

KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS

JŪRŲ TECHNIKOS FAKULTETAS

MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

Vilius Bazaras

**LĖTAEIGIŲ RIEDĖJIMO GUOLIŲ
DIAGNOSTINIAI TYRIMAI**

Technologijų valdymo studijų programos
magistro baigiamasis darbas

KLAIPĖDA, 2012

TURINYS

SANTRAUKA	3
ĮVADAS	4
I. LITERATŪROS APŽVALGA	6
1.1. Guolių diagnostikos problematika	17
1.2. Riedėjimo guolių defektų diagnostikos metodų apžvalga	18
1. 2. 1. Smūginių impulsų metodas	18
1. 2. 2. Virpesių signalo funkcijos pagal laiką metodas (ACMT)	20
1. 2. 3. Akustinės emisijos metodas	21
1. 2. 4. Pagreičių gaubiančiosios metodas	21
1. 2. 5. Lėtaveiksmių rotorių su riedėjimo guoliais virpesių tyrimo RSMMD metodas	23
1.3. Virpesių matavimo ir analizavimo prietaisai	23
1.4. Virpesių keitiklių montavimas ant guolių atramų	26
II. TYRIMO OBJEKTAS	27
III. TYRIMO METODIKA	30
3.1. Virpesių matavimo būdo parinkimas	30
3.2. Matavimo prietaiso ir programinės įrangos parinkimas	31
3.3. Matavimo taškų ant tyrimo objekto parinkimas	33
3.4. Eksperimentinių tyrimų atlikimo periodiškumas	34
3.5. Virpesių parametrų vertinimo metodika	34
3.6. Virpesių šaltinių identifikavimo metodika	35
IV. VIRPESIŲ MATAVIMAI	38
V. EKSPERIMENTINIŲ MATAVIMŲ REZULTATAI	40
IŠVADOS	51
LITERATŪRA	53
PRIEDAI	55

SANTRAUKA

Autorius: *Vilius Bazaras*

Baigiamojo darbo pavadinimas: *Lėtaeigių riedėjimo guolių diagnostiniai tyrimai.*

ANOTACIJA

Baigiamajame darbe pateikta literatūros šaltinių apžvalga susijusi su riedėjimo guolių defektų diagnostika. Darbe sukurta lėtaeigių riedėjimo guolių (iki 380 aps/min) esančių „INVERFORM“ džiovyklinių mašinų grupėse tyrimų metodika bei atlikti eksperimentiniai tyrimai. Pagrindinis šių tyrimų tikslas – sukurti patikimą tyrimų metodą, skirtą eksploatuojamų lėtaeigių sferinių riedėjimo guolių defektams diagnozuoti ir techninei būklei įvertinti. Metodas buvo sukurtas išsamių guolių korpusų virpesių matavimų ir virpesių duomenų formatų analizės pagrindu, mašinos dirbant natūralios eksploatacijos sąlygomis. Gautos diagnostinių tyrimų išvados patvirtintos mašinos periodinio planinio metu vizualiai apžiūrėjus ir įvertinus guolių techninę būklę.

RAKTINIAI ŽODŽIAI: *diagnostika, diagnostikos metodai, riedėjimo guoliai, virpesiai, defektai*

ABSTRACT

Author: *Vilius Bazaras*

Title of final work: *Slow speed rolling bearings diagnostic researches.*

This paper represents a review of literature which is associated with a slow speed rolling bearings diagnostics. In this work the methodology for a slow speed rolling bearings (rotational speed up to 380 rpm) experimental researches is created. Slow speed with double row self-alignment spherical roller bearings is located in drying machines “INVERFORM”. Also experimental researches have been done and analyzed in this work. The main objective of this research - to establish a reliable research method to diagnose defects and evaluate technical condition of operating slow speed spherical rolling bearings. The method has been developed based on detailed bearings vibration measurements and vibration data formats analysis, when machine works at natural operating conditions. Obtained diagnostic research findings adopted during machines routine periodic visual examination and assessment of technical condition of the bearings.

KEYWORDS: *diagnostics, diagnostic's methods, antifriction bearings, vibration, defects.*

IVADAS

Diagnostikos mechanikoje esmė - numatyti ar nustatyti mechanizmo trūkumus ir gedimus. Diagnostikoje naudojamos įvairios priemonės priklausomai nuo to ką norima diagnozuoti. Kiekvienas defektas turi savitus požymius pagal kuriuos galima jį identifikuoti.

Kiekviena eksploatuojama mašina ar įrengimas skleidžia virpesių signalus sukeltus įvairių veiksnių: konstrukcijos netobulumo, rotorių nesubalansuotumo, trinties judančiuose grandyse, smūgių atsiradusių defektiniuose mazguose ir t.t. Dirbančių įrenginių virpesių signalai išmatuojami virpesių matavimo prietaisais, vėliau duomenys analizuojami ir tiriami atitinkamais metodais. Tokiu būdu nustatoma įrengimo ar mazgo techninė būklė.

Riedėjimo guolis yra vienas iš svarbiausių, plačiai naudojamų komponentų, įvairiuose mechanizmuose. Netikėti šio elemento gedimai gali sukelti didelius materialinius nuostolius, sustabdyti įrenginio darbą. Sulūžęs guolis dažnai išveda iš stabilios sukimosi ašies rotorių, tuomet gali prasidėti grandininė gedimų reakcija visame įrenginyje. Siekiant išvengti tokių avarių, labai svarbu nustatyti guolio defektus kuo ankstyvesnėje jų stadijoje. Būtent todėl guolių defektų diagnostikos metodai yra intensyviai tyrinėjami pastaraisiais metais.

Šiame moksliniame tiriamajame darbe sukurta lėtaeigių riedėjimo guolių, esančių „INVERFORM“ džiovyklų mašinose, virpesių eksperimentinių matavimų metodiką.

Darbe analizuojamos tyrimo objekto konstrukcijos bei techninių parametrų ypatybės siekiant numatyti eksperimentinio tyrimo eigą. Aprašomi prietaisai ir metodai, kuriais remiantis buvo renkama ir analizuojama informacija apie lėtaeigių guolių techninę būklę ir defektų identifikavimą. Numatomas eksperimentinių tyrimų periodiškumas, matavimo taškai bei numatomos matavimo aplinkybės.

Pagrindinis šių eksperimentinių tyrimų prietaisas - virpesių signalų analizatorius. Darbe aprašoma tyrimo objektų virpesių šaltinių identifikavimo metodika pagrįsta greitos Furje transformacijos FFT (GFT liet.) spektrų analizės principais. Taip pat pateikta virpesių parametrų vertinimo metodika.

Šiame moksliniame darbe atlikta eksperimentinių matavimų duomenų analizė. Eksperimentiniai tyrimai atlikti AB „Klaipėdos kartonas“. Darbe pateikti džiovyklinės mašinos (IV, V ir VI grupių) tinklą vedančių velenų guolių virpesių matavimų rezultatai mašinai dirbant natūralios eksploatacijos sąlygomis.

Eksperimentiniai matavimai atlikti 2011 m. liepos – rugsėjo mėn. Guolių techninė būklė ir defektai identifikuoti pagal išmatuotus virpesių greičių ir pagreičių reikšmes. Gauti eksperimentinių matavimų rezultatai palyginti su periodinio planinio remonto metu atlikta guolių vizualinės analizės

rezultatais. Šie tyrimai leido identifikuoti patikimą virpesių duomenų formatą, skirtą tirtų lėtaeigių guolių diagnostiniams tyrimams vykdyti ir netikėtų gedimų prevencijai realizuoti.

Mokslinio darbo tikslas: sukurti patikimą diagnostikos tyrimų metodiką pagal kurią būtų galima tiksliai įvertinti lėtaeigio riedėjimo guolio techninę būklę.

Mokslinio darbo uždaviniai:

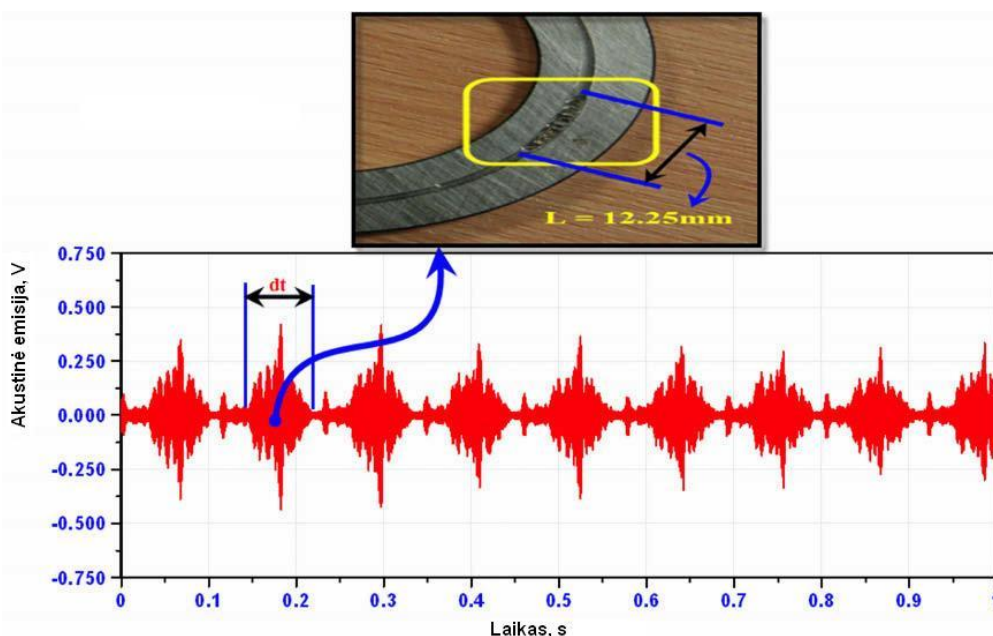
1. Atlikti lėtaeigių ir greitaeigių rotorių guolių diagnostikos mokslinių straipsnių apžvalgą:
 - a) Išanalizuoti mokslinius tyrimo darbus riedėjimo guolių defektų diagnostikos srityje.
 - b) Problemos formulavimas.
 - c) Apžvelgti virpesių matavimo priemones naudojamas rotorių riedėjimo guolių defektų diagnostikai.
2. Išanalizuoti tyrimo objektą ir identifikuoti jo eksploataavimo problemas;
3. Sukurti eksperimentinių matavimų metodiką:
 - a) parinkti eksperimentinių matavimų metodą;
 - b) parinkti matavimo prietaisus ir programinę įrangą;
 - c) parinkti matavimo taškus;
 - d) nustatyti eksperimentų periodiškumą;
 - e) parinkti virpesių parametrus ir duomenų formatus.
4. Atlikti džiovyklinės mašinos tinklą vedančių lėtaeigių velenų guolių virpesių matavimus pagal darbe pateiktą metodiką ir jų analizę (verifikuoti metodiką).

I. LITERATŪROS APŽVALGA

Pasaulyje atliekama daug mokslinių tyrimų ir eksperimentų riedėjimo guolių diagnostikos srityje. Mokslininkai iš įvairių šalių ir universitetų mėgina sukurti naujus ar patobulinti jau esančius guolių diagnostikos metodus.

Mokslininkai iš Cranfield universiteto (Didžioji Britanija), straipsnyje (M. Elforjani et al., 2009) aprašė eksperimentą kurio metu siekė išsiaiškinti ar akustinės emisijos (AE) metodas yra tinkamas nustatant lėtaeigio riedėjimo guolio defekto dydį. Akustinė emisija tai trumpalaikės, elastingos bangos sukeltos staigaus energijos pliūpsnio guolyje, ten kur yra mechaniniai pažeidimai. Tipinis šių bangų dažnis yra nuo 100 kHz iki 1MHz. Vienas iš AE metodo privalumų – galimybė aptikti guolio elementų vidinius pažeidimus prieš atsirandant dideliems pažeidimams. Eksperimentas atliktas pagreitinant guolio nusidėvėjimo laiką, t.y. padidinant jo apkrovą. Tokiu atveju nereikia daryti dirbtinų mechaninių pažeidimų, todėl buvo tikimasi gauti kokybiškesnius eksperimento rezultatus.

Straipsnyje aprašytas pirmasis bandymas nustatyti natūralių defektų dydį lėtaeigiame guolyje panaudojant AE metodą (1.1 pav.). Eksperimentas buvo atlikinėjamas 20 valandų. Virpesiai matuojami piezoelektriniais keitiklis pritvirtintais prie guoliavietės. Riedėjimo guolis buvo apkrautas 20 kN jėga, kol atsirado pirmieji defektai.



1.1 pav. Defekto ilgio nustatymas (M. Elforjani et al., 2009)

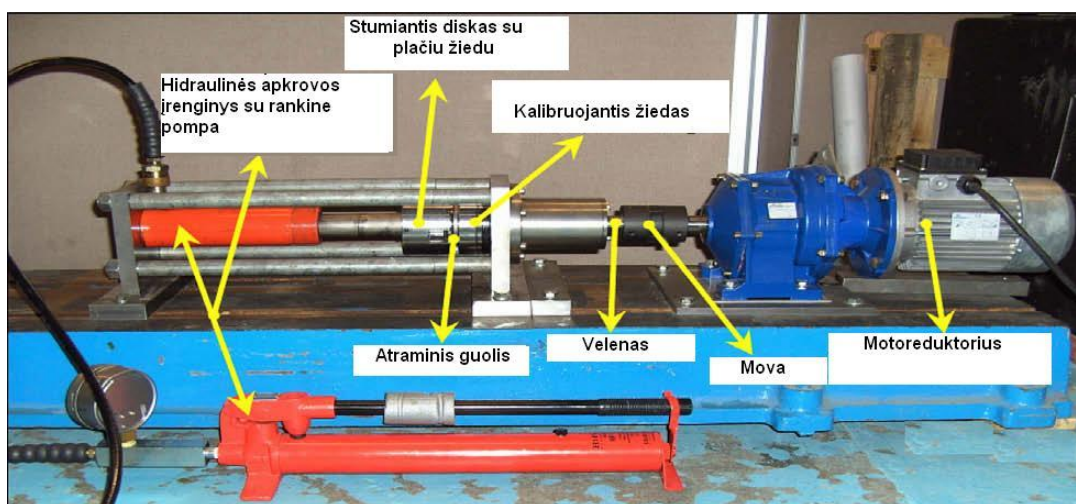
Išmatavus akustinės emisijos pliūpsnio trukmę randamas defekto ilgis (1.1 pav.).

Atlikę eksperimentą ir išanalizavę apdorotus duomenis straipsnio autoriai teigia, jog akustinės emisijos metodo pritaikymas, lėtaeigio guolio elementų deformacijų dydžio nustatymui, yra efektyvus. Taip pat nustatytas glaudus ryšys tarp akustinės emisijos energijos dydžio ir pradinių

defektų atsiradimo. Defektų nustatymas ankstyvojoje stadijoje gali būti naudojamas guolių gamintojų, kurie tikrintų gaminio medžiagos homogeniškumą.

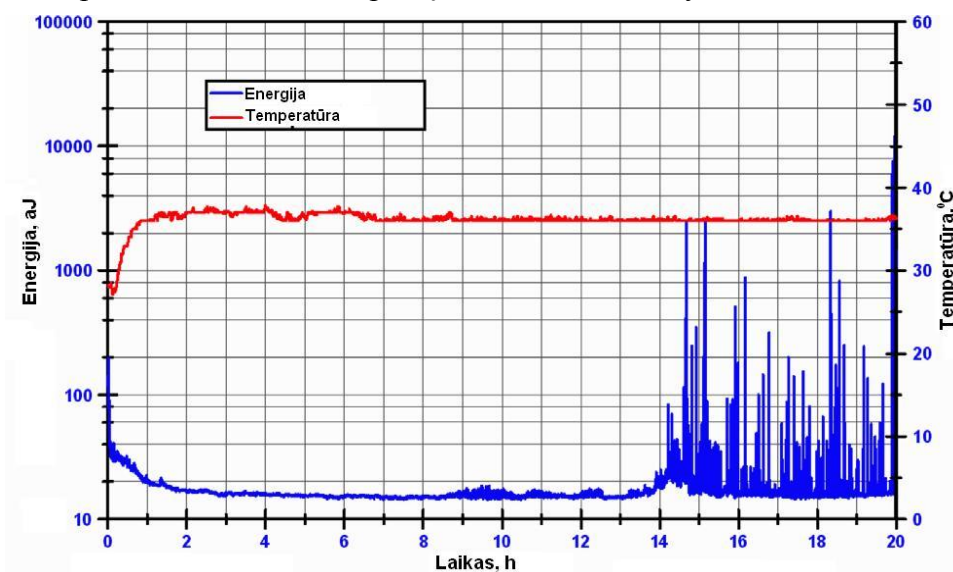
Tie patys mokslininkai atliko tyrimą (M. Elforjani et al., 2009), kurio metu nustatinėjo pagal kokius parametrus galima nustatyti lėtaeigio riedėjimo guolio techninę būklę, naudojant AE metodą.

Akustinės emisijos technologija nustatinėjant riedėjimo guolių techninę būklę yra pripažinta efektyvia. Šis tyrimas iliustruoja akustinio metodo duomenų naudingumą nustatinėjant ir randant riedėjimo guolio pažeidimus. Eksperimentui atlikti buvo sukonstruotas specialus stendas (1.2 pav.), kurio pagalba buvo pagreitintas natūralus guolio nusidėvėjimas. Atraminio, riedėjimo guolio išorinis žiedas buvo apkrautas 20kN jėga. Motoreduktoriaus veleno apsisukimai 70 sūk./min. Eksperimento metu buvo matuojama akustinė emisija bei temperatūra.



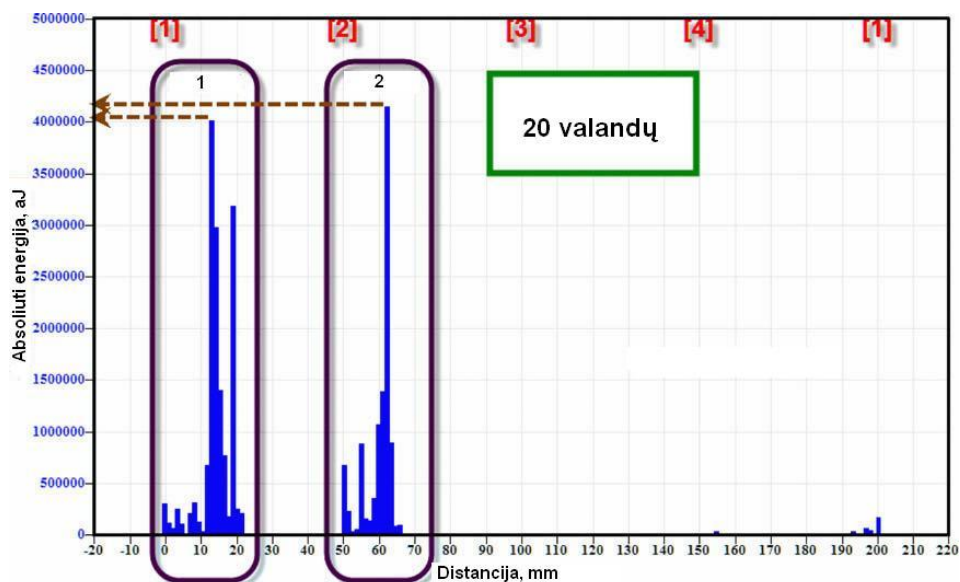
1.2 pav. Eksperimentinis stendas (M. Elforjani et al., 2009)

Eksperimento metu guolio apkrovimo procesas buvo tęsiamas iki matomų guolio pažeidimų. Tuomet apkrova pašalinta ir surinkti virpesių matavimo duomenys.



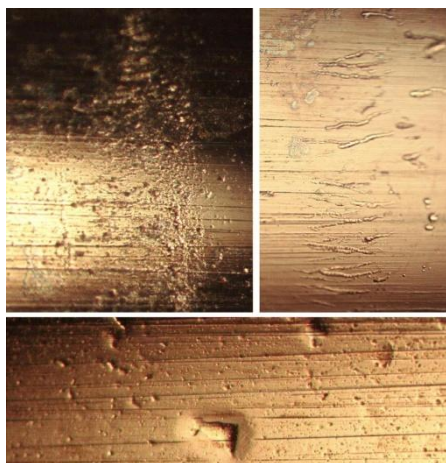
1.3 pav. AE energijos bei temperatūros išsiskyrimo grafikas (M. Elforjani et al., 2009)

Straipsnio autoriai teigia, kad akustinės emisijos energija yra patikimas, stiprus ir tikslus parametras nustatant pradinius lėtaeigių guolių pažeidimus. Tai pirmas žinomas bandymas rasti sąsają tarp akustinės emisijos ir natūralaus defekto atsiradimo vietos lėtaeigiuose guoliuose. Guolio defekto vieta ir akustinės emisijos sąsaja pateikta grafike (1.4 pav.). Taip pat nustatyta, jog atsiradus pirminiams defektams riedėjimo guolyje, temperatūrą praktiškai nekinta. Tai reiškia, jog temperatūra nėra patikimas rodiklis nustatant riedėjimo guolio pradinius defektus.



1.4 pav. Guolio defekto vietos ir akustinės energijos dydžio grafikas (M. Elforjani et al., 2009)

Gazi universiteto (Turkija), mechanikos inžinerijos departamento mokslininkai straipsnyje (T. Karacay et al., 2009) aprašė bandymą siekiant nustatyti ryšį tarp defekto dydžio ir virpesių amplitudės. Pagrindiniai virpesių parametrai, tokie kaip virpesių formos faktorius (angl. Kurtosis), virpesių amplitudės faktorius (angl. Crest factor), nurodo defektus esančius guolyje tačiau nesuteikia informacijos apie defekto vietą ir pobūdį. Kiekvienas defektas skleidžia sau būdingus virpesius, todėl analizuojant spektrą galima nustatyti defekto tipą.

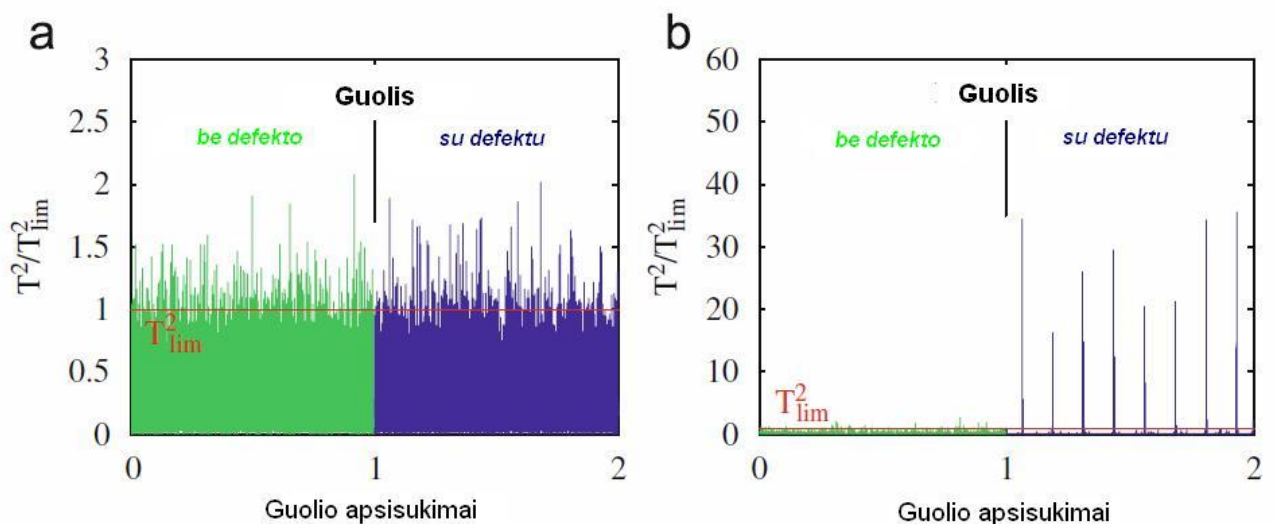


1.5 pav. Vidinio žiedo defektų nuotraukos (T. Karacay et al., 2009)

Šiame tyrime buvo surinkti ir išanalizuoti virpesių duomenys, atlikti statistinių dydžių skaičiavimai. Aptikus pokyčius skaičiavimuose, buvo įrašomas virpesių spektras, kuris vėliau analizuojamas norint nustatyti defekto vietą. Baigus eksperimentą guoliai buvo išardyti ir mikroskopu OLYMPUS GX71F padarytos defektų nuotraukos (1.5 pav.).

T. Karacay ir N. Akturk nustatė, kad padidėjus defektui virpesių spektras padidėja ir paaštrėja. Taip pat nustatyta, jog neįmanoma rasti tiesioginio ryšio tarp defekto dydžio ir virpesių amplitudės, nes virpesiai kiekvienoje sistemoje gali keistis. Tyrimai atskleidžia, jog pirmieji defektai guolio vidiniame žiede atsiranda kartu su nežymiais pažeidimais riedėjimo elementuose.

Mokslininkai iš Ljubljana universiteto (Slovėnija) moksliniame straipsnyje (M. Zvokelj et al., 2010) pasiūlė naują metodą, kuris leidžia efektyviai nustatyti lėtaeigio, stambiagabaričio guolio pažeidimus jų pradinėje stadijoje ir išvengti avarijos. Didelių gabaritų guolių avarijos pramonėje dažniausiai reiškia didelius materialinius nuostolius, kartais tai gali sukelti pavojų darbuotojų gyvybei. Siūlomas metodas, kuris jungia principinę komponentų analizę (PCA) ir bendrą empirinį įrimo tipo metodą (EEMD). Siūlomo metodo PCA-EEMD efektyvumas, stebint guolio būklę ir filtruojant virpesių signalus, buvo įvertintas atlikus bandymus specialiai tam sukonstruotame, eksperimentiniame modelyje. Tyrimo metu nustatyta, kad siūlomas metodas gali efektyviai nustatyti labai mažus guolio pažeidimus, kas patvirtina jog akustinės emisijos, pagreičių gaubiančiosios, virpesių formos faktoriaus ir virpesių amplitudės faktoriaus metodų pagalba gauti rezultatai suteikia itin svarbios informacijos apie guolio būklę. PCA leidžia surinkti naudingus duomenis apie sistemos būklę, o EEMD metodas suskaido signalus į įvairius laiko intervalus.

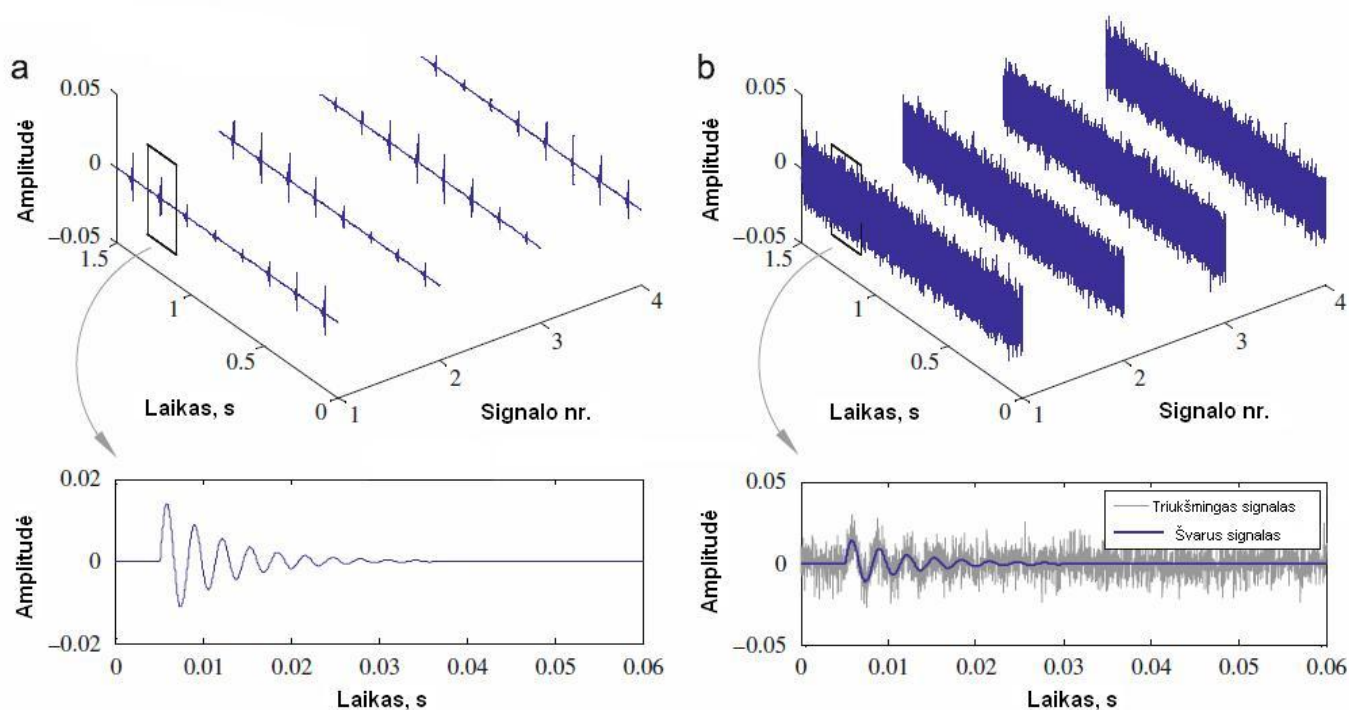


1.6 pav. Virpesių pagreičių spektrai (M. Zvokelj et al., 2010)

a – pradinis signalas; b – išfiltruotas signalas PCA-EEMD metodu.

Bandomajame modelyje buvo padarytas dirbtinis guolio išoriniame žiede defektas. Eksperimento metu gauto amplitudės pavaizduotos grafikuose 1.6 pav.

Straipsnio autoriai teigia, jog šis lėtaeigių riedėjimo guolių diagnostikos metodas PCA-EEMD yra efektyvus. Tyrimo metu nustatyta, kad šio metodo pagalba galima filtruoti virpesių signalus ir nustatyti lėtaeigių guolių defektus (1.6 – 1.7 pav.).



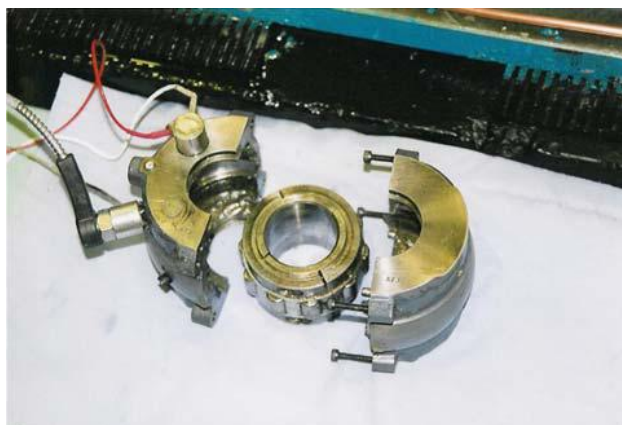
1.7 pav. Virpesių pagreičių spektrai (M. Zvokelj et al., 2010)

a – išfiltruotas signalas PCA-EEMD metodu; b – pradinis signalas.

Moksliniame straipsnyje (D. Mba, 2008) aprašytas atliktas tyrimas, kurio metu siekta išsiaiškinti akustinės emisijos (AE) pritaikomumą guolių defektų dydžiui nustatyti. Išorinio guolio žiedo ir riedėjimo elementų paviršių nelygumai sukelia akustinės emisijos reiškinį. Dėl aukšto akustinės emisijos bangų dažnio lengvai atskiriamas pašalinis mechaninis triukšmas, kurio dažnis mažesnis nei 20 kHz.

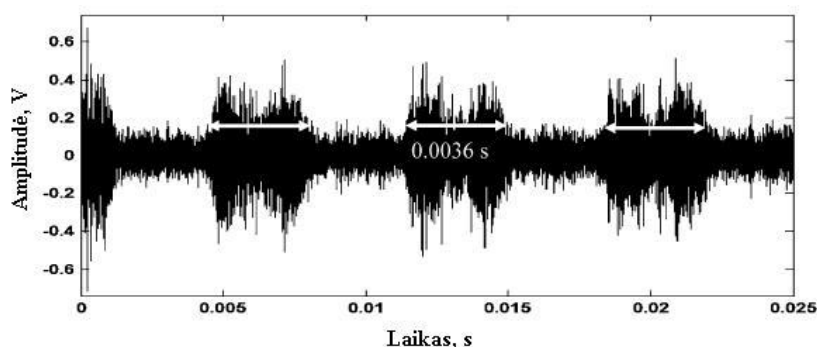
Buvo atlikta daug tyrimų siekiant pritaikyti akustinės emisijos metodą guolių defektų diagnostikai. D. Mba mėgino surasti sąsają tarp defekto dydžio guolyje ir AE aktyvumo.

Tyrimui atlikti buvo sukonstruotas specialus stendas (1.8 pav.) (su riedėjimo guoliu), kuriame skirtingose vietose, mechaniškai, buvo padaryti skirtingų dydžių defektai. Tyrimo tikslas - identifikuoti defekto dydį.



1.8 pav. Tyrimo stendas (D. Mba, 2008)

Atlikus tyrimą buvo rastas ryšys tarp akustinės emisijos bangų pliūpsnio trukmės ir defekto dydžio (1.9 pav.). Bangų pliūpsnio trukmė buvo tiesiogiai susieta su defekto ilgiu, o akustinės emisijos amplitudė su defekto pločiu.



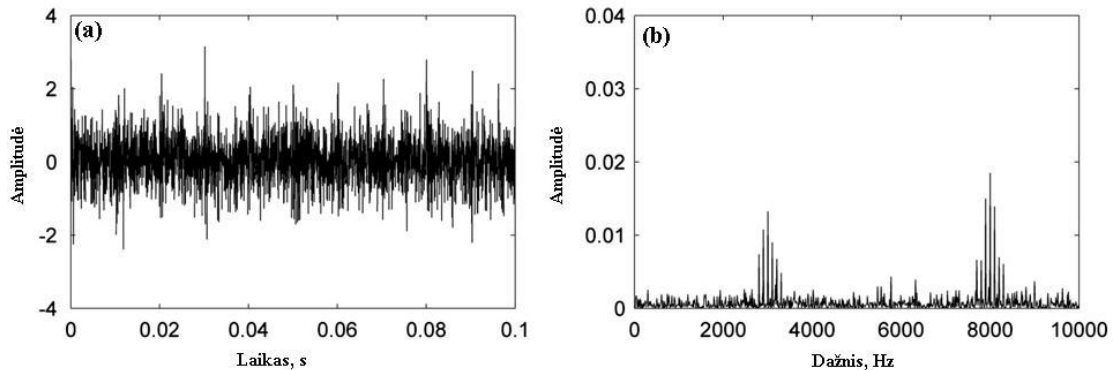
1.9 pav. Riedėjimo guolio su defektu virpesių signalas (D. Mba, 2008)

Moksliniame straipsnyje (F. Wang et al., 2010) aprašoma riedėjimo guolių defektų diagnostika panaudojant optimalų „Morlet“, virpesių sukeltų bangų filtrą. Šis virpesių filtras paremtas pagreičių gaubiančiosios tyrimo metodu. Taip pat pritaikytas autokoreliacijos padidinimas. Šis mišrus metodas atmeta dažnius susijusius su virpesių bangų interferencija, o autokoreliacijos padidinimo algoritmas išfiltruoja signalą palikdamas nedidelį bangų spektrą, pagal kurį nesunku spręsti apie guolio būklę (1.10 pav.).

Šio metodo pritaikymas susideda iš kelių etapų:

- Išmatuojamas riedėjimo guolio virpesių signalas;
- Pasirenkamas optimalus „Morlet“ filtras su atitinkamais parametrais;
- Gaunamas signalas išfiltruotas „Morlet“ filtru;
- Skaičiuojama autokoreliacijos funkcija gauta iš išfiltruoto signalo;
- Išgaunamas padidintos autokoreliacijos galingumo spektras panaudojant „Shannon“ funkciją
- Guolio būklės diagnozavimas.

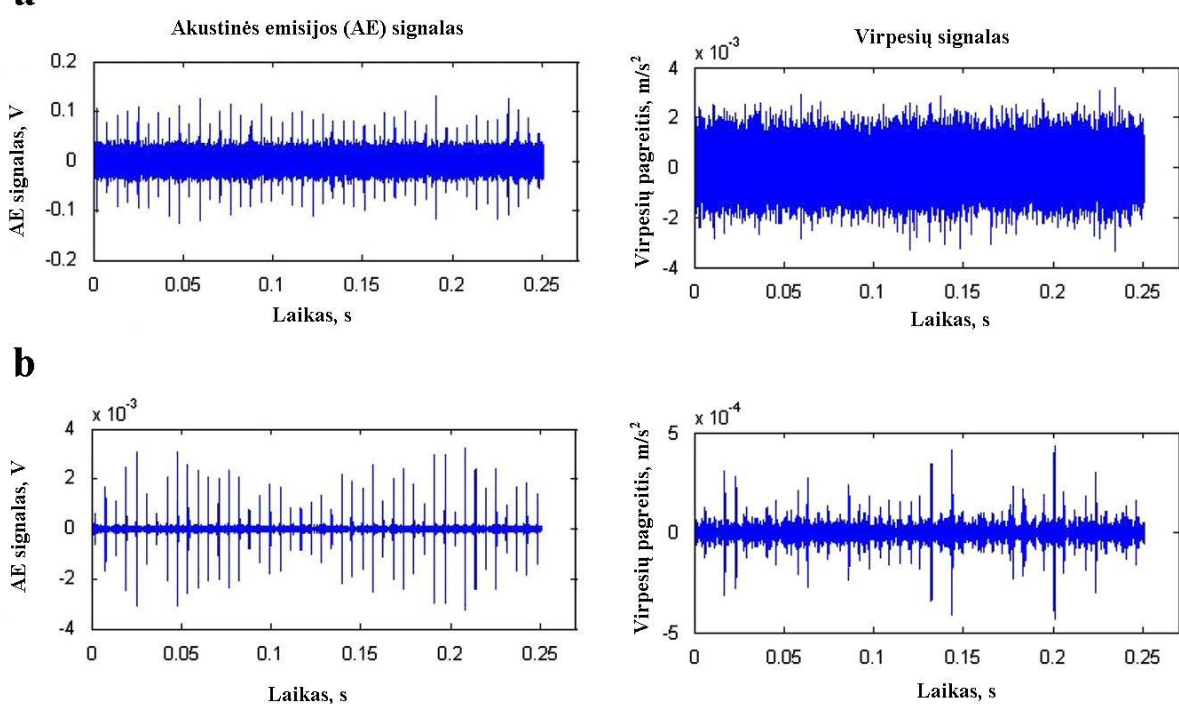
Mokslininkų atlikto eksperimento metu buvo matuojami riedėjimo guolio su defektu virpesiai. Surinkus ir apdorojus eksperimento rezultatus buvo nustatyta, jog šis mišrus metodas yra labai efektyvus nustatant riedėjimo guolio būklę. Dar daugiau, šis metodas pateikia labai aiškius rezultatus, kas sumažina tikimybę, jog operatorius atliekantis diagnostiką suklys.



1.10 pav. (a) guolio su defektu virpesiu signalo spektras (b) (F. Wang et al., 2010)

Moksliniame straipsnyje (B. Eftekharnejad et al., 2012) pristatomas tyrimas, kuris lygina akustinės emisijos metodą, su spektriniu virpesių formos faktoriaus metodu. Šie metodai buvo palyginti nustatinėjant natūraliai susidariusius defektus riedėjimo guolyje. Tai pirmasis bandymas tirti santykinį efektyvumą taikant „kurtogramą“ abiem, akustinės emisijos ir virpesių formos faktoriaus metodams.

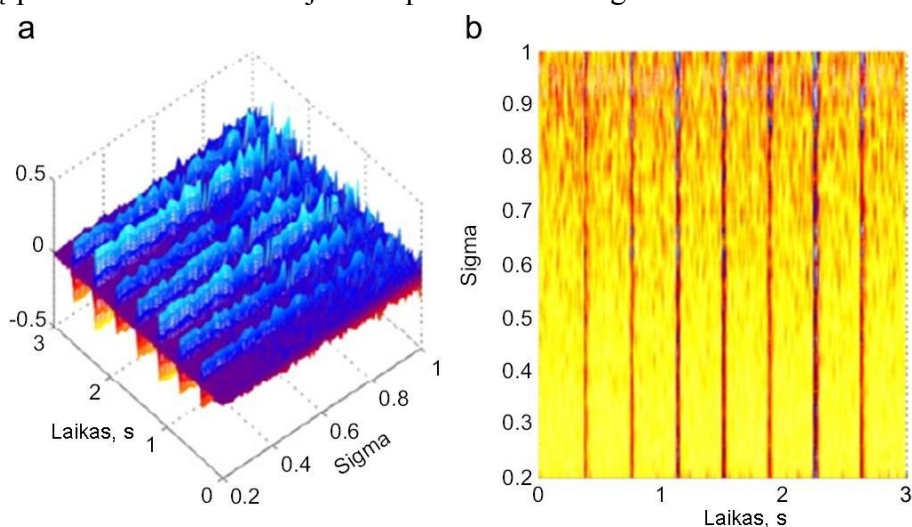
Eksperimento metu riedėjimo guolis buvo apkrautas 50 000 N jėga. Guolio vidinio žiedo apsisukimai 1000 aps./min. Eksperimentas buvo tęsiamas kol virpesių lygis peržengė reguliarių guolio eksploatacijos virpesių lygį (1.11 pav.).



1.11 pav. Akustinės emisijos ir virpesių formos faktoriaus metodų grafinis palyginimas (B. Eftekharnejad et al., 2012). a – nefiltruotas signalas; b – filtruotas signalas.

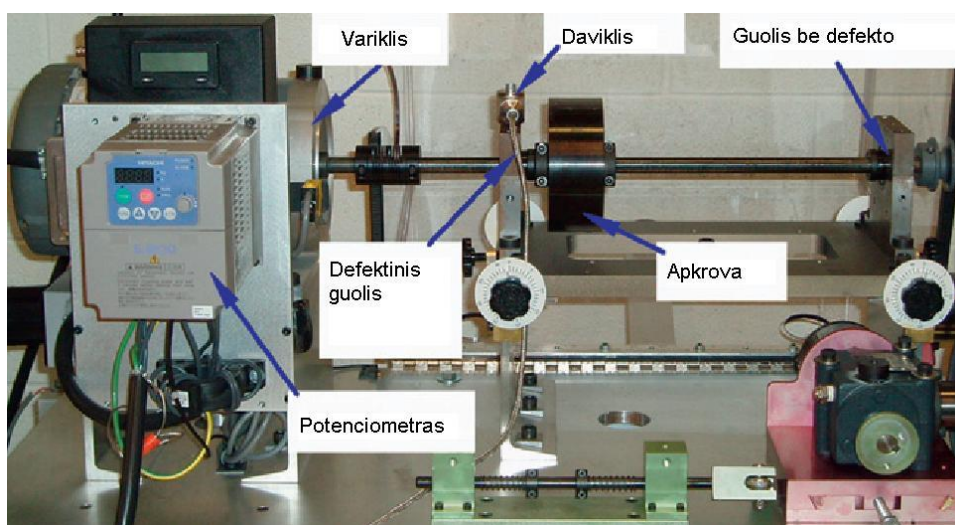
Mokslininkai teigia, kad akustinio metodo rezultatai buvo šiek tiek tikslesni šiuo konkrečiu atveju. Dar daugiau, spektrinio virpesių formos faktoriaus ir „kurtogramos“ analizė buvo efektyvi filtruojant tiek akustinės emisijos, tiek virpesių metodų signalus.

Mokslininkai iš Ottawa universiteto (Kanada) straipsnyje (Y. Wang et al., 2010) pateikė pritaikytą spektrinį virpesių formos faktorių (angl. spectral kurtosis) (SK) defektams riedėjimo guoliuose nustatyti. Pirmiausia metodas geba nustatyti duomenų diapazoną, bei vidutinę dažnio reikšmę. Tai įgyvendinama sėkmingai pritaikant duotojo lango išplėtimą kartu su dažnių ašimi, suliejant paskesnius artimus langus. Ištirta įtaka parametru, tokių kaip pradinio lango funkcija, diapazonas ir lango dalinis sutapimas. Tiriamo metodo efektyvumas nustatyti riedėjimo guolio techninę būklę patvirtinamas analizuojant eksperimentinius signalus.



1.12 pav. Kurtogramos rezultatai: (a) išgauti impulsyvūs signalai ir jų pjūviai (b) (Y. Wang et al., 2010)

Paveiksle (1.12 pav.) grafikuose pavaizduoti eksperimento rezultatai, kai defekto signalas buvo imituojamas. Vėliau buvo pagamintas tyrimo stendas (1.13 pav.).



1.13 pav. Eksperimento stendas (Y. Wang et al., 2010)

Atlikus tyrimus nustatyta, jog šis metodas yra veiksmingas naudojant skirtingas kartu paimtas langu funkcijas. Taip pat nustatyta, kad dalinai uždengto lango perdavimo skaičius turi būti 0.5 norint pasiekti gerą balansą tarp skaičiavimų ir norimų išfiltruotų rezultatų.

Siūlomos metodikos pranašumai yra šie:

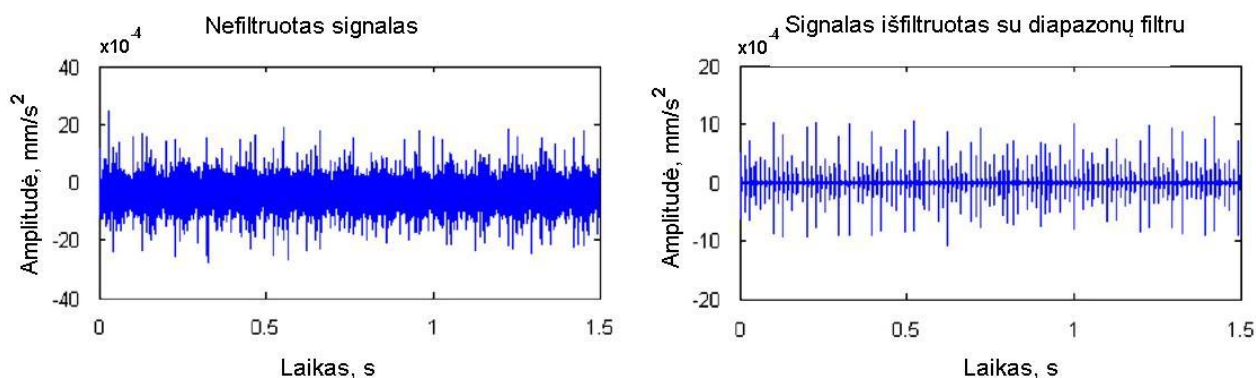
- Nesudėtingai parenkamas filtro diapazonas ir patikimai randamas filtro vidutinis dažnis, tokiu būdu išgaunami kokybiškesni demoduluoti rezultatai.
- Išsaugoma amplitudės informacija regeneruotame signale.

Metodo savybės buvo išanalizuotos naudojant tiek imituojamus defektų duomenis, tiek realius eksperimento metu gautus guolio defekto duomenis.

Moksliniame straipsnyje (Y. Zhang et al., 2009) pristatyta nauja guolių diagnostikos metodika paremta genetiniu algoritmu, bei greita „kurtograma“. Pritaikant kitus metodus susiduriama su problema, kai tiriami parametrai yra charakteringi būtent tuo atveju. Pakeitus sukimosi greitį ar atsiradus kitokiems defektams metodas tampa neefektyvus. Virpesiai skleidžiami defektinio guolio yra plataus dažnio ir silpno signalo, todėl sunku nustatyti geriausius diagnostikos parametrus. Tačiau virpesių formos faktorius (ang. „Kurtosis“) visuomet yra stiprus ir akivaizdžiai skiriasi kai guolis yra defektinis arba nedefektinis. Greita kurtograma labai efektyviai pateikia neapdorotus analizės parametrus, bet filtras, diapazonas ir dažniu centras negali būti parinktas taip efektyviai. Genetinis algoritmas geba optimizuoti minėtus parametrus, bet tai labai lėtas procesas kol parametrai neparinkti tinkamai. Šiame moksliniame straipsnyje taip pat aprašomas modelis ir algoritmas tinkamam parametru parinkimui, kad rezonansinis virpesių šifravimas, naudojant greitą kurtogramą ir genetinį algoritmą, taptų efektyvus. Metodo tinkamumas ir efektyvumas yra parentas eksperimento rezultatais. Šis metodas yra lankstesnis, parenkant parametrus, nei greitos kurtogramos metodas atskirai.

Eksperimentui atlikti buvo panaudotas trifazis elektros variklis su reduktoriumi. Reduktoriaus išėjimo veleno guolio vidiniame ir išoriniame žieduose buvo padaryti defektai panaudojant elektrinę eroziją. Virpesių signalai buvo surinkti 180-600 aps./min veleno sukimosi greičio diapazone.

Naujasis metodas išfiltravo virpesių signalą ir defektai aiškiai atspindėjo grafike (1.14 pav.).

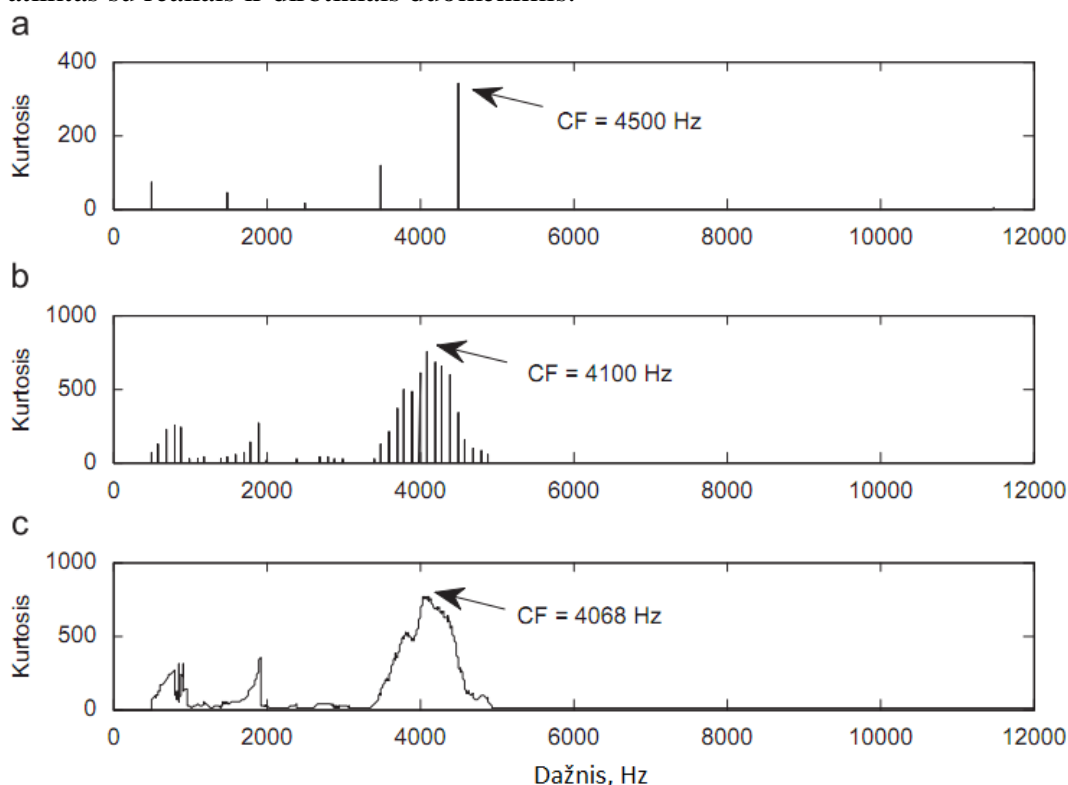


1.14 pav. Guolio su defektu virpesių signalo grafikai (Y. Zhang et al., 2009)

Straipsnio autoriai tyrimo metu priartėjo prie tinkamų, greitos kurtogramos ir genetinio algoritmo, parametrų parinkimo diagnozuojant guolio defektus. Taip pat nustatė optimalų diapazonų filtrą. Didžiausi siūlomo metodo privalumai:

- Greitos kurtogramos rezultatai suteikia kokybiškesnius duomenis genetiniam algoritmui;
- Genetinis algoritmas, paremtas spektriniu virpesių formos faktoriumi, turi didelę gebą optimizuoti parametrus su minimaliu diapazono ir centrinio dažnio iškraipymu.

Straipsnyje (T. Barszcz et al., 2011) aprašytas originalus metodas optimaliam dažnio diapazono pasirinkimui, kai virpesių signalas demoduliuojamas. Šiauro virpesių signalo demoduliacija leidžia išgauti charakteringus parametrus, kurie suteikia informacijos apie guolio defektus. Kaip bebūtų išfiltruoto ir demoduliuoto signalo kokybė labai priklauso nuo virpesių dažnio diapazono, kuris parinktas demoduliatoriui. Šiame straipsnyje pristatomas metodas kurio dėka galima efektyviai parinkti virpesių dažnio diapazoną, ko nepavyko atlikti kituose moksliniuose tyrimuose praeityje. Taip pat pristatomas naujas įrankis metodo rezultatų pateikimui – „Protrugram“. Metodas remiasi demoduliuoto, o ne filtruoto signalo virpesių formos faktoriumi. Metodo pranašumas – gebėjimas aptikti defekto virpesių signalą, kai jis yra labai panašus su pašaliniais signalais. Eksperimentinis tyrimas atliktas su realiais ir dirbtiniais duomenimis.



1.15 pav. Protrugrama, kai dažnių diapazonas const. 500 Hz. (a) 1 kHz; (b) 100 Hz; (c) 1 Hz. (T. Barszcz et al., 2011)

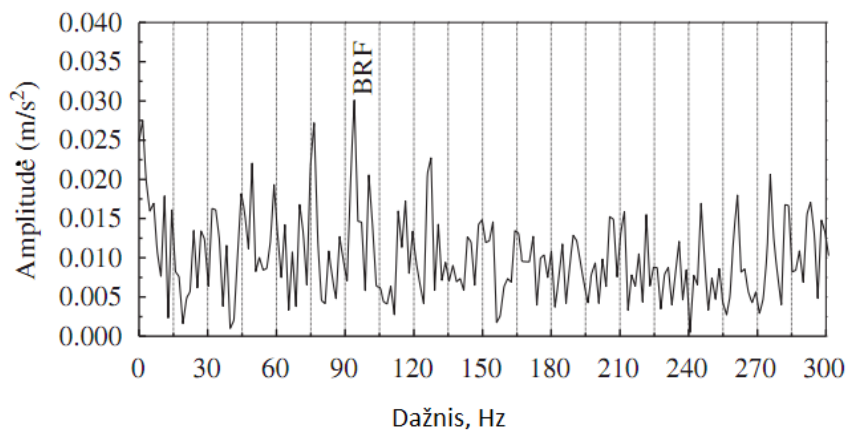
Praktinių žinių, bei eksperimento rezultatų analizės dėka straipsnio autoriai sukūrė naują ridėjimo guolių defektų nustatymo metodiką, kurią pavadino “Protrugram”. Šiame straipsnyje ji

buvo pristatyta ir bandymais mėginta nustatyti jos veiksmingumą. Priešingai nei „Kurtogram“ metodas, naujasis metodas reikalauja įrenginio, kuris yra analizuojamas, kinematinų žinių. Iš kitos pusės, „Protrugram“ rodo kokybiškesnius rezultatus demoduliuojant virpesių signalą, kai yra daug pašalinių garsų nei „Kurtogram“.

Moksliniame straipsnyje (Y. Dong et al., 2010) aprašytas naujas metodas, kuriuo siekiama efektyviai sumažinti pašalinių virpesių įtaką virpesių signalo analizei. Sukurtas naujas, modifikuotas analitinis- morfologinis metodas patikrintas dviem būdais:

- Dirbtiniais defekto signalais;
- Realiais defekto signalais.

Šis metodas taip pat palyginamas su „Nikolaou’s“ metodu. Tyrimais nustatyta, jog pristatomas metodas yra pranašesnis išgaunant virpesių charakteristikas iš virpesių signalo, ypač jei signalai yra labai triukšmingi, t.y. turi daug pašalinių virpesių. Naujasis metodas paremtas virpesių signalų spektrine analize (FFT).

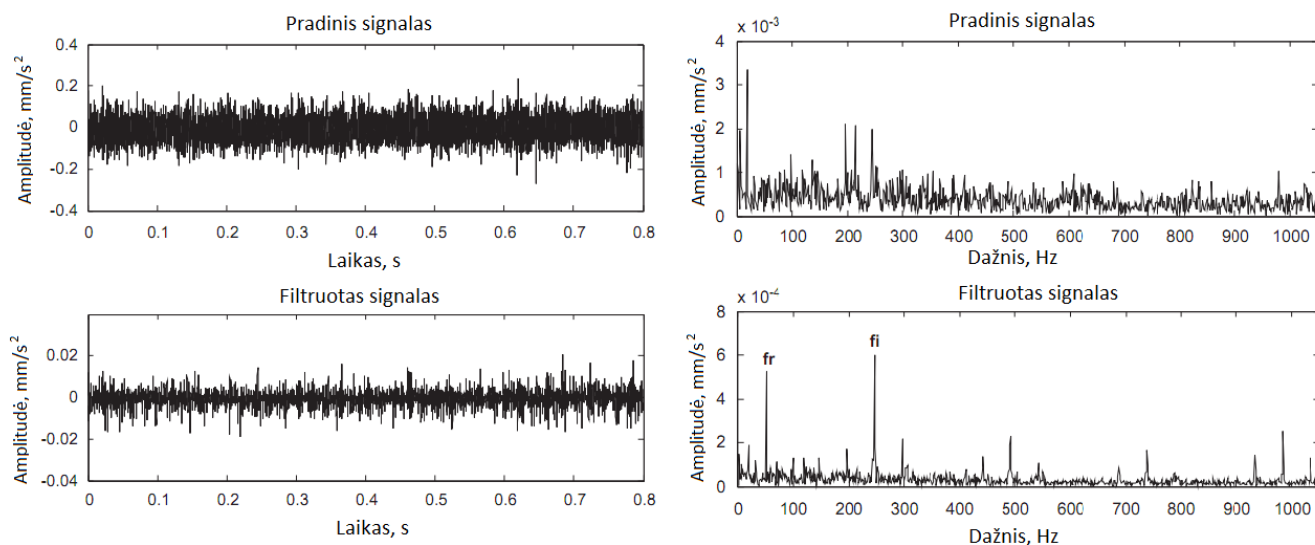


1.16 pav. Virpesių greičių ir pagreičių grafikas, kai signalas apdorotas modifikuotu morfologiniu metodu (Y. Dong et al., 2010)

Straipsnio autoriai kurdami naująjį metodą rėmėsi „Nikolaou’s“ metodu, ko pasakoje buvo sukurtas naujas morfologinės analizės metodas, kuris efektyviai išgauna virpesių parametrus iš triukšmingo defektinio guolio signalo. Metodo efektyvumas buvo patikrintas atliekant tyrimus su realiais ir dirbtiniais virpesių signalais. Lyginant su „Nikolaou’s“ metodu, šis metodas yra efektyvesnis. Dėl metodo paprastumo jis tinkamas tiesioginiai riedėjimo guolių diagnostikai taikyti.

Mokslininkai iš Kinijos (Shanghai Jiao Tong University) straipsnyje (Y. Ming et al., 2010) pasiūlė metodą, kuris geba aptikti nežymius guolio defektus, kai virpesių signalas yra labai iškraipytas pašalinių virpesių. Metodas paremtas ciklinio „Wiener“ filtro ir virpesių pagreičio gaubiančiosios analize. Ciklinis „Wiener“ filtras naudojasi spektriniu koherentiškumu teoriškai sukeltu antros eilės signalų. Tikrasis signalas yra sudubliuotas ir perkeltas į dažnių sritį, kur pašalinių triukšmo elementai optimaliai išfiltruojami. Išfiltruotas signalas analizuojamas pagal virpesių kreivės spektrą. Tuomet daugiausia smūgių vaizduojanti kreivės dalis perduodama tolesnei

analizei. Eksperimentui atlikti buvo sukurtas standas, kuriame surinkti ir apdoroti virpesių signalai (1.17 pav.) skleidžiami defektinio guolio.



1.17 pav. Virpesių signalų grafikai (Y. Ming et al., 2010)

Išvados. Pramonėje vis didesnis dėmesys skiriamas guolių defektų aptikimui pradinėje jų stadijoje. Tai sudėtingas procesas, nes smulkūs defektai skleidžia silpnus virpesius. Tuo tarpu foninis triukšmas yra didelis ir tuos defektus labai sudėtinga aptikti.

Straipsnio autoriai teigia, jog šis naujas metodas turi didelį efektyvumą aptinkant pradinius defektus virš kvadratinio pagreičių vidurkio (RMS). Taikant pristatytą metodą atsiradavo ciklinio dažnio paklaidų bei netikslumų, todėl galimi tolimesni tyrinėjimai kaip pašalinti šiuos nesklandumus.

Dažniausiai taikomi virpesių signalų matavimo ir tyrimo metodai:

1. Virpesių amplitudės faktoriaus K_a (Crest) ir virpesių formos K_f faktoriaus (Kurtosis);
2. Pagreičių gaubiančiosios;
3. Virpesių formos pagreičio K_f ir gaubiančiosios;
4. Virpesių signalo spektrinės analizės (FFT);
5. Akustinės emisijos.

1.1. Guolių diagnostikos problematika

Virpesių signalas surinktas virpesių keitiklių, kurie montuojami guoliavietėje, yra netiesioginis ir dažniausiai jame apstu pašalinių virpesių. Jie atsiranda dėl fono triukšmo, kurį fiksuoja keitikliai, o taip pat dėl kitų sistemos elementų skleidžiamų virpesių. Kas dar labiau apsunkina duomenų analizę ir filtravimą, tai virpesių interferencija. Tiriamo guolio skleidžiami virpesiai interferuoja su visos sistemos skleidžiamais virpesiais todėl, labai sunku aptikti guolio defektą jo ankstyvoje

stadijoje, kai pašaliniai virpesiai užgožia silpnus defekto žadinamus virpesius. Ypač sudėtinga lėtaeigių guolių diagnostika, nes defekto žadinami virpesiai būna labai silpni, absoliučią virpesių greičių ir pagreičių amplitudės yra labai mažos ir vyrauja žemo dažnio virpesiai.

Norint efektyviai nustatyti riedėjimo guolio defektus jų pradinėje stadijoje reikia pasirinkti tinkamą tyrimo metodą atsižvelgiant į situaciją. Kartais keli metodai ir virpesių matavimo priemonės naudojamos kartu siekiant užtikrinti diagnostikos kokybę. Metodai, naudojami greitaeigių guolių diagnostikai, ne visada tinkami lėtaeigių guolių diagnostikai.

1.2. Riedėjimo guolių defektų diagnostikos metodų apžvalga

Moksliniuose tyrimuose naudojama nemažai skirtingų virpesių tyrimo metodų. Moksliniuose straipsniuose analizuojamas jų pritaikomumas ir patikimumas. Virpesių tyrimo metodai nuolatos tobulinami siekiant sukurti kuo paprastesnius ir efektyvesnius būdus guolių defektams nustatyti. Šiame poskyryje apžvelgiami keli pagrindiniai virpesių tyrimo metodai.

Kietų kūnų virpesiai yra sudėtinga judesio forma, kuri gali sukelti daug įvairių padarinių. Virpesiams išmatuoti ir apibudinti yra ne vienas būdas. Norėdami panaudoti virpesius kaip priemonę apibudinti mašinos techninę būklę mes turime:

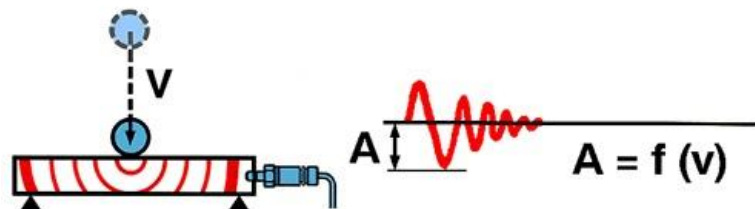
1. Surasti tinkamą virpesių matavimo būdą;
2. Nustatyti kokie yra analizuojamos mašinos ar įrenginio normalių darbo sąlygų virpesiai ir kur yra ta riba, kai jie viršija normas.

Visi virpesių matavimai prasideda nuo virpesių amplitudės kitimo laike grafiko. Virpesių keitiklis pakeičia judesį į elektrinį signalą, kurį atitinkamas įrenginys apskaičiuoja, atvaizduoja ir išsaugo. Tuomet galima daryti išvadas apie tai ar virpesiai yra natūralūs ar sukelti defekto.

1. 2. 1. Smūginių impulsų metodas

Riedėjimo guoliai žadina kinematinis stacionarius žemo dažnio virpesius ir nestacionarius aukšto dažnio virpesius. Stacionarūs virpesiai pasireiškia 10 Hz – 10000 Hz dažnių intervale. Virpesių dažniai susiję su guolio elementų geometrine forma, matmenimis, todėl paprastai apskaičiuojami kai kinematiniai dažniai (Mažeika P., 2008, 25 p.).

Smūginių impulsų metodą sukūrė firma SPM Instrument AB (Švedija). SPM (angl. SPM – Shock Pulse Method). SPM smūginių impulsų metodas įvertina riedėjimo guolių elementų (žiedų, riedėjimo takeliu ir rutuliukų arba rutuliukų) paviršių mikropažeidimus ir jų laipsnį bei guolio tepimo būklę, nes metodas pagrįstas smūgio impulso sužadintos tamprios smūgio bangos sklidimo guolio žiedu ir su juo susiliečiančiais elementais reiškiniu. Metodas iliustruojamas pavyzdžiu, kai metalinis rutuliukas atsimuša smūgio greičiu v į metalinę plokštelę.



1.18 pav. Rutuliuko smūgio į metalinę plokštelę schema ir pjezoakselerometro išėjimo signalo grafikas (A – informatyvi dalis, sudaranti SPM metodo esmę) (Spminstrument, [interaktyvus])

Rutuliuko smūgio impulsas sukelia tamprias smūgio bangas, sklindančias nuo kontakto taško abiejuose kūnuose – ir plokštelėje ir rutuliuke.



1.19 pav. Smūgio sukelti virpesiai bendrame virpesių kontekste (Spminstrument,[interaktyvus])

Smūgio impulso relė reaguoja į silpnų smūgių virpesius, nes jos rezonansinis dažnis 32 kHz. Mašinos sukeliama virpesiai, kurie yra kur kas žemesnio dažnio - išfiltruojami. Defekto keliami virpesiai taip pat priklauso nuo tepalo plėvelės storio tarp riedėjimo elementų guolyje, kuo plėvelė storesnė tuo defekto smūgis silpnesnis ir atvirkščiai. Guolių kontaktuojančių paviršių dilimas labai įtakoja smūgių impulso energiją ir jos kitimo ribos yra gan plačios. „Metalinis“ kontaktas tarp riedėjimo elementų ir guolio žiedų būna net ir pradiniame įsidirbimo etape. Jeigu tepalo plėvelė atskirtų kontaktuojančius paviršius, tai riedėjimo guoliai dirbtų nepertraukiamai ilgai. Tačiau praktikoje to nėra. Kai tepalo plėvelės storis sumažėja, riedėjimo elementai kontaktuoja su guolio žiedais didesniu plotu. Tai sukelia didesnius smūginius impulsus guolyje ir pagreitina defektų atsiradimą. Periodiškai didėjant defektų skaičiui riedėjimo takelyje, didėjantys smūginiai impulsai sukelia dideles virpesių amplitudes (Mažeika P., 2008, 26 p.).

Jutiklis defekto smūgį matuoja decibelais. Matavimas atliekamas dviejose lygmenyse:

1. Mikroprocesorius įvertina signalą;
2. Įvesties duomenys nusako guolio tipą, veleno sukimosi greitį, guolio diametrą ir kt.

Paviršiaus pažeidimai guolyje sukelia smūgio virpesių signalo padidėjimą, tuomet virpesių laiko grafikuose išryškėja defekto amplitudė.

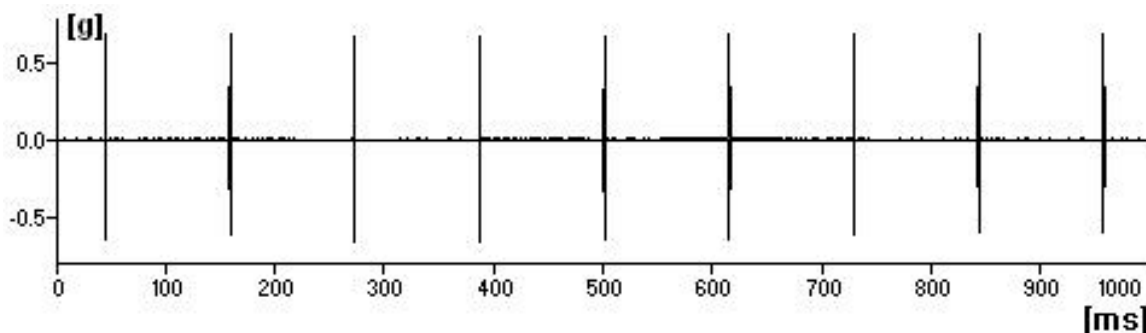
Pagrindinis metodo privalumas - paprasti prietaisai, nereikalinga aukšta darbuotojo, atliekančio diagnostiką, kvalifikacija. Tačiau metodo trūkumai yra žymūs: defektai kurie nesudaro tepalo plėvelės tarp riedėjimo elementų, guolio surinkimo į atramą defektai, negali būti nustatomi SPM.

Įvertinus tai, kad smūginiai impulsai guolyje gali pasireikšti esant skirtingo tipo defektams, o keičiant tepimo sąlygas, tepalo kiekį, metodas nesuteikia galimybės identifikuoti defekto tipo. Guolių diagnostikos praktika parodė, kad metodas nėra efektyvus ir yra netaikytinas atliekant lėtaveiksmių totorių riedėjimo guolių diagnostiką, kai rotoriaus sukimosi greitis mažas, 50 – 100 aps/min (Mažeika P., 2008, 26 p.).

1. 2. 2. Virpesių signalo funkcijos pagal laiką metodas (ACMT)

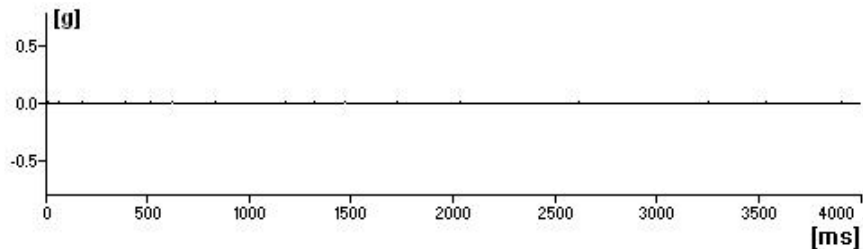
Firma ADASH (Čekija) 2005 m. virpesių signalų analizatoriuje A4300 – VA3 realizavo lėtaveiksmių rotorių su riedėjimo guoliais, kurių sukimosi greitis 120 aps/min ir mažesnis techninės būklės monitoringo ir defektų diagnostikos metodą, pavadintą ACMT – Adash Compressed Time. Metodo esmę sudaro guolio defekčio elemento trumpalaikių smūgių ilgame matavimo laiko intervale monitoringas ir analizė (Mažeika P., 2008, 40 p.).

Lėtaeigiuose guoliuose defekto keliamų smūgių trukmė yra maža, todėl virpesių signalų surinkimo dažnis turi būti didelis. Lėtaeigiuose guoliuose intervalas tarp smūgių gali siekti iki 3 sekundžių. Smūgio impulso trukmė gali siekti 100 ms, todėl surenkant virpesių duomenis kas 1 sekundę, tikimybė aptikti 100 ms trukmės virpesius yra maža. Tuo atveju, jei vis dėl tai pavyksta atsitiktinai išmatuoti tokį trumpą impulsą, nebus galima teigti, jog tai buvo signalas sukeltas guolio defekto, nes virpesių laiko grafike tai bus pavieniai amplitudės šuoliai. Šio metodo pagalba pirmiausia aptinkami mažos trukmės virpesiai sukelti defekto, nuskaitant duomenis dideliu dažniu 19200 Hz (200 Hz įprastas nuskaitymo dažnis) ir įrašinėjant juos 42 ms laiko intervale. 1.20 pav. pavaizduota ilgame matavimo laike užfiksuoti trumpi smūgio bangų intervalai.



1.20 pav. Ilgame matavimo laike užfiksuoti trumpi smūgio bangų intervalai kai virpesiai matuojami 19200 Hz dažniu (mažu žingsniu) (Adash [interaktyvus])

Pirmiausia, diskretizavus analoginį signalą mažu žingsniu, fiksuojamas virpesių smūgis, o po to šis virpesių signalas moduluojamas analoginio signalo dideliu žingsniu diskretizuotu signalu, trunkančiu ilgą laiko tarpą.



1.21 pav. Virpesių amplitudės spektras kai virpesiai matuojami dideliu žingsniu (Adash [interaktyvus])

1. 2. 3. Akustinės emisijos metodas

SEE (angl. SEE – Spectral Emitted Energy) metodas pagrįstas akustinės emisijos, ypač aukštų virpesių dažnių garso, kurį žadina kontaktuojančių metalinių paviršių dinaminis sąlytis, matavimu.

Akustinės emisijos metodu identifikuojamų virpesių dažnių intervalas yra nuo 100 kHz iki 1 MHz, kurie pasireiškia dėl medžiagos kristalinės gardelės trūkumų, dėl medžiagos fazės pasikeitimų, elektros srovės pratekėjimo ir kt. Tokie defektai pasireiškia dėl atomų grupių greito judėjimo medžiagoje sukulto, pavyzdžiui, riedėjimo guolių nepakankamo tepimo arba tepalo užterštumo pašalinėmis kietų medžiagų dalelėmis. Šis reiškinys medžiagoje pasireiškia, kai virpesių sklidimo greitis yra artimas akustiniam greičiui, todėl ir vadinamas akustinės emisijos metodu. (Mažeika P., 2008, 37 p.).

Ryškūs SEE metodo trūkumai neleidžia jam įsitvirtinti praktikoje, nes metodo tikslumas labai priklauso nuo pjezoelektrinio keitlio parametrų. Pavyzdžiui dažnio intervalas 250 - 350 kHz, matavimų ribos 1 – 250 g^E. Metodo tikslumas labai jautrus matavimo keitlio tvirtinimo vietai ant matuojamo paviršiaus. Keitlys turi būti tvirtinamas (prilietas arba tvirtinamas kitu būdu) prie labiausiai apkrautos, arba maksimaliai labiausiai apkrautos guolio atramos vietos, kuri praktiškai nežinoma arba rotoriaus guolio atramos konstrukcija neleidžia pasiekti labiausiai apkrautos atramos vietos. Naudojant rankinį tvirtinimą ypač svarbu išlaikyti stabilią keitlio erdvinę padėtį statmenai ($90^0 \pm 10^0$) matavimo vietos paviršiui ir pastovią keitiklio prispaudimo prie matuojamo paviršiaus jėgą.

1. 2. 4. Pagreičių gaubiančiosios metodas

Tai vienas iš efektyviausių tačiau sudėtingiausių riedėjimo guolių defektų diagnostikos metodų, kai šį metodą lyginame su kitais metodais matematinio apdorojimo ir fizikinio gautų rezultatų interpretavimo atžvilgiu.

Metodas pagrįstas dviem prielaidomis:

1. Priklausomai nuo to, kokiame riedėjimo guolio elemente atsiras defektas (vidinio ar išorinio žiedo riedėjimo takelyje, separatoriuje ar riedėjimo elemente), guolio žadinamas smūgio dažnis bus

kitoks. Šis dažnis vienareikšmiškai susijęs, su specifikuojamu defekčiu elementu, su guolio geometriniais parametrais ir guolio žiedo (rotoriaus, kaip varančiosios grandies) sukimosi greičiu.

2. Po kiekvieno defekčio elemento smūgio į kontaktuojantį elementą, guolyje bus sužadinti konstrukcijos laisvieji slopinamieji virpesiai. Virpesių parametrai ir trukmė kinta priklausomai nuo guolio elementų dinaminių parametrų (masės, standumo) ir slopinimo. Šie virpesiai yra plataus dažnių intervalo, kas būtina metodui atskirti virpesių signalą nuo trukdžių juostinių filtrų pagalba (Mažeika P., 2008, 29 p.).

Šio metodo veikimo principas toks: trinties jėga, sužadinanti aukšto dažnio atsitiktinius virpesius, yra stacionari tik nepasireiškus defektams. Nedefekčiuose guoliuose trintis mazguose vyrauja stacionari ir atsitiktinė aukšto dažnio vibracija. Jos galia pastovi laiko atžvilgiu. Pasireiškus guolių defektams, kurie iššaukia tepalo išspaudimą iš elementų kontaktų srities, keičiasi periodinės trinties jėgos ir pasireiškia smūgiai, sužadinantys aukšto dažnio virpesius. Šio tipo virpesiai taip pat gali pasireikšti jei yra naudojamas netinkamas tepalas (mažo klampumo) ir jo plėvelė lengvai praspaudžiama (Mažeika P., 2008, 29 p.).

Pasireiškus defektams, trinties jėgos ir virpesių lygis kinta kaip laiko funkcija t.y. pasireiškia aukšto dažnio virpesių moduliacija, tiek pagal amplitudę, tiek pagal dažnį. Guolio techninės būklės vertinimas ir defektų diagnostika daroma guolio harmonikų amplitudžių gaubiančiosios spektre santykių pagrindu. Svarbu žinoti, kad gautas virpesių signalų spektras sukuriamas panaudojant tam tikrą virpesių signalą (vadinamą imtimi) apibrėžtame laiko intervale. Todėl dažnių harmonikų amplitudės gaunamos ne tiksliais pagreičių reikšmėmis, o vienetais moduluoti signalo atžvilgiu. Tai labai sunkina rezultatų interpretavimą ir defektų diagnostiką (Mažeika P., 2008, 30 p.).

Be išvardintų trūkumų, signalų gaubiančiosios metodas turi dar vieną reikšmingą trūkumą, kuris apsunkina guolio darbo resurso nustatymą. Jei defektas pasireiškia guolio bet kurio žiedo riedėjimo takelyje, o tai, kaip parodė praktika sudaro 90% visų guolių gedimų, tai jo pradiniame defekto vystymosi etape pastebimas proporcingas virpesių parametrų kitimas. Tolimesniame defekto vystymosi etape prasideda toks procesas, kai signalo gaubiančiosios spektre defekto vystymosi pradeda mažėti. Defektas vystosi, o virpesių signalų analizė rodo lyg ir pagerėjusią guolio būklę (Mažeika P., 2008, 30 p.)

Minėti šio diagnostikos metodo trūkumai apriboja mechaninių virpesių signalų gaubiančiosios spektro formato naudojimą praktikoje. Pradiniame ir „viduriniame“ defektų vystymosi etape diagnostikos rezultatų patikimumas sumažėja iki 30 – 50%, ko aiškiai nepakanka šiuolaikinėse brangiuose technologinėse mašinose.

1. 2. 5. Lėtaveiksmių rotorių su riedėjimo guoliais virpesių tyrimo RSMMD metodas

Šis metodas sukurtas Doc. Dr. P. Mažeikos 2008 m. Praktikoje aprobuotas ypač lėtai besisukančių ir didelį sukimo momentą išvystančių rotorių su riedėjimo guoliais defektų diagnostikos metodas (RSMMD – Rotorių Stebėsenos, Matematinio Modeliavimo ir Diagnostikos metodas). (Mažeika P., 2008, 42 p.)

RSMMD metodo esmė, kad eksperimentiniai rotorių poslinkių ir virpesių poslinkių (radialių poslinkių) matavimų bekontakčiais jutikliais rezultatai, matuojami ne pačiame guolyje, bet prie guolio. Šie matavimų rezultatai įtraukiami į rotorinės sistemos diskretizuotą modelį taip, kad sukurto modelio tyrimas kiekybiškai įvertina krumplinių perdavų techninę būklę, o modeliavimo rezultatai leidžia prognozuoti ne tik pačių guolių gedimą, bet ir rotorinės sistemos su krumplinėmis perdavomės netikėtą gedimą. Pagal krumplinės perdavos techninę būklę įvertinama ir riedėjimo guolio techninė būklė, nes tarp šių dviejų elementų yra koreliacija. Metodas taip pat gali būti taikomas diržinei, grandininei, elevatorių pavaroms, technologiniams sraigtams ir t.t. RSMMD metodo eksperimentinę dalį sudaro rotoriaus dalies, esančios arti riedėjimo guolio absoliučiojo radialinio poslinkio ir virpesių poslinkio matavimas ir matavimo rezultatų naudojimas teoriniam dinaminio ir matematinio modelių sudarymui ir sprendimui (Mažeika P., 2008, 42 p.)

1.3. Virpesių matavimo ir analizavimo prietaisai

Defektams guoliuose nustatyti naudojami virpesių matavimo ir analizavimo prietaisai. Priklausomai nuo paskirties prietaisas gali būti komplektuojamas su įvairiais virpesių matavimo keitliais: pjezoakselerometrais, seisminiais keitliais ar virpesių poslinkių keitikliais. Kiekvienas jų surenka informaciją apie tiriamo rotoriaus guolio virpesių signalą, virpesių poslinkį ar akustinę emisiją. Surinktą informaciją apdoroja programinė įranga. Vėliau grafiškai ar skaitinėmis reikšmėmis pateiktą informaciją analizuoja asmuo atliekantis diagnostiką.

Pocket AE-2 (JAV) (Physical Acustion Corporation [interaktyvus]), tai akustinės emisijos (AE) virpesių matavimo prietaisas (1.22 pav.), kuris surenka ir apdoroja AE signalą vėliau pateikdamas grafines rezultatų išraiškas. Šis prietaisas turi du pasyvius AE keitiklius. Prietaisas aprūpintas programine įranga, kuri geba atlikti AE signalo spektrinę analizę, grafiškai atkurti virpesių grafiką, sukurti histogramą ir kt.



1.22 pav. Pocket AE-2 akustinės emisijos signalų matavimo prietaisas (20, [interaktyvus])

CoCo - 80 (JAV) (GMR – solutions [interaktyvus]) tai rankinis, dinaminės signalo analizės ir virpesių signalo sukaupimo ir apdorojimo prietaisas (1.23 pav.) turintis plačias panaudojimo galimybes. Ši prietaisas turi aštuonis įvesties kanalus ir vienu metu gali matuoti dinaminius ir statinius signalus. Programinė įranga geba analizuoti virpesių amplitudės faktoriaus ir virpesių formos faktoriaus, virpesių signalų spektrinės analizės, pagreičių gaubiančiosios metodais. Grafiškai pateikiami įvairūs statistiniai skaičiavimai.



1.23 pav. Virpesių matavimo prietaisas CoCo – 80 (GMR – solutions [interaktyvus])

Adash A4300-VA3 (Čekija) (Adash [interaktyvus]) – modernus dviejų arba vien kanalo virpesių signalo kaupimo ir analizavimo prietaisas (1.24 pav.) su programine įranga gebančia analizuoti virpesių signalus virpesių amplitudės faktoriaus ir virpesių formos faktoriaus, virpesių signalų spektrinės analizės, metodais. Taip pat gali nustatyti virpesių pagreičio kvadratinį vidurkį, didžiausias pikines reikšmes ir kt. Pateikti grafinius analizės rezultatus.



1.24 pav. Virpesių matavimo prietaisas Adash A4300-VA3 (Adash [interaktyvus])

Leonova Infinity (Švedija) (SPM Leonova [interaktyvus]) – šis prietaisas (1.25 pav.) matuoja įrengimų virpesius pagal ISO standartus. Integruota programinė įranga matuoja smūginius impulsus bei analizuoja juos „True SPM“ metodu, kuris leidžia diagnozuoti rotorų, guolių ar kitų elementų ar įrenginių techninę būklę. Taip pat šiuo prietaisu galima nustatyti bendraašiškimų nuokrypius sujungtų rotorų.



1.25 pav. Virpesių matavimo prietaisas Leonova infinity (SPM Leonova [interaktyvus])

SKF Microlog Analyzer AX (Švedija) (SKF [interaktyvus]) – šis prietaisas (1.26 pav.) turi pažangią virpesių matavimo ir stebėjimo technologiją pritaikomą įvairiems vartotojo poreikiams. Prietaisas turi keturis kanalus, todėl vienu metu gali būti priimami virpesių signalai iš keturių keitlių. Duomenų surinkimas, apdorojimas ir saugojimas ypač greitas.



1.25 pav. Virpesių matavimo prietaisas SKF Microlog Analyzer AX (SKF [interaktyvus])

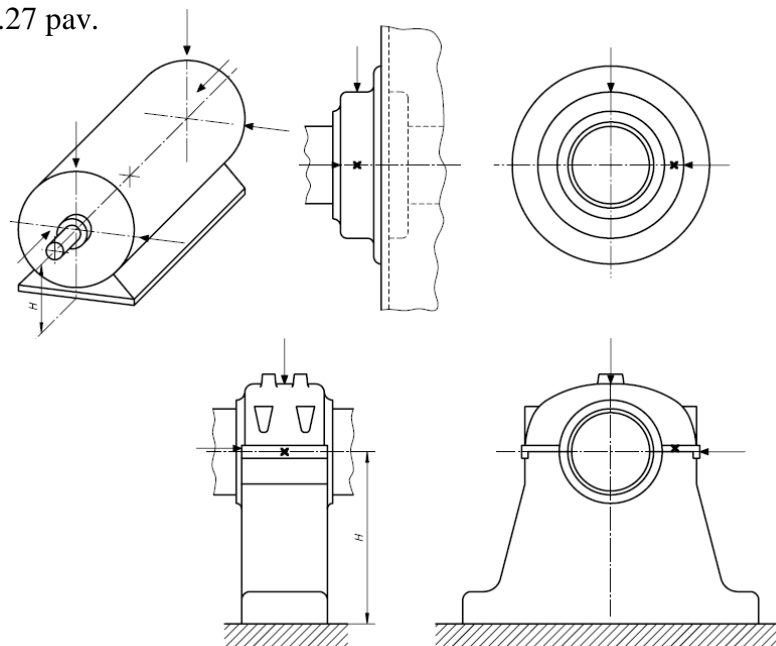
Analyzer - Type 2250 H (Danija) (BKS [interaktyvus]) – šis prietaisas (1.26 pav.) turi vieną kanalą ir geba analizuoti virpesių signalus bei nustatyti įrengimo techninę būklę. Siurblio, ventiliatoriaus ar rotorius virpesių matavimas yra efektyvus būdas išvengti netikėtų gedimų, ką šis įrengimas puikiai atlieka. Prietaisas turi 120 dB veiklų diapazoną.



1.26 pav. Virpesių matavimo prietaisas Analyzer - Type 2250 H (BKSV [interaktyvus])

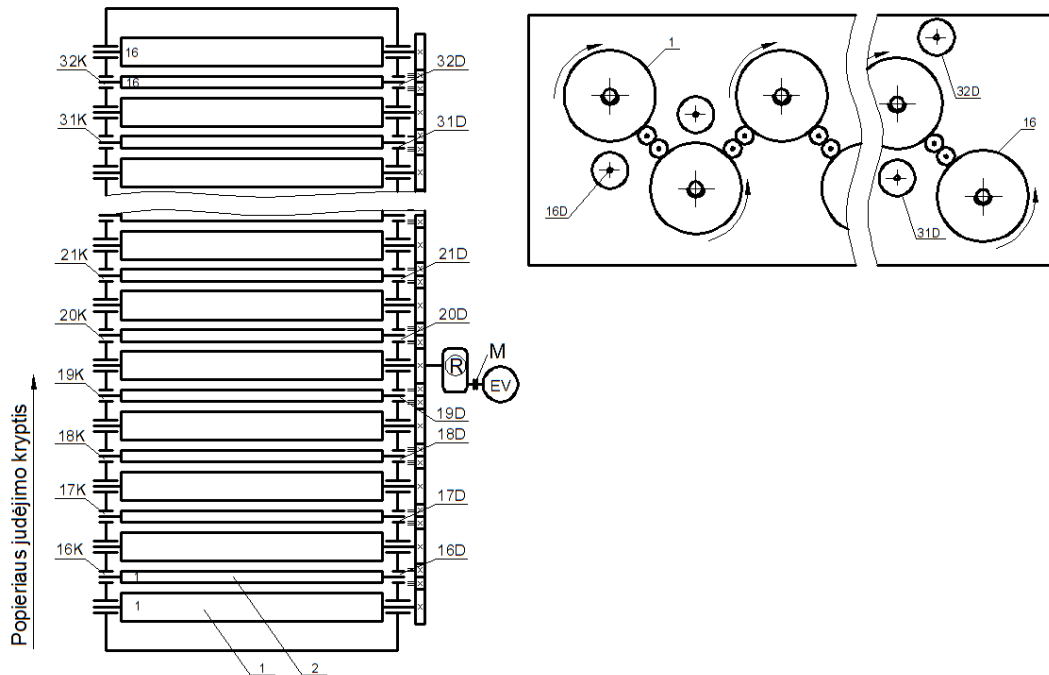
1.4. Virpesių keitiklių montavimas ant guolių atramų

Pagal ISO 10861-3 virpesių keitliai montuojami ant gerai matomų bei prieinamų mašinos vietų. Vieta taip pat turėtų būti parenkama taip, kad gautas virpesių signalas turėtų kuo mažesnės įtakos dėl pašalinių virpesių. Keitiklių tvirtinimo vietos ir kryptys turėtų būti susietos su mašina veikiančiomis dinaminėmis jėgomis. Dažniausiai reikalingi du statmeni apskritimu išdėstyti taškai kaip parodyta 1.27 pav.



1.27 pav. Keitiklių montavimo schema (ISO 10861-3, 2009)

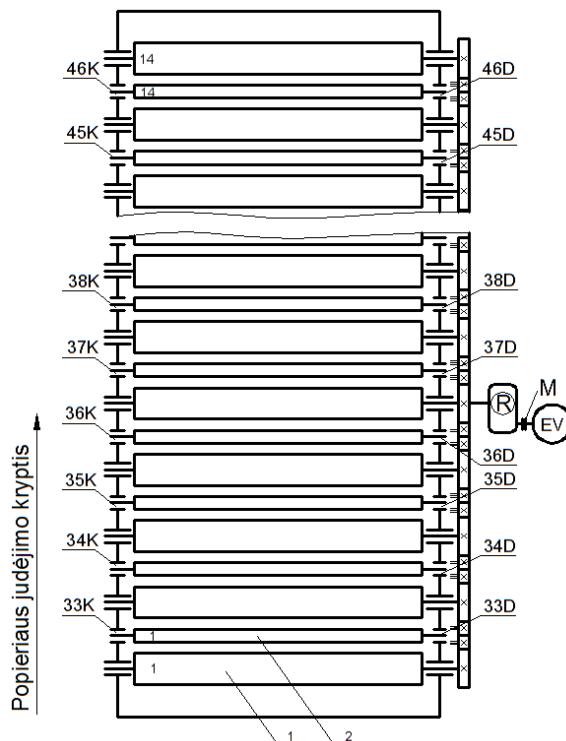
Keitikliai gali būti montuojami bet kokioje guoliavietės ar rotoriaus pamato vietoje. Vertikalios ir horizontalios kryptys dažniausiai parenkamos horizontaliai sumontuotiems mechanizms. Vertikaliems ar pasvirusiems įrengimams parenkamos keitiklių montavimo pozicijos geriausiai nusakančios tiriamus virpesius. Vienas keitiklis gali būti tvirtinamas ant guoliavietės korpuso ar įrenginio pamato, tačiau reikia atkreipti dėmesį į tai kokioje vietoje virpesiai yra didžiausi, kokiomis ašimis veikia didžiausios jėgos.



2.2 pav. V džiovyklų grupė.

1 – džiovinimo būgnas; 2 – vedantysis velenas; R – reduktorius; M – mova; EV – elektros variklis; 17K – 32K – kairiosios pusės vedančiųjų velenų guoliai; 17D – 32D – dešinėsios pusės vedančiųjų velenų guoliai.

VI džiovyklų grupė (2.3 pav.) identiška IV – V grupėms. Skiriasi tik tuo, kad šioje džiovyklų grupėje yra 14 – a džiovinimo būgnų, bei 14 - a vedančiųjų velenų.



2.3 pav. VI džiovyklų grupė.

1 – džiovinimo būgnas; 2 – vedantysis velenas; R – reduktorius; M – mova; EV – elektros variklis; 33K – 46K – kairiosios pusės vedančiųjų velenų guoliai; 33D – 46D – dešinėsios pusės vedančiųjų velenų guoliai.

Vedančiųjų velenų sukimosi greitis siekia 360 aps./min. Defektų atsiradimo vietos - riedėjimo elementai ir išorinio guolio žiedo riedėjimo takelis (2.4 pav.). Guolio markė 21314-E/C3.

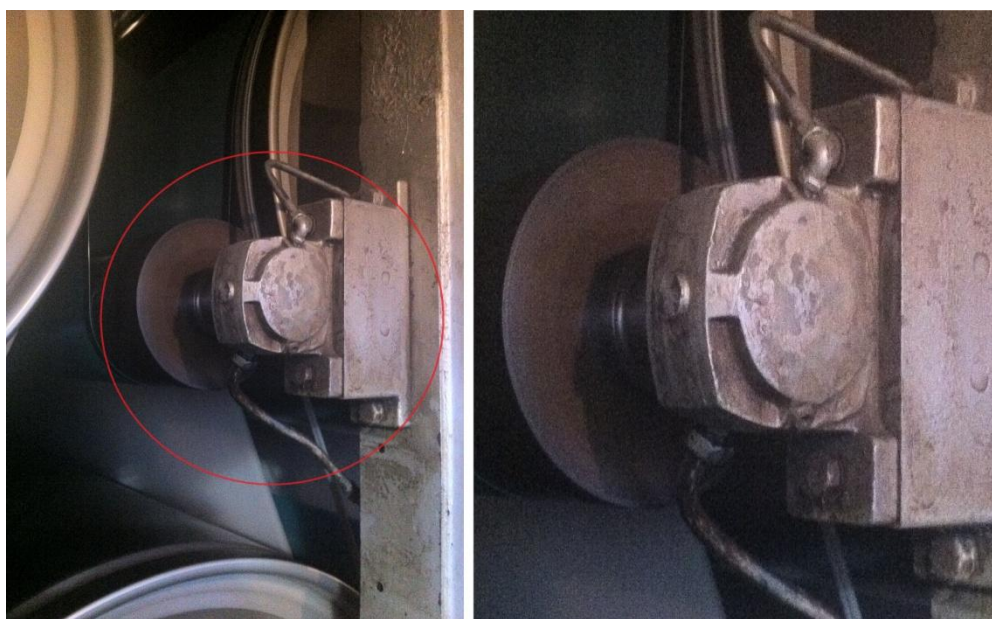


2.4 pav. Riedėjimo guolio defektai (aut. nuotrauka)

2.1 lentelė. Matuojamų guolių sąrašas

Mašina	Guolių numeriai	Viso matuojamų guolių
4-a džiovyklinė mašina „INVERFORM“	1K, 1D, ... , 16K, 16D	32
5-a džiovyklinė mašina „INVERFORM“	17K, 17D, ... , 32K, 32D	32
6-a džiovyklinė mašina „INVERFORM“	33K, 33D, ... , 46K, 46D	28
	Viso:	92

Šiame tiriamajame darbe išmatuoti pateiktų vedančiųjų velenų guolių virpesių parametrai. Guoliavietės nuotrauka 2.5 pav.



2.5 pav. Vedančiųjų velenų guoliavietės (aut. nuotrauka)

III. TYRIMO METODIKA

Atlikus AB „Klaipėdos kartonas“ eksploatuojamų džiovyklinių mašinų konstrukcijų analizę ir išnagrinėjus pagrindinius jų techninius parametrus, sukurta virpesių eksperimentinių matavimų metodika eksploatuojamų džiovyklinių grupių mašinų vedančiųjų velenų lėtaeigių riedėjimo guolių techninei būklei įvertinti.

Ekspperimentinio virpesių tyrimo metodiką sudaro šios dalys:

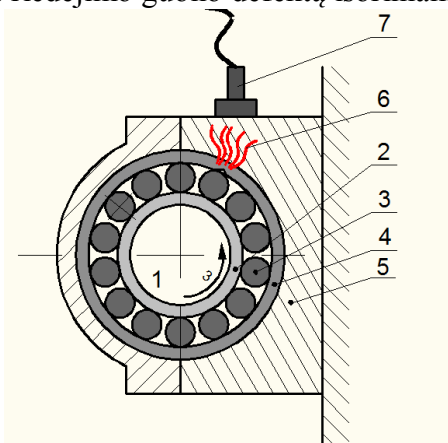
1. Guolių žadinamų virpesių matavimo būdo parinkimas;
2. Virpesių matavimo priemonių parinkimas;
3. Matavimo taškų ant tyrimo objektų parinkimo metodika;
4. Eksperimentinių tyrimų atlikimo periodiškumo nustatymas;
5. Guolių žadinamų virpesių lygio, virpesių intensyvumo identifikavimo metodikos sudarymas;
6. Virpesių šaltinių identifikavimo metodikos sudarymas.

Praktikoje nustatant guolių techninę būklę taip pat naudojami tepalo priemaišų bei tepalo charakteristikų metodai. Šiuo atveju metodai negali būti taikomi, nes tepimo sistema „INVERFORM“ džiovyklose yra centralizuota, todėl būtų labai sudėtinga paimti tepalo mėginius.

3.1. Virpesių matavimo būdo parinkimas

Norint sudaryti vedančiųjų velenų riedėjimo guolių virpesių eksperimentinių matavimų metodiką, būtina pasirinkti tinkamą virpesių matavimo būdą. Atsižvelgus į tai, jog vedančiųjų velenų guoliai yra uždaro tipo, virpesių lygiai matuojami netiesioginiu būdu, t.y. matuojamas guoliavietės virpesių lygis. Šis būdas leidžia kiekybiškai įvertinti guolio techninę būklę ir identifiukuoti jį žalojančius, virpesių šaltinius.

Šiuo būdu identifiukuojant riedėjimo guolio defektą išoriniame žiede, principinė schema pateikta 3.1 pav.



3.1 pav. Vedančiojo veleno riedėjimo guolio išorinio žiedo defekto žadinamo virpesių lygio matavimo netiesioginiu (absoliučiuoju) metodu principinė schema

1 – rotorius; 2 – riedėjimo guolio vidinis žiedas; 3 – guolio riedėjimo elementas; 4 – riedėjimo guolio išorinis žiedas; 5 – guoliavietė; 6 – defektų žadinami virpesiai; 7 – pjezoakselerometrinis keitiklis.

Lėtaeigių guolių žadinamo virpesių lygio ir virpesių šaltinių identifikavimo metodika pagrįsta šių virpesių parametrų ir duomenų formatų analize (Bently D. et al., 2002):

1. Virpesių greičio kvadratinio vidurkio reikšmė V_{RMS} (dažnių intervale 10-1000 Hz);
2. Virpesių pagreičio kvadratinio vidurkio santykinė reikšmė g (dažnių intervale 5-16 kHz);
3. Virpesių pagreičio kvadratinio vidurkio santykinė reikšmė g_L (dažnių intervale 0,5-16 kHz);
4. Virpesių greičių spektrai (FFT spektras) dažnių intervale 0-1000 Hz;
5. Virpesių pagreičių spektrai (FFT spektras) dažnių intervale 0-3200 Hz;
6. Virpesių greičių spektrai (FFT spektras) dažnių intervale 0-6400 Hz;
7. Virpesių pagreičio priklausomybės nuo laiko grafiko analize (ACMT) 4-ių sekundžių intervale.

3.2. Matavimo prietaiso ir programinės įrangos parinkimas

Lėtaeigių riedėjimo guolių virpesių lygio ir virpesių šaltinių identifikavimui bei aukščiau minėtų virpesių duomenų formatų gavimui ir analizei, eksperimento duomenų išsaugojimui bei perkėlimui į kompiuterį, t.y. moksliniams eksperimentiniams tyrimams atlikti, pasirinktas virpesių signalų analizatorius ADASH A4300-VA3 (Čekija).

Matavimo priemonė ADASH A4300-VA3 pasirinkta atsižvelgus į šiuos kriterijus (privalumus):

- galimybė matuoti absoliučiąjų greičių kvadratinį vidurkių V_{RMS} reikšmes;
- identifikuoti riedėjimo guolių defektus;
- galimybė virpesių energiją fiksuoti plačiame dažnių intervale (nuo 0,8 Hz iki 20 kHz);
- galimybė matuoti virpesių pagreičio kvadratinio vidurkio reikšmę g ;
- galimybė matuoti virpesių pagreičių spektrą FFT;
- galimybė sukauptus duomenis perkelti į kompiuterį tolimesnei analizei arba duomenų kaupimui/saugojimui.

Virpesių signalų analizatoriaus ADASH A4300-VA3 paveikslas pateiktas 1.20 pav.

Duomenims, kurie buvo surinkti atlikus eksperimentus, perkėlimui iš virpesių signalų analizatoriaus ADASH A4300-VA3 į kompiuterį, saugojimui jame ir gautų virpesių duomenų formatų analizei, buvo panaudota programinė įranga DDS2000. Ši programinė įranga pasirinkta atsižvelgus ir į šiuos privalumus:

1. Programinė įranga pritaikyta duomenų perkėlimui iš virpesių signalų analizatoriaus ADASH A4300-VA3 į kompiuterį.
2. Galimybė automatiškai būdu kaupti/atnaujinti iš virpesių signalų analizatorių perkeltus duomenis duomenų bazėje SQL.
3. Galimybė atlikti absoliučiuųjų virpesių (greičių ir/arba pagreičių) spektrinę analizę taikant virpesių harmonikų automatinio vizualizavimo funkcijas.
4. Galimybė integruoti/diferencijuoti virpesių duomenų formatus.
5. Galimybė sekti mašinų absoliučiuųjų virpesių greičių kvadratinėms vidurkių V_{RMS} pokytį, identifikuoti virpesių šaltinių ir t.t.
6. Portatyvinis, pritaikytas dirbti agresyviose aplinkose (oro drėgmė iki 95%, temp. > 50 °C).

Visų džiovyklinės grupės mašinų vedančiųjų velenų guoliai yra lėtaeigiai (~360 aps./min.). Virpesių energijai matuoti pasirinkti virpesių pagreičių pjezoakselometriniai keitikliai WR WILCONXON 797 (JAV).

Absoliučiuųjų virpesių energijai fiksuoti pasirinkti virpesių pagreičio keitikliai dėl šių priežasčių:

1. Virpesių pagreičio keitikliais galima guolių virpesių energiją fiksuoti plačiame dažnių intervale, todėl tai tinka tiek lėtaeigiams tiek greitaeigiems guoliams.
2. Didelis virpesių jautris 100mV/g.
3. Galimybė prijungti prie virpesių signalų analizatoriaus ADASH 4300-VA3.

Ekspimentiniams tyrimams atlikti pasirinkto panaudojimui pjezoakselometrinio virpesių pagreičio keitiklio WR WILCONXON 797 nuotrauka pateikta 3.2 pav.



3.2 pav. Pjezoakselometrinis keitiklis WR WILCONXON 797 (autorius nuotr.)

Pakartotinai ir patikimai tiriamų mašinų guolių virpesių energijai matuoti, išvengiant keitiklio prispaudimo prie guoliaviečių vienoda jėga paklaidų, pjezoakselometrinis virpesių pagreičių

AB „Klaipėdos kartonas“ eksploatuojamų džiovyklinių mašinų „INVERFORM“ vedančiųjų velenų guolių atramų absoliučią virpesių lygio matavimai atliekami atramų virpesių energiją fiksuojant ta kryptimi, kuri suteikia daugiausia charakteringos informacijos apie guolio techninę būklę (Barzdaitis V. ir kiti, 1998) . Matavimų taškų skaičius parinktas atsižvelgus į veikiančias jėgas. Matavimų taškai parinkti gerai matomose, lengvai prieinamose vedančiųjų velenų guoliaviečių vietose. Keitiklio tvirtinimo vietos pasirinktos taip, kad fiksuojami virpesiai kuo labiau atspindėtų matuojamo guolio sukeltus virpesius, t.y. kad nebūtų įtraukiami kitų vietinių mazgų rezonansiniai virpesiai, kurie stiprintų virpesių signalo amplitudę. Keitiklio orientavimo kryptys (iš viršaus ar iš apačios) parinktos atsižvelgiant į tai kaip ruošinys veikia vedantįjį veleną.

3.4. Eksperimentinių tyrimų atlikimo periodiškumas

3.1 lentelė. AB „Klaipėdos kartonas“ eksploatuojamų džiovyklinių mašinų grupių (IV, V, VI) vedančiųjų velenų guolių būklės tyrimų planuojamas grafikas

Eil. Nr.	Įrenginio pavadinimas	Tiriami guoliai	Tyrimų atlikimo data
1.	Džiovyklos „INVERFORM“ (IV, V, VI grupės)	1K-46K, 1D-46D.	2011 m. liepos mėn 14d.
2.	Džiovyklos „INVERFORM“ (IV, V, VI grupės)	1K-46K, 1D-46D.	2011 m. rugpjūčio mėn 12d.
3.	Džiovyklos „INVERFORM“ (IV, V, VI grupės)	1K-46K, 1D-46D.	2011 m. rugsėjo mėn 18d.

Guolių tyrimai atlikti savaitę prieš periodinį profilaktinį remontą (PPR), nes PPR metu buvo galima praktiškai patikrinti guolio techninę būklę, t.y. jį išardyti. Pagrindinis tikslas - rasti sąsajas tarp guolio defektų atsiradimo ir virpesių parametrų pokyčio, t.y. nustatyti tuos parametrus, kurie geriausiai charakterizuoja guolio techninę būklę.

3.5. Virpesių parametrų vertinimo metodika

Sukurta lėtaeigių riedėjimo guolių, esančių vedančiųjų velenų atramose, techninės būklės eksperimentinių matavimų metodika. Ši metodika sukurta remiantis ankstesniuose skyriuose aprašytais matavimo priemonės parinkimo ir matavimo taškų ant tyrimo objektų nustatymo metodikomis.

Visi tiriami guoliai priskiriami lėtaeigiams riedėjimo guoliams (~360 aps./min.) su standžiomis atramomis. Guolių virpesių intensyvumo vertinimas atliktas šia tvarka:

1. Vedančiųjų velenų atramų virpesių energija matuota pagal 3.3 dalyje pateiktą keitiklio tvirtinimo ant guoliaviečių metodiką.

2. Išmatuota virpesių energija išreikšta absoliučiąjų virpesių greičių kvadratinio vidurkio V_{RMS} reikšmėmis ir virpesių pagreičio kvadratinio vidurkio santykinė reikšme g_L .
3. Absoliučiąjų virpesių greičių kvadratinio vidurkio V_{RMS} reikšmės ir reali guolių techninė būklė lyginama su ISO 10816 – 3 rekomenduojamomis virpesių greičio kvadratinio vidurkio V_{RMS} reikšmėmis (ISO 10816 – 3, 2009).

3.2 Lentelė. Tarptautinio ISO 10816 - 3 standarto rekomenduojamos rotorinių mašinų, kurių nominali galia viršija 15 kW, absoliučiąjų virpesių greičių kvadratinio vidurkių V_{RMS} reikšmės

Atramos tipas	Virpesių intensyvumo sritis	Absoliučiąjų virpesių greičio kvadratinio vidurkio V_{RMS} reikšmė, mm/s
Standi atrama	A/B	2,30
	B/C	4,50
	C/D	7,10

3.2 lentelėje pateiktų rotorinių mašinų atramų virpesių intensyvumo sritys:

1. A virpesių intensyvumo sritis – pagal virpesių V_{RMS} dydį į šią virpesių sritį turi patekti tik ką pradėtos eksploatuoti mašinos (techninė būklė - gera);
2. B virpesių intensyvumo sritis - pagal virpesių V_{RMS} vertę, tokį virpesių intensyvumo lygį turinčias mašinas galima eksploatuoti nepertraukiamame ilgalaikiame darbo režime (techninė būklė - patenkinama);
3. C virpesių intensyvumo sritis - pagal užfiksuotą šioje srityje virpesių V_{RMS} reikšmę, teigiama, jog mašinų vibracinis aktyvumas yra padidintas ir nerekomenduojama mašinos eksploatuoti nepertraukiamo ilgalaikio darbo režimo sąlygomis. Tokio vibracinio aktyvumo mašiną galima eksploatuoti ribotą laikotarpį, kol atsiras galimybė pašalinti trūkumus, iššaukusius padidintą vibracinį aktyvumą;
4. D - pagal į šią sritį patenkančią užfiksuotą virpesių V_{RMS} reikšmę, mašiną eksploatuoti draudžiama, nes ją veikia didelio intensyvumo žalingi virpesiai, kurie gali būti mašinos, ar jos konstrukcijos elementų suardymo priežastimi.

3.6. Virpesių šaltinių identifikavimo metodika

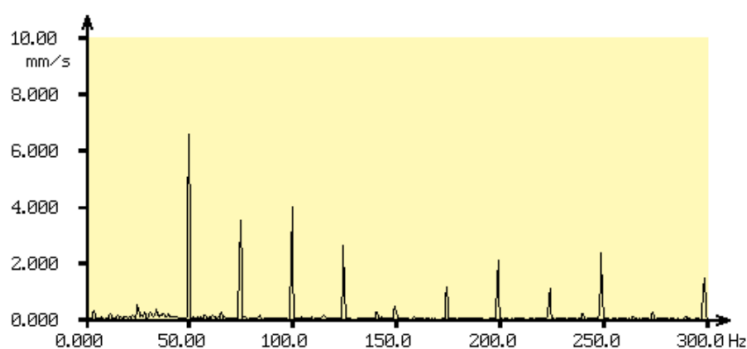
Tyrimo objektų virpesių šaltinių identifikavimo metodika pagrįsta greitos Furje transformacijos FFT (GFT liet.) spektrų analizės principais.

FFT virpesių greičių spektrinė analizė leidžia nustatyti defektus riedėjimo, slydimo, hidrodinaminio slydimo guoliuose, taip pat FFT pagalba nustatomas mašinos virpesių lygį sukėlęs

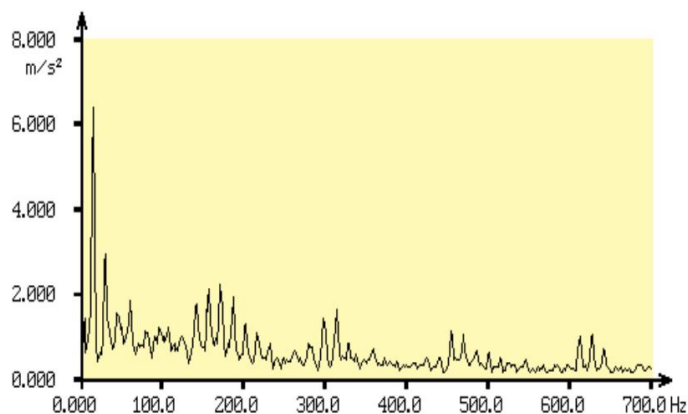
defektas, pvz. padidintas rotoriaus disbalansas, padidinti velenų bendraašiškumo nuokrypiai, mechaninių perdavų defektai ir kt.

Tirtų guolių absoliučiuųjų virpesių šaltinių identifikavimas atliktas šia tvarka:

1. Vadovaujantis tyrimo objektų elektros variklių pasais ir atlikus visos rotorinės sistemos kinematinę analizę nustatytas tiriamų guolių sukimosi greitis;
2. Guoliaviečių virpesiai matuojami pagal 3.3. skyriuje pateikta keitiklio tvirtinimo metodiką;
3. Kiekvienos guoliavietės virpesių signalai pamatuoti analizatoriumi A4300-VA3, nuo 0 Hz iki 1000 Hz virpesių dažnių intervale, nufiltruojant aukštesnių, kaip 1000 Hz dažnių virpesius;
4. Analizatorius apdoros duomenis atlikdamas greitą Furje transformaciją, pateikdamas virpesių greičio ir/arba virpesių pagreičio gaubiančiosios spektrus. Šių spektrų pavyzdžiai pateikti 3.5 ir 3.6 pav.;
5. Atlikus tirtų guolių virpesių energijos matavimus, visi virpesių signalų analizatoriuje A4300-VA3 išsaugoti virpesių duomenų formatai perkelti į personaliniame kompiuteryje esančią programinę įrangą DDS 2000;
6. Guolių virpesių šaltiniai identifikuoti išanalizavus absoliučiuųjų virpesių greičių ir pagreičių FFT spektrus.



3.5 pav. Absoliučiuųjų virpesių greičio FFT spektro pavyzdys (B. Eftekharnjad et al., 2011)



3.6 pav. Absoliučiuųjų virpesių pagreičio gaubiančiosios FFT spektro pavyzdys (B. Eftekharnjad et al., 2011)

Guolių defektų žadinamų kinematinų virpesių dažnių skaičiavimo formulės pateiktos 3.3 lentelėje.

3.3. lentelė. Guolių elementų, žadinamų kinematinų virpesių dažnių skaičiavimo formulės
(Mažeika P., 2008)

Nr.	Vidinis žiedas sukasi greičiu n_r , o išorinis nejuda;	Išorinis žiedas sukasi greičiu n_i , o vidinis žiedas nejuda
Separatoriaus žadinamų virpesių dažniai, Hz		
1	$f_{spv} = \frac{f_r}{2} \left(1 - \frac{d_r}{d_{vid}} \cos \alpha_0 \right)$	$f_{spi} = \frac{f_i}{2} \left(1 + \frac{d_r}{d_{vid}} \cos \alpha_0 \right)$
Vidinio žiedo riedėjimo takelių žadinamų virpesių dažniai, Hz		
2	$f_{vv} = z \frac{f_r}{2} \left(1 + \frac{d_r \cos \alpha_0}{d_{vid}} \right)$	$f_{vi} = z \frac{f_r}{2} \left(1 + \frac{d_r}{d_{vid}} \cos \alpha_0 \right)$
Išorinio žiedo riedėjimo takelių žadinamų virpesių dažniai, Hz		
3	$f_{iv} = z \frac{f_r}{2} \left(1 - \frac{d_r}{d_{vid}} \cos \alpha_0 \right)$	$f_{ii} = z \frac{f_i}{2} \left(1 - \frac{d_r \cos \alpha_0}{d_{vid}} \right)$
Rutuliukų arba ritinukų žadinamų virpesių dažniai, Hz		
4	$f_{rev} = f_r \frac{d_{vid}}{d_r} \left(1 - \left(\frac{d_r \cos \alpha_0}{d_{vid}} \right)^2 \right)$	$f_{rei} = f_i \frac{d_{vid}}{d_r} \left(1 + \left(\frac{d_r \cos \alpha_0}{d_{vid}} \right)^2 \right)$
<p>f_r – vidinio žiedo sukimosi greitis, Hz, $f_r = n_r/60$; f_i – išorinio žiedo sukimosi greitis, Hz, $f_i = n_i/60$; z – riedėjimo elementų (rutuliukų arba ritinukų) skaičius guolyje; d_r – riedėjimo elemento skersmuo; d_{vid} – vidurinio apskritimo, einančio per rutuliukų centrus, skersmuo; D ir d – išorinio ir vidinio žiedų skersmenys, atitinkamai; α_0 – riedėjimo elemento kontakto į riedėjimo takelį pradinis, ne dinaminis, kampas</p>		

Blogo riedėjimo guolio fiksavimo guoliavietėje žadinami dažniai apskaičiuojami:

$$f_{g.1} = 3 \cdot f_{rot.} \quad (1)$$

$$f_{g.2} = 5 \cdot f_{rot.}$$

Čia: $f_{rot.}$ - rotoriaus sukimosi dažnis, Hz.

IV. VIRPESIŲ MATAVIMAI

Virpesių matavimai buvo atlikti **ADASH A4300-VA3** virpesių signalų analizatoriumi. Eksperimentiniai matavimai atlikti pagal III skyriuje pateiktą metodiką. Eksperimentiniai matavimai atlikti bendrovėje AB „Klaipėdos kartonas“. Tyrimo objektas – džiovyklinės mašinos IV, V ir VI grupių tinklą vedančiųjų lėtaeigių velenų guoliai. Viso atlikti 92-ų guolių virpesių parametrų matavimai. Guolio markė SKF 21314-E/C3. Buvo išmatuoti šie virpesių parametrai:

1. Virpesių greičio kvadratinio vidurkio reikšmės V_{RMS} (dažnių intervale 10-1000 Hz);
2. Virpesių pagreičio kvadratinio vidurkio santykinė reikšmės g (dažnių intervale 5-16 kHz);
3. Virpesių pagreičio kvadratinio vidurkio santykinė reikšmės g_L (dažnių intervale 0,5-16 kHz);

Eksperimentinių matavimų metu gauti šie virpesių duomenų formatai:

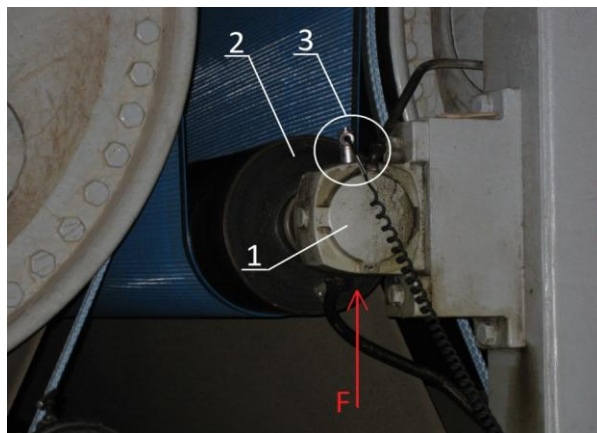
1. Virpesių greičių spektrai (FFT spektrai) dažnių intervale 0-1000 Hz;
2. Virpesių pagreičių spektrai (FFT spektrai) dažnių intervale 0-3200 Hz;
3. Virpesių greičių spektrai (FFT spektrai) dažnių intervale 0-6400 Hz;
4. Virpesių pagreičio priklausomybės nuo laiko grafiko analizė (ACMT) 4-ių sekundžių intervale.

Virpesių matavimams atlikti buvo naudojamas pjezoakslerometriniu virpesių pagreičio keitiklis WR WILCONXON 797 prijungtas prie virpesių signalų analizatoriaus ADASH A4300-VA3 paveikslas pateiktas 3.2 pav.

Pagreičio keitiklis serijinis numeris 47194, jautris 102 mV/g, paklaida $\pm 5\%$.

Žadinančių virpesių energija guoliuose matuota viena vertikalia kryptimi, nes didžiausios jėgos veikia vertikalia kryptimi (horizontalia ir ašinei kryptys matavimai nevykdyti). Virpesių keitiklis ant guolio atramos tvirtintas specialiu magnetu. Keitiklio tvirtinimo taškai pavaizduoti 3.3 pav.

Pagreičių keitiklis 3.2 pav. buvo tvirtinimas ant guoliavietės taip, kaip pavaizduota 4.1 pav.



4.1. pav. Keitiklio tvirtinimo schema (autoriaus nuotr.)

1 – guoliavietė; 2 – vedantysis velenas; 3 – pagreičių keitiklis; F – jėgos veikimo kryptis.

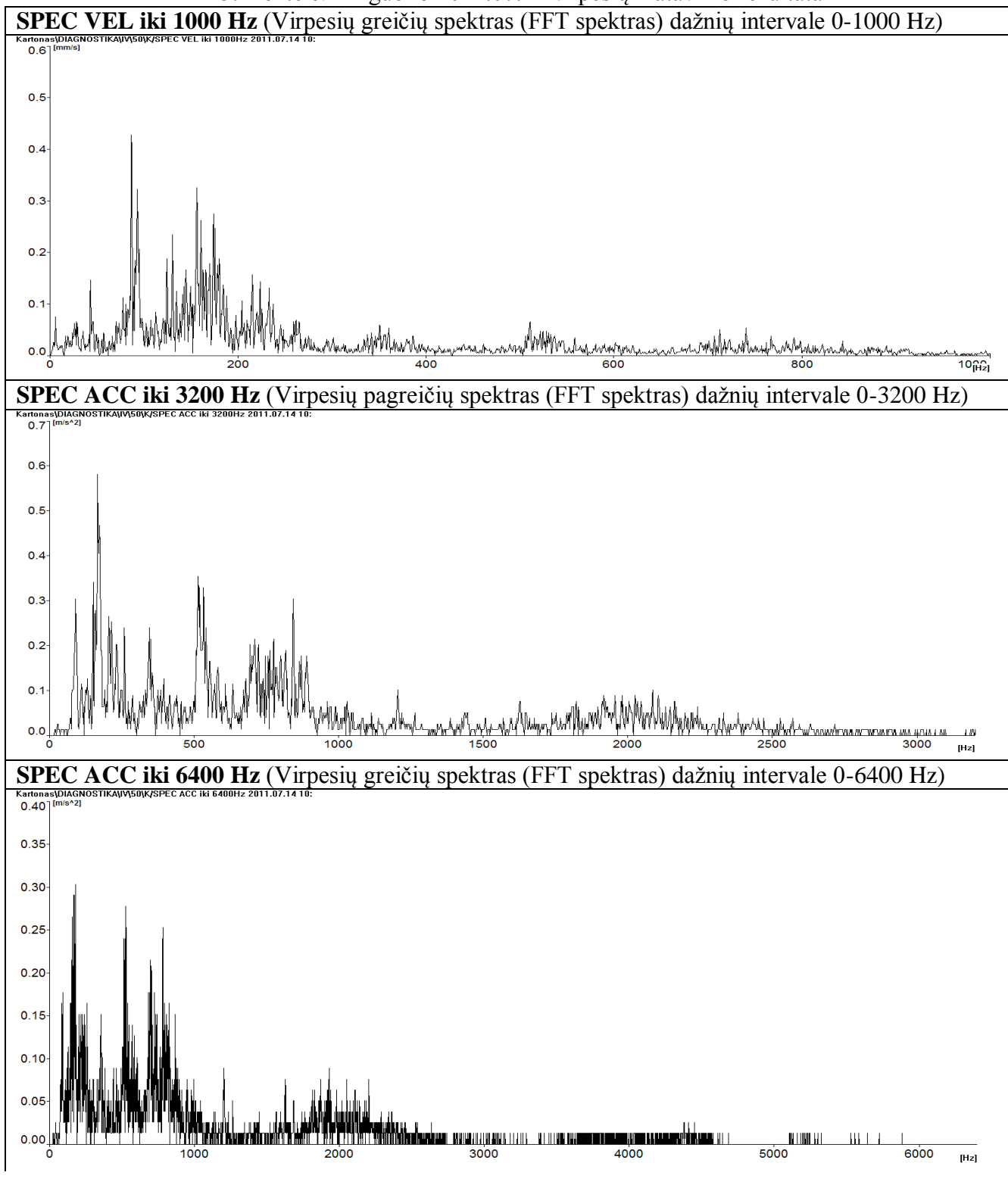
Prieš tvirtinant keitiklį guoliavietės korpusas buvo nuvalytas ir rasta lygiausia plokštuma guoliavietės paviršiuje, kad pagreičių keitiklis priglustu visa plokštuma. Keitiklis tvirtinamas magnetu. V džiovyklų grupė pavaizduota 2.1 pav. IV, V, VI džiovyklinių mašinų grupių konstrukcija yra vienoda, skiriasi tik džiovinimo būgnų ir vedančiųjų velenų skaičius. Viso 46 vedantieji velenai ir 46 džiovinimo būgnai.

Džiovyklų guoliai sunumeruoti nuo 1K iki 46K (kairė pusė) ir nuo 1D iki 46D (dešinė). Dešinioji pusė žiūrint į schemą esančią II skyriuje 2.3 paveiksle.

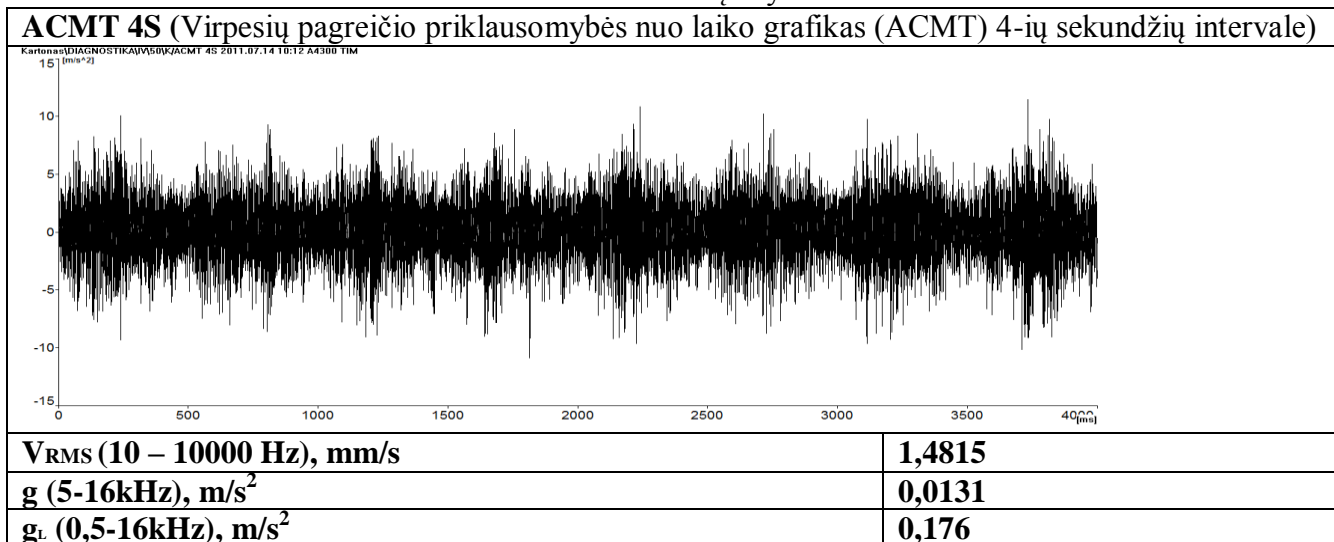
V. EKSPERIMENTINIŲ MATAVIMŲ REZULTATAI

Ekspirimentinių matavimų metu išmatuoti guolių virpesių greičių ir pagreičių parametrai (V_{rms} , g (5-16kHz), g (0,5-16kHz)) bei gauti įvairių dažnių greičio ir pagreičio FFT spektrai. Atlikus matavimus kiekvieno guolio virpesių parametrus charakterizavo trys skaitinės reikšmės bei keturi grafikai 5.1 lent.

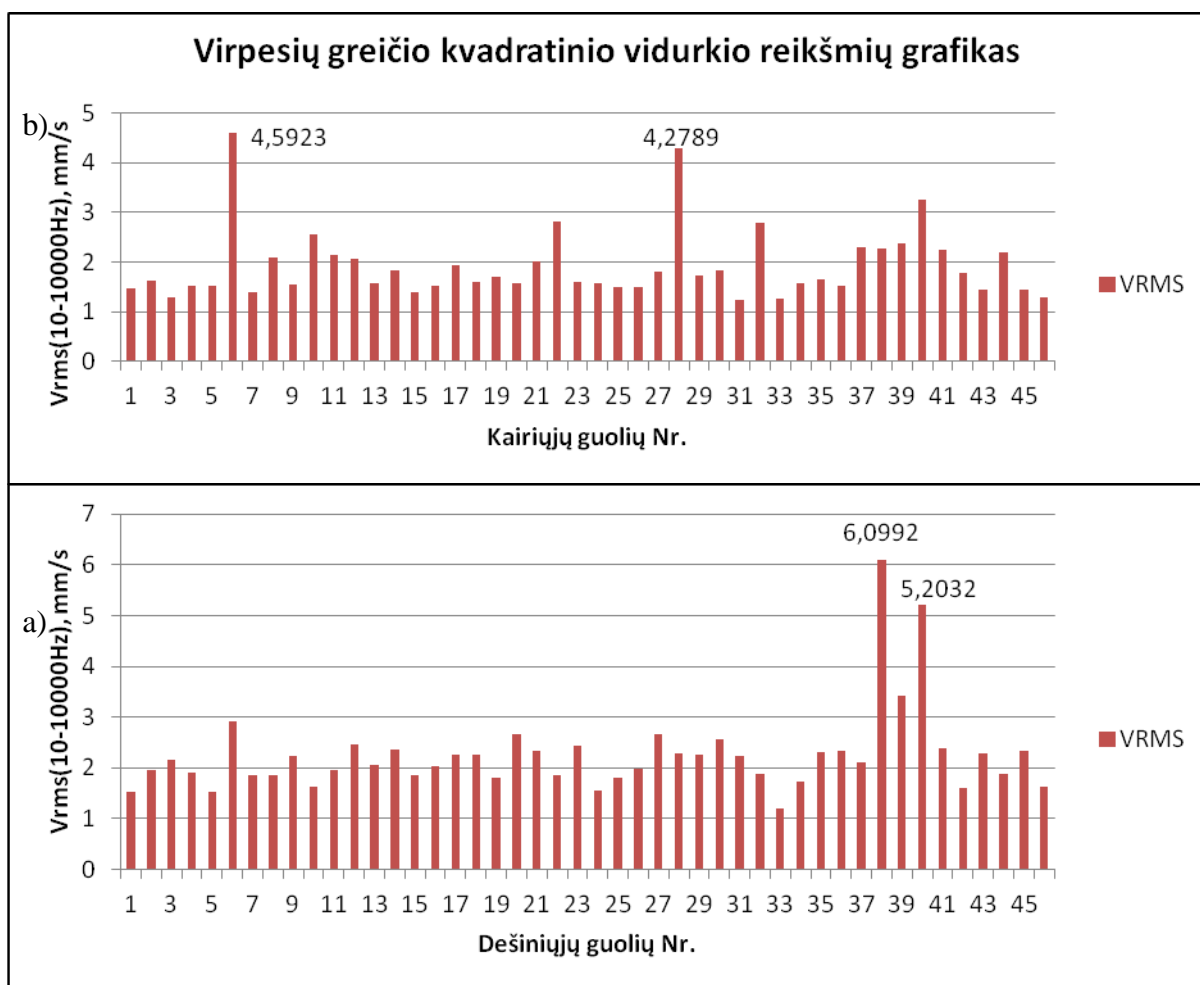
5.1 lentelė. 1K guolio 2011.07.14 virpesių matavimo rezultatai



5.1 lentelės tęsinys



Išanalizavus eksperimentinių matavimų duomenis buvo galima daryti išvadas, kuris parametras (-ai) geriausiai leidžia identifikuoti besivystančius guolių defektus. 5.1 pav. pateiktas tirtų guolių virpesių greičio kvadratinio vidurkio grafikas (dažnių intervale 10-1000 Hz).



5.1 pav. virpesių greičio kvadratinio vidurkio reikšmių grafikas.

a) Kairiųjų guolių; b) Dešiniųjų guolių.

Grafike matoma didžiausia V_{rms} reikšmė (38D guolis). Iš šių duomenų buvo padaryta prielaida, jog guoliai, kurių numeriai 6K, 28K, 38D, 40D (1 priedas) yra pažeisti, nes jų virpesių lygis yra aukštas palyginus su kitais guoliais. Taigi, periodinio planinio remonto metu (2011.07.22) AB „Klaipėdos kartonas“ gamykloje buvo revizuoti guoliai 38D ir 40D patikrinta jų techninė būklė.

Prielaida nepasitvirtino, guoliai buvo be defektų. Išvada - virpesių greičių kvadratinio vidurkio reikšmės (dažnių intervale 10-1000 Hz) analizė negali būti taikoma šių guolių techninei būklei įvertinti.

Buvo mėginama rasti statistinę priklausomybę tarp virpesių greičio V_{rms} kvadratinio vidurkio ir kvadratinio vidurkio santykinės reikšmės g (5-16kHz) bei g_r (0,5-16kHz). Tam tikslui atliekami skaičiavimai:

1. Sudaroma rezultatų lentelė kuri pateikta prieduose (1 priedas).
2. Nustatoma ar yra koreliacinė priklausomybė tarp V_{rms} (X) ir g (Y) (K. Bučys, 2006, 142p.):

$$r_{xy} = \frac{N \sum_{i=1}^N X_i Y_i - \sum_{i=1}^N X_i \sum_{i=1}^N Y_i}{\sqrt{\left[N \sum_{i=1}^N X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N X_i \right)^2 \right] \cdot \left[N \sum_{i=1}^N Y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N Y_i \right)^2 \right]}}; \quad (2)$$

čia \bar{X} ir \bar{Y} vidurkiai, N – imties dydis.

Apskaičiuojamos sumos:

$\sum_{i=1}^{92} X_i = 1,4815 + 1,6215 + 1,2961 + 1,5195 + \dots + 1,6202 = 191,823$
$\sum_{i=1}^{92} Y_i = 0,0131 + 0,0403 + 0,0049 + 0,0584 + \dots + 0,0146 = 3,271$
$\sum_{i=1}^{92} X_i^2 = 1,4815^2 + 1,6215^2 + 1,2961^2 + 1,5195^2 + \dots + 1,6202^2 = 456,658$
$\sum_{i=1}^{92} Y_i^2 = 0,0131^2 + 0,0403^2 + 0,0049^2 + 0,0584^2 + \dots + 0,0146^2 = 0,1913$
$\sum_{i=1}^{92} Y_i X_i = 1,4815 \cdot 0,0131 + 1,6215 \cdot 0,0403 + \dots + 1,6202 \cdot 0,0146 = 7,261$

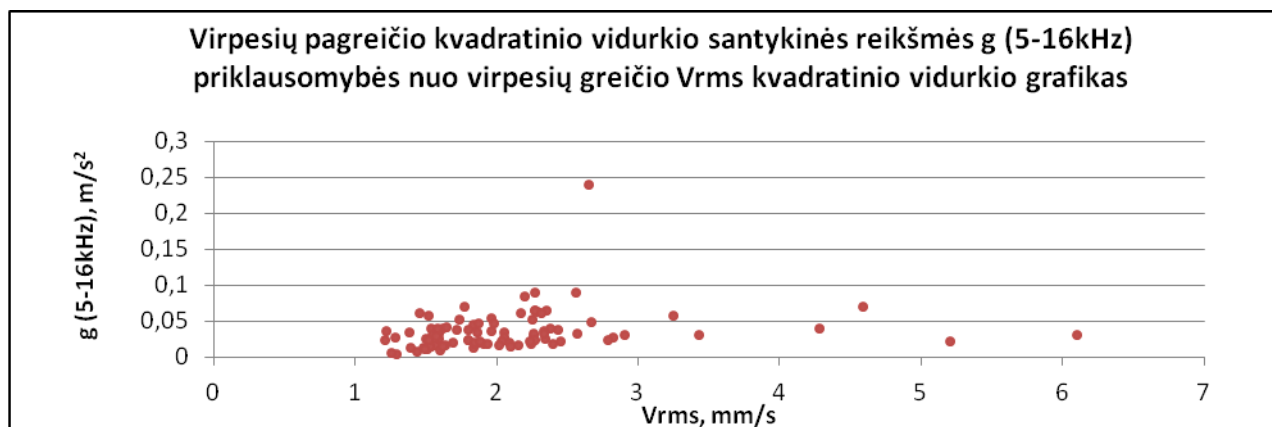
Dabar gautas skaitines reikšmes įstatę į (1) formulę, gausime:

$$r_{xy} = \frac{92 \cdot 7,261 - 191,823 \cdot 3,271}{\sqrt{\left[92 \cdot 456,658 - 191,823^2 \right] \cdot \left[92 \cdot 0,1913 - 3,271^2 \right]}} = 0,449.$$

3. Koreliacinio ryšio stiprumai:

$r_{xy}(1 \div 0,95)$ - labai stiprus ryšys, $r_{xy}(0,95 \div 0,7)$ - stiprus ryšys, $r_{xy}(0,7 \div 0,5)$ - vidutinis, $r_{xy} < 0,5$ - ryšys silpnas. r_{xy} reikšmės gali būti nuo -1 iki 1. Jei $r_{xy} = 0$ - ryšio nėra. Minuso ar pliuso ženklas apibudina ar ryšio grafikas yra mažėjantis ar didėjantis (J. Janutėnienė, 2008).

4. Atlikus skaičiavimus galima daryti išvadą jog V_{rms} (X) ir g (Y) dydžiai turi silpną tarpusavio priklausomybę (5.2 pav.).



5.2 pav. Parametų priklausomybės grafikas

Pritaikius regresinę analizę galima nustatyti kaip kinta virpesių pagreičio kvadratinio vidurkio santykinė reikšmė g (5 – 16 kHz) kai kinta virpesių greičio kvadratinio vidurkio reikšmė V_{rms} .

Kai regresijos lygtis yra tiesė $y=ax+b$, jos koeficientus a , b galima rasti pasinaudojus mažiausių kvadratų metodu sprendžiant sistemą (V_{rms} (X) ir g (Y)) (K. Bučys, 2006, 142p.):

$$\begin{cases} a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i y_i, \\ a \sum_{i=1}^n x_i + nb = \sum_{i=1}^n y_i. \end{cases} \quad (3)$$

čia a, b – regresinės lygties koeficientai,
 y_i – i -itasis y elementas,
 x_i – i -tasis x elementas.

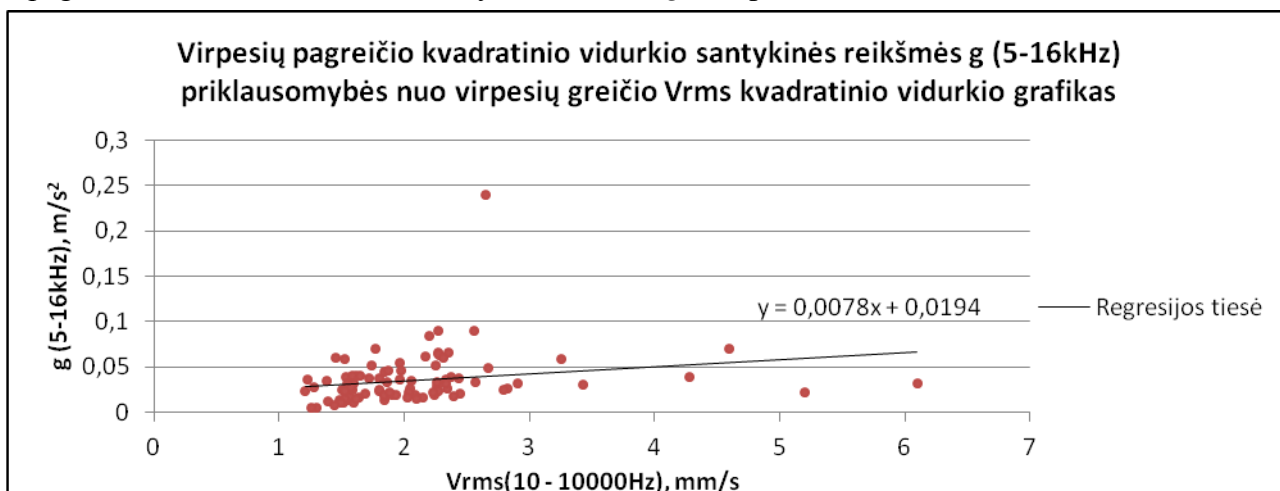
Apskaičiuojame sumas:

$\sum_{i=1}^{92} X_i = 1,4815 + 1,6215 + 1,2961 + 1,5195 + \dots + 1,6202 = 191,823$
$\sum_{i=1}^{92} Y_i = 0,0131 + 0,0403 + 0,0049 + 0,0584 + \dots + 0,0146 = 3,271$
$\sum_{i=1}^{92} X_i^2 = 1,4815^2 + 1,6215^2 + 1,2961^2 + 1,5195^2 + \dots + 1,6202^2 = 456,658$
$\sum_{i=1}^{92} Y_i X_i = 1,4815 \cdot 0,0131 + 1,6215 \cdot 0,0403 + \dots + 1,6202 \cdot 0,0146 = 7,261$

Apskaičiuotus dydžius įstatome į sistemą, kad galėtume apskaičiuotume koeficientus a ir b :

$\begin{cases} 456,658a + 191,823b = 7,261 \\ 191,823a + 92b = 3,271 \end{cases}$	$\begin{aligned} a &= 0,0078; \\ b &= 0,0194; \end{aligned}$
Užrašome regresijos lygtį pavidalu: $y = 0,0078x + 0,0194$	

Apskaičiavus regresijos lygti galima daryti išvada, jog didėjant reikšmei V_{rms} didėja ir virpesių pagreičio kvadratinio vidurkio santykinė reikšmė g (5.3 pav.).



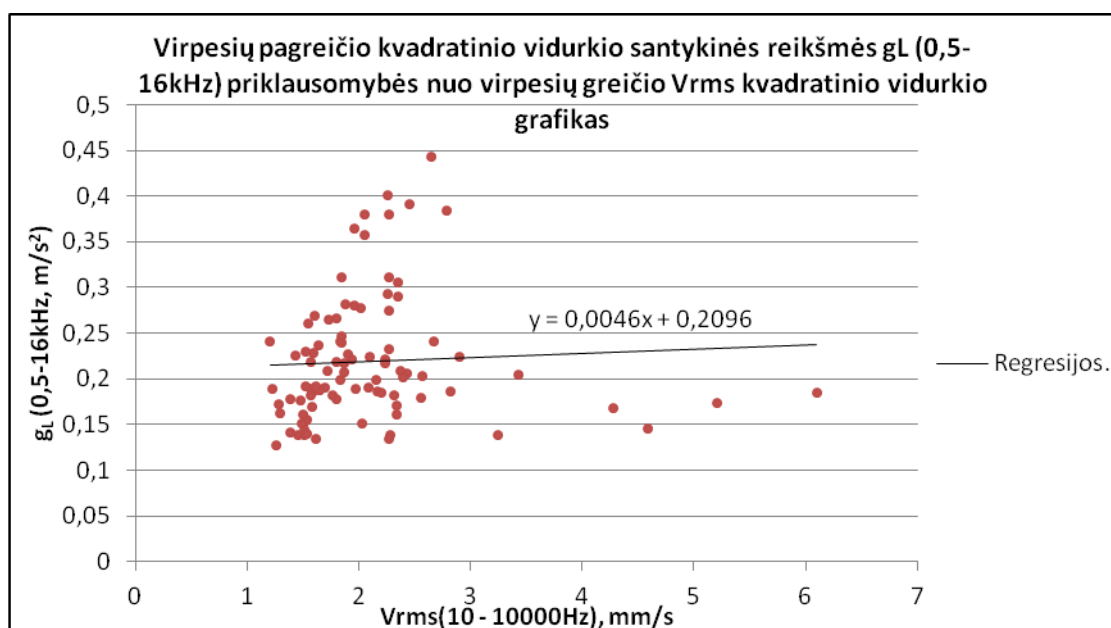
5.3 pav. Parametrų priklausomybės bei regresijos tiesės grafikas

Analogiškai apskaičiuojame koreliacinę priklausomybę tarp V_{rms} (X) ir g_L (Y), atliekame regresinę analizę, braižome grafikus. Duomenys imami iš priedų (1 priedas). Tarpiniai rezultatai pateikti 5.2 lentelėje.

5.2. lentelė. Tarpiniai rezultatai.

Reikšmė	rezultatas
Koreliacinė priklausomybė tarp V_{rms} (X) ir g_L (Y)	$r_{xy} = 0,423$
Regresijos lygtis	$y = 0,0046x + 0,2096$

Atlikus skaičiavimus galima teigti, jog koreliacinė priklausomybė tarp V_{rms} (X) ir g_L (Y) yra silpna (5.4 pav.).

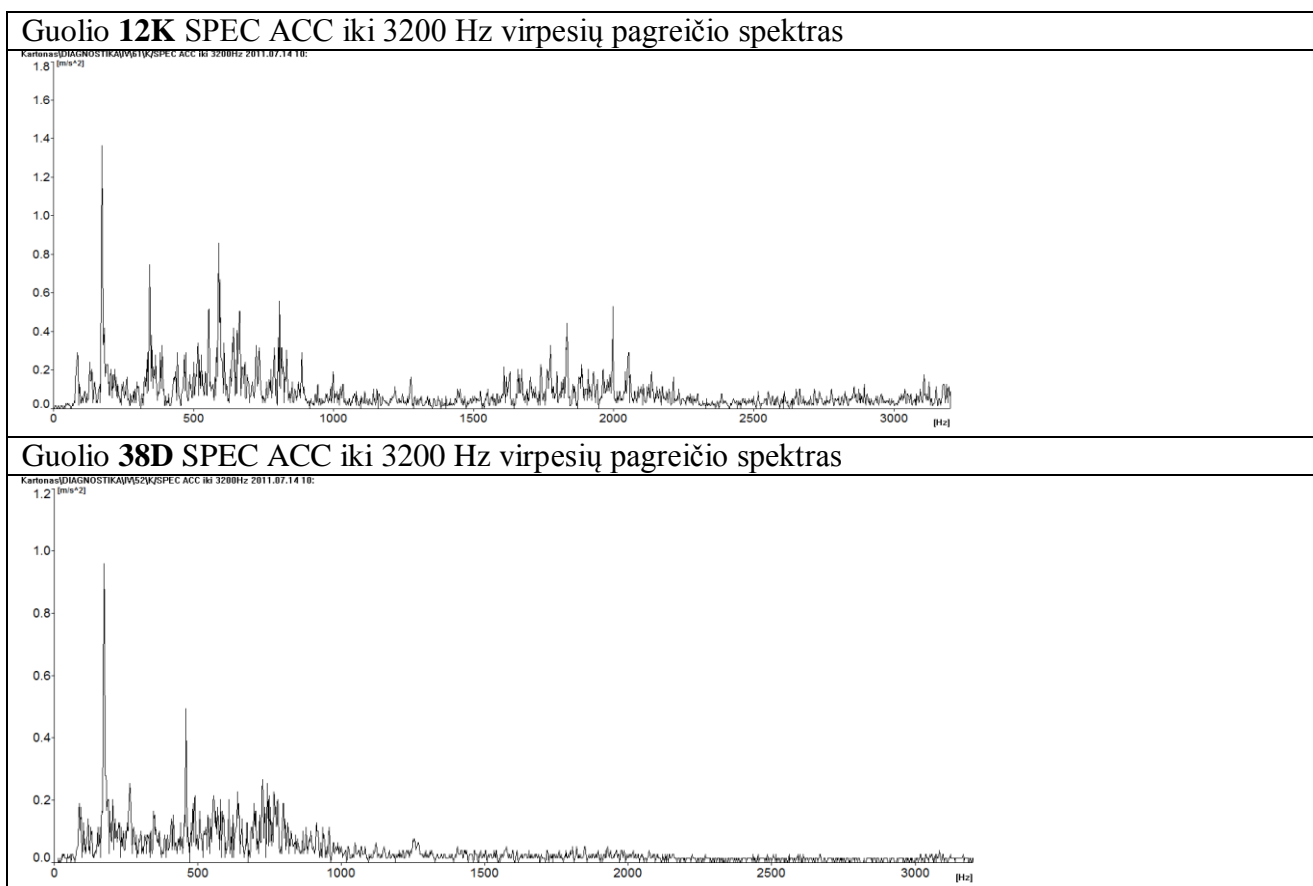


5.4 pav. Parametrų priklausomybės grafikas bei regresijos tiesės grafikas

Apskaičiuavus regresijos lygti galima daryti išvada, jog didėjant reikšmei V_{rms} didėja ir virpesių pagreičio kvadratinio vidurkio santykinė reikšmė g_t (5.4 pav.).

Atlikus virpesių parametrų V_{rms} , g (5-16kHz) ir g (0,5-16kHz) analizę nustatyta, jog šie parametrai necharakterizuoja guolio techninės būklės. Kitų matavimų metu (2011.08.12) vėl buvo matuojami visų 92 guolių virpesių parametrai. Duomenų analizei atlikti buvo naudojama kompiuterinė programinė įranga DDS2000 (EPRO, Vokietija). Analizuojant ir lyginant guolių FFT spektrus (2011.07.14 su 2011.08.12) 38D ir 40D guolio, kurie buvo išmontuoti 2011.07.22 PPR metu ir techniškai tvarkingi, virpesių parametrai buvo lyginami su kitų guolių virpesių parametrais gautais per 2011.08.12 matavimus.

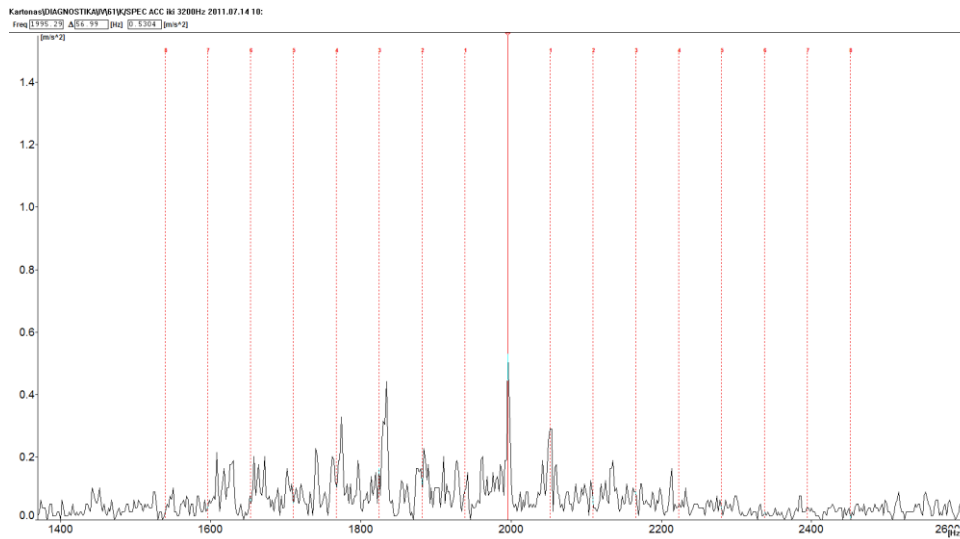
Atliekant spektrų analizę buvo pastebėta, jog 12K guolio SPEC ACC iki 3200 Hz virpesių pagreičio spektras turi esminių skirtumų lyginant su techniškai tvarkingo guolio 38D virpesių pagreičio spektru 5.5 pav.



5.5 pav. 12K ir 38D guolių virpesių pagreičių spektrai

Reikia atkreipti dėmesį į 12K guolio virpesių spektrą nuo 1000Hz, kur matomas padidėjęs virpesių pagreitis, tačiau ar jį sukėlė defektai esantys guolyje, ar aplinkinių elementu virpesiai, įvertinsime naudodami programinę įrangą DDS2000.

5.6 pav. pavaizduotas padidintas 12K guolio virpesių pagreičio spektras (0 – 3200 Hz).



5.6 pav. Padidintas 12K guolio SPEC ACC iki 3200 Hz virpesių pagreičio spektras

Kaip matome, FFT spektro amplitudė harmoniškai atsikartoja kas 56,99 Hz. Tai reiškia, jog virpesiai žadinami defekto esančio guolyje (3 skyrius, 2.3 lentelė). Guolio defektų vieta identifikuojama pagal žadinamų kinematinių dažnių kaimynines harmonikas. Jei neįmanoma identifikuoti kaimyninių harmonikų, vadinasi virpesiai gali būti sukelti ne defekto esančio guolyje, o aplinkinių elementų keliamų virpesių. Tokiu atveju derėtų guolio matavimus atlikti pakartotinai.

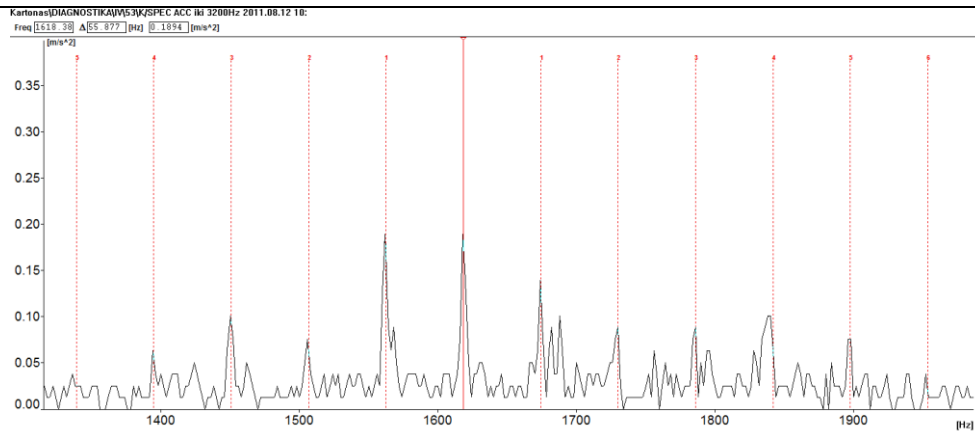
5.3 lentelėje pateikti defektų žadinami dažniai, kai riedėjimo guolio vidinio žiedo apsisukimai ~ 373 aps/min. Reikšmės apskaičiuotos pagal III skyriaus 3.3 lentelės formules.

5.3 lentelė. Defekto žadinamų virpesių dažniai

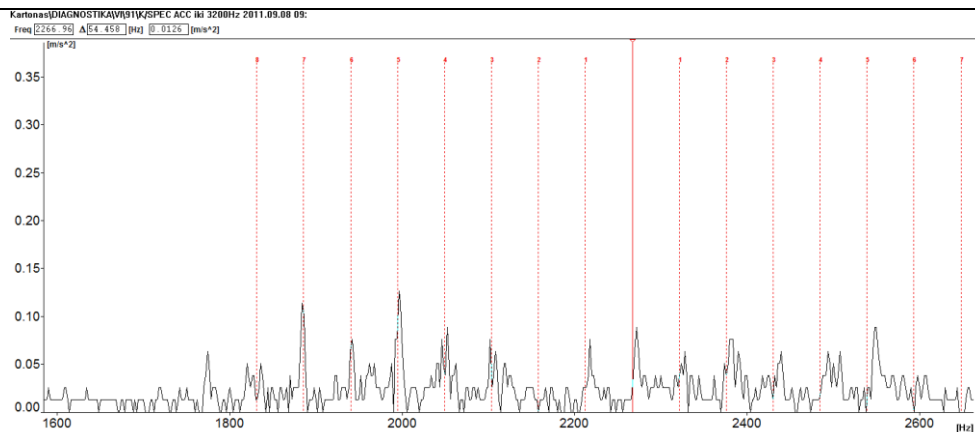
f_{vid}	74,4 Hz
$f_{išor}$	56,2 Hz
$f_{ried.el.}$	43,3 Hz

Remiantis prielaida, jog lėtaeigių guolių defektus charakterizuoja SPEC ACC iki 3200 Hz virpesių pagreičių spektras, buvo išanalizuoti eksperimentinio bandymo rezultatai, kurie buvo gauti 2011.08.12 ir nustatyti dar du guoliai, kurie galimai yra pažeisti ir juos reikėtų pakeisti artimiausiu metu. Jų FFT iki 3200 Hz virpesių pagreičių spektrai pavaizduoti 5.7 pav.

4K SPEC ACC iki 3200Hz



43K SPEC ACC iki 3200Hz



5.7 pav. 4K ir 43K guolių virpesių pagreičių spektrai.

Planinio periodinio remonto metu (2011.08.26) demontavus galimai defektinius guolius buvo nustatyta, jog 12K guolis buvo pakeistas, prasidėjęs irimo procesas guolio išoriniame žiede 5.8 pav.

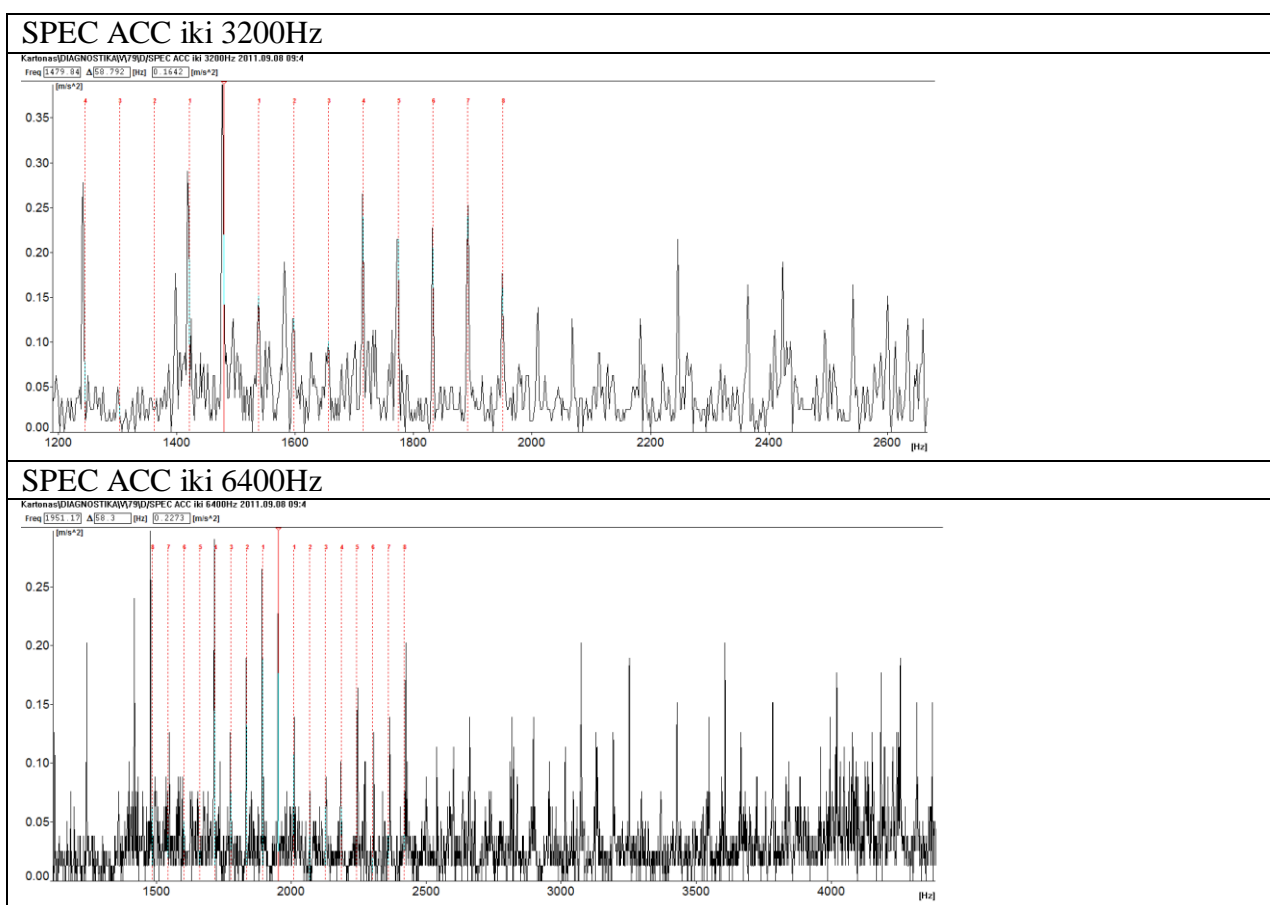


5.8 pav. 12K guolio defektas išoriniame žiede (autoriaus nuotr.)

Defekto žadinamas kinematinio dažnio kaimyninės harmonikos buvo 56,99 Hz kas rodė, jog yra sužalotas guolio išorinio žiedo riedėjimo takelis ir tai praktiškai buvo pasitvirtinta demontavus guolį.

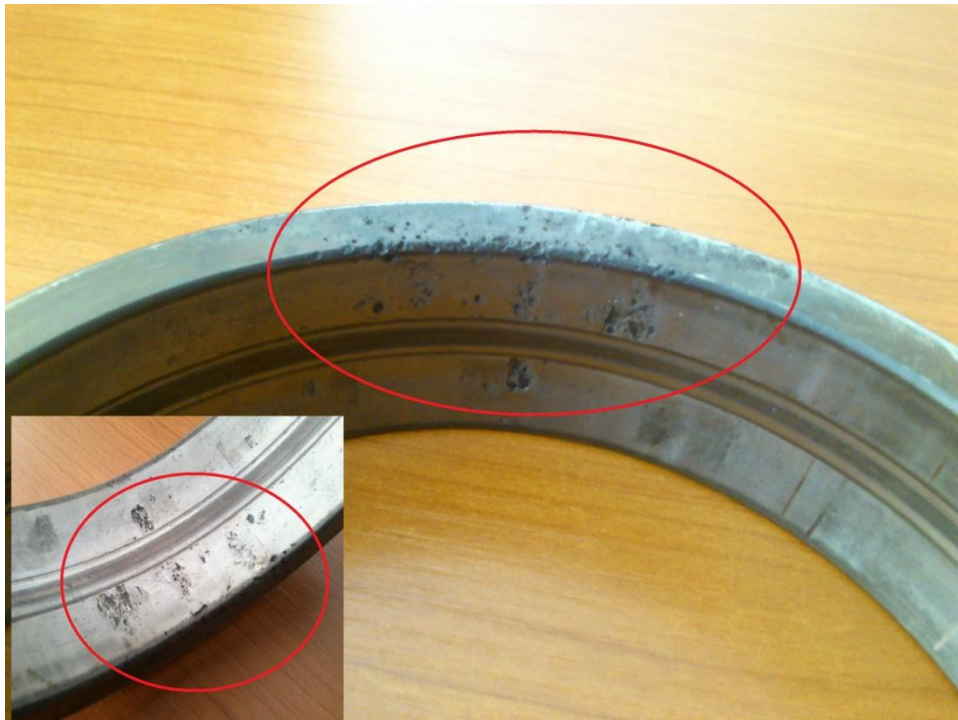
Kitų dviejų guolių 4K ir 43K defektų be specialios įrangos įžiūrėti nebuvo įmanoma, tačiau FFT grafikai rodė, jog irimo procesas jau yra prasidėjęs. Tokius guolius galima eksploatuoti, tačiau reikia nuolatos matuoti SPEC ACC iki 3200 Hz virpesių pagreičių spektrą.

Išanalizavus sekančių matavimų atliktų 2011.09.18 duomenis buvo aptikti dar du numanomai defektuoti guoliai 30D ir 26D, kurių virpesių pagreičių spektrai buvo sąlyginai aukšti. Žadinamų kinematinio dažnių kaimyninės harmonikos buvo atitinkamai 58,79Hz ir 56,2Hz, kas leido manyti jog defektai yra guolio išoriniame žiede. 30D guolio virpesių pagreičių spektras pavaizduotas 5.9 pav.



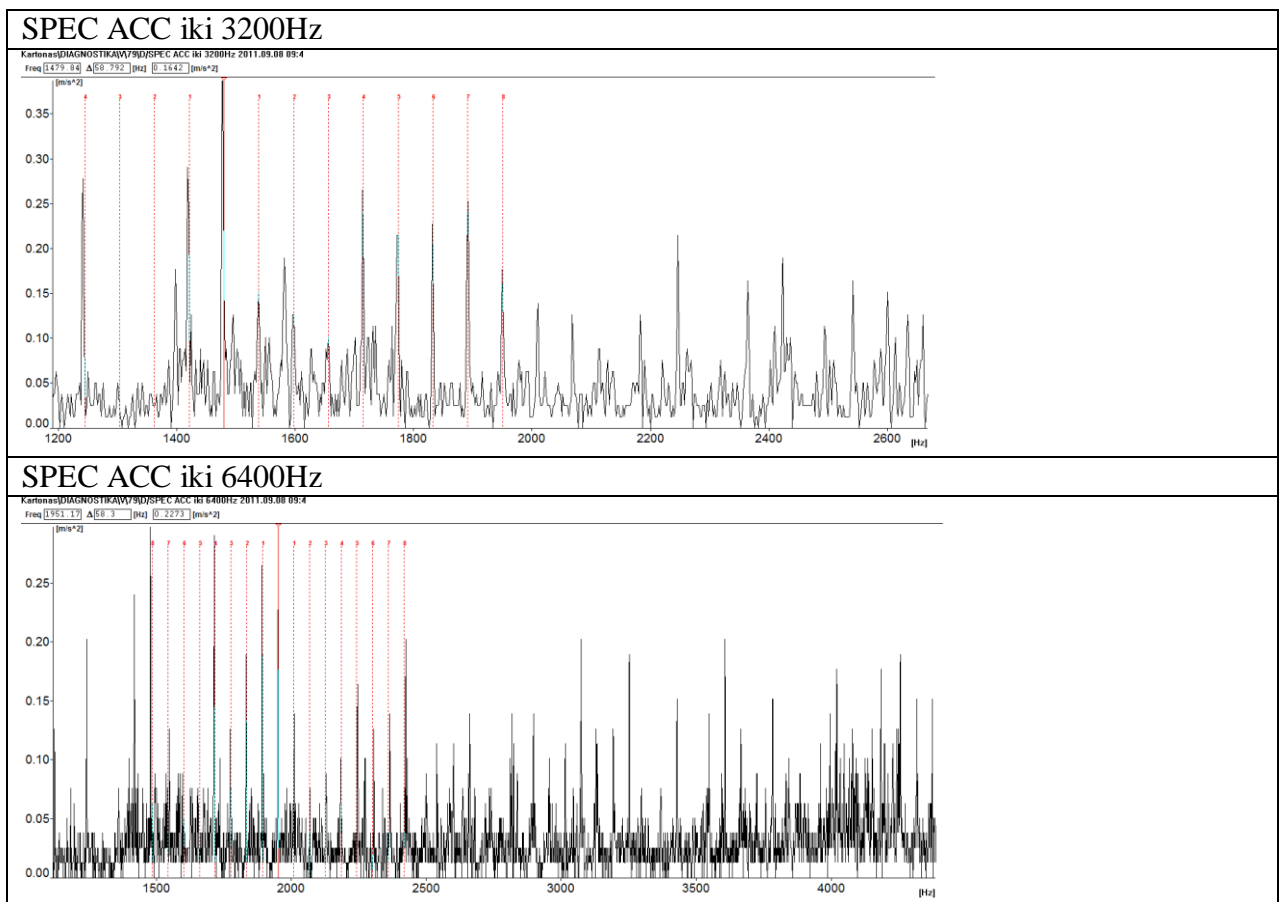
5.9 pav. 30D guolio virpesių pagreičių spektras

Planinio periodinio remonto (2011.09.24) metu 30D guolis buvo demontuotas ir revizuotas. Metodo patikimumas buvo dar kartą patvirtintas, guolio išoriniame žiede buvo matomi defektai 5.10 pav.



5.10 pav. 30D guolio defektas išoriniame žiede (aut. nuotrauka)

To paties planinio periodinio remonto metu taip pat buvo revizuotas guolis, kurio numeris 26D. Guolio virpesių pagreičių spektras pavaizduotas 5.11 pav.



5.11 pav. 30D guolio virpesių pagreičių spektras

Atlikus reviziją defekto prielaida pasitvirtino, guolio išoriniame žiede, o taip pat ir riedėjimo elementuose buvo matomi ryškūs sužeidimai. Revizuoto guolio nuotrauka pateikta 5.12 pav.



5.10 pav. 26D guolio defektas išoriniame žiede (aut. nuotrauka)

Atlikus eksperimentinių matavimų analizę buvo nustatyta, jog ryškūs defektai guolyje matomi kai FFT iki 3200 Hz FFT spektro amplitudė, analizuojant nuo 1000Hz, viršija arba yra lygi $0,4m/s^2$. Eksperimentų analizės metu nebuvo nustatyta per kokį laiko tarpą nežymus ankstyvos stadijos defektas (amplitudė iki $0,2m/s^2$) išsivysto į defektą, kuris demontavus guolį matosi akivaizdžiai be jokios papildomos įrangos. Norint nustatyti kiek laiko tai užtrunka, reikalingas nuolatinis guolio stebėjimas matuojant virpesių parametrus. 5.4 lentelėje pateiktas guolio techninės būklės vertinimas.

5.4 lentelė. guolio defektai

Spec ACC iki 3600Hz amplitudė nuo 1000Hz:	PASTABA
$< 0,2m/s^2$	Guolio defektai ankstyvoje stadijoje, eksploatuoti galima*
$< 0,4m/s^2$	Guolio defektai vystymosi stadijoje, eksploatuoti galima, tačiau reikia stebėti SPEC ACC iki 3200 Hz laiko grafiką nuo 1000 Hz*
$> 0,4m/s^2$	Guolį reikia pakeisti kaip įmanoma greičiau*

* reikia įsitikinti ar FFT spektro amplitudė harmoniškai atsikartoja 5.3 lent.

Taigi, atlikus eksperimentinių rezultatų analizę buvo nustatyta pagal kokį duomenų formatą galima spręsti apie guolio techninę būklę bei defekto formavimosi vietą guolyje.

IŠVADOS

1. Darbe atlikta lėtaeigių ir greitaeigių rotorių guolių defektų diagnostikos mokslinių straipsnių apžvalga. Apžvelgta dvylika straipsnių nesenėsių kaip 2008 m. Pastebėta, jog kuriami diagnostikos metodai yra pagrindinai orientuoti į greitaeigių rotorių riedėjimo guolių defektų diagnostiką.

2. Išanalizavus mokslinius tyrimo darbus nustatyti pagrindiniai riedėjimo guolių diagnostikos metodai: virpesių amplitudės faktoriaus K_a (Crest) ir virpesių formos K_f faktoriaus (Kurtosis), pagreičių gaubiančiosios, virpesių formos pagreičio K_f ir gaubiančiosios, virpesių signalo spektrinės analizės (FFT), akustinės emisijos metodai. Tyrimuose daugiausia dėmesio skiriama jau sukurtų metodų analizei ir tobulinimui. Moksliniuose darbuose aprašytos atrastos sąsajos tarp akustinės emisijos energijos dydžio ir pradinių defektų atsiradimo lėtaeigiame guolyje, guolio defekto dydžio ir virpesių amplitudės, akustinės emisijos amplitudės ir defekto pločio. Sukurti nauji metodai skirti virpesių signalui filtruoti: „Wiener“ filtras, modifikuotas morfologinis metodas, „Morlet“ filtras. Taip pat, remiantis eksperimento duomenimis, buvo nustatyta, jog akustinės emisijos metodu gautas riedėjimo guolio defekto virpesių spektras yra mažiau informatyvus nei virpesių amplitudės ir virpesių formos faktorių metodais gautas spektras.

3. Nustatytos pagrindinės problemos diagnozuojant riedėjimo guolių defektus:

- Užfiksuotas virpesių signalas kupinas pašalinių virpesių.
- Virpesių signalų interferencija.
- Tinkamo analizės metodo parinkimas ir tinkamas virpesių signalo filtravimas.
- Lėtaeigių guolių žadinamų virpesių silpnumas.

4. Apžvelgti virpesių matavimo ir analizavimo prietaisai: Adash A4300-VA3, CoCo – 80, Pocket AE – 2, Leonova Infinity, SKF Microlog Analyzer AX, Analyzer - Type 2250 H.

5. Eksperimentinio tyrimo objektas (trys „INVERFORM“ džiovyklų mašinos) yra naudojamas popieriaus gamybos pramonėje. Kiekviena mašina yra sudaryta iš jėginės pavaros (elektros variklio ir reduktoriaus), popieriaus džiovinimo būgnų (16) ir vedančiųjų velenų (16). Šių mašinų eksploatavimo praktika parodė, kad dažniausiai neprognozuojamai sugenda vedančiųjų velenų guoliai (21314-E/C3), todėl neprognozuojamai ir priverstinai stabdoma visa popieriaus gamybos linija remontui. Dėl šios priežasties magistriniame darbe buvo sukurta vedančiųjų velenų guolių techninės būklės įvertinimo ir defektų identifikavimo metodika mašinoms dirbant natūralios eksploatacijos sąlygomis.

6. Džiovyklų mašinų (jų nestabdant ir neardant) vedančiųjų velenų guolių tyrimų metodika paremta guolių virpesių parametrų matavimo ir šių parametrų analizės metodais.

7. Guolių virpesių matavimams parinktas portatyvinis virpesių signalų analizatorius A4300-VA3 (ADASH, Čekija) ir kompiuterinė programinė įranga DDS2000 (EPRO, Vokietija). Virpesiai buvo matuojami virpesių pagreičių keitliu (Wilcoxon 797, JAV).

8. Vedantieji velenai guolius veikia (apkrauna) pagrinde tik radialine kryptimi, todėl vedančiųjų velenų guolių virpesiai buvo matuojami tik vertikalia kryptimi (ta kryptimi, kuria velenas guolį veikia didžiausia jėga), kaip kad reglamentuoja tarptautinis ISO 10816-3 standartas.

9. Eksperimentiniai matavimai vyko magistrantūros studijų III-ąjį semestrą. Tyrimo objekto periodinis planinis remontas (PPR) vyko vieną kartą per mėnesį, todėl eksperimentiniams rezultatams patikrinti guolių virpesių matavimai buvo atliekami preliminariai taip pat vieną kartą per mėnesį (1 savaitę prieš PPR) – nuo 2011 m. liepos mėn. iki 2011 m. rugsėjo mėn. (viso 3 matavimai).

10. Vedančiųjų velenų guolių techninei būklei įvertinti ir defektų diagnostikai atlikti, buvo analizuojami šie rotorinių mašinų virpesių tyrimuose naudojami informatyviausi virpesių parametrai ir duomenų formatai:

- virpesių greičio kvadratinio vidurkio vertė V_{RMS} (dažnių intervale 10-1000 Hz);
- virpesių pagreičio kvadratinio vidurkio santykinė vertė g (dažnių intervale 5-16 kHz);
- virpesių pagreičio kvadratinio vidurkio santykinė vertė g_L (dažnių intervale 0,5-16 kHz);
- virpesių greičių spektrai (FFT) dažnių intervale 0-1000 Hz;
- virpesių pagreičių spektrai (FFT) dažnių intervale 0-3200 Hz;
- virpesių greičių spektrai (FFT) dažnių intervale 0-6400 Hz.
- virpesių greičio ir pagreičio laiko grafikai (tame tarpe ir ACMT – Adash Compressed Time).

11. Džiovyklinės mašinos (IV, V ir VI grupių) tinklą vedančiųjų lėtaeigių velenų guolių (viso 92 guoliai) virpesių eksperimentinių matavimo rezultatų ir periodinio planinio remonto (PPR) metu atlikta vizualinė guolių analizė parodė, kad šių guolių techninę būklę tiksliausiai įvertinti ir defektus identifikuoti galima tik išanalizavus guolio virpesių pagreičių spektrą (nuo 1000 Hz iki 3200 Hz). Tirtų guolių defektai identifikuojami pagal apskaičiuotus guolių žadinamų kinematinis dažnius.

12. Eksperimentiškai nustatyta, jog virpesių pagreičių spektre (nuo 1000 Hz iki 3200 Hz), dominuojant guolio kinematinį dažnių virpesių amplitudėms iki $0,2 \text{ m/s}^2$, guolis yra pažeistas nežymiai. Tačiau virpesių amplitudei pasiekus $0,4 \text{ m/s}^2$ reikšmę, guolis yra ženkliai pažeistas (jis yra defektinis ir jį rekomenduojama keisti nauju).

LITERATŪRA

1. M. Elforjani, D. Mba. 2009. Accelerated natural fault diagnosis in slow speed bearings with Acoustic Emission. *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 77, p. 112 – 127.
2. M. Elforjani, D. Mba. 2009. Natural mechanical degradation measurements in slow speed bearings. *Engineering Failure Analysis*, vol. 16, 521- 532.
3. T. Karacay, N. Akturk. 2009. Experimental diagnostic and spectral methods. *Tribology International*, vol. 42, p. 836 – 843.
4. M. Zvokeļj, S. Zupan, I. Prebil. 2010. Multivariate and multiscale monitoring of large-size low-speed bearings using Ensemble Empirical Mode Decomposition method combined with Principal Component Analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 24, p. 1049 – 1067
5. D. Mba. 2008. The Use of Acoustic Emission for Estimation of Bearing Defect Size. *Machinery Failure Prevention Technology*, vol. 8, p. 188 – 192.
6. W. Su, F. Wang, H. Zhu, Z. Zhang, Z. Guo. 2010. Rolling element bearing faults diagnosis based on optimal Morlet wavelet filter and autocorrelation enhancement. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 24, p. 1458 – 1472.
7. B. Eftekharijad, M.R. Carrasco, B. Charnley, D. Mba. 2011. The application of spectral kurtosis on Acoustic Emission and vibrations from a defective bearing. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 25, p. 266 – 284.
8. Y. Wang, M. Liang. 2010. An adaptive SK technique and its application for fault detection of rolling element bearings. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 24, p. 857 – 873.
9. Y. Zhang, R.B. Randall. 2009. Rolling element bearing fault diagnosis based on the combination of genetic algorithms and fast kurtogram. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 23, p. 1509 – 1517.
10. T. Barszcz, A. Jabonski. 2011. A novel method for the optimal band selection for vibration signal demodulation and comparison with the Kurtogram. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 25, p. 431 – 451.
11. Y. Dong, M. Liao, X. Zhang, F. Wang. 2010. Faults diagnosis of rolling element bearings based on modified morphological method. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 24, p. 952 – 963.
12. Y. Ming, J. Chen, G. Dong. 2010. Weak fault feature extraction of rolling bearing based on cyclicWiener filter and envelope spectrum. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 24, p. 1123 – 1136.

13. Bently D.E., Hatch Ch.T. 2002. Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics. Bently Pressurized Bearing Company, ISBN 0-9714081-0-6.
14. J. Janutėnienė, 2008. Inžinerinių sistemų patikimumas. Vilnius, Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla, 131p.
15. Jonušas R., Jurkauskas A., Volkovas V. 2001. Rotorinių sistemų dinamika ir diagnostika. Kaunas, Technologija, 295 p.
16. Barzdaitis V., Činikas G., 1998, Rotorinių mašinų monitoringas ir diagnostika. Monografija. Kaunas, KTU: Technologija, 364 p.
17. P. Mažeika, 2008. Rotorių su riedėjimo guoliais diagnostikos ir gedimų prevencijos tyrimai. Daktaro disertacija. Kaunas, Kauno technologijos universitetas, 130p.
18. K. Bučys, 2006. Tikimybių teorijos ir statistikos pagrindų praktikumas. Klaipėda, KU leidykla, 214 p.
19. ISO10816-3. Reference Standards for Vibration Monitoring and Analysis. International organization for standartization, 2009.
20. Physical Acustions Corporation [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2011m. gegužės 2d.]. Prieiga per internetą: <http://www.pacndt.com/index.aspx?go=products&focus=Pocket%20AE.htm>
21. Global manufacturing & Reliability solutions [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2011m. balandžio 12d.]. Prieiga per internetą: <http://www.gmr-solutions.com/products/coco80/pictures.htm>
22. ADASH [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2011m. balandžio 16d.]. Prieiga per internetą: http://www.adash.eu/prenosne_pristroje_en.html
23. SKF [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2011m. balandžio 16d.]. Prieiga per internetą: <http://www.skf.com/portal/skf/home/products?contentId=266161&lang=en>
24. SPM Instrument AB [Žiūrėta 2011m. kovo 17d.]. Prieiga per internetą: <http://www.leonovabyspm.com/features/index.html>
25. ACMT - ADASH Compressed Time A new diagnostic method for bearings on slow speed machinery [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2011m. balandžio 10d.]. Prieiga per internetą: http://www.adash.cz/doc/ApplicationNotes/ACMT_app_en.pdf
26. Shock Pulse Monitoring [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2011m. balandžio 11d.]. Prieiga per internetą: <http://www.spminstrument.com/methods/shock-pulse-monitoring/>
27. Brüel & Kjær Sound and Vibration Measurement A/S [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2011m. balandžio 11d.]. Prieiga per internetą: <http://www.bksv.com/Products/handheld-instruments/vibration-analyzers/handheld-vibration-analyzer-2250-h.aspx#>

PRIEDAI

1 priedas

1 Lentelė. Eksperimento 2011.07.14 rezultatų lentelė

Guolio nr.	V_{rms} , mm/s	g (5-16 kHz)	g_L (0,5– 16 kHz)	Guolio nr.	V_{rms} , mm/s	g (5-16 kHz)	g_L (0,5– 16kHz)
1K	1,4815	0,0131	0,176	1D	1,5254	0,0146	0,2299
2K	1,6215	0,0403	0,1351	2D	1,9607	0,0549	0,3652
3K	1,2961	0,0049	0,162	3D	2,1699	0,0611	0,1868
4K	1,5195	0,0584	0,1529	4D	1,9082	0,0192	0,2267
5K	1,5121	0,0109	0,1383	5D	1,5354	0,039	0,1407
6K	4,5923	0,0702	0,1464	6D	2,9028	0,0315	0,2249
7K	1,3885	0,0126	0,142	7D	1,8664	0,0342	0,2069
8K	2,0861	0,0195	0,1907	8D	1,8513	0,0183	0,2395
9K	1,5402	0,0144	0,155	9D	2,2407	0,019	0,2221
10K	2,5629	0,0894	0,1793	10D	1,6397	0,0169	0,2372
11K	2,153	0,0167	0,1988	11D	1,9607	0,0364	0,2799
12K	2,0528	0,0344	0,3798	12D	2,4498	0,0213	0,3913
13K	1,5681	0,0165	0,1898	13D	2,0501	0,0265	0,3577
14K	1,8379	0,0138	0,1992	14D	2,3553	0,0654	0,2895
15K	1,3836	0,0344	0,178	15D	1,8468	0,018	0,3113
16K	1,5145	0,0128	0,145	16D	2,0325	0,0223	0,1507
17K	1,9345	0,0189	0,2208	17D	2,265	0,0288	0,2923
18K	1,5887	0,0248	0,2288	18D	2,2663	0,0329	0,3116
19K	1,6929	0,0202	0,1905	19D	1,7998	0,0246	0,2668
20K	1,5749	0,0312	0,2188	20D	2,6536	0,2398	0,4429
21K	2,0224	0,017	0,2771	21D	2,3463	0,0263	0,3052
22K	2,8213	0,0265	0,186	22D	1,8447	0,0194	0,2469
23K	1,5933	0,0327	0,1862	23D	2,4325	0,0376	0,2066
24K	1,5828	0,0401	0,1697	24D	1,5445	0,0318	0,2612
25K	1,4906	0,0108	0,152	25D	1,7973	0,038	0,2186
26K	1,5051	0,0248	0,1617	26D	1,9772	0,0462	0,1895
27K	1,7993	0,0242	0,1777	27D	2,6745	0,0491	0,2413
28K	4,2789	0,0395	0,1685	28D	2,2742	0,0241	0,3795
29K	1,7367	0,0526	0,2646	29D	2,2703	0,0656	0,2747
30K	1,8372	0,0455	0,2409	30D	2,5688	0,0335	0,2027
31K	1,2253	0,0361	0,1899	31D	2,2325	0,0221	0,2166
32K	2,7897	0,0246	0,3838	32D	1,8847	0,0216	0,2823
33K	1,2616	0,0056	0,1268	33D	1,2094	0,0239	0,2407
34K	1,5727	0,0285	0,1821	34D	1,7203	0,0381	0,2094
35K	1,6509	0,0412	0,1873	35D	2,3175	0,061	0,1827
36K	1,5229	0,0235	0,1926	36D	2,3377	0,0364	0,1606
37K	2,287	0,0631	0,1387	37D	2,0962	0,0146	0,2238
38K	2,2727	0,0644	0,1341	38D	6,0992	0,0318	0,1844
39K	2,3758	0,0396	0,2086	39D	3,4272	0,0303	0,2048

1 lentelės tęsinys

Guolio nr.	V _{rms}	g (5-16 kHz)	g _L (0,5– 16 kHz)	Guolio nr.	V _{rms}	g (5-16 kHz)	g _L (0,5– 16kHz)
40K	3,2507	0,0584	0,1383	40D	5,2032	0,0221	0,1741
41K	2,2544	0,0523	0,4005	41D	2,3975	0,0181	0,2017
42K	1,7702	0,0696	0,1817	42D	1,6002	0,0104	0,269
43K	1,4388	0,0086	0,2261	43D	2,2758	0,0906	0,2329
44K	2,2026	0,0849	0,1849	44D	1,8719	0,0465	0,2178
45K	1,4532	0,0608	0,1394	45D	2,3377	0,0328	0,1706
46K	1,2834	0,028	0,1724	46D	1,6202	0,0146	0,1927

2 priedas

2 Lentelė. Eksperimento 2011.08.12 rezultatų lentelė

Guolio nr.	V _{rms}	g (5-16 kHz)	g _L (0,5– 16 kHz)	Guolio nr.	V _{rms}	g (5-16 kHz)	g _L (0,5– 16kHz)
1K	2,029	0,0065	0,2108	1D	3,1243	0,0334	0,5841
2K	1,6222	0,0228	0,1654	2D	2,3588	0,0161	0,225
3K	2,0703	0,016	0,1758	3D	2,9999	0,0204	0,2613
4K	2,6038	0,0171	0,1444	4D	3,0963	0,0337	0,1709
5K	1,5939	0,0199	0,1637	5D	1,7274	0,0321	0,2361
6K	6,222	0,0226	0,1568	6D	2,2919	0,0264	0,1696
7K	1,4142	0,0247	0,1364	7D	1,4159	0,0292	0,272
8K	2,1373	0,0407	0,2339	8D	1,6481	0,0386	0,2579
9K	1,7841	0,0167	0,1855	9D	2,224	0,0236	0,3131
10K	1,8274	0,0365	0,3025	10D	1,9963	0,0165	0,3096
11K	2,5586	0,0261	0,2389	11D	2,6185	0,0262	0,3684
12K	2,3249	0,0489	0,33	12D	2,7987	0,0297	0,3979
13K	2,1429	0,028	0,2439	13D	2,3578	0,1048	0,4378
14K	2,2862	0,0152	0,218	14D	2,5619	0,0148	0,3903
15K	1,7601	0,0371	0,2037	15D	1,7477	0,0252	0,3593
16K	1,515	0,0228	0,105	16D	1,0325	0,0223	0,1307
17K	2,3235	0,0179	0,2126	17D	2,5852	0,0151	0,3681
18K	1,5678	0,0279	0,215	18D	2,0738	0,0397	0,2678
19K	2,0186	0,0268	0,1944	19D	1,9831	0,0253	0,2984
20K	2,1984	0,053	0,1909	20D	2,2616	0,0204	0,282
21K	3,3821	0,0195	0,3161	21D	2,6916	0,0227	0,3548
22K	4,064	0,0233	0,2458	22D	2,6489	0,1665	0,3544
23K	1,8473	0,0187	0,2353	23D	2,0926	0,0413	0,3195
24K	1,6819	0,0268	0,2075	24D	2,6047	0,0296	0,1952
25K	1,8426	0,0078	0,1699	25D	2,3812	0,0405	0,2734
26K	2,365	0,0161	0,1527	26D	3,0316	0,0355	0,2122
27K	1,8188	0,0224	0,1819	27D	3,6514	0,0094	0,1997

2 lentelės tęsinys

Guolio nr.	V_{rms}	g (5-16 kHz)	g_L (0,5– 16 kHz)	Guolio nr.	V_{rms}	g (5-16 kHz)	g_L (0,5– 16kHz)
28K	3,5878	0,0284	0,151	28D	2,8319	0,0722	0,1882
29K	1,8867	0,0409	0,2781	29D	2,3312	0,0422	0,3188
30K	2,039	0,0522	0,278	30D	2,4857	0,0802	0,2783
31K	1,013	0,0319	0,1838	31D	2,304	0,0287	0,1941
32K	1,7897	0,0246	0,3838	32D	1,5847	0,0216	0,2823
33K	1,4301	0,0055	0,1485	33D	1,2885	0,0134	0,1903
34K	1,7211	0,036	0,1808	34D	1,4123	0,0232	0,2224
35K	1,6521	0,0321	0,1831	35D	1,6787	0,0303	0,2223
36K	1,7689	0,0141	0,1772	36D	2,7203	0,0431	0,2112
37K	2,1709	0,0928	0,2006	37D	2,4041	0,0341	0,2035
38K	2,4513	0,0192	0,1475	38D	1,828	0,0219	0,209
39K	3,1567	0,0318	0,228	39D	4,8287	0,0427	0,165
40K	4,1467	0,049	0,1633	40D	4,2015	0,0292	0,1942
41K	3,9993	0,1219	0,3893	41D	5,8749	0,0324	0,2285
42K	2,6626	0,0474	0,1721	42D	2,7519	0,0372	0,2142
43K	1,847	0,0434	0,2152	43D	1,878	0,0585	0,3305
44K	2,5767	0,0371	0,2295	44D	2,4495	0,0704	0,236
45K	1,445	0,0348	0,1765	45D	1,9178	0,0181	0,1875
46K	1,4834	0,028	0,1724	46D	1,4202	0,0146	0,1927