

**KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS**

JŪRŲ TECHNIKOS FAKULTETAS

LAIVO INŽINERIJOS KATEDRA

Arvydas Galminas

**KELTO “OPTIMA SEAWAYS”  
VIRPESIŲ TYRIMAS**

Laiivų projektavimo ir statybos studijų programos (621H52001) magistro  
baigiamasis darbas

Klaipėda, 2015

## MAGISTRO BAIGIAMOJO DARBO LYDRAŠTIS

### Pildo magistro baigiamojo darbo autorius

.....  
(magistro baigiamojo darbo autoriaus vardas, pavardė)

.....  
(magistro baigiamojo darbo pavadinimas lietuvių kalba)

**Patvirtinu, kad magistro baigiamasis darbas parašytas savarankiškai, nepažeidžiant kitiems asmenims priklausančių autorių teisių, visas baigiamasis magistro darbas ar jo dalis nebuvo panaudotas Klaipėdos universitete ir kitose aukštosiose mokyklose:**

.....  
(magistro baigiamojo darbo autoriaus vardas, pavardė ir parašas)

**Sutinku, kad magistro baigiamasis darbas būtų naudojamas neatlygintinai 5 m. Klaipėdos universiteto studijų procese:**

.....  
(magistro baigiamojo darbo autoriaus vardas, pavardė ir parašas)

### Pildo magistro baigiamojo darbo vadovas

**Magistro baigiamąjį darbą ginti** .....

(įrašyti – leidžiu arba neleidžiu)

.....  
(data)

.....  
(magistro baigiamojo darbo vadovo vardas, pavardė ir parašas)

### Pildo katedros, kuriojančios studijų programą, administratorė

Baigiamasis darbas įregistruotas katedroje .....

(data)

.....  
(katedros administratorės vardas, pavardė ir parašas)

### Pildo laivo inžinerijos katedros, kuriojančios studijų programą, vedėjas

**Magistro baigiamąjį darbą ginti** .....

(įrašyti – leidžiu arba neleidžiu)

.....  
(data)

.....  
(katedros vedėjo vardas, pavardė ir parašas)

**Recenzentais skiriu** .....

(įrašyti recenzento vardą, pavardę)

.....  
(įrašyti recenzento vardą, pavardę)

.....  
(data)

.....  
(katedros vedėjo vardas, pavardė ir parašas)

## SANTRAUKA

Galminas A. *Kelto „Optima Seaways“ virpesių tyrimas*. Laivų projektavimo ir statybos magistrantūros studijų programos (621H52001) baigiamasis darbas. Darbo vadovas doc. dr. Mažeika P. Klaipėdos universitetas: Klaipėda, 2015. – 66 p.

Baigiamasis darbas susideda iš dviejų dalių: teorinės ir eksperimentinės.

Teorinėje dalyje analizuojama su tyrimo tematika susijusi techninė literatūra ir moksliniai straipsniai, kuriuose nagrinėjami ir aprašomi mechaniniai virpesiai ir jų atsiradimo priežastys, virpesių poveikis laivui ir juo plaukiantiems žmonėms, virpesių diagnostika, monitoringas ir naudojama įranga, virpesių lygio laive mažinimo būdai bei prevencinės priemonės. Taip pat apžvelgiami virpesius laive reglamentuojantys normatyvai.

Eksperimentinėje dalyje nagrinėjamas kelto „Optima Seaways“ virpesių lygis prieš ir po skruberio sumontavimo jame bei keleivių ir dirbančiojo personalo komforto lygis. Sudaroma kelto virpesių matavimo metodika ir atliekamas gautų virpesių rezultatų apdorojimas bei analizė.

Pateikiamos tiriamojo darbo išvados.

*Raktažodžiai:* virpesiai, virpesių lygis, virpesių tyrimas, keltas, komforto lygis, skruberis, Optima Seaways.

## SUMMARY

Galminas A. *Vibration analysis of ferry „Optima Seaways“*. Master's degree thesis of ship design and construction study program (621H52001). Supervisor docent Dr. Mažeika P. University of Klaipėda: Klaipėda, 2015. – 66 p.

Master's thesis consists of two parts: theoretical and experimental.

In the theoretical part author analyses technical literature and scientific articles that describes the mechanical vibrations and their causes, vibration effects on vessel and people, vibration diagnostics, monitoring and used equipment, methods of reducing vibration level onboard and preventive measures. Also reviews norms and standards of vibration onboard.

The experiment combines two parts of analysis: ferry „Optima Seaways“ vibration level before and after the scrubber installation also the passengers and crew level of comfort. Presents methodology of ferry vibrations measuring also examines and analyses received results of vibration processing.

Author represents the conclusions of research.

*Keywords:* vibration, level of vibration, vibration analysis, ferry, level of comfort, scrubber, Optima Seaways.

## **Laivų projektavimo ir statybos magistro studijų (621H52001) baigiamasis darbas**

Užduotis studentui: Arvydui Galminui

Temos pavadinimas: „Kelto „Optima Seaways“ virpesių tyrimas“

### **Darbo sudėtis**

#### **ĮVADAS**

Problemos aktualumas

Darbo tikslas ir uždaviniai

#### **I. LITERATŪROS APŽVALGA**

##### 1.1. Mechaniniai virpesiai laivuose

1.1.1. Mechaninių virpesių samprata

1.1.2. Mechaninių virpesių poveikis laivui ir jame esantiems žmonėms

##### 1.2. Virpesių mažinimo būdai ir priemonės

##### 1.3. Virpesių normatyvai ir reglamentai

##### 1.4. Virpesių tyrimo priemonės ir matavimo ypatumai

##### 1.5. Virpesių modeliavimas BEM metodu

##### 1.6. Mokslinių straipsnių analizė

1.6.1. Laivo ir jo konstrukcijų virpesių lygio tyrimas naudojant BEM

1.6.2. Laivo mašinų virpesių diagnostika ir monitoringas

1.6.3. Virpesių lygio mažinimo metodai ir prevencinės priemonės

#### **II. EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI**

##### 2.1. Tyrimo objektas

2.1.1. Kelto „Optima Seaways“ techniniai parametrai

2.1.2. Virpesių lygio tyrimo kelte priežastys

##### 2.2. Eksperimentinio tyrimo atlikimo metodika

2.2.1. Virpesių matavimo būdo parinkimas

- 2.2.2. Virpesių matavimo priemonės ir programinės įrangos parinkimas
- 2.2.3. Virpesių matavimo taškų parinkimas
- 2.2.4. Virpesių analizės atlikimo metodika
- 2.3. Eksperimentinių tyrimų rezultatai ir jų analizė
  - 2.3.1. Pagrindinio variklio žadinamų virpesių dažnių nustatymas
  - 2.3.2. Sraigto žadinamų virpesių dažnio nustatymas
  - 2.3.3. Eksperimentinių tyrimų vykdymo eiga
  - 2.3.4. Gauti rezultatai ir jų analizė

IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS

LITERATŪRA

PRIEDAI

Darbo vadovas: doc.dr. Pranas Mažeika

## LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.3.1 lentelė. Leistini virpesių lygiai keleivinių laivų patalpose pagal ISO 6954:2000 .....	21
1.3.2 lentelė. ISO 10816:2003 rekomenduojamos $v_{RMS}$ reikšmės atskiroms mašinų klasėms ir jų techninei būklei įvertinti pagal virpesių intensyvumo sritis .....	22
1.6.1.1 lentelė. Sušlapinto ir nesusšlapinto korpuso paviršiaus vibracijų palyginimas .....	28
2.1.2.1 lentelė. Leistinas SOx kiekis išmetamosiose dujose pagal MARPOL 73/78 VI priedą .....	38
2.2.4.1 lentelė. Keleivių komforto lygiai pagal „Germanischer Lloyd“ rekomendacijas .....	44
2.2.4.2 lentelė. Įgulos narių komforto lygiai pagal „Germanischer Lloyd“ rekomendacijas .....	45
2.3.4.1 lentelė. Kelto virpesių lygio eksperimentinių tyrimų rezultatai .....	58

## PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1.1.1 pav. Mechaninių virpesių skirstymas į grupes .....	14
1.1.1.2 pav. Laisvieji neslopunami (kairėje) ir slopinami (dešinėje) virpesiai .....	14
1.1.2.1 pav. Virpesių mušimo (plakimo) reiškinys .....	16
1.1.2.2 pav. Virpesių skirstymas pagal pasireiškimo pobūdį .....	17
1.1.2.3 pav. Minimalūs sraigto atstumai nuo laivagalio konstrukcijų .....	17
1.2.1 pav. Tandeminis sraigtas su vandens srauto kreipiančiąja .....	19
1.2.2 pav. Laivinių mašinų pamatiniai vibroizoliatoriai. a – specialios sandaros guminės tarpinės; b – atraminė pagalvė; c – spyruoklinis amortizatorius; d – plastikinis amortizatorius .....	20
1.3.1 pav. Standarte ISO 6954:2000 numatytos virpesių normos laivo įgulai ir keleiviams .....	21
1.4.1 pav. Virpesių signalų analizatoriai (VSA). Kairėje – „Adash A4404“ kompaktiškas analizatorius, jungiamas prie kompiuterio; dešinėje – „SKF Microlog Analyzer AX“ analizatorius su raiškiu ekranu .....	23
1.4.2 pav. Indukcinių bekontaktių poslinkio matavimo jutiklių taikymas praktikoje .....	24
1.4.3 pav. Virpesių greičio matavimo keitiklio schema. 1 – keitiklio korpusas; 2 – nejudanti ritė; 3 – judantis magnetas; 4 – magnetą laikanti spyruoklė; 5 – ritės laikiklis .....	25
1.4.4 pav. Virpesių pagreičio matavimo keitiklio schema. 1 – žiedo formos pjezokristalai; 2 – pastovaus dydžio masė $m_3$ ; 3 – elektroninis stiprintuvas; 4 – jungtis; 5 – korpusas .....	26
1.6.1.1 pav. Projektuojamo 1900 TEU konteinervežio BEM modelis. Kairėje matoma laivagalio dalis (smulkesnis tinkliukas), o dešinėje – viso laivo BEM modelis .....	27
1.6.1.2 pav. Lenkimo formos: kairėje pirmoji forma (1,015 Hz), dešinėje – antroji (2,059 Hz) .....	28
1.6.1.3 pav. Sukimo formos: kairėje pirmoji forma (0,998 Hz), dešinėje – antroji (2,325 Hz) .....	28
1.6.1.4 pav. Virpesių formos: kairėje – horizontalaus lenkimo ir sukimo forma (1,328 Hz), dešinėje – bendra suminė virpesių forma (8,186 Hz) .....	28
1.6.1.5 pav. Gauti variklio grafikai: kairėje matomas vertikalios inercijos jėgos laiko grafikas (slenkamieji stūmoklio judesiai), kairėje – degimo proceso sukeltų jėgų laiko grafikas .....	29
1.6.2.1 pav. Virpesių pagreičių keitiklių tvirtinimo vietos: (a) ant laivo varomosios sistemos reduktoriaus guolių atramų ir virpesių poslinkių jutiklių tvirtinimo vieta (b) prie slydimo guolių atramos (PK – virpesių pagreičių keitiklis, FK – fazės ir greičio keitiklis) .....	30
1.6.2.2 pav. a) Daugiakanalis virpesių analizatorius OROS – Mobipack; b) Virpesių pagreičių keitiklis Wilcoxon; c) greičio ir fazės matavimo optinis jutiklis Optel II Thevon 152G7 .....	31
1.6.2.3 pav. Laivo – kelto pagrindiniai eigos turbodyzeliniai varikliai .....	32
1.6.3.1 pav. Dvipakopė kompensatorių sistema „Collins“ .....	33

1.6.3.2 pav. „Smart Spring“ virpesių izoliatorius .....	33
1.6.3.3 pav. Korpuso ties mašinų skyriumi sijų modifikacijos: a – prieš modifikaciją; b – pirmas modifikacijos variantas; c – antras variantas; d – trečias variantas; e – ketvirtas variantas; f – penktas variantas .....	34
2.1.1.1 pav. Ro-Pax tipo keleivinis keltas „Optima Seaways“ .....	36
2.1.1.2 pav. Keleivinio kelto „Optima Seaways“ denių išdėstymas .....	37
2.1.2.1 pav. Kelte „Optima Seaways“ sumontuotas skruberis. Kairėje – iš toliau, dešinėje – iš arti. Fotografuota iš 6-ojo kelto denio (asmeninio archyvo nuotraukos) .....	39
2.2.2.1 pav. ADASH A4400-VA4PRO (Čekija) virpesių signalų analizatorius .....	41
2.3.1.1 pav. Kelte „Optima Seaways“ sumontuotas pagrindinis eigos variklis. Kairėje vaizdas iš 1-ojo denio, dešinėje – iš 2-ojo denio (asmeninio archyvo nuotraukos) .....	46
2.3.3.1 pav. Eksperimento metu naudotas plieninis, pasižymintis stipriomis magnetinėmis savybėmis padas (asmeninio archyvo nuotraukos) .....	49
2.3.3.2 pav. Kelto denių planuose naudojami sutartiniai ženklai .....	50
2.3.3.3 pav. Septintojo denio planas su jame pažymėtais virpesių lygio matavimo taškais .....	50
2.3.3.4 pav. Šeštojo denio planas su jame pažymėtais virpesių lygio matavimo taškais .....	51
2.3.3.5 pav. Virpesių lygio matavimas šeštojo denio koridoriuje prie laiptų (13 taškas) .....	51
2.3.3.6 pav. Penktojo denio I-osios dalies planas su jame pažymėtais virpesių matavimo taškais ..	52
2.3.3.7 pav. Penktojo denio II-osios dalies planas su jame pažymėtais virpesių matavimo taškais .	53
2.3.3.8 pav. Virpesių lygio matavimas penktojo denio koridoriuje (27 taškas) .....	53
2.3.3.9 pav. Ketvirtojo denio planas prie laiptų su jame pažymėtu virpesių lygio matavimo tašku .	54
2.3.3.10 pav. Trečiojo denio planas su jame pažymėtais virpesių lygio matavimo taškais .....	54
2.3.3.11 pav. Antrojo denio mašinų skyriaus planas su jame pažymėtais virpesių lygio matavimo taškais .....	55
2.3.3.12 pav. Virpesių lygio matavimas antrojo denio mašinų skyriuje (21 taškas) .....	55
2.3.3.13 pav. Pirmojo denio mašinų skyriaus planas su jame pažymėtais virpesių lygio matavimo taškais .....	56
2.3.3.14 pav. Virpesių lygio matavimas pirmojo denio mašinų skyriuje (20 taškas) .....	56
2.3.4.1 pav. Antrojo denio 21 taško $v_{RMS}$ spektro pikinės reikšmės .....	61
2.3.4.2 pav. Antrojo denio 21 taško $v_{RMS}$ spektro harmonikos .....	61

## TURINYS

<b>ĮVADAS</b> .....	11
<b>I. LITERATŪROS APŽVALGA</b> .....	13
1.1. Mechaniniai virpesiai laivuose .....	13
1.1.1. Mechaninių virpesių samprata .....	13
1.1.2. Mechaninių virpesių poveikis laivui ir jame esantiems žmonėms .....	16
1.2. Virpesių mažinimo būdai ir priemonės .....	18
1.3. Virpesių normatyvai ir reglamentai .....	21
1.4. Virpesių tyrimo priemonės ir matavimo ypatumai .....	23
1.5. Virpesių modeliavimas BEM metodu .....	26
1.6. Mokslinių straipsnių analizė .....	27
1.6.1. Laivo ir jo konstrukcijų virpesių lygio tyrimas naudojant BEM .....	27
1.6.2. Laivo mašinų virpesių diagnostika ir monitoringas .....	30
1.6.3. Virpesių lygio mažinimo metodai ir prevencinės priemonės .....	32
<b>II. EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI</b> .....	35
2.1. Tyrimo objektas .....	35
2.1.1. Kelto „Optima Seaways“ techniniai parametrai .....	36
2.1.2. Virpesių lygio tyrimo kelte priežastys .....	37
2.2. Eksperimentinio tyrimo atlikimo metodika .....	39
2.2.1. Virpesių matavimo būdo parinkimas .....	40
2.2.2. Virpesių matavimo priemonės ir programinės įrangos pasirinkimas .....	41
2.2.3. Virpesių matavimo taškų parinkimas .....	43
2.2.4. Virpesių analizės atlikimo metodika .....	44
2.3. Eksperimentinių tyrimų rezultatai ir jų analizė .....	46
2.3.1. Pagrindinio variklio žadinamų virpesių dažnių nustatymas .....	46
2.3.2. Sraigto žadinamų virpesių dažnio nustatymas .....	48
2.3.3. Eksperimentinių tyrimų vykdymo eiga .....	48
2.3.4. Gauti rezultatai ir jų analizė .....	57
<b>IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS</b> .....	62
<b>LITERATŪRA</b> .....	63
<b>PRIEDAI</b> .....	66

## ĮVADAS

Vystantis laivų pramonei, didėjant krovinių gabenimo bei žmonių keliavimo vandens keliais mastams ir vystantis šiuolaikinėms technologijoms, vis daugiau dėmesio skiriama patikimam laivo projektavimui ir eksploatavimui. Tik inžineriškai teisingai suprojektuotas laivas bus patikimas, saugus ir komfortiškas. Laivas, kuriuo plaukiant pernelyg jaučiami virpesiai, nėra komfortiškas, o įgulos nariai ir/arba keleiviai jaučiasi nesaugūs, būna suirzę, atsiranda nervinė įtampa, greičiau pasijaučia fizinis ir emocinis nuovargis, be to, dėl virpesių poveikio ir paties laivo patikimumas ženkliai sumažėja, nes gali pasireikšti laivo įrenginių bei jo korpusą sudarančių medžiagų ir kitų laivinių elementų nuovargis.

Mechaniniai virpesiai laivuose sukelia periodinius įvairių laivo elementų įtempimus, per kuriuos pasireiškia medžiagų nuovargis (įtrūksta laivo korpusas, vamzdynai, sugadinamos pagrindinės ar pagalbinės laivinės mašinos). Dėl šių priežasčių laivų projektuotojams būtina žinoti kaip išvengti padidėjusių virpesių laive. Visos laive dirbančios mašinos žadina tik joms būdingus virpesius. Svarbiausia projektavimo užduotis – kad šie žadintojai nepriverstų rezonuoti patį laivą ar atskirus jo elementus. Tokiu atveju jau laivo projektavimo metu reikia apskaičiuoti pagrindinių ir pagalbinių laivinių mašinų žadinamus priverstinių virpesių dažnius, kurie „keliaudami“ laivo korpuso konstrukcijomis ir savo kelyje sutikę bet kurį laivo lokalų ar globalų elementą su tokio pat dydžio ar jam artimu savųjų virpesių dažniu, priverčia jį rezonuoti, t.y. padidina to elemento virpesių amplitudę. Norint to išvengti, patartina padidinti rezonuojančių elementų standumą.

Vibraciją laive dažniausiai sukelia šie įrenginiai: sraigtas ir veleno linija; pagrindinis eigos variklis; kitos laivinės mašinos ir įrenginiai: pagalbiniai varikliai, siurbliai, aušinimo sistema ir oro kondicionieriai, centrifugos ir kt.; jūros ir aplinkos poveikis – bangos, stiprus vėjas.

*Tyrimo objektas ir priežastis.* Tyrimo objektu pasirinktas laivybos kompanijos AB „DFDS Seaways“ keltas „Optima Seaways“, nes įmonės atstovų ir kelte dirbančio personalo teigimu, po skruberio sumontavimo, jame padidėjo virpesių lygis.

Skruberio atsiradimas kelte. Siekiant sumažinti aplinkos užterštumą iš jūrų transporto 1973 metais Tarptautinė jūrų organizacija IMO išleido MARPOL 73/78 konvenciją, kurios pagrindinis tikslas – sumažinti jūrų transporto daromą žalingą įtaką aplinkai. 1978 metais buvo padaryti šios konvencijos pakeitimai, o 1997 metais pateiktos oro taršos iš laivų prevencijos taisyklės (MARPOL 73/78 Annex VI 2006), kurios įsigaliojo 2005 metais. Šeštasis konvencijos priedas nustato leistiną SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, CH ir kitų dalelių koncentracijos kiekį išmetamosiose dujose ir teritorijas, kuriose yra sugriežtintos normos išvardintiems cheminiams junginiams. Šios zonos įvardijamos kaip „kontroliuojamos emisijos zonos“ (angl. ECA – *Emission Control Areas*). ECA zonai priklauso ir Baltijos jūra, kuria reisu Klaipėda – Kyliis plaukioja tiriamasis keltas „Optima Seaways“.

MARPOL 73/78 konvencijos VI priedas nuo 2015 metų įpareigojo laivų, plaukiojančių ECA zonose, savininkus ir eksploatuotojus ženkliai sumažinti išmetamųjų dujų toksiškumą SO<sub>x</sub> atžvilgiu nuo 1,0% iki 0,1%.

Konvencija leidžia naudoti daug įvairių teršalų išmetimo mažinimo metodų: įvairią įrangą, metodus, technologijos procesus ir alternatyvų kurą. Kiekvienas būdas turi savų pliusų ir minusų. Skaičiavimais yra pagrįsta, kad efektyviausias sieros emisijos mažinimo metodas yra „išmetamųjų dujų plautuvių“ – skruberių įrengimas, kurių atsipirkimo laikotarpis, priklausantis nuo mazuto ir dyzelinio kuro kainų skirtumo, plaukiojimo nuotolių ECA zonose ir kt., svyruoja nuo 1 iki 5 metų.

AB „DFDS Seaways“ kompanija, įvertinusi visus pliusus ir minusus, į savo laivus nusprendė montuoti šlapiojo tipo skruberius (angl. *wet scrubber*). Skruberis į „Optimą Seaways“ keltą buvo sumontuotas 2014 metų balandžio mėnesį Lenkijoje. Įrangos ir darbų kaina siekė apie 6 mln. eurų.

Nustatant keltu plaukiančių keleivių ir dirbančiojo personalo komforto lygį atitinkamų kelto patalpų eksperimentinių tyrimų rezultatai bus lyginami su tarptautiniame standarte ISO 6954:2000 ir laivų klasifikacinės bendrovės „Germanischer Lloyd“ leidinyje pateiktomis „komfortiškomis“ virpesių lygio reikšmėmis.

**Problemos aktualumas.** Iki šiol ir pačių naujausių bei moderniausių pasaulio laivų savininkai negali pasigirti darbiniu nuliniu virpesių lygiu. Visų pirma, būtina sugriežtinti laivų projektavimo stebėseną ir BEM programų pagalba nuodugniai iširti jų virpesių lygį.

Pažymėtina, kad laivo virpesių lygio padidėjimo tyrimai po skruberio sumontavimo yra nauja tyrimo sritis. Iki šiol visame pasaulyje nebuvo poreikio atlikti tokio pobūdžio laivo virpesių lygio tyrimų analizės, susietos su skruberio veikimu jame. Kadangi tai yra nauja šių įrenginių montavimo „banga“ laivuose, plaukiojančiuose SO<sub>x</sub> kontroliuojamos emisijos zonose ir jų paklausa ateityje tik didės, todėl yra privalu sudaryti tokio tipo virpesių lygio tyrimo metodiką.

**Darbo tikslas** – pagal iš anksto numatytą eksperimentinio tyrimo atlikimo metodiką atlikti kelto „Optima Seaways“ virpesių lygio tyrimus ir kompleksinę gautų rezultatų analizę.

#### **Darbo uždaviniai:**

1. atliekant mokslinių straipsnių ir kitų literatūros šaltinių apžvalgą ir analizę, nustatyti kiek yra pažengusi virpesių lygio tyrimų ir prevencijos sritis laivuose;
2. sudaryti eksperimento atlikimo metodiką;
3. atlikti kelto virpesių lygio matavimus;
4. nustatyti keltu plaukiančių keleivių ir dirbančiojo personalo komforto lygį;
5. nustatyti ar po skruberio sumontavimo kelte padidėjo virpesių lygis.

# I. LITERATŪROS APŽVALGA

## 1.1. Mechaniniai virpesiai laivuose

Vystantis technologijoms vystosi ir laivų pramonė, atitinkamai didėja ir keleivių bei įvairių krovinių gabenimo srautai vandens keliais. Tokiu būdu vis daugiau dėmesio turi būti skiriama patikimam laivo projektavimui ir eksploatavimui. Tik inžineriškai teisingai suprojektuotas laivas bus patikimas, saugus ir komfortiškas. Laivas, kuriuo plaukiant pernelyg jaučiami virpesiai, nėra komfortiškas, o įgulos nariai ir/ar keleiviai nesijaučia saugūs, be to, dėl virpesių poveikio ir paties laivo patikimumas ženkliai mažėja, nes gali pasireikšti laivo įrenginių bei laivo korpusą sudarančių medžiagų ir kitų elementų nuovargis. Naudojant nekomfortišką ir nesaugų laivą, jo savininkai rizikuoja prarasti klientus, t.y. pajamų šaltinį. [27]

### 1.1.1. Mechaninių virpesių samprata

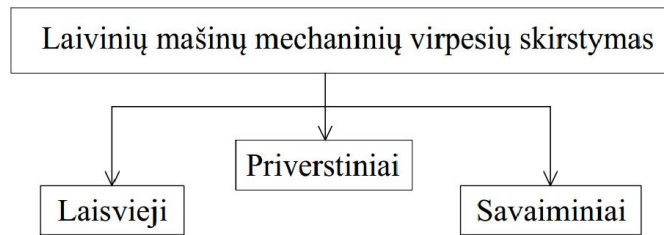
*Svyravimai ir virpesiai. Kas tai?* Lietuvių kalboje yra sutinkamos dvi sąvokos: virpesiai ir svyravimai. Pavyzdžiui, anglų kalboje yra tik vienas šiuos reiškinius apibūdinantis žodis – *virpesiai* (angl. *vibrations*). Mechaniniais svyravimais ir virpesiais vadiname periodišką kūnų mechaninių dydžių (poslinkio, greičio, pagreičio ir t.t.) kitimą apie pusiausvyros padėtį. [3, 10]

*Mechaniniai svyravimai* – tai reiškinys, kai kūno poslinkiai nuo pusiausvyros padėties yra palyginti dideli ir kartojasi retai, t.y. kai virpesių amplitudė yra didesnė už dažnį.

*Mechaniniai virpesiai* – tai reiškinys, kai kūno poslinkiai nuo pusiausvyros padėties yra palyginti nedideli (*mm, μm* eilės) ir pasikartoja dažnai (dažniau nei 1 kartą per sekundę), kitaip tariant, kai virpesių dažnis didesnis už amplitudę. [10, 32]

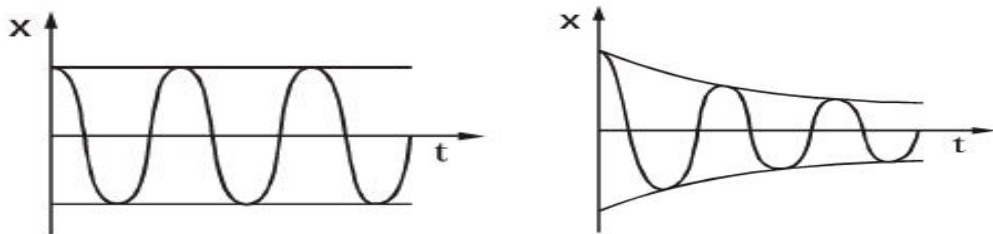
Virpesiai laivinėse mašinose (pagrindiniuose eigos ir pagalbinuose varikliuose) atsiranda ne vien tik dėl technologinio proceso parametrų kitimo įtakos, bet ir todėl, kad vis nepavyksta pagaminti ypač tikslių mašinų dalių ir šias dalis tinkamai surinkti į mazgus. Pavyzdžiui, jei rotorius pagamintume taip tiksliai, kad jo masės ir geometrinis centrai visiškai sutaptų, tai rotorius neturėtų disbalanso masės. Disbalanso sužadinti virpesiai yra proporcingi disbalanso masės dydžiui. Kiti virpesių šaltiniai yra mašinos sudedamųjų dalių gamybos tolerancijos, šių dalių surinkimo į mazgus tolerancijos, išorinių apkrovų veikimas, besisukančių mašinos dalių kliuvinimas už stacionarių dalių, nevienodas detalių nudilimas, tepimas ir kt. [10, 21]

Mechaniniai virpesiai priklausomai nuo energijos perdavimo virpančiam kūnui mechanizmo skirstomi į: *laisvuosius, priverstinius ir savaiminius*. [10]



1.1.1.1 pav. Mechaninių virpesių skirstymas į grupes [10]

**Laisvieji virpesiai** – tai virpesiai, kai išvestas iš pusiausvyros materialus taškas svyruoja veikiamas tik grąžinančiosios jėgos. Savo ruožtu laisvieji virpesiai skirstomi į neslopinamus ir slopinamus virpesius. *Laisvieji neslopinami virpesiai* – teoriškai, tai tokie laisvieji mechaniniai virpesiai, kurių amplitudė laikui bėgant nekinta, t.y. kai nepaisoma virpesių metu kylančių slopinimo jėgų. *Laisvieji slopinamieji virpesiai* – tai tokie laisvieji mechaniniai virpesiai, kurių amplitudė laikui bėgant kinta (juos veikia įvairios slopinimo jėgos). Dažniausia slopinimo jėga laivinėse mašinose yra trintis. Laisvieji virpesiai laive pasireiškia, kai laivui ar jo elementui staiga suteikiamas žadinimas. Pavyzdžiui, bangai smūgiuojant į laivo korpusą, po smūgio laivo korpusas suvibruoja laisvaisiais slopstančiais virpesiais ir užgęsta. [3, 10, 37]



1.1.1.2 pav. Laisvieji neslopinami (kairėje) ir slopinami (dešinėje) virpesiai [37]

**Priverstiniai virpesiai** – tai kūno virpesiai, kai jam energija perduodama periodiškai žadinančios jėgos poveikyje. Kūno priverstinių virpesių dažnis yra lygus žadinančios jėgos dažniui, o virpesių amplitudė priklauso nuo mechaninės sistemos parametrų ir žadinančio poveikio. [3, 10]

**Savaiminiai virpesiai** (*savaime susižadinantys autovirpesiai*) – tai pastovios, periodiškai nekintančios jėgos poveikio sužadinti kūno virpesiai, kurie palaikomi pastovios energijos, suteikiamos kūnui, dydžio. Savaiminiais virpesiais virpanti sistema privalo turėti vidinį energijos transformavimo (perdavimo) mechanizmą, kuris jai periodiškai perduotų mechaninę energiją. Energija perduodama periodiškai, su dažniu, lygiu arba artimu vienam iš sistemos savųjų dažnių. Jie kyla ir vėliau yra palaikomi papildant energiją iš nevirpamojo šaltinio, esančio pačioje sistemoje. Savaiminiai virpesiai visada pasireiškia per sistemos *rezonansinius dažnius*. [3, 10]

Šiuolaikinė rotorinių mašinų virpesių matavimo bei analizavimo technologija naudoja penkis virpesių parametrus: [10]

- amplitudė,  $x$ ;
- dažnis,  $f$ ;
- fazė,  $\Phi$ ;
- virpesių signalo forma – orbitos forma;
- veleno kakliuko vidutinis poslinkis guolyje – žemo dažnio poslinkis.

**Virpesių amplitudė** – tai didžiausias periodiškai kintančio dydžio nuokrypis nuo pusiausvyros padėties. Amplitudė gali būti išreiškiama mašinos elemento virpesių poslinkiu, greičiu ir pagreičiu. [10]

**Virpesių dažnis** – tai periodiškai pasikartojančių įvykių pasikartojimo skaičius per laiko tarpą, dažniausiai lygų 1 sekundei. Pavyzdžiui, laivinio variklio rotoriaus sukimosi dažnis nusako kiek kartų rotorius apsisuko apie savo sukimosi ašį per 1 sekundę. Dažnis matuojamas hercais. Laivinių mašinų rotoriaus disbalanso sužadintų virpesių dažnis sutampa su jo sukimosi dažniu. [10]

**Virpesių fazė** – tai laiko intervalas, skiriantis du įvykius. Laivinės mašinos rotoriaus fazė – tai jo pasisukimo kampas, kurį galime išreikšti laiko intervalu arba kampu. Atliekant mašinų virpesių monitoringą ir defektų diagnostiką naudojamos santykinė  $\Phi_s$  ir absoliučiąja  $\Phi_a$  fazėmis.

**Santykinė fazė  $\Phi_s$**  - tai laiko intervalas arba rotoriaus pasisukimo kampas per laiko intervalą, išmatuotas tarp dviejų gretimų virpesių poslinkių signalų bendravardžių taškų.

**Absoliučioji fazė  $\Phi_a$**  - tai kampas arba laiko intervalas, per kurį rotorius pasisuka šiuo kampu, išmatuotą nuo fazės signalo pradžios iki pirmojo virpesių amplitudės maksimumo. [10]

**Virpesių signalo forma – veleno orbitos forma** – tai plokštuminė kreivė, gauta matuojant besisukančio laivinio variklio veleno cilindrinio paviršiaus padėtį dviem statmenomis XY ašių kryptimis. *Orbita* – tai rotoriaus reliatyviųjų virpesių poslinkių radialine kryptimis dvimatis grafikas. Kai mašina yra tvarkinga, tada orbita yra taisyklingo apskritimo formos. Pagal orbitos formą nustatomi mašinų gedimai ir defektų vystymasis ankstyvojoje jų atsiradimo stadijoje. [10]

**Veleno kakliuko vidutinis poslinkis guolyje – žemo dažnio poslinkis.** Besisukančio rotoriaus veleno kakliukas keičia savo padėtį slydimo trinties guolio tarpelyje kai kinta rotorių veikiančios apkrovos. Rotorių veikia dinaminės apkrovos, kurių kitimo dažniai yra lygūs rotoriaus sukimosi dažniui. Tokių dažnių dinaminės apkrovos iššaukia veleno kakliuko virpesius guolyje. [10]

**IŠVADA:** integruojant išvardintų penkių parametrų – amplitudės, dažnio, fazės, orbitos ir vidutinio poslinkio parametrus, galima tiksliai prognozuoti rotorinės mašinos gedimų vystymąsi, nustatyti virpesių šaltinius ir virpesių pakitimo priežastis, išvengti netikėtų gedimų ir iš esmės sumažinti mašinos eksploatacijos ir remonto išlaidas bei prailginti mašinos eksploatacijos laiką.

### 1.1.2. Mechaninių virpesių poveikis laivui ir jame esantiems žmonėms

Mechaniniai virpesiai gali būti naudingi arba žalingi, tačiau laivuose dažniausiai sutinkami tik žalingi virpesiai. Laivinių mašinų keliami virpesiai neigiamai veikia keleivius, darbuotojus ir aptarnaujantį personalą, mažėja sistemos patikimumas, ilgaamžiškumas. [3, 21]

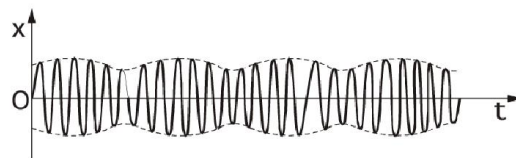
Mechaniniai virpesiai laivuose sukelia periodinius įvairių laivo elementų įtempimus, per kuriuos pasireiškia medžiagų nuovargis (įtrūksta laivo korpusas, vamzdynai, sugadinamos laivinės mašinos). Dėl šių priežasčių laivų projektuotojams būtina žinoti kaip išvengti padidėjusių virpesių laive. Visos laive dirbančios mašinos žadina tik joms būdingus virpesius. Svarbiausia projektavimo užduotis – kad šie žadintojai nepriverstų rezonuoti patį laivą ar atskirus jo elementus. [3, 21]

Rezonansas (lot. *resonans*) – tai reiškinys, kai sistemą veikiančios jėgos kitimo dažnis (priverstiniai virpesiai) sutampa su tos sistemos savųjų laisvųjų virpesių dažniu.

Projektuojant laivus, būtina atlikti laivo ir jo atskirų elementų rezonansinių dažnių teorinius ir eksperimentinius tyrimus tam, kad ateityje išvengti padidinto virpesių lygio laive. Norint išvengti virpesių laive, patartina padidinti rezonuojančių elementų standumą. [26, 35]

*Mušimo (plakimo) reiškinys* – tai reiškinys, pasireiškiantis kai dominuoja du virpesių šaltiniai, kurių dažniai yra artimi vienas kitam, bet ne vienodo dydžio. Tada jaučiamas virpesių pulsavimas. Virpesių mušimas dažnai sutinkamas laivuose su dviem pagrindiniais varikliais, tačiau laivuose su vienu pagrindiniu varikliu virpesių mušimas nepasireiškia. Virpesių mušimo atveju laive virpesių amplitudės išauga, tačiau tai nėra rezonanso reiškinys. Šiuo atveju dominuoja du priverstinių virpesių šaltiniai, kurių žadinami dažniai yra artimi vienas kitam. Tačiau šis reiškinys nepasireiškia kai du rotorai sukasi visiškai vienodais greičiais (dažniais). Šis reiškinys yra pavojingas tuo, kad virpesių amplitudės periodiškai ženkliai padidėja. Šie virpesiai neigiamai veikia laivą, jo konstrukcijas, laivines mašinas ir laive esančius žmones.

Šio reiškinio galima išvengti sumažinus žadinančias dinamines jėgas (pavyzdžiui, subalansavus rotorius) arba izoliuojant vieną virpesių šaltinį nuo kito. [37]

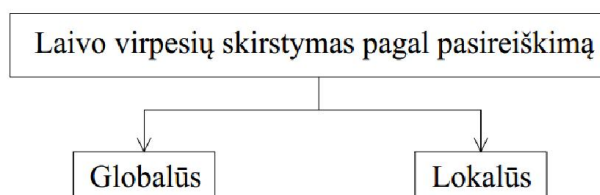


1.1.2.1 pav. Virpesių mušimo (plakimo) reiškinys [37]

Vibraciją laive galima suskirstyti taip: [20]

- labai žemo dažnio virpesiai, kurių dažnis yra nuo 0 ir 2 Hz;
- žemo dažnio virpesiai, kurių dažnis yra nuo 2 ir 20 Hz;
- aukšto dažnio virpesiai, kurių dažnis didesnis nei 20 Hz.

Pagal pasireiškimo pobūdį laive virpesiai gali būti skirstomi į dvi pagrindines grupes: *globalūs ir lokalūs*. [20, 28]



1.1.2.2 pav. Virpesių skirstymas pagal pasireiškimo pobūdį [20]

*Globalūs virpesiai* – tai virpesiai, kuriems esant visos laivo sijos virpa priklausomai nuo žadinamų virpesių, kuriuos sukelia varikliai, velenai, sraigtai ar jūros bangos.

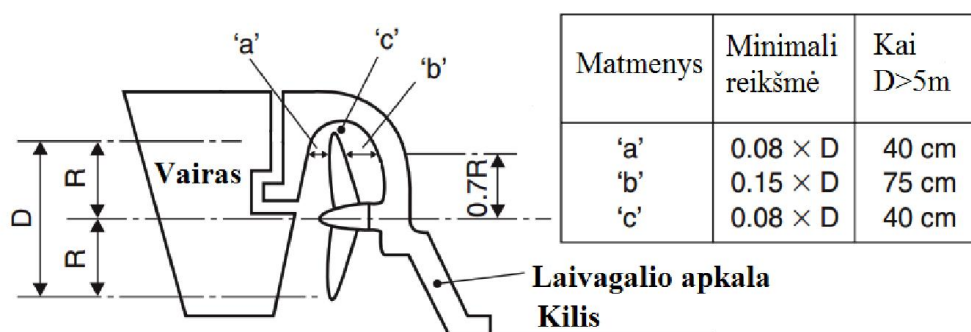
*Lokalūs virpesiai* – tai virpesiai, kurie pasireiškia kai atskira laivo konstrukcija ar mechanizmas rezonuoja. Šiuos virpesius būtina įvertinti laivo projektavimo metu.

Vibraciją laive dažniausiai sukelia šie įrenginiai:

- sraigtas ir veleno linija (periodinė vibracija);
- pagrindinis eigos variklis (periodinė vibracija);
- kitos laivinės mašinos ir įrenginiai: pagalbiniai varikliai, siurbliai, aušinimo sistema ir oro kondicionieriai, centrifugos ir kt. (periodinė vibracija);
- jūros ir aplinkos poveikis – bangos, stiprus vėjas (atsitiktinė vibracija). [4, 20]

Sraigtui sukantis atsiranda kintamas vandens slėgio laukas, kuris sužadina veleno linijos ir laivagalio rėminių konstrukcijų bei apkalos vibracijas. Sraigtas žadina virpesius dėl: neidentiškai pagamintų (geometrija, medžiagos neizotropiškumas) ar eksploatacijos metu sugadintų menčių; sraigto aptenkančio nevienodo vandens srauto; kai sraigtas turi netinkamą skaičių menčių (projektavimo klaida); kintamo stūmimo; kavitacijos reiškinio ir kt.

Taip pat sraigto vibracija gali padidėti dėl projektavimo kaltės, kai laivui parinktas ir sumontuotas sraigtas yra per didelio diametro, tada charakteringi tarpai tarp sraigto ir laivagalio bei pavairavimo įrenginio (angl. *rudder*) yra per maži (žr. 1.1.2.3 pav.). [6]



1.1.2.3 pav. Minimalūs sraigto atstumai nuo laivagalio konstrukcijų [6]

Laivinių vidaus degimo variklių virpesius sukelia įvairūs reiškiniai: alkūninio veleno mechanizmas, išmetimo dujų, kuro ir oro padavimo sukelti slėgio svyravimai, vožtuvai, turbinos veikimas. Paprastai vidaus degimo variklių žadinamų virpesių dažnis prasideda nuo 5 Hz. Prognozuojant variklio perduodamus virpesius laivo korpusui, būtina žinoti variklio žadinamus dažnius. Projektuojant laivą, tokią informaciją paprastai pateikia variklio gamintojas.

Matuojant virpesius, matuojamos absoliučiuųjų greičių kvadratinį vidurkių  $v_{RMS}$  reikšmės (angl. *Root Mean Square*). Šis greitis yra tiesiog proporcingas virpesių energijai. Taip pat kartais matuojami virpesių poslinkiai ir virpesių pagreičiai. Panaudojus Furjė transformacijas (angl. *Fast Fourier Transformation - FFT*) išmatuotiems virpesiams gaunamas virpesių amplitudės ir dažnių priklausomybės grafikas, vadinamas dažnių spektru. Moderniuose virpesių matavimo prietaisuose Furjė transformacijos paprastai atliekamos automatiškai. [10, 31]

Jūros bangavimas sukelia labai žemo dažnio laivo korpuso virpesius (iki 2 Hz). Ramioje jūroje virpesių dažnis yra vos 0,01 Hz. Tačiau šio tipo virpesiai neretai sukelia jūros ligą. [20]

Virpesiai žalingai veikia žmogus sveikatą. Virpesių dažniui esant iki 2 Hz, žmogaus kūnas juos „priima“ kaip vientisas elementas, o dažniui esant didesniai nei 2 Hz, organai į juos reaguoja kaip atskiri elementai. Pateikiami kai kurių žmogaus organų savieji virpesių dažniai:

- Galvos 20 – 30 Hz. Kai dažnis yra 60 – 90 Hz, gali pasireikšti regėjimo sutrikimai;
- Krūtinės ląstos 3 – 7 Hz. Prie dažnio gali kilti kvėpavimo problemos;
- Širdies 4 – 8 Hz. Prie tokio dažnio gali pasireikšti širdies negalavimai;
- Pilvo srities organų 4 – 9 Hz;
- Stuburo 2 – 6 Hz;
- Dubens 4 – 9 Hz;
- Virpesių dažniui esant arti 2 Hz žmogus tiesiog jaučiasi prastai. [20]

## 1.2. Virpesių mažinimo būdai ir priemonės

Kai eksploatuojant laivą pamatoma, jog dirbant pagrindiniams įrenginiams, laive pasireiškia vibracija, tada juos keisti kitokių parametrų įrenginiais yra ekonomiškai nepriimtina ir neracionalu. Tokiu atveju yra ieškoma paprastesnių virpesių mažinimo būdų. Tada pats efektyviausias ir pigiausias būdas yra sumažinti laivo korpusui bei kitiems įrenginiams perduodamus virpesius. [4]

Prieš imantis virpesių šalinimo laive prevencijos, reikia išsiaiškinti kas yra kaltininkas, t.y. kuri laivinė mašina ar mechanizmas skleidžia šiuos priverstinius žadinančius virpesius. Tokius virpesius skleidžiantis šaltinis gali būti identifikuotas naudojant vibracijos matavimo keitiklius ir/arba jutiklius, kurie matuoja rezonansinio dažnio amplitudes. [6]

Efektyviausi yra šie keturi pagrindiniai virpesių mažinimo būdai: [6]

- sumažinti virpesius žadinančią jėgą;
- padidinti mašinos ar įrenginio įtvirtinimo standumą;
- vengti savųjų ir priverstinių virpesių dažnių santykio lygaus vienetui ( $f_s / f_p = 1$ );
- padidinti sistemos virpesių slopinimą.

**Virpesius žadinančios jėgos sumažinimas.** Atvejais, kai virpesius žadina sraigtas, virpesiai gali būti sumažinami pakoregavus sraigto hidrodinamiką. Todėl šiuolaikiniuose laivuose plačiai naudojami varytuvai su vandens srauto kreipiančiosiomis (1.2.1 pav).



1.2.1 pav. Tandeminis sraigtas su vandens srauto kreipiančiąja

Panašų rezultatą galima pasiekti pakeitus atstumą tarp sraigto ir korpuso, kad besisukančio sraigto sukeltos hidrodinaminės jėgos būtų mažesnės (žr. 1.1.2.3 pav.) arba pakeitus sraigto su kitokia menčių geometrija, skaičiumi ar specialiu kompiuteriu valdomu menčių pasisukimu.

Nesubalansuoto pagrindinio variklio alkūninio veleno atveju neišsvertos jo dinaminės jėgos žadins virpesius. Šių išcentrinių jėgų dydį galima sumažinti tinkamai subalansavus veleną. [6, 10]

**Standumo padidinimas.** Laivo virpesių lygis tiesiogiai priklauso nuo žadinančios jėgos dydžio ir atvirkščiai – nuo sistemos standumo, todėl padidinus sistemos standumą, sumažėtų virpesių lygis. Tačiau būtina atsiminti, kad pakeitus sistemos standumą, pasikeičia sistemos savasis virpesių dažnis ir tam tikrais atvejais virpesių lygis gali net padidėti. Todėl keičiant sistemos standumą, reikia visa tai tinkamai įvertinti atlikus specialius inžinerinius skaičiavimus. [6]

**Vengti savųjų ir priverstinių virpesių dažnių santykio lygaus vienetui.** Jei šis santykis yra lygus vienetui arba labai artimas jam, tai įvyksta rezonansas, kurio metu ženkliai padidėja virpesiai,

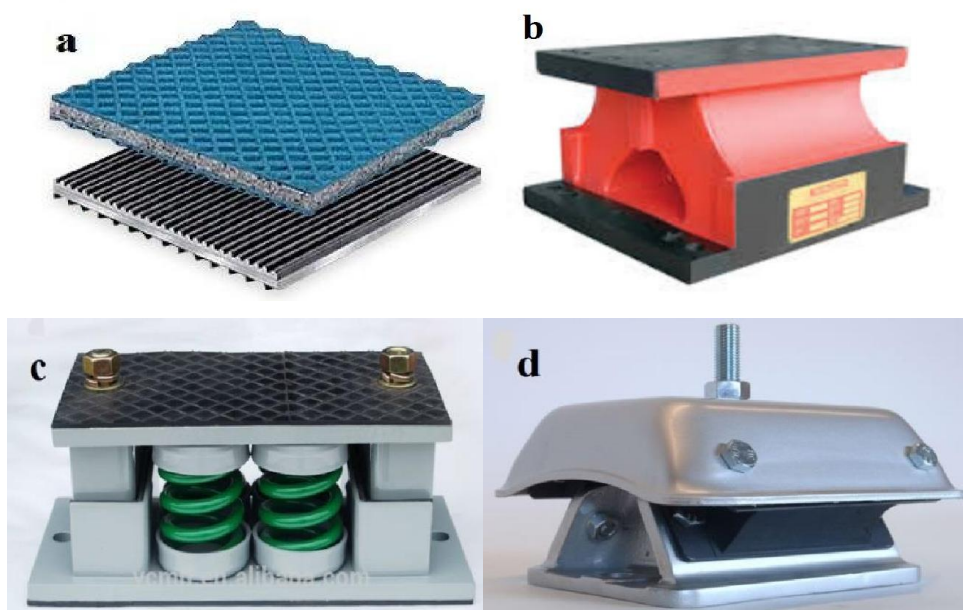
Savųjų ir priverstinių virpesių dažnių santykio lygaus vienetui galima išvengti keičiant vieno iš šių dažnių vertę. Paprasčiausias būdas tai padaryti – pakeisti standumą. [6]

**Sistemos virpesių slopinimo padidinimas.** Kiekviena mechaninė sistema turi tik jai būdingą slopinimą (priešingu atveju, virpesiai laikui bėgant neužgęstu ir, nutraukus išorinį žadinimą, tęstųsi amžinai). Laivo korpuso slopinimas yra labai mažas, todėl virpesių lygis rezonanso metu beveik nepriklauso nuo laivo korpuso virpesių slopinimo. Būtina atsiminti, kad korpusas yra panardintas į vandenį, o vanduo elgiasi kaip virpesių slopintuvas. Laivo korpuso slopinimo padidinimas yra sunkiai įmanomas, todėl šio parametro keitimas yra sudėtingiausias. [6]

*Virpesių izoliavimas.* Kai kuriuos vidinius vibracijos šaltinius galima bent jau dalinai izoliuoti nuo tolesnio jos plitimo. Virpesių izoliavimas – tai konstrukcinis būdas, skirtas sumažinti mechaninius virpesius, kurie iš laivų mašinų ar pagalbinių įrenginių yra perduodami į aplinką per pakabą, pamatus ir panašiai. Šio būdo esmę teoriškai apibrėžia tokie teiginiai:

- 1) priverstinių virpesių amplitudė yra maža, kai mašinos (sistemos) savasis dažnis yra gerokai mažesnis už žadinimo dažnį;
- 2) slopinimas sugeria virpesių energiją ir tuo mažina priverstinių virpesių amplitudę, ypač rezonanso srityje, be to, užgesina laisvuosius virpesius.

Pirmuoju teiginiu pagrįstas *vibroizoliatorių* (tamprių elementų – specialių guminių ar plastikinių pagalvėlių, metalinių spyruoklių ir kt.) naudojimas (1.2.2 pav.). [4, 37]



1.2.2 pav. Laivinių mašinų pamatiniai vibroizoliatoriai. a – specialios sandaros guminės tarpinės; b – atraminė pagalvė; c – spyruoklinis amortizatorius; d – plastikinis amortizatorius [4, 37]

Antrasis teiginys tinka *slopintuvams*, turintiems kokios nors rūšies trinties (skystinės, oro, sausosios, histerezinės) elementą ar jų kombinacijas. Dažnai vibroizoliatoriai ir slopintuvai įtaisomi viename korpuse, t.y. padaroma jų kombinacija. [37]

Virpesių izoliavimas pagal paskirtį skirstomas į: *aktyvųjų* ir *pasyvųjų*. Abiem atvejais sistemoje naudojami prieš tai paminėti elementai, tačiau jų vaidmenys skiriasi.

*Aktyviojoje* sistemoje vibroizoliatoriai statomi tarp virpesių šaltinio ir pamato. Jie neleidžia žadinimo jėgai tiesiogiai veikti pamatą.

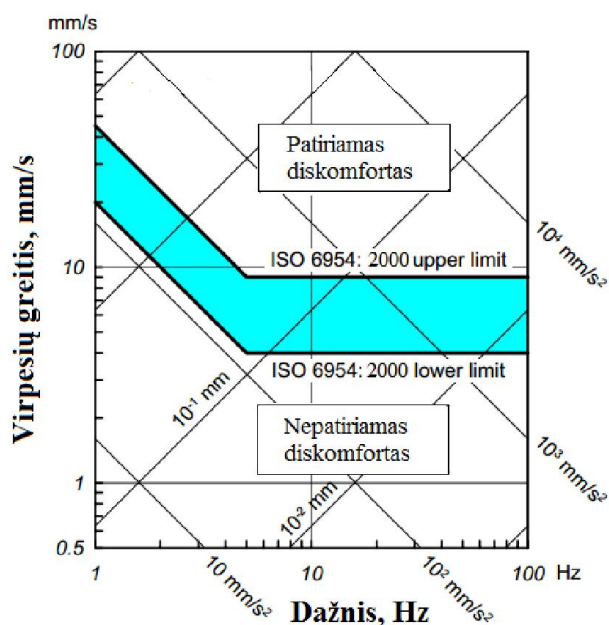
*Pasyviojoje* sistemoje, atvirkščiai, vibroizoliatoriai saugo mašiną nuo galimų pagrindo virpesių. [37]

### 1.3. Virpesių normatyvai ir reglamentai

Laivo eksperimentiniai virpesių tyrimai turi būti atliekami ne tik pastačius laivą, bet ir reguliariai jo eksploatavimo metu. Tam naudojama speciali virpesių tyrimo aparatūra, o išmatuotos virpesių vertės (virpesių lygis) palyginamos su tarptautiniuose standartuose numatytomis vertėmis. Galima išskirti tris laivo virpesių reglamentavimo grupes: [30]

- 1) Virpesių normos įgulai ir keleiviams.
- 2) Virpesių normos lokaliems laivo elementams.
- 3) Virpesių normos pagrindinėms mašinoms.

**Virpesių normos įgulai ir keleiviams.** Tarptautinis standartas, nustatantis leistinus mechaninių virpesių parametrus laivo įgulai ir keleiviams yra ISO 6954:2000. Šis standartas numato virpesių lygio vertes, kurioms esant, laivo įgula ir keleiviai patiria / nepatiria diskomforto. [13, 19]



1.3.1 pav. Standarte ISO 6954:2000 numatytos virpesių normos laivo įgulai ir keleiviams [19]

1.3.1 lentelė. Leistini virpesių lygiai keleivinių laivų patalpose pagal ISO 6954:2000 [19]

Keleivių bei ekipažo reakcija	Vibracijos greičio ir pagreičio reikšmės					
	A klasės patalpa		B klasės patalpa		C klasės patalpa	
	mm/s <sup>2</sup>	mm/s	mm/s <sup>2</sup>	mm/s	mm/s <sup>2</sup>	mm/s
Galimas diskomforto pojūtis	Daugiau nei 143,0	Daugiau nei 4,0	Daugiau nei 214,0	Daugiau nei 6,0	Daugiau nei 286,0	Daugiau nei 8,0
Mažai tikėtinas diskomforto pojūtis	Mažiau nei 71,5	Mažiau nei 2,0	Mažiau nei 107,0	Mažiau nei 3,0	Mažiau nei 143,0	Mažiau nei 4,0

Pastaba: Likęs intervalas tarp viršutinės ir žemutinės reikšmių laikomas normaliomis gyvenimo, poilsio bei darbo sąlygomis laive ir laikomas priimtiniu.  
A klasės patalpa – keleivių kajutės; B – įgulos gyvenamosios patalpos; C – darbinės patalpos.

Pagal tarptautinį standartą ISO 2631:2003 virpesių poveikis žmogui apibūdinamas: mažiau nei  $0,3 \text{ m/s}^2$  - jokio diskomforto; nuo  $0,3$  iki  $0,6 \text{ m/s}^2$  - nedidelis diskomfortas; nuo  $0,6$  iki  $1,0 \text{ m/s}^2$  - juntamas diskomfortas; nuo  $1,0$  iki  $1,6 \text{ m/s}^2$  - diskomfortas; nuo  $1,6$  iki  $2,5 \text{ m/s}^2$  - didelis diskomfortas; daugiau nei  $2,5 \text{ m/s}^2$  - pavojingas diskomfortas. [18, 20]

**Virpesių normos lokaliems laivo elementams.** Lokalių mašinų padidintų virpesių poveikio turi būti išvengiama tam, kad sumažinti mašinų sugadinimo riziką. Lokalūs elementai, tokie kaip variklio pamatas, tankų sistemos ar radarų stiebai, gali būti sugadinti dėl medžiagos nuovargio, kurį sukelia padidėję virpesiai. Mašinų defektai pasireiškia dėl padidintų virpesių, apkrovų, įtempimų koncentracijų bei medžiagų savybių. Todėl lokalioms mašinoms nurodyti leistini virpesių parametrai yra kaip rekomendacinio pobūdžio mašinoms dirbančioms nominaliu apkrovimu. [17]

**Virpesių normos pagrindinėms mašinoms.** Standartas ISO 10816:2003 mašinas pagal paskirtį, gabaritus ir pamatus, ant kurių yra sumontuotos skirsto į keturias klases:

1.3.2 lentelė. ISO 10816:2003 rekomenduojamos  $v_{RMS}$  reikšmės atskiroms mašinų klasėms ir jų techninei būklei įvertinti pagal virpesių intensyvumo sritis [16]

Virpesių greitis, $v_{RMS}$ , mm/s	Pirmoji mašinų klasė	Antroji mašinų klasė	Trečioji mašinų klasė	Trečioji mašinų klasė
0,28 - 0,71	A			
1,12	B	A	A	A
1,80		B		
2,80	C	C	B	B
4,50			C	
7,10	D	D	C	C
11,20			C	
18,00			D	D
28,00 – 45,00			D	

*Pirmoji mašinų klasė.* Iki 15 kW galios mašinos, nereikalaujančios specialių pamatų.

*Antroji mašinų klasė.* Vidutinės galios (nuo 15 iki 75 kW) ant standžių pamatų pritvirtinti varikliai ir iki 300 kW galios mašinos, pritvirtintos ant specialios konstrukcijos pamatų.

*Trečioji mašinų klasė.* Tai didelės galios varikliai ir rotorinės mašinos, pritvirtintos ant masyvių ir virpesių matavimo kryptimi standžių pamatų.

*Ketvirtoji mašinų klasė.* Tai labai didelės galios varikliai ir rotorinės mašinos, pritvirtintos ant specialios konstrukcijos pamatų, kurie virpesių matavimo kryptimi yra tamprūs. [16]

*Virpesių sričių (A, B, C ir D) reikšmės:* **A** – mašinos techninė būklė yra gera; **B** – mašinos techninė būklė yra patenkinama; **C** – mašina gali veikti tik ribotą laiką iki remonto; **D** – mašiną eksploatuoti draudžiama dėl per didelio (pavojingo) virpesių intensyvumo. [16]

## 1.4. Virpesių tyrimo priemonės ir matavimo ypatumai

Laivinių mašinų ir kitų įrenginių virpesių *monitoringas* – tai periodinis, sistemingas ir nepertraukiamas virpesių matavimas, matavimų rezultatų analizė, archyvavimas, duomenų bazių sudarymas, ir jų taikymas praktikoje defektų nustatymui bei siekiant išvengti netikėtų gedimų. [10]

Tik išvysčius mechaninių virpesių matavimo keitiklių ir jutiklių gamybos technologiją, efektyvius elektrinių signalų analizės metodus ir sukūrus tam tinkamus prietaisus, praktikoje buvo realizuoti šiuolaikiniai mašinų techninės būklės monitoringo ir gedimų diagnostikos metodai, kurie nuolat vystomi ir tobulinami. Šie metodai realizuojami virpesių matavimo keitikliais (ir jutikliais) bei kompiuterizuotais virpesių signalų analizatoriais (VSA). Šiuolaikiniai VSA yra patogūs, ne dideli, su spalvotu ryškiu ekranu, kuriame iš karto matome matuojamų virpesių parametrus ir grafikus, arba be jų, kai tai riboja gabaritai. Bet kuriuo atveju juos galima prijungti prie kompiuterio ir išsikelti visus gautus matavimų parametrus. [8, 10]



1.4.1 pav. Virpesių signalų analizatoriai (VSA). Kairėje – „Adash A4404“ kompaktiškas analizatorius, jungiamas prie kompiuterio; dešinėje – „SKF Microlog Analyzer AX“ analizatorius su raiškiu ekranu [38, 41]

Pasaulyje yra labai daug virpesių matavimo priemonių gamintojų, tokių kaip: Adash, SKF, SPM, Oros, Pruftechnik, B&K, Bently Nevada, Schenck, Profess, Easy Laser, Fluke ir kt.

Turint reikiamą įrangą (VSA su virpesių matavimo keitikliais) virpančio daikto, pavyzdžiui, laivinės mašinos, virpesių parametrus nustatyti nėra sudėtinga. Svarbu parinkti tinkamą virpesių matavimo keitiklį ir tinkamai jį pritvirtinti prie matuojamų laivo mašinų ir kitų įrenginių. [13]

Tačiau norint nustatyti laivinio elemento savuosius rezonansinius virpesių dažnius, būtina žinoti būdą kaip tai atlikti. Praktikoje yra naudojami du metodai:

- Smūginis metodas.
- Žadinimo metodas.

**Smūginis metodas.** Šis metodas yra paprastas ir plačiai taikomas. Smūginiu metodu laivo elementų rezonansiniai dažniai nustatomi tokia tvarka: pirma – ant plokščio paviršiaus nejudamai (tvirtai) pritvirtinamas virpesių keitiklis ir įjungimas virpesių signalų analizatorius; antra – su plaktuku suduodamas žadinimas į matuojamą paviršių, po smūgio šis paviršius suvibruoja savuoju dažniu ir užgęsta; trečia – atliekama išmatuoto virpesių signalo FFT (angl. *fast Furje transformation*) spektrinė analizė ir grafiškai nustatomi rezonansiniai dažniai. Šis metodas pagrindinai yra naudojamas plokščių elementų sienelių rezonansiniams dažniams išmatuoti.

**Žadinimo metodas.** Žadintuvą sudaro virpesių dažnio keitikliu valdomas elektros variklis ir prie jo prijungtas ekscentrikas. Žadintuvą pritvirtinus prie laivo korpuso tam tikros vietos ir įjungus elektros variklį, žadintuvas žadins harmoninio dažnio virpesius. Šiuo įrenginiu galima pakeisti žadinančios jėgos dydį ir žadinimo dažnį. Pagrindinis šio metodo privalumas – laive galima žadinti įvairių dažnių virpesius, atitinkančius pagrindinio variklio ar sraigto žadinimo dažnį.

### **Virpesių matavimo įranga.**

Virpesių matavimo jutikliai (arba keitikliai) gali matuoti tris skirtingus kinematinis virpesių parametrus: *virpesių poslinkį, greitį ir pagreitį*. Kiekvienas minėtas kinematinis parametras gali būti išreiškiamas vienas per kitą. Pavyzdžiui, virpesių greičiui išmatuoti puikiai tinka tiek virpesių greičio, tiek pagreičio matavimo keitiklis. Tokiu atveju virpesių pagreičių signalą suintegravus galima gauti virpesių greitį. Tačiau virpesių signalo diferencijavimas labai retai taikomas, nes diferencijuojant signalą gaunami pašaliniai triukšmai, t.y. iškraipomas signalas. [8,10]

Mechatronikoje yra naudojamos keitiklio ir jutiklio sąvokos. *Keitiklis* – tai matavimo prietaisas, keičiantis bet kokios rūšies energiją į elektros energiją. *Jutiklis* – tai matavimo prietaisas, reaguojantis į to paties fizikinio dydžio pokyčius. [8, 10]

**Bekontaktiniai virpesių poslinkio matavimo jutikliai.** Šie jutikliai naudojami tiesiogiai matuoti besisukančio veleno virpesių poslinkius. Praktikoje plačiai paplitę indukciniai jutikliai, kurių veikimo principas pagrįstas Fuko srovėmis. Jutiklis veikia kaip aukšto dažnio vibratorius, kai jutiklio apvija maitina aukšto dažnio elektros srove ir sužadina magnetinį lauką. Taip nustatomas tarpo tarp jutiklio galo ir veleno cilindrinio paviršiaus pokytis, kaip pateikta 1.4.2 pav. [8, 9, 10]



1.4.2 pav. Indukcinių bekontaktinių poslinkio matavimo jutiklių taikymas praktikoje [8]

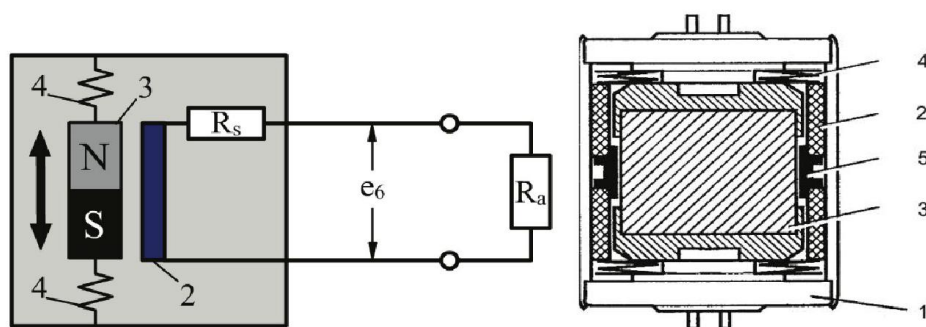
Matuojamo didžiausio poslinkio dydis priklauso nuo jutiklio apvijos skersmens ir siekia nuo 2 iki 8 mm. [8, 9, 10]

*Trūkumai.* Jų matavimo tikslumas priklauso nuo matuojamo objekto geometrinių paklaidų, paviršiaus šiurkštumo, mechaninių pažeidimų, paviršiaus elektrinių savybių nevienodumu. [10]

**Virpesių greičio matavimo keitikliai.** Jie priskiriami seisminiams, nes matuoja absoliučiuosius mašinos korpuso virpesių greičius. Tai pirmieji praktikoje panaudoti keitikliai.

Keitiklis matuoja absoliutųjį mašinos virpesių greitį, nes keitiklio korpusas (1) su rite (2) juda sinchroniškai su matuojamu objektu. Keitiklio pastovaus magneto (3), pakabinto ant spyruoklių (4), judesys ritės (2) atžvilgiu yra reliatyvusis. Ritė, įtvirtinta keitiklio korpuse, juda kartu su mašinos korpusu pastovaus magneto (3) sužadinto magnetinio lauko aplinkoje. Taip ritėje indukuojama elektrovaros jėga, proporcinga mašinos korpuso virpesių greičiui.

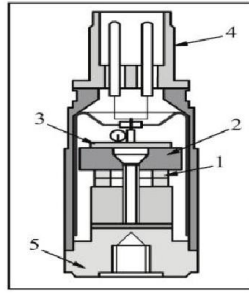
*Trūkumai:* dėvėsi judančios mechaninės dalys, dėl medžiagos nuovargio kinta spyruoklės standumas, jautrūs pašalinių magnetinių laukų veikimui bei temperatūriniais pokyčiams. [8, 9, 10]



1.4.3 pav. Virpesių greičio matavimo keitiklio schema. 1 – keitiklio korpusas; 2 – nejudanti ritė; 3 – judantis magnetas; 4 – magnetą laikanti spyruoklė; 5 – ritės laikiklis [10]

**Virpesių pagreičio matavimo keitikliai.** Laivinių mašinų virpesių pagreitis, kaip dinaminis parametras, yra informatyvus vertinant mašinos techninę būklę, todėl praktikoje yra naudingas ir plačiai paplitęs. *Akselerometrai* – tai plačiai paplitę mašinų matuojamų virpesių pagreičio keitikliai. Jie yra santykinai nebrangūs ir patikimi.

*Pjezokristaliniai akselerometrai - pjezoakselerometrai* kaip seisminiai keitikliai naudojami matuoti absoliučiuosius mechaninius virpesius plačiame dažnių intervale. *Pjezokristalas* – tai pagrindinis akselerometro elementas, kuris generuoja elektros krūvį, jo didumas yra proporcingas įtempimams pjezoelektrinėje medžiagoje. Jis generuoja elektros krūvį  $q_a$ , kurio dydis proporcingas įtempimams, atsiradusiems kristalą veikiant apkrovai. Elektros krūvio dydis yra proporcingas dinaminei apkrovai. Vibruojanti, pastovaus dydžio masė ( $m_3$ ) ir ją veikiantis virpesių pagreitis ( $a$ ) nustato jėgą, kuri yra įtempimų atsiradimo priežastis pjezokristale. Keitiklis transformuoja kinetinę virpančios masės ( $m_3$ ) energiją į elektros energiją, t.y. į elektrinį signalą. [8, 9, 10]



1.4.4 pav. Virpesių pagreičio matavimo keitiklio schema. 1 – žiedo formos pjezokristalai; 2 – pastovaus dydžio masė  $m_3$ ; 3 – elektroninis stiprintuvas; 4 – jungtis; 5 – korpusas [8]

Norint gauti kuo tikslesnius rezultatus, svarbu techniškai teisingai tvirtinti akselerometrą prie matavimo vietos, nes tai tiesiogiai įtakoja matavimo rezultatų tikslumą. [10]

*Privalumai:* tinka naudoti gamybos sąlygomis, hermetiški, nekelia triukšmo, platus dažnių intervalas, nejautrūs perkrovimui, turi temperatūrinę kompensaciją, patikimi, ilgaamžiai.

*Trūkumai:* mažas signalo lygis žemų dažnių srityje, išėjimo signalo elektrinis krūvis ir sunkiai identifikuojamas tarp kitokio tipo signalų.

## 1.5. Virpesių modeliavimas BEM metodu

*Baigtinių elementų metodas BEM* (angl. *FEM – Finite Element Model*) – tai skaitinis modeliavimo metodas. Tai vienas iš plačiausiai taikomų metodų, skirtų mechaninių, šiluminių, hidraulinių ir kitokių fizinių sistemų uždaviniams spręsti bei dinaminiam procesams modeliuoti. BEM yra paremtas diferencialinių lygčių dalinių išvestinių sprendimu. [1, 5]

BEM pagrindu yra sukurta daug universalių modeliavimo programų, pavyzdžiui, ANSYS, ALGOR, NASTRAN, ABAQUS, COSMOS, LUSAS ir panašiai. [5]

Baigtinių elementų metodas gali būti realizuotas dviem būdais: *diskretiniais ir kontinuumo elementais*. Diskretiniais elementais modeliuojami kūnai neturi savo geometrijos (tūrio), t.y. kūnai, kurių tiksli geometrija nėra svarbi, o kūnų fizikinės savybės aprašomos realiomis konstantomis. Kontinuumo elementais paprastai modeliuojami kūnai, kurių tiksli geometrija yra svarbi.

Norint gauti kuo tikslesnius rezultatus, svarbu teisingai parinkti elemento tipą ir teisingai sudaryti tinkliuką (angl. *mesh*), t.y. viso modelio suskaidymas mažais baigtiniais elementais, kurie tarpusavyje yra sujungti mazgais. Baigtinio elemento dydžio parinkimas yra susijęs su rezultatų tikslumu. Tankesnis tinkliukas reikalingas tose vietose, kur deformacijų ar įtempimų gradientas yra didesnis. Tuo tarpu, santykinai stambesni elementai gali būti naudojami tose vietose, kur deformacijų ar įtempimų gradientas yra mažas, taip pat tose vietose, kurios nėra reikšmingos. [5]

## 1.6. Mokslinių straipsnių analizė

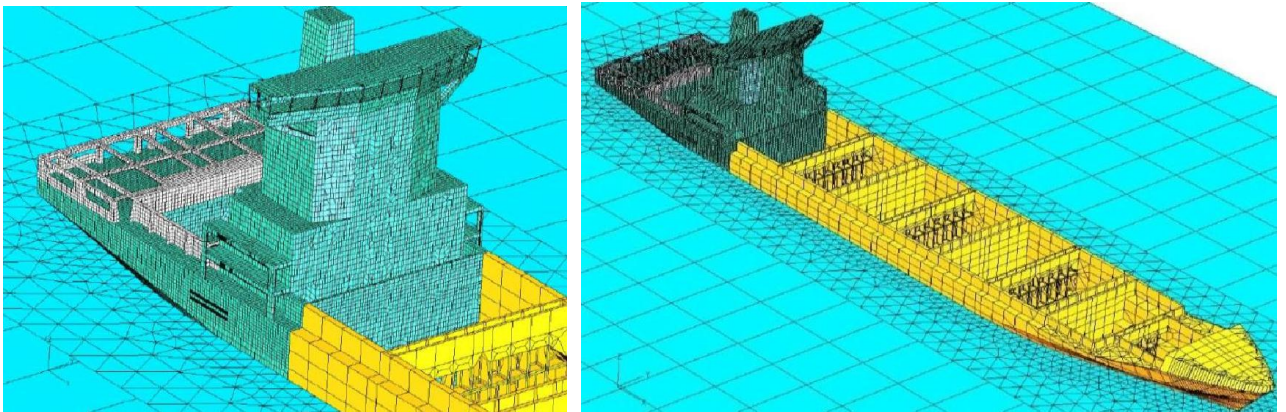
Mokslinių straipsnių analizėje tikslinga apžvelgti tyrimus, susijusius su projektuojamų laivų projektiniais viso korpuso ar atskirų jo elementų virpesių lygio tyrimais baigtinių elementų metodais (BEM), esamų ir jau eksploatuojamų laivų periodinę virpesių diagnostiką ir monitoringą, naudojant šiuolaikinę modernią ir tikslią matavimo įrangą, siekiant išvengti medžiagos nuovargio ir po to sekančios mašinos ar kito elemento avarijos. Taip pat tikslinga apžvelgti virpesių lygio laivuose mažinimo metodus ir jų prevencijos priemones.

### 1.6.1. Laivo ir jo konstrukcijų virpesių lygio tyrimas naudojant BEM

Y. Gul ir L. Kaydihan darbe [14] pateikta projektuojamo 1900 TEU konteinervežio vibracijos lygio tyrimo baigtinių elementų metodu eiga ir gauti rezultatai. Buvo sukurtas detalus jo modelis, kuriame pilnai atkurtas kevalas, įskaitant korpusą, antstatą bei propulsinę sistemą.

Konteinervežio pagrindiniai parametrai yra tokie: ilgis 182,25 m, plotis 28,00 m, borto aukštis 16,10 m, grimzlė 10,00 m, greitis 19,5 mazgo, dedveitas 26 200 t.

Modeliavimui buvo naudojama BEM programa „ABAQUS“. Kadangi galinėje laivo dalyje, yra daugiausia lokalių vibracijų formų ir vibracijų lygiai yra didesni nei priekinėje laivo dalyje, todėl laivagalio modelio tinkliukas (angl. *mesh*) buvo padarytas smulkesnis (žr. 1.6.1.1 pav.).



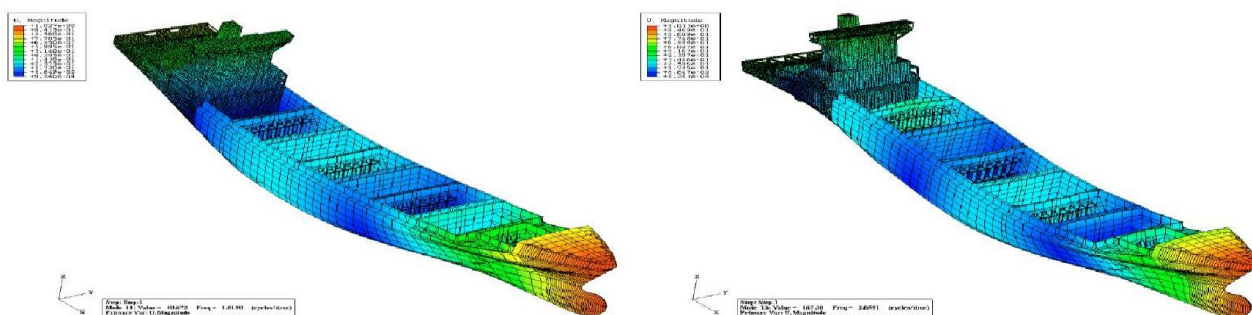
1.6.1.1 pav. Projektuojamo 1900 TEU konteinervežio BEM modelis. Kairėje matoma laivagalio dalis (smulkesnis tinkliukas), o dešinėje – viso laivo BEM modelis [14]

Siekiant kuo tikslesnių rezultatų ir kuo tiksliau atkurti hidrodinaminius efektus, buvo sumodeliuotas laivo korpusą gaubiantis vanduo. Krovinio ir kitos apkrovos buvo užduotos kaip inertinės masės, išskirstytos ant triumų dugno bei sieninių paviršių (siekiama atkartoti realų modelį). Sraigtas sumodeliuotas kaip inertinių masių elementas. Pagrindinis ir pagalbinių varikliai sumodeliuoti kaip stačiakampės tūrinės formos, kurios turi tokį patį svorio centrą ir svorį kaip tikras elementas. Atlikta ir aibė kitų darbų, tokių kaip optimalaus sraigto parinkimas ir kt.

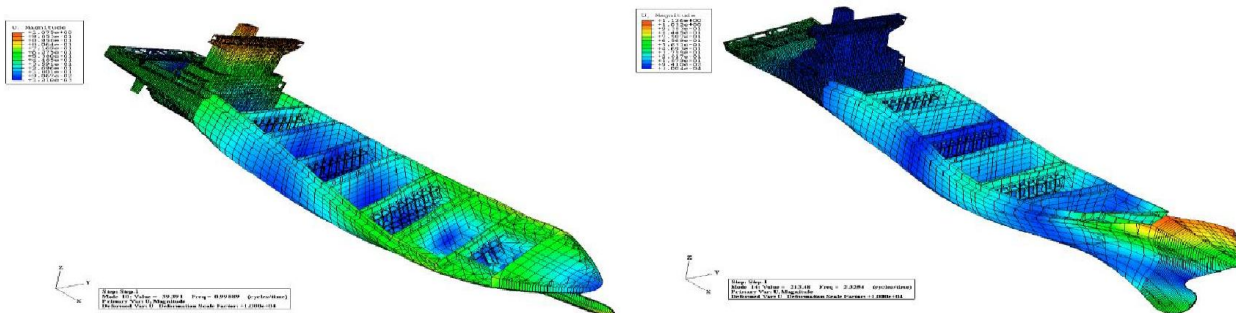
Gauti virpesių lygio rezultatai surašyti 1.6.1 lentelėje, o virpesių formos pateiktos paveiksluose (1.6.1.2; 1.6.1.3 ir 1.6.1.4 pav.). Pastaba: lentelėje pateiktos ir virpesių lygių reikšmės, kai neįvertinamas vandens poveikis. Pastebima, kad dalį virpesių „sugeria“ vanduo.

1.6.1.1 lentelė. Sušlapinto ir nesusšlapinto korpuso paviršiaus vibracijų palyginimas [14]

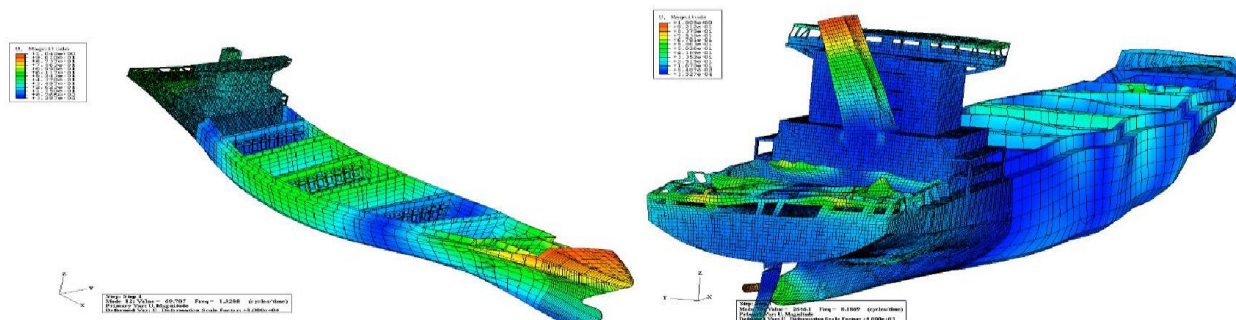
Virpesių forma	Sušlapinto paviršiaus virpesių dažnis, Hz	Nesusšlapinto paviršiaus virpesių dažnis, Hz
Pirma lenkimo forma (1.6.1.2 pav., a)	0,998	1,118
Antra lenkimo forma (1.6.1.2 pav., b)	2,325	2,546
Pirma sukimo forma (1.6.1.3 pav., a)	1,015	1,330
Antra sukimo forma (1.6.1.3 pav., b)	2,059	2,670
Horizontalaus lenkimo ir sukimo forma (1.6.1.4 pav., a)	1,328	1,510



1.6.1.2 pav. Lenkimo formos: kairėje pirmoji forma (1,015 Hz), dešinėje – antroji (2,059 Hz) [14]



1.6.1.3 pav. Sukimo formos: kairėje pirmoji forma (0,998 Hz), dešinėje – antroji (2,325 Hz) [14]

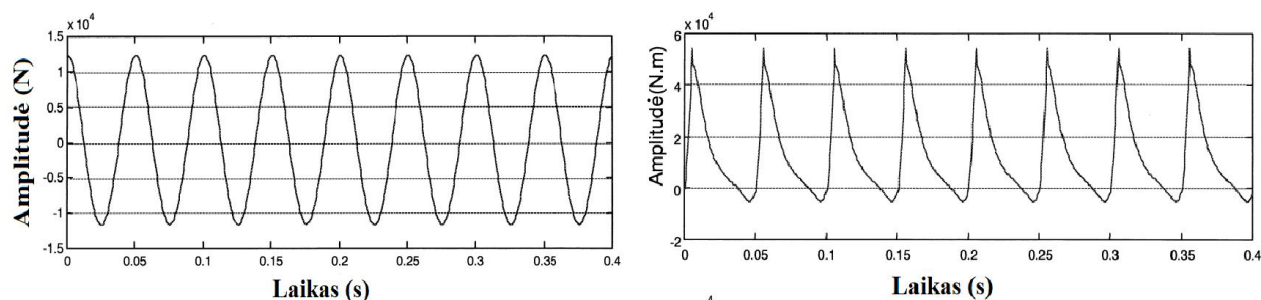


1.6.1.4 pav. Virpesių formos: kairėje – horizontalaus lenkimo ir sukimo forma (1,328 Hz), dešinėje – bendra suminė virpesių forma (8,186 Hz) [14]

Ilgą laiką laivų projektavimo metu parenkant pagrindinius eigos dyzelinius variklius ir jų tvirtinimo būdus prie pamato, buvo atsižvelgiama tik į stūmoklio slenkamųjų ir alkūninio veleno sukamųjų judesių sukiamas inercijos jėgas, tačiau į degimo proceso metu atsirandančias inercijos jėgas nebuvo kreipiama dėmesio, nes buvo norima palengvinti projektinius skaičiavimus.

Iki tol analitiškai ir eksperimentiškai buvo įrodyta tik tai, kad degimo proceso metu sukiamos jėgos padidina triukšmo lygį vidaus degimo varikliuose. Tačiau 2000 metais *H. Zheng, G. R. Liu, J. S. Tao ir K. Y. Lam* savo tiriamajame darbe [36] įrodė, kad degimo proceso metu sužadintos inercijos jėgos turi įtakos ir laivo virpesiams. Tyrimui buvo sudarytas baigtinių elementų modelis, kurio pagalba buvo nustatyta, kad dyzelinio variklio vertikali inercijos jėga (stūmoklio slenkamieji judesiai) sukelia tik tam tikro dažnio harmoninius virpesius. Tačiau degimo proceso virpesių dažnių spektras parodė, kad yra žadinami ir kitokio dažnio virpesiai (žr. 1.6.5 pav.).

Gauti rezultatai parodė, kad kai yra vertinamos ir degimo proceso metu sužadintos inercijos jėgos, tada laivo korpusui perduodamo virpesių lygio reikšmė gaunama didesnė, nei vertinant vien tik stūmoklio slenkamuosius judesius. Taip pat nustatyta, kad elastinių variklio tvirtinimo elementų sukamasis standumas sumažina dyzelinio variklio perduodamus žadinamus virpesius laivo korpusui.



1.6.1.5 pav. Gauti variklio grafikai: kairėje matomas vertikalios inercijos jėgos laiko grafikas (slenkamieji stūmoklio judesiai), kairėje – degimo proceso sukeltų jėgų laiko grafikas [34]

2012 metais *S. J. Hamedani, M. R. Khedmati ir S. Azkat* savo tiriamajame darbe [15] tyrė standinimo briaunomis sustandintų metalo lakštų (plokščių) panaudojimą laivo apkalai ir kitiems elementams. Tiriamo sustandinto metalo lakšto matmenys:  $1,6 \times 1,6 \times 0,02$  m. Standumo briaunos aukštis 0,08 m, o storis 0,01 m. Tyrime buvo naudojami tradiciniai teorinio skaičiavimo metodai ir modeliavimas baigtinių elementų metodu. Abiem būdais rezultatai beveik sutapo. Nustatyta, kad didinant standumo briaunų skaičių, atsparumas žadinamiems virpesiams didėja iki tam tikros ribos (apie 500 Hz, kai yra 5 standumo briaunos). Virš šios ribos standinimo briaunų skaičiaus didinimas pastebimos naudos nebesuteikia, t.y. gauta šio lakšto atsparumo virpesių poveikiui riba. Ataskaitoje taip pat pateiktos racionalios projektavimo rekomendacijos, galimas pritaikymas laivų gamyboje.

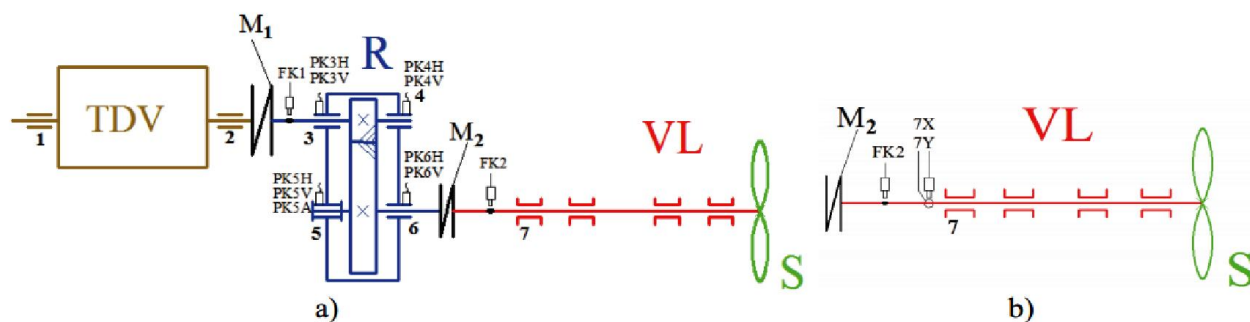
### 1.6.2. Laivo mašinų virpesių diagnostika ir monitoringas

2012 metais *H. Ahmadi ir K. Molladze* [2] savo moksliniame tiriamajame darbe tyrė jūrinio laivo elektrinio siurblio gedimą, naudodami virpesių tyrimo diagnostiką. Tyrime naudojo ISO 10816 (žr. 1.3.2 lent.) rekomendacijas ir pateiktas galimas didžiausias šio tipo variklio žadinamas virpesių reikšmes. Tyrimui buvo naudojamas pjezoakselometras „VMI-102 mode“. Atlikus tyrimą pastebėta, kad gautos virpesių reikšmės du kartus viršija leistinąsias reikšmes. Išardžius variklį buvo nustatytas guolio gedimas, kurio priežastis – nepakankamas jo tepimas. Todėl, veikiamas trinties jėgų ir susidarius abrazyvinei trinčiai, guolis buvo sugadintas. Jį pakeitus nauju, pakartotinai buvo atlikta diagnostika, kuri parodė, kad variklio žadinami viresiai neviršija leistinųjų reikšmių. Tyrimas laikomas nusisekusiu.

2014 metais *M. Vasylius, V. Barzdaitis, P. Mažeika, A. Tadžijevs ir V. Kartašovas* [33] savo moksliniame tiriamajame darbe atliko Baltijos jūroje plaukiojančio keltos varomosios sistemos virpesių tyrimą. Keltos varomąją propulsinę sistemą sudaro turbodizelinis variklis TDV, reduktorius R ir veleno linija VL, kurie tarpusavyje sujungti movomis M. Keltą varo dvi veleno linijos.

Keltos pagrindinių variklių reduktorių ir veleno linijų virpesių signalų matavimai atlikti daugiakanaliu virpesių signalų analizatoriumi OROS Mobi-Pack (Prancūzija), panaudojant (žr. 1.6.7 pav.): virpesių pagreičių keitiklius – pjezoakselometrus Wilcoxon 793 (JAV), virpesių poslinkių jutiklius – indukcinis Fuko srovių jutiklius EPRO PR6423 (Vokietija), fazės ir greičio matavimo keitiklius – Optel - Thevon 152G7 (Prancūzija). Virpesių signalai išsaugojami virpesių analizatoriaus kietajame diske, o virpesių signalų apdorojimas ir virpesių duomenų formatų analizė atliekama programinėmis įrangomis NVGate v8.2 ir OrbiGate v5.0.

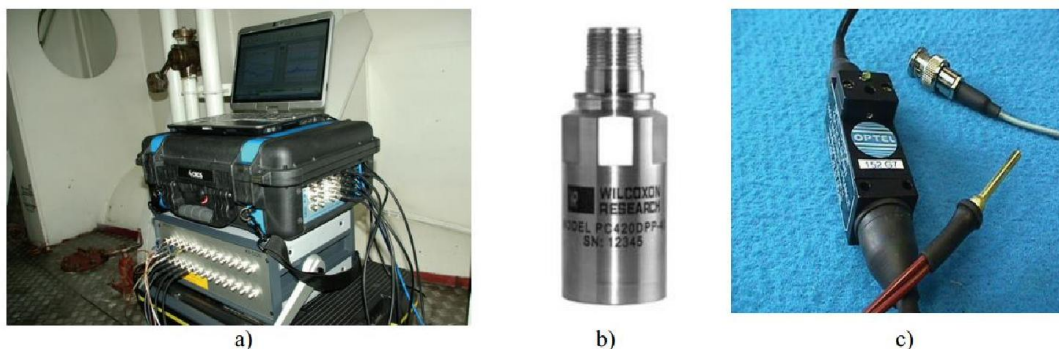
Tyrimas atliktas remiantis ISO 10816 rekomendacijomis (žr. 1.3.2 lent.). Atliekant laivo varomosios sistemos reduktoriaus guolių atramų virpesių greičių matavimus, virpesių pagreičių keitikliai buvo išdėstyti reikėtų kaip pateikta schemoje (1.6.2.1 pav.).



1.6.2.1 pav. Virpesių pagreičių keitiklių tvirtinimo vietas: (a) ant laivo varomosios sistemos reduktoriaus guolių atramų ir virpesių poslinkių jutiklių tvirtinimo vieta (b) prie slydimo guolių atramos (PK – virpesių pagreičių keitiklis, FK – fazės ir greičio keitiklis) [31]

Laivo varomosios sistemos reduktoriaus ir veleno linijos virpesių matavimai atlikti laivui plaukiant jūroje normaliu darbo režimu, variklio apkrova 55 - 57 % viso galingumo (6580-6740kW, kai variklio nominalus galingumas 12000kW). Atlikus bandymus, buvo padarytos išvados: jūrinio kelto reduktorių ir veleno linijos techninė būklė, vertinant pagal atliktus virpesių matavimus, yra gera ir keltas gali toliau nepertraukiamai dirbti ilgalaikiame darbo režime.

2014 metais *V. Barzdaitis, P. Mažeika, M. Vasylius, A. Tadžijevs ir V. Kartašovas* [7] savo moksliniame tiriamajame darbe atliko sudėtingą vertikalių balastinio vandens išcentrinių siurblių, sumontuotų ant bendro pagrindinio pamato (ant kurio yra sumontuoti ir pagrindiniai, varantieji vidaus degimo varikliai) virpesių tyrimą. Tyrimas yra sudėtingas, nes išcentrinių siurblių virpesių tyrimui trukdo ant to paties pamato sumontuotų pagrindinių eigos varikliai, iš kurių per pamatą puikiai sklinda jų žadinami virpesiai. Tyrimui naudojama įranga pavaizduota (1.6.2.2 pav.).



1.6.2.2 pav. a) Daugiakanalis virpesių analizatorius OROS – Mobipack; b) Virpesių pagreičių keitiklis Wilcoxon; c) greičio ir fazės matavimo optinis jutiklis Optel II Thevon 152G7 [7]

Atlikus eksperimentą, buvo padarytos išvados. *Pirma* - ištirta kokią įtaką matuojamiems virpesiams turi faktorius, kai įrenginiai yra sumontuoti ant bendro pagrindo: eksperimentiniais tyrimais ištirti išcentrinių siurblių pagrindinių darbo dažniai, kai VDV varikliai neveikia ir kai VDV veikia. *Antra* - tyrimais nustatyta, kad pagrindiniai VDV generuojami virpesiai fiksuojami dažnių diapazone (200 – 1000 Hz), todėl tai apsunkina pagalbinės įrangos riedėjimo guolių defektų diagnostiką bei stebėseną. *Trečia* - esant didesniam VDV sukimosi greičiui (apie 600 min<sup>-1</sup>) kai kuriuos tiriamo siurblio defektus būtų sudėtinga identifikuoti, nes VDV žadinamų virpesių dažniai sutaptų su tiriamo siurblio sinchroninio dažnio virpesiais ir įvyktų rezonansas.

2014 metais *P. Mažeika, V. Barzdaitis, M. Vasylius, A. Tadžijevs ir V. Kartašovas* [25] savo moksliniame tiriamajame darbe atliko ypač sudėtingą laivo vidaus degimo variklių (VDV) virpesių tyrimą. Vidaus degimo variklių virpesių tyrimų specifikai ir problematikai paaiškinti, tyrimo objektu buvo pasirinkti laivo – kelto du pagrindiniai vidaus degimo turbodizeliniai varikliai (po 12 MW, 300÷500 aps/min, 12-os cilindrų, V formos, 2006 metų gamybos). Jų nuotraukos pateiktos 1.6.2.3 pav. Abu varikliai yra identiškos konstrukcijos. Esminiai jų skirtumai yra tik tokie,

kad jų alkūniniai velenai sukasi priešingomis kryptimis ir skiriasi cilindru darbo eiliškumas. Eksperimentiniai tyrimai vykdyti keltui plaukiant Baltijos jūroje.



a) kairiojo variklio viršutinė dalis  
(2-as denis)



b) kairiojo variklio blokas  
(1-as denis)



c) dešiniojo variklio blokas  
(1-as denis)

### 1.6.2.3 pav. Laivo – keltų pagrindiniai eigos turbodieseliniai varikliai [25]

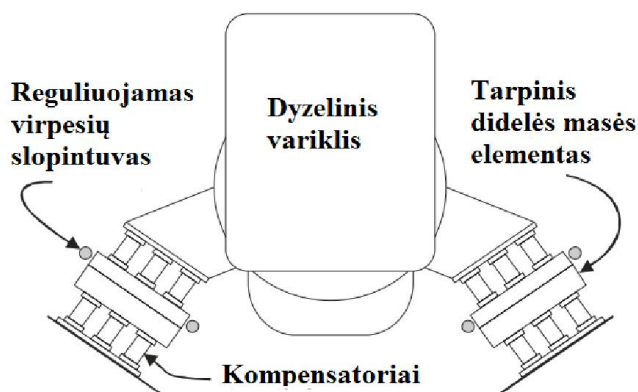
Kitas tyrimo objektas – tai asinchroninis elektros variklis (315 kW, keturių polių, valdomas dažnio keitikliu), sukantis išcentrinio siurblio darbo ratą. Šis objektas parinktas kaip palyginamasis objektas, kuriuo norima parodyti šio objekto virpesių tyrimo (defektų identifikavimo) specifika, tyrimo „paprastumą“ lyginant su vidaus degimo variklių diagnostiniais tyrimais.

Atlikus eksperimentą, buvo padarytos išvados. *Pirma* - pramoninių mašinų, tokių kaip elektros varikliai (mechaninės pavaros, įvairių tipų siurbliai, turbinos ir t.t.), yra ženkliai lengvesnė ir paprastesnė lyginant su vidaus degimo variklių diagnostiniais virpesių tyrimais. Tai yra todėl, kad pramoninėse mašinose paprastai nevyksta staigūs ir pastoviai kintantys pereinamieji procesai. *Antra* - šiuolaikinė virpesių diagnostinių tyrimų technika yra išstobulinta ir vis kuriama nauja. Kelte atlikti tyrimai parodė, jog standartinė virpesių tyrimų technologija (taikytina pramoninėms mašinoms) nėra informatyvi, todėl būtina ieškoti naujų metodų ir priemonių VDV patikimiems diagnostiniams tyrimams vykdyti.

### 1.6.3. Virpesių lygio mažinimo metodai ir prevencinės priemonės

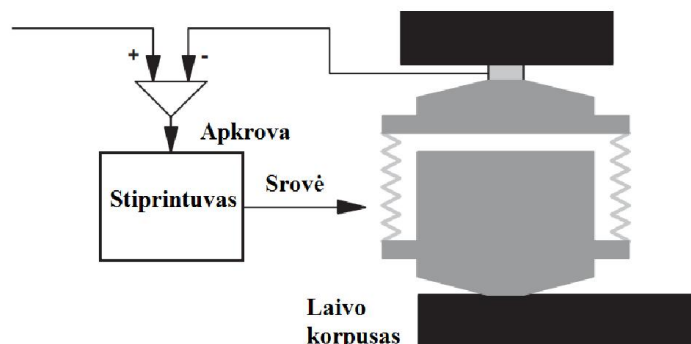
2004 metais *X. Li, C. Howard, C. Hansen ir M. Winberg* savo tiriamajame darbe [24] aprašė dvipakopę virpesių slopintuvo sistemą, skirtą „Collins“ klasės povandeniniams laivams (žr. 1.6.3.1 pav). Tokia sistema taikoma laivuose, kuriems yra keliami aukšti virpesių lygio ir triukšmo apribojimai, pavyzdžiui, kariniuose (ypač povandeniniuose), mokslinių tyrimų laivuose ir t.t. Tokią sistemą sudaro du komplektai paprastų guminių kompensatorių, tarp kurių montuojamas tarpinis didelės masės elementas, kuris smarkiai slopina variklio ir kitų laivinių mašinų perduodamus virpesius laivo konstrukcijai. Ant tarpinio elemento reguliuojamų strypelių montuojamas reguliuojamas virpesių slopintuvas. Reguluojant juos yra keičiamas slopintuvo savasis dažnis, kuris sąveikauja su virpesių žadintojo keliamu virpesių dažniu.

Sistemos trūkumas yra toks: slopintuvas veikia tik siaurame virpesių dažnių intervale, t.y. jei keičiamas variklio greitis, slopintuvas turi būti reguliuojamas iš naujo.



1.6.3.1 pav. Dvapakopė kompensatorių sistema „Collins“ [24]

Tais pačiais metais *S. Daley, F. A. Johnson, J. B. Pearson ir R. Dixon* savo tiriamajame darbe [12] sprendė pasyvios virpesių kontrolės trūkumą – santykinai mažą virpesių slopinimo efektyvumą esant žemam žadinančių virpesių lygiui. Buvo sukurta virpesių slopinimo sistema, sudaryta iš pasyviosios virpesių kontrolės ir elektromagneto kombinacijos (1.6.3.2 pav.).



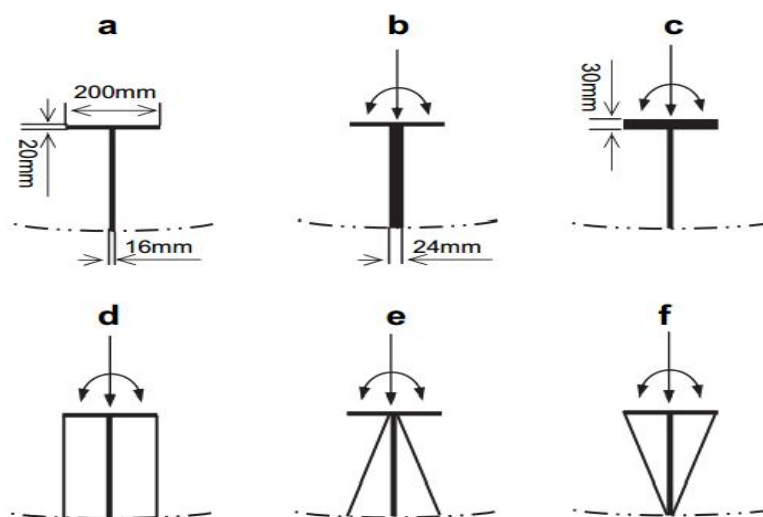
1.6.3.2 pav. „Smart Spring“ virpesių izoliatorius [12]

Virpesių izoliatoriaus „Smart Spring“ veikimas: srovė elektromagneto ritėje reguliuojama stiprintuvo (valdymo pulto) ir specialaus daviklio pagalba. Taip yra užtikrinama, kad sukuriama spyruoklės standumo jėga pilnai atsvers išorines jėgas. Tokia sistema puikiai tinka pagrindinių ir pagalbinių laivo mašinų tvirtinimui ir tuo pačiu - virpesių slopinimui.

2010 metais *T. Basten ir A. Berkhoff* [11] „Septynioliktame tarptautiniame triukšmo ir vibracijos kongrese, Olandijoje“ pristatė specialius virpesių sukėlėjus, kurie yra tvirtinami prie reduktoriaus ir prijungiami specialiomis jungtimis prie laivinės mašinos. Ypatybė yra ta, kad jie „nuskaito“ mašinos keliamus virpesių dažnius ir skleidžia tokio pat dažnio virpesius, tik jų fazė skiriasi  $180^0$ . Tokiu būdu žadintojo virpesiai yra maksimaliai slopinami. Tokie įrenginiai buvo sumontuoti Danijos kariniuose laivuose.

2011 metais *M. Bahtiarian* [4] aprašė dvipakopės virpesių slopinimo sistemos panaudojimą „Delaware“ (JAV) universiteto mokslinių tyrimų laive „R/V Hugh R. Sharp“. Šiame laive antros eilės kompensatoriai montuojami po atskira laivo korpuso platforma ant kurios montuojami varikliai. Taip yra slopinami žadinami virpesiai.

2008 metais *C. K. Mechefske ir T. R. Lin* savo tiriamajame darbe [22] ieškojo konstrukcinių būdų, kuriais būtų galima sumažinti pagrindinio eigos dyzelinio variklio virpesių poveikį laivo korpusui. Tyrimo metu buvo naudojamas 30 metrų ilgio patulinio tipo laivo baigtinių elementų modelis (BEM). Buvo pasiūlytos keturios korpuso sijų ties mašinų skyriumi modifikacijos ir virpesių pokyčių analizė (grafikas). 2009 metais šie tyrėjai, į pagalbą pasiėmę du kolegas (*J. Pan ir P. J. O'Shea*) pratęsė savo tyrimus [23], kuriuos atlikdami panaudojo penkias sijų modifikacijas bei sukonkretino jų gabaritinius matmenis (1.6.3.3 pav.).



1.6.3.3 pav. Korpuso ties mašinų skyriumi sijų modifikacijos: a – prieš modifikaciją; b – pirmas modifikacijos variantas; c – antras variantas; d – trečias variantas; e – ketvirtas variantas; f – penktas variantas [23]

Tyrimas parodė, kad nė viena sijų modifikacija neduoda naudos esant žemo dažnio virpesiams. Tačiau esant didesniai virpesių lygiui (šiuo atveju daugiau nei 63 Hz), virpesius labiausiai sumažina „d“ modifikacija (žr. 1.6.3.3 pav.).

Kadangi, esant žemam žadinamų virpesių lygiui, sijų modifikacija naudos neduoda, jie nusprendė toliau ieškoti būdų, kaip sumažinti korpuso vibracijas. Pirminiame modelyje patulinio tipo laivo španhautai buvo išdėstyti vienodais atstumais. Tada jiems kilo mintis španhautus išdėstyti ne vienodais atstumais, t.y. ties mašinų skyriumi juos dėti arčiau vieno kito. Gauti rezultatai parodė, kad sutankinus atstumus tarp španhautų ties mašinų skyriumi (vietoje, kur yra didžiausias virpesių žadinimas), esant žemam žadinamų virpesių lygiui, korpuso vibracija tampa mažesnė.

## II. EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI

Magistro baigiamojo darbo kelto „Optima Seaways“ natūriniai eksperimentiniai virpesių lygio tyrimai buvo atlikti 2015 metų kovo 18 – 20 dienomis reiso Klaipėda – Kyliis – Klaipėda metu. Šių tyrimų tikslas – patvirtinti arba paneigti kelto įgulos nuogaštavimus, kad po skruberio sumontavimo kelte padidėjo virpesių lygis. Taip pat eksperimentiniu būdu įvertinti kokią įtaką kelto konstrukcijų ir mašinų keliama virpesiai daro keleiviams bei jame dirbančiam personalui.

Pirminis tyrimas. Dar prieš skruberio kelte sumontavimą 2014 metų sausio 30 – 31 dienomis kelte buvo atliktas pirminis virpesių lygio tyrimas, kurį atliko Klaipėdos universiteto Jūrų technikos fakulteto mechanikos inžinerijos katedros dėstytojas ir Mechatronikos mokslo instituto jaunesnysis mokslo darbuotojas doc. dr. Marius Vasylius. Tyrimo tikslas – Nacionalinės plėtros KU projektas „Lietuvos jūrinio sektoriaus technologijų ir aplinkos tyrimų plėtra“ (registracijos Nr. VP1-3.1-ŠMM-08-K-01-019). Tyrimo metu buvo naudojamas virpesių signalų analizatorius ADASH A4300 VA3 (Čekija) kartu su sukalibruotu virpesių pagreičių keitikliu WILCOXON 797 (JAV). Tyrimo metu buvo siekiama įvertinti kelto virpesius bei triukšmą ir kokią įtaką tai daro keleiviams bei jame dirbantiems įgulos nariams (1 priedas).

2015 metų vykdyto tyrimo metu virpesių lygio matavimai buvo vykdomi tose pačiose kelto vietose kaip ir 2014 metais vykdyto tyrimo metu, pagal turimus rankraštinius kelto denių planus, kuriuose sužymėti matavimų taškai. Buvo stengiamasi kiek įmanoma tiksliau atkartoti tyrimą, kad matavimų paklaidos būtų kuo minimalesnės. Tuo tikslu kartu su manimi ir mano magistrinio darbo vadovu doc. dr. Pranu Mažeika keltu plaukė ir pradinio tyrimo autorius M. Vasylius.

Reiso metu kelto virpesių lygio tyrimas tuose pačiuose taškuose buvo atliktas du kartus. Pirmieji matavimai buvo atlikti 2015 metų kovo 19 dieną plaukiant iš Klaipėdos į Kyliį, o antrieji – kitą dieną, t.y. kovo 20 dieną plaukiant atgal iš Kylio į Klaipėdą.

Reiso metu (įgulos leidimu) buvo nufotografuoti 7-ojo denio koridoriuje ant sienos pakabinti „Optima Seaways“ kelto brėžiniai (2 priedas), pagal kuriuos kompiuterine projektavimo programa „AutoCAD“ nubraižiau eskizinius kelto denių planus, kurie bus naudojami tyrimo ataskaitoje.

### 2.1. Tyrimo objektas

Tyrimo objektu pasirinktas Lietuvoje registruotos laivybos kompanijos AB „DFDS Seaways“ jūrinis laivas – keltas „Optima Seaways“, plaukiojantis Baltijos jūroje.

Danijos įmonė „DFDS“ buvo įkurta 1866 metais. Lietuvoje jų dukterinė įmonė buvo įkurta 2001 metais ir buvo pavadinta AB „Lisco Baltic Service“, kurios didžiąją dalį akcijų valdė jau minėta motininė Danijos įmonė. 2006 metų balandžio 27 dieną bendrovės akcininkų susirinkime

buvo nuspręsta pakeisti jos pavadinimą į AB „DFDS LISCO“. Ro-Pax (kombinuotas Ro-Ro ir keleivinis laivas – keltas; angl: *combined Ro-Ro and passenger ship*) tipo laivą – keltą "Svealand", plaukiojusį iš Klaipėdos į Kyli, įmonė įsigijo 2006 metais. Tų metų balandžio 26 dieną jis buvo perduotas naujam šeiminkui, o pavadinimas buvo pakeistas į "LISCO Optima" ir nuo tada jis Baltijos jūroje plaukioja su Lietuvos vėliava. 2011 metų birželio 1 dieną įmonės pavadinimas buvo pakeistas į AB „DFDS Seaways“, o kelto pavadinimas buvo pakeistas į „Optima Seaways“.

AB „DFDS Seaways“ šiuo metu – tai viena iš stambiausių laivybos kompanijų Baltijos šalyse, turinti Ro-Pax ir Ro-Ro tipo keltus. Įmonės teikiamos paslaugos: krovinių ir keleivių aptarnavimas bei pervežimas keltais iš Klaipėdos į kitus Baltijos jūros uostus (Kylį, Karlshamą, Zasnica ir kt.); logistikos bei agentavimo paslaugos.

#### 2.1.1. Kelto „Optima Seaways“ techniniai parametrai

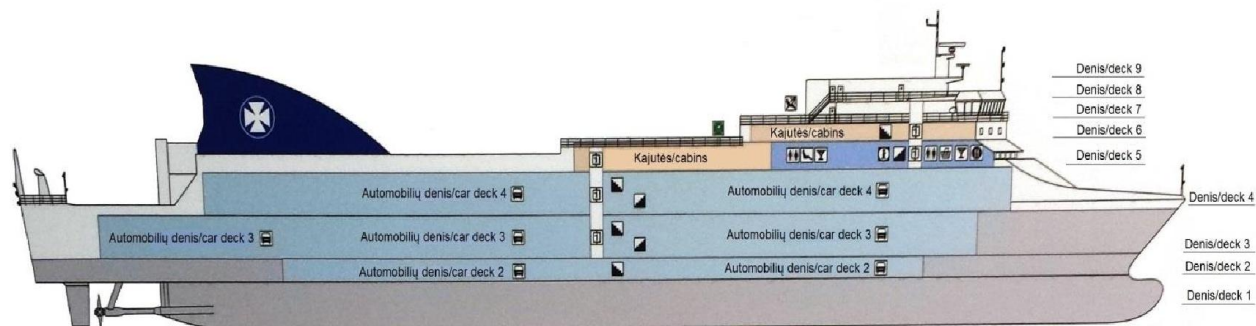
Laivas „Optima Seaways“ (2.1.1.1 pav.) – tai 186,25 metro, 25,60 metro pločio ir 7466 tonų dedveito Ro-Pax tipo keleivinis keltas, kurio didžiausias plaukimo greitis yra 21,50 mazgo. IMO numeris 9188427. Keleiviams yra įrengtos 252 miegamos vietos kajutėse bei 72 sėdimos vietos sėdimų vietų salone. Keltas buvo pastatytas 1999 metais „Cantieri Navali Visentini Porto Viro“ laivų statykloje, Italijoje. Kelte yra sumontuoti du pagrindiniai eigos MAN B&W 9L tipo 48/60 varikliai, kurių kiekvieno galingumas yra po 9450 kW. 9L reiškia, kad variklių cilindrai yra išdėstyti vienoje eilėje. Apsukos 500 aps/min. Variklis yra 10,55 metro ilgio, 2,97 metro pločio ir 5,78 metro aukščio (3 priedas), todėl stovi per du denius. [39]



2.1.1.1 pav. Ro-Pax tipo keleivinis keltas „Optima Seaways“

Kelte yra 9 deniai. Pagrindiniai eigos varikliai yra pirmame ir antrame denyje. Antras, trečias ir ketvirtas deniai yra krovininiai – automobilių deniai, kuriuose telpa apie 164 transporto priemonių. Penktame denyje yra įrengta registratūra, maitinimo patalpos, barai, parduotuvė, vaikų

žaidimų kambarys, sėdimų vietų salonas, keleivių kajutės (krovininių transporto priemonių vairuotojams) ir kitos patalpos bei atviras transporto priemonių denis laivagalyje ir atviras denis aplink visą keltą. Šeštame denyje yra įrengtos keleivių kajutės bei atviras denis. Septintame denyje, į kurį gali patekti tik įgulos nariai arba svečiai su leidimais, yra įgulos narių poilsio kambariai, kapitonų vairinė (tiltelis) bei techninės jų patalpos. Aštuntame denyje yra techninės patalpos ir atviras denis, į kurį taip pat gali patekti tik įgulos nariai. Devintame atvirame denyje yra stiebas ir kita susisiekimo – ryšio įranga. Kelto denių išdėstymas vaizdžiai parodytas 2.1.1.2 paveiksle.



2.1.1.2 pav. Keleivinio kelto „Optima Seaways“ denių išdėstymas

## 2.1.2. Virpesių lygio tyrimo kelte priežastys

Siekiant sumažinti aplinkos užterštumą iš jūrų transporto 1973 metais Tarptautinė jūrų organizacija (angl. IMO – *International Maritime Organization*) išleido MARPOL 73/78 konvenciją, kurios pagrindinis tikslas – sumažinti jūrų transporto daromą žalingą įtaką aplinkai. 1978 metais buvo padaryti minėtos konvencijos pakeitimai, o 1997 metais buvo pateiktos oro taršos iš laivų prevencijos taisyklės (MARPOL 73/78 Annex VI 2006), kurios įsigaliojo 2005 m. Šeštasis konvencijos priedas nustato leistiną SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, suodžių ir kitų kietųjų dalelių (PM) koncentracijos kiekį išmetamosiose dujose. Taip pat nustatė teritorijas, kuriose yra sugriežtintos normos išvardintiems cheminiams junginiams. [28, 29, 40]

Teritorijoms, kuriose yra ypatingai dideli laivybos srautai ir labai jautri ekosistema IMO savo konvencijoje MARPOL 73/78 nustatė griežtesnes normas. VI konvencijos priede jos įvardijamos kaip „kontroliuojamos emisijos zonos“ (angl. ECA – Emission Control Areas). Dabartinės „kontroliuojamos emisijos zonos“ priklauso: Baltijos jūra, Šiaurės jūra, Šiaurės Amerikos pakrantė, taip pat didžioji dalis Šiaurės Amerikos ir Kanados pakrančių. [40]

IMO parengusi ir įteisinusi MARPOL 73/78 VI priedą įpareigojo laivų savininkus ženkliai sumažinti išmetamųjų dujų toksiškumą SO<sub>x</sub> atžvilgiu nuo 1,0% iki 0,1% nuo 2015 metų ECA zonose ir nuo 3,5% iki 0,5% nuo 2020 metų likusiuose pasaulio vandenyse (2.1.2.1 lentelė). [40]

2.1.2.1 lentelė. Leistinas SOx kiekis išmetamosiose dujose pagal MARPOL 73/78 VI priedą

Konvencijos VI priedo įsigaliojimo metai	Sieros (SOx) normuojamas kiekis kure, %	
	ECA zona	Likusi pasaulio jūrinė teritorija
<b>2000</b>	1,5%	4,5%
<b>2010</b>	1,0%	
<b>2012</b>		0,1%
<b>2015</b>	0,5%*	
<b>2020</b>		

\* bus peržiūrėta 2018 metais ir tada arba palikta 2020 metų data arba nukelta į 2025 metus

Pažymėtina, kad konvencija leidžia naudoti daug įvairių teršalų išmetimo mažinimo metodų: įvairią įrangą, metodus, technologijos procesus ir alternatyvų kurą. Kalbant konkrečiau, norint pasiekti šeštajame priede keliamus reikalavimus sieros oksidų SOx emisijai, galima taikyti šias pagrindines priemones: vietoj įprastinių laivinių sunkiųjų degalų (mazuto) naudoti kur kas brangesnį kurą – jūrinį dyzelinį kurą; naudoti suskystintas gamtines dujas (angl. LNG – liquefied natural gas) arba metanolį; naudoti išmetamųjų dujų valymo įrenginį skruberį.

Kiekvienas būdas turi savų pliusų ir minusų. Norint naudoti suskystintas gamtines dujas reiktų pakeisti beveik visą propulsinę laivo sistemą ir daug kitų sistemų, kurių kaina ir laivo prastovos rekonstrukcijos metu yra didžiulės, tokiu atveju kartais yra naudingiau net statyti naują laivą. Kai kurios kompanijos bandė pereiti prie metanolio, tačiau buvo susidurta su didelėmis techninėmis problemomis. Mažasis dyzelino kuras yra daug didesnė (apie 30 – 40%) nei mazuto. Skaičiavimais yra pagrįsta, kad efektyviausias sieros emisijos mažinimo metodas yra „išmetamųjų dujų plautuvių“ – skruberių įrengimas, kurių atsipirkimo laikotarpis, priklausantis nuo mazuto ir dyzelinio kuro kainų skirtumo, plaukiojimo nuotolių ECA zonose ir kt., svyruoja nuo 1 iki 5 metų.

AB „DFDS Seaways“ kompanija, įvertinusi visus pliusus ir minusus, į savo laivus nusprendė montuoti „išmetamųjų dujų plautuves“ – šlapiojo tipo skruberius (angl. *wet scrubber*). Tokiu būdu yra deginamas sunkusis laivinis kuras – mazutas ir iš išmetamųjų dujų išplaunami sieros oksidai (iki 99%) ir kitos kenksmingos medžiagos. Skruberis į „Optimā Seaways“ keltą buvo sumontuotas 2014 metų balandžio mėnesį Lenkijoje. Įrangos ir darbų kaina siekė apie 6 mln. eurų. [42]

Po skruberio sumontavimo buvo girdėti įmonės atstovų ir kelte dirbančio personalo nuogastavimai, kad jame padidėjo virpesių lygis, todėl atsirado poreikis ištirti ar tai tiesa. Tyrimui, kaip gautų rezultatų palyginimui ir jų analizės atlikimui, buvo pasinaudota 2014 metų sausio 30 – 31 dienomis kelte atlikto virpesių ir triukšmo lygio tyrimo metu gautais rezultatais. Pažymėtina, kad tai nauja tyrimo sritis, nes iki šiol nebuvo poreikio atlikti tokio pobūdžio kelto virpesių lygio tyrimo analizės, susietos su skruberio veikimu jame, kadangi tai yra nauja šių įrenginių montavimo „banga“ laivuose, plaukiojančiuose SOx kontroliuojamos emisijos zonose.

Kelte sumontuoto skruberio vaizdas iš šeštojo denio parodytas 2.1.2.1 paveiksle.



2.1.2.1 pav. Kelte „Optima Seaways“ sumontuotas skruberis. Kairėje – iš toliau, dešinėje – iš arti.  
Fotografuota iš 6-ojo kelto denio (asmeninio archyvo nuotraukos)

## 2.2. Eksperimentinio tyrimo atlikimo metodika

Kelto „Optima Seaways“ virpesių aktyvumo eksperimentinio tyrimo metodika yra skirta:

- išmatuoti ir įvertinti bendrą laivo – kelto virpesių lygį (vibroaktyvumą), turintį įtakos tiriamojo kelto bendram ir jo atskirų elementų patikimumui, keleivių ir įgulos narių komfortui bei sveikatos būklei;
- nustatyti priverstinius virpesius žadinančius šaltinius, kurie sukelia kitų laivinių elementų rezonansus;

Tiriamo kelto virpesių aktyvumo tyrimo metodiką sudaro šios dalys:

- virpesių matavimo būdo parinkimas;
- šiuolaikinių specialiai tam skirtų virpesių matavimo priemonių ir programinės įrangos parinkimas;
- virpesių matavimo taškų kelte parinkimo metodikos parinkimas;
- kelto virpesių lygio (vibroaktyvumo) gautų rezultatų įvertinimo metodikos parinkimas ir jų analizė.

### 2.2.1. Virpesių matavimo būdo parinkimas

Norint sudaryti tiriamojo kelto natūrinių eksperimentinių virpesių matavimo metodiką, būtina pasirinkti tinkamą virpesių matavimo būdą. Atsižvelgiant į tai, jog laive vieno įrenginio žadinami priverstiniai virpesiai lengvai persiduoda ir sklinda laivo korpusu bei interferuoja tarpusavyje, kelto virpesių lygio matavimus numatoma vykdyti netiesioginiu būdu, t.y. matuojamas atitinkamų vietų (patalpų) grindų virpesių lygis.

Virpesių žadinimo šaltiniai ir jų prastas slopinimas turi įtakos laivo ilgaamžiškumui ir patikimumui eksploatacijos metu bei juo plaukiančių žmonių komfortui ir sveikatai. Pagrindiniai kelte virpesius žadinantys šaltiniai yra: abu pagrindiniai eigos varikliai (alkūninio veleno slenkamieji judesiai, dujų užsidegimo cilindre procesas, pereinamieji variklio režimai), sraigtas ir kitos laivinės mašinos.

Pagrindinių kelto priverstinių virpesių šaltinių identifikavimo metodika yra pagrįsta šių virpesių parametrų ir duomenų formatų analize:

- Dažniausiai naudojamas absoliučiujų virpesių, matuojamų pagreičių keitikliais (pjezokristaliniais akselerometrais), tyrimo metodas, kuris įgyvendinamas analizuojant virpesių greitos Furje transformacijos (FFT) greičių [mm/s] spektrus dažnių [Hz] intervale.
- Vykiant keleivinių laivų virpesių lygio analizę, privaloma tam tikrų kelto funkcinių vietų absoliučiujų virpesių greičių kvadratinio vidurkio  $v_{RMS}$  reikšmes palyginti su tarptautiniame standarte ISO 6954:2000 bei 2003 metais išleistose laivų klasifikacinės bendrovės „Germanischer Lloyd“ rekomendacijose pateiktomis žmogui komfortiškomis virpesių lygio reikšmėmis atitinkamose keleivinio kelto patalpose. [19, 43]
- Kadangi tiriamame kelte yra sumontuoti du sraigta, kuriuos atitinkamai suka du vienodi keturtakčiai vidaus degimo pagrindiniai eigos varikliai MAN B&W 9L tipo 48/60, todėl juose vyksta pereinamieji procesai. Tada virpesių greičių FFT spektrų analizė yra labai sudėtinga, nes jose ištiesai dominuoja 1X ir 0,5X harmonikos, o virpesių pagreičių spektre – įvairių mechaninių sistemų rezonansai.
- Analizuojant virpesių greičių FFT spektrus gali matytis virpesių mušimo (pulsavimo) reiškinys, nors ir identiški yra abu eigos varikliai, tačiau jų dažniai ne būtinai turi būti vienodai, t.y. gali būti labai artimi vienas kitam, bet minimaliai skirtis.

## 2.2.2. Virpesių matavimo priemonės ir programinės įrangos pasirinkimas

Tiriamąjį kelto „Optima Seaways“ virpesių lygio tyrimui, 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, buvo pasirinktas mobilus virpesių signalų analizatorius ADASH A4400-VA4PRO (Čekija). Kelto virpesių lygio tyrimo atlikimui pasirinktas virpesių signalų analizatorius pavaizduotas 2.2.2.1 paveiksle.



2.2.2.1 pav. ADASH A4400-VA4PRO (Čekija) virpesių signalų analizatorius [38]

Tai profesionalus keturių kanalų įrenginys, skirtas įvairių mechanizmų defektavimui, jų virpesių lygio matavimui, turintis spartų procesorių, vidinę atmintį (duomenų bazę) ir atliekantis kelias funkcijas vienu metu.

Būtent šio matavimo prietaiso pasirinkimą įtakojo tokie jo privalumai (4 priedas):

- galimybė matuoti absoliučią virpesių lygį, išreikštą per absoliučią greičių kvadratinių vidurkių  $v_{RMS}$  reikšmes ir jas palyginti su tarptautiniame standarte ISO 6954:2000 bei klasifikacinės bendrovės „Germanischer Lloyd“ rekomendacijose pateiktomis žmogui komfortiškomis virpesių reikšmėms atitinkamose kelto vietose ir patalpose;
- lygiagrečiai veikiantys 1,6 GHz spartos procesoriai užtikrina spartų virpesių signalų apdorojimą;
- didelė vidinė 120 GB atmintis;
- integruotas didelis, raiškus LCD (800 x 600 pikselių) ekranas, kuriame matavimo metu matomi gauti rezultatai ir virpesių lygių spektrai bei kita informacija. Taip pat bet kada duomenų bazėje galima pasižiūrėti norimus spektrus ir kitą informaciją;

- integruota talpi baterija, kurios dėka pilnai įkrautas įrenginys gali dirbti 5 valandas iki sekančio įkrovimo;
- paprastas naudoti, patogus, kompaktiškas dydis (230 x 140 x 60 mm) bei sąlyginai nesunkus (2000 g);
- galimybė virpesių energiją fiksuoti plačiame dažnių intervale;
- galimybė sukauptus duomenis perkelti į kompiuterį tolimesnei analizei arba duomenų kaupimui/saugojimui.

Duomenims, kurie buvo surinkti atlikus kelto natūrinius eksperimentinius virpesių lygio matavimus, perkėlimui iš virpesių signalų analizatoriaus ADASH A4400-VA4PRO į kompiuterį, saugojimui jame ir gautų virpesių duomenų formatų analizei, puikiai tinka programinė įranga DDS 2011. Ši programinė įranga pasirinkta atsižvelgus į šiuos privalumus:

- programinė įranga DDS 2011 tinka duomenų perkėlimui iš virpesių signalų analizatoriaus ADASH A4400-VA4PRO į kompiuterį ir puikiai tarpusavyje dera;
- paprastas naudojimas;
- galimybė automatiškai kaupti/atnaujinti iš virpesių signalų analizatorių perkeltus duomenis duomenų bazėje SQL.
- galimybė atlikti absoliučią virpesių (greičių ir/arba pagreičių) spektrinę analizę taikant virpesių harmonikų automatinio vizualizavimo funkcijas.
- galimybė integruoti/diferencijuoti virpesių duomenų formatus.

Laivo eksploatavimo metu, jame dirba įvairių rūšių ir dydžių įrenginiai ir mašinos, kurios žadina aibę įvairių dažnių virpesius. Tam tikrose patalpose, pavyzdžiui, mašinų skyriuje, vyrauja itin agresyvi aplinka: aukšta temperatūra, ant tam tikrų paviršių gali būtų užsilikusios naftos produktų ir kt. Todėl buvo nuspręsta naudoti virpesių pagreičio matavimo keitiklį – pjezokristalinį akselerometrą. Tyrimui atlikti buvo pasirinktas sukalibruotas virpesių pagreičių matavimo keitiklis WILCOXON 797 (JAV). Pasirinkimą lėmė šios jo savybės (5 priedas):

- didelis matavimo jautris 100 mV/g +/- 5% ;
- platus matuojamų dažnių intervalas (nuo 1 Hz iki 12 kHz);
- turi temperatūrinę kompensaciją, tinka dirbti aukštose temperatūrose (iki 120<sup>0</sup>C);
- santykinai nebrangūs, patikimi bei ilgą laiką;
- nejautrus perkrovimui;
- nedideli gabaritiniai matmenys, patogus naudojimas;
- puikiai dirba prijungtas prie pasirinkto ADASH A4400-VA4PRO virpesių signalų analizatoriaus.

### 2.2.3. Virpesių matavimo taškų parinkimas

Norint nustatyti tiriamojo objekto virpesių lygį, reikia parinkti tinkamus matavimo taškus. Matuojant kelto „Optima Seaways“ vibroaktyvumą, buvo naudotasi laivų klasifikacinės bendrovės „Germanischer Lloyd“ leidinyje bei tarptautiniame standarte ISO 6954:2000 pateiktomis rekomendacijomis ir taisyklėmis.

„Germanischer Lloyd“ leidinyje [43] pateiktos rekomendacijos keleivių ir įgulos narių komfortui keleiviniuose laivuose, kurių greitis yra ne didesnis kaip 25 mazgai. Leidinyje pateikiamos galimos didžiausios komfortiškos virpesių absoliučiuųjų greičių kvadratinio vidurkio  $v_{RMS}$  reikšmės [mm/s] atitinkamose patalpose. Yra išskiriamos vidaus ir lauko erdvės (atvirai deniai). Matavimai atliekami tik vidaus patalpose. Rekomendacijų 2.5 lentelėje pateikiamos tokios vidaus patalpos keleivių komforto lygiui nustatyti:

- kajutės (pirmos klasės ir standartinės);
- trumpo buvimo viešos – bendrojo naudojimo erdvės;
- ilgo buvimo viešos – bendrojo naudojimo erdvės;
- koridoriai ir laiptai.

„Germanischer Lloyd“ leidinio rekomendacijų 2.6 lentelėje pateikiamos tokios vidaus patalpos įgulos narių komforto lygiui nustatyti:

- *darbo zonos* (mašinų skyriai, eigos variklių dispečerinė, dirbtuvės, sandėliai ir kt.);
- *aptarnavimo ir paslaugų zonos* (virtuvės, restoranai, barai, valgyklos, bufetai ir kt.);
- *navigacinės zonos* (kapitono vairinė, ryšio patalpa ir kitos navigacinės patalpos);
- *apgyvendinimo patalpos* (kapitonų bei kitų įgulos narių poilsio ir miego patalpos; kitų įgulos narių poilsio ir miego patalpos; bendros poilsio patalpos, medicinos punktai, palatos, sporto patalpos, koridoriai tarp poilsio ir miego patalpų).

Tarptautiniame standarte ISO 6954:2000 [19] pateikiamos rekomendacijos keleivių ir įgulos narių komforto lygiui keleiviniuose laivuose, kuris skirstomas į dvi dalis: „mažai tikėtinas diskomforto pojūtis“ ir „galimas diskomforto pojūtis“, o likęs virpesių absoliučiuųjų greičių kvadratinio vidurkio  $v_{RMS}$  reikšmių [mm/s] intervalas tarp viršutinės ir žemutinės reikšmių yra laikomas priimtinais poilsio ir darbo sąlygomis. Patalpos yra išskirstytos į tris grupes: A klasės patalpa – keleivių kajutės; B – įgulos narių gyvenamosios patalpos; C – įgulos narių darbo patalpos.

2015 metų vykdyto tyrimo metu virpesių lygio matavimai buvo vykdomi tose pačiose kelto vietose kaip ir pirminio tyrimo metu. Buvo stengiamasi kiek įmanoma tiksliau atkartoti tyrimą, kad matavimų paklaidos būtų kuo minimalesnės.

## 2.2.4. Virpesių analizės atlikimo metodika

Virpesiai laivuose yra reglamentuojami klasifikacinių bendrovių bei tarptautinių standartų rekomendacijomis ir taisyklėmis, svarbiausia tinkamai pasirinkti reikiamas rekomendacijas pagal matuojamo objekto pobūdį ir norimos atlikti analizės pobūdį.

Vertinant keleivinių laivų virpesių įtaką keleivių ir įgulos narių komforto lygiui, reikia pagrįsto matavimo jutikliu išmatuotas atitinkamų laivo patalpų virpesių lygio reikšmės (absoliučią virpesių greičių kvadratinių vidurkių  $v_{RMS}$  reikšmės), gautas apdorojus duomenis virpesių signalų analizatoriumi, palyginti su klasifikacinių bendrovių bei tarptautinių standartų pateiktų rekomendacinių „komfortiškų“ virpesių lygių reikšmėmis.

„Germanischer Lloyd“ leidinyje [43] pateiktos rekomendacijos keleivių ir įgulos narių komforto lygiui nustatyti keleiviniuose laivuose, kurių greitis yra ne didesnis kaip 25 mazgai. Yra išskiriami 5 komforto lygiai (angl. *harmony categories - hc*):

- E = \*\*\*\*\* - puikus komfortas, aukščiausia klasė, 5 žvaigždučių (angl. *excellent*);
- 1 = \*\*\*\* - labai aukštas komforto lygis, 4 žvaigždučių;
- 2 = \*\*\* - aukštas komforto lygis, 3 žvaigždučių;
- 3 = \*\* - vidutinis komforto lygis, 2 žvaigždučių;
- 4 = \* - priimtinas komforto lygis, 1 žvaigždutės;

Pažymėtina, jog rekomenduojama  $v_{RMS}$  reikšmės matuoti virpesių dažnių diapozone nuo 1 iki 80 Hz, o pagrindiniai eigos varikliai turi dirbti ne mažesniu kaip 85% pajėgumu. Leidinyje pateiktose lentelėse nurodomos rekomenduojamos virpesių lygio reikšmės atitinkamo komforto lygiui keleiviniame laive (keleivių patalpos ir įgulos narių patalpos atskirai).

2.2.4.1 lentelė. Keleivių komforto lygiai pagal „Germanischer Lloyd“ rekomendacijas

Vibracijos lygio $v_{RMS}$ [mm/s] reikšmės kelto atitinkamose patalpose (virpesių dažnių diapozone nuo 1 iki 80 Hz)	Jūros režimas				
	$hc_{pass}$				
	E	1	2	3	4
Vidaus patalpos					
Pirmos klasės kabinės	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4
Standartinės kabinės	1,2	1,7	2,2	2,7	3,2
Trumpo buvimo viešos – bendrojo naudojimo erdvės	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
Ilgo buvimo viešos – bendrojo naudojimo erdvės	1,4	1,9	2,4	2,9	3,4
Koridoriai, laiptai	-	-	-	-	-

2.2.4.2 lentelė. Įgulos narių komforto lygiai pagal „Germanischer Lloyd“ rekomendacijas

Vibracijos lygio $v_{RMS}$ [mm/s] reikšmės kelto atitinkamose patalpose (virpesių dažnių diapozone nuo 1 iki 80 Hz)	Jūros režimas				
	$hc_{crew}$				
	E	1	2	3	4
Darbo zonos					
Mašinų skyriai	4,4	4,8	5,2	5,6	6,0
Eigos variklių dispečerinės	2,4	2,8	3,2	3,6	4,0
Dirbtuvės	3,2	3,6	4,0	4,4	4,8
Sandėliai	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Kitos vidaus darbo patalpos	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Aptarnavimo ir paslaugų zonos					
Laivo virtuvės, restoranai, barai, valgyklos	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
Kitos aptarnavimo patalpos (registratūra ir kt.)	2,4	2,8	3,2	3,6	4,0
Navigacinės zonos					
Kapitono vairinė (tiltelis)	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
Ryšio patalpa (angl. <i>radio room</i> )	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
Kitos kapitonų navigacinės patalpos	2,8	3,2	3,6	4,0	4,4
Apgyvadinimo patalpos					
Kapitonų poilsio ir miego patalpos	1,2	1,7	2,2	2,7	3,2
Kitų įgulos narių poilsio ir miego patalpos	1,6	2,0	2,4	2,8	3,2
Bendros poilsio ir susibūrimo patalpos	2,0	2,4	2,8	3,2	3,6
Medicinos punktai	1,2	1,7	2,2	2,7	3,2
Pacientų palatos, sporto patalpos	2,0	2,4	2,8	3,2	3,6
Koridoriai tarp poilsio ir miego patalpų	-	-	-	-	-

Tarptautiniame standarte ISO 6954:2000 taip pat pateikiamos rekomendacijos keleivių ir įgulos narių komforto lygiui keleiviniuose laivuose nustatyti. Plačiau apie šį standartą buvo rašyta pirmojo skyriaus „Literatūros apžvalga“ 1.3. dalyje „Virpesių normatyvai ir reglamentai“. Komforto lygiai pagal virpesių  $v_{RMS}$  reikšmes atitinkamose patalpose pateikti minėtojo skyriaus 1.3.1 lentelėje „Leistini virpesių lygiai keleivinių laivų patalpose pagal ISO 6954:2000“.

Antroji kelto virpesių analizės dalis – palyginti gautas absoliučiuųjų virpesių greičių kvadratinio vidurkio  $v_{RMS}$  reikšmes [mm/s] su pirminio tyrimo, atlikto 2013 metais prieš skruberio sumontavimą kelte (1 priedas), gautomis reikšmėmis ir padaryti išvadą ar po skruberio sumontavimo kelte padidėjo virpesių lygis ar nepakito ir rasti priežastis kodėl įvyko vienas ar kitas įvykis.

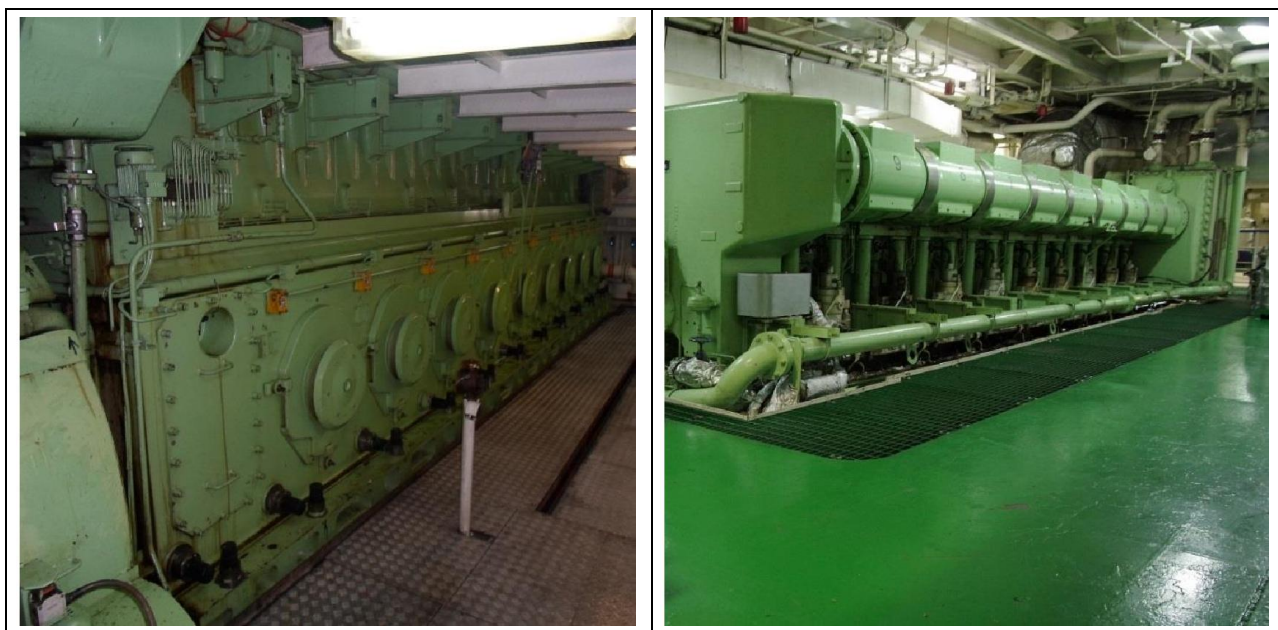
## 2.3. Eksperimentinių tyrimų rezultatai ir jų analizė

Norint tinkamai išanalizuoti tyrimo metu gautus absoliučią virpesių greičių kvadratinį vidurkių reikšmių FFT spektrus, reikia žinoti kokios laivinės mašinos gali sukelti „pikines“ virpesių reikšmes, t.y. reikia apskaičiuoti kelto pagrindinių mašinų žadinamus priverstinių virpesių dažnius, kurie gali sukelti matuojamų objektų rezonansus, kurių metu tų dažnių ribose ženkliai padidėja virpesių lygis, t.y. amplitudė. Virpesiai matuojami atitinkamose kelto patalpose prie jų grindų magneto pagalba priverstinant virpesių pagreičių matavimo keitiklį.

Taigi, prieš atliekant eksperimentinių tyrimų rezultatų analizę, reikia apskaičiuoti varančiosios kelto sistemos eigos variklių ir sraigčių žadinamų priverstinių virpesių dažnius.

### 2.3.1. Pagrindinio variklio žadinamų virpesių dažnių nustatymas

Apskaičiuojame pagrindinių eigos variklių (tiriamame kelte jų yra du, bet abu vienodo modelio ir konstrukcijos) žadinamus priverstinių virpesių dažnius, kurie, sutapę su lokalių ar globalių kelto elementų savaisiais virpesių dažniais, sukelia jų rezonansus (virpesių amplitudžių ženklų padidėjimą). Kelto projektavimo metu buvo pasirinkti ir statybos metu sumontuoti tokie du pagrindiniai dyzeliniai keturtakčiai eigos varikliai: MAN B&W 9L tipo 48/60 varikliai, kurių kiekvieno galingumas yra po 9450 kW. 9L reiškia, kad variklių cilindrai yra išdėstyti vienoje eilėje (vieno cilindro galingumas 1050 kW). Variklių apskukos yra 500 aps/min. (3 priedas). [39]



2.3.1.1 pav. Kelte „Optima Seaways“ sumontuotas pagrindinis eigos variklis. Kairėje vaizdas iš 1-ojo denio, dešinėje – iš 2-ojo denio (asmeninio archyvo nuotraukos)

Kadangi variklių cilindrų alkūninių velenų apskukos yra pastovios (jos nekinta, nes varikliai nėra reversuojami), todėl galime apskaičiuoti alkūninio veleno neišsvertų jėgų (disbalanso) žadinamų virpesių dažnį. Skaičiavimui taikome formulę:

$$f_{alk.disb} = \frac{n_{alk}}{60}, \quad (1)$$

čia:  $f_{alk.disb}$  - alkūninio veleno neišsvertų jėgų (disbalanso) žadinamų virpesių dažnis, *Hz*;

$n_{alk}$  - alkūninio veleno sukimosi greitis, *aps/min*;

$$f_{alk.disb} = \frac{500}{60} = 8,33 \text{ Hz.}$$

Apskaičiuojame keturtakčio vidaus degimo variklio dujų užsidegimo cilindre metu žadinamų virpesių dažnį. Skaičiavimui taikome formulę:

$$f_{deg.cil} = \frac{n_{alk} \cdot z_{cil}}{120}, \quad (2)$$

čia:  $f_{deg.cil}$  - dujų užsidegimo cilindre metu žadinamų virpesių dažnis, *Hz*;

$n_{alk}$  - variklio cilindrų skaičius, *vnt*;

$$f_{deg.cil} = \frac{500 \cdot 9}{120} = 37,50 \text{ Hz.}$$

Kadangi kelte sumontuoti varikliai yra keturtakčiai vidaus degimo, juose vyksta pereinamieji režimai (smūgiai kuro užsidegimo metu ir kt.), todėl jie žadina virpesių harmonikas, t.y. alkūninio veleno disbalanso sukeliamų priverstinių žadinamų virpesių kartotinius dažnius (harmonikas 0,5X; 1X; 1,5X; 2X ir t.t.). Harmonikų apskaičiavimui taikome formulę:

$$f_{harm} = \eta \cdot \frac{n_{alk}}{60}, \quad (3)$$

čia:  $f_{harm}$  - žadinamų priverstinių virpesių harmonikos dažnis, *Hz*;

$\eta$  - harmonikos (kartotinio) koeficientai, kurių reikšmės yra: 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5...;

$$f_{harm} = \eta \cdot \frac{500}{60} = \eta \cdot 8,33 \text{ Hz.}$$

Taigi priverstinių žadinamų virpesių kartotinių dažnių – harmonikų reikšmės atitinkamai yra: 0,5X harmonikos 4,17 *Hz*; 1X - 8,33 *Hz*; 1,5X - 12,50 *Hz*; 2X - 16,67 *Hz*; 2,5X - 20,83 *Hz*; 3X - 25,00 *Hz*; 3,5X - 29,17 *Hz*; 4X - 33,33 *Hz*; 4,5X - 37,50 *Hz*; 5X - 41,67 *Hz*; 5,5X - 45,83 *Hz*; 6X - 50,00 *Hz*; 6,5X - 54,17 *Hz*; 7X - 58,33 *Hz*; 7,5X - 62,50 *Hz*; 8X - 66,67 *Hz*; 8,5X - 70,83 *Hz*; 9X - 75,00 *Hz*; 9,5X - 79,17 *Hz* ir t.t.

### 2.3.2. Sraigto žadinamų virpesių dažnio nustatymas

Sraigtas yra vienas didžiausių laivo virpesių žadintojų. Kiekviena besisukančio sraigto mentis perduoda tam tikrą mechaninės energijos kiekį (gautą iš pagrindinio eigos variklio per veleno liniją) vandens srautui. Dėl šios priežasties sraigtui sukantis mentis vis „tėškiasi“ į vandens srautą, kuris nėra tolygiai pasiskirstęs aplink sraigto menčių paviršių. Todėl mentys kartu su visa sraigto konstrukcija (tuo pačiu dalinai ir veleno linija) pradeda vibruoti (pulsuoti). Tada menčių priverstinių virpesių dažnis laiviniais elementais persiduoda per visus laivo konstrukcinius elementus ir, „savo kelyje sutikęs“ kokį nors laivinį lokalų ar globalų elementą, kurio savasis virpesių dažnis sutampa su sraigto priverstiniu virpesių dažniu, priverčia jį rezonuoti. Tada smarkiai padidėja virpesių amplitudė.

Kadangi tiriamojo kelto propulsinėje sistemoje yra generatorius, kuris tam tikru koeficientu sumažina variklio perduodamas apskukas sraigtui ir tuo pačiu padidina sukimo momentą, tai sraigtas (ir variklis) visada sukasi pastoviu bet skirtingu greičiu (atitinkamai variklis 500 aps/min, o sraigtas kartu su veleno linija 161 aps/min), o kelto judėjimo greitis bei kryptis yra reguliuojama sraigto menčių pasukimu tam tikru kampu, o švartuojantis – ir pavairavimo įrenginių pagalba. Kelte yra sumontuoti du kintamo žingsnio sraigtai. Kelto sraigto sukimosi greitis yra apie 161 aps/min, o menčių skaičius – 4 vnt. Sraigto žadinamą priverstinių virpesių dažnį apskaičiuojame naudodamiesi formule:

$$f_{sr} = \frac{n_{sr}}{60} \cdot z, \quad (4)$$

čia:  $f_{sr}$  - sraigto žadinamų virpesių dažnis,  $Hz$ ;

$n_{sr}$  - sraigto sukimosi greitis,  $aps/min$ ;

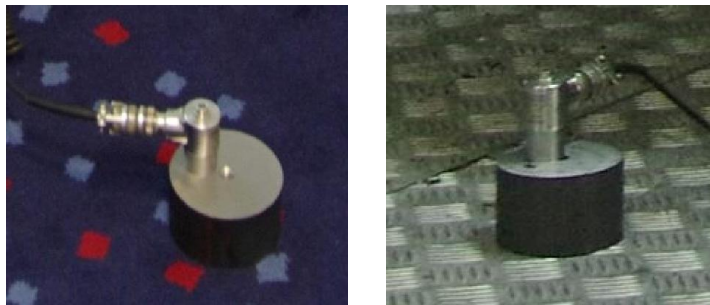
$$f_{sr} = \frac{161}{60} \cdot 4 = 10,73 \text{ Hz}.$$

### 2.3.3. Eksperimentinių tyrimų vykdymo eiga

Kelto eksperimentiniai tyrimai buvo vykdyti remiantis laivų klasifikacinės bendrovės „Germanischer Lloyd“ ir tarptautinio standarto ISO 6954:2000 rekomendacijomis.

Ant matuojamo paviršiaus magneto pagalba tvirtinamas virpesių pagreičių keitiklis Wilcoxon 797. Remiantis „Germanischer Lloyd“ rekomendacijomis [43], matuojamas paviršius turi būti lygus ir pasižymintis stipriomis magnetinėmis savybėmis. Kitu atveju rekomenduojama ant matuojamo paviršiaus dėti masyvų (ne lengvesnį kaip 1,5 kg.) stipriomis magnetinėmis savybėmis pasižymintį „padą“, prie kurio bus pritvirtinamas virpesių pagreičių keitiklis.








Kadangi tiriamo kelto didžioji dalis patalpų yra padengta kilimine danga ar kitomis nemagnetinėmis dangomis, todėl, norint apsaugoti nuo galimų gautų rezultatų netikslumų, buvo nuspręsta viso tyrimo metu naudoti apvalų plieninį „padą“, pasižymintį puikiomis magnetinėmis savybėmis bei sveriantį daugiau kaip pusantro kilogramo (2.3.3.1 pav.).



2.3.3.1 pav. Eksperimento metu naudotas plieninis, pasižymintis stipriomis magnetinėmis savybėmis padas (asmeninio archyvo nuotraukos)

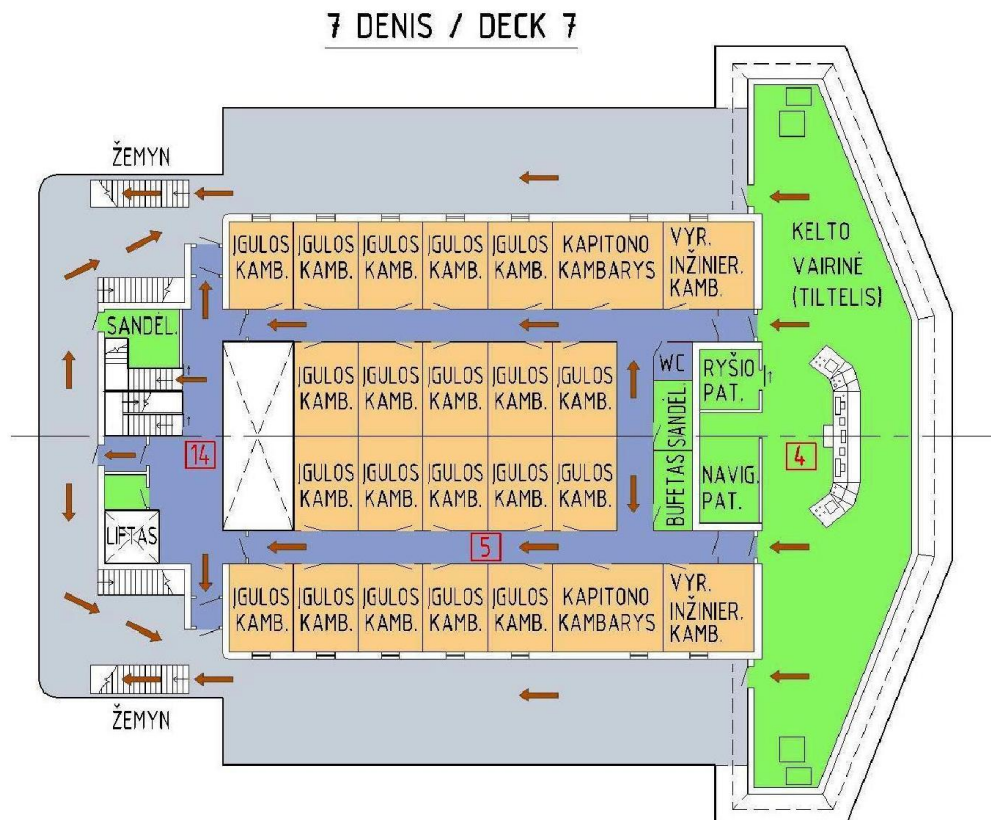
Kelto „Optima Seaways“ eksperimentiniai virpesių lygio tyrimai tuose pačiuose taškuose buvo atlikti du kartus. Pirmieji matavimai buvo atliekami 2015 metų kovo 19 dieną plaukiant iš Klaipėdos į Kyli. Reiso metu jūra buvo rami, plaukimo greitis apie 19,6 mazgo (eigos varikliai dirbo maždaug 90% viso pajėgumo). Kitos dienos rytą (2015 metų kovo 20 dieną) plaukiant atgal iš Kylio į Klaipėdą buvo atliekami pakartotiniai matavimai tuose pačiuose taškuose. Jūra buvo gana rami, plaukimo greitis apie 19,8 mazgo (eigos varikliai dirbo maždaug 92% viso pajėgumo). Verta paminėti, jog tarptautiniame standarte ISO 6954:2000 ir „Germanischer Lloyd“ leidinyje pateiktose rekomendacijose nurodoma, kad kelto virpesių lygio tyrimo metu pagrindiniai eigos varikliai turi dirbti ne mažiau kaip 85% viso pajėgumo, todėl daroma prielaida, kad atliekant tyrimą nebuvo nusižengta reikalavimams.

Pasinaudojus 7-ojo denio koridoriuje ant sienos už stiklo pakabintais įrėmintais kelto brėžiniais (2 priedas), kompiuterine projektavimo programa „AutoCAD“ buvo nubraižyti tiriamojo kelto denių eskiziniai planai, kurie naudojami vizualiai parodyti kelto virpesių lygio tyrimų atlikimo vietas. Kiekvienas matavimo taškas turi savo atitinkamą numerį. Denių planuose matavimo taškų numeriai yra užrašyti raudonu šriftu ir apibraukti tokios pat spalvos stačiakampiu kontūru. Braižant kelto denių planus, jo patalpos buvo sugrupuotos į atskiras funkcines zonas (poilsio ir gyvenamosios patalpos, maitinimo patalpos, funkcinės darbo ir pagalbinės patalpos, bendrojo naudojimo vidaus patalpos ir bendrojo naudojimo atviras denis) ir nuspalvintos atitinkamomis spalvomis, kaip parodyta sekančiuose paveiksluose. Taip pat rudomis rodyklėmis buvo parodyti evakuacijos keliai. Verta paminėti, kad žmonių rinkimosi vieta evakuacijos atveju yra laisvas plotas šeštajame denyje. Visi ką tik apibūdinti sutartiniai žymėjimai parodyti 2.3.3.2 paveiksle.

SUTARTINIAI ŽYMĖJIMAI:	
	POILSIO IR GYVENAMOSIOS PATALPOS
	RESTORANAI, VALGYKLOS IR BARAI
	FUNKCINĖS DARBO IR PAGALBINĖS PATALPOS
	BENDROJO NAUDOJIMO VIDAUS PATALPOS
	BENDROJO NAUDOJIMO ATVIRAS DENIS
	VIRPESIŲ MATAVIMO VIETA, NUMERIS
	EVAKUACIJOS KELIO KRYPTIS

2.3.3.2 pav. Kelto denių planuose naudojami sutartiniai ženklai

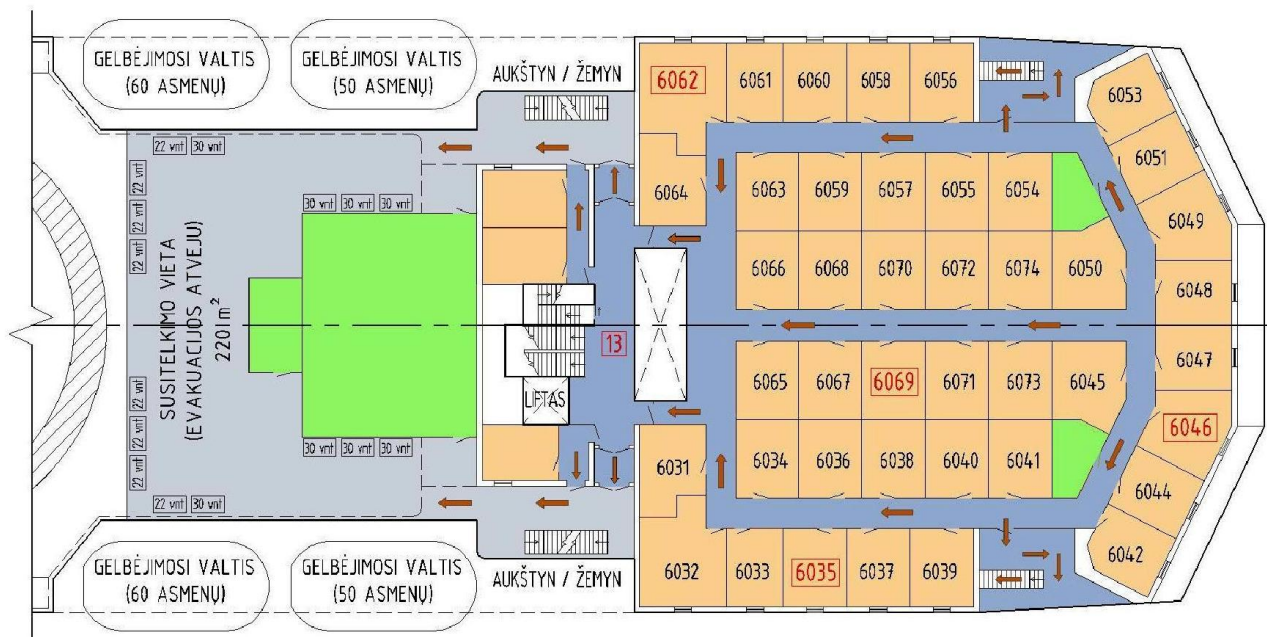
Kelto virpesių matavimai buvo pradėti vykdyti nuo 7-ojo denio, kuriame virpesių lygis buvo matuojamas kapitonų vairinėje (4 taškas), dešiniajame koridoriuje tarp įgulos narių poilsio ir miego kambarių (5 taškas) bei prie laiptų, vedančių į šeštąjį denį (14 taškas). Septintojo denio virpesių lygio matavimų vietos parodytos 2.3.3.3 paveiksle.



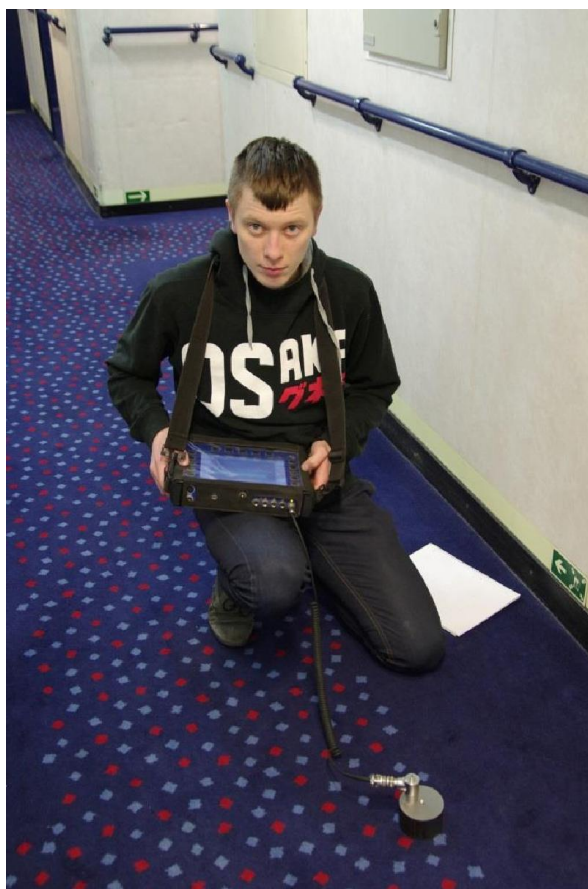
2.3.3.3 pav. Septintojo denio planas su jame pažymėtais virpesių lygio matavimo taškais

Po to virpesių matavimai buvo vykdomi šeštajame denyje, kuriame virpesių lygis buvo matuojamas nusileidus iš septintojo denio prie laiptų, vedančių į penktąjį denį (13 taškas) bei keleivių kajutėse (6035, 6046, 6062 ir 6069). Šeštojo denio virpesių lygio matavimų vietos parodytos 2.3.3.4 paveiksle.

## 6 DENIS / DECK 6



2.3.3.4 pav. Šeštojo denio planas su jame pažymėtais virpesių lygio matavimo taškais



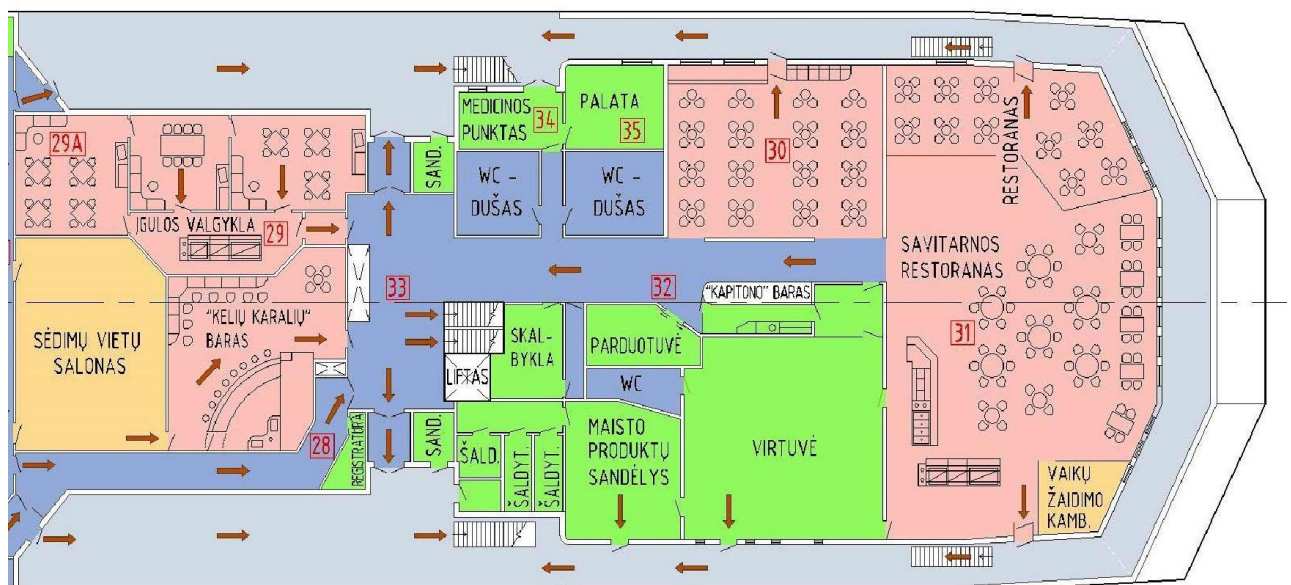
2.3.3.5 pav. Virpesių lygio matavimas šeštojo denio koridoriuje prie laiptų (13 taškas)

Baigus matavimus šeštajame denyje, laiptais nusileidome į penktąjį denį. Penktojo denio vidaus patalpos yra išsidėsčiusios didžiąja dalimi kelto ilgio, todėl tikslinga šio denio matavimų zonas skirstyti į dvi atskiras dalis.

Pirmoji dalis yra aptarnavimo ir paslaugų zona, kuri prasideda nuo kelto achterštevenio ir tęsiasi iki poilsio ir miego zonos, kur yra įrengtos krovinių transporto priemonių vairuotojų kajutės. Remiantis tarptautiniame standarte ISO 6954:2000 bei laivų klasifikacinės bendrovės „Germanischer Lloyd“ leidinyje pateiktomis rekomendacijomis, šioje kelto penktojo denio dalyje buvo numatyta atlikti ganėtinai daug matavimų. To priežastis – penktajame denyje yra gausu įvairių aptarnavimo ir paslaugų zonų, kuriose keliaujantieji praleidžia didžiąją dalį savo laisvo laiko, todėl šioje zonoje virpesių lygis turi būti nuodugniai iširtas ir gauti rezultatai palyginti su komfortiškais žmogui virpesių reikšmėmis.

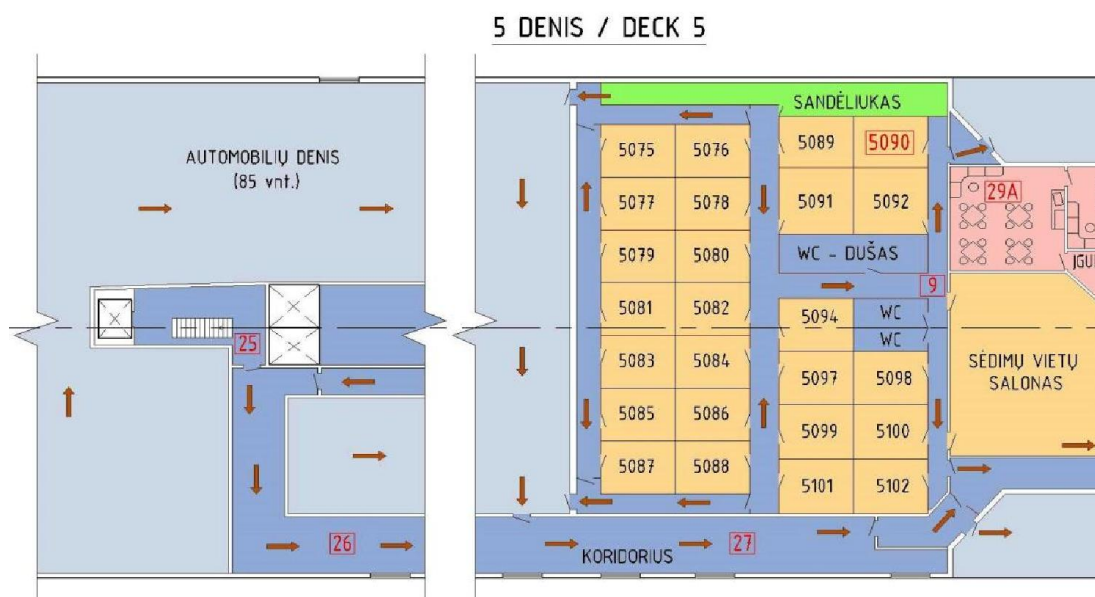
Matavimai pradėti vykdyti nuo laivapriekinėje dalyje esančios pirmosios patalpos – savitarnos restorano (31 taškas). Po to virpesiai buvo matuojami priešais „Kapitono barą“ esančios poilsio ir laiko praleidimo zonos, kurioje yra staliukai su kėdėmis ir televizorius (30 taškas). Po to virpesiai buvo matuojami šalia kelto parduotuvės (32 taškas), medicinos punkte (34 taškas) ir pacientų palatoje (35), zonoje tarp laiptų į 6 denį ir įgulos narių valgyklos (33 taškas), įgulos narių valgykloje (29 taškas) ir valgyklos valgomajame (29A taškas) bei šalia registratūros (28 taškas). Penktojo denio pirmosios dalies (arčiau laivapriekio) virpesių lygio matavimų vietos parodytos 2.3.3.6 paveiksle.

#### 5 DENIS / DECK 5

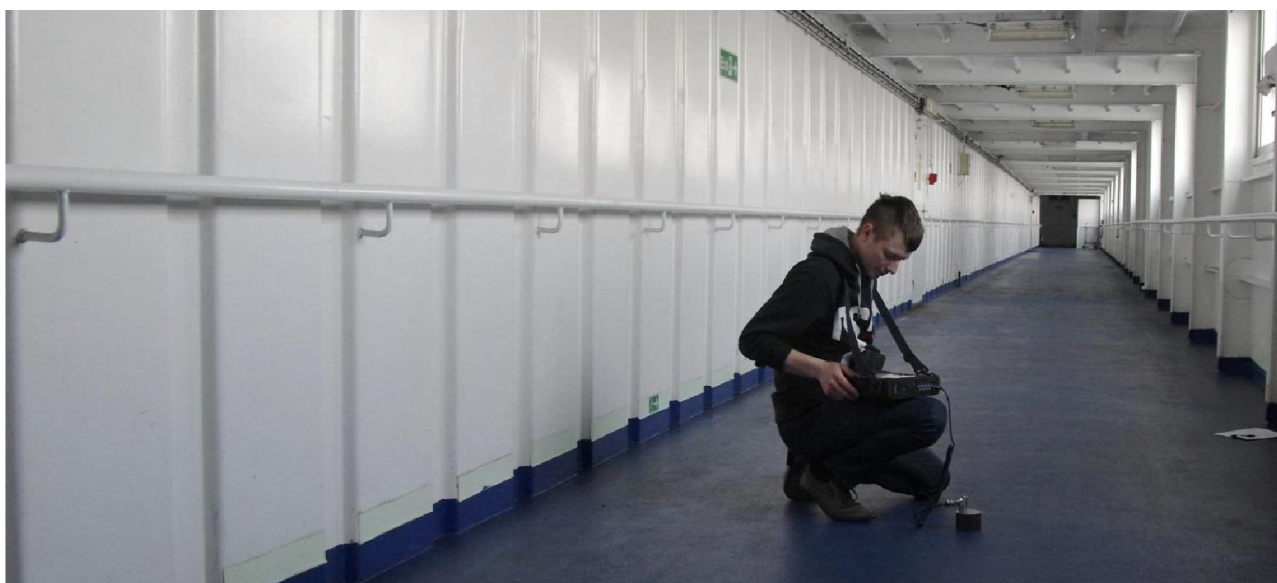


2.3.3.6 pav. Penktojo denio I-osios dalies planas su jame pažymėtais virpesių matavimo taškais

Antroji penktojo denio dalis – poilsio zona, kurioje yra krovinių transporto priemonių vairuotojų kajutės. Virpesių lygio matavimai buvo atlikti kajutėje (5090 taškas) ir koridoriuje tarp kajučių bei sėdimų vietų salono (9 taškas). Toliau už kajučių zonos link laivagalio yra atviras transporto priemonių denis. Dešinėje kelto pusėje nuo registratūros link laivagalio tęsiasi koridorius į technines patalpas (26 ir 27 taškai), kuriuo einant iki galo (pašaliniams eiti draudžiama) pasiekiami laiptai (25 taškas), vedantys į 3 trečiąjį denį, iš kurio patenkama į mašinų skyrių. Į šį koridorių taip pat galima patekti išeinant iš kajučių zonos koridoriaus į atvirą transporto priemonių denį ir iš ten įeinant pro kairėje pusėje esančias duris su specialiu kodiniu užraktu. Penktojo denio antros dalies virpesių lygio matavimų vietas parodytos 2.3.3.7 paveiksle.

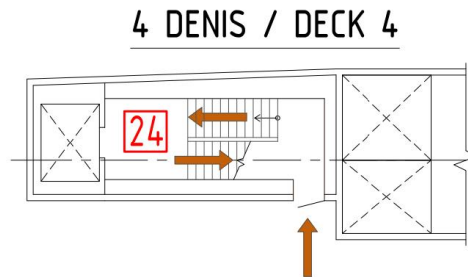


2.3.3.7 pav. Penktojo denio II-osios dalies planas su jame pažymėtais virpesių matavimo taškais



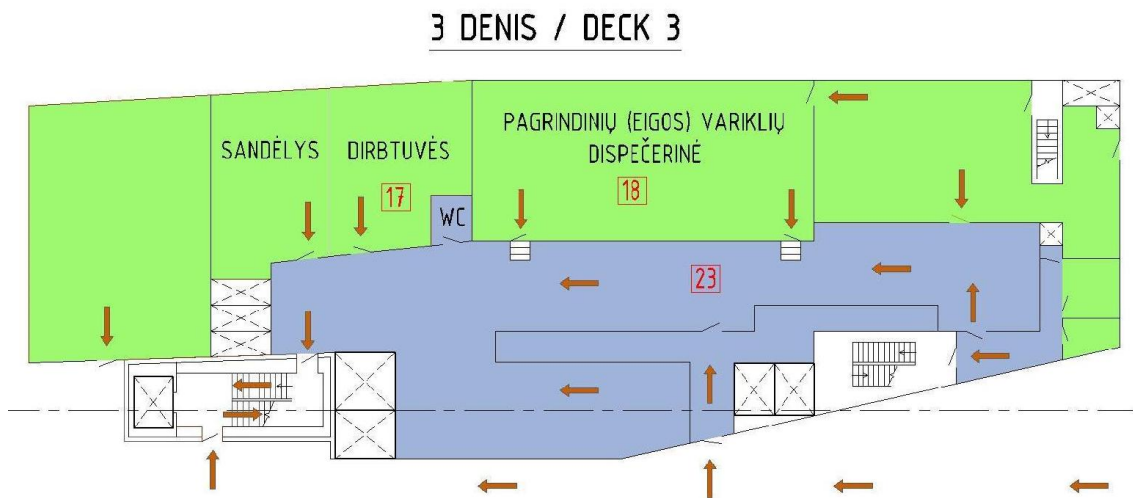
2.3.3.8 pav. Virpesių lygio matavimas penktojo denio koridoriuje (27 taškas)

Atlikus virpesių lygio matavimą prie laiptų (25 taškas), jais buvo leistasi į trečiąjį denį. Besileidžiant į apačią ketvirtojo denio laiptų aikštelėje ties liftu buvo atliktas sekantis matavimas (24 taškas). Ketvirtojo denio virpesių lygio matavimo vieta parodyta 2.3.3.9 paveiksle.



2.3.3.9 pav. Ketvirtojo denio planas prie laiptų su jame pažymėtu virpesių lygio matavimo tašku

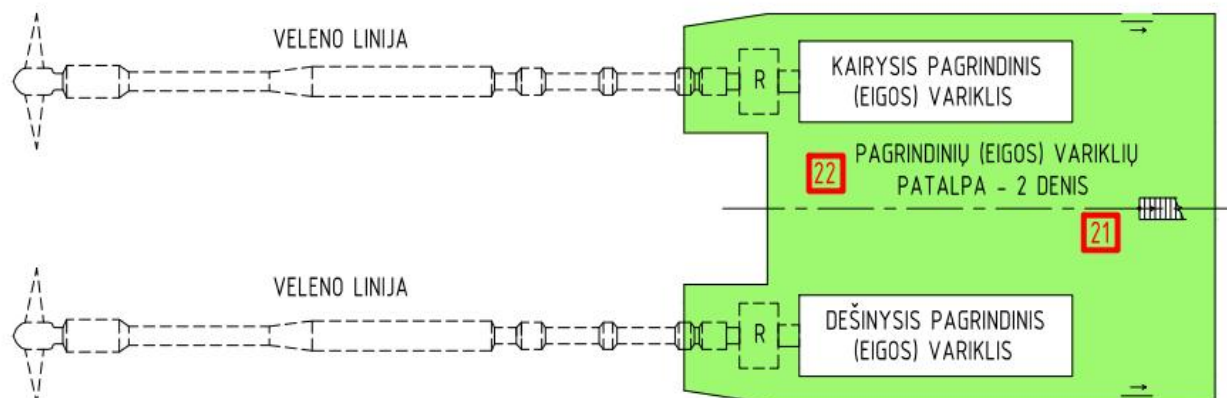
Laiptais nusileidus į trečiąjį denį virpesių lygio matavimai buvo atlikti dirbtuvėse (17 taškas), pagrindinių eigos variklių kompiuterizuoto valdymo poste – dispečerinėje (18 taškas) bei koridoriuje tarp techninių patalpų (23 taškas). Trečiojo denio virpesių lygio matavimų vietas parodytos 2.3.3.10 paveiksle.



2.3.3.10 pav. Trečiojo denio planas su jame pažymėtais virpesių lygio matavimo taškais

Atlikus virpesių lygio tyrimus trečiojo denio koridoriuje tarp techninių patalpų, buvo numatyta sekančius matavimus atlikti mašinų skyriuje, esančiame pirmame ir antrame deniuose. Trečiojo denio koridoriaus priekyje (arčiau laivapriekio) praėjus pro dešinėje pusėje esančias specialias sutvirtintas priešgaisrines duris, buvo patekta prie metalinių laiptų, vedančių į antrąjį denį – mašinų skyrių. Šioje patalpoje yra abiejų pagrindinių eigos variklių viršutinė dalis. Čia jaučiamas ne mažas triukšmas ir vibracija. Virpesių lygio tyrimai buvo atlikti dviejose vietose (21 ir 22 taškai) kaip parodyta 2.3.3.11 paveiksle.

## 2 DENIS / DECK 2

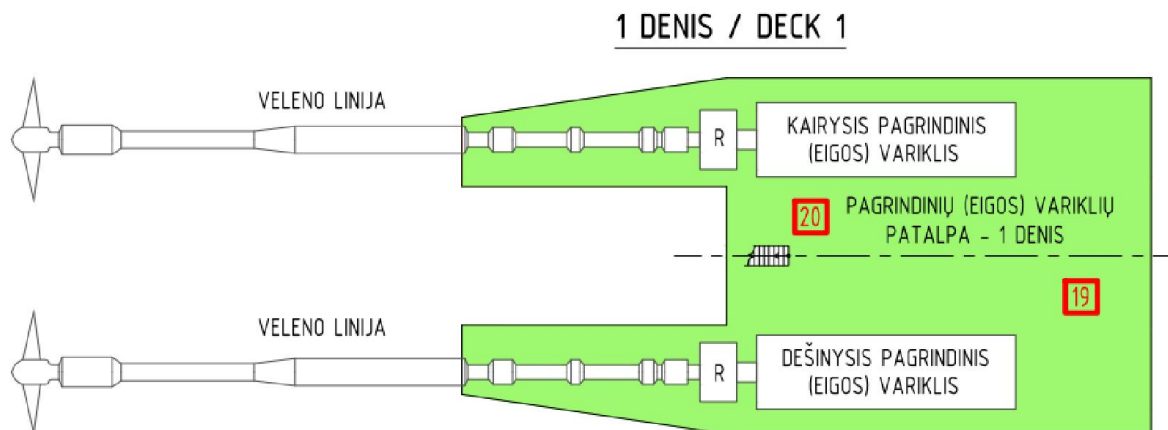


2.3.3.11 pav. Antrojo denio mašinų skyriaus planas su jame pažymėtais virpesių lygio matavimo taškais



2.3.3.12 pav. Virpesių lygio matavimas antrojo denio mašinų skyriuje (21 taškas)

Po to antrojo denio mašinų skyriuje esančiais metaliniais laiptais buvo nusileista į apačią – į pagrindinį mašinų skyriaus pirmąjį denį, kuriame jaučiamas dar didesnis triukšmas ir vibracija. Virpesių lygio tyrimai buvo atlikti dviejose vietose (19 ir 20 taškai) kaip parodyta 2.3.3.13 paveiksle.



2.3.3.13 pav. Pirmojo denio mašinų skyriaus planas su jame pažymėtais virpesių lygio matavimo taškais



2.3.3.14 pav. Virpesių lygio matavimas pirmojo denio mašinų skyriuje (20 taškas)

#### 2.3.4. Gauti rezultatai ir jų analizė

Atlikus kelto virpesių lygio natūrinius eksperimentinius tyrimus, apskaičiavus jo pagrindinių eigos variklių bei sraigto žadinamų priverstinių virpesių dažnius ir turint pirminio kelto virpesių tyrimo, atlikto 2014 metų sausio 30 – 31 dienomis, rezultatus (1 priedas), galima padaryti tokią kompleksinę kelto virpesių lygio analizę:

- keleivių ir dirbančiojo personalo komforto lygio įvertinimas;
- virpesių lygio pokyčio po skruberio sumontavimo įvertinimas;
- pagrindinių kelto virpesių žadintojų identifikavimas.

**Keleivių ir dirbančiojo personalo komforto lygio įvertinimas.** Kelto keleivių ir jame dirbančiojo personalo komforto lygio įvertinimas atliekamas eksperimentinio tyrimo metu atitinkamose matavimo vietose (taškuose) gautas absoliučiuųjų virpesių greičių kvadratinio vidurkio  $v_{RMS}$  reikšmės (6 priedas) sulyginus su tarptautiniame standarte ISO 6954:2000 bei klasifikacinės bendrovės „Germanischer Lloyd“ rekomendacijose pateiktomis žmogui komfortiškomis virpesių lygio reikšmėmis. [19, 43]

Darbo 2.2.4. poskyryje buvo minėta, kad „Germanischer Lloyd“ rekomendacijose pateikiamas keleivių ir dirbančiojo personalo komforto lygio vertinimas, kurį sudaro penki komforto lygiai (angl. *harmony categories - hc*): E - puikus komforto lygis, aukščiausia komforto klasė; 1 - labai aukštas komforto lygis; 2 – aukštas komforto lygis; 3 - vidutinis komforto lygis; 4 - priimtinas komforto lygis (žr. 2.2.4.1 ir 2.2.4.2 lenteles).

Kadangi 2003 metų leidinio „Germanischer Lloyd“ rekomendacijos yra parengtos pagal tarptautinį standartą ISO 6954:2000, todėl komforto lygi kelte vertinsime pagal GL rekomendacijas (E, 1, 2, 3 ir 4 komforto lygiai).

2.3.4.1 lentelėje pateikiama pirminio virpesių lygio matavimo rezultatai, kuriuos 2014 metų sausio 30 – 31 dienomis atliko M. Vasylius, įgyvendindamas Nacionalinės plėtros KU projektą „Lietuvos jūrinio sektoriaus technologijų ir aplinkos tyrimų plėtra“ (registracijos Nr. VP1-3.1-ŠMM-08-K-01-019). Taip pat pateikiama 2015 metų kovo 19 ir 20 dienomis atlikti kelto virpesių lygio tyrimų rezultatai ir jų aritmetinis vidurkis, kuriuo naudosisi įvertindamas kelto keleivių ir jame dirbančio personalo komforto lygi.

2.3.4.1 lentelė. Keltos virpesių lygio eksperimentinių tyrimų rezultatai (6 priedas)

Denio Nr.	Matavimo taškas	Matuojamo taško kelte „Optima Seaways“ vieta, pavadinimas	2014 metų tyrimas		2015 metų tyrimas				Komforto lygis
			Sausio 30 – 31 d.		Kovo 19 d.	Kovo 20 d.		Aritmetinis vidurkis, mm/s	
			$V_{RMS}$ , mm/s	Komforto lygis	$V_{RMS}$ , mm/s	$V_{RMS}$ , mm/s	7		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
7	4	Kapitonų vairinė (tiltelis)	1,0600	E	1,8681	2,0046	1,93635	E	
7	5	Dešinysis koridorius tarp įgulos kambarių	0,4450	E	0,9204	0,6241	0,77225	E	
7	14	Prie laiptų, vedančių į 6 denį	0,3670	E	0,6690	0,5730	0,62100	E	
6	13	Prie laiptų, vedančių į 5 denį	0,4810	E	0,7185	0,4395	0,57900	E	
6	6035	Keleivių kajutė Nr. 6035	0,4840	E	0,7886	0,7177	0,75315	E	
6	6046	Keleivių kajutė Nr. 6046	1,0250	E	1,4655	1,2169	1,34120	1	
6	6062	Keleivių kajutė Nr. 6062	0,5880	E	0,8491	0,6362	0,74265	E	
6	6069	Keleivių kajutė Nr. 6069	0,5400	E	1,0324	0,7329	0,88265	E	
5	30	Poilsio zona su staliukais ir TV prie baro	1,2900	E	1,0278	0,8941	0,96095	E	
5	31	Savitarnos restoranas	1,4100	1	1,8463	2,1674	2,00685	2	
5	32	Prie keltos parduotuvės	0,5290	E	0,7480	0,6052	0,67660	E	
5	34	Medicinos punktas	0,3420	E	0,9922	0,6732	0,83270	E	
5	35	Pacientų palata	0,4820	E	0,8271	0,6671	0,74710	E	
5	33	Tarp laiptų į 6 denį ir įgulos narių valgyklos	0,4470	E	0,8549	0,8851	0,87000	E	
5	29	Įgulos narių (dirbančio personalo) valgykla	0,8590	E	1,4584	1,1437	1,30105	E	

1	2	3	4	5	6	7	8	9
5	29A	Valgyklos valgomasis su staliukais	0,8590	E	1,1701	1,4443	1,30720	E
5	28	Prie registratūros posto	0,5280	E	1,1441	0,7936	0,96885	E
5	5090	Krovinio transporto vairuot. kajutė Nr. 5090	0,6010	E	1,4062	1,3534	1,37980	1
5	9	Koridorius tarp kajučių ir sėdimų vietų salono	0,8350	E	1,5808	1,4973	1,53905	E
5	27	Koridorius link laiptų į 3 denį (arčiau laivapr.)	1,8100	E	1,9376	3,4956	2,71660	E
5	26	Koridorius link laiptų į 3 denį (arčiau laivag.)	1,9870	E	1,5521	3,7816	2,66685	E
5	25	Prie laiptų, vedančių į 3 denį	0,8980	E	1,1368	1,1003	1,11855	E
4	24	Laiptų aikštelė 4 denyje (prie lifto)	1,0100	E	1,2059	2,5735	1,88970	E
3	17	Dirbtuvės	1,1400	E	2,2094	1,8527	2,03105	E
3	18	Pagrindinių eigos variklių dispečerinė	2,6600	1	4,4382	3,0615	3,74985	4
3	23	Koridorius tarp techninių patalpų	1,7100	E	1,8758	2,3782	2,12700	E
2	21	Mašinų skyrius (tarp variklių, arčiau laivapr.)	9,7100	4	4,9221	9,3558	7,13895	4
2	22	Mašinų skyrius (tarp variklių, arčiau laivag.)	2,6700	E	2,5239	3,8923	3,20810	E
1	19	Mašinų skyrius (tarp variklių, arčiau laivapr.)	4,5900	1	10,0100	7,9181	8,96405	4
1	20	Mašinų skyrius (tarp variklių, arčiau laivag.)	5,4500	3	5,7114	9,8149	7,76315	4
<b>Aritmetinio vidurkio reikšmė:</b>			<b>1,56023</b>	<b>E</b>	<b>1,96302</b>	<b>2,27646</b>	<b>2,11974</b>	<b>1</b>

\* Pastaba: kadangi 2003 metų „Germanischer Lloyd“ leidinio rekomendacijose komfortui keleivinių laivų keleiviams ir dirbančiajam personalui rekomenduojamų „komfortiškų“ virpesių reikšmių koridoriuose nėra pateikta, todėl juos priskiriame prie trumpo buvimo bendrojo naudojimo erdvių.

*Keleivių komforto lygis.* Atliktų kelto virpesių lygio eksperimentinių tyrimų rezultatai rodo, kad juo plaukiančių keleivių komforto lygis yra puikus ( $hc = E$ ) su keliomis menkomis išimtimis. Labai aukštas komforto lygis ( $hc = 1$ ) yra kajutėse 6046 ir 5090, o savitarnos restorane komforto lygis yra aukštas ( $hc = 2$ ). Nepaisant to, galima teigti, kad keleivių komforto lygis yra puikus.

*Dirbančiojo personalo komforto lygis.* Kelte dirbančio personalo komforto lygį galima dalinti į tokias dvi dalis: puikus ( $hc = E$ ) ir priimtinas komforto lygis ( $hc = 4$ ). Puikus komforto lygis yra kapitonų vairinėje, valgykloje, registratūroje, dirbtuvėse, 3 denio koridoriuje ir 2 denio mašinų skyriuje. Priimtinas komforto lygis yra pagrindinių variklių dispečerinėje, 2 ir 1 denio mašinų skyriuose. Apibendrinant, daroma išvada, kad įgulos komforto lygis yra aukštas ( $hc = 2$ ).

*Bendras kelto komforto lygis.* Bendras kelto komforto lygis yra labai aukštas ( $hc = 1$ ), nors 2014 metais atliktų tyrimų metu buvo gauta, kad bendras kelto komforto lygis yra puikus ( $hc = E$ ). To priežastys bus aptartos „virpesių lygio pokyčio po skruberio sumontavimo įvertinimas“ dalyje.

**Virpesių lygio pokyčio po skruberio sumontavimo įvertinimas.** Kelto virpesių lygio pokytis po skruberio sumontavimo įvertinamas naudojantis 2.3.4.1 lentele.

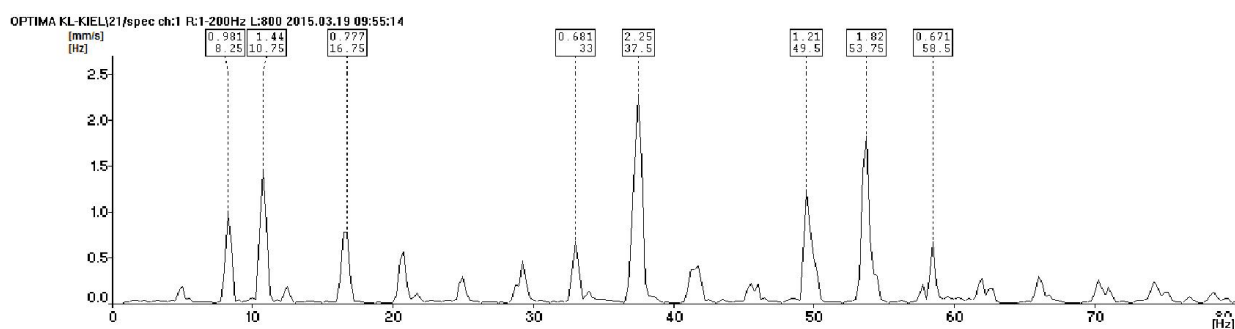
*Kelto virpesių lygio tyrimai prieš skruberio sumontavimą.* Pirminio tyrimo, vykdyto 2014 metų sausio 30 – 31 dienomis, gauta, kad kelto  $v_{RMS}$  vidutinė reikšmė yra 1,56023 mm/s.

*Kelto virpesių lygio tyrimai po skruberio sumontavimo.* Eksperimentinių tyrimų metu, vykdytų 2015 metų kovo 19 dieną, gauta, kad  $v_{RMS}$  vidutinė reikšmė yra 1,96302 mm/s, o kovo 20 dieną – 2,27646 mm/s. Virpesių lygio reikšmių skirtumas tarp abiejų dienų matavimų rezultatų susidarė dėl šių priežasčių: nevienodų oro sąlygų (plaukiant iš Klaipėdos į Kylį vėjas buvo palankus, o grįžtant – nepalankus), plaukimo greičių (nuplaukiant buvo apie 19,6 mazgo, o parplaukiant – apie 19,8 mazgo) ir kitų priežasčių. Plaukiant didesniu greičiu ir prieš vėją natūralu, kad varikliai dirba didesniu apkrovimu ir to pasėkoje padidėja žadinamas priverstinių virpesių lygis.

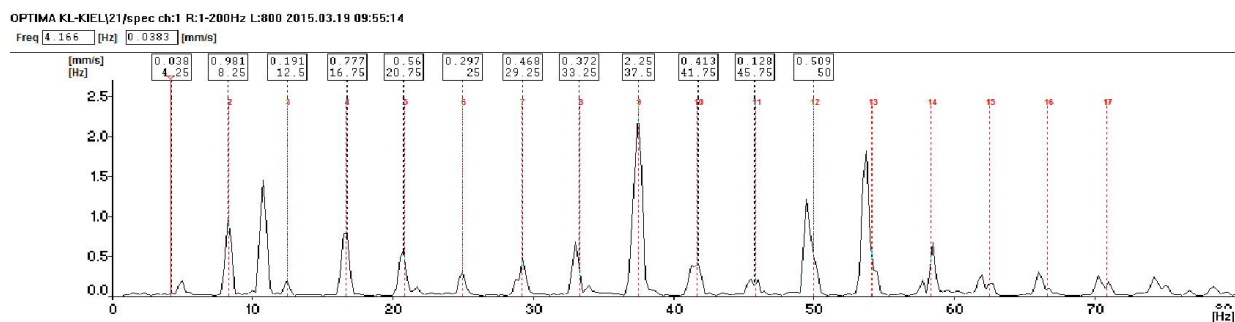
*Kelto virpesių lygio padidėjimo priežastys.* Lyginant kelto virpesių lygius prieš ir po skruberio sumontavimo matoma, kad vidutiniškai virpesių lygis padidėjo 0,55951 mm/s, t.y. apie 26,4%. Aklai teigti, kad virpesių lygis padidėjo vien dėl skruberio kaip pašalinio daikto sumontavimo kelte būtų naivu. Kadangi jis yra sumontuotas kelto achterštevenio viršuje prie išmetimo kolektoriaus, tai jis labiau lemia laivo stovumo ir kitų jo jūrinių savybių pakitimą. Tačiau reikia įvertinti tai, kad įrengus „išmetamųjų dujų plautuvę“ – šlapiojo tipo skruberį, išmetamosios dujos nebeišteka vamzdynais tiesiai į aplinką. Pastarosios, prieš patekdamos į išmetimo kolektorių, techniniais vamzdynais keliauja į skruberį, dalyvaudamos „plovimo“ procese, t.y. daro vingį ir yra „užlaikomos“. Dėl visų šių išvardytų priežasčių padidėja išmetamųjų dujų slėgis ir pasipriešinimas, to pasėkoje varikliai turi „pagaminti“ didesnę kiekį mechaninės energijos – padidėja variklių apkrovimas (ir kuro sąnaudos), todėl padidėja ir jų skleidžiamų priverstinių virpesių lygis.

**Pagrindinių kelto virpesių žadintojų identifikavimas.** Darbo 2.3.1. ir 2.3.2 poskyriuose pagal atliktus skaičiavimus buvo gauta, kad kelto pagrindiniai eigos varikliai žadina visą aibę priverstinių virpesių dažnių: alkūninio veleno neišsvertų jėgų žadinamų priverstinių virpesių dažnis yra 8,33 Hz, dujų užsidegimo cilindre metu – 37,50 Hz, vidaus degimo keturktaktyje variklyje vykstančių pereinamųjų režimų žadinami priverstinių virpesių kartotiniai 0,5X; 1,0X; 1,5X ir t.t. dažniai (harmonikos) -  $\eta \cdot 8,33\text{Hz}$ , o sraigas žadina 10,73 Hz dažnio priverstinius virpesius.

Gauti virpesių tyrimų rezultatai – spektrai (6 priedas) patvirtina, kad kelto variklių ir sraigtų priverstinių virpesių dažniai yra apskaičiuoti teisingai. Kaip pavyzdį galima paimti bet kurio tiriamojo taško (paimame 2 denio 21 tašką) absoliučią virpesių greičių kvadratinio vidurkio  $v_{RMS}$  reikšmių [mm/s] virpesių dažnių intervale nuo 0 iki 80 Hz spektrą ir jį išanalizuoti.



2.3.4.1 pav. Antrojo denio 21 taško  $v_{RMS}$  spektro pikinės reikšmės



2.3.4.2 pav. Antrojo denio 21 taško  $v_{RMS}$  spektro harmonikos

Analizuojant antrojo denio mašinų skyriuje matuoto 21 taško gautą virpesių spektrą matome, kad pikinės virpesių greičių reikšmės [mm/s] yra ties pagrindinių eigos variklių ir sraigtų žadinamais priverstinių virpesių dažniais. Mažiausia virpesių dažnio reikšmė (apie 5 Hz), tikėtina, kad tai yra laivo korpuso elementų rezonansinis dažnis. Didesnių dažnių pikines vertes žadina kitos laivinės mašinos ir įrenginiai: pagalbiniai varikliai, generatoriai, siurbliai, aušinimo sistema ir oro kondicionieriai, centrifugos ir kt.

## IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS

1. Atlikus mokslinių straipsnių ir kitų literatūros šaltinių apžvalgą ir analizę paaiškėjo, kad viso pasaulio mokslininkai ir tyrėjai ieško naujų efektyvių virpesių laivuose mažinimo būdų bei tobulina senus, bando pritaikyti įvairių metodų kombinacijas, atliekami įvairūs natūriniai eksperimentiniai tyrimai ir modeliavimai BEM programomis. Nustatyta, kad virpesiai laive lemia ne tik laivinių konstrukcinių elementų ir įrenginių nuovarginį irimą ir gedimus, bet ir juo plaukiančių žmonių prastą fizinę ir emocinę savijautą. Nustatyta, kad virpesius laive dėl šių išvardytų pasekmių griežtai kontroliuoja tarptautiniai standartai ir laivų klasifikacinės bendrovės.
2. Sukūrus eksperimentinių tyrimų vykdymo metodiką ir pasirinkus tam labiausiai tinkančią įrangą, buvo atliktas kelto „Optima Seaways“ virpesių lygio tyrimas. Virpesių lygio matavimų vietas tam tikrose patalpose buvo pasirinktos naudojantis laivų klasifikacinės bendrovės „Germanischer Lloyd“ pateiktomis rekomendacijomis, kurios sudarytos remiantis tarptautiniu standartu ISO 6954:2000.
3. Naudojantis sudaryta kelto eksperimentinių tyrimų atlikimo metodika ir pasirinkta įranga, 2015 metų kovo 18 – 20 dienomis reiso Klaipėda – Kyliis – Klaipėda metu buvo atliktas kelto virpesių lygio tyrimas.
4. Atlikus kelto virpesių lygio tyrimų metu gautų rezultatų analizę buvo nustatyta, kad juo plaukiančių keleivių virpesių lygis yra aukščiausios klasės ( $hc = E$ ), o kelte dirbančio personalo – aukštas komforto lygis ( $hc = 2$ ).
5. Atlikus kompleksinę kelto 2014 ir 2015 metų virpesių lygio tyrimų metu gautų rezultatų analizę buvo nustatyta, kad po skruberio sumontavimo kelto virpesių lygis padidėjo 0,55951 mm/s, t.y. apie 26,4%. Padaryta išvada jog tokį virpesių lygio pokytį lemia tai, kad kelte įrengus skruberį, išmetamosios dujos nebeišteka vamzdynais tiesiai į aplinką, o prieš tai keliauja į skruberį, kuriame vyksta jų „plovimo“ procesas. Tada padidėja išmetamųjų dujų slėgis, kurio pasipriešinimą turi įveikti kelte sumontuoti pagrindiniai eigos varikliai. Dėl šių priežasčių padidėja variklių apkrovimas (ir kuro sąnaudos), todėl padidėja ir jų skleidžiamų priverstinių bei viso kelto virpesių lygis. Be to, tokį virpesių lygio skirtumą dalinai lemia ir skirtingos aplinkos sąlygos (vėjo stiprumas, kryptis, bangos) ir kelto plaukimo greitis – nuo to priklauso eigos variklių apkrovimas.  
Norint gauti tikslius kelto virpesių lygio pokyčio po skruberio sumontavimo rezultatus, reiktų atliktų sudėtingus ir ilgai trunkančius kompleksinius kelto virpesių lygio tyrimus plaukiant įvairiais režimais ir įvairiomis aplinkos sąlygomis.

## LITERATŪRA

- 1) American Bureau of Shipping. 2014. Guidance note on ship vibration. USA, Huston.
- 2) Ahmadi, H., ir Mollazade, K. 2012, Fault diagnosis of an electro-pump in a marine ship using vibration condition monitoring.
- 3) Augustaitis, V.K. 2000. Mechaninių virpesių pagrindai. Vilnius: Žiburio leidykla.
- 4) Bahtiarian, M. 2011. Underwater noise For New Research Vessels. Noise control engineering. Massachusetts.
- 5) Barauskas, R., Belevičius, R., Kačianauskas, R. 2004. Baigtinių elementų metodo pagrindai. Vilnius: Technika.
- 6) Barrass, C. B. 2004. Ship design and performance for masters and mates. Oxford
- 7) Barzdaitis, V., Mažeika, P., Vasylius, M., Tadžijevs, A., Kartašovas, V. 2014. Vertikalių rotorinių mašinų diagnostikos specifika jūriniame transporte. Technologijos mokslo darbai Vakarų Lietuvoje, vol. 9, p. 16 – 20.
- 8) Barzdaitis, V. 2011. Mechatronikos pagrindai. Kaunas: Technologija.
- 9) Barzdaitis, V. 2008. Mechatroninės sistemos tyrimai ir diagnostika. Kaunas: Technologija.
- 10) Barzdaitis, V., Činikas, G. 1998. Rotorinių mašinų monitoringas ir diagnostika. Kaunas: Technologija.
- 11) Basten, T., Berkhoff, A. 2010. Active vibration control for underwater signature reduction of a navy ship. The 17th international congress on sound and vibration.
- 12) Daley, S., Johnson, F. A., Pearson, J. B., Dixon, R. 2004. Active vibration control for marine applications. Control Engineering Practice, No. 12, p. 465–474.
- 13) Germanisher Lloyd technology. 2001. Ship Vibration. Hamburg.
- 14) Gul, Y., Kaydihan, L. Global vibration analysis of a 1900 TEU capacity container ship.
- 15) Hamedani, S. J., Khedmati, M. R., Azkat, S. 2012. Vibration analysis of stiffened plates using Finite Element Method. Latin American journal of Solids and Structures, No. 9, p.1 – 20.
- 16) ISO 10816:2003. Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts.
- 17) ISO 20283:2008. Mechanical vibration - Measurement of vibration on ships.
- 18) ISO 2631:2003. Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole - body vibration.
- 19) ISO 6954:2000. Mechanical vibration – Guidelines for the measurement, reporting and evaluation of vibration with regard to habitability on passenger and merchant ships.
- 20) Jegaden, D. 2013. Textbook of maritime medicine.

- 21) Jonušas, R. 1991. Rotorinių sistemų virpesių šaltiniai, jų mažinimo būdai ir priemonės. Kauno technologijos universitetas. Mašinų gamybos katedra. Kaunas: Technologija.
- 22) Lin, T. R., Mechefske, C. K. 2008. Vibration control of ship structures. 5th International Conference on Thin-walled Structures in Brisbane, No. 1, p. 245-252.
- 23) Lin, T. R., Pan, J., O'Shea, P. J., Mechefske, C. K. 2009. A study of vibration and vibration control of ship structures. Marine Structures, No. 22, p. 730–743.
- 24) Li, X., Howard, C., Hansen, C., Winberg, M. 2004. Feasibility of Active Vibration Isolation of Diesel Engines in Collins Class Submarines. Navy Engineering Bulletin.
- 25) Mažeika, P., Barzdaitis, V., Vasylius, M., Tadžijevas, A., Kartašovas, V. 2014. Vidaus degimo variklio virpesių tyrimo specifika ir problematika. Nacionalinė mokslinė – praktinė konferencija. Jūros mokslai ir technologijos – 2014. Vol. 9, p. 133 – 137.
- 26) Molland, A. F. 2008. The maritime engineering reference book. A guide to ship design, construction and operation.
- 27) Okumoto, Y., Takeda, Y., Mano, M., Okada, T. 2009. Design of ship hull structures. A practical guide for engineers. Berlin: Springer-Verlag.
- 28) Panasiuk, I. 2012. Laivo išmetamųjų dujų toksiškumo mažinimo problematika. Vilnius: VGTU, Mokslas – Lietuvos ateitis konferencija.
- 29) Panasiuk, I. 2013. Laivo išmetamųjų dujų toksiškumo mažinimo metodų taikymo lyginamoji analizė. Vilnius: VGTU, Mokslas – Lietuvos ateitis konferencija.
- 30) Smith, M. 2011. Prediction methodologies for vibration and structure borne noise.
- 31) Tienhaara, H., Mikonaho, H. 2004. Engine Dynamics and vibration control.
- 32) Tokhi, O., Veres, S. 2002. Active sound and vibration control theory and applications. London: Bookcraft Ltd.
- 33) Vasylius, M., Barzdaitis, V., Mažeika, P., Tadžijevas, A., Kartašovas, V. 2014. Laivo varomosios sistemos reduktoriaus ir veleno linijos virpesių tyrimas. Technologijos mokslo darbai Vakarų Lietuvoje, vol. 9, p. 177 – 181.
- 34) Velonias, P. M. 1995. Vibration analysis of a swath-type ship. Massachusetts university of technology. Boston.
- 35) Watson, D. 1998. Practical ship design. Volume 1. Oxford.
- 36) Zheng, H., Liu, G. R., Tao, J. S., Lam, K. Y. 2001. FEM/BEM analysis of diesel piston-slap induced ship hull vibration and underwater noise. Applied Acoustics, No. 62, p. 341-358.
- 37) Žiliukas, P., Barauskas, R. 2008. Mechaniniai virpesiai. Vilnius: VPU leidykla.
- 38) ADASH virpesių signalų analizatoriai [interaktyvus]. [žiūrėta 2015 m. vasario 6 d.]. Prieiga per internetą: <[http://www.adash.cz/index\\_en.php](http://www.adash.cz/index_en.php)>

- 39) MAN B&W type 9L 48/60 techniniai parametrai [interaktyvus]. [žiūrėta 2015 m. kovo 29 d.]. Prieiga per internetą: <<http://powerplants.man.eu/docs/librariesprovider7/brochures/48-60.pdf?sfvrsn=4>>
- 40) MARPOL 73/78 Annex VI, Regulation for the Prevention of Air Pollution from ships, Technical and Operational implications [interaktyvus]. [žiūrėta 2015 m. balandžio 3 d.]. Prieiga per internetą: <[http://www.dnv.com/binaries/marpol%20brochure\\_tcm4-383718.pdf](http://www.dnv.com/binaries/marpol%20brochure_tcm4-383718.pdf)>
- 41) SKF virpesių signalų analizatoriai [interaktyvus]. [žiūrėta 2015 m. vasario 6 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.skf.com/group/products/condition-monitoring/portables-data-collectors-and-analyzers/vibration-analyzers/index.html>>
- 42) Skruberių montavimo ypatumai kompanijos AB „DFDS Seaways“ laivuose [interaktyvus]. Lietuva, Klaipėda [žiūrėta 2015 m. kovo 25 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.ve.lt/naujienos/jura/laivybos-kompanijos-rengiasi-dideliems-issukiams-1207484/>>
- 43) Virpesių ir triukšmo ribojimo taisyklės bei rekomendacijos keleivių ir įgulos narių komfortui keleiviniuose laivuose, kurių greitis yra ne didesnis kaip 25 mazgai. Germanischer Lloyd. 2003 Edition. Rules for Classification and Construction. Harmony Class – Rules on Rating Noise and Vibration for Comfort, Cruise Ships ( $v \leq 25kn$ ) [interaktyvus]. Germany, Hamburg [žiūrėta 2015 m. kovo 27 d.]. Prieiga per internetą: <[http://www.gl-group.com/infoServices/rules/pdfs/gl\\_i-1-16\\_e.pdf](http://www.gl-group.com/infoServices/rules/pdfs/gl_i-1-16_e.pdf)>

## **PRIEDAI**

## 1 PRIEDAS

**„Lietuvos jūrinio sektoriaus technologijų ir aplinkos tyrimų plėtra“ (registracijos Nr. VP1-3.1-ŠMM-08-K-01-019)**

Kelto "Optima Seaways" virpesių ir vibracijos tyrimas

Matavimo taškas	Laikas	Oktavos, LZeq											Dažnių juosta					Vibracija mm/s
		16 Hz	31.5 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2 000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	16000 Hz	LAeq	LCeq	LCpeak	LAFmax	LAFmin	
20	23:24	103,7	103,8	102,1	103,4	104,4	103,3	101,2	104,7	93,8	85,8	78,3	108,4	111,5	123,6	109,0	106,7	5,45
19	23:20	99,4	105,3	104,3	101,9	101,6	101,4	99,3	97,6	86,9	77,2	68,1	104,0	110,0	121,9	104,3	103,7	4,59
22	23:32	101,7	98,9	102,7	100,6	102,6	103,5	96,2	98,2	87,1	78,2	68,3	104,1	109,4	120,4	104,8	103,0	2,67
21	23:29	105,3	102,6	101,7	98,6	98,8	96,2	94,8	95,3	84,4	75,7	68,7	100,4	106,9	118,9	100,8	99,9	9,71
18	23:14	85,7	96,4	91,6	78,5	77,9	73,2	70,0	64,5	59,7	51,9	43,4	75,6	95,5	105,8	76,4	74,5	2,66
17	23:10	89,4	98,3	91,6	81,3	80,8	73,2	71,1	71,9	61,0	52,1	42,6	78,1	97,4	108,0	78,6	77,6	1,14
23	23:36	94,9	109,5	98,3	86,6	87,9	82,9	80,7	81,5	70,4	60,1	50,9	87,2	107,6	114,9	87,8	86,7	1,71
24	23:39	86,1	97,1	86,2	72,9	71,0	62,1	56,5	52,9	48,1	38,7	30,4	66,8	94,8	103,8	67,7	65,3	1,01
25	23:42	88,9	94,6	85,5	74,0	72,9	60,8	55,6	47,6	41,4	32,7	27,1	66,4	92,8	102,1	67,9	62,9	0,898
26	23:46	96,0	107,9	98,4	90,1	86,2	83,5	79,2	72,4	69,0	61,4	52,2	85,0	106,3	113,9	85,5	84,0	0,987
27	23:48	93,6	105,9	96,3	90,4	83,5	80,1	73,2	63,7	58,0	51,8	41,0	81,4	104,3	111,8	82,1	80,9	1,81
28	23:51	81,7	96,0	83,9	62,1	54,8	49,6	47,1	45,6	42,7	37,3	32,4	61,1	93,9	98,5	61,7	60,4	0,528
9	22:21	84,4	90,9	79,3	59,5	48,4	45,1	39,7	36,1	26,6	22,2	17,6	55,8	89,0	95,3	56,6	55,2	0,835
7	22:18	81,2	88,4	75,7	55,7	48,8	45,0	44,6	46,9	42,9	29,7	19,6	54,9	86,3	93,8	55,8	53,1	0,601
6	22:13	92,7	89,4	77,2	58,8	49,6	45,0	39,7	36,9	29,7	26,0	22,7	54,5	88,7	96,6	55,1	53,4	0,915
29	00:01	79,9	88,3	74,5	64,5	59,4	56,1	51,3	49,3	45,7	38,5	31,8	58,9	85,9	94,8	59,6	58,0	0,859
34	00:24	71,3	83,7	71,6	56,7	50,0	46,4	44,2	49,2	47,3	36,1	22,0	54,9	81,6	89,3	60,6	50,6	0,342
35	00:29	70,4	88,6	76,6	56,6	52,4	46,7	43,7	39,2	31,5	21,7	19,4	54,4	86,5	92,8	55,4	53,1	0,482
32	00:13	75,3	78,6	68,1	61,6	58,7	54,3	50,2	43,2	37,9	33,1	26,0	56,0	77,2	87,3	58,3	55,1	0,529
30	00:06	76,6	79,1	66,5	58,5	57,7	51,7	47,4	44,1	38,0	30,0	21,8	54,3	77,4	87,5	54,9	53,6	1,29
31	00:11	83,8	79,1	69,7	57,1	57,5	52,3	50,0	44,7	41,0	31,9	22,8	55,3	78,4	88,3	61,3	52,5	1,41
33	00:21	70,0	81,4	70,2	59,5	55,4	56,9	49,2	47,9	40,2	33,7	25,5	56,9	79,5	87,5	57,4	56,5	0,447
13	22:45	74,0	79,9	67,6	57,4	56,8	47,3	44,2	40,6	34,7	28,4	19,9	52,0	77,9	86,1	53,2	50,4	0,481

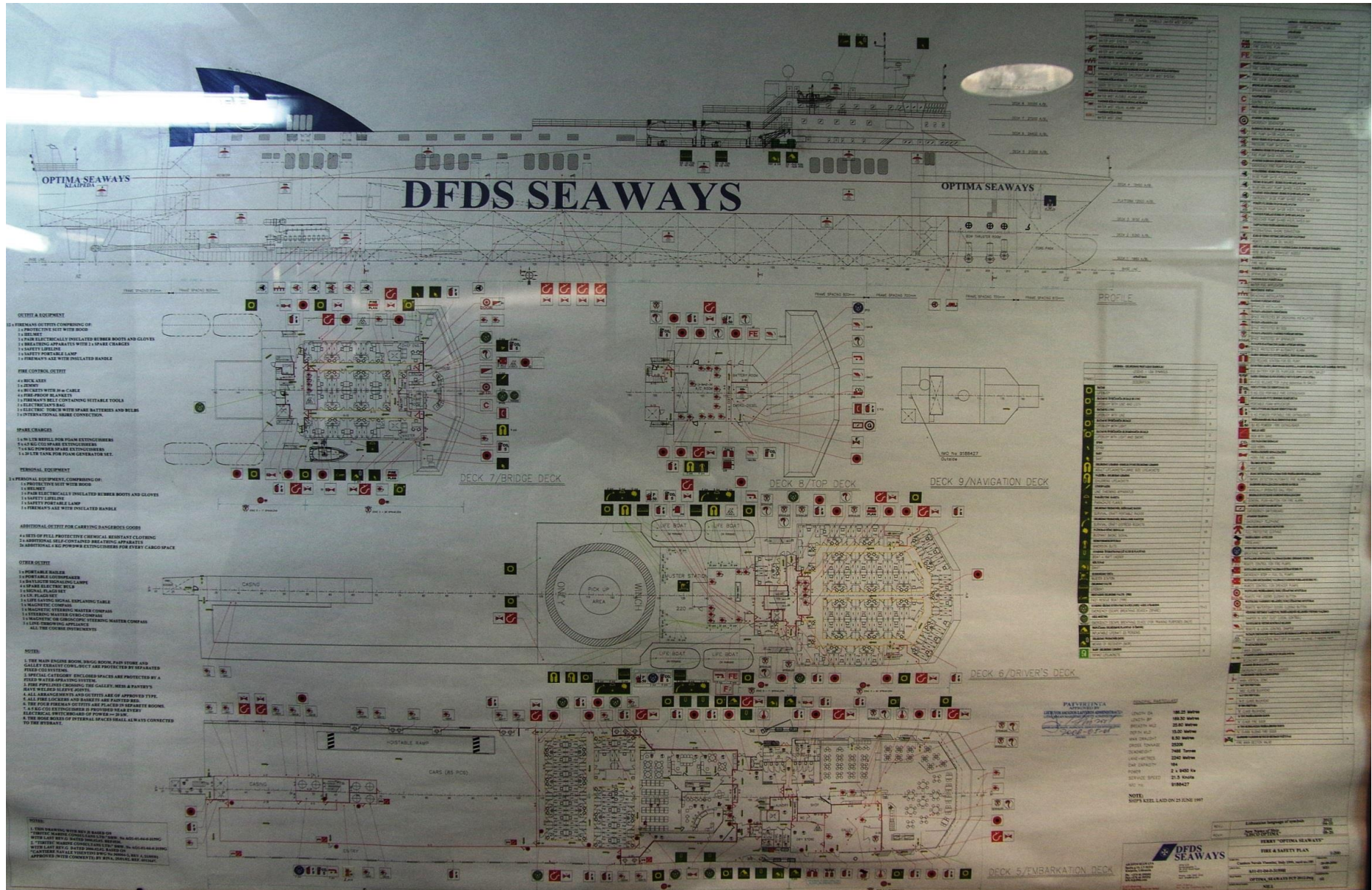
8	22:26	79,1	79,8	68,1	63,3	53,5	40,1	34,7	30,6	28,2	22,9	21,1	51,2	78,5	85,7	53,1	47,6	0,588
11	22:35	74,6	74,8	62,5	47,5	45,5	43,4	45,6	43,1	37,5	31,3	25,6	49,7	73,5	82,4	56,8	41,9	0,467
12	22:41	78,3	85,7	73,8	50,9	40,1	32,2	27,1	24,1	21,6	17,7	15,8	50,2	83,8	90,8	52,4	47,9	0,542
36	00:34	72,1	69,6	60,9	52,3	51,1	46,3	39,7	33,7	29,2	24,4	21,9	47,4	69,2	79,2	51,4	44,6	0,54
37	00:41	78,6	89,4	77,6	53,5	42,4	34,4	32,6	31,9	29,7	24,1	18,6	54,0	87,5	93,5	54,9	52,5	0,484
10	22:30	70,2	73,7	58,8	48,3	39,8	37,5	36,9	37,6	31,9	26,6	22,7	43,7	71,7	80,5	49,5	39,0	1,025
14	22:53	80,5	75,1	67,2	59,6	53,3	48,8	47,8	50,8	41,7	36,2	29,1	55,3	76,4	86,4	60,0	51,9	0,367
16	23:02	79,2	75,9	65,9	60,2	52,7	48,4	42,3	35,1	31,0	28,0	24,6	50,1	75,4	84,6	50,8	49,3	0,445
15	22:59	79,2	73,3	61,0	55,7	46,3	45,3	42,4	41,6	38,3	33,7	28,0	48,9	73,4	82,7	51,1	46,1	0,623
5	22:03	82,3	78,2	66,4	60,0	52,5	47,5	47,1	47,0	41,4	40,0	36,6	53,4	77,7	86,8	54,7	50,1	0,445
4	21:54	99,9	83,9	65,4	59,5	56,3	53,9	50,6	44,9	38,9	35,4	41,7	56,0	92,2	97,3	58,6	53,3	1,06

**„Lietuvos jūrinio sektoriaus technologijų ir aplinkos tyrimų plėtra“  
(registracijos Nr. VP1-3.1-ŠMM-08-K-01-019)**

Kelto "Optima Seaways" virpesių ir vibracijos tyrimas

Matavimo taškas	Matavimo taško apibūdinimas
4	Tiltelis (7 denis)
5	Koriudorius vidurinis (7 denis)
6	Vairuotojų kajutės (5 denis - nr. 5100)
7	Vairuotojų kajutės (5 denis - nr. 5090)
8	Keleivių šoninės kajutės (6 denis - nr.6059)
9	Koriudorius tarp kajučių (5 denis)
10	Keleivių priekinės (liuksas) kajutės (6 denis - nr.6049)
11	Keleivių vidinės kajutės (6 denis - nr.6070)
12	Keleivių šoninės kajutės (6 denis - nr.6039)
13	Koridorius (6 denis)
14	Koridoriaus pradžia (7 denis, P.s. Užė vejas)
15	Įgulos šoninės kajutės (7 denis, P.s. Nuo pagr. Durų 3 kajutė po dešine)
16	Įgulos šoninės kajutės (7 denis, P.s. Nuo pagr. Durų 1 kajutė po kaire)
17	Dirbtuvės (3 denis)
18	Variklių valdymo skyrius (3 denis)
19	Variklio apačia (1 denis, nuo rotorių 2 mat. taškas)
20	Variklio apačia (1 denis, nuo rotorių 1 mat. taškas)
21	Variklio viršus (2 denis, nuo rotorių 2 mat. taškas)
22	Variklio viršus (2 denis, nuo rotorių 1 mat. taškas)
23	Koriudorius (3 denis)
24	Laiptai - įėjimas į 4 denį (4 denis)
25	Laptai prie įėjimo į ilgąjį koridorių (5 denis)
26	Ilgas koriudorius į registratūrą (5 denis, nuo laiptų 1 mat. taškas)
27	Ilgas koriudorius į registratūrą (5 denis, nuo laiptų 2 mat. taškas)
28	Registratūra (5 denis)
29	Valgykla įgulos (5 denis)
30	Laukiamasis (5 denis)
31	Restoranas (5 denis)
32	Koridorius į restoraną (5 denis, prie pardutuovės)
33	Lapatai į 6 denį
34	Medicininės patalpos, priimamasis (5 denis)
35	Medicininės patalpos, palata (5 denis)
36	Keleivių kajutės vidinės (6 denis - nr.6067) Linos
37	Keleivių kajutės šoninės (6 denis - nr.6035) MŪSŪ, be ventiliatoriaus
38	Keleivių kajutės šoninės (6 denis - nr.6035) MŪSŪ, su ventiliatoriaus

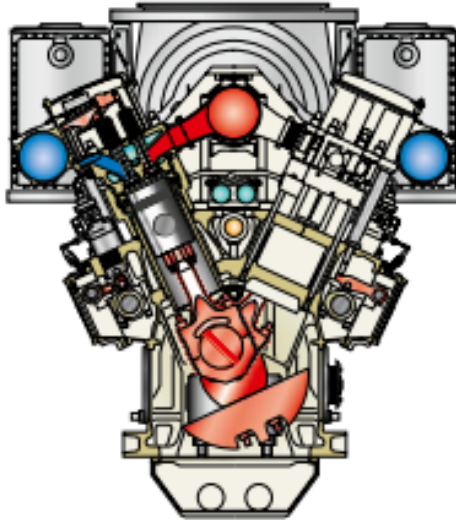
# 2 PRIEDAS



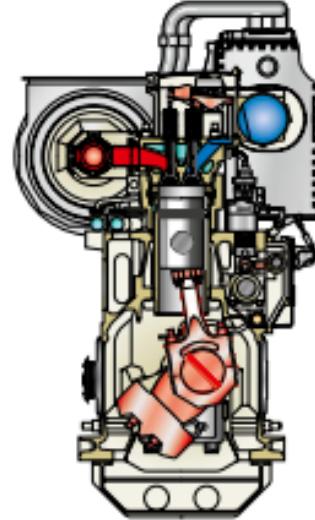


### 3 PRIEDAS

## MAN B&W 48/60 ENGINES



V48/60 four-stroke diesel engine



L48/60 four-stroke diesel engine

#### Power output (maximum continuous rating)

		Engine (kW)	Generating set (kW)
9L48/60	9 cyl.	9,450	9,195
12V48/60	12 cyl.	12,600	12,310
14V48/60	14 cyl.	14,700	14,362
18V48/60	18 cyl.	18,900	18,465
<b>50/60 Hz</b>			
Engine speed			500/514 rpm
Mean piston speed			10.0/10.3 m/s
Mean effective pressure			23.2/22.6 bar
Nominal generator efficiencies			L-type: 97.3%, V-type: 97.7%

#### Electric genset heat rate at 100% load

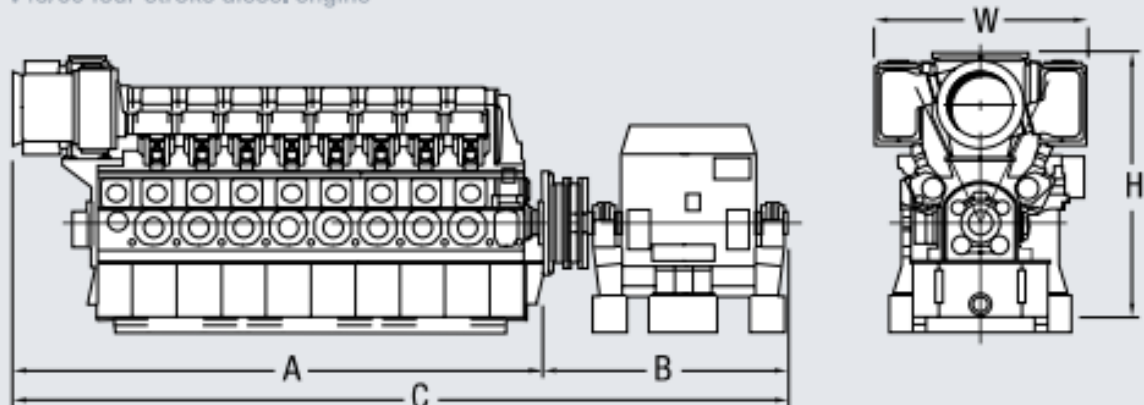
	kJ/kWh
L48/60 (WB 1998)	7,812
V48/60 (WB 1998)	7,605
L48/60 (WB 2007/2008)	7,899
V48/60 (WB 2007/2008)	7,779

Engine type specific reference charge air temperature before cylinder 37 °C

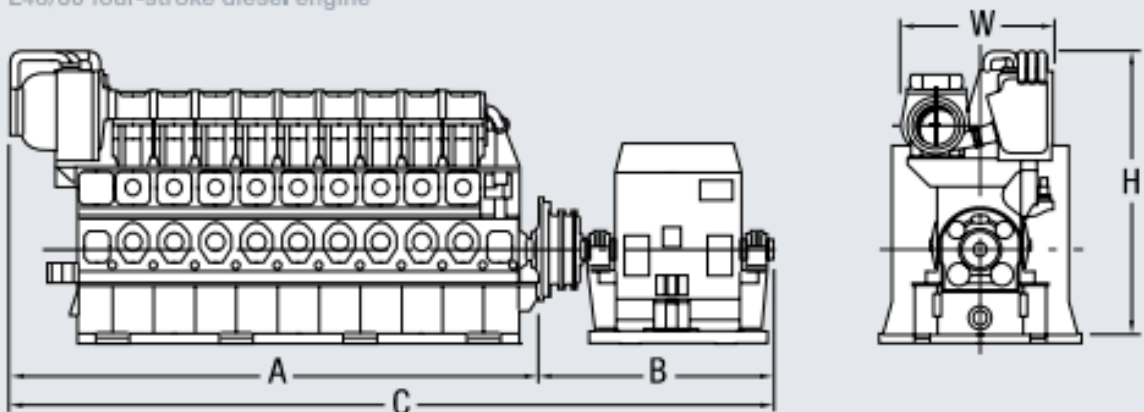
#### Specific lubricating oil consumption

	g/kWh
L+V48/60	0.5

V48/60 four-stroke diesel engine



L48/60 four-stroke diesel engine



**48/60 engine**

Engine type	No. of cyl.	A (mm)	B (mm)	C (mm)	W (mm)	H (mm)	Wt. (t)
9L48/60	9	10,545	4,805	15,350	2,970	5,780	223
12V48/60	12	9,835	4,950	14,785	4,700	6,250	273
14V48/60	14	10,835	5,150	15,985	4,700	6,250	314
18V48/60	18	13,148	5,410	18,558	4,700	6,530	375

All weights and dimensions apply only to dry engines without a flywheel. More information available upon request.

# A4400 - VA4Pro

**4CH Signal Analyser & Signal Recorder  
in One Unit**



**Many special modes inside:**

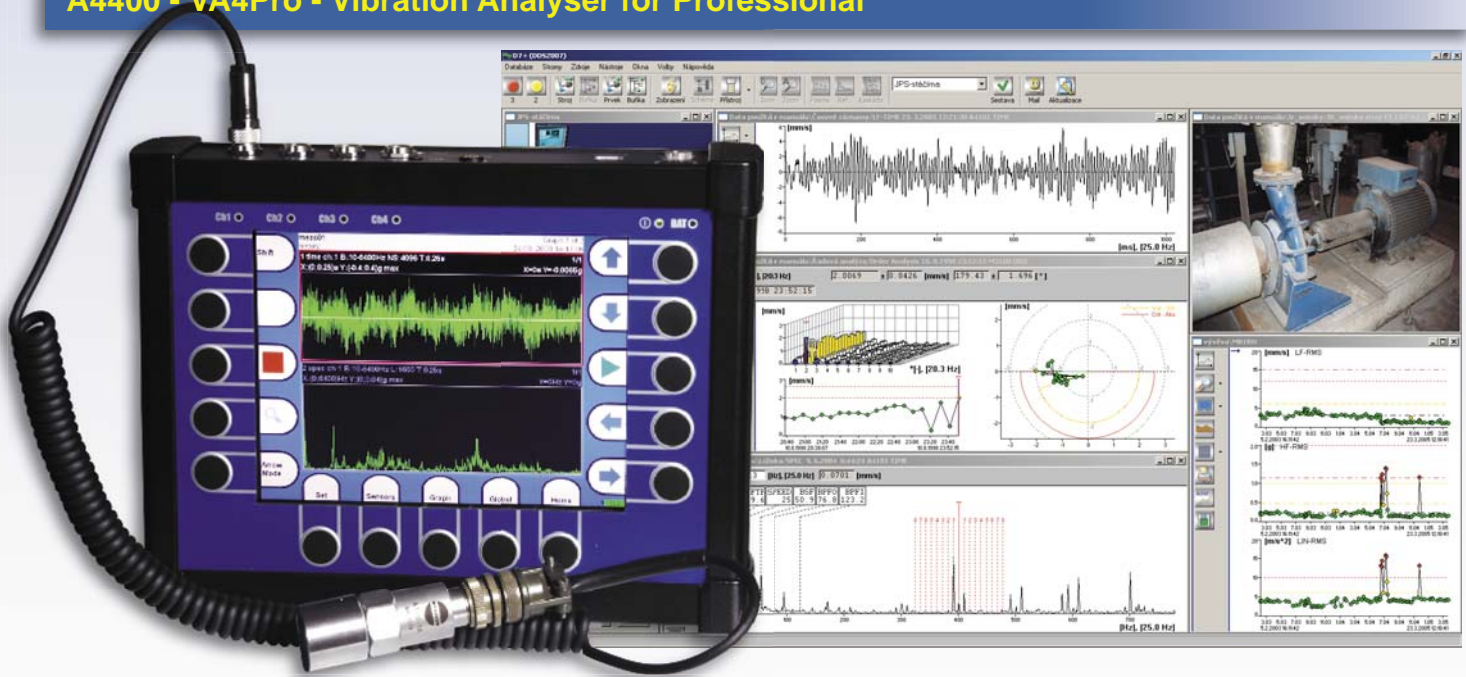
- Analyser,
- Data Collector (Route measurements),
- Run Up (Coast Down) measurements,
- Balancer,
- Signal Recorder.

**All modes made for: 4 AC simultaneous channels (ICP powered),  
4 DC channels for process values,  
1 Tacho channel.**

**Next functions:**

- 25 600 lines FFT, 24 bit A/D conversion,
- Parallel processors give high speed signal processing,
- 35 hours for 4 channels simultaneous recording with 25 600 Hz frequency range,
- Large colour high resolution display.

## A4400 - VA4Pro - Vibration Analyser for Professional



### A4400 - VA4Pro - Technical specification:

<b>Input channels:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 4 AC, ICP® power supply on/off</li> <li>• 4 DC for process values</li> <li>• 1 TACHO for external trigger</li> </ul>	<b>Data processing:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• FFT real time analysis</li> <li>• ENVELOPE analysis</li> <li>• ACMT - low speed bearing analysis</li> <li>• order analysis</li> <li>• user band pass analysis</li> <li>• RPM measurement</li> <li>• DC measurement</li> <li>• Orbit measurement</li> </ul>
<b>Input range:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• AC +/- 12 V peak-peak</li> <li>• DC +/- 24 V</li> </ul>	<b>Signal Recorder:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 64 kHz sampling frequency</li> <li>• 4 Ch memory consumption 3 GB/hour</li> <li>• 4 Ch total recording - 35 hours</li> </ul>
<b>AD conversion:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 24 bit, 64 bit internal signal processing</li> <li>• No AutoGain function!</li> </ul>	<b>Trigger:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• manual, external, signal level, time</li> <li>• use for signal recording trigger</li> <li>• speed change, time interval</li> </ul>
<b>Dynamic range S/N:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 120 dB</li> </ul>	<b>Display:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• colour 800 x 600 pixels, LCD</li> </ul>
<b>Frequency ranges:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• max. 76 kHz (1 Ch, 196 kHz sampling)</li> <li>• max. 25 kHz (4 Ch, 64 kHz sampling)</li> <li>• min. 25 Hz (4 Ch, 64 Hz sampling)</li> </ul>	<b>Communication:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• USB</li> </ul>
<b>Sampling mode:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• fully simultaneous for 4 channels</li> </ul>	<b>Temperature range:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• -10°C to +50°C</li> </ul>
<b>FFT resolution:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• min. 100 lines</li> <li>• max. 25 600 lines</li> </ul>	<b>Power::</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• battery 5 hours operation, AC 230 V</li> </ul>
<b>Unit modes:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Data-collector - route measurement</li> <li>• Analyser - analytic measurement</li> <li>• Balancer - on-site balancing</li> <li>• Run up / Coast down measurement</li> <li>• Recorder - signal recording</li> </ul>	<b>Case :</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aluminium Heavy Duty</li> </ul>
<b>Processor:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intel Atom 1,6 GHz</li> </ul>	<b>Size &amp; Weight:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 230 x 140 x 60 mm</li> <li>• 2000 g</li> </ul>
<b>Memory, Route:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 120 GB, max. 4 GB for one route, number of routes is limited by free memory only</li> </ul>		

**Adash, Ltd.**  
 Hlubinska 32/1379  
 702 00 Moravska Ostrava  
 Czech republic

Tel.: +420 59 623 2670  
 +420 59 623 2687  
 Fax: +420 59 623 2671

**www.adash.eu**

e-mail: info@adash.eu

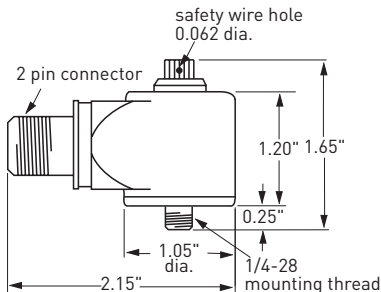


# Wilcoxon Research model 797 Premium, PiezoFET<sup>®</sup>, low profile IsoRing accelerometer



**Features**

- Rugged design
- Corrosion resistant
- Hermetic seal
- Ground isolated
- ESD protection
- Reverse wiring protection
- Mounting in any orientation



**Dynamic**

Sensitivity, ± 5%, 25° C.....	100 mV/g
Acceleration range, VDC >25V .....	80 g peak
Amplitude nonlinearity.....	1%
Frequency response:	
± 5%.....	3 - 5,000 Hz
± 10%.....	2 - 7,000 Hz
± 3 dB .....	1 - 12,000 Hz
Resonance frequency.....	26 kHz
Transverse sensitivity, max.....	5% of axial
Temperature response:	
-50° C.....	-15%
+120° C.....	+15%

**Electrical**

Power requirement:	
Voltage source .....	18 - 30 VDC
Current regulating diode .....	2 - 10 mA
Electrical noise, equiv. g:	
Broadband 2.5 Hz to 25 kHz .....	600 µg
Spectral 10 Hz .....	8 µg/√Hz
100 Hz .....	5 µg/√Hz
1000 Hz .....	5 µg/√Hz
Output impedance, max .....	100 Ω
Bias output voltage .....	12 VDC
Grounding.....	case isolated, internally shielded

**Environmental**

Temperature range .....	-50 to 120° C
Vibration limit.....	500 g peak
Shock limit .....	5,000 g peak
Sealing.....	hermetic
Base strain sensitivity.....	0.002 g/µstrain

**Physical**

Sensing element design.....	PZT / shear
Weight.....	138 g
Case material.....	316L stainless steel
Mounting .....	1/4-28 captive socket head screw
Output connector .....	2 pin, MIL-C-5015 style
Mating connector .....	R6 type
Recommended cable.....	J10 / J9T2A

**Connections**

Function	Connector pin
ground	shell
power/ signal	A
common	B

Accessories supplied: #12105-01 captive socket head (metric stud available upon request);  
calibration data (level 3)  
Options: Intrinsic safety certifications (consult factory)

Meggitt Sensing Systems  
20511 Seneca Meadows Parkway  
Germantown MD 20876  
USA

Tel: 301 330 8811  
Fax: 301 330 8873  
Email: wilcoxon@meggitt.com

www.wilcoxon.com  
www.meggitt.com

**MEGGITT**  
smart engineering for  
extreme environments  
98244 Rev.D.2 2/12

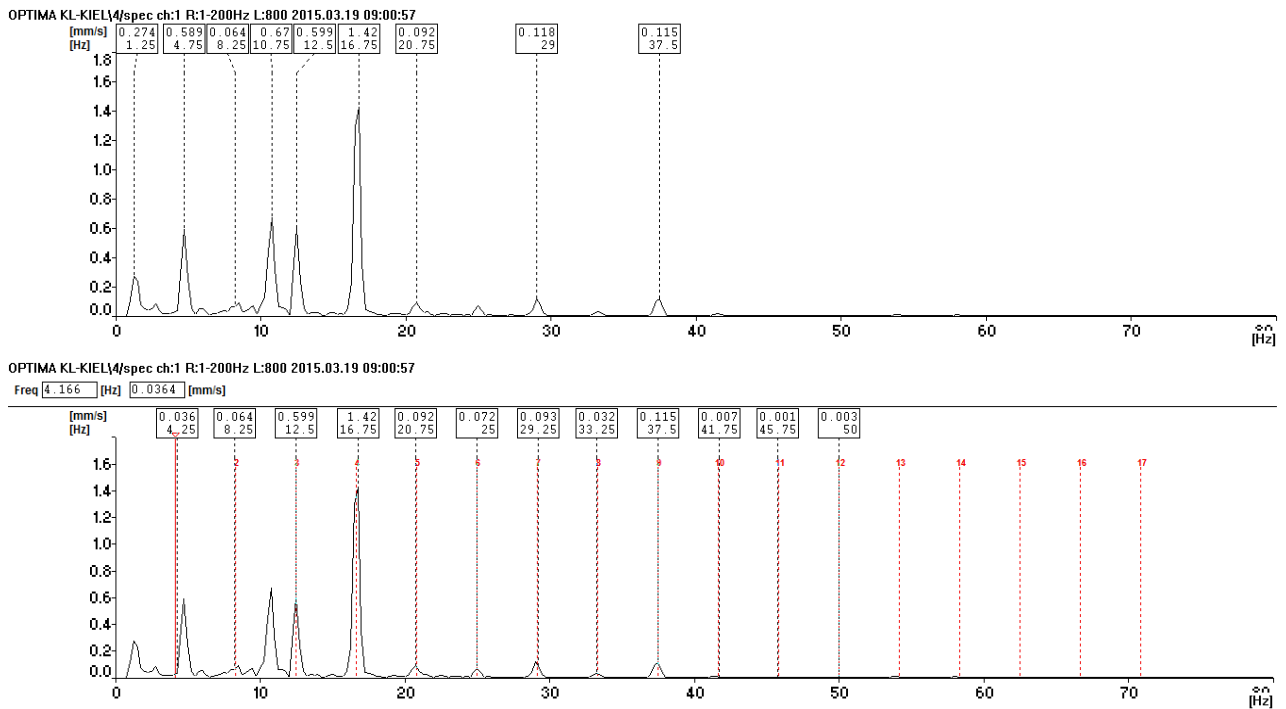


## 6 PRIEDAS

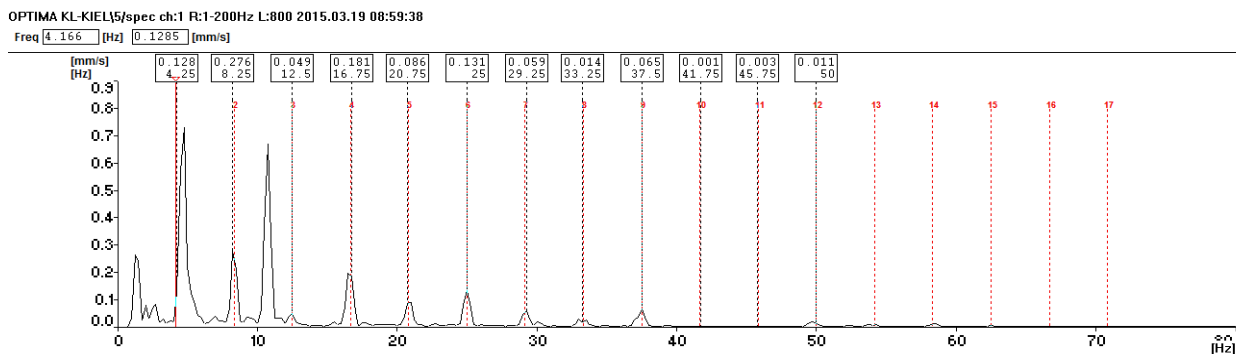
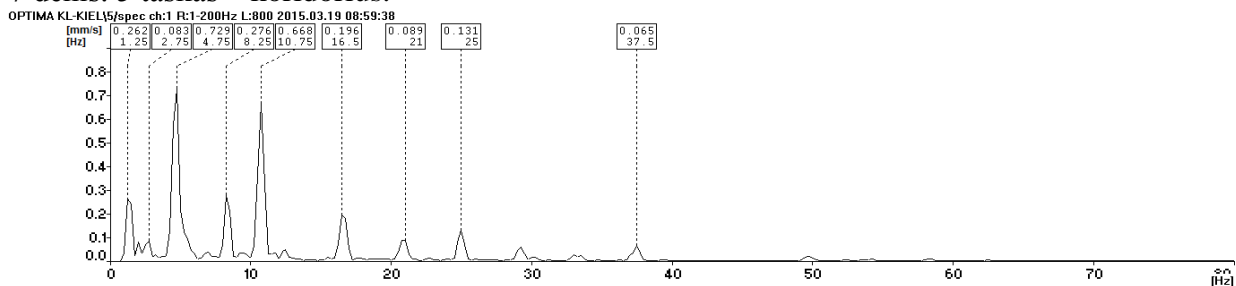
\* Kiekvieno taško virpesių lygio rezultatai pateikiami absoliučiąjų virpesių greičių kvadratinio vidurkio  $v_{RMS}$  reikšmių [mm/s] virpesių dažnių intervale nuo 0 iki 80 Hz spektruose, lygiai taip, kaip nurodyta laivų klasifikacinės bendrovės „Germanischer Lloyd“ leidinyje pateiktose rekomendacijose. Pirmame grafike nurodytos išmatuoto taško virpesių greičio didžiausios („pikinės“), o antrame – pagrindiniuose eigos varikliuose vykstančių pereinamųjų procesų žadinamo priverstinių virpesio dažnio (8,33 Hz) kartotiniai dažniai – 0,5X; 1,0X; 1,5X ir t.t. harmonikos.

**2015 metų kovo 19 dieną atliktų Keltos „Optima Seaways“ virpesių lygio tyrimų gauti rezultatai reiso Klaipėda – Kyliu metu.**

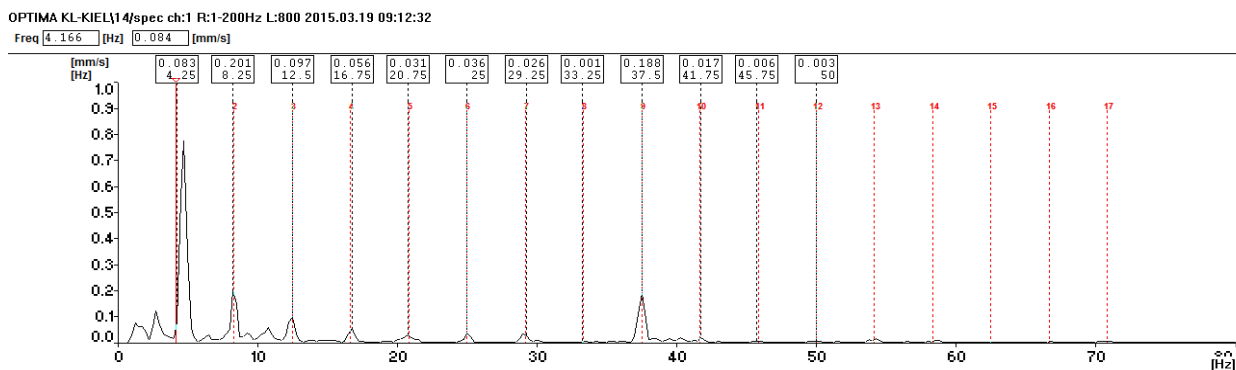
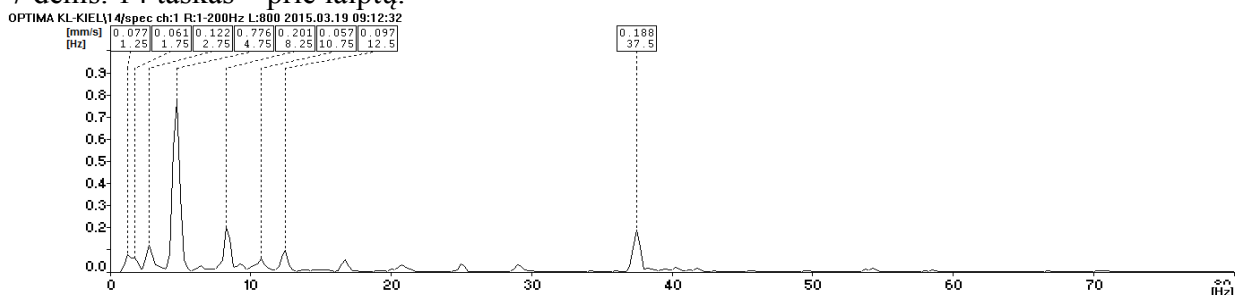
7 denis. 4 taškas – kapitono vairinė (tiltelis).



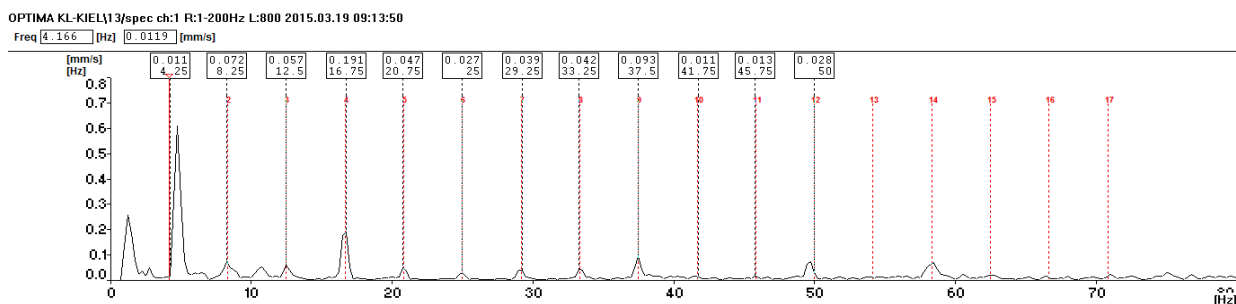
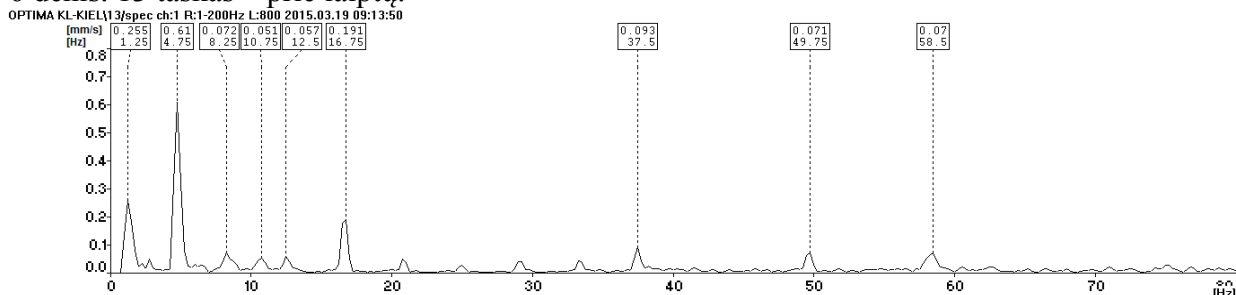
### 7 denis. 5 taškas – koridorius.



### 7 denis. 14 taškas – prie laiptų.

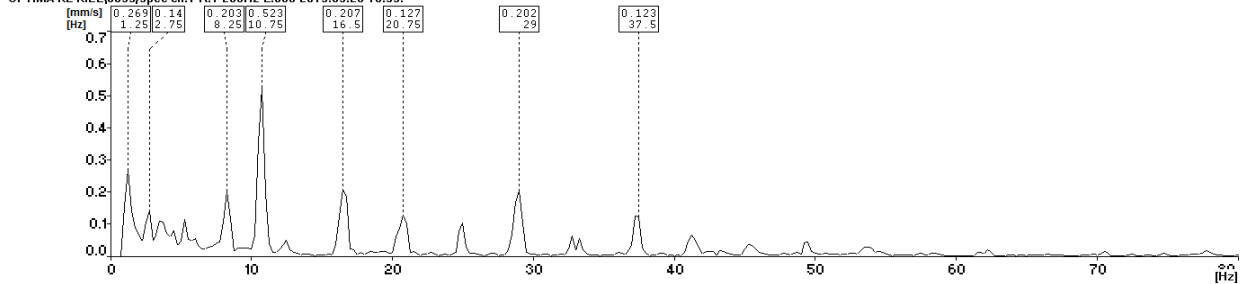


### 6 denis. 13 taškas – prie laiptų.

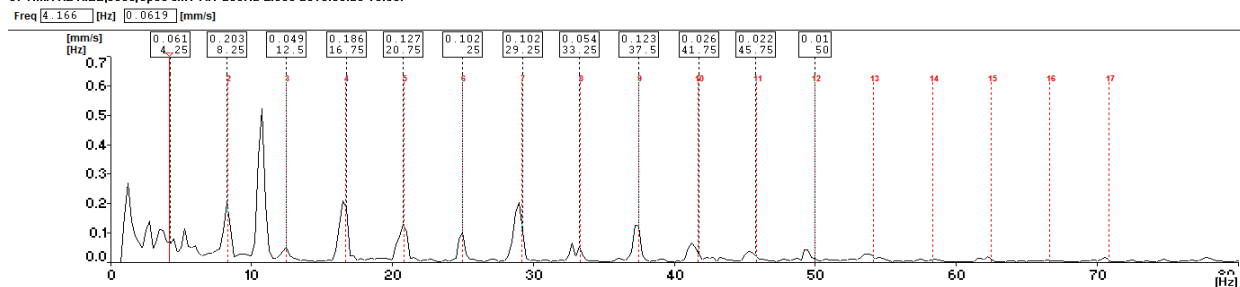


### 6 denis. 6035 taškas – kajutē Nr. 6035.

OPTIMA KL-KIEL\6035\spec ch:1 R:1-200Hz L:800 2015.03.20 10:53:

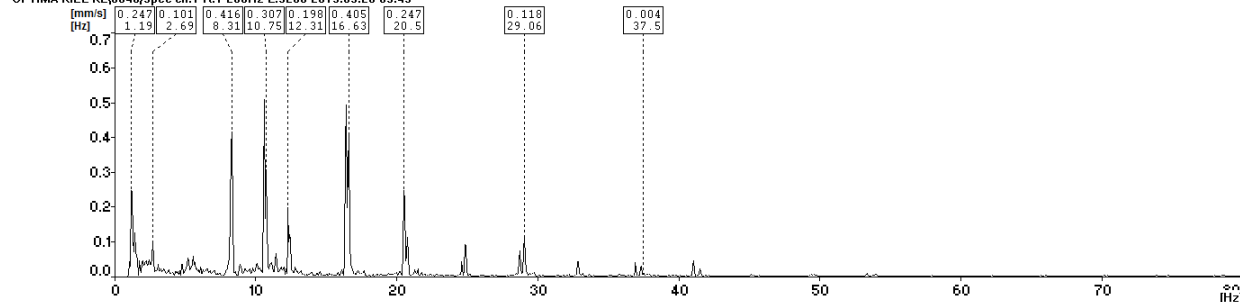


OPTIMA KL-KIEL\6035\spec ch:1 R:1-200Hz L:800 2015.03.20 10:53:

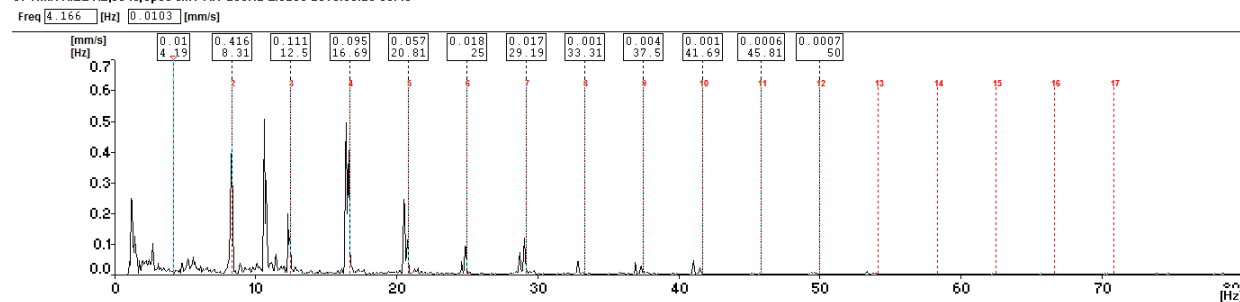


### 6 denis. 6046 taškas – kajutē Nr. 6046.

OPTIMA KL-KIEL\6046\spec ch:1 R:1-200Hz L:3200 2015.03.20 09:45

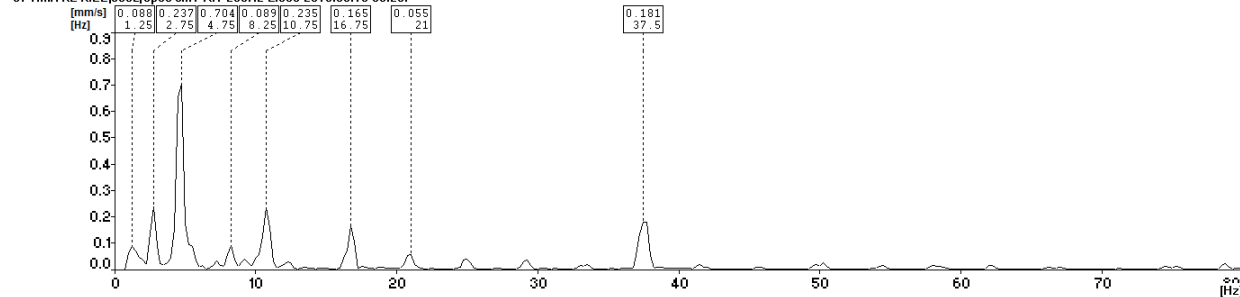


OPTIMA KL-KIEL\6046\spec ch:1 R:1-200Hz L:3200 2015.03.20 09:45

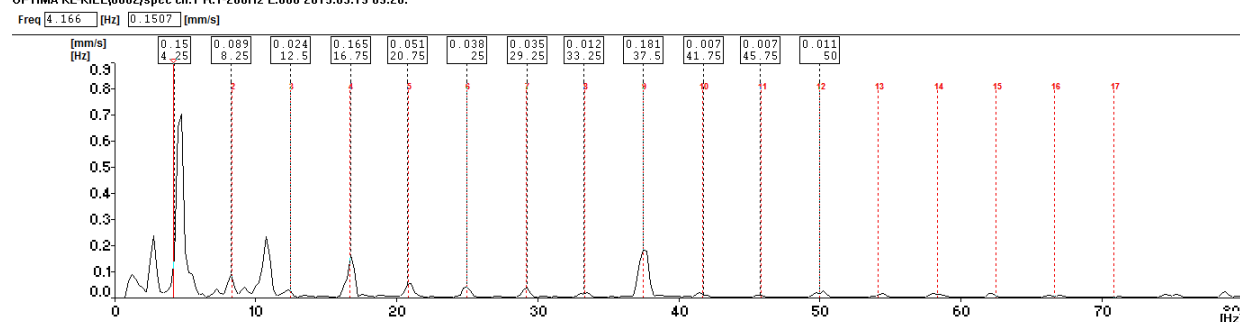


### 6 denis. 6062 taškas – kajutē Nr. 6062.

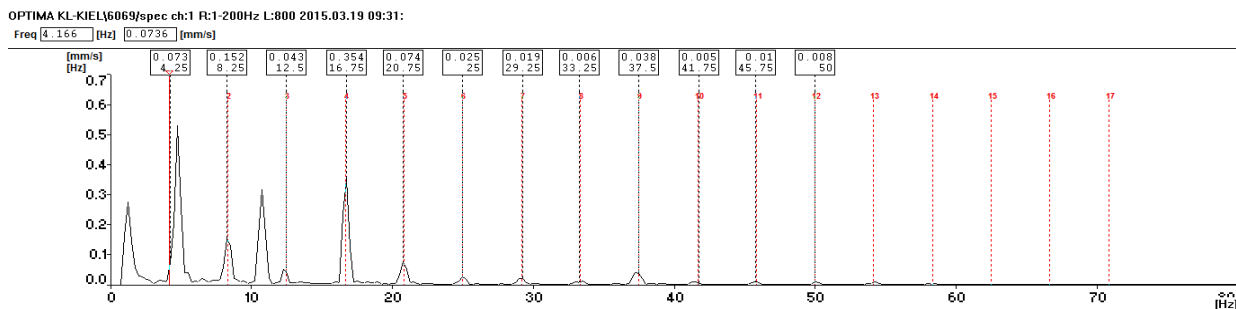
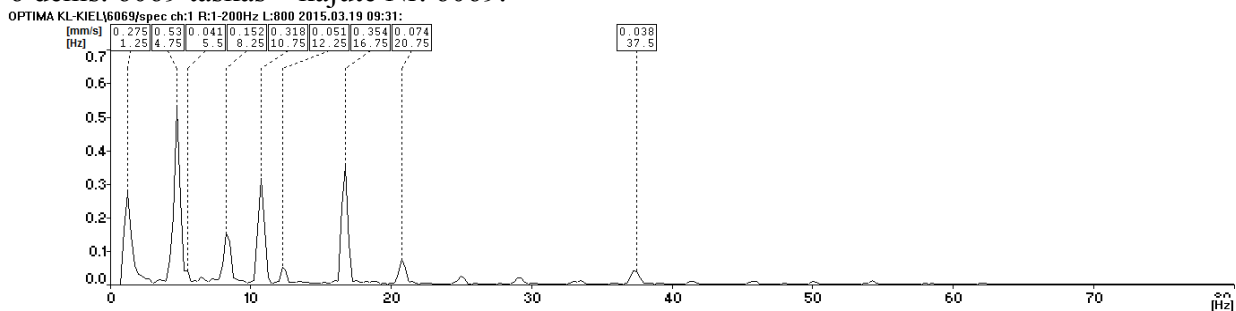
OPTIMA KL-KIEL\6062\spec ch:1 R:1-200Hz L:800 2015.03.19 09:28:



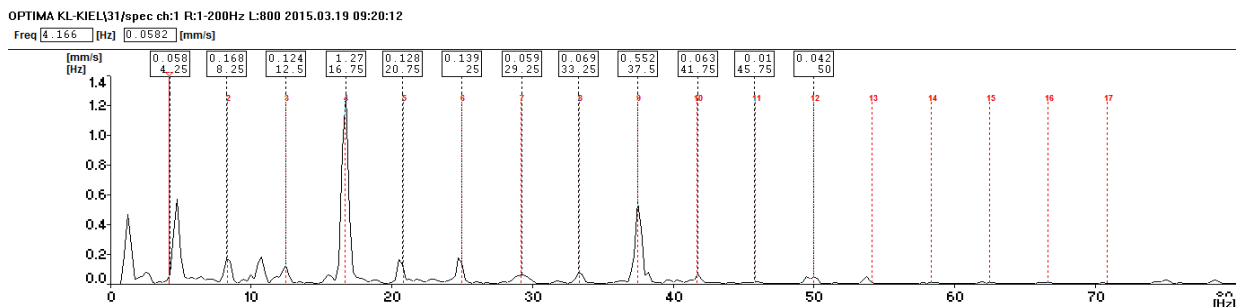
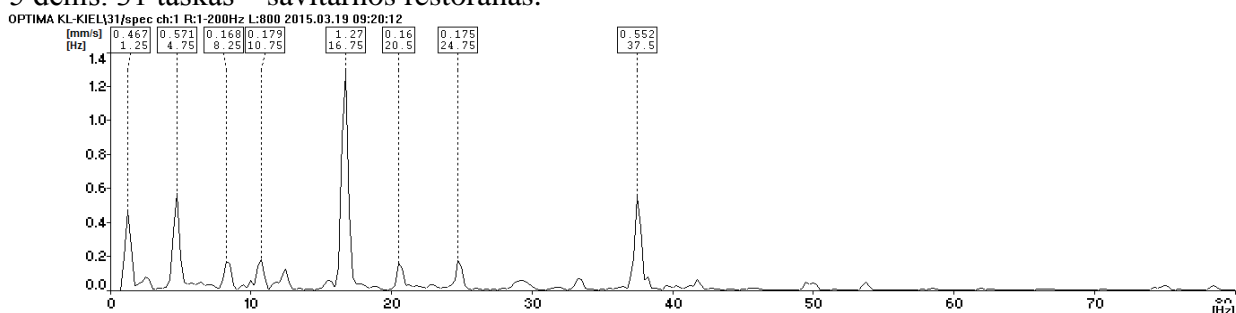
OPTIMA KL-KIEL\6062\spec ch:1 R:1-200Hz L:800 2015.03.19 09:28:



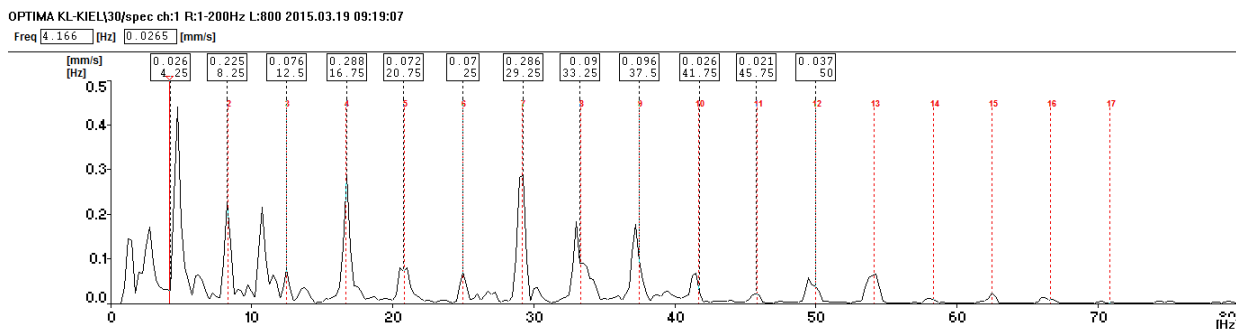
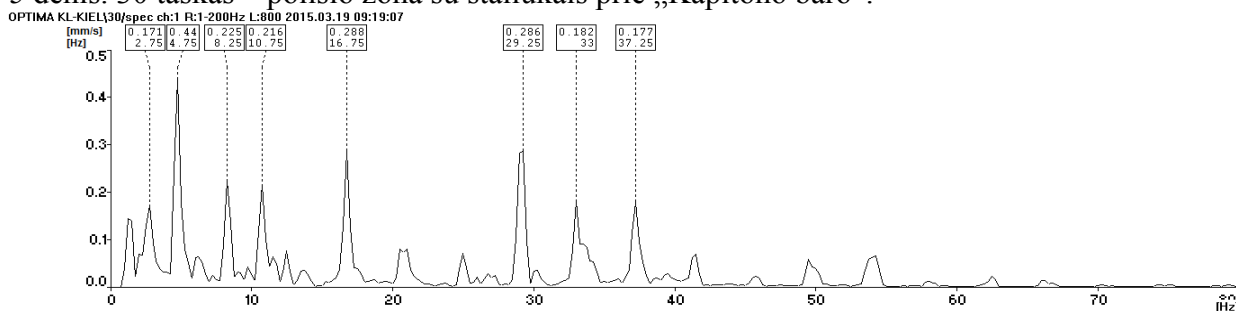
### 6 denis. 6069 taškas – kajutė Nr. 6069.



### 5 denis. 31 taškas – savitarnos restoranas.

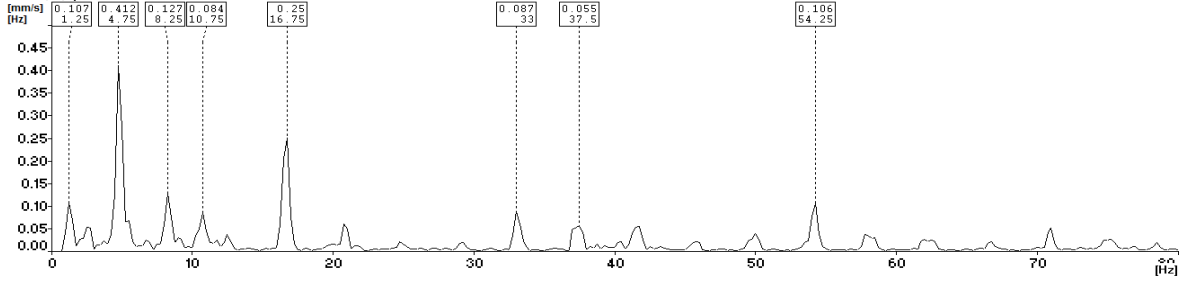


### 5 denis. 30 taškas – poilsio zona su staliukais prie „Kapitono baro“.



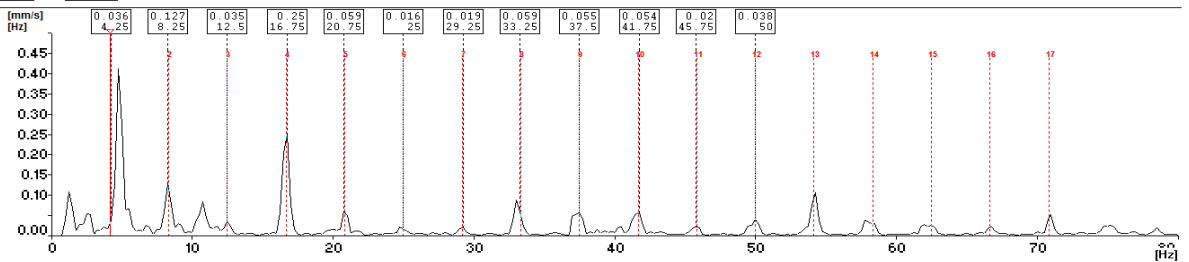
### 5 denis. 32 taškas – prie kelto parduotuvės.

OPTIMA KL-KIEL32/spec ch:1 R:1-200Hz L:800 2015.03.19 09:17:48



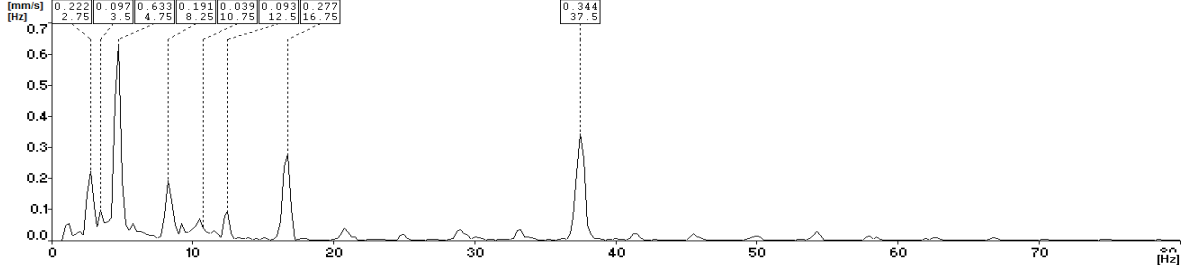
OPTIMA KL-KIEL32/spec ch:1 R:1-200Hz L:800 2015.03.19 09:17:48

Freq [4.166] [Hz] 0.0363 [mm/s]



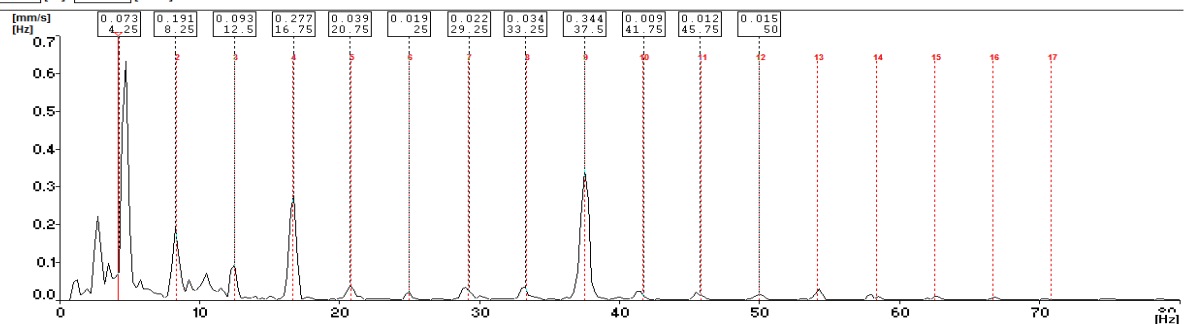
### 5 denis. 34 taškas – medicinos punktas.

OPTIMA KL-KIEL34/spec ch:1 R:1-200Hz L:800 2015.03.19 09:33:31



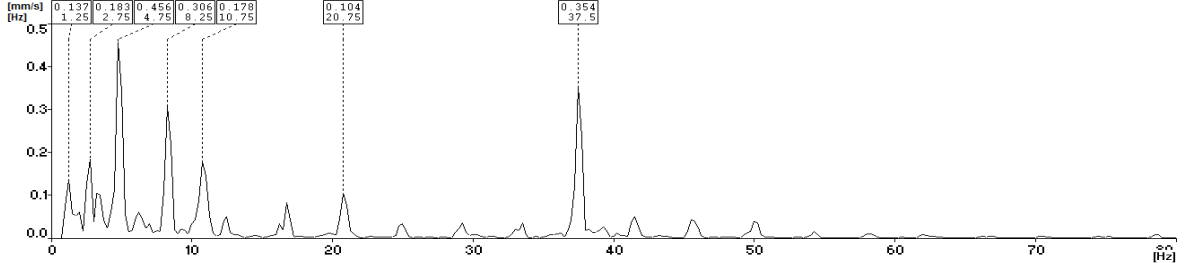
OPTIMA KL-KIEL34/spec ch:1 R:1-200Hz L:800 2015.03.19 09:33:31

Freq [4.166] [Hz] 0.073 [mm/s]



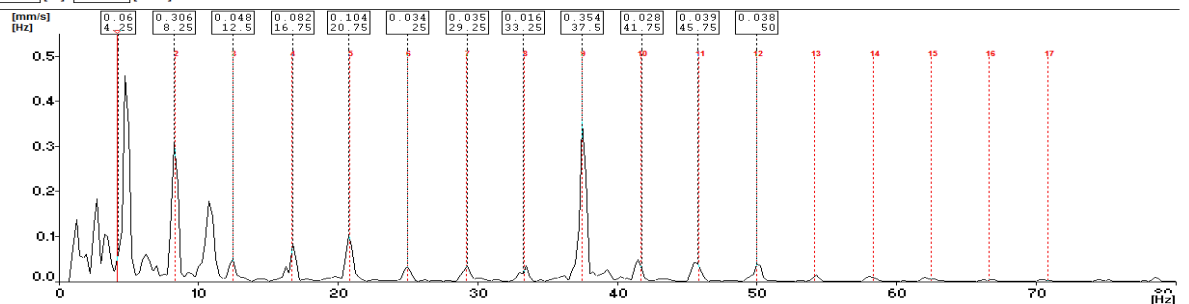
### 5 denis. 35 taškas – pacientų palata.

OPTIMA KL-KIEL35/spec ch:1 R:1-200Hz L:800 2015.03.19 09:34:29



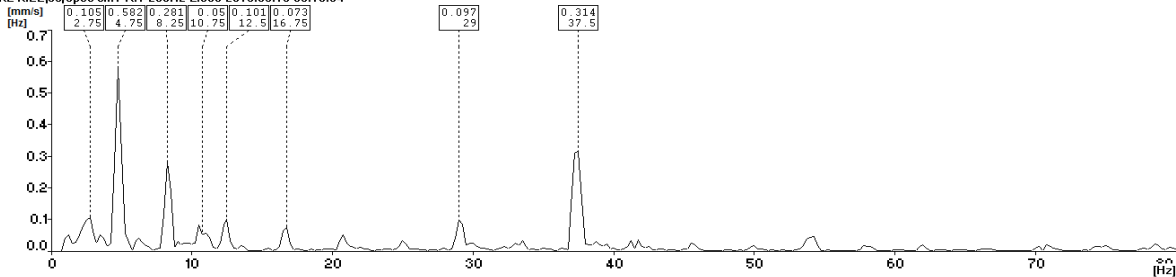
OPTIMA KL-KIEL35/spec ch:1 R:1-200Hz L:800 2015.03.19 09:34:29

Freq [4.166] [Hz] 0.0607 [mm/s]

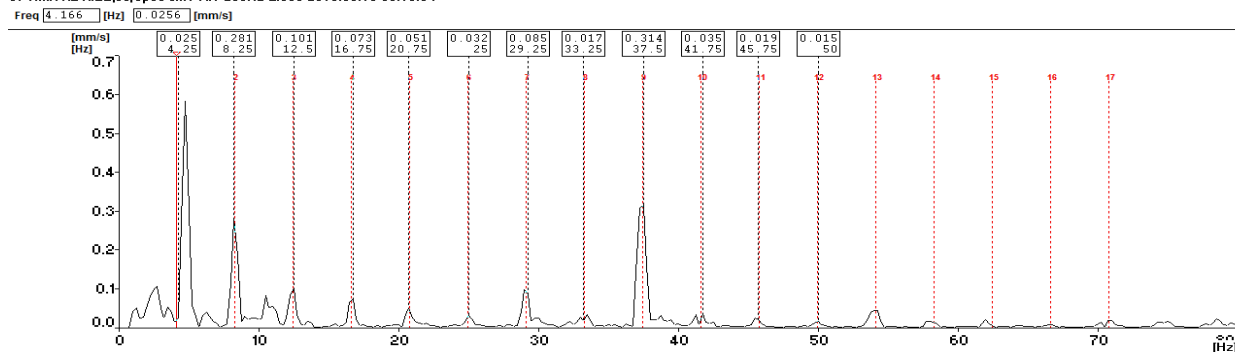


### 5 denis. 33 taškas – prie laiptų.

OPTIMA KL-KIEL33/spec ch:1 R:1-200Hz L:800 2015.03.19 09:16:34

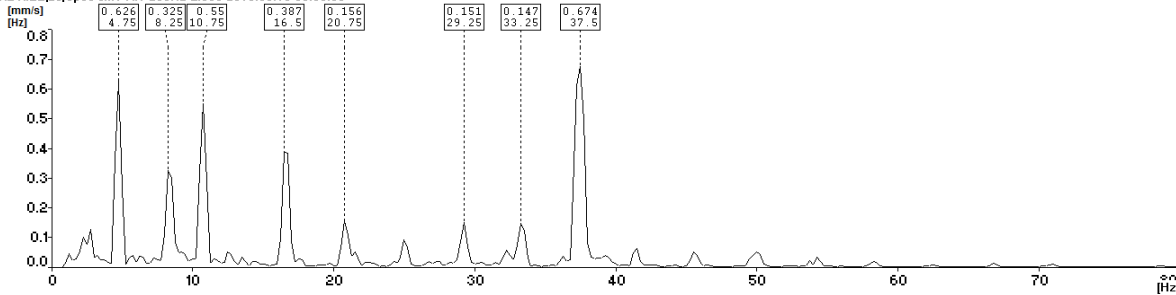


OPTIMA KL-KIEL33/spec ch:1 R:1-200Hz L:800 2015.03.19 09:16:34

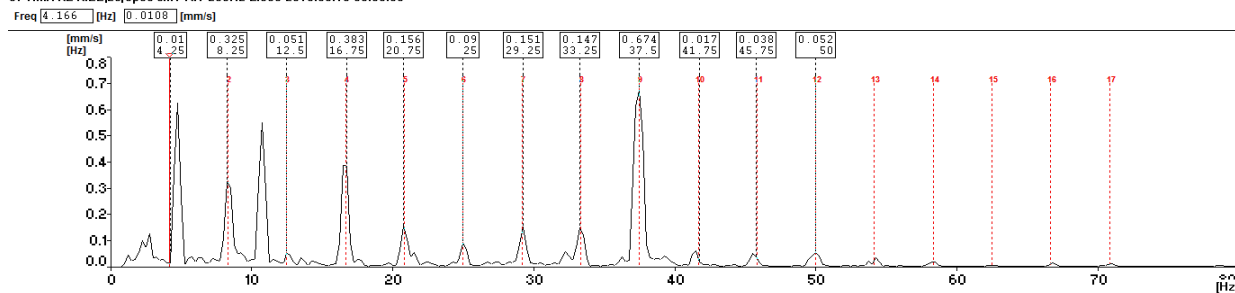


### 5 denis. 29 taškas – įgulos virtuvė.

OPTIMA KL-KIEL29/spec ch:1 R:1-200Hz L:800 2015.03.19 09:36:06

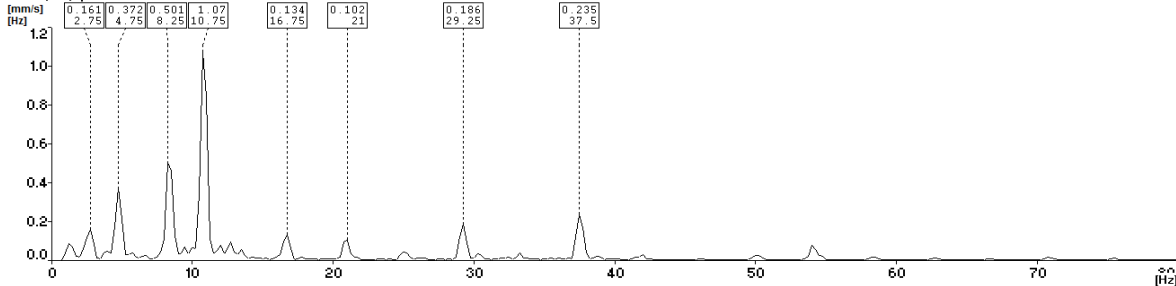


OPTIMA KL-KIEL29/spec ch:1 R:1-200Hz L:800 2015.03.19 09:36:06

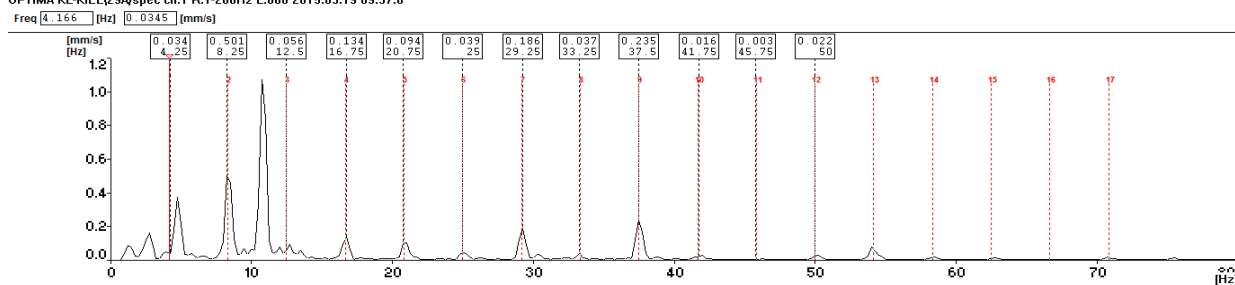


### 5 denis. 29A taškas – įgulos valgomasis.

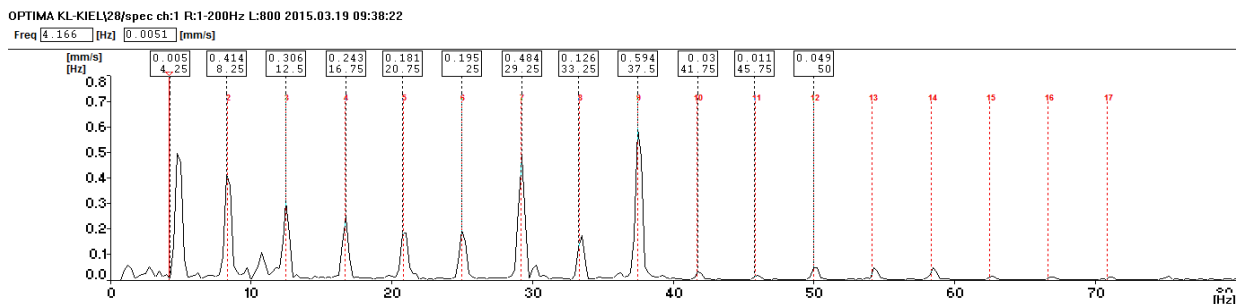
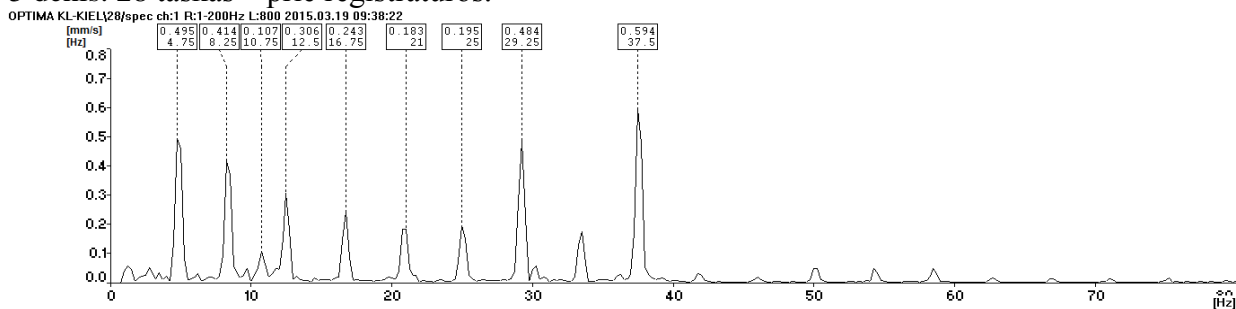
OPTIMA KL-KIEL29A/spec ch:1 R:1-200Hz L:800 2015.03.19 09:37:0



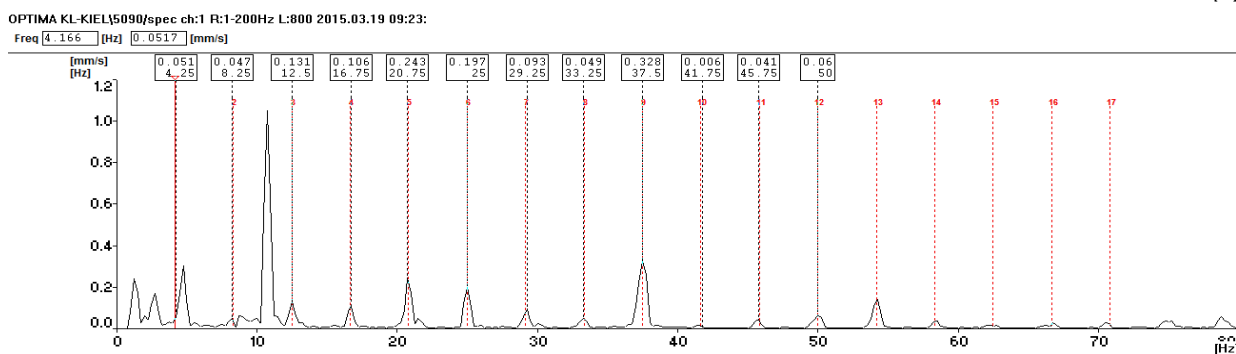
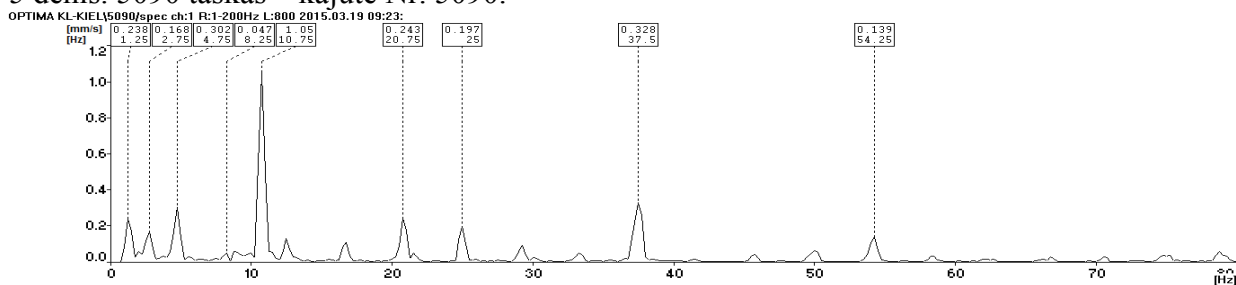
OPTIMA KL-KIEL29A/spec ch:1 R:1-200Hz L:800 2015.03.19 09:37:0



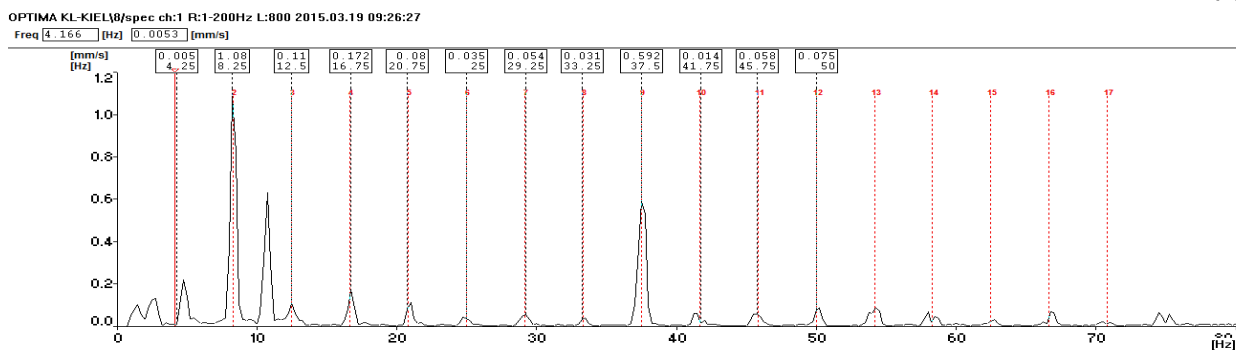
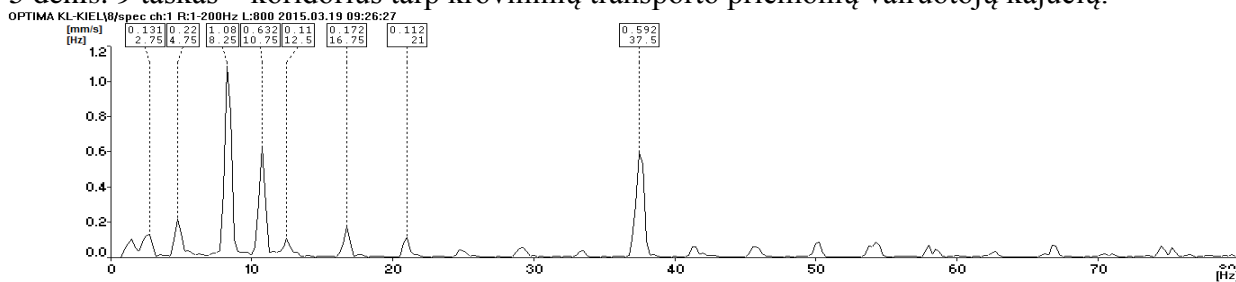
### 5 denis. 28 taškas – prie registratūros.



### 5 denis. 5090 taškas – kajutė Nr. 5090.

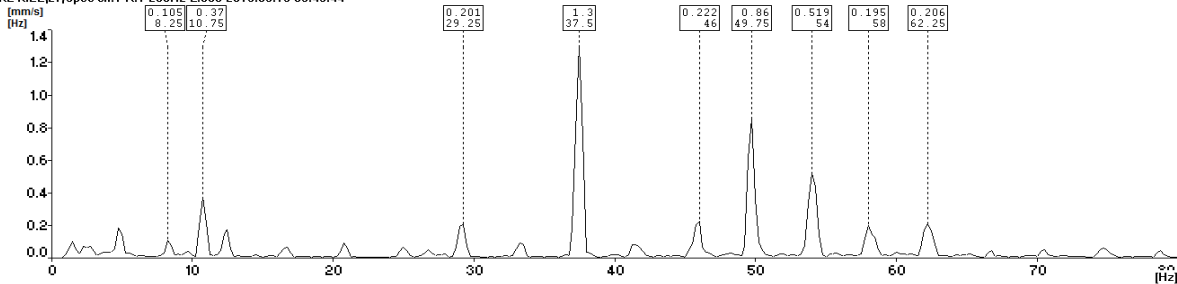


### 5 denis. 9 taškas – koridorius tarp krovininių transporto priemonių vairuotojų kajučių.



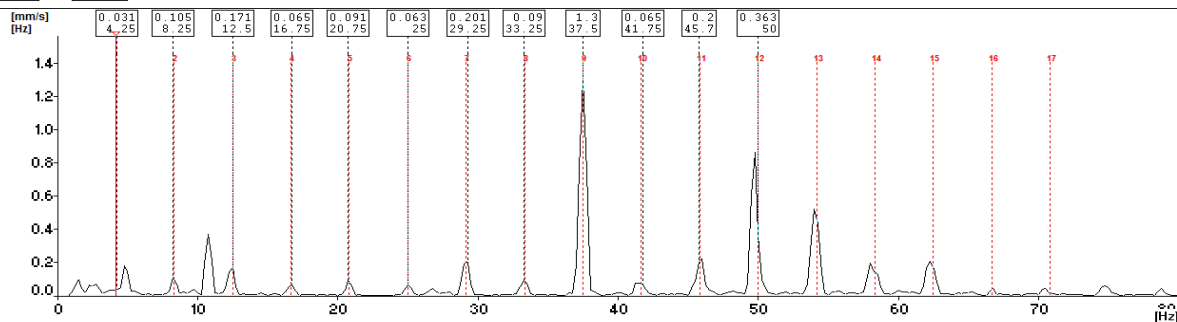
### 5 denis. 27 taškas – koridorius link laiptų (arčiau laivapriekio).

OPTIMA KL-KIEL\27/spec ch:1 R:1-200Hz L:800 2015.03.19 09:43:44



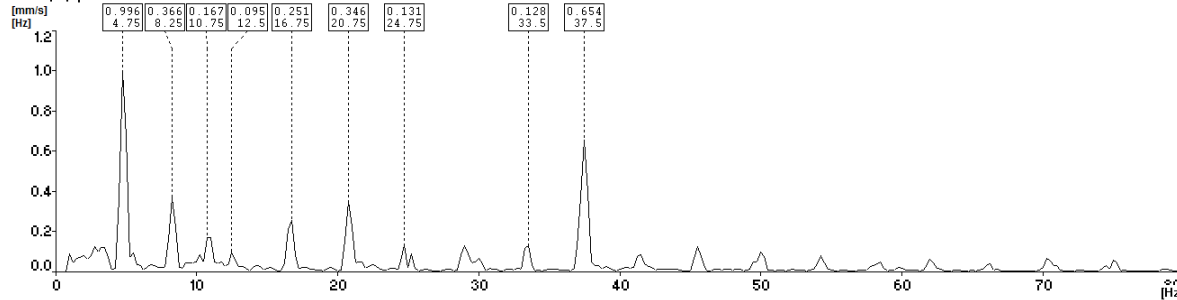
OPTIMA KL-KIEL\27/spec ch:1 R:1-200Hz L:800 2015.03.19 09:43:44

Freq 4.166 [Hz] 0.0315 [mm/s]



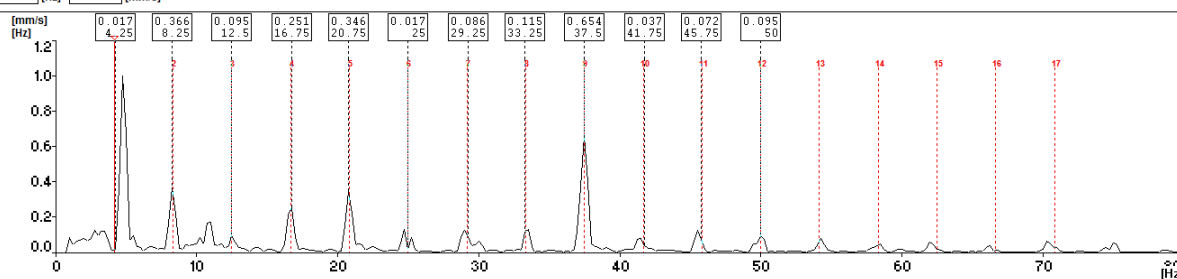
### 5 denis. 26 taškas – koridorius link laiptų (arčiau laivagalio).

OPTIMA KL-KIEL\26/spec ch:1 R:1-200Hz L:800 2015.03.19 09:45:19



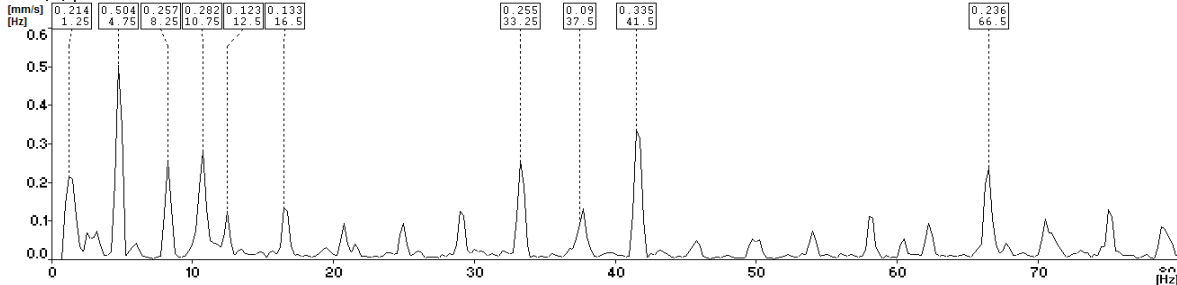
OPTIMA KL-KIEL\26/spec ch:1 R:1-200Hz L:800 2015.03.19 09:45:19

Freq 4.166 [Hz] 0.0179 [mm/s]



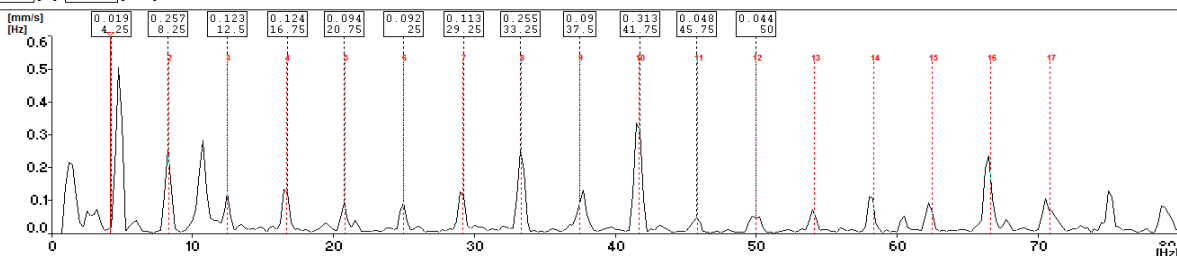
### 5 denis. 25 taškas – prie laiptų, vedančių į 3 denį.

OPTIMA KL-KIEL\25/spec ch:1 R:1-200Hz L:800 2015.03.19 09:46:26



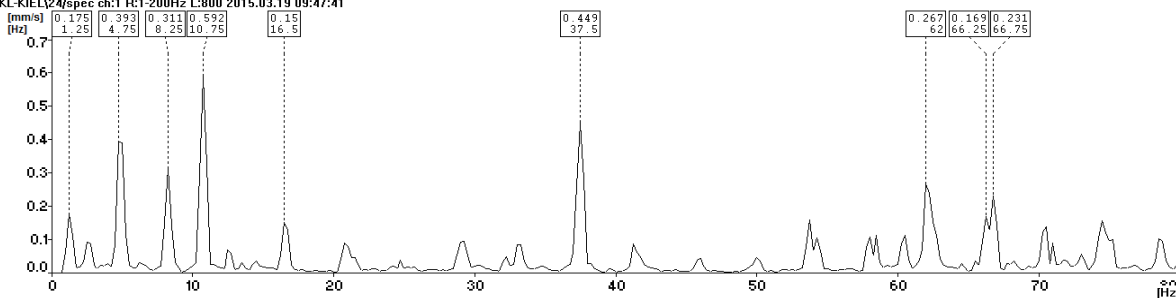
OPTIMA KL-KIEL\25/spec ch:1 R:1-200Hz L:800 2015.03.19 09:46:26

Freq 4.166 [Hz] 0.0193 [mm/s]



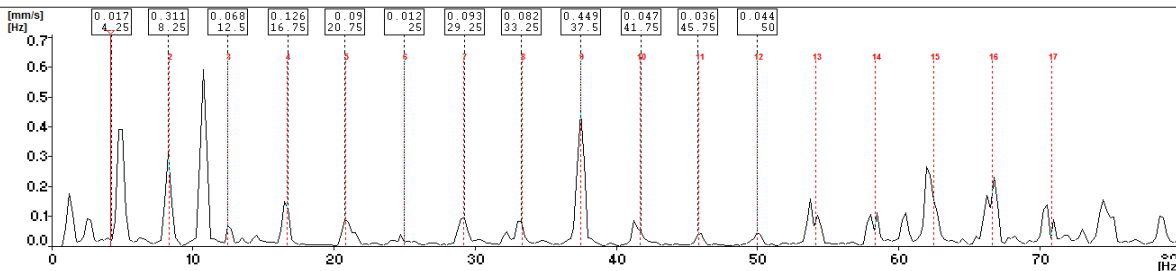
### 4 denis. 24 taškas – laiptų aikštelė prie lifto.

OPTIMA KL-KIEL24/spec ch:1 R:1-200Hz L:800 2015.03.19 09:47:41



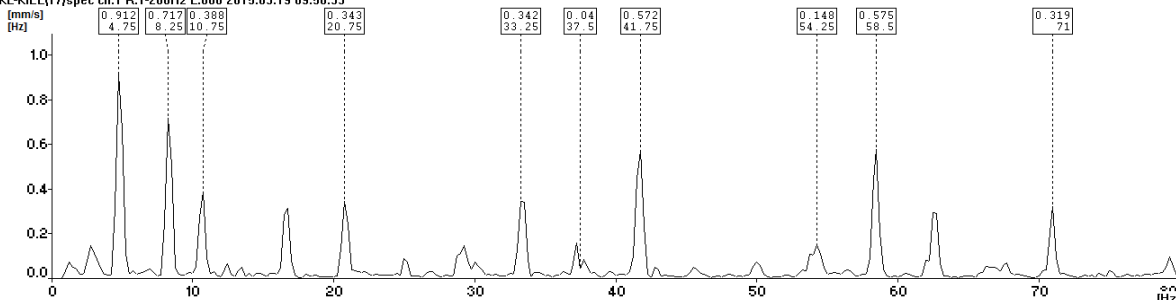
OPTIMA KL-KIEL24/spec ch:1 R:1-200Hz L:800 2015.03.19 09:47:41

Freq 4.166 [Hz] 0.0173 [mm/s]



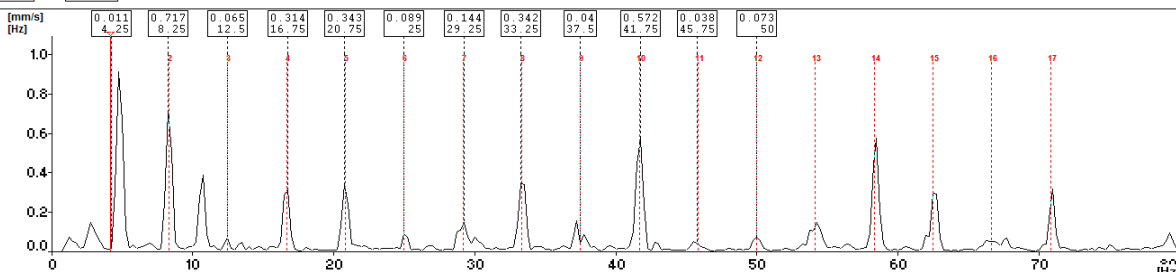
### 3 denis. 17 taškas – dirbtuvės.

OPTIMA KL-KIEL17/spec ch:1 R:1-200Hz L:800 2015.03.19 09:50:33



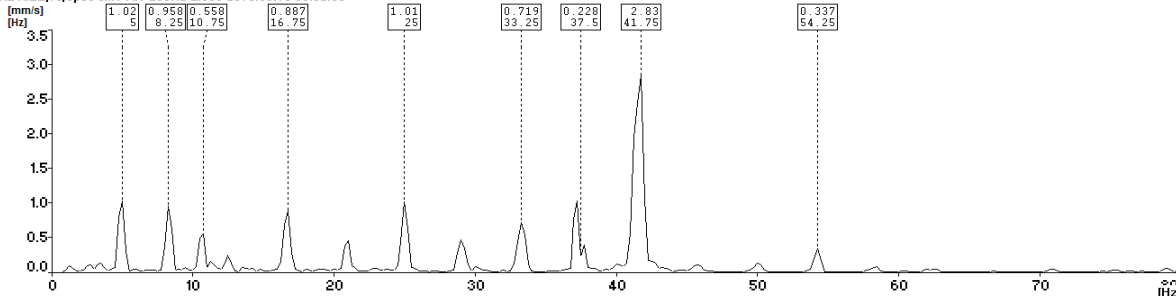
OPTIMA KL-KIEL17/spec ch:1 R:1-200Hz L:800 2015.03.19 09:50:33

Freq 4.166 [Hz] 0.0117 [mm/s]



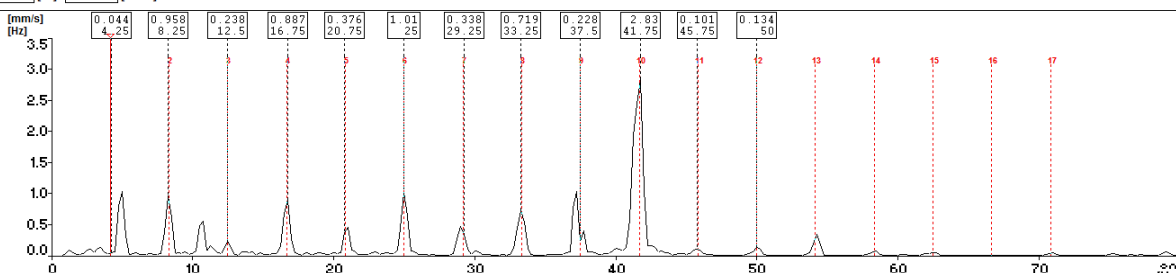
### 3 denis. 18 taškas – pagrindinių eigos variklių dispečerinė.

OPTIMA KL-KIEL18/spec ch:1 R:1-200Hz L:800 2015.03.19 09:52:35



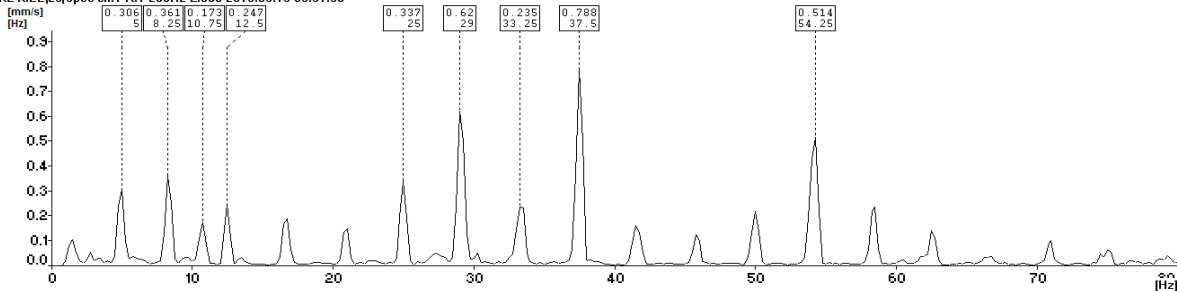
OPTIMA KL-KIEL18/spec ch:1 R:1-200Hz L:800 2015.03.19 09:52:35

Freq 4.166 [Hz] 0.0448 [mm/s]



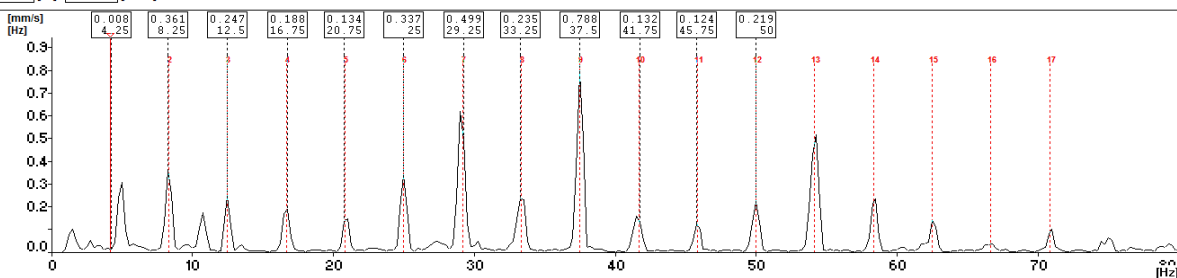
### 3 denis. 23 taškas – koridorius.

OPTIMA KL-KIEL23/spec ch:1 R:1-200Hz L:800 2015.03.19 09:51:36



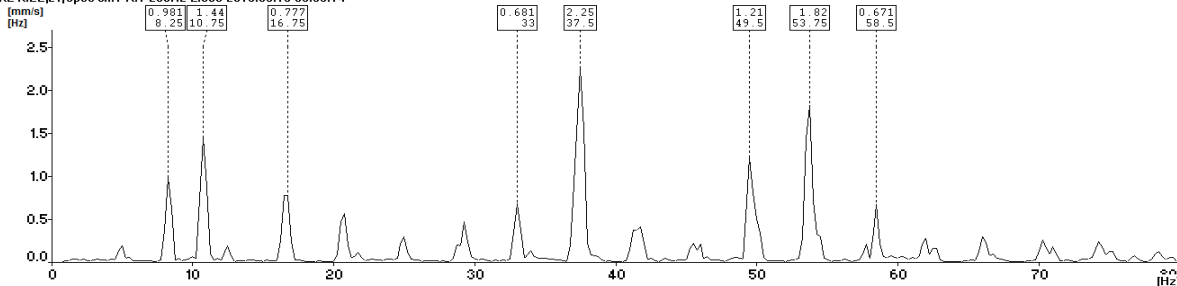
OPTIMA KL-KIEL23/spec ch:1 R:1-200Hz L:800 2015.03.19 09:51:36

Freq [4.166] [Hz] [0.0084] [mm/s]



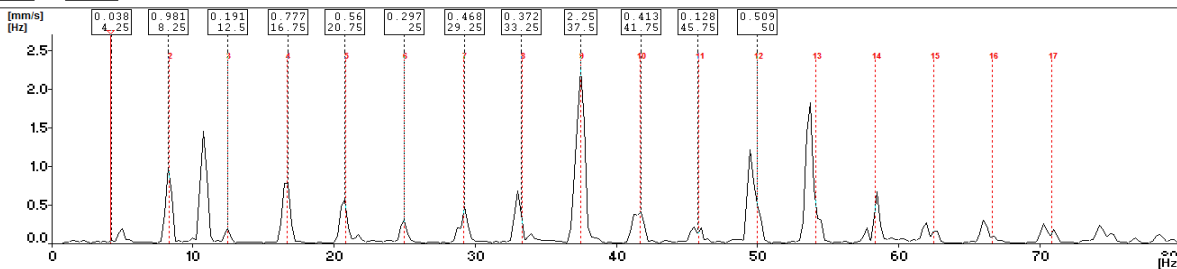
### 2 denis. 21 taškas – mašinų skyrius (arčiau laivapriekio).

OPTIMA KL-KIEL21/spec ch:1 R:1-200Hz L:800 2015.03.19 09:55:14



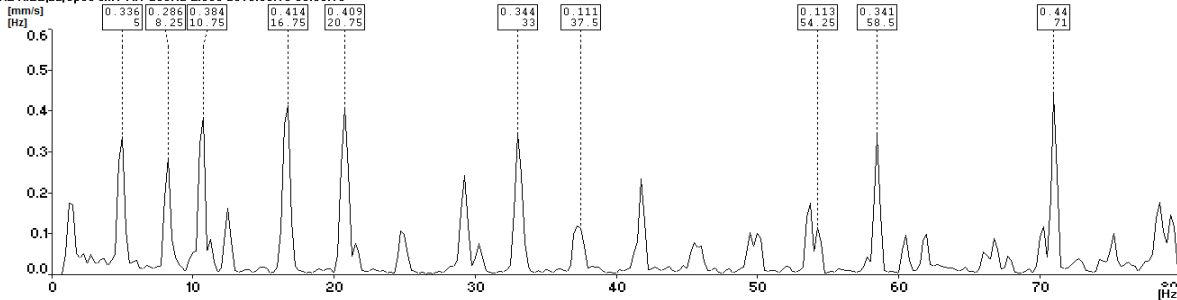
OPTIMA KL-KIEL21/spec ch:1 R:1-200Hz L:800 2015.03.19 09:55:14

Freq [4.166] [Hz] [0.0383] [mm/s]



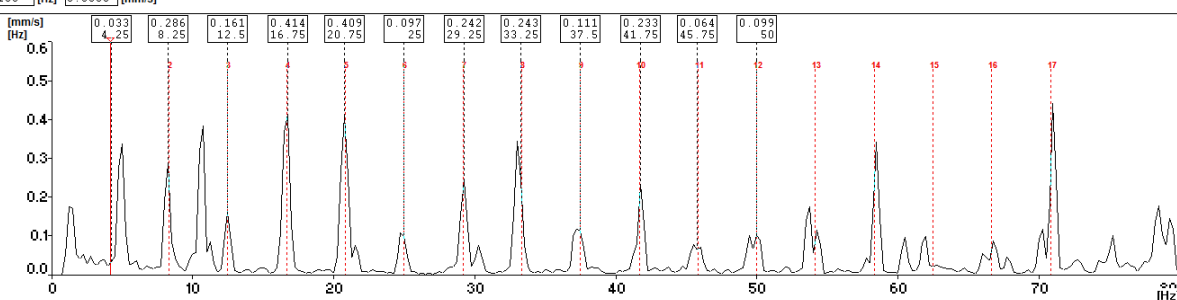
### 2 denis. 22 taškas – mašinų skyrius (arčiau laivagalio).

OPTIMA KL-KIEL22/spec ch:1 R:1-200Hz L:800 2015.03.19 09:56:18



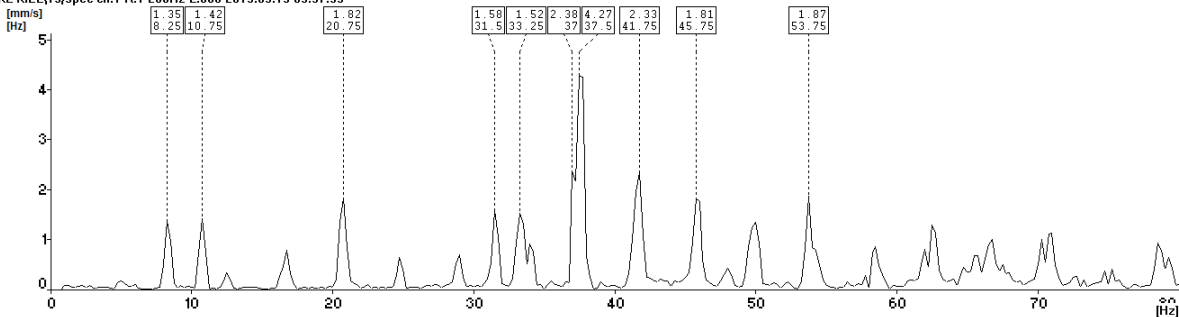
OPTIMA KL-KIEL22/spec ch:1 R:1-200Hz L:800 2015.03.19 09:56:18

Freq [4.166] [Hz] [0.0338] [mm/s]

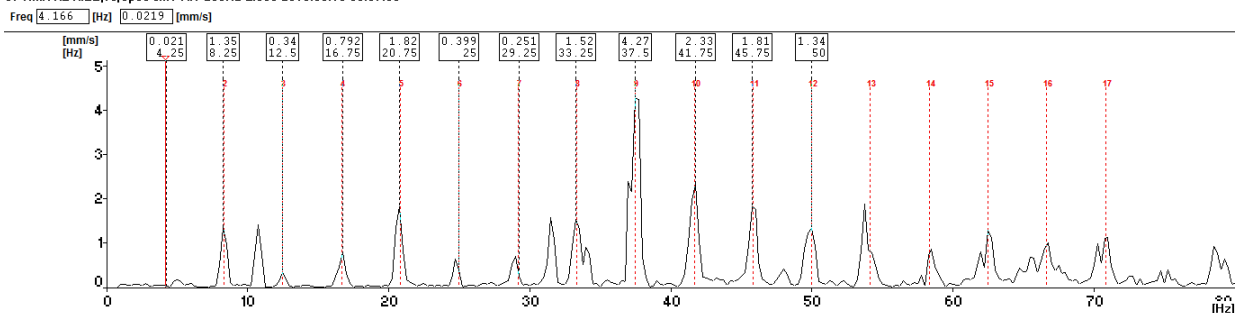


# 1 denis. 19 taškas – mašinų skyrius (arčiau laivaprieikio).

OPTIMA KL-KIEL\19/spec.ch:1 R:1-200Hz L:800 2015.03.19 09:57:39

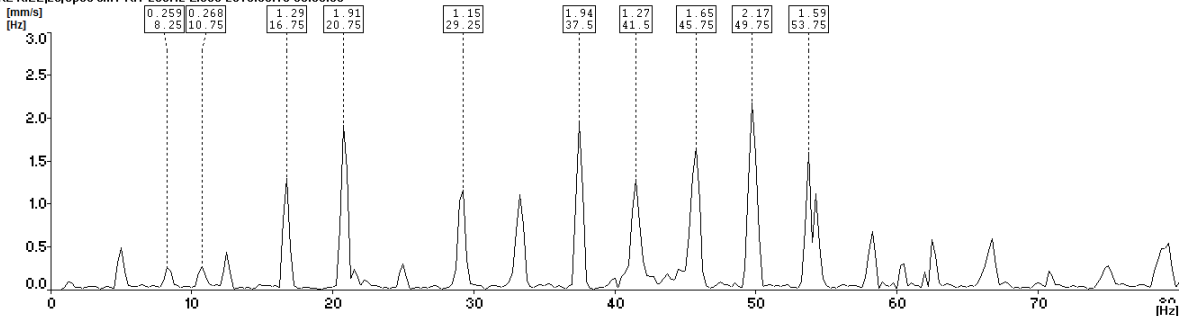


OPTIMA KL-KIEL\19/spec.ch:1 R:1-200Hz L:800 2015.03.19 09:57:39

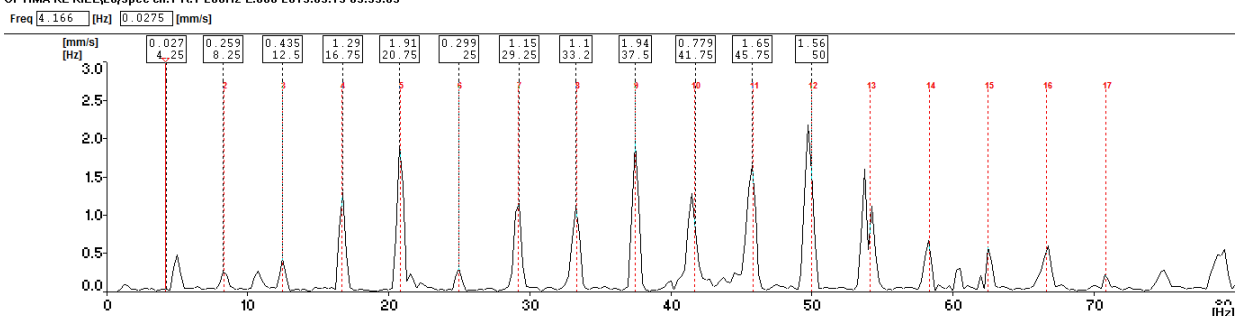


# 1 denis. 20 taškas – mašinų skyrius (arčiau laivagalio).

OPTIMA KL-KIEL\20/spec.ch:1 R:1-200Hz L:800 2015.03.19 09:59:03

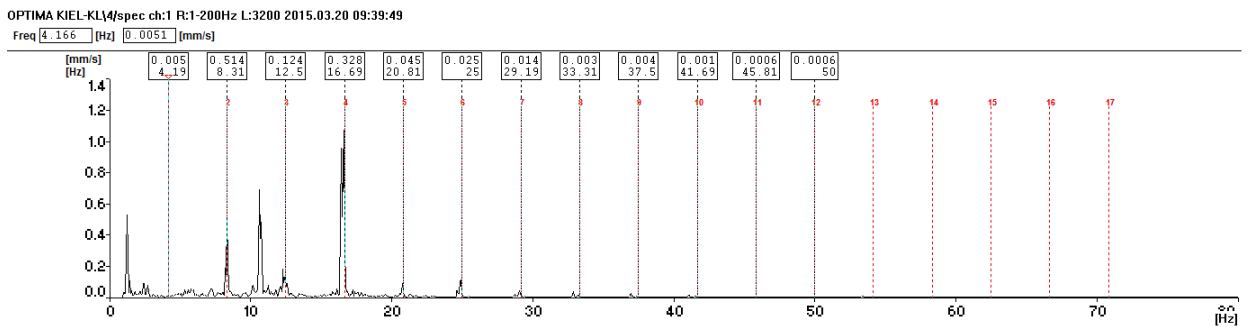
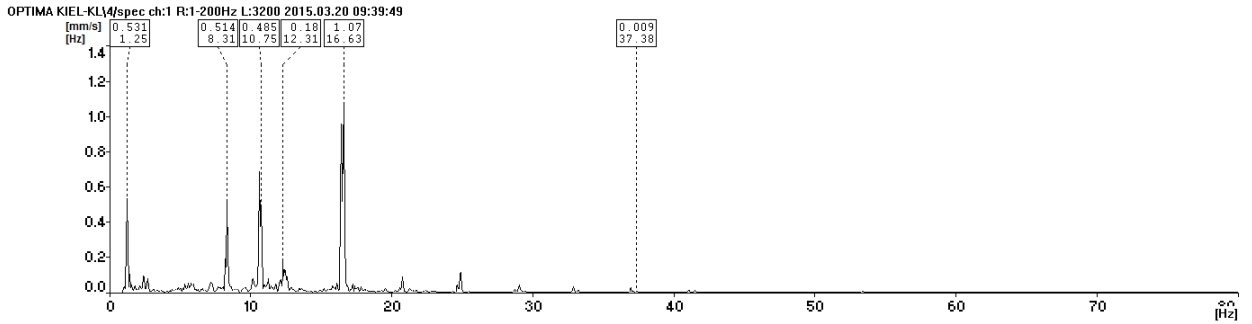


OPTIMA KL-KIEL\20/spec.ch:1 R:1-200Hz L:800 2015.03.19 09:59:03

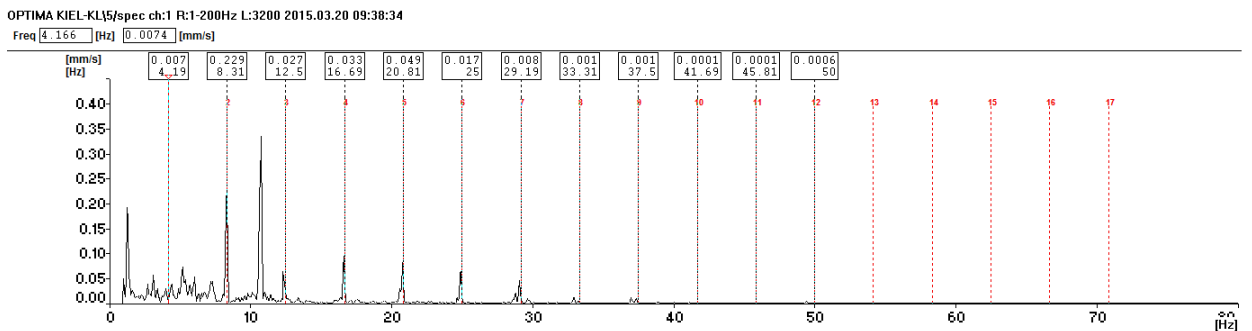
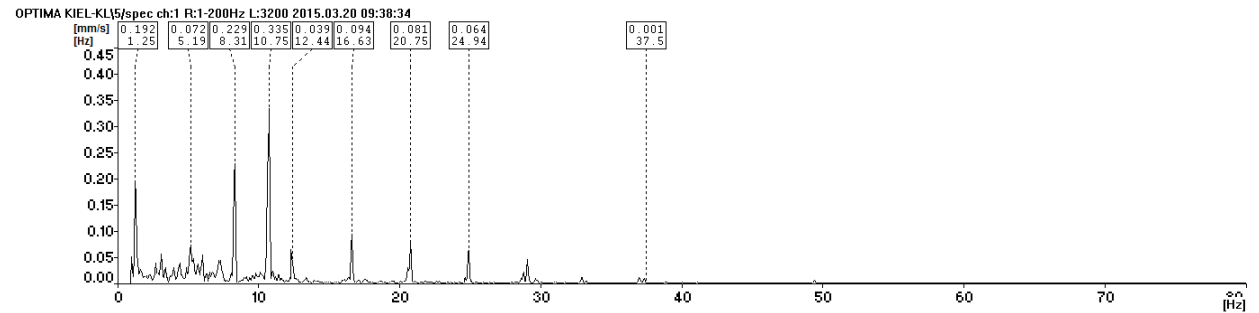


2015 metų kovo 20 dieną atliktų Kelto „Optima Seaways“ virpesių lygio tyrimų gauti rezultatai reiso Kyllis – Klaipėda metu.

7 denis. 4 taškas – kapitonų vairinė (tiltelis).

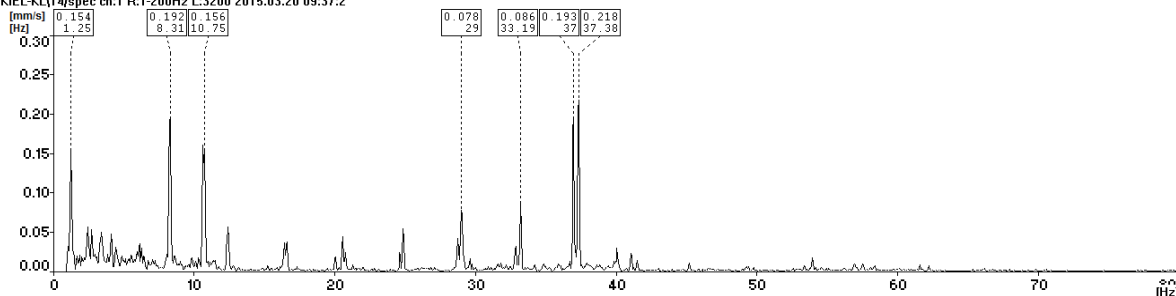


7 denis. 5 taškas – koridorius.



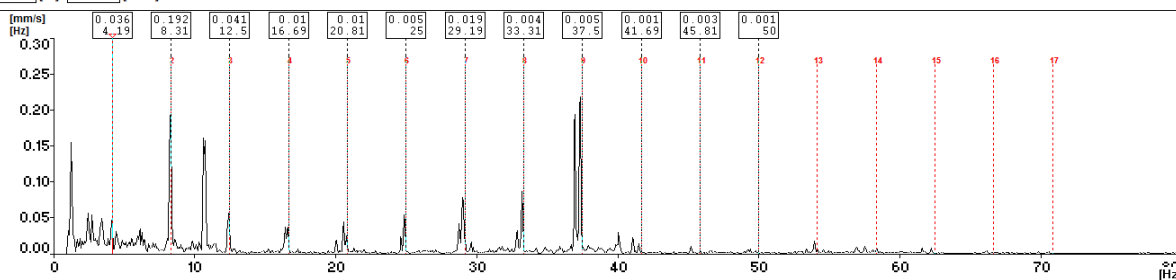
### 7 denis. 14 taškas – prie laiptų.

OPTIMA KIEL-KL14/spec ch:1 R:1-200Hz L:3200 2015.03.20 09:37:2



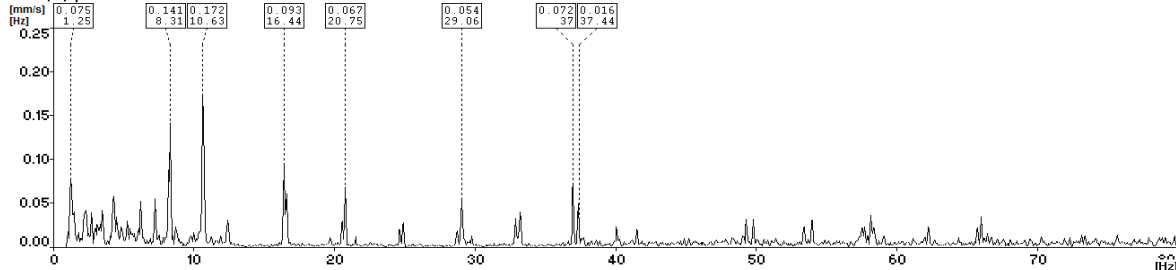
OPTIMA KIEL-KL14/spec ch:1 R:1-200Hz L:3200 2015.03.20 09:37:2

Freq [4.166] [Hz] 0.0368 [mm/s]



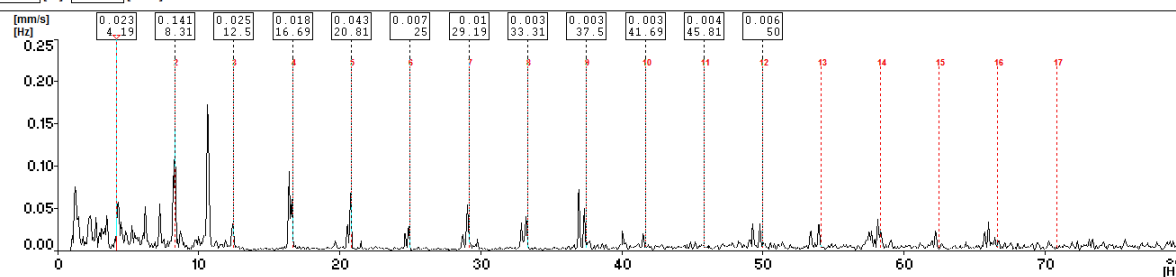
### 6 denis. 13 taškas – prie laiptų.

OPTIMA KIEL-KL13/spec ch:1 R:1-200Hz L:3200 2015.03.20 09:35:4



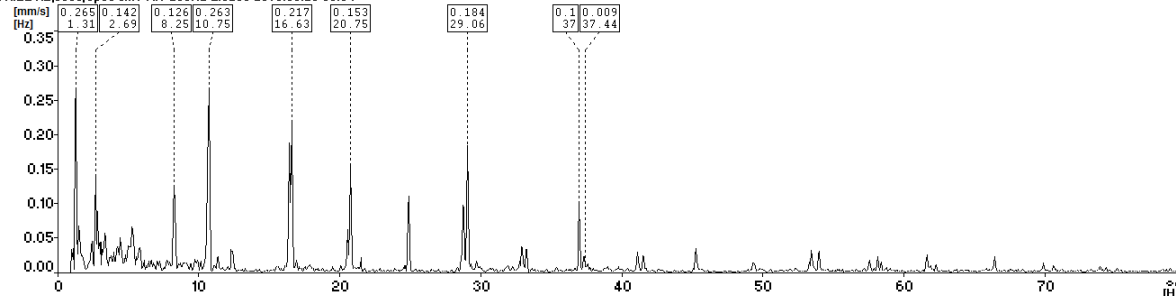
OPTIMA KIEL-KL13/spec ch:1 R:1-200Hz L:3200 2015.03.20 09:35:4

Freq [4.166] [Hz] 0.0237 [mm/s]



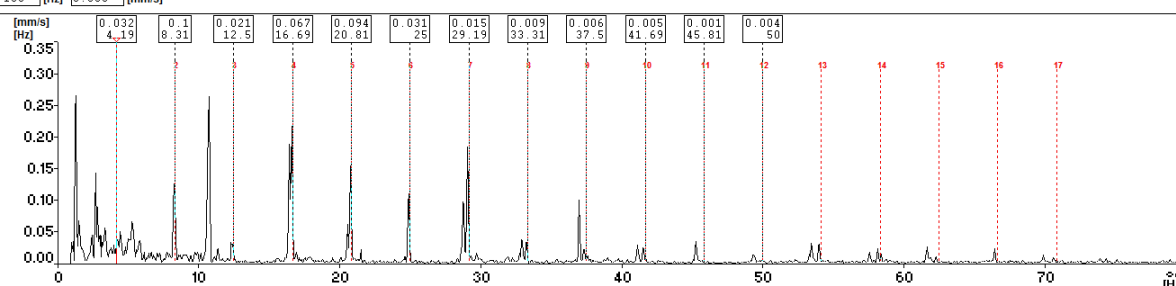
### 6 denis. 6035 taškas – kajutė Nr. 6035.

OPTIMA KIEL-KL6035/spec ch:1 R:1-200Hz L:3200 2015.03.20 09:34

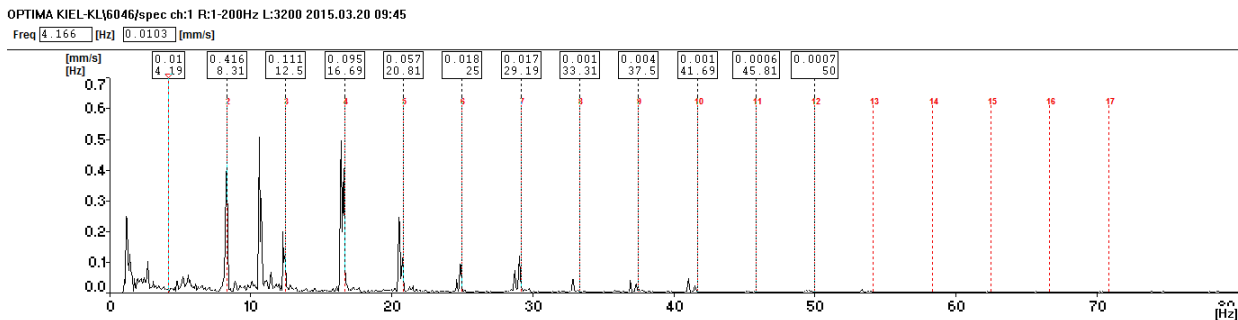
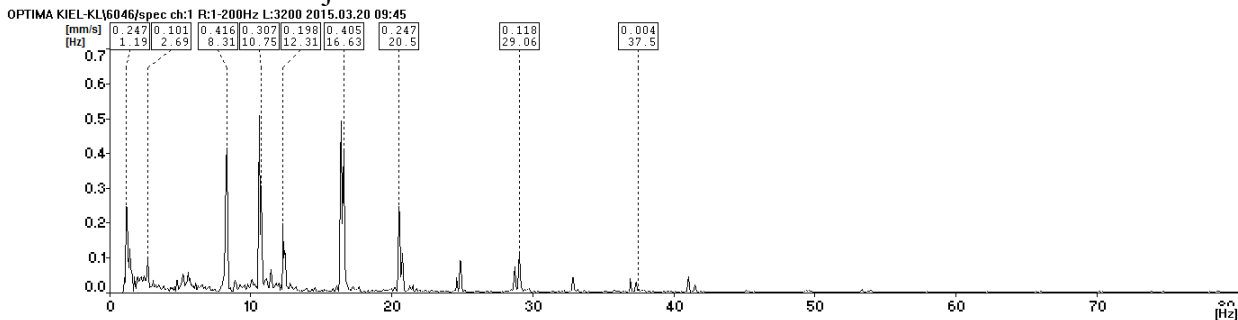


OPTIMA KIEL-KL6035/spec ch:1 R:1-200Hz L:3200 2015.03.20 09:34

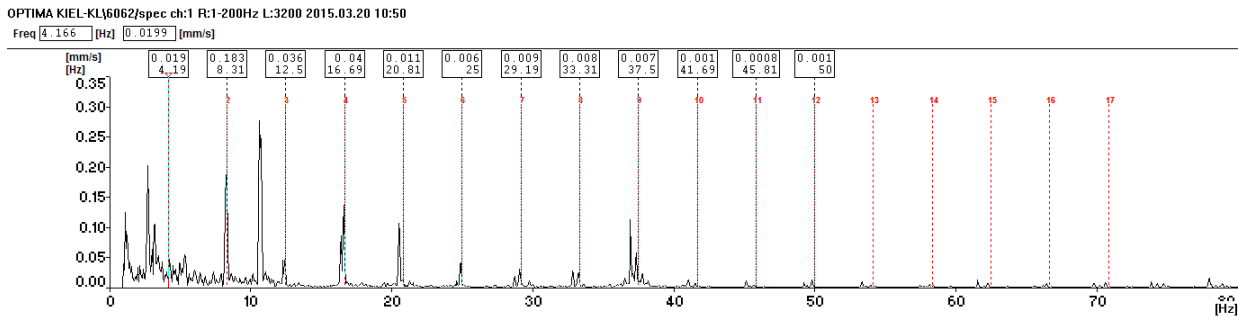
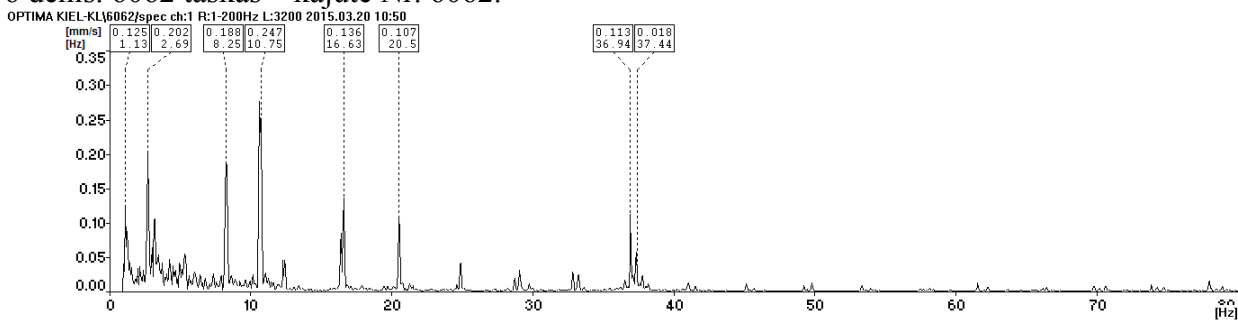
Freq [4.166] [Hz] 0.033 [mm/s]



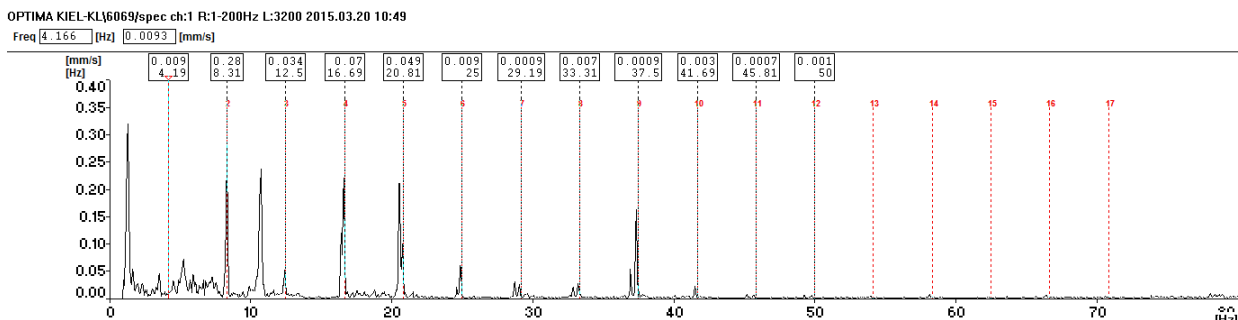
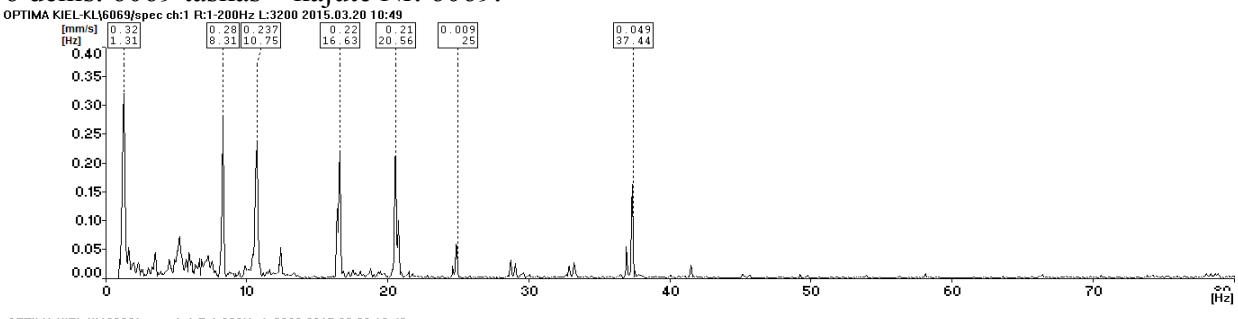
### 6 denis. 6046 taškas – kajutē Nr. 6046.



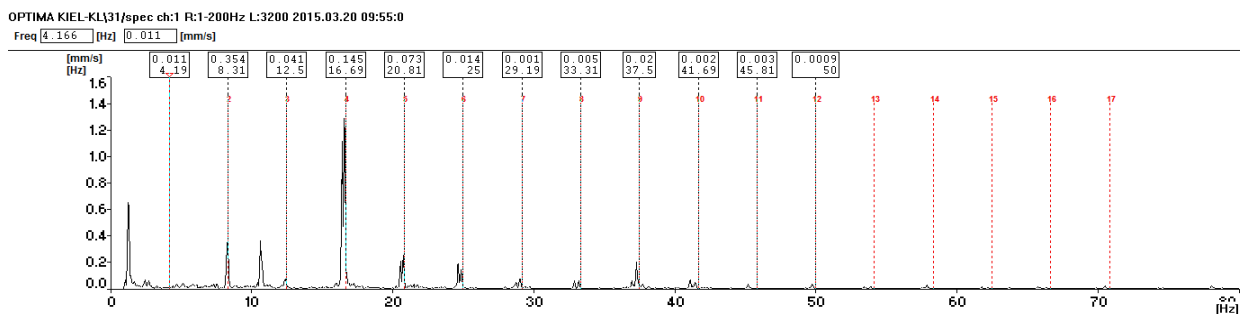
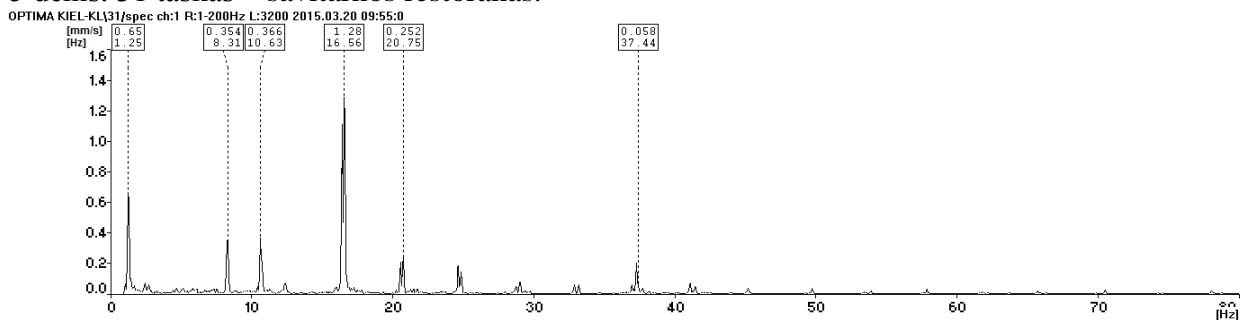
### 6 denis. 6062 taškas – kajutē Nr. 6062.



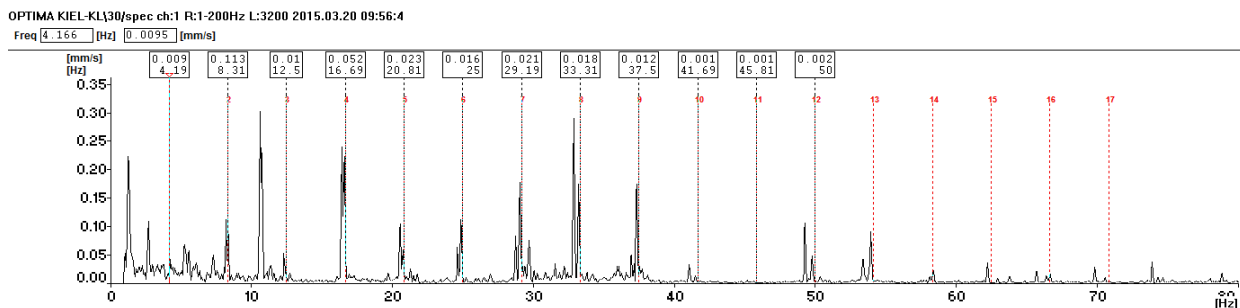
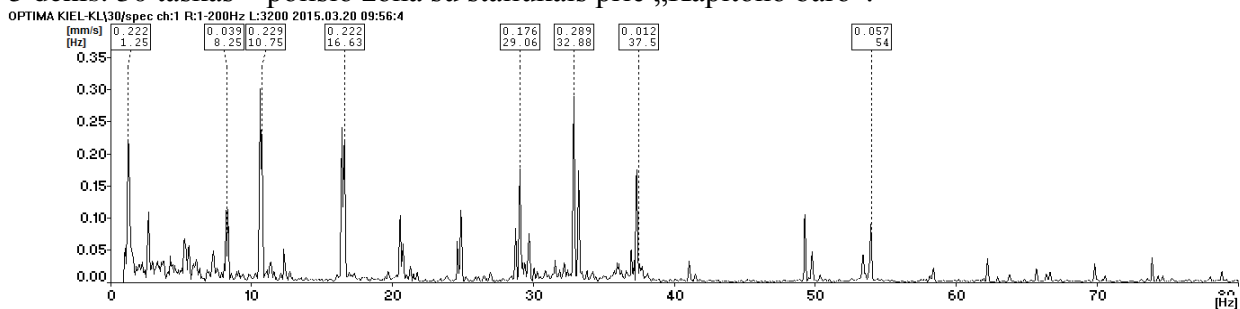
### 6 denis. 6069 taškas – kajutē Nr. 6069.



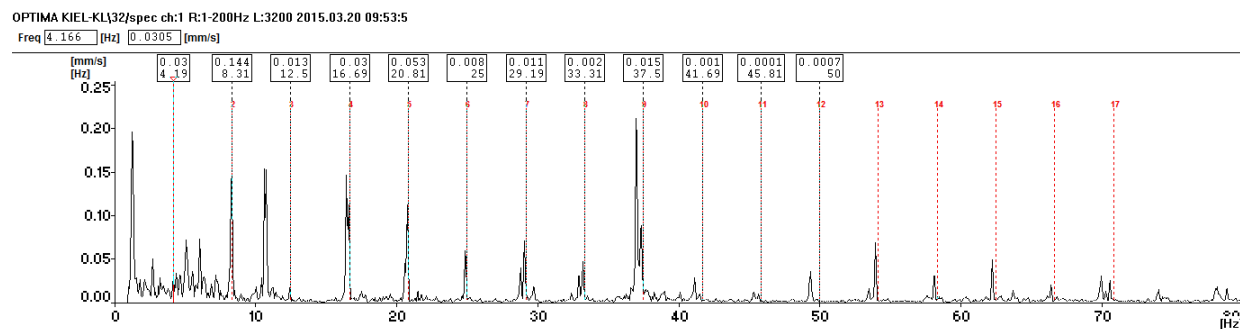
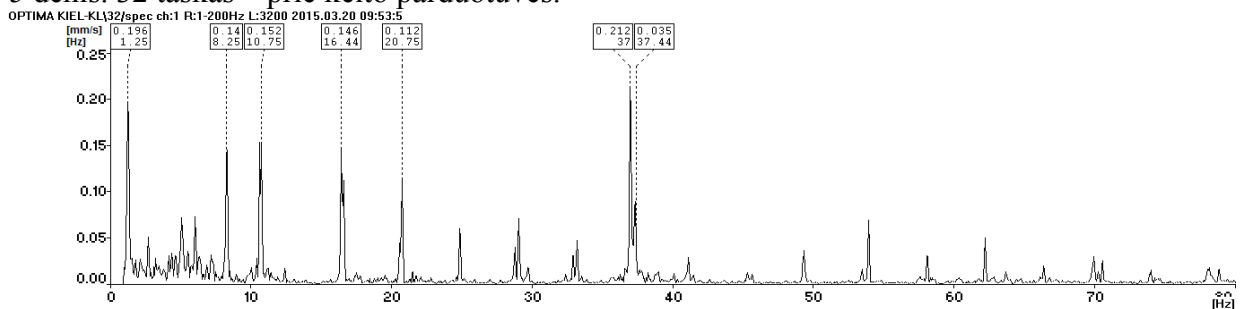
### 5 denis. 31 taškas – savitarnos restoranas.



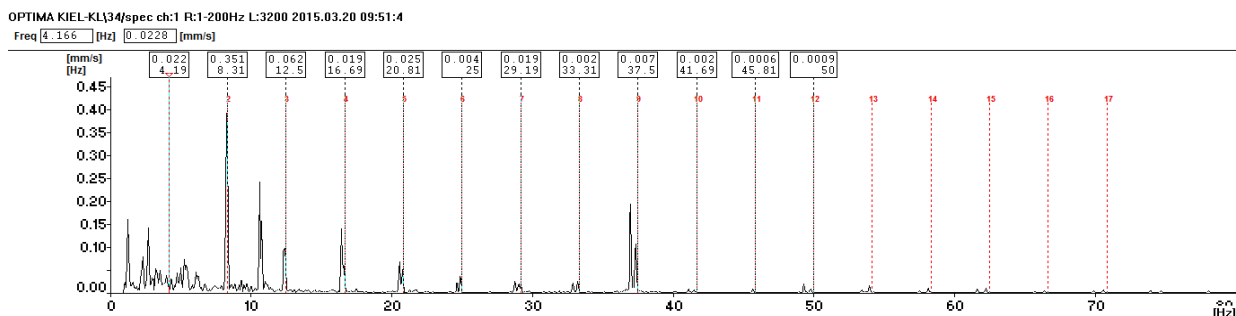
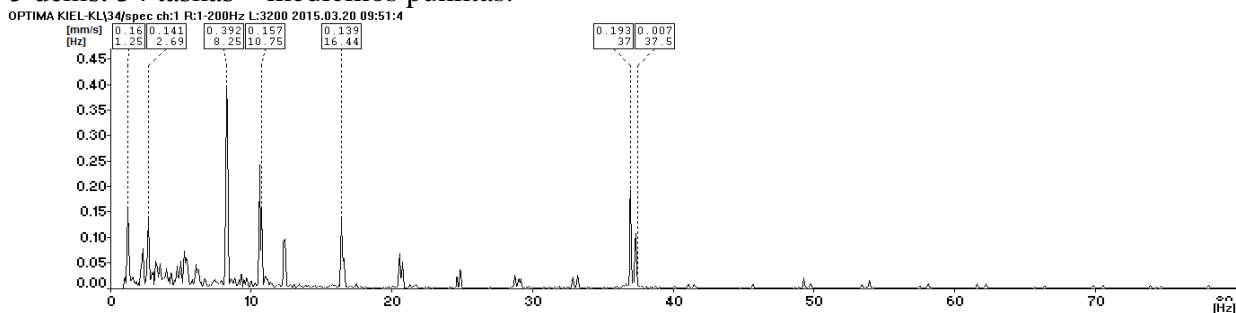
### 5 denis. 30 taškas – poilsio zona su staliukais prie „Kapitono baro“.



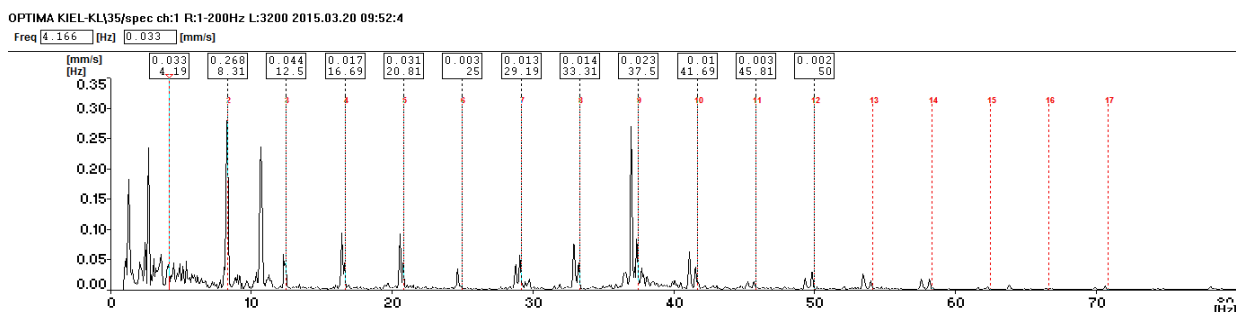
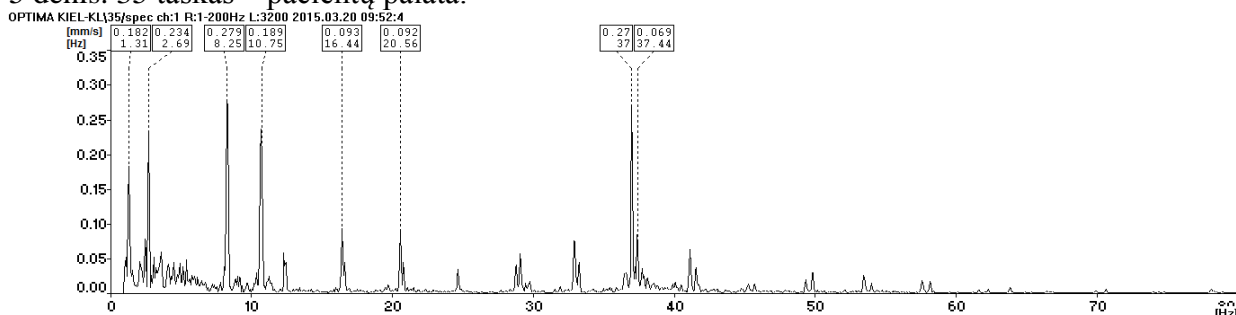
### 5 denis. 32 taškas – prie kelto parduotuvės.



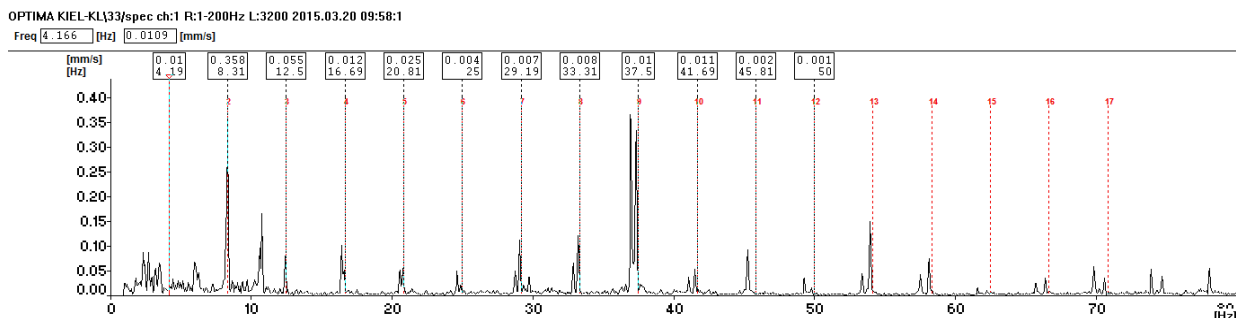
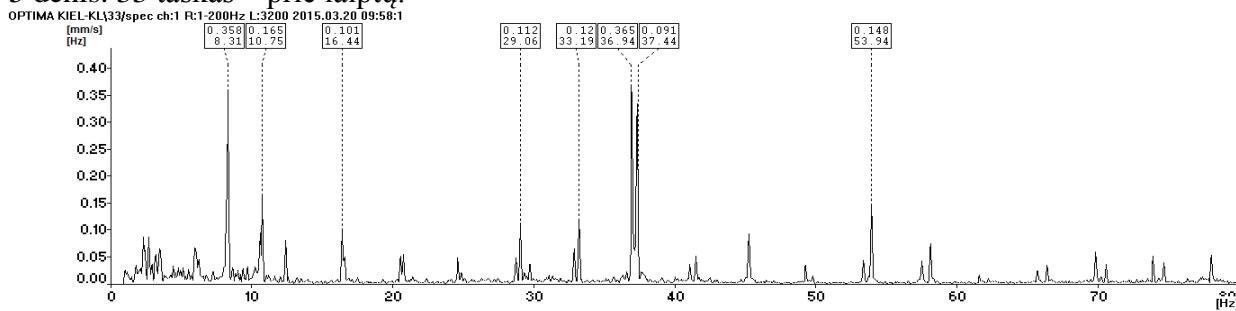
### 5 denis. 34 taškas – medicinos punktas.



### 5 denis. 35 taškas – pacientų palata.

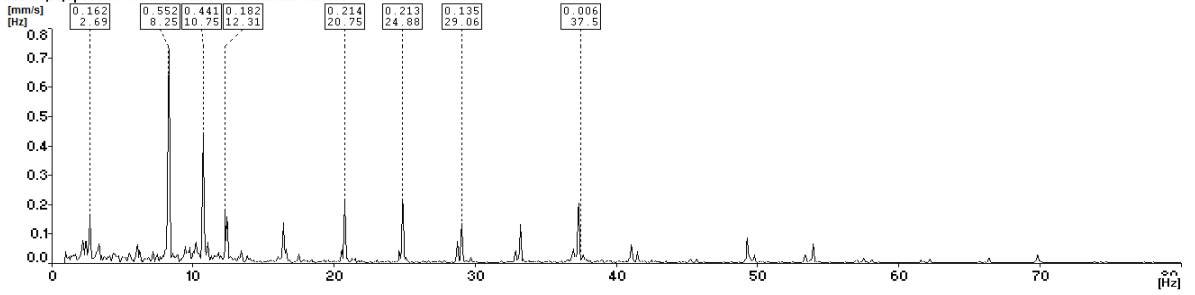


### 5 denis. 33 taškas – prie laiptų.



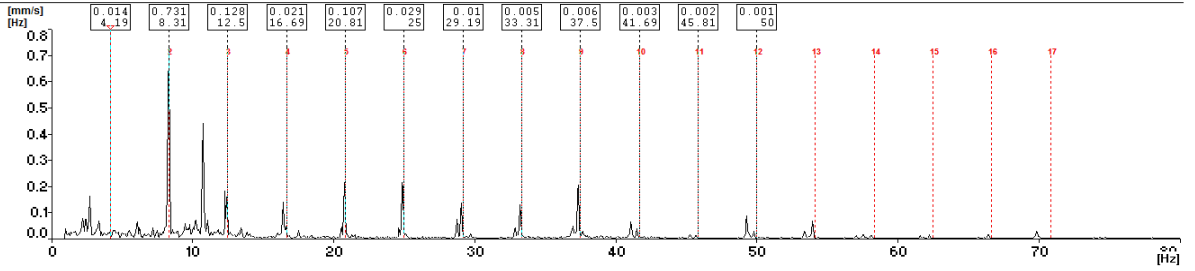
### 5 denis. 29 taškas – ģiģulos virtuvē.

OPTIMA KIEL-KL\29\spec ch:1 R:1-200Hz L:3200 2015.03.20 10:01:4



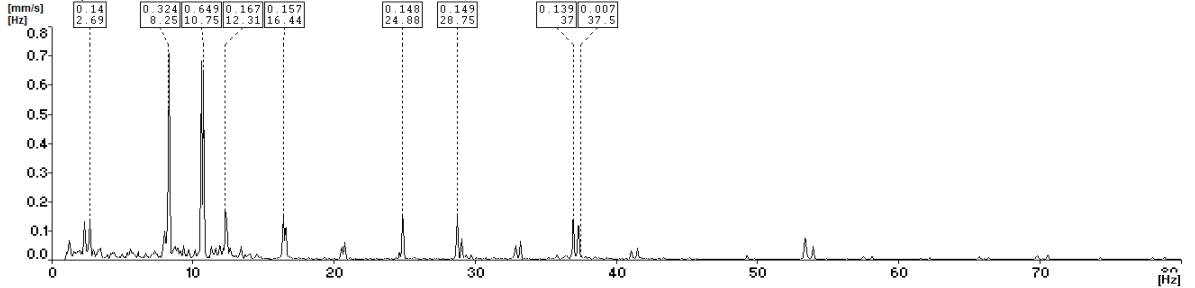
OPTIMA KIEL-KL\29\spec ch:1 R:1-200Hz L:3200 2015.03.20 10:01:4

Freq [4.166] [Hz] [0.0147] [mm/s]



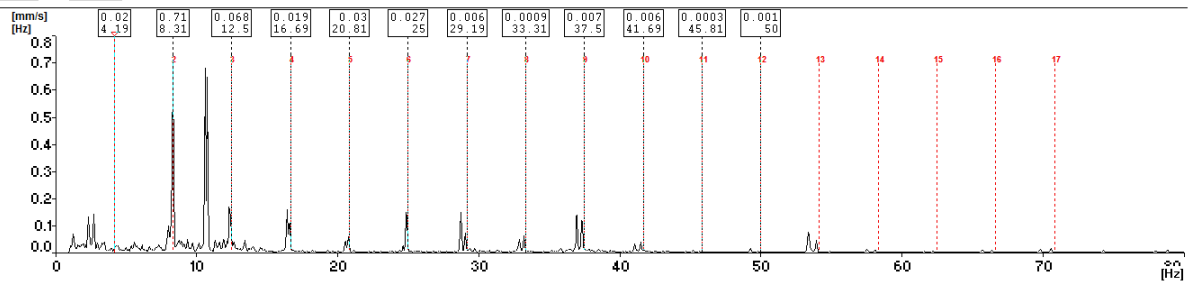
### 5 denis. 29A taškas – ģiģulos valgomas.

OPTIMA KIEL-KL\29A\spec ch:1 R:1-200Hz L:3200 2015.03.20 10:02:



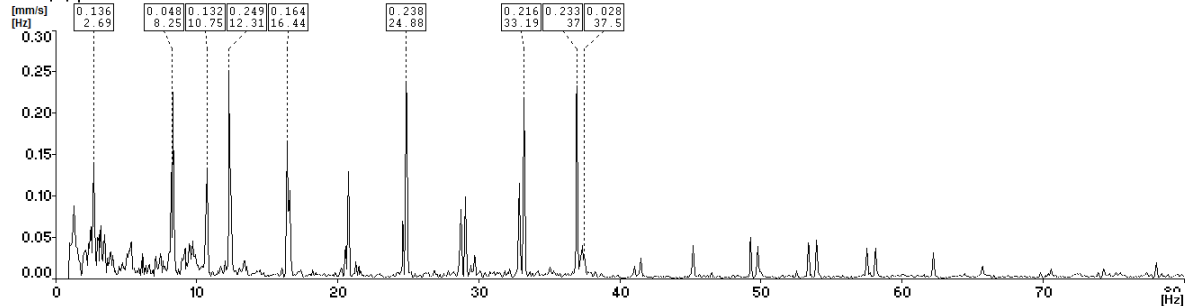
OPTIMA KIEL-KL\29A\spec ch:1 R:1-200Hz L:3200 2015.03.20 10:02:

Freq [4.166] [Hz] [0.0208] [mm/s]



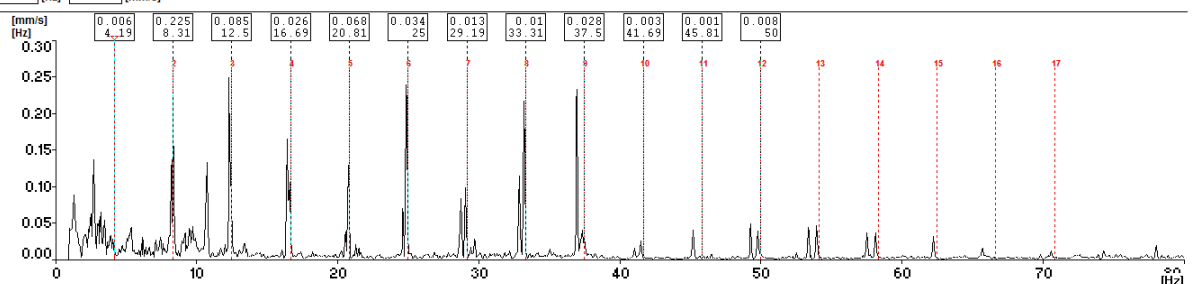
### 5 denis. 28 taškas – priede registratūros.

OPTIMA KIEL-KL\28\spec ch:1 R:1-200Hz L:3200 2015.03.20 09:59:5

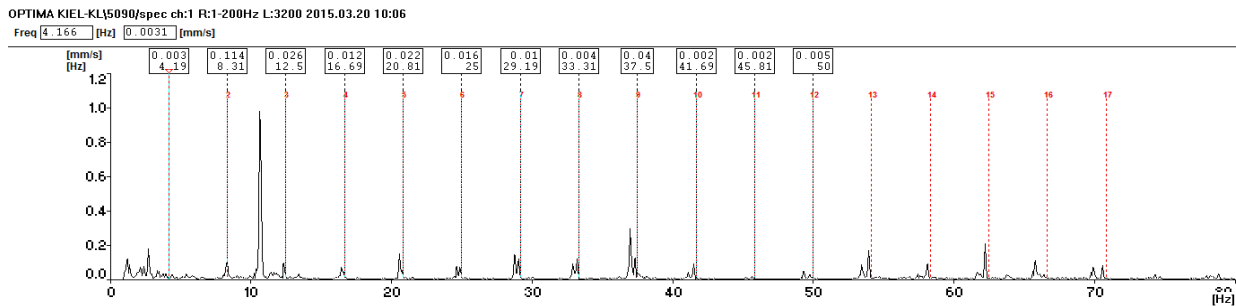
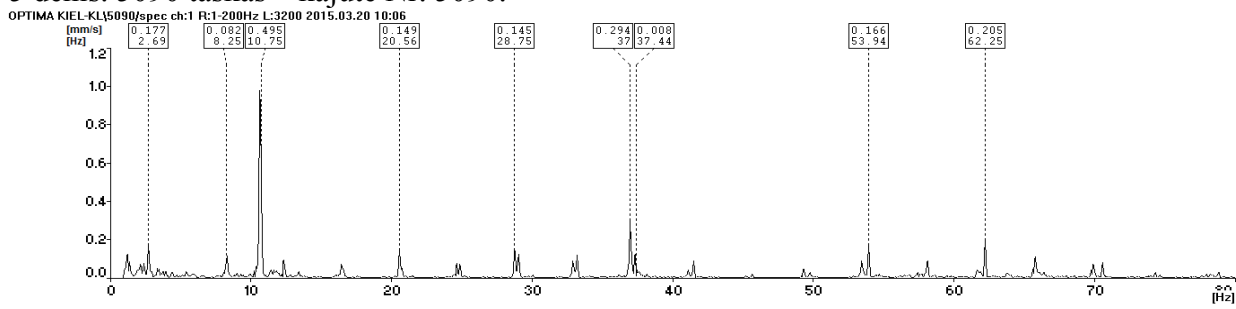


OPTIMA KIEL-KL\28\spec ch:1 R:1-200Hz L:3200 2015.03.20 09:59:5

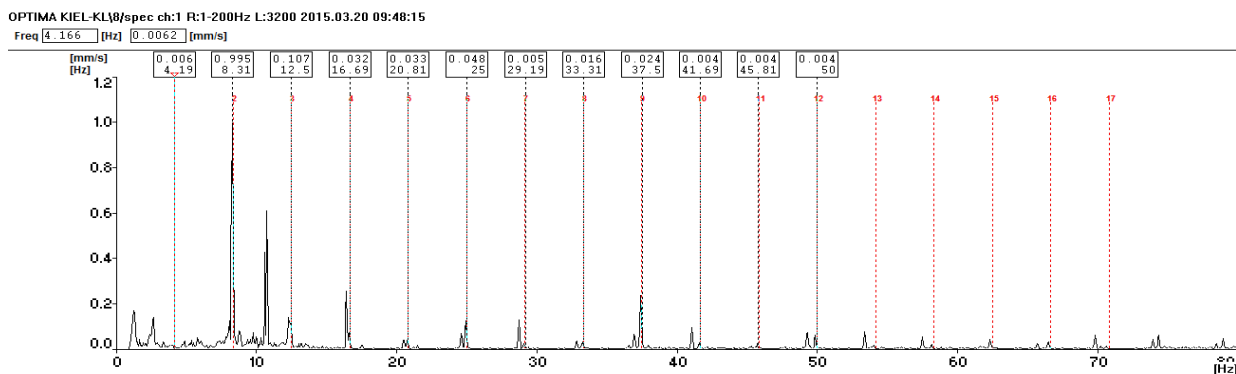
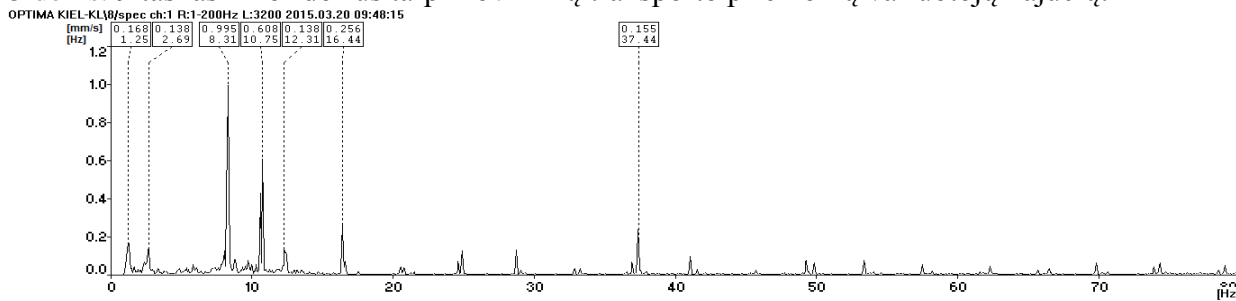
Freq [4.166] [Hz] [0.0069] [mm/s]



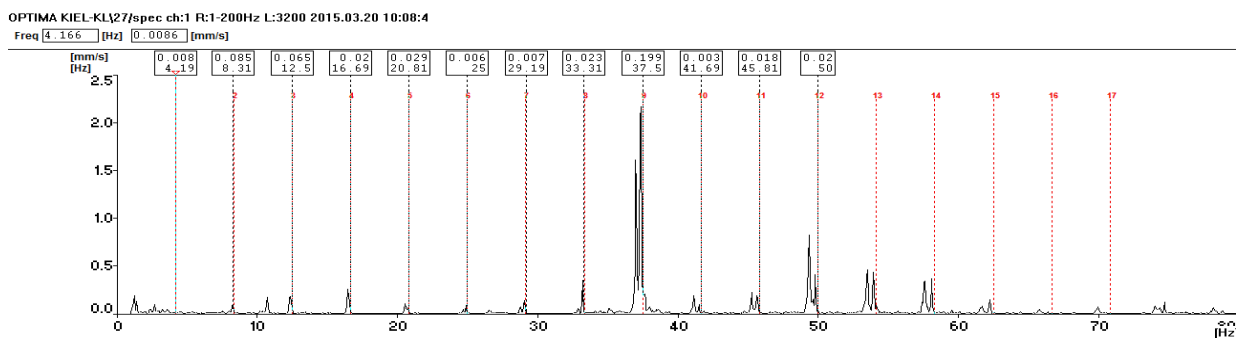
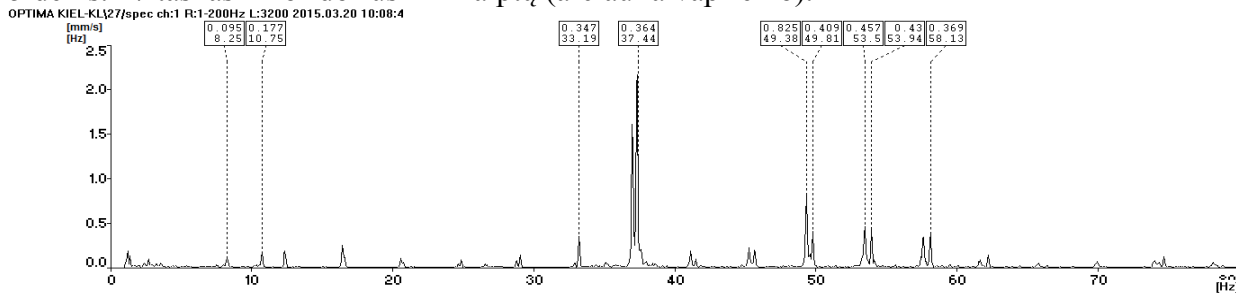
### 5 denis. 5090 taškas – kajutė Nr. 5090.



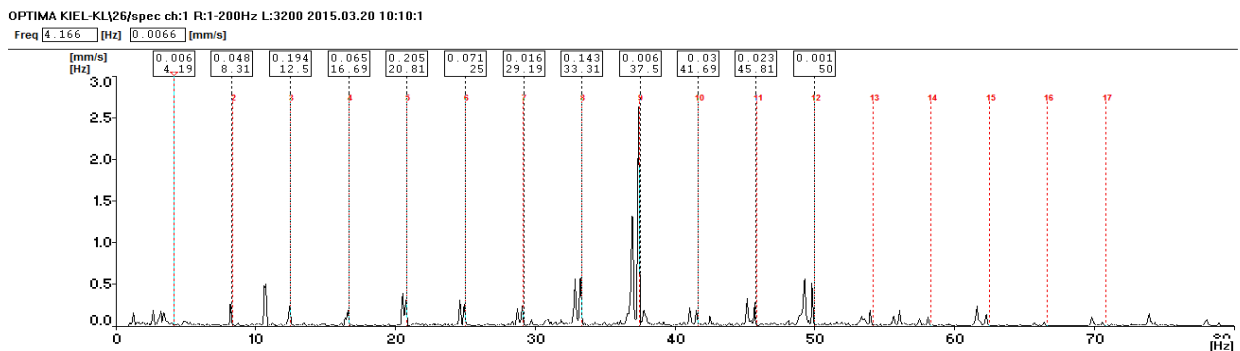
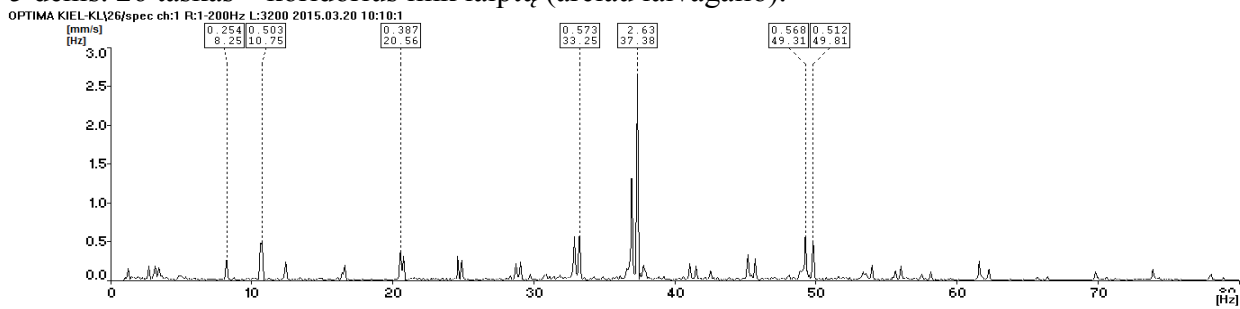
### 5 denis. 9 taškas – koridorius tarp krovinių transporto priemonių vairuotojų kajučių.



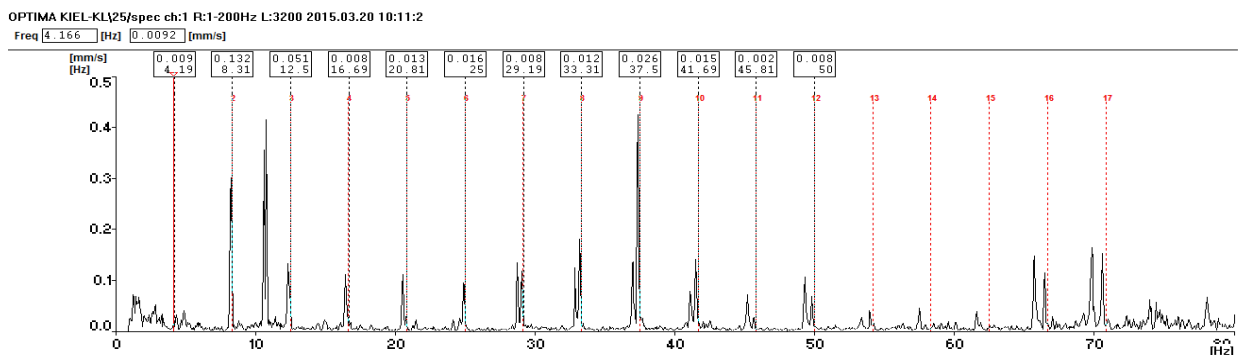
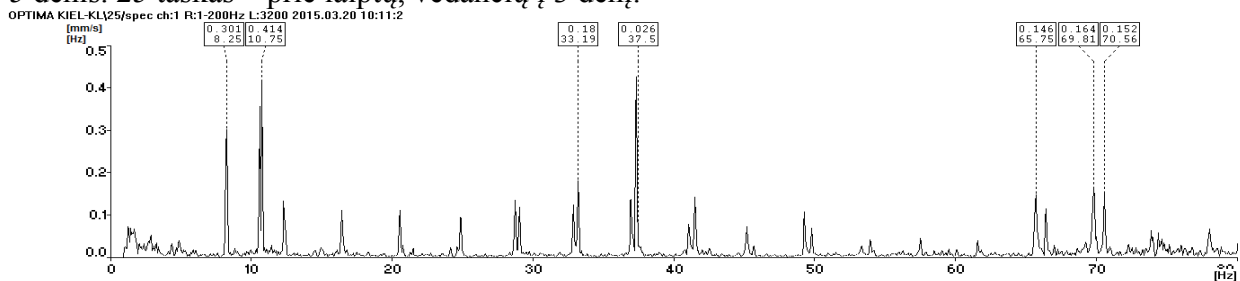
### 5 denis. 27 taškas – koridorius link laiptų (arčiau laivapriekio).



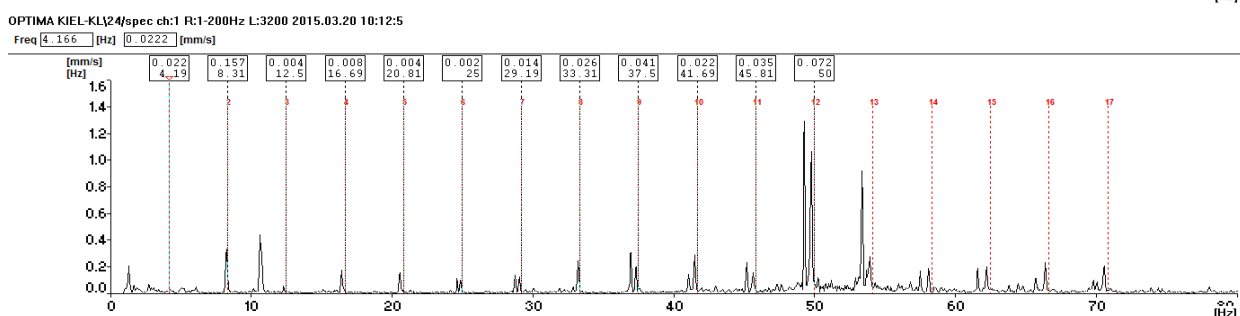
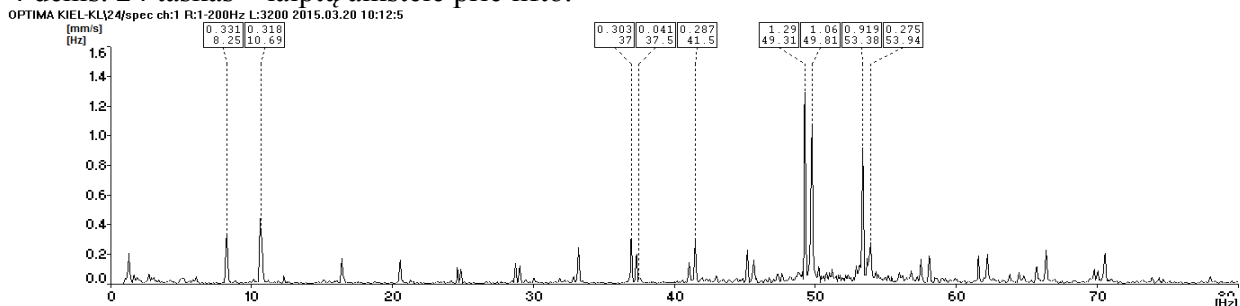
### 5 denis. 26 taškas – koridorius link laiptų (arčiau laivagalio).



### 5 denis. 25 taškas – prie laiptų, vedančių į 3 denį.

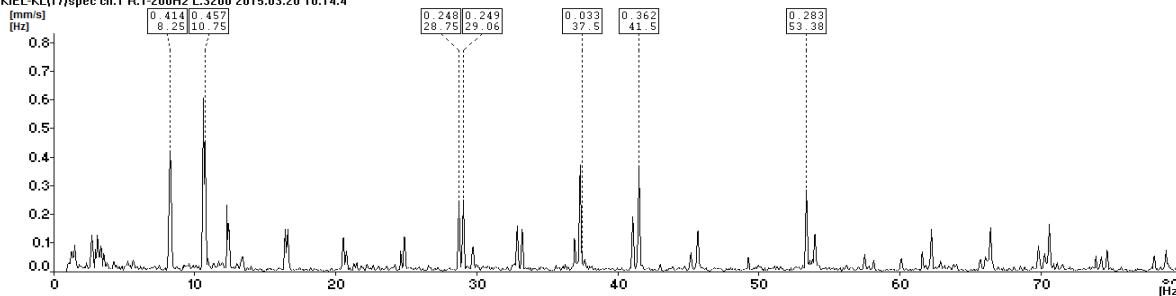


### 4 denis. 24 taškas – laiptų aikštelė prie lifto.

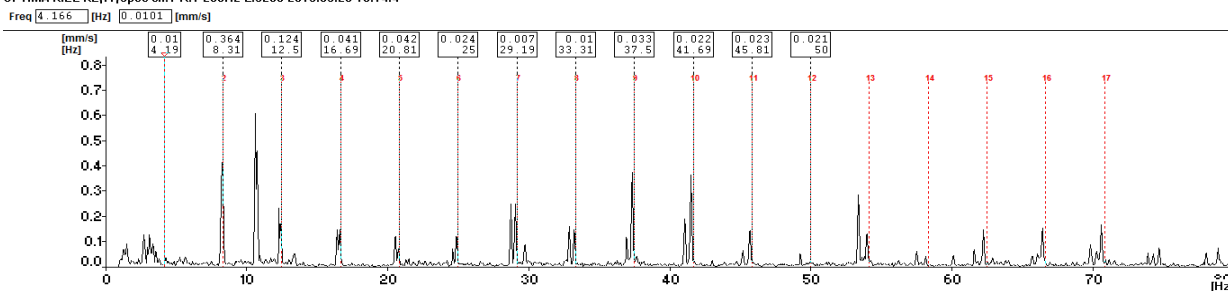


### 3 denis. 17 taškas – dirbtuvės.

OPTIMA KIEL-KL17/spec ch:1 R:1-200Hz L:3200 2015.03.20 10:14:4

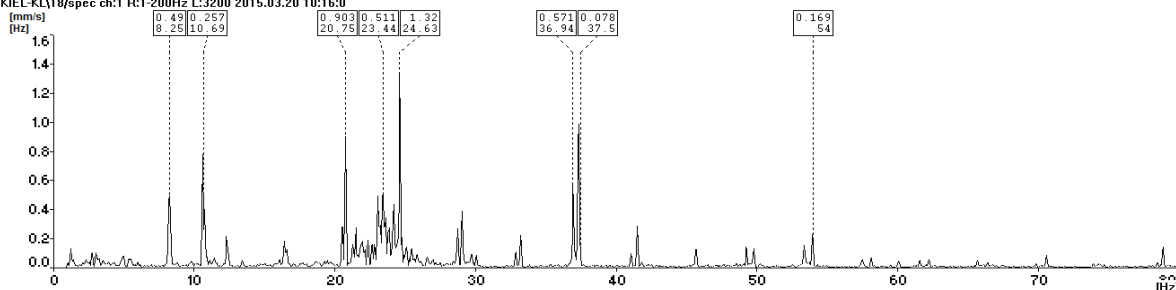


OPTIMA KIEL-KL17/spec ch:1 R:1-200Hz L:3200 2015.03.20 10:14:4

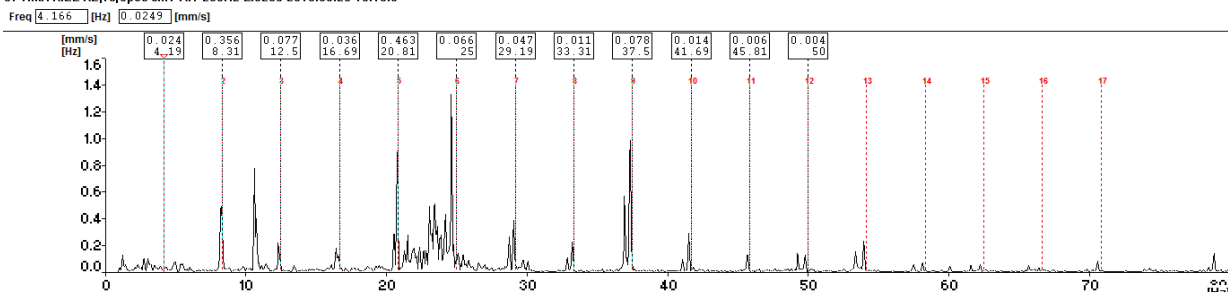


### 3 denis. 18 taškas – pagrindinių eigos variklių dispečerinė.

OPTIMA KIEL-KL18/spec ch:1 R:1-200Hz L:3200 2015.03.20 10:16:0

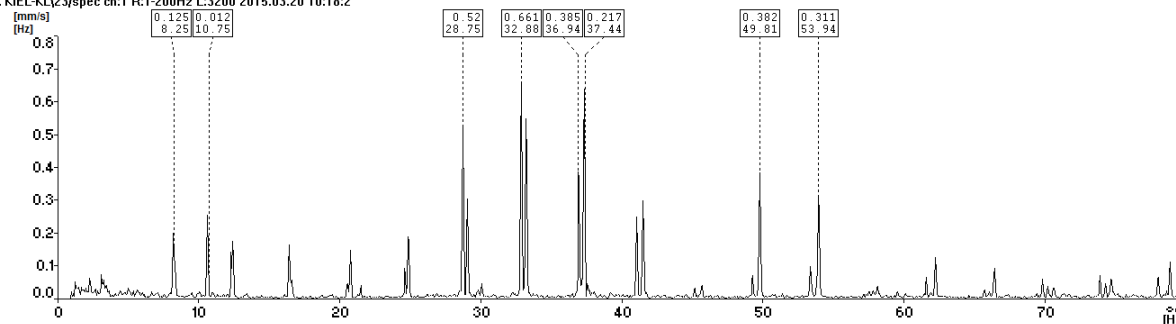


OPTIMA KIEL-KL18/spec ch:1 R:1-200Hz L:3200 2015.03.20 10:16:0

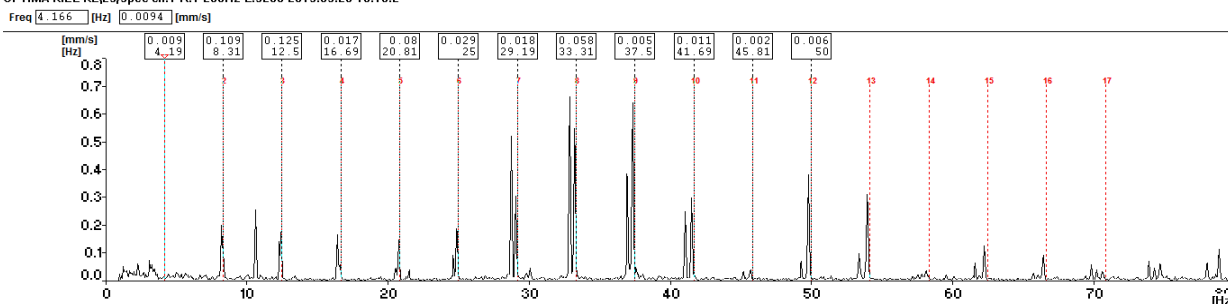


### 3 denis. 23 taškas – koridorius.

OPTIMA KIEL-KL23/spec ch:1 R:1-200Hz L:3200 2015.03.20 10:18:2

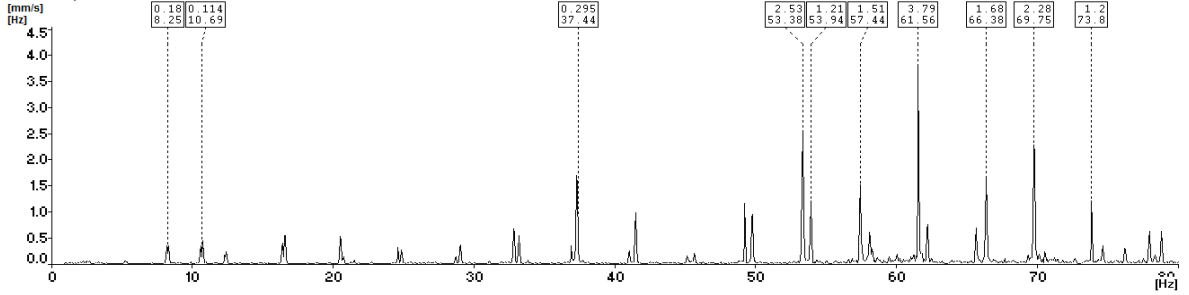


OPTIMA KIEL-KL23/spec ch:1 R:1-200Hz L:3200 2015.03.20 10:18:2



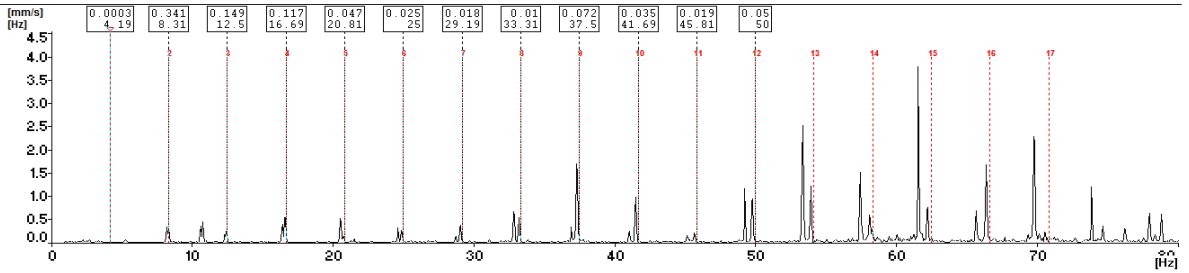
## 2 denis. 21 taškas – mašinų skyrius (arčiau laivaprieikio).

OPTIMA KIEL-KL21/spec ch:1 R:1-200Hz L:3200 2015.03.20 10:20:1



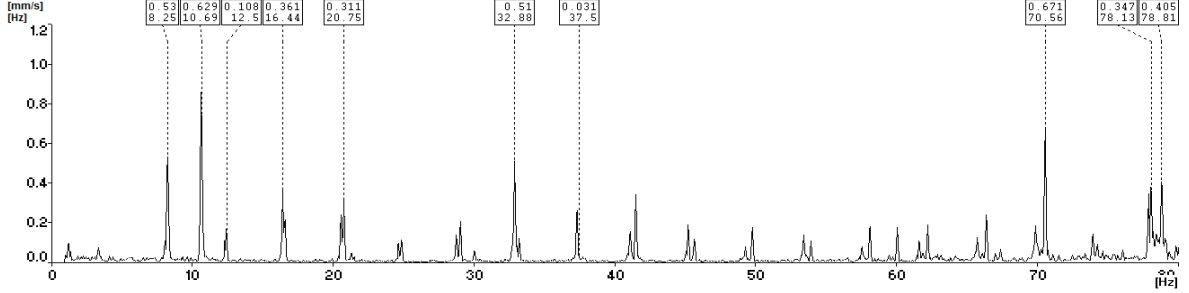
OPTIMA KIEL-KL21/spec ch:1 R:1-200Hz L:3200 2015.03.20 10:20:1

Freq [4.166] [Hz] [0.0003] [mm/s]



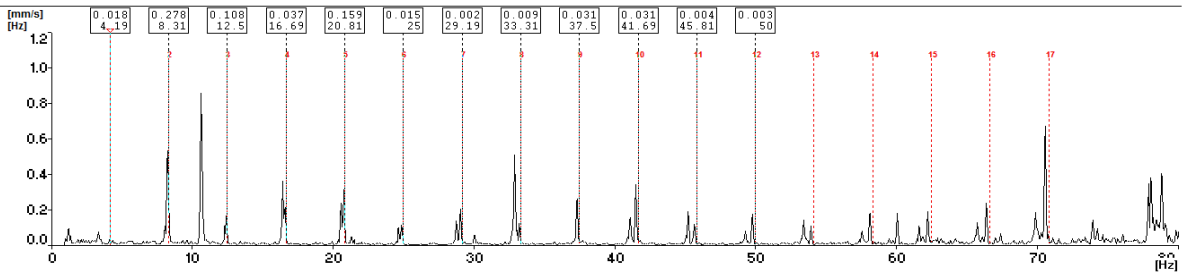
## 2 denis. 22 taškas – mašinų skyrius (arčiau laivagalio).

OPTIMA KIEL-KL22/spec ch:1 R:1-200Hz L:3200 2015.03.20 10:21:3



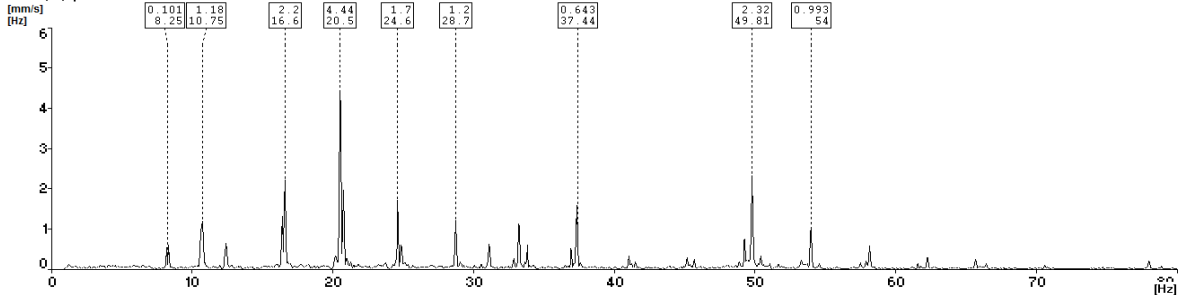
OPTIMA KIEL-KL22/spec ch:1 R:1-200Hz L:3200 2015.03.20 10:21:3

Freq [4.166] [Hz] [0.0188] [mm/s]



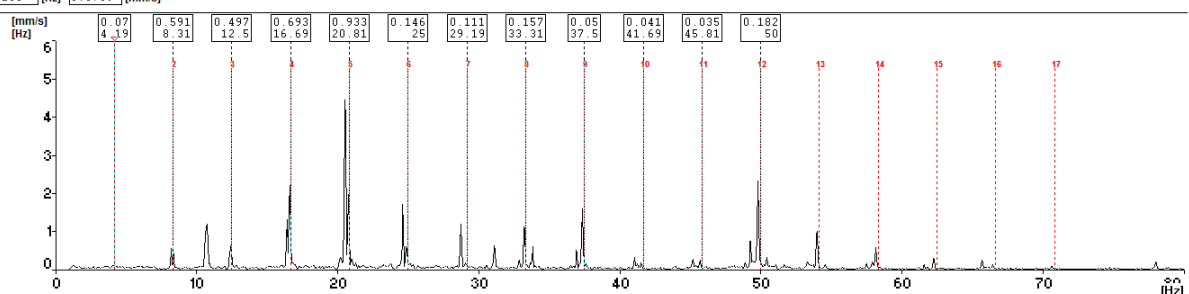
## 1 denis. 19 taškas – mašinų skyrius (arčiau laivaprieikio).

OPTIMA KIEL-KL19/spec ch:1 R:1-200Hz L:3200 2015.03.20 10:23:1



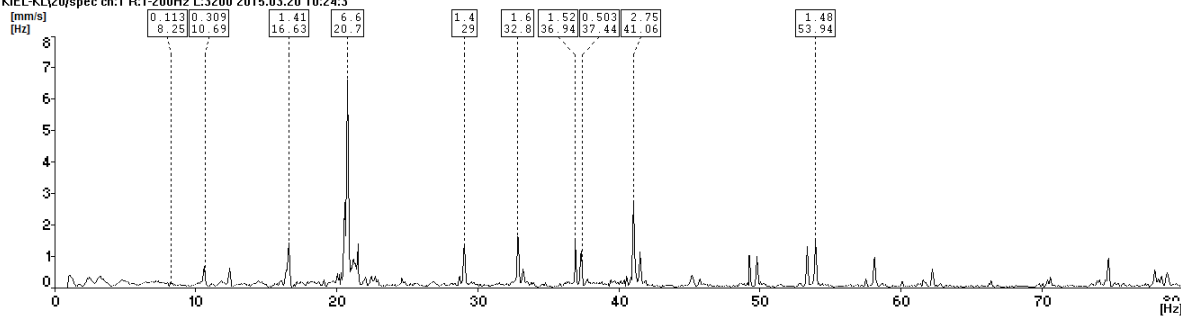
OPTIMA KIEL-KL19/spec ch:1 R:1-200Hz L:3200 2015.03.20 10:23:1

Freq [2.166] [Hz] [0.0709] [mm/s]



# 1 denis. 20 taškas – mašinų skyrius (arčiau laivagalio).

OPTIMA KIEL-KL\20\spec ch:1 R:1-200Hz L:3200 2015.03.20 10:24:3



OPTIMA KIEL-KL\20\spec ch:1 R:1-200Hz L:3200 2015.03.20 10:24:3

Freq [4.166] [Hz] 0.0675 [mm/s]

