RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultāte

Andris Unbedahts
Doktora studiju programmas "Transports" doktorants

KUĢU DZINĒJU TEHNISKĀ STĀVOKĻA AKUSTISKĀS DIAGNOSTIKAS METODOLOĢIJAS IZSTRĀDE

Nozare: transports un satiksme

Apakšnozare: jūras transports un infrastruktūra

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
profesors *Dr. habil. sc. ing.*
A. URBAHS

RTU Izdevniecība
Rīga 2016

Unbedahts A. Kuğu dzinēju tehniskā stāvokļa akustiskās diagnostikas metodoloğijas izstrāde. Promocijas darba kopsavilkums. – R.: RTU Izdevniecība, 2016, – 38 lpp.

Izdots saskaņā ar RTU promocijas padomes «RTU P-22» 2016. gada 7. aprīļa lēmumu, protokols Nr. 4/2016.

ISBN 978-9934-10-830-3

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS
INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI
RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2016. gada 4. jūlijā, plkst. 15.30 Rīgas Tehniskās universitātes Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultātē, Aeronautikas institūtā, Lomonosova ielā 1A, k-1, 218. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. habil. sc. ing.* Valdis PRIEDNIEKS
Latvijas Jūras akadēmija, Latvija

Profesors *Dr. habil. sc. ing., tālbraucējs kapteinis* Vytautas PAULAUSKAS
Klaipēdas Universitāte, Lietuva

Vadošais pētnieks *Dr. sc. ing.* Vladislavs TURKO
SIA «*Aviatest*», *LNK AEROSPACE*, Latvija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Andris UNBEDAHTS ……. (Paraksts)

Datums: ……

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, astoņi pielikumi, 80 attēlu, sešas tabulas, kopā 120 lappušu. Literatūras sarakstā ir 130 avotu.

SATURS

SATURS 4
DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS 5
Darba aktualitāte 5
Darba mērķis un uzdevumi 5
Pētniecības metodes 5
Darba zinātniskā novitāte 6
Darba praktiskā vērtība 6
Darba aprobācija 6
Publikācijas 7
Darba struktūra 7
1. KUĢU DZINĒJU BOJĀJUMU UN TO DIAGNOSTIKAS METOŽU ANALĪZE 8
2. AKUSTISKĀS EMISIJAS SIGNĀLU EKSPERIMENTĀLO MĒRĪJUMU TEHNISKAIS NODROŠINĀJUMS UN METODOLOĢIJA 14
Mērījumu aparatūras tehniskais apraksts 14
Pētījuma objekta apraksts 16
Pētījuma metodoloģija 17
3. AKUSTISKĀS EMISIJAS SIGNĀLU RAŠANĀS AVOTU MATEMĀTISKĀ MODELĒŠANA TURBULENTAI GĀZES PLŪSMAI NO DEFEKTĒTA KANĀLA CILINDRA HERMĒTISKUMA ZUŠANAS GADĪJUMĀ 21
Akustiskās emisijas signālu avotu dīzeļdzinējos analīze 21
Akustiskās emisijas signāla avotu matemātiskā modelēšana turbulentai gāzes plūsmai no defektēta kanāla 22
4. KUĢA DĪZEĻDZINĒJA TEHNISKĀ STĀVOKĻA AKUSTISKĀS DIAGNOSTIKAS PĒTĪJUMU REZULTĀTI 25
SECINĀJUMI 34
IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS 35

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Darba aktualitāte

Mūsdienās transatlantiskie pārvadājumi tiek realizēti ar kuģiem, kuru garums sasniedz 400 metru, dedveits sasniedz 500 000 t, savukārt konteineru skaits jau 20 000 TEU. Galvenās dīzeļiekārtas jauda tuvojas 100 000 kW (parasti zemapgriezienu dzinēji), palīgdzinēju jauda sasniedz 10 000 kW (vidēju apgriezienu dzinēji), un arvien vairāk ekspluatācijā ienāk augstapgriezienu dīzeļdzinēji to nelielo izmēru (tātad – vairāk vietas kravai) un jauno materiālu dēļ, kas nodrošina palielinātu motorresursu. Mūsdienu kuģu dzinēji strādā augstu spriedžu zonā, piemēram, vidēju apgriezienu četrtaktu dīzeļdzinēja degvielas iesmidzināšanas spiediens sasniedz 196 MPa, degšanas spiediens 21 MP [71]. Statistika rāda, ka šādu energoiekārtu bojājumi var radīt lielus ekonomiskus un ekoloģiskus zaudējumus apkārtējai videi utt.

Par zinātniskā darba aktualitāti uzskatāmi divi būtiski savstarpēji saistīti faktori: pirmkārt, kušošanas drošības paaugstināšana, otrkārt, flotes ekonomisko rādītāju paaugstināšana (galvenos izdevumus veido degvielas un remonta izmaksas), tādēļ arvien vairāk kuģiem (pārsvarā – nesen būvētiem) sāk izmantot kuģu mehānismu apskates grafiku pēc to reālā tehniskā stāvokļa, nepakļaujot tos nevajadzīgai izjaukšanai (*Condition Based Maintenance – CBM*), citiem vārdiem, dzinēju droša ekspluatācijas laika palielināšana. Šā iemesla dēļ mehānismu tehniskā stāvokļa diagnostika, izmantojot modernās diagnosticēšanas metodes, kas ļauj kontrolēt dzinēju tehnisko stāvokli ekspluatācijas laikā, ieņem vadošu lomu.

Vēl jāņem vērā, ka ekspluatācijā aizvien ir liels skaits kuģu, galvenokārt sauso beramkravu, kas būvēti 20. gs. 70.–80. gados. Šie kuģi veido paaugstināta riska grupu, lai gan lielam skaitam kuģu to dzinēji (galvenokārt palīgdzinēji) ir nomainīti, dzinēju tehniskā stāvokļa kontrolei ir būtiska loma.

Pašlaik, ievērojot *CBM* prasības, dzinēju kontrolei izmanto vibrodiagnostikas un termogrāfijas ierīces, kas nesniedz pilnīgu informāciju, tādēļ izstrādāt neizjaucošas kontroles metodi (*Non Destructive Testing – NDT*) saskaņā ar klasifikacijas sabiedrību rekomendācijām, kas atbilstu *CBM* prasībām, ir ļoti aktuali.

Darba mērķis un uzdevumi

Darba mērķis ir izstrādāt kuģu dīzeļdzinēju akustiskās diagnostikas metodoloģiju dzinēja defektu agrīnai noteikšanai, kas atbilstu tehniskā stāvokļa uzraudzības sistēmas (*Condition Based Maintenance – CBM*) prasībām.

Izvirzītā mērķa īstenošanai darbā tika izvirzīti šādi uzdevumi.

1. Veikt kuģu dzinēju bojājumu un to diagnostikas metožu analīzi.
2. Izstrādāt matemātisko modeli akustiskās emisijas signālu rašanās avotu dzinēja cilindru hermētiskuma zušanas gadījumā.
3. Pamatojoties uz gāzu dinamisko aprēķinu, noteikt diapazona robežas gāzes turbulentai zemskaņas plūsmai defektā, kas radies dīzeļdzinēja cilindra hermētiskuma zušanas gadījumā.
4. Veikt eksperimentālus mērījumus dzinēja ekspluatācijas apstākļos ar mērķi noteikt kritērijus akustiskās emisijas (AE) diagnosticēšanai un tās informatīvajam novērtējumam.
5. Izstrādāt kuģu dīzeļdzinēju akustiskās diagnostikas metodoloģiju dzinēja defektu agrīnai noteikšanai, kas atbilstu tehniskā stāvokļa uzraudzības sistēmas (*Condition Based Maintenance – CBM*) prasībām.
6. Veikt klasifikācijas sabiedrību prasību analīzi *CBM* ieviešanai un izteikt priekšlikumus akustiskās emisijas metodes ieviešanai praksē.

Pētniecības metodes

1. Matemātiskā modelēšana.
2. Varbūtības teorija un matemātiskā statistika.

3. AE signālu mērīšana, izmantojot AE aparatūru saskaņā ar standartiem. LVS EN 13554:2011, LVS EN 1330-9:2009.
4. AE datu apstrāde, izmantojot specializētu programmatūru *AEwin* ™.

Darba zinātniskā novitāte

1. Analizējot dzinēja radītos trokšņus, izmantojot akustiskās emisijas metodi, tiek nodrošināta iespēja momentāni iegūt rezultātus tiešsaistes režīmā.

2. Akustiskās emisijas signālu rašanās avotu matemātiskais modelis dzinēja cilindru hermētiskuma zušanas gadījumā.

3. Kuģu dīzeļdzinēju akustiskās diagnostikas metodoloģija dzinēja defektu agrīnai noteikšanai, kas atbilstu tehniskā stāvokļa uzraudzības sistēmas (*Condition Based Maintenance – CBM*) prasībām.

Autors šajā darbā aizstāv:

1. Izstrādāto akustiskās emisijas rašanās avotu matemātisko modeli turbulentai gāzes plūsmai cilindra defektā;
2. Akustiskās emisijas diagnosticēšanas signālu mērījumu rezultātus dzinēja ekspluatācijas apstākļos;
3. Kuģu dīzeļdzinēju akustiskās diagnostikas metodoloģiju dzinēja defektu agrīnai noteikšanai, kas atbilstu tehniskā stāvokļa uzraudzības sistēmas (*Condition Based Maintenance – CBM*) prasībām.

Darba praktiskā vērtība

Augstapgriezienu dīzeļdzinēja augstfrekvenču akustiskā trokšņa eksperimentālās izpētes rezultāti un piedāvātā metodoloģija var tikt izmantota visu veidu kuģiem un to dīzeļdzinējiem, lai kontrolētu ekspluatācijas rādītāju atbilstību noteiktajām tehniskajām specifikācijām. Izstrādātā akustiskās diagnostikas metodoloģija un praktiskās rekomendācijas var tikt izmantotas *CBM* programmas ietvaros, tādējādi paaugstinot flotes izmantošanas ekonomiskos rādītājus, ņemot vērā, ka *CBM* ir vērsta uz dzinēju droša ekspluatācijas laika palielināšanu bez tā izjaukšanas.

Par pētījumu tika saņemtas «*Transport Claims Consultants Network*», Ltd. (Beļģija), «*Africa Marine Surveys*» Ltd., (Beļģija), SIA «Witraktor» (Latvija) pozitīvas atsauksmes, kā arī ieteikums turpināt tālākus pētījumus kuģu dīzeļdzinēju akustiskās diagnostikas izmantošanas jomā.

Promocijas darbā tika veikta arī klasifikācijas sabiedrību prasību analīze *CBM* ieviešanai un izteikti priekšlikumi akustiskās metodes ieviešanai praksē.

Darba aprobācija

Promocijas darba rezultāti tika prezentēti un apspriesti starptautiskās zinātniskajās konferencēs.

1. Transport Means 2015// Acoustic emission method evaluation for high speed ship engines condition monitoring. – Kaunas, Lithuania: Kaunas Technical university, 2015. – 19. International conference.
2. Transport Means 2014// Acoustic emission method implementation for medium and high speed ship engines condition monitoring. – Kaunas, Lithuania: Kaunas Technical university, 2014. – 18. International conference.
3. Transport Means 2013// Use of the acoustic emission for the vessels engines/hull condition monitoring. – Kaunas, Lithuania: Kaunas Tehnical university, 2013. – 17. International conference.
4. Transport and Engineering. Production Technologies// Influence of Ship's Hull and Engines Monitoring on Maritime Safety Improvement. – Riga, Latvia: Riga Tehnical university, 2013.

5. Riga Techical University 53rd International Scientific Conference// Acoustic emission application for ship structures strength assessment. – Riga, Latvia: Riga Tehnical university, 2012.
6. Transport Means 2012// Application of the Acoustic Emission Method for cracks early detection in the ship constructions. – Kaunas, Lithuania: Kaunas Tehnical university, 2012. – 16. International conference.
7. Maritime Transport and Infrastructure 2012// Utilization of acoustic emission as a ship's damage prevention method**. –** Riga, Latvia: Latvian Maritime academy, 2012. – 14. International conference.

Promocijas darba rezultāti tika prezentēti un apspriesti nolasītās lekcijās Rīgas Tehniskajā universitātē, Latvijas Jūras akadēmijā un Kauņas Tehniskajā universitātē (Lietuva).

Publikācijas

1. Urbahs A., Unbedahts A. Acoustic Emission Method Evaluation for High Speed Ship Engines Condition Monitoring. – In Book: Transport Means, ISSN 1822-296x, 2015, pp. 587 - 590. Database: SCOPUS.
2. Unbedahts A., Carjova K., Urbaha M. Acoustic emission method implementation for medium and high speed ship engines condition monitoring**.** - In Book: Transport Means, ISSN 1822-296x, 2014, pp. 380–382. Database: SCOPUS.
3. Unbedahts A., Banovs M. Use of the acoustic emission for the vessels engines/hull condition monitoring. – In Book: Transport Means, ISSN 1822-296x, 2013, pp. 220– 223. Database: SCOPUS.
4. Unbedahts A., Vindergauzs L. Transport Means 2012// Application of the Acoustic Emission Method for cracks early detection in the ship constructions. – In Book: Transport Means, ISSN 1822-296x, 2012, pp. 46–49. Database: SCOPUS.
5. Unbedahts A., Vindergauz L. Utilization of acoustic emission as a ship's damage prevention method**. –** In Book: Maritime Transport and Infrastructure, Riga, Latvia, 2012, pp. 113–117.
6. Unbedahts A., Banovs M., Rijkuris G. Production Technologies// Influence of Ship's Hull and Engines Monitoring on Maritime Safety Improvement. – In Book: Transport and Engineering. Riga, Latvia, 2013, pp. 53.–58.
7. Urbahs A., Unbedahts A. Acoustic Emision Signal Mathematichal Modeling in Case of Engine Cylinders Tightness Disappereance. In Book: Power and Energy Systems, 2016.
8. Urbahs A., Unbedahts A., Feščuks J. Ship Diesel Engines Technical Condition Acoustic Diagnostic Results. – In Book: Transport Means, 2016.

Darba struktūra

Darbā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts un pielikumi.

Pirmajā nodaļā aplūkoti kuģu dzinēju bojājumi un diagnostikas metožu analīze, otrajā nodaļā raksturota akustiskās emisijas signālu eksperimentālo mērījumu metodoloģija un tehniskais nodrošinājums. Trešā nodaļa ietver akustiskās emisijas signālu rašanās avotu matemātisko modelēšanu dzinēja cilindru hermētiskuma zušanas gadījumā, savukārt ceturtajā nodaļā apkopoti kuģa dīzeļdzinēja tehniskā stāvokļa diagnostikas mērījumu rezultāti.

1. KUĢU DZINĒJU BOJĀJUMU UN TO DIAGNOSTIKAS METOŽU ANALĪZE

Visus spēkus, kas iedarbojas uz kuģa dzinēju, var iedalīt divās lielās grupās: ārējie spēki, kas tiek pārnesti no korpusa (galvenokārt tie var ietekmēt kloķvārpstu un tās gultņus) un spēki, kas rodas dzinēja darbības rezultātā: inerces, spiediena utt. Šie spēki var negatīvi ietekmēt dzinēju, veicinot paaugstinātu nodilumu un plaisu rašanos.

Šajā nodaļā tiek aplūkots **kuģu mezglu noslogojums – ārējie spēki**

Kuģa korpuss ekspluatācijas laikā nepārtraukti tiek pakļauts dažāda lieluma, virziena un periodiskuma spēkiem, tas liecas un vērpjas ārējo spēku ietekmē. Šie spēki var tikt pārnesti uz dzinēja pamatu, kas savienots ar korpusu, bet no pamata uz paša dzinēja detaļām: kloķvārpstu, gultņiem utt. Ja ārējo spēku ietekme dzinēja projektēšanas stadijā nav pietiekami ņemta vērā, nepietiekamas stiprības dēļ var rasties dzinēja detaļu/konstrukciju nopietni defekti [17].

Dzinējā esošie spēki

Gan darbojoties, gan miera stāvoklī dzinēja detaļas pakļautas virknei spēku un slodžu. Ja miera stāvoklī uz dzinēju darbojas detaļu smaguma spēki, vibrācijas izraisītie spēki (no blakus strādājošiem mehānismiem) un nelielas termiskās spriedzes, tad darbojoties klāt nāk milzīgi inerces spēki (mainīgas zīmes), gāzu spiediena un centrbēdzes spēki, kā arī krasi pieaug termiskais noslogojums un berzes spēki. Savlaicīgi neatklājot defektus dzinēja detaļās, minētie spēki var izraisīt dzinēja un, iespējams, kuģa avāriju.

Kuģu dīzeļdzinēju bojājumu un defektu analīze

No pieejamās statistikas redzams, ka dzinēju bojājumu skaitam ir tendence pieaugt, turklāt šeit atspoguļoti tiešie zaudējumi, netiešie var būt daudz lielāki. Tāpat saprotams, ka negaidītu bojājumu parādīšanās rada nopietnus draudus kuģošanai, apkārtējai videi un cilvēku dzīvībai [20].

2012. gada specifiskās literatūras izdevumos minēti galvenie dzinēju defektu cēloņi:

a) piesārņota eļļa;
b) dzinēju pārbaude (*overhaul*) notikusi bez ekspertu klātbūtnes;
c) izmantota nepiemērota degviela;
d) degvielas/eļļas separatori ekspluatēti neatbilstoši instrukcijai;
e) nepietiekami kvalificēts mašīnkomandas sastāvs;
f) dzinēju turbokompresori bojāti ārēja svešķermeņa ietekmē.

1.1. tabula

Izdevumā «*The Swedish Club. Main Engine Damage Study 2012*» minēti pieci galvenie dzinēju defekti 2012. gadā [40, 41]

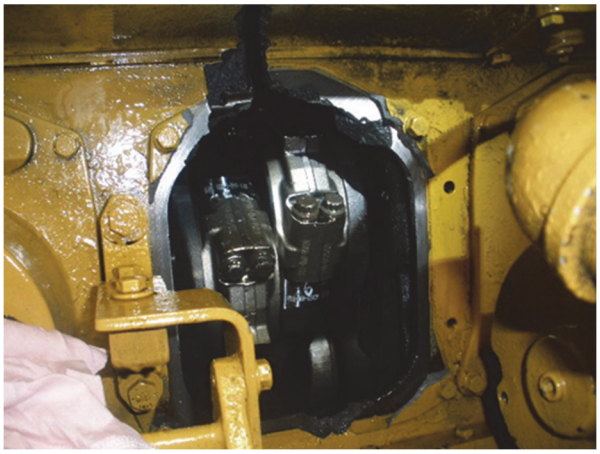
Nr. p. k.	**Cēlonis**	**Skaits**	**Vidējās izmaksas (USD)**
1.	Nepareiza apkalpošana / remonts	52	576,000
2.	Neatbilstošas kvalitātes eļļa	33	977,300
3.	Ārējs objekts (turbokompresoriem)	28	350,000
4.	Nekvalitatīva degviela	27	365,000
5.	Slēpti defekti	25	500,000

No statistikas izriet, ka defektiem visvairāk ir pakļautas cilindru galvas, virzuļi/gredzeni, cilindru čaulas un klaņu gultņi. Vismazākais nostrādāto stundu skaits līdz iespējamam defektam ir degvielas sprauslām, virzuļa gredzeniem un ieplūdes un izplūdes vārstiem.

1.1. att. Bojāts izplūdes vārsts

1.2. att. Bojāta cilindra čaula un virzulis

Augstāk un zemāk redzamajos attēlos varam vērot vidēju un augstapgriezienu dīzeļdzinēju vārstu bojājumus, kas izraisījuši dzinēju un turbokompresoru avārijas (1.1., 1.2., 1.3. un 1.4. att.).

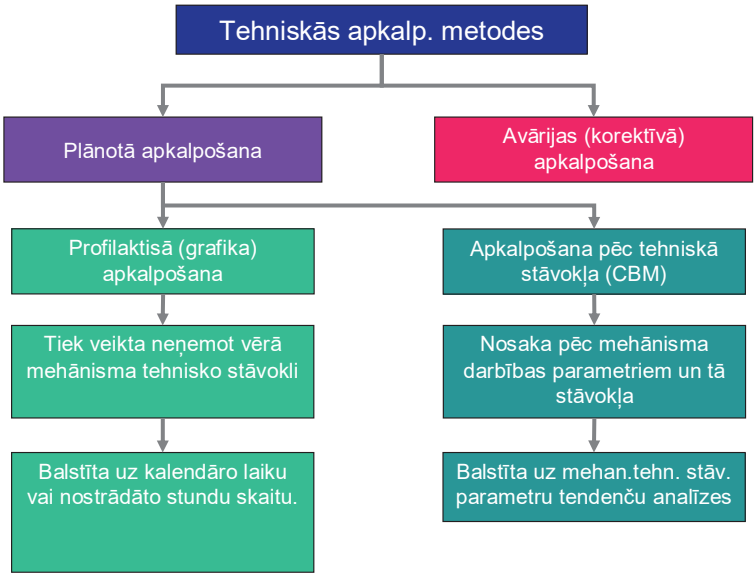


1.3. Dzinēja karteris pēc negadījuma

1.4. att. Turbokompresora bojājumi

Kuģu dzinēju mezglu diagnostikas metodes

Mūsdienās jūras flotes kuģiem tiek izmantotas divas tehniskās apkalpošanas un kontroles metodes:



1.5. att. Mūsdienu tehniskās apkalpošanas metodes

Dzinēju detaļu periodiska/profilaktiska kontrole tiek veikta saskaņā ar noteiktu laika grafiku, ko nosaka mehānisma izgatavotājs kopā ar klasifikācijas sabiedrībām. Dzinējs tiek pakļauts apskatei (tātad – apstādināts un izjaukts) pēc noteikta nostrādāta stundu skaita. Par detaļu tehnisko stāvokli un tālākās lietošanas iespējamību lemj, izmantojot nesagraujošās kontroles metodes: ultraskaņas, magnētiskās nesagraujošās kontroles metodi, kapilāro, virpuļstrāvas vai rentgenoskopiju.

Apkalpošana pēc tehniskā stāvokļa (*Condition Based Maintenance – CBM*) ir samērā jauna metode, kas tiek izmantota aptuveni 10 gadu. Tā var tikt ieviesta ar klasifikācijas sabiedrību apstiprinājumu katram kuģim, kas izpildījis un atbilst noteiktām tās prasībām. Šīs metodes pamatā ir objekta periodiska vai nepārtraukta kontrole ar mērķi noteikt tā tehnisko stāvokli bez ekspluatācijas pārtraukšanas. Izmantojot šo sistēmu, pašlaik galvenokārt tiek izmantoti vibrodiagnostikas un termogrāfijas mēraparati, bet tie nevar sniegt pilnīgu informaciju par dzinēja esošo tehnisko stāvokli, tādēļ par perspektīvu var uzskatīt akustiskās emisijas ierīču izmantošanu [29].

Vibrācijas monitorings ir viena no efektīvākajām mehānisma rotējošo detaļu kontroles metodēm. Visplašāk šo metodi izmanto rotējošu mašīnu diagnostikai un monitoringam, tā aptverot lielāko daļu iespējamo defektu. Piemēram, centrbēdzes sūkņa defekti, kas nosakāmi ar vibrodiagnostiku: bojāts darba rats, gultņi, blīvslēgi, nelīdzsvarotība, sūkņa un dzinēja ass nesakritība.

Šis diagnostikas veids pēc savas būtības ir vistuvāk AE diagnosticēšanai, un tā signāli ir līdzīgi (skat. 1.6. att.), tikai izmantojamais frekvenču diapazons ir zemāks – 1000–5000 Hz.

Jebkuras diagnosticēšanas mērķis – arī vibrodiagnostikas – ir sniegt informāciju par iekārtas ekspluatāciju un tās tehnisko stāvokli, lai nodrošinātu apkopes plānošanu un pārvaldību.

Rotāciju mašīnu vibrācijas ir cieši saistītas ar iekārtas dinamisko stresu, gultņu un zobratu bloku stāvokli, disbalansu, plaisām svarīgās komponentēs u.c.

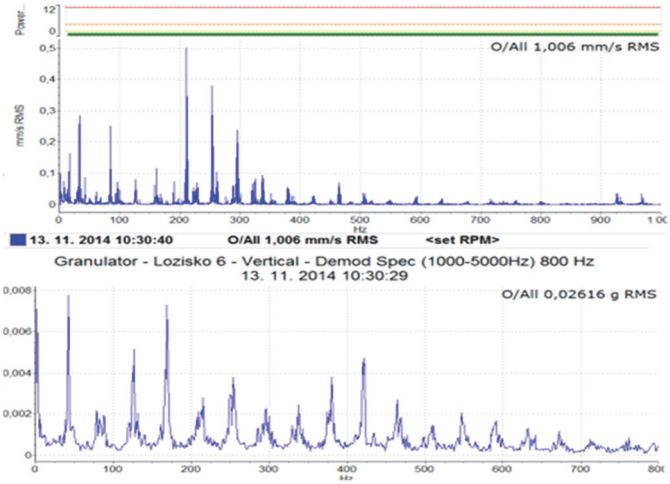
Vibrodiagnostika izmanto vibrācijas kā diagnostikas parametru, ko radījis dinamiskais stress uz mašīnu. Šis ļoti svarīgais parametrs sniedz informāciju, lai noteiktu esošo tehnisko stāvokli rotācijas mašīnām. Galvenie defekti, ko atklāj ar vibrodiagnostiku:

a) rotoru disbalanss;
b) asu nesakritība savienojumiem, gultņiem;
c) savienojumu atslābums;
d) gultņu bojājumi;
e) hidrauliskas un aerodinamikas problēmas;
f) rezonanse;
g) deformācijas;
h) konstrukciju bojājumi: plaisas, lūzumi.

Vibrodiagnostikā parasti izmanto trīs veidu sensorus: tilpuma (*displacement*), ātruma (*velocity*) un akselerometrus.

Tilpuma sensorus izmanto, lai noteiktu vertikālo/horizontālo kustību, tas ir labi piemērots, lai noteiktu vārpstas kustību un tās spēli. Ātruma sensorus parasti izmanto portatīvām iekārtām.

Akselerometri ir efektīvi, lai atklātu augstās frekvences, ko rada ātrgaitas turbīnu lāpstiņas, zobratu un lodīšu/rullīšu gultņi, kas pārvietojas ar daudz lielāku ātrumu nekā vārpstas, uz kurām tie ir uzmontēti.



1.6. att. Vibrodiagnostikas viļņu forma un viļņu spektrs

Termogrāfiskā inspekcijā ar termogrāfiskās ierīces palīdzību nosaka starojumu elektromagnētiskā spektra robežās (aptuveni 900–1400 nanometri jeb 0,9–14 μm) un dod šā starojuma attēlu. Starojuma apjoms, ko izstaro objekts, paaugstinoties temperatūrai, palielinās, tādēļ termogrāfija ļauj saskatīt temperatūras izmaiņas. Ierīcei, uztverot infrasarkano starojumu, var konstatēt nevienādu/paaugstinātu detaļu sasilšanu, piemēram, mehānismu gultņiem.

***CBM* priekšrocības:**

a) ietaupa dzinēju uzturēšanas izmaksas (prasmīgas apkopju plānošanas dēļ);
b) ietaupa apsekojumu/inspekciju izmaksas (prasmīgās inspekciju plānošanas dēļ);
c) uzlabo kuģa ekonomiskos rādītājus, kas saistīts ar dzinēju uzlabotu veiktspēju;
d) uzlabo dzinēju un kuģošanas drošību (labākas un dinamiskākas (*on-line*) kontroles dēļ);
e) dod iespēju operatoram (krasta/kuģa) vai datoram (ja ieprogrammēts automātiskai datu saņemšanai) iegūt pilnu ainu par konkrēta kuģa mehānismu stāvokli;
f) dod iespēju veikt kuģu tehniski ekonomisko rādītāju salīdzināšanu starp atsevišķu kuģu grupām un visas flotes mērogā;
g) dati var tikt ilglaicīgi uzglabāti tālākai analīzei un sistēmas uzlabošanai.

Likumdošanas akti, regulējušie dokumenti *CBM* ieviešanai

Par piemēru *CBM* ieviešanai un izmantojamai aparatūrai tika ņemtas Krievijas Jūras reģistra (*Российский морской регистр судоходства* vai *Russian Maritime Register of Shipping – RS*) prasības. *RS* ir Starptautiskās Klasifikacijas sabiedrību asociācijas (*IACS – International Association of Classification Societies*) biedrs, kas apvieno 12 galvenās pasaules klasifikacijas sabiedrības, piemēram, *LR – Lloyds Register*, *DNV – GL Det Norske Veritas – Germanisher Lloyd*, *BV – Bureau Veritas*, *NK – Nippon Kaiji Kyokai* u.c., tāpēc var teikt, ka *RS* prasības ir līdzīgas citu *IACS* biedru prasībām.

Saskaņā ar RS prasībām *CBM* ieviešanu reglamentē vairāki dokumenti:

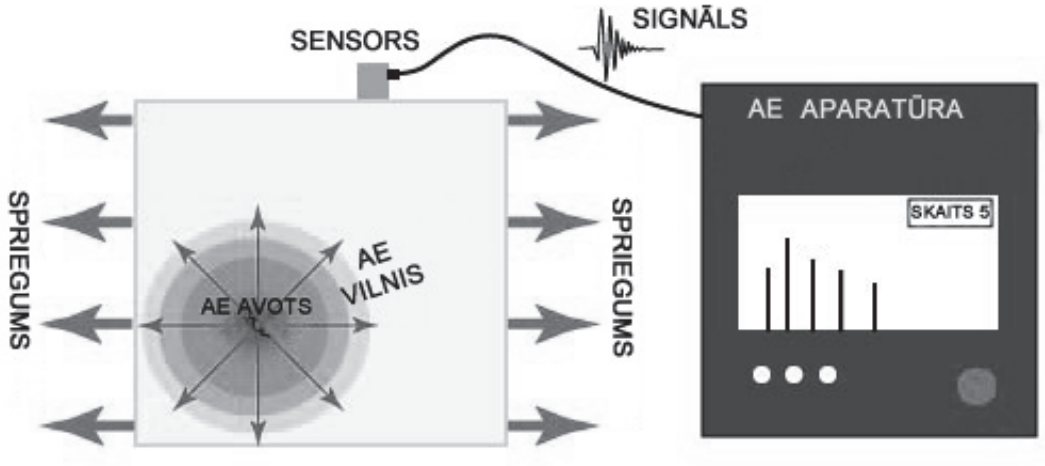
1) Pārbaudes noteikumi kuģiem, kas atrodas ekspluatācijā.
2) Lietošanas instrukcija datu izmantošanai, kas iegūti no iebūvētām un pārnēsāmajām nesagraujošās kontroles diagnostikas iekārtām pārbaudāmo objektu kontroles laikā.
3) Instrukcija kuģu nepārtrauktai kontrolei.
4) Noteikumi, ņemot vērā *CBM* priekšrocības jūras kuģu klasifikācijai un būvei.
5) Vadlīnijas ekspluatācijā esošu kuģu tehniskai uzraudzībai.
6) 2014. gada reglamentējošo dokumentu apkopojums par pārbaužu periodiskumu un apjomu.

Ieviešot *CBM*, Krievijas Jūras reģistrs ļauj izmantot vibrodiagnostiku un termogrāfisko inspekciju. *RS* ir atzinusi šādus mēraparātus:

a) vibrometrus: DN-3 un DN-4 (*Vibropribor*, Krievija), VTM 33 AB (*Hugo Tillguist*, Zviedrija), MK 310 (*Kawatetsu Instrument*, Japāna);
b) distances infrasarkanos termometrus: *Thermopoint* 30; 40; 80 (*AGEMA*, Zviedrija) [36].

Akustiskās emisijas metodes fizikālie pamati un priekšrocības

Akustiskās emisijas metodes pamatā ir materiāla mehānisku viļņu izstarojums, kas rodas no materiāla iekšējās struktūras dinamiskām izmaiņām, ko rada ārēja vai iekšēja spēka iedarbošanās (1.7. att.). AE izraisītāji var būt plastiskās deformācijas, plaisu veidošanās un augšana, šķidruma/gāzes plūsma cauruļvados, korozija, zemes un sniega nogruvumi, eļļas slāņa zudums berzējošos detaļu vidū (berzes palielināšanās), gāzes/šķidruma plūsma defektos u.c. cieto vielu deformēšanās. Var uzskatīt, ka AE signālus materiālos izraisa procesi, kuros notiek spiediena, slodzes vai temperatūras izmaiņas [1, 2, 5, 7].



1.7. att. AE metodes darbības princips

Metodes galvenās priekšrocības:

1) Ar augstu ticamības pakāpi ļauj konstatēt materiāla struktūras defektus un noguruma bojājumus grūti pieejamās vietās, kā arī noteikt defekta koordinātas.
2) Iespējama nepārtraukta diagnostika.

3) Iespēja sekot līdzi defekta attīstībai ekspluatācijas laikā.
4) Iespējams fiksēt defekta agrīno attīstības stadiju.
5) Iespējams klasificēt bojājumus pēc to bīstamības pakāpes.
6) Sagatavošanās darbu un kontroles darbietilpība ir jūtami mazāka nekā tā ir citām NK metodēm.
7) Augsta jutība, un tai ir mazāk ierobežojušu faktoru, salīdzinot ar citām metodēm.
8) Ar vienu vai vairākiem sensoriem, kas novietoti uz kontrolējamā objekta virsmas, iespējams kontrolēt visu objektu (ļoti svarīga priekšrocība grūti pieejamās vietās).
9) Nav nepieciešama rūpīga virsmas sagatavošana pirms mērījumiem.
10) Augsta ražība.
11) Lietojama dažādiem materiāliem.
12) Samērā vienkārša lietotājam [4].

Uzstādot vairākus devējus, tiek veikta visa objekta kontrole, kurā tiek noteikta defektu rašanās un to attīstības vietas (lokācijas režīms). Tas ļauj veikt nepārtrauktu objekta kontroli (diagnostiku) tā funkcionēšanas laikā un pāriet no periodiskām tehniskām apskatēm uz objekta ekspluatāciju atbilstoši tā tehniskajam stāvoklim. Ļauj veikt arī pilnu objekta diagnostiku, nepārtraucot ekspluatācijas režīmu vai to pārtraucot uz īsu laiku, kas sniedz acīmredzamu ekonomisku efektu.

Tomēr jāņem vērā, ka praksē AE metodes lietojumam dzinēju detaļu kontrolei ir virkne traucēkļu:

a) signāla enerģijas līmenis un tā parametri ir atkarīgi no materiāla īpašībām un tā stāvokļa ekspluatācijas/mērījumu brīdī;
b) defekta kontroles/attīstības procesu parasti pavada trokšņi (dzinēju, mehānismu darbība, kravu operāciju trokšņi u.c.) ar parametriem, kas tuvi AE signālu parametriem.

Potenciālie AE metodes lietojuma uzraudzības un kontroles objekti:

a) dzinēju turbokompresori un reduktori;
b) mehānismu gultņi;
c) dzinēju gāzu sadales mehānisms;
d) dzenvārpstas;
e) augstspiediena degvielas sistēmas.

Tipiska AE sistēma sastāv no:

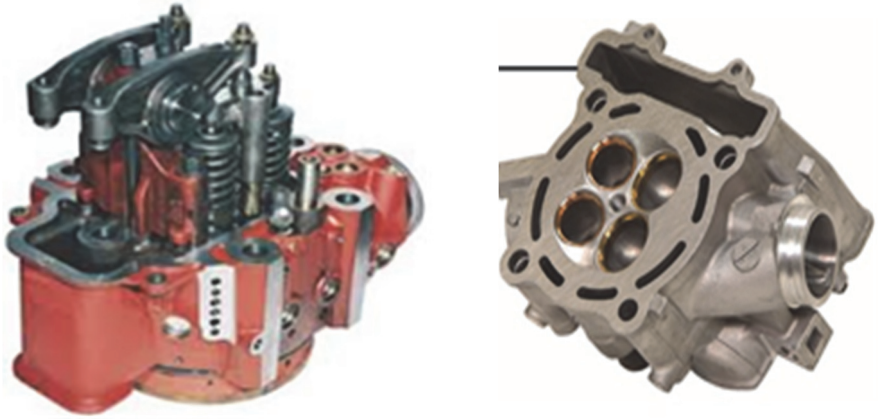
a) sensoriem, kas uztver AE viļņus;
b) priekšpastiprinātāja, kas pastiprina iegūto signālu;
c) datu apstrādes procesora (signālu filtrācijas, analizēšanas, pārveidošanas pārskatāmā formā) ar displeju;
d) datu pārraides kabeļiem, parasti līdz 300 m, kas ir pilnīgi pietiekami mūsdienu kuģiem.

Šajā nodaļā analizētais parāda, ka kuģu dzinēju defektu un avāriju negaidīta parādīšanās pat ar dzinēju augstu kontroles un aizsardzības līmeni ir samērā bieža parādība, līdz ar to nepieciešams risinājums, lai novērstu iespējamās nevēlamās ekonomiskās un ekoloģiskās sekas.

2. AKUSTISKĀS EMISIJAS SIGNĀLU EKSPERIMENTĀLO MĒRĪJUMU TEHNISKAIS NODROŠINĀJUMS UN METODOLOĢIJA

Par pētījuma objektu tika izvēlēts 20 cilindru, V-veida izvietojuma četrtaktu dzinējs, tā cilindra galvās atrodas divi ieplūdes un divi izplūdes varsti (2.1. att.), kas tiek atvērti ar piedziņu no sadales vārpstas, bet aizvērti ar atsperu palīdzību.

Ekoloģisku un ekonomisku apsvērumu dēļ dzinējs strādā ar dabasgāzi. Lai tas būtu iespējams, dzinējam ir demontēti augstspiediena degvielas sūkņi, tā vietā uzstādot gāzes sadalītāju, kā arī nomainot degvielas sprauslas pret kvēlsvecēm, jo gāze uzliesmo apmēram 700 °C (dīzeļdegviela uzliesmo 300–400 °C, tas atkarīgs no veida).



2.1. att. Vidēju un augstapgriezienu dīzeļdzinēju galvas

Dīzeļdzinēja ieplūdes un izplūdes vārsts ir piemērots kā nogurumsagrūšanas procesu pētījumu objekts, turklāt vārsti ir vieni no visvairāk noslogotajiem dzinēja konstrukcijas elementiem [28, 44, 45].

Vārstu darbības analīzei tika veikta virkne eksperimentālu mērījumu, izmantojot rūpnieciski ekspluatētu augstapgriezienu dzinēju, piedaloties promocijas darba autoram. Mērījumu veikšanā tika ņemta vērā iepriekšējā pieredze un dati, kas iegūti Rīgas Tehniskās universitātes Aeronautikas institūta pētījumos un darbos [46, 49, 65].

Ekspluatācijas procesā vārsti tiek pakļauti triecienslodzei, termiskai slodzei, paaugstinātam nodilumam, mainīgas zīmes inerces spēkiem un augstam spiedienam.

Dzinēja cilindra galvas vārstu galvenie ekspluatācijas defekti ir šādi:

a) noguruma plaisas vārsta kātā;
b) izdegumi vārsta šķīvī;
c) paaugstināts degšanas produktu nosēdums;
d) palielinātas/samazinātas siltuma atstarpes.

Visbīstamākie vārstu defekti ir noguruma plaisu rašanās materiālā un izdegumi vārstu šķīvjos, kas veicina turpmāko materiāla sagrūšanu. Parasti plaisas rodas sprieguma koncentrācijas vietās – zonās ar būtiskām stiprības izmaiņām: noapaļotās pārejās, frēzējumu vietās u.c.

Mērījumu aparatūras tehniskais apraksts

Mērījumos tika izmantota portatīvā ierīce «*Pocket PACK AE-2*», Nr. 8520232001.

«*Pocket AE-2*» ir augstas veiktspējas, datorizēta, divu kanālu akustiskās emisijas sistēma, kas ievietota izturīgā pārnēsājamā ierīcē. Tā piedāvā visas darbības iezīmes, kas raksturīgas lielākām un dārgākām AE sistēmām, ietverot plašu joslas platumu, ātrumu, dažādas paraugu ņemšanas frekvences, viļņformu apstrādes iespējas kompaktā ierīcē, kas darbināma ar bateriju.

Ierīce ir lielisks instruments «lauka» apsekojumos, īpaši situācijās, kad elektroenerģija nav viegli pieejama. Tā noderīga laboratorijā – sistēma veic laboratorijas testus, izmantojot tās

divu kanālu AE ieeju un viena kanāla parametrisko ieeju, lai salīdzinātu AE aktivitāti atkarībā no slodzes vai spriedzes. Lai nodrošinātu lielāku daudzpusību, ir iebūvēts skaņu filtrēšanas bloks.

Ar «*Pocket AE-2*» iespējams veikt tradicionālo AE atlasīto signālu apstrādi, kā arī uzlabotu viļņformu iegūšanu un apstrādi. Rezultāti tiek parādīti uz integrēta krāsu *LCD* skārienjutīga ekrāna (240×320 pikseļu izšķirtspēja). Programmatūra dod iespēju apskatīt viļņformas, histogrammas, līniju diagrammas un atzīmēt atsevišķus gabalus. Papildu sistēmā ir iebūvētas defekta atklāšanas, tā lineārās atrašanās vietas noteikšanas spēja.

AE datu faili tiek saglabāti *MISTRAS* standarta *DTA* formātā, tos var pārsūtīt uz datoru, izmantojot *Compact Flash* kartes un/vai *USB*, pilnīgai datu analīzei var izmantot *AEwin*™ programmatūru.

«*Pocket AE-2*» ir ar iekšēju AE priekšpastiprinātāju, un tas ir spējīgs darbināt mazjaudas līniju ārējos priekšpastiprinātājus un sensorus. Lietotājs var izvēlēties izmantot iekšējo vai ārējo priekšpastiprinātāju, izmantojot programmatūru. Kad iekārta izmanto iekšējo priekšpastiprināšanas režīmu, standarta, pasīvos sensorus var pievienot tieši AE ieejām.

«*Pocket AE-2*» tiek piegādāts ar R15α (*Alpha*) sensoriem un kabeli, kas savieno sensorus ar sistēmu.

Alpha sērijas sensori ir vispārējas nozīmes, zemas izmaksas sensori, kurus var plaši izmantot.

«*Pocket AE-2*» sistēmu var ieslēgt ārējā priekšpastiprinātāja režīmā. Ja iekārta ir šajā režīmā, ar elektroenerģiju ir apgādāts ārējais priekšpastiprinātājs. Līdz ar to iespējams veikt mērījumus, ja attālums starp sensoriem un pašu iekārtu ir liels.

Akustiskās emisijas sistēmas komponenti

«*Pocket AE-2*» komplektā ietilpst: rokas divu kanālu iekārta, divi R15α pasīvie AE sensori, divi viena metra sensoru kabeļi, viens divu metru parametru kabelis ar *BNC* savienotāju, 1GB CF karte un akumulatora barošanas avots. Pēc izvēles akumulatoru lādētājs un papildu akumulatori, savukārt *AEwin*™ *Replay* programatūra ir pieejama atsevišķi.

2.2. att. Mērinstrumenta «*Pocket AE-2*» komplektācija

«*Pocket AE-2*» galvenie raksturlielumi

Izmēri: 241 mm × 89 mm × 36 mm

Svars: 1,13 kg ar baterijām

Ekrāns: 3,52” krāsu *LCD*, 240 pikseļi × 320 pikseļi, ar *LED* apgaismojumu
Vadības panelis: iebūvēts skarienjutīgs ekrāns (spec. zīmulis)
Atmiņa: 128 MB
Porti: viens atmiņas kartei, viens USB 2.0
Patērētā jauda: 4 W
Enerģijas avots: ārējais *DC* parveidotajs (12 V @ 1A) vai iekšējas 7,2 V NiMH lādējamas baterijas
Bateriju darbības laiks: 4–6 stundas ar pātraukumiem
Darba temperatūra: – 5° līdz 45°
Savienojumi: AE 2 – *SMB* un parametriskais 1 – SMB

AE kanālu apraksts

Divu kanālu AE ieeja caur *SMB* savienojumu (F ligzda)
Ieejas spriegums: +/–10 V
AE kanāla frekvence: 1,0 kHz līdz 1,0 MHz +/– 1,5 db

Programatūras filtri

Sistēma «*Pocket AE*» apgādāta ar augstu un zemfrekvenču digitālajiem filtriem, papildu analogajiem, kas tiek aktivizēti ar programatūras palīdzību. Tas dod izcilas spējas atfiltrēt trokšņus un uzlabot «signāls-troksnis» attiecību.

Signāla apstrāde: filtrācija ar beigu raksturlīkni reālajā laikā. Iespējams ierakstīt signāla formu un to apstrādāt.

Ekstrahētie rezultāti: tipiskie AE raksturojumi ietver pirmo gadījumu, kas pārsniedz noteikto sliekšņa līmeni, laiku līdz maksimālajam līmenim, maksimālo līmeņa amplitūdu, signāla stiprumu un ilgumu, signāla pieauguma laiku, patieso enerģijas lielumu un blakus trokšņu vidējo līmeni.

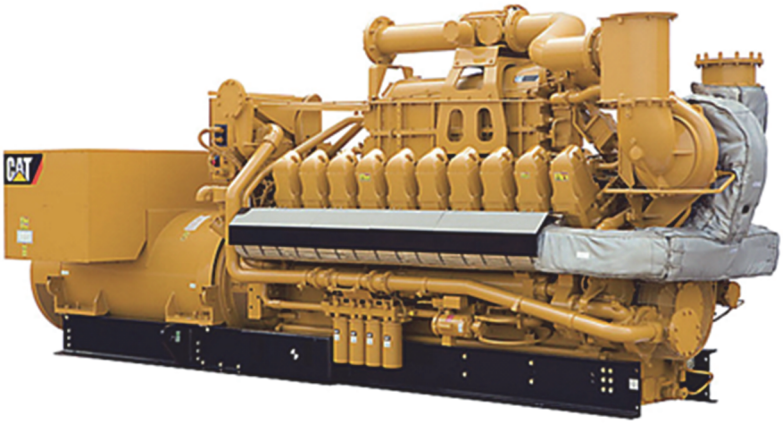
Kontrolei tika izmantots firmas «*PAC*» zemfrekvences pārveidotājs R3α.

Līdztekus mērījumu veikšanai tika lietoti divu metru kabeļi, kas savieno ierīci, sensorus un barošanas bloku.

Pjezokeramiskie sensori reģistrē elastīgos viļņus, kas atbilst AE impulsiem un pārveido mehāniskās svārstības elektriskos signālos, kas pa kabeļiem nonāk AE reģistrējošajā iekārtā.

Mērījumos tika izmantoti arī divkanālu ciparu oscilogrāfi: *Rigol DS1052E* un *Picoscope 3204*, kā arī analogais oscilogrāfs *C8-17*, lai ar to palīdzību noteiktu signālu no Holla devēja – signāla lielumu, formu un tā vietu aplūkojamā cilindra darba ciklā.

Pētījuma objekta apraksts

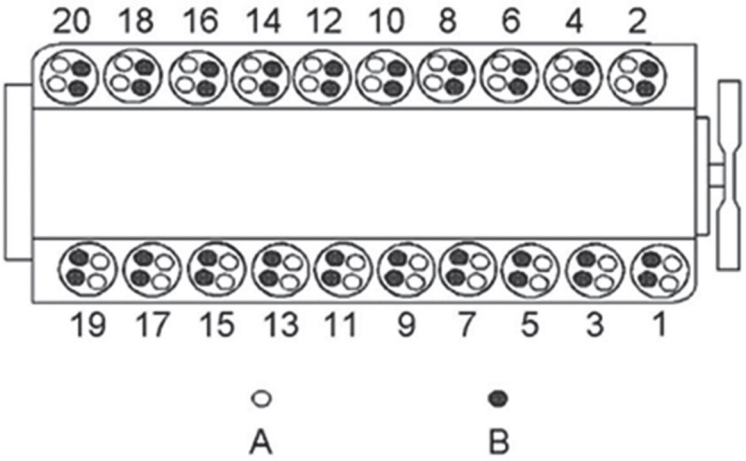


2.3. att. Dzinēja kopskats

Tips: G3520C
Numurs: GZN00302
Būves gads: 2006
Nominālā jauda: 2000 kW
Apgriezienu skaits: $1500n^{-1}$
Cilindru skaits: 20
Cilindru izvietojums: V-veida
Degviela: dabasgāze
Aizdedzes veids: kvēlsvece ar priekškameru

Dzinējs apgādāts ar spēcīgu mikroprocesoru, kas kontrolē visus galvenos parametrus, īpaši akcentējot degvielas padeves un degšanas kontroli.

Lai minimizētu iespēju, ka dzinējs var apstāties mikroprocesora defekta dēļ, galvenais elektroniskais bloks katras 50 sekundes sūta informāciju uz rezerves bloku, saņemot atbildes signālu, tas turpina strādāt normālā režīmā. Ja signāli no galvenā bloka pārtrūkst, dzinēja darbības uzturēšanas un kontroles funkcijas pāriet uz rezerves bloku.



2.4. att. Dzinēja cilindru un vārstu izvietojuma shēma

Informācija par dzinēju un darba ciklu (skat. 2.4. att.)

A – ieplūdes vārsti, B – izplūdes vārsti
Vārstu skaits cilindrā – 4
Cilindra diametrs – 170 mm
Virzuļa gājiens – 190 mm
Ieplūdes vārstu atstarpe – 0,38 mm
Izplūdes vārstu atstarpe – 1,12 mm
Cilindru skaits – 20
Cilindru darba kārtība: 1, 2, 11, 12, 3, 4, 15, 16, 7, 8, 19, 20, 9, 10, 17, 18, 5, 6, 13, 14
Kloķvārpstas vaigu izvērsums: 18°

Ieplūdes vārsta atvēršanās: 9° pirms AMP (augstākais maiņas punkts) un aizvēršanās 21° pēc ZMP (zemākais maiņas punkts)

Izplūdes vārsta atvēršanās 18° pirms ZMP un aizvēršanās 10° pēc AMP

Pētījuma metodoloģija

Dzinēja akustiskās emisijas eksperimentālie mērījumi tika veikti ar kalibrēto mēraparatūru «*Pocket PACK AE-2*», Nr. 8520232001.

Eksperimentālie mērījumi tika veikti no 2012. gada februāra līdz 2015. gada aprīlim (ietverot). Kopā: septiņi mērījumi.

2012. gada 20. februārī notika **pirmais eksperiments** dīzeļdzinēja AE mērīšanai. AE sensori tika piestiprināti Rīgas ostas pārvaldes velkoņa «Sfinksa» galvenajam dzinējam «*Caterpillar*», Ne = 2 × 1500 kW, n = 1600 n^{-1}.

Cilindru izvietojums: V-veida, cilindru skaits: 12.

Mērķis – fiksēt AE viļņus dažādos dzinēja kloķvārpstas apgriezienu režīmos: 650 (minimāli noturīgie), 900, 1200 (75 %).

Sensori tika izvietoti pie turbokompresoru gultņiem, izplūdes kolektora pirms turbokompresora, pie dzinēja pamata un piektā klaņa gultņa rajonā.

Tika secināts, ka AE signāli atspoguļo cilindru vārstu darbību, kā arī turbokompresora gultņu stāvokli. Analizējot turbokompresoru defektu statistiku tika atklāts, ka gultņu defekti ir reti sastopami, galvenokārt turbokompresoru defekti ir saistīti ar svešķermenu nokļūšanu turbīnas pusē, tas nozīmē bojātu cilindra vārstu fragmentu nokļūšanu turbokompresorā. Šā iemesla dēļ turpmākajos mērījumos AE signāli no dzinēju turbokompresoru gultņiem netika mērīti. Līdz ar to tika nolemts pastiprināti mērīt cilindru ieplūdes un izplūdes vārstu darbību, kloķvārpstas gultņu darbu, jo šīs detaļas visbiežāk pakļautas defektiem, un to remonts vai maiņa izmaksā dārgi.

Analizējot iegūtos datus, kā arī ņemot vērā grūtības ar parametriskā signāla iegūšanu un mērījumu laika grafika saskaņošanu, tika pieņemts lēmums turpmākos eksperimentus veikt citur.

Turpmāko mērījumu veikšanas vieta: Valmiera, Dzelzceļa iela 7, dzinējs atrodas a/s «Valmieras enerģija» īpašumā. Tehnisko apkalpošanu veic SIA «*Witraktor*».

Turpmākie mērījumi tika veikti:

1. 2013. gada 14. maijā, kopējais dzinēja nostrādāto stundu skaits – 47 280.
2. 2013. gada 5. augustā, kopējais dzinēja nostrādato stundu skaits – 49 036 (pēc nostrādātām 50 000 stundām veikts kapitālais remonts, cilindram Nr. 9 ieplūdes vārstā atklāta plaisa).
3. 2014. gada 18. februārī, kopējais dzinēja nostrādāto stundu skaits – 53 726, pēc kapitālā remonta – 4 690.
4. 2014. gada 15. aprīlī, kopējais dzinēja nostrādāto stundu skaits – 55 000, pēc kapitālā remonta – 5 964 (nomainīta cilindra Nr. 9 galva ar vārstiem (to palielinātā nosēduma dēļ), un atklāta izmainīta izplūdes vārsta ģeometrija un novirzes no vārstu siltuma atstarpju normas).
5. 2014. gada 21. novembrī, kopējais dzinēja nostrādāto stundu skaits – 57 880, pēc kapitālā remonta – 8 844.
6. 2015. gada 7. aprīlī, kopējais dzinēja nostrādāto stundu skaits – 61 144, pēc kapitālā remonta – 12 108.

Mērījumi tika veikti pirms dzinēja kapitālā remonta, tūlīt pēc tā un pēc dzinēja vairāku mēnešu darba.

Ņemot vērā dzinēja konstruktīvās īpatnības, var teikt, ka galvenais šo mehānisko viļņu avots, kurus reģistrēja AE aparatūra, ir ieplūdes un izplūdes vārstu radītās skaņas, tam atveroties un aizveroties.

Ja ir dzineja AE portrets ar sprieguma izmaiņām no Holla devēja, tad, zinot dzinēja cilindru darba kārtību, var iegūt vārstu darbības raksturlielumus. Pilns darba cikls notiek no Holla devēja līknes pirmā augstākā punkta, kas atbilst cilindra Nr. 1 AMP, līdz Holla devēja līknes trešajam augstākajam punktam, kas atbilst kloķvarpstas otrā apgrieziena beigām.

Sagatavošanās eksperimentāliem mērījumiem

Tika savienota «*Pocket A2*» ar dzinēja Holla devēju, lai iegūtu parametrisko signālu, kas atbilst cilindra Nr. 1 augšējam maiņas punktam (AMP). Turpmāko mērījumu gaitā tika noteikta cilindra Nr. 9 virzuļa AMP attiecībā pret cilindra Nr. 1 virzuļa AMP, kas veido 216° pēc kloķvārpstas pagrieziena leņķa.

Lai noskaidrotu AE signāla jaudu un formu, sākotnēji sensori tika stiprināti pie dzinēja trīs vietās: cilindra galvām, dzinēja kartera un spararata korpusa. Kontakts starp dzinēju un AE sensoriem tika nodrošināts, izmantojot «*Silagel*» smēri.

Pirmo mērījumu laikā tika iegūti AE dati, kas ļāva novērtēt tās dzinēja vietas, kur lietderīgie AE signāli ir visstiprākie, tāpēc tika nolemts koncentrēties uz AE signālu mērījumiem no cilindra galvām (pēc datu saņemšanas no SIA «*Witraktor*» tika izlemts turpināt mērīt un analizēt signālus no cilindriem Nr. 7 un 9).

Mērījumu veikšanas apstākļi

Dzinējs atradās slēgtā telpā – rekonstruētā katlu mājā, ar elektroģeneratoru ievietots konteinera tipa skaņu slāpējošā konstrukcijā.

Tehniskie parametri mērījumu laikā:

a) jauda……..1,5–2 MW
b) kloķvārpstas apgriezienu skaits minūtē ……1500
c) atgāzu t …….450–480 °C
d) dzesējošā šķidruma t …….87–90 °C
e) cirkulācijas eļļas t……...87–91 °C
f) ieplūstošā gaisa t……20–26 °C

AE aparatūras noregulēšana un sagatavošana darbam

Pēc aparatūras pieslēgšanas tika veikta akustiskā signāla pārbaude un mērījumu diapazona noregulēšana atbilstoši «*Pocket AE*^{TM}» lietošanas instrukcijai un «*Pocket AE*» *win* programmatūrai, izmantojot automātiskās kalibrēšanas impulsus un standarta skaņas avotu NIL-SU.

Ierīces darba frekvences tiek noregulētas uz 20–1000 кHz un 100–1000 кHz.

Pastiprināšanas koeficients kanāliem tika noregulēts uz 14 dB, jo tika izmantoti sensori nevis ar iebūvētiem priekšpastiprinātājiem, bet ar ārējiem pastiprinātājiem, kuriem pastiprināšanas koeficients ir26 dB.

Abiem kanāliem tika noteikts paštrokšņa līmenis – 37 dB (40 dB cilindra galvām).

Slieksnis: 26 dB.

Pastiprinājums: 40 dB.

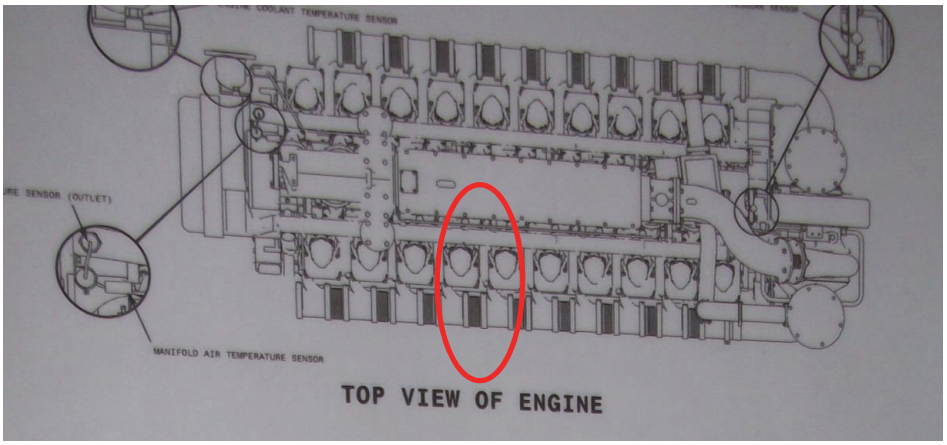
Viļņa formas garums: 15 000 punktu.

Fiksācijas ātrums: 100 000 mērījumu sekundē.

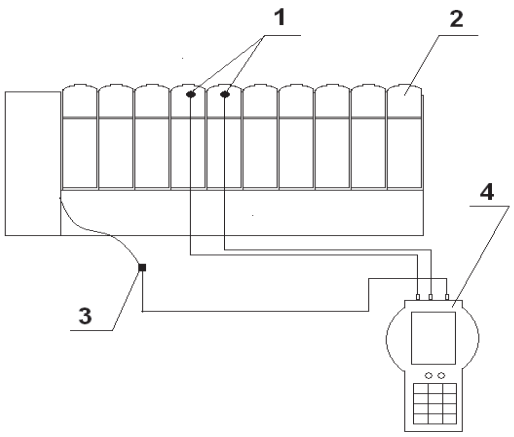
Augstfrekvences filtrs: 100 kHz.

Zemfrekvenču filtrs: 1 MHz.

Parametriskais signāls: ± 10 V.



2.5. att. AE sensoru stiprinājuma vieta (cilindra Nr. 7 un Nr. 9 galva)



2.6. att. Principiālā eksperimentālo mērījumu veikšanas shēma

Apzīmējumi:
1. AE sensors pie cilindra galvas.
2. Cilindra galva.
3. Izejas vads no Holla devēja.
4. Oscilogrāfs/AE mērierīce.

2.7. att. AE stiprināšana pie cilindru galvām un savienojums ar Holla devēju

Mērījumu laiks

Fona troksnis tika mērīts vismaz 60 sekundes, un tā līmenim bija jābūt vismaz 6 dB zemākam par mērāmā avota līmeni. Pirms un pēc katras mērījumu sesijas mērījuma ķēde tika kalibrēta.

AE datu faili tika saglabāti *MISTRAS* standarta *DTA* formātā un, pārsūtīti uz datoru, izmantojot *Compact Flash* kartes un/vai *USB*, pilnīgai datu analīzei tika izmantota *AEwin*™ programmatūra.

Eksperimentālie mērījumi, kas tika veikti strādājošam, rūpnieciski izmantotam dzinējam, parādīja, ka AE metode ir lietojama dzinēja defektu (konkrētā gadījumā ieplūdes un izplūdes vārstu) agrīnai konstatācijai, un šīs metodes jutība ir pārāka par citām dzinēju un mehānismu diagnostikas metodēm.

3. AKUSTISKĀS EMISIJAS SIGNĀLU RAŠANĀS AVOTU MATEMĀTISKĀ MODELĒŠANA TURBULENTAI GĀZES PLŪSMAI NO DEFEKTĒTA KANĀLA CILINDRA HERMĒTISKUMA ZUŠANAS GADĪJUMĀ

Akustiskās emisijas signālu avotu dīzeļdzinējos analīze

AE izmantošana tautsaimniecības nozarēs mehānismu un detaļu kontrolei pētīta jau agrāk, arī Rīgas Tehniskajā universitātē [68]. Akustiskās emisijas (AE) plūsmas mērīšanas signāli ļauj izpētīt bojājumu uzkrāšanās kinētiku, kontrolēt dažādu defektu veidošanos un diagnosticēt defektu sākumposmu dažādiem kontrolējamiem objektiem – elementiem, mezgliem un konstrukciju savienojumiem, agregātiem un spēka iekārtām [3, 9, 10, 11, 13, 18, 21, 23, 24, 25, 27, 32, 33, 34, 35, 37, 38, 39, 48, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 66, 68, 69, 70, 72].

No akustiskā viedokļa kuģu dīzeļdzinēji ir ļoti sarežģīta sistēma, kas sastāv no daudziem neatkarīgiem avotiem, kam piemīt individuālas fizikālas un akustiskas īpašības. Ir praktiski neiespējams analītiski aprakstīt visu sistēmu kopumā, ņemot vērā visus komponentu avotus un visus starojumu ietekmējošos parametrus.

Iepriekšējie mūsu [11, 49, 53, 64, 65] un citu autoru pētījumi [19, 30] liecina, ka AE mērījumi, kas veikti cilindra galvām, satur galvenos AE cēloņus: degvielas sadegšanu, degvielas iesmidzināšanu, cilindra virzuļu grupas mehāniskos trokšņus un vārstu iedarbību.

Lai iegūtu detalizētāku izpratni par AE signāliem dīzeļdzinējos, nepieciešams mērīt AE avotus dzinējam šādos gadījumos [1, 6, 7, 12].

1) Degšanas fāzē

Degšanas fāzē ievērojami un strauji pieaug spiediens cilindrā, tādēļ virzulis pārvietojas uz leju. Spiediena paaugstināšanās ātrums degšanas laikā rada spēku, ko var salīdzināt ar sprādzienu, līdz ar to izraisot iespaidīgus viļņus uz cilindru čaulām un cilindru galvām. Iepriekšējie pētījumi ir apstiprinājuši, ka šī ierosme ir periodiska un izplatās līdz vairāku kHz joslai. Spiediens cilindrā tieši ietekmē cilindra galvas, to var viegli novērot, novietojot AE sensorus uz cilindra galvas.

2) Virzulim pārmaiņus piespiežoties vienai un otrai čaulas pusei (tikai četrtaktu tronka dzinējiem)

Šis ir vēl viens nozīmīgs AE avots dīzeļdzinējos. To izraisa inerces spēku inversija, kas darbojas uz virzuli, kad tas maina virzienu augstākajā maiņas punktā (AMP) un zemākajā maiņas punktā (ZMP) – virzuļa atsišanās (*slap*). Būtībā virzulis ir pakļauts diviem spēcīgiem triecieniem. Virzuļa atsišanās izraisa AE plašā frekvenču joslā un ir ievērojami atšķirīga atkarībā no dzinēja darbības apstākļiem (slodze, tehniskais stāvoklis utt.). AE intensitāti noteicošais faktors ir atstarpe starp virzuli un cilindra čaulu, līdz ar to, ja atstarpe ir neliela, AE viļņi nav novērojami. Tomēr jāuzsver, ka virzuļu atsišanās ir ļoti tuvu AMP, tādējādi tā radītos AE viļņus var nomākt degvielas uzliesmošanas/sadegšanas radītie viļņi.

3) Iesmidzinot degvielu

Degvielas iesmidzināšana ir process ar dīzeļdegvielu, kas notiek augstā spiedienā (vairāki simti bāru) un īsā laikā (vairākas mikro sekundes). Šajā procesā ir gan mehāniskā ietekme, gan šķidruma berzes ietekme. Degvielas iesmidzināšnas laikā augstspiediena degvielas vilnis atver un aizver sprauslas adatvārstu, kas izraisa mehānisko ietekmi saistībā ar vārsta kustību, līdz ar to arī AE emisiju. Savukārt liela ātruma augsta spiediena degvielas plūsma var radīt AE signālus, ko izraisa sarežģīti hidrodinamiski procesi vai mijiedarbība starp degvielas plūsmas strūklu un sprauslas atverēm. Šiem AE signāliem ir daudz mazāka amplitūda, salīdzinot ar degšanas izraisīto.

4) Ieplūdes vai izplūdes vārstu ietekme

Aizvēršanos un atvēršanos ieplūdes un izplūdes vārstiem panāk ar sadales vārpstu un vārstu atsperu precīzu sinhronizāciju. AE starojums no dīzeļdzinēju vārstiem rodas:

a) no mehāniskās ietekmes, saskaroties ar dažādām virsmām, piemēram, vārstam ar vārsta ligzdu, divplecu svirai ar vārsta kātu utt. Vārstu ietekme tiek uzskatīta par galveno AE avotu šajā grupā;
b) no aerodinamiskās berzes, kas rodas no ātras gāzes plūsmas starp vārstu un tā sēdvietu un gāzes plūsmu virs vārsta šķīvja. Vārstu ietekmei ir nozīmīga loma dīzeļdzinēju AE, un tās lielums atkarīgs no vairākiem apstākļiem, piemēram, dzinēja tehniskā stāvokļa un slodzes;
c) no gāzes turbulentas plūsmas kanālos, kur zudis hermētiskums. Cilindru hermētiskuma bojājumi parādās galvenokārt saistībā ar vārstu un vārstu ligzdu defektiem, to nodilumu.

Dzinēja jauda un ekspluatācijas parametri lielā mērā ir atkarīgi no ieplūstošā gaisa daudzuma cilindrā un attīrīšanās no degšanas produktiem – deggāzēm. Liela nozīme šajos procesos ir ieplūdes un izplūdes vārstiem, to konstrukcijai un tehniskajam stāvoklim. Visvairāk gāzu apmaiņas procesu cilindrā ietekmē:

a) vārstu šķērsgriezuma laukums;
b) vārstu atvēršanās lielums;
c) nosēdumi uz vārstu virsmas;
d) izdilums vai nevienmērīga un nekvalitatīva pieguļa sēdvietai;
e) defekti vārstā.

Akustiskās emisijas signāla avotu matemātiskā modelēšana turbulentai gāzes plūsmai no defektēta kanāla

Pētījumu objekts šajā darbā ir kuģu dzinējs, kas darbojas ar gāzi, tāpēc tiek izskatīts gadījums, kad AE signāli rodas no turbulentas gāzes plūsmas kanālā, tam parādoties defekta rezultātā un izraisot nehermētiskumu. Hermētiskums var zust, piemēram, sakarā ar visbiežāk sastopamiem ekspluatācijas defektiem vārstos un to ligzdās, piemēram, paaugstināts nodilums, sabrukšana.

AE signāli šajā gadījumā ir ultraskaņas signāli no gāzes plūsmas, kas plūst pa cilindra sienām un radušies no defektiem vārstā vai ligzdā, rodoties atšķirīgo spiedienu rezultātā.

Gāzveida produktam kustība defektā var būt molekulāra vai viskoza. Konkrētam objektam minimāli iespējamais spiediens defektā ir samērojams ar laika atmosfēras (aptuveni 0,1 MPa), gāzes molekulu brīvās kustības ceļa garums l_b ir apmēram 10^4 mm. Šajā gadījumā nosacījumu $l_b \gg 2$, kas atbilst molekulu plūsmai, nodrošināt nevar, tādēļ tiek izskatīts tikai gadījums ar viskozu plūsmu. Viskoza plūsma savukārt var būt lamināra vai turbulenta.

Var uzskatīt, ka AE signāli, tiek iegūti tikai pie turbulentas gāzes kustības, kad nestabilu virpuļu rašanās izraisa spiediena pulsāciju (stresa viļņi) pie kontrolejamā objekta ejas sienām, un AE signāli kā turbulences trokšņi tiek reģistrēti ultraskaņas diapazonā.

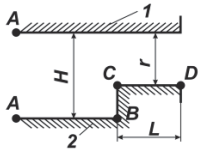
Jāuzsver, ja gāzveida produkts ieplūst gāzveida vidē,tas ir visnelabvēlīgākais gadījums, kad dažādu gāzu mijiedarbība izraisa AE signālus. Tālab akustisko emisiju līmenim gāzes noplūdes gadījumā ir jābūt pietiekami augstam. Šis nosacījums nodrošinās ar pietiekami augstu spiediena starpību, kas rada turbulentu gāzes kustību.

Ir zināmas metodes teorētiskam aprakstam šķidruma plūšanai defektētās vietās, kuru pamatā ir hidrodinamiski aprēķini [18, 52]. Akustiskā efekta (to rada gāzes plūšana) teorētiskā apraksta pamatā jābūt gāzes dinamiskajiem aprēķiniem, ņemot vērā to sarežģītību un fizikālo procesu daudzveidību.

Pamatojoties uz gāzes dinamisko aprēķinu, ir nepieciešams noteikt robežrežīmes gāzes plūsmai caur defektu, kā arī analizēt dažādus svārstību mehānismus un to lomu lietderīga akustiskā signāla formēšanā.

Ņemot vērā attiecīgo fizikālo procesu sarežģītību un daudzveidību, kas ir pamatā gāzes dinamiskajam aprēķinam, tiek pieņemti vairāki vienkāršojumi.

Aplūkotajā plūsmas gadījumā, kas veidojies vārsta un vārsta ligzdas defekta rezultātā, ejai/kanālam ir sarežģīta konfigurācija. Vienkāršības labad akustisko signālu teorētiskai analīzei pieņemam modeli - kanāls ir taisns ar gludām sienām un paplašinājumu *r* (lielums, kas veidojas atstarpes elementu bojājumu starp vārstu un tā ligzdu dēļ) un lielumu *L* (vārsta biezums), kas ir perpendikulāri savienots ar galveno kanālu (cilindrs), skat. 3.1. att.



3.1. att. Defekta modelis

Turbulentā plūsma kanālā notiek, kad gāzes ātrums sasniedz vērtību $V = V_{kr}$, kas atbilst kritiskajam Reinoldsa skaitlim $Re = Re_{kr}$. Reinoldsa skaitlis plūsmai kanāla modelī tiek noteikts:

$$R_{\mathrm{e}} = \frac{2\rho V p}{\mu}, \tag{3.1}$$

μ – plūsmas produkta dinamiskā viskozitāte.

Aprēķinot gāzes plūsmas ātrumu, nepieciešams ņemt vērā tā saspiežamību, t.i., blīvuma ρ (p) atkarību no spiediena un spiediena zudumus, kas saistīti ar berzes spēkiem kanālā. Spiediena gradients neliela kanāla daļā ar garuma *dl* (dl) tiek noteikts saskaņā ar Darsī-Veisbaha formulu:

$$-\mathrm{d}p = \varsigma \frac{\mathrm{d}l}{2p} \frac{\rho V^2}{2}, \tag{3.2}$$

$\xi = \xi(Re)$ pretestība, vispārējā gadījumā atkarīga no Reinoldsa skaitļa.

Jāņem vērā, ka gāzes plūsmas nepārtrauktība tiek ievērota:

$$V_{\rho} = V_{\mathrm{c}}\rho_{\mathrm{c}} = V_{\mathrm{D}}\rho_{\mathrm{D}} \tag{3.3}$$

Gāzes stāvokļa vienādojums, ņemot vērā hipotēzi par tās izotermisko plūsmu, iegūst šādu veidu:

$$\frac{\rho_{\mathrm{D}}}{P_{\mathrm{D}}} = \frac{\rho}{P} = \frac{\rho_{\mathrm{c}}}{P_{\mathrm{c}}} \tag{3.4}$$

Šeit un turpmāk parametru indeksi atbilst apzīmējumiem kanāla šķēlumam 3.1. att. Kā sekas hipotēzei par gāzes izotermisko plūsmu ir parametru μ, Re, ξ pastāvīgums.

Ņemot vērā izteiksmes (3.3) un (3.4), pēc izteiksmes (3.2) integrēšanas iegūstam:

$$V_{\mathrm{D}} = \sqrt{\frac{1}{\varsigma\lambda}\frac{P_{\mathrm{c}}}{\rho_{\mathrm{c}}}\left(\frac{{P_{\mathrm{c}}}^2}{{p_{\mathrm{c}}}^2} - 1\right)} \tag{3.5}$$

ϑ_D – vislielākais gāzes ātrums kanālā.

Skaņas izotermisko ātrumu gāzē izrēķinām no vienādojuma $c = \sqrt{p_{c/\rho_c}}$.

Pie zemskaņas ātrumiem un pie $p_D=p_a$, $p_C \approx p_A$, $\rho_C \approx \rho_A$ formulu (3.5) pierakstām:

$$V_D = \sqrt{\frac{1}{\varsigma\lambda}\left(\frac{P_A{}^2}{p_a{}^2} - 1\right)} \tag{3.6}$$

Kopīgi atrisinot vienādojumus (3.6) un (3.1) pie $Re = Re_{kr}$, iegūstam spiedienu attiecību, kurā parādās turbulentā plūsma:

$$\frac{P_A}{p_a} = \sqrt{1 + \varsigma\lambda\left(\frac{\mu R_{ekr}}{2c\rho_D r}\right)^2} \tag{3.7}$$

vai attiecīgs spiedienu kritums:

$$\Delta p = p_a\sqrt{1 + \varsigma\lambda\left(\frac{\mu R_{ekr}}{2c\rho_D r}\right)^2} \tag{3.8}$$

$$\left(\frac{P_A}{p_a}\right)_{sk} = \sqrt{1 + \varsigma\lambda} \tag{3.9}$$

$$r_{robež} = \frac{\mu R_{ekr}}{2\rho_D} = \frac{\mu R_{ekr}}{\upsilon\rho_D P_D} \tag{3.10}$$

Pie tālākas attiecības p_A/p_a palielināšanas spēkā kļūst nosacījums $p_D > p_a$. Spiediens izejas kanālā piegaug tiktāl, ka paliek spēkā vienādojums ϑ_D = c. Tādējādi gāzes ātrums kanālā vairs nepalielinās. Sakarā ar to izteiksme (3.9) nosaka augšējo robežu attiecībai p_A/p_a, kuru, pārsniedzot akustiskās emisijas signālu, pieaugums turbulences ietekmē vairs nenotiek.

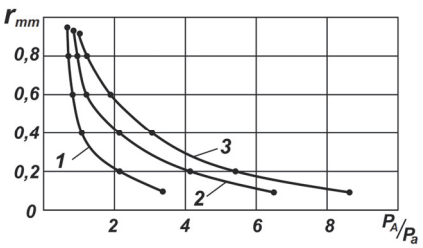
Tika veikts robežu aprēķins zemskaņas turbulentai gāzes plūsmai kanālā. Mērķis bija noteikt robežnosacījumus turbulentai plūsmai, ko raksturo attiecība *pA/pa* (skat. formulu (3.9)).

Robežvērtības gāzes izplūdes kanāla ģeometriskajiem parametriem sistēmā «cilindrs-vārsts», kurā turbulentas plūsmas režīms ir nesasniedzams, noteikti pie saspiesta gaisa izplūdes atmosfērā normālā temperatūrā. Konkrētajā gadījumā pieņemam: produkta dinamiskā viskozitāte = 1,8; blīvums *D* [kg/m³]; spiediens p [*MPa*]; kritiskais Reinoldsa skaitlis *Rekr* = 2.

Relatīvais kanāla garums $\lambda = L/r$ tiek pieņemts:

1) $\lambda = 10$
2) $\lambda = 50$
3) $\lambda = 100$

Rezultāti parādīti 3.2. attēlā.



3.2. att. Diapazona robežas saspiesta gaisa noplūdei zemskaņas turbulentas plūsmas režīmā

Rezultāti liecina, ka zemskaņas turbulentas plūsmas režīmā plašu attiecību *pA/pa* diapozonu ir iespējams nodrošināt tikai pie defekta lielas atveres *r* liela kanāla garumā.

Risinot izteiksmes (3.8) un (3.9), iegūstam sliekšņa vērtību kanāla atverei (defektam), kurā plūsmas turbulents režīms ir nesasniedzams (skat. formulu (3.10)). Šī attiecība nosaka sliekšņa izšķirtspēju akustiskās emisijas metodes izmantošanai dīzeļdzinēju cilindru hermētiskuma kontrolēšanai, pamatojoties uz skaņas signālu reģistrāciju, ko izraisa turbulenta gāzes plūsma noplūdes kanalā.

Izskatītajā gadījumā defekta atvēruma sliekšņa vērtība ir: $r_{robež}$ = 0,1 mm.

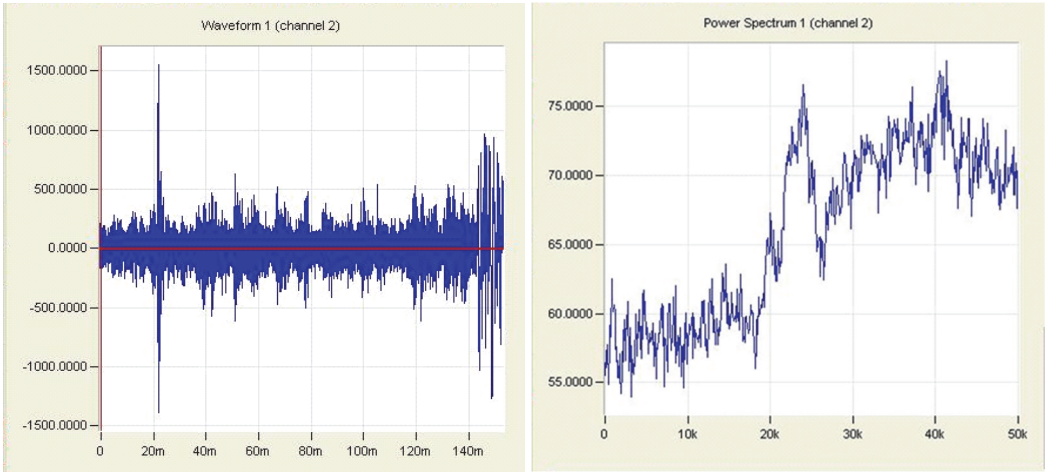
Pēc dzinēja cilindra AE avotu analīzes matemātiski tiek modelēta turbulenta gāzes plūsma kanālā, kas radusies vārsta izdeguma rezultātā un ir viena no bīstamākajiem vārstu defektiem, kuru savlaicīgi neatklājot var notikt vārsta sabrukšana.

Pētījuma rezultātā ir noteikta robeža, kad AE signāli no gāzes plūsmas bojātā vārstā kļūst uztverami, kā arī izvēlēti galvenie AE kritēriji, kas izmantojami defekta agrīnai atklāšanai.

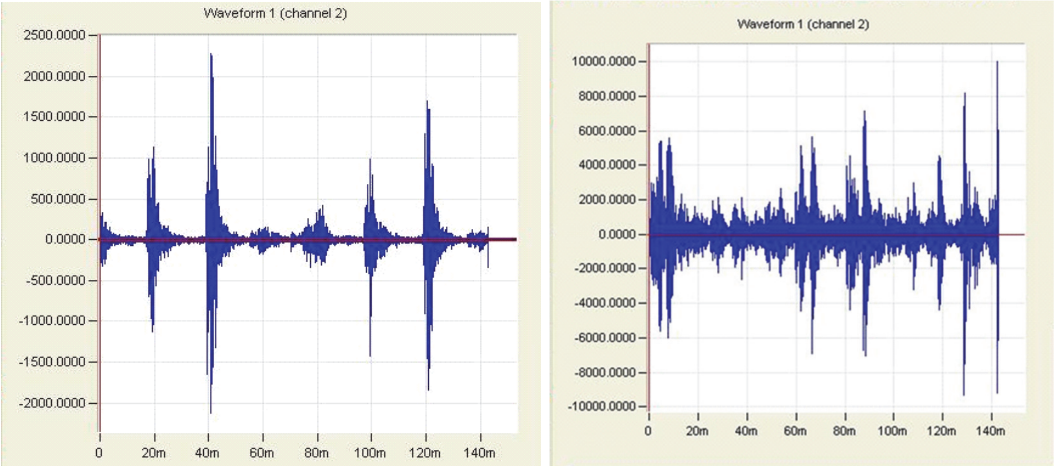
4. KUĢA DĪZEĻDZINĒJA TEHNISKĀ STĀVOKĻA AKUSTISKĀS DIAGNOSTIKAS PĒTĪJUMU REZULTĀTI

Mērījumu rezultāti tika analizēti un statistiski apstrādāti, izmantojot *Excel* programmnodrošinājumu.

Trokšņa spektru modelēšana veikta, izmantojot *MatLAB* programmnodrošinājumu.



4.1. att. AE viļņforma un viļņu spektrs pie dzinēja spararata
(AE viļņformas amplitūda izteikta mV atkarībā no laika milisekundēs, to spektrs atkarībā no decibeliem un kHz dažādās dzinēja vietās)



4.2. att. AE viļņforma pie dzinēja cilindra galvas un pie pamata
(AE viļņformas amplitūda izteikta mV atkarībā no laika milisekundēs)

4.2. att. parāda viļņformu, iegūtu no sensora, kas piestiprināts cilindra galvai un pamatam. Signāla apstrādei izmantota *Excel* programma, lai skaidrāk izceltu zemākos signālus. Krasi izceļas divu, sensoram tuvāk esošo, vārstu aizvēršanās, šajā gadījumā to signālu maksimumam un minimumam nav nozīmes, jo analizēti tika zemākie signāli.

Veiktie mērījumi ļāva iegūt akustiskās emisijas izmaiņu portretu, kas ataino virspusējo mehānisko viļņu izplatību pa dzinēja detaļām. Jāņem vērā, ka šo viļņu rašanos ietekmē virkne trokšņu, kas raksturīgi dzinēja darbībai: berze gultņos, klaudzēšana cilindra virzuļu grupā, plaisu veidošanās detaļās, šķidruma plūšana cauruļvados utt.

Analizējot AE attēlus, secināms, ka visskaidrākie signāla attēli tika iegūti, mērot pie cilindru galvām, pēc tam pie pamata un pie spararata, šis signāls ir visvairāk piesārņots ar blakus trokšņiem.

Saņemot informāciju no SIA «*Witraktor*», kas iegūta, veicot tehniskās apkopes un remontus, pētījumā tika analizēti AE dati noteiktam dzinēja stāvoklim.

Eksperimentam tika izvēlēti seši dzinēja vārstu tehniskie stāvokļi:

1) Samazināta ieplūdes vārsta siltuma atstarpe.
2) Samazināta izplūdes vārsta siltuma atstarpe.
3) Samazināta ieplūdes un izplūdes vārsta atstarpe.
4) Ar ieplūdes vārsta mikroplaisu.
5) Palielināts degšanas produktu nosēduma slānis.
6) Paaugstināts izplūdes vārsta nodilums un vārsta izdegums.

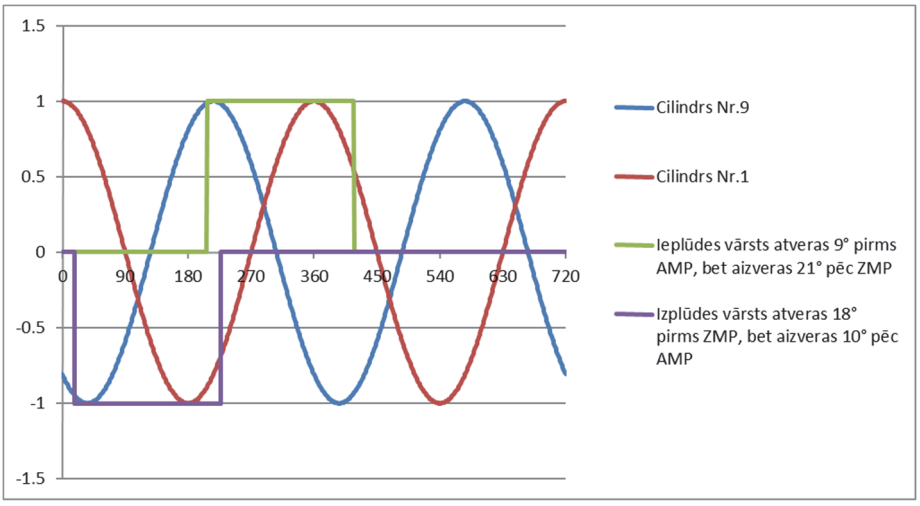
AE grafikos tika analizēti šādi parametri, atveroties un aizveroties konkrēta cilindra vārstiem:

a) signāla ilgums;
b) signāla amplitūda;
c) signāla pieauguma laiks.

Vārstu siltuma atstarpes novirze no normas:

a) ieplūdes vārstam: 0,38 mm uz 0,36 mm;
b) izplūdes vārstam: 1,12 mm uz 1,10 mm.

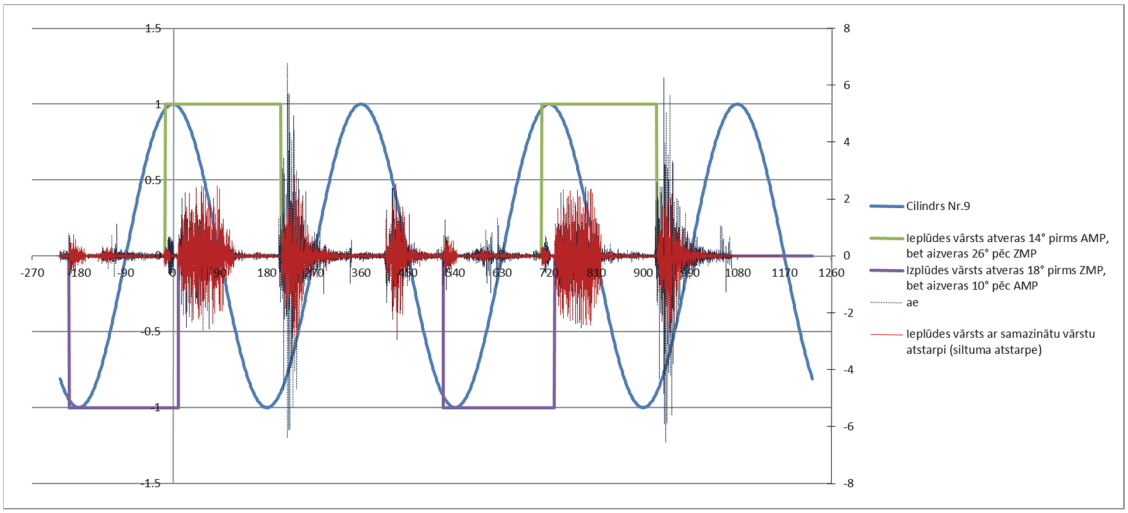
4.3. att. ataino virzuļu Nr. 1 un Nr. 9 kustības līknes un vārstu darbību dzinēja stāvoklim, kas atbilst tehniskās ekspluatācijas prasībām.



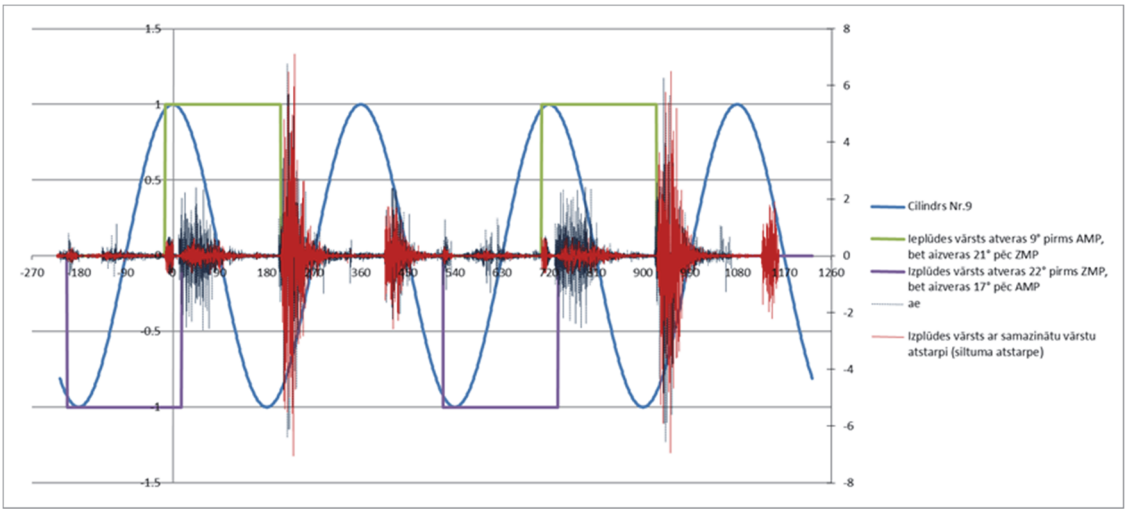
4.3. att. Virzuļu Nr. 1 un Nr. 9 kustības līknes un ieplūdes, izplūdes vārstu darbība (X ass – kloķvārpstas pagrieziena leņķis grādos; Y ass – nosacīti lielumi)

Analizējot un savietojot vārstu darbības AE mērījumus dzinēja bezdefekta stāvoklī ar mērījumiem, kas iegūti dzinējam ar zināmiem defektiem, var spriest par izmaiņām vārstu darbībā. Pēc dzinēja AE portreta izmaiņām var spriest par to raksturu un izdarīt secinājumus par konkrētā cilindra vārstu stāvokli.

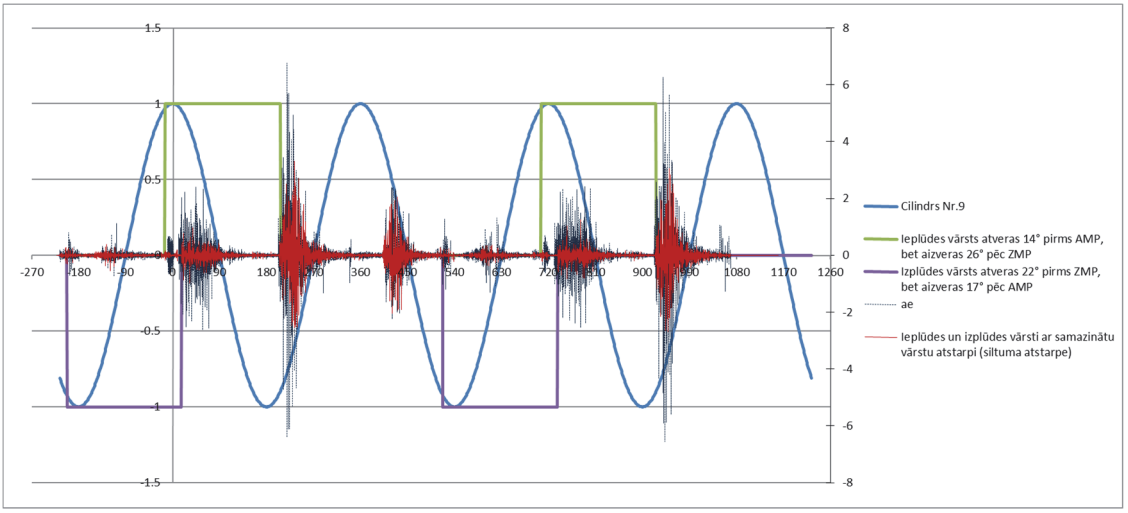
No 4.4. līdz 4.10. attēlos X ass apzīmē kloķvārpstas pagrieziena leņķi, Y ass (pa kreisi) apzīmē nosacītus lielumus, Y ass (pa labi) – AE amplitūdu voltos (V).



4.4. att. Dzinēja ieplūdes vārsts ar samazinātu siltuma atstarpi



4.5. att. Dzinēja izplūdes vārsts ar samazinātu siltuma atstarpi



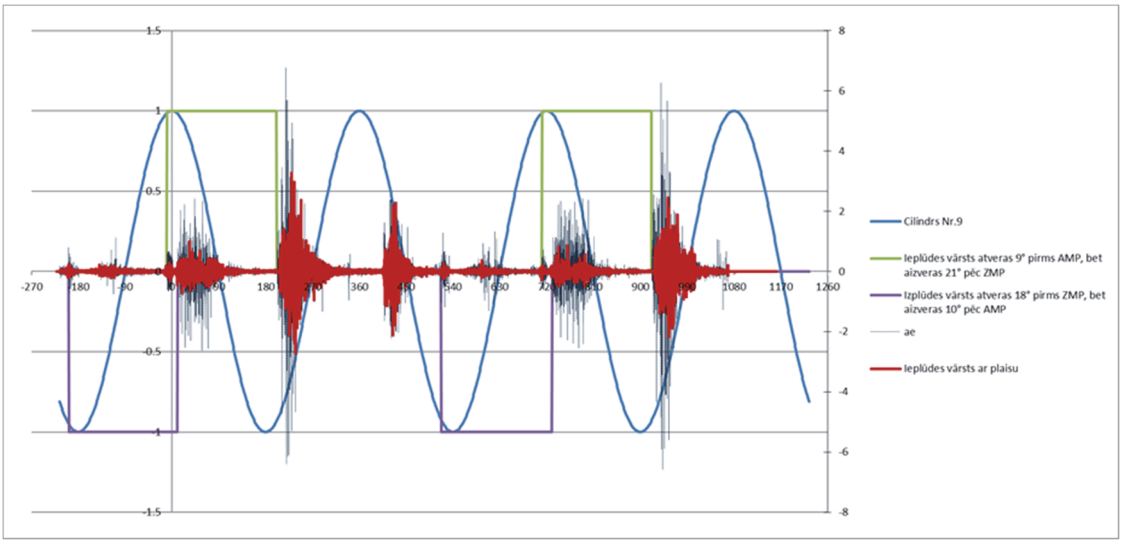
4.6. att. Dzinēja ieplūdes un izplūdes vārsti ar samazinātu siltuma atstarpi

Ar samazinātu siltuma atstarpi novērojamas šādas izmaiņas:

a) samazinās signāla amplitūda, vārstiem atveroties (mazāks laiks spēka iedarbei uz vārstu), bet aizveroties amplitūda samazinās sakarā ar izmaiņām degšanas procesā;
b) samazinās signāla ilgums;
c) vārstu atvēršanās notiek dažus grādus agrāk, bet aizvēršanās – dažus grādus vēlāk.

Samazināta siltuma atstarpe parasti norāda, ka bijusi kļūda vārstu regulēšanā un/vai ir izmaiņas gāzu apmaiņas ciklā. Bet, ja siltuma atstarpe pazūd pavisam, var rasties lūzumi vārstu kātos un/vai gāzu sadales mehānismā.

Vārstu siltuma atstarpes tiek regulētas ik pēc 2000 motorstundām ar speciāli pielāgotu mikrometru. Ražotājs rekomendē šo procedūru veikt ik pēc 1000 motorstundām, taču pieredze rāda, ka tik bieža regulēšana nav nepieciešama.



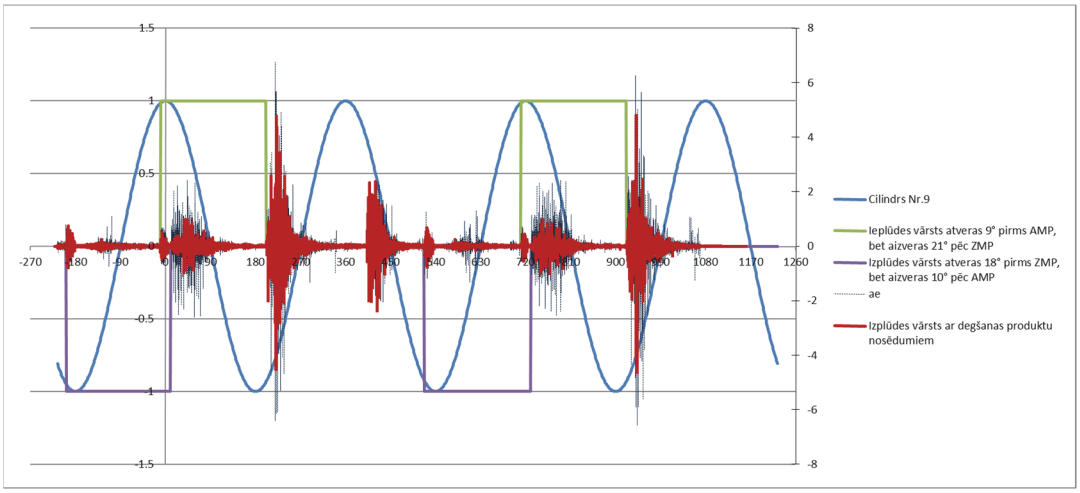
4.7. att. Dzinēja ieplūdes vārsts ar plaisu

Plaisas vārstos rada vārsta pārkaršana vai tā rūpniecisks defekts. Laicīgi neatklājot plaisas, vārsts var sagrūt, kas savukārt var radīt cilindra virzuļa grupas un turbokompresoru bojājumus vai avārijas.

2014. gada rudenī tika saņemta informācija no SIA «*Witraktor*» pārstāvja, ka, veicot demontēto cilindra galvu un to vārstu inspekciju ar kapilāro metodi (4.8. att.), vienam no ieplūdes vārstiem tika konstatēta mikroplaisa.

Analizējot AE grafikus, kas ieguti īsi pirms mikroplaisas atklāšanas, novērojams, ka signāla amplitūda samazinājusies, savukārt signāla ilgums pieaudzis. Defekta beigu stadijā signāla ilgums un amplitūda ir jūtami pieaugusi (4.11. att.), kas varētu būt skaidrojams ar plaisas virbrāciju.

4.8. att. Cilindru galvu un vārstu pārbaude ar kapilāro nesagraujošās kontroles metodi



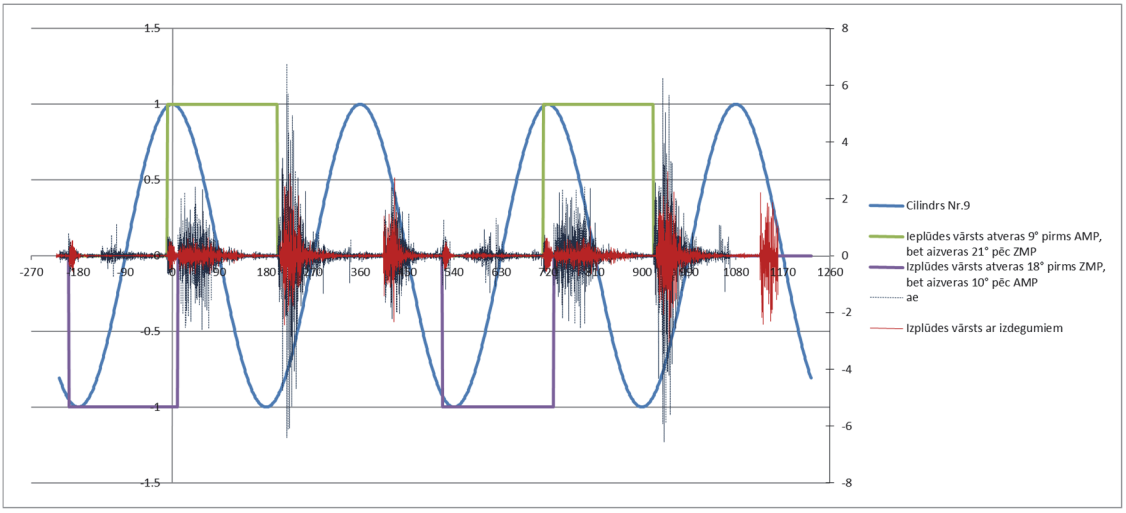
4.9. att. Dzinēja izplūdes vārsts noklāts ar degšanas produktu nosēdumiem

Palielināts degšanas produktu nosēdumu slānis uz vārsta un izplūdes traktā izraisa:

a) izplūdes trakta šķērsgriezuma laukuma samazināšanos – apgrūtina cilindra attīrīšanos un rada zemāku jaudu, palielina degvielas patēriņu;
b) pasliktina vārsta dzesēšanu, pieaug vārsta temperatūra. Temperatūrai sasniedzot zināmu līmeni, vārstā notiek strukturālas pārmaiņas, kas tajos rada plaisas.

Analizējot 2013. gada rudens mērījumus, kas iegūti īsi pirms dzinēja kapitālā remonta (ik pēc 50 000 stundām), kā arī informāciju no SIA «*Witraktor*», tika secināts, ka izplūdes vārsta nosēdumus veido gaiši brūni degšanas produkti vārsta iekšpusē un cilindra galvas izplūdes traktā: 0,3–0,6 mm. Virsējā kārta ir irdena, bet tuvāk metālam kļūst cieta un grūti notīrāma.

AE signalu analīze parādīja, ka, paaugstinātoties degšanas produktu nosēdumiem uz izplūdes varsta, samazinās AE signāla amplitūda, savukārt ilgums palielinās.



4.10. att. Dzinēja izplūdes vārsts ar palielinātu izdegumu/mainītu vārsta ģeometriju

Vārsta nodilumu mēra ik pēc 2000 darba stundām. Vārsta nodiluma mērīšana ar piekļuvi tā šķīvim ir darbietilpīga, turklāt dzinējs ir jāapstādina. Līdz ar to vārsta nodilums (nosēdums) tiek mērīts neizjauktam dzinējam ar mikrometru no dzinēja ārpuses (attālums no cilndra galvas līdz vārsta kāta galam).

Palielināts vārsta nodilums un nevienmērīga sēža var būt vārsta pārkaršanas, nekvalitatīva materiāla vai ekspluatācijas noteikumu neievērošanas sekas, un tas var izraisīt jaudas samazināšanos (iemesls: krītas Pz), ieplūdes vai izplūdes trakta pārkaršanu, defekta palielināšanos un vārsta sagrūšanu, kas rada tālākas sekas.

Šajā gadījumā degviela (gāze) un darba apstākļi ir ļoti labvēlīgi – vārstu nosēde ir minimāla (reti gadījumi, kad vārsts nosēdies līdz maksimāli pieļaujamai robežai pirms galvu maiņas – 17 000 motorstundām).

Īsi pēc jaunas cilindra galvas uzstādīšanas (100 motorstundām) tika ņemts vērā vārstu nosēdes atskaites jeb references mērījums. Ik pēc 4000 motorstundām tika mērīta vārstu nosēde. Izplūdes un ieplūdes vārstu nosēdums nedrīkstēja pārsniegt 2,3 mm.

2014. gada rudenī SIA «*Witraktor*» pārstavis informēja, ka, kārtējo reizi mērot vārstu nosēdumu, ir konstatēts palielināts nosēdums – 2,5 mm, kā arī neliels vārsta izdegums, turklāt vārsts nostrādājis tikai mazliet vairāk nekā 6000 stundas.

Detalizētāk tika analizēti saņemtie AE dati, kas bija iegūti pirms un pēc vārsta nosēduma mērīšanas (4.9. att.).

Samazinoties vārsta kontakta virsmai/izdegumam, pieauga signāla amplitūda.

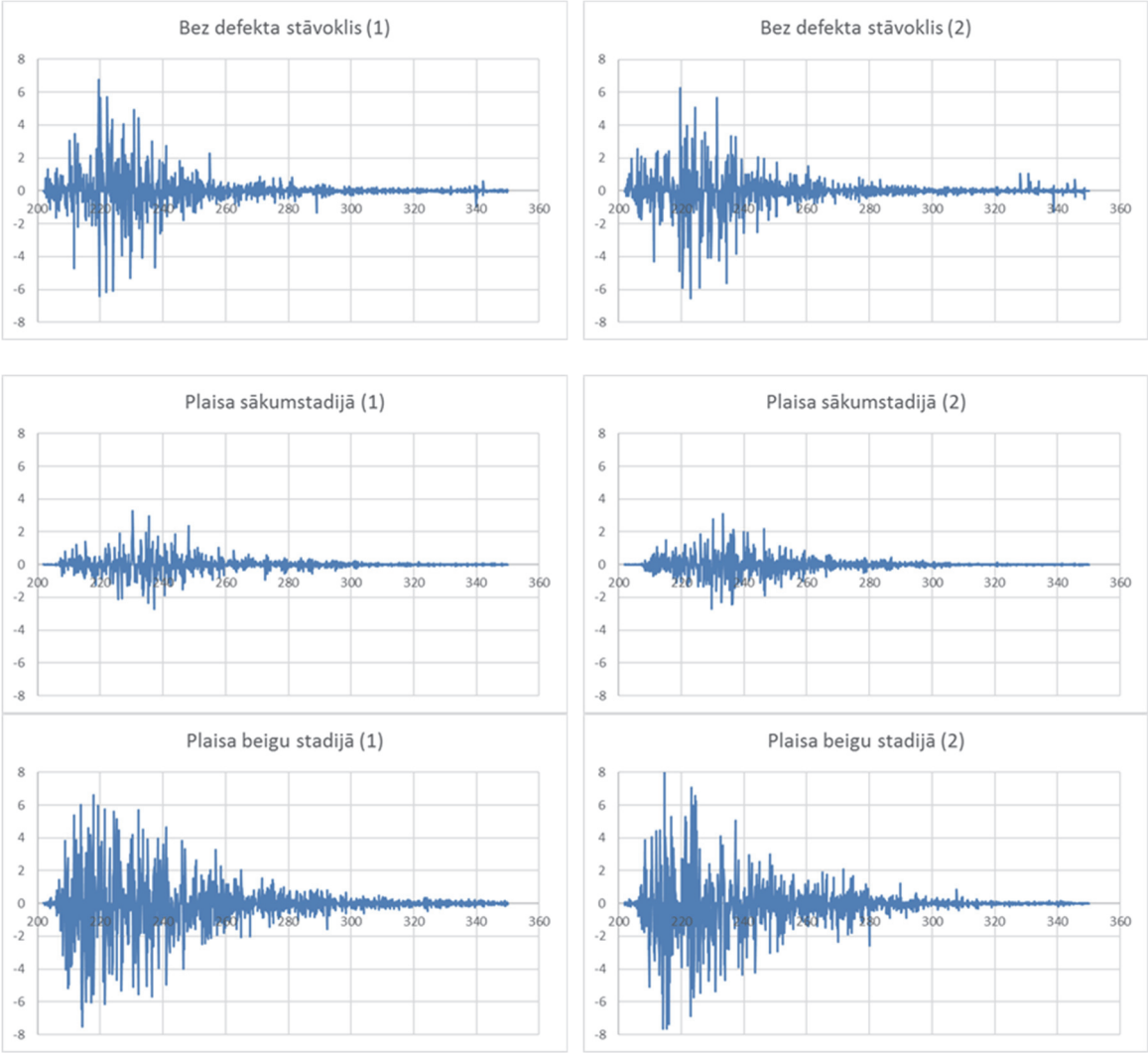
Veicot eksperimentālos mērījumus, tika secināts:

1. Ja vārstiem ir samazināta siltuma atstarpe, izmainās gāzu apmaiņas cikls un samazinās gan amplitūda, gan signāla ilgums.
2. Ja ir nosēdumi uz izplūdes vārsta, samazinās amplitūda un skaņas ilgums.
3. Ja ir plaisa ieplūdes vārstā, samazinās amplitūda, savukārt skaņas ilgums palielinās.
4. Ja ir izplūdes vārsts ar palielinātu nosēdumu un izdegumu, samazinās amplitūda, palielinās skaņas ilgums.

Detalizētākai analīzei tika izvēlēti šādi ieplūdes vārsta ar plaisu stāvokļi:

a) sešas vārsta aizvēršanās bezdefekta stāvoklī;
b) sešas vārsta ar plaisu sākumstadijā aizvēršanās;
c) sešas vārsta ar plaisu beigu stadijā aizvēršanās (pirms plānotās apkalpošanas).

Uzskatei tālāk redzamajā attēlā (4.11. att.) parādīti ieplūdes vārsta ar plaisu divi stāvokļi (kopā tika veikti seši mērījumi).



4.11. att. Mērījumu grafiskais attēlojums vārstam ar plaisu (X ass – kloķvārpstas pagrieziena leņķis; Y ass – AE amplitūda voltos (V))

4.1. tabula

Mērījumu datu apkopojums

	N1	N2	N3	N4	N5	N6	Sešas vārsta aizvēršanās normālā stāvoklī		
Max	6.770113	6.560149	6.923008	6.658722	6.477751	6.332485	6.620371	Aver	Max
AnglMax	219.51	222.93	218.34	219.96	220.23	220.41	220.2955	Aver	AnglMax
Threshold	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6			
FirstValue	0.765391	0.720835	0.839245	-0.99184	0.79652	0.856945			
FirstAngl	202.68	202.95	203.4	202.14	202.14	203.31	202.77	Aver	FirstAngl
LastValue	-1.32265	0.670175	0.625009	-0.65431	0.602425	-0.71778			
LastAngl	288.99	283.5	280.44	282.6	279.72	281.97	282.87	Aver	LastAngl
Aver	0.317359	0.329929	0.52102	0.598205	0.438794	0.500489	0.47643	Aver	Aver
RiseTime	0.00187	0.00222	0.00166	0.00198	0.00201	0.0019	0.00194	Aver	RiseTime
DownTim	0.00772	0.00673	0.0069	0.00696	0.00661	0.00684	0.00696	Aver	DownTime
Rise	16.83	19.98	14.94	17.82	18.09	17.1	17.46	Aver	Rise
Down	69.48	60.57	62.1	62.64	59.49	61.56	62.64	Aver	Down
TimeFirst	0.02252	0.02255	0.0226	0.02246	0.02246	0.02259	0.02253	Aver	TimeFirst
TimeLast	0.03211	0.0315	0.03116	0.0314	0.03108	0.03133	0.03143	Aver	TimeLast
TimeMax	0.02439	0.02477	0.02426	0.02444	0.02447	0.02449	0.02447	Aver	TimeMax
	IncrF1	IncrF2	IncrF3	IncrF4	IncrF5	IncrF6	Sešas vārsta ar plaisu beigu stadijā aizvēršanās		
Max	7.529401	8.032948	8.127249	8.279533	8.260917	8.319512	8.091593	Aver	Max
AnglMax	214.38	214.65	214.11	213.48	214.83	214.02	214.245	Aver	AnglMax
Threshold	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6			
FirstValue	-0.74464	-0.73548	0.680551	0.605782	-0.61036	0.607308			
FirstAngl	206.1	206.28	202.41	205.83	203.76	204.12	204.75	Aver	FirstAngl
LastValue	-0.62714	0.855114	-0.61036	0.637216	-0.62501	0.657663			
LastAngl	304.02	307.89	287.46	299.43	288.54	289.53	296.145	Aver	LastAngl
Aver	0.563609	0.529503	0.541982	0.573304	0.513922	0.57407	0.549398	Aver	Aver
RiseTime	0.00092	0.00093	0.0013	0.00085	0.00123	0.0011	0.001055	Aver	RiseTime
DownTim	0.00996	0.01036	0.00815	0.00955	0.00819	0.00839	0.0091	Aver	DownTime
Rise	8.28	8.37	11.7	7.65	11.07	9.9	9.495	Aver	Rise
Down	89.64	93.24	73.35	85.95	73.71	75.51	81.9	Aver	Down
TimeFirst	0.0229	0.02292	0.02249	0.02287	0.02264	0.02268	0.02275	Aver	TimeFirst
TimeLast	0.03378	0.03421	0.03194	0.03327	0.03206	0.03217	0.032905	Aver	TimeLast
TimeMax	0.02382	0.02385	0.02379	0.02372	0.02387	0.02378	0.023805	Aver	TimeMax
	Incr1	Incr2	Incr3	Incr4	Incr5	Incr6	Sešas vārsta ar plaisu sākumstadijā aizvēršanās		
Max	3.271835	3.07713	3.173872	3.07713	2.453952	2.77134	2.928294	Aver	Max
AnglMax	230.4	233.37	228.69	233.37	232.65	234.36	231.606	Aver	AnglMax
Threshold	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6			
FirstValue	-0.69459	-0.70466	-0.7068	-0.70466	0.817577	-1.08095			
FirstAngl	207.81	210.96	209.97	210.96	208.44	209.97	209.685	Aver	FirstAngl
LastValue	-0.94941	-0.73365	0.63508	0.634469	0.656747	-0.66285			
LastAngl	272.7	266.13	286.47	286.92	279.36	285.12	279.45	Aver	LastAngl
Aver	0.165302	0.178016	0.203024	0.191972	0.17123	0.209758	0.186275	Aver	Aver
RiseTime	0.00251	0.00249	0.00208	0.00249	0.00269	0.00271	0.00263	Aver	RiseTime
DownTim	0.0047	0.00364	0.00642	0.00595	0.00519	0.00564	0.005593	Aver	DownTime
Rise	22.59	22.41	18.72	22.41	24.21	24.39	23.67	Aver	Rise
Down	42.3	32.76	57.78	53.55	46.71	50.76	50.34	Aver	Down
TimeFirst	0.02309	0.02344	0.02333	0.02344	0.02316	0.02333	0.02331	Aver	TimeFirst
TimeLast	0.0303	0.02957	0.03183	0.03188	0.03104	0.03168	0.031533	Aver	TimeLast
TimeMax	0.0256	0.02593	0.02541	0.02593	0.02585	0.02604	0.02594	Aver	TimeMax

No tabulas redzams, ka analizēta tika virkne parametru, kas liecina par vārstu tehnisko stāvokli. Tomēr tika konstatēts, ka visskaidrāko informāciju par vārstu stāvokli sniedz AE amplitūda, AE signāla pieaugums un dilšanas laiks. Ir jāuzsver, ka šie trīs parametri tika analizēti vienlaikus.

SECINĀJUMI

1. Kuģu dzinēju bojājumu un to diagnostikas metožu analīze, ietverot *Condition Based Maintenance* ieviešanas regulējošos dokumentus, parādīja, ka šodien klasifikācijas sabiedrībām nav strikti regulējošu noteikumu AE aparatūras ieviešanai. Par to lemj katra klasifikācijas sabiedrība, ņemot vērā savu pieredzi. Cilindra virzuļu grupas bojājumi (plaisas, vārstu izdegumi) ieņem vienu no galvenajām vietām bojājumu skaitu un remontu izmaksu ziņā (ietverot turbokompresporus). Pašlaik, ievērojot *CBM* prasības, dzinēju kontrolei izmanto vibrodiagnostikas un termogrāfijas ierīces, kas nesniedz pilnīgu informāciju un ir ar zemu izšķirtspēju.

2. Tika izstrādāts matemātiskais modelis gāzes plūsmai defektētā kanālā un tās plūsmas izraisītajam akustiskajam efektam. AE signāli šajā gadījumā bija ultraskaņas signāli no gāzes plūsmas defektā (vārstā vai tā ligzdā), kas radušies spiediena krituma rezultātā, gāzei plūstot pa neregulāras formas kanālu, starp vārstu un vārsta ligzdu.

3. Ir izstrādāts gāzu dinamiskais aprēķins un noteiktas diapazona robežas saspiesta gaisa noplūdei zemskaņas turbulentas plūsmas režīmā. Rezultāti liecina, ka zemskaņas turbulentas plūsmas režīmā plašu attiecību *pA/pa* diapozonu ir iespējams nodrošināt tikai pie defekta lielas atveres liela kanāla garumā. Izskatītajā gadījumā defekta atvēruma sliekšņa vērtība ir: $r_{robež}$ = 0,1 mm.

4. Ir veikti eksperimentālie mērījumi dzinējam ekspluatācijas apstākļos un noteikti kritēriji defekta novērtēšanai. Tika pierādīts, ka AE ir efektīvs līdzeklis noguruma plaisu u.c. defektu, piemēram, vārstu ģeometrijas zušanas un degšanas produktu nosēdumu gadījumu atklāšanā. Secināts, ka AE sensoru visefektīvākā uzstādīšanas vieta AE viļņu konstatācijai ir dzinēju cilindra galvas. Tika atklāts, ka AE sensoru visefektīvākā uzstādīšanas vieta AE viļņu konstatācijai ir dzinēju cilindra galvas. AE metode parādīja plaisas rašanos apmēram 1000 stundas pirms tā tika konstatēta ar kapilāro metodi (tika atklāta mikroplaisa ar atvērumu 0,02 mm un garumu – 4 mm). Vārstu ģeometrijas novirze tika fiksēta pēc nostrādātām 1300 darba stundām (iegūto AE mērījumu analīzei tika izmantots vārsts ar nosēdumu – 2,5 mm). Degšanas produktu paaugstinātu nosēdumu slāni uz izplūdes vārsta un cilindra galvas izplūdes traktā veidoja gaiši brūni degšanas produkti: 0,3 – 0,6 mm, kas tika konstatēti pēc nostrādātām 2800 darba stundām.

5. Ir izstrādāta akustiskās emisijas diagnostikas metodoloģija dzinēja defektu agrīnai noteikšanai, kas atbilstu tehniskā stāvokļa uzraudzības sistēmas (*Condition Based Maintenance – CBM*) prasībām, kuras pamatposmi ir:

a) objekta sagatavošana darbam;
b) mēraparatūras sagatavošana darbam;
c) AE sensoru fiksācija mērījumu vietās;
d) AE signālu mērījumu veikšana;
e) mērījumu rezultātu apstrāde;
f) informatīvo AE rādītāju analīze;
g) defektu identificēšana;
h) lēmumu pieņemšana par dzinēja tehnisko stāvokli;
i) tehnisko protokolu noformēšana;
j) datu saglabāšana.

Izstrādātās akustiskās emisijas diagnostikas metodoloģijas pamatposmi atbilst kuģu dīzeļdzinēju diagnosticēšanai, ņemot vērā standartus, kas attiecas uz akustiskās emisijas mēraparatūru un ir klasifikācijas sabiedrības apstiprināti.

IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS

1. Abdou W., Balodimus N., Reuben B. Acoustic emission in diesel engines – towards a time series model for the injection process // 30th European Conference on Acoustic Emission Testing & 7th International Conference on Acoustic Emission University of Granada. Edinburgh: School of Engineering and Physical Sciences, Heriot-Watt University, 2013.
2. Acoustic Emission for Corrosion Detection / Available at http://www.ndt.net/article/mendt2005/pdf/01.pdf
3. Acoustic Emission. General regulations: Euro Standard EN 13554. 2002.
4. Acoustic emission monitoring sounds like a good idea // Marine Propulsion & Auxiliary Machinery. October/November 2012, 58 p.
5. Acoustic Emission Science and Technology / Available at http://www.muravin.com/downloads/Muravin%20-%20Acoustic%20Emission%20Science%20and%20Technology.pdf
6. Ball A.D., Gu F., Liu S. Detection of engine valve faults by vibration signals measured on the cylinder head // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part D: Journal of Automobile Engineering. Vol. 220, 2006, pp. 379–386.
7. Ball A.D., Gu F., Li W. The condition monitoring of diesel engines using acoustic measurements, part 2: fault detection and diagnosis // SAE 2000 World Congress, Noise & Vibration. Detroit, USA, 2000. SAE Paper 2000-01-0368, pp. 57–64.
8. Ball A.D., Gu F., Liu S. Vibration monitoring of diesel engines using wavelet packet analysis and image processing // Research Report. University of Manchester, 2000.
9. Banovs M.D., Shanyavsky A., Urbahs A., Troenkins D.A., Konyaev E.A., Pykhtin Yu.A., Minatsevičs S.F., Kashins V.N. Acoustic-emission inspection of the kinetics of fatigue cracks in turbomachinery disks // The Journal of Nondestructive Testing 23 (11), 1988, pp. 801–805.
10. Banovs M.D., Konyaev E.A., Pavelko V.P., Urbahs A. Determination of the threshold stress intensity factor by the method of acoustic emission // Strength of Materials 23 (4),1991, pp. 439–443.
11. Banovs M., Troenkins D., Urbahs A., Minatsevich S. Inspection of the condition of gas-turbine engine blades by the acoustic-emission method // The Journal of Nondestructive Testing 22 (9), 1986, pp. 619–623.
12. Bidini L., Buratti G. Diagnosis of internal combustion engine through vibration and acoustic pressure non-intrusive measurements // Applied Thermal Engineering Barelli, Vol. 34, 2009, pp. 1707–1713.
13. Банов М.Д, Коняев Е.А., Урбах А. Оценка долговечности конструкционных материалов ГТД по параметрам АЭ // Диагностирование и прогнозирование технического состояния ГТД. 1985.– 13–16 с.
14. Банов М.Д., Урбах А. Способ контроля газораспределения поршневых двигателей // А.С. N 4914062106. 1991.
15. Буйвол Б.Н. Тонкие каверны в течениях с возмущениями. Киев: Наукова думка. 1980, 296 с.
16. Chen J., Geng Z. Investigation into piston-slap-induced vibration for engine condition simulation and monitoring // Journal of Sound and Vibration, Vol. 282, 2005, pp. 735–751.
17. DNV Managing Risk: Ship Hull Strength – What Are the Limits / Available at http://www.dnv.com.au/industry/maritime/publicationsanddownloads/publications/updates/container/2008/3-2008/shiphull.asp

18. Dunegan H.L., Harris D.O., Tatro C.A. Fracture analysis by use of acoustic emission // Eng. Fract. Hech. 1(1), 1968, pp. 105–122.
19. Elamin F., Fan Y., Gu F. Detection of diesel engine valve clearance by acoustic emission // Proceedings of Computing and Engineering Annual Researchers' Conference. Huddersfield: University of Huddersfield, 2009, pp. 7–13.
20. Filcek P. Lloyd's register technology days // Failure of Medium Speed Diesel Engines. 2010, pp. 177–186.
21. Gerberich W.W., Alteridge D.G., Lessar I.F. Acoustic emission investigation of microscopic ductile fracture // Met. Trans. 6(2), 1975, pp.– 797–801.
22. Girdhar P., Mackay S., Scheffer C. Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance // Newnes. Elsevier, Oxford, 2004.
23. Hartbower C.E., Reuter W.G., Horais C.F. Acoustic emission for the detection of weld and stress – corrosion cracking // Acoustic emission, 1972, pp. 187–221.
24. Hill R., Stephens R. Sonic emission during deformation of solids // Arch. Akust. 6(1), 1971.– pp. 45–57.
25. Hutton P.H., Skorpik I.R. In-flight fatigue crack monitoring using acoustic emission // ISA Trans. 20(1), 1981, pp. 59–63.
26. Иванов А.Н. Гидродинамика развитых кавитационных течений. Ленинград: Судостроение. 1980, 237 с.
27. Kaiser J. Erktenntnisse und Folgerungen aus der Messung von Gerauschen bei Zugleichprufung von metallischen Werkstoffen // Archiv fur das Eisenhuttenwesen, 1953, H.1/2.– 43–45 s.
28. Mandloi R.K., Pandey A., Raghuwanshi N.K. Failure analysis of internal combustion engine valves: a review // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology 1(2), 2012 pp. 173–181.
29. Molland A.F. The Maritime Engineering Reference Book (1st edition). 2008, 920 p.
30. Nivesrangsan P., Steel J.A., Reuben R.L. Acoustic emission mapping of diesel engines for spatially located time series, Part II // Spatial reconstitution, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 21, 2007, pp.1084–1102.
31. Nivesrangsan P., Reuben R.L., Steel J.A. Source location of acoustic emission in diesel engines // Mechanical Systems and Signal Processing, Vol 21, 2007, pp. 1103–1114.
32. Non-destructive Testing – Acoustic Emission Inspection. Vocabulary: ISO 12716:2001.
33. Parrish B. Acoustic emission techniques for in flight structural monitoring // SAE Technical Paper Series, N8, 1960, pp. 14–19.
34. Pless W.H. Acoustic emission detection of fatigue crack growth in a production – size aircraft wing test article under simulated flight loads // Materials Evaluation 36(5), 1978, pp. 41–46.
35. Pollock A. Metals Handbook // ASM International. 9th Ed., V17, 1989, pp. 278–294.
36. Russian Maritime Register of Shipping. Regulating documents. Saint-Petersburg, 2011.
37. Shaniavskis A., Urbahs A., Banovs M., Nasibullins A., Carjova K. Analysis ofthe mechanism of destruction of aircraft components // International Congress on Enginiring and Tehnology. 2013, pp. 167–172.
38. Tatro C.A., Liptal R.G., Harris D.O. Acoustic emission technique in materials research // J. Nondestructive Testing 3(3), 1971. pp. 215–275.
39. Terms. Acoustic Emission Conceptions: Euro Standard EN 1330-9. 2000.
40. The Swedish Club Highlights. Goethenburg, Sweden, 2005.
41. The Swedish Club. Main Engine Damage Study. Goethenburg, Sweden, 2012.
42. Transport Claims Consultants Network / Available at http://www.tccn.be

43. Unbedahts A., Carjova K., Urbaha M. Acoustic emission method implementation for medium and high speed ship engines condition monitoring // Transport Means 2014. Kaunas, Lithuania: Kaunas University of Technology, 2014, pp. 380–382.
44. Unbedahts A., Vindergauzs L. Application of the Acoustic Emission Method for cracks early detection in the ship constructions // Transport Means 2012. Kaunas, Lithuania: Kaunas University of Technology, 2012, pp. 46–49.
45. Unbedahts A., Banovs M., Rijkuris G. Influence of Ship's Hull and Engines Monitoring on Maritime Safety Improvement // Transport and Engineering. Production Technologies. Latvia, Riga, 2013. pp. 53–58.
46. Unbedahts A., Banovs M. Use of the acoustic emission for the vessels engines/hull condition monitoring // Transport Means 2013. Kaunas, Lithuania: Kaunas University of Technology, 2013, pp. 220–223.
47. Unbedahts A., Vindergauzs L. Utilization of acoustic emission as a ship's damage prevention method // Maritime transport and Infrastructure 2012. Riga, Latvia: Latvian Maritime Academy, Research Institute, 2012, pp. 113–117.
48. Urbahs A., Banovs M., Doroshko S., Harbuzs Y., Turko V. Acoustic Emission Diagnostic of Fatigue Crack Development During Undercarriage Bench Testing // Mechanika 2010. 2010, pp. 450–454.
49. Urbah A., Unbedaht A. Acoustic emission method evaluation for high speed ship engines condition monitoring // Transport Means 2015. Kaunas, Lithuania: Kaunas University of Technology, 2015, pp. 587–590.
50. Urbahs A., Banovs M., Doroshko S., Nasibullins A., Fesčuks J. Acoustic emission monitoring of fatigue damage // High Tech in Latvia 2008. Riga: Latvia Technology Park, 2008.
51. Urbahs A., Shaniavsky A., Doroshko S., Banovs M. Correlation of Acoustic Emission and Fractographic Characteristics during Fatigue Crack Development // EWGAE 2010. 2010, pp. 20–27.
52. Urbahs A., Soskovets K., Sorokins A. Tsepusovs A. Creating a new generation helicopter – tilt rotor // Transport Means 2012. 2012, pp.– 175–178.
53. Urbahs A., Banovs M., Bratarchuks S., Serebrjakovs P., Turko V. Diagnostics of damaged composite skin zones of aircraft after the impact of lightning bolt using the method of acoustic emission // Proceedings of the 16th European Conference on Composite Materials. Seville, Spain, 2014.
54. Urbahs A., Banovs M., Turko V., Feščuks J. Diagnostics of Fatigue Damage of Gas Turbine Engine Blades // WASET Issue 59. 2011, Part IX, pp. 906–911.
55. Urbahs A., Banosv M., Harbuzs Y., Turko V., Fesčuks J., Hodos N. Estimation of mechanical properties of the anisotropic reinforced plastics with application of the method of acoustic emission // Transport and Telecommunication 11(2), 2010, pp. 68–75.
56. Urbahs A., Shaniavsky A., Banovs M., Carjova K. Evaluation of an Acoustic Emission Criterion of Under Surface Fatigue Cracks Development Mechanism in Metals // Transport means 2012. 2012, pp.131–134.
57. Urbahs, A., Harbuzs, Y. Evaluating of Damageability of Materials at fatigue Loading based on Signals of Acoustic Emission // Mechanika. Kaunas: Kaunas University of Technology, 2015, pp. 257–261.
58. Urbahs A., Banovs M., Harbuzs Y., Fesčuks J., Sologubovs Y. Evaluations of degree of damage and probability of forecasting of destructing load in anisotropic composites by means of acoustic emission in materials under static loading // Transport Means 2011. 2011, pp. 270–273.

59. Urbahs A., Banovs M., Harbuzs Y., Chepusovs A., Feščuks J. Evaluation of residual strength of aircraft aileron construction // AES – ATEMA 2011. 2011, pp. 29–34.
60. Urbahs A., Doroshko S., Banovs M., Nasibulins A. Fatigue crack growth assessment tool design cyclic checks // LR patent LV 13853 B, 2009.
61. Urbahs A., Banovs M., Harbuzs Y., Turko V., Feščuks J., Hodos N. Investigation of Mechanical Properties of Composite Materials Using the Method of Acoustic Emission // Mechanika 2011. 2011, pp. 306–310.
62. Urbahs A., Banovs M., Turko V., Fesčuks J. New approach to use the acoustic emission monitoring for the defects detection of composit-material's design elements // Proceedings of the 14th International Conference Maritime Transport and Infrastructure. Riga, 2012, pp. 45–50.
63. Urbahs A., Banovs M., Doroshko S., Turko V. Non-destructive inspection of aircraft landing gear during residual strength testing // ULTRAGARSAS 64(1), 2009. pp. 43–45.
64. Urbahs A., Banovs M., Turko V., Bratarchuks S., Khodos N. Some features of behaviour of acoustic emission signals at dynamics bench tests of preliminary intense steel fibre reinforced concrete designs // Transport Means 2010. Riga, Latvia, 2010. pp. 45–48.
65. Urbahs A., Unbedahts A. Perspectives of Ship's Hull Diagnostics Using Acoustic Emission Method // 53rd International Scientific Conference of Riga Techical University. Riga, Latvia: RTU, 2012.
66. Urbahs A., Banovs M., Turko V., Carjova K. The Characteristic Features of Composite Materials Specimen's Static Fracture Investigated by the Acoustic Emission Method // Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications, Vol. 23, Switzerland, 2012, pp. 28–32.
67. Using Acoustic Emission in Fatigue and Fracture Materials Research / –Available at http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/9811/Huang/Huang-9811.html
68. Урбах А. Диагностика повреждений и прогнозирование разрушений авиационных конструкций акустико - эмиссионным методом. Рига: Рижский авиационный университет, 1996.
69. Урбах А. Критерии эффективности промышленного акустико – эмиссионного контроля// Труды РАТИ.– 1992.– 21–27 с.
70. Урбах А., Романов В.Н., Банов Н.Д., Коняев Е.А. Методика и аппаратура диагностики состояния силовых элементов авиадвигателей с использованием акустической эмиссии // Применение неразрушающих методов контроля в промышленности. 1981, 37–38 с.
71. Woodyard D. Poundrers Marine Diesel Engines and Gas Turbines (9th edition), 2009.
72. Wood B.R.A. The use of acoustic emission for structural integrity assurance // Nondestructive Testing-Australia 18(6), 1981, pp. 9–15.
73. Возницкий И. В., Пунда А.Ц. Судовые двигатели внутреннего сгорания (том 2). - Моркнига: Санкт-Петербург, 2008.