RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultāte

A. UNBEDAHTS
Doktora studiju programmas «Transports» doktorants

KUĢU DZINĒJU TEHNISKĀ STĀVOKĻA AKUSTISKĀS DIAGNOSTIKAS METODOLOĢIJAS IZSTRĀDE

Promocijas darbs

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

RTU Izdevniecība
Rīga 2016

ANOTĀCIJA

Mūsdienās kuģniecības nozare attīstās, ņemot vērā šīsdienas situācijas diktētus noteikumus. Ir nepieciešams paaugstināt kuģošanas drošību un samazināt izmaksas. Izmaksu samazināšanas jomā prioritāte ir kuģu mehānismu drošas ekspluatācijas laika palielināšana. Nesagraujošās kontroles (NK) metožu ieviešana ir obligāts nosacījums dzinēju un mehānismu drošas ekspluatācijas termiņa palielināšanai. Prakse liecina, ka noguruma plaisas ir galvenais dzinēju bojājumu veidošanās cēlonis. Tā kā plaisu rašanos ir grūti konstatēt, defekts parādās strauji, kas ekspluatācijas laikā rada vislielāko bīstamību. Šī iemesla dēļ ir svarīgi iespējami ātrāk atklāt noguruma bojājumu rašanos un tālāk kontrolēt to attīstību.

Pašlaik pielietotajām NK metodēm - ultraskaņas, virpuļstrāvu, kapilāra, magnētisko daļiņu u.c. piemīt vairāki trūkumi, kas apgrūtina to izmantošanu, īpaši tādēļ, ka šīs metodes prasa dzinēja apstādināšanu kontroles dēļ. Promocijas darbā ir veikts tradicionālo NK metožu novērtējums un salīdzinājums.

Lielāko daļu no tradicionālajām NK metodēm piemītošajiem trūkumiem var pārvarēt, izmantojot perspektīvu NK metodi – akustiskās emisijas metodi (AE). AE metode ar augstu ticamības pakāpi ļauj konstatēt mehānismu defektus un noguruma bojājumus un sekot līdzi to attīstībai arī ekspluatācijas laikā.

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

Pētījuma objekts - 20 cilindru V-veida četrtaktu dzinējs.

Pētījuma priekšmets - kuģu dzinēju diagnosticēšanas tehnoloģiskie procesi ekspluatācijas apstākļos.

Darba zinātniskā novitāte:

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

2. Matemātiskais modelis gāzes plūsmai defektētā kanālā un tās plūsmas izraisītajam akustiskajam defektam.

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

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

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 akustisko signālu rašanās avotu matemātisko modelēšanu dzinēja cilindru hermētiskuma zušanas gadījumā, bet ceturtajā nodaļā apkopoti kuģa dīzeļdzinēja tehniskā stāvokļa diagnostikas mērījumu rezultāti.

Atslēgas vārdi: akustiskā emisija, akustiskās emisijas diagnostika, kuģu dzinēju tehniskā uzraudzība, matemātiskā modelēšana.

ANNOTATION

Today the shipping industry is evolving taking into account contemporary situations dictate terms: it is necessary to increase maritime safety and reduce costs. In the scope of costs reduction, priority is a ships' operation time increase. Fatigue strength studies with a variety of non-destructive inspection (NDT) techniques are required for in-service engines life extension. Practice shows that fatigue cracking is the main cause of engine damage formation. As cracks are hard to find, usually the defects occur suddenly during the operation, results in the highest hazard. For this reason, it is important as quickly as possible to detect the occurrence of fatigue damage and further control their development. Currently NDT, as ultrasonic, eddy current, liquid penetrant, magnetic, etc. methods have several drawbacks that make it difficult to use in a number of practical situations, the more so that these methods require stopping the engine for control.

This paper contains comparison and assessment of NDT. Most of the traditional NDT disadvantages can be overcome through a prospective NDT method - the method of acoustic emission (AE). AE method with a high degree of probability detect defects of fatigue damage and keep track of their development.

Presented paper offer the engine intake valve fatigue damage assessment mathematical model based on the AE signal measurement data.

The objective is to develop marine diesel engines acoustic diagnostic methodology for the early detection of engine failure to meet the technical condition of the system (Condition based maintenance - CBM) requirements.

Study object - 20 cylinder V-type for stroke diesel engine.

Subject of research – ship engines diagnostics procesess during operation.

Experimentally confirmed feasibility to detect fatigue cracks birth and progress in the engine cylinder head components during operation. Created mathematical model of the AE signal during gas turbulent flow in the cylinder crack.

Scientific novelty:

1. Analyzing engine generated noise using acoustic emission method there are possibility to obtain results online.
2. The developed mathematical model of the gas flow in defective channel and its generated acoustic effect.
3. It is created acoustic emission metodology for engine failure early detection to meet Condition Based Maitenance (CBM) requirements.

The dissertation is in Latvian, it contains an introduction, 4 parts, conclusions, list of references, eight attachments, 80 pictures, 6 tables, total 120 pages.

The first chapter deals with marine engines disorders and diagnostic methods for analysis.

The second chapter describes acoustic emission signal experimental measurement methodology and technical support.

The third chapter contains mathematical modeling of the acoustic signal sources in the damaged engine cylinders.

The fourth chapter offer results of the ship's diesel engine diagnostic measurements.

Key words: acoustic emission, acoustic emission diagnostic, marine engines technical condition monitoring, mathematical modeling.

SATURS

ANOTĀCIJA

ANNOTATION

IEVADS 7
1. KUĢU DĪZEĻDZINĒJU BOJĀJUMU UN TO DIAGNOSTIKAS METOŽU ANALĪZE 11
1.1. Kuģu mezglu noslogojums 11
1.2. Dzinēju detaļu periodiska kontrole 25
1.3. Apkalpošana pēc tehniskā stāvokļa (*Condition based maintenance - CBM*) 28
1.4. Promocijas darba mērķis un uzdevumi 43
2. AKUSTISKĀS EMISIJAS SIGNĀLU EKSPERIMENTĀLO MĒRĪJUMU TEHNISKAIS NODROŠINĀJUMS UN METODOLOĢIJA 46
2.1. Pētījuma objekta tehniskais apraksts 46
2.2. Mērījumu aparatūras tehniskais apraksts 49
2.3. Akustiskās emisijas signālu eksperimentālo mērījumu metodoloģijas gaita 52
3. AKUSTISKĀS EMISIJAS SIGNĀLU RAŠANĀS AVOTU MATEMĀTISKĀ MODELĒŠANA DZINĒJA CILINDRU HERMĒTISKUMA ZUŠANAS GADĪJUMĀ 59
3.1. Akustiskās emisijas signālu avotu dīzeļdzinējos analīze 59
3.2. Akustiskās emisijas signālu avotu matemātiskā modelēšana turbulentai gāzes plūsmai no defektēta kanāla cilindra hermētiskuma zušanas gadījumā 61
4. KUĢA DĪZEĻDZINĒJA TEHNISKĀ STĀVOKĻA AKUSTISKĀS DIAGNOSTIKAS PĒTĪJUMU REZULTĀTI 65
4.1. Robežu noteikšana saspiestas gāzes turbulentai zemskaņas plūsmai defektā 65
4.2. Akustiskās emisijas signālu informatīvo parametru pamatojums 66
4.3. Dīzeļdzinēja tehniskā stāvokļa akustiskās diagnostikas eksperimentālie pētījumi 70
4.3.1. Akustiskās emisijas signālu mērījumu rezultāti 71
4.3.2. AE mērījumu datu apstrādes rezultāti 78
SECINĀJUMI 90
PIELIKUMI 92
IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI 109

IEVADS

Ir zināms, ka kravu pārvadājumi ar kuģiem ir vieni no lētākajiem. Transatlantiskie pārvadājumi tiek realizēti ar kuģiem, kuru garums sasniedz 400 metrus, savukārt 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). Mūsdienu kuģu dzinēji strādā augstu spriedžu zonā, piemēram, vidēju apgriezienu četrtaktu dīzeļdzinēja degvielas iesmidzināšanas spiediens sasniedz 196 MPa, degšanas spiediens 21 MPa [125]. Statistika rāda, ka šādu energoiekārtu bojājumi var radīt lielus ekonomiskus un ekoloģiskus zaudējumus apkārtējai videi utt.

Saskaņā ar klasifikācijas sabiedrības "Det Norske Veritas" (*DNV*) datu bāzes informāciju, negadījumi, kas ietverti kategorijā "B" - „Kuģa konstrukcijas un iekārtas", tikai divas sadaļas: "Nepietiekama kuģa struktūru stiprība" un „Kuģa struktūru stiprības vājināšanās korozijas, metināšanas u.c. ietekmē" kopā veido 80 % no „B" kategorijas negadījumu skaita. Kuģa korpusa un dzinēju defekti, kas radušies metāla noguruma vai zemas kvalitātes dēļ, prasa ilgu remontu par augstu cenu. Tas ir sarežģīts process, īpaši, ja dzinējs stendā jāremontē un jāpārbauda. Testēšanas ārējie apstākļi, piemēram, gaisa temperatūra, mitrums, spiediens ir reglamentēti ekspluatācijā, un tie var būt ļoti atšķirīgi [68]. Turklāt jāņem vērā arī netiešie zaudējumi, ko rada kuģa dīkstāve vai, piemēram, vides piesārņojums. Tādēļ slēpto defektu atklāšana tā sākumstadijā ir ļoti būtiska.

Par zinātniskā darba aktualitāti uzskatāmi divi būtiski faktori.

Pirmkārt, viena no mūsdienu kuģu/dzinēju būvniecības pamatnostādnēm ir ekonomisko rādītāju paaugstināšana. Ekonomisko rādītāju uzlabošanas risinājumi ir vairāki, bet tuvāk tiek apskatīts viens no galvenajiem: pāriešana uz dzinēju tehniskām apkopēm pēc dzinēju reālā tehniskā stāvokļa (*Condition Based Maintenance - CBM*), t.i, dzinēju drošas ekspluatācijas laika palielināšana. Arvien vairāk kuģu (pārsvarā nesen būvēti) pāriet uz kuģu mehānismu apskates grafiku pēc to reālā tehniskā stāvokļa, nepakļaujot tos nevajadzīgai izjaukšanai. Šī iemesla dēļ mehānismu tehniskā stāvokļa diagnostika, izmantojot modernās diagnosticēšanas metodes, ieņem vadošu lomu.

Otrkārt, vēl aizvien ekspluatācijā atrodas liels skaits kuģu, galvenokārt sauso beramkravu, kas būvēti 20. gs. 70.-80. gados. Šie kuģi veido paaugstināta riska grupu, lai gan lielam skaitam kuģu dzinēji (galvenokārt palīgdzinēji) ir nomainīti un to tehniskā stāvokļa kontrolei ir būtiska loma.

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

Izvirzītā mērķa īstenošanai nepieciešams veikt šādus uzdevumus:

1. Veikt kuģu dzinēju bojājumu un to diagnostikas metožu analīzi.
2. Izstrādāt matemātisko modeli akustiskās emisijas signālu rašanās avotus dzinēja cilindru hermētiskuma zušanas gadījumā.
3. Pamatojoties uz gāzu dinamisko aprēķinu, noteikt diapzona 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.

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.

Darba praktiskā nozīme: augstapgriezienu dīzeļdzinēja augstfrekvenču akustiskā trokšņa eksperimentālās izpētes rezultāti un piedāvātā metodoloģija var tikt izmantota gan jūrniecības nozarē, gan citās transporta un tautsaimniecības nozarēs (skatīt atsauksmes no "*Transport Claims Consultants Network"*, Ltd., "*Africa Marine Surveys"*, Ltd., SIA "*Witraktor*" pielikumu Nr. 2, Nr. 3 un Nr. 5), lai kontrolētu ekspluatācijas rādītāju atbilstību noteiktajai tehniskajai specifikācijai. 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.

Promocijas darbā tika veikta arī Klasifikacijas sabiedrību prasību analīze *CBM* ieviešanai un izteikti priekšlikumi 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* ™.

Pētījuma objekts: 20 cilindru V-veida četru taktu dzinējs.

Pētījuma priekšmets: kuģu dzinēju diagnosticēšanas tehnoloģiskie procesi ekspluatācijas apstākļos.

Autora publikācijas:

Laika periodā no 2011. līdz 2016. gadam autoram tapušas 9 zinātniskās publikācijas, kas tieši saistītas ar akustiskās emisijas pētījumiem:

1. Urbahs A., Unbedahts A. Acoustic Emission Method Evaluation for High Speed Ship Engines Condition Monitoring. - In Book: Transport Means, ISSN 1822-296x, 2015, 587-590 pp. Datu bāze: 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, 380-382 pp. 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, 220-223 pp. 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, 46-49 pp. Database: SCOPUS.
5. Unbedahts A., Vindergauz L. Utilization of acoustic emission as a ship's damage prevention method**. -** Grāmatā: Jūras transports un infrastruktūra, Rīga, Latvija, 2012, 113.– 117. lpp.

6. Unbedahts A., Banovs M., Rijkuris G. Production Technologies// Influence of Ship's Hull and Engines Monitoring on Maritime Safety Improvement. – Grāmatā: Transport and Engineering. Rīga, Latvija, 2013. – 53.–58. lpp.
7. Urbahs A., Unbedahts A., Feščuks J. Ship Diesel Engines Technical Condition Acoustic Diagnostic Results. - In Book: Transport Means, 2016.
8. Urbahs A., Unbedahts A. Acoustic Emision Signal Mathematichal Modeling in Case of Engine Cylinders Tightness Disappereance. – Rīga, Latvia: RTU Izdevniecība, 2016.
9. Urbahs A., Unbedahts A. Riga Techical University 53rd International Scientific Conference// Perspectives of Ship's Hull Diagnostics Using Acoustic Emission Method. – Rīga, Latvia: RTU Izdevniecība, 2012.

1. KUĢU DĪZEĻDZINĒJU BOJĀJUMU UN TO DIAGNOSTIKAS METOŽU ANALĪZE

Lai arī dīzeļdzinēju attīstības vēsture sniedzas 19. gadsimta beigās, neskatoties uz to dominējošo stāvokli jūras flotes kuģiem, šie dzinēji joprojām ir pakļauti intensīvai pētniecībai un attīstībai. Ekonomiskie un drošuma aspekti, obligātā dzinēju diagnosticēšana, kā arī kaitīgo emisiju limitu samazināšana rosina uz nepārtrauktiem pētījumiem iekšdedzes dzinēju attīstībā.

Dzinēja tehniskā stāvokļa diagnostika ir pārbaudāmā objekta tehniskā stāvokļa kontrole ar turpmāko iegūtās informācijas apstrādi bez objekta izjaukšanas, kas dod iespēju pieņemt lēmumus par dzinēja tehnisko stāvokli, nosakot tā turpmākās darba spējas [53, 59].

Dīzeļdzinēju tehniskā stāvokļa diagnosticēšana nav nekas jauns, pēdējos gados ierosinātas un ieviestas dažādas metodes, tomēr nesenā tehniskā un ciparu tehnoloģijas attīstība, kā arī vides likumdošanas izmaiņas veicinājušas efektīvāku diagnostikas metožu attīstību. Turklāt elektronisko komponentu skaits (*Engine Control Units - ECU*), piemēram, sensoru un devēju, pastāvīgi pieaug. Tikmēr lielākā daļa programmatūru, kas paredzētas stāvokļa uzraudzībai, nav paredzētas, lai atklātu un skaidri noteiktu dzinēja defektus un pronozētu to rašanos, kas īpaši svarīgi, paredzot un plānojot apkopes intervālus.

1.1. Kuģu mezglu noslogojums

Spēkus, kas iedarbojas uz kuģa dzinēju var iedalīt divās lielās grupās: ārējie spēki, kas iedarbojas uz kuģa korpusu un tiek pārnesti uz dzinēju (galvenokārt tie var ietekmēt kloķvārpstu un tās gultņus), un spēki, kas rodas dzinēja darbības rezultātā: inerces, spiediena u.c. [60, 90]. Šie spēki var negatīvi ietekmēt dzinēju, veicinot paaugstinātu nodilumu un plaisu rašanos.

Ārējie spēki

Kuģa korpuss ekspluatācijas laikā nepārtraukti 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 un citur. Ja dzinēja projektēšanas stadijā ārējo spēku ietekme nav pietiekami ņemta vērā, nepietiekamas stiprības dēļ tas var radīt dzinēja detaļu/konstrukciju nopietnus defektus. Kā atzīst *DNV* speciālisti, bojājumu sarežģītās dabas un tās attīstības pētīšana būtu lietderīga [34].

Zināms, jo lielāki kuģi, jo sarežģītākām un lielākām slodzēm pakļaujas to konstrukcijas. Galvenie ārējie spēki, kas var ietekmēt dzinēja tehnisko stāvokli ir:

a) viļņu radītie;

b) kravas un ar to saistīto operāciju radītie;

c) spēki no saduršanās ar peldošu objektu;

d) spēki no kontakta ar nekustīgu objektu (piestātne, grunts u.c.).

Šo spēku izraisīto spriedzi var iedalīt piecās grupās:

a) garenvirziena;

b) vērpes;

c) šķērsvirziena;

d) lokālais, galvenokārt novērojams kuģa priekšgalā;

e) sabrukšanas (*collapsing*), ko izraisa: kravas svars uz kuģa apakšu, tam kuģi liecot, bet, kuģim atrodoties dokā uz balstiem, novērojams pretējs efekts - korpuss izliecas.

Augstāk minēto spēku izraisītā spriedze atkarīga arī no kuģa tipa un konstruktīvajām īpatnībām:

a) balkeriem (okeāna kuģi, parasti ar 50 000-300 000 *DWT* lielām vienklāja kravas tilpnēm un mašīntelpu kuģa aizmugurē) šāda konstrukcija rada jūtamus lieces momentus gan ostā kravas operāciju laikā, gan jūras pārgājienos;

b) konteinerkuģiem (okeāna kuģi, parasti ar 4 000-18 000 *TEU*. Mašīntelpa izvietota pakaļgalā vai vidusdaļā. Krava parasti sastāv no tukšiem un lādētiem konteineriem, kas jāapstrādā dažādās ostās) bieži izsauc asimetrisku slodzi, kas savukārt izraisa garenvirziena un vērpes spriedzi.

Viļņu radītās spriedzes paredzēšana ir svarīgākais noteikums kuģa korpusa drošuma novērtēšanā. Tas var izsaukt gan plastiskās deformācijas, gan noguruma plaisas. Šī tēma vēl ir maz pētīta, tādēļ turpināt pētījumus minēto spēku ietekmes izvērtējumam ir augstākā mērā svarīgi [79].

Praksē jāsaskaras ar gadījumiem, kad defekti kuģa korpusā vai dzinējos varētu būt radušies pienācīgi nenovērtētu ārējo spēku ietekmē. Šādi spēki rodas gan kuģī iekraujot, izlādējot vai balasta operācijās (galvenokārt lieces spēki), gan atrodoties atklātā jūrā, kad kuģa korpuss pakļauts sarežģītām slodzēm (liece, vērpe, triecienslodzes u.c.).

Jāņem vērā, ka saskaņā ar klasifikācijas sabiedrības prasībām, pēc katras korpusa deformācijas arī kuģa galvenais dzinējs tiek pakļauts inspekcijai, kuras mērķis ir noskaidrot, vai korpusa deformācijas / trieciena rezultātā nav notikušas izmaiņas arī dzinējā [44, 54, 55, 66, 70, 85, 93].

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.

2011. gadā pasaules jūrās atradās 85 000 komerciālas nozīmes kuģi (izņemot zvejas), kas >100 *GT* [63]. Tajā pašā periodā smagu negadījumu skaits (kuģis nogrimis vai zaudējis jūras spēju), kuru iemesls ir mehānismu bojājumi – 250 (1. vieta), korpusa bojājumi 30 (8. vieta) [63].

Visvairāk riskiem pakļauti lejamkravu un sauskravu balkera tipa kuģi. Staistika rāda, ka šiem kuģiem (*DWT* virs 20 000) no visiem negadījumiem 72 % ir korpusa bojājumu izraisīti defekti, no tiem 45 % ir korpusa sānu apšuvuma defekti [67].

"*The Swedish Club*" (starptautiska kuģu apdrošinātāju kompānija) kopš 1872. gada regulāri apkopo un publicē negadījumu statistiku un to izmaksas.

"*The Swedish Club Highlights*. 2005" [94]:

1) 1988.–1997. gads - mehānismu bojājumi – 38 % pēc skaita, 22 % pēc izmaksām.
2) 1998.–2004. gads - mehānismu bojājumi – 45 % pēc skaita, 32 % pēc izmaksām.

1998.–2004. gada periodā (defektu skaits, divtaktu un četrtaktu dzinēji kopā):

1) galvenais dzinējs - 232 (vid. izm. USD 300,000).
2) palīgdzinējs - 120 (vid. izm. USD 230,000).
3) turbokompresors - 84 (36,2 %).
4) kloķvārpsta - 23 (20 %).

Tajā skaitā pēc dzinēju tipa (bojājumu skaits %):

divtaktu zemapgriezienu:
a) turbokompresors – 43 %
b) enkursaites – 12 %

četrtaktu vid. apgriezienu:
a) turbokompresors – 26 %
b) kloķvārpsta – 26 %
c) sad. vārpsta – 10 %

”*The Swedish Club. Main Engine Damage Study 2012*” [95]:

1) 2005.-2011. gadā - mehānismu bojājumi – 51 % pēc skaita, 36 % pēc izmaksām.

2005.–2011. gadā (defektu skaits divtaktu un četrtaktu dzinējiem kopā):

a) galvenais dzinējs - 370 (vid. izm. USD 544,692);

b) palīgdzinējs - 185 (vid. izm. USD 390,092);

c) turbokompresors - 145 (39,1 %, vid. izm. USD 343,596);

d) kloķvārpsta - 16 (4,3 %, vid. izm. USD 1 447,163).

Tajā skaitā pēc dzinēju tipa (bojājumu skaits %):

divtaktu zemapgriezienu:

a) turbokompresors - 42,6 %;

b) gultņi (vid. izm. USD 385,840).

četrtaktu vid. apgriezienu:

a) turbokompresors - 42,9 %;

b) gultņi (vid. izm. USD 655,553).

No statistikas redzams, ka dzinēju bojajumu 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.

Šajā pašā izdevumā minēti galvenie cēloņi dzinēju defektiem:

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.

1.2 tabula

Izdevumā ”*The Swedish Club. Main Engine Damage Study 2012*” minēti pieci galvenie dzinēju defekti 2012. gadā

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

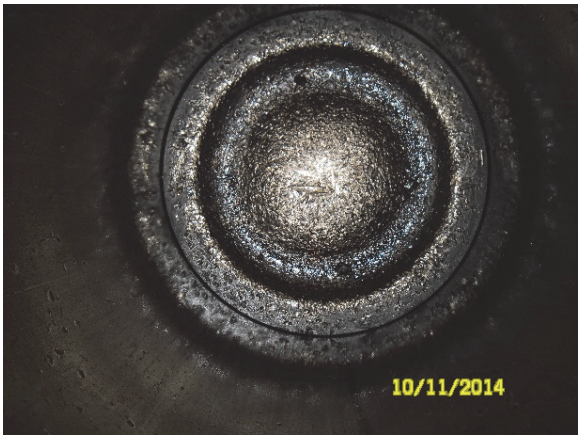
No statistikas izriet, ka defektiem visvairāk pakļautas ir cilindru galvas, virzuļi/gredzeni, cilindru čaulas un klaņu gultņi. Vismazākais nostrādāto stundu skaits līdz iespējamam defektam ir degvielas sprauslām, virzuļa gredzeniem un ieplūdes/izplūdes vārstiem [129].

Turpmāk darbā, aprakstot avāriju un dzinēju defektu piemērus, izmantoti materiāli no *Lloyd's Register Technology Days// Failure of Medium Speed Diesel Engines* [41] un *Transport Claims Consultants Network* darba materiāli [33].

1. piemērs. Kuģa galvenā dzinēja avārija

2014. gada novembrī plkst. 21.45 kuģa galvenajam dzinējam "Wartsila" 8L46B, 7800 kW, darbojoties ar 500 apgriezieniem minūtē un nominālo jaudu, nostrādāja avārijas signalizācija „Paaugstināta vibrācija", un tika aktivizēta automātiskā dzinēja avārijas apstādināšanas programma. Izmeklēšanā atklāja izdegušu un salauztu izplūdes vārstu. Tā daļas bija sabojājušas turbokompresoru, virzuli un cilindra čaulu (1.1., 1.2. att.). Dzinēja parametru automātiskās uzglabāšanas iekārtas analīze neuzrādīja nekādas dzinēja novirzes no normas līdz avārijas brīdim. Dokumentu un datorizētās apkalpošanas sistēmas (*Computer Based Maintenance - CBM*) pārbaude parādīja, ka visi dzinēja servisa darbi ir veikti savlaicīgi un saskaņā ar izgatavotājrūpnīcas instrukcijām. Negadījuma iemesla noskaidrošana turpinās.

1.1. att. Bojātais izplūdes vārsts



1.2. att. Bojātā cilindra čaula un virzulis

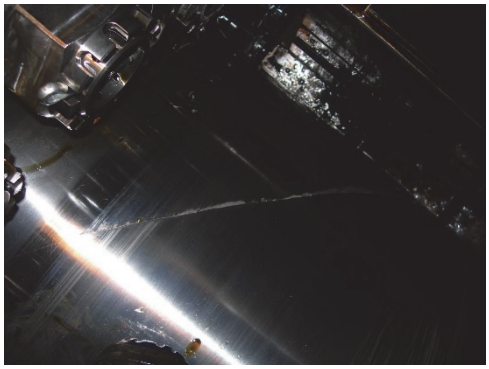
2. piemērs. Kuģa galvenā dzinēja avārija

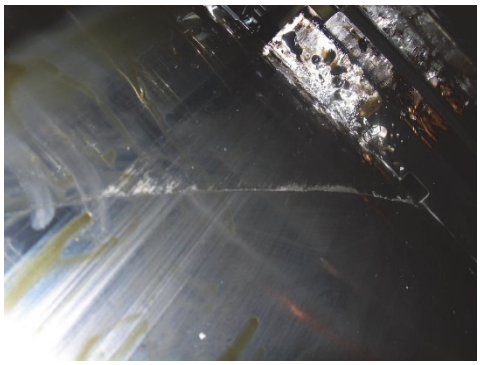
Zināms, ka kloķvārpsta ir dzinēja dārgākā un atbildīgākā daļa, tā pakļauta lielām un sarežģītām slodzēm (+/- zīmes liece, vērpe, vibrācija, smaguma un inerces spēki, nodilums u.c.). Galvenie defekti: nodilums, rievas, plaisas.

Attēlos zemāk redzama plaisa 4000 *TEU* konteinerkuģa galvenā dzinēja „Sultzer" 8RTA84c kloķvārpstas pamata kakliņā (1.3., 1.4., 1.5., 1.6., 1.7. un 1.8. att.) [33].

Kuģa dīkstāve ilga vairāk nekā sešus mēnešus, remonta izmaksas (nomainot tikai defektēto koķvārpstas pusi) – EUR 4,5 milj. Ekspertīze parādīja, ka plaisas iemesls ir nepilnības izgatavošanā, t.i., rieva kloķvārpstas kakliņā tikusi izfrēzēta bez dokumentācijā paredzētajiem noapaļojumiem. Jāmin, ka šo dzinēju pamata aprēķinos pienācīgi nav ņemta vērā ārējo spēku ietekme, kuri caur korpusu un dzinēja pamatu ietekmē kloķvārpstu un tās gultņus [71].

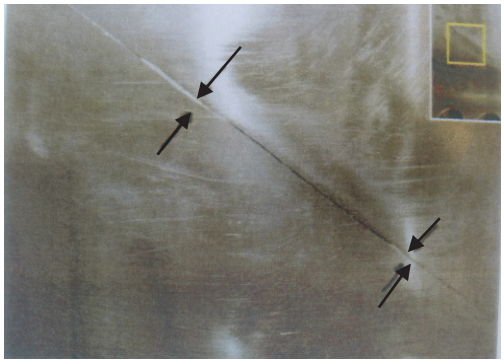
Līdzīga situācija pirms vairākiem gadiem tika novērota Latvijas Kuģniecības kuģim, kad mērījumi parādīja nenormālu kloķvārpstas deformāciju kuģa iekraušanas procesā.





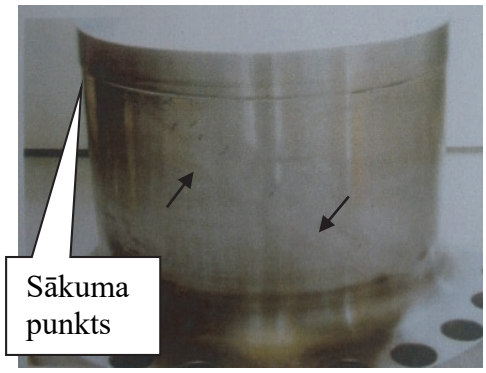
1.3. un 1.4. att. Plaisa kloķvārpstas pamata kakliņā

1.5. att. Jaunās kloķvārpstas iecelšana



1.6. att. Plaisa kakliņā

1.7. att. Plaisas sākuma punkts



1.8. att. Bojātais kloķvārpstas kakliņš

Jau iepriekš tika minēts, ka jūras flotē visvairāk tiek izmantoti vidēju apgriezienu dzinēji, un to defektu līmenis ir samērā augsts. Zemāk vairāki piemēri [71].

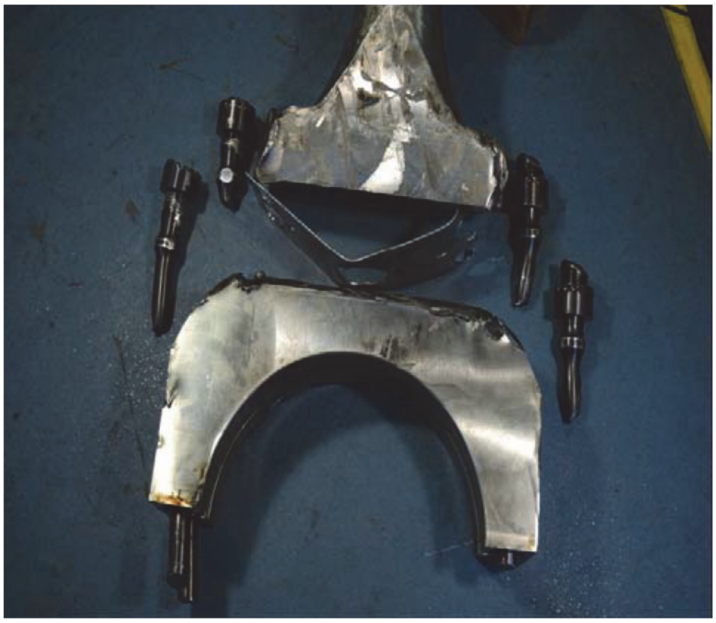
Lloyd reģistrā Tehniskās izmeklēšanas inženieri analizē dažādas nepilnības un negadījumus gan jūrā, gan uz sauszemes. Ir uzkrāta ievērojama pieredze, izmeklējot problēmas vai nepilnības, kas saistītas ar kuģa dzenskrūvēm, gultņiem, vārpstu sistēmām, transmisijām, katliem, turbīnām, dīzeļdzinējiem, korpusa struktūru, vibrāciju u.c. Šeit aprakstītie gadījumi ietver dzinēju mehānisku pārslodzi, noguruma lūzumus, plaisu rašanos no berzes, gultņu un ekspluatācijas problēmas.

3. piemērs. Kuģa galvenais dzinējs - klaņa apakšējās galvas bojājums

Zemāk aprakstītais gadījums parāda atšķirību starp to, ko atklāja negadījuma izmeklēšana un to, kas tika uzrādīts dokumentācijā par remontdarbu veikšanu.

Negadījums notika ar galveno kuģa dzinēju (astoņi cilindri, rindas izvietojums), maksimālā jauda 5280 kW ar 510 apgriezieniem minūtē. Galvenais dzinējs pēc iepriekšējā remonta bija nosrādājis aptuveni 12 000 darba stundas, bet kopā nostrādato stundu skaits ir krietni lielāks. Dzinējs bija darbojies astoņas minūtes, kad vispirms bija dzirdamas vārstiem neraksturīgas skaņas, tam sekoja milzīgs skaļš troksnis. Dzinējs nekavējoties tika apstādināts. Cilindra Nr. 8 klanis un cilindru čaula bija katastrofāli bojātas (1.9. att.).

Bojājumi bija iespējami, jo pastāvēja neatbilstība starp veikto izmeklēšanu uz kuģa, laboratorijas rezultātiem un kapitālremonta ziņojumiem, kuros norādīts, ka klaņu skrūvēm tika veikti stiepes mērījumi. Negadījums varēja tikt novērsts, ja, pirms motora kartera lūku aizvēršanas, būtu veikta galīgā vizuālā apskate un konstatēts sktūvju izliekums.



1.9. att. Klaņa un tā apakšējās galvas bojājums

4. piemērs. Kuģa galvenais dzinējs - klaņa gultņa bojājums

Nākošais gadījums rosina uz pārdomām, vai dīzeļdzinējiem ir neierobežots kalpošanas laiks? Atbilde ir, iespējams, jā, ar nosacījumu, ka sastāvdaļas tiek uzturētas atbilstoši dzinēja izgatavotāja noteikumiem un detaļu saskares vietu iespējams kontrolēt.

Šis piemērs attiecas uz klaņa gultņu korpusu, kas bija izdilis lielāks par pieļaujamo. Pietauvošanās laikā viens no galvenajiem kuģa dzinējiem automātiski atslēdzās, jo sensori karterī konstatēja augstu eļļas tvaiku koncentrāciju. Tā kā nebija acīmredzamu iemeslu dzinēja apstādināšanai, tika nolemts, ka defekts ir eļļas tvaiku sensorā, un pēc sensora nomaiņas dzinējs tika atkal iedarbināts. Kartera eļļas miglas signalizācija atkal tika aktivizēta, un dzinējs apturēts. Karteris tika atvērts pārbaudei. Tajā atklāja, ka trešā cilindra klaņa apakšējā gultņa ieliktnis bija pārkarsēts, deformēts un rotēja korpusā kopā ar kloķvārpstu (1.10. att.).

Visi klaņa gultņi tika pārbaudīti un klaņa skrūvju urbumiem tika pārbaudīts to apaļums. Inspekcija atklāja, ka paredzētā riņķa ģeometrija urbumiem ir izjaukta, un urbumi kļuvuši elipsveida. Gan gultņa ieliktņu, gan gultņa korpusa iekšējais diametrs bija ārpus pieļaujamās robežas.

Ieliktņa pieļaujamie izmēri bija pārsniegti par 0,01-0,16 mm no pieļaujamās novirzes. Bojātais kloķvārpstas klaņa kakliņa izmērs bija zemāks par instrukcijā noteikto minimālo diametru, un kloķvārpsta tika nomainīta.

1.10. att. Pārkarsētais klaņa gultņa ieliktnis

5. piemērs. Kuģa palīgdzinējs - klaņa skrūvju bojājums

Šī dzinēja daļa bija nostrādājusi daudzas darba stundas, un defekts atklājās neparastā vietā. Spriedzes stresa / plaisas rašanās vieta bija grūti nosakāma, jo bojātās detaļas strādā pārī (klaņa skrūve ieskrūvēta klaņa apakšējā galvā (1.11 att.)).

Dzinējs ir četrtaktu, astoņu cilindru, ar rindas izvietojumu un turbokompresoru. Nominālā izejas jauda 1589 kW ar 1000 apgriezieniem minūtē. Klaņa konstrukcija redzama zemāk esošajā 1.11. attēlā. Klaņa apakšējā gultņa savienojumu nodrošina divas hidrauliski pievilktas skrūves.

Negadījuma laikā kuģis atradās jūrā, un motors strādāja ar slodzi ~ 800 kW. Dzinējs tika apstādināts manuāli no sadales skapja. Tika konstatēts, ka klanis Nr. 4 ir atdalījies visā kāta pamatnes garumā netālu no klaņa apakšējās galvas. Kopš pēdējā remonta (*overhaul*), dzinējs bija nostrādājis aptuveni 1800 stundas, tomēr tas neietvēra apakšējo klaņa gultņu un skrūvju nomaiņu. Klaņi dzinējam bija nomainīti pirms 23 500 stundām.

Izmeklēšanā tika lūgts palīdzēt un veikt metalurģijas pārbaudi *Lloyd* reģistrā, Materiālu un *NDE* (*Non Destructive Examination*) laboratorijā. Materiālu pārbaudēs apstiprinājās, ka klaņa materiāls ir 34CrNiMo6, mazleģēts tērauds, kas atbilst un ir apstrādāts saskaņā ar dzinēja izgatavotāja specifikāciju un nosacījumiem. Tika noteikts bojājuma veids - materiāla nogurums, uz to norādīja lūzuma virsma. Lūzums bija sadalījies no viena galvenā sākumpunkta un trīs blakus sekundārām iniciācijas vietām (skat. 1.11. att.).

Detalizētākā pārbaudē atklājās, ka cēlonis defektam meklējams neprecizitātē skrūves vītnes izveidošanas laikā. Šis defekts varētu būt devis papildu slodzi un palielinājis lokālo spriedzi detaļā, kas tā jau bija ļoti nospriegota. Palielinātais spriegums varētu būt sniedzis pirmo impulsu plaisas veidošanās vietai, no kuras tā izpletās tālāk.

1.11. att. Noguruma plaisu radītais bojājums

6. piemērs. Kuģa palīgdzinējs - kloķvārpstas atsvaru bojājumi

Dzinējs ir astoņu cilindru (rindas izvietojums), četrtaktu dīzeļdzinējs ar nominālo jaudu 2830 kW un 720 apgriezieniem minūtē. Laikā, kad notika negadījums, dzinējs bija nostrādājis vairāk nekā 90 000 darba stundas.

Kuģis bija tikko atstājis ostu, kad palīgdzinēja ģenerators pēkšņi apstājās, jo astotā cilindra kloķvārpstas vaiga atsvars bija atdalījies un, salaužot karteri, izmests mašīntelpā (1.12. att.). Par laimi, darbinieki mašīntelpā tuvumā nebija.

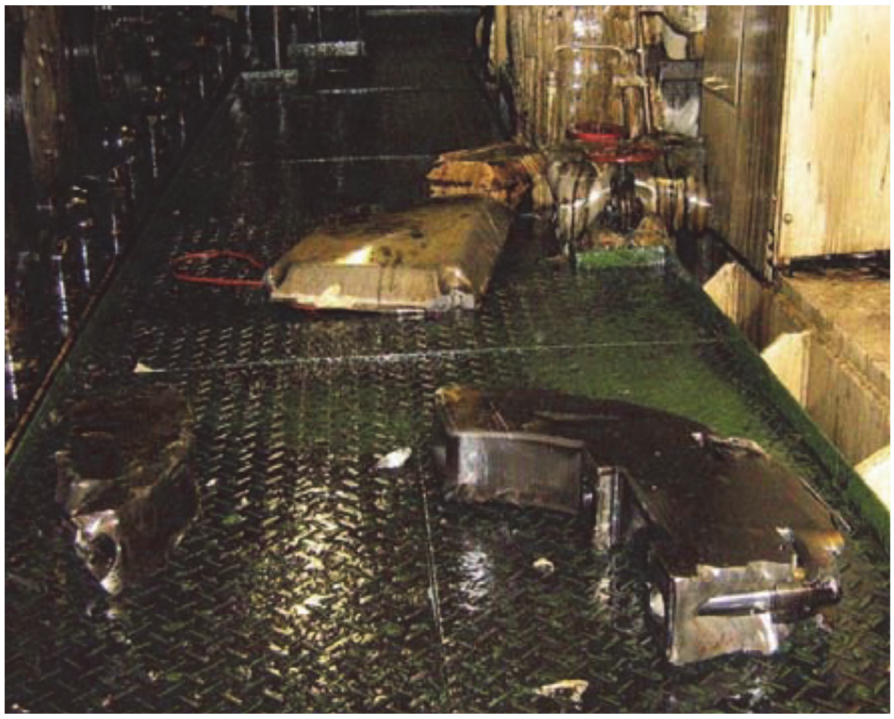
Sakotnējā izmeklēšana parādīja, ka plaisa cēlusies no vienas vai vairākām mikroplaisām, kas radušās termiskās apstrādes un tās radītā stresa dēļ atsvaru izgatavošanas procesā.

Detalizētāka izmeklēšana *Lloyd* reģistra materiālu laboratorijā parādīja, ka plaisas sākšanās zonā ir novērojama eļļa, tas liecina, ka plaisa jau kādu laiku bijusi. Bija neizprotams, kādēļ tas varēja notikt, īpaši tādēļ, ja dzinējs bija strādājis krietni vairāk nekā 40 000 stundas, un pēc motora izgatavotāja teiktā servisa vēstulē, strādājot vairāk nekā 40 000 stundu, lieli defekti nav iespējami, jo dzinēja detaļas jau labi pielāgojušās viena otrai.

Atbilde, kāpēc atsvaru defekts parādījās pēc tik ilga ekspluatācijas laika, tika iegūta pēc turpmākas diskusijas ar kuģa personālu, kā arī pārbaudot mašīntelpas žurnālus. Dzinējam jau pirms diviem mēnešiem (400 ekspluatācijas stundām) bija novēroti defekti: bojāts cilindra vārsts jūtami deformēja virzuli un cilindra galvu, ļaujot ūdenim un eļļai ieplūst karterī, kas izraisīja dzinēja strauju apstāšanos, nostrādājot dzinēja aizsardzības sensoriem. Tajā pašā laikā straujās apstāšanās izraisītais šoks (un arī temperatūras svārstības) deva impulsu esošajam plaisas aizmetnim, pēc kura tālāka plaisas attīstība bija tikai laika jautājums.

Dzinēja periodiskās pārbaudes procedūras tika veiktas saskaņā ar dzinēja izgatavotāja ieteikumiem. To pamatā bija plaisas rašanās iespējamība sānos esošajiem balansēšanas

atsvariem, kur defekti varētu būt redzami, izmantojot spoguli. Plaisas izcelsme, šajā gadījumā, bija balansa atsvara vidusdaļas apakšā un nevarēja būt atklājama ar šādu metodi, īpaši neapstrādātai virsmai.



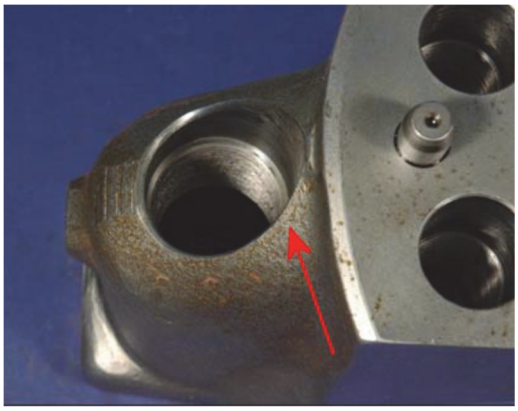
1.12. att. Atrautie kloķvārpstas atsvari

7. piemērs. Kuģa palīgdzinēji - klaņa bojājumi

Trīs atsevišķi, bet līdzīgi negadījumi ar tā paša tipa motoru notika īsā laikā trīs jaunbūvētiem dzinējiem. Dzinēji ir astoņu cilindru (ar rindas izvietojumu) un būvēti saskaņā ar licenci. Dzinēju maksimālā jauda 3500 kW un 720 apgriezieni minūtē. Kopīgais visiem bojājumiem bija defekti klanī. Nostrādāto darba stundu skaits līdz negadījumam attiecīgi ~ 300, 1600 un 1800.

Konstruktīvi mezgls veidots kā klaņa pēda, kas ar skrūvēm piestiprināta klaņa gultņa korpusam (klaņa apakšējā galva). Korpuss savukārt veidots tradicionāli - abas puses savilktas kopā ar klaņa skrūvēm. Visiem trim bojātajiem klaņu komplektiem bija viens un tas pats ražotājs. Tehniskajā pārbaudē tika inspicētas gan bojātās detaļas no visiem kuģiem, gan izgatavotājrūpnīcas darbs. Defekta iemesls bija atrodams klaņa skrūvju urbumu nekvalitatīvā izgatavošanā (1.13., 1.14. att.). Rūpīga pārbaude atklāja arī citus trūkumus un šaubas par detaļu kvalitāti. Tie bija: slikta virsmas apstrāde, detaļas izmēru neievērošana (virsmas trūkumus), pārmērīga slīpēšana, nekvalitatīva vītņu apstrāde u.c.

Izmeklēšanas laikā tika secināts, ka izgatavotājs bija jāizslēdz no klasifikācijas sabiedrību apstiprināto piegādātāju saraksta.



1.13. att. Plaisas klaņa skrūvju rajonā

1.14. att. Plaisas klaņa skrūvju rajonā

8. piemērs. Kuģa galvenais dzinējs - kloķvārpstas bojājums

Pasažieru kuģim ar dīzeļelektrisko spēka iekārtu, kura ģeneratorus darbina deviņu cilindru rindas četrtaktu dīzeļa motori ar nominālo jaudu – 6055 kW un 514 apgriezieniem minūtē, vienam no dzinējiem tika atklāts kloķvārpstas defekts aptuveni pēc 50 000 ekspluatācijas stundām.

Kuģis veica transatlantisko pārbraucienu, un dzinējs bija pieļaujami noslogots, kad, nostrādājot kartera eļļas miglas sensoram, kas norādīja uz augstu kartera eļļas miglas koncentrāciju, dzinējs tika apstādināts. Pirmā izmeklēšana, ko veica kuģa inženieri, parādīja, ka kloķvārpsta ir stipri bojāta. *Lloyd* Tehniskās izmeklēšanas speciālisti apmeklēja kuģi nākamajā ostā.

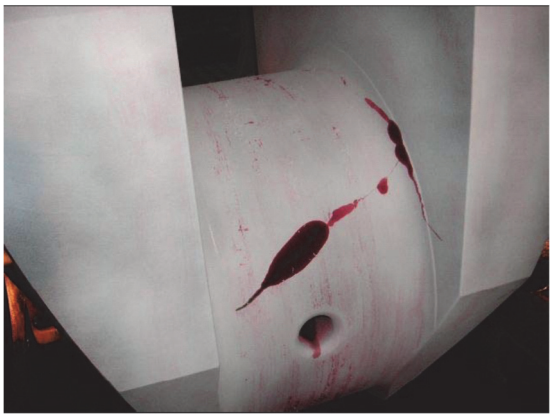
Kloķvārpstai tika pārbaudīts septītā klaņa kakliņš, un tika konstatēta viena sazarota plaisa uz tā virsmas (1.15. att.). Plaisa stiepās no septītā cilindra kloķvārpstas priekšgala vaiga apmēram 45° leņķī pāri klaņa kakliņam. Plaisa 45° leņķī pret asi uzreiz norādīja uz griezes (*torsional*) vibrācijas problēmas iespējamību. Tomēr tālākā izmeklēšana šo versiju neapstiprināja.

Divi faktori, kas būtu varējuši ietekmēt vērpes īpašības, bija gumijas elementu lokanais savienojums, kas uzstādīts starp dzinēju un ģeneratoru, un atsperu tipa vibrāciju dzēsēju (*torsional dapper*), kas atrodas pie brīvā kloķvārpstas gala. Tomēr tā elementi tika nomainīti pirms aptuveni 2500 darba stundām. Izmeklēšanas laikā detaļas tika atvērtas apskatei un konstatēts, ka tās ir labā stāvoklī. Tās bija darba kārtībā un pareizi ekspluatētas, neskatoties, ka dažas nebūtiskas novirzes no normas bija atrodamas, galvenokārt saistītas ar gumijas īpašību maiņām laika gaitā.

Kloķvārpstas bojātā daļa tika uzmanīgi izgriezta, lai nesabojātu lūzuma vietas. Detaļas daļa ar plaisu tika nosūtīta *Lloyd* reģistra materiālu laboratorijai un pārbaudīta. Tika konstatēts, ka plaisai ir divi galvenie pirmsākumi, ko izraisījusi gultņa korpusa berze gar rādiusu, kas

veidojas kloķvārpstas vaiga un kakliņa savienojuma vietā (1.16. att.). Berzes rezultātā radušās plaisas nav nekas neparasts. Konkrētā vieta pati par sevi ir ļoti noslogota, izmeklēšanā tika uzsvērts, ka plaisas rašanās galvenais iemesls ir berze, un plaisas attīstību stimulējusi vibrācija.

1.15. att. Plaisas sākums

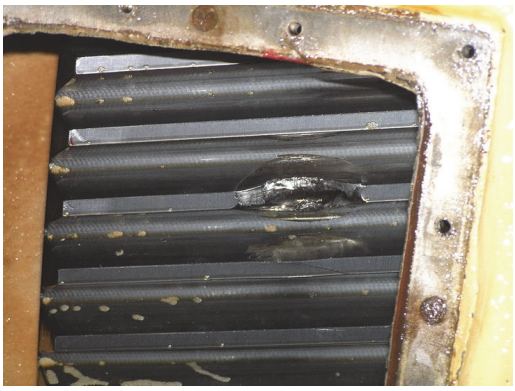


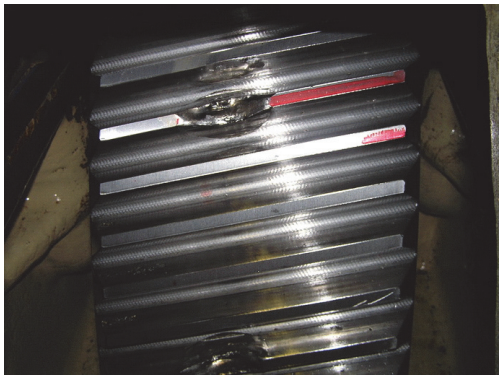
1.16. att. Plaisa kloķvārpstas kakliņā

9. piemērs. Kuģa galvanā dzinēja reduktora bojājums

„Atlantic 488" tipa zvejas kuģim (divi galvenie dzinēji ar reduktora palīdzību strādā uz vienu dzenskrūvi) reduktora bojājums tika atklāts, kad jau bija dzirdams nenormāls troksnis un redzama eļļas noplūde gar reduktora blīvslēgiem (1.17. un 1.18. att.). Tāpat kā iepriekšējā gadījumā, defekta konstatācija bija daudz par vēlu, lai novērstu vai vismaz samazinātu bojājuma apjomu. Izmeklēšana parādīja, ka defekta cēlonis meklējams nepareizā centrēšanā, kas izsauca zobratu zobu izlūšanu.

Remonts aizņēma aptuveni trīs mēnešus, un tiešās remonta izmaksas sasniedza EUR 350 000, papildu izmaksas un dīkstāve īpašniekiem radīja zaudējumus aptuveni EUR 1 miljona apmērā.





1.17. un 1.18. att. Dzinēja reduktora bojātie zobrati

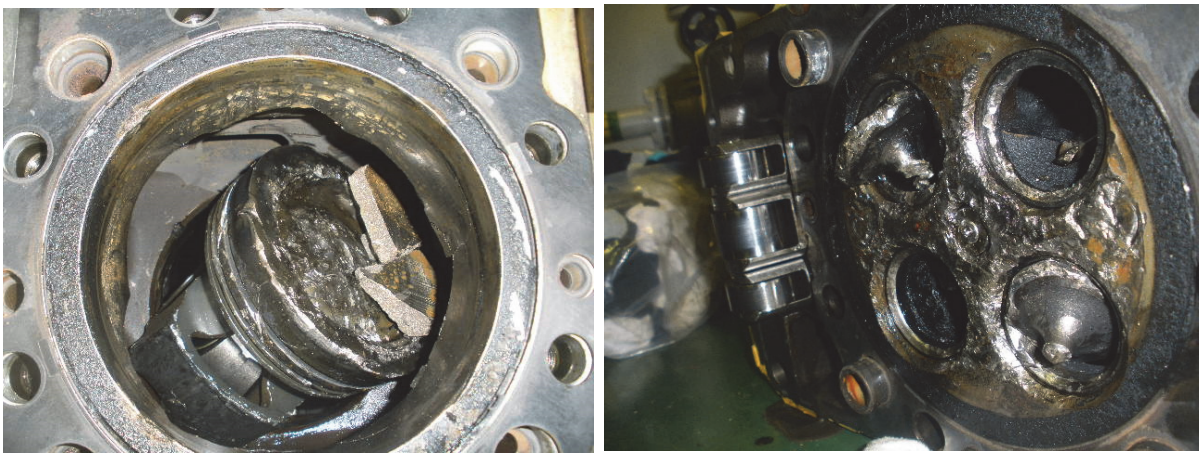
10. piemērs. Kuģa palīgdzinēja avarija

Drīz pēc ieiešanas ostā un galvenā dzinēja apstādināšanas 2014. gada martā Konteinerkuģa mašīntelpā, kas būvēts 2006. gadā, nostrādāja dūmu sensors, (kā vēlāk izrādās, eļļas miglas dēļ) un pēc brīža automātika apstādināja palīgdzinēju Nr. 2. Atklājās, ka pārrauts

palīgdzinēja cilindra Nr. 6 klanis un sadauzīts karteris [33]. Inspekcija atklāja arī pārrautu cilindra čaulu un pilnīgi deformētu virzuli, ieplūdes / izplūdes vārstus (1.19.un 1.20. att.), kā arī bojātu turbokompresoru. Dzinēja atmiņas bloka pārbaude pirms avārijas neuzrādīja nekādas novirzes, tāpat automātiskajā trauksmju reģistrā netika konstatēts neviens avārijas signāls.

Bojātā dzinēja dati: astoņu cilindru, ar V-veida izkārtojumu. Nominālā jauda 856 kW un 1500 apgriezieni minūtē. Kopējais nostrādāto stundu skaits - 15 211.

Tika pieņemts lēmums dzinēju utilizēt un uzstādīt jaunu. Izmaksas - aptuveni EUR 300 000, neietverot demontāžu/uzstādīšanu.



1.19. un 1.20. att. Dzinēja cilindra bojājumi

11. piemērs. Kuģa palīgdzinēja avārija

2014. gada maijā dzinēja avārija notika uz naftas platformu apkalpošanas kuģa. Dzinējs MaK M282, 12 cilindri, ar V-veida izvietojumu, jaudu 2400 kW un 1000 apgriezieniem minūtē.

No kloķvārpstas tika atrauts klanis un, salaužot dzinēja bloku, izsviests mašīntelpā. Automātiskie parametru ierakstītāji un avārijas situāciju brīdinājumu sistēma neuzrādīja nekādas novirzes no noteiktajiem darba parametriem līdz pat pašam avārijas brīdim. Avārijas cēloņa noskaidrošana turpinās.

Kad tiek runāts par mehānisma stāvokļa diagnostiku, ar to tiek saprasta tā uzraudzība, lai mehānisms spētu ilgstoši pildīt noteiktās funkcijas atbilstošā veidā [121]. Kuģu dzinēju tehniskā stāvokļa diagnostiku var iedalīt divās lielās grupās:

1. Pēc tiešajiem mērījumiem (temperatūras, spiediena, eļļas miglas koncentrācijas karterī utt.).
2. Pēc mērījumiem un atklājumiem dzinēju revīziju laikā, kuru periodiskumu nosaka klasifikācijas sabiedrība kopā ar izgatavotājrūpnīcu [69].

Mūsdienās kuģu dzinēju tehniskā stāvokļa noteikšana tiek veikta galvenokārt pēc divām metodēm: preventīvās metodes un pēc tehniskā stāvokļa (1.21. att.).

Neskatoties uz to, pēc kādas apkalpošanas metodes dzinējs tiek uzturēts, visi mūsdienu kuģu dzinēji ir aprīkoti ar centralizēto kontroles sistēmu - automātisku parametru reģistrāciju un analīzi. Tās darbības princips - galvenais dators pēc noteiktas kārtības katru sekundi automātiski pieslēdzas 1-10 sensoriem (to skaits var būt vairāki simti) un saņem no tiem informāciju, tomēr lēni notiekošos procesus, piemēram, visu veidu erozijas u.c., tie nespēj reģistrēt, bet defektu novēršanā tas ir ļoti svarīgi, tādēļ dzinējus pakļauj periodiskai pārbaudei (preventīvā apkalpošana) vai pielieto arī citas kontroles metodes (pēc tehniskā stāvokļa) [129].

1.2. Dzinēju detaļu periodiska kontrole

Preventīvās apkalpošanas laikā mehānismi un mezgli tiek atvērti apskatei un inspekcijai pēc noteikta laika perioda vai nostrādātu stundu skaita (pēc klasifikācijas sabiedrību un izgatavotāja instrukcijām), lai noteiktu, vai mehānisms un mezgls ir darba spējīgs turpmākam periodam. Kontrole tiek veikta, neņemot vērā mehānisma tehnisko stāvokli.

Preventīvās apkalpošanas pamatā var būt nostrādāto stundu skaits (maksimāli pieļaujamo stundu skaitu nosaka KS kopā ar ražotāju) vai kalendārais laiks, neskatoties uz darba stundām. Mūsdienās aptuveni 80 % kuģu strādā, izmantojot šādu metodi.

Pastāvot aizdomām par kādas detaļas neatbilstību prasībām, to pārbaudei inspekcijas laikā izmanto kādu no nesagraujšās kontroles metodēm *NDT (Non Destructive Testing)*, tas gan iespējams tikai remonta laikā. Literatūrā sastopami arī apzīmējumi: *NDE (Non Destructive Examination)* vai *NDI (Non Destructive Inspection*). Metodes, kuras pielieto kuģniecības nozarē, ietverot remontuzņēmumus, ir: ultraskaņas, magnētisko daļiņu, šķidruma iespiešanās (kapilārā), rentgenoskopijas un virpuļstrāvu metode [61, 88].

Ultraskaņas metode

Ļoti īsi ultraskaņas impulsi, parasti 0,1 - 15 MHz, reizēm līdz 50 MHz, tiek raidīti materiālā ar mērķi atklāt tādus defektus kā plaisas, svešķermeņu ieslēgumus u.c. To eksistence radīs kropļojumus uztvertās atbalss signālā.

Šo metodi pielieto:

1) Visplašāk kuģu korpusa biezuma mērīšanā.
2) Metinājuma šuvju kvalitātes noteikšanā.
3) Cauruļvadu pārbaudei (flotē samērā reti, izņemot ļoti atbildīgus gadījumus).
4) Gultņu pārbaudei.

Metodes galvenās priekšrocības**:**

1) Augsta iespiešanās spēja, kas var atklāt defektus materiāla dziļumā.

2) Augsta izšķiršanas spēja.

3) Augsta precizitāte.

4) Nekaitīga cilvēkiem un videi.

5) Portatīva un augsti automatizēta.

Metodes galvenie trūkumi:

1) Vajadzīgs kvalificēts operators.

2) Pielietojama attīrītām virsmām.

3) Grūti pielietot darbā ar rupjām virsmām un neviendabīgu materiālu.

4) Materiāla virsmai jābūt sausai.

Nesagraujošās kontroles magnētiskā metode

Šī metode kalpo virsmas defektu atklāšanai. Priekšmets tiek magnetizēts impulsveidīgi ar tiešo un apgriezto polaritāti. Virsmai jābūt tīrai un precīzi jāaprēķina impulsa stiprums. Defektu vizuālai atklāšanai vajadzīgs ultravioletais apgaismojums.

Feromagnētiskais testa paraugs tiek magnetizēts ar spēcīgu magnētisko lauku, ko rada magnēts vai speciāls aprīkojums. Ja paraugā ir kads pārrāvums (plaisa, svešķermenis), pārtraukums ir arī magnētiskajā laukā, kas plūst cauri paraugam, un šīs novirzes tiek fiksētas: smalki samaltu dzelzs daļiņu veidā, kas pārklātas ar krāsu pigmentu tiek uzklātas testa paraugam. Šīs daļiņas tiek piesaistītas defekta zonās un veido norādes tieši virs pārrāvuma / defekta. Šo norādi var vizuāli atklāt atbilstošos apgaismojuma apstākļos, visbiežāk pielieto ultravioleto apgaismojumu.

Metodes galvenās priekšrocības:

1) Var viegli pārbaudīt neregulāras formas detaļas.

2) Virsmas priekšapstrādei nav augstu prasību.

3) Ātra pārbaudes metode, un norādes ir redzamas tieši uz parauga virsmas.

4) Salīdzinājumā ar daudzām citām *NDT* metodēm – zemas izmaksas.

6) Var būt viegli pārnēsājama mērierīce.

Metodes galvenie trūkumi:

1) Var noteikt tikai virsmas defektus vai defektus tuvu virsmai.

2) Pielietojama tikai magnētiskos materiālos.

Nesagraujošās kontroles kapilārā metode

Šķidruma iespiešanās metode zināma arī kā *LPI* (*Liquid Penetrant Inspection*) vai *PT* (*Penetrant Testing*). Plaši izmantojama un zemu izmaksu metode. Lietojama visiem

materiāliem, izņemot porainus. Parāda virsmas defektus: plaisas, lūzumus u.c. Tās pamatā ir zemas viskozitātes šķidruma iespiešanās plaisās. Pārbaudāmo virsmu apstrādā ar diviem šķidrumiem: vispirms ar iespiešanās (parasti krāsains), tad ar fiksējošo.

Rentgenoskopijas metode (*Radiographic Testing - RT)* - paredzēta slēptu defektu atklāšanai materiāla iekšienē. Starojuma avots ir kāds radioaktīvs materiāls. Atkarībā no iekārtas starošanai tiek izmantoti fotoni vai neitroni.

Metodes galvenā priekšrocība:

1) Piemērojama visu veidu materiāliem.

Metodes galvenie trūkumi:

1) Ietekme uz vidi un cilvēkiem.
2) Radioaktīvā materiāla uzglabāšana un utilizācija.
3) Neitronu iekārtas trūkums: ūdens, eļļa, sintētiski materiāli bremzē neitronu plūsmu.
4) Grūti pamanīt plakanas plaisas un ieslēgumus, kas sakrīt ar starojuma virzienu.

Darbības princips - šī metode izmanto gamma vai X-starojuma daļu īpašību izspiesties cauri materiālam un atklāt iekšējos defektus, projecējot attēlu uz fotoplāksnes. Rentgenstaru iekārta vai radioaktīvais izotops tiek izmantots kā starojuma avots. Starojums tiek virzīts caur testējamo materiālu un uz filmas vai cita jūtīga materiāla tiek iegūts attēls. Rezultātā iegūtais attēls parāda materiāla iekšējo stabilitāti. Iespējamie defekti tiek atklāti kā blīvuma izmaiņas testa materiālā.

Virpuļstrāvu metode (*Eddy-Current Testing*)

Metodes princips - iekārtas ģenerētā elektromagnētiskā indukcija ietekmē pārbaudāmo materiālu, radot tajā elektromagnetisko lauku. Magnetiskais lauks savukārt rada virpuļstrāvas. Ja materiālā ir defekti, pieaug pretestība virpuļstrāvai, un parādās kropļojumi laukā. Šīs izmaiņas tiek elektroniski analizētas un mēraparātā parādās informacija, kas norāda uz defekta esamību.

Metodes galvenās priekšrocības:

1) Iekārta ir portatīva, tūlītēja reakcija, nav vajadzīgs tiešs kontakts, pārbaudi var veikt neattīrītām virsmām (no krāsas, rūsas utt.).
2) Var atklāt ļoti mazas plaisas.

Metodes galvenie trūkumi:

1) Metode pielietojama tikai elektrību vadošiem materiāliem, tātad galvenokārt metāliem.
2) Tā atklāj tikai virsmas defektus un tos tuvu virsmai.
3) Krāsa, rūsa, netīrumi utt. ietekmē lasījuma kvalitāti.

4) Testējamā materiāla elektrovadītspēja nosaka pārbaudes dziļumu: jo vājāka vadītspēja, jo mazāks iespējamais pārbaudes dziļums.
5) Defekti, kas atrodas paralēli starojuma avotam, ir grūti pamanāmi.

1.3. Apkalpošana pēc tehniskā stāvokļa (*Condition Based Maintenance - CBM*)

Šī metode ir samērā jauna - tā tiek izmantota aptuveni 10 gadus. Tā var tikt ieviesta ar klasifikācijas sabiedrības apstiprinājumu katram atsevišķam kuģim, kas izpildījis un atbilst noteiktām tās prasībām. Šajā gadījumā vajadzību pēc inspekcijas nosaka mezgla/sistēmas faktiskais tehniskais stāvoklis, kas tiek kontrolēts ar vairākām metodēm. Kontrolējamā ietaise tiek atvērta inspekcijai, kad tiek sasniegta minimāli noteiktā robeža, novērojamas kādas anomālības vai parādās defekts, ja redzama atšķirība rādījumos un izgatavotāja noteiktajos parametros. Šīs metodes pamatā ir objekta periodiskums vai nepartraukta kontrole ar mērķi noteikt tā tehnisko stāvokli bez ekspluatācijas pārtraukšanas.

***CBM* priekšrocības:**

a) ietaupa dzinēju uzturēšanas izmaksas (prasmīgas apkopju plānošanas dēļ);
b) ietaupa apsekojumu/inspekciju izmaksas (prasmīgas inspekciju plānošanas dēļ);
c) uzlabo kuģa ienesīgumu, saistītu 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 konkrētā 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.

Galvenās prasības *CBM* ieviešanai

Tehniskā stāvokļa monitoringa pamatā ir no mēramā sensoru iegūto datu apstrāde un analīze.

Lai sasniegtu stabilu un efektīvu *CBM* pielietojumu, nepieciešams definēt mērījumu veidus un atrašanās vietas, kurās šie mērījumi tiks veikti. Tādēļ būtiski zināt sensoru precizitāti un citas detaļas, kas var garantēt augstāku ticamību un atbilstošu izrietošo datu kvalitāti, ko nosaka klasifikācijas sabiedrības.

Prasības datu glabāšanai un apstrādei

Kā norādīts iepriekš, sākuma dati tiek apkopoti no dažādām kuģu sensoru sistēmām, līdz ar to rodas liels datu krājums, kas var būt iespaidīgs pat par vienu kuģi.

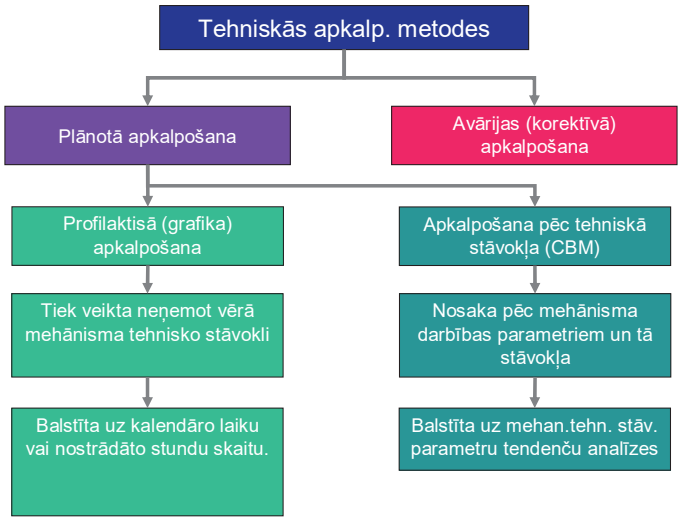
Krasta datu infrastruktūrā ir jābūt sistēmai, kas var apvienot atšķirīgus datu avotus, kā arī apstrādāt gan reālā laikā, gan izmantot datu vēsturi visā kuģa dzīves ciklā. Turklāt sistēmai ir jāatbilst metodes datu privātuma aizsardzībai un piekļuves kontrolei no konkurējošo uzņēmumu un citu ieinteresēto personu puses.

Mūsdienu diagnosticēšanas sistēmu pamatā ir mērāmo parametru mazo noviržu analīze. Tiek salīdzināti dati, kas saņemti mērījuma brīdī ar etalondatiem, kas iegūti jauna dzinēja testēšanas laikā. Sistēma diagnosticē situācijas, kad defekts vēl nav parādījies, bet mērījumi rāda, ka dzinējs nestrādā ar optimāliem parametriem, un tuvojas kritiska situācija [128].

Pēdējos gados ir vērojama attīstība dīzeļdzinēju tehniskā stāvokļa diagnostikas tehnoloģijā. Dīzeļdzinēju ražotāji ir izstrādājuši dzinēju diagnostikas metodes, lai uzlabotu dīzeļdzinēja darba rādītājus. Tipiska monitoringa sistēma (*Condition Monitoring System - CMS*) ir mikroprocesora ierīce ar analīzes programmatūru, lai uzraudzītu degšanas procesu dzinējā, ieplūdes / izplūdes vārstu darbību, virzuļa kustību un nodilumu cilindra - virzuļa grupai [58]. Mērīšanā izmanto sensorus, kas sniedz informāciju laika un frekvenču domēnā. Šo informāciju izmanto, lai noteiktu pastāvošās vai iespējamās problēmas un tālāk varētu salīdzināt novirzes ar normālu dzinēja stāvokli [7, 9, 15, 20, 36, 37, 46, 47, 59, 64].

Tipiskas *CMS* saskaras ar datu vākšanu un datu interpretāciju no vairākiem avotiem, piemēram, apkopes vēstures, vibrācijas analīzes, spektra analīzes, ekspluatācijas, pārbaužu datiem utt.

Jāpiebilst, ka *CBM* ieviesējiem jāsaprot, ka tas ir daudznozaru pasākums, kas ietver vairāk kā tikai datu un signālu analīzi. Tas visciešākā veidā saistīts ar ekonomisko, sociālo, un, protams, plašāku spektru tehniskajām zinātnēm.



1.21. att. Mūsdienu tehniskās apkalpošanas metodes

Mūsdienās kuģu tehniskajā uzraudzībā izmantojamās metodes un aparatūru reglamentē starptautiski standarti (ISO 22096 - *Condition Monitoring and Diagnostics of Machines*, ISO 18436 - *Condition Monitoring and Diagnostics of Machines – Requirements for Qualification and Assessment of Personnel*). Tie galvenokārt attiecas uz šādiem monitoringa veidiem: infrasarkano termogrāfiju, vibrāciju analīzi, AE u.c.

Mūsdienu modernie lieljaudas kuģu dzinēji tiek uzraudzīti ar vairākiem simtiem sensoru, kas automatiski reģistrē datus un no kuģa galvenā datora caur satelītu nosūta informaciju analīzei krasta tehniskajiem dienestiem. Pēc temperatūras izmaiņām eļļošanas sistēmās var spriest par kloķvārpstas un sadales vārpstu gultņu stāvokli, dzesējošā ūdens temperatūras izmaiņas var liecināt par plaisām cilindru čaulās un cilindra gāzu nokļūšanu dzesēšanas sistēmā, izmaiņas eļļas miglas konentrācijā (pieaugums) var norādīt uz paaugstinātu berzi kloķvārpstas gultņos, tātad iespējamu defektu. Līdzīgi ir ar spiedienu un temperatūru izmaiņām degšanas kamerā. Pēc to lieluma un dabas var izdarīt secinājumus par noteiktu defektu iespējamību. Tomēr šiem mērījumiem ir būtisks trūkums: tie fiksē jau tādas izmaiņas, kas liecina par defekta rašanos. Bieži jau ir par vēlu, lai novērstu avāriju, tādēļ praksē tiek piedāvātas metodes, ar kurām var sekot detaļas / mezgla tehniskajam stāvoklim reālajā laikā un noteikt tendences. Šī ideja ir *CBM* metodes pamatā. Pašlaik eksistē divas galvenās metodes, kuras tiek pielietotas dzinēju nepārtrauktai vai periodiskai diagnostikai (ja kuģis iekļauts klasifikācijas sabiedrību sarakstā, kas strādā pēc *CBM* metodes, tad mērījumu periodiskuma robežas nosaka klasifikācijas sabiedrības).

Vibrācijas monitorings (vibrodiagnostika)

Šis diagnostikas veids pēc savas būtības ir vistuvākais AE diagnosticēšanai, tikai izmantojamais frekvenču diapazons ir zemāks, parasti – 10-2000 Hz, (skat. 1.24. att.). AE izmantojamā frekvenču josla ir vidēji ap 20 - 2000 kHz.

Jāuzsver, ka šķidruma (gāzes) plūsmas defekti rada viļņus 30-180 kHz robežās, savukārt plaisas 400-600 kHz robežās.

Jebkuras diagnosticēšanas, arī vibrodiagnostikas mērķis ir sniegt informāciju par iekārtas ekspluatāciju un tās tehnisko stāvokli, lai nodrošinātu apkopes plānošanu un pārvaldību. Neatņemama un galvenā šī procesa daļa ir vibrāciju pakāpes novērtēšana un tās attīstība ekspluatācijas laikā.

Vibrācijas monitorings ir viena no efektīvākajām mehānisma rotējošo detaļu kontroles metodēm. Vibrācijas diagnostika - vibrācijas signāls ietver informāciju par vibrācijas cēloni un, signalu analizējot, izmantojot dažādas metodes, defektu iespējams atklāt. Visplašāk šo metodi izmanto rotējošu mašīnu diagnostikai un monitoringam, jo aptver lielāko daļu iespējamos defektus. Piemēram, centrbēdzes sūkņa defektus, kas nosakāmi ar vibrodiagnostiku: bojāts darba rats, gultņi, blīvslēgi, nelīdzsvarotība, sūkņa dzinēja ass nesakritība.

Rotāciju mašīnu vibrācijas ir cieši saistīts 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 faktisko tehnisko stāvokli rotācijas mašīnām. Iespējamo kļūmju agrīna atklāšana ir būtisks priekšnoteikums stratēģiskās plānošanas pasākumiem. 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, un ir labi piemēroti, lai noteiktu vārpstas kustību un tās spēli.

Ātruma sensoros pielieto elektromagnētisko darbības principu. Galvenokārt tie tiek izmantoti portatīvām iekārtām.

Akselerometri izmanto pjezoelektrisko kristālu (kas pārveido skaņas viļņus elektriskajos impulsos un otrādi), kas ir piestiprināts pārbaudāmai detaļai, kura vibrē. Tā kā gan detaļa (mehānisms), gan kristāls vibrē, rodas zema sprieguma strāvas, kas caur priekšpastiprinātāju tiek nosūtīts uz reģistrācijas iekārtu. Akselerometri ir efektīvi, lai atklātu augstās frekvences,

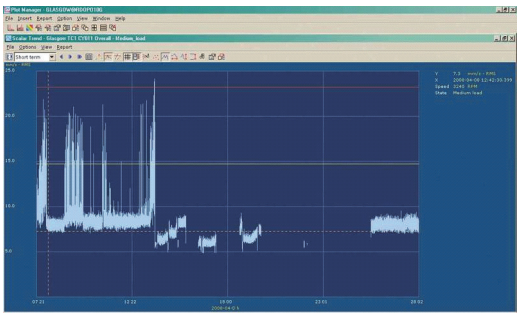
ko rada ātrgaitas turbīnu lāpstiņas, zobratu un lodīšu/rullīšu gultņi, kas pārvietojas ar daudz lielāku ātrumu nekā vārpstas, uz kurām tie ir uzmontēti.

Vibrāciju diagnostika detalizētāk ir aprakstīta ISO 13373-1: *mašīnu stāvoklis uzraudzība un diagnostika – Vibrāciju monitorings - 1. daļa: Vispārīgas procedūras un ISO 13373-2: mašīnu stāvoklis uzraudzība un diagnostika - Vibrāciju monitorings - 2. daļa: vibrācijas datu apstrāde un analīze.*

Vibrodiagnostikas aparatūra var būt dažāda: no vienkāršas, kas mēra kopējo vibrāciju, līdz daudzkanālu iekārtām, kas aprīkotas ar daudz funkcijām un atvieglo ne tikai mērījumu veikšanu, bet arī datu apstrādi.

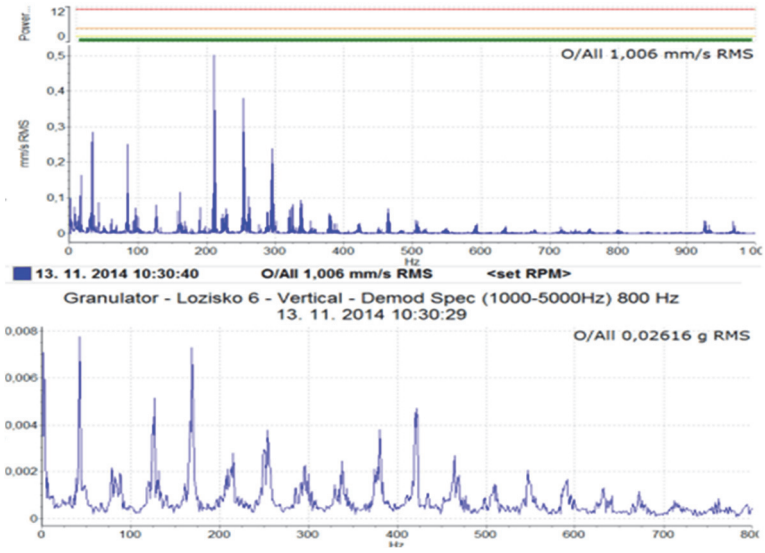
Mēriekārta var būt gan stacionāra, gan portatīva (1.22., 1.23. att.) gan to apvienojums.

1.22. att. Daudzkanālu portatīva iekārta



1.23. att. Attēls displejā

Vibrodiagnostikas iekārta darbojas pēc šādas shēmas: analogais signāls no sensora plūst caur ieejas pastiprinātāju, signālu filtru un analogo/ciparu parveidotāju, kur signāls iegūst ciparu formu un nonāk datu krātuvē, no kurienes signāls var tikt attēlots displejā kā viļņforma vai tālāk apstrādāts līdz iegūst frekvenču spektru.



1.24. att. Vibrodiagnostikas viļņu forma un viļņu spektrs

Cēloņi troksnim un vibrācijai ir kopēji, galvenie vibrācijas radītāji ir:

a) dinamiskie spēki, kas parādās masīvu detaļu nevienmērīgas kustības laikā;

b) atstarpe starp kustīgām daļām - ražošanas neprecizitātes;

c) berzes kontakts starp detaļām, saskares virsmu kvalitāte;

d) rotācijas kustības detaļu nelīdzsvarotība.

Kā jau norādīts, minēto iemeslu dēļ metodi plaši pielieto sūkņu u.c. rotējošu mehānismu tehniskā stāvokļa kontrolei.

Neskatoties uz to, ka šai metodei ir daudz kopīgu īpašību ar AE metodi (sensori viegli pielietojami un nosacīti lēti, signāli var tikt apstrādāti reālajā laikā un uz vietas, iekārta pielietojama kontrolējamam objektam strādājot), salīdzinājumā ar AE metodi vibrodiagnostikai piemīt virkne būtisku trūkumu:

a) kuģa apstākļos praktiski pielietojama tikai rotējošām detaļām;

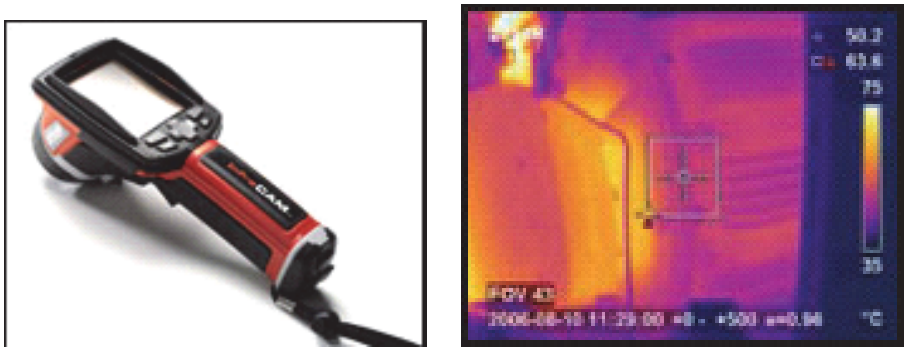
b) galvenokārt norāda uz vispārējo defektu bez konkrētas vietas noteikšanas;

c) defekts tiek reģistrēts samērā vēlu, kad tas jau tuvojas beigu stadijai (detaļas sabrukšana).

Termogrāfiskā diagnosticēšana

Tehniskajā literatūrā šim jēdzienam sastopami arī termini “siltuma attēlveidošana” vai “infrasarkanā attēla veidošana”.

Termogrāfiskās ierīces nosaka starojumu elektromagnētiskā spektra robežās (aptuveni 900–1 400 nanometri jeb 0,9–14 um) un dod šā starojuma attēlu. Starojuma apjoms, ko izstaro objekts, paaugstinoties temperatūrai, palielinās, tādēļ termogrāfija ļauj saskatīt temperatūras izmaiņas.



1.25. att. Siltuma starojuma uztvērējs un gultņa temperatūra

Ierīcei, uztverot infrasarkano starojumu, var konstatēt nevienādu/paaugstinātu detaļu sasilšanu, piemēram, mehānismu gultņiem (1.25. att.).

Lai arī augsāk apraksītās diagnostikas metodes ir progresīvas un visnotaļ noderīgas un izmantojamas dzinēja darba laikā, arī tām piemīt virkne trūkumu: **vibrodiagnostika** pielietojama galvenokārt rotējošām detaļām, ar to nenoteiks degvielas sprauslu darbības kvalitāti vai ieplūdes/izplūdes vārstu stāvokli. Tāpat problemātiski būs noteikt kloķvārpstas gultņu stāvokli, pirmkārt, jau grūtības ar sensoru uzstādīšanu dzinēja karterī, turklāt tam jādarbojas ekstremālos apstākļos: eļļas un tās tvaiku t° 70-80 °C. **Termogrāfiskā inspekcija** arī nedos vēlamo rezultātu augstāk minēto detaļu kontrolei, jo degvielas sprauslu stāvokli tāpat kā vārstu stāvokli ar šo metodi noteikt nevar. Tā kā mērījumi notiek no dzinēja ārpuses, un kļūda lasījumos var būt jūtama, izņemot gadījumu, kad jau sācis kust, piemēram, klaņa gultnis un kartera lūku temperatūra ievērojami paaugstinājusies izkususšā metāla ietekmē (tas, kloķvārpstai rotējot, tiek uzsviests uz kartera lūkas), maz ticams, ka iekārta uzrādīs izmaiņas kloķvarpstas gultņu stāvoklī, kad defekts ir tikai sākumstadijā.

Ņemot vērā augstāk minēto, var uzskatīt, ka AE metodes pielietošana dzinēja tehniskā stāvokļa diagnostikā būtu ļoti piemērota. Analizējot akustiskos signālus varētu spriest gan par sprauslu, ieplūdes/izplūdes vārstu, kloķvārpstas, cilindra virzuļa grupas u.c. detaļu tehnisko stāvokli. Īpaši svarīgi būtu noteikt defektu rašanos ieplūdes/izplūdes vārstos un kloķvārpstā, dzinēja dārgākajā detaļā.

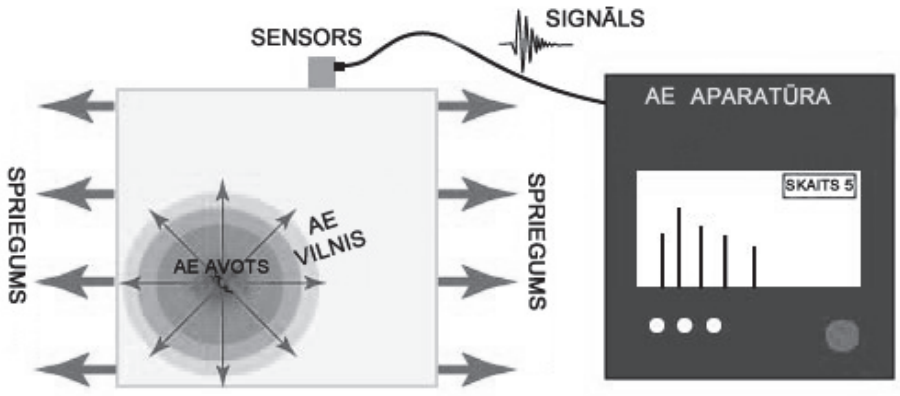
Metālu akustiskās kontroles metodes zināmas jau samērā sen [10]. Akustiskās emisijas metodē izmanto materiāla mehānisku viļņu izstarojumu, tam rodoties no materiāla iekšējās struktūras dinamiskām izmaiņām, kuras izraisa jebkura veida slodze. AE izraisītāji var būt plastiskās deformācijas, plaisu veidošanās 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 pieņemt, ka AE signālus materiālos izraisa procesi, kuros notiek spiediena, slodzes vai temperatūras izmaiņas.

Spriegums iedarbojas uz materiālu un rada lokālas plastiskās deformācijas. Šīs deformācijas materiālā rada AE: elastīgu vilni, kas ceļo prom no tā avota, kamēr tas nonāk līdz tālvadības sensoram. Uz to atbildot, sensors rada elektrisku signālu, kas tiek nodots elektroniskajam aprīkojumam turpmākai apstrādei. AE metodes pamatprincips parādīts 1.25. attēlā.

Metodes galvenās priekšrocības:

1) Ar augstu ticamības pakāpi ļauj konstatēt materiāla struktūras defektus un noguruma bojājumus grūti pieejamās vietās, kā arī noteikt defekta koordinātes.
2) Iespējama nepārtraukta diagnostika.
3) Iespēja sekot līdzi defekta attīstībai ekspluatācijas laikā.
4) Iespējams fiksēt defekta agrīno attīstības stadiju.
5) Iespējams klasificēt bojājumus pēc 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 metodē.
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.

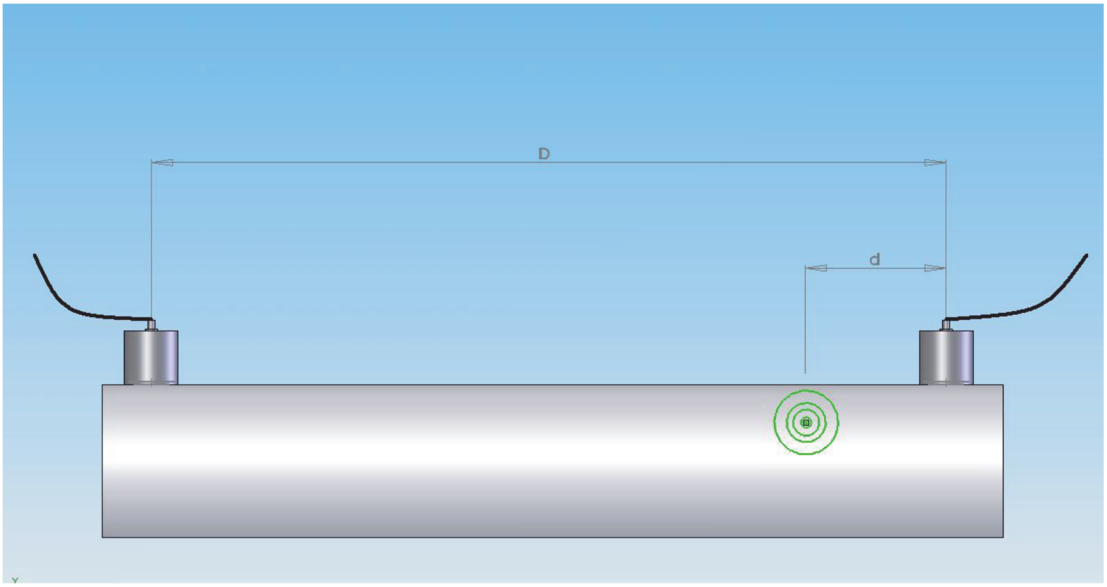
Šī metode, atšķirībā no citām *NDT* metodēm, ir pasīva, tā izmanto starojumu, ko rada pats defekts (1.26. att.).



1.26. att. AE metodes darbības princips

Dzinēja detaļas ir pakļautas dažādām slodzēm, kuru rezultātā var rasties materiāla noguruma plaisas un būtiski ir noteikt ne tikai defekta esamību, bet arī tā atrašanās vietu.

Principiālā defekta vietas noteikšanas shēma redzama attēlā 1.27.



1.27. att. Plaisas rašanās vietas noteikšana

(1.1)

$$d = \frac{1}{2}(D - \Delta T \times V)$$

d - attālums no pirmā sensora

D - attālums starp sensoriem

V - viļņu ātrums

Mūsdienās AE metodi kā *CBM* sastāvdaļu ievieš, lai kontrolētu dzinēju virzuļu un cilindru čaulu mijiedarbību, kā arī, lai kontrolētu degvielas iesmidzinātāja un vārstu darbību atkarībā no dzinēja slodzes. Šādi eksperementi tika uzsākti 2000. gada vidū [81].

Pēdējās desmitgades sākumā aizsākās koncepta maiņa no klasiskās signālu ieguves un apstrādes uz dārgāko modeli – *CMS* (*Condition Monitoring Systems*).

CBM ir daļa no vispārējās dzinēju plānotās apkopes sistēmas (*CMS)*, ko apstiprina klasifikācijas sabiedrība (*Llyod's Register*, *RINA*, *DNV* u.c.). Šo sistēmu klasifikācijas sabiedrības katram kuģim nosaka individuāli atkarībā no diagnosticēšanas iekārtu tipa, precizitātes, kontrolējamo parametru daudzuma utt. Shēma nosaka arī obligāti kontrolējamos parametrus, piemēram, degšanas spiedienu cilindros, izplūdes gāzu temperatūru, ieplūdes gaisa spiedienu u.c.

Šodien AE tehnoloģijas ir labi pazīstamas jūrniecības industrijā, bet tās galvenokārt izmanto korpusa biezuma mērīšanā vai vibrācijas kontrolē [10]. Tomēr tās nesniedz pilnu ainu

par mehānisma stāvokli, vairāk fiksē nodiluma pakāpi. Turklāt iegūto datu apstrādei un analīzei nepieciešamas speciālas zināšanas. Jaunākie atklājumi AE jomā ļauj vienkāršot apstrādes procesu un padarīt to lietojamu katram kuģa inženierim, kā arī mērījumi var tikt veikti nepārtraukti vai, piemēram, sardzes beigās.

AE sniedz daudz plašāku informāciju par detaļu un mehānismu tehnisko stāvokli kā tradicionālās kontroles metodes [4]. Kuģi ekspluatējot, ar šo metodi iespējams noteikt arī dzinēja detaļu slodzes limitu, atklāt plaisas u.c. defektus to sākumstadijā. 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.

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 ekspluatācijas laikā vai to pārtraucot uz īsu laiku un pāriet no periodiskām tehniskām apskatēm uz objekta ekspluatāciju atbilstoši tā tehniskajam stāvoklim, kas sniedz acīmredzamu ekonomisku efektu.

AE kontroles metode nodrošina tikai progresējošu, tātad, bīstamu defektu konstatēšanu un reģistrāciju, klasifikāciju nevis pēc izmēriem, bet pēc bīstamības pakāpes. Tas nozīmē, ka daži defekti, kuru izmēri pārsniedz tradicionālo NK metožu brāķa līmeni, izmantojot AE metodi, var nonākt drošu defektu klasē, jo tie pastāv, taču objekta darba laikā neattīstās. Tas ļauj pamatoti atcelt objekta darbības apturēšanu un remontdarbus.

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.

Izmantojot sensoru iespējas uztvert vibrācijas no dažiem desmitiem kHz līdz MHz frekvencēm, ļauj atklāt un noteikt atrašanās vietu noguruma bojājumiem gultņos un zobratos, kavitāciju un eroziju cauruļvados u.c.

Protams, jāņem vērā, ka kvantitatīvie un kvalitatīvie AE viļņu raksturlielumi atkarīgi no materiāla īpašībām un apkārtējās vides faktoriem.

Galvenā problēma, īpaši dzinējiem, ir trokšņu attdalīšana, ko rada citi strādājoši mehānismi.

Pētot gultņu kontroles iespējas, tika uzsvērts, ka signāli, kas konstatēti AE frekvenču diapazonā, ir gultņu defekti nevis citi, piemēram, nelīdzsvarotība, nesaskaņotība, vaļīgums un vārpstas locīšana [30]. Tāpat iepriekšējie pētījumi ir parādījuši, ka AE līmeņa pieaugums sakrīt ar plaisas izplešanos [120]. Plaisu rašanās mehānisms detalizētāk apskatīts vairākos darbos [62, 77].

Daudzi autori uzsver akustiskās emisijas (AE) lietderību dīzeļdzinēju tehniskā stāvokļa diagnostikā, pamatojoties uz tās augsto jutību pret dažādiem mehāniskiem un plūsmas mehāniskiem procesiem, kas notiek dzinēja darba ciklā. Ņemot vērā AE augsto laika izšķirtspēju un spēju noteikt avota atrašanās vietu, atsevišķi notikumi un procesi, piemēram, vārstu atvēršanās un aizvēršanās, degvielas iesmidzināšanas un sadegšanas process, var tikt veiksmīgi noteikti telpā un laikā [73].

Šī sākotnējā analīze liecina, ka ap paredzēto degvielas iesmidzināšanas laiku pastāv identificējami AE viļņi. Šo impulsu struktūra ir ļoti līdzīga tiem impulsiem, kādi fiksēti uz pašas degvielas sprauslas vai iesmidzinātāja korpusa.

Ņemot vērā tādas vienkāršas iezīmes impulsiem kā to enerģiju un laiku, atklājas līdzīgas tendences ar kloķvārpstas ātrumu gan uz sprauslas korpusu, gan dzinēju kopumā (pamats, cilindru bloks un galvas) [1].

Šodienas dīzeļdzinējiem jāatbilst gan degvielas ekonomijas prasībām, gan piesārņojošo vielu emisijas noteikumiem. Šie noteikumi kļūst arvien stingrāki. Trūkumi degvielas sprauslās ne tikai pazemina dzinēja efektivitāti, bet rada arī augstu (reizēm nepieņemamu) nesadegušo ogļūdeņražu līmeni. Turklāt sprauslas defekti palielina troksni un vibrāciju, kas var negatīvi ietekmēt un bojāt visu dzinēju. Tādēļ sprauslu defektu atklāšana to agrīnā stadijā ir viens no galvenajiem uzdevumiem, lai kontrolētu piesārņojošo vielu emisiju visā dzinēja dzīves ciklā.

Līdz šim pētnieki veikuši dzinēju degvielas iesmidzināšanas procesa diagnosticēšanu, pamatojoties uz dažādiem principiem *(F. Gu un A. D Ball, 1996; S. F. Rzeka un N. A. Henein, 1987).* Tomēr ņemot vērā sarežģītos vibroakustiskos avotus dīzeļdzinējos, grūti iegūt detalizētu un uzticamu informāciju par degvielas iesmidzināšanu. AE lietošana var būt efektīvāka ar iesmidzināšanu saistīto defektu atklāšanā, jo AE tiek mērīta augstās frekvencēs - 100 kHz un augstāk, tādējādi tai ir augstas spējas avota vietas noteikšanā. AE mērīšana tika pielietota arī cilindra galvām un veiksmīgi izmantota dīzeļdzinēju analīzē *(J. Antoni, J. Danière, F., 2002; J. Antoni, J. Danière, F. Guillet, 2004; L. Stankovic, J. F. Böhme, 1999).*

Izmanto dažādus AE signālu apstrādes paņēmienus, lai iegūtu informāciju, kas norāda uz defektiem. Šie pētījumi ir parādījuši, ka AE signāliem ir ļoti augsta signāla-trokšņa attiecība un interesējošie defekti var tikt iegūti, attiecīgi apstrādājot signālus.

AE signāli, kas tiek mērīti dzinējam, atkarīgi no viļņu intensitātes un izplatīšanās ceļa. Galvenie viļņu ierosmes avoti, kas ietekmē dzinēja AE attēlu ir atstarpes virzuļu detaļās - skaņa, kas rodas tronku dzinējos, virzulim pārmaiņus piespiežoties čaulas vienai un otrai pusei, gāzes spiediena pieaugums sadedzināšanas laikā un ieplūdes vai izplūdes vārstu ietekme. Daži no šo detaļu bojājumiem ietekmē AE signālu vienlaicīgi un noteiktu daļu no dzinēja darba cikla. Defektu parasti atklāj, salīdzinot AE signālu bojātam dzinējam ar atskaites datiem (standartdati). Ir skaidrs, ka, esot vairākiem vienlaicīgiem defektiem, to atdalīšana ir grūts uzdevums.

Lai arī daudzi mūsdienu kuģu dīzeļdzinēji ir aprīkoti ar degvielas iesmidzināšanas elektronisko vadību un tās aktīvo kontroli, pašlaik izstrādāti un pastāv dinamiskie modeļi, kas analizē un uzrauga šādas sistēmas. Modeļu pamatā ir degvielas sistēmas komponentu vibrācijas analīze [12].

Apkopojot iepriekš teikto, AE metode atšķiras no vairuma citu nesagraujošās testēšanas (*NDT*) paņēmieniem ar divām būtiskām īpašībām:

1) Pirmā atšķirība attiecas uz izcelsmes signālu. Tā vietā, lai piegādātu enerģiju pārbaudāmajam objektam, AE metodē vienkārši klausās enerģiju, kas atbrīvojas no objekta. AE pārbaudes bieži veic uz konstrukcijām, kamēr tās darbojas, jo tas nodrošina pietiekamu slodzi potenciāliem defektiem, kas savukārt izraisa akustisko emisiju.
2) Otra atšķirība ir tā, ka AE nodarbojas ar dinamiskajiem procesiem vai ar izmaiņām materiālā. Tas ir īpaši nozīmīgi, jo tikai aktīva procesa pazīmes (piemēram, plaisu rašanās un augšana) tiek reģistrētas. Ievērojama nozīme ir spējai saskatīt un noteikt jaunattīstības un stagnējošu defektu.

AE metode var tikt pielietota, lai:

a) noteiktu plaisas parādīšanās laiku un tās tendenci;
b) noteiktu plaisas atrašanās vietu;
c) atšķirtu pirmsplaisu no turpmākajām;
d) noteiktu plaisas materiāla iekšienē, ko nav iespējams paveikt ar citām metodēm;
e) veiktu kontroli bez objekta izjaukšanas;
f) pamanītu kuģa mehānismu nestandarta darbību, redzot izmaiņas akustiskajā emisijā.

Tipiska AE sistēma sastāv no:

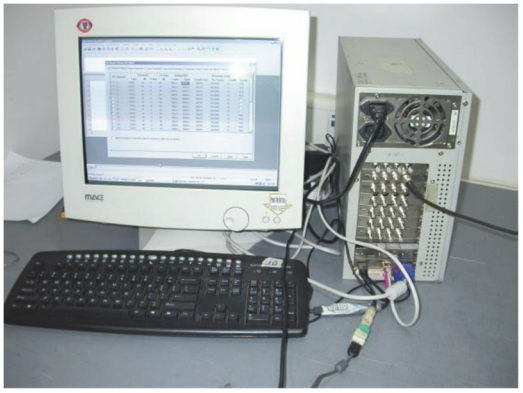
a) sensoriem, kas uztver AE viļņus (1.28. att.);

b) priekšpastiprinātāja, kas pastiprina iegūto signālu;

c) datu apstrādes procesora (signālu filtrācijas, analizēšanas, pārveidošanas pārskatāmā formā) ar displeju (1.29. att.);

d) datu pārraides kabeļiem, parasti līdz 300 m, kas ir pilnīgi pietiekami mūsdienu kuģiem.

1.28. att. AE uztverējs (sensors)



1.29. att. Datu apstrādes procesors

Mūsdienās eksistē vairākas pieejamas AE sistemas, piemēram, „Vallen System" produkcija, kas ir gandrīz 20 gadu pētījumu rezultāts. Konkrēti, sistēmu "AMSY-5", kas AE datu uzglabāšanai, analīzei un vizualizācijai izmanto jaudīgus personālos datorus ar Windows 95/98/2000/NT/XP operatīvajām sistēmām. Sistēmas papildu aprīkotas ar dažādu algoritmu kopumu AE signāla avotu koordinašu noteikšanai un programmatūras veidu noteikšanai [29].

Daudzkanālu AE sistēmas izveidotas pēc moduļu principa, t.i., atbilstošās aparatūras korpusā var būt uzstādīti 6 - 37 kanāliem. Vairāki korpusi var būt savienoti savā starpā vienā lielā sistēmā.

Četrtaktu dzinēju ieplūdes un izplūdes vārstu laukumiem jābūt pēc iespējas lielākiem, cik vien to atļauj vieta cilindru galvā un cilindra čaulas izmēri, lai samazinātu spiediena zudumus ieplūdes un izplūdes procesa laikā. Liela pretestība vārstos samazina cilindra piepildīšanas gaisa koeficientu un palielina darbu, kas jāveic, gaisu iesūcot. Saprotams, ka šos parametrus dzinēja apkalpotāji ietekmēt nevar.

Vārsta gājienam jābūt tādam, lai gāzu ātrums spraugā (vārsts - vārsta sēdvieta) un virs vārsta būtu vienāds. Lai šādu vienmērīgu gāzu ātrumu saglabātu, šo divu laukumu šķēlumiem jābūt vienādiem:

(1.2)

$$\pi D^2/4 = \pi Dh \cos\alpha$$

(no kurienes var aprēķināt vārsta nepieciešamo pilno gājienu)

$$h = D/4 \cos\alpha$$

D - vārsta iekšējais diametrs

H - vārsta pilnais gājiens

α - vārsta šķīvja sēdvirsmas leņķis [32]

Samazināta vārsta gājiena rezultātā pasliktinās gāzu apmaiņas process cilindrā, degviela pilnībā nesadeg, pieaug degvielas patēriņš, veidojas nosēdumi uz vārstiem (galvenokārt izplūdes) ar izrietošām sekām (skatīt zemāk).

Vārsta gājienu ietekmē siltuma atstarpes lielums (jo lielāka atstarpe, jo mazāks vārsta gājiens):

a) vārsti strādā augstās termiskās slodzēs. Nosēdumi uz vārstiem ne tikai pasliktina gāzu apmaiņu, bet arī samazina siltumapmaiņu, kas rada vārstu izdegšanu un var beigties ar dzinēja avāriju, ja bojātā vārsta atlūzas nonāk cilindrā, sabojājot virzuli un cilindra čaulu vai izplūdes traktā un turbokompresorā;
b) vārstu izdilums/nevienmērīga pieguļa sēdvirsmai: pirmajā gadījumā samazinās vārsta gājiens (sk. iepriekš), otrajā - krīt degšanas spiediens cilindrā un jauda, pasliktinās gāzu apmaiņas process, paaugstinās vārstu temperatūra, un viss kopā var radīt metāla daļiņu atdalīšanos no vārsta (sekas skatīt iepriekš);
c) defekti vārstos (plaisas, kļūdas izgatavošanas tehnoloģijā utt.) parasti izraisa dzinēja avārijas, radot defektu ķēdi visā dzinējā. Līdz ar to vārsts tiek pilnībā sagrauts, un tā daļas nonāk cilindrā un izplūdes traktā.

Augstāk minētais noteica izvēli ar kādām novirzēm no normas tika veikti AE mērījumi un salīdzināti ar AE mērījumiem, kad dzinējs ir normālā tehniskā stāvoklī [32].

Eksperimentālie pētījumi ir parādījuši, ka AE signāli no četru cilindru dīzeļdzinēja ir izrādījušies efektīvi, lai atklātu degvielas iesmidzināšanas kļūdas. Analīze sniedza vienkāršu metodi, lai noteiktu nelielu disfunkciju inžektorā, strādājot bezslodzes režīmā. Frekvenču analīze parādīja defektu, bet nebija iespējams noteikt atšķirības starp dažādiem avotiem un veidu defektiem [11].

Standarta dīzeļdzinēji parasti sastāv no kustīgajām un nekustīgajām detaļām, dzesēšanas, eļļošanas, degvielas un palaišanas sistēmām, kā arī virknes siltummaiņu. Visas šīs detaļas pārrauga *Engine Control Unit* (*ECU)*. Lai radītu efektīvas dzinēja monitoringa sistēmas, jāzina par dzinējā notiekošajiem termodinamiskajiem procesiem un iespējamiem defektiem un traucējumiem. Šo informāciju var izmantot, lai pilnveidotu defektu atklāšanas algoritmu.

Zemāk uzskaitīti biežākie dīzeļmotoru defekti un to cēloņi:

1) Jaudas zudums, ko izraisa kļūmes degšanas procesā (vēla vai pārāk ātra uzliesmošana, nekvalitatīva degvielas izsmidzināšana utt.).

2) Emisijas izmaiņas, ko izraisa kompresijas zudums cilindrā, turbokompresora traucējumi, aizsērējuši degvielas un/vai gaisa filtri, netīra degviela utt.

3) Eļļošanas sistēmas kļūme, kas radusies nepareiza eļļas spiediena un/vai eļļas kvalitātes pasliktināšanās rezultātā.

4) Termiskās pārslodzes, kas cēlušās no sprauslu defektiem, virzuļa gredzenu nodiluma, pārāk zema iesmidzināšanas spiediena, paaugstinātas berzes starp virzuli un cilindra čaulu, augstas dzesēšanas šķidruma vai smērvielas temperatūras, ieplūdes/izplūdes vārstu defektiem utt.

5) Noplūdes degvielas iesmidzināšanas sistēmā, eļļošanas sistēmā, gaisa padeves sistēmā (defekti turbokompresorā vai gaisa dzesētājā).

6) Troksnis un vibrācija, ko izraisījis paaugstināts nodilums dzinēja kustīgajās detaļās.

7) Citi defekti, kas radušies dzinēja apkalpojošos mehānismos un ierīcēs, piemēram, bojāti pašattīrošie degvielas filtri (troksnis).

Galvenais dzinēja defektu noteikšanas uzdevums ir noskaidrot sakarību starp defektiem un to cēloņiem. Dzinēja defekti var tikt izraisīti no cēloņu kombinācijas. Palielināt mehānismu drošumu un to resursus arī šodien ir viens no ražotāju un ekspluatētāju galvenajiem uzdevumiem [75].

Vidēju un augstu apgriezienu jūras kuģu dīzeļdzinējos galvenās problēmas saistītas ar augstiem kloķvārpstas apgriezieniem un defektu atklāšana bieži ir novēlota un parādās jau dzinēja avārijas veidā. Tajā pašā laikā jāpiebilst, ka papildu sensori un mērīšanas iekārtas stāvokļa uzraudzībai nav iespējamas, jo dzinējiem jābūt attiecīgi modificētiem, lai šos papildu sensorus izvietotu [87]. Šādi papildu sensori ir, piemēram, viskozitātes sensori eļļas kvalitātes kontrolei [6], [64] vai akustiskie sensori, lai noteiktu bojājumus, pamatojoties uz akustiskā spiediena un vibrācijas signālu mērījumiem [16, 24, 30].

Pārskatus par dažādām defektu diagnostikas metodēm, kas tiek izmantotas tehniskā stāvokļa analīzē, var skatīt izdevumā "*The Old Salt Blog: Littoral Combat Ship Program* " [93].

Dīzeļdzinēja vārstu tehniskā stāvokļa noteikšana, izmantojot AE metodi, apskatīta pētījumā "*Diesel Engine Valve Clearance Detection Using Acoustic Emission" (F. Elamin, Y.*

Fan, F. G, A. Ball) [40]. Izmantojot eksperimentālo metodi, šādi pētīja AE metodes piemērotību dīzeļdzinēju vārstu defektu analīzei. Eksperimenta objekts bija Ford FSD 425 četrcilindru, četrtaktu, *in-line OHV*, tiešās iesmidzināšanas dīzeļdzinējs. Vārstu atstarpes defekts tika veiksmīgi atklāts un diagnosticēts. Bojātā izplūdes vārsta ietekme uz dzinēja darbību tika uzraudzīta, un bija vērojama atšķirība starp tehniskā kārtībā esošā un bojātā dzinēja AE signāliem. Mērījumu rezultātu apstrāde liecināja, ka, tikai izmantojot AE signālu laika un frekvences domēna analīzi, var iegūt labāku redzējumu par dzinēja tehnisko stāvokli. Tas ļauj secināt, ka AE metode var būt spēcīga un uzticama dīzeļmotoru defektu noteikšanai un diagnosticēšanai. Tā tiek uzskatīta par unikālu metodi vārstu tehniskā stāvokļa monitoringā [40].

Pat nelieli defekti ne tikai pasliktina dzinēja darbību, bet arī rada lietotājam ievērojamus ekonomiskos zaudējumus. Lai iespējami mazinātu defektu negatīvo ietekmi, pēdējo desmitgažu laikā pētītas daudzas diagnostikas metodes. Neskatoties uz to, dīzeļdzinējiem defektus dažkārt ir grūti diagnosticēt, izmantojot tradicionālās metodes: vibrodiagnostiku, termogrāfiju u.c. metodes. Vibrācijas monitorings sniedz tikai ierobežotu informāciju par dzinēja tehnisko stāvokli. Tas bieži vien prasa vairākus akselerometrus un dažādas mērījumu pozīcijas, lai panāktu vispārēju dzinēja stāvokļa novērtējumu. Vēl viens trūkums ir tas, ka vibrācijas signāli ir piesārņoti ar troksni, un nepieciešama efektīva signāla apstrāde, lai iegūtu noderīgu informāciju [13]. Problēmas rodas arī saistībā ar mainīgiem vibrācijas signālu raksturlielumiem [17]. Bezkontakta akustiskie signāli var sniegt plašāku informāciju par dzinēju, tomēr, tā kā skaņas signāli ir piesārņoti ar blakus trokšņiem, bieži vien ir grūti iegūt noderīgu diagnostikas informāciju [19].

Iekšdedzes dzinēju ieplūdes un izplūdes vārsti spēlē nozīmīgu lomu dzinēja veiktspējā. Tie ir vieni no būtiskākajiem komponentiem, kuru defekti var izraisīt citu agregātu un detaļu bojājumus, piemēram, turbokompresoru un cilindra - virzuļa grupas detaļu [18]. Galvenie cēloņi vārstu defektiem ir bojāta vārsta sēdvieta, nosēdumi uz vārsta, maza vārstu atstarpe, izdedzis vārsts, siltuma nogurums, nodilums utt. [65, 130]. Pēdējos gados, ieviešot modernas *CBM*, ir panākta augsta ticamība dzinēja diagnosticēšanas metodēm [43].

1.4. Promocijas darba mērķis un uzdevumi

Viena no mūsdienu kuģu/dzinēju būvniecības pamatnostādnēm ir ekonomisko rādītāju paaugstināšana. Ekonomisko rādītāju uzlabošanas risinājumi ir vairāki, bet tuvāk tiek apskatīts viens no galvenajiem: pāriešana uz dzinēju tehniskām apkopēm pēc dzinēju reālā tehniskā

stāvokļa (*Condition Based Maintenance - CBM*), t.i, dzinēju drošas ekspluatācijas laika palielināšana. Arvien vairāk kuģu (pārsvarā nesen būvēti) pāriet uz kuģu mehānismu apskates grafiku pēc to reālā tehniskā stāvokļa, nepakļaujot tos nevajadzīgai izjaukšanai. Šī iemesla dēļ mehānismu tehniskā stāvokļa diagnostika, izmantojot modernās diagnosticēšanas metodes, ieņem vadošu lomu.

Turklāt vēl aizvien ekspluatācijā atrodas liels skaits kuģu, galvenokārt sauso beramkravu, kas būvēti 20. gs. 70.-80. gados. Šie kuģi veido paaugstināta riska grupu, lai gan lielam skaitam kuģu dzinēji (galvenokārt palīgdzinēji) ir nomainīti un to tehniskā stāvokļa kontrolei ir būtiska loma.

Promocijas 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 nepieciešams veikt šādus uzdevumus:

1. Veikt kuģu dzinēju bojājumu un to diagnostikas metožu analīzi.
2. Izstrādāt matemātisko modeli akustiskās emisijas signālu rašanās avotus dzinēja cilindru hermētiskuma zušanas gadījumā.
3. Pamatojoties uz gāzu dinamisko aprēķinu, noteikt diapzona robežas gāzes turbolentai zemskaņas plūsmai defektā, kas radies dīzeļdzinēja cilindra hermētiskuma zušanas gadījumā.
4. Veikt eksperimentālus mērījumus dzinēja ekspluatācijas apstākļos ar mērķi noteikt kritērijus akustiskās emisijas 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.

Sasniedzot izvirzīto promocijas darba mērķi būtu iespējams gan paildzināt dzinēju drošu ekspluatācijas laiku, gan identificēt defektus to agrīnajā stadijā, tādējādi izvairoties no lieliem neplānotiem kuģu dzinēju remonta izdevumiem.

Šajā nodaļā analizētais parāda, ka kuģu dzinēju defektu un avāriju negaidīta parādīšanās pat ar dzinēju augsto kontroles un aizsardzības līmeni ir samērā bieža parādība, līdz ar to

nepieciešams risānājums, lai novērstu iespējamās nevēlamās ekonomiskās un ekoloģiskās sekas.

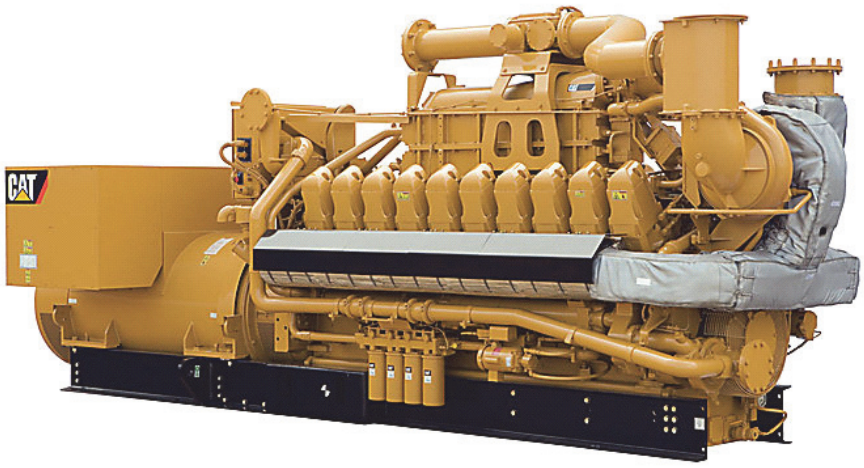
2. AKUSTISKĀS EMISIJAS SIGNĀLU EKSPERIMENTĀLO MĒRĪJUMU TEHNISKAIS NODROŠINĀJUMS UN METODOLOĢIJA

2.1. Pētījuma objekta tehniskais apraksts

Promocijas darba mērķa sasniegšanai tika veikta virkne eksperimentu, izmantojot rūpnieciski ekspluatētu augstapgriezienu dzinēju (2.1. att.). Mērījumu veikšanā tika ņemta vērā iepriekšējā pieredze un dati, kas iegūti RTU Aeronautikas institūta pētījumos un darbos [99, 102, 118].

Par pētījuma objektu tika izvēlēts 20 cilindru V-veida četrtaktu dzinējs, tā cilindra galvās atrodas divi ieplūdes un divi izplūdes vārsti, kas tiek atvērti ar piedziņu no sadales vārpstas, bet aizvērti ar atsperu palīdzību. Dzinēja galvenie raksturlielumi ir redzami 2.1. tabulā.

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. Dzinēja CAT G3520C kopskats

2.1. tabula

Dzinēja galvenie raksturlielumi

Ražotājs:	"*Caterpillar*"
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 kalpo elektroenerģijas ražošanai, kā arī siltā ūdens padevei Valmierā.

Dzinējs apgādāts ar spēcīgu mikroprocesoru, kas kontrolē galvenos parametrus, īpaši akcentējot degvielas padevi un degšanas kontroli, tātad mazāks patēriņš un mazāk degšanas produktu izmešu.

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.

Procesors kontrolē un izpilda šādas funkcijas:

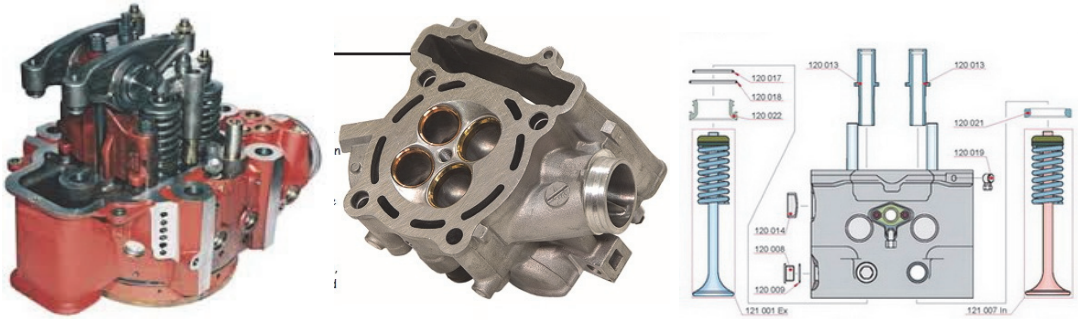
a) uztur uzdotos apgriezienus un slodzes režīmu;
b) padod degvielu atbilstoši režīmam;
c) veic dzinēja galveno parametru (arī apkalpojošo sistēmu un apkārtējās vides) diagnostiku un to lielumu fiksāciju;
d) brīdina par tuvošanos parametru kritiskai robežai, nepieciešamības gadījumā veic dzinēja avārijas apstādināšanu;
e) uztur atmiņā fiksētos parametrus un pamanītās novirzes no normas: brīdinājuma un avārijas signālus.

Dzinējam/procesoram iespējams pieslēgt portatīvo datoru ar speciālu programmu, kas ļauj testēt dzinēju un atrast atmiņas bloka ierakstus visā dzinēja dzīves laikā.

Dzinēja prototips tika testēts dažādos pasaules reģionos ar dažādu pielietojumu. Dzinēju iespējams vadīt un kontrolēt, izmantojot interneta iespējas.

Tas, ka tika pētīti dzinēja vārsti, skaidrojams ar to, ka daudz avāriju kuģu dzinējiem izsauc tieši defekti vārstos.

Parasti vārstu sēdvirma ir 45° leņķī, kas nodrošina labāku vārsta kontaktu ar sēdvirsmu, optimālu siltuma novadīšanu un gaisa/gāzu plūsmas visizdevīgako formu [129].

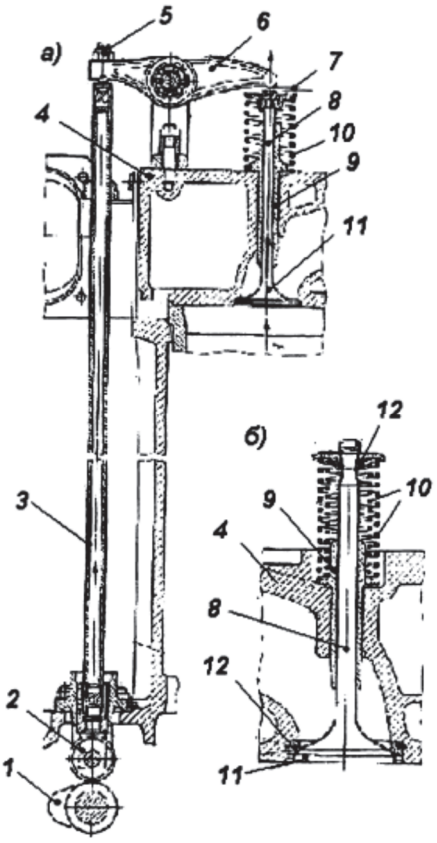


2.2. att. Tipiska mūsdienu četrtaktu vidēju/augstapgriezienu dzinēja cilindru galva

Četrtaktu dīzeļdzinēja gāzu sadales mehānisma komponenti attēloti zemāk:

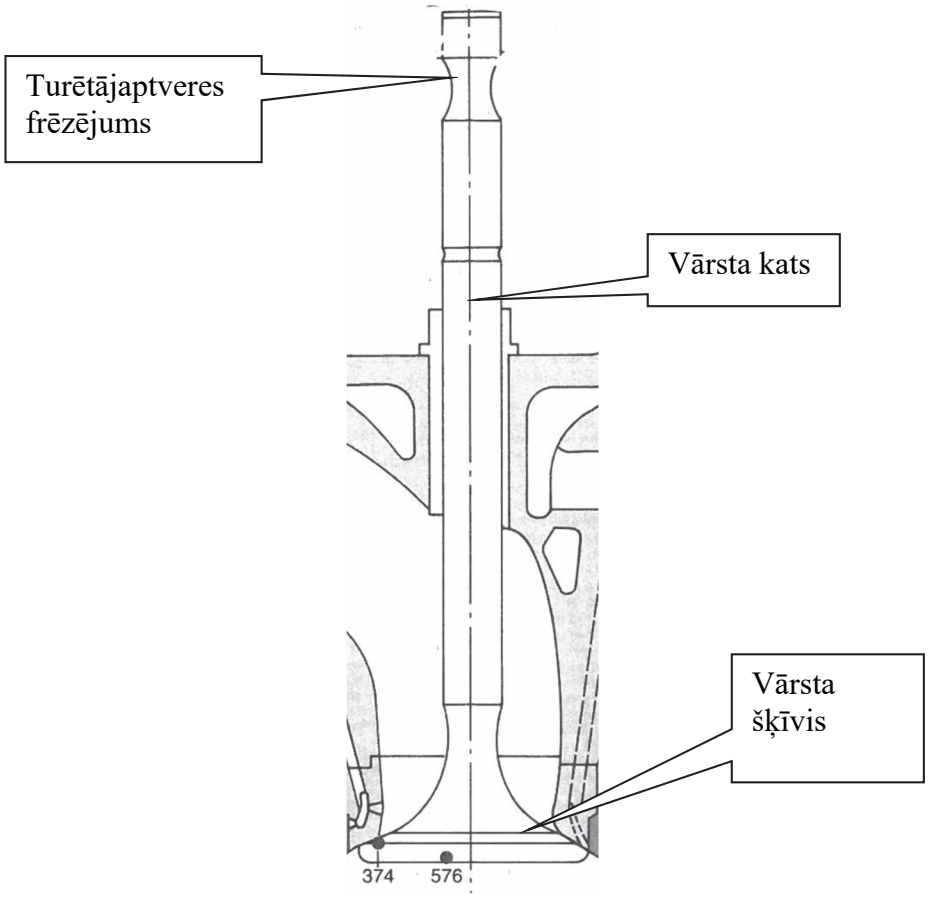
AE mērījumi tika veikti 80-100% noslogotam dzinējam.

Zemāk redzamajā 2.3. attēlā uzskatāmi parādīta vārstu konstrukcija, bet 2.4. att. - mehānisko spriegumu rašanās vietas un vārsta termiskais noslogojums.



2.3. att. Principiālā gāzes sadales mehānisma shēma

1 - cilnis, 2 - skriemelis, 3 - bīdstienis, 4 - cilindra galva, 5 - siltuma atstarpes regulējošā skrūve, 6 - divplecu svira, 7 - siltuma atstarpe, 8 - virzuļa kāts, 9 - vadbukse, 10 - vārstu atsperes, 11 - vārsts, 12 - vārsta sēžvieta.



2.4. att. Cilindra vārsta galvenās sastāvdaļas un vidējās darba temperatūras

2.2. 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 iegūšanas 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 iegūto signālu apstrādi, kā arī iegūt uzlabotu viļņformu un to apstrādi. Rezultāti tiek parādīti uz integrēta krāsu LCD skārienjutīga ekrāna (240x320 pikseļu izšķirtspēja). Programmatūra dod iespēja 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. Izmantojot programmatūru, lietotājs var izmantot iekšējo vai ārējo priekšpastiprinātāju. 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 un tos var plaši izmantot.

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

Akustiskās emisijas sistēmas komponenti

Pocket AE-2 komplektā (2.5. att.) ietilpst: divu kanālu portatīvā iekārta, divi R15α pasīvie AE sensori, divi sensoru kabeļi, viens parametru kabelis ar BNC savienotāju, 1GB CF karte un akumulatora barošanas avots. Pēc izvēles akumulatoru lādētājs, papildu akumulatori un *AEwin* ™ Replay programatūra ir pieejama atsevišķi.

2.5. att. Mērinstrumenta *Pocket AE-2* komplektācija

2.2. tabula

Pocket AE-2 galvenie raksturlielumi

Izmēri: 241 mm x 89 mm x 36 mm

Svars: 1,13kg ar baterijām

Ekrāns: 3,52” krāsu LCD, 240 pikseļi x 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

Eneģijas avots: ārējais DC parveidotājs (12 V @ 1A) vai iekšējas 7,2V 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

Programmatūras filtri

Sistēma "*Pocket AE*" apgādāta ar augstu un zemfrekvenču digitālajiem filtriem, papildu analogajiem, kas tiek aktivizēti ar programmatūras palīdzību. Tas dod izcilas spējas filtrēt trokšņus un uzlabot „signāls-troksnis" attiecību.

Signāla apstrāde: filtrācija ar beigu raksturlīkni reālajā laikā. Iespējams ierakstīt signala 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 tiek izmantots firmas "PAC" zemfrenvences pārveidotajs R3α.

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

Ierīces sagatavošana darbam

Slieksnis: 26 dB

Pastiprinājums: 40 dB

Viļņa formas garums: 15 000 punktu

Fiksācijas ātrums: 100 000 mērījumu sekundē

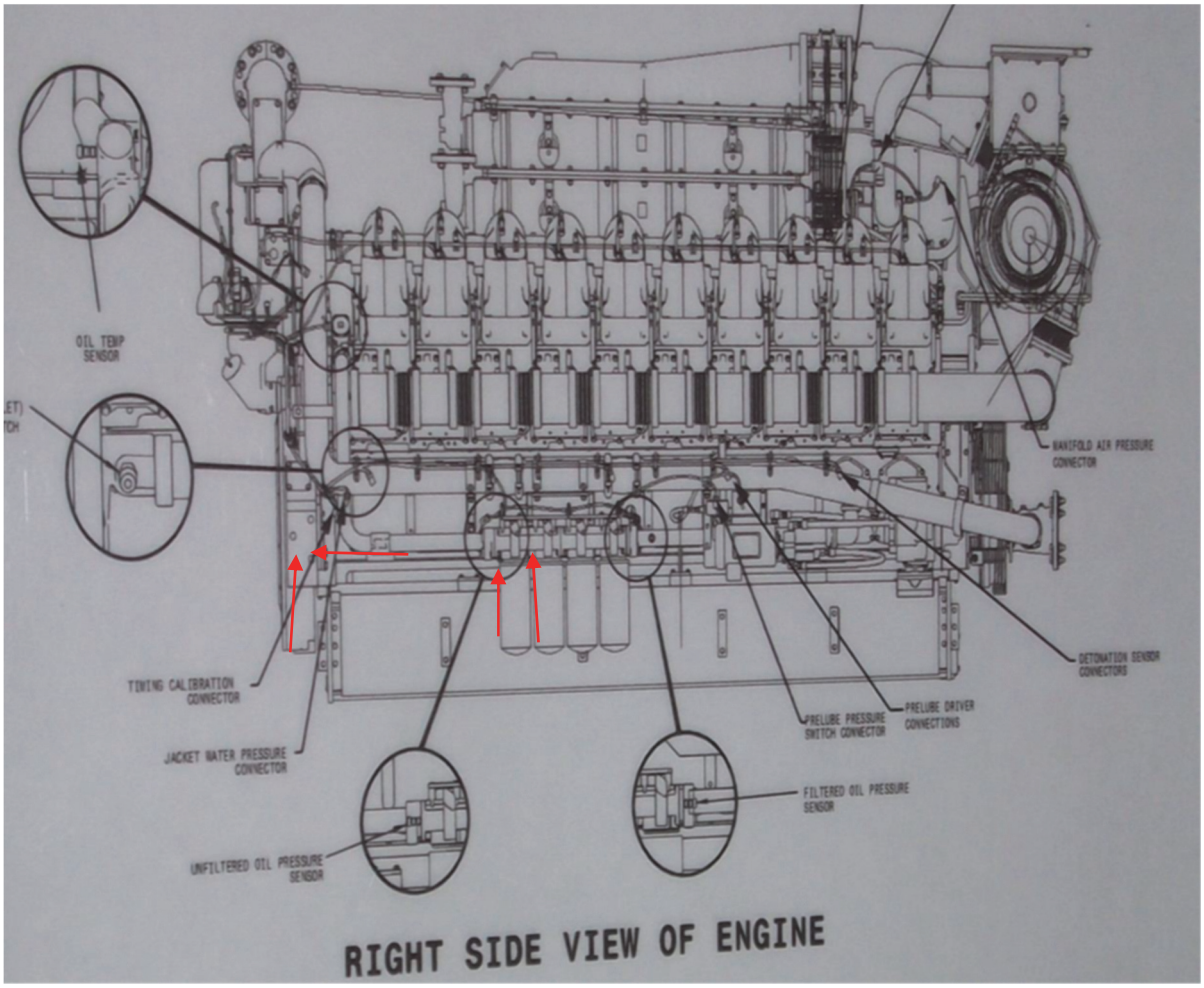
Augstfrekvences filtrs: 100 kHz

Zemfrekvenču filtrs: 1 MHz

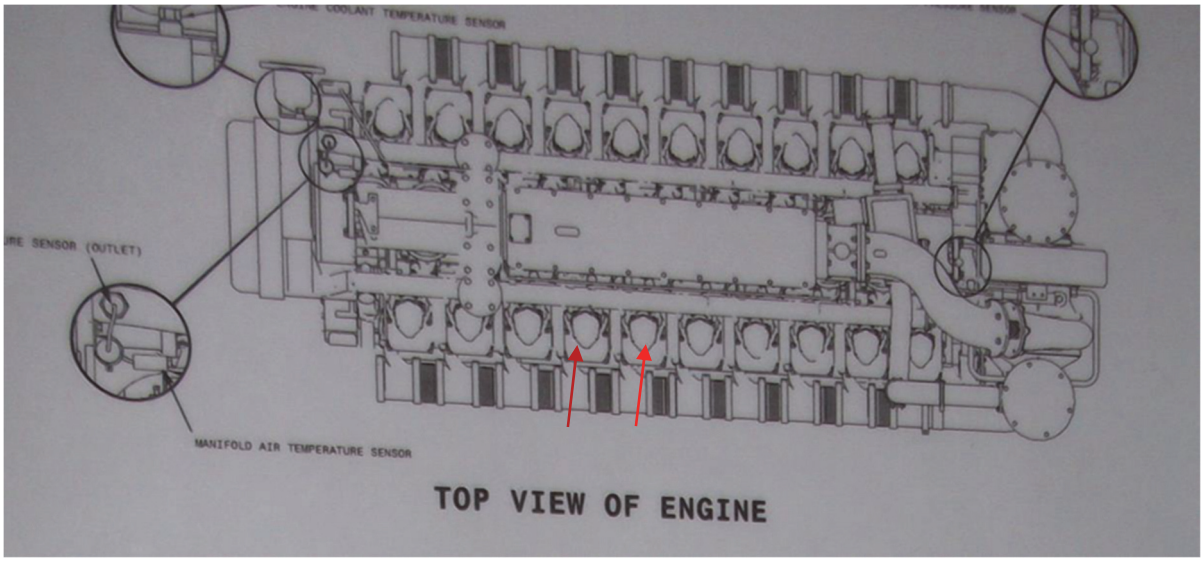
Parametriskais signāls: ± 10 V

2.3. Akustiskās emisijas signālu eksperimentālo mērījumu metodoloģijas gaita

1. AE sensoru stiprinājumu vietas tiek attīrītas no eļļas, putekļiem un citiem nosēdumiem.
2. Lai noskaidrotu AE signāla jaudu un formu, sākotnēji sensori tika stiprināti pie dzinēja trīs vietās: pie cilindra Nr. 7. un cilindra Nr. 9 galvām, pie dzinēja pamata, minēto cilindru rajonā, un pie spararata korpusa. Kontakts starp dzinēju un AE sensoriem tika nodrošināts, izmantojot "Silagel" smēri.
3. Zemāk attēlos 2.6. un 2.7. redzama sensoru izvietojuma shēma.



2.6. att. AE sensoru izvietojums pie spararata un pamata (sānskats)



2.7. att. AE sensoru izvietojums pie cilindru galvām (virsskats)

4. Tika veikta AE aparatūras noregulēšana:
   a) pēc aparatūras pieslēgšanas tika veikta akustiskā signāla pārbaude un mērījumu diapazona pieregulēšana atbilstoši „*Pocket AE*™" lietošanas instrukcijai un "*Pocket AE*" win programmatūrai, izmantojot automātiskās kalibrēšanas impulsus un standarta skaņas avotu NIL-SU;

   b) ierīces darba frekvences tika noregulētas uz 20-1000 кHz un 100-1000 кHz;

   c) pastiprināšanas koeficients kanāliem tika noregulēts uz 14 dB, jo tika izmantoti sensori nevis ar iebūvētiem priekšpastiprinātājiem, bet ar ārējiem ar pastiprināšanas koeficientu 26 dB;

   d) abiem kanāliem tika noteikts paštrokšņa līmenis - 37 dB (40 dB cilindra galvām).

5. Tika veikti AE signālu kontroles mērījumi un izstrādāta datu apstrādes metodoloģija:

a) ar pjezokeramiskajiem sensoriem tika reģistrēti elastīgie viļņi, kas atbilst AE impulsiem, tiekot pārveidoti mehāniskās svārstības elektriskos signālos, kas pa kabeļiem nonāk AE reģistrējošā iekārtā;

b) AE signālu reģistrācija notika ar ierīci PAC "*Pocket AE-2*" vairāku minūšu laikā, dzinēja kloķvārpstai rotējot ar 1500 apgriezieniem minūtē. Tika fiksēta viļņu forma un citi AE parametri, kas veido dzinēja AE portretu.

4. 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 (2.8. att.), Ne=2 x 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 atklājās, ka gultņu defekti ir reti sastopami, galvenokārt turbokompresoru defekti ir saistīti ar svešķermenu noklūšanu turbīnas pusē, tas nozīmē bojātu cilindra vārstu fragmentu nokļūšanu turbokompresorā. Šā iemesla dēļ turpmākajos mērījumos AE signāli no dzineju 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.

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

2.8. att. AE mērījumi uz velkoņa "Sfinksa"

6. Turpmākie mērījumi tika veikti (2.11., 2.12. un 2.14. att.):

a) 2013. gada 14. maijā, kopējais dzinēja nostrādāto stundu skaits - 47 280;
b) 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)
c) 2014. gada 18. februārī, kopējais dzinēja nostrādāto stundu skaits – 53 726, pēc kapitālā remonta – 4690;
d) 2014. gada 15. aprīlī, kopējais dzinēja nostrādāto stundu skaits - 55 000, pēc kapitālā remonta – 5964 (nomainīta cilindra Nr. 9 galva ar vārstiem to palielinātā nosēduma dēļ un atklāta izmainīta izplūdes vārsta ģeometrija un novirzes no vārstu siltuma atstarpju normas);
e) 2014. gada 21. novembrī, kopējais dzinēja nostrādāto stundu skaits - 57 880, pēc kapitālā remonta – 8844;
f) 2015. gada 7. aprīlī, kopējais dzinēja nostrādāto stundu skaits - 61 144, pēc kapitālā remonta - 12 108.

Mērījumu veikšanas vieta: Valmiera, Dzelzceļa iela 7, dzinējs atrodas a/s “Valmieras enerģija” īpašumā. Tehnisko apkalpošanu veic SIA "*Witraktor*". Mērījumiem tika izmantota ierīce "*Pocket AE-2*". Sensoru tips: KD-32 pjezosensori. Sensoru izvietojums:

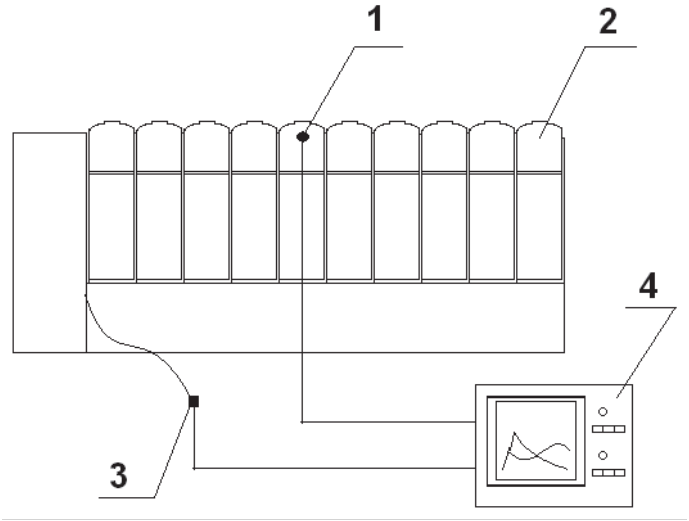
1. Pie dzinēja pamata, kloķvārpstas gultņu rajonā.
2. Pie spararata.
3. Pie cilindru galvām.

7. Mērījumos tika izmantoti arī divkanālu ciparu oscilogrāfi: *Rigol DS1052E* un *Picoscope 320*4, kā arī analogais *C8-17*, lai noteiktu signālus no Holla devēja – signāla lielumu, formu un tā vietu aplūkojamā cilindra darba ciklā:

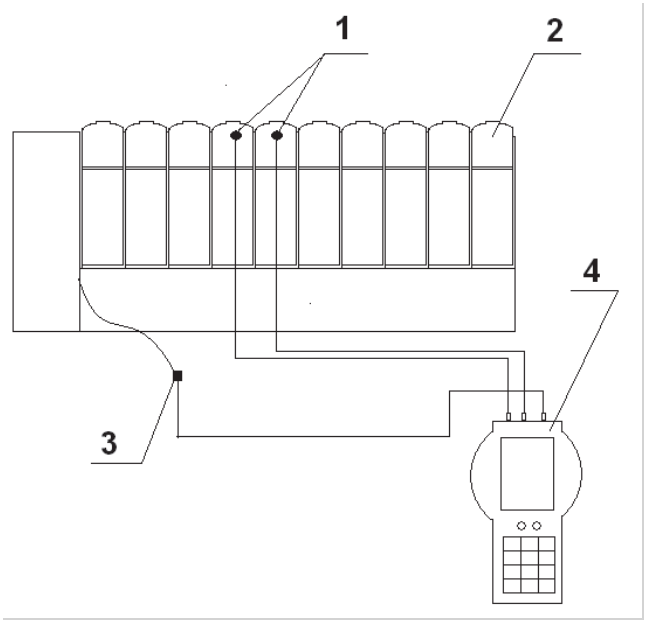
1) Signāla veida noteikšana no Holla devēja - 12 V no tā izejas ir jāatbilst cilindra Nr. 1 virzuļa augšējam maiņas punktam (AMP).
2) Cilindra Nr. 1 AMP momenta kontrole attiecībā pret saņemto signālu no sensora, kas piestiprināts apsekojamā cilindra galvai.

8. Mērījumu shēmu (skat. 2.9. att. un 2.10. att.) apzīmējumi:

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

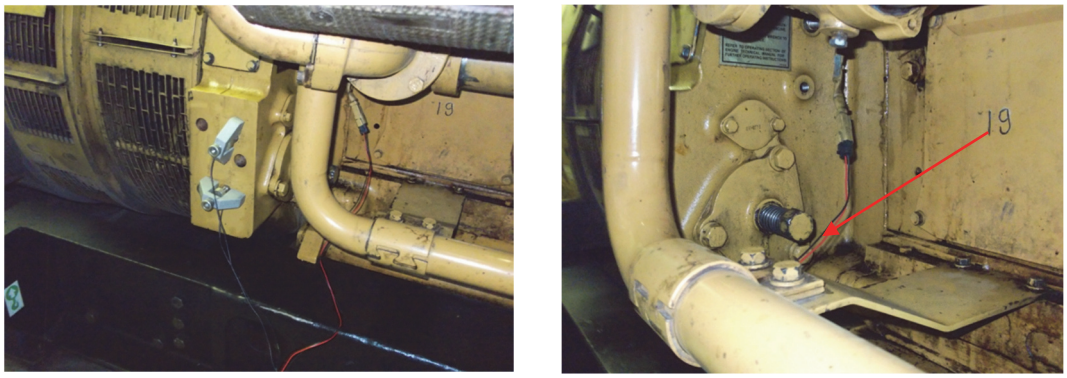


2.9. att. Mērījumu shēma, izmantojot oscilogrāfu

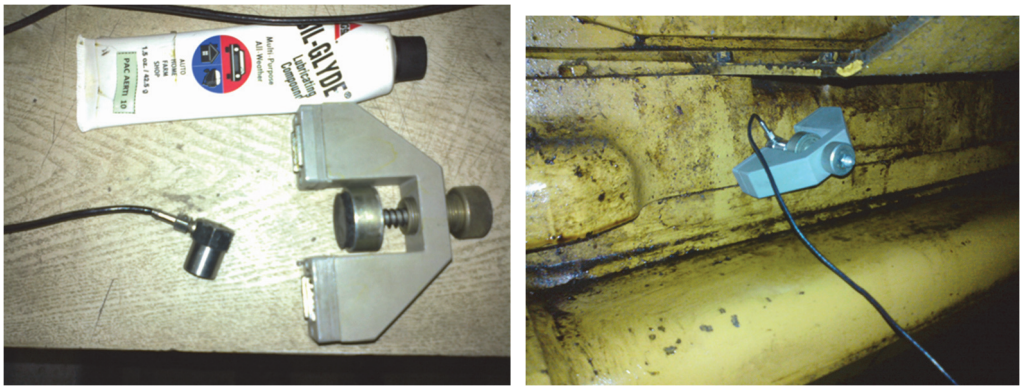


2.10.att. Mērījumu shēma, izmantojot *Pocket AE 2*

2.11. att. AE sensoru izvietojums pie cilindru galvām un dzinēja pamata



2.12. att. AE sesnsoru izvietojums pie dzinēja spararata un parametriskā signāla izvads



2.13. att. Izmantojamie sensori ar magnētiskiem fiksatoriem

2.14. att. Mērījumos izmantotā AE aparatūra un oscilogrāfi

9. Fona troksni mērīja 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.

10. AE datu faili tika saglabāti MISTRAS standarta DTA formātā un tos pārsūtīja uz datoru, izmantojot *Compact Flash* kartes un/vai USB, pilnīgai datu analīzei izmantoja *AEwin* ™ programmatūru.

Eksperimentālo mērījumu rezultātā (mērot dzinēja dažādos tehniskos stāvokļos), tika iegūts ievērojams AE datu apjoms, kas vēlāk tika analizēts, izmantojot datu apstrādes programmatūru.

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 DZINĒJA CILINDRU HERMĒTISKUMA ZUŠANAS GADĪJUMĀ

3.1. Akustiskās emisijas signālu avotu dīzeļdzinējos analīze

Akustiskās emisijas (AE) signālu plūsmas mērīšana signāli ļauj mums 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, 21, 22, 23, 25, 38, 45, 48, 49, 50, 56, 74, 76, 78, 80, 84, 90, 91, 101, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 119, 122, 123, 124, 126].

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 [23, 102, 106, 117, 118] un citu autoru pētījumi [39, 72] 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) 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 izsauc 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 signālu plūsma 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: izdegumiem vārstos, vārstu ģeometrijas izmaiņu un 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 (skatīt 2.2., 2.3. un 2.4. att.) 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.

3.2. Akustiskās emisijas signālu avotu matemātiskā modelēšana turbulentai gāzes plūsmai no defektēta kanāla cilindra hermētiskuma zušanas gadījumā

Pētījuma objekts šajā darbā ir kuģu dzinējs, kas darbojas ar gāzi, tādēļ 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 kā paaugstināts nodilums un virsmas atslāņošanās, kas noved pie gāzu izlaušanās no cilindra pat pie vārstu aizvērta stāvokļa. Visbiežāk defekts izpaužas kā neregulāras formas un konfigurācijas kanāls vārsta šķīvī un/vai vārsta ligzdā.

AE signāli šajā gadījumā ir ultraskaņas signāli no gāzes plūsmas defektā (vārstā vai tā ligzdā) un, kas rodas spiediena krituma rezultātā.

Pie gāzveida produkta tā kustība kanālā var būt molekulāra vai viskoza. Konkrētam objektam minimāli iespējamais spiediens kanālā ir samērojams ar atmosfēras spiedienu (aptuveni 0,1 MPa), gāzes molekulu brīvās kustības ceļa garums l_b ir apmēram 10^{-4} mm. Šājā gadījumā nosacījumu $l_b \gg 2$, kas atbilst molekulārai plūsmai, nodrošināt nevar, tādēļ tiek izskatīts tikai gadījums ar gāzes viskozu plūsmu. Viskoza plūsma, savukārt, var būt lamināra vai turbulenta.

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

Jāuzsver, ka gadījumā, kad gāzveida viela ieplūst tādā pašā vidē ir visgrūtāk identificēt AE signālus. Šaja gadījumā tas izpaužas kā degšanas produktu ieplūšana izplūdes traktā kur ir gaisa un deggāzu maisījums. Tādēļ akustisko emisiju līmenim 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 kanālā hermētiskuma zušanas gadījuma, kura pamatā ir hidrodinamiski aprēķini [38, 105]. Akustiskā efektu, ko 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.

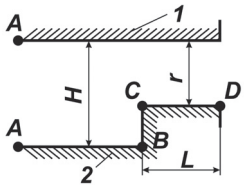
Ņemot vērā attiecīgo fizikālo procesu sarežģītību un daudzveidību, kas ir pamatā gāzes dinamiskajam aprēķinam, tiek pieņemti vairāki vienkāršojumim un hipotēzes.

1. Aplūkotajā plūsmas gadījumā, kas veidojies vārsta un vārsta ligzdas defekta rezultātā, ejai/kanālam ir sarežģīta konfigurācija. Vienkāršības labad akustisko signālu teorētiskai analīzei pieņemam modeli, ka kanāls ir taisns ar gludām sienām un paplašinājumu *r* (lielums, kas veidojas sakarā ar atstarpes elementu- vārsta un tā ligzdu bojājumiem) un garumu *L* (vārsta biezums) un ir perpendikulāri savienots ar galveno kanālu (cilindrs), skat. 3.1. att. Relatīvo kanāla garumu (pagarinājumu) raksturo paramters $\lambda = L/r$.

2. Atvērums *r* ir neizmērojami mazs salīdzinot ar cilindra tilpumu (šajā gadījumā salīdzinājumā ar H (3.1. att.).

3. Pieņemam hipotēzi par izotermisku gāzes plūsmu kanālā (defektā).

4. Šajā gadījumā tiek ievērots plūsmas nesaraujamības nosacījums.



3.1. att. Defekta modelis

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

(3.1)

$$\mathrm{R_e} = \frac{2\rho \mathrm{V r}}{\mu},$$

μ - plūsmas produkta dinamiskā viskozitāte.

Aprēķinot gāzes plūsmas ātrumu, nepieciešams ņemt vērā tā saspiežamību, t.i., blīvuma ρ 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:

(3.2)

$$-\mathrm{dp} = \varsigma \frac{\mathrm{dl}}{2\mathrm{r}} \frac{\rho \mathrm{V}^2}{2},$$

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

Šeit un tālāk parametru indeksi atbilst kanāla šķērsgriezuma apzīmējumiem (3.1. att.).

Jāņem vērā, ka gāzes plūsmas nepārtrauktība tiek ievērota:

(3.3)

$$\mathrm{V}_\rho = \mathrm{V}_\mathrm{c}\rho_\mathrm{c} = \mathrm{V}_\mathrm{D}\rho_\mathrm{D}$$

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

(3.4)

$$\frac{\rho_\mathrm{D}}{\mathrm{P}_\mathrm{D}} = \frac{\rho}{\mathrm{P}} = \frac{\rho_\mathrm{c}}{\mathrm{P}_\mathrm{c}}$$

Kā sekas hipotēzei par gāzes izotermisko plūsmu ir parametru μ, Re, ξ pastāvīgums visā kanāla garumā.

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

(3.5)

$$\mathrm{V}_\mathrm{D} = \sqrt{\frac{1}{\varsigma\lambda}\frac{\mathrm{P}_\mathrm{c}}{\rho_\mathrm{c}}\left(\frac{{\mathrm{P}_\mathrm{c}}^2}{{\mathrm{p}_\mathrm{c}}^2} - 1\right)}$$

ϑ_D – vislielākais gāzes ātrums kanālā

Skaņas ātrumu izotermiskā 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:

(3.6)

$$\mathrm{V}_\mathrm{D} = \sqrt{\frac{1}{\varsigma\lambda}\left(\frac{{\mathrm{P}_\mathrm{A}}^2}{{\mathrm{p}_\mathrm{a}}^2} - 1\right)}$$

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

(3.7)

$$\frac{\mathrm{P_A}}{\mathrm{p_a}} = \sqrt{1 + \varsigma\lambda(\frac{\mu R_{\mathrm{ekr}}}{2c\rho_{\mathrm{D}}\mathrm{r}})^2}$$

Vai attiecīgs spiedienu kritums:

(3.8)

$$\Delta\mathrm{p} = \mathrm{p_a}\sqrt{1 + \varsigma\lambda(\frac{\mu R_{\mathrm{ekr}}}{2c\rho_{\mathrm{D}}\mathrm{r}})^2}$$

Izteiksmes (3.7) un (3.8) piemērojami tikai līdz skaņas ātruma sasniegšanai pie kanāla izejas, kad atbilstoši vienādojumam (3.6):

(3.9)

$$(\frac{\mathrm{P_A}}{\mathrm{p_a}})_{\mathrm{sk}} = \sqrt{1 + \varsigma\lambda}$$

(3.10)

$$\mathrm{r_{robež}} = \frac{\mu R_{\mathrm{ekr}}}{2\rho_{\mathrm{D}}} = \frac{\mu R_{\mathrm{ekr}}}{\upsilon\rho_{\mathrm{D}}\mathrm{P_D}}$$

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.

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.

4. KUĢA DĪZEĻDZINĒJA TEHNISKĀ STĀVOKĻA AKUSTISKĀS DIAGNOSTIKAS PĒTĪJUMU REZULTĀTI

4.1. Robežu noteikšana saspiestas gāzes turbulentai zemskaņas plūsmai defektā

Pamatojoties uz promocijas darba 3. nodaļas "Akustiskās emisijas signālu rašanās avotu matematiskā modelēšana dzinēja cilindru hermētiskuma zušanas gadījumā" ieteikumiem, 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 normālas temperatūras. Konkrētā gadījumā pieņemam: produkta dinamiskā viskozitāte = 1,8; blīvums *D* [kg/m³]; spiediens *p* [*MPa*]; kritiskais Reinoldsa skaitlis *Rekr* =2.

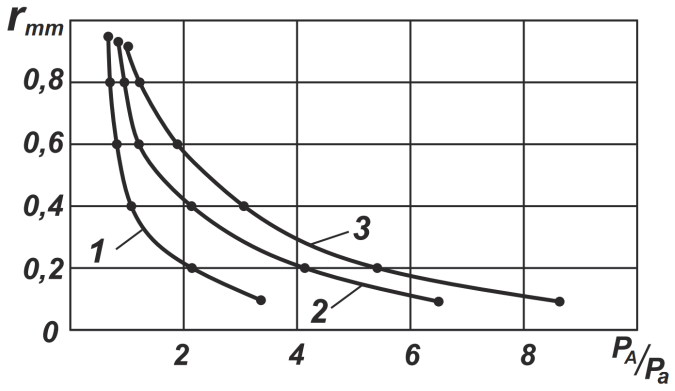
Relatīvais kanāla garums $\lambda=L/r$ tiek pieņemts:

1) $\lambda = 10$

2) $\lambda = 50$

3) $\lambda = 100$

Rezultāti parādīti 4.1 attēlā.



4.1. 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)).

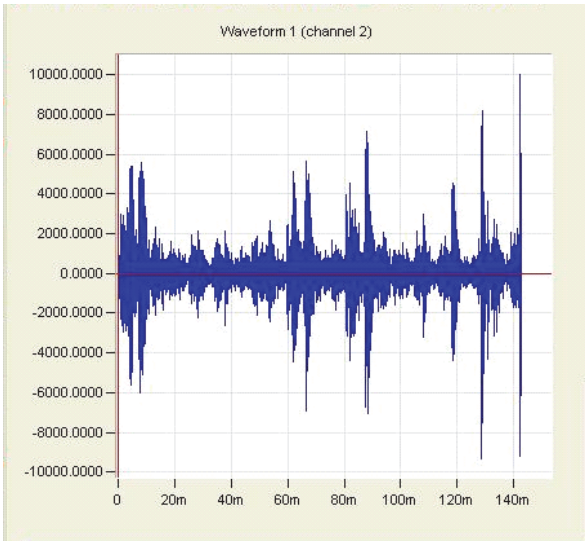
Šī attiecība nosaka sliekšņa izšķirtspēju akustiskās emisijas metodes izmantošanai dīzeļdzinēju cilindru hermētiskuma kontrolēšanai, pamatojoties uz skaņas signālu reģistrāciju, ko izraisa turbulenta gāzes plūsma noplūdes kanalā.

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

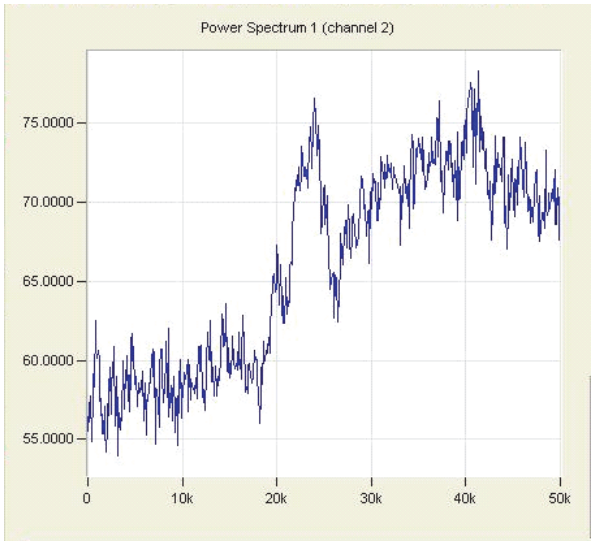
4.2. Akustiskās emisijas signālu informatīvo parametru pamatojums

Sākotnēji AE mērījumi tika veikti visiem cilindriem, piestiprinot sensorus pie to galvām, attiecīgiem kloķvārpstas gultņiem un spararata rajonā. Pēdējie pētījumi tika fokusēti uz cilindru Nr. 7. un Nr. 9. vārstu darbību (skatīt 2.12. un 2.13. attēlu).

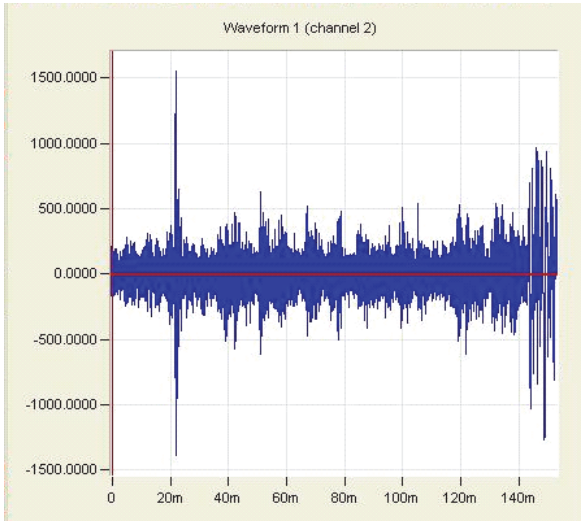
Zemāk redzamos attēlos (4.2.-4.18. att.) fiksētas AE viļņu formas (amplitūda, kas izteikta mV atkarībā no laika milisekundēs) un to spektrs (atkarībā no decibeliem un kHz) dažādās dzinēja vietās.



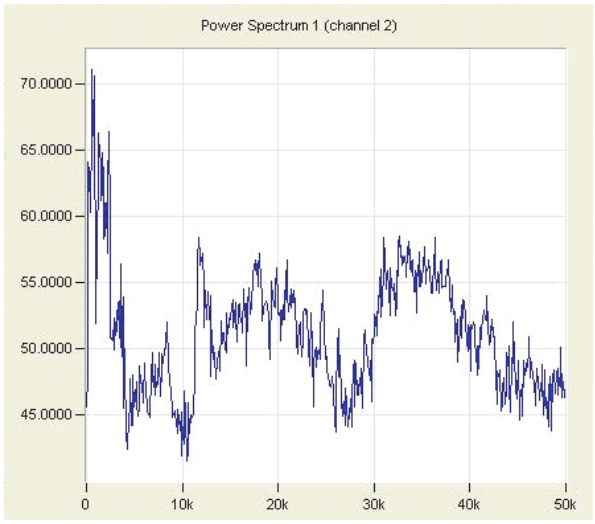
4.2. att. AE viļņa forma pie pamata



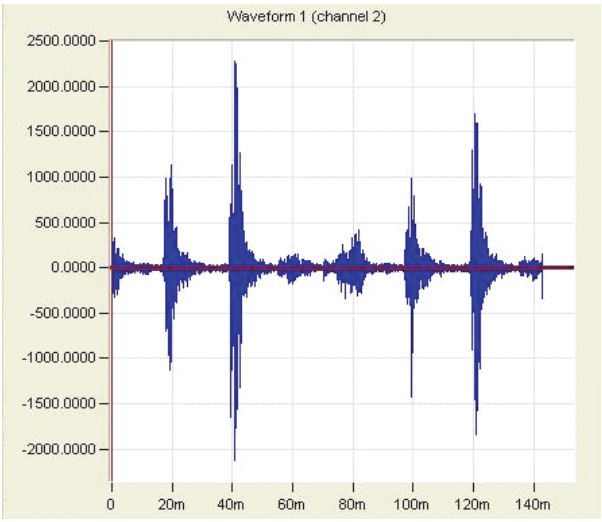
4.3. att. AE viļņa spektrs pie pamata



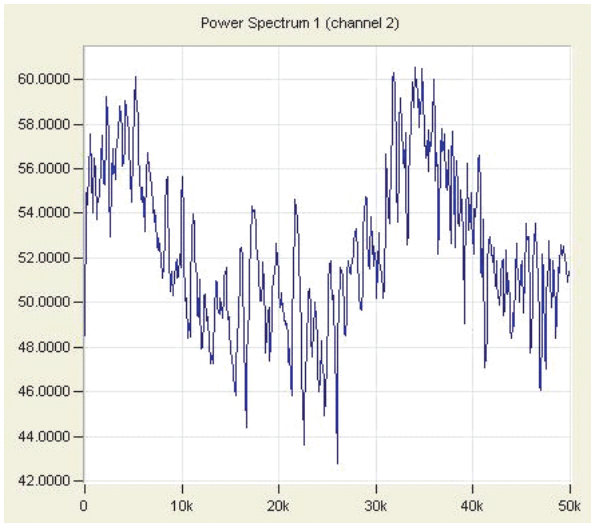
4.4. att. AE viļņa forma pie spararata



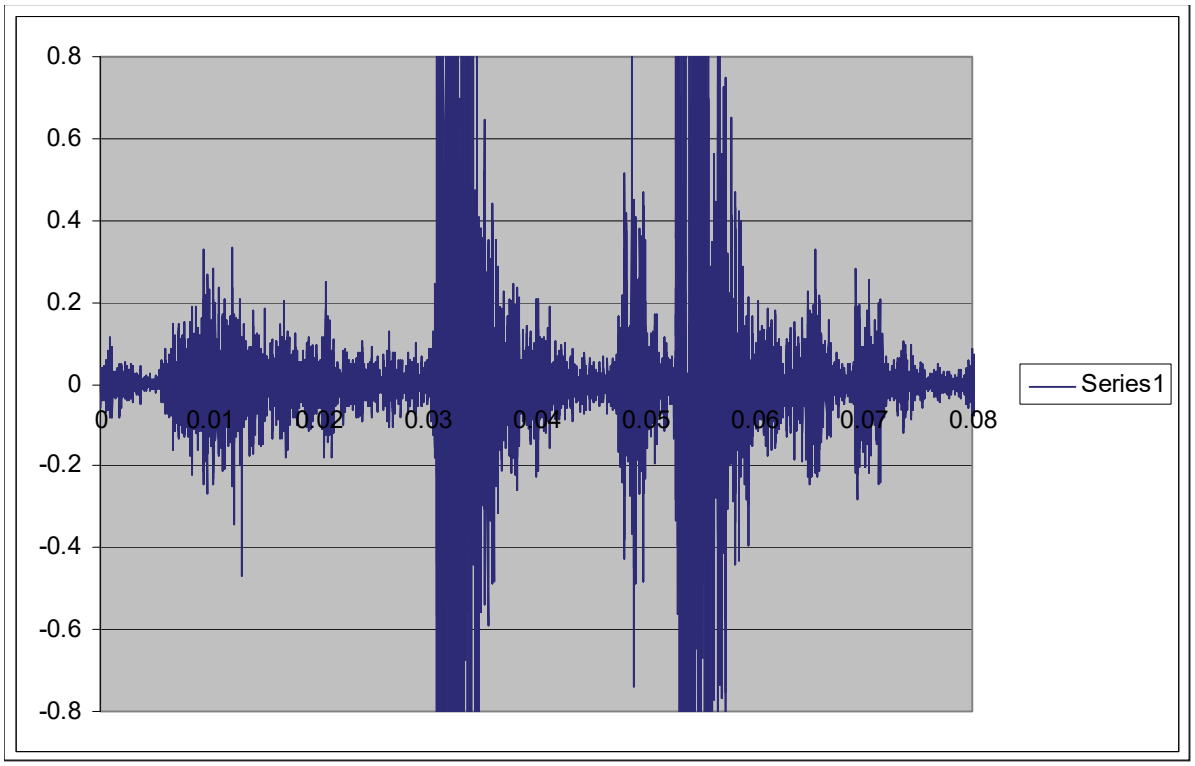
4.5. att. AE viļņa spektrs pie spararata



4.6. att. AE viļņu forma pie cilindra galvas



4.7. att. AE viļņu spektrs pie cilindra galvas



4.8. att. AE viļņu forma no cilindra galvas

4.8. att. parāda viļņa formu, iegūtu no sensora, kas piestiprināts cilindra galvai. Signāla apstrādei izmantota *Excel* programma, lai skaidrāk izceltu mazākos signālus. Krasi izceļas divu, sensoram tuvāk esošo, vārstu aizvēršanās, šajā gadījumā to signālu maksimumam un minimumam nav nozīmes, jo analizēti tiek mazākie signāli.

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

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

Izplūdes vārsta nosēdumus veido gaiši brūni degšanas produkti vārsta iekšpusē un cilindra galvas izplūdes traktā: 0,3 mm – 0,6 mm. Virsējā kārta ir irdena, bet tuvāk metālam kļūst cieta un grūti notīrāma.

Veicot vārstu tehniskā stāvokļa kontroli ar kapilāro metodi, vienam no ieplūdes vārstiem tika konstatēta mikroplaisa. Šī cilindra galva tika izmantota eksperimentālajam mērījumam ar nolūku noteikt AE signāla formu bojātam vārstam (skat. 4.9. att.).

4.9. att. Cilindru galvu un vārstu tests plaisu atklāšanai

Vārsta nodiluma mērīšana ar piekļuvi tā šķīvim ir darbietilpīga, un tādēļ dzinējs jāapstādina. Līdz ar to vārsta nodilums (nosēdums) tiek mērīts ar mikrometru no dzinēja ārpuses (attālums no cilindra galvas līdz vārsta kāta galam).

Šajā gadījumā degviela (gāze) un darba apstākļi ir ļoti labvēlīgi, jo 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) tiek ņemts vērā vārstu nosēdes atskaites jeb references mērījums. Ik pēc 4000 motorstundām tiek mērīta vārstu nosēde. Izplūdes un ieplūdes vārstu nosēdums nedrīkst pārsniegt 2,3 mm. Skatīt pielikumu Nr.1.

Veicot kārtējos mērījumus SIA "*Witraktor*" atklāja, ka viens no vārstiem pārsniedz pieļaujamo nosēdumu. Turpmākajai iegūto AE mērījumu analīzei tika izmantots vārsts ar nosēdumu – 2,5 mm.

Pirmie mērījumu grafiki (4.3, 4.5 un 4.7 att.) parādīja, ka AE viļņu spektrs (jauda) ir maz noderīgi turpmākajos aprēķinos un analīzē, jo ir pārāk piesārņoti ar blakustrokņiem, ko rada citas kustīgas detaļas un mehānismi.

Turpmākajā analīzē par galvenajiem AE faktoriem tika pieņemti:

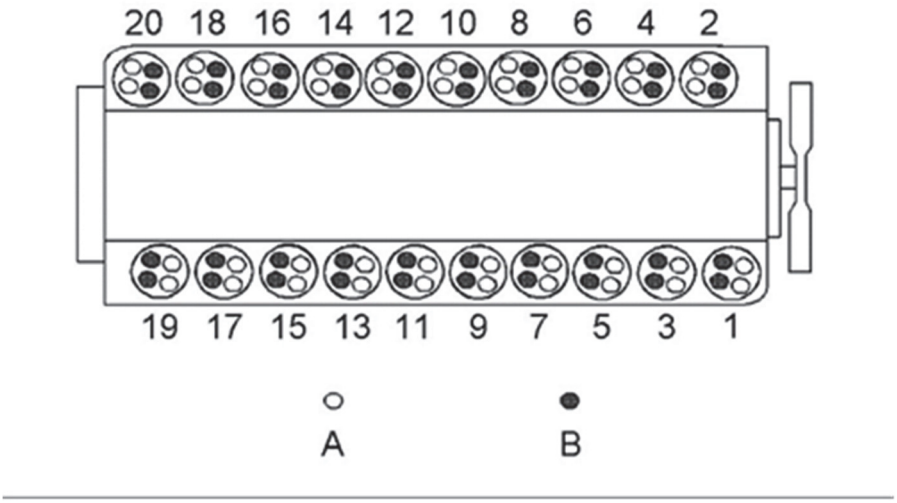
a) AE signāla maksimālā amplitūda;

b) signāla pieauguma ātrums;

c) signala samazināšanās ātrums.

4.3. Dīzeļdzinēja tehniskā stāvokļa akustiskās diagnostikas eksperimentālie pētījumi

Datu apstrādei izvēlētie mērījumi tika veikti cilindram Nr. 9 par pamatbāzi izvēloties cilindram Nr. 1, jo vadības signāls, virzulim sasniedzot augstāko maiņas punktu, uz AE mērierīci tika padots no cilindra Nr. 1.



4.10. att. Dzinēja cilindru un vārstu izvietojuma shēma

Informācija par dzinēju un darba ciklu (skat. 4.10. 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 un aizvēršanās 21° pēc ZMP.

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

Saskaņā ar cilindra Nr. 1 virzuļa AMP cilindra Nr. 9 AMP pēc kloķvārpstas pagrieziena ir 216°.

Ņemot vērā datus, kas iegūti no SIA "*Witraktor*" pēc dzinēju apkopēm un remontiem, tika analizēti mērījumu dati ar šādām novirzēm no normas:

1) Samazinātu ieplūdes vārstu atstarpi (siltuma atstarpe).
2) Samazinātu izplūdes vārstu atstarpi (siltuma atstarpe).
3) Samazinātu ieplūdes un izplūdes vārstu atstarpi (siltuma atstarpe).
4) Ar ieplūdes vārsta mikroplaisu.
5) Ar palielinātu degšanas produktu nosēdumu slāni.
6) Ar paaugstinātu izplūdes vārsta izdegumu.

4.3.1. Akustiskās emisijas signālu mērījumu rezultāti

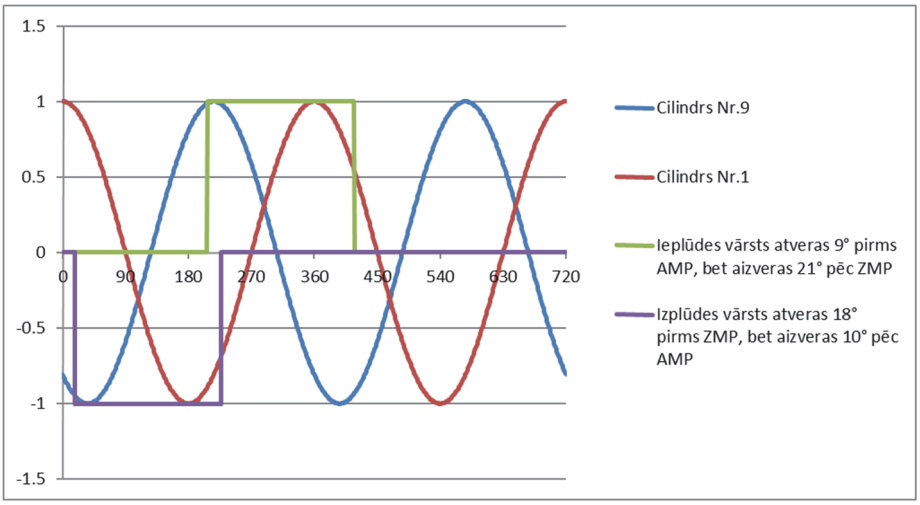
AE grafikos tiek analizēti šādi parametri, atveroties un aizveroties konkrēta cilindra vārstiem:

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

Vārstu siltuma atstarpe bija samazināta no normas:

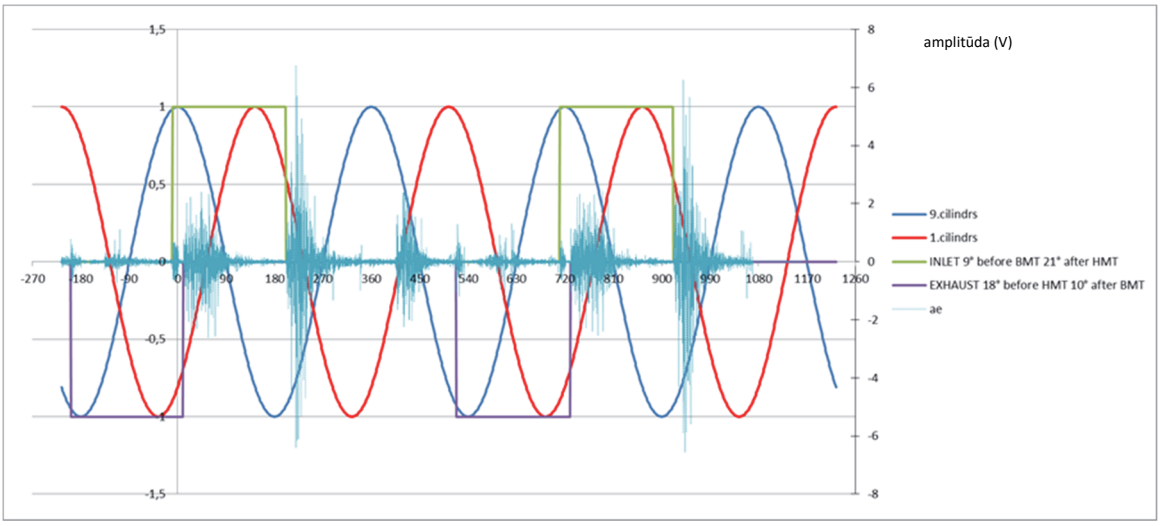
a) ieplūdes vārstam: 0,38 mm uz 0,36 mm;
b) izplūdes vārstam: 1,12 mm uz 1,10 mm.

Dzinēja tehniskais stāvoklis pēc cilindra virzuļa grupas nomaiņas (bezdefekta stāvoklis).

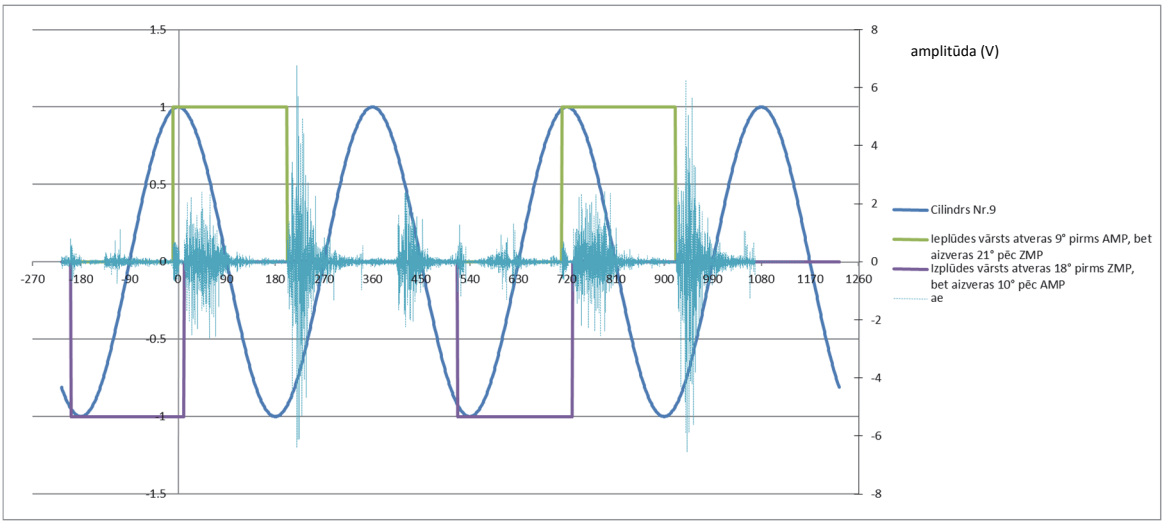


4.11. att. Virzuļu Nr. 1 un Nr. 9 kustības līknes un ieplūdes, izplūdes vārstu darbība (atkarībā no kloķvārpstas pagrieziena leņķa)

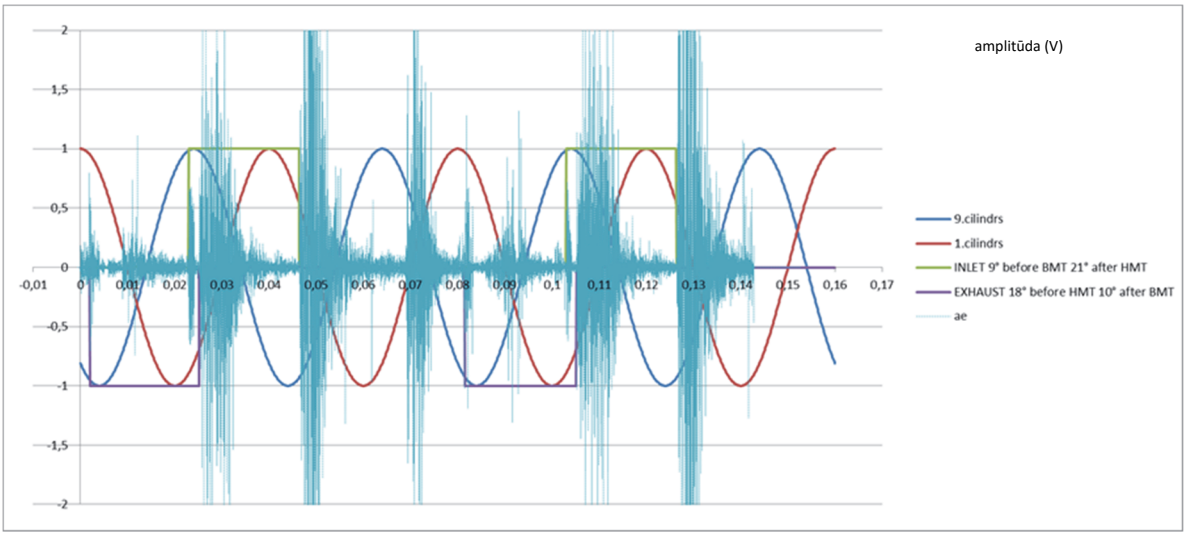
Zemāk atainotajos grafikos ir attēlota vārstu AE bezdefekta stāvoklī un ar augstāk minētiem vārstu defektiem.



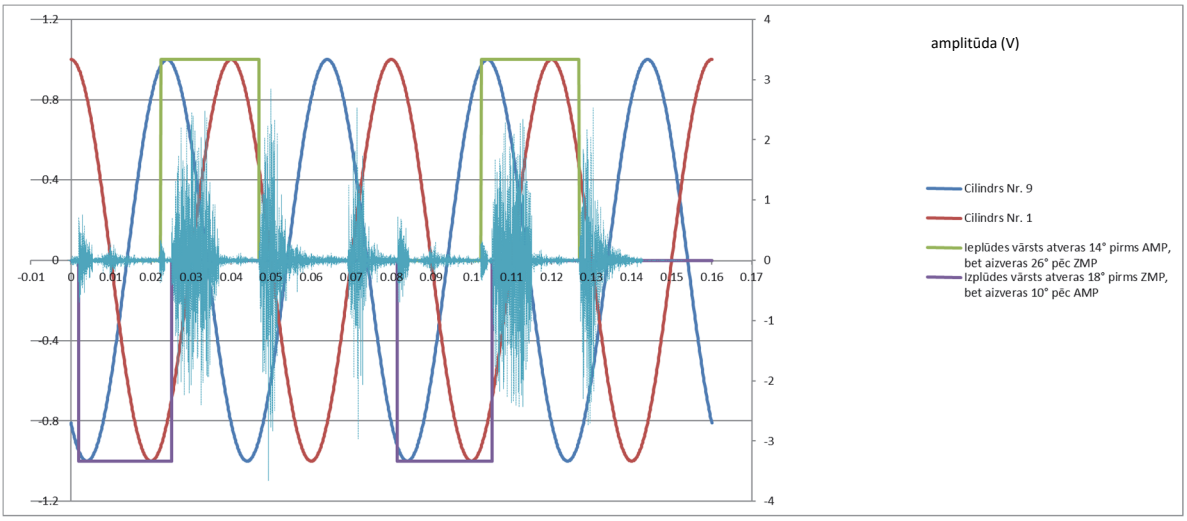
4.12.att. Vārstu darbība ar radīto AE vārstu bezdefekta stāvoklī (atkarībā no kloķvarpstas pagrieziena leņķa)



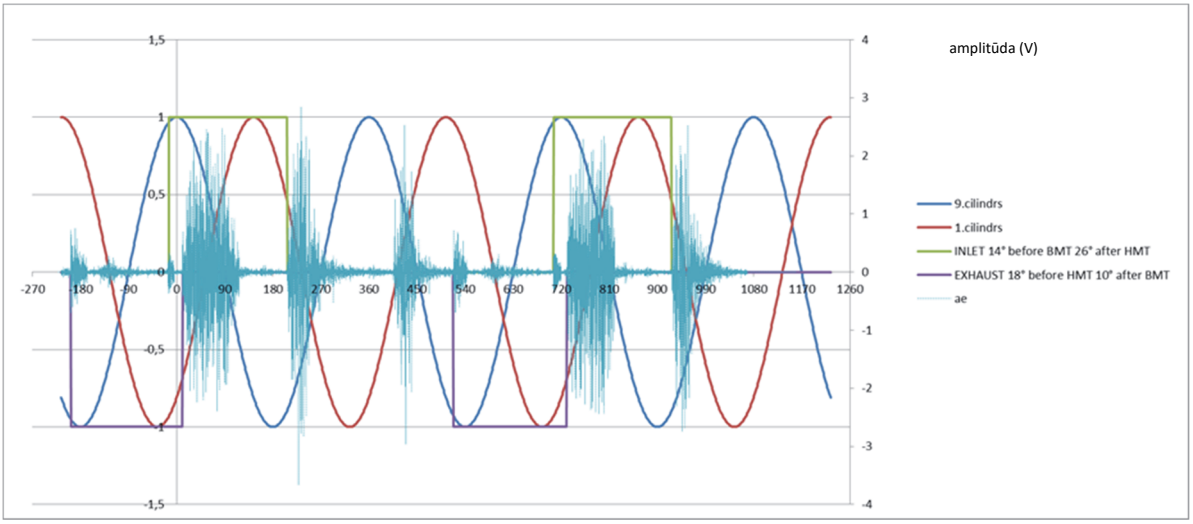
4.13. att. Virzuļa Nr. 9 kustības līkne; ieplūdes un izplūdes vārstu darbība; vārstu radītā AE to bezdefekta stāvoklī (atkarībā no kloķvarpstas pagrieziena leņķa)



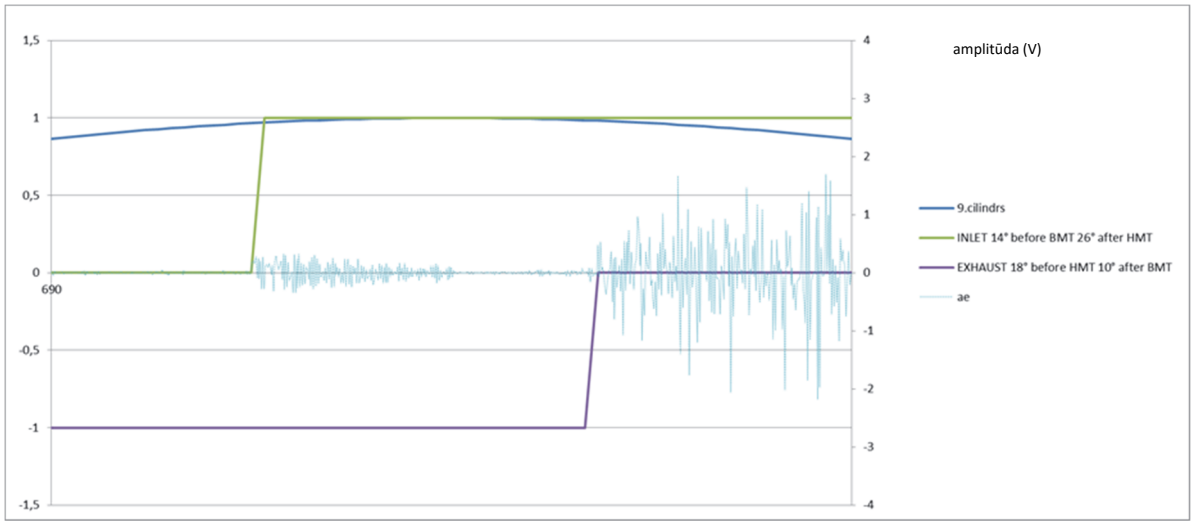
4.14. att. Vārstu darbība ar radīto AE vārstu bezdefekta stāvoklī (atkarībā no laika)



4.15. att. Ieplūdes vārsts ar samazinātu siltuma atstarpi (atkarībā no laika)

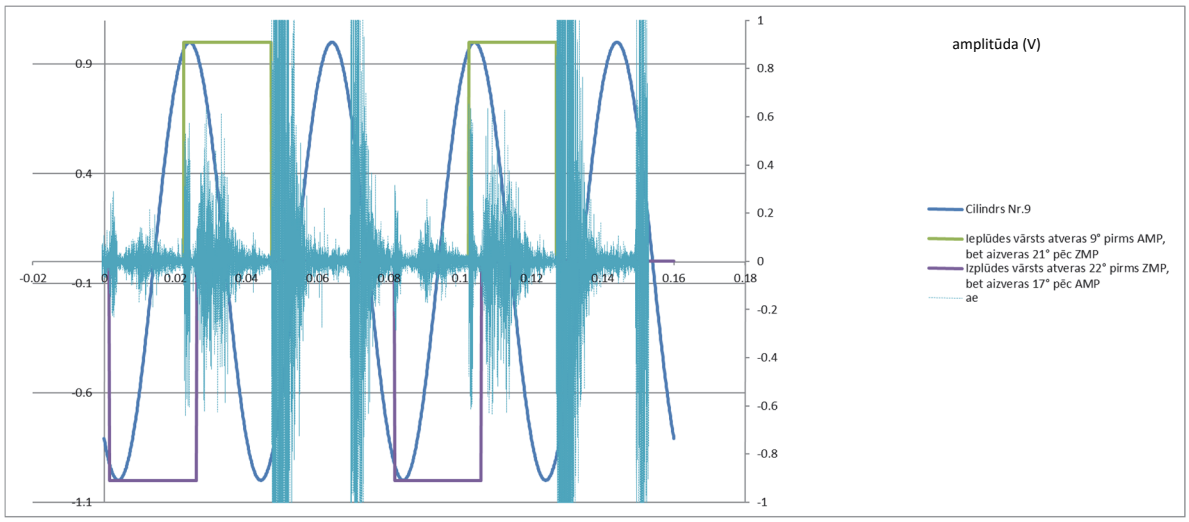


4.16. att. Samazināta siltuma atstarpe ieplūdes vārstam (atkarībā no kloķvārpstas pagrieziena leņķa)

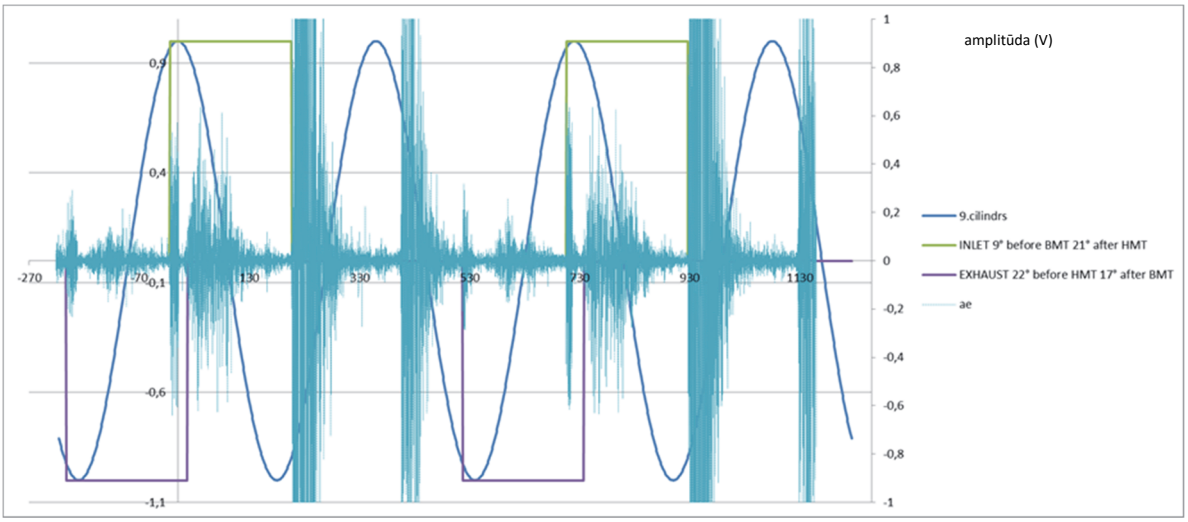


4.17. att. Ieplūdes vārsts atveras 14° pirms AMP

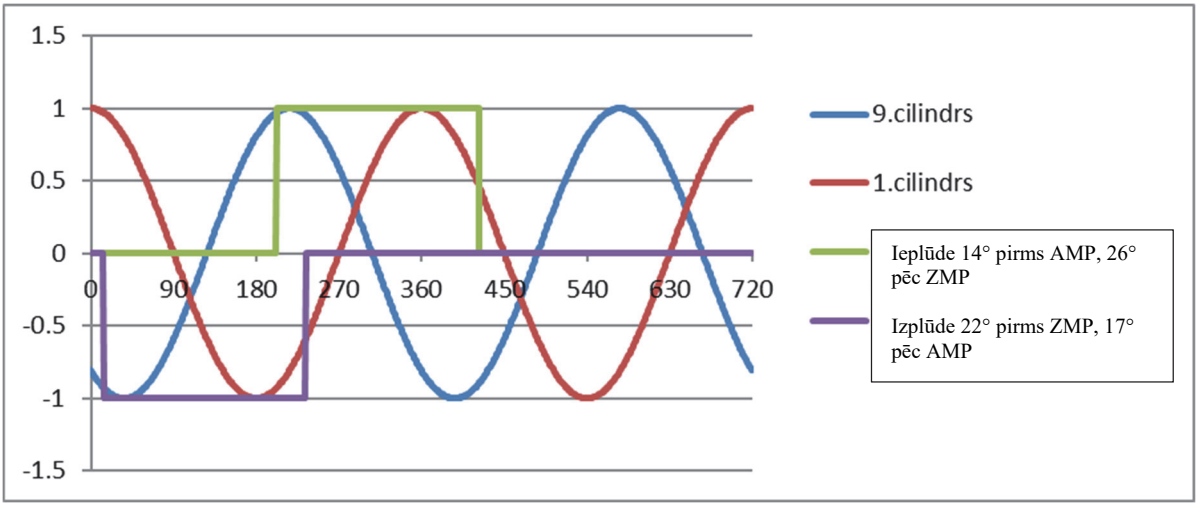
Grafiku analīze rāda, ka vārstu atvēršanās notiek 5 grādus agrāk, bet aizvēršanās – 5 grādus vēlāk. Līdzīga aina vērojama arī izplūdes vārstam ar samazinātu siltuma atstarpi, kad vārsts atveras 4 grādus agrāk, bet aizveras 7 grādus vēlāk (skatīt 4.18. un 4.19. att.).



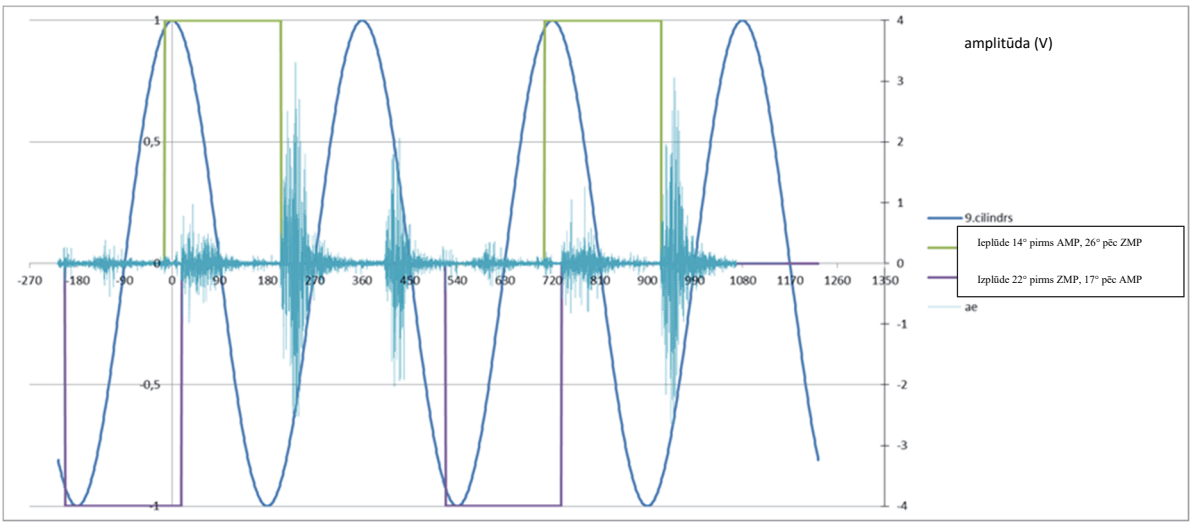
4.18.att. Izplūdes vārsts ar samazinātu siltuma atstarpi (atkarībā no laika)



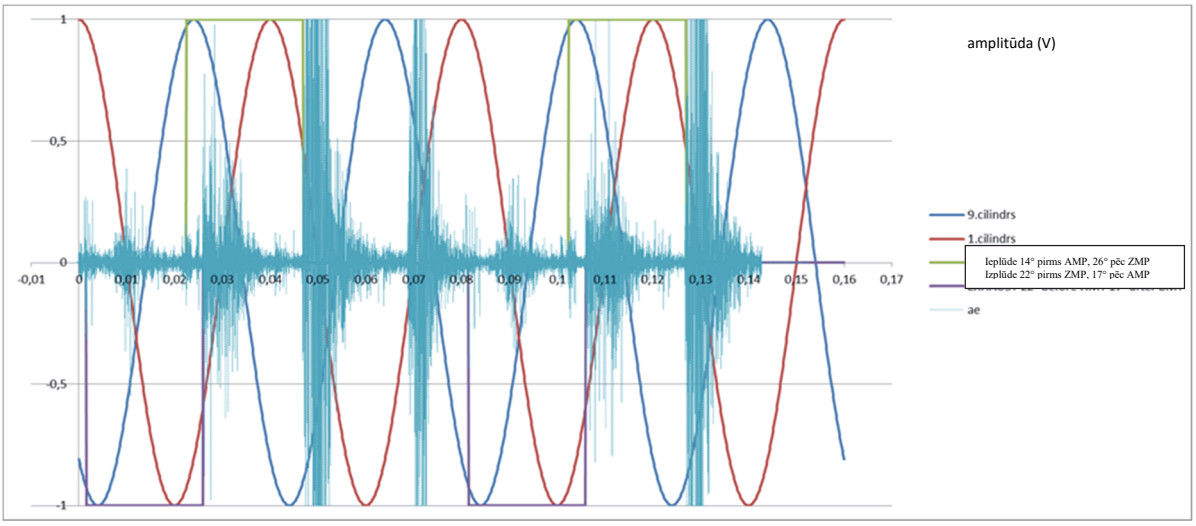
4.19. att. AE izplūdes vārstam ar samazinātu siltuma atstarpi (atkarībā no kloķvārpstas pagrieziena leņķa)



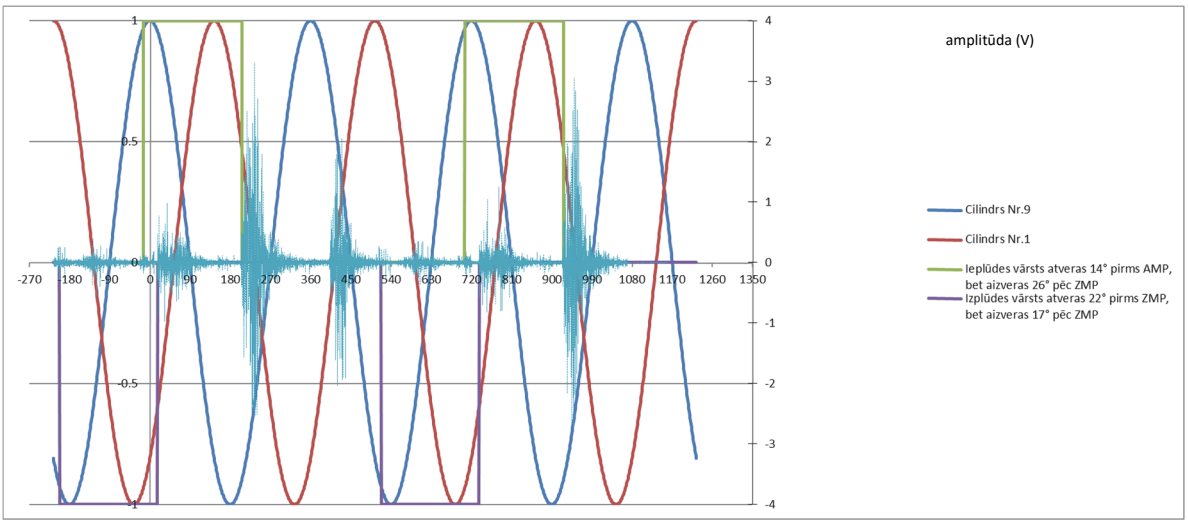
4.20. att. 7.un 9.cilindra virzuļu kustība un 9.cilindra vārstu darbība pie samazinātas siltuma atstarpes



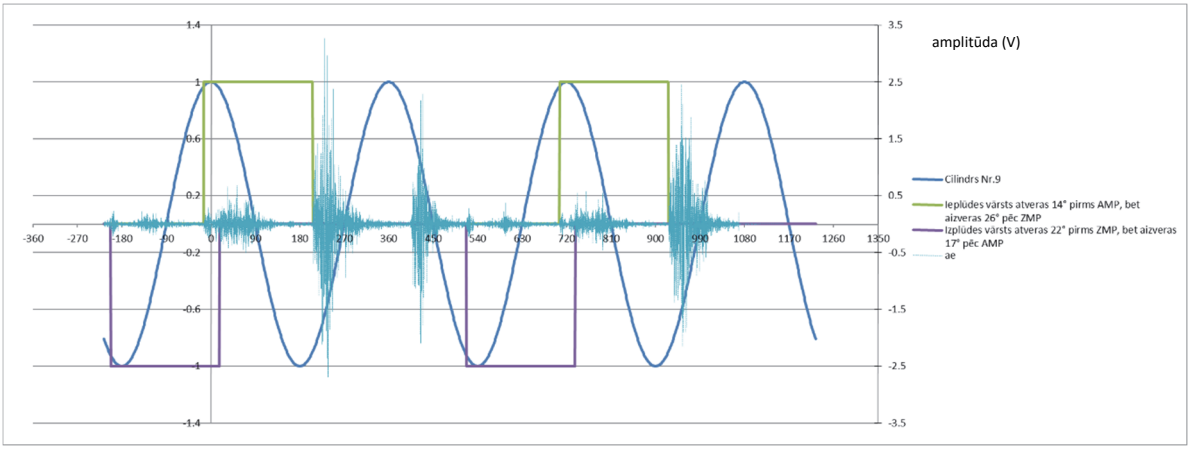
4.21. att. AE no 9.cilindra varstu darbības



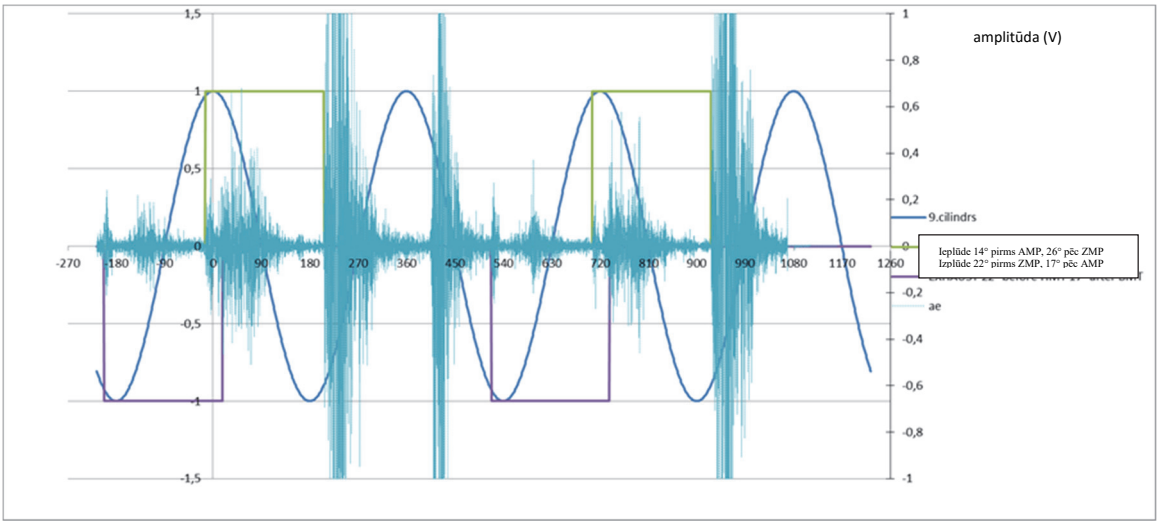
4.22. att. 9.cilindra vārstu AE atkarībā no laika



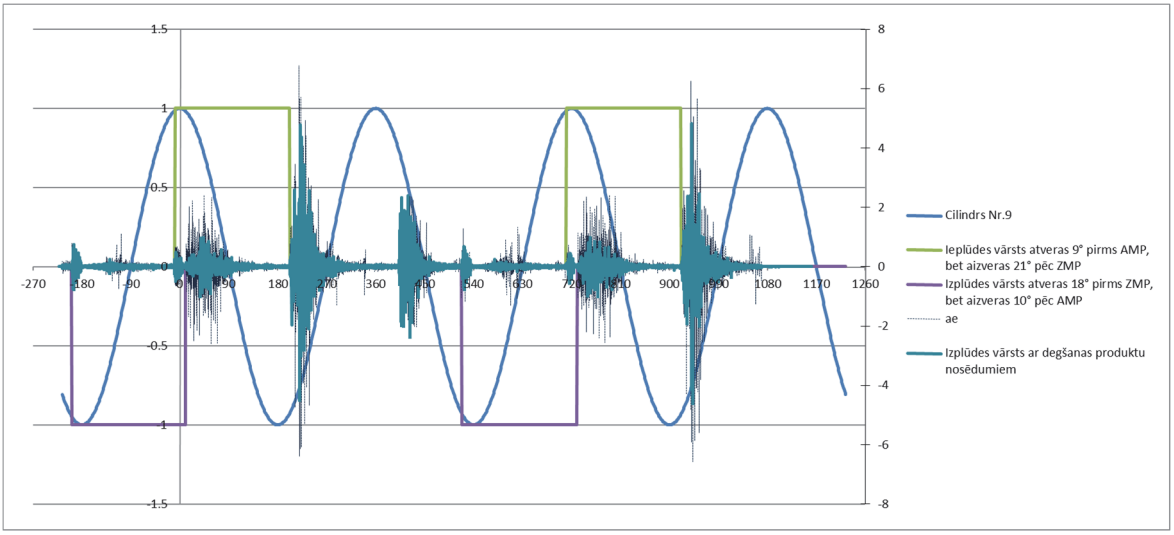
4.23. att. AE no 9.cilindra vārstu darbības- ieplūdes un izplūdes vārstu samazināta siltuma atstarpe atstarpi (atkarībā no kloķvārpstas pagrieziena leņķa)



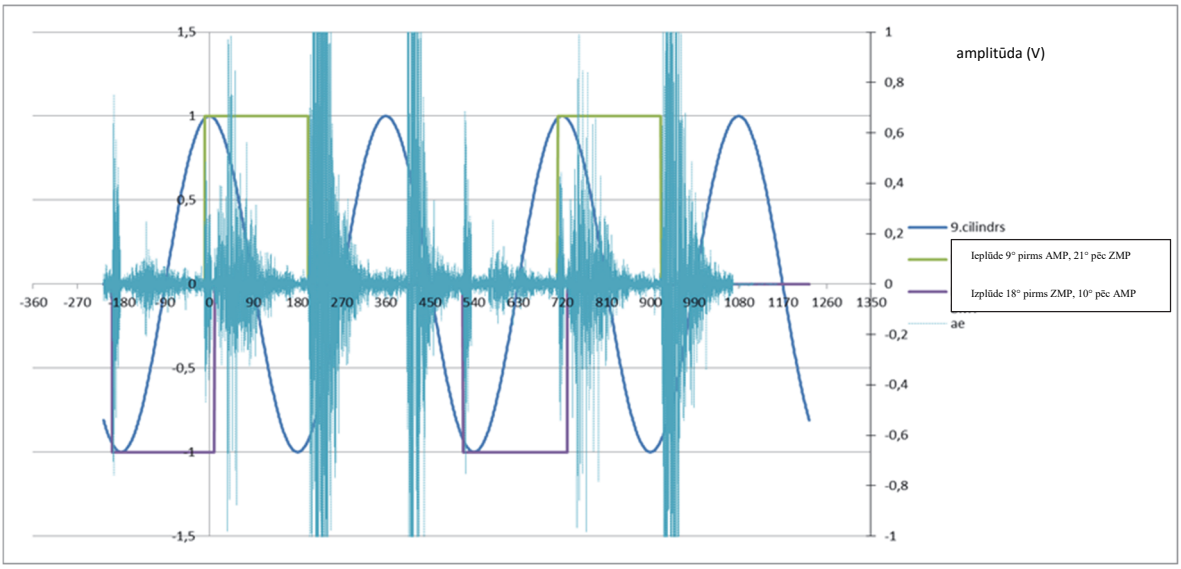
4.24. att. Ieplūdes vārsta ar plaisu akustiskā emisija



4.25. att.AE 9.cilindra ieplūdes vārstam ar plaisu

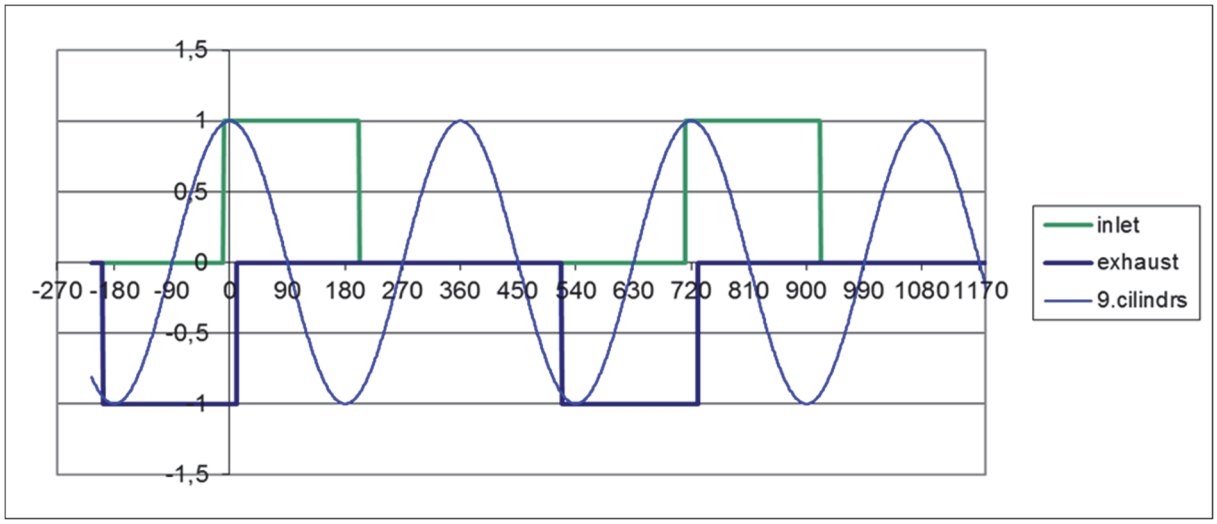


4.26. att. Akustiskā emisija izplūdes vārstam ar degšanas produktu nosēdumiem

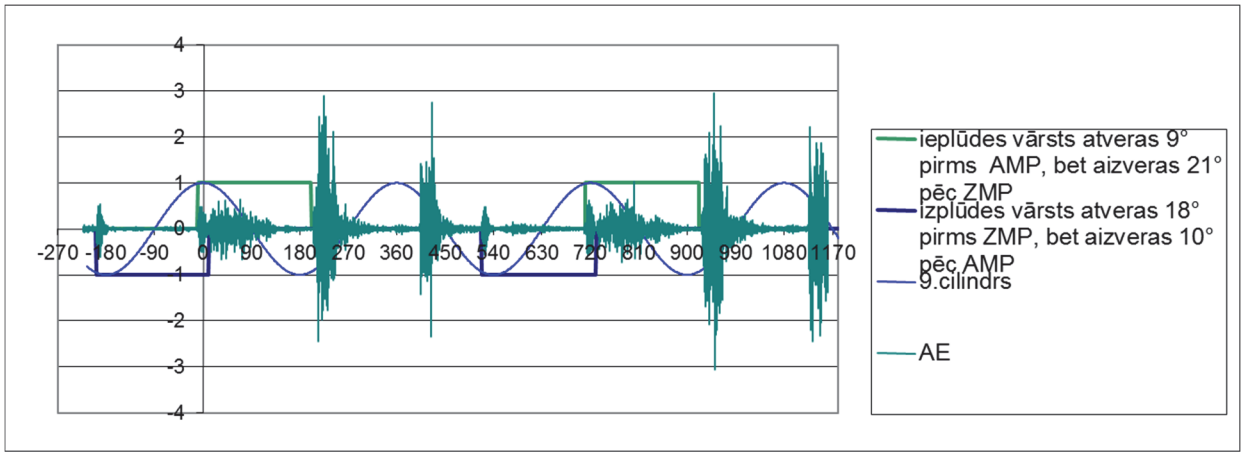


4.27. att. AE no izplūdes vārsta ar degšanas produktu nosēdumiem

Palielināts degšanas produktu nosēdumu slānis uz vārsta un izplūdes traktā izraisa izplūdes trakta šķērsgriezuma laukuma samazināšanos - tiek apgrūtināta cilindra attīrīšanās, līdz ar to rodas zemāka jauda, palielinās degvielas patēriņš un pasliktinās vārsta dzesēšana, t.i., pieaug vārsta temperatūra. Temperatūrai sasniedzot zināmu līmeni, vārstā notiek strukturālas pārmaiņas, kas tajos rada plaisas.



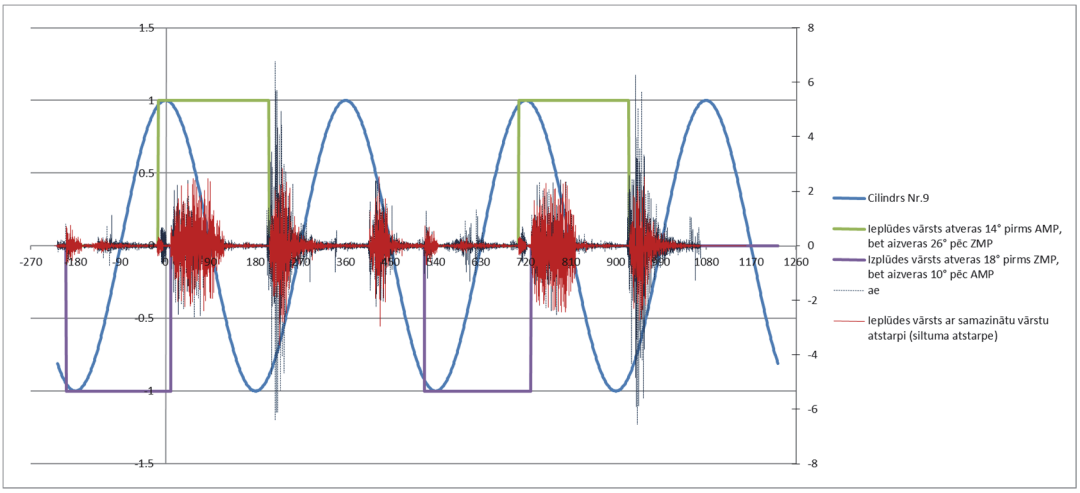
4.28.att. Cilindra Nr. 9 vārstu un virzuļa darbība atkarībā no kloķvārpstas pagrieziena leņķa



4.29. att. Akustiskā emisija izplūdes vārstam ar izdegumiem/mainītu vārsta ģeometriju

4.3.2. AE mērījumu datu apstrādes rezultāti

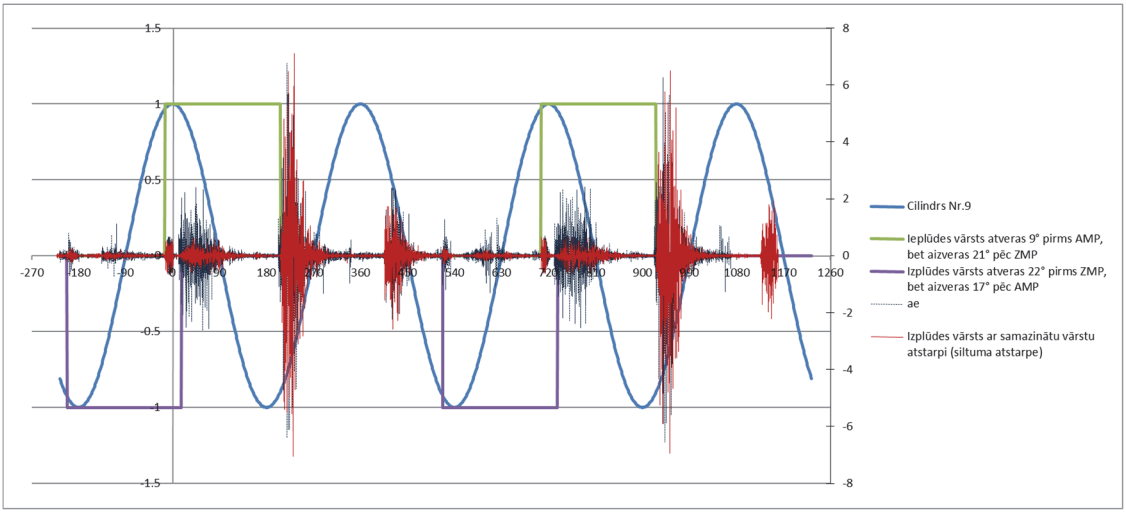
Zemāk atainotajos grafikos ir apkopoti vārstu bezdefekta salīdzinājums ar sešiem vārstu izvēlētajiem tehniskajiem stāvokļiem (sarkkanā krāsa ataino AE defekta stāvoklī).



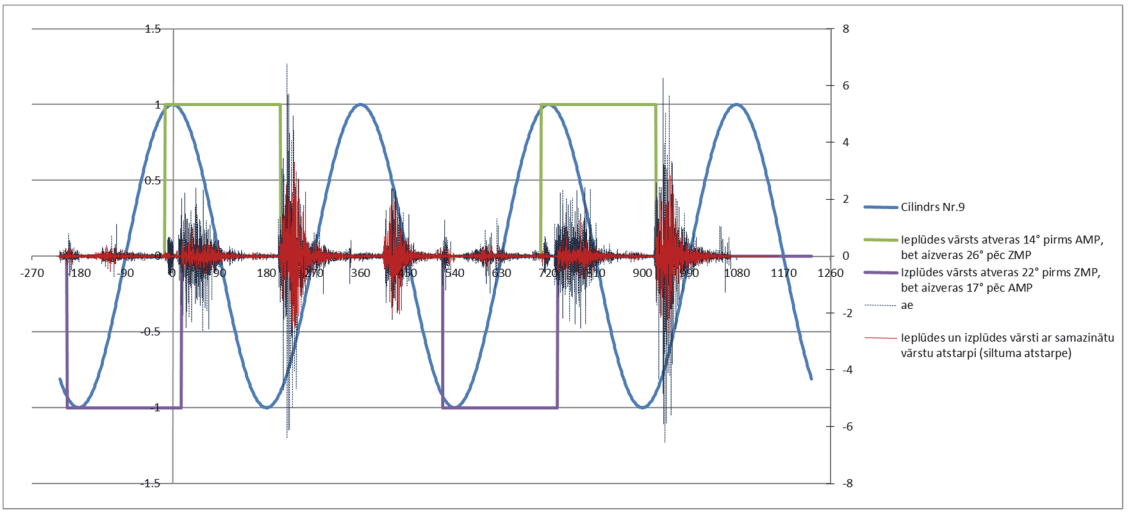
4.30. att. Dzinēja ieplūdes vārsts ar samazinātu siltuma atstarpi

Salīdzinājumā ar vārstu bezdefektu stāvokli redzams, ka AE signāla amplitūda samazinās, īpaši tam aizveroties, samazinās arī signāla ilgums. 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/gāzu sadales mehanismā.

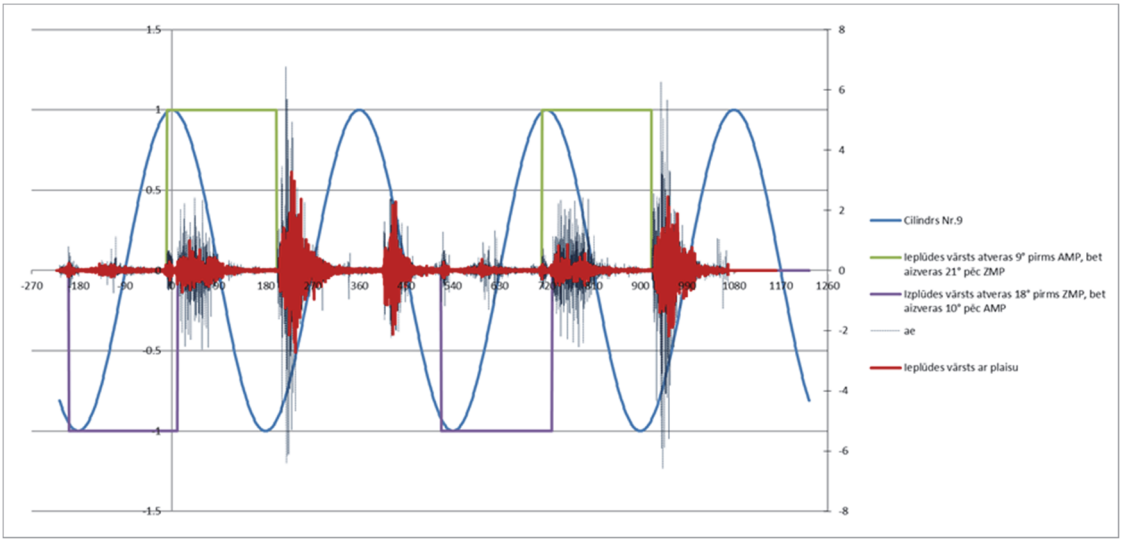
Vārstu siltuma atstarpes tiek regulētas ik pēc 2000 motorstundām ar speciāli pielāgotu mikrometru. Ražotājs rekomendē šo procedūru veikt ik pēc 1000 motorstundām, taču pieredze rāda, ka tik bieža regulēšana nav nepieciešama.



4.31. att. Dzinēja izplūdes vārsts ar samazinātu siltuma atsarpi



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

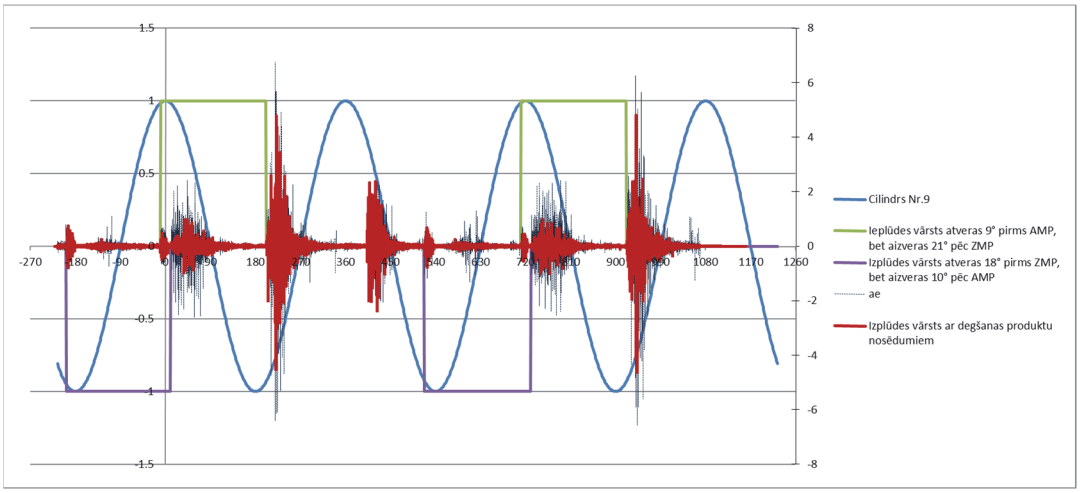


4.33. att. Dzinēja ieplūdes vārsts ar plaisu sākumstadijā

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*", ka, veicot demontēto cilindra galvu un to vārstu inspekciju ar kapilāro metodi (4.9. att.), vienam no ieplūdes vārstiem tika konstatēta mikroplaisa ar atvērumu 0,02 mm un garumu – 4 mm.

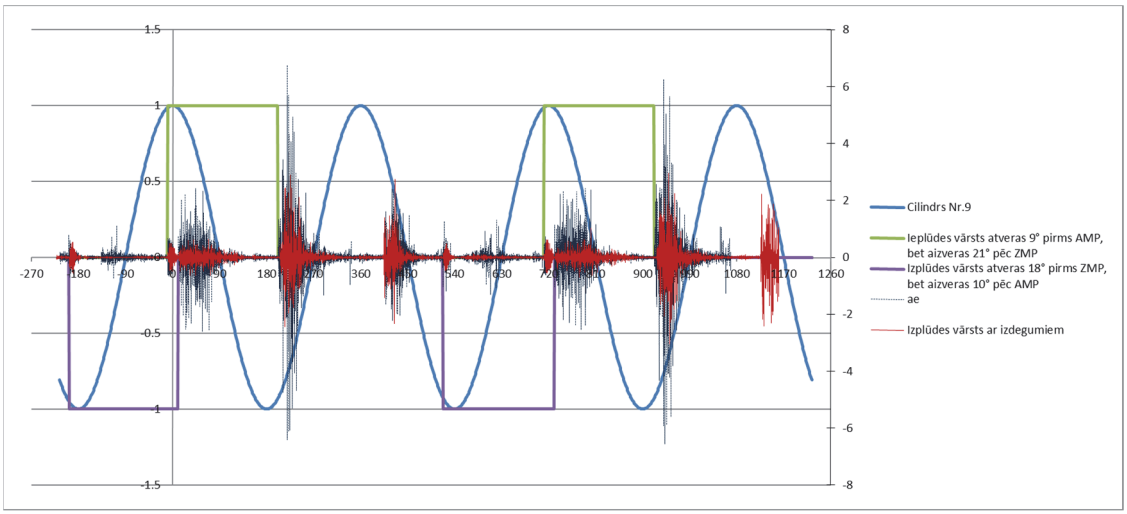
Analizējot AE grafikus, kas iegūti īsi pirms mikroplaisas atklāšanas, novērojams, ka signāla amplitūda samazinājusies, savukārt signāla ilgums pieaudzis.



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

Analizējot 2013. gada rudens mērījumus, kas iegūti īsi pirms 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 mm – 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 vārsta un izplūdes traktā, samazinās AE signāla amplitūda jo nosēdumu slānis bremzē AE viļņu izplatību, bet tā ilgums palielinās, jo nosēduma slāņa pārvarēšana prasa ilgāku laiku.



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

No grafika redzams, ka, mainoties vārsta ģeometrijai, samazinās signāla amplitūda, kas skaidrojams ar mazāku vārsta kontatkvirsmu.

Analizējot un savietojot vārstu darbības AE mērījumu grafikus dzinēja bezdefekta stāvoklī ar mērījumu grafikiem, 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.

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 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, jo 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*" 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 (4.34. att.).

Veicot eksperimentālos mērījumus tika secināts:

1. ja vārstiem ir samazināta siltuma atstarpe, izmainās gāzu apmaiņas cikls un samazinās gan amplitūda, gan nedaudz samazinās 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.

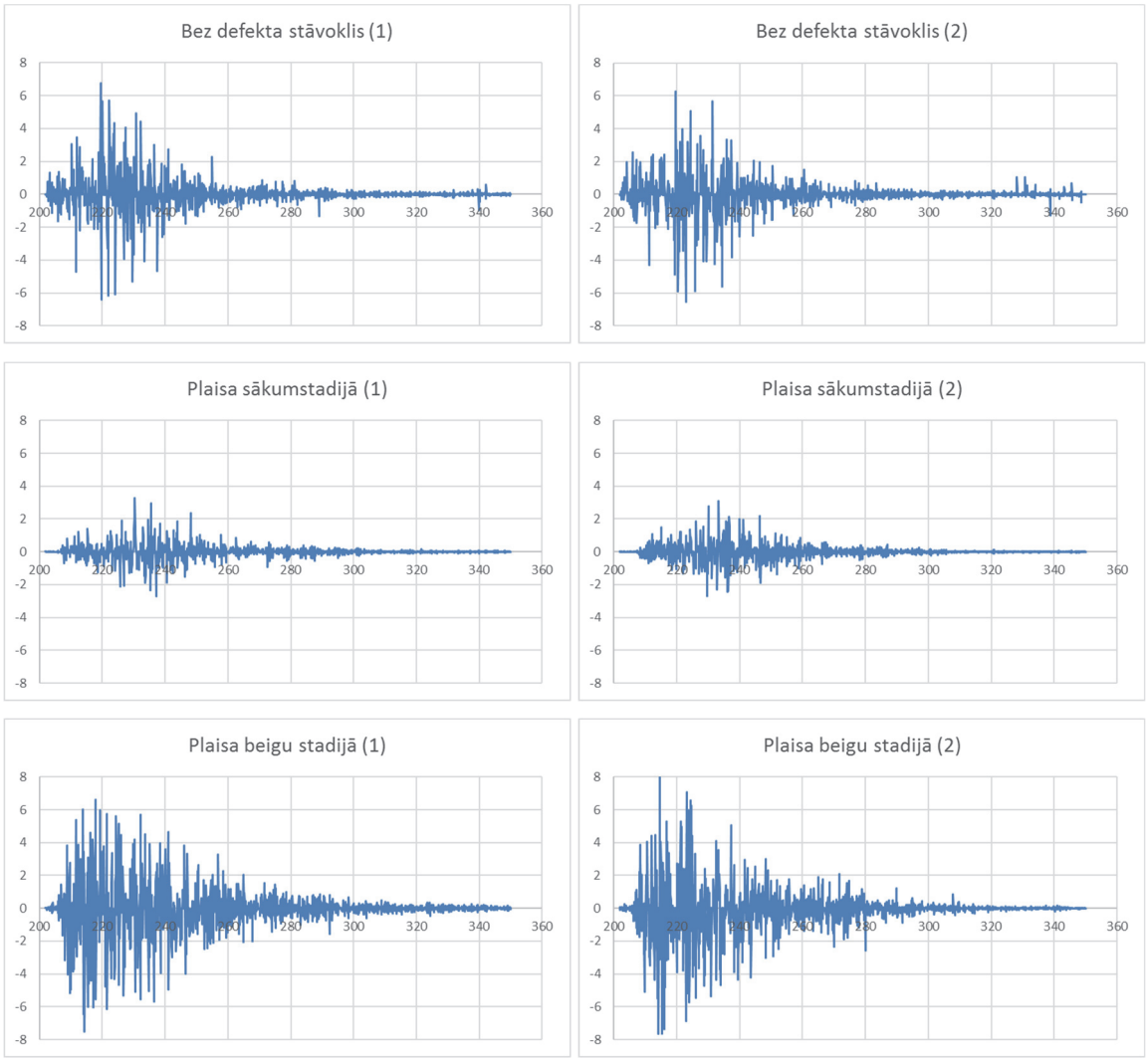
Tā kā plaisas vārstos ir visbīstamākie defekti, kas var izraisīt dzinēja avāriju (skat. 1.19. un 1.20. att.). Detalizētākai analīzei tika izvēlēti šādi ieplūdes vārsta ar plaisu stāvokļi:

1) Sešas vārsta aizvēršanās bezdefekta stāvoklī.
2) Sešas vārsta ar plaisu sākumstadijā aizvēršanās.
3) Sešas vārsta ar plaisu beigu stadijā aizvēršanās (pirms plānotās apkalpošanas).

Pamatojoties uz RTU iepriekš veiktajiem pētījumiem, analizējot mērījumos iegūtos datus tika pieņemts, ka slieksnis derīgo signālu atfiltrēšanai ir 0,6, tas nozīmē, ka signāli, kas ir augstāki par 0,6, tiek uzskatīti par iegūtiem no vārstu darbības, bet signāli, kas zemāki par 0,6 tiek pieņemti par blakustrokšņiem no paša dzinēja vai blakus esošu mehānismu darbības.

Uzskatei redzamajos grafikos attēloti tikai divi no sešiem AE signāliem:

1) AE signāli, vārstam aizvēroties bezdefekta stāvoklī.
2) AE signāli, vārstam ar plaisu sākumstadijā aizveroties.
3) AE signāli plaisas beigu stadijā (pirms atklāšanas).



4.35. att. Mērījumu grafiskais attēlojums vārstam ar plaisu

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

Pamatojoties uz 4.1. tabulu, tiek noteikta mērījumu dispersija. Ar jēdzienu dispersija tiek saprasta vidējā kvadrātiskā novirze no aritmētiskā vidējā. Eksistē:

1. Ģenerālkopas (visi pētāmie objekti) dispersija, apzīmē ar σ^2 (sigma).
2. Izlases (atlasītie ģenerālkopas dati) dispersija, apzīmē ar s^2.

Standartnovirze raksturo variansu izkliede ap vidējo aritmētisko.

1. Ģenerālkopas standartnovirze, apzīmē ar σ.
2. Izlases standartnovirze (vidējā kvadrātiskā novirze), apzīmē ar s.

Variantu izkliede ap vidējo vērtību raksturo pazīmes stabilitāti – pazīme ar mazāku izkliedi ir stabilāka.

(4.1.)

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x - \bar{x})^2}{n}$$

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x - \bar{x})^2}{n - 1}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x - \bar{x})^2}{n}}$$

Statistisko datu apstrādei tika izmantotas lielumu vidējās vērtības $s^2 = 1/(n-1)*\Sigma(Xi-X)*(Xi-X)$, dispersija $\sigma^2 = (1/n)*\Sigma(Xi-X)*(Xi-X)$ un vidējā kvadrātiskā novirze $\sigma = sqrt((1/n)*\Sigma(Xi-X)*(Xi-X))$ – skatīt Pielikumā Nr. 6.

Pamatojoties uz attēla (4.36. att.) datiem, tiek veikts vidējo lielumu salīdzinājums pēc to absolūtām vērtībām ieplūdes vārsta šādos stāvokļos (4.37. att.):

a) bezdefekta (*Normal*);
b) plaisas beigu stadijā (*Crack Final*);
c) plaisas sākuma stadijā (*Crack Initial*),

Līdzīgā veidā tika aprēķināta vidējā kvadrātiskā novirze σ (4.38. att.).

4.2. tabula

Vidējo vērtību salīdzinājums

	Abs Value					
	N-CrF	(N-CrF)/N	N-CrI	(N-CrI)/N	CrF-CrI	(CrF-CrI)/CrF
Max	-1,47122	-0,22223	3,692078	0,557684	5,1633	0,638107
AnglMax	6,050455	0,027465	-11,3105	-0,05134	-17,361	-0,08103
FirstAngl	-1,98	-0,00976	-6,915	-0,0341	-4,935	-0,0241
LastAngl	-13,275	-0,04693	3,42	0,01209	16,695	0,056374
Aver	-0,07297	-0,15316	0,290155	0,609018	0,363123	0,660946
RiseTime	0,000885	0,456186	-0,00069	-0,35567	-0,00158	-1,49289
DownTime	-0,00214	-0,30747	0,001367	0,19636	0,003507	0,385348
Rise	7,965	0,456186	-6,21	-0,35567	-14,175	-1,49289
Down	-19,26	-0,30747	12,3	0,19636	31,56	0,385348
TimeFirst	-0,00022	-0,00976	-0,00078	-0,03462	-0,00056	-0,02462
TimeLast	-0,00148	-0,04693	-0,0001	-0,00329	0,001372	0,041686
TimeMax	0,000665	0,027176	-0,00147	-0,06007	-0,00214	-0,08969

Tabulā redzams, ka vislabāk vārsta diagnosticēšanai noder:

a) maksimālā AE amplitūda vārsta aizvēršanās laikā;

b) AE signāla pieauguma un dilšanas laiks.

Atšķirība starp bezdefekta (*Norm)* un plaisas beigu stādijā (*Final)* vārsta stāvokli (**N-CrF)/N**) ir 22 % (maksimālā amplitūda). Signāla pieaugšanas laiks (*Rise*): 45,6 %. Signāla dilšanas laiks (*Down*): 30,7 %.

Bezdefekta (*Normal): CrInit*

Atšķirība starp bezdefekta (*Norm)* un plaisas sākuma stadijā *Init* vārsta stāvokli (**N-CrI)/N)** ir 55,7 % (maksimālā amplitūda). Signāla pieaugšanas laiks (*Rise*): 35,5 %. Signāla dilšanas laiks (*Down*): 19,6 %.

CrI: CrF

Atšķirība starp plaisas sākumstadijā (*CrI)* un plaisas beigu stadijā (*CrF)* vārsta stāvokli ir 63,8 % (maksimālā amplitūda). Signāla pieaugšanas laiks (*Rise*): 149 %. Signāla dilšanas laiks (*Down*): 38,5 %.

Ņemot vērā būtisko atšķirību starp vārsta dažādu stāvokļu lielumiem, var teikt, ka izvēlētie kritēriji bijuši pareizi.

4.3. tabula

Vidējā kvadrātiskā novirze σ

	sigma					
	N-CrF	(N-CrF)/N	N-CrI	(N-CrI)/N	CrF-CrI	(CrF-CrI)/CrF
Max	0,07729	0,40152	0,08806	0,45746	0,01077	-0,03991
AnglMax	0,941931	0,680031	-0,6502	0,46941	1,59213	-3,59236
FirstAngl	-0,92114	-1,82843	-0,68501	-1,35972	0,23613	0,165714
LastAngl	-5,02367	-1,66592	-4,73281	-1,56946	0,290863	0,03618
Aver	0,081846	0,782877	0,088222	0,843857	0,006375	0,280854
RiseTime	6,2E-07	0,003688	-7,9E-05	0,46835	-7,9E-05	-0,47379
DownTime	-0,00053	-1,48586	-0,00061	-1,6924	-7,4E-05	-0,08309
Rise	0,005583	0,003688	-0,70911	0,46835	0,71469	-0,47379
Down	-4,79372	-1,48586	-5,46006	-1,6924	0,66634	-0,08309
TimeFirst	-0,0001	-1,82843	-7,7E-05	-1,3689	2,57E-05	0,162466
TimeLast	-0,00056	-1,66592	-0,00065	1,94669	-9,4E-05	-0,10532
TimeMax	0,000104	0,679673	-0,00011	0,71034	-0,00021	-4,33934

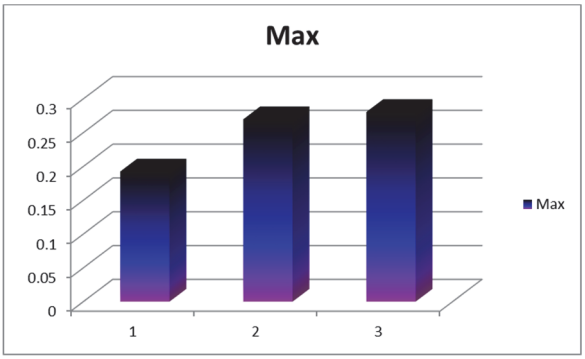
(N-CrF)/N= 40 % (maksimālā amplitūda). Signāla pieaugšanas laiks (*Rise*): 0,3 %. Signāla dilšanas laiks (*Down*): 148 %.

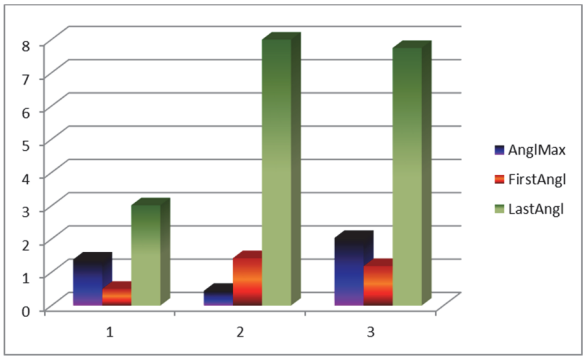
(N-CrI)/N= 45,7 % (maksimālā amplitūda). Signāla pieaugšanas laiks (*Rise*): 46,8 %. Signāla dilšanas laiks (*Down*): 169 %.

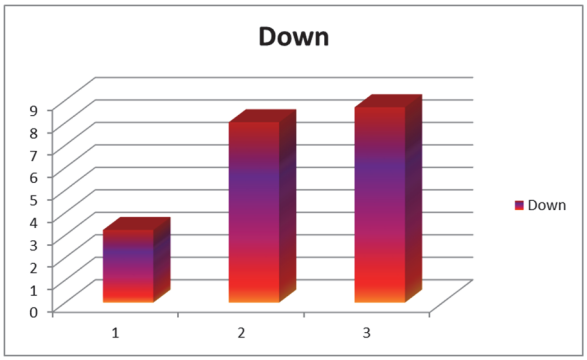
(CrF-CrI)/CrF= 3,9% (maksimālā amplitūda). Signāla pieaugšanas laiks (*Rise*): 47 %. Signāla dilšanas laiks (*Down*): 8,3 %.

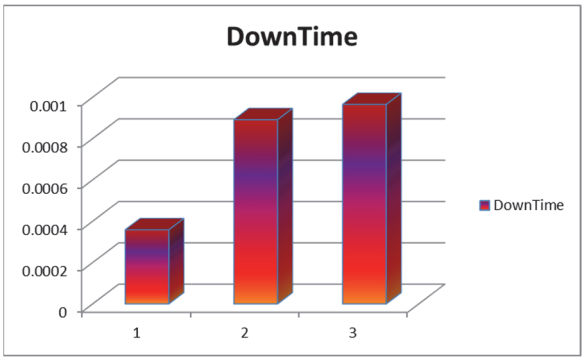
Secināms, ka vidējā kvadrātiskā novirze ir plaša, taču vienlaikus neizkropļo diagnosticēšanas rezultātus. No augstāk minētajiem skaitļiem redzams, ka dažādos gadījumos vidējā kvadrātiskā lieluma dispersija būtiski atšķiras.

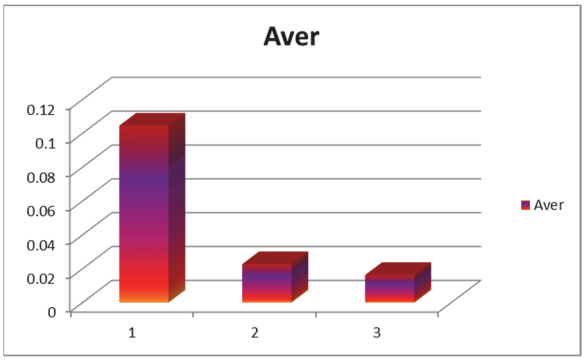
Zemāk attēlotās diagrammās uzskatāmi parādīti dati no 4.1. un 4.2. tabulām, kur uz abscisu ass 1- vārsta bezdefekta stāvoklis, 2 – plaisas beigu stadija, 3 – plaisas sākumstadija.

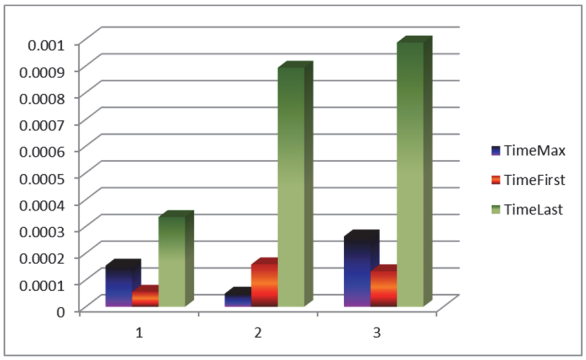


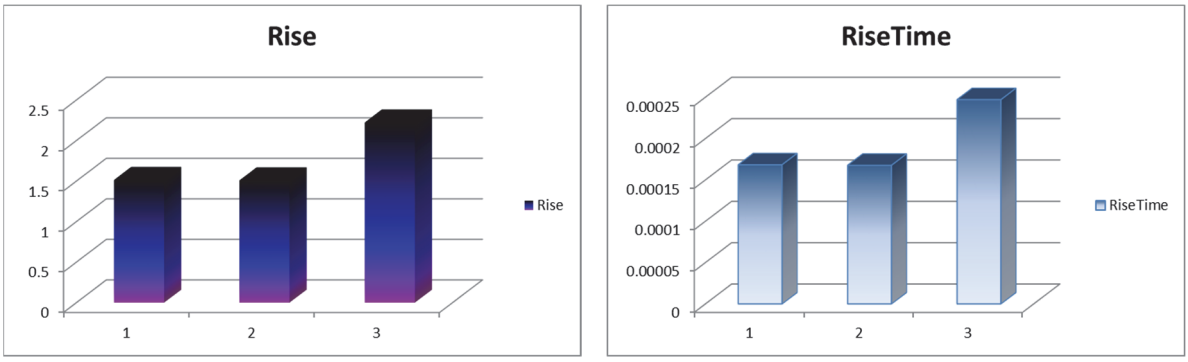












4.39. Iegūto datu grafiskais attēlojums

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

SECINĀJUMI

Promocijas darba mērķis bija, izmantojot akustiskās emisijas (AE) signālu mērījumus, izstrādāt kuģu dīzeļdzinēju akustiskās diagnostikas metodologiju dzinēja defektu agrīnai noteikšanai, kas atbilstu tehniskā stāvokļa uzraudzības sistēmas (*Condition Based Maintenance* - *CBM*) prasībām.

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). Mūsdienās, 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 atveruma 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 fiksēta ar kapilāro metodi (tika konstatēta 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 paaugstināts nosēdumus uz izplūdes vārsta un cilindra galvas

izplūdes traktā veidoja gaiši brūni degšanas produkti: 0,3-0,6 mm, kas tika fiksēts 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.

PIELIKUMI

Akustiskās emisijas mērījumu veikšanas protokolu paraugs

WITRAKTOR CAT

PROTOKOLS

Par akustiskās emisijas (AE) mērījumu veikšanu dzinējam CAT G3520C

Š. g. 14. maijā Rīgas Tehniskās universitātes Aeronautikas institūta pārstāvji veica dzinēja CAT G3520C, s/n GZN00302, (atrodas a/s "Valmieras enerģija" īpašumā, Valmierā, Dzelzceļa ielā 7, tehnisko apkalpošanu veic SIA Witraktor, CAT oficiālais pārstāvis Latvijā) AE mērījumus ar mērķi:

- noteikt dzinēja pašreizējo tehnisko stāvokli, izmantojot AE datus;
- veikt dzinēja monitoringu ekspluatācijas laikā;
- sekot ieplūdes un izplūdes vārstu teniskā stāvokļa izmaiņām;
- izstrādāt kuģu dīzeļdzinēju tehniskā stāvokļa diagnostiku defektu agrīnai konstatēšanai, kuras pamatā ir akustiskās emisijas priekšrocības.

Dzinēja galvenie parametri (sīkāku inform.sk.pielikumā):
Tips: dabasgāzes koģenerācijas stacija
Modelis: G3520C
N°: GZN00302
Būves gads: 2006
Nominālā jauda: 2000 kW
Apgriezieni: 1500 apgr./min

Dzinēja darba parametri mērījumu laikā:
Jauda: 1630 kW
Apgriezieni: 1500 apgr./min
Iepūdes gaisa t°: 34°C
Cirkulācijas eļļas t°: 95°C
Darba stundu skaits: 47280

Izmantotā mērījumu aparatūra: (sīkāku inform.sk.piclikumā)
Nosaukums: Pocket PACK AE-2
N°: 8520232001
Ekspluatācijas t°: -5°C līdz 45°C

Witraktor pārstāvis: E. Kovals
RTU pārstāvis: J. Feščuks
RTU doktorants: A. Unbedahts

2013. gada 14. maijā

Witraktor SIA

„Ziedu Gravas"
Mārupes nov., LV-2167
Latvija/Latvia
+371 67703513 tel
+371 67703567 fax
www.witraktor.lv

Nordea Bank plc Latvijas filiāle/Nordea Bank plc Latvia branch
SWIFT NDEALV2X
LV36NDEA0000080005892 (LVL), LV94NDEA0000080005915 (EUR)
LV62NDEA0000080159751 (USD)
Reģistrācijas Nr./registration No. 40003441517
PVN reģistrācijas Nr / VAT registration No. LV40003441517

2. pielikums

Atsauksme par akustiskās emisijas metodes lietderīgumu

Transport Claims Consultants Network c.v.b.a.

P & I Club Correspondents - Average Adjusters - Crisis Control Officers - Marine Surveyors

Keizerstraat 66, B-2000 Antwerp (Belgium)
Tel: +32(0)3 218.98.80 – Fax: +32(0)3 281.35.55 – info@tccn.be
Bankers: KBC BE75 4096 5835 9151/INGBE18 3200 8548 5665 – BTW BE0464.719.575
RPR Antwerpen

JP. Vanhooff	Direct +32(0)3.287.38.91	Mobile +32(0)475.51.88.11	E-mail: JP.Vanhooff@tccn.be
A.Unbedahts	Direct+32(0)3.287.38.95	Mobile+32(0)490.41.00.17	E-mail :Andris.Unbedahts@tccn.be
I.Yavorskiy	Direct +32(0)3 287.36.98	Mobile +32(0)490.45.62.55	E-mail :Igor.Yavorskiy@tccn.be

Mr. Andris Unbedahts
C/o Riga Technical University

Antwerp, 20 juni 2013

Dear Sir,

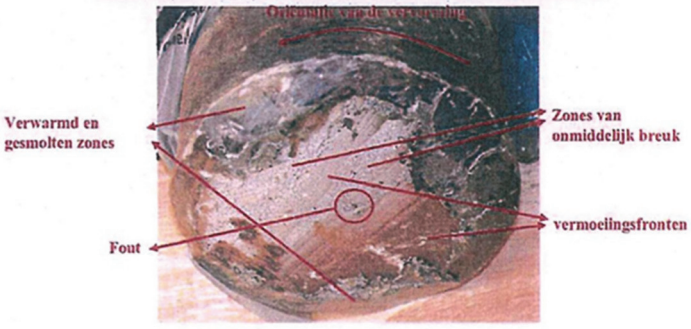
Re : Ships' hull and engines monitoring influence on maritime safety improvement

We read with great interest the article which you prepared on AE testing of hulls and engines of vessels.
We are indeed regularly involved in dealing with the negative consequences of cracks developing in ships' hulls and in engine parts, which lead to huge problems, affecting the safety of the vessel and her crew, her cargo and possibly cause a threat to the marine environment.
We fully concur with your description of the various problems that could be encountered in the shipping industry.

We had already word with Engine Deck Repair in Antwerp, who are specialized in both Hull and Engine maintenance and repairs for shipowners. They definitely see the advantage of this AE testing program, but would like further details on how actually it could be installed on vessels, what the cost would be, what training of the Engine crew would be required etc.
Therefore, we can only but strongly suggest that you perform further analysis of this AE testing program, and keep us informed about your results, so that we could see, together with our Principals, how to implement this testing method on board of their ships.

But we also recently were involved in a similar crack developing over the years in the axle of a (cargo)railway wagon, leading to a big derailment. Luckily, there were no casualties, but the material damage was tremendous. Had the crack been detected by AE during routine maintenance of the axle (which is perfectly possible because it is a

NDT), the defective axle would have been replaced and the derailment would never have occurred.



Therefore, we would kindly ask you not to confine your study on the application of AE testing to the shipping industry, but also to include the railroads, as we get more and

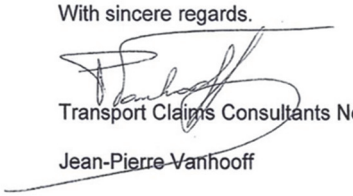
more High Speed Trains, and that security of the passengers is of the outmost importance.

We would kindly ask you to keep us closely informed about the progress of your research, as this is surely going to improve the safety of the marine (and railroads) industry as a whole.

Meanwhile, we wish you good luck, and look forward to hearing from you.

Meanwhile, we remain,

With sincere regards.



Transport Claims Consultants Network cvba

Jean-Pierre Vanhooff

Atsauksme par akustiskās emisijas metodes lietderīgumu

Africa Marine Surveys (Overseas) cvba

AFRICA MARINE SURVEYS (Overseas) cvba

Kipdorp 53, B-2000, Antwerpen, Belgium
TEL : +32 (0)3 287.38.99 FAX : +32 (0)3 475.22.34
E-mail : info@africamarine.be
Bankers : BBL 320-0854752-58

Risk Managers - Surveyors - Crisis Control Managers
Marine Claims Consultants

Mr. Andris Unbedahts
c/o Riga Technical University

RE: **SHIPS HULL AND ENGINES MONITORING INFLUENCE ON MARITIME SAFETY IMPROVEMENT**

All ships' condition monitoring systems commonly in use today are based on a periodical approach. Every ship classed by particular technical condition monitoring body is subject to inspections to confirm that it has still conformed to applicable rules and her inevitable wear and tear has still been within acceptable limits. These inspections however are carried out through defined time intervals.

The suggested technique appears to be able to fill the gap between inspections intervals and tends to establish the kind of continuous condition monitoring system which would allow for the defects to be identified on the very early stage, thus allowing to avoid major mechanisms and structures breakdowns, increasing the efficiency of ships' operation and eventually contributing significantly to the safety in general.

Sincerely yours,
I. Yavorskiy
MICS, MIIMS, RMC, DipMarSur

Antwerpen, June 20, 2013

1

"*Caterpillar*" dīzeļdzinēja tehniskā informācija

WITRAKTOR CAT

Service Information System

Previous Screen

Welcome: x350edk

Product: GENERATOR SET
Model: G3520C GENERATOR SET GZN00303
Configuration: G3520C Generator Set GZN00001-UP

Operation and Maintenance Manual
G3500 Generator Sets
Media Number -SEBU7681-19 **Publication Date -01/10/2014** **Date Updated -09/10/2014**

i03852589

Engine Valve Lash and Bridge - Check

SMCS - 1102-535; 1121-535

WARNING

Ignition systems can cause electrical shocks. Avoid contacting the ignition system components and wiring.

Do not attempt to remove the valve covers when the engine is operating. The transformers are grounded to the valve covers. Personal injury or death may result and the ignition system will be damaged if the valve covers are removed during engine operation. The engine will not operate without the valve covers.

For procedures on adjusting the valve bridge and the engine valve lash, refer to the following publications:

- Special Instruction, REHS0128, "Using the 147-5482 Indicator Gauge for Valve Lash and Valve Bridge Adjustment"
- The Systems Operation/Testing and Adjusting manual for the engine
- The Specifications manual for the engine

Consult your Caterpillar dealer for assistance.

Valve Bridge

Check the valve bridge and adjust the valve bridge, if necessary. Perform the procedure for both valve bridges for each cylinder.

After the valve bridge for each cylinder is satisfactory, measure the valve lash.

Engine Valve Lash

NOTICE

Only qualified service personnel should perform this maintenance. Refer to the Service Manual or your Caterpillar dealer for the complete valve lash adjustment procedure.

Operation of Caterpillar engines with improper valve adjustments can reduce engine efficiency. This reduced efficiency could result in excessive fuel usage and/or shortened engine component life. Improper valve lash may also lead to valve failure, and result in catastrophic failure.

If the valve lash is within the tolerance, an adjustment of the valve lash is NOT necessary.

Perform valve lash adjustment if the dimension is not within the tolerance. The valve bridge adjustment must be performed before making a valve lash adjustment.

Perform the valve lash setting when the engine is cold. After the engine has been shut down and the valve covers are removed, the engine is considered cold.

Before performing maintenance, prevent the entry of foreign matter into the top of the cylinder head and the valve mechanism. Thoroughly clean the area around the valve mechanism covers.

Copyright 1993 - 2015 Caterpillar Inc.
All Rights Reserved.
Private Network For SIS Licensees.

WITRAKTOR CAT **Service Information System**

Previous Screen

Welcome: x350edk

Product: GENERATOR SET
Model: G3520C GENERATOR SET GZN00303
Configuration: G3520C Generator Set GZN00001-UP

Operation and Maintenance Manual
G3500 Generator Sets
Media Number -SEBU7681-19 **Publication Date -01/10/2014** **Date Updated -09/10/2014**

i03470080

Valve Stem Projection - Measure/Record

SMCS - 1105-082

Valve Recession - The valves and the valve seats are worn over time. This causes the valves to recede into the cylinder head. This condition is called "valve recession".

The top end overhaul is typically scheduled according to the amount of valve recession. The amount of valve recession should be monitored on both intake and exhaust valves. However, it is difficult to measure the actual valve recession in the cylinder head. A simpler method is used to determine the valve recession:

- Measure the projection of the valve rotator above the cylinder head.

Measure the projection of the exhaust valve rotators with a **155-1536** Valve Recession Tool Group. Follow the instructions that are provided with the tool group.

Record the measurements on the Operation and Maintenance Manual, "Valve Data Sheet" (Reference Materials Section).

- Measure the projection of the exhaust valve rotators after 250 service hours. This measurement is the baseline. The baseline is a reference for subsequent measurements.
- Measure the projection of the exhaust valve rotators at the first 1000 service hours.
- Plan for the top end overhaul as the projection of the valve rotator approaches the maximum limit. Perform the top end overhaul when the projection of the valve rotator has increased by a total of 2.3 mm (0.09 inch). **Do not allow the recession of the exhaust valves to exceed this limit.** The valve head can break. This will cause severe damage in the combustion chamber.
- Check the measurement data for a difference in the valve recession that is greater than 1 mm (0.039 inch) for the valves that share a valve bridge. If this measurement is exceeded for two successive measurements, replacement of the cylinder head is necessary.

SIA "*Witraktor*" rekomendācijas vēstule

WITRAKTOR CAT

Kam: uz kuru tas attiecas

Par dzinēju diagnosticēšanu izmantojot akustiskās emisijas metodi

Laika posmā no 2013. gada līdz 2015. gadam RTU doktorants A. Unbedahts un RTU darbinieki veica virkni akustiskās emisijas (AE) mērījumus dzinējam CAT G3520C (s/n GZN00302), kura tehnisko apkalpošanu veic SIA WITRAKTOR, ar mērķi izstrādāt jaunu iekšdedzes dzinēju tehniskā stāvokļa akustiskās diagnostikas metodoloģiju.

AE diagnostikas metodoloģijas ieviešana iekārtu diagnostikas procedūrās ļautu ne tikai paliclināt dzinēju drošu ekspluatācijas laiku, bet laikus pamanīt defektus to sākuma stadijā, kā arī pielāgot dzinēju remontu plānus (TBO) atkarībā no to faktiskā tehniskā stāvokļa, kas kopsummā dotu jūtamu ekonomisko efektu.

Dotais pētījumu virziens atzīstams kā perspektīvs saistībā ar jūrniecības un citās industrijas izmantotu iekšdedzes dzinēju drošas ekspluatācijas laika palielināšanu un apkalpošanas izmaksu samazināšanu.

SIA WITRAKTOR rekomendē turpināt pētījumus šajā virzienā.

SIA WITRAKTOR

E. Kovals
Enerģētikas nodaļas vadītājs

Witraktor SIA

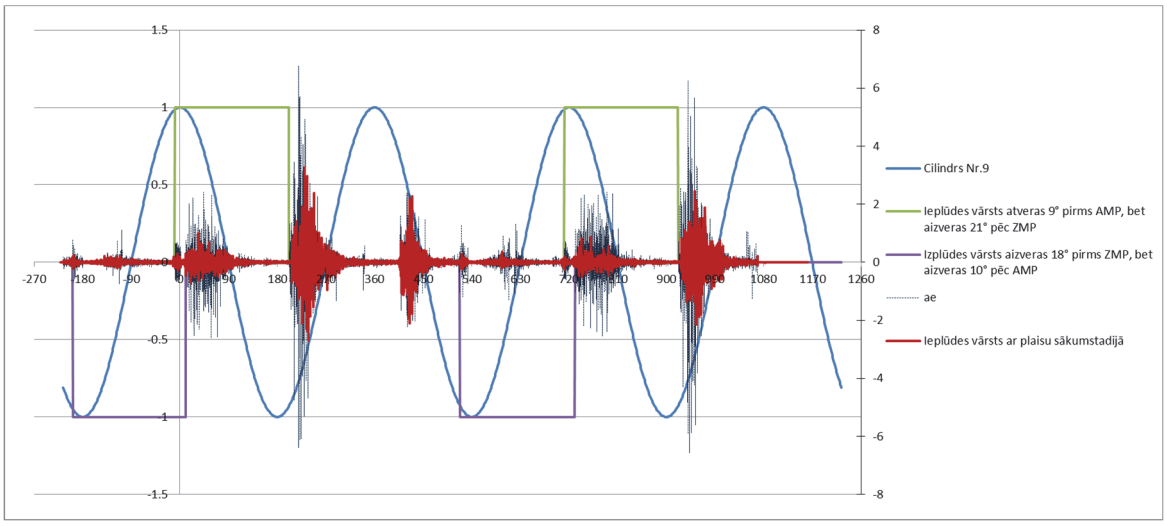
"Zaķīši Grāvīši"
Mārupes nov., LV-2167
Latvija/Latvia
+371 67703513 tel
+371 67709567 fax

Nordea Bank plc Latvijas Filiāle/Nordea Bank plc Latvia branch
SWIFT NDEALV2X
LV36NDEA0000080055852 (LVL), LV94NDEA0000083805915 (EUR)
LV62NDEA0000090129721 (USD)
Reģistrācijas Nr./registration No. 40003441513

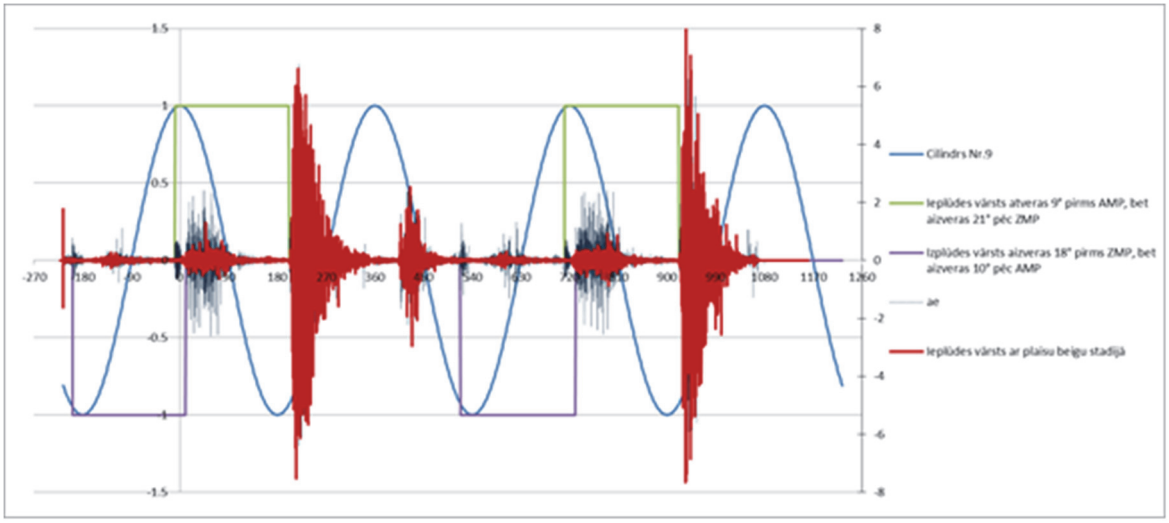
6. pielikums

Akustiskās emisijas mērījumu grafiki

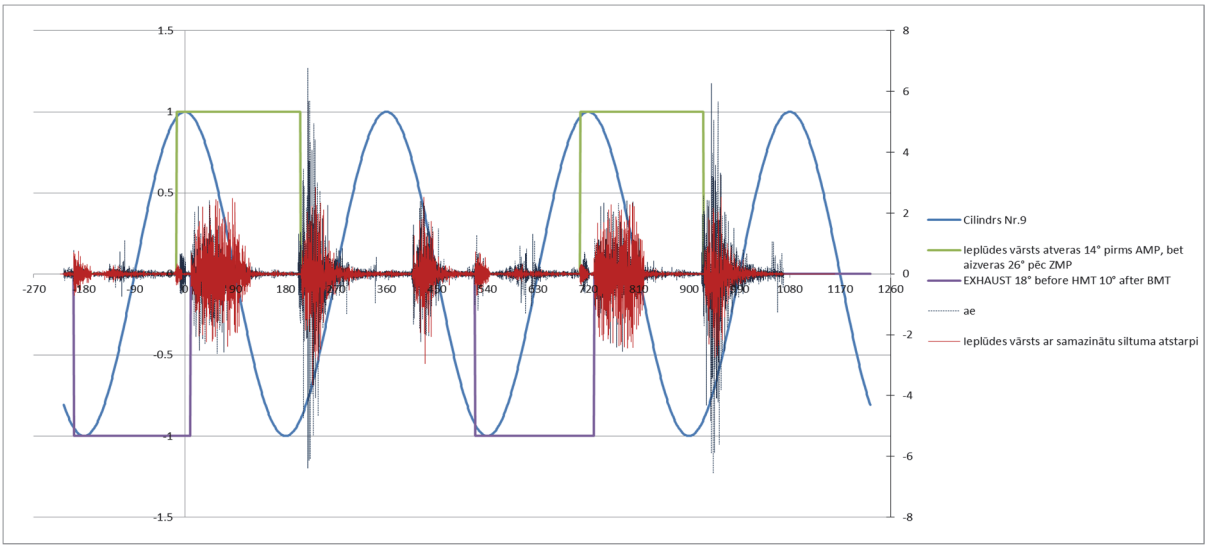
1.



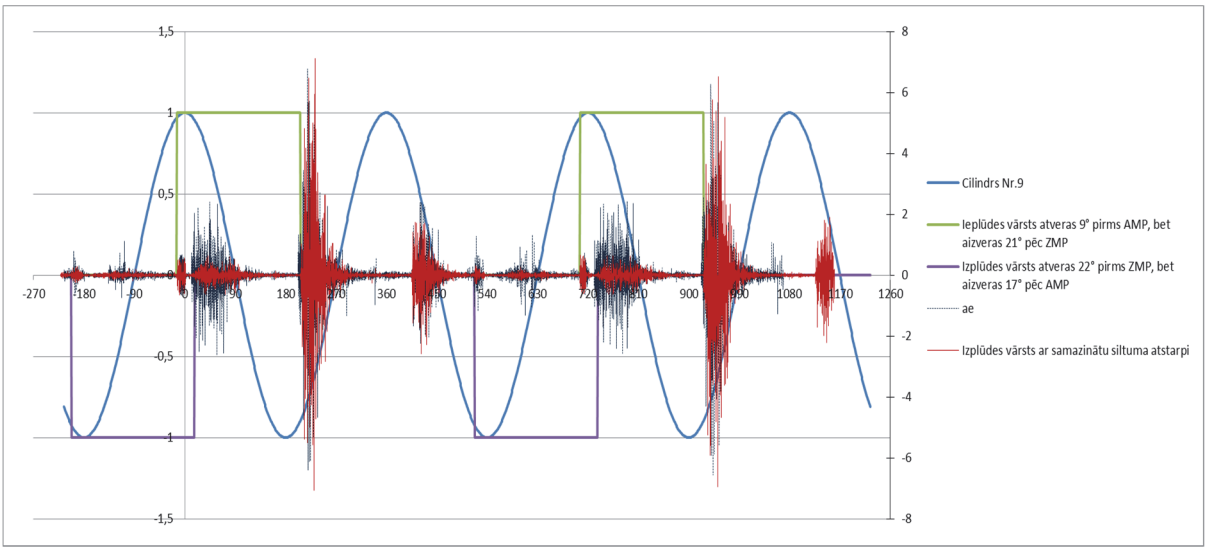
2.



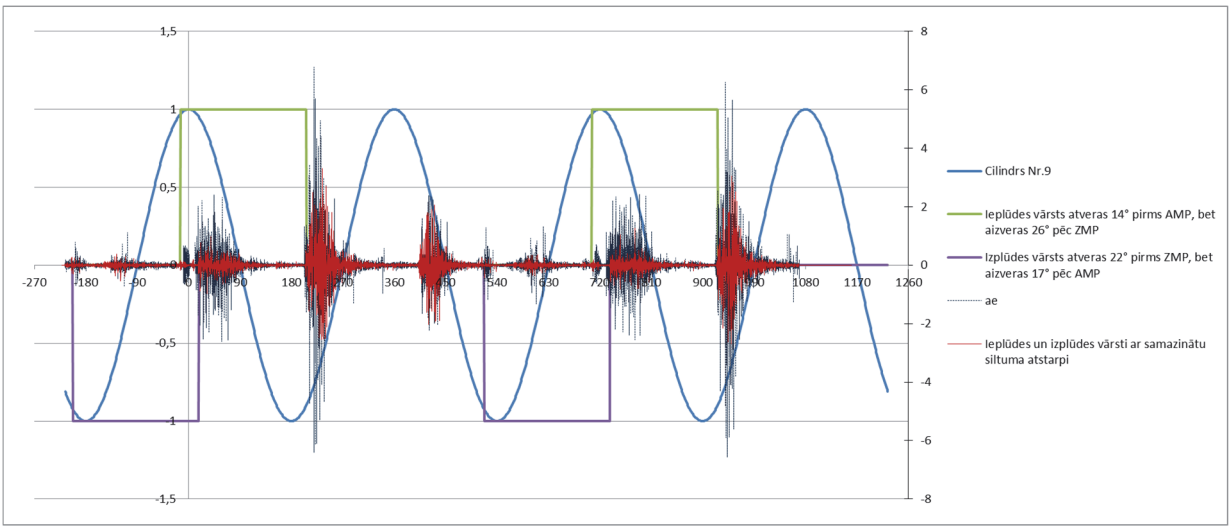
3.


Cilindrs Nr.9
Ieplūdes vārsts atveras 14° pirms AMP, bet aizveras 26° pēc ZMP
EXHAUST 18° before HMT 10° after BMT
ae
Ieplūdes vārsts ar samazinātu siltuma atstarpi

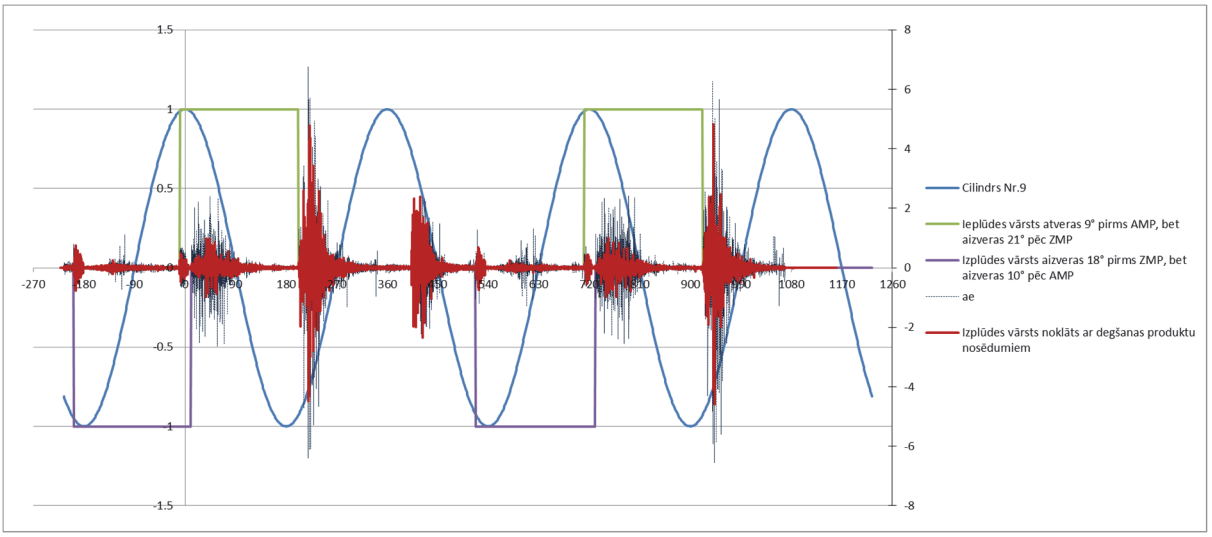
4.


Cilindrs Nr.9
Ieplūdes vārsts atveras 9° pirms AMP, bet aizveras 21° pēc ZMP
Izplūdes vārsts atveras 22° pirms ZMP, bet aizveras 17° pēc AMP
ae
Izplūdes vārsts ar samazinātu siltuma atstarpi

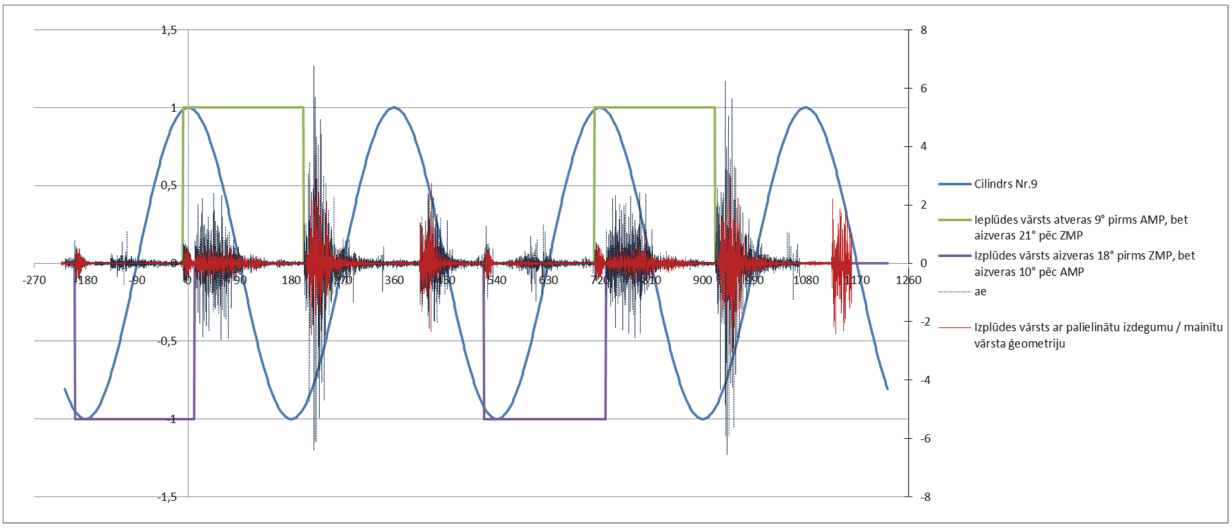
5.


Cilindrs Nr.9
Ieplūdes vārsts atveras 14° pirms AMP, bet aizveras 26° pēc ZMP
Izplūdes vārsts atveras 22° pirms ZMP, bet aizveras 17° pēc AMP
ae
Ieplūdes un izplūdes vārsti ar samazinātu siltuma atstarpi

6.


1.5
1
0.5
-0.5
-1
-1.5
8
6
4
2
0
-2
-4
-6
-8
-270
180
-90
0
90
180
270
360
450
540
630
720
810
900
990
1080
1170
1260
Cilindrs Nr.9
Ieplūdes vārsts atveras 9° pirms AMP, bet aizveras 21° pēc ZMP
Izplūdes vārsts aizveras 18° pirms ZMP, bet aizveras 10° pēc AMP
ae
Izplūdes vārsts noklāts ar degšanas produktu nosēdumiem

7.


1,5
1
0,5
-0,5
-1
-1,5
8
6
4
2
0
-2
-4
-6
-8
-270
180
-90
0
90
180
270
360
450
540
630
720
810
900
990
1080
1170
1260
Cilindrs Nr.9
Ieplūdes vārsts atveras 9° pirms AMP, bet aizveras 21° pēc ZMP
Izplūdes vārsts aizveras 18° pirms ZMP, bet aizveras 10° pēc AMP
ae
Izplūdes vārsts ar palielinātu izdegumu / mainītu vārsta ģeometriju

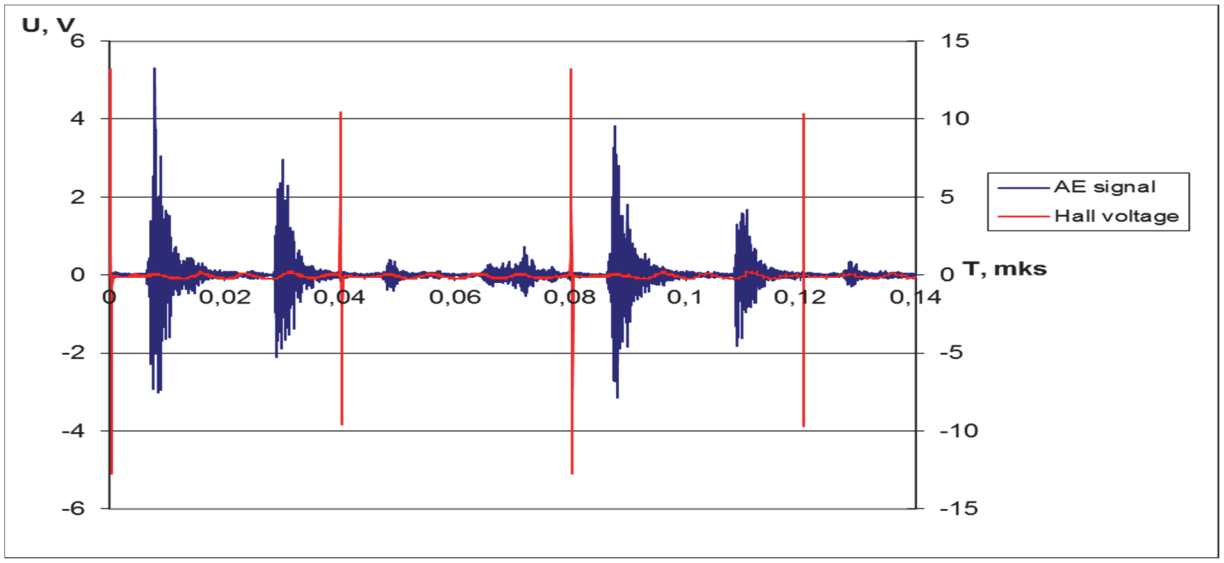
Ieplūdes vārsta ar plaisu mērījumu datu apkopojums

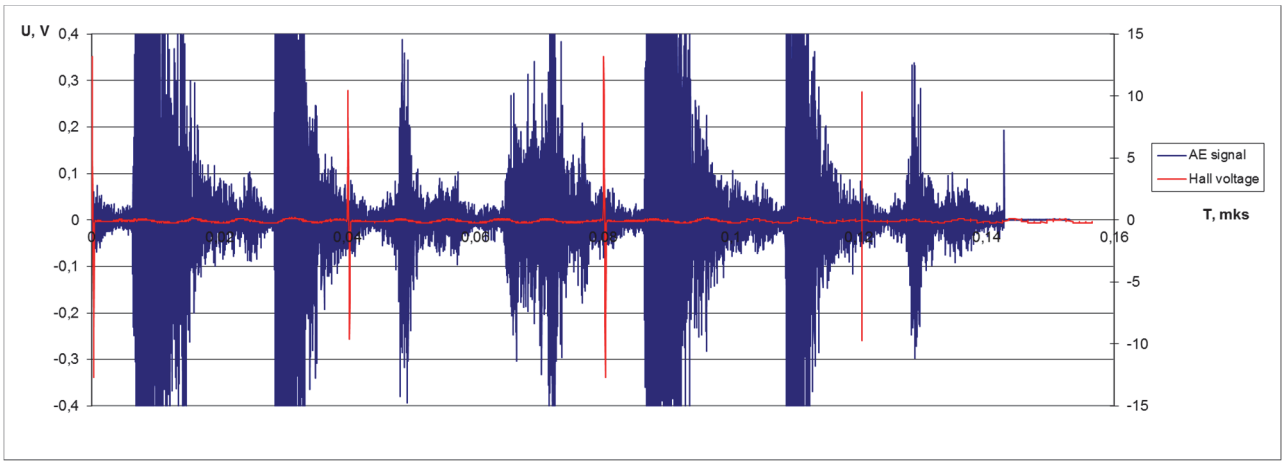
		Xi-X					
	Bez defekta	N1	N2	N3	N4	N5	N6
Max		0.149742	-0.06022	0.302637	0.038351	-0.14262	-0.28789
AnglMax		-0.78545	2.634545	-1.95545	-0.33545	-0.06545	0.114545
FirstAngl		-0.09	0.18	0.63	-0.63	-0.63	0.54
LastAngl		6.12	0.63	-2.43	-0.27	-3.15	-0.9
Aver		-0.15907	-0.1465	0.04459	0.121774	-0.03764	0.024059
RiseTime		-7E-05	0.00028	-0.00028	4E-05	7E-05	-4E-05
DownTime		0.00076	-0.00023	-6E-05	0	-0.00035	-0.00012
Rise		-0.63	2.52	-2.52	0.36	0.63	-0.36
Down		6.84	-2.07	-0.54	0	-3.15	-1.08
TimeFirst		-1E-05	2E-05	7E-05	-7E-05	-7E-05	6E-05
TimeLast		0.00068	7E-05	-0.00027	-3E-05	-0.00035	-1E-04
TimeMax		-8E-05	0.0003	-0.00021	-3E-05	0	2E-05
	Plaisas beigu stadija						
Max		-0.56219	-0.05865	0.035655	0.18794	0.169324	0.227919
AnglMax		0.135	0.405	-0.135	-0.765	0.585	-0.225
FirstAngl		1.35	1.53	-2.34	1.08	-0.99	-0.63
LastAngl		7.875	11.745	-8.685	3.285	-7.605	-6.615
Aver		0.014211	-0.0199	-0.00742	0.023906	-0.03548	0.024672
RiseTime		-0.00014	-0.00013	0.000245	-0.00021	0.000175	4.5E-05
DownTime		0.00086	0.00126	-0.00095	0.00045	-0.00091	-0.00071
Rise		-1.215	-1.125	2.205	-1.845	1.575	0.405
Down		7.74	11.34	-8.55	4.05	-8.19	-6.39
TimeFirst		0.00015	0.00017	-0.00026	0.00012	-0.00011	-7E-05
TimeLast		0.000875	0.001305	-0.00096	0.000365	-0.00084	-0.00074
TimeMax		1.5E-05	4.5E-05	-1.5E-05	-8.5E-05	6.5E-05	-2.5E-05
	Plaias sākumstadija						
Max		0.343541	0.148836	0.245578	0.148836	-0.47434	-0.15695
AnglMax		-1.206	1.764	-2.916	1.764	1.044	2.754
FirstAngl		-1.875	1.275	0.285	1.275	-1.245	0.285
LastAngl		-6.75	-13.32	7.02	7.47	-0.09	5.67
Aver		-0.02097	-0.00826	0.016749	0.005696	-0.01505	0.023483
RiseTime		-0.00012	-0.00014	-0.00055	-0.00014	6E-05	8E-05
DownTime		-0.00089	-0.00195	0.000827	0.000357	-0.0004	4.67E-05
Rise		-1.08	-1.26	-4.95	-1.26	0.54	0.72
Down		-8.04	-17.58	7.44	3.21	-3.63	0.42
TimeFirst		-0.00022	0.00013	2E-05	0.00013	-0.00015	2E-05
TimeLast		-0.00123	-0.00196	0.000297	0.000347	-0.00049	0.000147
TimeMax		-0.00034	-1E-05	-0.00053	-1E-05	-9E-05	0.0001

	(Xi-X)*(Xi-X)					
	N1	N2	N3	N4	N5	N6
Max	0.022423	0.003627	0.091589	0.001471	0.020341	0.082879
AnglMax	0.616939	6.94083	3.823802	0.11253	0.004284	0.013121
FirstAngl	0.0081	0.0324	0.3969	0.3969	0.3969	0.2916
LastAngl	37.4544	0.3969	5.9049	0.0729	9.9225	0.81
Aver	0.025304	0.021463	0.001988	0.014829	0.001417	0.000579
RiseTime	4.9E-09	7.84E-08	7.84E-08	1.6E-09	4.9E-09	1.6E-09
DownTim	5.78E-07	5.29E-08	3.6E-09	0	1.23E-07	1.44E-08
Rise	0.3969	6.3504	6.3504	0.1296	0.3969	0.1296
Down	46.7856	4.2849	0.2916	0	9.9225	1.1664
TimeFirst	1E-10	4E-10	4.9E-09	4.9E-09	4.9E-09	3.6E-09
TimeLast	4.62E-07	4.9E-09	7.29E-08	9E-10	1.23E-07	1E-08
TimeMax	6.4E-09	9E-08	4.41E-08	9E-10	0	4E-10
Max	0.31606	0.003439	0.001271	0.035321	0.028671	0.051947
AnglMax	0.018225	0.164025	0.018225	0.585225	0.342225	0.050625
FirstAngl	1.8225	2.3409	5.4756	1.1664	0.9801	0.3969
LastAngl	62.01563	137.945	75.42923	10.79123	57.83602	43.75823
Aver	0.000202	0.000396	5.5E-05	0.000571	0.001259	0.000609
RiseTime	1.82E-08	1.56E-08	6E-08	4.2E-08	3.06E-08	2.03E-09
DownTim	7.4E-07	1.59E-06	9.02E-07	2.03E-07	8.28E-07	5.04E-07
Rise	1.476225	1.265625	4.862025	3.404025	2.480625	0.164025
Down	59.9076	128.5956	73.1025	16.4025	67.0761	40.8321
TimeFirst	2.25E-08	2.89E-08	6.76E-08	1.44E-08	1.21E-08	4.9E-09
TimeLast	7.66E-07	1.7E-06	9.31E-07	1.33E-07	7.14E-07	5.4E-07
TimeMax	2.25E-10	2.02E-09	2.25E-10	7.23E-09	4.22E-09	6.25E-10
Max	0.118021	0.022152	0.060309	0.022152	0.225	0.024635
AnglMax	1.454436	3.111696	8.503056	3.111696	1.089936	7.584516
FirstAngl	3.515625	1.625625	0.081225	1.625625	1.550025	0.081225
LastAngl	45.5625	177.4224	49.2804	55.8009	0.0081	32.1489
Aver	0.00044	6.82E-05	0.000281	3.24E-05	0.000226	0.000551
RiseTime	1.44E-08	1.96E-08	3.03E-07	1.96E-08	3.6E-09	6.4E-09
DownTim	7.98E-07	3.82E-06	6.83E-07	1.27E-07	1.63E-07	2.18E-09
Rise	1.1664	1.5876	24.5025	1.5876	0.2916	0.5184
Down	64.6416	309.0564	55.3536	10.3041	13.1769	0.1764
TimeFirst	4.84E-08	1.69E-08	4E-10	1.69E-08	2.25E-08	4E-10
TimeLast	1.52E-06	3.85E-06	8.8E-08	1.2E-07	2.43E-07	2.15E-08
TimeMax	1.16E-07	1E-10	2.81E-07	1E-10	8.1E-09	1E-08

	Σ(Xi-X)*(Xi-X)	1/(n-1)*Σ(Xi-X)*(Xi-X)	(1/n)*Σ(Xi-X)*(Xi-X)		sqrt((1/n)*Σ(Xi-X)*(Xi-X))		
Max	0.22232843	0.044465686	0.037055		0.192496		
AnglMax	11.51150579	2.302301157	1.918584		1.38513		
FirstAngl	1.5228	0.30456	0.2538		0.503786		
LastAngl	54.5616	10.91232	9.0936		3.01556		
Aver	0.065578772	0.013115754	0.01093		0.104546		
RiseTime	1.698E-07	3.396E-08	2.83E-08		0.000168		
DownTime	7.71E-07	1.542E-07	1.29E-07		0.000358		
Rise	13.7538	2.75076	2.2923		1.514034		
Down	62.451	12.4902	10.4085		3.226221		
TimeFirst	1.88E-08	3.76E-09	3.13E-09		5.6E-05		
TimeLast	6.736E-07	1.3472E-07	1.12E-07		0.000335		
TimeMax	1.418E-07	2.836E-08	2.36E-08		0.000154		
Max	0.436709866	0.087341973	0.072785		0.269787		
AnglMax	1.17855	0.23571	0.196425		0.443199		
FirstAngl	12.1824	2.43648	2.0304		1.424921		
LastAngl	387.77535	77.55507	64.62923		8.03923		
Aver	0.003091544	0.000618309	0.000515		0.022699		
RiseTime	1.6855E-07	3.371E-08	2.81E-08		0.000168		
DownTime	4.7644E-06	9.5288E-07	7.94E-07		0.000891		
Rise	13.65255	2.73051	2.275425		1.508451		
Down	385.9164	77.18328	64.3194		8.019938		
TimeFirst	1.504E-07	3.008E-08	2.51E-08		0.000158		
TimeLast	4.78735E-06	9.5747E-07	7.98E-07		0.000893		
TimeMax	1.455E-08	2.91E-09	2.43E-09		4.92E-05		
Max	0.472267935	0.094453587	0.078711		0.280555		
AnglMax	24.855336	4.9710672	4.142556		2.035327		
FirstAngl	8.47935	1.69587	1.413225		1.188791		
LastAngl	360.2232	72.04464	60.0372		7.748368		
Aver	0.001598856	0.000319771	0.000266		0.016324		
RiseTime	3.661E-07	7.322E-08	6.1E-08		0.000247		
DownTime	0.000005589	1.1178E-06	9.32E-07		0.000965		
Rise	29.6541	5.93082	4.94235		2.22314		
Down	452.709	90.5418	75.4515		8.686282		
TimeFirst	1.055E-07	2.11E-08	1.76E-08		0.000133		
TimeLast	5.84887E-06	1.16977E-06	9.75E-07		0.000987		
TimeMax	4.148E-07	8.296E-08	6.91E-08		0.000263		

Cilindra Nr. 9 AE signali ar pievienotu vadības signālu (no Holla devēja)





IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI

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. – 12-15 September.

2. Acoustic Emission for corrosion detection / Internets. - 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 pp.

5. Acoustic Emission Science and Technology / Internets. - http://www.muravin.com/downloads/Muravin%20-%20Acoustic%20Emission%20Science%20and%20Technology.pdf

6. Agoston A., Jakoby B., Ötsch C. Viscosity sensors for engine oil condition monitoring– application and interpretation of results// Sensors and Actuators. – 2005. - Vol. 121. – 327–332 p.

7. Attefagh M.M., Pirouzpanah V., Sadeghi M.H. A parametric modeling approach, Mechanical Systems and Signal Processing// Knock detection in spark ignition engines by vibration analysis of cylinder block. - 2007. – 22. - 1495-1514 p.

8. A study of ship hull crack arrester systems. - U.S. Coast Guard Headquarters Washington: Coast Guard Ship Structure Committee, D.C. 1976.

9. Autar R.K. An automated diagnostic expert system for diesel engines, Transactions of the ASME// Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 1996. – 118 (3). - 673–679 p.

10. Алешин И.П., Белый В.Е. Методы акустического контроля металлов. – Москва: Машиностроение. - 1989. – 456 с.
11. Ball A.D., Elamin F., Gu F., Diesel Engine Injector Faults Detection Using Acoustic Emissions Technique. - Queensgate, Huddersfield HD1 3DH, UK: School of Computing and Engineering, University of Huddersfield. - 2010.
12. Ball A.D., Gu F., Rao K.K. Diesel injector dynamic modelling and estimation of injection parameters from impact response. Part 2: prediction of injection parameters from monitored vibration// Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part D: Journal of Automobile Engineering. – 1996. - Vol 210. - No 4. - 303-312 p.
13. Ball A.D., Gu F., Liang B. Detection and diagnosis of valve faults in recuperating compressors// Proceedings of the 9th International Congress and Exhibition on Condition Monitoring and Diagnostics Engineering Management. – Sheffield, UK, 1996. – 421–430 p.
14. 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. – 2006. - Vol. 220. – 379–386 p.
15. Ball A.D., Gu F., Li W. The condition monitoring of diesel engines using acoustic measurements, part 1: acoustic characteristics of the engine and representation of the acoustic signals// SAE 2000 World Congress, Noise & Vibration. - Detroit, USA, 2000. - 51-57 p.
16. 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. - 57-64 p.
17. 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.
18. Behzad M., Jafari S.M., Mehdigholi H. Research Article Valve Fault Diagnosis// Internal Combustion Engines Using Acoustic Emission and Artificial Neural Network. - School of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, 2014.

19. Ben-Sasi A. The exploitation of instantaneous angular speed for machinery condition monitoring// Ph.D. thesis. – Manchester, UK: School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, the University of Manchester, 2005.

20. Boutin K.D., Long B.R. Enhancing the process of diesel engine condition monitoring// Proceedings of the 18th Annual Fall Technical Conference of the ASME Internal Combustion Engine Division. - Fairborn, USA, 1996. - 27 (1). - 61-68 p.

21. Banovs, M.D., Shanyavsky, A.A., Urbahs, A.I., Troenkin, D.A., Konyaev, E.A., Pykhtin, Yu.A., Minatsevich, S.F., Kashin, V.N. Acoustic-emission inspection of the kinetics of fatigue cracks in turbomachinery disks// The journal of nondestructive testing. - 1988. - 23 (11), 801-805 p.

22. 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. – 1991. - 23 (4). 439-443 p.

23. Banovs M., Troenkin D., Urbahs A., Minatsevich S. Inspection of the condition of gas-turbine engine blades by the acoustic-emission method// The journal of nondestructive testing. - 1986. – 22 (9). – 619-623 p.

24. Bidini L., Buratti G. Diagnosis of internal combustion engine through vibration and acoustic pressure non-intrusive measurements// Applied Thermal Engineering Barelli. – 2009. - Vol. 34. – 1707–1713 p.

25. 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.

26. Банов М.Д., Урбах А. Способ контроля газораспределения поршневых двигателей// А.С. N 4914062106. - 1991.

27. Буйвол Б.Н. Тонкие каверны в течениях с возмущениями. Киев: Наукова думка. -1980. - 296 с.

28. Capt. Irminger P. MOL Морское страхование// Comfort - was this incident predictable? – 2013. – No. 6 (15).

29. Cargo work: loading, discharging & stowing cargo / Internets. - http://www.pfri.uniri.hr/~bopri/documents/17-ME-tal.pdf.

30. Chen J., Geng Z. Investigation into piston-slap-induced vibration for engine condition simulation and monitoring// Journal of Sound and Vibration. – 2005. - Vol. 282. – 735–751 p.

31. Cranfield University: Acoustic Emissions and monitoring bearing health / Internets. - https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/bitstream/1826/1781/1/Acoustic%2520emissions%2520and%2520monitoring%2520bearing%2520health.pdf.

32. Чумаченко И.И. Судовые двигатели внутреннего сгорания. - 3-е изд., перераб. и доп. - Москва: Транспорт. – 1967. – 486 с.

33. Darba materiāli. – Antverpene, Beļģija: Transport Claims Consultants Network. - 2012.– 2016.

34. DNV Managing Risk: Ship hull Strength – what are the limits / Internets. - http://www.dnv.com.au/industry/maritime/publicationsanddownloads/publications/updates/container/2008/3-2008/shiphull.asp

35. Douglas R.M., Hymers D.A., Steel J.A. A study of Tribology behavior of piston ring/cylinder liner interaction in diesel engines using acoustic emission// Tribology International. - 2006. – 39. - 1634-1642 p.

36. Douglas R.M., Gill J.D., Neo Y.S. Examination of plate valve behavior in a small reciprocating compressor using acoustic emission// Proceeding of the 24th European Conference on Acoustic Emission. - EWGAE, France, 2000. - 133-138 p.

37. Douglas R.M., Nivesrangsan P., Robertson A. I. F. Source identification using acoustic emission on large bore cylinder liners// Proceeding of the 26th European Conference on Acoustic Emission Testing. - EWGAE, Berlin, Germany, 2004. - 637-643 p.

38. Dunegan H.L., Harris D.O., Tatro C.A. Fracture analysis by use of acoustic emission// Eng. Fract. Hech. - 1968. - V1, Nl. – 105-122 p.

39. 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. - 7-13 p.

40. Elamin F., Fan Y., Gu F. Diesel Engine Valve Clearance Detection Using Acoustic Emission. Queensgate, Huddersfield HD1 3DH, UK: School of Computing and Engineering, University of Huddersfield, 2010.

41. Filcek P. Lloyd's Register Technology Days// Failure of Medium Speed Diesel Engines. – 2010. – 177–186 p.

42. First Commercial Testing Using AE in a Marine Environment / Internets. - http://www.mistrasgroup.com/news/itn/print/09012007_ACTIVITIES.pdf.

43. Franchek M., Grigoriadis K., Mohammadpour J. A surveyon diagnostics methods for automotive engines// Proceedings of the American Control Conference. - San Francisco, USA, 2011. – 985–990 p.

44. gCaptain: A Look Back: MOL Comfort Incident Photos [25 PHOTOS] / Internets. - http://gcaptain.com/mol-comfort-incident-photos/

45. Gerberich W.W., Alteridge D.G., Lessar I.F. Acoustic emission investigation of microscopic ductile fracture// Met. Trans. - 1975. - V6, N2. - 797-801 p.

46. Gill J.D., Reuben R.L. and Steel J.A. A study of small HSDI diesel engine fuel injection equipment faults using acoustic emission// Proceedings of the 24th European Conference on Acoustic Emission Testing. - EWGAE, France, 2000. - 281-286 p.

47. Girdhar P., Mackay S., Scheffer C. Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance// Newnes. - Elsevier, Oxford, 2004.

48. Hartbower C.E., Reuter W.G., Horais C.F. Acoustic emission for the detection of weld and stress – corrosion cracking// Acoustic emission. - 1972. - 187-221 p.

49. Hill R., Stephens R. Sonic emission during deformation of solids// Arch. Akust. - 1971. - V6, N1. - 45-57 p.

50. Hutton P.H., Skorpik I.R. In - flight fatigue crack monitoring using acoustic emission// ISA Trans. - 1981. - V20, N1. - 59-63 p.

51. International Association of Classification Societies, Ltd.: Publications, documentation / Internets. - www.iacs.org.uk

52. Иванов А.Н. Гидродинамика развитых кавитационных течений. Ленинград: Судостроение. - 1980. - 237 с.

53. Jones N.B., Li Y-Hua. A review of condition monitoring and fault diagnosis for diesel engines// Tribotest Journal. – 2000. - Vol. 6 (No. 3). – 267–291 p.

54. Kuģa korpusa stiprība pēc ugunsgrēka / Internets. - www.reederei-nsb.de/site_en/index.php

55. Kuģa korpusa stiprības samazināšanās izgatavošanas tehnoloģiju neievērošanas dēļ / Internets. - http://molcomfort.com/technical-specifications-mol-comfort/cause/

56. 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.

57. Katholieke Universiteit Leuven: Departement of Metallurgy and Materials Engineering: Acoustic Emission: Vallen AMSY-5 / Internets. - http://www.mtm.kuleuven.be/Onderzoek/ndt/equipment/acousticemission_vallen_amsy5

58. Klinchaeam S., Nivesrangsan P. Condition Monitoring of a Small Four-stroke Petrol Engine using Vibration Signals// Songklanakarin Journal of Science & Technology. – 2009. - Vol. 9 No. 1 Jan. - Jun.

59. Kruger U., McCullough G., McDowell N., Wang X. Fault diagnosis for internal combustion engines// Automation Technology in Practice. – 2006. - Vol. 3. – 19–26 p.

60. Курдюмов А.А. Вибрация корабля. - Ленинград: Судпромгиз. - 1961. – 318 с.

61. Lester S.W., Song J-S. Ultrasonic nondestructive evaluation systems. - Springer. – 2007. – 603 pp.

62. Lignelli A.F. Fatigue crack growth: mechanics, behavior, and prediction. – New York: Nova Science Publishers. - 2009. – 265 pp.

63. Lloyds List Intelligence. Marine Casualty Profiles. - Hong Kong: International Maritime Statistics Forum. - 2011.

64. Macián V., Olmeda P., Tormos B. Analytical approach to wear rate determination for internal combustion engine condition monitoring based on oil analysis// Tribology International. - 2003. - Vol. 36. – 771–776 p.

65. 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. – 2012. - Vol. 1. - No. 2. - 173–181 p.

66. Maritime Bulletin: Container Ship MOL Comfort disaster, Arabian Sea / Internets. - http://www.odin.tc/2013/molcomfort.htm

67. Maritime Safety Committee: 74th session / Internets. http://www.iacs.org.uk/document/public/Publications/Other_technical/PDF/FSA_Bulk_Carrier_Report_pdf424.PDF

68. Martyr A.J., Plint M.A. Engine testing (3-rd edition). - 2007. – 315 pp.

69. Molland A.F. The maritime engineering reference book (1st edition) - 2008. – 920 pp.

70. MSC Container Ship Hull Damage to be Repaired at Anchorage / Internets. - http://www.marinelink.com/news/container-repaired-damage362550.aspx

71. Murawski L., Szmyt M. Stiffness characteristics and thermal deformations of the frame of high power marine engine// Polish Maritime Research. – 2007. - vol. 14.

72. 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. – 2007. – 21. – 1084–1102 p.

73. Nivesrangsan P., Reuben R.L., Steel J.A. Source location of acoustic emission in diesel engines// Mechanical Systems and Signal Processing. – 2007. - Vol 21. - 1103-1114 p.

74. Non-destructive testing - Acoustic emission inspection – Vocabulary: ISO 12716:2001.

75. Paramonovs Ju.M., Paramonova A.Ju. Transporta līdzekļu slodzes resurss un drošums. – Rīga: RTU. – 2002. – 108. lpp.

76. Parrish B. Acoustic emission techniques for in flight structural monitoring// SAE Technical Paper Series. - 1960. - N8. - 14-19 p.

77. Petit J., Davidson D.L. Fatigue crack growth under variable amplitude loading. – London: Elsevier Applied Science. – 1988. – 398 pp.

78. Pless W.H. Acoustic emission detection of fatigue crack growth in a production - size aircraft wing test article under simulated flight loads// Materials Evaluation. - 1978. - V36, N5. - 41-46 p.

79. Polish Register of Shipping: Simulation of wave loads and dynamic stresses in ship hulls irregular waves / Internets. http://www.prs.pl/__files/parent4/simulation_of_wave_loads.pdf

80. Pollock A. Metals Handbook// ASM International. - 1989. - 9th Ed., V17. - 278-294 p.
81. Pontoppidan N.H. Condition Monitoring and Management from Acoustic Emissions// Technical University of Denmark, 2005.
82. Russian Maritime Register of Shipping. Regulating documents. – Russia, Sint-Petersburg, 2006.
83. Sanders D.J. The Nautical Institute of the work of the Nautical surveyor// Silverdale Press. - 1991. – 145–147 p.
84. 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. - 167-172 p.
85. Ship operations: Vale Beijing cracks confirmed / Internets. - www.lloydslist.com

86. Ship Structure Committee: Bulk carriers: Mission Eliminate Marine Structure Failures / Internets. - www.shipstructure.org

87. Sommer M.S., Steiner G., Watzenig D. Model-Based Condition and State Monitoring of Large Marine Diesel Engines. - Austria: University of Technology and Virtual Vehicle Research Center.

88. Самойлович Г.С. Неразрущающий контроль металлов и изделий. - Москва: Машиностроение. - 1976. – 456 с.
89. Сирил М.Х., Чарльз И.К. Справочник по ударным нагрузкам. - Ленинград: Судостроение. - 1980. – 360 с.
90. Tatro C.A., Liptal R.G., Harris D.O. Acoustic emission technique in materials research// J. Nondestructive Testing. - 1971. - V3, N3. - 215-275 p.
91. Terms. Acoustic Emission Conceptions: Euro Standard EN 1330-9. - 2000. -
92. The human element as a factor in marine accidents / Internets. - www.martrans.org/documents/

93. The Old Salt Blog: Littoral Combat Ship Program Plowing Ahead Regardless / Internets. - http://www.oldsaltblog.com/2012/04/06/littoral-combat-ship-program-plowing-ahead-regardless/

94. The Swedish Club Highlights. – Goethenburg, Sweden. - 2005.

95. The Swedish Club. Main Engine Damage Study. – Goethenburg, Sweden. - 2012.

96. 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. - 18th International Conference. – 380–382 p.

97. 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. – 16th International Conference. – 46–49 p.

98. 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. – 53.–58 p.

99. 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. – 17th International Conference. – 220–223 p.

100. 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 The Research Institute, 2012. - 14th International Conference. – 113–117 p.

101. Urbahs A., Banovs M., Doroshko S., Harbuzs Y., Turko V. Acoustic Emission Diagnostic of Fatigue Crack Development During Undercarriage Bench Testing// Mechanika 2010. - 2010. - 450-454 p.

102. Urbahs A., Unbedahts A. Acoustic emission method evaluation for high speed ship engines condition monitoring// Transport Means 2015. – Kaunas, Lithuania: Kaunas University of Technology, 2015. – 19th International Conference. – 587–590 p.

103. 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. – 50 p.

104. Urbahs A., Shaniavsky A., Doroshko S., Banovs M. Correlation of Acoustic Emission and Fractographic Characteristics during Fatigue Crack Development// EWGAE 2010. - 2010. – 20-27 p.

105. Urbahs A., Soskoveca K., Sorokins A. Tsepusovs A. Creating a new generation helicopter – tilt rotor// Transport Means 2012. – 2012. - 175-178 p.
106. 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.
107. Urbahs A., Banovs M., Turko V., Feščuks J. Diagnostics of Fatigue Damage of Gas Turbine Engine Blades// WASET Issue 59. - 2011. - Part IX. - 906-911 p.
108. Urbahs A., Banovs M., Harbuzs Y., Turko V., Feščhuks J., Hodos N. Estimation of mechanical properties of the anisotropic reinforced plastics with application of the method of acoustic emission // Transport and Telecommunication. - 2010. - V11, N2. - 68-75 p.
109. 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. - 131-134 p.
110. 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. - 257-261 p.
111. Urbahs A., Banovs M., Harbuzs Y., Feščuks 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. - 270-273 p.
112. Urbahs A., Banovs M., Harbuzs Y., Chepusovs A., Feščuks J. Evaluation of residual strength of aircraft aileron construction// AES – ATEMA 2011. - 2011. - 29-34 p.
113. Urbahs A., Doroshko S., Banovs M., Nasibulins A. Fatigue crack growth assessment tool design cyclic checks// LR patent LV 13853 B. - 2009.
114. 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. - 306-310 p.
115. Urbahs A., Banovs M., Turko V., Feščuks 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, 45–50 p.

116. Urbahs A., Banovs M., Doroshko S., Turko V. Non-destructive inspection of aircraft landing gear during residual strength testing // ULTRAGARSAS. - V64, N1. - 2009. - 43-45 p.
117. 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. – 45-48 p.
118. Urbahs A., Unbedahts A. Perspectives of Ship's Hull Diagnostics Using Acoustic Emission Method// Riga Technical University 53rd International Scientific Conference. – Riga, Latvia: RTU, 2012.
119. 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, Switzerland, 2012. – Vol. 23. - 28-32 p.
120. Using Acoustic Emission in Fatigue and Fracture Materials Research / Internets. - http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/9811/Huang/Huang-9811.html
121. Углов А.Л. Акустический контроль оборудования при изготовлении и эксплуатации. Москва: Наука. – 2009. – 280 с.
122. Урбах А. Диагностика повреждений и прогнозирование разрушений авиационных конструкций акустико - эмиссионным методом. Рига: Рижский авиационный университет. - 1996. – 123 с.
123. Урбах А. Критерии эффективности промышленного акустико – эмиссионного контроля// Труды РАТИ. - 1992. - 21-27 с.
124. 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.
125. Woodyard D. Poundrers marine diesel engines and gas turbines (9-th edition). - 2009. – p. 508.
126. Wood B.R.A. The use of acoustic emission for structural integrity assurance// Nondestructive Testing-Australia. - 1981. - V18, N 6. - 9-15 p.

127. Возницкий И.В. MAN B&W двигатели модельного ряда MC 50-98. – Моркнига: С- Петербург, 2008. – 27 с.

128. Возницкий И.В. Судовые двигатели внутреннего сгорания (том 1). – Моркнига: С- Петербург, 2007.

129. Возницкий И. В., Пунда А. Ц. Судовые двигатели внутреннего сгорания (том 2). - Моркнига: С- Петербург, 2008. - 100 с.

130. Xu X.L., Yu Z.W. Failure analysis and metallurgical investigation of diesel engine exhaust valves// Engineering Failure Analysis. – 2006. - Vol. 13. - No. 4. - 673–682 p.