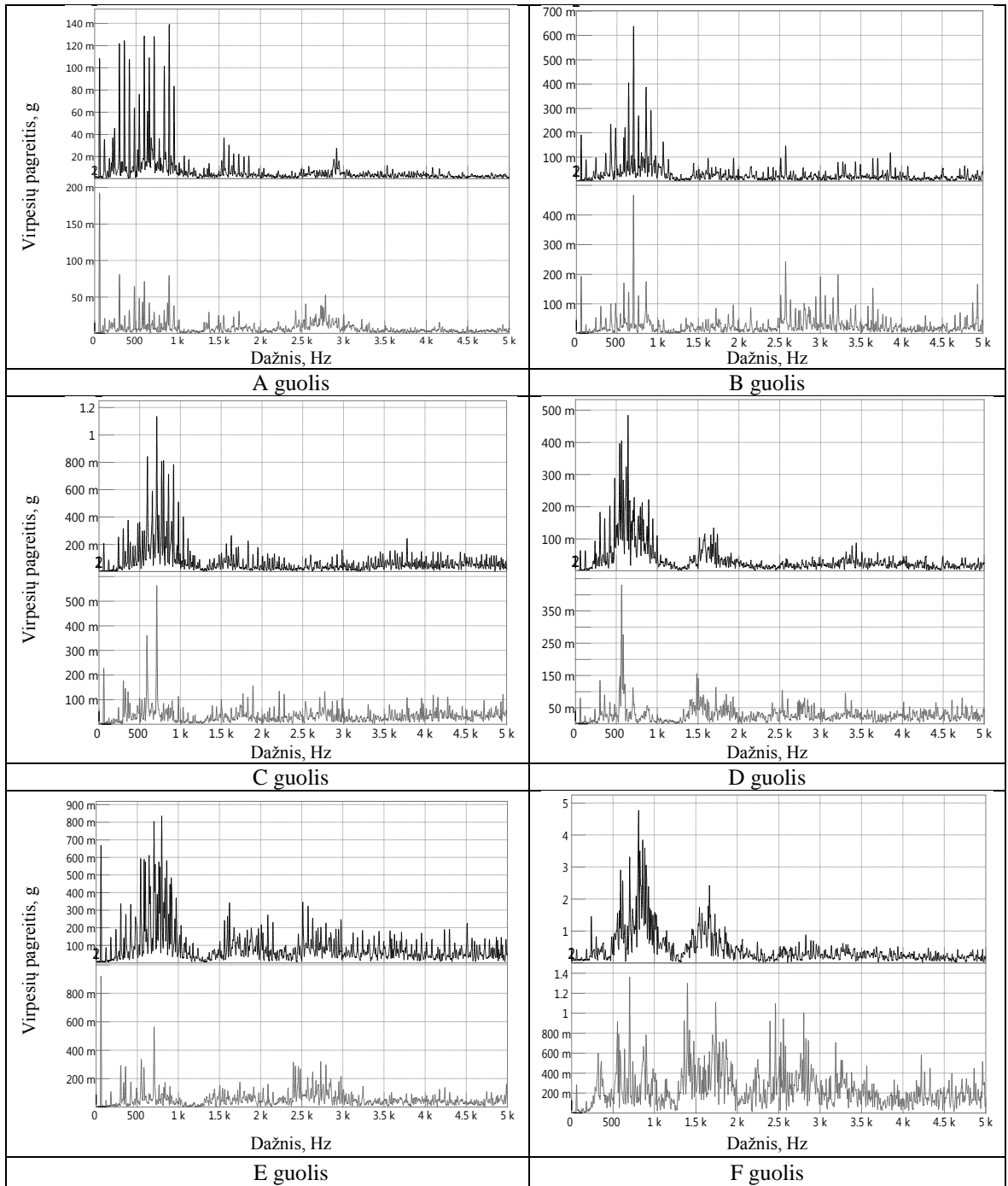


40 pav. Virpesių signalai B guolio su išorinio žiedo defektu, nesant disbalansui X ir Y ašimis: a – polinėje koordinatinių sistemoje; b – dvimatėje koordinatinių sistemoje.

Tačiau šiuo būdu analizuoti virpesių signalus yra per daug sudėtinga, nes rotorius sukasi pastoviu greičiu ir dėl aukšto dažnio virpesių. Todėl toliau nebeanalizuosime virpesių signalų kitimo laike grafikų, o toliau analizuosime virpesių pagreičių ir greičių FFT spektrus, kurie žymiai informatyvesni nei laiko grafikai.

### 3.1.4. Virpesių pagreičių $a_{RMS}$ FFT spektrai

FFT metodas pagrįstas pagreičių lygių analize, siejant spektro reikšmes su kinematiniais defektų pasireiškimo dažniais. Gauti guolių be defektų (A) ir su defektais (B, C, D, E ir F) x ir y ašimis, kai nėra disbalanso virpesių pagreičių  $a_{RMS}$  FFT spektrai, kurie pateikti 41 paveikslėlyje.



41 pav. Virpesių pagreičių  $a_{RMS}$  FFT spektrai x ir y ašimis, kai nėra disbalanso.

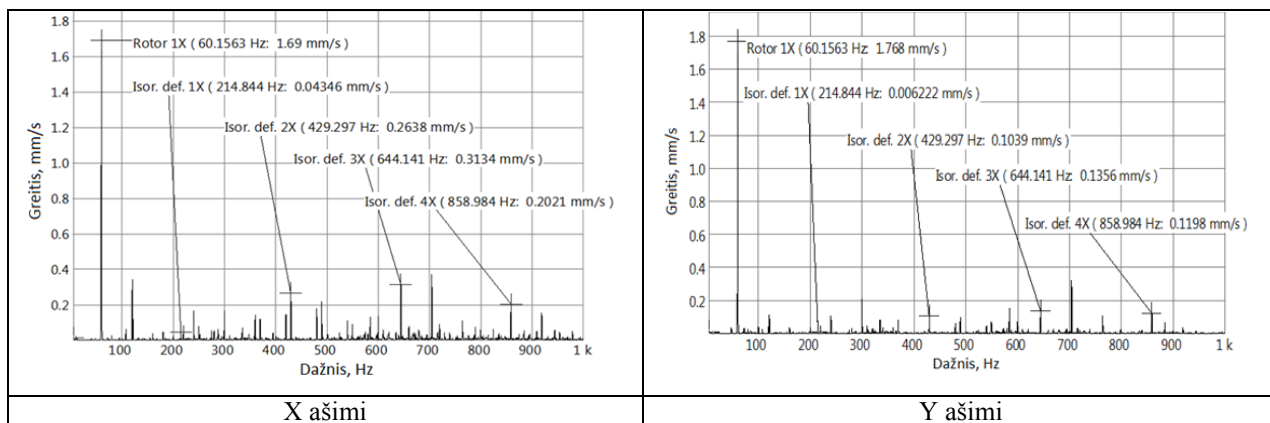
Lyginant A guolį (be defektų) su B, C, D, E ir F guoliais (su defektais) pastebime, kad be pagreičio amplitudės padidėjimo guoliuose su defektais taip pat atsiranda daugiau aukšto dažnio virpesių. Tuo tikslu reikalinga atlikti virpesių signalo papildomą filtravimą ar kitokį virpesių signalo

apdorojimą, kad galėtume paprasčiau analizuoti virpesių pagreičių  $a_{RMS}$  FFT spektrą, tačiau to NVGate V9.10 programa atlikti negali, nes gali pritaikyt tik vieną filtrą virpesių signalui apdoroti. Todėl toliau analizuosime tik virpesių greičių  $V_{RMS}$  FFT spektrus, kurie taip pat padeda ankstesnėje guolio defekto vystymosi stadijoje identifikuoti guolio defektus, bei praktikoje yra labiau paplitę analizuojant virpesių signalus.

### 3.1.5. Virpesių greičių $V_{RMS}$ FFT spektrinė analizė

Virpesių greičių  $V_{RMS}$  FFT spektrai analizuojami kaip anksčiau minėtame skyriuje (3.1.1. Virpesių signalo apdoravimo technika) naudojant NVGate V9.10 programą ir ieškoma tiriamos rotorinės sistemos sinchroninių sūkių 1X harmonika, ir guolio defekto nX harmonikų.

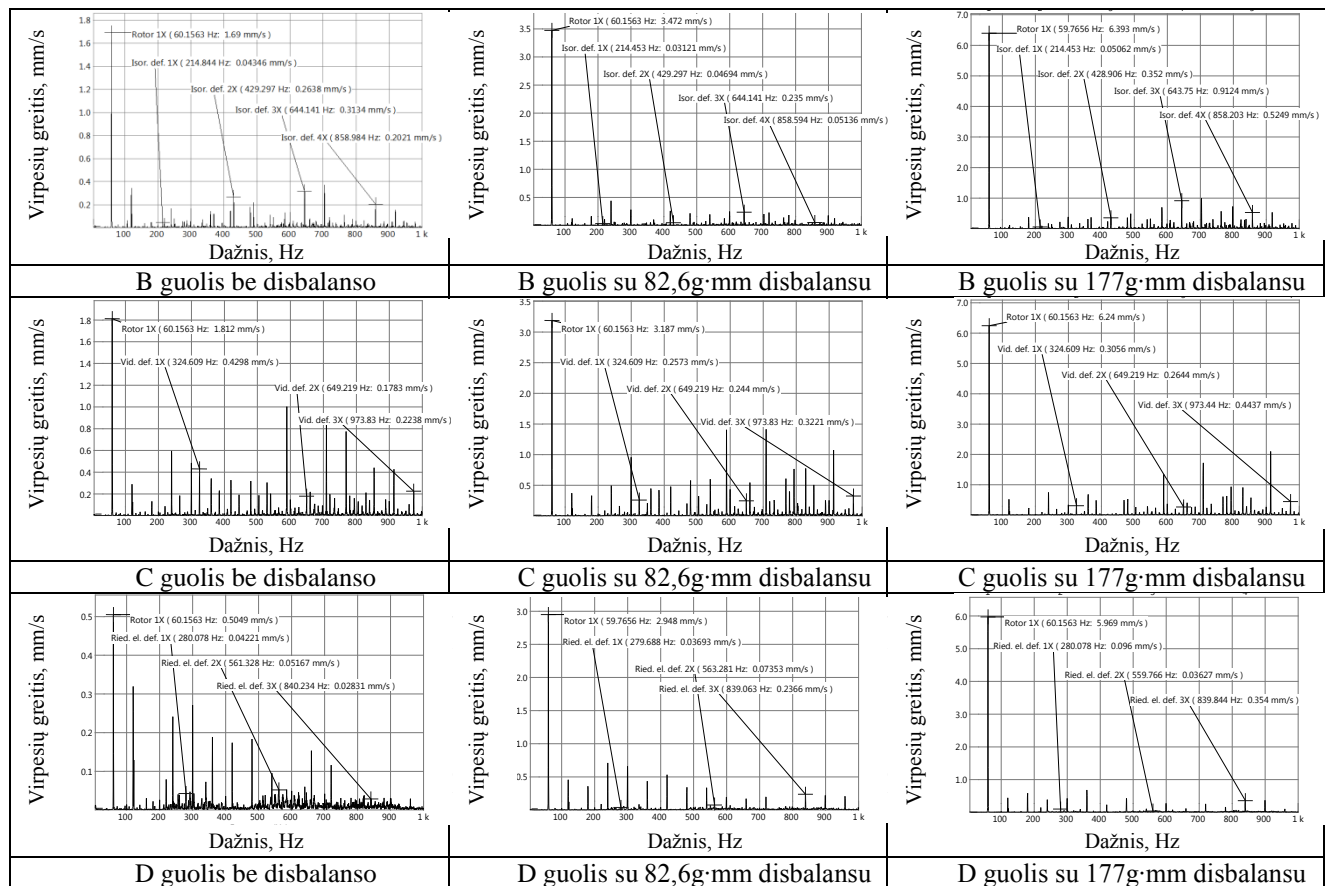
Žemiau esančiame 42 paveikslėlyje pateikti B guolio su išorinio žiedo defektu, kai nėra disbalanso tiriamos guoliavietės virpesių greičio  $V_{RMS}$  FFT spektrai x ir y ašimis. Kaip matome x kryptimis rotorius harmonika 1X yra 1,69mm/s, o y kryptimi truputį didesnė ir yra 1,768mm/s. Toliau analizuodami guolių defektų nX harmonikas pastebime, kad x ašimi guolių defektų nX harmonikos didesnės nei y ašimi (1X: 0,04346mm/s > 0,00622mm/s; 2X: 0,2638mm/s > 0,1039mm/s ir t.t.). Rotoriaus harmonikų virpesiai y ašimi yra didesni, dėl to, kad rotorius veikia gravitacija y ašimi ir kuo didesnis rotorius disbalansas tuo jo virpesiai y ašimi bus didesni nei x ašimi, tačiau guolių defektų harmonikos y ašimi yra mažesnės negu x ašimi. Guolio virpesiai x ašimi didesni, dėl guoliavietės mažesnio standumo x ašimi. Todėl toliau darbe bus nagrinėjami tik x ašimi FFT spektrai.



42 pav. Virpesių greičio  $V_{RMS}$  FFT spektrai B guolio (su išorinio žiedo defektu), kai nėra disbalanso.

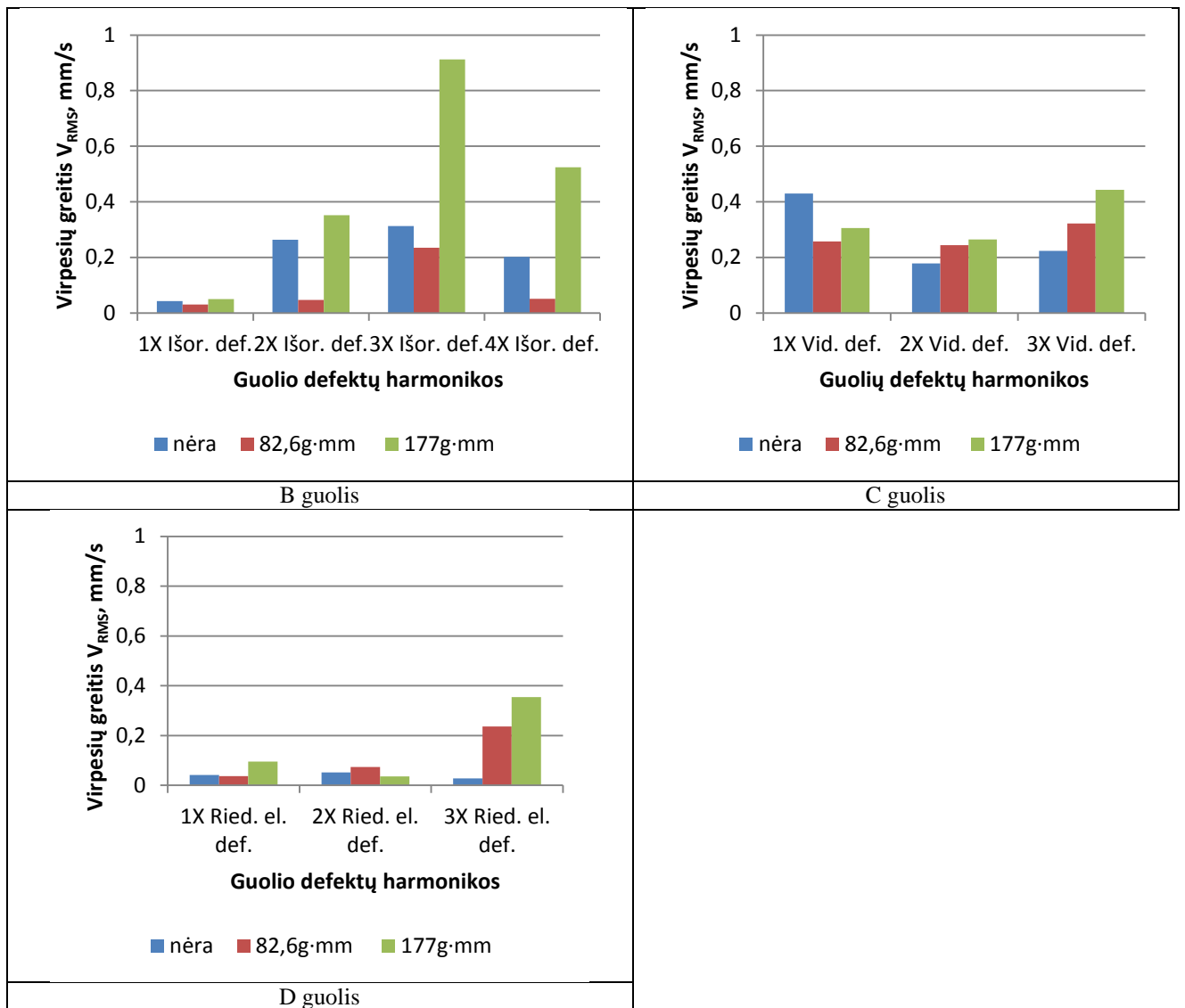
Eksperimento metu gauti guolių su defektais (B, C ir D), kai nėra ir yra disbalansas (82,6g·mm ir 177g·mm), virpesių greičių  $V_{RMS}$  FFT spektrai x ašimi, kurie yra palyginami (43 pav.). Kiekvieną spektrą charakterizuoja rotorius 1X ir jų defektų (išorinio ir vidinio žiedo, bei riedėjimo elemento) 1X, 2X, 3X ir 4X harmonikų vertės, kurios yra pateiktos FFT spektruose.

Pagal guolių vystymosi stadijas visų trijų guolių spektrai yra 3-os stadijos, nes pasireiškia guolių defektų kartotiniai dažniai (harmonikos) FFT spektruose.



43 pav. Virpesių greičių  $V_{RMS}$  FFT spektrai x ašimi, kai nėra disbalanso ir yra (82,6g·mm ir 177g·mm).

Pagal guolių virpesių greičių  $V_{RMS}$  FFT spektrų duomenis esančius 43 paveikslėlyje sudarome guolių defektų harmonikų diagramas (44 pav.), kurios parodys virpesių greičių kitimą harmonikose, esant skirtingam disbalansui ir guolio defektui. Pagal šias diagramą siekiama ištirti disbalanso įtaką guolio defekto įvertinimui.

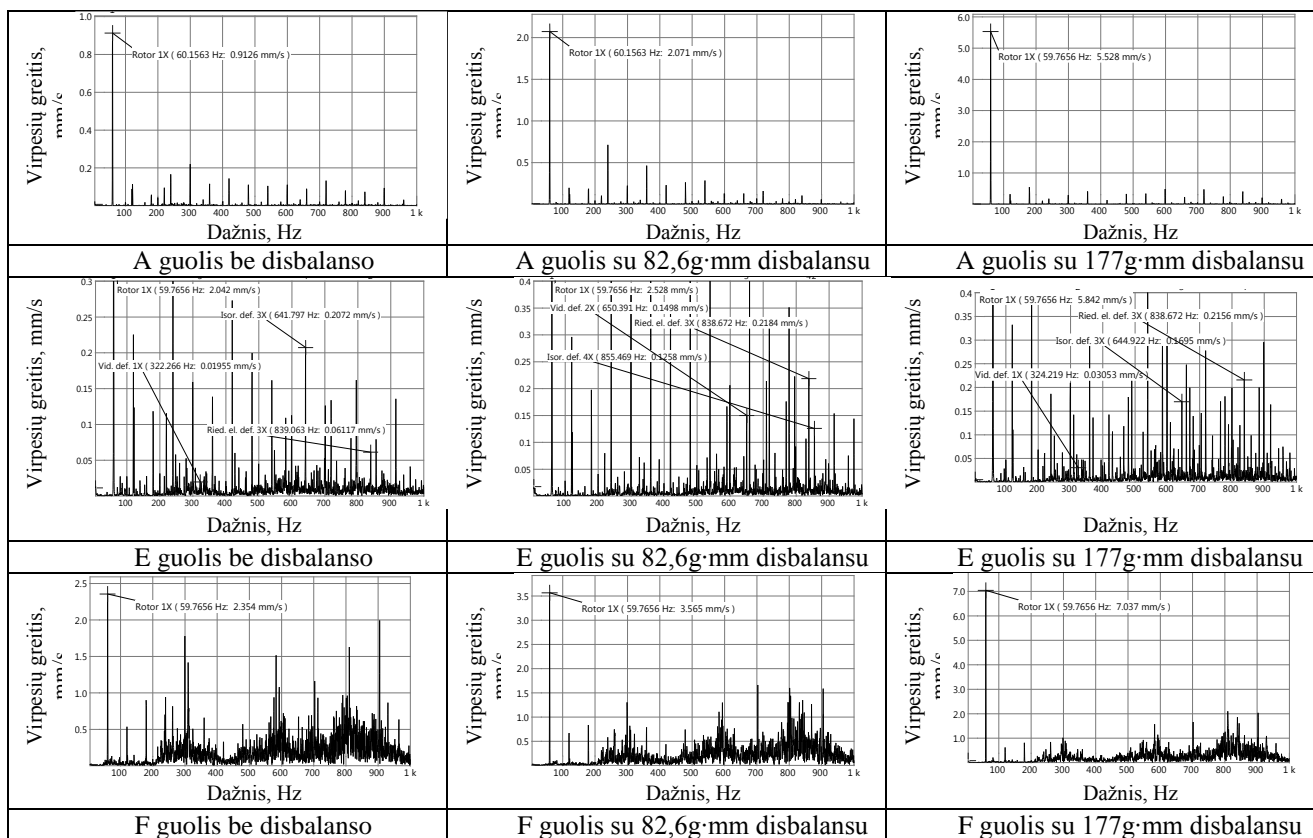


44 pav. B, C ir D guolių defektų harmonikos x ašimi.

44 paveikslėlyje pateikta B, C ir D guolių defektų harmonikų reikšmės x ašimi. Esant išoriniam žiedo defektui (B guolis) visais trimis disbalanso atvejais dominuoja 3X guolio defekto harmonikos, tačiau esant vidinio žiedo ir riedėjimo elemento defektams dominuoja skirtingos harmonikos, esant skirtingam disbalansui. Tačiau vidinio žiedo ir riedėjimo elemento defekto (C ir D guoliai) atvejais esant disbalansui dominuoja 3X guolio defekto harmonikos, o nesant disbalansui C guolyje dominuoja 1X ir D guolyje 2X guolio defekto harmonikos. B ir C guolio, su išorinio ir vidinio žiedo defektu atitinkamai, defektų reikšmės yra didžiausios ir lengviau aptinkamos negu D guolio su riedėjimo elemento defektu.

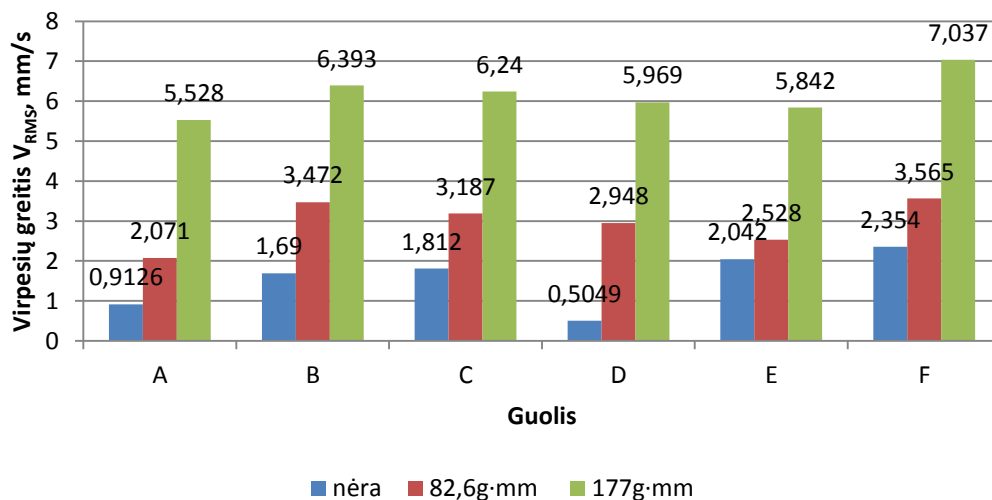
Eksperimento metu gauti likę A, E ir F guolių t.y. guolio be defektų, guolio su trimis (riedėjimo elemento, išorinio ir vidinio žiedo) defektai ir išsidėvėjusio guolio virpesių greičių  $V_{RMS}$  FFT spektrai x ašimi (45 pav.), kai nėra ir yra disbalansas (82,6g·mm ir 177g·mm). Kaip ir anksčiau kiekvieną spektrą charakterizuoja rotoriaus 1X ir jų defektų (išorinio ir vidinio žiedo, bei riedėjimo elemento) 1X, 2X, 3X ir 4X harmonikų vertės, kurios yra pateiktos FFT spektruose. Pagal guolių

vystymosi stadijas A guolio spektrai yra 2-os stadijos, nes galime pastebėti guolio rezonansinius dažnius. E guolio spektrai yra 3-os stadijos, nes pasireiškia guolio defektų kartotiniai dažniai (harmonikos) FFT spektruose, o F guolio spektrai yra 4-os stadijos, nes yra padidėjęs rotoriaus harmonikų amplitudės ir atsiradęs virpesių „miškas“ FFT spektruose.



45 pav. Virpesių greičių  $V_{RMS}$  FFT spektrai x ašimi, kai nėra disbalanso ir yra (82,6g·mm ir 177g·mm).

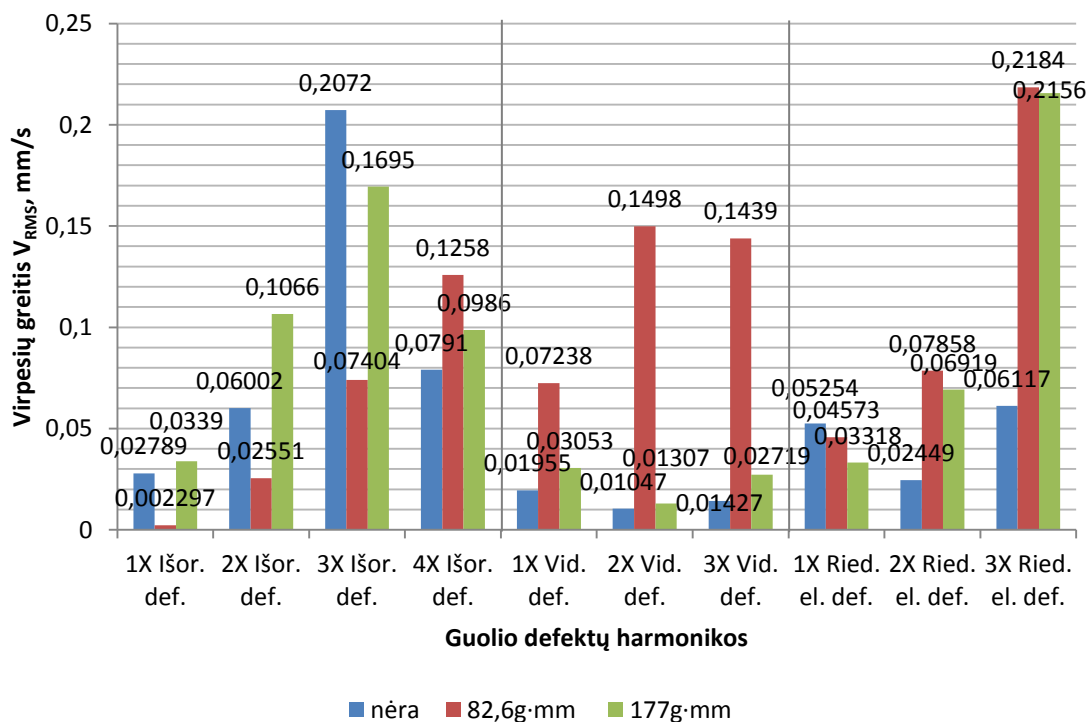
Pagal visų šešių A, B, C, D, E ir F guolių virpesių greičių FFT spektrų duomenis esančius 43 ir 45 paveikslėliuose sudarome rotoriaus 1X harmonikų diagramą (46 pav.).



46 pav. A, B, C, D, E ir F guolių rotoriaus 1X harmonikos x ašimi.

Atlikus guolio A be defekto rotoriaus 1X harmonikų virpesių greičių palyginimą su guoliais B, C, D, E ir F pastebėta, kad didinat disbalansą rotoriaus 1X harmonikų virpesių greitis didėja vidutiniškai 2,1 karto. Taip pat pastebėta, kad guolio defektai gali išryškinti rotoriaus 1X harmoniką, net iki 2,58 karto, esant tam pačiam disbalansui.

Pagal E guolio virpesių greičių FFT spektrų duomenis esančius 45 paveikslėlyje sudarome guolių defektų harmonikų diagramą (47 pav.), kuri parodys virpesių greičių kitimą harmonikose, esant skirtingam disbalansui ir guolio defektui. Pagal šią diagramą siekiama iširti disbalanso įtaką guolio defekto aptikimui.



47 pav. E guolio defektų harmonikos x ašimi.

47 paveikslėlyje pateikta E guolio defektų harmonikų reikšmės x ašimi. Esant išoriniam žiedo defektui dominuoja 3X ir 4X guolio defektų harmonikos. Esant vidiniam žiedo defektui dominuoja 2X ir 3X guolio defektų harmonikos, o esant riedėjimo elemento defektui dominuoja 3X guolio defektų harmonikos. E guolyje su visais trim guolio defektais didžiausios ir lengviau aptinkamos guolio defekto harmonikų reikšmės yra išorinio žiedo ir riedėjimo elemento defekto harmonikos lyginant su vidinio žiedo defekto harmonikų reikšmėm.

Pastebime, kad didėjant disbalansui E guolyje harmonikos nevisą laiką padidėja kaip ir B, C ir D guoliuose. Taip pat lyginant dominuojančias harmonikas E guolio, kai yra visi trys guolio defektai su B, C ir D guoliais, kai yra tik vienas guolio defektas, dominuojančio harmonikos atitinkamai pagal defektą (lyginama B ir E guolių išorinio žiedo harmonikos ir t.t.) kartais skiriasi, bet dažniausiai dominuoja 3X harmonikos.

Apibendrinant galime teigti, kad guolio defekto harmonikų  $nX$  virpesių lygis nepriklauso nuo rotoriaus disbalanso. Taip pat pastebėta, kad dažniausiai dominuoja  $3X$  guolio defekto harmonika. Pagal guolių vystymosi stadijas guolio A (be defekto) spektrai yra 2-os stadijos, nes galime pastebėti guolio rezonansinius dažnius FFT spektruose. Guolių B, C, D ir E spektrai yra 3-os stadijos, nes pasireiškia guolio riedėjimo elemento, išorinio ar vidinio žiedo defektų kartotiniai dažniai (harmonikos) FFT spektruose, o F guolio spektrai yra 4-os stadijos, nes yra padidėjusios rotoriaus harmonikų amplitudės ir atsiradęs virpesių „miškas“ FFT spektruose.

Siekiant apibendrinti ir palyginti pateiktus tyrimų duomenis, panaudosime statistinį defekto atpažinimo rodiklį DAR, kuris parodo kiek kartu rotoriaus  $1X$  harmonika didesnė už didžiausią guolio defekto harmoniką t.y. kuo didesnė DAR reikšmė tuo lengviau pastebėti defektus. DAR padeda įvertinti guolio defektų nustatymo sudėtingumą ir apskaičiuojama pagal šią formulę (Tadžijevs, 2013, 1015p; Tadžijevs, 2015, 90p):

$$DAR = \frac{V_{def}}{V_{Rotor\ 1X}} \quad (12)$$

Čia:  $V_{def}$  – dominuojanti guolio defekto  $nX$  harmonika virpesių greičio reikšmė, mm/s;

$V_{Rotor\ 1X}$  – rotoriaus  $1X$  reikšmė, mm/s.

Apskaičiuojame B guolio DAR x ašimi, kai nėra disbalanso ir rotoriaus  $1X$  harmonika yra 1,768mm/s, o dominuojanti guolio defekto  $3X$  harmonika yra 0,1356mm/s pagal 7 formulę:

$$DAR_{B1} = \frac{0,1356}{1,768} = 0,077$$

Analogiškai apskaičiuojame ir kitus guolių DAR reikšmes pagal 12 formulę. Gauti rezultatai pateikti 9 lentelėje.

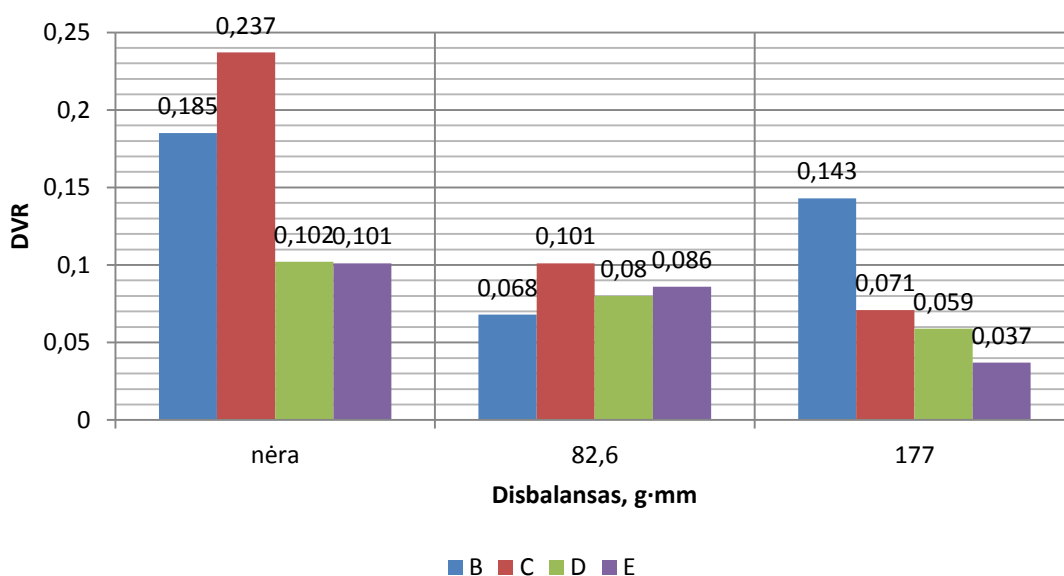
9 lentelė. Guolių apskaičiuotos DAR reikšmės.

Eil. Nr.	Guolis	Disbalansas, g·mm	Ašis	Rotor 1X, mm/s	Dominuojanti guolio defekto $nX$ harmonika, mm/s	DAR
1	B	-	X	1,69	0,3134	0,185
2		82,6		3,472	0,235	0,068
3		177		6,393	0,9124	0,143
4		-	Y	1,768	0,1356	0,077
5		82,6		4,373	0,1701	0,039
6		177		8,602	0,1343	0,016

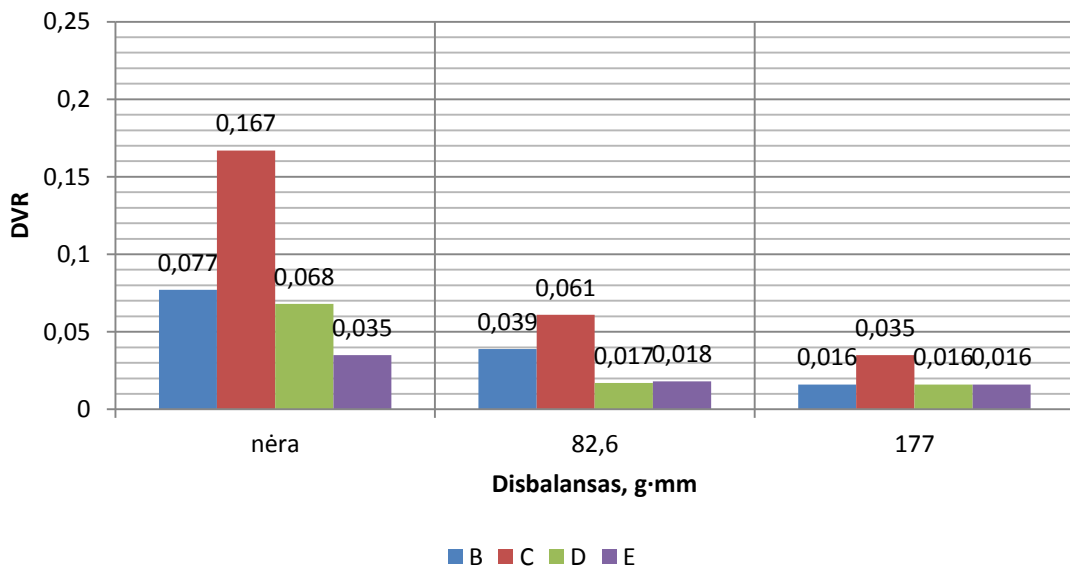
9 lentelės tęsinys. Guolių apskaičiuotos DAR reikšmės.

Eil. Nr.	Guolis	Disbalansas, g·mm	Ašis	Rotor 1X, mm/s	Dominuojanti guolio defekto nX harmonika, mm/s	DAR
7	C	-	X	1,812	0,4298	0,237
8		82,6		3,187	0,3221	0,101
9		177		6,24	0,4437	0,071
10		-	Y	2,046	0,3416	0,167
11		82,6		3,902	0,2395	0,061
12		177		8,163	0,2828	0,035
13	D	-	X	0,5049	0,05167	0,102
14		82,6		2,948	0,07353	0,080
15		177		5,969	0,354	0,059
16		-	Y	0,6578	0,04441	0,068
17		82,6		3,597	0,06163	0,017
18		177		7,877	0,1264	0,016
19	E	-	X	2,040	0,2072	0,101
20		082,6		2,528	0,2184	0,086
21		177		5,842	0,2156	0,037
22		-	Y	2,185	0,07618	0,035
23		82,6		3,542	0,065471	0,018
24		177		8,208	0,135	0,016

Tiriamų B, C, D ir E guolių DAR grafikai x ir y ašimis pateikti 48 ir 49 paveikslėliuose.



48 pav. B, C, D ir E guolių DAR x ašimi.



49 pav. B, C, D ir E guolių DAR y ašimi.

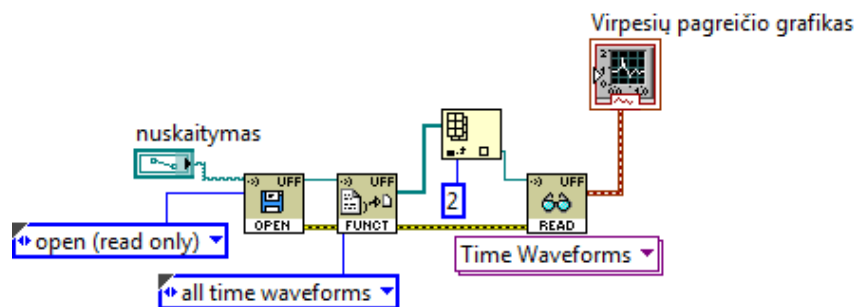
Atliekant B, C, D ir E guolių DAR analizę x ir y ašims pastebime, kad C guolio abejom ašim DAR reikšmės yra didžiausias, dėl to šiame guolyje bus lengviau pastebimi defektai nei kituose guoliuose. Sunkiau pastebimi defektai bus D ir E guoliuose, nes jų mažiausios DAR reikšmės. Pastebime tendencija (nepaisant x ašimi B guolio esant didžiausiam 177g·mm disbalansui), kad didėjant disbalansui guolių defektų aptikimas sunkėja, dėl mažėjančios DAR reikšmės. Taip pat pastebime, kad guolių defektų identifikavimas x ašimi yra lengvesnis, nes rotorius sinchroninio dažnio virpesių  $V_{RMS}$  yra mažesnis negu y ašimi, o defektų virpesių  $V_{RMS}$  x ašimi yra didesni nei y ašimi. Darome išvada, kad lengviausia defektus identifikuoti x ašimi ir esant kuo mažesniai rotorius disbalansui.

### 3.2. Virpesių signalų apdorojimas NI LabVIEW programa

#### 3.2.1. Virpesių signalo apdorojimo technika

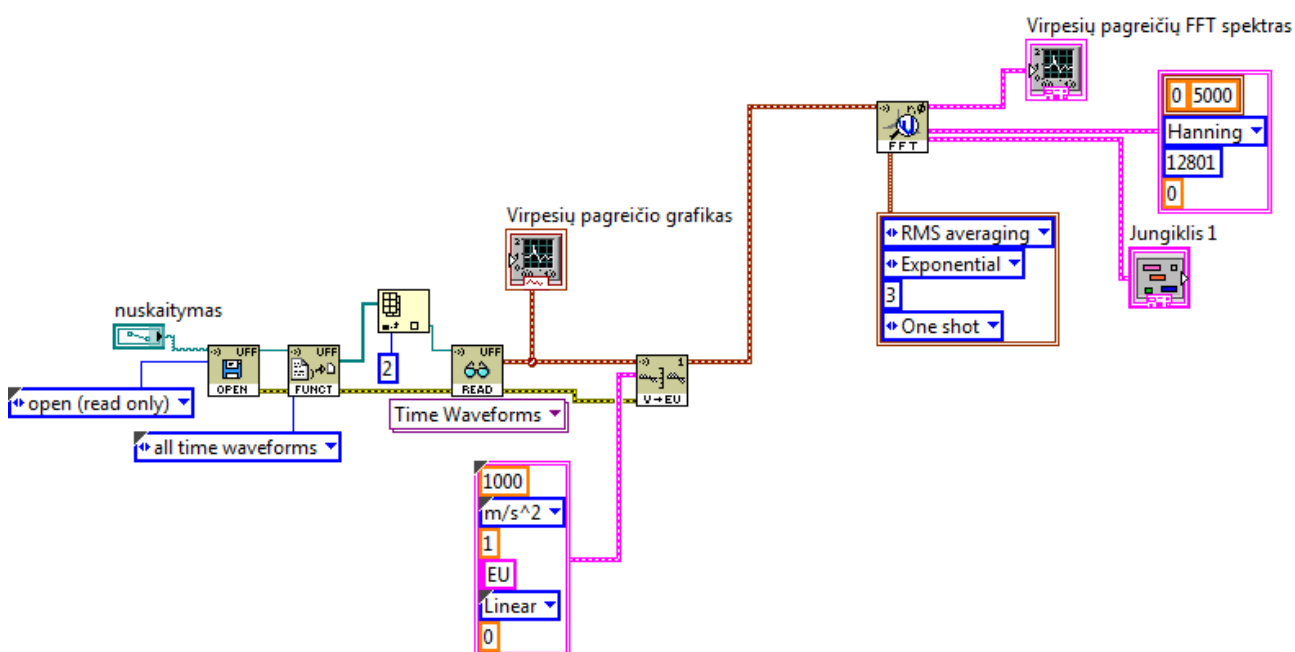
Toliau bus apdorojami virpesių signalai x kryptimi, kai nėra disbalanso masės, nes tuomet bus labiau pastebimi guolio defekto virpesiai. Virpesių signalai apdorojami naudojantis NI LabVIEW 2015 kompiuterine programa.

Virpesių apdorojimo programos algoritmas sudaromas iš įvairių jungiklių, indikatorių ir valdiklių. Pirmiausia yra parenkamas ir nuskaitomas failas su įrašytu virpesių pagreičio signalu, tuomet šis virpesių pagreičių signalas yra pateikiamas virpesių pagreičio laiko grafike. Virpesių pagreičio grafiko gavimo programos algoritmas pateiktas 50 paveikslėlyje.



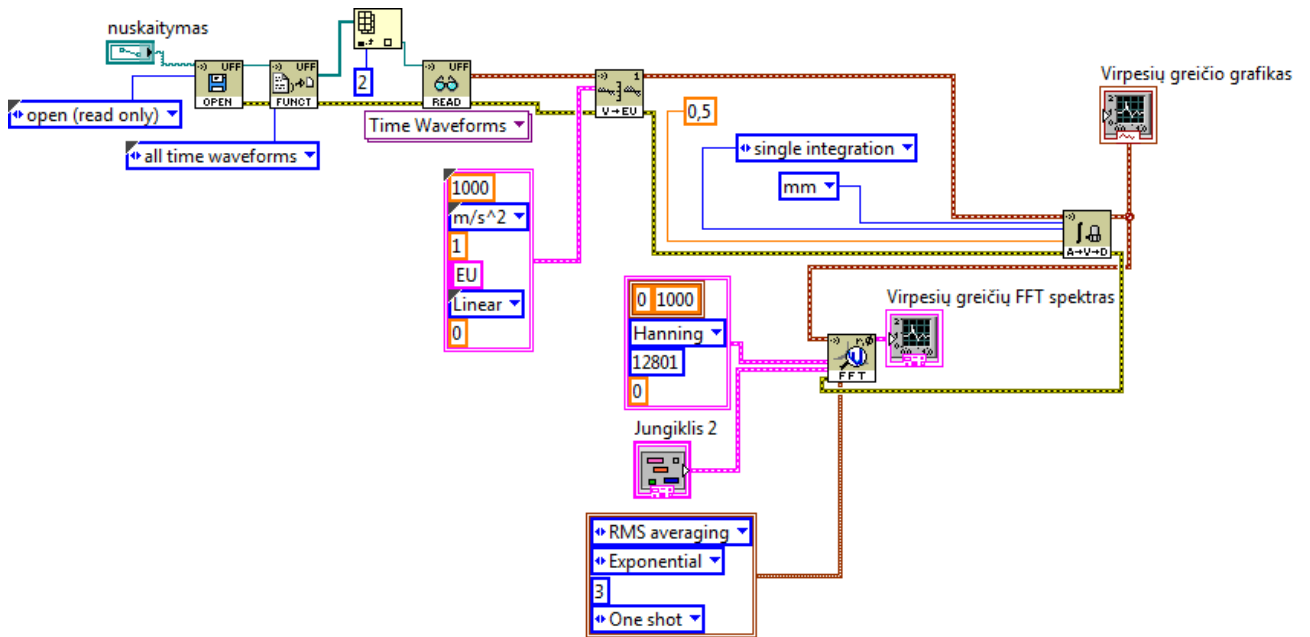
50 pav. Virpesių pagreičio grafiko gavimo programos algoritmas.

Norint gauti virpesių pagreičio FFT spektrą reikia nustatyti grafiko mastelį bei parinkti FFT spektro parametrus (dažnių intervalą nuo 0-5kHz, Haningo lango funkcija, linijų skaičių 12801, persidengimą 0 %, RMS vidurkinimą ir kt.). Virpesių pagreičio FFT spektro gavimo programos algoritmas pateiktas 51 paveikslėlyje.



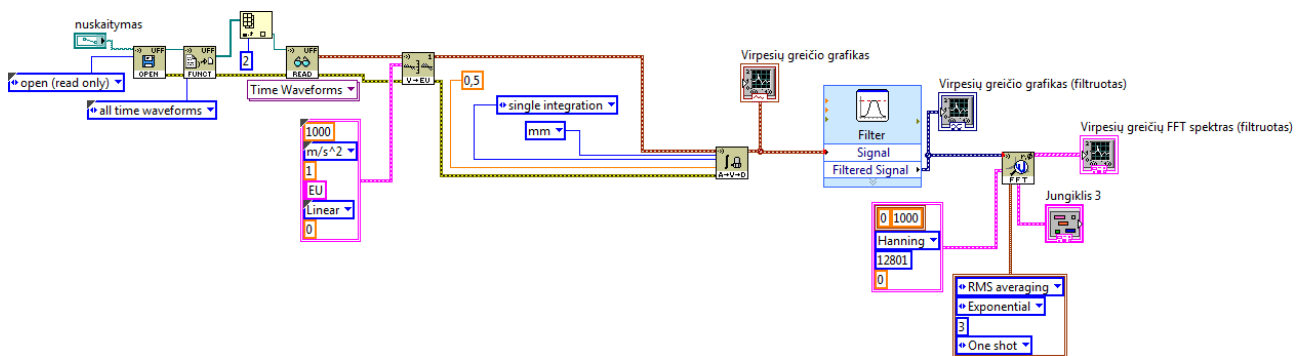
51 pav. Virpesių pagreičio FFT spektro gavimo programos algoritmas.

Norint gauti virpesių greičio grafiką ir FFT spektrą reikia nustatyti virpesių greičio grafiko mastelį ir atlikti virpesių pagreičio signalo integravimą. Virpesių greičių FFT spektras gaunamas iš integruoto virpesių pagreičio signalo su parinktais virpesių greičio FFT spektro parametrais (dažnių intervalą nuo 0-1kHz, Haningo lango funkcija, linijų skaičių 12801, persidengimą 0 %, RMS vidurkinimą ir kt.). Virpesių greičio grafiko ir FFT spektro gavimo programos algoritmas pateiktas 52 paveikslėlyje.



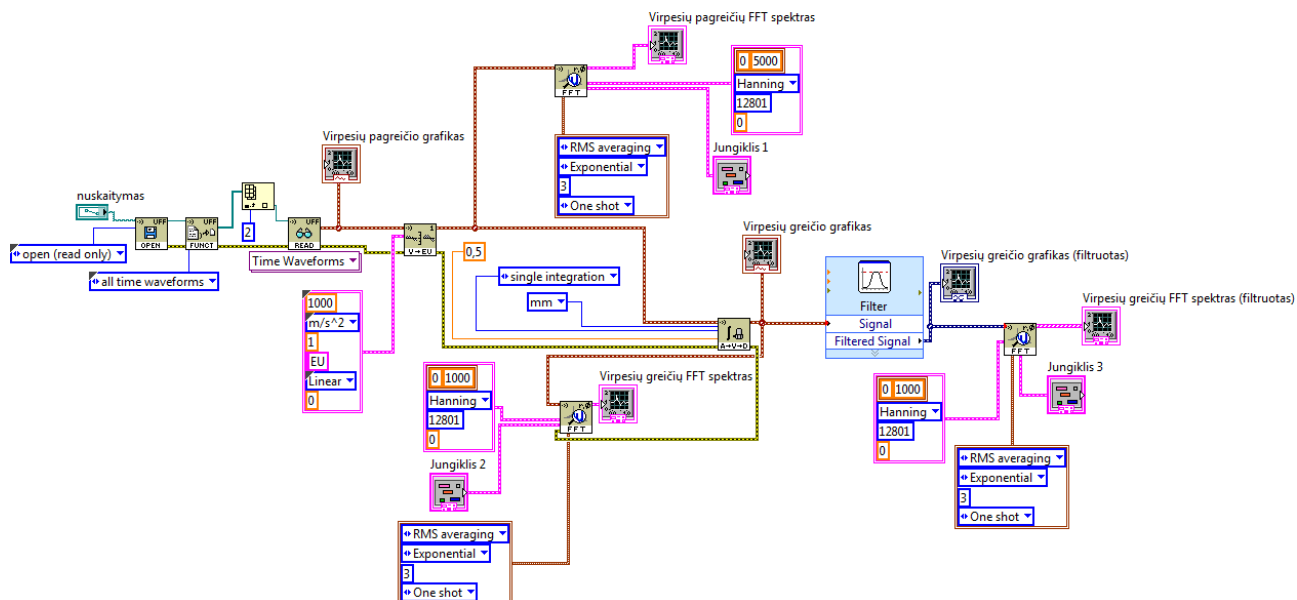
52 pav. Virpesių greičio grafiko ir FFT spektro gavimo programos algoritmas.

Norint gauti filtruotą virpesių greičio grafiką ir FFT spektrą iš kart po virpesių pagreičio signalo integravimo pritaikome dažnių praeinamumo (angl. bandpass) filtrą. Filtras nepraleidžia virpesių kurių dažnis yra iki 100Hz ir nuo 800Hz. Toliau atliekame tokius pat veiksmus kaip ir nefiltruoto virpesių greičio grafiko ir FFT spektro gavime anksčiau. Filtruoto virpesių greičio grafiko ir FFT spektro gavimo programos algoritmas pateiktas 53 paveikslėlyje.



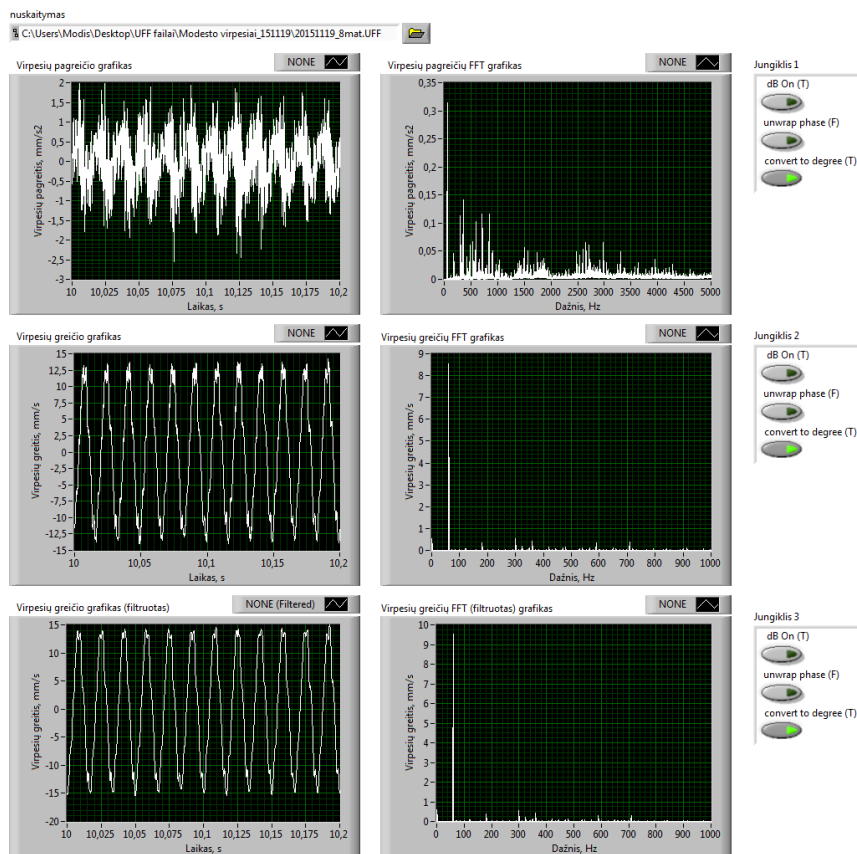
53 pav. Filtruoto virpesių greičio grafiko ir FFT spektro gavimo programos algoritmas.

Sudarytas virpesių signalo apdorojimo programos algoritmas blokinėje diagramoje pateiktas 54 paveikslėlyje.



54 pav. Virpesių signalo apdorojimo programos algoritmas blokinėje diagramoje.

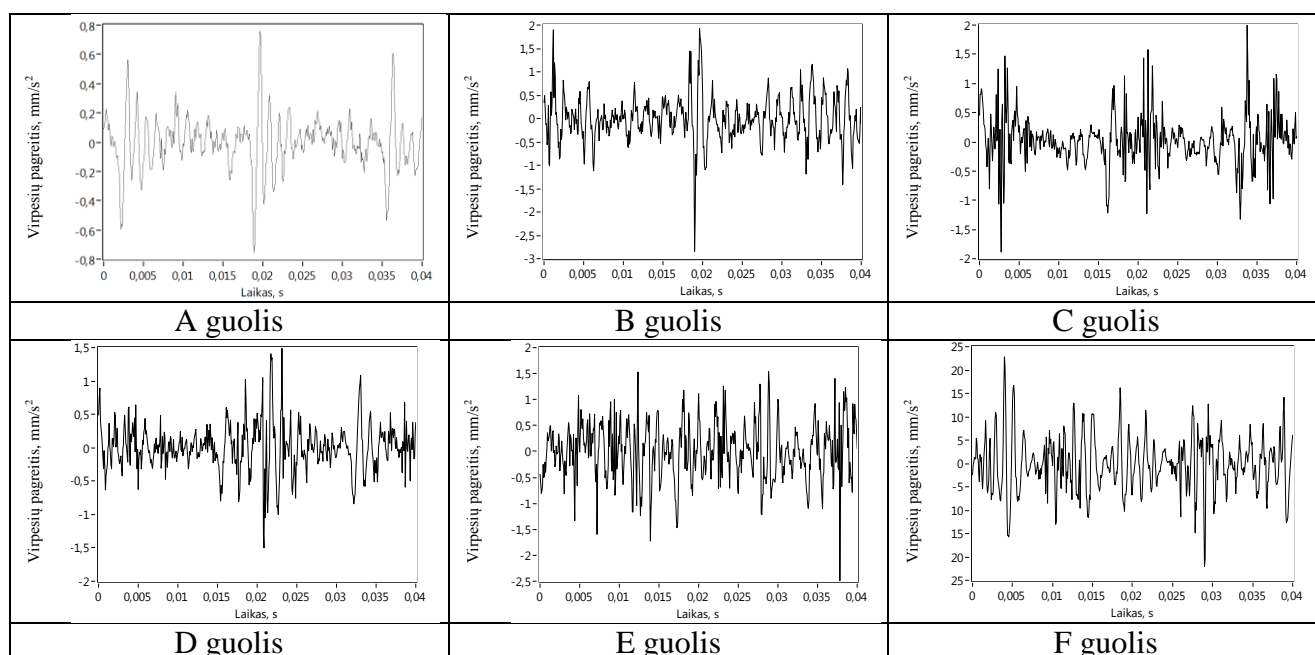
Virpesių signalo apdorojimo programos vartotojo sąsajos langas (55 pav.) sąveikauja su virtualiu instrumentu t.y. sukurta virpesių apdorojimo programa. Vartotojo sąsajos lange yra virpesių pagreičio įkėlimo mygtukas, virpesių pagreičių/greičių grafikai ir FFT spektrai, grafikų ir spektrų skalių mastelio keitimo mygtukai. Taip pat vartotojas gali nesunkiai keisti grafikų skalių intervalus ir iškart matyti ir analizuoti rezultatus ekrane.



55 pav. Virpesių signalo apdorojimo programos vartotojo sąsajos langas.

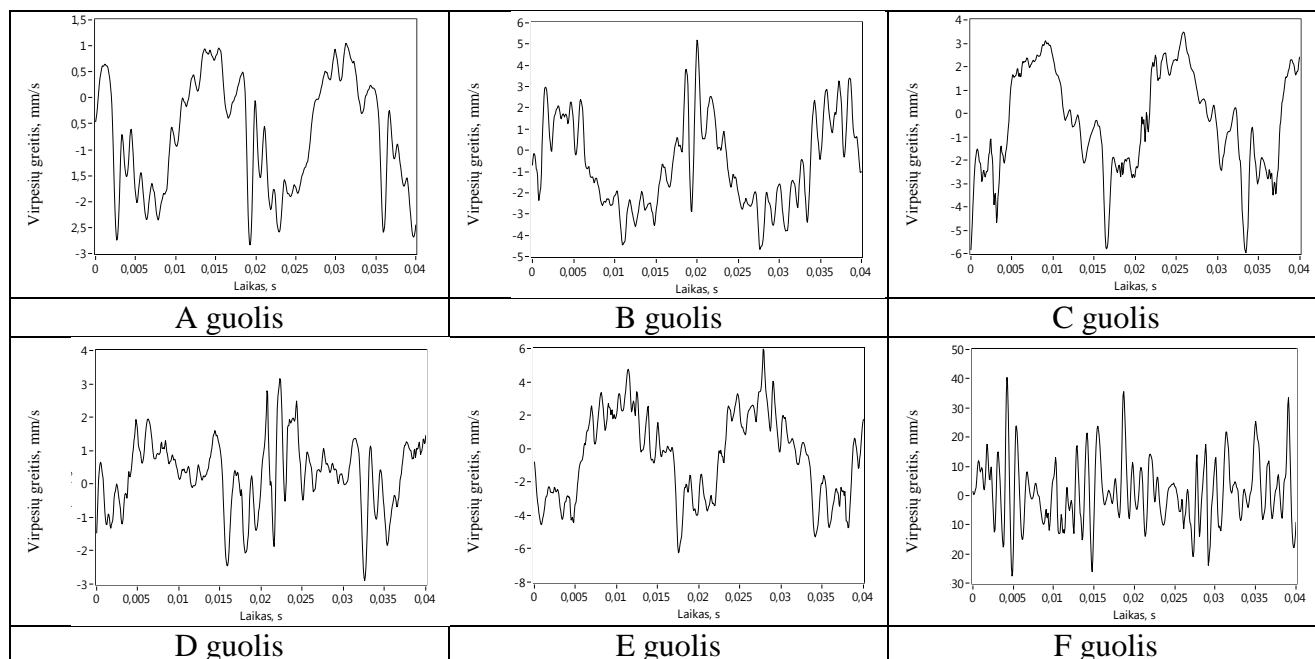
### 3.2.2. Virpesių signalų kitimo laike grafikai

Virpesių pagreičio ir greičio laiko grafikai gaunami naudojant sudarytą virpesių signalo apdorojimo algoritmą. Virpesių pagreičių laiko grafikai pateikti 56 paveikslėlyje. Guoliuose su defektu (B, C, D ir E) galime pastebėti guolių defektų žadinamus virpesius, kuomet trumpame laiko intervale virpesių amplitudė išauga apie 2 kartus lyginant su guoliu A be defekto. Išsidėvėjusiame guolyje F pastebimas ryškus virpesių pagreičio amplitudės padidėjimas, net 31 kartą, lyginant su guoliu A be defekto ir su likusiais guoliais su defektu (B, C, D ir E) apie 12 kartų virpesių pagreičio amplitudės padidėjimas. Taip pat virpesių pagreičių laiko grafikuose matome daugiau nei du rotoriaus apsisukimus (laiko intervale nuo 0ms iki 40ms), kurie trunka apie 17ms (esant rotoriaus 3600aps/min greičiui t.y. 60Hz).



56 pav. Virpesių pagreičio laiko grafikai x ašimi be disbalanso.

Virpesių greičių laiko grafikai pateikti 57 paveikslėlyje. Tame pačiame laiko intervale virpesių greičio laiko grafikuose matoma aiškiau sinusinės formos virpesiai lyginant su virpesių pagreičio laiko grafikai. Guoliuose su defektu (B, C, D ir E) ir išsidėvėjusiame guolyje F galime pastebėti guolių defektų žadinamus virpesius t.y. didesnius virpesių signalų amplitudės svyravimus tame pačiame laiko intervale negu guolyje A be defektų. Išsidėvėjusiame guolyje F pastebimas ryškus virpesių greičio amplitudės padidėjimas iki 4 kartų lyginant su guoliu A be defekto ir su likusiais guoliais su defektu (B, C, D ir E) apie 8 kartus virpesių pagreičio amplitudės padidėjimas. Virpesių greičių laiko grafikuose kaip ir virpesių pagreičių laiko grafikuose matome daugiau nei du rotoriaus apsisukimus (laiko intervale nuo 0ms iki 40ms), kurie trunka apie 17ms (esant rotoriaus 3600aps/min greičiui t.y. 60Hz).

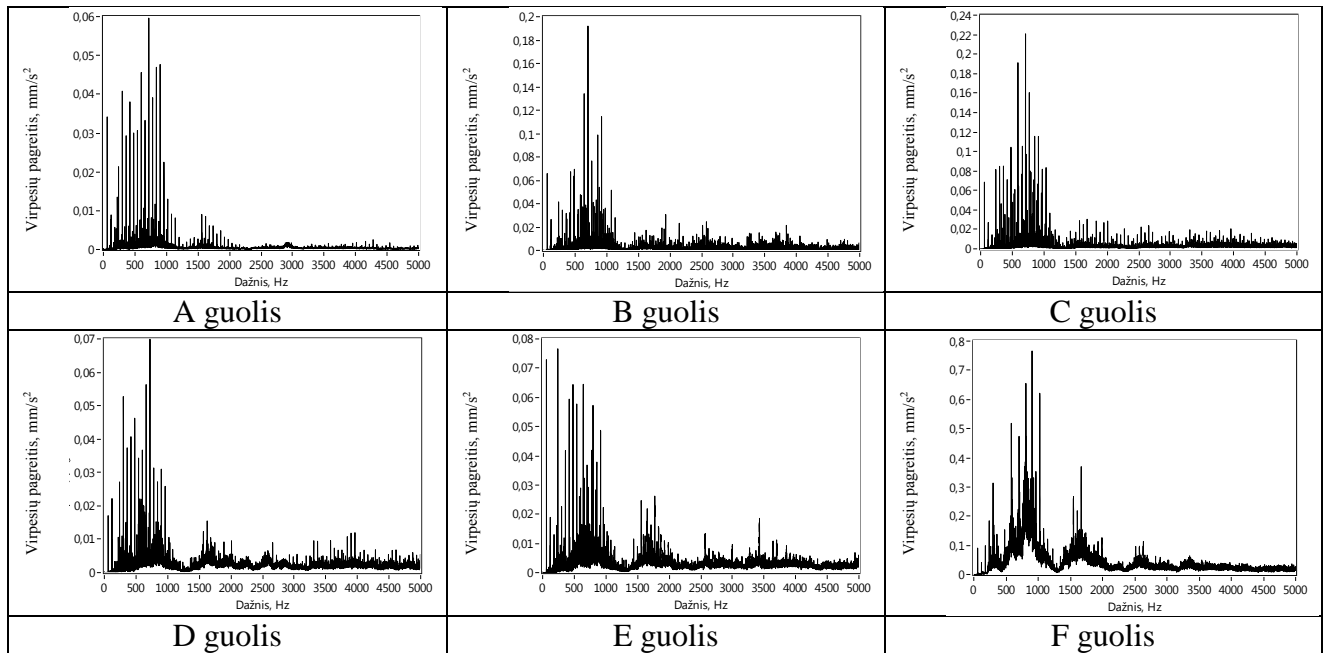


57 pav. Virpesių greičio laiko grafikai x ašimi be disbalanso.

Tačiau šiuo būdu analizuoti virpesių signalus yra per daug sudėtinga, nes rotorius sukasi pastoviu greičiu. Toks guolio defekto identifikavimo būdas gali būti naudojamas tik kaip papildomas, defekto egzistavimą įrodantis būdas, todėl toliau nebeanalizuosime virpesių signalų kitimo laike grafikus, o toliau analizuosime virpesių pagreičių ir greičių FFT spektrus, kurie žymiai informatyvesni nei laiko grafikai.

### 3.2.3. Virpesių pagreičių FFT spektrai

Gauti guolių be defektų (A) ir su defektais (B, C, D, E ir F) x ašim, kai nėra disbalanso virpesių pagreičių FFT spektrai, kurie pateikti 58 paveikslėlyje.

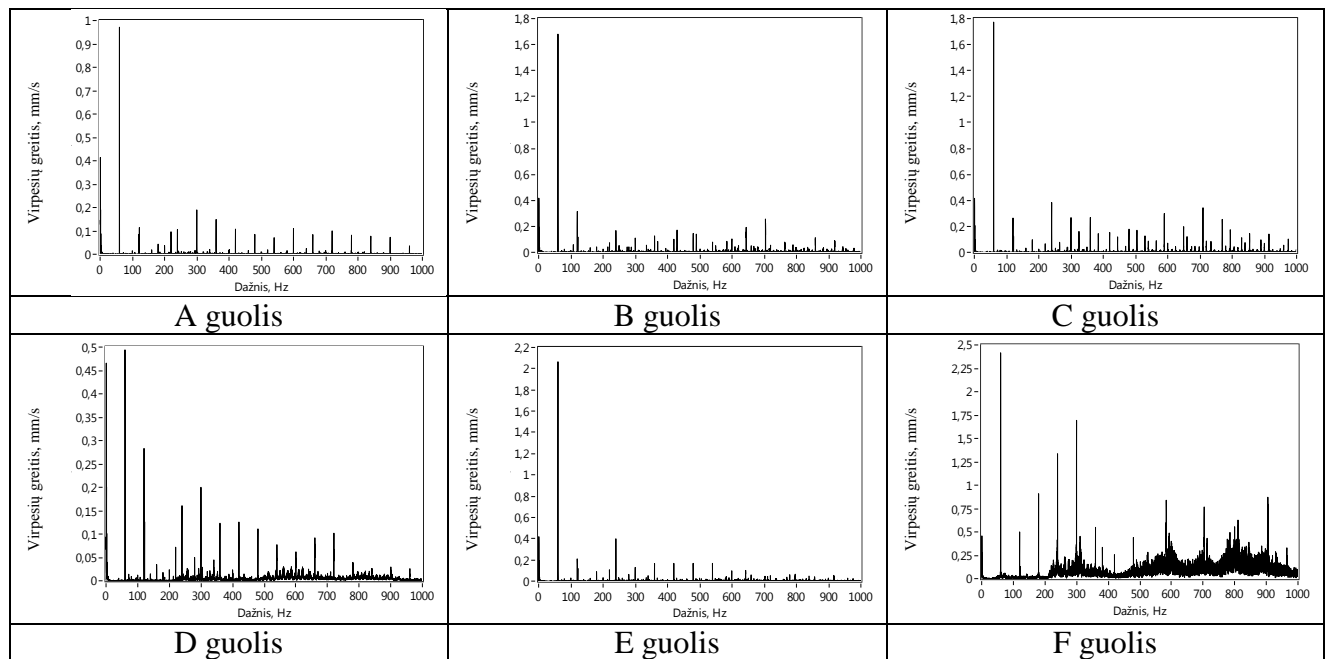


58 pav. Virpesių pagreičių FFT spektrai x ašim, kai nėra disbalanso.

Guoliuose su defektais (B, C, D ir E) ir išsidėvėjusiam guolyje F pastebime, kad be virpesių pagreičio amplitudės padidėjimo spektruose taip pat atsiranda daugiau aukšto dažnio virpesių. Šie aukšto dažnio virpesiai yra guolių defektų žadinami virpesiai kurie pasireiškia nuo ~1200Hz iki ~2200Hz. Taip pat pastebima daug rotoriaus  $nX$  virpesių pagreičio harmonikų esant 60Hz, 120Hz, 180Hz ir t.t.

### 3.2.4. Virpesių greičių FFT spektrinė analizė

Gauti guolių be defektų (A) ir su defektais (B, C, D ir E) ir išsidėvėjusiam guolyje F x ašim, kai nėra disbalanso virpesių greičių FFT spektrai, kurie pateikti 59 paveikslėlyje.

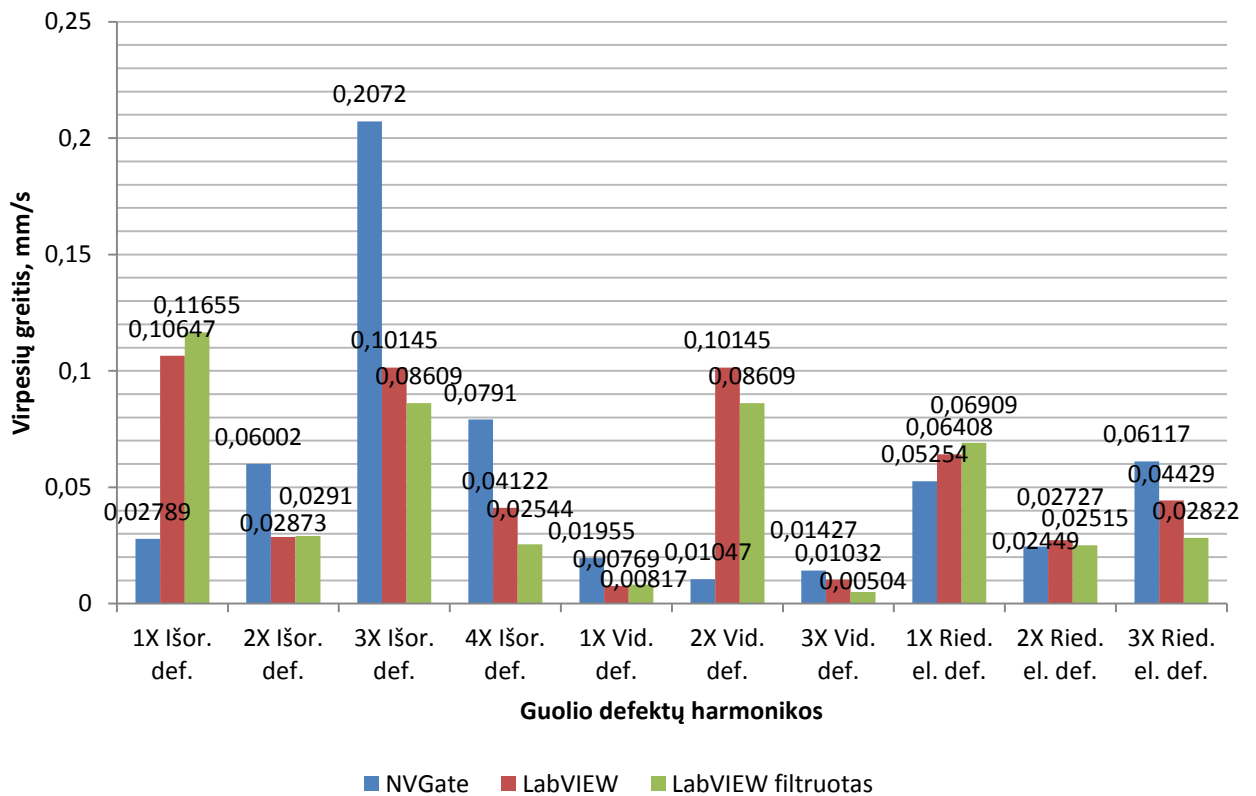


59 pav. Virpesių greičių FFT spektrai x ašim, kai nėra disbalanso.

Pagal guolių vystymosi stadijas guolio A be defekto spektrai yra 2-os stadijos, nes galime pastebėti guolio rezonansinius dažnius, o guolių su defektais (B, C, D ir E) ir išsidėvėjusio guolio F spektrai yra 4-os stadijos, nes pasireiškia guolio riedėjimo elemento, išorinio ar vidinio žiedo defektų kartotiniai dažniai (harmonikos) FFT spektruose. Guoliuose su defektais (B, C, D, E) pastebima guolių defektų (riedėjimo elemento, išorinio ir vidinio žiedo) ir rotoriaus  $nX$  harmonikos. F guolyje sunkiai bepastebimi guolių kinematiniai dažniai ir kaimyninės harmonikos, nes vietoj jų atsiranda virpesių „miškas“, dėl didėjančių tarpų guolyje ir guolio defektų didėjimo.

### 3.3.NVGate ir LabVIEW virpesių greičių FFT spektrų palyginimas

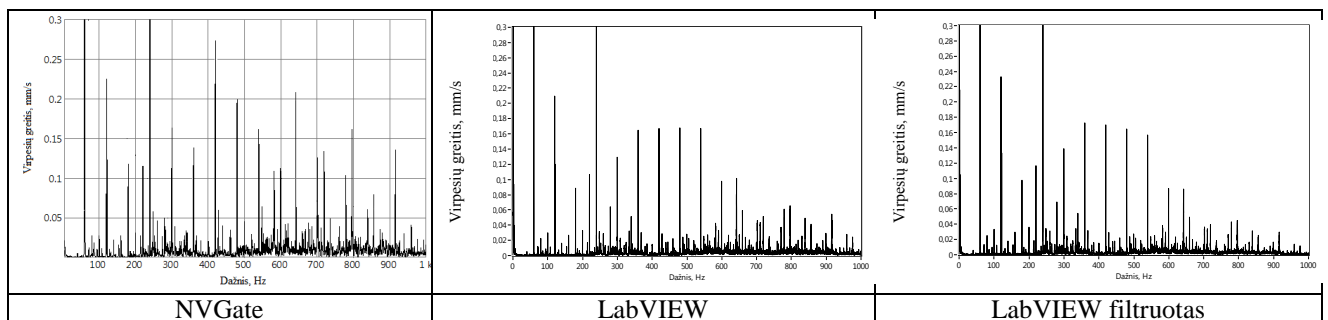
Siekiant pritaikyti patikimą diagnostikos tyrimų metodiką rotorinės sistemos su keliais defektais techninei būklei įvertinti palyginsime E guolio su trimis defektais (riedėjimo elemento, išorinio ir vidinio žiedo) virpesių greičių FFT spektrus x ašimi nesant disbalanso masei, kurie yra gauti NVGate V9.10 ir LabVIEW 2015 virpesių apdorojimo programomis. E guolį lyginsime dėl to, kad jame yra visi trys defektai ir jo virpesių greičių FFT spektras yra vienas iš sudėtingesnių guolių defektų indentifikavimui. Palyginimui bus naudojami trijų virpesių greičių FFT spektrai. Vienas virpesių greičių FFT spektras iš NVGate ir du iš LabVIEW (nefiltruotą ir filtruotą) virpesių apdorojimo programų. Filtruotas virpesių greičių FFT spektras gaunamas naudojant anksčiau poskyryje (3.2.1.Virpesių signalo apdorojimo technika) minėtu būdu. Gautos guolio E defektų harmonikų reikšmės x ašimi pateiktos 60 paveikslėlyje.



60 pav. Guolio E defektų harmonikų reikšmės x ašimi.

Pastebime, kad naudojant NVGate programą gautos virpesių greičių FFT spektro guolio defektų harmonikų reikšmės vidutiniškai didesnės už ne filtruotą 1,34 karto, o už filtruotą 1,71 karto. Naudojant NVGate programą dominuojanti guolio defekto harmonika esant išorinio žiedo defektui yra 3X, vidinio žiedo – 1X ir riedėjimo elemento – 3X. Tačiau panaudojus LabVIEW programą (filtruotam ir nefiltruotam virpesių greičių FFT spektrui) abiem atvejais dominuojanti guolio defekto harmonika esant išorinio žiedo defektui yra 1X, vidinio žiedo – 2X ir riedėjimo elemento – 1X. Pastebime, kad NVGate programos atveju labiau dominuoja 3X, o LabVIEW 1X guolio defekto harmonikos.

E guolio virpesių greičių FFT spektrų palyginimas pateiktas 61 paveikslėlyje.



61 pav. E guolio virpesių greičių FFT spektrų palyginimas.

Atliekant E guolio virpesių greičių FFT spektrų palyginimą pastebime, kad su LabVIEW programa gautuose virpesių greičių FFT spektruose yra mažiau virpesių „miško“ ir aukšto dažnio virpesių taip pat virpesių greičio amplitudės yra mažesnės. Virpesių greičių FFT spektrų virpesių greičių amplitudės yra sumažintos iki 0,3mm/s tam, kad geriau matytųsi guolio defektų žadinami virpesiai.

## IŠVADOS

1) Apžvelgus rotorinių sistemų defektus pastebėta, kad jie skirstomi į rotorijų, slydimo guolių, riedėjimo guolių, elektros variklių ir kitus defektus. Taip pat virpesių parametrai naudojami rotorinių sistemų tyrimuose yra virpesių amplitudė, dažnis ir rotoriaus fazė. Virpesių formatai skiriami į laiko grafikus, virpesių spektrus, vandens krioklio diagramas, FFT eilutės, Trend'us, orbita ir kitus.

2) Atlikus virpesių signalų apdorojimo metodų straipsnių analizę pastebėta, kad tai aktuali problema pasaulyje ir daug mokslininkų, bei inžinierių dirba ties virpesių signalų filtrų, apdorojimo metodų ir algoritmų kūrimu ir jų tobulinimu. Dažniausiai yra naudojamas ir tobulinamas BSS algoritmas, taip pat pasinaudojus įvairias kompiuterines programas yra kuriamas susimuluotas virpesių signalas ir šis lyginamas su tikroju virpesių signalu taip siekiant sumažinti virpesių triukšmą tikrajame virpesių signale.

Virpesių signalus apdorojami firmos OROS programa NVGate ir firmos NI programa LabVIEW. Pastebėta, kad programa NVGate pasižymi mažiau galimybių apdorojant virpesių signalus negu naudojant programą LabVIEW. Ši programa turi pakankamai daug įrankių su virpesių apdorojimo algoritmais ir metodais savo bibliotekoje, o svarbiausia galima ją ir patiem savo sukurtais algoritmais ir metodais papildyti.

3) Išanalizavus vokiečių firmos GUNT virpesių tyrimų stendą PT500 nustatyta, kad su šiuo stendu galima atlikti rotorinių sistemų virpesių matavimo eksperimentus t.y. virpesių pagreičio ir greičio matavimus gaunamus laiko ar dažnio diapazonu.

Parinkta eksperimentiniams virpesių tyrimams atlikti naudojama įranga: daugiakanalis virpesių analizatorius OROS Mobi Pack OR36 (Prancūzija), pagreičio jutiklis Wilcoxon 793 (JAV), optinis fazės jutiklis Optel – Thevon 152 G7 (Prancūzija). Gautiems virpesių signalams įrašyti naudojama kompiuterinė programinė įranga NVGate, o juos apdoroti su NVGate ir LabVIEW programomis.

Sudaryta virpesių signalo tyrimo metodika, kuomet buvo keičiamas antrasis stendo guolis į be defektų, su defektais (riedėjimo elementų, išorinio ir vidinio žiedų) ir į išsidėvėjusį guolį taip pat pakeitus guolį buvo keičiama disko disbalanso masė (1,4g; 3g) ir be disbalanso masės. Parinktas stacionarus rotoriaus darbo režimas esant rotoriaus sukimosi greičiui ~3600 aps/min (60 Hz).

4) Virpesių signalų rezultatų analizė remiasi  $V_{RMS}$  reikšmių, laiko grafikų virpesių pagreičių ir greičių FFT spektrų analizę. Atlikus  $V_{RMS}$  reikšmių analizę x ir y ašimi. Pastebime, kad didėjant disbalansui didėja ir  $V_{RMS}$  reikšmės, X ašimi vidutiniškai 1,97 karto, o Y ašimi 2,26 karto. padaryta išvada, kad pagal didžiausias absoliučiuųjų virpesių  $V_{RMS}$  reikšmes yra sunku įvertinti ir

nustatyti ar rotorinės sistemos guoliai yra geri, ar su defektu, nes tai yra bendrieji, netiesioginiu būdu išmatuoti antrosios guoliavietės virpesiai.

Analizuojant virpesių signalų kitimo laike grafikus pastebėta, kad tokiu būdu analizuoti virpesių signalus yra per daug sudėtinga, nes rotorius sukasi pastoviu greičiu ir dėl aukšto dažnio virpesių.

Analizuojant virpesių` pagreičių FFT spektrus pastebėta, kad be pagreičio amplitudės padidėjimo guoliuose su defektais taip pat atsiranda daugiau aukšto dažnio virpesių, kurie apsunkina defektų indentifikavimą. Ypač sudėtinga analizuoti kai yra keletą defektų vienu metu.

Analizuojant virpesių greičių FFT spektrus pastebėta, kad guolių defektu identifikuoti geriausia x ašimi, nes rotoriaus harmonikos šia ašimi yra mažesnės, o guolių žadinami virpesiai didesni, tai taip pat įrodo defekto atpažinimo rodiklis (DAR). Atlikus analizę galime teigti, kad guolio defekto harmonikų  $nX$  virpesių lygis nepriklauso nuo rotoriaus disbalanso. Taip pat pastebėta, kad dažniausiai dominuoja  $3X$  guolio defekto harmonika.

Atliekant eksperimento metu gautų rotorinių sistemų su keliais defektais sudėtingų virpesių signalų apdorojimą pagal virpesių greičių FFT spektrų palyginimą pastebėta, kad su LabVIEW programa gautuose virpesių greičių FFT spektruose yra mažiau virpesių „miško“ ir aukšto dažnio virpesių taip pat virpesių greičio amplitudės yra mažesnės. Todėl apdoroti virpesių signalus LabVIEW programa yra tikslingiau.

## Literatūra

1. Augustaitis V. K. 2000. Mechaninių virpesių pagrindai. Vilnius: Žiburio leidykla.
2. Barzdaitis V. 2008. Mechatroninės sistemos: tyrimai ir diagnostika. Vilnius: Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla.
3. Barzdaitis V., ir kt. 1998. Rotorinių mašinų monitoringas ir diagnostika. Kaunas: Technologija.
4. Barzdaitis V., Pocius Z., ir kt. 2006. Mašinų elementų diagnostika. Kaunas: Technologija.
5. Benly D. E., et al. 2002. Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics. Canada.
6. Chen B., et al. 2012. Fault feature extraction of gearbox by using over complete rational dilation discrete wavelet transform on signals measured from vibration sensors. Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 33, 275-298p.
7. Dong S., et al. 2012. A repeated single-channel mechanical signal blind separation method based on morphological filtering and singular value decomposition. Measurement, vol. 45, 2052-2063p.
8. Fazès ir greičio matavimo jutiklis Optel-Thevon 152G7. [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 01 13]. Prieiga per Internetą: [http://s476559216.onlinehome.fr/wp-content/uploads/2013/06/manual\\_152\\_g7\\_en.pdf](http://s476559216.onlinehome.fr/wp-content/uploads/2013/06/manual_152_g7_en.pdf)
9. Guolis 6004-2Z/C3. [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 01 10]. Prieiga per Internetą: <http://www.skf.com/group/products/bearings-units-housings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/single-row-deep-groove-ball-bearings/single-row/index.html?designation=6004-2Z>
10. Gurskas A. 2010. Virtualieji instrumentai LabVIEW terpėje. Vilnius: Technika.
11. Hongxian Y., et al. 2013. A Blind Source Separation method for convolved mixtures by non-stationary vibration signals. Smart Sensing and Intelligent Systems, vol. 6, no. 3, 1-20p.
12. Ibrahim G., et al. 2013. Adaptive filtering based system for extracting gearbox condition feature from the measured vibrations. Measurement, vol. 46, 2029-2034p.
13. Jonušas R., Jurkauskas A., Volkovas V. 2001. Rotorinių sistemų dinamika ir diagnostika. Kaunas: Technologija.
14. National Instruments LabVIEW. Tools for Time-Frequency, Time-Series and Wavelet Analysis. [interaktyvus]. [žiūrėta 2015 12 18]. Prieiga per Internetą: <http://www.robertmarks.org/InTheNews/ZAM/NationalInstruments.pdf>
15. OROS NVGate. Analyzer Setting Browser. Reference manual Vol. 1.
16. Popescu T.D., et al. 2010. Blind separation of vibration signals and source change detection – Application to machine monitoring. Applied Mathematical Modelling, vol. 34, 3408-3421p.

17. SKF. Vibration Diagnostic Guide. 2000. [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 02 11]. Prieiga per Internetą: <http://www.skf.com/pk/knowledge-centre/subscriptions/displayfactbox.html?itemid=tcm:143-109867>
18. Stendas PT500. [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 01 13]. Prieiga per Internetą: [http://www.gunt.de/static/s1744\\_1.php](http://www.gunt.de/static/s1744_1.php)
19. STI Vibration Monitoring. [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 03 11]. Prieiga per Internetą: <http://www.stiweb.com/appnotes/Rolling-Element-Bearings.html>
20. Tadžijėvas A. 2015. Vertikalių rotorių su netiesinio standžio atramomis dinamika ir diagnostika: daktaro disertacija. Kaunas.
21. Tadžijėvas A., Barzdaitis V., Vasylius M., Mažeika P. 2013. The comparison of diagnostic features between vertical and horizontal axis rotors. Journal of Vibroengineering, vol. 15, 1011-1019p.
22. Tse P.W., et al. 2006. Blind Source Separation and Blind Equalization Algorithms for Mechanical Signal Separation and Identification. Journal of Vibration and Control, vol. 12, 1-30p.
23. Valdemar Širvinsk. LabVIEW distancinio mokymo kursas. VGTU. [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 01 19]. Prieiga per Internetą: [http://www2.el.vgtu.lt/dist\\_mok/LabVIEW/index.html](http://www2.el.vgtu.lt/dist_mok/LabVIEW/index.html)
24. Virpesių pagreičių keitlius Wilcoxon 793. [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 01 13]. Prieiga per Internetą: [http://www.wilcoxon.com/prodpdf/793%20spec%20\(98169\)%20H.pdf](http://www.wilcoxon.com/prodpdf/793%20spec%20(98169)%20H.pdf)
25. Virpesių signalų analizatorius OROS Mobi-Pack OR36. [interaktyvus]. [žiūrėta 2015 12 13]. Prieiga per Internetą: <http://www.oros.com/3974-mobi-pack-4-to-16-channels-reinforced.htm>
26. Wang D., et al. 2012. A new blind fault component separation algorithm for a single-channel mechanical signal mixture. Journal of Sound and Vibration, vol. 331, 4956-4970p.
27. Wang D., et al. 2013. A novel adaptive wavelet stripping algorithm for extracting the transients caused by bearing localized faults. Journal of Sound and Vibration, vol. 332, 6871-6890p.
28. Xiong X., et al. 2012. A new procedure for extracting fault feature of multi-frequency signal from rotating machinery. Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 32, 306-319p.
29. Zhou W., et al. 2007. Blind source separation based vibration mode identification. Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 21, 2072-3087p.
30. Žiliukas P., Barauskas R.. 2008. Mechaniniai virpesiai. Vilnius: Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla.