

KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS

Jūrų technikos fakultetas

Mechanikos inžinerijos katedra

Raimondas Pelenius

**ROTORINIŲ SISTEMŲ,
TURINČIŲ BENDRĄ PAMATĄ,
DIAGNOSTINIAI TYRIMAI**

Perdirbimo pramonės inžinerijos studijų programos magistro
baigiamasis darbas

KLAIPĖDA, 2015

SANTRAUKA

Pelenius R. *Rotorinių sistemų, turinčių bendrą pamatą, diagnostiniai tyrimai*. Perdirbimo pramonės inžinerijos studijų programos magistro baigiamasis darbas. Darbo vadovas Doc. dr. M. Vasylius, Klaipėdos universitetas: Klaipėda, 2015.

Raktažodžiai: virpesiai, virpesių matavimas, rotorinės sistemos, bendras pamatas, diagnostiniai tyrimai.

Magistrinio baigiamojo darbo teorinėje dalyje analizuojama problema, kuomet dėl greta veikiančių mašinų generuojamų virpesių, apsunkinamas rotorinių sistemų guolių diagnostika. Aprašomi mokslininkų atlikti tyrimai ant vieno pagrindo veikiant daugiau nei vienai rotorinei sistemai.

Eksperimentinėje dalyje pateikiama tyrimo objekto virpesių matavimo metodika. Nagrinėjami virpesių matavimų metu gauti rezultatai. Įvertinama ant bendro pamato dirbančios rotorinės sistemos įtaka, tiriamosios rotorinės sistemos guolių defektų identifikavimui.

SUMMARY

Pelenius R. *Diagnostics researches of rotor systems with the same foundation*. Industrial recycling engineering Master's degree thesis. Supervisor Doc. Dr. M. Vasylius, University of Klaipėda: Klaipėda. 2015.

Key words: vibration, measurement of vibration, rotor system, general foundation, diagnostic research.

The theoretical and experimental part of Master's thesis analyzes bearing system diagnostics problems which is caused of external rotating machinery vibrations on the same foundation. The experimental part presents vibration measurement methodology of study object. Data of vibration measurements is obtained. The influence of the common foundation rotor systems is evaluated for study object bearing defect identification.

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 Lentelė. Poslinkio, greičio ir pagreičio keitiklių privalumai ir trūkumai	23
2.1 Lentelė. Disbalansą sukeliančios masės	27
2.2 Lentelė. Paskaičiuoti rotorų disbalanso dydžiai	28
2.3 Lentelė. Guolio 6004 geometriniai matmenys	28
2.4 Lentelė. Dažnių keitiklio nustatymai	28
2.5 Lentelė. Guolio defekto virpesių dažniai	38

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 Pav. Guolių tyrimo stendas.....	9
1.2 Pav. Kondensato siurbiai	10
1.3 Pav. Virpesių „mušimo“ reiškinys.....	11
1.4 Pav. Siurblio pavaros galinio guolio virpesių dažnių spektras.....	12
1.5 Pav. Virpesių amplitudės ir laiko duomenų formato grafike matomas virpesių mušimo reiškinys.....	12
1.6 Pav. Guolio išorinio ir vidinio žiedų takelių defektų dažniai ir jų harmonikos	13
1.7 Pav. Rotorinių mašinų gedimų diagnostikos sistema	14
1.8 Pav. Frezavimo staklių schema	15
1.9 Pav. Simuliuoto signalo periodiniai virpesiai.....	15
1.10 Pav. Simuliuotas signalas	16
1.11 Pav. Simuliuoto signalo virpesių dažnių spektras	16
1.12 Pav. Tikrinio vektoriaus algoritmo (EAV) modelis	17
1.13 Pav. Aklo išlyginimo (BE) modelis.....	17
1.14 Pav. Guolių tyrimo stendas.....	18
1.15 Pav. Virpesių amplitudžių spektrai.....	19
1.16 Pav. Tyrimų įranga bei defektiniai elementai naudoti tyrimams	19
1.17 Pav. Daugiakanalis virpesių signalų analizatorius OROS Mobi-Pack.....	23
2.1. Pav. Eksperimentų atlikimo stendas.....	26
2.2 Pav. Disbalanso masių montavimo vietos	27
2.3 Pav. Rutulinis radialinis guolis.....	28
2.4 Pav. Dažnių keitiklis.....	29
2.5 Pav. Absoliučiąjų virpesių kvadratinų vidurkių V_{RMS} skirtinguose matavimo taškuose, kitimo laike grafikas.....	30
2.6 Pav. Absoliučiąjų virpesių greitosios Furje transformacijos FFT spektras.....	32
2.7 Pav. Daugiakanalis virpesių signalų analizatorius OROS Mobi-Pack, eksperimentų metu	31
2.8 Pav. Jutiklių montavimo vietos eksperimentinių tyrimų stende.....	33
2.9 Pav. Guolio defektas išoriniame riedėjimo takelyje.....	33
2.10 Pav. Pirmasis tiriamosios rotorinės sistemos virpesių energijos matavimo etapas	34
2.11 Pav. Antrasis tiriamosios rotorinės sistemos virpesių energijos matavimo etapas	35
2.12 Pav. Trečiasis tiriamosios rotorinės sistemos virpesių energijos matavimo etapas	36
3.1 Pav. Rotorinių sistemų sūkliai eksperimentų metu.....	40
3.2 Pav. Virpesių lygio analizatoriumi įrašytų virpesių pagreičių kitimo laike grafikas	41

3.3 Pav. Programinės įrangos „NVGate“ darbinis langas	41
3.4 Pav. Virpesių greičių, skirtinguose matavimo taškuose, kvadratinių vidurkių (V_{RMS}) kitimo laike grafikas	41
3.5 Pav. Virpesių V_{RMS} guoliavietėse, veikiant tik tiriamajai rot. sistemai $M1$, esant guoliu be defekto	42
3.6 Pav. Virpesių V_{RMS} palyginimas, tiriamoje guoliavietėje įmontavus guolį be defekto	43
3.7 Pav. Virpesių V_{RMS} , palyginimas, tiriamoje guoliavietėje įmontavus guolį su defektu.....	44
3.8 Pav. 2-os guoliavietės virpesių V_{RMS} palyginimas, veikiant abiem rot. sistemoms, kai $M1$ sistemos rotorius be disbalanso	45
3.9 Pav. 2-os guoliavietės virpesių V_{RMS} palyginimas, veikiant abiem rotorinėm sistemom, kai $M1$ sistemos rotorius su disbalansu.....	45
3.10 Pav. Tiriamos guoliavietės virpesių FFT spektras, vienu iš eksperimentų etapų.....	46
3.11 Pav. Tiriamos guoliavietės virpesių FFT spektras, joje įmontavus guolį be defekto.....	47
3.12 Pav. Guolio defekto virpesių palyginimas, keičiant $M1$ sistemos rotoriaus disbalansą.....	48
3.13 Pav. Guolio defekto virpesių palyginimas, keičiant $M2$ sistemos rotoriaus disbalansą.....	49
3.14 Pav. Guolio defekto virpesių palyginimas, keičiant $M1$ bei $M2$ sistemų rotorių disbalansą.....	50
3.15 Pav. Maksimalūs guolio defekto virpesiai, esant skirtingiems $M1$ ir $M2$ sistemų veikimo parametrams.....	51
3.16 Pav. Tiriamos guoliavietės virpesių FFT spektras, x ašies virpesių matavimo kryptimi	52

TURINYS

IVADAS	8
I. ANALITINĖ DALIS	9
1.1 Rotorinių sistemų, turinčių bendrą pamatą, tyrimų apžvalga	9
1.2 Mechaniniai virpesiai ir jų parametrai	20
1.3 Skyriaus apžvalga.....	24
II. METODINĖ DALIS	26
2.1 Tyrimo objektas	26
2.2 Virpesių tyrimo metodika	29
2.2.1 Virpesių matavimo būdo parinkimas.....	29
2.2.2 Virpesių aktyvumo matavimo priemonių ir programinės įrangos parinkimas	31
2.2.3 Virpesių matavimo taškų ant tyrimo objekto parinkimas.....	32
2.2.4 Eksperimentų atlikimo eiliškumas.....	34
2.2.5 Virpesių signalo apdorojimo (įvertinimo) metodika	37
III. EKSPERIMENTINĖ DALIS	40
3.1 Ant bendro pamato dirbančių rotorinių sistemų virpesių signalų apdorojimas	40
3.2 Ant bendro pamato dirbančios rotorinės sistemos įtaka tiriamajai	42
3.3 Tiriamos guoliavietės virpesių spektrinė analizė	46
IŠVADOS	53
LITERATŪROS SĄRAŠAS	55
PRIEDAI	57

IVADAS

Šiuolaikinė pramonė naudoja sudėtingas rotorines mašinas. Rotorinės mašinos susidedančios iš kelių besisukančių sudėtinių dalių, variklių, guolių, velenų ir pavarų, vadinamos rotorinėmis sistemomis. Norint užtikrinti patikimą rotorinių mašinų veikimą, plačiai taikomos rotorinių mašinų techninės būklės monitoringo ir diagnostikos technologijos. Turbinos, generatoriai, varikliai siurbliai kompresoriai, orlaivių varikliai tai tik keletas pavyzdžių, kritiškai besisukančių mašinų, kurių techninės būklės diagnostika yra būtina, kad šios mašinos veiktų efektyviai ir saugiai. Šių rotorinių mašinų gedimų sukelti padariniai, gali būti katastrofiški tiek saugos, tiek eksploatacinių išlaidų atžvilgiu. Sugedus šioms mašinoms pramonė patiria netikėtas išlaidas, gali būti stabdomas technologinis procesas (Chen B., 2013; Rotating machinery..., 2013).

Rotorinių mašinų monitoringas ir diagnostika turi būti atliekamas nestabdant technologinio proceso, norint padidinti technologinio proceso patikimumą ir prastovų nebuvimą. Rotorinių mašinų virpesių matavimas ir analizė, žalos mašinai nedarantis būdas įvertinti jos techninę būklę ir numatyti galimą defekto vystymąsi. Atliekant rotorinių mašinų diagnostiką, galima nustatyti tokius gedimus, kaip masės disbalansas, veleno išlinkimas ir įtrūkęs velenas. Taip pat problemas rotorinėse mašinose gali sukelti ir guolių susidėvėjimas (Edwards S. et al., 1998; H. Et al., 2002; Rotating machinery..., 2013).

Dažnai pramonėje pasitaiko atveju, kuomet ant bendro pamato veikia kelios rotorinės sistemos, kurių, dėl technologinio proceso ypatumų, negalima sustabdyti. Siekiant atlikti kurios nors vienos rotorinės sistemos guolių diagnostiką, naudojantis virpesių matavimo ir analizės technologijomis, greta veikiančios sistemos, gali daryti įtaką tiriamos sistemos guolių defektų nustatymui. Šios įtakos tyrimas pateiktas mano baigiamajame darbe.

Darbo tikslas: eksperimentiniais tyrimais įvertinti, kokią įtaką daro ant bendro pamato veikiančių mašinų, generuojami virpesių signalai, tiriamosios rotorinės sistemos guolių defektų nustatymui.

Darbo uždaviniai:

1. Atlikti mokslinių straipsnių bei kitų informacijos šaltinių apžvalgą.
2. Pateikti tiriamosios rotorinės sistemos virpesių tyrimo metodiką.
3. Atlikti tiriamosios rotorinės sistemos virpesių lygio matavimus ir apdoroti gautus virpesių signalus.
4. Įvertinti pašalinės rotorinės sistemos įtaką tiriamajai rotorinei sistemai pagal absoliučią virpesių greičių V_{RMS} kitimo laike grafikus.
5. Įvertinti pašalinės rotorinės sistemos įtaką tiriamosios rotorinės sistemos guolių defektų diagnostikai pagal virpesių greičių FFT spektrus.

diagnostika, virpesius, bet ir pašalinius fono, bei greta dirbančios mašinos virpesius, perduodamus per tvirtinimo pamatus ir konstrukcijas.

Mokslininkai pasaulyje atlieka daugybę tyrimų, susijusių su pašaliniais virpesių šaltiniais ir reiškiniais apsunkinančiais tiriamų rotorinių sistemų virpesių analizę.

Jei tiriamos rotorinės mašinos generuojamų virpesių dažnis yra beveik toks pat, kaip greta dirbančios mašinos generuojamų virpesių dažnis, virpesių bangos interferuoja ir pasireiškia „mušimo“ reiškinys (Becker, 2013; Phuttipongisit, 2007).

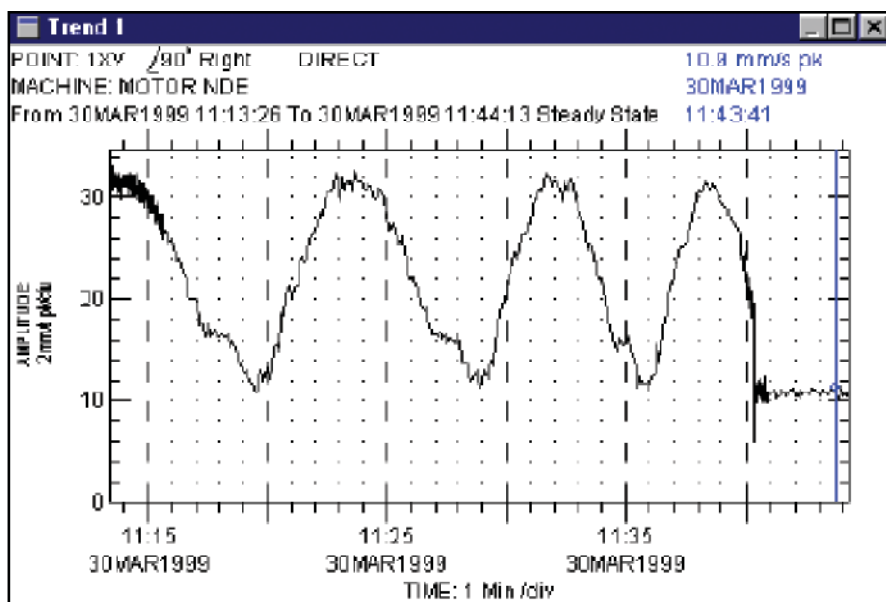
Šis reiškinys pasireiškia, kai abiejų mašinų generuojamų virpesių dažniai vienodi, bangos yra to paties ilgio, pastovaus fazių skirtumo, o virpesių kryptys nestatmenos. Virpesių bangų „mušimo“ reiškinys apsunkina rotorinės mašinos virpesių duomenų analizę ir filtravimą. Atliekant rotorinės mašinos virpesių analizę, tiriamo elemento virpesių signalas turi būti atskiriamas nuo kitų mašinos elementų virpesių signalų. (Mayoof, 2009; Tse et al., 2007).

Tailando mokslininkas, straipsnyje (Phuttipongisit, 2007) aprašo virpesių „mušimo“ reiškinį, pasireiškiantį atliekant dviejų kondensato siurblių (1.2 Pav.), dirbančių vienas šalia kito, beveik vienodais apsisukimais.



1.2 Pav. Kondensato siurbLIAI (Phuttipongisit, 2007)

Virpesių „mušimo“ reiškinys, užfiksuotas straipsnio autoriaus pateikiamas 1.3 paveiksle. Paveiksle matyti, jog kuomet buvo išjungtas antrasis siurblys, virpesių „mušimo“ reiškinys išnyko, dėl to virpesiai pasiekė stabilią būseną.

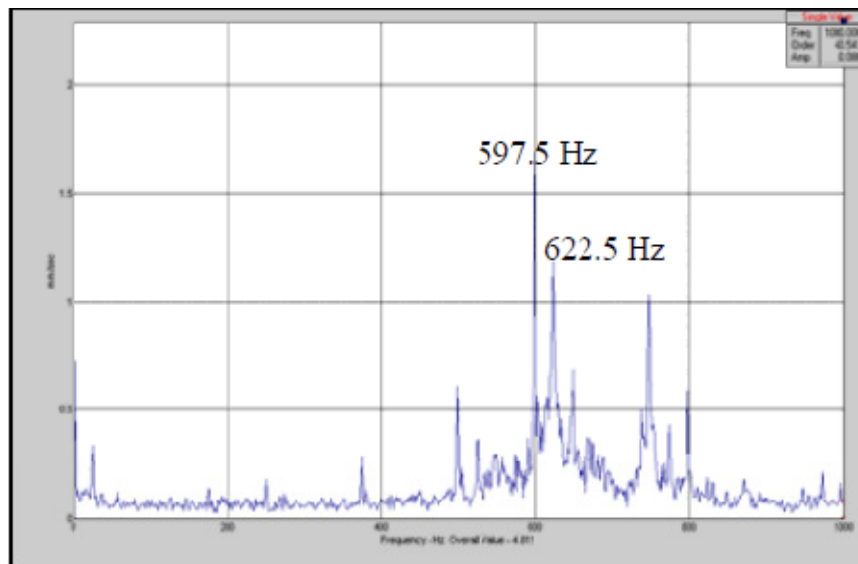


1.3 Pav. Virpesių „mušimo“ reiškinys (Phuttipongkit, 2007)

Pasak straipsnio autoriaus siekiant išskirti virpesių „mušimo“ reiškinį sukeliančius dažnius, paprasčiausias būdas yra naudoti aukštos rezoliucijos virpesių spektro grafikus. Norint išvengti rezultatų iškraipymo svarbu tinkamai sukonfigūruoti matavimo prietaisų filtrus, jog tik reikiamas spektrinis komponentas būtų pateikiamas, o kiti dažniai būtų filtruojami.

Kitas mokslininkas savo straipsnyje (Mayoof, 2009), taip pat aprašo virpesių „mušimo“ efektą pastebėtą virpesių amplitudės ir laiko duomenų formate grafike, atliekant rutulinio guolio virpesių analizę. Tyrimo objektas - išcentrinio siurblio pavaros galinis guolis, Bahrein'o vandens maišymo stotyje.

Tyrimų metu buvo matuojami vertikalios, horizontalios ir ašinės krypties virpesiai. Horizontalios krypties virpesiai naudoti kaip analizės pagrindas. Apdorojus duomenis, gautas virpesių dažnių spektras (1.4 pav.), kuriame matyti du artimi virpesių greičio šuoliai ties 597,5 Hz ir 622,56 Hz dažniu.



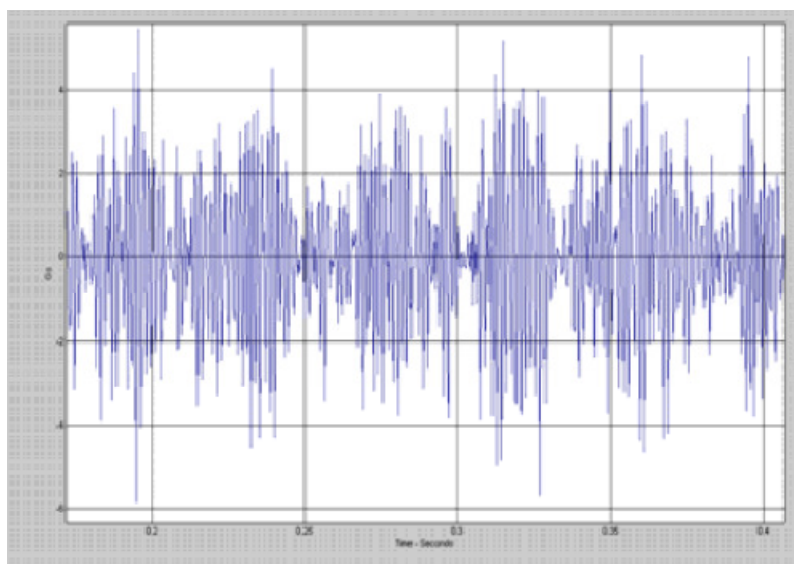
1.4 Pav. Siurblio pavaros galinio guolio virpesių dažnių spektras (Mayoof, 2009)

Virpesių amplitudžių grafike (1.5 Pav.), straipsnio autorius teigia pastebėjęs virpesių „mušimo“ reiškinį. Šiam teiginiui įrodyti autorius atliko skaičiavimus naudodamas virpesių amplitudės ir laiko duomenų formato grafiką. Atliktus skaičiavimus gauti dažniai ω_1 ir ω_2 :

$$\omega_1 = 3847.5 \text{ rad} / \text{s} = 612 \text{ Hz} ;$$

$$\omega_2 = 3690.5 \text{ rad} / \text{s} = 587 \text{ Hz} ;$$

Skaičiavimai parodė, jog dažniai (597,5 Hz ir 622,5 Hz) virpesių dažnių spektre ir apskaičiuoti dažniai virpesių amplitudės ir laiko duomenų formato grafike, praktiškai sutampa.



1.5 Pav. Virpesių amplitudės ir laiko duomenų formato grafike matomas virpesių mušimo reiškinys (Mayoof, 2009)

Atlikus siurblio pavaros galinio guolio virpesių matavimus, pagrindiniai guolio defektų dažniai pateikti 1.6 Pav. Paveiksle matyti, jog anksčiau minėtas 597,5 Hz dažnis atitinka guolio vidinio žiedo takelio trečiąją Harmoniką (3x). Tuo tarpu 622,5 Hz dažnis atitinka guolio išorinio žiedo takelio penktąją harmoniką (5x).

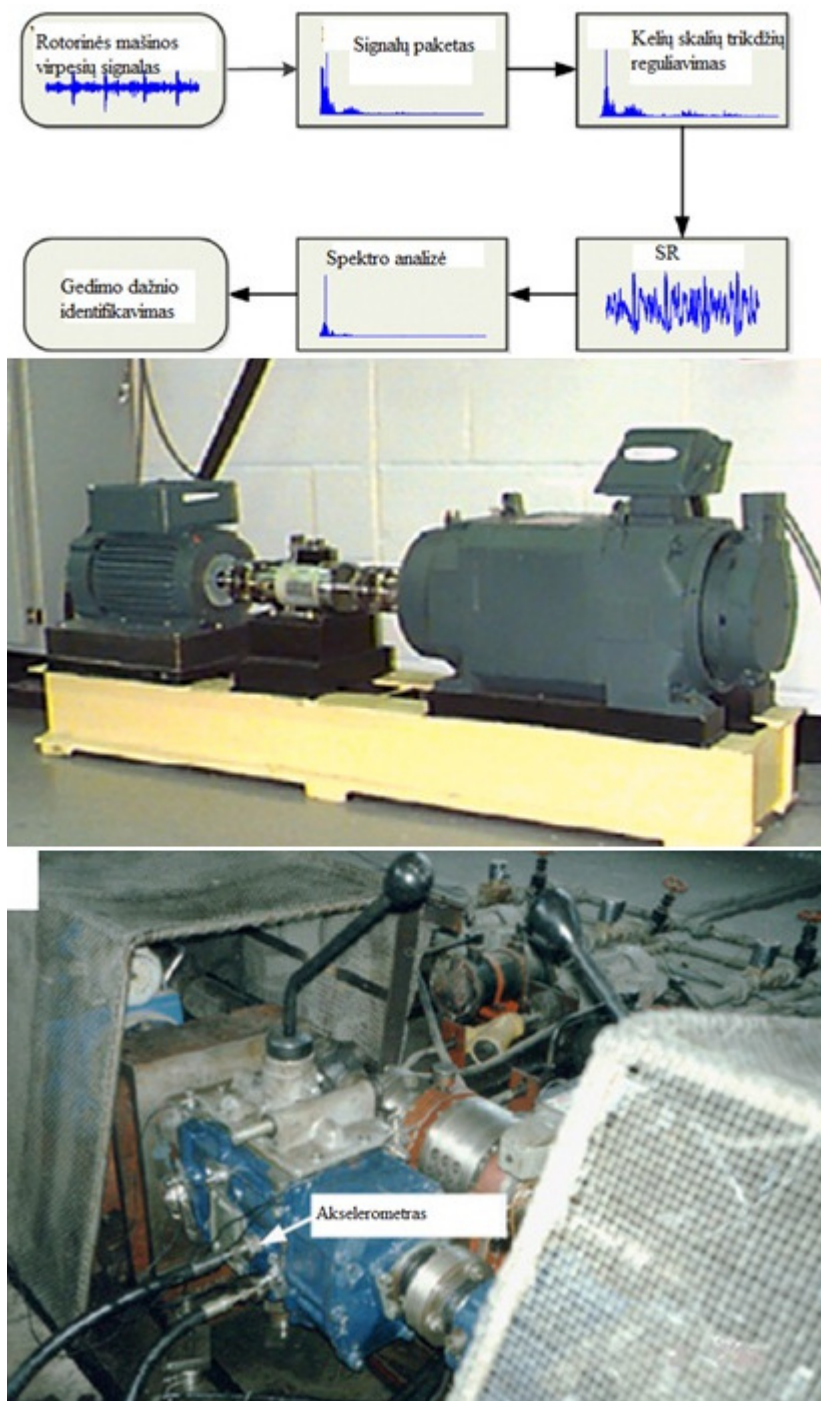
Defektas	Pagrindinis dažnis (Hz)	2X	3X	4X	5X	6X
Išorinis žiedas	124	248	372	496	<u>620</u>	744
Vidinis žiedas	199	398	<u>597</u>	796	995	1194

1.6 Pav. Guolio išorinio ir vidinio žiedų takelių defektų dažniai ir jų harmonikos (Mayoof, 2009)

Atlikus tyrimą nustatyta, jog, virpesių „mušimo“ efektas kilo dėl rutulinio guolio vidinio ir išorinio takelių defektų, todėl virpesių „mušimo“ efekto dažniai nesusiję su jokiais kitais sutrikimais ar virpesių šaltiniais šalia mašinos.

Kalbant apie pašalinius fono virpesius matomus spektrinės virpesių analizės metu, Kinijos mokslininkai straipsnyje (He et al., 2012), kaip problemą kelia apsunkintą virpesių analizę, dėl pašalinių virpesių ir fono triukšmo trikdžių. Autoriai ištyrė patobulintą, reguliuojamų parametrų, stochastinio rezonanso (anglų k. stochastic resonance [SR]) metodą, naudojamą rotorinių mašinų gedimų diagnostikai.

Siekiant nustatyti defektų sukeltiems mašinų gedimams būdingus virpesių dažnius, mokslininkai sukūrė naują parametrų derinimo metodą, norėdami pagerinti SR metodo veiksmingumą, silpno signalo aptikimui. Šis naujas metodas vadinamas kelių skalių trikdžių reguliavimo metodu (anglų k. multiscale noise tuning).



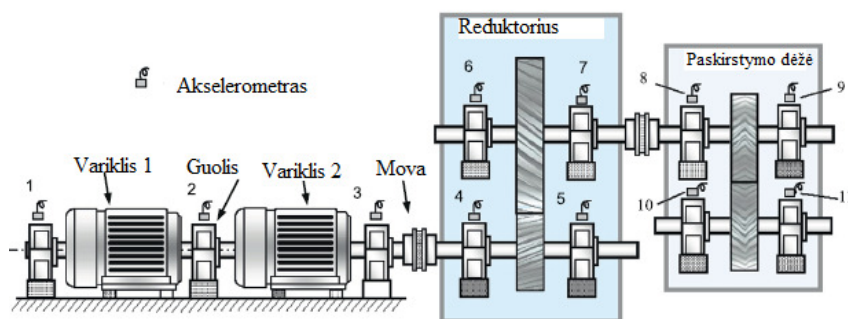
1.7 Pav. Rotorinių mašinų gedimų diagnostikos sistema (He et al., 2012)

Pasiūlyta rotorinių mašinų gedimų diagnostikos sistema (1.7 Pav.), pagrįsta naujuoju SR metodo modeliu, buvo taikoma praktiškai analizuojant guolių ir pavarų dėžės generuojamų virpesių analizei. Eksperimento rezultatai patikrino naujo siūlomo metodo efektyvumą, nustatant rotorinių mašinų gedimų dažnį, lyginant su kitais virpesių analizės metodais.

Savo straipsnyje (Chen B. et al., 2013) mechanikos inžinerijos mokyklos (Kinija) mokslininkai, kalba, jog atliekant rotorinės mašinos defektų diagnostiką, mechaninių virpesių jutiklių surinktų duomenų signaluose apstu daugelio mašinos komponentų generuojamų virpesių ir

fono triukšmo signalų. Rotorinės mašinos defektų generuojamų virpesių pėdsakai yra maskuojami interferuojančių virpesių, todėl, straipsnio autorių teigimu, daugelį metų naudojamos greitos kurtogramos (anglų k. fast kurtogram [FK]) metodikos naudojimas mašinos virpesių signalo analizėje, tampa mažiau efektyvus. Straipsnyje pristatoma patobulinta FK metodika, kuri vadinama „greita erdvine – spektrine eksceso kurtograma“ (anglų k. fast spatial–spectral ensemble kurtosis kurtogram [SSEK]). Ši metodika, kaip virpesių signalo filtrą naudoja kvazi – analitinį rėmelį (anglų k. quasi-analytic wavelet tight frame), o SSEK kaip signalo impulsyvumo įvertinimo priemonę.

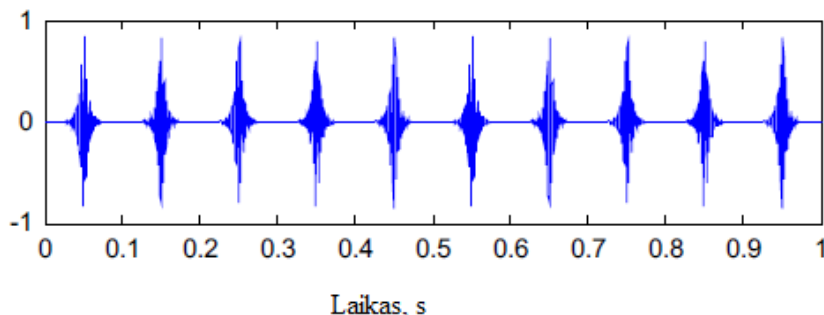
Mašinos defektų sukeltiems, trumpalaikių periodinių virpesių impulsams nustatyti skirtos metodikos efektyvumą straipsnio autoriai patvirtino naudodami frezavimo mašinos (1.8 Pav.) mechaninių virpesių matavimo duomenis.



1.8 Pav. Frezavimo staklių schema (Chen B. et al., 2013)

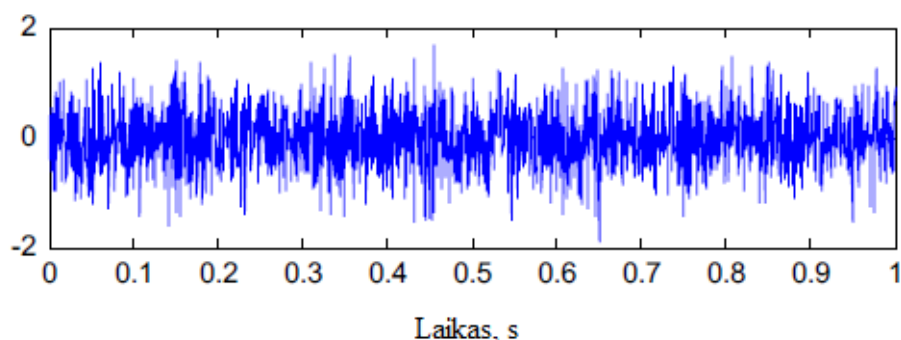
Atlikto tyrimo rezultatai parodė, jog lyginant originalią FK metodiką ir pristatomą SSEK metodiką, pastaroji metodika pasiekia gerus trumpalaikių virpesių pėdsakų analizavimo rezultatus.

Straipsnio (Chen J. et al., 2013) autoriai taip pat užsimena apie rotorinių mašinų defektų diagnostikos sunkumus, kuomet analizuojamame virpesių signale vyrauja pašaliniai fono virpesiai. Kadangi defektai rotorinėje mašinoje dažniausiai sukelia periodinius virpesių impulsus, defektų diagnozavimo problemos įrodymui, straipsnio autoriai atliko rotorinės mašinos komponento defekto generuojamų virpesių simuliaciją (1.9 Pav.).

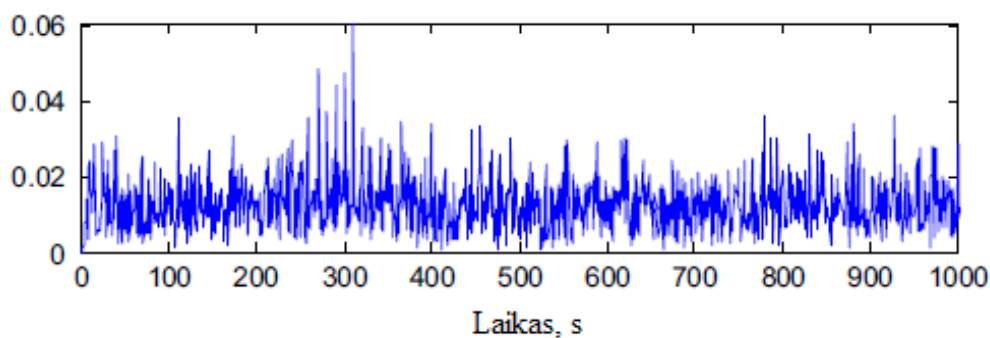


1.9 Pav. Simuliuoto signalo periodiniai virpesiai (Chen J. et al., 2013)

Prie periodinių virpesių signalo pridėjus fono virpesius, gautas signalas simuliuojantis virpesių signalą gaunama atliekant rotorinės mašinos defektų diagnostiką (1.10 Pav.), bei simuliuoto signalo dažnių spektras (1.11 Pav.).



1.10 Pav. Simuliuotas signalas (Chen J. et al., 2013)



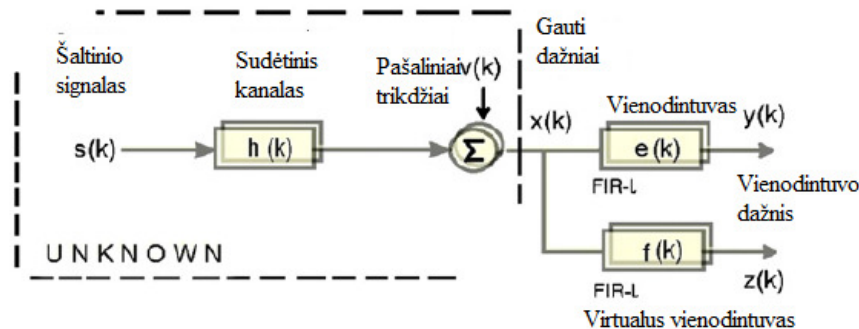
1.11 Pav. Simuliuoto signalo virpesių dažnių spektras (Chen J. ir kt., 2013)

1.10 Pav. Parodo kaip fono virpesiai „paslepia“ periodiškai pasikartojančius virpesius, imituojančius mašinos defektų generuojamus virpesius, dėl to defektų generuojamų virpesių nustatymas tampa sudėtingas.

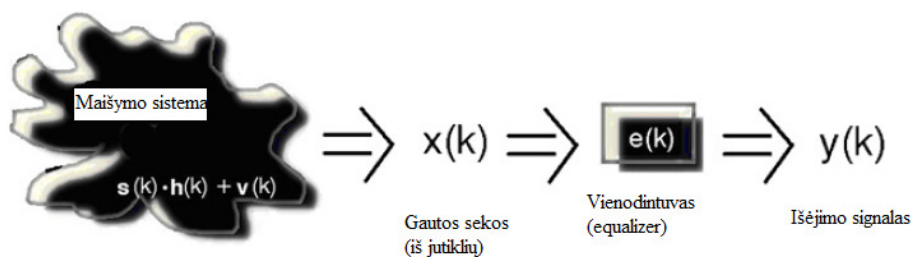
Šios problemos sprendimui, straipsnio autoriai pristatė metodiką (anglų k. customized redundant multiwavelet [CRM]), kurios pagalba eliminuojami trikdžiai apsunkinantys rotorinių mašinų defektų diagnostiką analizuojant mašinos elementų generuojamus virpesius. Metodo patikimumui įrodyti, straipsnio autoriai atliko eksperimentą. Eksperimento objektais pasirinkti kompresoriaus pavarų dėžė ir elektrinio lokomotyvo riedėjimo guoliai. Apdorojus tyrimo objektų virpesių matavimo duomenis CRM metodo pagalba, nustatyta, jog CRM metodas turi tvirtą pranašumą lyginant su kitais metodais aptinkat defektų sukeltų virpesių pėdsakus analizuojant virpesių signalus.

Pašalinius virpesių signalus, apsunkinančius tiriamos rotorinės sistemos komponento virpesių analizę, taip pat tyrė Hon Kong'o universiteto (Kinija) mokslininkai, straipsnyje (Tse et al., 2007). Mokslininkai nagrinėja problemą, kuomet norint atlikti rotorinės mašinos guolių virpesių

analizę, reikia atskirti kitų mašinos komponentų generuojamus virpesius. Autoriai aprašo tikrinio vektoriaus algoritmo (anglų k. eigenvector algorithm [EVA]) metodikos (1.12 Pav.) patobulinimą, kuri taikoma skaitmeninio mechaninių virpesių signalo apdorojimo technologijoje, vadinamoje aklo išlyginimo (anglų k. blind equalization [BE]) metodu (1.13 Pav.).



1.12 Pav. Tikrinio vektoriaus algoritmo (EAV) modelis (Tse et al., 2007)



1.13 Pav. Aklo išlyginimo (BE) modelis (Tse et al., 2007)

Siekiant įrodyti algoritmo efektyvumą, buvo atliekami eksperimentai su sumodeliuotais signalais ir realiais pramoninių mašinų virpesiais. Atlikus atitinkamos teorijos ir eksperimentų analizę, straipsnyje pateikiami metodo privalumai. Vienas privalumu tas, jog EAV metodo taikymas yra efektyvus ieškant guolio virpesių, netgi tada, jei guolio virpesiai yra santykinai mažesni, nei kitų šaltinių virpesiai. Taikant šį metodą galima atskirti keletą virpesių šaltinių.

Straipsnio autorių patobulintas EVA metodas lyginant su standartiniu EAV turi didesnes perspektyvas, kadangi metodo naudojimas suteikia galimybę išskirti keletą virpesių šaltinių naudojant vieną jutiklį.

Varšuvos technologijos Universiteto mokslininkai savo straipsnyje (Dybala et al., 2013) pagrindine guolių defektų virpesių analizės pramonėje pritaikymo problema vadina pašalinių virpesių šaltinių užgožiamus, diagnozuojamų guolių virpesius.

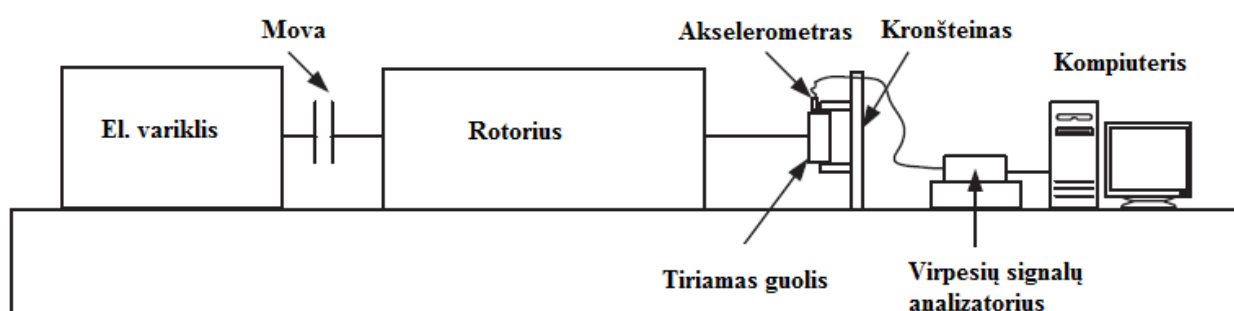
Pasak straipsnio autorių, per keletą paskutinių metų, buvo sukurta nemažai virpesių analizės metodų, tačiau daugeliu atvejų šiuos metodus yra sudėtinga naudoti, arba jie veiksmingi tik vėlesniais žalos mašinai nustatymo etapuose. Todėl autoriai straipsnyje pristato empirinio skaidymo

režimo metodu (anglų k. empirical mode decomposition [EMD]) pagrįstą guolių virpesių analizavimo metodą, kuris leidžia aptikti guolių defektus ankstesnėje jų vystymosi stadijoje.

Mokslininkai atliko du tyrimus analizuodami virpesių signalus gautus tiriant sudėtinę mechaninę sistemą naudojamą pramonėje. Naudojant anksčiau minėtą metodiką autoriai identifikavo guolių defektus, net kai guolių virpesiai buvo užgožiami pašalinių virpesių fonu.

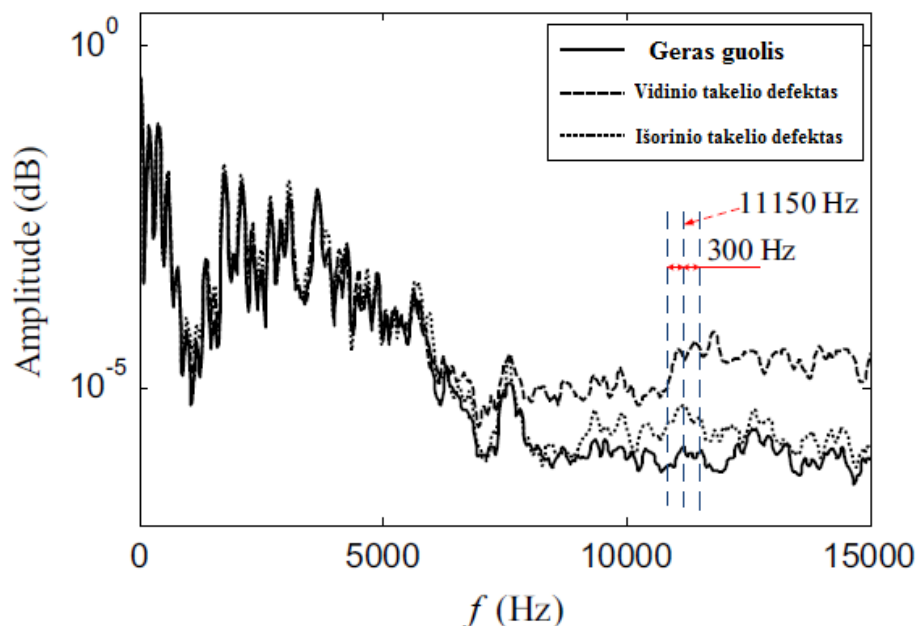
Kinijos mokslininkai straipsnyje (Dong et al., 2014) nagrinėja tą pačią problemą, kuomet siekiant kuo anksčiau nustatyti guolių defektus, ankstyvos stadijos guolio defekto virpesių signalai „pasislepia“ už pašalinių ir aplinkos virpesių.

Tyrimų metu, mokslininkai atliko eksperimentinius tyrimus, naudodamiesi guolių tyrimų stendu (1.15 pav.).



1.14 Pav. Guolių tyrimo stendas (Dong et al., 2014)

Atlikę eksperimentus mokslininkai apdorojo tyrimų rezultatus ir analizavo gautus virpesių spektrus (1.15 pav.). Virpesių spektruose mokslininkai mėgino išskirti guolio be defekto virpesių dažnius, bei defektinio guolio virpesių dažnius, kuomet defektas pasireiškia išoriniame, bei vidiniame guolio riedėjimo takeliuose. Guolio defektai dar tik pradėję progresuoti, todėl jų virpesių amplitudės labai mažos.



1.15 Pav. Virpesių amplitudžių spektrai (Dong et al., 2014)

Atlikę tyrimus mokslininkai nusprendė, jog vienas iš būdų, norint kuo efektyviau išskirti guolių defektų dažnius, kuomet ankstyvojoje progresavimo stadijoje jie užgožiami pašalinių virpesių signalų, yra spektrinės analizės metu padidinti virpesių dažnių rezoliuciją. Taip išdidinamas vienas dažnių intervalas, kuriame ieškoma guolio defektų generuojamų virpesių.

Dar vieni Kinijos mokslininkai straipsnyje (Gou et al., 2012) nagrinėja guolių defektus ankstyvojoje stadijoje. Guolių defektų virpesių amplitudės bendrame virpesių signale yra mažos, todėl dažnai užgožiamos aplinkos „triukšmo“ virpesių arba kitų tiriamos mašinos komponentų generuojamų virpesių signalų. Mokslininkų atliktų tyrimų metu naudota įranga bei defektiniai elementai pavaizduoti 1.16 paveiksle.



1.16 Pav. Tyrimų įranga bei defektiniai elementai naudoti tyrimams (Gou et al., 2012)

Pradinis virpesių signalas, mokslininkų pirmiausiai buvo apdorotas filtrais. Tada naudojant empirinio skaidymo būdą (angliškai ensemble empirical mode decomposition EEMD) mokslininkai suskaidė filtruotus virpesių signalus siekdami rasti ryšį tarp impulsų ir guolių defektų. Tyrimų metu mokslininkai naudojo hibridinį virpesių signalo apdorojimo metodiką, kuri remiasi spektrine analize bei empirinio skaidymo metodu. Atlikti tyrimai parodė, jog taikyti metodai padeda lengviau iš bendro virpesių signalo, kuriame daug pašalinių virpesių, išskirti guolio defektų generuojamus virpesius.

Atliekant mokslinių straipsnių apžvalgą pastebėta, jog daugeliu atvejų, diagnozuojant ant bendro pamato veikiančių rotorinių mašinų defektus, jų generuojamų virpesių identifikavimas tampa sudėtingas, kuomet į analizuojamų virpesių signalą patenka kitų mašinos elementų virpesiai, „mušimo efektas“, bei pašalinių fono virpesių signalai. Šie virpesių signalai užgožia virpesius to mašinos elemento, kurio techninę būklę norima įvertinti. Ne vienas mokslininkas pabrėžia šios problemos aktualumą savo moksliniuose straipsniuose. Mokslininkai atlieka tyrimus susijusius su šia problematika, ieškoma būdų eliminuoti foninius virpesių signalus ir išskirti nagrinėjamo mašinos elemento virpesių signalą pradiniam virpesių signalo spektre. Atliekant tyrimus, rotorinių mašinų virpesių signalai yra simuliuojami bandymo stenduose arba užfiksuojami veikiant realioms pramoninėms mašinoms įmonėse. Siekiant išskirti norimus virpesių signalus iš bendro virpesių signalo konteksto, mokslininkai naudoja skaitinius ir eksperimentinius metodus. Skaitiniai virpesių signalų atskyrimo metodai dažniausiai gaunami tobulinant jau anksčiau sukurtus ir naudotus skaitinius metodus. eksperimentiniais metodais reikiami virpesių signalai atskiriami kalibruojant matavimo įrangą, naudojant virpesių signalų filtrus arba koreguojamas greta dirbančių mašinų, sumontuotų ant vieno pagrindo, sukimosi dažnis, siekiant išvengti virpesių „mušimo“ efekto virpesių signalo spektruose.

1.2 Mechaniniai virpesiai ir jų parametrai

Norint užtikrinti patikimą rotorinių mašinų veikimą, plačiai taikomos mašinų techninės būklės diagnostikos technologijos. Rotorinių mašinų monitoringas ir diagnostika atliekama nestabdant technologinio proceso, kuomet dėl technologinio proceso ypatumų nėra galimybės stabdyti mašiną profilaktiniam remontui. Taip padidinamas technologinio proceso patikimumas ir prastovų nebuvimas. Rotorinių mašinų techninės būklės diagnostikos technologijų taikymas turi šiuos privalumus (Barzdaitis ir kt., 1998; Yang H. et al., 2002):

- Padidėja mašinų našumas.
- Sumažėja eksploatacijos ir remonto išlaidos.
- Padidėja mašinų naudingumo koeficientas.

- Užtikrina produkcijos kokybę.

Atliekant rotorinių mašinų techninės būklės diagnostiką ir monitoringą, atliekami mašinos dalių ir mazgų vibracinio aktyvumo tyrimai. Mašinų dalių ir mazgų vibracija – tai mechaniniai virpesiai (Barzdaitis ir kt., 1998).

Mechaniniais virpesiais vadinami nedideli (mm, μm) kūno poslinkiai nuo pusiausvyros ašies, kurie pasikartoja dažniau nei 1 kartą per sekundę (Barzdaitis ir kt., 1998).

Mechaniniai virpesiai yra svarbūs mechanikoje, mašinų gamyboje, statyboje ir kitose srityse. Virpesiai būna žalingieji ir naudingieji. Žalingieji virpesiai kelia tiesioginį pavojų įrenginiams, mašinoms ir jų dalims mechaninėms pavaroms, turbinoms ir kt. Naudingieji virpesiai – tai virpesiai, kuriuos galima panaudoti žmogaus darbui palengvinti, t. y. medžiagoms sijoti, betonui kloti ir kt. (Augustaitis, 2000).

Šiuolaikinės mechaninių virpesių matavimo ir analizės technologijos naudoja penkis virpesių parametrus (Barzdaitis ir kt., 1998):

1. Amplitudė, x .
2. Dažnis, f .
3. Fazė, ϕ .
4. Veleno virpesių poslinkių orbita.
5. Veleno kakliuko vidutinis poslinkis.

Rotorinės mašinos virpesių amplitudė x , tai didžiausias jos detalės ar konstrukcijos elemento dinaminio judėjimo apie pusiausvyros padėtį poslinkis, greitis arba pagreitis, išmatuotas nuo pusiausvyros padėties. Amplitudė išreiškiama mašinos elemento virpesių poslinkiu S_p (matuojamas mm arba μm), virpesių greičiu v_p (matuojamas mm/s), virpesių pagreičiu a_p (matuojamas m/s^2).

Virpesių dažniu f vadinamas periodinių, pasikartojančių įvykių skaičius per 1 sekundę. Jis parodo virpesių amplitudės pakitimo greitį ir intensyvumą (Barzdaitis ir kt., 1998).

Virpesių duomenų formatais vadinama koncentruota virpesių matavimo rezultatų ir jų analizės duomenų pateikimo forma. Atliekant mašinos, dirbančios stacionariame darbo režime, virpesių monitoringą ir defektų diagnostiką, naudojami šie virpesių duomenų formatai (Barzdaitis ir kt., 1998):

1. Virpesių signalo ir laiko grafikai.
2. Virpesių amplitudžių ir fazių grafikai laiko koordinatėje.
3. Virpesių spektras.

Virpesių signalo ir laiko grafikai – tai virpesių poslinkių $s(t)$, virpesių greičių $v(t)$ ir virpesių pagreičių $a(t)$ grafikai koordinačių sistemoje, kuomet virpesių signalas atidedamas ordinačių ašyje, o laikas abscisų ašyje (Barzdaitis ir kt., 1998).

Virpesių amplitudžių ir fazių grafikai laiko koordinatėje, parodo kaip šie parametrai kinta tam tikrame laiko intervale. Matavimo laiko intervalas priklauso nuo mašinos tipo ir jos techninės būklės (Barzdaitis ir kt., 1998).

Naudojant kompiuterizuotus virpesių spektro analizatorius, poliharmoninių virpesių signalas yra išskaidomas į harmonikas. Harmonikos – tai sinusinės formos virpesiai. Transformuojant šiuos sinusinės formos ir skirtingų virpesių dažnių signalus iš laiko koordinatės į dažnių, gaunamas virpesių spektras. T. y. gaunama virpesių poslinkio s , greičio v ir pagreičio a spektrograma. Virpesių spektro erdviniai grafikai vadinami „vandens krioklio“ spektrogramomis, padeda nustatyti gedimų ir defektų atsiradimo momentą, bei vystymąsi (Barzdaitis ir kt., 1998).

Virpesių greitis v įvertina mašinos dinamiką esant palyginus nedideliame dažnių intervale. Virpesių greičio kvadratinis vidurkis v_{RMS} įvertina vibracijų pavojingumą, nes virpesių greitis v nusako virpesių energiją ir yra jų daromos žalos efekto matas. Virpesių pagreitis a nusako jėgą veikiančią mašinos konstrukcijos elementą (Barzdaitis ir kt., 1998).

Kiekviena rotorinės mašinos mechaninė pavara, detalė ar mazgas turi tik jai būdingus mechaninių virpesių dažnius ir atitinkamas šių dažnių virpesių amplitudes. Šie virpesiai matuojami virpesių matavimo keitikliais, kurie virpesius paverčia elektriniu signalu.

Rotorinių mašinų virpesių monitoringui ir defektų diagnostikai naudojami šie pirminiai keitikliai (Barzdaitis ir kt., 1998):

1. Bekontaktiniai poslinkių matavimo keitikliai.
2. Greičių matavimo keitikliai.
3. Pagreičių matavimo keitikliai.
4. Bekontaktiniai diferencialiniai poslinkio keitikliai.
5. Kontaktiniai absoliučiuųjų poslinkių matavimo keitikliai.
6. Tachometrai ir fazės matavimo keitikliai.

Pagrindiniai poslinkio, greičio ir pagreičio keitiklių privalumai ir trūkumai pateikti 1.1 lentelėje (Barzdaitis ir kt., 1998).

1.1 Lentelė. Poslinkio, greičio ir pagreičio keitiklių privalumai ir trūkumai

Keitikliai	Privalumai	Trūkumai
Poslinkių keitikliai	<ol style="list-style-type: none"> 1. Matuoja veleno padėtį ir veleno virpesių poslinkius 2. Bekontaktiniai 3. Neturi mechaninių judančių dalių 4. Maži gabaritai 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Siauras dažnių intervalas 0...300 Hz 2. Sudėtinga instaliacija 3. Jungiamųjų kabelių ilgis kalibruojamas gamintojo 4. Jautrūs išorinių magnetinių laukų poveikiui, bei veleno geometrinės formos paklaidoms 5. Reikalingas išorinis maitinimas
Greičio keitikliai	Aukšto lygio išėjimo signalas nereikalauja papildomo stiprinimo	<ol style="list-style-type: none"> 1. Siauras dažnių intervalas 10...2000 Hz 2. Lengvai pažeidžiami išorinių magnetinių laukų 3. Jautrūs integruotiems poveikiams ir temperatūros pokyčiams 4. Išsidėvi mechaninės judančios dalys
Pagreičio keitikliai	<ol style="list-style-type: none"> 1. Platus dažnių intervalas 10...10000 Hz ir daugiau 2. Didelis dinamiškumas 3. Neturi mechaninių judančių detalių, nesidėvi, atsparūs gamybos sąlygoms 4. Kompaktiški, lengvi 5. Paprastai įdiegiami 	Žemo lygio išėjimo signalas reikalauja stiprinimo

Virpesių matavimo keitiklių elektriniai signalai apdorojami universaliais virpesių signalų analizatoriais (VSA). Vienas tokių - daugiakanalis virpesių signalų analizatorius OROS Mobi-Pack (Prancūzija) pateiktas 1.1 paveiksle.



1.17 Pav. Daugiakanalis virpesių signalų analizatorius OROS Mobi-Pack (OROS, 2014)

Šis prietaisas suteikia galimybę analizuoti virpesių duomenis realiu laiku arba įrašyti informaciją vėlesniam duomenų analizavimui. 16 kanalų suteikia galimybę atlikti virpesių lygio matavimus su minimaliomis prastovomis ir minimaliu mašinos stabdymo skaičiumi (OROS, 2014).

Pagrindinės virpesių signalų analizatorių savybės yra šios (Barzdaitis ir kt., 1998):

1. Analizuojamų virpesių dažnių intervalas $f_i = f_{max} - f_{min}$, kur f_{max} – didžiausias dažnis, f_{min} – mažiausias dažnis.
2. Dažnių skiriamoji geba Δf – tai mažiausias dviejų gretimų dažnių skirtumas.
3. Dinaminis intervalas.
4. Virpesių signalo analizės laikas – tai laikas, per kurį virpesių signalas paduotas į analizatorių, virsta patikimais duomenimis.
5. Amplitudžių ir dažnių matavimų santykinės neapibrėžtys.
6. Dažnių skiriamosios gebos didinimo funkcija.

Virpesių signalų analizatoriais apdorojus elektrinius signalus, gautus virpesių matavimo keitikliais, gaunami virpesių signalų spektro grafikai. Šiuose grafikuose virpesių amplitudė atidedama Y ašyje, o virpesių dažnis - X ašyje. Naudojantis tokiu virpesių duomenų formatu, galima nustatyti mašinos virpesių šaltinius, bei priežastis sukėlusias virpesius. Virpesių signalų analizatoriai sugeba sudėtingą elektrinį signalą, transformuotą matavimo keitikliu, išskaidyti į atskiras komponentes. Tai leidžia tiksliau identifikuoti virpesių šaltinius. Pagal virpesių amplitudes nustatoma ar mašinos vibracinis aktyvumas neviršija leistinų ribų. Virpesių amplitudžių fazių pakitimai parodo ar fazės pasiliko leistinoje kitimo srityje. Mechaninėse sistemose didelį kurios nors virpesių komponentės pokytį dažniausiai neįmanoma nustatyti virpesių amplitudės ir laiko duomenų formate, bet palyginus nesunku išanalizuoti virpesių spektro formate (Barzdaitis ir kt., 1998).

1.3 Skyriaus apžvalga

Atliekant mokslinių straipsnių apžvalgą pastebėta, jog daugeliu atvejų, diagnozuojant ant bendro pamato veikiančių rotorinių mašinų defektus, jų generuojamų virpesių identifikavimas tampa sudėtingas, kuomet į analizuojamų virpesių signalą patenka kitų mašinos elementų virpesiai, „mušimo efektas“, bei pašalinių fono virpesių signalai. Šie virpesių signalai užgožia virpesius to mašinos elemento, kurio techninę būklę norima įvertinti. Ne vienas mokslininkas pabrėžia šios problemos aktualumą savo moksliniuose straipsniuose. Mokslininkai atlieka tyrimus susijusius su šia problematika, ieškoma būdų eliminuoti foninius virpesių signalus ir išskirti nagrinėjamo mašinos elemento virpesių signalą pradiniame virpesių signalo spektre. Atliekant tyrimus, rotorinių mašinų virpesių signalai yra simuliuojami bandymo stenduose arba užfiksuojami veikiant realioms pramoninėms mašinoms įmonėse.

Rotorinių mašinų virpesių signalai matuojami virpesių pagreičio matavimo keitikliais, parenkamais pagal tai kokio dažnio virpesius jie geba užfiksuoti. Virpesių matavimo keitiklių elektriniai signalai apdorojami universaliais virpesių signalų analizatoriais (VSA). Apdorojus virpesių signalus, gaunami šie virpesių duomenų formatai:

1. Virpesių signalo ir laiko grafikai.
2. Virpesių amplitudžių ir fazių grafikai laiko koordinatėje.
3. Virpesių spektras.

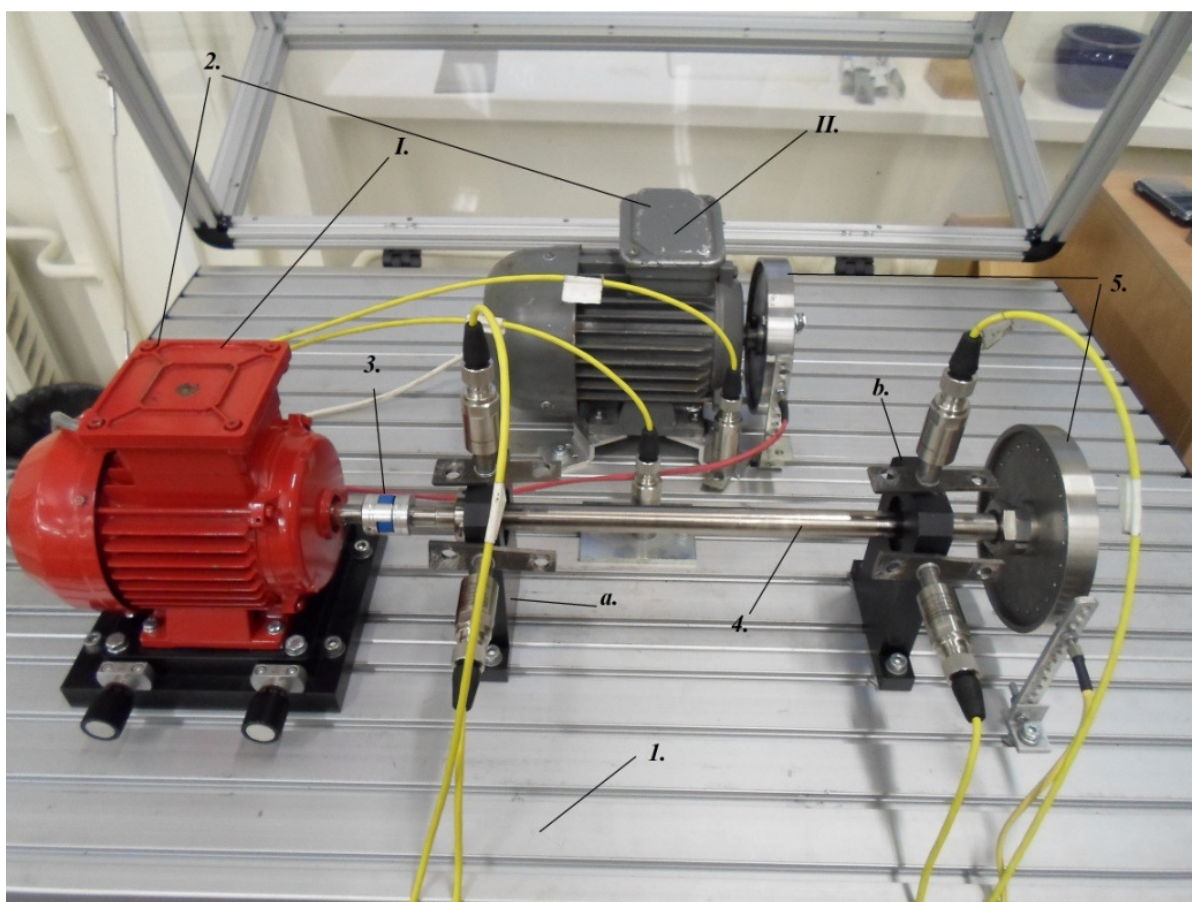
Tolesnėje šio darbo eigoje, aprašomas eksperimentinių tyrimų objektas, bei virpesių lygio matavimų atlikimo metodika.

II. METODINĖ DALIS

Šiame darbe, norima įvertinti, kokią įtaką daro ant bendro pamato veikiančių mašinų, generuojami virpesių signalai, tiriamos mašinos guolių defektų nustatymui, bendrajame virpesių spektre. Užsibrėžtam tikslui pasiekti, buvo pasirinktas virpesių matavimo būdas, pagrįstas veleno atramų virpesių lygio matavimo teorija.

2.1 Tyrimo objektas

Ekperimentiniai tyrimai atlikti riedėjimo guolių tyrimo stendu GUNT PT500 (Vokietija) (2.1 pav.) ant kurio buvo sumontuotos dvi rotorinės sistemos – tiriamoji ir pagalbinė, žadinanti pašalinius virpesius.



2.1. Pav. Eksperimentų atlikimo stendas:

1- pagrindas; 2 – Elektros varikliai; 3 – mova; 4 – velenas; 5 – rotoriai; a ir b – veleno atramos su guoliavietėmis; I ir II – atitinkamai tiriamoji (M1) ir pagalbinė (M2), pašalinius virpesius žadinanti, rotorinės sistemos;

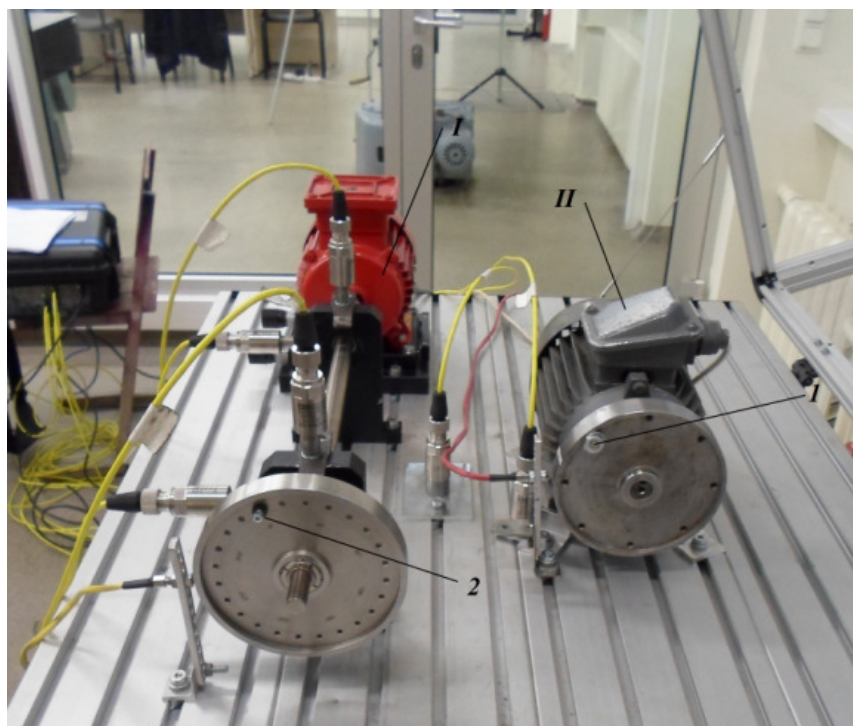
Rotorinė sistema *M2* (2.1 pav.), skirta virpesių, perduodamų per pamatą tiriamai rotorinei sistemai *M1*, žaditimui. Priklausomai nuo virpesių matavimo etapų rotorinė sistema *M2* neveikia arba veikia pastoviais, 997 aps./min sūkais.

Tiriamoji rotorinė sistema *M1* priklausomai nuo virpesių matavimo etapų veikia atitinkamai 500 aps./min, 1000 aps./min, 2000 aps./min arba 3000 aps./min sūkais.

Priklausomai nuo virpesių matavimo etapų, ant rotorinių sistemų rotorių *I* ir *2* (2.2 pav.) tvirtinamos disbalansą sukeliančios masės, pateiktos 2.1 lentelėje.

2.1 Lentelė. Disbalansą sukeliančios masės.

Rotorinė sistema	Disbalanso masė, g
M1	3,03;
M2	11,92; arba 22,4;



2.2 Pav. Disbalanso masių montavimo vietos:

I ir II – rotorinės sistemos; 1- M2 rotorinės sistemos disbalanso masės montavimo vieta; 2 – M1 rotorinės sistemos disbalanso masės montavimo vieta;

Ant rotorių (2.2 pav.) tvirtinamų masių m_1 ir m_2 sukelti rotorių disbalanso dydžiai apskaičiuojami pagal formulę:

$$D' = r \cdot m \quad (2.1)$$

Čia: r – rotoriaus spindulys;

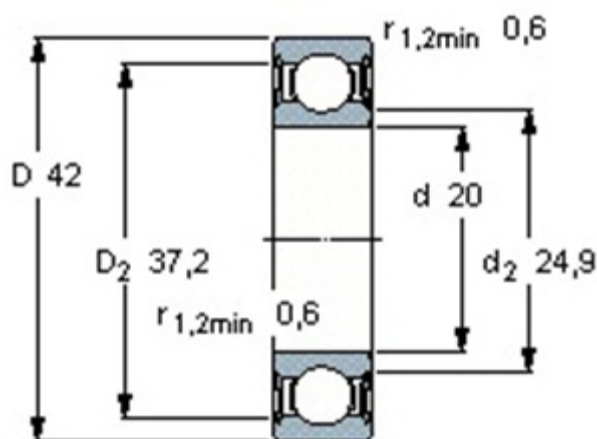
m – masė, rotoriaus disbalansui sukelti;

Pagal formulę (2.1) apskaičiuoti rotorų disbalanso dydžiai pateikti 2.2 lentelėje.

2.2 Lentelė. Paskaičiuoti rotorų disbalanso dydžiai

Disbalansas	Disbalanso dydis, g·mm
D'_1	127,87
D'_2	503,02 arba 945,28

Veleno atramų a ir b (2.1 pav.) guoliavietėse, sumontuoti radialiniai rutuliniai guoliai 6004. Radialinio rutulinio guolio (2.3 pav.) geometriniai matmenys pateikti 2.3 lentelėje.



2.3 Pav. Rutulinis radialinis guolis (Barzdaitis, 1998).

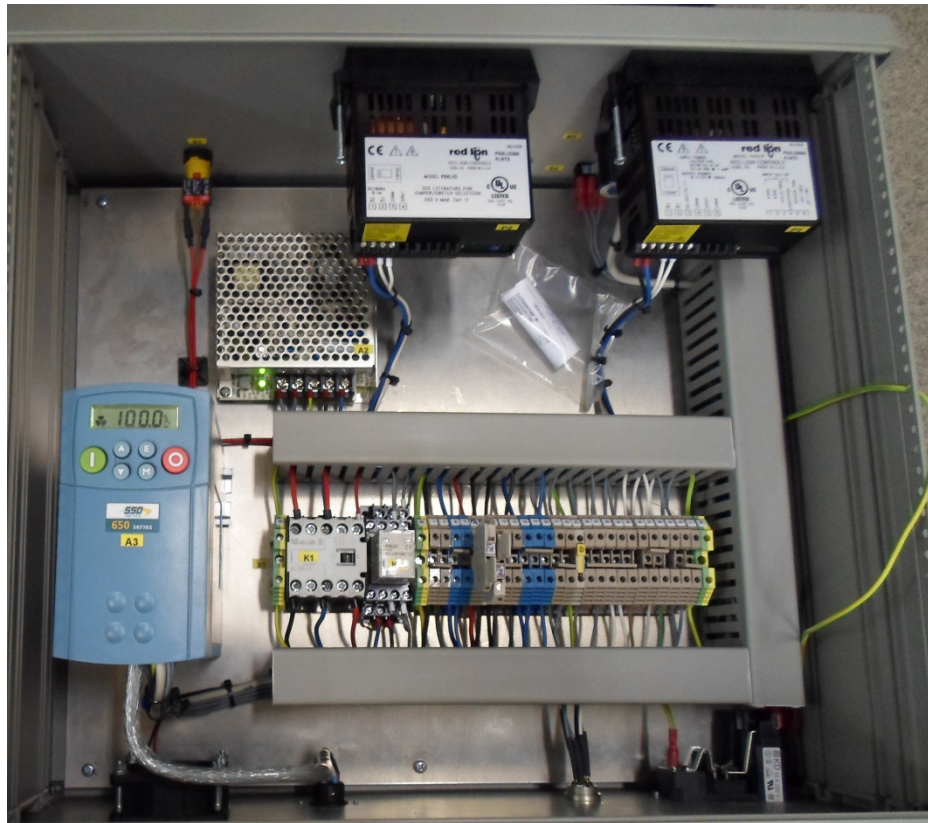
2.3 Lentelė. Guolio 6004 geometriniai matmenys (Vaičiulis, 2010)

Guolio žymuo	d , mm	D , mm	B , mm	r , mm	C , kN	C_0 , kN	P_w , kN	F_0
6004*	20	42	12	0,6	9,95	5,0	0,212	14

Tiriamos rotorinės sistemos MI (2.1 pav.) apsisukimai keičiami dažnių keitiklio pagalba. Keičiant skaitines vertes dažnių keitiklio ekranėlyje (2.4 Pav.) atitinkamai nustatomi reikiami tiriamosios rotorinės sistemos sūčiai. Šios vertės pateiktos 2.4 lentelėje.

2.4 Lentelė. Dažnių keitiklio nustatymai.

Tiriamos rotorinės sistemos sūčiai, aps./min	Skaitinė vertė dažnių keitiklio ekrane, %
3000	100
2000	67,7
1000	34,1
500	17,3



2.4 Pav. Dažnių keitiklis

Sumontavus guolių tyrimo stendą, tvirtinami virpesių lygio matavimo jutikliai ir pagal pasirinktą metodiką atliekami eksperimentiniai tyrimai.

2.2 Virpesių tyrimo metodika

Tiriamos rotorinės sistemos virpesių tyrimo metodiką sudaro šios dalys:

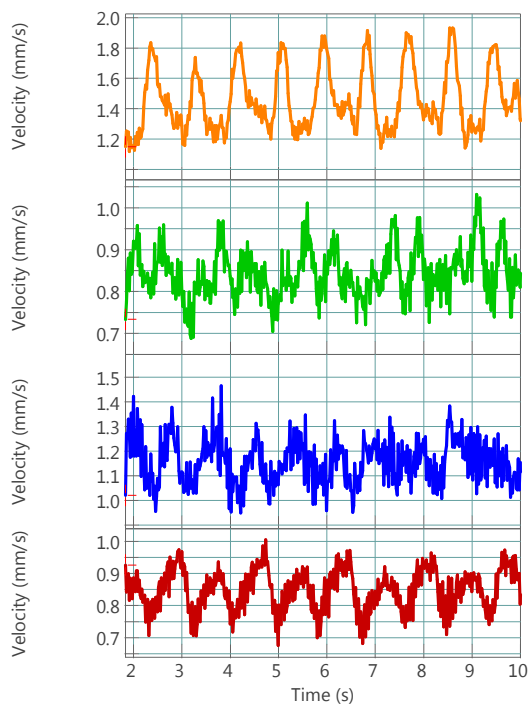
- Virpesių matavimo būdo parinkimas.
- Virpesių aktyvumo matavimo priemonių ir programinės įrangos parinkimas.
- Virpesių matavimo taškų ant tyrimo objekto parinkimas.
- Virpesių aktyvumo matavimo duomenų formatų parinkimas.
- Virpesių signalo apdorojimo (įvertinimo) metodika.
- Eksperimentų atlikimo eiliškumas.

2.2.1 Virpesių matavimo būdo parinkimas

Eksperimentinių tyrimų metu matuojami rutulinio guolio 6004, esančio veleno atramos b (2.1 pav.) guoliavietėje, defekto generuojamų virpesių lygiai. Virpesių lygio matavimai,

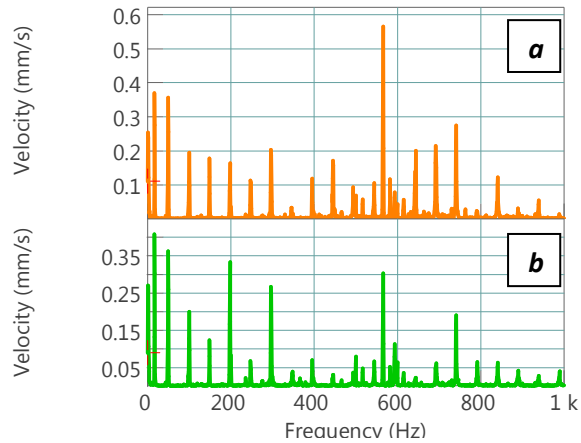
vadovaujantis tarptautiniu standartu ISO 10816, atlikti netiesioginiu būdu, kadangi guoliai sumontuoti veleno atramų guoliavietėse. Pasirinktas virpesių lygio matavimo būdas, pagrįstas rotorinių ir veleno atramų su riedėjimo guoliais, virpesių lygio matavimo teorija. Šie matavimai suteikia galimybę netiesiogiai išmatuoti ir kiekybiškai įvertinti progresuojančius arba besivystančius defektus riedėjimo guoliuose (Barzdaitis, 1998).

Siekiant įvertinti, kokią įtaką daro ant bendro pamato veikianti rotorinė sistema, tiriamosios rotorinės sistemos guolio defekto identifikavimui, nagrinėjami tiriamo guolio guoliavietės, absoliučiuoju virpesių kvadratinio vidurkiu V_{RMS} kitimo laike grafikai pavaizduoti 2.5 paveiksle.



2.5 Pav. Absoliučiuoju virpesių kvadratinio vidurkiu V_{RMS} , skirtinguose matavimo taškuose, kitimo laike grafikas

Siekiant identifikuoti tiriamo guolio defekto generuojamus virpesius, nagrinėjami absoliučiuoju virpesių greitosios Furje transformacijos FFT spektrai (2.6 pav.).



2.6 Pav. Absoliučiąjų virpesių greitosios Furje transformacijos FFT spektras:
a - virpesių greičiai x ašies matavimo kryptimi kryptimi; b - virpesių greičiai y ašies matavimo kryptimi kryptimi

2.2.2 Virpesių aktyvumo matavimo priemonių ir programinės įrangos parinkimas

Virpesių lygio matavimams pasirinktas daugiakanalis virpesių signalų analizatorius OROS Mobi-Pack (Prancūzija) (2.7 Pav.).



2.7 Pav. Daugiakanalis virpesių signalų analizatorius OROS Mobi-Pack, eksperimentų metu

Šis prietaisas suteikia galimybę analizuoti virpesių duomenis realiu laiku arba įrašyti informaciją vėlesniam duomenų analizavimui. 16 kanalų suteikia galimybę atlikti virpesių lygio matavimus su minimaliomis prastovomis ir minimaliu mašinos stabdymo skaičiumi. Pasirinkta virpesių aktyvumo matavimo, įranga suteikia galimybę matuoti bendrą veleno atramų guoliaviečių absoliučiąjų virpesių lygį, kuris naudojantis įranga išreiškiamas per absoliučiąjų virpesių

kvadratinių vidurkių V_{RMS} reikšmes (OROS, 2015). Atliekant konkrečius eksperimentinius tyrimus, buvo paanuoti 8 virpesių lygio analizatoriaus kanalai. Šeši kanalai skirti virpesių pagreičio matavimo keitikliams ir 2 kanalai skirti jautikliams matuojantiems rotorų sūkius.

Duomenų perkėlimui iš virpesių analizatoriaus į kompiuterį naudojama programinė įranga „NVGate“ v.8.2. Ši programinė platforma suteikia galimybę kaupti virpesių diagnostikos duomenis, juos įvertinti, bei apdoroti.

Virpesių lygio matavimui kartu su daugiakanaliu virpesių analizatoriumi pasirinkti:

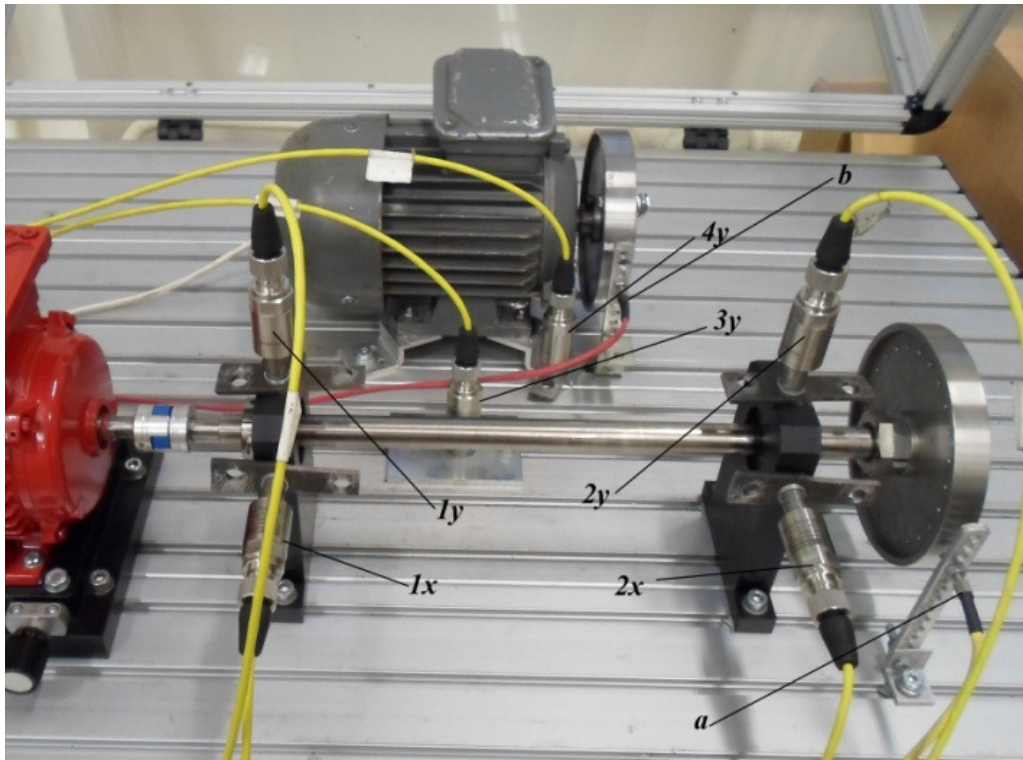
- virpesių pagreičių matavimui – pjezoakselerometrinis virpesių pagreičių jutiklis Wilcoxon 793 (JAV).
- fazės ir greičio matavimui - jutiklis Optel-Thevon 152G7 (Prancūzija).

Absoliučią virpesių pagreičių jautikliai pasirinkti dėl šių priežasčių:

- Platus matuojamų virpesių dažnių intervalas;
- Didelis matavimo jautrumas;
- Nedideli jutiklio gabaritai;
- Patogus jutiklio montavimas;

2.2.3 Virpesių matavimo taškų ant tyrimo objekto parinkimas.

Virpesių matavimo vietos pasirinktos vadovaujantis tarptautinio standarto ISO 10816 rekomendacijomis. Keturi pjezoakselerometriniai jutikliai, magnetais tvirtinami ant veleno atramų, vienas ant tyrimų stendo pagrindo plokštės, bei vienas ant pagalbinės rotorinės sistemos korpuso. Virpesių matavimai, kiekviename iš išvardintų virpesių energijos matavimo taškų, atliekami dviem, viena kitai statmena, kryptimis, kaip pavaizduota 2.8 paveiksle.

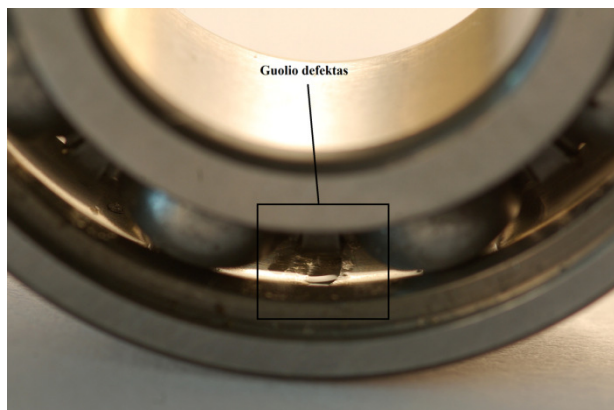


2.8 Pav. Jutiklių montavimo vietos eksperimentinių tyrimų stende:

1x ir 2x – virpesių lygio jutikliai matuojantys veleno atramų virpesius x ašies kryptimi; 1y ir 2y - virpesių lygio jutikliai matuojantys atramų virpesius y ašies kryptimi; 3y – tyrimo stendo pagrindo virpesių lygio matavimo jutiklis y ašies kryptimi; 4y – M2 rotorinės sistemos virpesių lygio matavimo jutiklis y ašies kryptimis; a – M1 rotorinės sistemos rotoriaus sukimosi greičio jutiklis; b – M2 rotorinės sistemos sukimosi greičio jutiklis;

Čia *1x*, *1y*, *2x*, *2y*, *3y* ir *4y* pjezoakselerometriniai jutikliai. Pirmas skaičius žymi jutiklio montavimo tašką, raidė žymi ašinę virpesių lygio matavimo kryptį. Fazės ir greičio jutikliai pažymėti *a* ir *b*. Jutiklis *a* matuoja *M1* rotorinės sistemos sūkius, jutiklis *b* – pagalbinės *M2* rotorinės sistemos sūkius.

Eksperimentinių tyrimų metu veleno atramoje *b* (2.1 pav.) geras guolis 6004 buvo keičiamas į guolį turintį defektą išoriniame riedėjimo takelyje (2.9 Pav.).

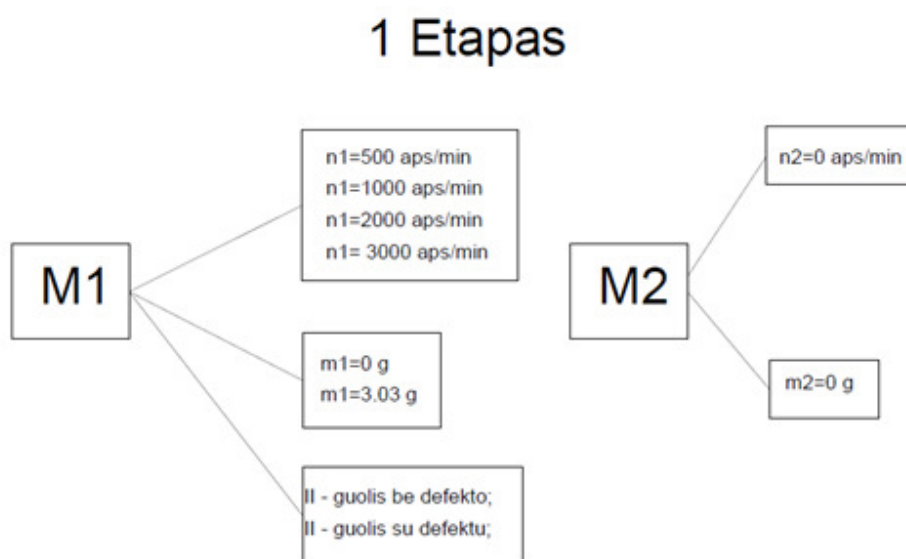


2.9 Pav. Guolio defektas išoriniame riedėjimo takelyje

2.2.4 Eksperimentų atlikimo eiliškumas

Tiriamos rotorinės sistemos (2.1 Pav.) virpesių lygių matavimus galima suskirstyti į 3 etapus. Kiekvieno matavimo etapo metu keičiami tiriamosios M_1 sistemos sūkliai, keičiamas M_1 ir M_2 sistemų rotorių disbalansas, matavimai atliekami įjungus arba išjungus pagalbinę M_2 sistemą. Viso atlikti 67 matavimai.

Pirmojo, tiriamosios rotorinės sistemos virpesių lygio matavimo etapo schema, pavaizduota 2.10 paveiksle.



2.10 Pav. Pirmasis tiriamosios rotorinės sistemos virpesių energijos matavimo etapas

Čia: M_1 – tiriamoji rotorinė sistema; M_2 – pagalbinė, pašalinius virpesius žadinanti rotorinė sistema; n_1 – tiriamosios rotorinės sistemos sūkliai, matavimų metu. n_2 - pašalinius virpesius žadinančios rotorinės sistemos sūkliai, matavimų metu; m_1 – Tiriamosios sistemos rotoriaus disbalanso masė, keičiama matavimų metu; m_2 – Pagalbinės sistemos rotoriaus disbalanso masė, keičiama matavimų metu; II – tyrimų metu, veleno atramoje b (2.1 Pav.) guoliavietėje tvirtintas guolis.

Šio virpesių matavimo etapo metu, matavimai atliekami šia tvarka:

1. Atliekami virpesių matavimai kuomet:

M_2 rotorinė sistema neveikia, (t.y $n_2 = 0$ aps./min), tiriamosios rot. sistemos rotoriaus disbalanso masė $m_1 = 0$ g, veleno atramoje b (2.1 Pav.) įmontuotas guolis be defekto, tiriamosios rotorinės sistemos sūkliai $n_1 = 500, 1000, 2000$ ir 3000 aps./min;

2. Atliekami virpesių matavimai kuomet:

$M2$ rotorinė sistema neveikia, (t.y $n_2 = 0$ aps./min), tiriamosios rot. sistemos rotoriaus disbalanso masė $m_1 = 3,03$ g, veleno atramoje b (2.1 Pav.) įmontuotas guolis be defekto, tiriamosios rotorinės sistemos sūkliai $n_1 = 500, 1000, 2000$ ir 3000 aps./min¹;

3. Atliekami virpesių matavimai kuomet:

$M2$ rotorinė sistema neveikia, (t.y $n_2 = 0$ aps./min), tiriamosios rot. sistemos rotoriaus disbalanso masė $m_1 = 0$ g, veleno atramoje b (2.1.1 Pav.) įmontuotas guolis su žinomu defektuotu, tiriamosios rotorinės sistemos sūkliai $n_1 = 500, 1000, 2000$ ir 3000 aps./min;

4. Atliekami virpesių matavimai kuomet:

$M2$ rotorinė sistema neveikia, (t.y $n_2 = 0$ aps./min), tiriamosios rot. sistemos rotoriaus disbalanso masė $m_1 = 3,03$ g, veleno atramoje b (2.1 Pav.) įmontuotas guolis su žinomu defektu, tiriamosios rotorinės sistemos sūkliai $n_1 = 500, 1000, 2000$ ir 3000 aps./min;

Antrojo, tiriamosios rotorinės sistemos virpesių lygio matavimo etapo schema, pavaizduota 2.11 paveiksle.

2 Etapas



2.11 Pav. Antrasis tiriamosios rotorinės sistemos virpesių energijos matavimo etapas

Šio virpesių matavimo etapo metu, matavimai atliekami šia tvarka:

1. Atliekami virpesių matavimai kuomet:

Tiriamoji, $M1$ rotorinė sistema, neveikia, (t.y $n_1 = 0$ aps./min), Papildomos rot. sistemos rotoriaus disbalanso masė $m_2 = 0$ g, veleno atramoje b (2.1 Pav.) įmontuotas guolis be defekto, $M2$ rotorinės sistemos sūkliai $n_2 = 996$ aps./min;

2. Atliekami virpesių matavimai kuomet:

Tiriamoji, *M1* rotorinė sistema, neveikia, (t.y $n_1 = 0$ aps./min), Papildomos rot. sistemos rotoriaus disbalanso masė $m_2 = 11,92$ g, veleno atramoje *b* (2.1 Pav.) įmontuotas guolis be defekto, *M2* rotorinės sistemos sūkliai $n_2 = 996$ aps./min;

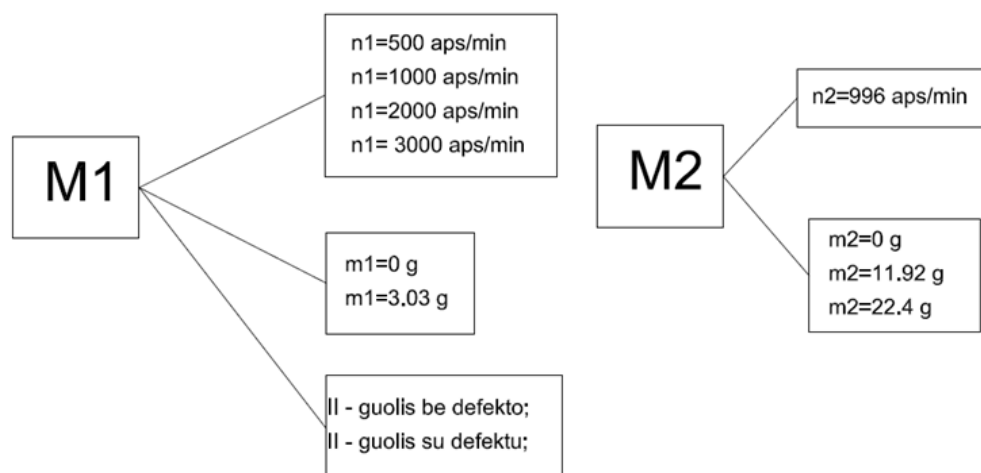
3. Atliekami virpesių matavimai kuomet:

Tiriamoji, *M1* rotorinė sistema, neveikia, (t.y $n_1 = 0$ aps./min), Papildomos rot. sistemos rotoriaus disbalanso masė $m_2 = 22,4$ g, veleno atramoje *b* (2.1 Pav.) įmontuotas guolis be defekto, *M2* rotorinės sistemos sūkliai $n_2 = 996$ aps./min;

Analogiškai virpesių lygių matavimai kartojami, veleno atramos *b* guoliavietėje (2.1 Pav.) įmontavus guolį su žinomu defektu.

Trečiojo, tiriamosios rotorinės sistemos virpesių lygio matavimo etapo schema, pavaizduota 2.12 paveiksle.

3 Etapas



2.12 Pav. Antrasis tiriamosios rotorinės sistemos virpesių energijos matavimo etapas

Šio virpesių matavimo etapo metu, matavimai atliekami šia tvarka:

1. Atliekami virpesių lygio matavimai kuomet:

Tiriamosios *M1* rotorinės sistemos sūkliai $n_1 = 500, 1000, 2000, 3000$ aps./min, disbalanso masė $m_1 = 0$ g Papildomos rot. Sistemos rotoriaus disbalanso masė $m_2 = 0$ g, veleno atramoje *b* (2.1 Pav.) įmontuotas guolis be defekto, *M2* rotorinės sistemos sūkliai $n_2 = 996$ aps./min;

2. Atliekami virpesių lygio matavimai kuomet:

Tiriamosios *M1* rotorinės sistemos sūkliai $n_1 = 500, 1000, 2000, 3000$ aps./min, disbalanso masė $m_1 = 3,03$ g Papildomos rot. Sistemos rotoriaus disbalanso masė $m_2 = 0$ g, veleno atramoje *b* (2.1 Pav.) įmontuotas guolis be defekto, *M2* rotorinės sistemos sūkliai $n_2 = 996$ aps./min;

3. Atliekami virpesių lygio matavimai kuomet:

Tiriamosios *M1* rotorinės sistemos sūkliai $n_1 = 500, 1000, 2000, 3000$ aps./min, disbalanso masė $m_1 = 0$ g Papildomos rot. Sistemos rotoriaus disbalanso masė $m_2 = 11,92$ g, veleno atramoje *b* (2.1 Pav.) įmontuotas guolis be defekto, *M2* rotorinės sistemos sūkliai $n_2 = 996$ aps./min;

4. Atliekami virpesių lygio matavimai kuomet:

Tiriamosios *M1* rotorinės sistemos sūkliai $n_1 = 500, 1000, 2000, 3000$ m⁻¹, disbalanso masė $m_1 = 3,03$ g Papildomos rot. Sistemos rotoriaus disbalanso masė $m_2 = 11,92$ g, veleno atramoje *b* (2.1 Pav.) įmontuotas guolis be defekto, *M2* rotorinės sistemos sūkliai $n_2 = 996$ m⁻¹;

5. Atliekami virpesių lygio matavimai kuomet:

Tiriamosios *M1* rotorinės sistemos sūkliai $n_1 = 500, 1000, 2000, 3000$ aps./min, disbalanso masė $m_1 = 0$ g Papildomos rot. Sistemos rotoriaus disbalanso masė $m_2 = 22,4$ g, veleno atramoje *b* (2.1 Pav.) įmontuotas guolis be defekto, *M2* rotorinės sistemos sūkliai $n_2 = 996$ aps./min;

6. Atliekami virpesių lygio matavimai kuomet:

Tiriamosios *M1* rotorinės sistemos sūkliai $n_1 = 500, 1000, 2000, 3000$ aps./min, disbalanso masė $m_1 = 3,03$ g Papildomos rot. Sistemos rotoriaus disbalanso masė $m_2 = 22,4$ g, veleno atramoje *b* (2.1 Pav.) įmontuotas guolis be defekto, *M2* rotorinės sistemos sūkliai $n_2 = 996$ aps./min;

Analogiškai virpesių lygių matavimai kartojami, veleno atramos *b* guoliavietėje (2.1 Pav.) įmontavus guolį su žinomu defektu.

Atlikus tiriamosios rotorinės sistemos virpesių energijos matavimus, visi virpesių signalų analizatoriuje OROS Mobi-Pack išsaugoti duomenys, perkelti į personaliniame kompiuteryje esančią programinę įrangą „NVGate“.

2.2.5 Virpesių signalo apdorojimo (įvertinimo) metodika

Eksperimentų metu, pirmieji virpesių lygio matavimai atliekami, kuomet veleno atramų guoliavietėse įtvirtinti guoliai be defektų. Sekančių virpesių lygio matavimo etapu, veleno atramos *b* (2.1 Pav.) guoliavietėje, įtvirtinamas rutulinis guolis 6004 su žinomu defektu. Guolio defektas - išoriniame riedėjimo takelyje. Žinoma, jog žemų dažnių (0 – 2000 Hz) virpesiai atsiranda dėl kontaktuojančių guolio elementų paviršių sužalojimų ir pasireiškia kaip priverstinių virpesių dažniai (Barzdaitis, 1998).

Defektiniai riedėjimo guolio elementai žadina keturių skirtingų dažnių virpesius, o šių virpesių dažnių teorinė reikšmės apskaičiuojamos naudojantis rutulinio radialinio guolio (2.3 pav.) geometriniais parametrais bei formulėmis (Barzdaitis, 1998):

1. Separatoriaus sukimosi dažnis f_{sp} , parodo, jog sugedo separatorius :

$$f_{sp} = \frac{f_r}{2} \left(1 - \frac{d_r}{d_{vid}} \cdot \cos\beta \right); \quad (2.1)$$

2. Rutuliukų probėgų išorinio žiedo riedėjimo takeliu dažnis f_I , parodo, kad išorinio žiedo riedėjimo takelis yra su defektu:

$$f_I = z \cdot \frac{f_r}{2} \left(1 - \frac{d_r}{d_{vid}} \cdot \cos\beta \right); \quad (2.2)$$

3. Rutuliukų probėgų išorinio žiedo riedėjimo takeliu dažnis f_V , parodo, kad išorinio žiedo riedėjimo takelis yra su defektu:

$$f_V = z \cdot \frac{f_r}{2} \left(1 + \frac{d_r}{d_{vid}} \cdot \cos\beta \right); \quad (2.3)$$

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

$$f_{rk} = f_r \cdot \frac{d_{vid}}{d_r} \cdot \left[1 - \left(\frac{d_r}{d_{vid}} \right)^2 \cdot \cos^2\beta \right]; \quad (2.4)$$

Kintamieji formulėse:

β – riedėjimo kūnų kontakto su žiedu kampas;

z – riedėjimo kūnų skaičius;

Kadangi žinoma, jog tiriamo guolio defektas yra išoriniame riedėjimo takelyje, todėl pagal formulę 2.3 ir naudojantis interaktyvia guolių virpesių dažnių skaičiuokle (Bearing vibration... 2015), apskaičiuojami defekto dažniai, esant skirtingiems tiriamosios rotorinės sistemos sūkiams, kurie pateikti 2.5 lentelėje.

2.5. Lentelė. Guolio defekto virpesių dažniai.

Tiriamos rotorinės sistemos sūkiai, aps./min	Defekto dažnis, Hz
500	29,94
1000	59,88
2000	119,76
3000	174,69

Atlikus virpesių matavimus, pagal formulę 2.3 apskaičiuoti teoriniai guolio elemento dažniai lyginami su FFT spektruose (2.9 Pav.) gautais dažniais. Iš FFT spektro nustatomi šiuos dažnius atitinkantys virpesių greičiai.

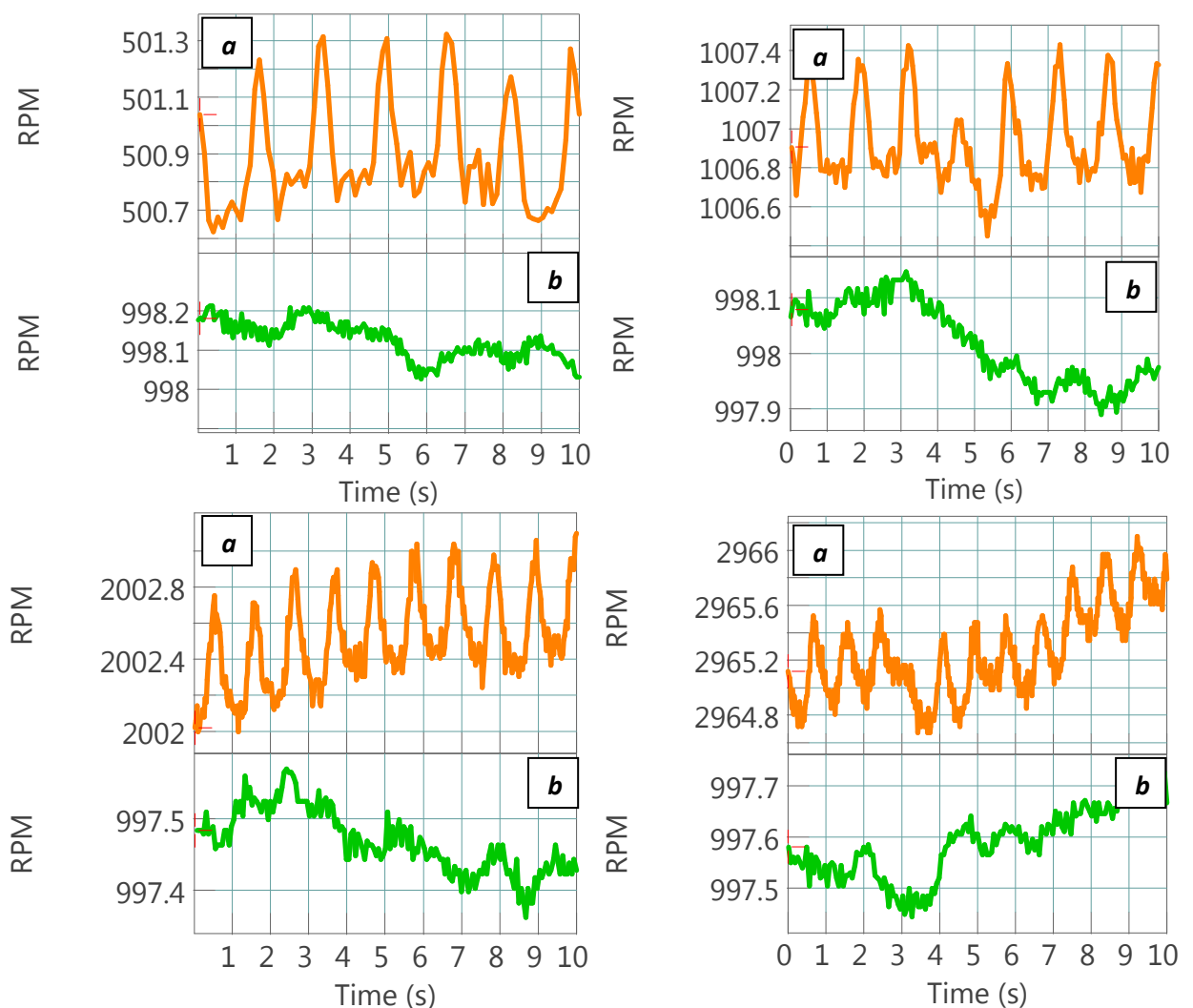
Tolesnėje darbo eigoje, apdorojami eksperimentų metu surinkti matavimo duomenys, nagrinėjami tiriamo guolio guoliavietės absoliučiuųjų virpesių kvadratinių vidurkių V_{RMS} kitimo laike grafikai, bei absoliučiuųjų virpesių greitosios Furje transformacijos FFT spektrai.

III. EKSPERIMENTINĖ DALIS

3.1 Ant bendro pamato dirbančių rotorinių sistemų virpesių signalų apdorojimas

Atliekant eksperimentus, buvo matuojami riedėjimo guolių tyrimo stendo elementų virpesių lygiai, rotorinėms sistemoms dirbant skirtingais sūkais, bei esant skirtingam rotorių disbalansui.

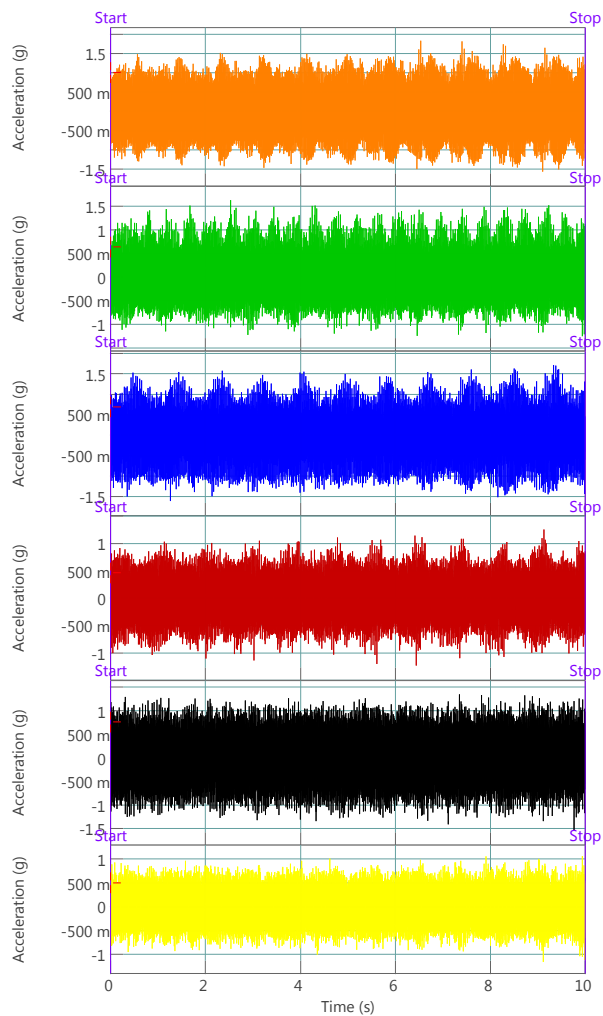
Virpesių lygio matavimai buvo atliekami tiriamajai rotorinei sistemai M1 veikiant 500, 1000, 2000 ir 3000 aps/min sūkais. Pagalbinės rotorinės sistemos M2 sūkiai visų matavimų metu buvo pastovūs, ~997 aps/min (3.1 Pav.)



3.1 Pav. Rotorinių sistemų sūkiai eksperimentų metu:

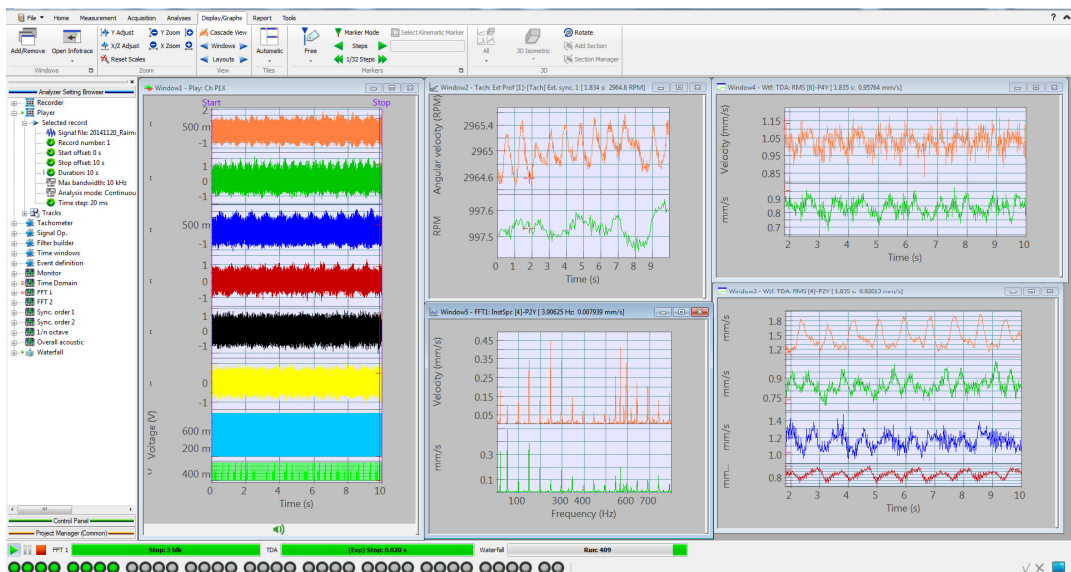
a – M1 sistemos sūkiai; *b* – M2 rotorinės sistemos sūkiai.

Virpesių lygio analizatoriumi 25600 kS/s diskretizavimo dažniu 10 s intervale buvo įrašinėjami virpesių pagreičiai. Taip gauti pirminiai virpesių pagreičio keitlių signalai (3.2 Pav.).



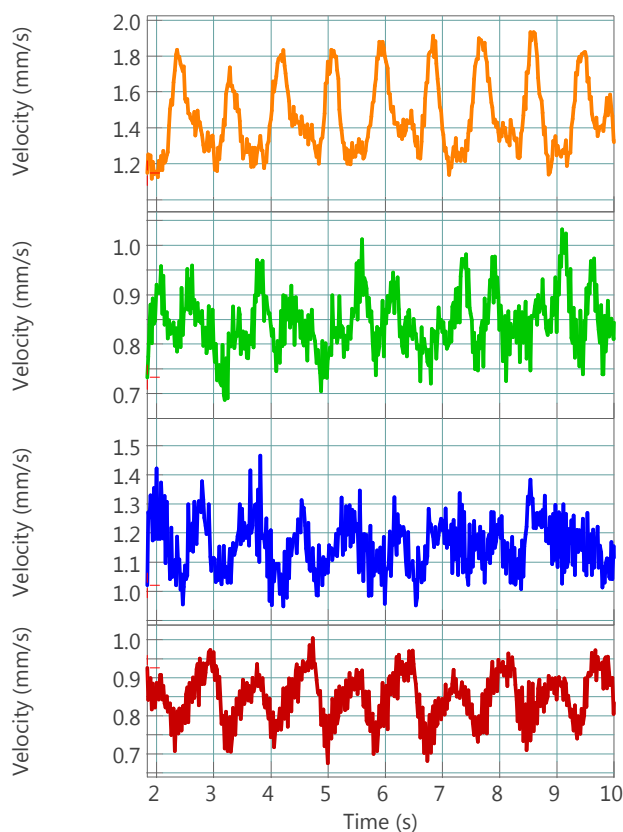
3.2 Pav. Virpesių lygio analizatoriumi įrašytų virpesių pagreičių kitimo laike grafikai

Įrašyti virpesių signalų duomenys perkeliama į personalinį kompiuterį, bei apdorojami programinės įrangos „NVGate v8.2“ (3.2 Pav.) pagalba.



3.3 Pav. Programinės įrangos „NVGate“ darbinis langas

Programinės įrangos pagalba, virpesių lygio matavimų metu įrašyti duomenys yra vidurkinami 0,02 sekundžių intervale, taip gaunami virpesių greičių, skirtinguose matavimo taškuose, kvadratinų vidurkių (V_{RMS}) kitimo laike grafikai (3.4 Pav.).



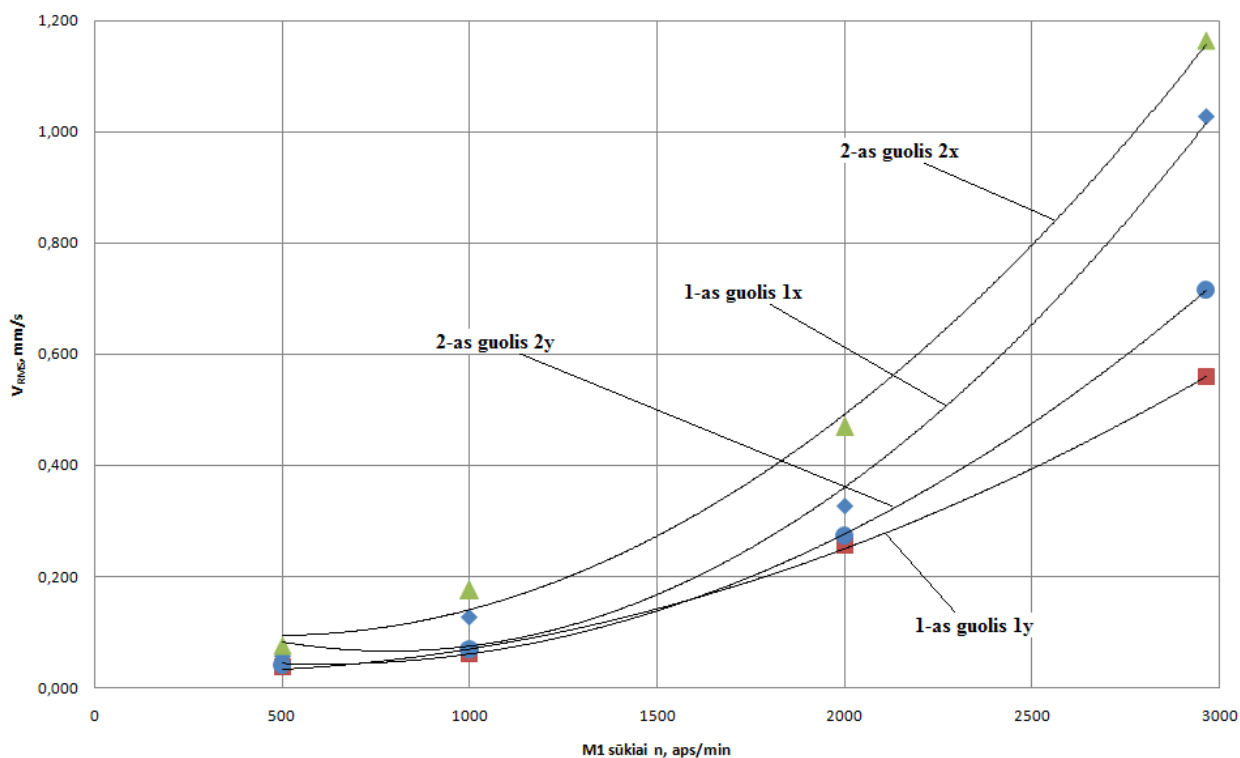
3.4 Pav. Virpesių greičių, skirtinguose matavimo taškuose, kvadratinų vidurkių (V_{RMS}) kitimo laike grafikas

Virpesių V_{RMS} reikšmės, užfiksuotos 10 sekundžių perkeliamos į Excel programą. Tuomet Excel programos pagalba, apskaičiuojami V_{RMS} reikšmių vidurkiai kiekviename virpesių matavimo taške ir pagal gautus rezultatus sudaroma lentelė pateikta 1-ame priede.

3.2 Ant bendro pamato dirbančios rotorinės sistemos įtaka tiriamajai

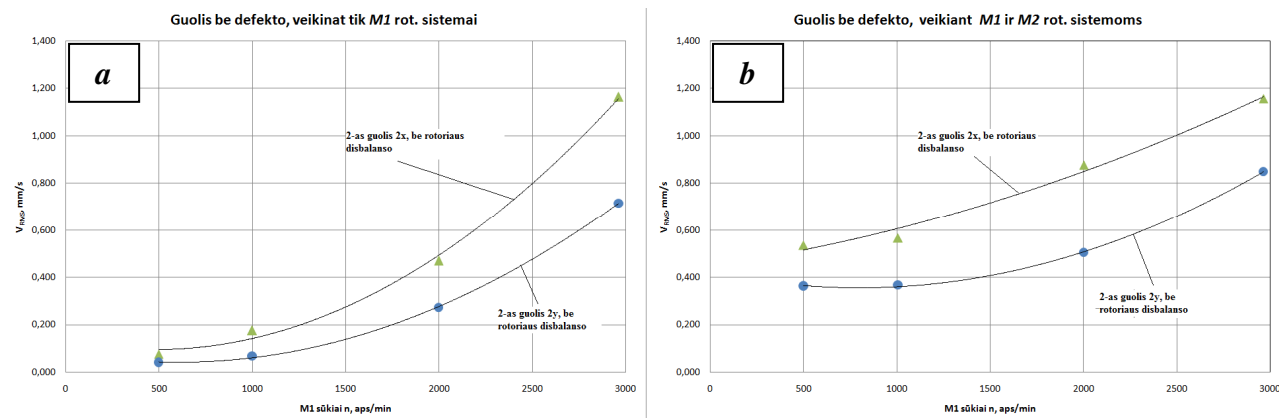
Pagal 1-ojo priedo, 1 lentelės duomenis sudaromi vidutinių V_{RMS} reikšmių priklausomybės, nuo tiriamosios rotorinės sistemos sūkių grafikai. Pirmasis grafikas, pateiktas 3.5 paveiksle, parodo virpesių, užfiksuotų 1x, 1y, 2x ir 2y pjezoakselerometriniais keitliais (2.8 Pav.) priklausomybę nuo tiriamosios rotorinės sistemos MI sūkių. Veleno atramoje a (2.1 Pav) įmontuotas gulis be defekto. Tiriamojoje veleno atramos guoliavietėje b (2.1 Pav.) taip pat įmontuotas geras guolis. Kaip matyti grafike (3.4 Pav.) dėl gaminės tiriamos rotorinės sistemos konstrukcijos, aukštesnio lygio virpesiai fiksuojami 2-oje guoliavietėje b (2.1 Pav.), virpesių matavimo x kryptimi. Taip yra dėl to, jog 1-oji

guoliavietė yra arčiau rotorinės sistemos variklio, todėl pati konstrukcija standesnė, tuo tarpu, 2-oji guoliavietė yra arčiau rotoriaus disko, todėl šios guoliavietės žadinami virpesiai yra didesni.



3.5 Pav. Virpesių V_{RMS} guoliavietėse, veikiant tik tiriamajai rot. sistemai $M1$, esant guoliu be defekto

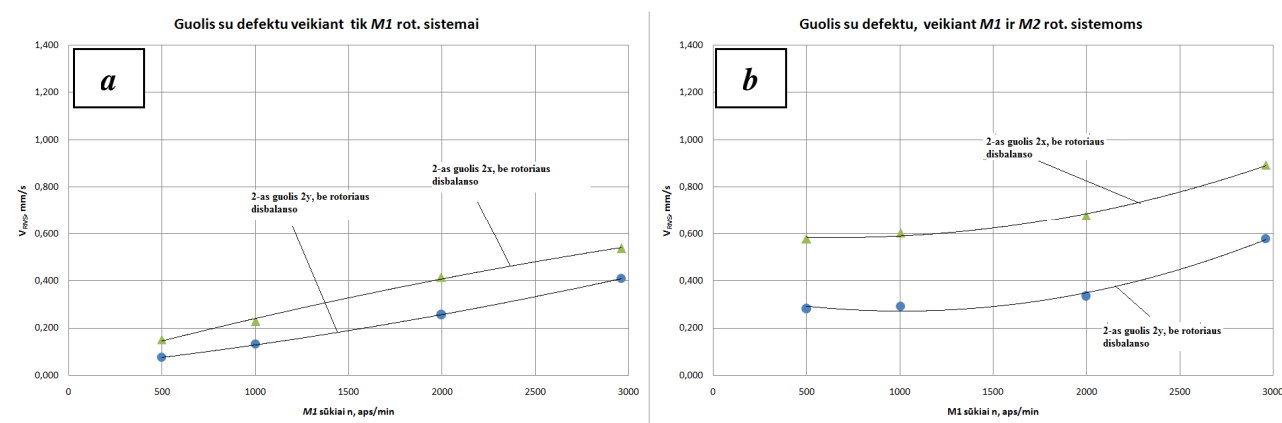
Kuomet tiriamojoje rotorinės sistemos $M1$ 2 guoliavietėje, įmontuotas guolis be defekto, virpesių V_{RMS} palyginimas pateiktas 3.6 paveiksle. Lyginant grafikus *a* ir *b* (3.6 Pav.), tiriamajai rotorinei sistemai veikiant skirtingais sūkliais, be rotorių disbalanso, matomas bendras virpesių lygio padidėjimas, kuomet įjungžiama pagalbinė rotorinė sistema $M2$. Tai parodo, jog atsiradus papildomam virpesių šaltiniui, bendras virpesių lygis 2-oje guoliavietėje padidėja, labiau tai pastebina prie mažesnių $M1$ rotorinės sistemos sūkių.



3.6 Pav. Virpesių V_{RMS} palyginimas, tiriamoje guoliavietėje įmontavus guolį be defekto: *a*- guolis be defekto veikiant tik $M1$ rotorinei sistemai; *b*-guolis be defekto, veikiant $M1$ ir $M2$ sistemoms;

2-oje guoliavietėje gerą guolį pakeitus guoliu, turinčiu defektą išoriniame žiedo takelyje (3.7 Pav.), bendras virpesių lygis 2-oje guoliavietėje tapo mažesnis nei 3.6 paveiksle. Tačiau lyginant 2-os guoliavietės virpesius, veikiant tik $M1$ sistemai (3.7 Pav., *a*) ir vienu metu veikiant abiem, $M1$ ir $M2$ sistemoms (3.7 Pav., *b*), didesnis virpesių lygis yra antru atveju. Tai parodo, jog $M2$ rotorinės sistemos virpesiai sustiprina 2-os guoliavietės virpesių lygį. Palyginus 3.6 ir 3.7 pav., galime taip pat daryti išvadą, kad virpesių greičių kvadratinų vidurkių V_{RMS} parametras nėra tinkamas įvertinti ar rotorinės sistemos guolis yra su defektu, ar be defekto.

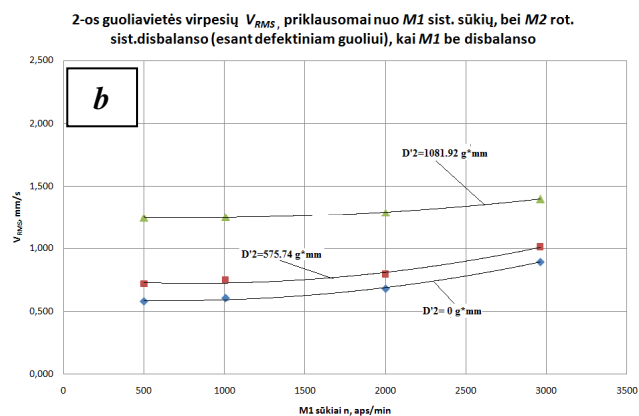
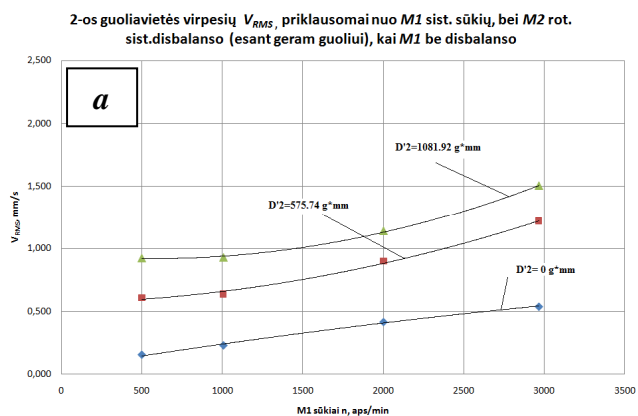
Kaip matyti 3.6 ir 3.7 pav., didesnės virpesių vertės 2-oje guoliavietėje, visais atvejais fiksuojamos virpesių matavimo x ašies kryptimi, dėl mažesnės atramos standumo šia kryptimi. Dėl šios priežasties, bei siekiant sumažinti nagrinėjamų duomenų apimtį, tolesnėje darbo eigoje bus nagrinėjami tik 2-os guoliavietės, $2x$ (2.8 Pav) virpesių matavimo keitliu užfiksuoti virpesiai.



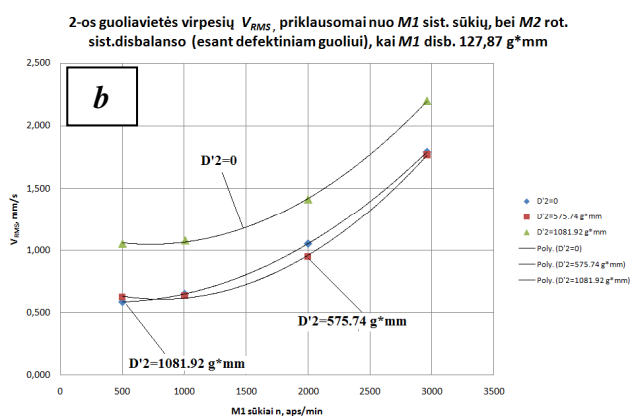
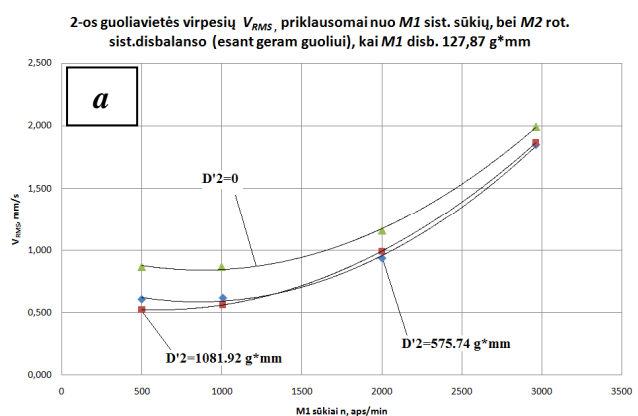
3.7 Pav. Virpesių V_{RMS} , palyginimas, tiriamoje guoliavietėje įmontavus guolį su defektu:
a- guolis su defektu veikiant tik $M1$ rotorinei sistemai; *b*- guolis su defektu, veikiant $M1$ ir $M2$ rotorinėms sistemoms;

Kadangi eksperimentų metu buvo keičiamos $M1$ ir $M2$ sistemų rotorių apkrovos, t. y. buvo pridamos papildomos masės ant rotoriaus disko, taip padidindamos rotoriaus disbalanso žadinamos jėgos. Sudaryti 2-os guoliavietės V_{RMS} grafikai (3.8 Pav. *a* ir *b*), parodantys kaip kinta virpesiai x ašies kryptimi, priklausomai nuo $M2$ rotoriaus disbalanso, bei tiriamos sistemos sūkių, vienu metu dirbant abiem rotorinėms sistemoms.

Paveiksle 3.8 pateikiami grafikai, kuriuose matoma 2-oje guoliavietėje fiksuojamų virpesių priklausomybė nuo $M1$ sistemos sūkių, bei $M2$ sistemos rotoriaus apkrovos, gerą guolį pakeitus į guolį su defektu. Šiuo atveju $M1$ sistemos rotorius sukasi be papildomai pridėto disbalanso. Aiškiai matyti, jog abiem atvejais, esant skirtingiems tiriamos rotorinės sistemos $M1$ sūkiams, virpesių V_{RMS} vertės 2-oje guoliavietėje didžiausios, kuomet $M2$ sistemos rotoriaus disbalansas didžiausias. Kuomet $M2$ sistemos rotoriaus disbalansas $D'2=0$ g*mm, didesni V_{RMS} matomi 2-oje guoliavietėje įmontavus defektinį guolį (3.8 Pav., *b*). Tačiau padidinus $M2$ sistemos rotoriaus disbalansą, 2-os guoliavietės virpesiai tapo mažesni, esant defektiniam guoliui, nei esant guoliui be defekto.



3.8 Pav. 2-os guoliavietės x kryptimi virpesių V_{RMS} palyginimas, veikiant abiem rot. sistemoms, kai $M1$ sistemos rotorius be disbalanso:
a- guolis be defekto; b- guolis turintis defektą.



3.9 Pav. 2-os guoliavietės virpesių x kryptimi V_{RMS} palyginimas, veikiant abiem rotorinėm sistemoms, kai $M1$ sistemos rotorius su disbalansu
a- geras guolis; b- guolis turintis defektą.

Kuomet padidinamas $M1$ sistemos rotoriaus disbalansas (3.9 Pav.), bendras virpesių lygis 2-oje guoliavietėje padidėja, lyginant su atveju pavaizduotu 3.8 paveiksle. Vadinas, kuomet apkraunamas tiriamosios $M1$ sistemos rotorius, dėl didesnės guolio apkrovos padidėja ir bendrieji veleno atramoje esančios guoliavietės virpesiai.

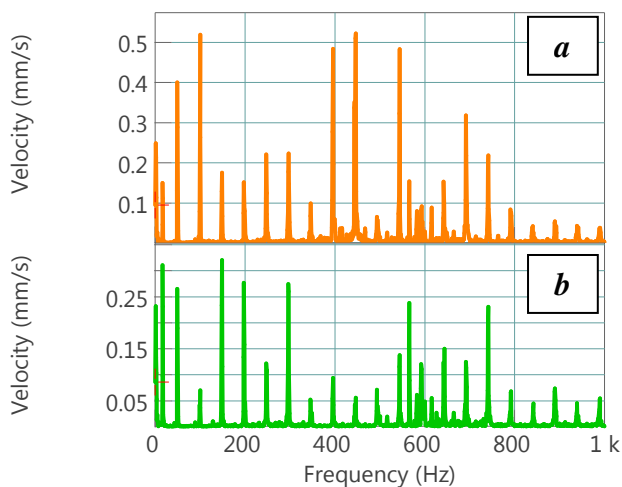
Apibendrinant šį skyrių galima teigti, jog nagrinėjant pateiktus V_{RMS} grafikus, didžiausi virpesių V_{RMS} matomi virpesių matavimo x ašies kryptimi. Todėl tolesnėje darbo eigoje nagrinėjami virpesių signalai, užfiksuoti būtent šioje ašyje. Lyginant V_{RMS} priklausomybes nuo tiriamosios rotorinės sistemos sūkių, grafikus, pastebėtas vidutiniškai 40 % virpesių lygio padidėjimas įjungus ant bendro pamato su tiriamąja sumontuotą pagalbinę rotorinę sistemą. Padidinus $M2$ rotoriaus disbalansą, kuomet vienu metu dirba $M1$ ir $M2$ rotorinės sistemos, 2-os guoliavietės V_{RMS} vertės padidėja vidutiniškai 47 %. Kuomet $M1$ ir $M2$ rotorines sistemas veikia didžiausi rotorių

disbalansai, pastebimas 50 % virpesių lygių padidėjimas, lyginant kuomet abi sistemos veikia be rotorų disbalanso.

Galima daryti išvadą, jog pagal bendrą tiriamos guoliavietės absoliučią virpesių V_{RMS} lygį, sunku įvertinti ir nustatyti, ar rotorinės sistemos guoliai geri, ar su defektu, kadangi tai yra bendrieji, netiesioginiu būdu išmatuoti, 2-os guoliavietės virpesiai, todėl siekiant įvertinti, kaip anksčiau minėtos sąlygos įtakoja tiriamo guolio defekto identifikavimą virpesių signaluose, tolesnėje darbo eigoje bus atliekama tiriamos guoliavietės virpesių Furjė greitosios transformacijos (FFT) spektrų analizė.

3.3 Tiriamos guoliavietės virpesių spektrinė analizė

Skaitmeninį virpesių signalą gautą virpesių lygio analizatoriumi, programinė įranga „NVGate“ apdoroja, naudojant greitąją Furjė transformaciją (GFT) arba kitaip vadinamą FFT (angliškai Fast Furje Transformation). Taip gaunami tiriamoje guoliavietėje atliktų matavimų, skaitmeninio virpesių signalo spektrai, toliau vadinami virpesių FFT spektrais (3.10 Pav.).

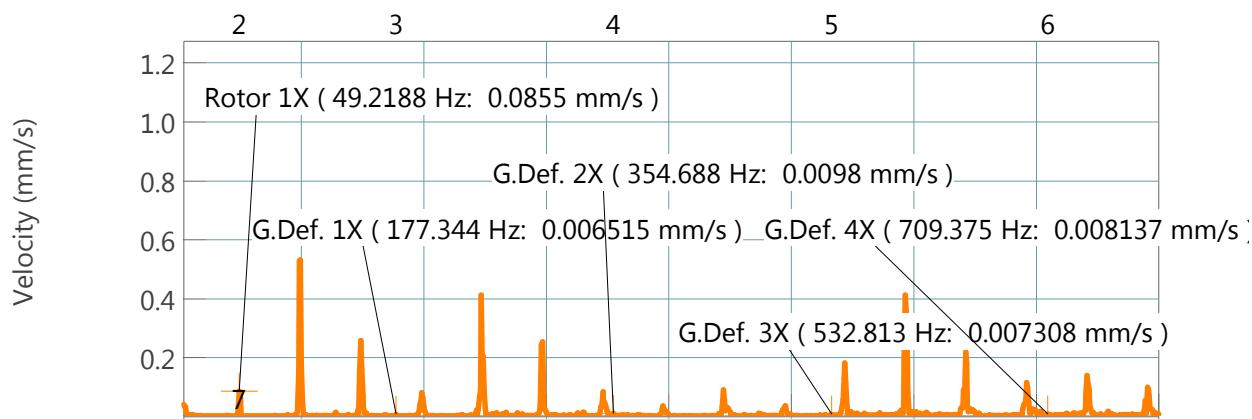


3.10 Pav. Tiriamos guoliavietės virpesių greičių FFT spektras, vienu iš eksperimentų etapų:

a – virpesiai x ašies kryptimi; b – virpesiai y ašies kryptimi

Atliekant skaitmeninio virpesių signalo apdorojimo nustatymus programinėje įrangoje, pasirinktas virpesių dažnio intervalas 0 – 1000 Hz. Rezoliucija, kuria pateikiami FFT spektrai – 781,25 mHz, panaudojant 12801 linijų skaičių. Virpesių greičių FFT spektrai analizuojami naudojantis programos įrankiais, ieškomi tiriamosios rotorinės sistemos rotoriaus sinchroninių sūkių $1x$ harmonikos dažniai, bei guolio išorinio riedėjimo takelio dažnio pirmoji, antroji, trečioji ir ketvirtoji harmonikos (3.11 Pav.).

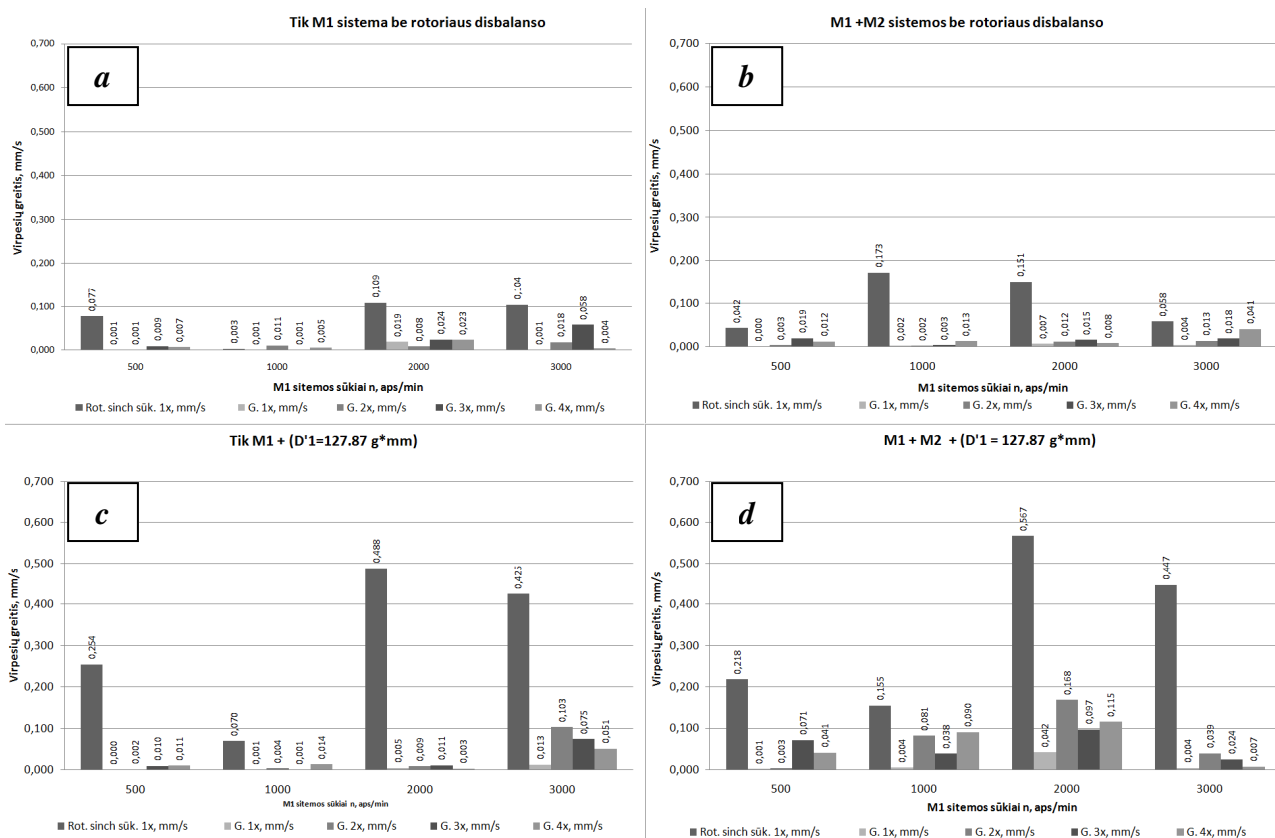
Paveiksle 3.11 pateiktas tiriamos 2-os guoliavietės virpesių spektras x ašies kryptimi. Darbo eigoje, FFT spektruose nenagrinėjami virpesiai y ašies kryptimi, kadangi y ašies kryptimi, virpesių greičių reikšmės yra mažesnės, kaip tai galima matyti 3.10 paveiksle. Analizuojant gautus virpesių greičių FFT spektrus, nustatomos *MI* sistemos rotoriaus sinchroninio sukimosi dažnio 1X vertės, bei guolio išorinio riedėjimo takelio dažnio virpesių greičių harmonikose (G.Def. 1X, G.Def. 2X G.Def. 3X ir G.Def. 4X) vertės, kurios surašytos į lentelę (2-as priedas, 1 lent.).



3.11 Pav. Tiriamos 2-os guoliavietės virpesių FFT spektras, joje įmontavus guolį be defekto

Naudojantis 2-jo priedo 1 lentelės duomenimis, sudaromos diagramos, parodančios virpesių greičių kitimą harmonikose, tiriamajai rotorinei sistemai dirbant skirtingais režimais, guoliavietėje įmontavus defektinį guolį. Pagal šiuos grafikus siekiama iširti, kaip yra įtakojami guolio defekto žadinami virpesiai, kai ant bendro pamato veikia pašalinė rotorinė sistema su besikeičiančia apkrova (didinamos disbalanso žadinamos jėgos).

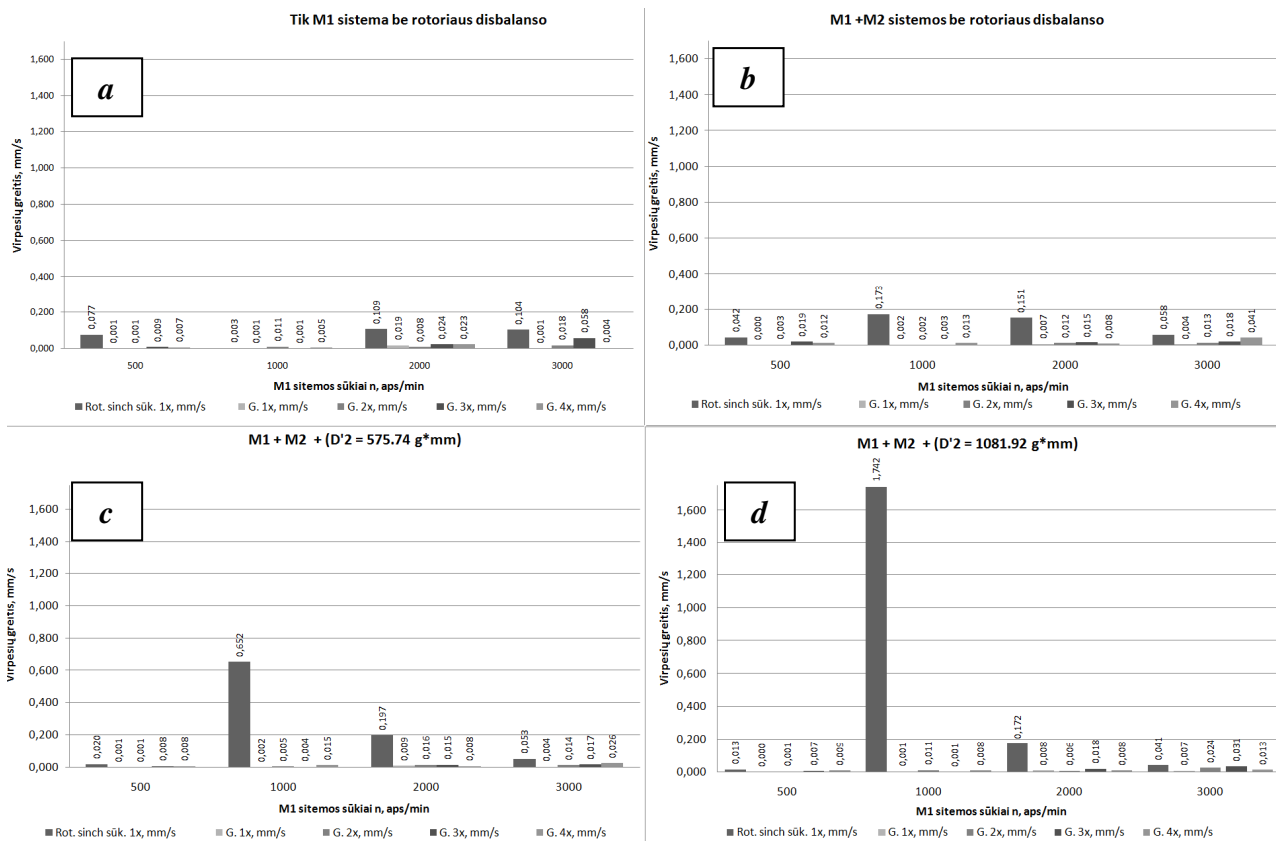
Paveiksle 3.12 pavaizduotas keturių stulpelinių diagramų palyginimas. Lyginama diagrama, kuomet veikia tik *MI* sistema be rotoriaus disbalanso (3.12 Pav., *a*), diagrama vienu metu veikiant abiem rotorinėm sistemom be rotorių disbalanso (3.12 Pav., *b*), diagrama veikiant tik *MI* sistemai su padidintu rotoriaus disbalansu (3.12 Pav., *c*) ir diagrama veikiant abiem rotorinėm sistemom su *MI* padidintu rotoriaus disbalansu (3.12 Pav., *d*). Diagramose, x ašyje, žymimi *MI* sistemos sūkliai. Ties kiekvienais sūkliai pavaizduota po penkis stulpelius, atitinkamai žyminčius *MI* rotoriaus sinchroninių sūklių $1x$, $2x$, $3x$ ir $4x$ harmonikų virpesius, defekto $1x$, $2x$, $3x$ ir $4x$ harmonikų virpesius.



3.12 Pav. Guolio defekto virpesių palyginimas, keičiant *M1* sistemos rotoriaus disbalansą

Lyginant diagramas *a* ir *b*, veikiant tik *M1* sistemai, bei vienu metu veikiant *M1* bei *M2* sistemoms, be rotorių disbalanso, pastebimas guolio defekto žadinamų virpesių greičių sumažėjimas, įjungus ant bendro pamato sumontuotą pagalbinę sistemą *M2*. Vadinasi, esant minėtoms sąlygoms, *M2* sistemos generuojami virpesiai, per bendrą pamatą slopina defekto virpesius. Iš 3.12 paveiksle pateiktų diagramų galima spręsti, jog papildomai apkrovus *M1* sistemos rotorių, tuo pačiu papildomai apkraunamas defektinis guolis. Dėl šios priežasties, išoriniame guolio riedėjimo takelyje esantis defektas generuoja stipresnius virpesius (3.12 Pav., *c*). Didžiausi guolio defekto virpesių greičiai šiuo atveju yra matomi vienu metu dirbant *M1* ir *M2* rotorinėm sistemom su *M1* rotoriaus disbalansu (3.12 Pav., *d*). Virpesių greičio padidėjimas stebimas *M1* sistemai veikiant skirtingais sūkliais, tačiau ryškiau defektas matomas, kuomet *M1* sistema dirba 2000 aps/min sūkliais. Vadinasi ant bendro pamato veikianti rotorinė sistema *M2*, generuoja virpesių signalus, perduodamus per pamatą tiriamai guoliavietei, kurie padidina defekto virpesių greičio reikšmes.

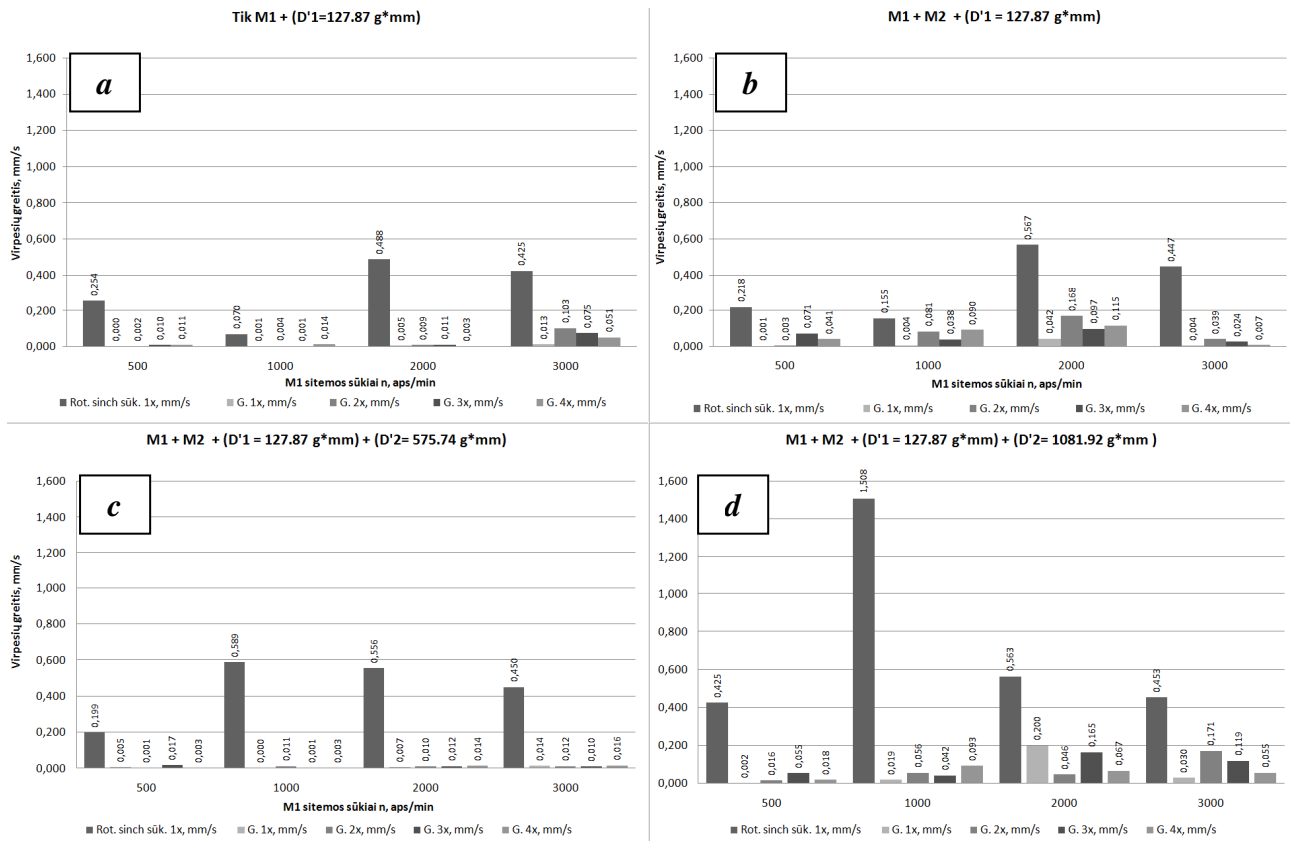
Guolio defekto virpesių diagramų palyginimas, keičiant *M2* sistemos rotoriaus disbalansą pateiktas 3.13 paveiksle.



3.13 Pav. Guolio defekto virpesių palyginimas, keičiant $M2$ sistemos rotoriaus disbalansą: *a* - veikia tik $M1$ sistema be rot. disbalanso; *b* – Veikia $M1$ ir $M2$ sistemos be rot. disbalanso; *c* – Veikia $M1$ ir $M2$ sistemos su vidutiniu $M2$ rotoriaus disbalansu; *d* - veikia $M1$ ir $M2$ sistemos su maksimaliu $M2$ rotoriaus disbalansu;

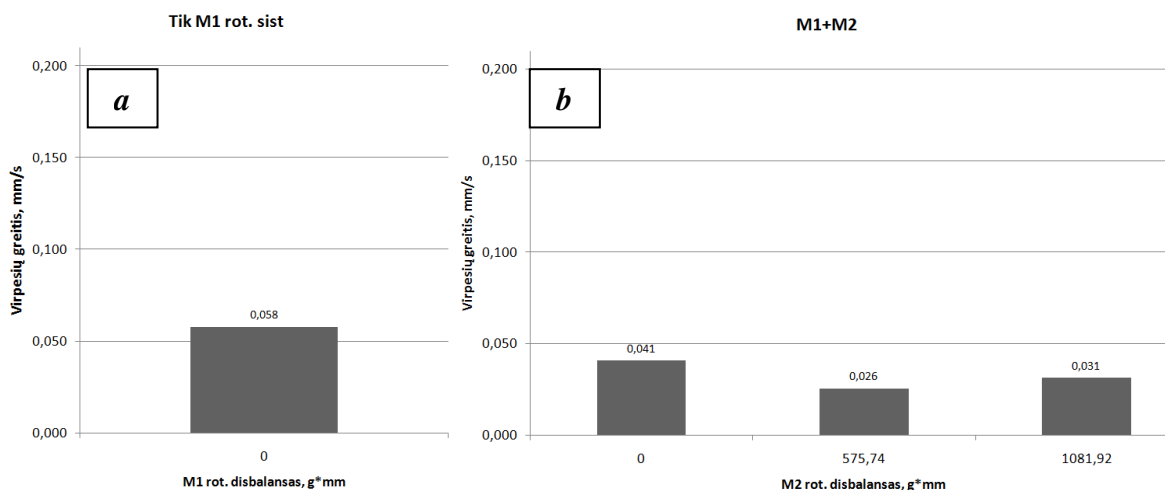
Pirmiausiai, lyginant diagramas, matomas ryškus variklio sinchroninių sūkių dažnio $1x$ harmonikos, virpesių greičio šuolis (3.13 Pav., *d*). Šio šuolio paaiškinimas galėtų būti tai, jog virpesių lygio matavimo metu, pasireiškia „mušimo“ efektas (prie 1000 aps/min), kadangi abiejų rotorinių sistemų dažniai beveik vienodi. Dėl šios priežasties ir padidėja $M1$ rotoriaus sukimosi dažnio virpesiai.

Lyginant 3.13 paveiksle pateiktas diagramas, rotorinėms sistemoms dirbant skirtingais režimais, sunku įvertinti kiek pasunkėja ar palengvėja guolio defekto identifikavimas, kadangi defekto virpesių greičio reikšmės yra palyginti mažos. Šios reikšmės nežymiai padidėja arba sumažėja keičiantis tiriamosios sistemos sūkiams, bei keičiant $M2$ sistemos rotoriaus apkrovas. Šiuo atveju defekto virpesių greičių vertės netgi didesnės 3.13 paveikslo *a* ir *b* diagramose, kuomet nenaudojamos sistemų rotorių apkrovos. Pridėjus $M2$ sistemos vidutinį ir maksimalų disbalansą (3.13 Pav., *c* ir *d*) defekto virpesių greičiai tampa mažesni nei *a* ir *b* diagramose. Vadinasi apkrovus $M2$ sistemos rotorių, ši sistema generuoja aukštesnius virpesių signalus, perduodamus per pamatą tiriamajai guoliavietei, taip slopindama šios guoliavietės virpesių signalus, atitinkamai defekto, bei rotoriaus sukimosi dažnio virpesius.



kuomet tiriamoji *M1* rotorinė sistema dirba 3000 aps/min sūkais, kadangi esant šioms sąlygoms geriausiai matosi minėta įtaka. Diagramose pateikiamas defekto virpesių greičio kitimas priklausomai nuo *M1* ir *M2* rotorinių sistemų rotorių pridėto disbalanso.

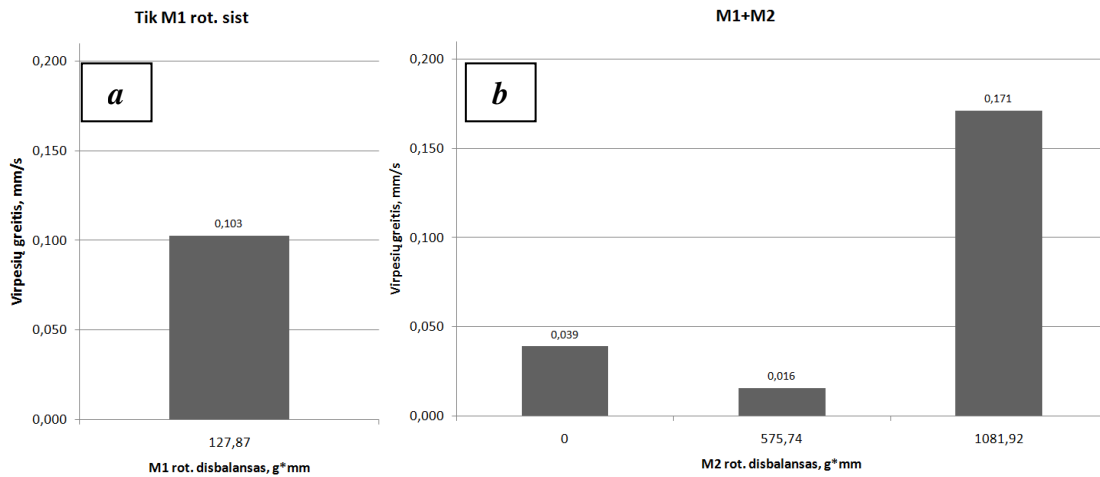
Lyginant *a* ir *b* diagramas, pateiktas 3.15 paveiksle, matome, jog guolio defekto virpesių greičių reikšmės mažėja, didinant pašalinės *M2* rotorinės sistemos rotoriaus apkrovą. Tai reiškia, kad *M2* sistemos generuojami virpesiai perduodami per bendrą pamatą *M1* rotorinės sistemos tiriamai guoliavietei, slopina guolio defekto žadinamus virpesius.



3.15 Pav. Guolio defekto, išoriniame riedėjimo takelyje virpesių greičio kitimas ties 3000 aps/min, kuomet *M1* sistemos rot. be disbalanso:

a – dirba tik *M1* sistema be rotoriaus disbalanso; *b* – dirba *M1* ir *M2* rotorinės sistemos, keičiant *M2* rotoriaus disbalansą;

Pridėtas *M1* rotorinės sistemos rotoriaus disbalansas (3.16 Pav., *a*), iššaukia aukštesnio lygio guolio defekto virpesius tiriamoje guoliavietėje, nei 3.15 paveiksle pateiktoje diagramoje *a*. Įjungus pagalbinę *M2* rotorinę sistemą (3.17 Pav., *b*), taip pat matomas defekto virpesio greičio reikšmių padidėjimas, tačiau tik esant 0 g*mm ir 575,74 g*mm *M2* sistemos rotoriaus disbalansui. Esant maksimaliam minėto rotoriaus pridėtiniam disbalansui, vyksta defekto virpesių lygio šuolis į didžiąją pusę. Šio virpesių šuolio priežastys nėra žinomos, joms nustatyti reikėtų tolesnių tyrimų.



3.16 Pav. Guolio defekto, išoriniame riedėjimo takelyje virpesių greičio kitimas prie 3000 aps/min, priklausomai nuo rotorinių sistemų rotorių disbalanso:

a – dirba tik *M1* sistema su rotoriaus disbalansu; *b* – dirba *M1* ir *M2* rotorinės sistemos, su abiejų sistemų rotorių disbalansu;

Taigi apibendrinant tiriamos guoliavietės virpesių spektrų analizę, matome, jog ant bendro pamato vienu metu dirbant tiriamajai *M1* ir pagalbinei virpesius žadinančiai *M2* sistemoms, stebimas 47% guolio defekto virpesių greičio reikšmių sumažėjimas FFT spektruose, lyginant, kuomet dirba vien tik tiriamoji rotorinė sistema. Kuo labiau apkraunamas pagalbinės *M2* sistemos rotorius, tuo minėta tendencija labiau išryškėja.

IŠVADOS

1. Atliekant mokslinių straipsnių apžvalgą pastebėta, jog daugeliu atvejų, diagnozuojant rotorinių mašinų defektus, jų generuojamų virpesių identifikavimas tampa sudėtingas, kuomet į analizuojamų virpesių signalą patenka kitų mašinos elementų virpesiai, „mušimo efektas“, bei pašalinių fono virpesių signalai. Šie virpesių signalai užgožia virpesius to mašinos elemento, kurio techninę būklę norima įvertinti. Ne vienas mokslininkas pabrėžia šios problemos aktualumą savo moksliniuose straipsniuose. Mokslininkai atlieka tyrimus susijusius su šia problematika, ieškoma būdų eliminuoti foninius virpesių signalus ir išskirti nagrinėjamo mašinos elemento virpesių signalą pradiniam virpesių signalo spektre.

2. Pateiktoje eksperimentų atlikimo metodikoje aprašytas tyrimų standas, parinkta virpesių matavimo, bei programinė įranga. Taip pat, vadovaujantis tarptautiniu standartu ISO 10816, parinkti netiesioginių virpesių matavimų taškai ant tyrimo objekto. Sudarytas tyrimo objekto virpesių matavimo etapų eiliškumas.

3. Atlikus tyrimo objekto virpesių lygio matavimus, matavimų duomenys išsaugoti virpesių lygių analizatoriuje, po to perkėlus į stacionarų kompiuterį, apdoroti programine įranga „NVGate“. Apdorojant virpesių signalus, programinės įrangos pagalba sudaromi absoliučiujų virpesių greičių kvadratinių vidurkių V_{RMS} , kitimo laike grafikai, bei virpesių greičių FFT spektrai. Sudarytos vidutinių virpesių greičių kvadratinių vidurkių V_{RMS} verčių ir virpesių greičių FFT spektrų atitinkamų dažnių harmonikų verčių lentelės.

4. Nustatyta, jog didžiausi virpesių V_{RMS} matomi virpesių matavimo x ašies kryptimi. Lyginant V_{RMS} priklausomybes nuo tiriamosios rotorinės sistemos sūkių, grafikus, pastebėtas vidutiniškai 40 % virpesių lygio padidėjimas įjungus ant bendro pamato su tiriamąja sumontuotą pagalbinę rotorinę sistemą. Padidinus $M2$ rotoriaus disbalansą, kuomet vienu metu dirba $M1$ ir $M2$ rotorinės sistemos, 2-os guoliavietės V_{RMS} vertės padidėja vidutiniškai 47 %. Pridėjus $M1$ ir $M2$ rotorinių sistemų maksimalius rotorių disbalansus, stebimas 50 % virpesių lygių padidėjimas, lyginant kuomet abi sistemos veikia be rotorių disbalanso.

Nuspręsta, jog pagal bendrą tiriamos guoliavietės absoliučiujų virpesių V_{RMS} lygį, sunku įvertinti ir nustatyti, ar rotorinės sistemos guoliai geri, ar su defektu, kadangi tai yra bendrieji, netiesioginiu būdu išmatuoti, 2-os guoliavietės virpesiai.

5. Išanalizavus eksperimentinių tyrimų rezultatus, pastebėta, jog ant bendro pamato vienu metu dirbant tiriamajai $M1$ ir pagalbinei virpesius žadinančiai $M2$ sistemoms, stebimas 47% guolio defekto virpesių greičio reikšmių sumažėjimas FFT spektruose, lyginant, kuomet dirba vien tik tiriamoji rotorinė sistema. Kuo labiau apkraunamas pagalbinės $M2$ sistemos rotorius, tuo minėta

tendencija labiau išryškėja. Vadinasi esant minėtoms sąlygoms guolio defekto identifikavimas FFT spektruose yra apsunkinamas.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Augustaitis V. K. 2000. Mechaninių virpesių pagrindai. Vilnius: „Žiburio“ leidykla. 319 p.
2. Barzdaitis V., Činikas G. 1998. Rotorinių mašinų monitoringas ir diagnostika. Kaunas: Technologija. 364 p.
3. Becker E. 2013. Beating in a pump station. Focus: centrifugal pumps No. 10, 2 p. 1 – 2.
4. Chen B., Zhang Z., Zi Y., He Z., Sun C. 2013. Detecting of transient vibration signatures using an improved fast spatial – spectral ensemble kurtosis kurtogram and its applications to mechanical signature analysis of short duration data from rotating machinery. Mechanical systems and signal processing No. 40, 37 p. 1 – 37.
5. Chen J., Zuo M., Zi Y., He Z. 2013. Construction of customized redundant multiwavelet via increasing multiplicity for fault detection of rotating machinery Mechanical systems and signal processing No. 42, 19 p. 206 – 224.
6. Dybala J., Zimroz R. 2013. Rolling bearing diagnosing method based on empirical mode decomposition of machine vibration signal. Applied acoustics No. 77, 9 p. 195 – 203.
7. Dong G., Chen J., Zhao F. 2014. A frequency-shifted bispectrum for rolling element bearing diagnosis. Journal of Sound and Vibration No. 339, 23 p. 396–418.
8. Edwards S., Lees A. W., Friswell M. I. 1998. Fault diagnosis of rotating machinery. The shock and vibration digest, No. 1, 9 p. 4 – 13.
9. Guo W., Tse P. W., Djordjevich A. 2010. Faulty bearing signal recovery from large noise using a hybrid method based on spectral kurtosis and ensemble empirical mode decomposition. Measurement No. 45, 15 p. 1308–1322.
10. He Q., Wang J., Liu Y., Dai D., Kong F. 2012. Multiscale noise tuning of stochastic resonance for enhanced fault diagnosis in rotating machines. Mechanical systems and signal processing No. 28, 15 p. 443 – 457.
11. Yang H., Mathew J., Ma L. 2002. Intelligent diagnosis of rotating machinery faults. 3rd Asia- Pacific conference on systems integrity and maintenance. Cairns, Australia. 8 p.
12. Mayoof F. N. 2009. Beating phenomenon of multi – harmonics defect frequencies in a rolling element bearing: case study from water pumping station. World academy of science, engineering and technology No. 33, 5 p. 327 – 331.
13. Phuttipongsit A. 2007. Beat frequencies. Orbit Vol. 27, No. 1, 3 p. 62 – 64.
14. Saruhan H., Saridemir S., Çiçek A., Uygur I. 2014. Vibration Analysis of Rolling Element Bearings Defects. Journal of Applied Research and Technology Vol. 12, 12 p. 384 – 395.
15. Tadžijėvas A., Barzdaitis V., Vasylius M., Mažeika P. 2013. The comparison of diagnostic features between the vertical and horizontal axis rotors. Journal of Vibroengineering Vol 15.

16. Tse P. W., Gontarz S., Wang X. J. 2007. Enhanced eigen vector algorithm for recovering multiple sources of vibration signals in machine fault diagnosis. *Mechanical systems and signal processing* No. 21, 20 p. 2794 – 2813.
17. Vaičiulis D. 2010. *Mašinų elementų kursinis projektavimas: mokomoji knyga : mechanikos ir transporto priemonių inžinerijos pagrindinių studijų programų studentams*. Kaunas: Technologija.
18. Bearing vibration frequency. 2015. Bearing technical calculation tool. [Interaktyvus], [žiūrėta 2015 04 01], prieiga per internetą: http://www.ntn.co.jp/tool/calc/index.php?lang=en_US.
19. OROS, 2014. [Interaktyvus], [žiūrėta 2015 04 06], prieiga per internetą: <http://www.oros.com/3974-mobi-pack-4-to-16-channels-reinforced.htm>
20. Rotating machinery diagnostic and vibration analysis, 2013. [Interaktyvus], [žiūrėta 2013 12 16], prieiga per internetą: <http://www.dataphysics.com/applications/rotating-machinery-diagnostics.html>

PRIEDAI

1 PRIEDAS

1 Lentelė. Virpesių greičių kvadratinų vidurkių, bei rotorių disbalanso reikšmės, kiekvienu iš atliktų matavimų metu

	Matavimas	1 rotorinės sistemos sukimosi greitis, aps./min	2 rotorinės sistemos sukimosi greitis, aps./min	Virpesių greičių matavimo taškuose vidurkiai, mm/s						Disbalanso mase, g		Disbalansas, g·mm	
				P1X	P1Y	P2X	P2Y	P3Y	P4Y	m ₁	m ₂	D` ₁	D` ₂
Guolis be defektų	1	499	0	0,055	0,037	0,076	0,041	0,042	0,041	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	999	0	0,127	0,061	0,176	0,068	0,081	0,080	0,00	0,00	0,00	0,00
	3	2000	0	0,326	0,256	0,469	0,273	0,246	0,198	0,00	0,00	0,00	0,00
	4	2964	0	1,027	0,559	1,165	0,715	0,686	0,673	0,00	0,00	0,00	0,00
	5	499	0	0,074	0,042	0,127	0,045	0,044	0,045	3,03	0,00	127,87	0,00
	6	999	0	0,153	0,220	0,220	0,262	0,239	0,237	3,03	0,00	127,87	0,00
	7	2000	0	0,467	0,499	0,846	0,629	0,412	0,378	3,03	0,00	127,87	0,00
	8	2964	0	1,584	2,183	1,868	3,352	2,560	2,569	3,03	0,00	127,87	0,00
	9	0	996	0,361	0,304	0,484	0,271	0,719	0,527	0,00	0,00	0,00	0,00
	10	0	996	0,461	0,702	0,559	0,707	1,027	0,956	0,00	11,92	0,00	575,74
	11	0	997	0,764	1,561	0,855	1,614	1,930	2,026	0,00	22,40	0,00	1081,92
	12	500	997	0,741	1,452	0,866	1,501	1,792	1,901	3,03	22,40	127,87	1081,92
	13	1000	997	0,738	1,450	0,865	1,495	1,792	1,895	3,03	22,40	127,87	1081,92
	14	2001	997	0,829	1,495	1,158	1,634	1,817	1,912	3,03	22,40	127,87	1081,92
	15	2965	997	1,766	2,642	1,992	3,599	3,109	3,154	3,03	22,40	127,87	1081,92
	16	500	998	0,456	0,685	0,606	0,704	0,972	0,897	3,03	11,92	127,87	575,74
	17	1006	997	0,463	0,684	0,618	0,700	0,971	0,891	3,03	11,92	127,87	575,74
	18	2001	997	0,573	0,806	0,937	0,909	0,995	0,942	3,03	11,92	127,87	575,74
	19	2965	997	1,542	2,342	1,847	3,408	2,740	2,703	3,03	11,92	127,87	575,74
	20	501	997	0,370	0,345	0,521	0,360	0,692	0,490	3,03	0,00	127,87	0,00
	21	1007	997	0,385	0,414	0,561	0,431	0,727	0,533	3,03	0,00	127,87	0,00

	Matavimas	1 rotorinės sistemos sukimosi greitis, aps./min	2 rotorinės sistemos sukimosi greitis, aps./min	Virpesių greičių matavimo taškuose vidurkiai, mm/s						Disbalanso mase, g		Disbalansas, g·mm	
				P1X	P1Y	P2X	P2Y	P3Y	P4Y	m ₁	m ₂	D` ₁	D` ₂
	22	2002	997	0,562	0,612	0,989	0,773	0,750	0,570	3,03	0,00	127,87	0,00
	23	2965	997	1,460	2,290	1,865	3,347	2,662	2,609	3,03	0,00	127,87	0,00
	24	500	998	0,342	0,343	0,536	0,363	0,688	0,479	0,00	0,00	0,00	0,00
	24	1007	998	0,361	0,354	0,566	0,367	0,684	0,475	0,00	0,00	0,00	0,00
	26	2002	997	0,692	0,546	0,877	0,504	0,750	0,563	0,00	0,00	0,00	0,00
	27	2965	997	1,457	0,843	1,157	0,850	1,028	0,835	0,00	0,00	0,00	0,00
	28	501	997	0,458	0,717	0,606	0,739	1,024	0,939	0,00	11,92	0,00	575,74
	29	1006	997	0,458	0,713	0,634	0,733	1,012	0,925	0,00	11,92	0,00	575,74
	30	2002	997	0,713	0,811	0,898	0,786	1,040	0,953	0,00	11,92	0,00	575,74
	31	2965	997	1,375	0,995	1,217	0,991	1,216	1,096	0,00	11,92	0,00	575,74
	32	500	998	0,802	1,529	0,925	1,592	1,908	2,012	0,00	22,40	0,00	1081,92
	33	1007	997	0,796	1,505	0,927	1,570	1,883	1,978	0,00	22,40	0,00	1081,92
	34	2002	998	0,980	1,564	1,137	1,599	1,898	1,991	0,00	22,40	0,00	1081,92
	35	2965	997	1,530	1,717	1,503	1,750	2,012	2,108	0,00	22,40	0,00	1081,92
Guolis su defektu	36	498	0	0,108	0,053	0,152	0,076	0,068	0,052	0,00	0,00	0,00	0,00
	37	1002	0	0,227	0,097	0,228	0,131	0,135	0,109	0,00	0,00	0,00	0,00
	38	1997	0	0,328	0,222	0,415	0,257	0,222	0,191	0,00	0,00	0,00	0,00
	39	2963	0	0,734	0,289	0,537	0,410	0,363	0,368	0,00	0,00	0,00	0,00
	40	500	0	0,110	0,057	0,174	0,071	0,061	0,054	3,03	0,00	127,87	0,00
	41	1004	0	0,170	0,144	0,206	0,202	0,174	0,177	3,03	0,00	127,87	0,00
	42	2000	0	0,465	0,247	0,766	0,446	0,272	0,250	3,03	0,00	127,87	0,00
	43	2962	0	1,584	1,953	1,718	3,164	2,526	2,601	3,03	0,00	127,87	0,00
	44	500	996	0,950	1,418	1,052	1,488	1,759	1,925	3,03	22,40	127,87	1081,92

Matavimas	1 rotorinės sistemos sukimosi greitis, aps./min	2 rotorinės sistemos sukimosi greitis, aps./min	Virpesių greičių matavimo taškuose vidurkiai, mm/s						Disbalanso mase, g		Disbalansas, g·mm	
			P1X	P1Y	P2X	P2Y	P3Y	P4Y	m ₁	m ₂	D` ₁	D` ₂
45	1006	995	0,967	1,431	1,079	1,504	1,774	1,939	3,03	22,40	127,87	1081,92
46	2000	996	1,162	1,465	1,411	1,609	1,801	1,969	3,03	22,40	127,87	1081,92
47	2960	996	1,837	2,521	2,199	3,686	3,219	3,364	3,03	22,40	127,87	1081,92
48	500	996	0,548	0,674	0,621	0,650	0,871	0,877	3,03	11,92	127,87	575,74
49	1005	996	0,563	0,687	0,634	0,660	0,878	0,878	3,03	11,92	127,87	575,74
50	2000	997	0,737	0,689	0,946	0,748	0,900	0,920	3,03	11,92	127,87	575,74
51	2961	997	1,753	2,184	1,767	3,470	2,850	2,949	3,03	11,92	127,87	575,74
52	500	997	0,488	0,385	0,582	0,310	0,569	0,488	3,03	0,00	127,87	0,00
53	1005	997	0,532	0,411	0,649	0,363	0,585	0,521	3,03	0,00	127,87	0,00
54	2000	997	0,744	0,487	1,049	0,641	0,660	0,569	3,03	0,00	127,87	0,00
55	2961	997	1,684	2,074	1,791	3,295	2,671	2,724	3,03	0,00	127,87	0,00
56	500	997	0,433	0,384	0,578	0,282	0,561	0,486	0,00	0,00	0,00	0,00
57	1005	997	0,476	0,421	0,603	0,292	0,569	0,493	0,00	0,00	0,00	0,00
58	2000	997	0,638	0,463	0,679	0,335	0,609	0,517	0,00	0,00	0,00	0,00
59	2962	997	1,074	0,695	0,893	0,578	0,808	0,690	0,00	0,00	0,00	0,00
60	499	997	0,617	0,732	0,718	0,699	0,921	0,975	0,00	11,92	0,00	575,74
61	1005	997	0,631	0,733	0,749	0,694	0,910	0,960	0,00	11,92	0,00	575,74
62	2000	997	0,712	0,760	0,794	0,711	0,935	0,979	0,00	11,92	0,00	575,74
63	2961	997	1,170	0,885	1,011	0,787	1,068	1,079	0,00	11,92	0,00	575,74
64	500	997	1,065	1,505	1,247	1,599	1,903	2,099	0,00	22,40	0,00	1081,92
65	1005	997	1,084	1,503	1,252	1,585	1,892	2,089	0,00	22,40	0,00	1081,92
66	2000	997	1,115	1,511	1,291	1,569	1,893	2,093	0,00	22,40	0,00	1081,92
67	2961	997	1,298	1,619	1,400	1,657	1,951	2,138	0,00	22,40	0,00	1081,92

2 PRIEDAS

1 lentelė. M1 sistemos rotoriaus sinchroninio sukimosi dažnio, bei guolio išorinio riedėjimo takelio dažnio virpesių greičiai, harmonikose, bei DVR reikšmės skirtingų virpesių matavimo etapų metu

Matavimo eilės Nr.	M1 sūkiai, aps/min	Harmonika					DVR
		Rot. sinch sūk. 1x, mm/s	G. 1x, mm/s	G. 2x, mm/s	G. 3x, mm/s	G. 4x, mm/s	
36	500	0,077	0,001	0,001	0,009	0,007	0,12
37	1002	0,003	0,001	0,011	0,001	0,005	3,38
38	1997	0,109	0,019	0,008	0,024	0,023	0,22
39	2963	0,104	0,001	0,018	0,058	0,004	0,56
40	500	0,254	0,000	0,002	0,010	0,011	0,04
41	1004	0,070	0,001	0,004	0,001	0,014	0,20
42	2000	0,488	0,005	0,009	0,011	0,003	0,02
43	2962	0,425	0,013	0,103	0,075	0,051	0,24
44	500	0,425	0,002	0,016	0,055	0,018	0,13
45	1006	1,508	0,019	0,056	0,042	0,093	0,06
46	2000	0,563	0,200	0,046	0,165	0,067	0,35
47	2960	0,453	0,030	0,171	0,119	0,055	0,38
48	500	0,199	0,005	0,001	0,017	0,003	0,09
49	1005	0,589	0,000	0,011	0,001	0,003	0,02
50	2000	0,556	0,007	0,010	0,012	0,014	0,02
51	2961	0,450	0,014	0,012	0,010	0,016	0,03
52	500	0,218	0,001	0,003	0,071	0,041	0,33
53	1005	0,155	0,004	0,081	0,038	0,090	0,58
54	2000	0,567	0,042	0,168	0,097	0,115	0,30
55	2961	0,447	0,004	0,039	0,024	0,007	0,09
56	500	0,042	0,000	0,003	0,019	0,012	0,46
57	1005	0,173	0,002	0,002	0,003	0,013	0,07
58	2000	0,151	0,007	0,012	0,015	0,008	0,10
59	2962	0,058	0,004	0,013	0,018	0,041	0,70
60	499	0,020	0,001	0,001	0,008	0,008	0,43
61	1005	0,652	0,002	0,005	0,004	0,015	0,02
62	2000	0,197	0,009	0,016	0,015	0,008	0,08
63	2961	0,053	0,004	0,014	0,017	0,026	0,48
64	500	0,013	0,000	0,001	0,007	0,009	0,67
65	1005	1,742	0,001	0,011	0,001	0,008	0,01
66	2000	0,172	0,008	0,006	0,018	0,008	0,11
67	2961	0,041	0,007	0,024	0,031	0,013	0,76