

**KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS**

Jūrų technikos fakultetas

Laivo inžinerijos katedra

Mantas Beniušis

**KELTO „VICTORIA SEAWAYS“  
ŠILUMOKAIČIO IR AUŠINIMO  
VAMZDYNO VIRPESIŲ  
TYRIMAS**

Laivo inžinerijos studijų programos  
magistro baigiamasis darbas

KLAIPĖDA, 2014

## SANTRAUKA

M. Beniušis „Kelto „Victoria Seaways“ šilumokaičio ir aušinimo vamzdyno virpesių tyrimas“. Laivų projektavimo ir statybos magistratūros studijų programos baigiamasis darbas. Darbo vadovas dr. P. Mažeika, Klaipėdos universitetas: Klaipėda, 2014.

*Raktažodžiai:* virpesiai, laivas, keltas, virpesių tyrimai, šilumokaitis.

Baigiamojo darbo teorinėje dalyje aprašoma virpesių klasifikacija, pagrindiniai virpesių žadintojai ir analizuojami įvairūs virpesių lygio mažinimo laive, virpesių skaičiavimo būdai.

Eksperimentinėje dalyje pateikiama keltų „Victoria Seaways“ ir „Athena Seaways“ aušinimo sistemos dalies virpesių matavimo metodika. Nagrinėjami reiso Klaipėda-Kylis-Klaipėda metu atliktų matavimų rezultatai, bei nustatomos tiriamos aušinimo sistemos dalies padidintų virpesių lygio priežastys.

Paskutinėje darbo dalyje pateikiamos išvados ir rekomendacijos.

## SUMMARY

M. Beniušis “Vibration research of heat exchanger and cooling piping in Victoria Seaways ferry”. Final work of the master studies of ship design and building program. Academic supervisor Dr. P. Mažeika, Klaipeda University: Klaipėda, 2014.

*Keywords:* vibrations, ship, ferry, vibration research, heat exchanger.

The theoretical part of the final work describes the classification of vibration, main excitations of vibration and analyses various methods for reduction of the vibration level on board and vibration calculation.

The experimental part presents the vibration measurement methodology in the cooling systems of Victoria Seaways and Athena Seaways ferries. It examines the results of measurements carried out during Klaipėda-Kiel-Klaipėda trip and identifies the reasons for the recent level of vibration in the analysed cooling system.

The final part of the work contains the conclusions and recommendations.

## LENTELIŲ SĄRAŠAS

**2.2.1 lentelė.** „Bump“ testo metu gauti pirmieji laisvieji „ATHENE Seaways“ kelto šilumokaičio ir jo vamzdyno virpesių pikų dažniai

**2.2.2 lentelė.** „Bump“ testo metu gauti pirmieji laisvieji „VICTORIA Seaways“ kelto šilumokaičio ir jo vamzdyno virpesių pikų dažniai

**2.2.3 lentelė.** „ATHENE Seaways“ kelto šilumokaičio ir jo vamzdyno virpesių lygio (virpesių greičio kvadratinio vidurkio  $V_{RMS}$  dažnių intervale 10÷1000Hz) matavimo rezultatai

**2.2.4 lentelė.** „VICTORIA Seaways“ kelto šilumokaičio ir jo vamzdyno virpesių lygio (virpesių greičio kvadratinio vidurkio  $V_{RMS}$  dažnių intervale 10÷1000Hz) matavimo rezultatai

**2.2.5 lentelė.** Variklio ir sraigto virpesių žadinimo dažnių skaičiavimo rezultatai skirtingais plaukimo režimais

## PAVEIKSLĖLIŲ SĄRAŠAS

- 1.1.1 pav. Laivo korpuso virpesių klasifikacija
- 1.2.1 pav. Hidroelastinės vibracijos analizė baigtinių elementų metodu, kompiuterizuotu būdu
- 1.3.1 pav. Variklių pamatininė atraminė pagalvė
- 1.3.2 pav. K,C – slopinimo įrenginys (didinantis energijos nuostolius)
- 1.3.3 pav. Vibro izoliacinė medžiaga, vibruojantiems paviršiams dengti
- 1.3.4 pav. Laivo korpuso sijų modifikacijos
- 1.3.5 pav. Virpesių grafikai keičiant korpuso sutvirtinimus
- 1.3.6 pav. Kylio sutvirtinimo variantai: a) tolygiai išdėstyti španhautai; b) netolygiai išdėstyti španhautai
- 1.3.7 pav. Kinetinės energijos ir dažnių grafikas
- 1.3.8 pav. Pasyvios vibracijų kontrolės ir elektromagneto kombinacija
- 1.3.9 pav. Dvipakopė virpesių slopinimo sistema
- 1.3.10 pav. Dvipakopė kompensatorių sistema „Collins“ klasės povandeniuose laivuose
- 1.3.11 pav. MR kompensatorius: a) schema, b) nuotrauka
- 1.4.1 pav. Turbulentinio slėgio ir elektrinių impulsų spektras vėjo tunelyje: I  $v=15$  m/s, II  $v=20$ m/s, III  $v=30$ m/s, IV  $v=0$ m/s
- 1.4.2 pav. Eksperimento objektas – imitatorius
- 1.4.3 pav. Matavimo linijos jungimo schema
- 1.4.4 pav. Virpesių spektro išsidėstymas esant guolio defektui
- 1.4.5 pav. Virpesiai esant gedimui ir pakeitus sugedusį guolį a) – sugedusio guolio grafikas, b) – naujo gero guolio grafikas
- 1.4.6 pav. Vibracijos sugėrimas hibridiniu ir pasyviuoju slopintuvais
- 1.4.7 pav. Tanklaivio cilindrinės dalies virpesių formos
- 1.4.8 pav. Įgulos patalpose esanti vibracija
- 1.4.9 pav. Vibracijų sukimo momentai laivo variklių skyriuje prieš modifikacijas ir po jų
- 2.1.1 pav. AB „DFDS Seaways“ laivas „Victoria“
- 2.1.2 pav. Šilumokaičiai kelte „VICTORIA Seaways
- 2.2.1 pav. ADASH A4400 virpesių signalų analizatorius su Wilcoxon 797 jutikliu
- 2.2.2 pav. Matavimo taškai ant šilumokaičio ir jo vamzdyno STBD pusė
- 2.2.3 pav. Matavimo taškai ant šilumokaičio ir jo vamzdyno PORT pusė
- 2.2.4 pav. Šilumokaičio ir jo vamzdyno virpesių greičių grafikas „bump“ testo metu

- 2.2.5 pav.** Šilumokaičio ir jo vamzdyno virpesių greičių FFT spektras gautas „bump“ testo metu „ATHENE Seaways“ kelte
- 2.2.6 pav.** Virpesių lygis  $V_{RMS}$  3 taške “ATHENE Seaways” kelto STBT pusėje esant 443 aps./min variklio alkūninio veleno sukiamas
- 2.2.7 pav.** Virpesių lygis  $V_{RMS}$  3 taške “ATHENE Seaways” laivo STBT pusėje esant 375 aps./min variklio alkūninio veleno sukiamas
- 2.2.8 pav.** Absoliučiujų virpesių  $V_{RMS}$  greičių kvadratinių vidurkių grafikas „VICTORIA Seaways“ kelte 8 taške
- 2.2.9 pav.** Virpesių lygis išmatuotas “ATHENE Seaways” kelto STBD pusėje 7 taške varikliui dirbant 443 aps./min
- 2.2.10 pav.** Virpesių lygis išmatuotas “VICTORIA Seaways” kelto STBD pusėje 7 taške varikliui dirbant 437 aps./min
- 2.3.1 pav.** Šilumokaičio vamzdynas ir jo tvirtinimas
- 2.3.2 pav.** Šilumokaitis ir jo vamzdyno tvirtinimas
- 2.3.3 pav.** „ATHENE Seaways“ šilumokaičio virpesių lygio, priklausomai nuo dažnio grafikas PORT pusė 13 taškas esant 375aps./min ir 443 aps./min
- 2.3.4 pav.** „VICTORIA Seaways“ šilumokaičio virpesių lygio, priklausomai nuo dažnio grafikas PORT pusė 13 taškas esant 400 aps./min
- 2.3.5 pav.** „VICTORIA Seaways“ šilumokaičio virpesių lygio, priklausomai nuo dažnio grafikas PORT pusė 13 taškas esant 465 aps./min
- 2.3.6 pav.** Pasireiškiančių ir žadinamų virpesių dažnių palyginimas (vertikaliai dažnis Hz, horizontaliai variklio alkūninio veleno apsisukimai aps./min)
- 2.3.7 pav.** Kelto „VICTORIA Seaways“ STBD pusėje 5 taške išmatuotų virpesių lygio grafikas
- 2.3.8 pav.** „VICTORIA Seaways“ kelto STBD pusės virpesių lygių grafikas pagal variklio sukčius
- 2.3.9 pav.** „VICTORIA Seaways“ kelto PORT pusės virpesių lygių grafikas pagal variklio sukčius
- 2.3.10 pav.** „ATHENA Seaways“ kelto STBD pusės virpesių lygių grafikas pagal variklio sukčius
- 2.3.11 pav.** „ATHENA Seaways“ kelto STBD pusės virpesių lygių grafikas pagal variklio sukčius

## TURINYS

ĮVADAS .....	8
1. LITERATŪROS APŽVALGA IR ANALIZĖ .....	9
1.1. Mechaniniai virpesiai .....	9
1.2. Virpesių skaičiavimo metodų apžvalga .....	13
1.3. Virpesių mažinimo būdai .....	14
1.4. Mokslinių straipsnių analizė .....	20
2. EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI IR TEORINIAI SKAIČIAVIMAI .....	27
2.1. Tiriamasis objektas .....	27
2.2. Eksperimentinis tyrimas .....	28
2.2.1. Virpesių matavimo būdo parinkimas .....	29
2.2.2. Tyrimo įrangos parinkimas .....	29
2.2.3. Virpesių matavimo taškų parinkimas .....	31
2.2.4. Virpesių lygio ir virpesių šaltinių identifikavimo metodika .....	34
2.2.5. Eksperimentinio tyrimo rezultatai .....	35
2.2.5.1. Šilumokaičio ir jo vamzdyno savųjų dažnių nustatymas .....	35
2.2.5.2. Šilumokaičio ir jo vamzdyno virpesių tyrimas kelto plaukimo metu .....	37
2.2.5.3. Variklio ir sraigto žadinamų virpesių dažnių nustatymas .....	41
2.3. Šilumokaičio ir jo vamzdyno tyrimo rezultatų peržiūra ir analizė .....	42
IŠVADOS .....	59
LITERATŪROS SĄRAŠAS .....	51
PRIEDAI .....	53

## ĮVADAS

Esant dideliems virpesiams ir jų rezonansams sumažėja mechaninis laivo patikimumas ir patvarumas, sudaromos nekomfortabilios sąlygos laivo įgulai ir keleiviams. Laivo visi mazgai ir sistemos turi būti patikimi visos kelionės metu ir tarp techninių apžiūrų bei aptarnavimų. Dėl šios priežasties dar laivo projektavimo stadijoje reikia modeliuoti ir analizuoti laivo virpesius.

Laive veikiantys mechanizmai ir mazgai yra virpesių ir rezonansų šaltiniai, todėl paskutiniu metu vis reikalaujama juos sumažinti ir ieškoma įvairiausių būdų. Visos naujos sistemos kuriamos, kad labiau sumažintų mechanizmų virpesių perdavimą laivo korpusui. Tokios sistemos kartu pagerina gyvenimo ir komforto sąlygas paprastuose laivuose.

Tyrimo problematika - keltų „Victoria Seaways“ ir „Athena Seaways“ aušinimo sistemos dalies padidintas virpesių lygis, kuris sukelia aušintuvo gedimus ir sistemos lūžius. Nežinoma, kas sukelia aušinimo sistemos virpesių padidėjimą paleidus pagrindinius variklius.

### **Darbo tikslas:**

Atlikti keltų „Victoria Seaways“ ir „Athena Seaways“ plokštelinio šilumokaičio ir jo vamzdyno virpesių tyrimus, skirtus padidintų virpesių priežasčiai nustatyti.

### **Darbo uždaviniai:**

- Atlikti mokslinių straipsnių ir kitų informacijos šaltinių apžvalgą ir analizę
- Sukurti eksperimento atlikimo metodiką
- Atlikti šilumokaičio ir jo vamzdyno virpesių matavimus
- Atlikti šilumokaičio ir jo vamzdyno virpesių analizę ir nustatyti padidintų virpesių priežastis
- Pateikti sprendimą virpesių lygio mažinimui

### **Tyrimo objektas:**

Keltų „Victoria Seaways“ ir „Athena Seaways“ plokšteliniai šilumokaičiai ir jų vamzdynai.

### **Tyrimo metodai:**

- Mokslinės literatūros analizė
- Stebėjimas atliekant eksperimentinį tyrimą
- Rezultatų analizavimas (grafinis ir skaitinis)

# 1. LITERATŪROS APŽVALGA IR ANALIZĖ

## 1.1 Mechaniniai virpesiai

Kietojo kūno pasikartojantys judesiai apie pusiausvyros padėtį yra vadinami mechaniniais virpesiais.

Sutrikdžius mechaninės sistemos pusiausvyrą, priklausomai nuo jos tipo ir ją apibūdinančių parametrų pobūdžio, gali atsirasti netik laisvieji ir priverstiniai virpesiai, bet ir kiti judėjimo režimai (parametriniai virpesiai, autovirpesiai ir kiti). Mechaniniai sistemų virpesiai yra mechaninio proceso nepageidaujami rezultatai, kurie lemia mašinų darbo patikimumą, konstrukcijų patvarumą ir pan. [2]

Pagrindinės virpesių matavimo bei analizės technologijos naudoja penkis virpesių parametrus [1.]:

- Amplitudė,  $x$ .
- Dažnis,  $f$ .
- Periodas,  $\phi$ .
- Virpesių signalo forma.
- Detalių tarpusavio sąveikavimo vidutinis poslinkis įvertinant jų dydį bei masę.

Amplitudė – svyruojančio dydžio kitimo matas fizikoje, parodantis dydžio vertės pokytį svyravimų metu.

Dydis įvertinantis įvykių pasikartojimą per laiko vienetą vadinamas dažniu (angl. *frequency*). Apskaičiuoti dažnį galima padalijus pasikartojančių įvykių skaičių per laiko ( $n$ ) tarpą iš skaičiuojamo laiko tarpo arba periodo ( $T$ ).

Taigi dažnis pagal apibrėžimą yra:

$$f = \frac{n}{t}, \quad (1)$$

čia  $f$  – sukimosi dažnis;

$n$  – apsisukimų skaičius;

$t$  – sukimosi periodas;

Laiko intervalas ar kampas skiriantis du įvykius vadinamas periodu.

Pagal dažnį virpesiai skirstomi:

- Labai žemo dažnio virpesiai 0- 2 Hz

- Žemo dažnio virpesiai 2-20 Hz
- Aukšto dažnio virpesiai virš 20 Hz

Pagal atsiradimo būdą virpesiai skirstomi:

- Laisvieji
- Priverstiniai
- Savaiminiai

Laisvieji virpesiai – tai svyravimai, kai materialus taškas išvestas iš pusiausvyros juda veikiamas tik pasipriešinimo (tamprumo) jėgos.

Priverstiniai virpesiai – tai virpesiai, kuriuos palaiko periodiškai kūną veikianti išorinė jėga.

Savaiminiai virpesiai (savaiame susižadinantys, autovirpesiai) - tai kūno virpesiai sužadinti pastovios, periodiškai nekintančios jėgos, kurie palaikomi pastovios energijos dydžio.

Priverstinių, savaiminių ir priverstinių virpesių dažniai neretai gali sutapti ir sudaryti virpesių rezonansą, kuris yra reiškinys priverstinai ir laisvieji svyravimai sutampa savo svyravimų dažniu ir susikaupia energijos perteklius bei smarkiai padidėja virpesių amplitudė.

Rezonansai kasdieniai reiškiniai, kurie skirstomi į naudingus ir žalingus. Naudingas būna tada kai reikia padidinti koncentruotos energijos kiekį ir svyravimų amplitudę. Nenaudingas jis būna kai dėl virpesių sutapimo jis gadina konstrukcijas mechanizmus ar konstrukcijas. Siekdami išvengti pavojingų rezonanso padarinių, konstruktoriai iš anksto apskaičiuoja sistemų bei atskirų įrenginių savąjį dažnį.

Nustatyta, kad dažniausiai laivo korpusas pažeidžiamas deformacijų ir įtempių, kuriuos sukelia žemo dažnio virpesiai. Taip pat žemo dažnio virpesiai sukelia didžiausią diskomfortą įgulai.

Pagal pasireiškimo pobūdį laive virpesiai gali būti skirstomi į dvi pagrindines grupes:

- Globalūs
- Lokalūs

Priklausomai nuo žadinamų virpesių, kuriuos sukelia varikliai, velenai, sraigtai ar jūros bangos, virpa laivo sijos, tai yra globalieji virpesiai. Lokalūs virpesiai pasireiškia kai atskira laivo konstrukcija ar mechanizmas rezonuoja.

Laivo projektavimo metu būtina įvertinti globalius virpesius.

Virpesius laivuose sukelia šie virpesių šaltiniai (1.1.1 pav.):

- Sraigtas (-ai)
- Variklis (-iai)

## Bangavimas

Sraigto veikimas, kuris sukelia slėgio svyravimus vandenyje perduodamus velenui ir galinei laivo korpuso daliai.

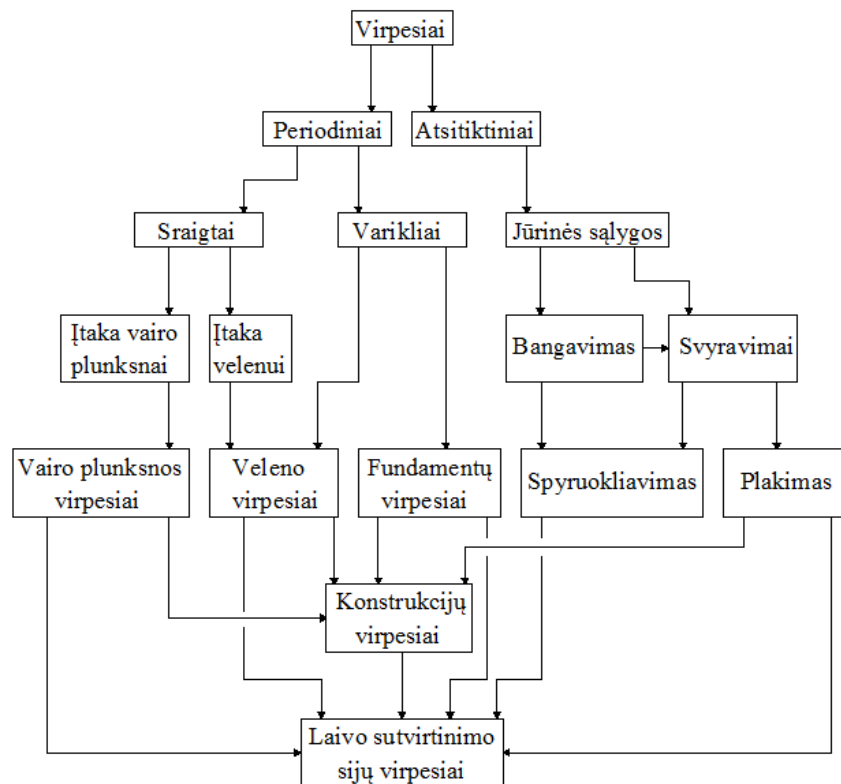
Būtina apskaičiuoti sraigto perduodamus virpesius laivo korpusui:

$$f = \frac{n_{sūk.} \cdot N}{60}, \quad (2)$$

čia  $n_{sūk.}$  – sraigto sūčiai, (aps./min)

$N$  – sraigto menčių skaičius, (vnt.)

Vidaus degimo variklio virpesius sukelia įvairūs mechanizmų sistemos ir elementai: alkūninio veleno mechanizmas, dujų skirstymo mechanizmai perdavimo elementai, oro pripūtimo mechanizmų veikimas (žr. 1.1.1 pav.). Įprastai vidaus degimo variklių žadinamų virpesių dažnis siekia 3- 30 Hz [4]. Virpesių lygis priklauso nuo variklio tipo ir sūkių. Projektuojant laivą ir prognozuojant variklio perduodamus virpesius laivo korpusui, žadinamų dažnių ir savybių informaciją paprastai pateikia variklio gamintojas.



1.1.1 pav. Laivo korpuso virpesių klasifikacija [4]

Paprastai matuojant virpesius, matuojamos absoliučiuųjų greičių kvadratinų vidurkių RMS  $V$  reikšmės (Root Mean Square – RMS), šis greitis yra tiesiog proporcingas virpesių energijai. Taip pat kartais matuojami virpesių poslinkiai ir virpesių pagreičiai. Panaudojus

Furjė transformacijas (Fast Fourier Transformation – FFT) išmatuotiems virpesiams gaunamas virpesių amplitudės ir dažnių priklausomybės grafikas, vadinamas dažnių spektru [6].

Moderniuose virpesių matavimo prietaisuose Furjė transformacijos (Fast Fourier Transformation – FFT), išmatuotiems virpesiams gaunamas virpesių amplitudės ir dažnių priklausomybės grafikas, vadinamas dažnių spektru, paprastai atliekamos automatiškai [7]. Tipinis veikiančio dyzelinio variklio dažnių spektras pavaizduotas (žr. 1.1.2 pav.). Jame galima pastebėti keletą pikų, šiuo atveju pavaizduotos virpesių harmonikos. 1-a harmonika apibūdina veikiančio variklio (alkūninio veleno sūkių) virpesių amplitudę. Kitos harmonikos, tai kartotiniai dažniai [6].

Paprastai dyzelinių variklių dažnių spektre sutinkamos 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 ir aukštesnės eilės harmonikos. Galima išvelgti minėtų harmonikų ryšį su virpesių forma [6]:

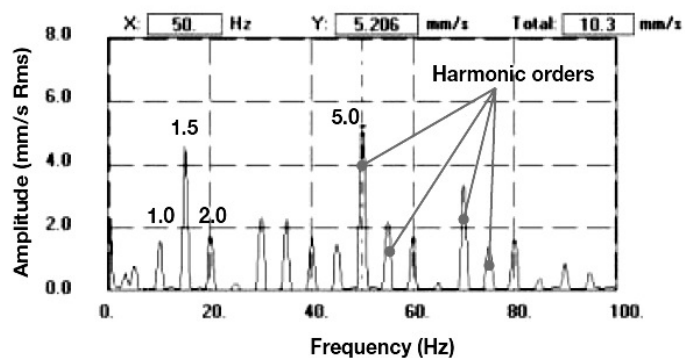
Harmonika 0,5 (dujų jėgų sukiamas disbalansas)- standaus kūno poslinkiai

Harmonika 1,0 (masės jėgos)- standaus kūno poslinkiai ir lenkimas

Harmonika 2,0 (masės jėgos)- lenkimas

Pusinės harmonikos 1,5; 2,5 ir t.t. (dujų jėgos)- sukimas

Neretai variklio kartotiniai dažniai sukelia įvairių konstrukcijų rezonansą. Jūros bangavimas paprastai sukelia labai žemo dažnio viso laivo korpuso virpesius (mažiau nei 2 Hz). Ramioje jūroje virpesių dažnis siekia vos 0,01 Hz. Tačiau šio tipo virpesiai neretai sukelia jūros ligą [4].



**1.1.2 pav.** Tipinis veikiančio dyzelinio variklio dažnių spektras [6]

Virpesių kriterijai skirstomi į tris grupes:

- triukšmo ribojimas žmogaus komfortui ir saugumui,
- virpesių ribojimas žmogaus komfortui ir saugumui,

- virpesių ribojimas užtikrinti mechanizmų ir korpuso stabilumui bei saugiam darbui [11].

Mechaninių virpesiai privalo būti apribojami pagal standartus:

- ISO 10816 (2009).
- ISO 2631 (1997).

## 1.2. Virpesių skaičiavimo metodų apžvalga

Virpesių klasifikavimas pagal dažnius (aukšto ir žemo) atitinka ir sprendimo metodų skirstymą. Paprastai pagal klasifikavimą į aukšto ir žemo dažnio virpesius naudojama kaip metodai skaičiuoti naudojama statistinė energijos analizė, o žemo dažnio virpesiams – baigtinių elementų metodas. Taip pat galimi ir mišrūs metodai siekiant panaikinti skaičiuojamų dažnių ribas [2].

Baigtinių elementų metodas (BEM) – skaitinis metodas, leidžiantis rasti apytikslius diferencialinių lygčių dalinėmis išvestinėmis ar integralinių lygčių sprendinius. Metodo esmė - sritis, kurioje ieškomas sprendimas, suskaidoma į dalis (baigtinius elementus). Tada daroma prielaida, kad kiekviename elemente nagrinėjamas nežinomasis kinta nesudėtingu dėsnio ir diferencialinė lygtis jame pakeičiama į algebrinių lygčių sistemą. Sujungus visų elementų sistemas gaunama sistema, kurią išsprendus gaunamas atsakymas. [11]

Projektuojant mašinų elementus, pastatus, statinius, automobilių, laivų ir lėktuvų korpusus ir kt. sprendžiami įvairūs mechanikos uždaviniai.

BEM galima spręsti šiuos mechanikos uždavinius:

Statikos uždavinys – įtempių ir deformacijų būvio nustatymas tampriai arba plastiškai deformuotuose kūnuose;

Modalinis uždavinys – mechaninės sistemos savųjų dažnių ir savųjų formų nustatymas

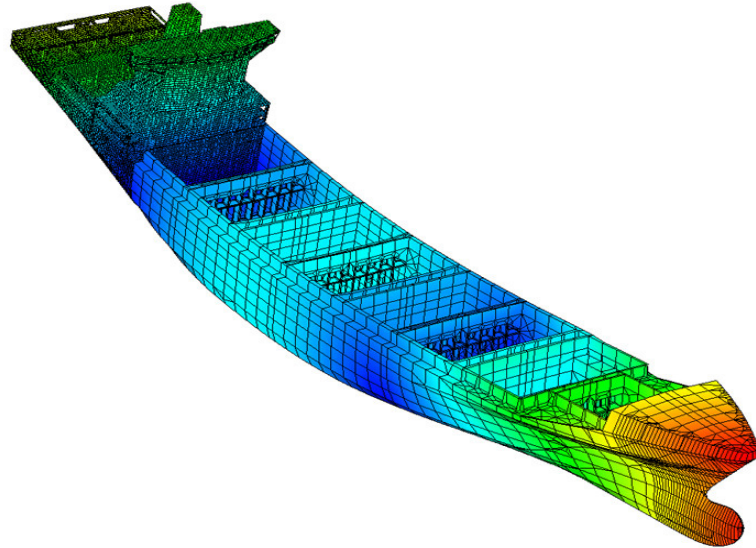
Dinamikos uždavinys – mechaninės sistemos elgsena veikiant harmoninėms apkrovoms esant pereinamajam arba nusistovėjusiam režimui;

Stabilumo uždavinys – kritinės apkrovos stabilumą praradusio mechaninės sistemos formos nustatymas;

Kontaktuojančių kūnų uždavinys – įtempių ir deformacijų būvio nustatymas kūnų kontakto vietose;

Nuovargio uždavinys – mechaninės sistemos ilgaamžiškumo nustatymas veikiant ciklinėms apkrovoms.

Sparčiai vystantis kompiuterinėms technologijoms galima daug greičiau atlikti viso laivo virpesių analizę. Trimatis baigtinių elementų metodas (FEM – finite element method) – tai vienas iš pagrindinių būdų nustatyti laivo virpesių charakteristikas (žr. 1.2.1 pav.). Pasinaudojus jomis galima apskaičiuoti viso laivo ir atskirų jo elementų rezonansinių dažnių pikus bei suprojektuoti nerezonuojantį laivą dirbant varikliams bei kitiems elementams.



**1.2.1 pav.** Hidroelastinės vibracijos analizė baigtinių elementų metodu, kompiuterizuotu būdu. [11]

### **1.3. Virpesių mažinimo būdai**

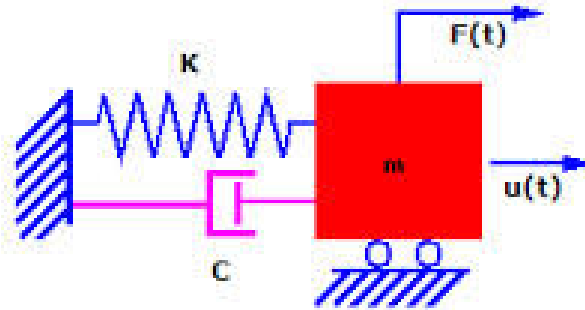
Pagrindiniai apsaugos nuo vibracijų būdai: vibracijų sumažinimas šaltinyje, vibroizoliacija, vibrogesinimas, vibrodemferavimas. Vibracijų mažinimas jų kilimo šaltinyje – efektyviausias būdas, jei vibracijos nėra technologinio proceso dalis. [2]

*Mašinos vibroizoliacija* įgyvendinama pastatant įrengimus ant specialių pamatų atraminių pagalvių (žr. 1.3.1 pav.).



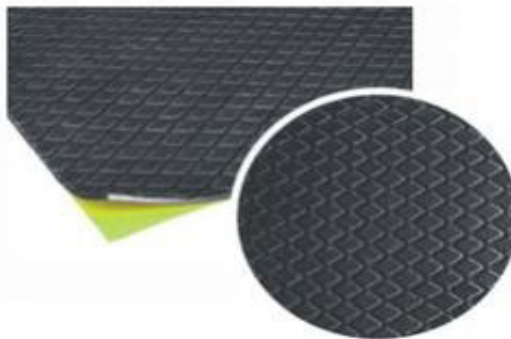
**1.3.1 pav.** Variklių pamatinė atraminė pagalvė [2]

*Vibrogesinimas* pasiekiamas didinant energijos nuostolius svyravimo sistemoje. Įgyvendinamas taikant papildomas mases, standumo briaunas ir panaudojant specialius vibrogesintuvus (žr. 1.3.2 pav.). [1]



**1.3.2 pav.** K,C – slopinimo įrenginys (didinantis energijos nuostolius)[1]

*Vibrodemferavimas* taikomas didinant vidinę trintį (parenkant specialias ketaus markes) ir paviršinę trintį (padengiant paviršius tamprių medžiagų sluoksniu(žr. 1.3.3 pav.).



**1.3.3 pav.** Vibro izoliacinė medžiaga, vibruojantiems paviršiams dengti [2]

Virpesių mažinimo būdus galima suskirstyti į:

- Pasyvius
- Aktyvius

Pasyvūs virpesių mažinimo būdai laivo konstrukcijose gali būti skirstomi:

1. Virpesių mažinimas virpesių šaltinio vietoje. Paprastai tai slopinimo elementų panaudojimas, taip pat atramų ir aplinkinių konstrukcijų tobulinimas.
2. Virpesių sklidimo laivo korpusu mažinimas.
3. Virpesių mažinimas konkretaus paveikto elemento vietoje. Slopinimo elementų panaudojimas.

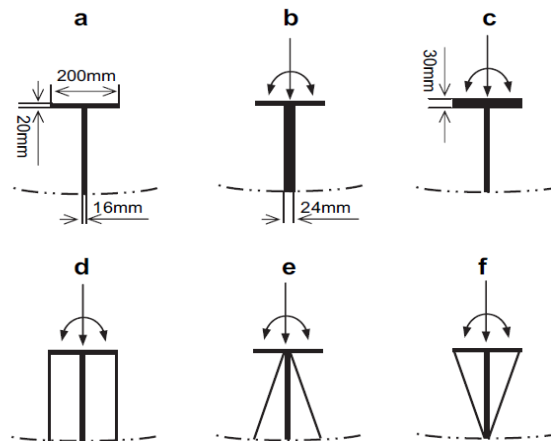
Variklio virpesius, pagal jų pasireiškimo vietą, galima suskirstyti į dvi grupes:

1. Vidiniai virpesiai. Tai variklio vidinių tarpusavyje sujungtų dalių virpesiai.
2. Išoriniai virpesiai. Tai viso variklio bloko virpesiai, kuriuos sukelia disbalanso

jėgos ir momentai.

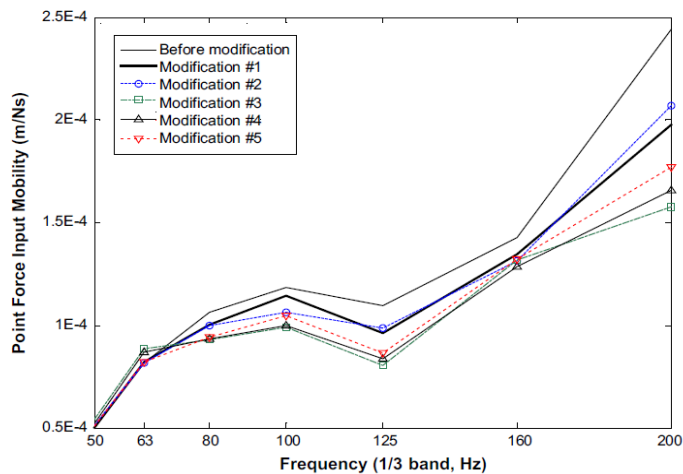
### Virpesių mažinimas keičiant korpuso konstrukciją variklio vietoje

Energijos perdavimas nuo šaltinio į laivo korpusą gali būti kontroliuojamas keičiant konstrukcijas, kurioje yra virpesių šaltinis, standumą. Tian Ran Lin, Jie Pan, Peter J. O'Shea ir Chris K. Mechefske darbe „A study of vibration and vibration control of ship structures“ pasiūlytos penkios korpuso sijų modifikacijos (žr. 1.3.4 pav.) ir virpesių pokyčio analizė.



**1.3.4 pav.** Laivo korpuso sijų modifikacijos; a) prieš modifikaciją; b) 1-as variantas; c) 2-as variantas; d) 3-ias variantas; e) 4-as variantas; f) 5-as variantas. [16]

Nustatyta, kad visos modifikacijos reikšmingų skirtumų virpesių poslinkių greičiams neturėjo iki 63 Hz. Tačiau didėjant virpesių dažniui, modifikacijų nauda išryškėja (žr. 1.3.5 pav.).

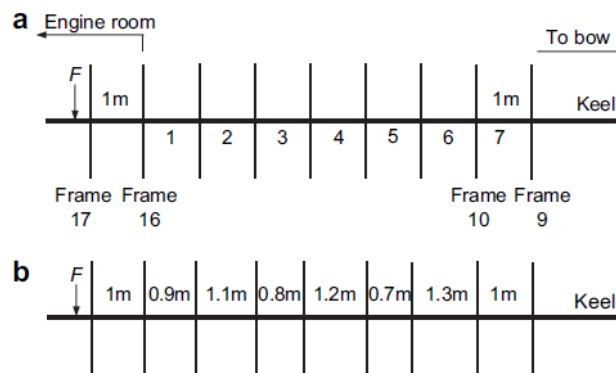


**1.3.5 pav.** Virpesių grafikai keičiant korpuso sutvirtinimus [16]

## Virpesių sklidimo kontrolė

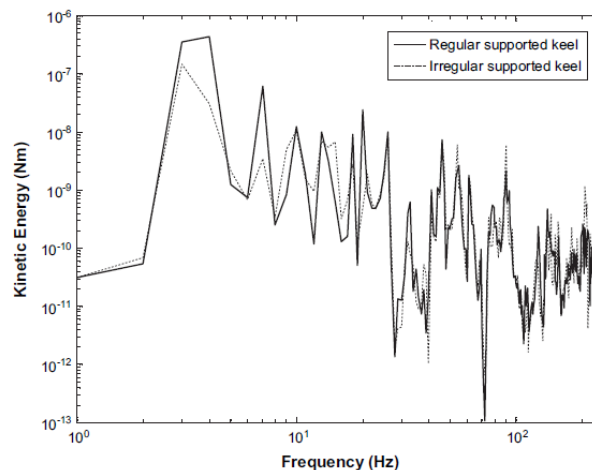
Pasyvioji virpesių kontrolė naudota, kaip tradicinis problemos sprendimo būdas, tačiau jos veiksmingumas yra dalinai ribotas esant žemiems virpesių dažniams. Dėl šios priežasties imta ieškoti naujų sprendimo būdų, vienas iš jų – aktyvioji virpesių kontrolė. [7]

Kaip matyti 1.3.5 pav. korpuso modifikacijos yra neveiksmingos prieš žemo dažnio virpesius. Tradiciniai slopinimo elementai taip pat – neveiksmingi. Tian Ran Lin, Jie Pan, Peter J. O'Shea ir Chris K. Mechefske darbe „A study of vibration and vibration control of ship structures“ nagrinėja virpesių sklidimą korpuso sutvirtinimais.



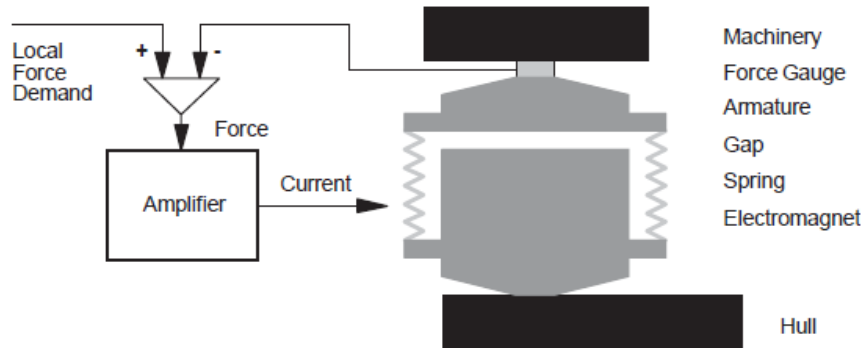
**1.3.6 pav.** Kylio sutvirtinimo variantai: a) tolygiai išdėstyti španhantai; b) netolygiai išdėstyti španhantai [16]

Nustatyta, kad netaisyklingai išdėsčius pagrindinius sutvirtinimus (pvz. špantus) galima susilpninti žemo dažnio virpesių bangų sklidimą. Buvo sumodeliuoti du kylio sutvirtinimo variantai, kai špantai išdėstyti vienodais ir skirtingais atstumais (žr. 1.3.6 pav.). 1.3.7 pav. galima pastebėti, kad prie žemų dažnių energijos perdavimas korpusui yra žymiai mažesnis kai španhantai išdėstyti skirtingais atstumais.



**1.3.7 pav.** Kinetinės energijos ir dažnių grafikas [16]

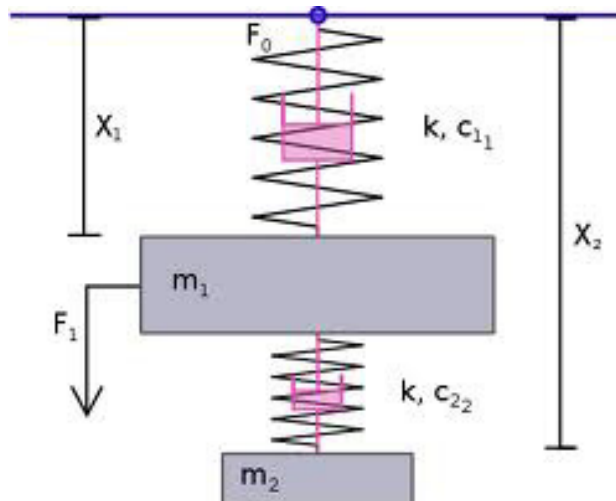
S. Daley, F.A. Johnson, J.B. Pearson, R. Dixon savo darbe „Active vibration control for marine applications“ aprašo aktyviają virpesių slopinimo sistemą „Smart Spring“. Tai sistema, kurios pagrindą sudaro pasyvios virpesių kontrolės (spyruoklės) ir elektromagneto kombinacija (žr. 1.3.8 pav.).



**1.3.8 pav.** Pasyvios vibracijų kontrolės ir elektromagneto kombinacija [13]

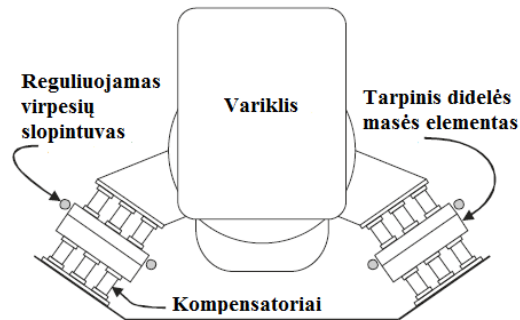
Srovė elektromagneto ritėje yra reguliuojama valdymo pultu ir davikliu, tai užtikrina, kad sukuriama jėga pilnai atsveria išorines jėgas. Tokia sistema puikiai gali būti panaudota pagrindinių ir pagalbinių variklių tvirtinimui.

Laivuose, kuriems keliami aukšti virpesių ir garso apribojimai (pvz. kariniai, mokslinių tyrimų laivai), plačiai paplitusi dvipakopė virpesių slopintuvų sistema. Tokią sistemą sudaro du komplektai paprastų gumos kompensatorių, tarp kurių montuojama tarpinis didelės masės elementas, kuris smarkiai slopina perduodamus virpesius laivo konstrukcijai. Ant tarpinio elemento dar matuojamas reguliuojamas virpesių slopintuvas, tai mažesnės masės plokštelės sumontuotos ant reguliuojamų strypelių (žr. 1.3.9 pav.).



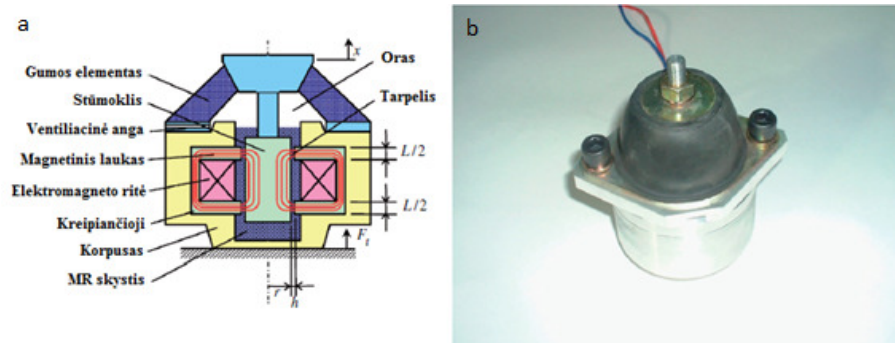
**1.3.9 pav.** Dvipakopė virpesių slopinimo sistema [13]

Reguliuojant juos yra keičiamas slopintuvo savasis dažnis, kuris sąveikauja su virpesių žadintojo keliamu dažniu. Sistemos trūkumas, kad slopintuvas veikia tik siaurame dažnių intervale, t.y. jei keičiamas pvz. variklio greitis slopintuvas turi būti reguliuojamas iš naujo. Dvipakopė kompensatorių sistema plačiai naudojama povandeniniuose karo laivuose pagrindinių ir pagalbinių variklių bei mechanizmų montavimui (žr. 1.3.10 pav.).



**1.3.10 pav.** Dvipakopė kompensatorių sistema „Collins“ klasės povandeniniuose laivuose [16]

Pakankamai neseniai buvo sukurti pusiau aktyvūs virpesių kompensatoriai, kurių vidus užpildytas magnetoreologiniu (MR) skysčiu. Tokios sistemos schema pavaizduota pav. 1.4.11 MR kompensatorius susideda iš gumos elemento ir magnetoreologinio skysčio talpos. MR skysčio talpa susideda iš stūmoklio, elektromagneto ritės, kreipiančiosios ir korpuso. Veikiant elektromagnetui, jo sukuriamas laukas keičia magnetoreologinio skysčio savybes (takumą). Kintant skysčio savybėms, kinta ir kompensatoriaus kuriama pasipriešinimo jėga.

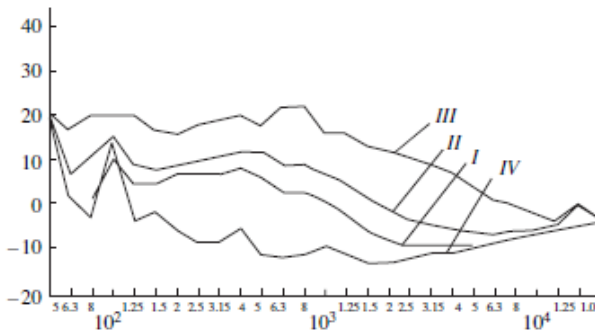


**1.3.11 pav.** MR kompensatorius: a) schema, b) nuotrauka [2]

## 1.4. Mokslinių straipsnių analizė

Rašomo baigiamojo darbo literatūros analizėje apžvelgiu mokslininkų tyrimus susijusius su laivų virpesiais, tyrimų metodikas ir naudotą įrangą su kuria buvo atlikti tyrimai. Kaip jau miniu šiame darbe laivo virpesiai yra vienas svarbesnių aspektų, į kuriuos reikia atsižvelgti projektuojant laivus.

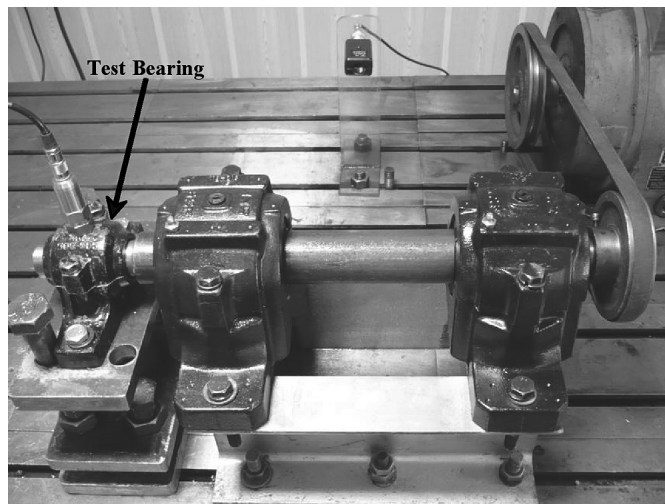
E. B. Kudashev atlikinėdamas tyrimą „Measurement of Wall Pressure Fluctuations in the Presence of Vibrations Induced by a Turbulent Flow“, kuriame nustatinėjo vibracijas sukiamas turbulentinio oro slėgio į laivo korpusą. Tyrimas buvo atliekamas laboratorijoje naudojantis tiksliu modeliu (1:100), keliant oro srautą vėjo tunelyje. Oro srauto greitis buvo pasirenkamas toks, kad būtų sukiamas spaudimas į modelio korpusą kaip ir vandens slėgis į tikro laivo korpusą.



**1.4.1 pav.** Turbulentinio slėgio ir elektrinių impulsų spektras vėjo tunelyje: I  $v=15$  m/s, II  $v=20$  m/s, III  $v=30$  m/s, IV  $v=0$  m/s. [17]

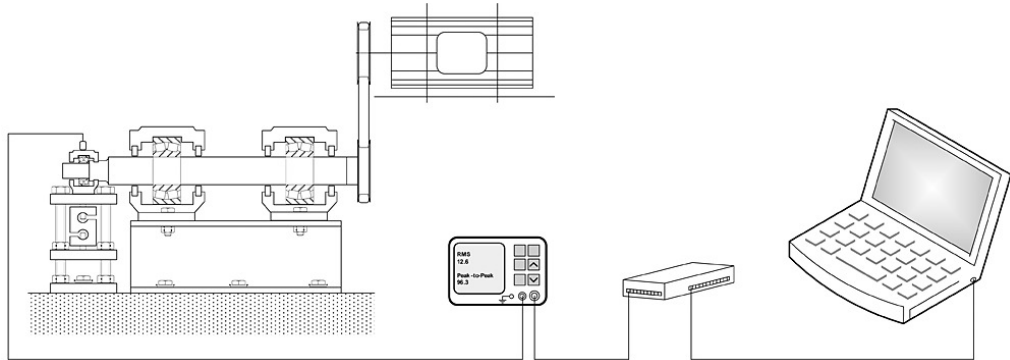
Laivo korpuse buvo išdėstyti piezoelektriniai elementai PE-7T2, kuriais buvo nustatomi laivo korpuso virpesiai ir keičiami elektriniais impulsais. Impulsiniais signalais ir kompiuteriniai įranga sudaryti grafikai keičiant oro srauto slėgį (1.4.1 pav.). Virpesiams mažinti buvo nuspręsta naudoti kompensacinius slopintuvus. [17]

M. Behzad, A. Alandi-Hallaj, A. Rohani Bastami, D. Mba, B. Eftekharnejad and B. Charnley tyrė guolių defektus, kurie sukelia vibracijas ir aprašė straipsnyje: „Defect size estimation in rolling element bearings using vibration time waveform“. Tyrimas buvo atliekamas sumontavus imitatorių (1.4.2 pav. ir 1.4.3) ir pasirinkus guolius su defektais.

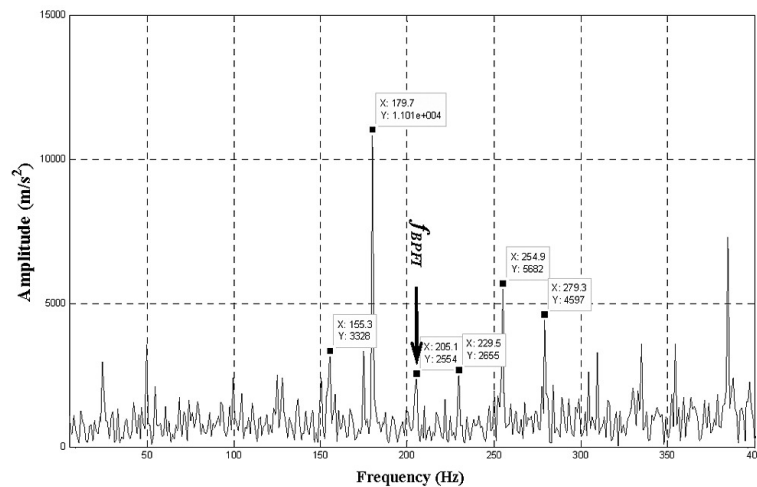


**1.4.2 pav.** Eksperimento objektas – imitatorius [18]

Virpesiams matuoti pasirinktas pjezoelektrinis jutiklis SEN-10293, sujungtas su kompiuteriu, kuriame braižomi grafikai ir nustatinėjami virpesių pikai (1.4.4 pav.). Visa tai sujungiama į vieną matavimo liniją (1.4.3 pav.).



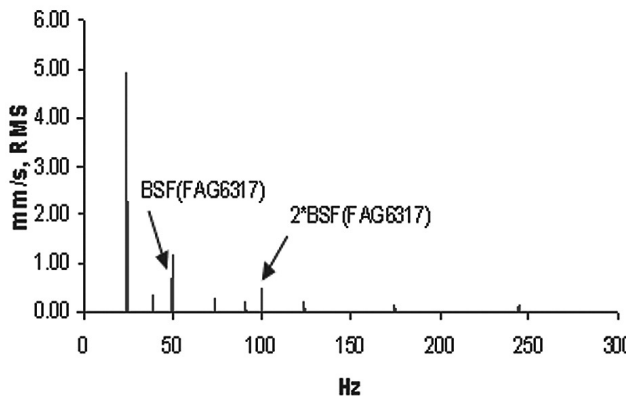
**1.4.3 pav.** Matavimo linijos jungimo schema [18]



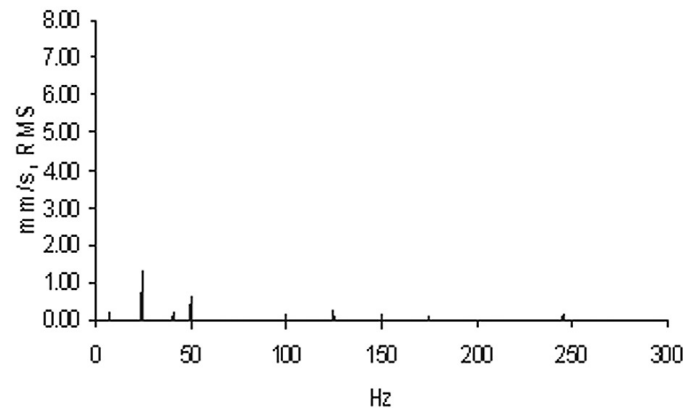
**1.4.4 pav.** Virpesių spektro išsidėstymas esant guolio defektui [18]

Eksperimento rezultatai parodė, kad virpesių dažnis, amplitudė ir defekto dydis yra išdėstyti pagal tiesinę koreliaciją.

Tiriamajame darbe “Fault diagnosis of an electro-pump in a marine ship using vibration condition monitoring“ H. Ahmadi ir K. Mollazade nustatinėjo jūrinio laivo elektrinio siurblio gedimus tirdami jo vibracijas, žinodami pagal standartą ISO 10816-1 galimą virpesių amplitudę, jie pjezoelektriniu testeriu „VMI-102 model“, nustatė beveik du kartus didesnę virpesių amplitudę 5mm/s ir dažnį. Išardžius variklį buvo nustatytas guolio gedimas ir jį suremontavus (pakeitus) buvo vėl išmatuoti siurblio virpesiai, kurių amplitudė siekė, 1,28mm/s (1.4.5 pav.). [19].



a)

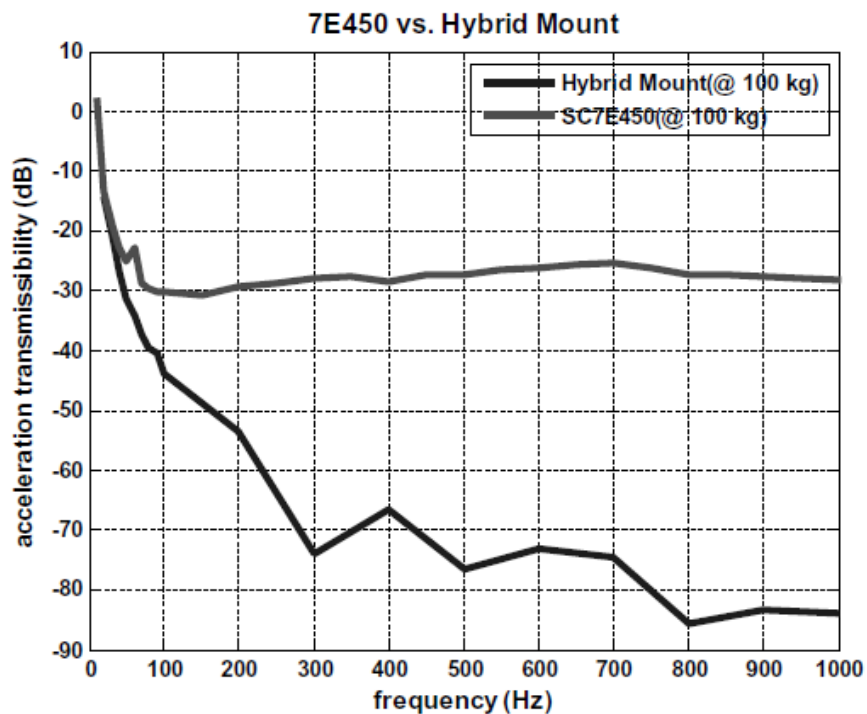


b)

**1.4.5 pav.** Virpesiai esant gedimui ir pakeitus sugedusį guolį a) – sugėdusio guolio grafikas, b) – naujo gero guolio grafikas[19]

Tyrimo metu nustatytas guolio gedimas, vėliau naudojantis standartais ir kitais moksliniais tiriamaisiais darbais nustatyta, kad guolis dirbo be tepimo. Dėl trinties dirbant metalas į metalą išsibalansavo.

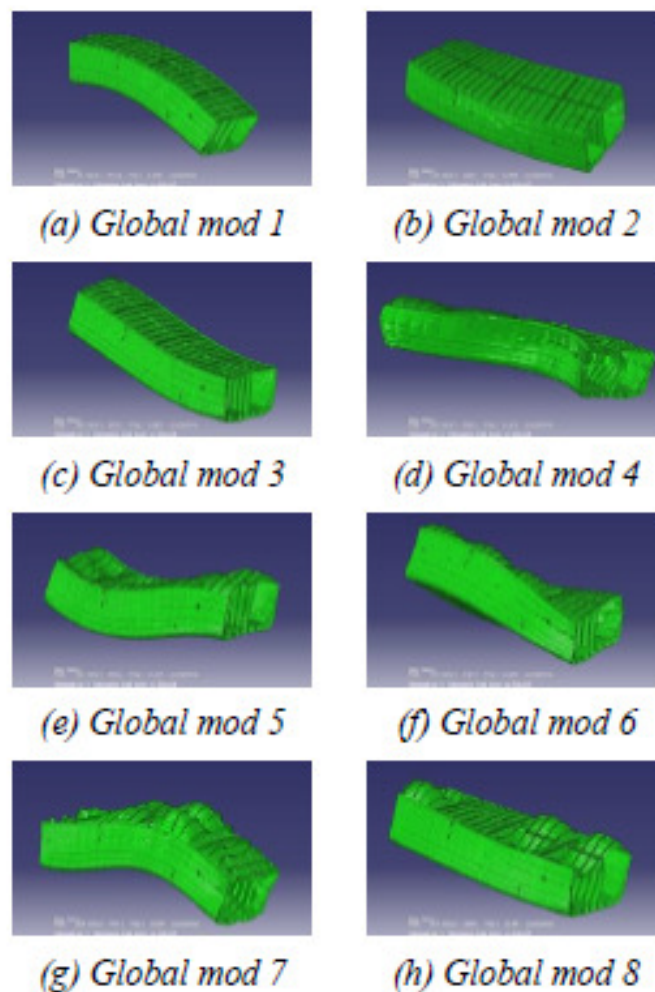
Korėjos laivų statytojai ir mokslininkai vadovaujami Seok-Jun Moon atliko tyrimą ir parašė straipsnį apie kariniuose laivuose naudojamus pasyvius svyravimų slopintuvus, kurie yra žemo dažnio ir didelės masės. Jie atliko bandymus su pasyviais masių slopintuvais SC7E450 ir aktyviais HYBRIDMOUNT (1.4.6 pav). [20]



**1.4.6 pav.** Vibracijos sugėrimas hibridiniu ir pasyviuoju slopintuvais [20]

Bandymai atlikti su virpesių imitatoriumi, slopintuvais ir virpesių matuokliu EXTECHSDL800, laboratorijoje. [20]

Tanklaivio virpesių tyrimas baigtinių elementų metodu, naudojantis modeliavimo ir simuliacijos programomis, atliktas siekiant suprasti virpesių priežastis dideliuose laivuose. Sumodeliavus laivą kompiuterine programa buvo nustatyti laivo savieji dažniai ir leido projektavimo metu daryti laivo konstrukcinius pakeitimus, dėl kurių sumažėja laivo vibracija. “Finite element analysis of global ship vibrations“ straipsnio autorių tikslas buvo tanklaivio vibracijų nustatymas pagal modeliavimo programas palyginimas su realaus laivo virpesiais, bei įvertinamos projektavimo klaidos. Modalinio metodo tyrimo metu, programa HYPERMESH buvo nustatyti 8 laivo virpesių formos prie atitinkamų rezonuojančių dažnių (1.4.7 pav.). [20]

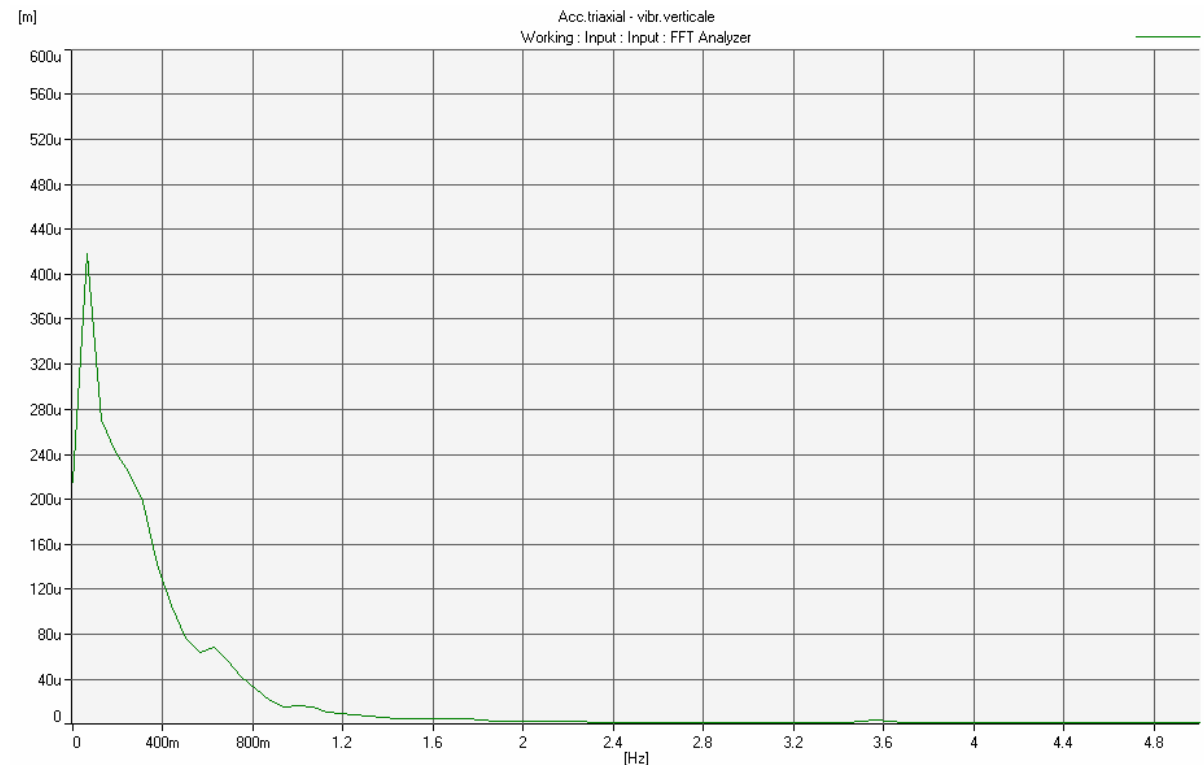


**1.4.7 pav.** Tanklaivio cilindrinės dalies virpesių formos [20]

Atlikus bandymus ir matavimus, bei juos palyginus nustatyta apie 30% virpesių duomenų neatitikimas, tuomet buvo nustatyti ir galimi laivo gedimai, bei pasiūlyta projektinių sprendimų kaip jų išvengti.

”The Analysis of Ship's Hull Structure Using Vibration Measurements at Sea“ straipsnyje autorius Mihail Pricop aptaria laivo virpesių šaltinius, atlieka bandymus plaukiančiame laive, įvertina virpesius, nes laivas yra dažnai gendantis (skilinėja korpusas), sukelia nemalonų ir kenkiantį jausmą laivo ekipažui. Gauti rezultatai (1.4.8 pav.) nepatvirtino laivo blogo funkcionalumo. Atliekami matavimai buvo prietaisais akselerometrais DeltaTron 4506 and 752A 12x, abu buvo prijungti su Bruel&Kjaer , Machine Diagnostics Toolbox 9727. [22]

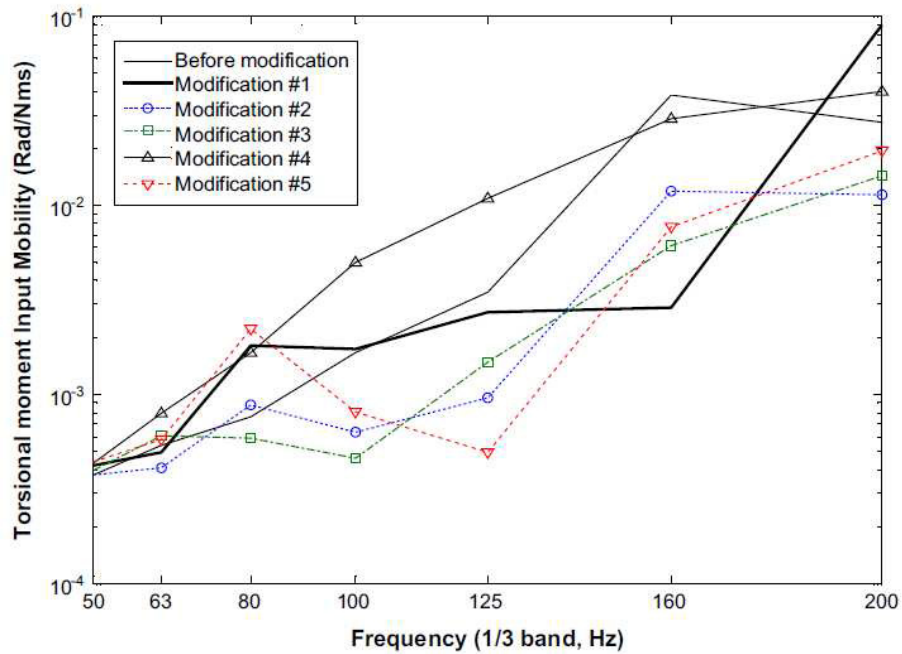
“VIBRATION CONTROL OF COMPLEX SHIP STRUCTURES“ MITU DANIELA – ELENA straipsnyje sprendžiama problema su laivo sijomis, ir perdidelė laivo vibracija, kuri neatitinka Germanisch Loyd reikalavimų. Buvo imtasi atlikti laivo modeliavimą programine įranga MSC/NASTRAN, baigtinių elementų metodu. Tuomet nustatyta, kad 30 m laivas stipriai vibruoja dėl neteisingai suprojektuoto variklio tvirtinimo pagrindo sijų. Tuomet nusprendė modeliavimo programoje pakeisti sijas ir sijų konstrukciją, padarius naują modalinę analizę laivo virpesiai sumažėjo (1.4.9 pav.) dėl pakeistos laivo sijų konstrukcijos.



**1.4.8 pav.** Įgulos patalpose esanti vibracija [22]

PULSE 12 prietaisu buvo atliekamas virpesių tyrimas besisukančioms detalės, nustatomos virpesių formos, bei galimi gedimai. Simuliacija buvo vykdoma programa ANSYS 13.0. “SIGNAL PROCESSING WAVELET TECHNIQUES IN VIBRATION

ANALYSIS“ straipsnis įrodo, kad simuliacijos programomis gauti rezultatai atitinka eksperimentiniu keliu gautus rezultatus.



**1.4.9 pav.** Vibracijų sukimo momentai laivo variklių skyriuje prieš modifikacijas ir po jų [22]

Analizuojant mokslininkų atliktus tyrimus ir parašytus straipsnius įvertinau laivo virpesių svarbą laivo būklei, susipažinau su naudota įranga, kuria galima analizuoti virpesius, bei juos modeliuoti. Laivo aušinimo sistemos šilumokaičio veikimo trikdžių, bei esamų gedimų analizei pasirinkti virpesių tyrimai yra tinkama kryptis, nes analizuotuose informacijos šaltiniuose visos iškeltos panašios problemos išspręstos pasinaudojant virpesių analizės metodus, bei simuliuojant modalinę analizę.

## 2. TEORINIAI IR EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI

2014 m. vasario mėn. 21-23 dienomis reiso metu Klaipėda-Kylis-Klaipėda buvo atlikti kelto „Athena Seaways“ plokštelinio šilumokaičio ir aušinimo sistemos vamzdyno virpesių dažnio ir virpesių lygio matavimai. Pasinaudojus kelte archyvuojama technine dokumentacija, buvo surinkta informacija apie laivo variklio bei sisteminius techninius parametrus.

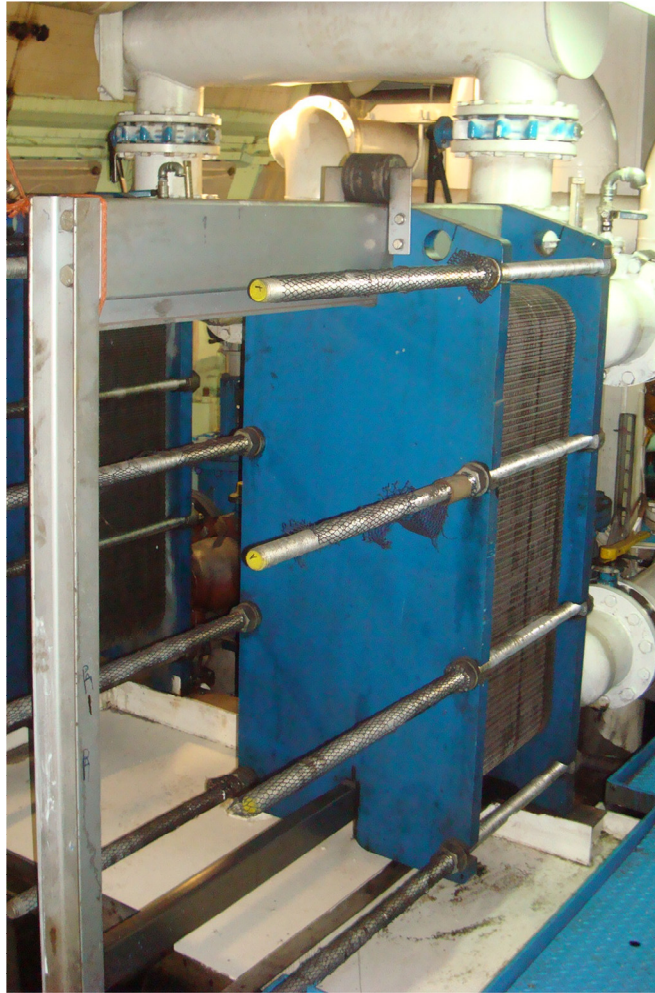
### 2.1. Tyrimo objektas

AB "DFDS Seaways" laivai „Victoria Seaways“ ir „Athena Seaways“ – tai vieno gamintojo pastatyti ro-ro tipo keltai naudojantis analogiškomis technologijomis, medžiagomis ir projektais. 199 metrų ilgio ro-ro tipo keleiviniai keltai, pastatyti 2009-2012 metais. Kelte sumontuoti du pagrindiniai WARTSYLA 12V/466 tipo varikliai, kurių kiekvieno galingumas siekia 12000 kW. Keltas „Athena“ 3 kartus per savaitę plaukia maršrutu (keltų liniją) Klaipėda-Kylis-Klaipėda, „VICTORIA Seaways“ (2.1.1 pav.) plaukioja Klaipėda-Karlhamnas-Klaipėda. Keleiviams įrengtos 521 vietos kajutėse bei salone (sėdimos vietos).

Tyrimo objektas- keltų pagrindinių variklių aušinimo sistemos ir šilumokaičiai (2.1.2 pav.). Kelto mašinų skyriuje tarp pagrindinių laivo variklių sumontuota aušinimo sistema su dviem tepalo – jūros vandens šilumokaičiais. Padidintas virpesių lygis pasireiškia visame aušinimo sistemos vamzdyne bei šilumokaičiuose, kurie sugenda. Dėl variklio aušinimo svarbos jis turi būti patikimas ir veikti viso eksploatavimo metu. Aušinimo sistemos virpesių lygis – amplitudė padidėja sumažinus variklių alkūninių velenų sukimosi greičius.



2.1.1 pav. AB „DFDS Seaways“ laivas „Victoria“



**2.1.2 pav.** Šilumokaičiai kelte „VICTORIA Seaways“

Šilumokaičio SONDEX S41 – IS parametrai:

- Galingumas 1400 kW;
- Aušinimo plotas 67,73 m<sup>2</sup>;
- Aušinamo tepalo pralaidumas 93,5 l esant 8 bar. slėgiui;

## **2.2. Eksperimentiniai tyrimai**

Šilumokaičio ir jo vamzdyno virpesių lygio tyrimo metodika skirta:

- Išmatuoti ir įvertinti bendrą šilumokaičio ir jo vamzdyno virpesių lygį (vibroaktyvumą), turinčio įtakos tiriamosios įrenginio darbo patikimumui;
- Nustatyti išorinius šaltinius žadinančius virpesius.

Tiriamą šilumokaičio ir jo vamzdyno virpesių lygio tyrimo metodiką sudaro šios dalys:

- Šilumokaičio ir jo vamzdyno virpesių matavimo būdo parinkimas.
- Šilumokaičio ir jo vamzdyno virpesių energijos matavimo priemonės parinkimas.
- Matavimo taškų ant tyrimo objektų parinkimo metodika.
- Šilumokaičio ir jo vamzdyno virpesių lygio – vibroaktyvumo įvertinimo metodika.
- Šilumokaičio ir jo vamzdyno padidinto intensyvumo virpesių židinių identifikavimo metodika.

### **2.2.1. Virpesių matavimo būdo parinkimas**

Apžiūrėjus laivo šilumokaitį ir jo vamzdyną ir įvertinus jo tvirtinimo būdus – nustatyta, kad objekte nėra besisukančių ir virpesius galinčių sukelti židinių, todėl tyrimo objektų virpesių lygio matavimus galima atlikti netiesioginiais matavimais. Pasirinktas virpesių lygio matavimo būdas grindžiamas įrenginių rotorių atraminių slydimo riedėjimo guolių virpesių energijos (virpesių lygio) matavimu, leidžia išmatuoti ir kokybiškai įvertinti įrenginių virpesių priežastis :

- Rotorių išsibalansavimą;
- Velenų bendraašiško nuokrypius;
- Defektus įvairių tipų riedėjimo ir hidrodinaminiuose slydimo guoliuose;
- Išdilimus įrenginio elementų porose;
- Įrenginio tvirtinimo pamato defektus;
- Įrenginio tvirtinimo defektus ir netikslumus;
- Kitus virpesių šaltinius.

Virpesių žadinimo šaltiniai ir jų prastas slopinimas turi įtakos įrenginio ilgaamžiškumui ir patikimumui eksploatacijos metu.

Įrenginių elementų žadinamo virpesių lygio ir virpesių priežasčių identifikavimo metodika pagrįsta virpesių analizėmis:

- Absoliučių virpesių greičio spektrine analize;
- Absoliučių virpesių greičio spektro kitimo laike grafikinę analize;
- Absoliučių virpesių  $V_{RMS}$  greičių kvadratinio vidurkio lyginimas su standartinėmis normomis iš pateiktų ISO 10816;

## 2.2.2. Tyrimo įrangos parinkimas

Matavimo įranga pasirinkta profesionali skirta įvairių įrenginių defektavimui, jų virpesių lygio nustatymui, atliekanti kelias funkcijas iškart, taip pat turinti duomenų bazę. Duomenų bazės funkcija labai palengvina ir pagreitina darbą. Keltuose „Seaways Athena“ ir „Seaways Victoria“ šilumokaičio ir jo vamzdyno virpesių lygio matavimams buvo pasirinkta vienoda ADASH A4400 pav. 2.2.1 virpesių signalų analizatorius (žr. priedai). Prietaiso pasirinkimą įtakojo kriterijai:

- Galimybė matuoti bendrą mašinos atramų absoliučiuųjų virpesių lygį išreikštą per absoliučiuųjų greičių kvadratinį vidurkių  $V_{RMS}$  reikšmes ir jas palyginti su tarptautinio ISO 10816 rekomenduojamomis virpesių reikšmėmis;
- Lygiagrečiai veikiančys procesoriai užtikriną spartų signalų apdorojimą ADASH A4400 virpesių signalų analizatoriuje.



**2.2.1 pav.** ADASH A4400 virpesių signalų analizatorius su Wilcoxon 797 jutikliu

Kadangi matavimo prietaiso saugomų duomenų kiekis yra ribotas, jų perkėlimui iš matavimo įtaiso į kompiuterį naudojama programinė įranga DDS 2011 (Digital Diagnostics System). Kurios pagalba galima lengvai analizuoti, apdoroti, įvertinti bei apdoroti virpesių diagnostikos duomenis.

Eksploatuojant laivą įprasta, kad veikia įvairių rūšių ir dydžių įrenginių, kurie gali būti nepageidaujamų įvairių dažnių virpesių žydiniai. Virpesių paplitimo intervalas yra labai platus.

Absoliučiuųjų virpesių energijai fiksuoti pasirinkti virpesių pagreičių jutikliai, nes:

- Platus matuojamų virpesių dažnių intervalas;
- Platus matuojamų virpesių amplitudžių intervalas;
- Didelis matavimo jautrumas;
- Nedideli jutiklio gabaritiniai matmenys;
- Patogus jutiklio montavimas;
- Galimybė naudoti su virpesių signalų analizatoriumi ADASH A4400

Kadangi matavimai atliekami ant dažytų metalinių paviršių, matavimams puikiai tiks pjezoakselerometrinis virpesių pagreičių jutiklis Wilcoxon 797 , kuris komplektuojamas su ADASH A4400.

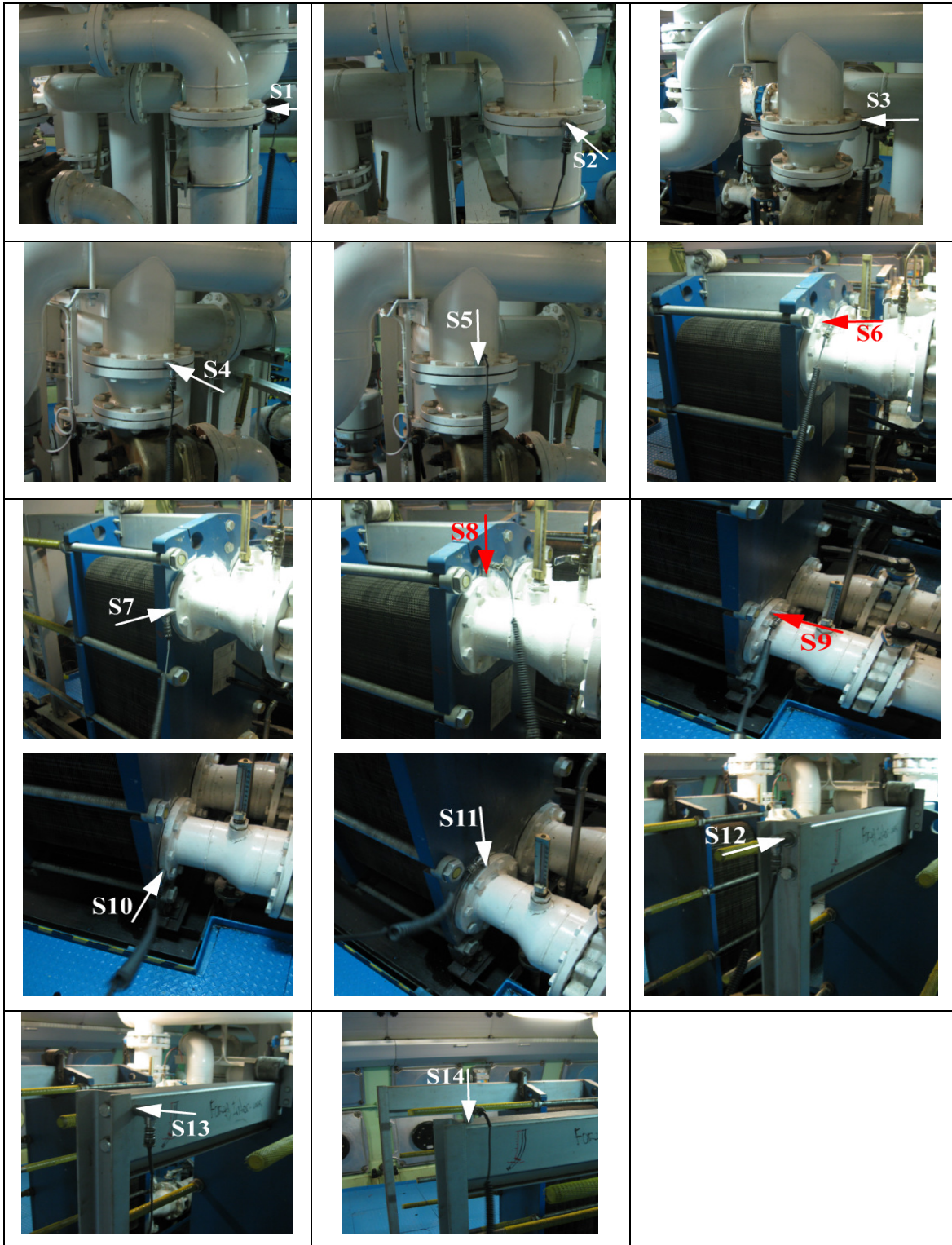
### 2.2.3. Virpesių matavimo taškų parinkimas

Prieš atliekant matavimus jau buvo žinoma, kad matavimų objektas, šilumokaitis ir jo vamzdynas, nėra virpesių šaltinis. Todėl matavimo taškai buvo pasirinkti pagal tarptautinį standartą ISO 10816.

Remiantis ISO 10816 standarto rekomendacijomis pjezoelektrometrinis jutiklis su magnetu tvirtinamas ant vietų, kur būtų galima išmatuoti virpesius trimis kryptimis (žr. 2.2.4 pav.). Kadangi eksperimento objektas neturi besisukančių rotorių, velenų ir guolių, kurie gali būti virpesių židiniai, nuspręsta jog virpesius sukelia išoriniai veiksniai. Logiškiausi įmanomi veiksniai galėtų būti vidaus degimo varikliai sujungti vamzdynu su šilumokaičiais, išcentrinis alyvos filtras (centrafūga). Todėl vamzdyno ir šilumokaičio matavimams parinktos vietos yra vamzdyno alkūnių ir galinių padėčių, kur yra galimybė pritvirtinti jutiklį, taip pat ant šilumokaičio plokštumų.

Kadangi virpesių lygis priklauso nuo standumo ir kitų parametru, tai aišku, kad standumas didžiausias bus ties šilumokaičio pamatu ir vamzdyno tvirtinimo apkabų, bei mažiausias viršutinėje įrenginio dalyje ir vamzdyno kampuose su galais. Vietose, kur standumas mažiausias virpesių lygis yra didžiausias.

Parinkome 14 matavimo taškų STBD (STARBOARD – dešnio borto pusė ) pusėje ir 14 taškų PORT (kairiojo borto pusė) pusėje. Matavimų taškai pasirinkti įvairiose vietose, kad būtų galima įvertinti ir nustatyti virpesių židinius, bei lygį. Kiekvienas taškas matuojamas statmenai kitam tašpavaizduota jutiklio tvirtinimo paveiksluose (2.2.3 ir 2.2.4 pav.).



2.2.2 pav. Matavimo taškai ant šilumokaičio ir jo vamzdyno STBD pusė



2.2.3 pav. Matavimo taškai ant šilumokaičio ir jo vamzdyno PORT pusė

#### 2.2.4. Virpesių lygio ir virpesių šaltinių identifikavimo metodika

Virpesių lygis, kaip ir daugelis laivo konstrukcinių sprendimų yra reglamentuojama kvalifikacinių bendrovių rekomendacijų registruose, tokiose kaip Lloyd's register.

„Athene Seaways“ ir „Victoria Seaways“ keltuose atliekant šilumokaičių ir jų vamzdynų matavimus, buvo nustatyta, kad šilumokaitis ir jo vamzdynas nėra virpesių šaltinis, todėl nuspręsta pasinaudoti ISO 10816 standartu, kuris nusako virpesių matavimus išreiškiamus absoliučiąjį virpesių greičių kvadratinio vidurkio  $V_{RMS}$  reikšmėmis (10÷1000 Hz). Taip pat ir rotorinių mašinų klasifikavimu pagal Lloyd's registrą, kuriame nusakomos mechanizmų kasės pagal masyvumą, galingumą ir išvystomą galią[10]:

- 1-a klasė: elektros variklio galia neviršija 15kW;
- 2-a klasė: vidutinio dydžio mašinos be specialių fundamentų ir elektros variklio galia 15-75kW; su specialiu standžiu fundamentu elektros variklio galia iki 300 kW;
- 3-ia klase: didelės mašinos su sustiprintu standžiu fundamentu, kuris susietas su laivo korpuso sutvirtinimų tinklu. Elektros variklio galia virš 300 kW;
- 4-a klasė: didelės mašinos su amortizuojančiu fundamentu virpesių energijos kryptimi. Elektros variklio galia virš 300 kW;

Kaip jau žinoma, tiriamas šilumokaitis turi standų pagrindą ir nėra virpesių šaltinis, bei jo vamzdynas turi standžius tvirtinimus, mes renkamės 2-ąją klasę, pagal kurią matuojamas virpesių lygis vienoje zonoje keliomis kryptimis, o virpesiai vertinami naudojant didžiausią ar kelias didžiausias  $V_{RMS}$  reikšmes.

Greitos Furje transformacijos FFT spektrų analizės metodikos principai yra vieni paprasčiausių ir greičiausių tiriamų objektų elementų padidinto intensyvumo virpesių šaltinių indentifikavimui.

Absoliučiąjį virpesių šaltinių, sukeliančių tiriamo šilumokaičio ir jo vamzdyno, indentifikavimo atlikimo tvarka:

- šilumokaičio ir jo vamzdyno virpesių matavimas plaukiant jūroje standartiniais plaukimo režimais;
- atliekamas šilumokaičio ir jo vamzdyno “bump” testas ir išmatuoti savieji virpesiai, kai laivas stovi vietoje;
- šilumokaičio ir jo atramų virpesiai išmatuojami pagal tarptautinio ISO 10816 standarto rekomendacijas ir 2.2.3 skyriaus pateiktą jutiklių tvirtinimo metodiką;
- atlikus tiriamų virpesių energijos matavimus ADASH A4400 analizatoriumi, visi virpesių signalų duomenų formate perkelti į personalinį kompiuterį ir DDS 2011 programinę įrangą apdorojami ir analizuojami;
- išnagrinėjami virpesių spektrų grafikai.

Analizuojant virpesių priežastis ir galimus jų židinius, reikia žinoti virpesių galimų šaltinių charakteristikas ir požymius. Taip pat būtina išnagrinėti eksperimento metu gautus virpesių spektrų grafikus ir matavimo rezultatų grafikus, bei apskaičiuoti pagrindinių virpesių šaltinių (vidaus degimo variklių ir sraigčių) žadinamų virpesių dažnius, kurie yra analizuojami

### **2.2.5. Eksperimentinių tyrimų rezultatai**

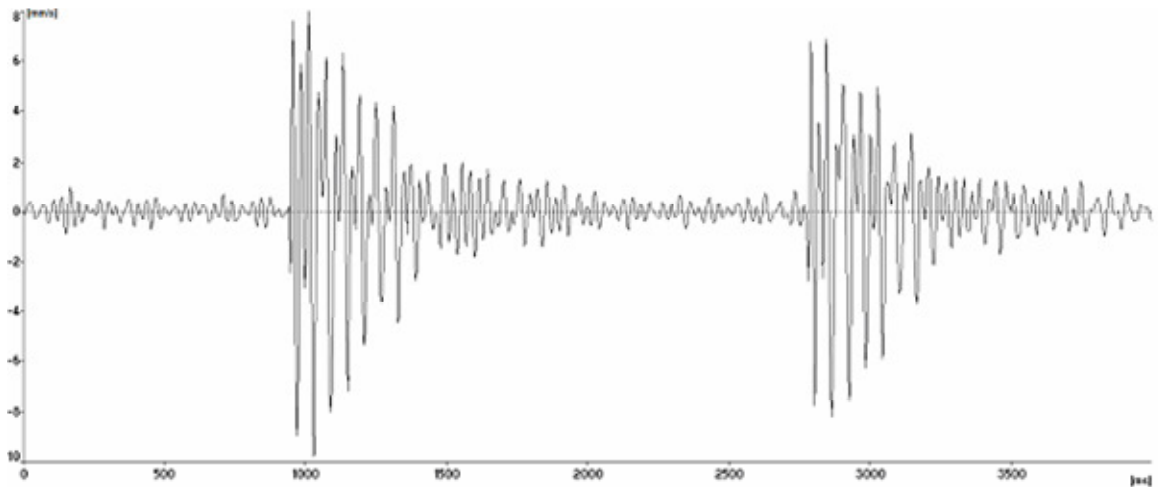
Eksperimentinių tyrimų rezultatai tyrimo eigoje grupuojami pagal duomenų rinkimo, apdorojimo ir panaudojimo rūšį, skirstomi į pagrindinius ir pagalbinius.

Pirmiausia laivui stovint, neveikiant jokiems įrenginiams, renkami šilumokaičio ir jo vamzdyno savųjų virpesių dažnių duomenys, kurio metu gauti duomenys naudojami kaip pagrindiniai ir tarpusavyje palyginami duomenis gautus, laivo plaukimo metu. Šie duomenys nurodo, kuriuose matavimo taškuose pasireiškia didžiausi virpesiai, jų  $V_{RMS}$  virpesių greičio kvadratinis vidurkis ir rezonansų pasireiškimo dažniai. Taip pat nustatomi pagrindinių laivo virpesių židinių žadinamus dažnius, kurie lyginami su gautais savaisiais virpesių dažniais bei matavimo vietose gautų rezonansinių pikų dažniais.

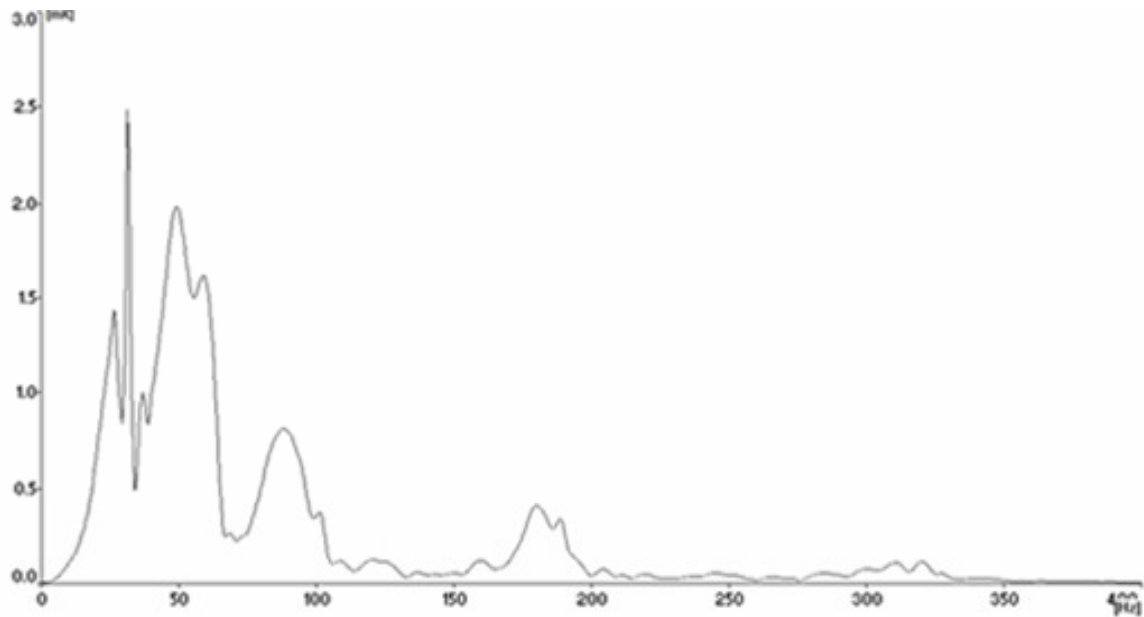
Pagalbiniai rezultatai – tai laivo žadinamų virpesių dažnių harmonikos nustatymas.

#### **2.2.5.1 Šilumokaičio ir jo vamzdyno savųjų dažnių nustatymas**

Šilumokaitis ir jo vamzdynas negali būti virpesių šaltiniais, bet padidintas virpesių lygis jame pasireiškia, todėl daroma išvada, jog virpesių žadinimo šaltinis yra išorinis, kuris kelia šilumokaičio ir jo vamzdyno rezonansinį reiškinių. Taigi, norint nustatyti savuosius šilumokaičio ir jo vamzdyno virpesių dažnius atliekamas „bump“ testas, kai matuojamas įrenginys išvedamas iš pusiausvyros padėties priverstinai (vienkartiniu smūginio jėgos panaudojimu). Savųjų virpesių dažnių testo laiko grafikas atvaizduojamas 2.2.5 pav. Po smūginio poveikio šilumokaitis ir jo vamzdynas suvibruoja savaisiais dažniais, kurie išmatuojami. Tuomet iš šilumokaičio ir jo vamzdyno virpesių greičių spektro grafiko nustatomi aušinimo sistemos savieji dažniai.



**2.2.4 pav.** Šilumokaičio ir jo vamzdyno virpesių greičių grafikas „bump“ testo metu



**2.2.5 pav.** Šilumokaičio ir jo vamzdyno virpesių greičių FFT spektras gautas „bump“ testo metu „ATHENE Seaways“ kelte

„Bump“ testo metu gautų virpesių greičių FFT spektrų matome, kad vienas spektro pikas ties 28 Hz išsiskiria iš kitų. Kaip matome iš 1 ir 2 lentelėse pateiktų „bump“ testo matavimų pasirinktuose taškuose, visi savieji virpesių dažniai yra nuo 10 Hz iki 50 Hz. Taigi, matavimo rezultatai turėtų būti vertinami šiame intervale, o apytiksliai šilumokaičio ir jo vamzdyno savieji virpesiai yra ties 26,5 Hz.

**2.2.1 lentelė.** „Bump“ testo metu gauti pirmieji laisvieji „ATHENE Seaways“ kelto šilumokaičio ir jo vamzdyno virpesių pikų dažniai

Savųjų virpesių pikų Nr.	Savųjų virpesių dažniai, Hz					
	1	4	7	12	13	14
<b>STBD pusės šilumokaitis</b>						
1.	11,9	21,5	15,5	15,5	10,0	35,0
2.	18,0	35,5	42,5	23,5	32,5	49,0
<b>PORT pusės šilumokaitis</b>						
1.	15,0	13,0	18,0	23,5	10,0	19,0
2.	43,5	42,0	37,0	49,5	31,5	27,5

**2.2.2 lentelė.** „Bump“ testo metu gauti pirmieji laisvieji „VICTORIA Seaways“ kelto šilumokaičio ir jo vamzdyno virpesių pikų dažniai

Savųjų virpesių pikų Nr.	Savųjų virpesių dažniai, Hz					
	1	4	7	12	13	14
<b>STBD pusės šilumokaitis</b>						
1.	10,2	23,0	14,5	14	10,0	35,0
2.	18,5	37,5	40,5	22,0	33,5	50,5
<b>PORT pusės šilumokaitis</b>						
1.	18,0	12,0	18,5	22,5	15,5	18,5
2.	37,5	39,0	33,5	44,5	23,0	31,5

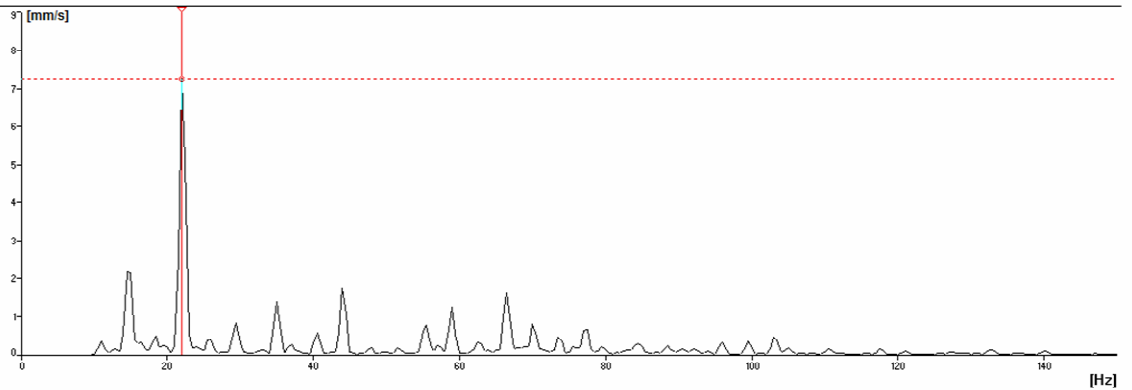
Gauti rezultatai naudojami tiriant keltų šilumokaičių ir jų vamzdynų virpesius lyginant juos su eksperimentiniais ir teoriniais duomenimis.

#### 2.2.5.2 Šilumokaičio ir jo vamzdyno virpesių tyrimas kelto plaukimo metu

Kiti matavimai išmatuoti plaukiant jūroje, veikiant pagrindiniams varikliams skirtingais režimais („ATHENE Seaways“ kelto 443 aps./min ir 375 aps./min ir „VICTORIA Seaways“ kelto 400 aps./min, 437 aps./min ir 465 aps./min) ir kitiems laivo įrenginiams.

Manto[S3]VSpec iki 1600Hz 2014.02.22 09:55:39 A4400 Spec

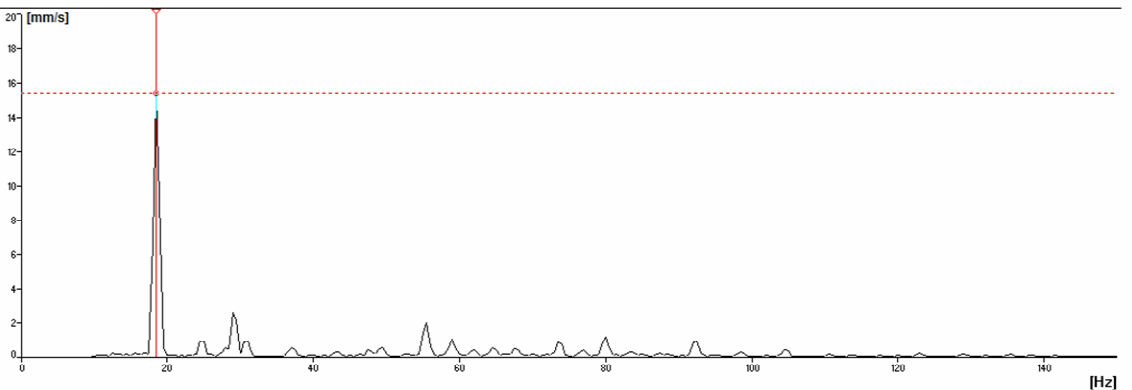
Freq [22] [Hz] [7.2471] [mm/s]



**2.2.6 pav.** Virpesių lygis  $V_{RMS}$  3 taške “ATHENE Seaways” kelto STBT pusėje esant 443 aps./min variklio alkūninio veleno sūkiams

Manto[S3]VSpec iki 1600Hz 2014.02.22 18:54:25 A4400 Spec

Freq [18.5] [Hz] [15.387] [mm/s]



**2.2.7 pav.** Virpesių lygis  $V_{RMS}$  3 taške “ATHENE Seaways” laivo STBT pusėje esant 375 aps./min variklio alkūninio veleno sūkiams

Atliekant tyrimą ir matuojant virpesių vidutinį greitį  $V_{RMS}$  pastebėta, kad esant skirtingiems plaukimo režimams visi pirminiai virpesių pikai yra prie tam tikro virpesių dažnio. Visi pateikti pikai lentelėje nr. 3 iš kelto „ATHENA seaways“ esant 443 aps./min yra ties 22,0 Hz, o esant alkūninio veleno 375 aps./min. gauti  $V_{RMS}$  – 18,5 Hz dažnyje. 4 lentelėje „VICTORIA Seaways“ kelte gauti rezultatai taip pat priklauso nuo plaukimo režimu ir atitinkamose dažniuose, pvz.: esant 400 aps./min alkūninio veleno sūkiams gauti  $V_{RMS}$  nustatėme, kad vyrauja 20 Hz dažnis, esant 437 aps./min dažnis apie 22,5 Hz, bei 465 aps./min siekia 23,5 Hz.

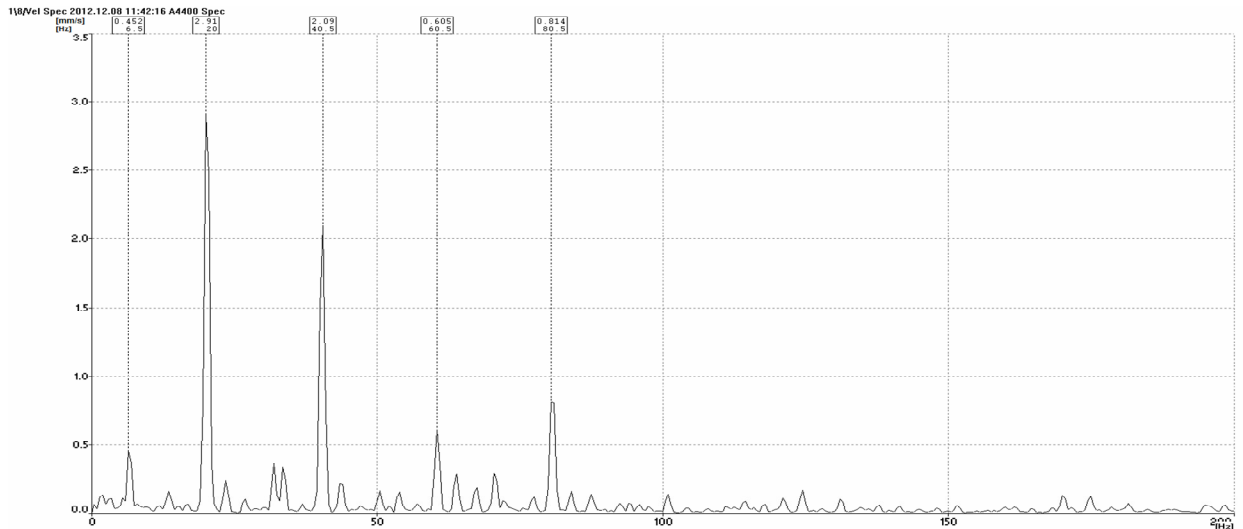
**2.2.3 lentelė.** „ATHENE Seaways“ kelto šilumokaičio ir jo vamzdyno virpesių lygio (virpesių greičio kvadratinio vidurkio  $V_{RMS}$  dažnių intervale 10÷1000Hz) matavimo rezultatai

Režimas	Virpesių lygis (virpesių greičio kvadratinio vidurkio $V_{RMS}$ dažnių intervale 10÷1000Hz), mm/s													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
<b>STBD pusės šilumokaitis</b>														
375 aps./min	10,3	4,05	15,8	8,26	11,4	14,2	4,49	3,05	11,6	7,60	2,78	15,6	8,13	1,64
443 aps./min	7,91	4,23	9,01	12,0	6,67	17,1	14,2	4,18	6,47	8,83	4,24	12,6	9,08	2,06
<b>PORT pusės šilumokaitis</b>														
375 aps./min	13,0	5,04	17,4	6,03	8,01	16,9	4,47	2,82	15,3	5,52	3,06	19,2	40,1	3,09
443 aps./min	8,37	5,44	7,08	7,48	16,3	4,21	10,0	2,59	4,34	2,88	2,10	6,98	28,2	3,61

**2.2.4 lentelė.** „VICTORIA Seaways“ kelto šilumokaičio ir jo vamzdyno virpesių lygio (virpesių greičio kvadratinio vidurkio  $V_{RMS}$  dažnių intervale 10÷1000Hz) matavimo rezultatai

Režimas	Virpesių lygis (virpesių greičio kvadratinio vidurkio $V_{RMS}$ dažnių intervale 10÷1000Hz), mm/s													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
<b>STBD pusės šilumokaitis</b>														
400 aps./min	30,7	8,14	30,2	5,38	5,90	28,9	20,3	4,09	12,4	8,31	3,63	28,8	76,4	3,66
437 aps./min	23,7	7,03	23,9	13,2	8,34	29,9	20,7	3,71	14,7	11,0	3,16	30,3	74,4	4,81
465 aps./min	11,2	6,00	15,9	11,9	9,70	22,4	5,57	2,80	8,51	1,83	2,40	21,5	62,2	5,06
<b>PORT pusės šilumokaitis</b>														
400 aps./min	16,1	4,81	9,22	8,24	8,37	16,9	11,1	2,07	6,99	1,68	2,46	15,4	18,7	3,19
437 aps./min	7,34	8,84	12,0	18,0	10,1	5,12	4,68	2,29	5,25	7,92	2,04	25,3	12,1	2,8
465 aps./min	7,15	7,94	5,14	6,59	9,60	10,8	4,93	1,99	4,61	2,38	2,09	16,0	5,15	3,89

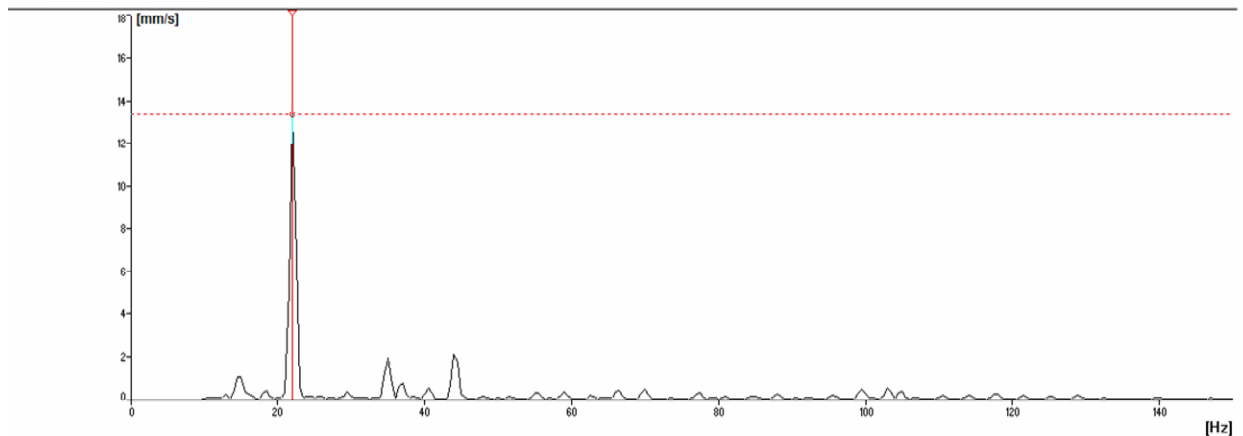
Išmatavus absoliučiujų virpesių  $V_{RMS}$  greičių kvadratinį vidurkį (3 ir 4 lentelės) pastebėjome, kad yra daug gautų reikšmių viršijančių leistiną ribinę vertę 7,1 mm/s (ISO 10816). Taip pat pastebėta, kad daugiausiai viršijama leistina riba yra esant mažesniems variklių sūkiams. Taigi, didžiausi virpesiai gauti esant 18- 24 Hz. Pasitaiko ir daugiau pikų, bet jų virpesių greičių kvadratiniai vidurkiai yra mažesni kurie neviršija leistino 7,1 mm/s kaip nurodyta pav.



**2.2.8 pav.** Absoliučiąjų virpesių  $V_{RMS}$  greičių kvadratinių vidurkių grafikas „VICTORIA Seaways“ kelte 8 taške

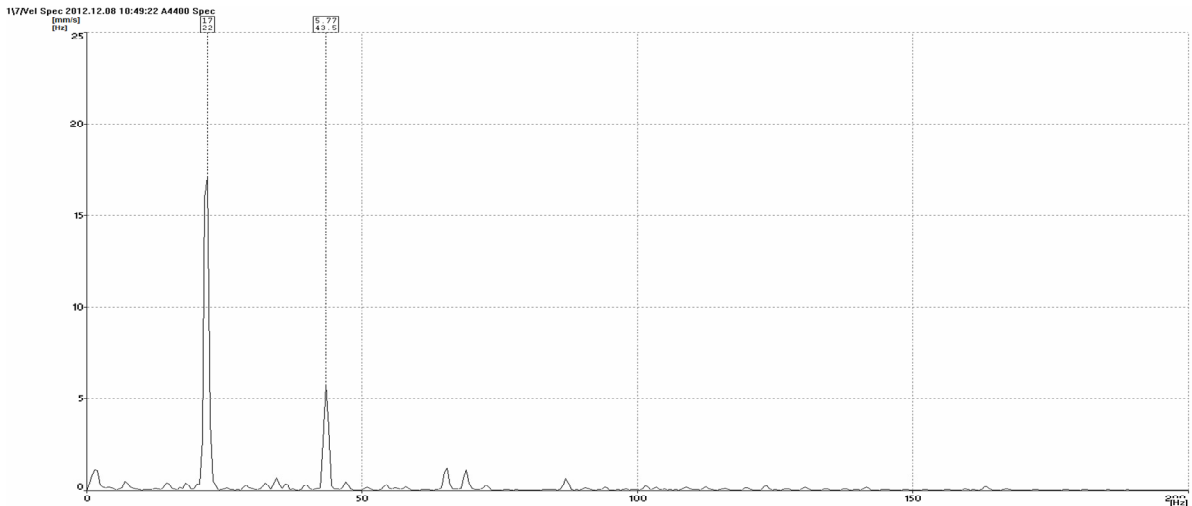
Taškai, kuriuose virpesių greičių kvadratiniai vidurkiai yra mažesni už leistiną ribą, nereikėtų naudoti tyrimo eigoje. Taip pat tyrimo metu pastebėta, kad rezultatai abiejų keltų panašūs, tik šiek tiek skiriasi virpesių greičiai ir dažniai priklausomai nuo alkūninio veleno sūkių 3 ir 4 lentelės.

MantolS7VSpec iki 1600Hz 2014.02.22 09:56:39 A4400 Spec  
 Freq [22] [Hz] [13.3711] [mm/s]



**2.2.9 pav.** Virpesių lygis išmatuotas “ATHENE Seaways” kelto STBD pusėje 7 taške varikliui dirbant 443 aps./min

Gauti grafikai kaip 2.2.10 ir 2.2.11 pav. beveik visi atitinka esant panašioms darbo režimams, todėl tikėtina, kad virpesių šaltiniai yra tie patys, o virpesių slopinimo įtaisai identišškai sumontuoti, taigi pasireiškiančios bėdos yra priklausomos nuo tų pačių pasireiškiančių veiksnių.



**2.2.10 pav.** Virpesių lygis išmatuotas “VICTORIA Seaways” kelto STBD pusėje 7 taške varikliui dirbant 437 aps./min

### 2.2.5.3. Variklio ir sraigto žadinamų virpesių dažnių nustatymas

Nustatome pagrindinių židinių: variklio alkūninio veleno, dujų uždegimo degimo kameroje, variklyje slystančių detalių ir sraigto, virpesių žadinimo dažnius. Taigi mums reikia apskaičiuoti kiekvieno režimo metu žadinamų virpesių dažnius. Pirmiausia apskaičiuojame variklio alkūninio veleno neišsvertų jėgų žadinamus virpesių dažnius esant 375 aps./min, 400 aps./min, 437 aps./min, 443 aps./min ir 465 aps./min. Pagal šiuos plaukimo režimus apskaičiuosime ir kitus virpesių žadinimo veiksnių dažnius.

Apskaičiuojame variklio alkūninio veleno neišsvertų jėgų žadinamus virpesius, 375 aps./min:

$$f_{alk} = \frac{n_{var}}{60} = \frac{375}{60} = 6.25 Hz \quad (3)$$

čia  $f_{alk}$  – alkūninio veleno žadinamų virpesių dažnis,  $Hz$ ;  
 $n_{alk}$  – variklio alkūninio veleno apsisukimai,  $aps./min$ ;

Apskaičiuojame dujų uždegimo degimo kameroje metu žadinamų virpesių dažnį, esant 375 aps./min:

$$f_{deg} = \frac{n_{alk} \cdot n_{cil}}{120} = \frac{375 \cdot 12}{120} = 37.5 Hz \quad (4)$$

čia  $f_{deg}$  – dujų uždegimo degimo kameroje metu žadinamų virpesių dažnis,  $Hz$ ;  
 $n_{cil}$  – variklio cilindų skaičius,  $vnt$ ;

Apskaičiuojame variklyje slankiojančių ir su dideliu pagreičiu besisukančių detalių keliamų virpesių dažnį, esant 375 aps./min:

$$f_{sl} = \eta \frac{n_{alk}}{60} = 3 \cdot \frac{375}{60} = 18.75 Hz \quad (5)$$

čia  $f_{sl}$  – variklyje slankiojančių ir su dideliu pagreičiu besisukančių detalių žadinami virpesiai,  $Hz$ ;

$\eta$  – koeficientas įvertinantis slankiojančių detalių dažnumą ir kiekį;

Apskaičiuojame sraigto žadinamų virpesių dažnį, esant 375 aps./min:

$$f_{sr} = f_{alk} \cdot n_{men} = 6.25 \cdot 4 = 25 Hz \quad (6)$$

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

$n_{men}$  – sraigto menčių skaičius,  $vnt.$

Kitais plaukimo režimais apskaičiuotus žadinamų virpesių dažnius pateikiame lentelėje nr. 5.

**2.2.5 lentelė.** Variklio ir sraigto virpesių žadinimo dažnių skaičiavimo rezultatai skirtingais plaukimo režimais

Alkūninio veleno sukiai, aps./min	Alkūninio veleno žadinamų virpesių dažnis, Hz	Degimo metu žadinamų virpesių dažnis, Hz	Variklyje atliekančių linijinį judesnį ir besisukančių detalių virpesių dažnis, Hz	Sraigto žadinamų virpesių dažnis, Hz
375	6,25	37,5	18,75	25,0
400	6,67	40,02	20,01	26,68
437	7,28	43,7	21,84	29,12
443	7,38	44,28	22,14	29,52
465	7,75	46,5	23,25	31,0

Šioje lentelėje apskaičiuotus duomenis panaudosime tyrimo eigoje, kad galėtume nustatyti kokie dažniai ir virpesių židiniai skatina šilumokaičio ir jo vamzdyno virpesius.

### 2.3. Šilumokaičio ir jo vamzdyno tyrimo rezultatų peržiūra ir analizė

Gauti rezultatai įrodo, jog keltai „ATHENE Seaways“ ir „VICTORIA Seaways“ yra identiški projektai, tik skiriasi jų plaukimo režimai dėl maršrutų skirtumo. „ATHENE Seaways“ plaukioja maršrutu Klaipėda-Kylis-Klaipėda, jo plaukimo režimai yra 375 aps./min ir 443 aps./min, o keltas „VICTORIA Seaways“ plaukioja maršrutu Klaipėda-Karshamnas-

Klaipėda. Šio kelto plaukiojimo režimai pagrindiniai režimai 400 aps./min, 437 aps./min ir 465 aps./min.

Abiejų keltų varikliai ir tiriamieji šilumokaičiai bei vamzdynai yra identiški, vamzdyno ir šilumokaičio tvirtinimas taip pat yra vienodas 2.3.1 ir 2.3.2 pav. Dėl galimų įvaržų skirtumo apkabose šiek tiek skiriasi savųjų virpesių dažniai apie 1-3 Hz, beveik visuose matavimo taškuose tik į skirtingas puses vienuose taškuose 1 Hz didesnis, kituose 1 mažesnis matome lygindami 1 ir 2 lenteles pvz.: „ATHENE Seaways“ PORT pusės 4 taške ir pirmajame pike ir antrajame pike rezultatai yra atitinkamai 13,0 Hz ir 42,0 Hz, o kelte „VICTORIA Seaways“ jie yra atitinkamai 1 Hz ir 2 Hz mažesni, taip yra ir kituose „bump“ testo atlikimo taškuose.



**2.3.1 pav.** Šilumokaičio vamzdynas ir jo tvirtinimas

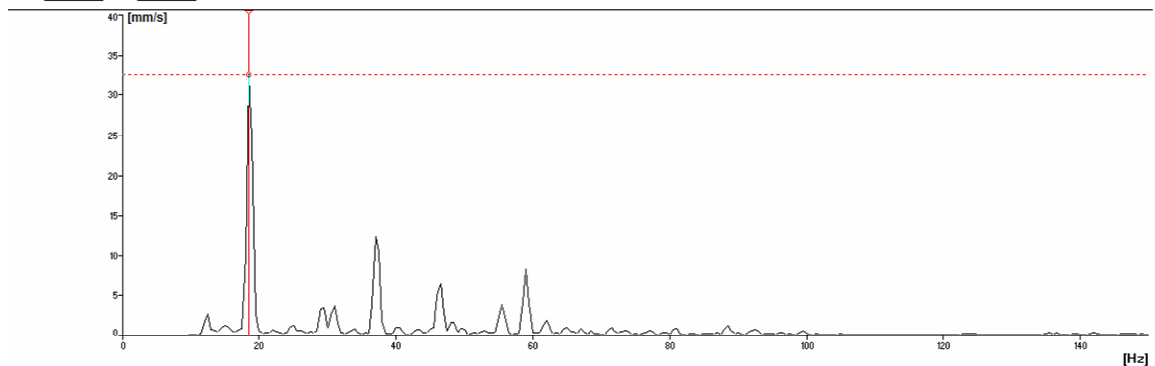
Atlikus „ATHENE Seaways“ kelto šilumokaičio ir jo vamzdyno virpesių lygio (virpesių greičio kvadratinio vidurkio  $V_{RMS}$  dažnių intervale 10÷1000Hz) matavimus ir rezultatus sugrupavus pagal variklio alkūninio veleno sūkius pastebėta, kad esant mažesniems variklio sūkiams 375aps./min (mažesniems žadinamiems virpesiams) virpesių lygio pikai atsiranda esant mažesniam dažniui (18,5 Hz) 2.3.3 pav.



**2.3.2 pav. Šilumokaitis ir jo vamzdyno tvirtinimas**

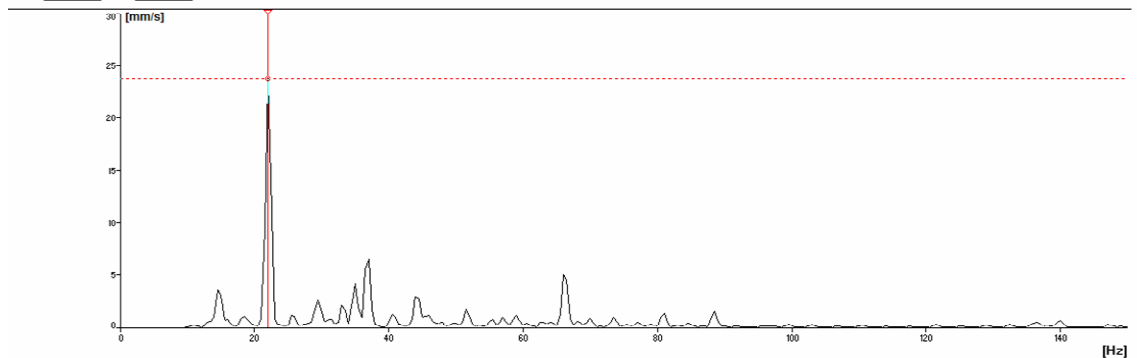
Manto\P13\Spec iki 1600Hz 2014.02.22 19:00:44 A4400 Spec

Freq  [Hz]  [mm/s]



Manto\P13\Spec iki 1600Hz 2014.02.22 10:02:48 A4400 Spec

Freq  [Hz]  [mm/s]

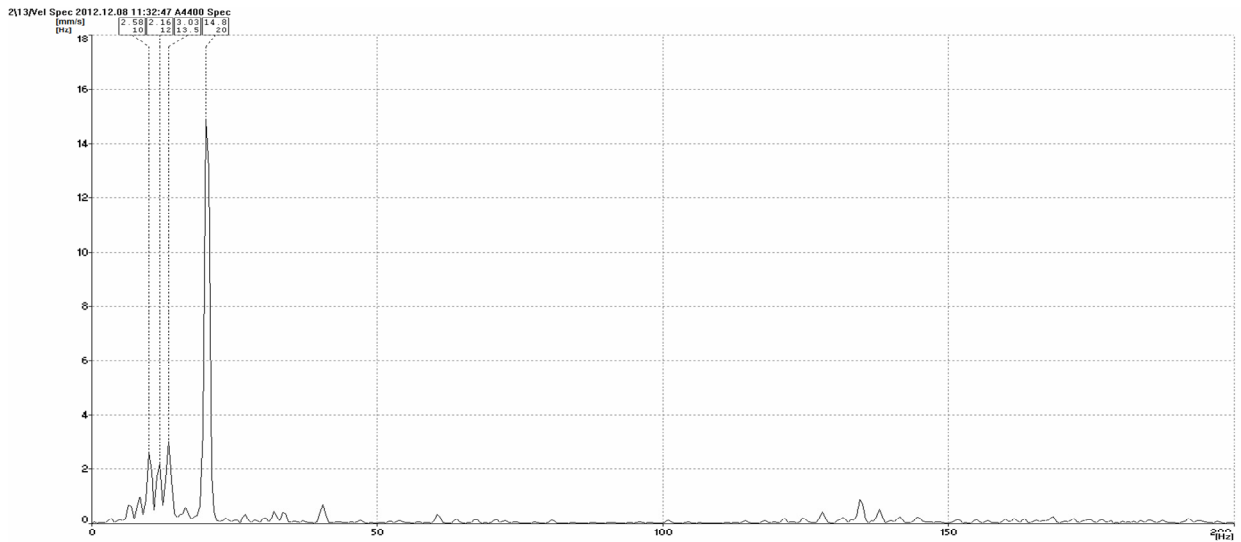


**2.3.3 pav. „ATHENE Seaways“ šilumokaičio virpesių lygio, priklausomai nuo dažnio grafikas PORT pusė 13 taškas esant 375aps./min ir 443 aps./min**

Tai pasireiškia visuose matavimo taškuose. Padidėjus variklio sūkiams 443aps./min padidėja ir virpesių dažnis 22 Hz, tai pastebėta STBD ir PORT pusėse. Taip pat ir „VICTORIA Seaways“ kelte, esant variklio sūkiams 400 aps./min, šilumokaityje ir jo vamzdyne atsirandantys virpesiai yra ties 20 Hz, o padidėjus sūkiams iki 465 aps./min – 23,5 Hz, tai matome 2.3.4 ir 2.3.5 pav. Taigi virpesių žadinimas priklauso nuo variklio sūkių. Remiantis

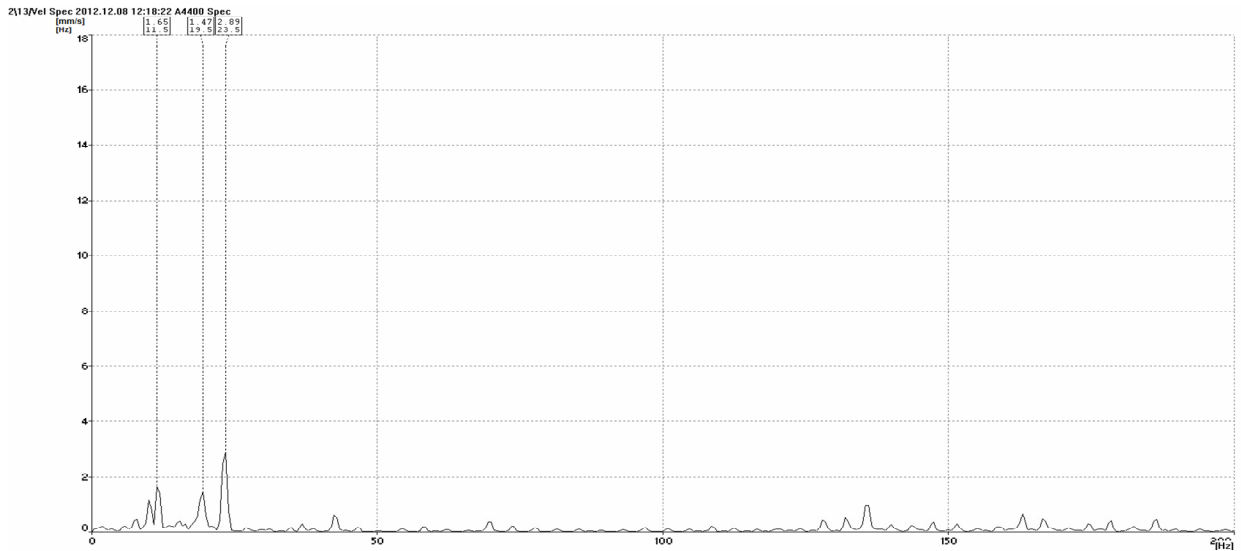
šiais duomenimis galima nusakyti ir tai, kad šilumokaičio ir jo vamzdyno, bei variklio žadinamų virpesių rezonavimo taškai yra panašūs.

Pasinaudojus žadinamų virpesių dažnių formulėmis apskaičiuota, kad alkūninis velenas žadina skirtingais režimais virpesius nuo 6,25 iki 7,75 Hz dažniu, betgi reikia neatmesti ir harmoninių virpesių žadinimų kaip aprašyta pirmojoje analitinėje dalyje ir pavaizduoti kartotiniai 1.1.2 pav. 3 harmoninės alkūninio veleno eilės virpesiai galėtų būti kaip žadinantys šilumokaičio ir jo vamzdyno virpesius, bet esant tendencijai virpesiams silpnėti, jų įtaka turėtų būti per silpna.

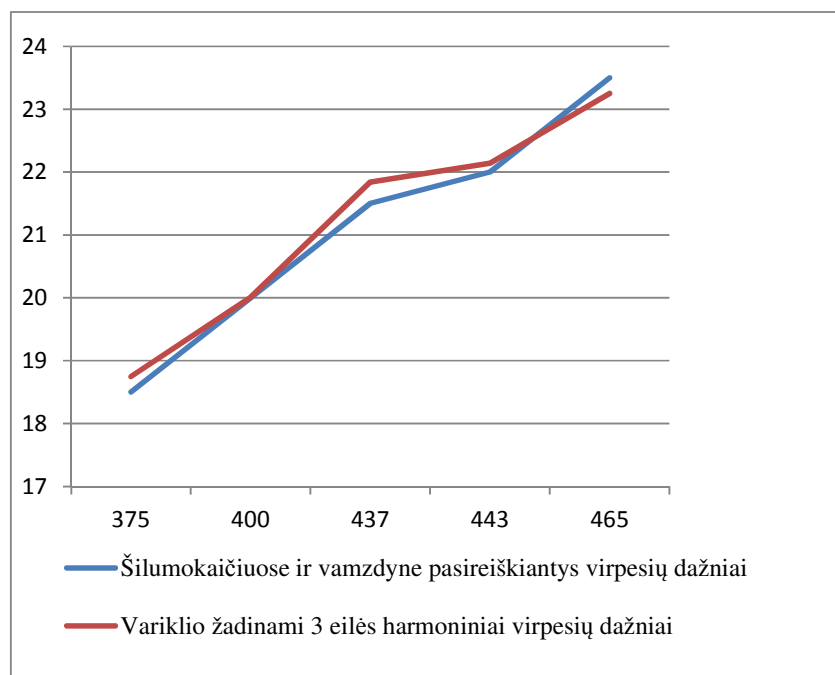


**2.3.4 pav.** „VICTORIA Seaways“ šilumokaičio virpesių lygio, priklausomai nuo dažnio grafikas PORT pusė 13 taškas esant 400 aps./min

Taip pat jų nereiktų atmesti, nes jie atitinka ir šilumokaičio su vamzdynu nustatytus žadinamus dažnius, matuojant laivo plaukimo režimais pav. 2.3.7. Šie 3 eilės harmoniniai virpesiai atitinka ir apskaičiuotus slystančių bei besisukančių variklio detalių žadinamus virpesių dažnius (5 lentelė), kurie gali būti ir šilumokaičiuose atsirandančių virpesių šaltiniai. Taipogi yra ir dujų uždegimo degimo kameroje žadinami virpesiai, kurie žadina ganėtinai aukšto virpesių dažnius apie 37,5-46,5 Hz, kuris įtakos tiriamiems virpesiams negali turėti dėl didelio skirtumo su išmatuotų tiriamajame objekte.

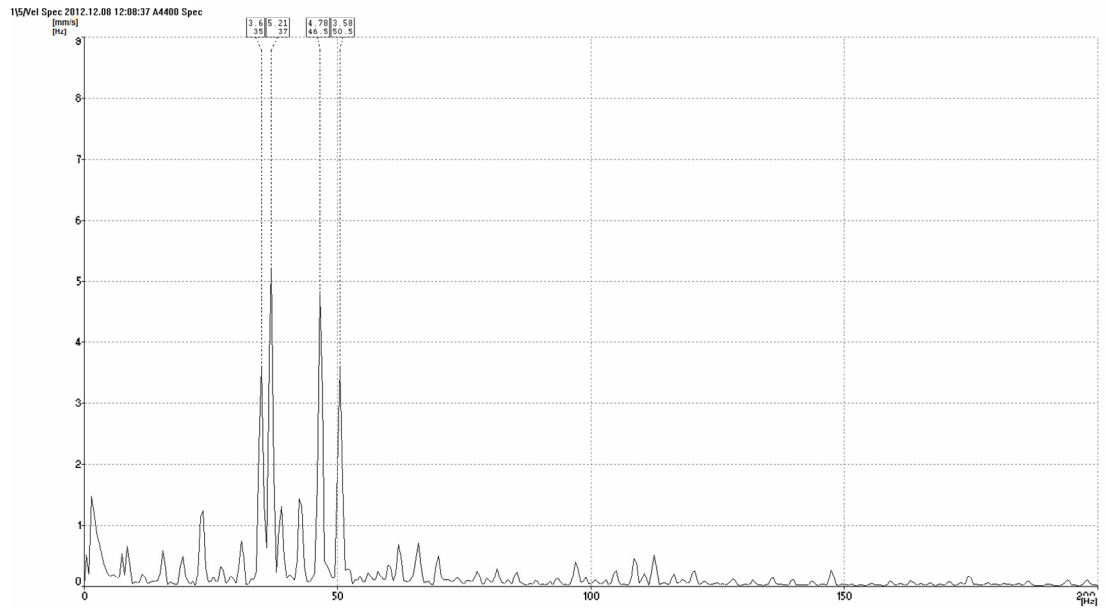


**2.3.5 pav.** „VICTORIA Seaways“ šilumokaičio virpesių lygio, priklausomai nuo dažnio grafikas PORT pusė 13 taškas esant 465 aps./min



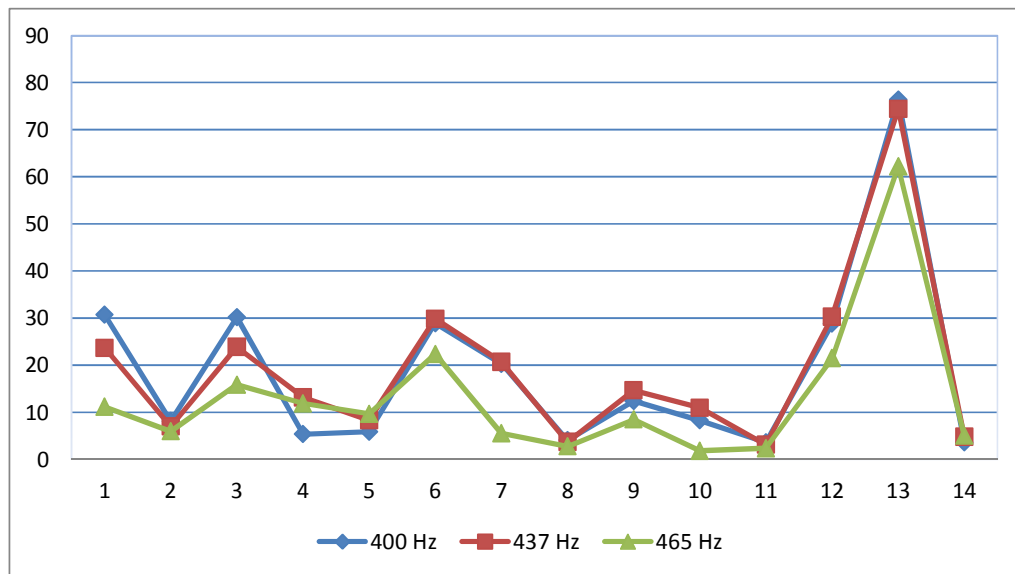
**2.3.6 pav.** Pasireiškiančių ir žadinamų virpesių dažnių palyginimas (vertikaliai dažnis Hz, horizontaliai variklio alkūninio veleno apsisukimai aps./min)

Apskaičiuoti sraigto žadinamų virpesių dažniai taip pat yra atitolę nuo šilumokaičiuose pasireiškiančių virpesių dažnių, bet yra keli pikai (2.3.8 pav.), kurie atsiranda kelte „VICTORIA Seaways“, ten jų greitis neviršija leistinos šilumokaičio ir jo vamzdyno virpesių lygio (virpesių greičio kvadratinio vidurkio  $V_{RMS}$  dažnių intervale 10÷1000Hz) 7,1 mm/s ribos pagal ISO 10816 standartą.

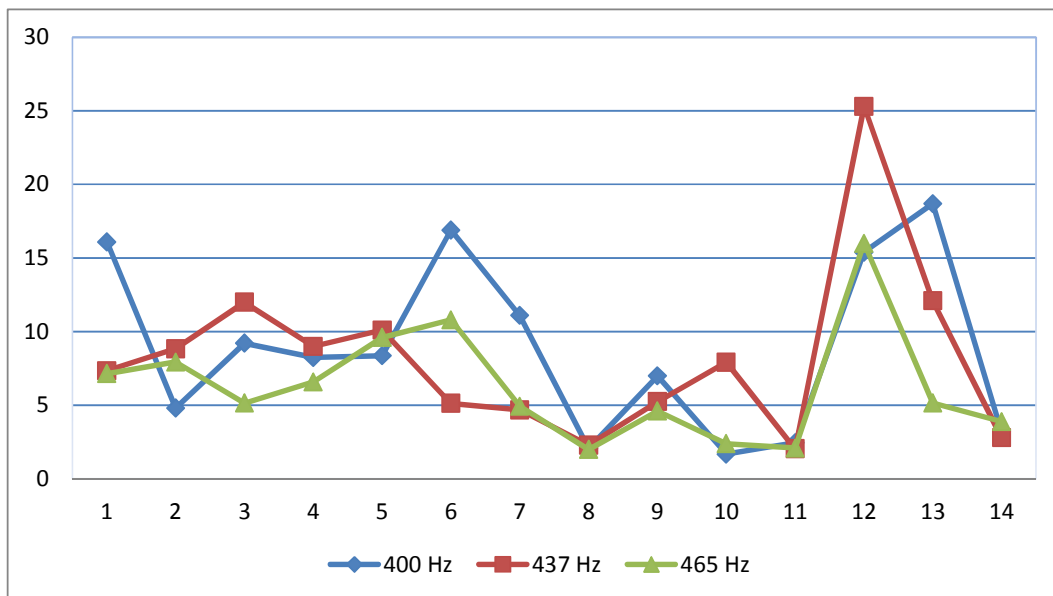


**2.3.7 pav.** Kelto „VICTORIA Seaways“ STBD pusėje 5 taške išmatuotų virpesių lygio grafikas

Taigi, vertinant virpesių lygi pagal 3 ir 4 matavimų lenteles galime sudaryti grafikus 2.3.8 ir 2.3.9 pav., bei palyginti virpesių didėjimo tendencijas didėjant laivo variklio sūkiams.

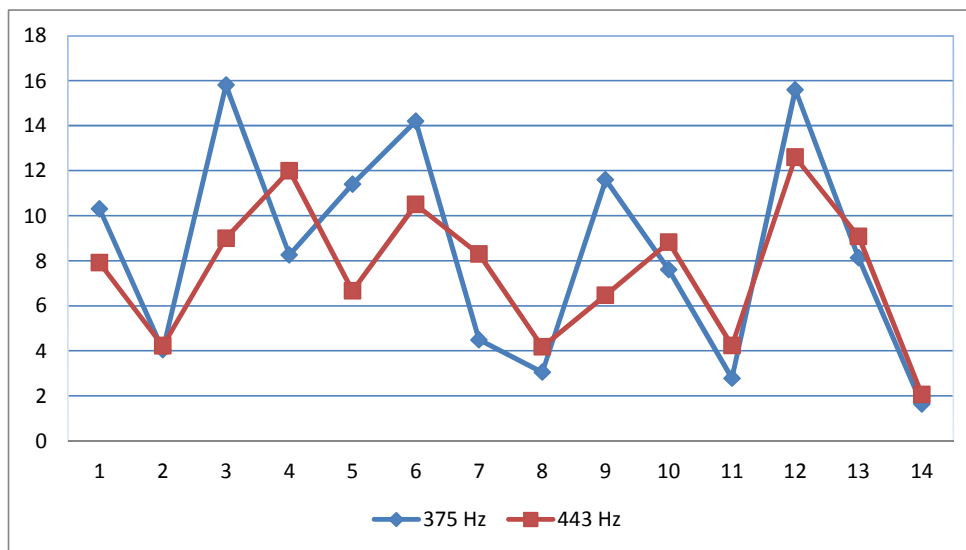


**2.3.8 pav.** „VICTORIA Seaways“ kelto STBD pusės virpesių lygių grafikas pagal variklio sūkius



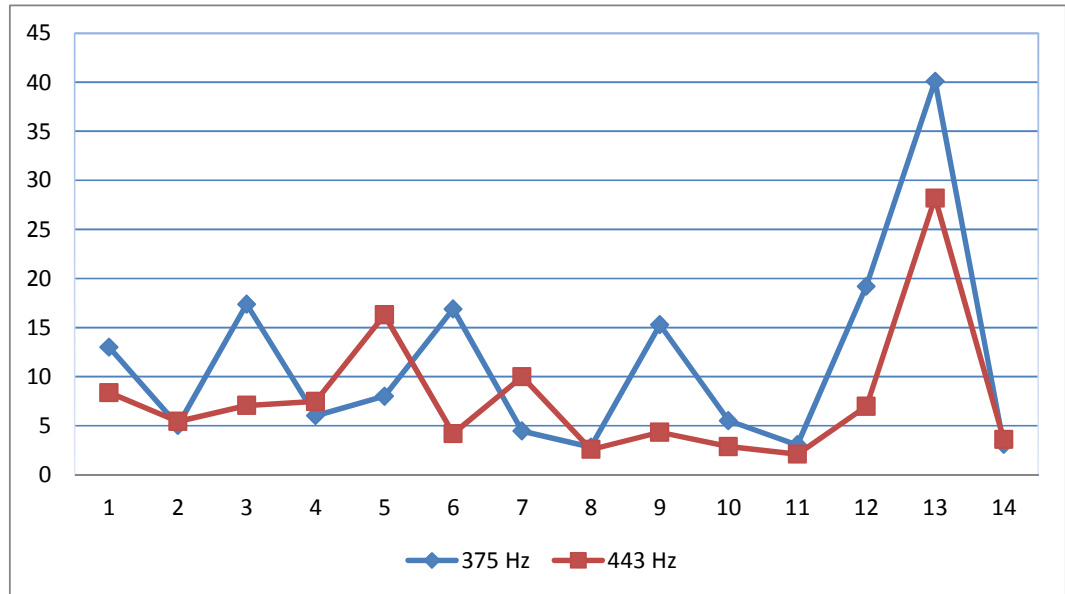
**2.3.9 pav.** „VICTORIA Seaways“ kelto PORT pusės virpesių lygių grafikas pagal variklio sūkius

Tokius grafikus 2.3.10 ir 2.3.11 pav. padarome ir pagal „ATHENA Seaways“ kelte atliktus matavimus, kurie pateikti 3 lentelėje. Šiuose grafikuose nustatome, kuri kelto vieta labiausiai vibruoja.



**2.3.10 pav.** „ATHENA Seaways“ kelto STBD pusės virpesių lygių grafikas pagal variklio sūkius

Šiuose grafikuose matoma, kad aukštas virpesių lygis yra 12 ir 13 matavimo taškuose. Pagal nuotrauką iš laivo ir gautus rezultatus nustatome, kad šilumokaičio virpesiai yra didžiausi ant tvirtinimo kronšteino ir jo virpesiai vyksta į šonus ir išilgai laivo.



**2.3.11 pav.** „ATHENA Seaways“ kelto STBD pusės virpesių lygių grafikas pagal variklio sūkius

Šioje vietoje tikrai trūksta standumo, bei labai prisideda prie kitų virpesių didinimo esant mažesniems sūkiams. Reiškia, kad didinant variklio sūkius mažėja virpesiai ir yra tolėjama nuo rezonansinio reiškinio. Bei daugiau matavimo reikšmių artėja prie leistino virpesių lygio 7,1 mm/s.

## IŠVADOS

Baigiamojo darbo atlikimo metu, analizuojant užsienio mokslininkų atlyktus mokslinius tyrimus, straipsnius ir kitą mokslinę literatūrą, paaiškėjo virpesių žalingumas žmogaus organizmui, bei įrangos patikimumui. Todėl, šiais laikais laivuose virpesiams keliami ypatingi reikalavimai, bei kontroliuojama ar laikomasis kvalifikacinių bendrovių reglamentavimo. Taip pat tyrimui pritaikyta virpesių klasifikacija, bei apskaičiavimo metodika, įvertinti virpesių lygio vertinimo ir mažinimo būdai.

Pasirinkus eksperimento metodiką, išsigrūnino šilumokaičio ir jo vamzdyno virpesių matavimo etapų eiliškumas ir tikslingumas. Pasirinkus reikiamo tikslumo ir tipo matavimo įrangą buvo paririnkti matavimo taškai sistemoje pagal tarptautinį ISO 10816 standartą. Taip pat nustatyta virpesių lygio (virpesių greičio kvadratinis vidurkis  $V_{RMS}$ ) riba pagal klasifikacinės bendrovės Lloyd's register (LR) reikalavimus.

Atlikus keltų „VICTORIA Seaways“ ir „ATHENA Seaways“ šilumokaičių ir jų vamzdynų virpesių matavimus nustatyta, kad abiejuose keltuose dominuoja ta pati aušinimo sistemos problema – labai didelis virpesių lygis. Esant laivų variklio režimams 437 ir 443 aps./min virpesių dažnis yra atitinkamai 21,5 ir 22 Hz ir atskiruose 28 taškuose virpesių lygiai svyruoja gretimose ribose ir skirtumas siekia iki 2mm/s. Keliuose matavimo taškuose viršija 3-4 kartus, o taškuose Nr. 12 ir 13 viršija 10-11 kartų, tai kelia didelę gedimo galimybę abiejuose laivuose. Eksperimentiniais tyrimais nustatyta, kad 12 ir 13 virpesių matavimo taškuose virpesių lygis yra 72-77 Hz, kurie viršija 10-11 kartų leistiną virpesių lygio 7,1 mm/s ribą (LR registro reikalavimas), o daugumoje taškų ji viršijama 3-4 kartų. Pasinaudojus laivų šilumokaičių dokumentacijomis buvo patvirtinta, kad laivų šilumokaičių ir jų vamzdynų sistemos yra identiškos. Dauguma nustatytų savųjų dažnių svyruoja ribose nuo 18 iki 25 Hz.

Atliekant gautų virpesių duomenų analizę, paaiškėjo, kad tiriamų objektų virpesius žadina pagrindinio variklio trečiosios harmonikos virpesiai arba variklio detalės atliekančios linijinį judesį. Nustatyti savieji šilumokaičių ir jų vamzdynų dažniai atitinka variklio keliamų virpesių dažnius. Dažniams sutapus priverstiniais ir saviesiems sistemų virpesių dažniams įvyksta rezonansas ir sistemos virpesių lygis viršija leistiną ribą.

Šio tyrimo metu nustatytas pagrindinė problema yra – projektavimo klaidos, ko pasekoje tirtoji sistema rezonuoja dėl permažo standumo.

Tirto aušintuvo sistemos virpesių lygiui sumažinti iki leistinų normų, rekomenduojama atlikti aušinimo sistemos (šilumokaičių ir jo vamzdynų) savųjų dažnių

modeliavimą ir perprojektuoti šią sistemą taip, kad aušintuvo sistemos pirmasis savasis dažnis būtų didesnis už 30 Hz dažnį, bei esant reikalui, panaudoti virpesių slopinimo sistemas.

## LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. V. Barzdaitis, G. Činikas 1998. *Rotorinių mašinų monitoringas ir diagnostika*. Kaunas, Technologija.
2. P.Žiliukas, R. Barauskas 2008, *Mechaniniai virpesiai*. Kaunas, VPUL
3. C. Bohn, A. Cortabarría, V. Hartel, K. Kowalczyk 2002. *Active control of engineinduced vibrations in automotive vehicles using disturbance observer gain shedding*.
4. D. Jegaden 2011. *Vibration on board Ships and its Effects*
5. Germanisher Lloyd. *Pipe guide*. IQST- Division EA
6. H. Tienhaara, H. Mikonaho 2004. *Engine dynamics and vibration control*
7. H. Zheng, G.R. Liu, J.S. Tao, K.Y. Lam 2001. *FEM/BEM analysis of diesel piston-slap induced ship hull vibration and underwater noise*.
8. International standard ISO10816. First edition 1998. *Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts*.
9. Lloyd's Register 2006. *Ship vibration and noise. Guidance notes*
10. M. Bahtiarian 2011. *Underwater noise: For New Research Vessels*. Noise control engineering, Inc.
11. M. Smith 2011. *Prediction methodologies for vibration and structure borne noise*
12. R. Butkus, J. Deikus, S. Markevičius, A. Šarlauskas 2005. *Praktinės rekomendacijos darbuotojų apsaugos nuo vibracijos keliamos rizikos nuostatams taikyti*. Vilnius
13. S. Daley, F.A. Johnson, J.B. Pearson, R. Dixon 2004. *Active vibration control for marine applications*
14. Seung-Bok Choi, Sung-Ryong Hong, Kum-Gil Sung, Jung-Woo Sohn 2007. *Optimal control structural vibrations using a mixed-mode magnetorheological fluid mount*.
15. Tom Basten, Arthur Berkhoff 2010. *Active vibration control for underwater signature reduction of a navy ship*. ICSV 17 Netherlands.
16. T.R. Lin, J. Pan, P.J. O'Shea, C.K. Mechefske 2009. *A study of vibration and vibration control of ship structures*
17. E. B. Kudashev 2002, *Measurement of Wall Pressure Fluctuations in the Presence of Vibrations Induced by a Turbulent Flow*
18. M. Behzad, A. Alandi-Hallaj, A. Rohani Bastami, D. Mba, B. Eftekharnjad and B. Charnley 2009, *Defect size estimation in rolling element bearings using vibration time waveform*

19. H. Ahmadi ir K. Mollazade 2012, *Fault diagnosis of an electro-pump in a marine ship using vibration condition monitoring*
20. Adil YÜCEL\*, Alaeddin ARPACI 2010, *Global gemi titreşimlerinin sonlu eleman yöntemiyle analizi*
21. Mihail Pricop 2012, *The Analysis of Ship's Hull Structure Using Vibration Measurements at Sea Mihail Pricop*
22. Mitu Daniela – Elena 2013, *Vibration Control Of Complex Ship Structures*
23. Pricop Mihail, Pricop Codruta 2013, *Signal Processing Wavelet Techniques In Vibration Analysis*
24. Xun Li, Carl Howard, Colin Hansen and Mathias Winberg. *Feasibility of active vibration isolation of diesel engines in Collins class submarines*. The university of Adelaide.
25. [http://www.adash.cz/index\\_en.php](http://www.adash.cz/index_en.php) [žiūrėta 2014m. 01 06 d]

## **PRIEDAI**

# 1 PRIEDAS

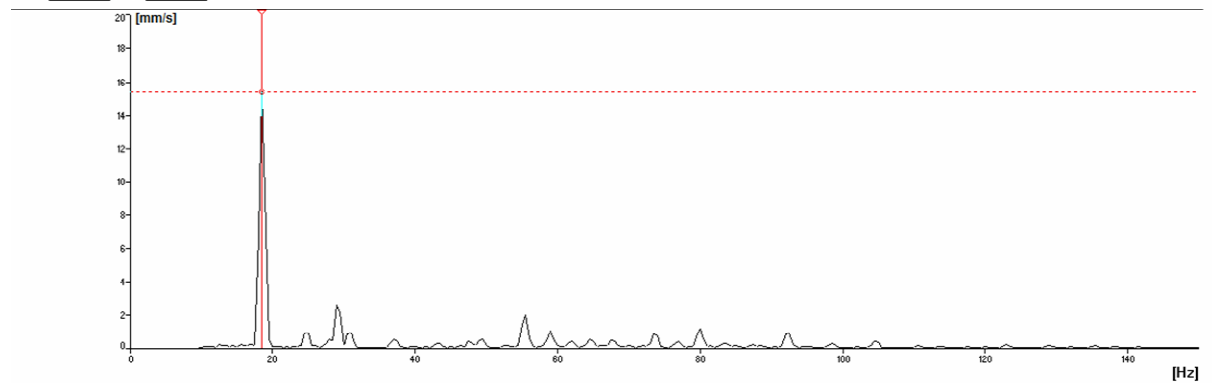
STBD pusės matavimai tirimo metu kelte „Athena Seaways“ esant 375 ir 443 aps./min  
plaukimo režimams

## 3 taškas

375 aps./min

Manto\S3\VSpec iki 1600Hz 2014.02.22 18:54:25 A4400 Spec

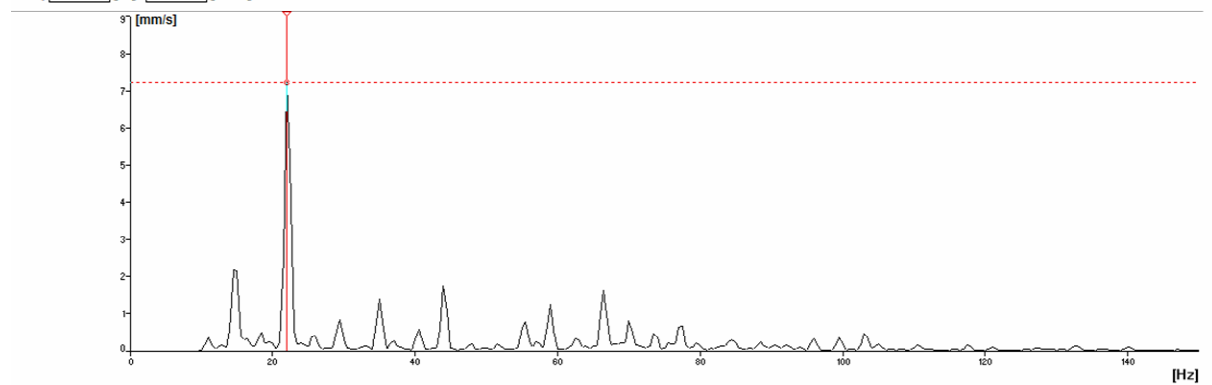
Freq  [Hz]  [mm/s]



443 aps./min

Manto\S3\VSpec iki 1600Hz 2014.02.22 09:55:39 A4400 Spec

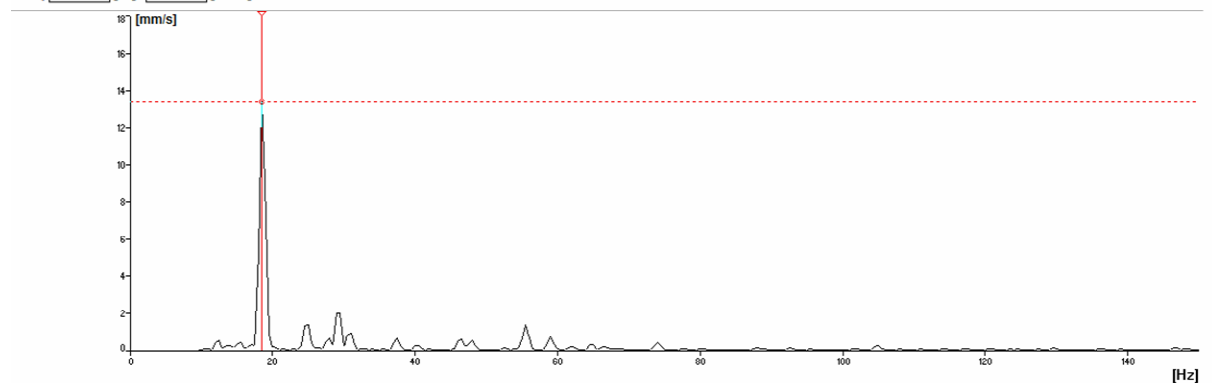
Freq  [Hz]  [mm/s]



6 taškas 375 aps./min

Manto\S6\VSpec iki 1600Hz 2014.02.22 18:55:21 A4400 Spec

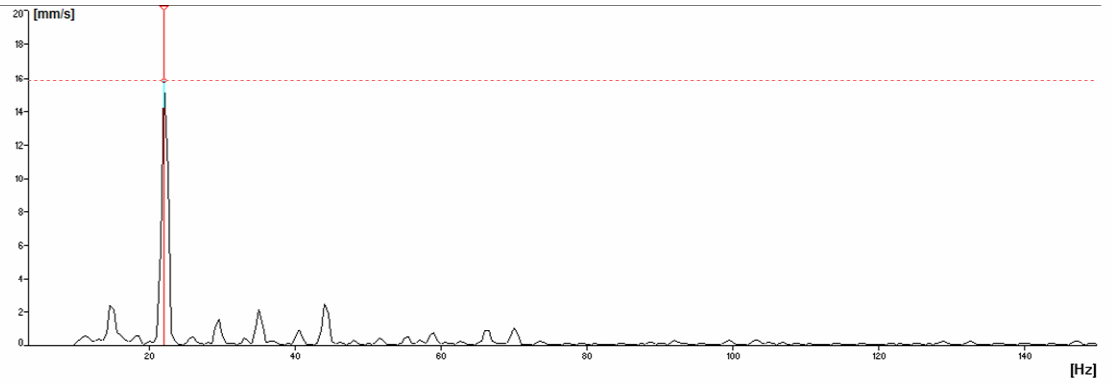
Freq  [Hz]  [mm/s]



443 aps./min

Manto[S6/V]Spec iki 1600Hz 2014.02.22 09:56:25 A4400 Spec

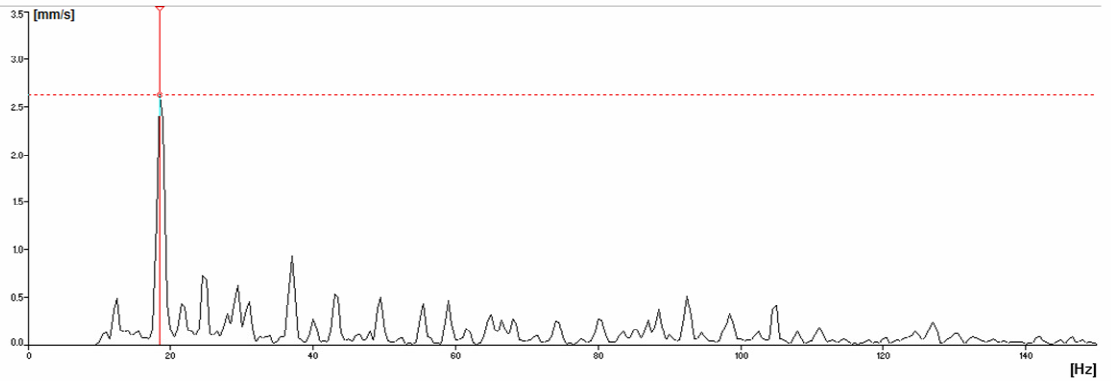
Freq [22] [Hz] [15.8401] [mm/s]



7 taškas 357 aps./min

Manto[S7/V]Spec iki 1600Hz 2014.02.22 18:55:42 A4400 Spec

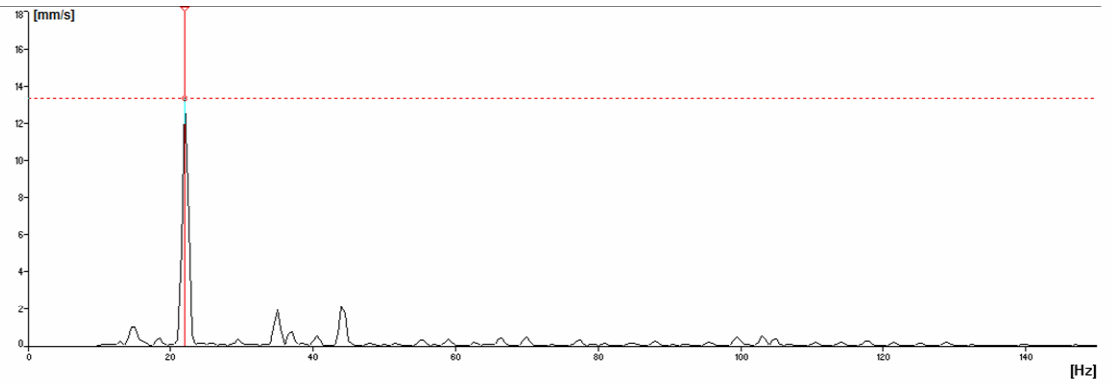
Freq [18.5] [Hz] [2.6297] [mm/s]



443 aps./min

Manto[S7/V]Spec iki 1600Hz 2014.02.22 09:56:39 A4400 Spec

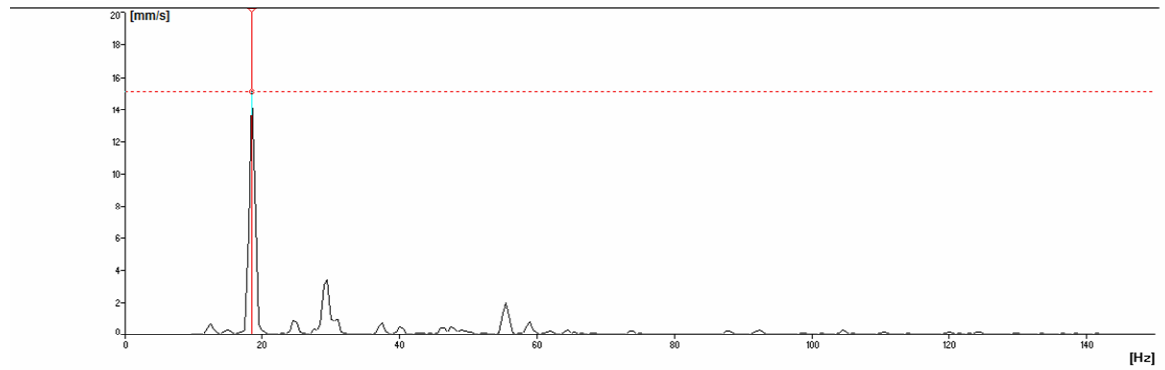
Freq [22] [Hz] [13.3711] [mm/s]



## 12 taškas 375 aps./min

Manto\S12\Spec iki 1600Hz 2014.02.22 18:57:01 A4400 Spec

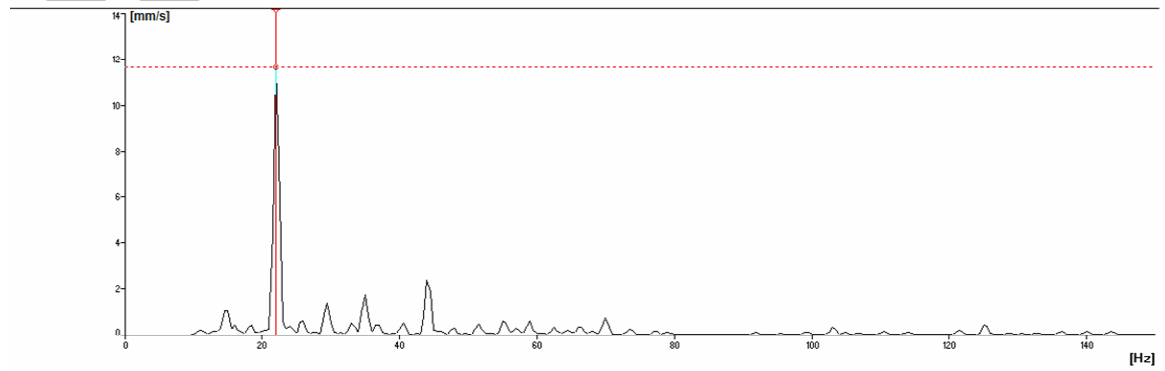
Freq [18.5] [Hz] [15.1021] [mm/s]



## 443 aps./min

Manto\S12\Spec iki 1600Hz 2014.02.22 09:58:04 A4400 Spec

Freq [22] [Hz] [11.6665] [mm/s]

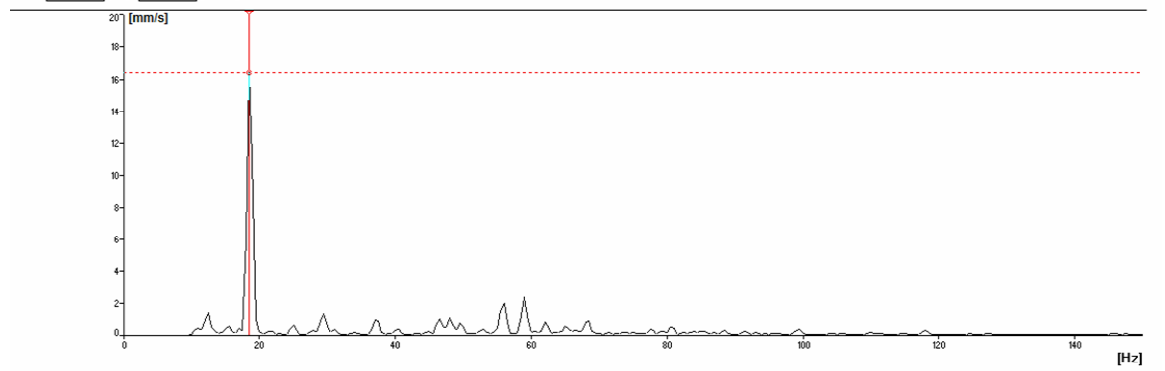


## PORT pusè

### 3 taškas 375 aps./min

Manto\P3\Spec iki 1600Hz 2014.02.22 18:58:32 A4400 Spec

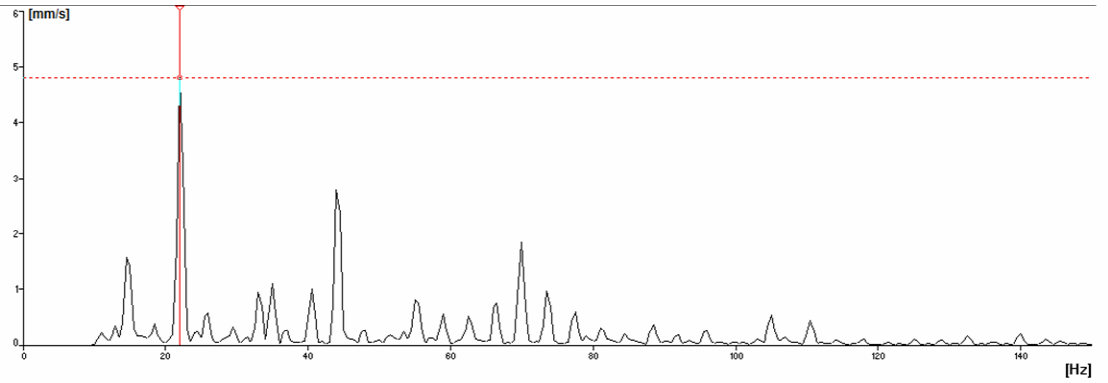
Freq [18.5] [Hz] [16.3897] [mm/s]



443 aps./min

Manto\P3\Spec iki 1600Hz 2014.02.22 10:00:18 A4400 Spec

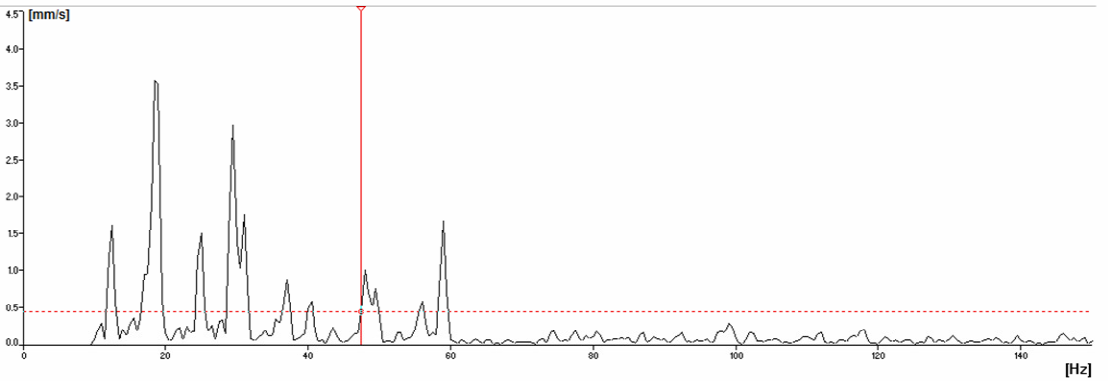
Freq [22] [Hz] [4.8008] [mm/s]



5 taškas 375 aps./min

Manto\P5\Spec iki 1600Hz 2014.02.22 18:58:59 A4400 Spec

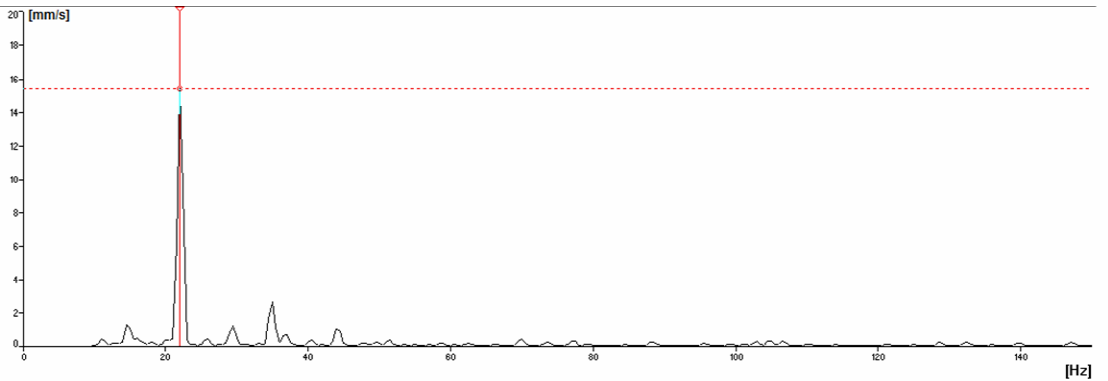
Freq [47.5] [Hz] [0.4412] [mm/s]



443 aps./min

Manto\P5\Spec iki 1600Hz 2014.02.22 10:00:43 A4400 Spec

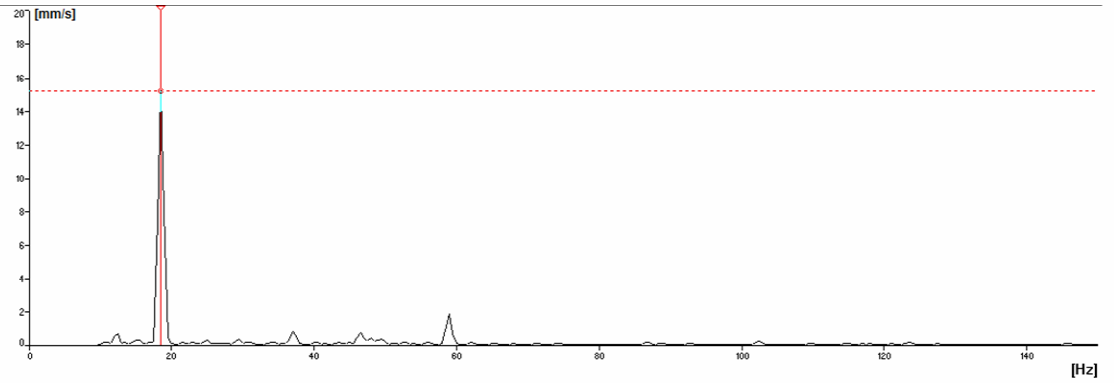
Freq [22] [Hz] [15.4157] [mm/s]



### 9 taškas 375 aps./min

Manto[P9/V]Spec iki 1600Hz 2014.02.22 18:59:54 A4400 Spec

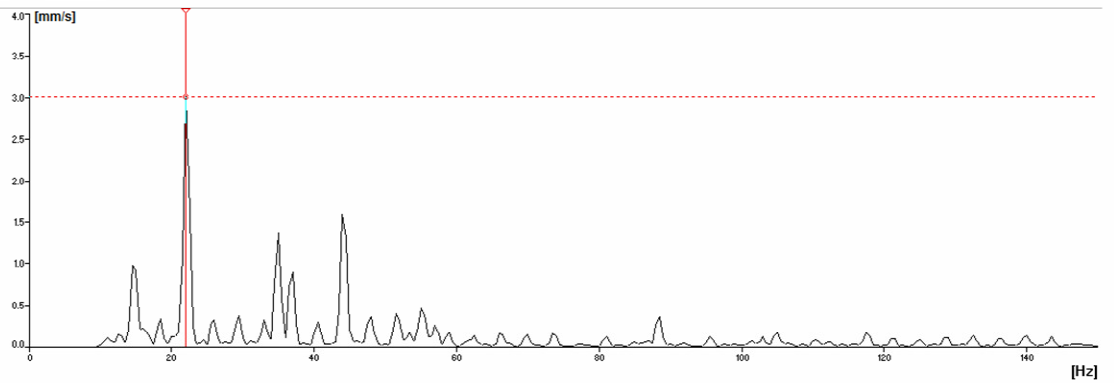
Freq [18.5] [Hz] [15.2276] [mm/s]



### 443 aps./min

Manto[P9/V]Spec iki 1600Hz 2014.02.22 10:01:47 A4400 Spec

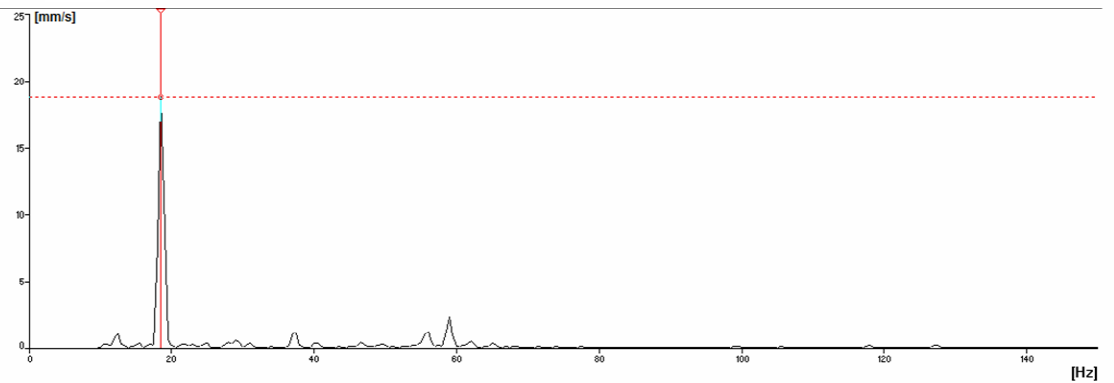
Freq [22] [Hz] [3.0071] [mm/s]



### 12 taškas 375 aps./min

Manto[P12/V]Spec iki 1600Hz 2014.02.22 19:00:33 A4400 Spec

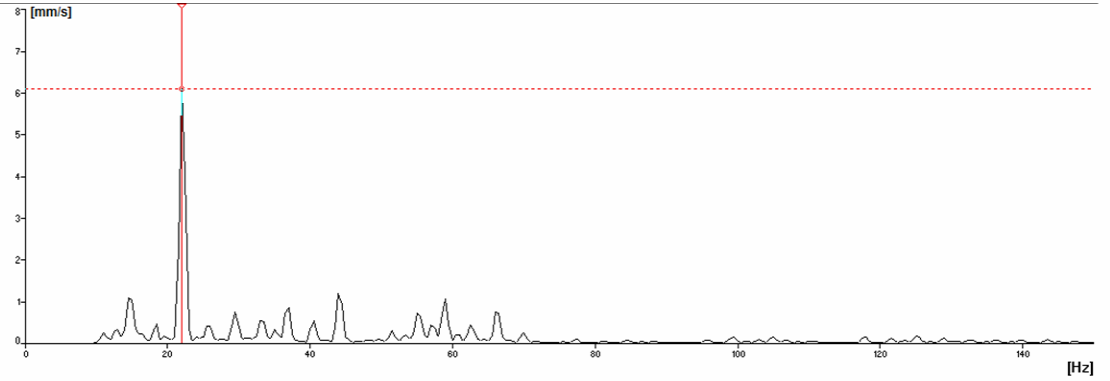
Freq [18.5] [Hz] [18.7796] [mm/s]



443 aps./min

Manto[P12]NSpec iki 1600Hz 2014.02.22 10:02:34 A4400 Spec

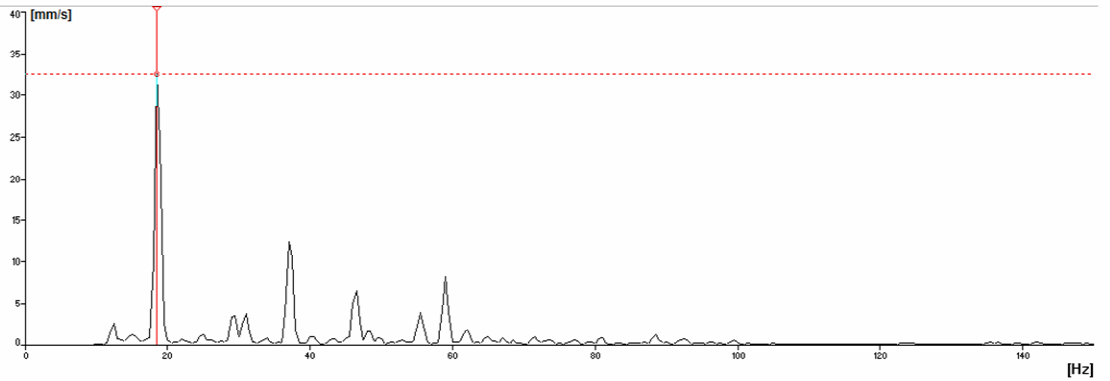
Freq [22] [Hz] [6.0801] [mm/s]



13 taškas 375 aps./min

Manto[P13]NSpec iki 1600Hz 2014.02.22 19:00:44 A4400 Spec

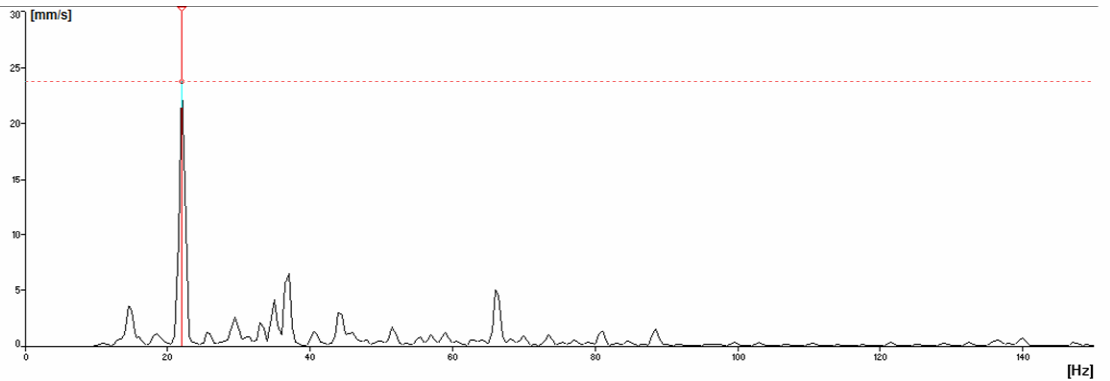
Freq [18.5] [Hz] [32.535] [mm/s]



443 aps./min

Manto[P13]NSpec iki 1600Hz 2014.02.22 10:02:48 A4400 Spec

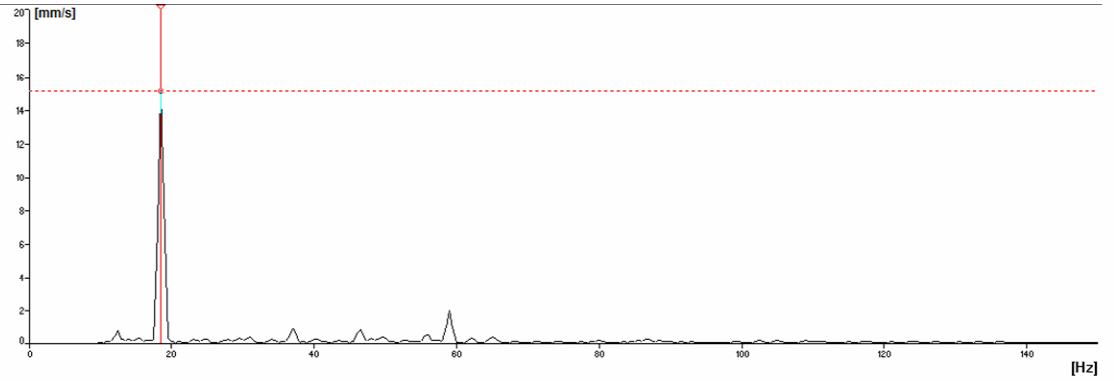
Freq [22] [Hz] [23.7919] [mm/s]



### 15 taškas 375 aps./min

Manto|P15|VSpec iki 1600Hz 2014.02.22 19:02:08 A4400 Spec

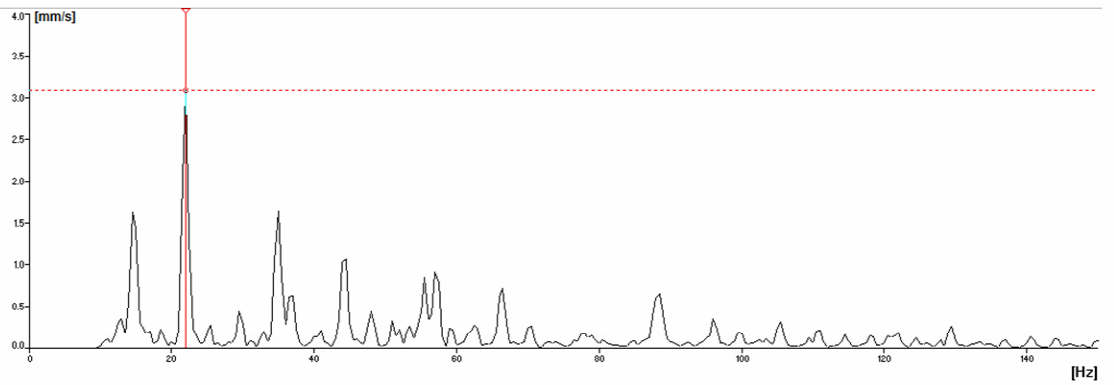
Freq  [Hz]  [mm/s]



### 443 aps./min

Manto|P15|VSpec iki 1600Hz 2014.02.22 15:24:29 A4400 Spec

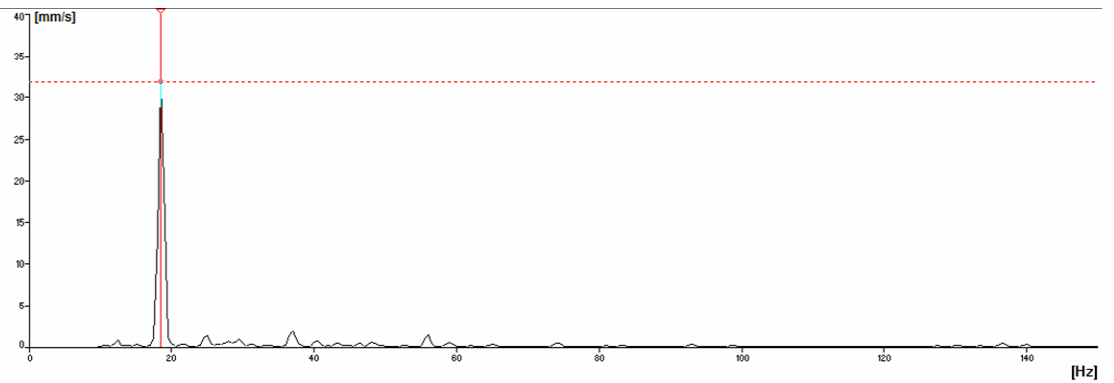
Freq  [Hz]  [mm/s]



### 16 taškas 375 aps./min

Manto|P16|VSpec iki 1600Hz 2014.02.22 19:02:25 A4400 Spec

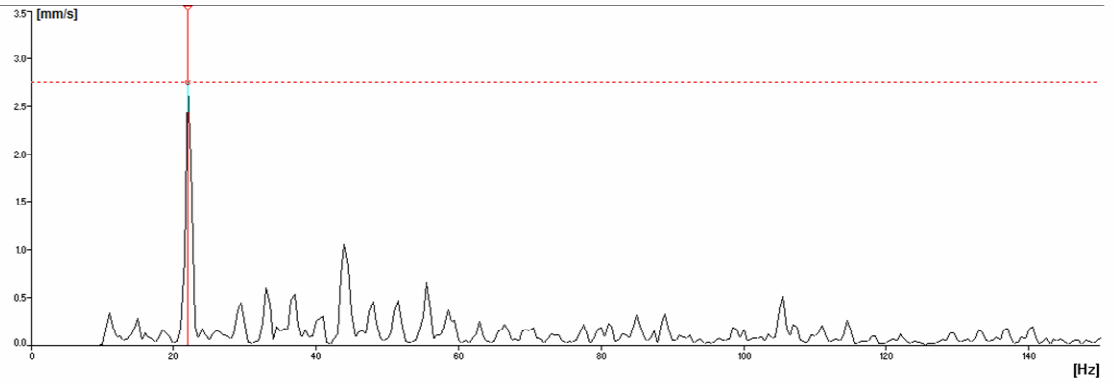
Freq  [Hz]  [mm/s]



443 aps./min

Manto[P16/NSpec iki 1600Hz 2014.02.22 15:24:45 A4400 Spec

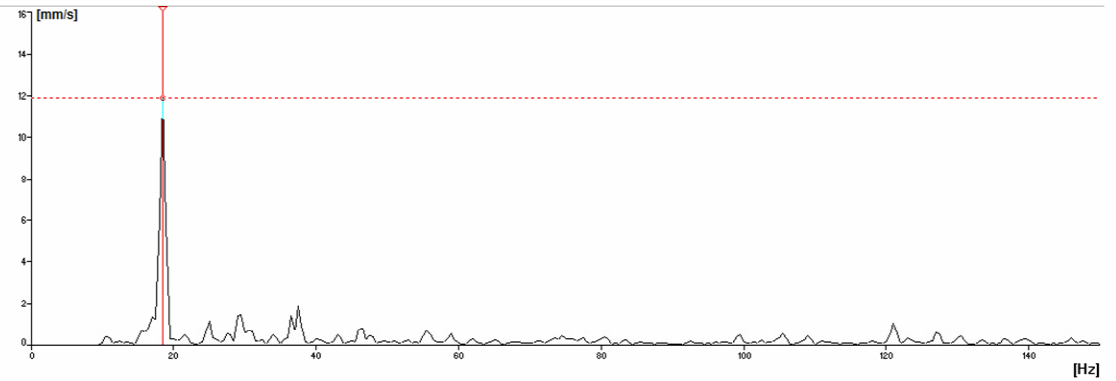
Freq [22] [Hz] [2.751] [mm/s]



18 taškas 375 aps./min

Manto[P18/NSpec iki 1600Hz 2014.02.22 19:02:53 A4400 Spec

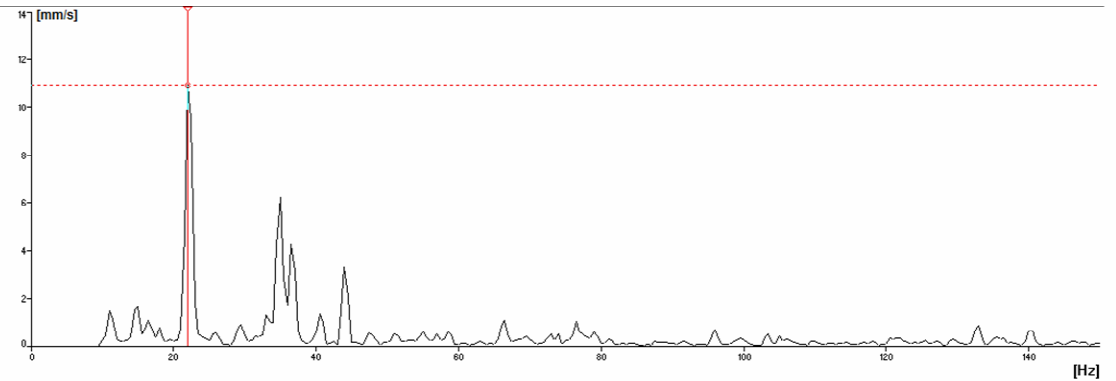
Freq [18.5] [Hz] [11.8571] [mm/s]



443 aps./min

Manto[P18/NSpec iki 1600Hz 2014.02.22 15:26:36 A4400 Spec

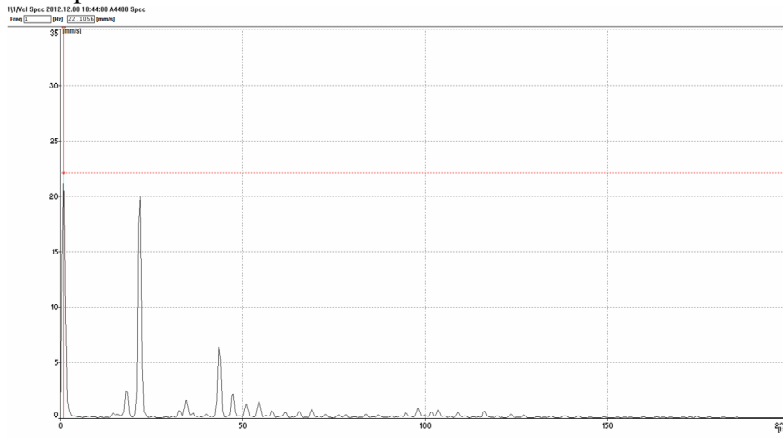
Freq [22] [Hz] [10.9104] [mm/s]



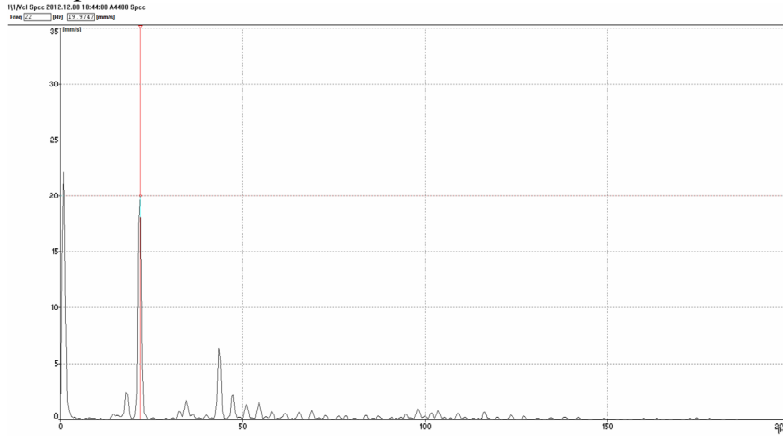
STBD pusės rezultatai iš kelto “Victoria Seaways” tirimo matavimų  
437, 400 ir 465 aps./ min visuose grafikuose

1 taškas

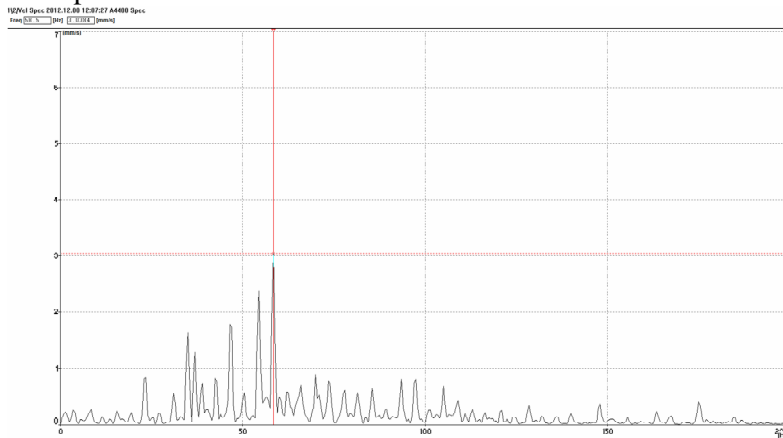
437 aps./min



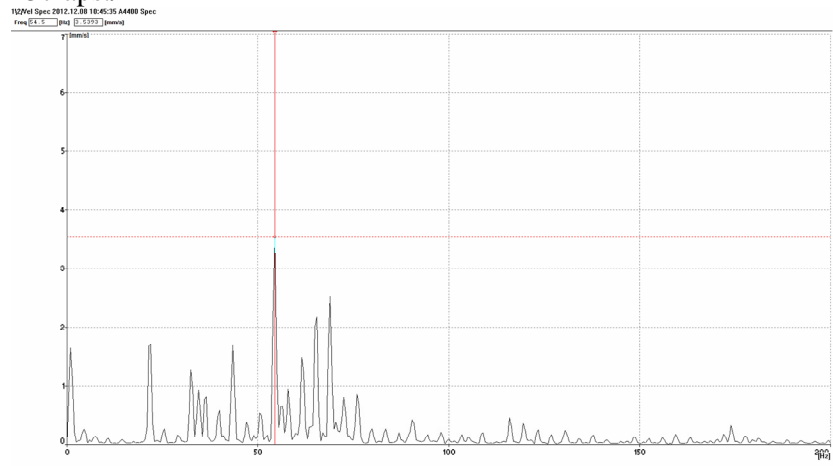
400 aps./min



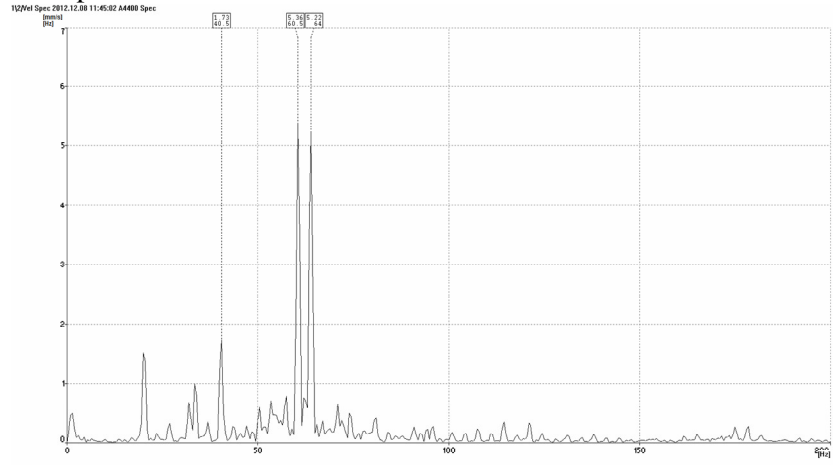
465 aps./min



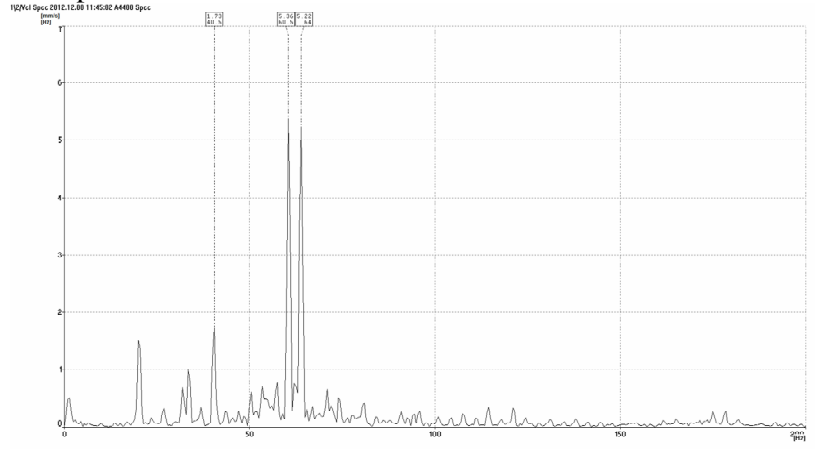
**2 taškas**  
**437 aps./min**



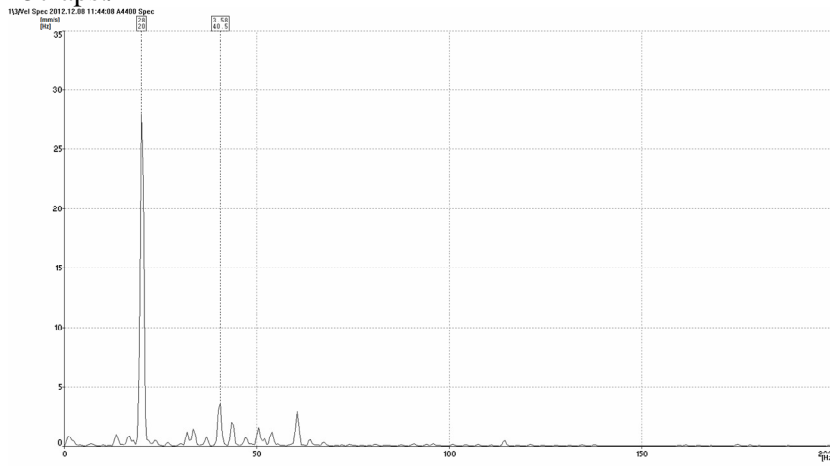
**400 aps./min**



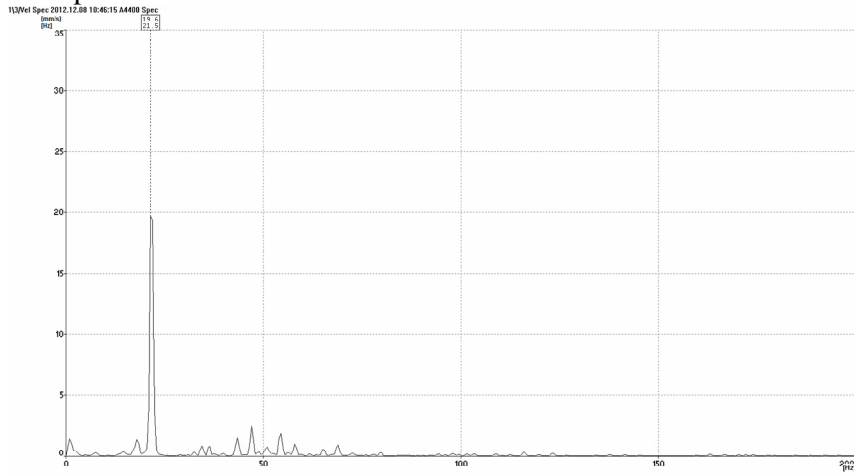
**465 aps./min**



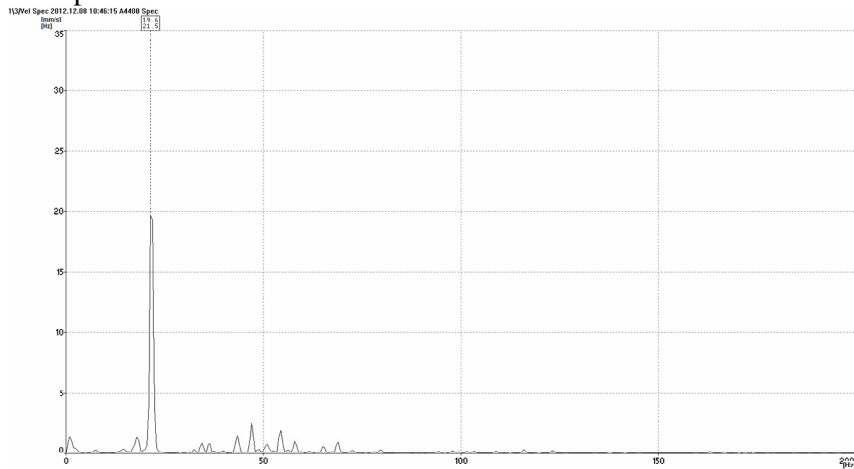
**3 taškas**  
**437 aps./min**



**400 aps./min**



**465 aps./min**

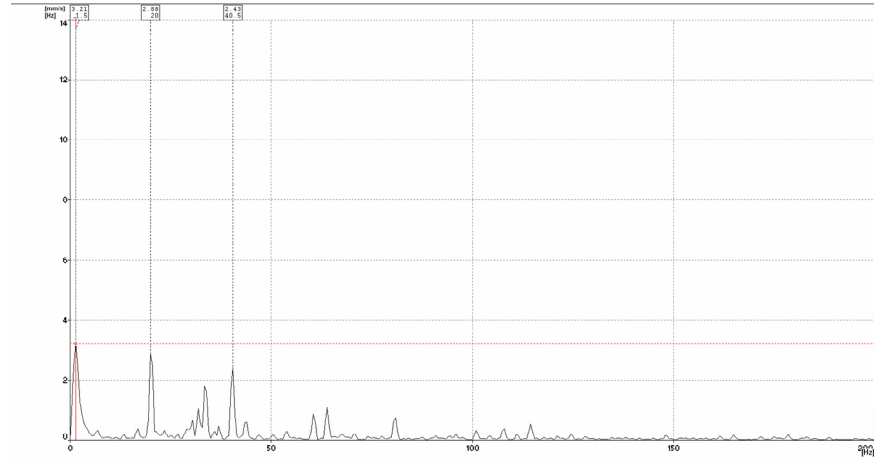


### 4 taškas

437 aps./min

11/01/14 Spec 2012.12.08 11:44:30 A4400 Spec

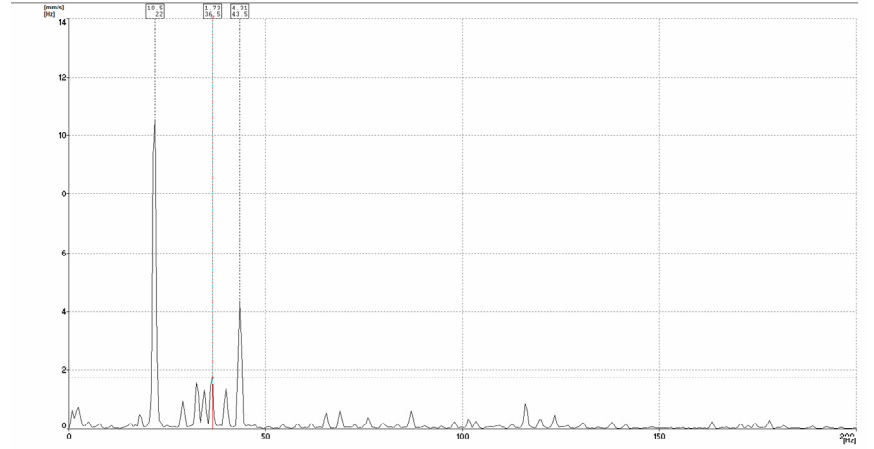
freq [1.5] [Hz] 0.2193 [mm/s]



400 aps./min

11/01/14 Spec 2012.12.08 18:47:17 A4400 Spec

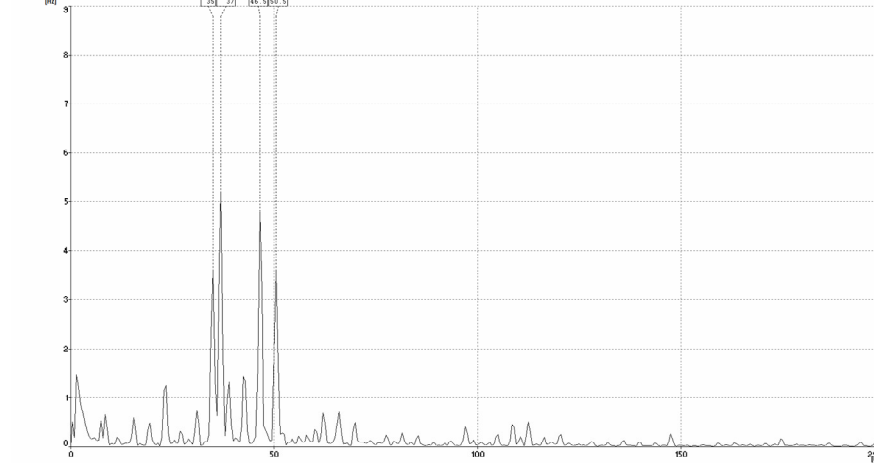
freq [1.5] [Hz] 0.2235 [mm/s]



465 aps./min

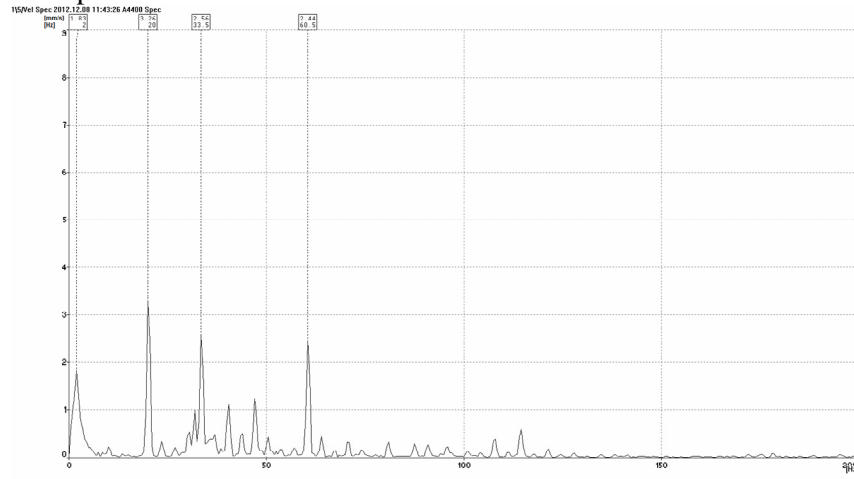
11/01/14 Spec 2012.12.08 12:38:37 A4400 Spec

freq [1.5] [Hz] 0.2305 [mm/s]

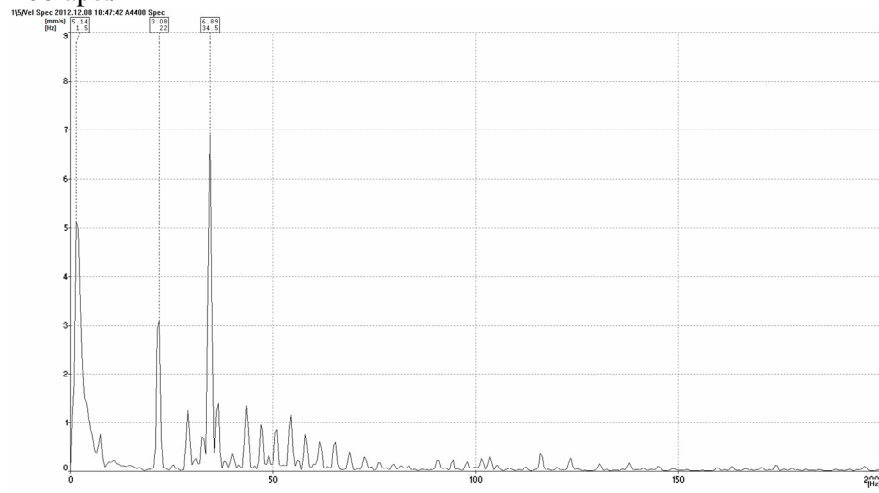


### 5 taškas

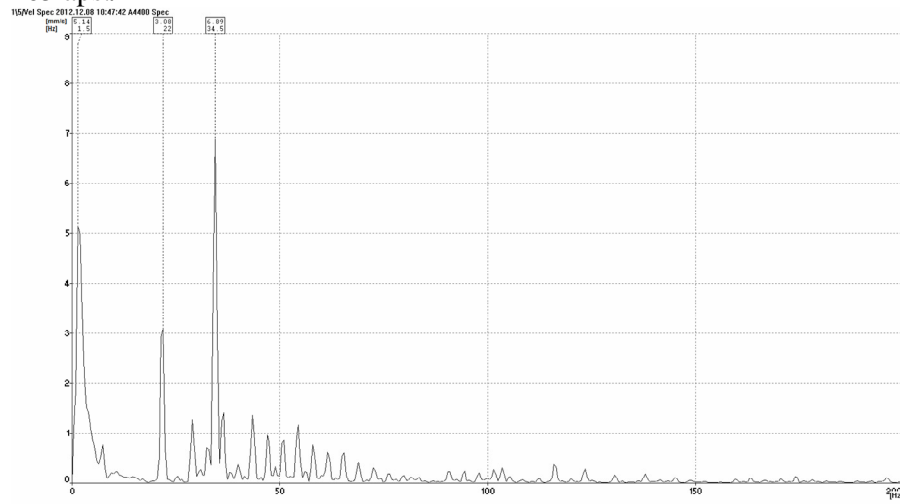
437 aps./min



400 aps./min

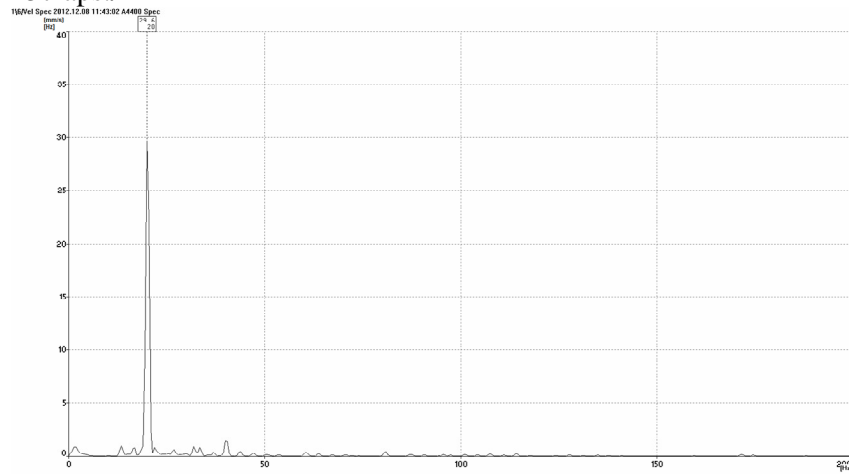


465 aps./min

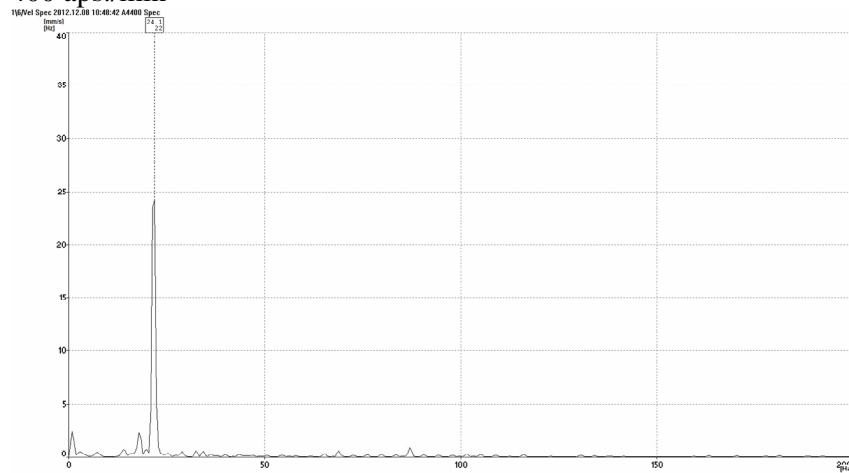


### 6 taškas

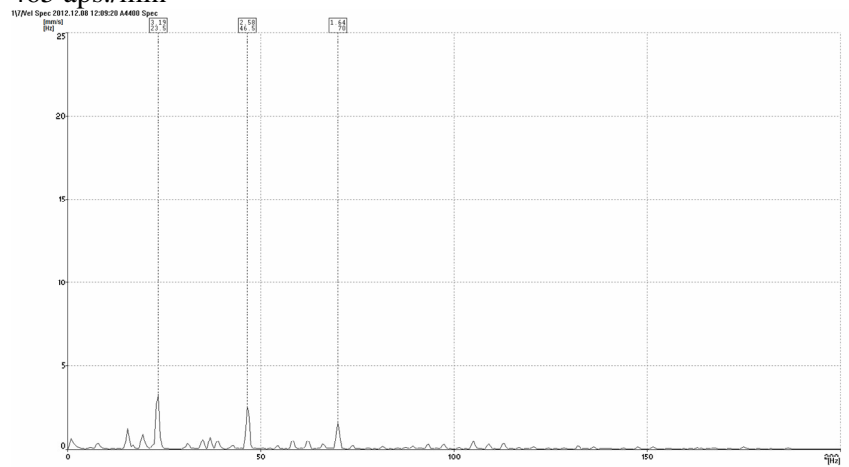
437 aps./min



400 aps./min

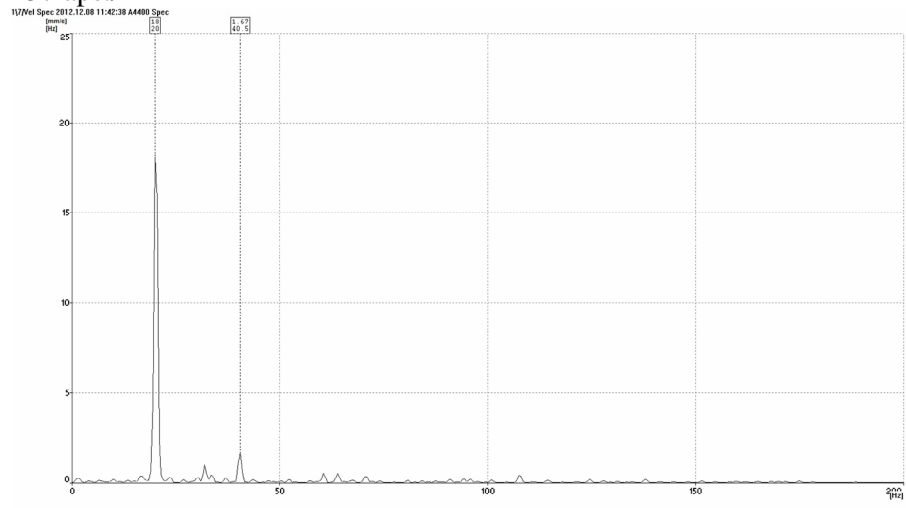


465 aps./min

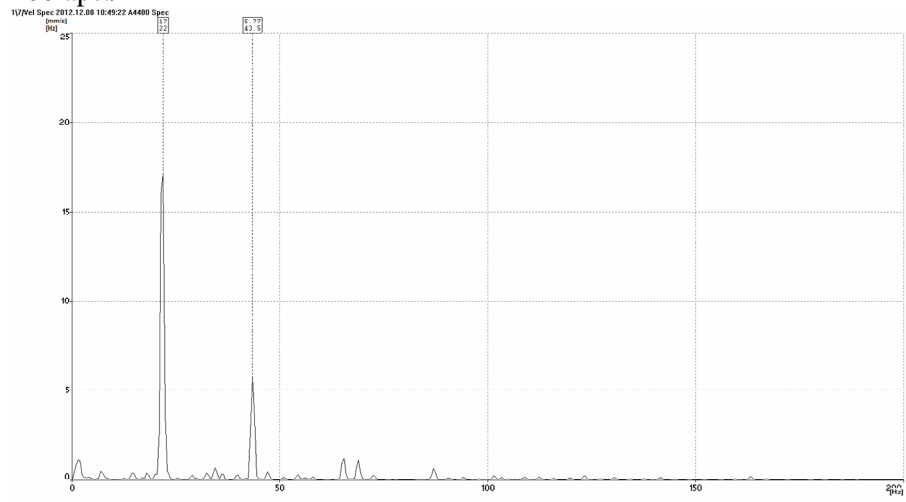


### 7 taškas

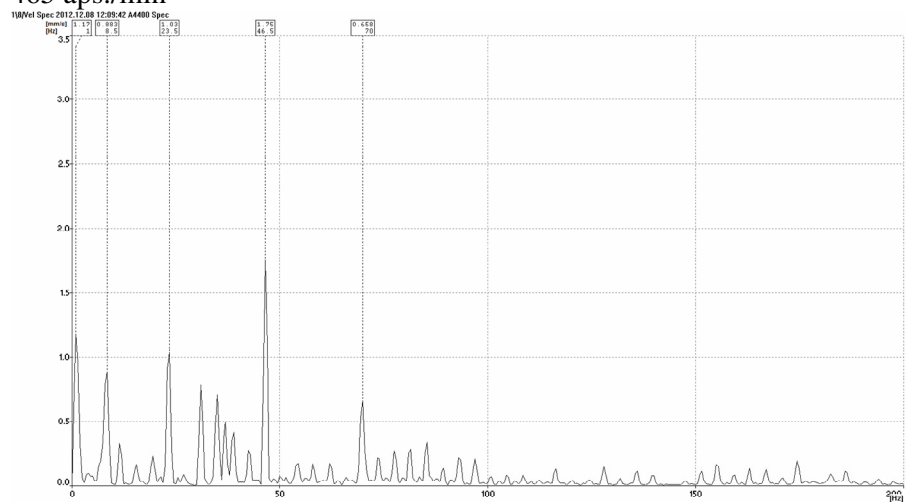
437 aps./min



400 aps./min

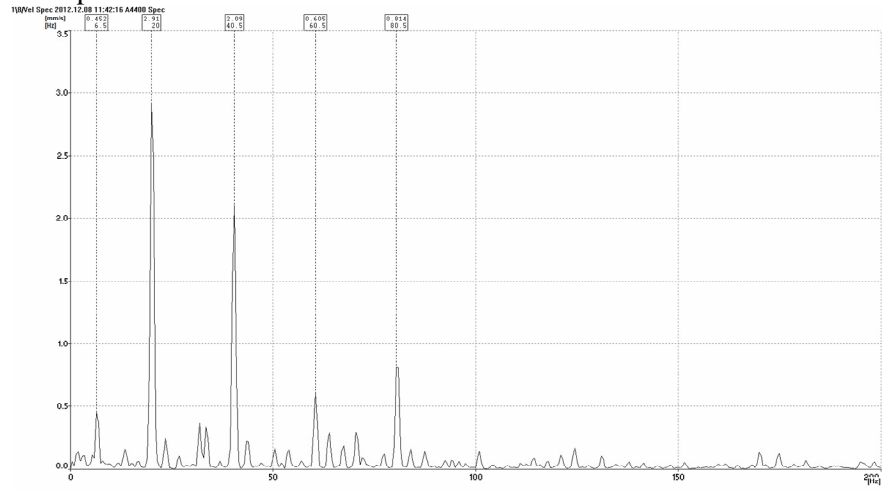


465 aps./min

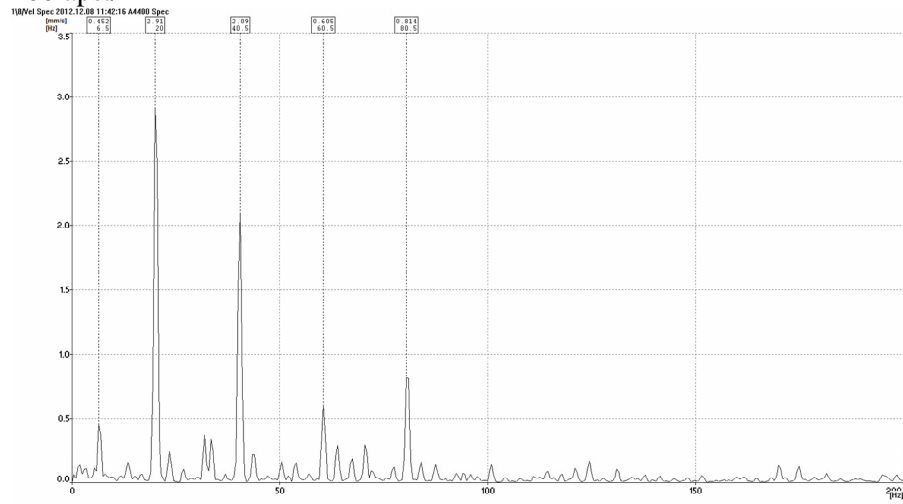


# 8 taškas

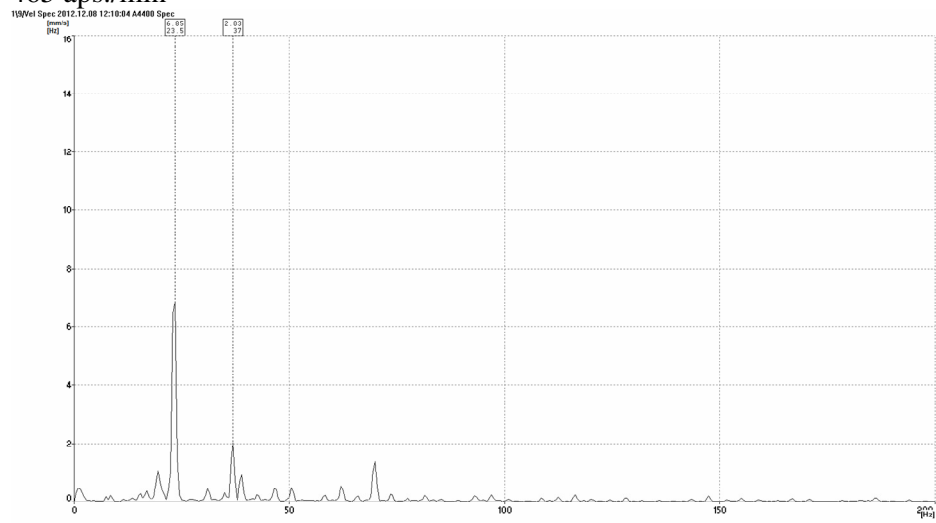
## 437 aps./min



## 400 aps./min

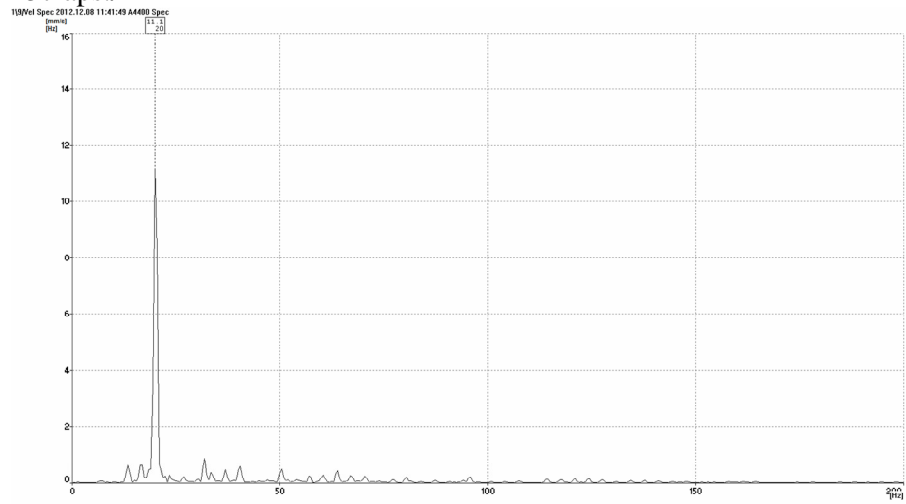


## 465 aps./min

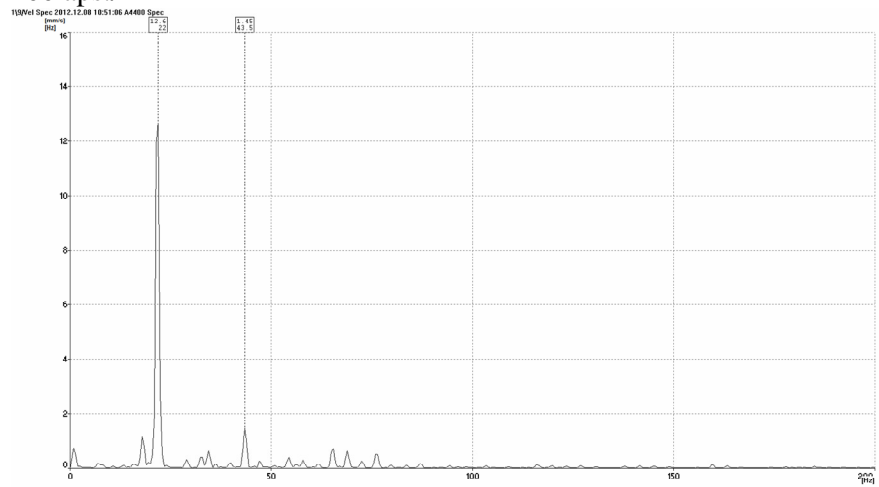


### 9 taškas

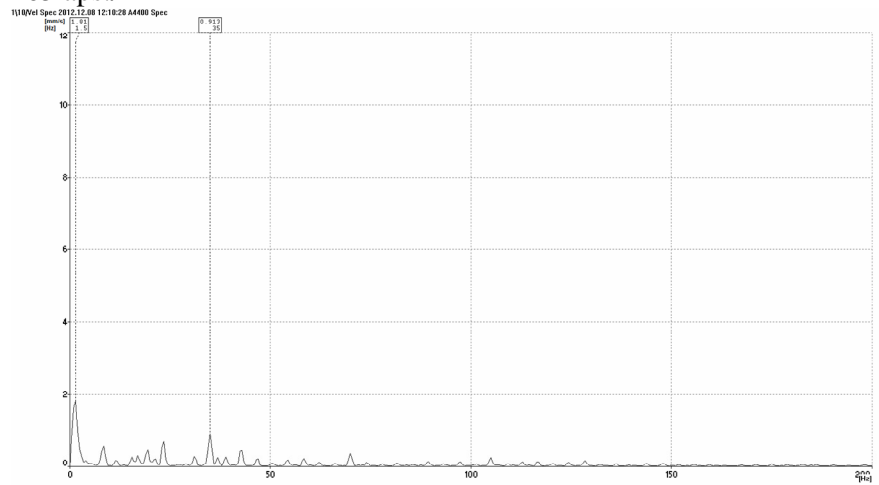
437 aps./min



400 aps./min

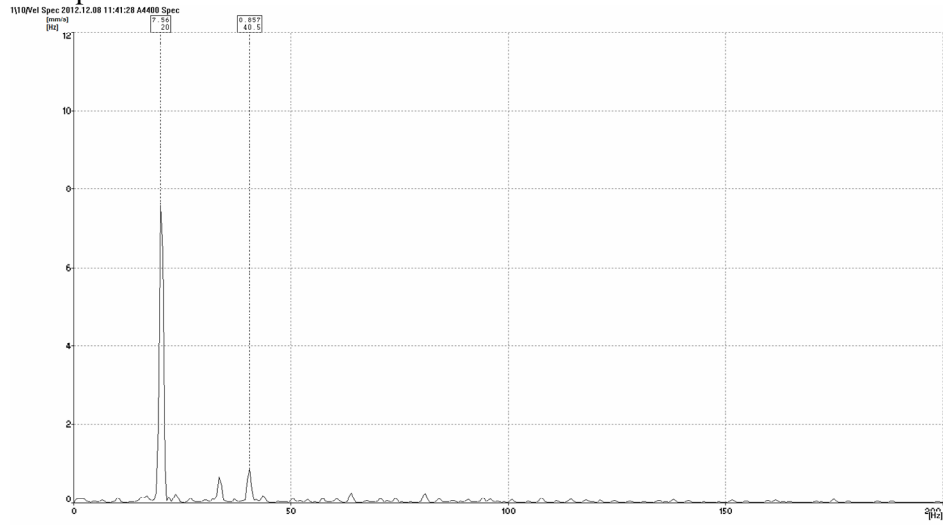


465 aps./min

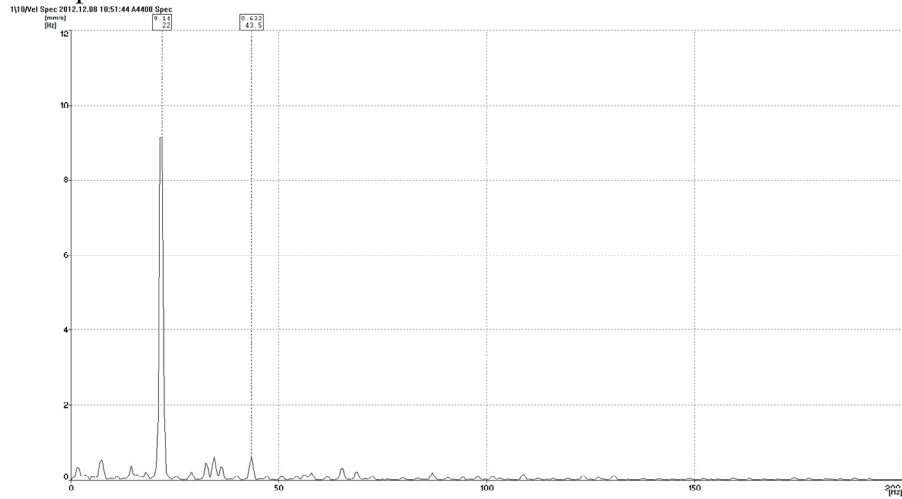


### 10 taškas

437 aps./min

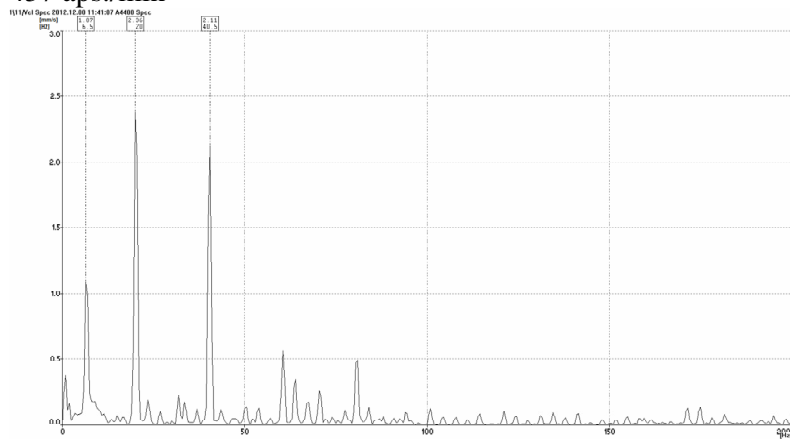


### 400 aps./min

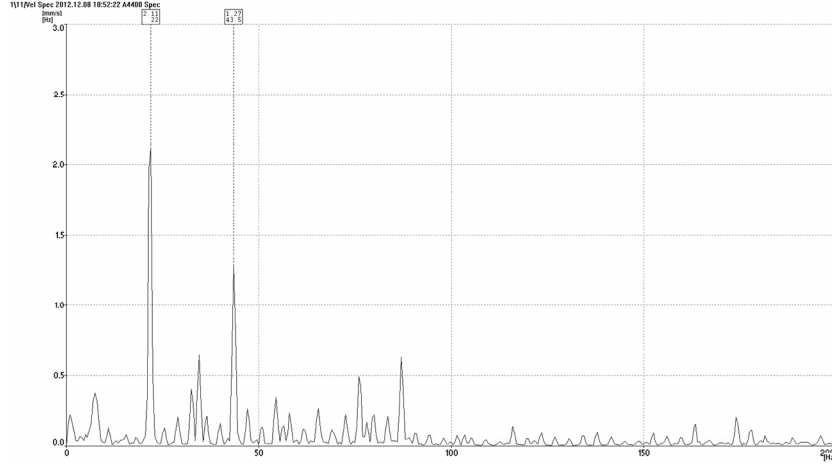


### 11 taškas

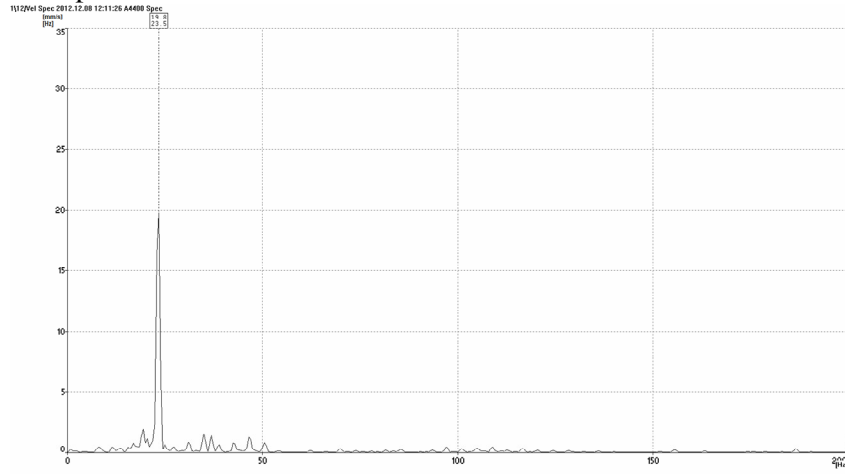
437 aps./min



400 aps./min

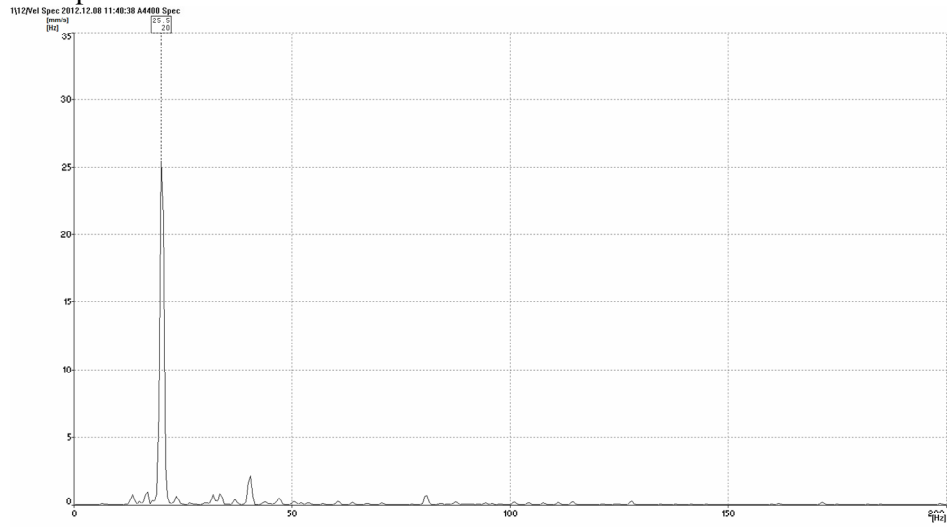


465 aps./min

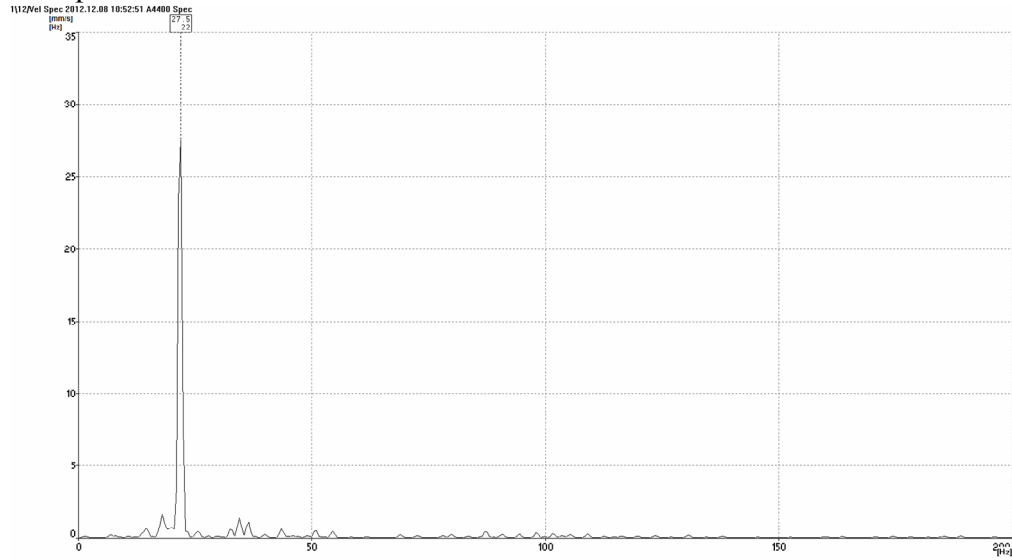


12 taškas

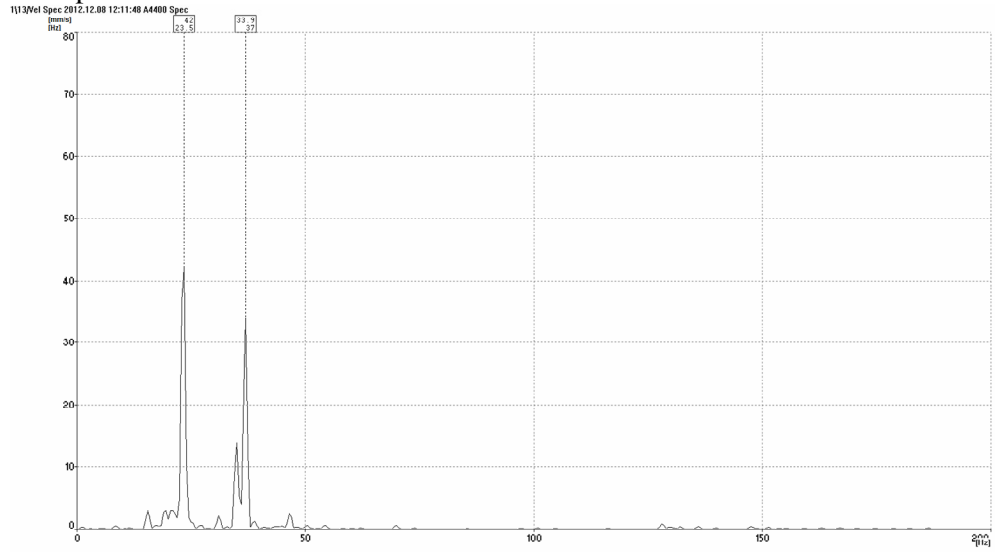
437 aps./min



400 aps./min

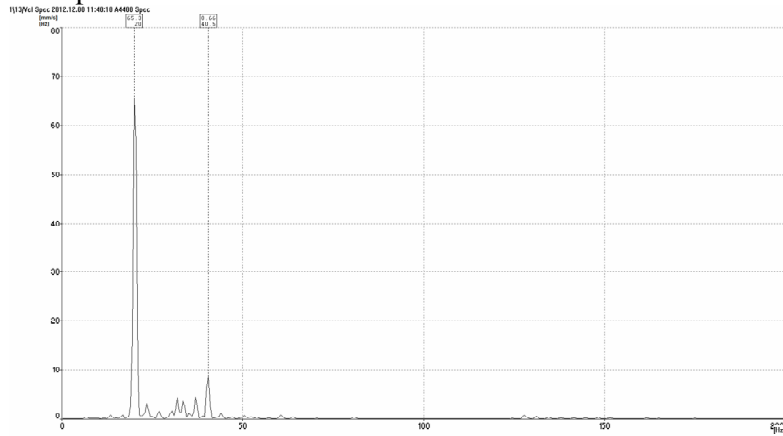


465 aps./min

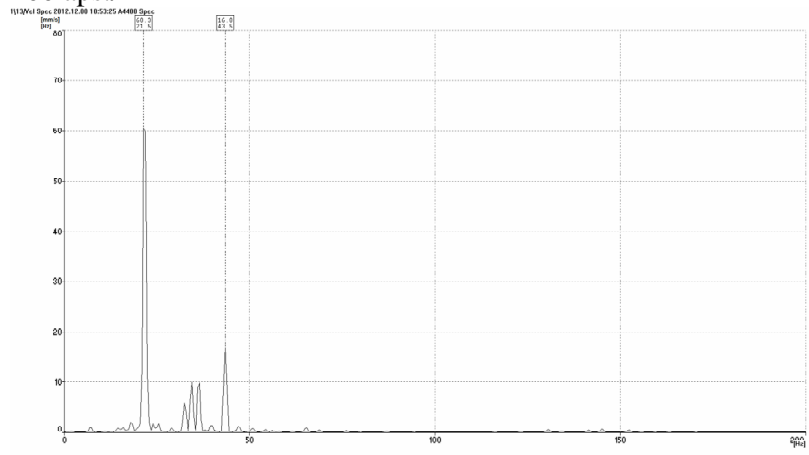


13 taškas

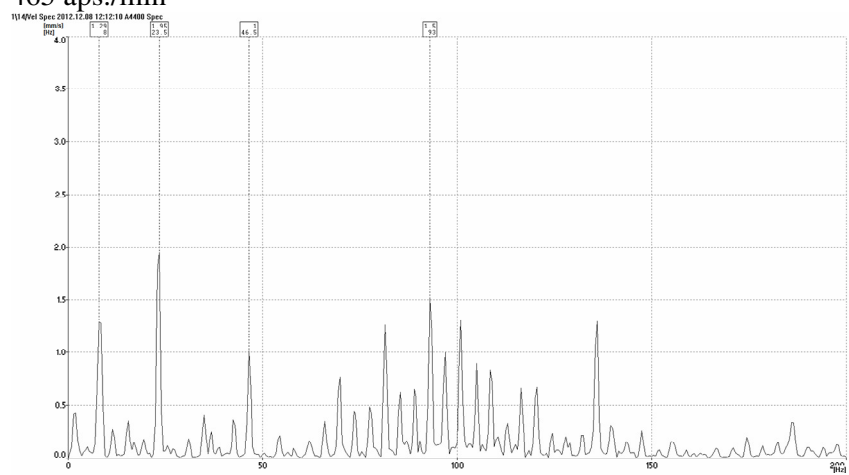
437 aps./min



### 400 aps./min

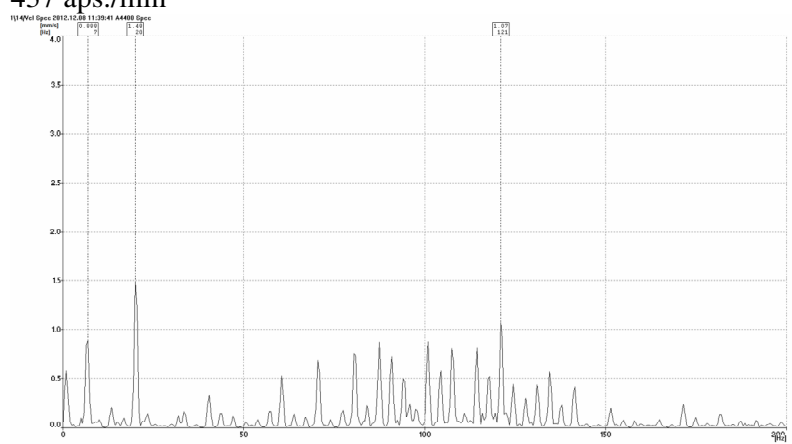


### 465 aps./min

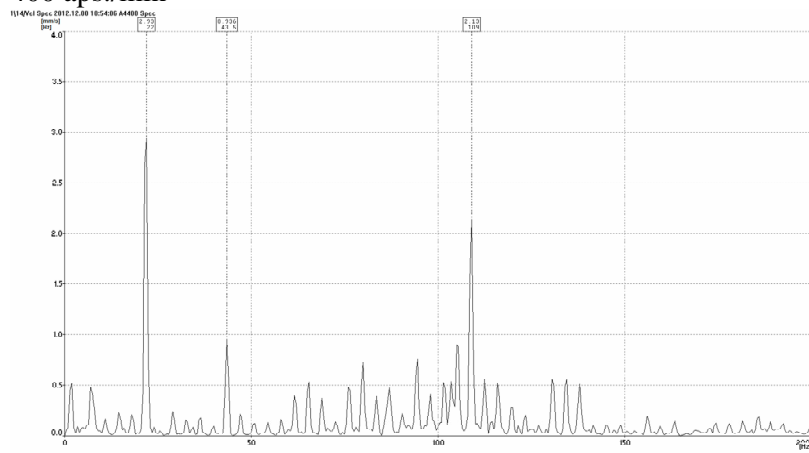


### 14 taškas

### 437 aps./min



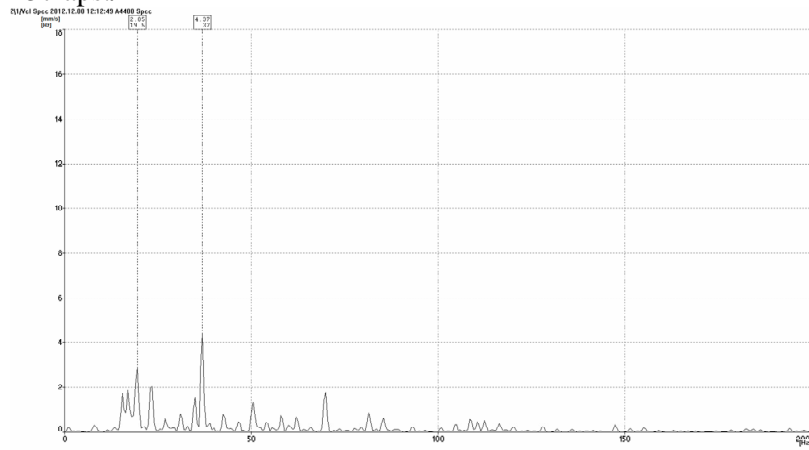
400 aps./min



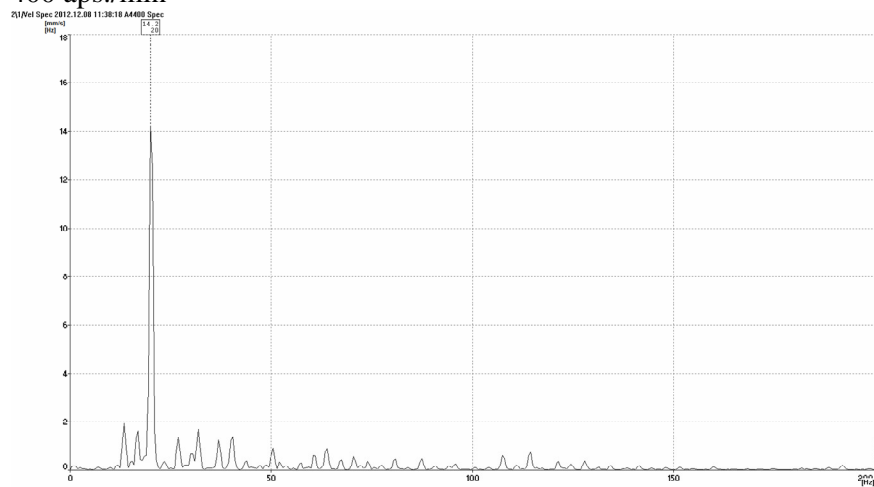
PORT - pusė

1 taškas

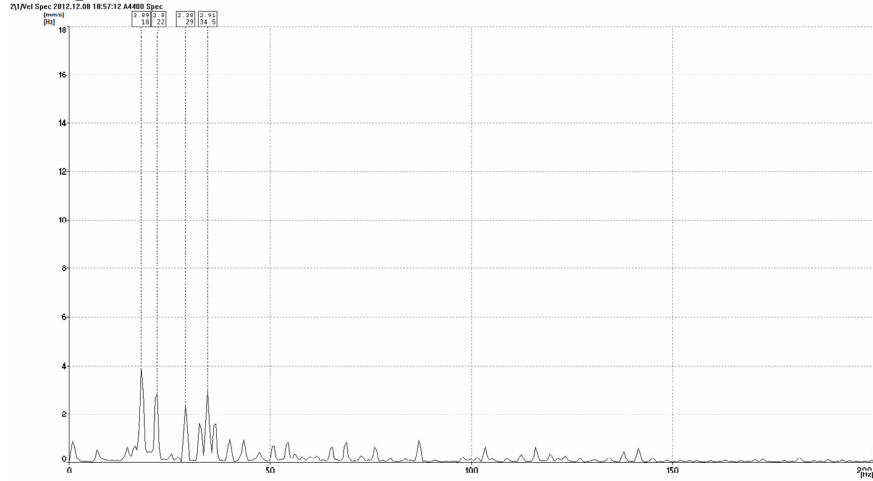
437 aps./min



400 aps./min

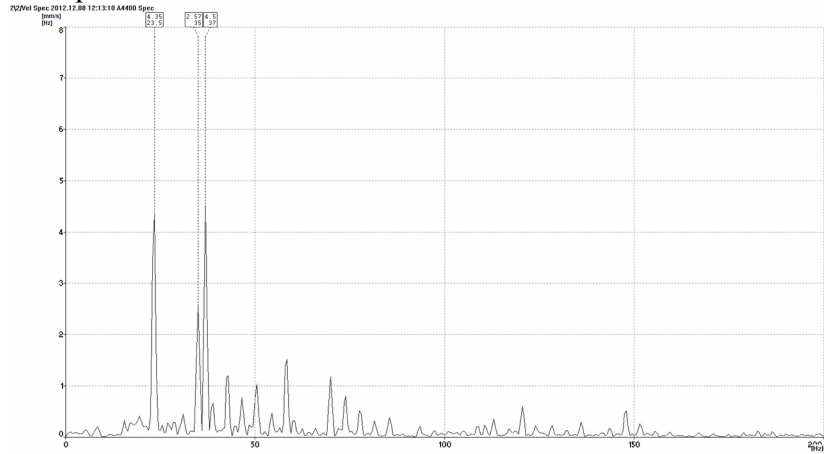


465 aps./min

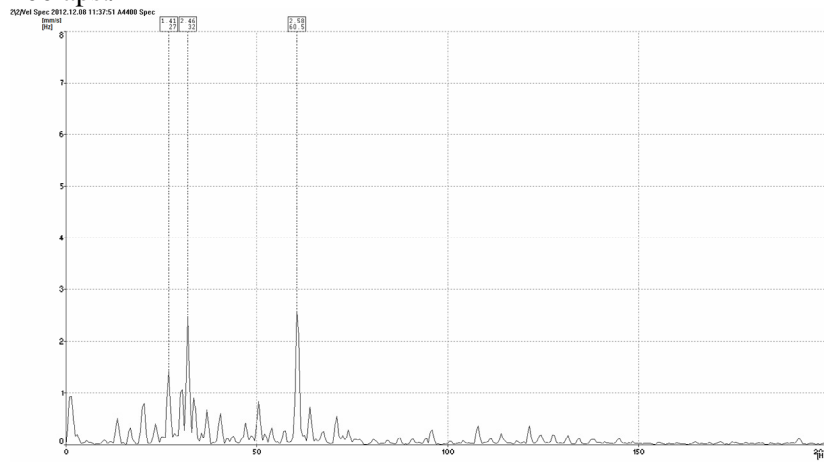


2 taškas

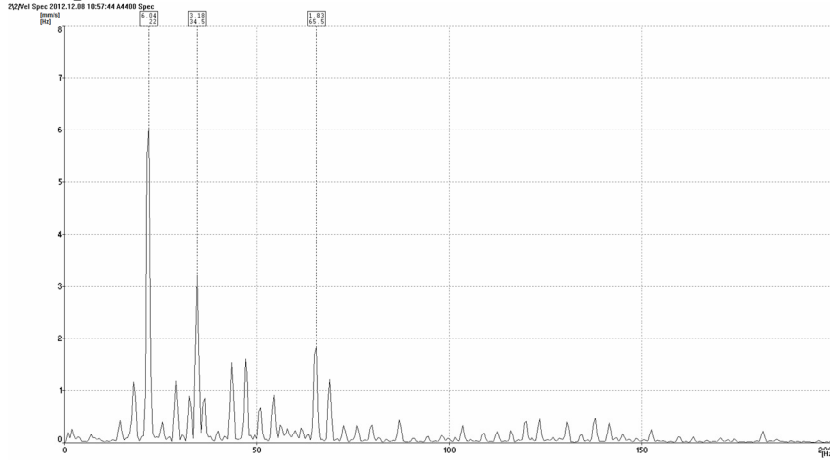
437 aps./min



400 aps./min

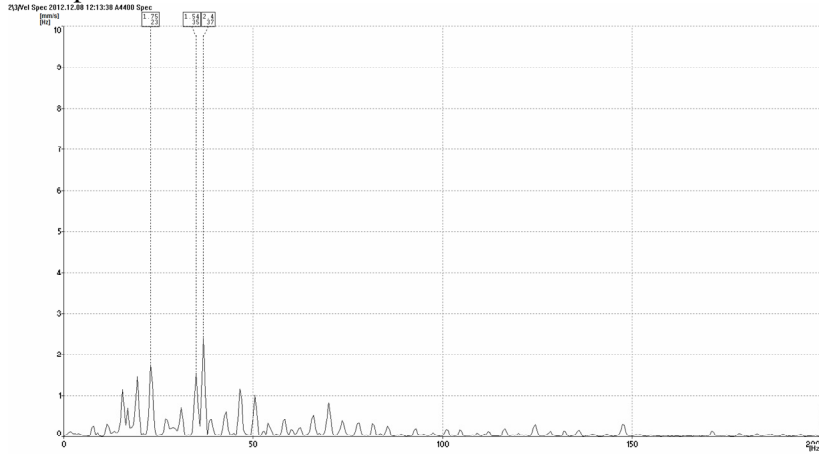


465 aps./min

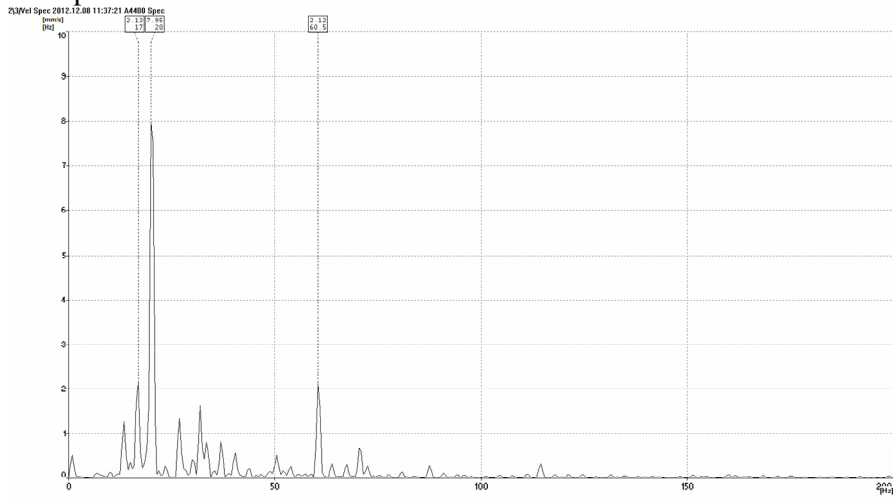


3 taškas

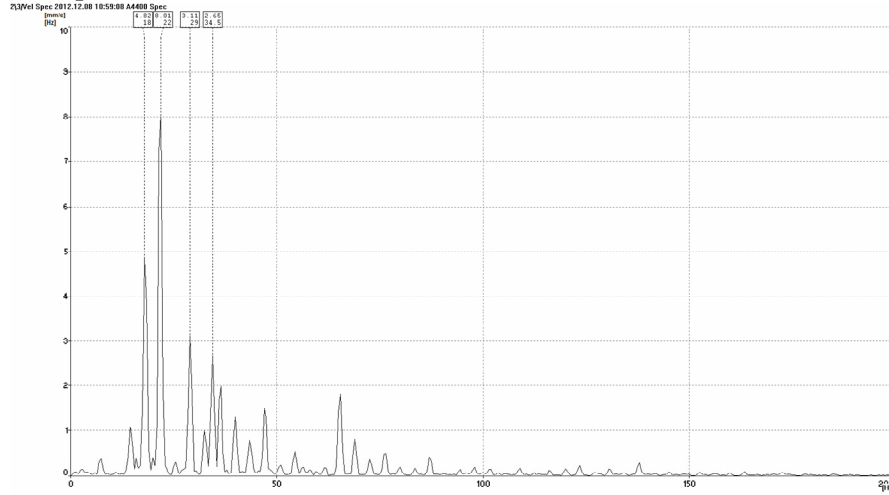
437 aps./min



400 aps./min

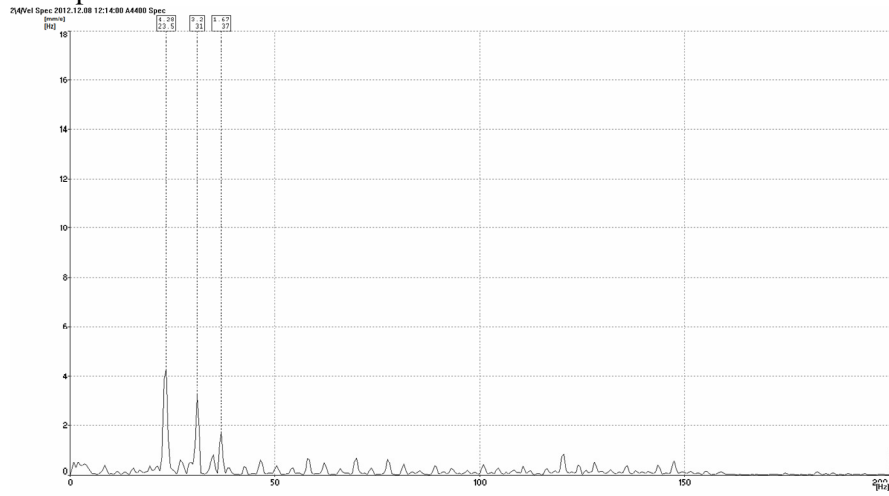


465 aps./min

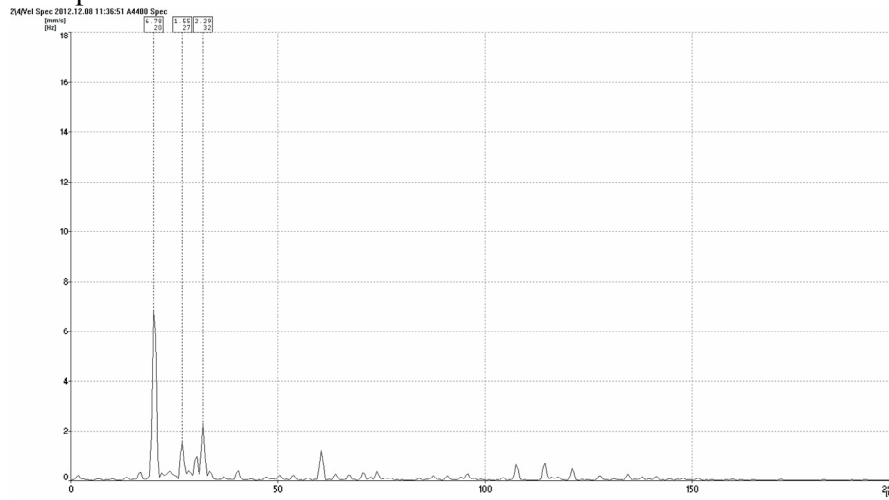


4 taškas

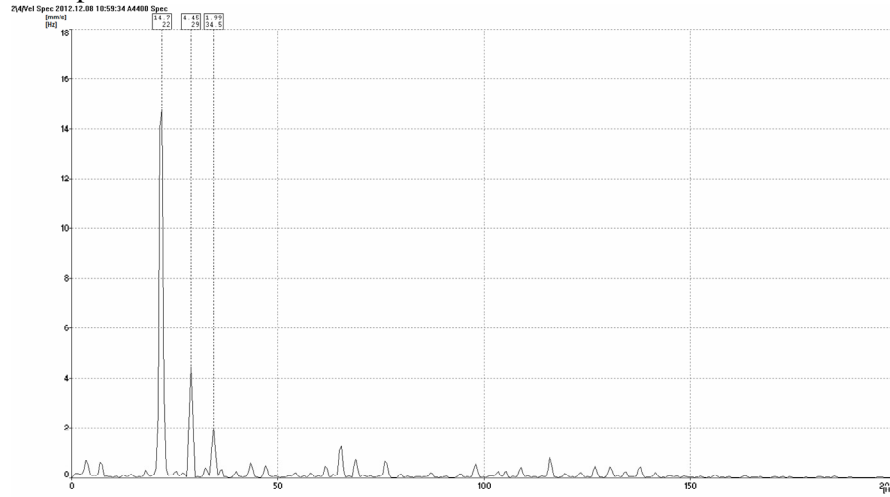
437 aps./min



400 aps./min

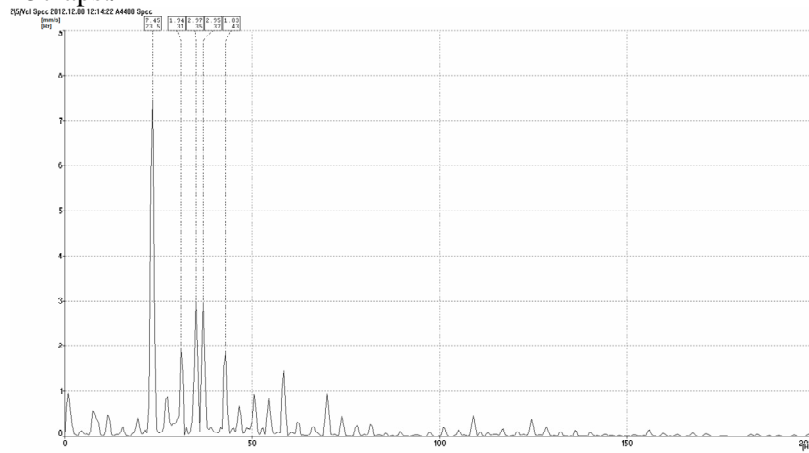


465 aps./min

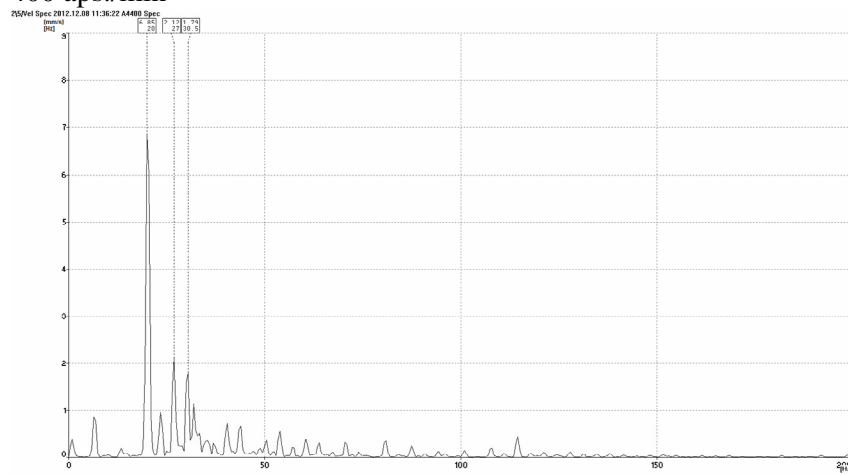


5 taškas

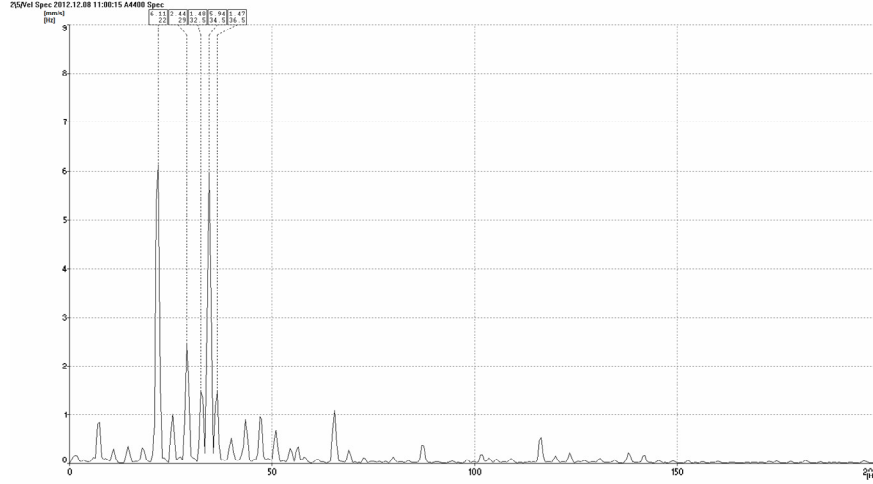
437 aps./min



400 aps./min

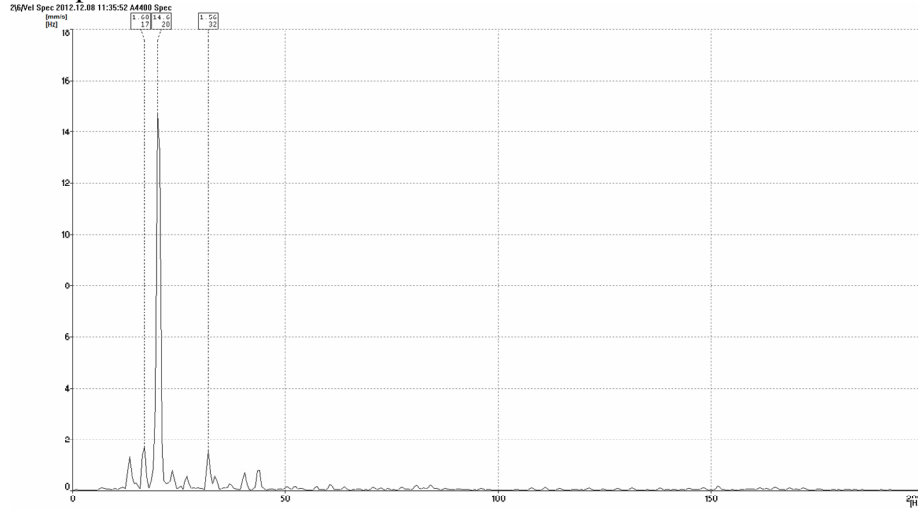


465 aps./min

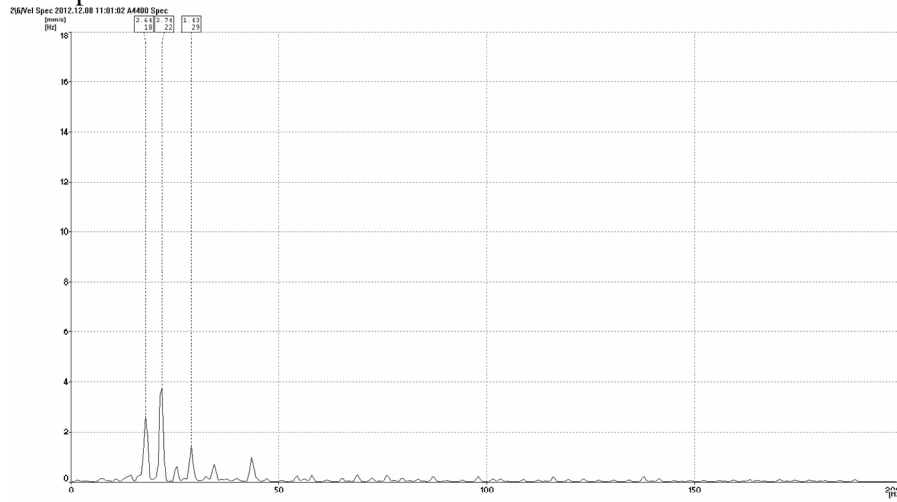


6 taškas

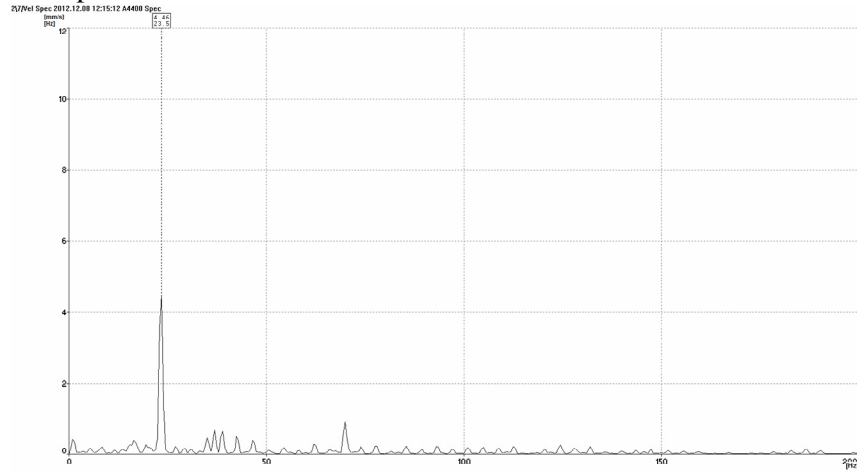
437 aps./min



400 aps./min

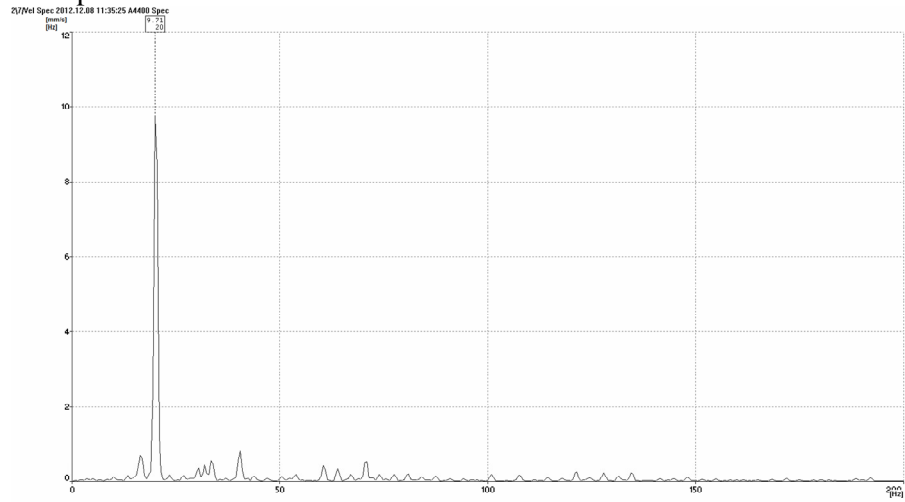


465 aps./min

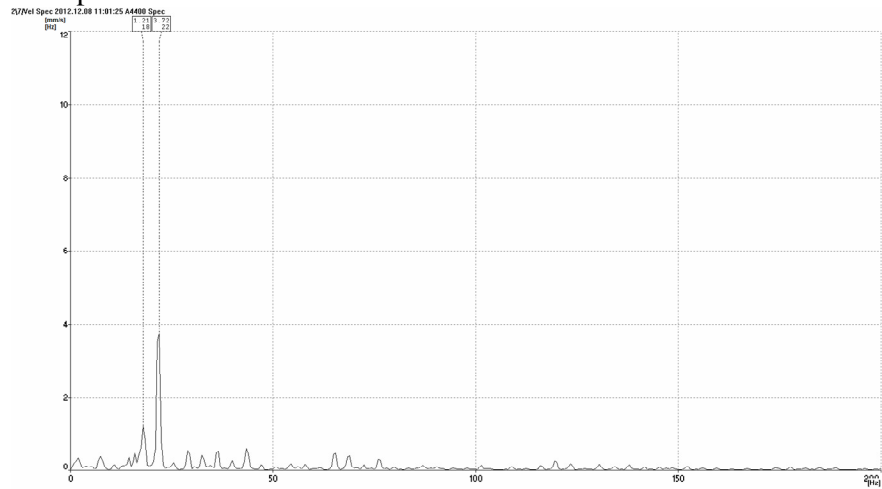


7 taškas

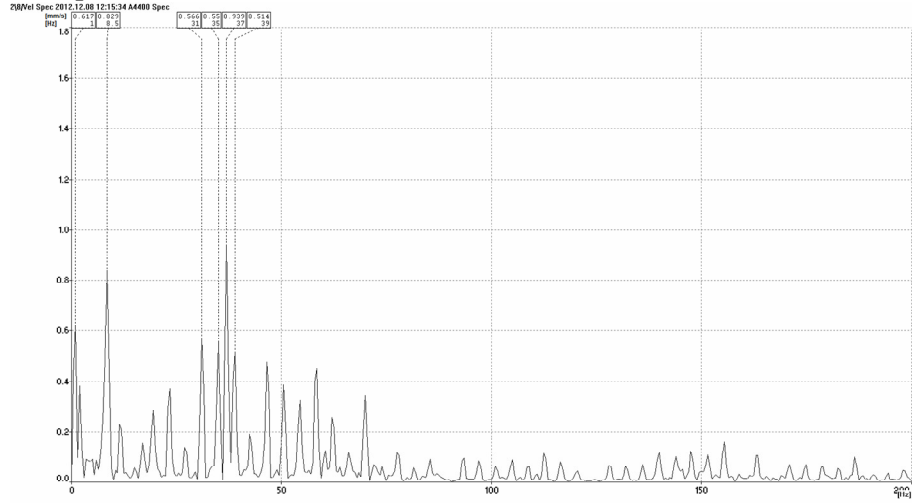
437 aps./min



400 aps./min

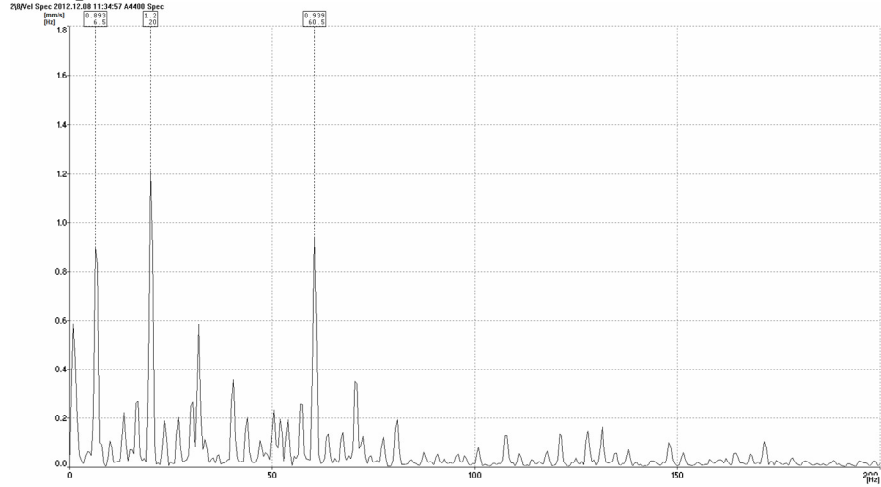


465 aps./min

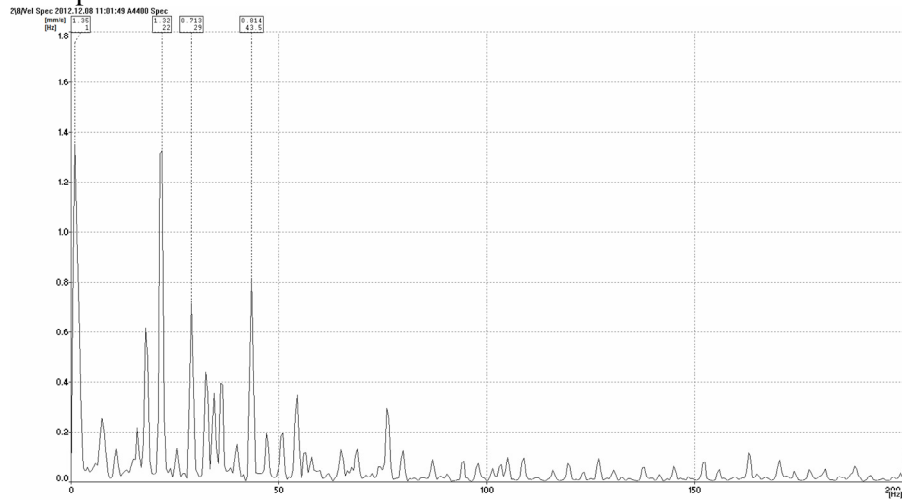


8 taškas

437 aps./min

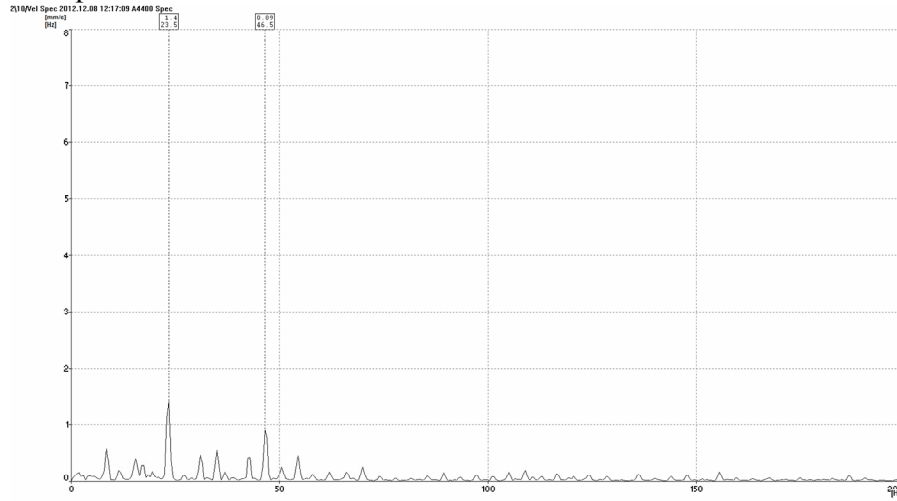


400 aps./min



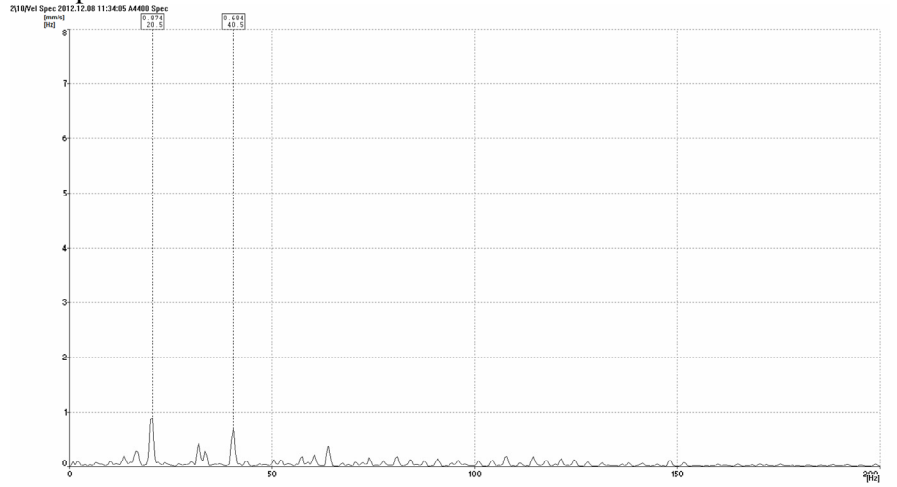


465 aps./min

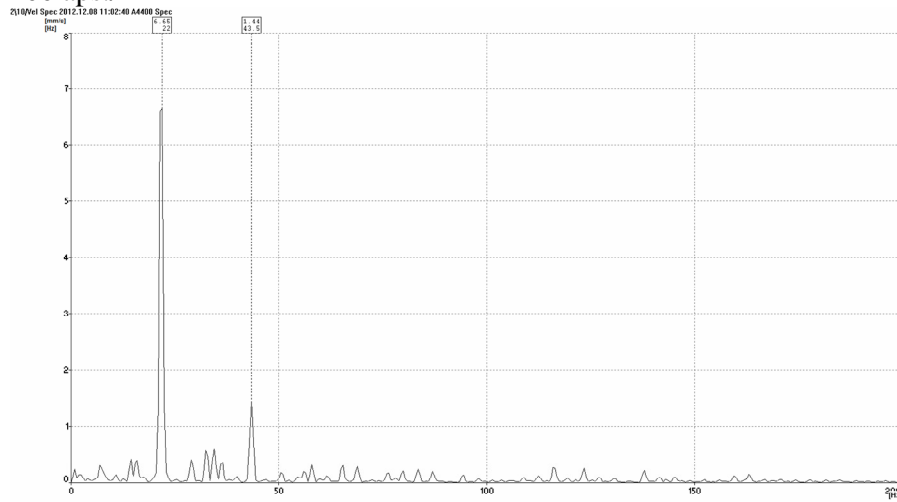


10 taškas

437 aps./min

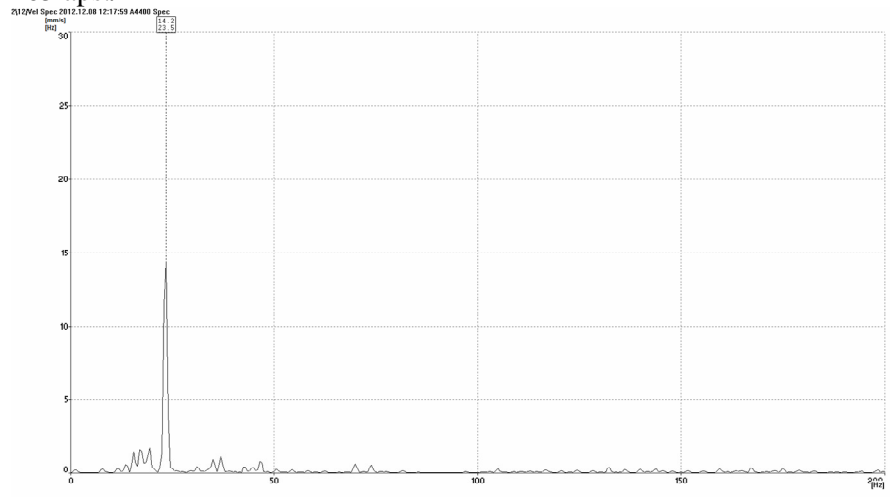


400 aps./min



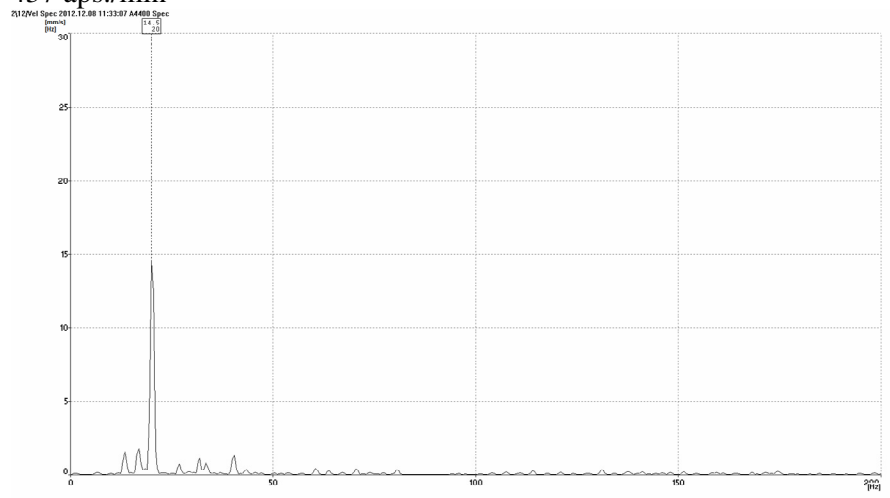


465 aps./min

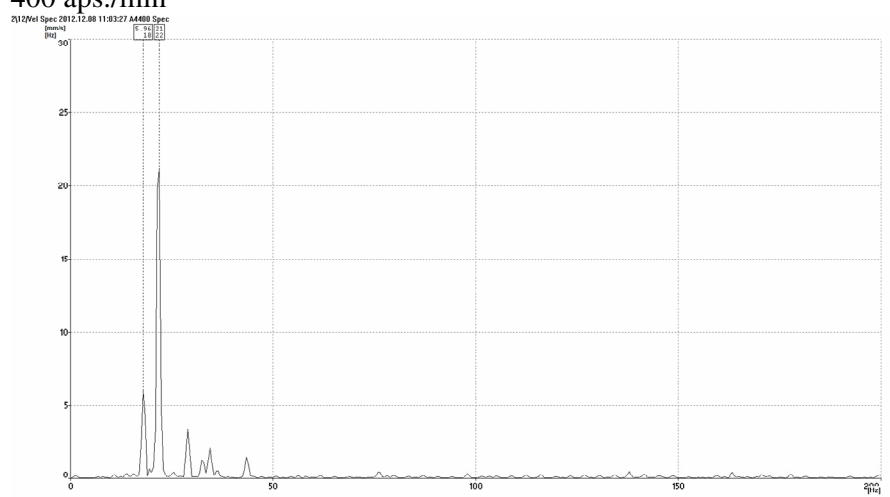


12 taškas

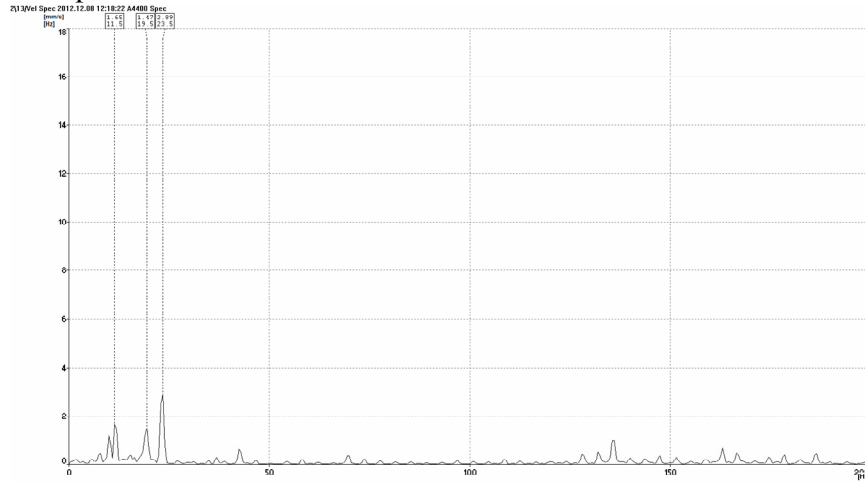
437 aps./min



400 aps./min

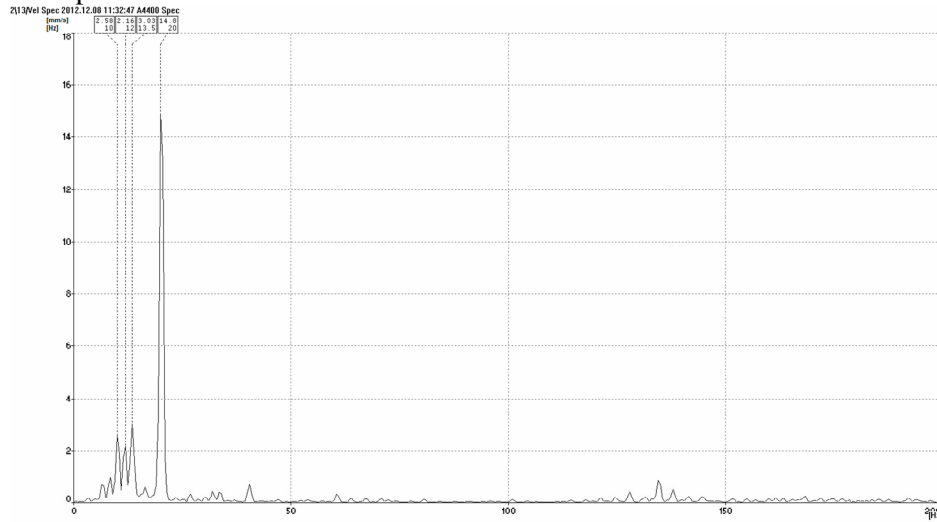


465 aps./min

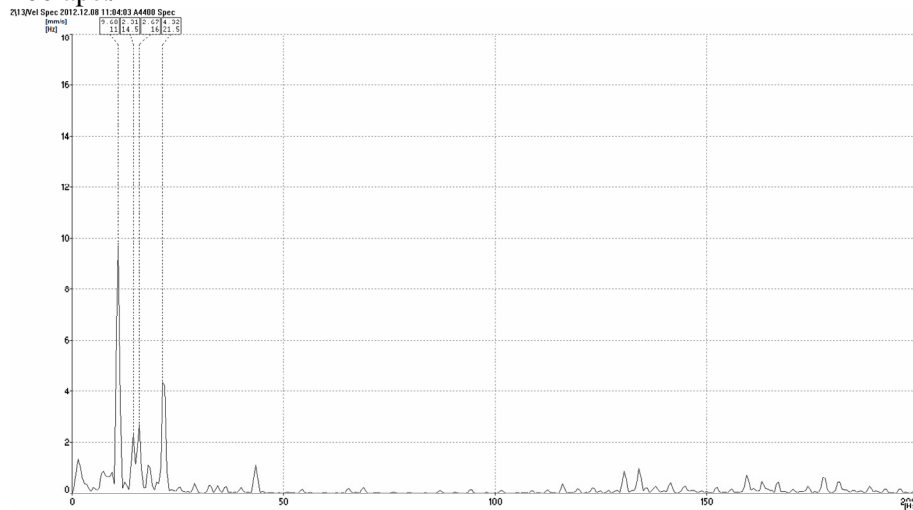


13 taškas

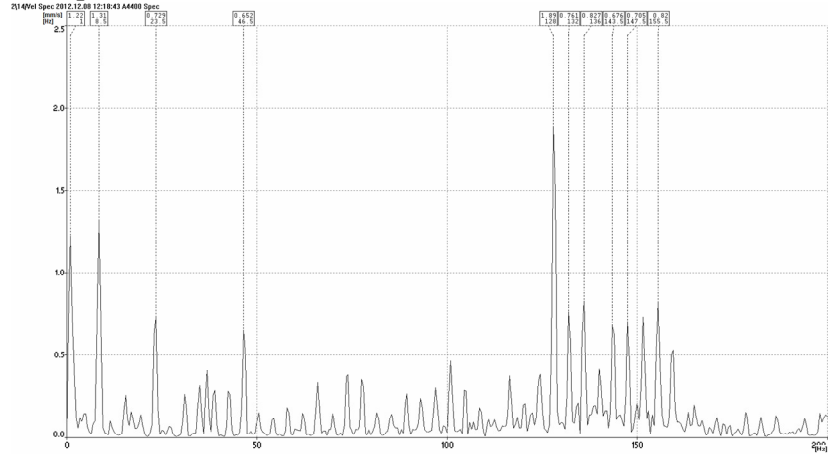
437 aps./min



400 aps./min

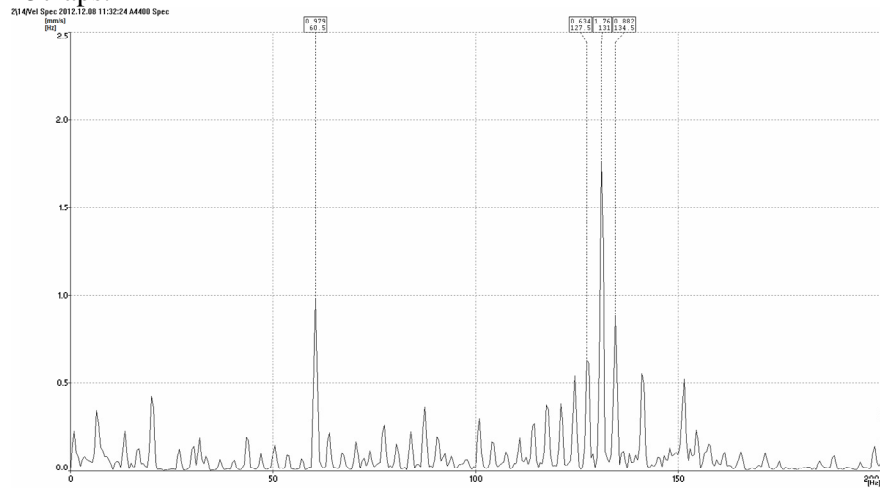


465 aps./min



14 taškas

437 aps.min



465 aps./min

