

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**  
Transporta un mašīnzinību fakultāte  
Mašīnbūves tehnoloģijas institūts

**Dmitrijs ĻITVINOVS**

Doktora studiju programmas „Aparātu inženierija” doktorants

**DIVPAKĀPJU PLANETĀRĀ MOTORA-REDUKTORA AR  
NEKUSTĪGU GREDZENZOB RATU VIBRĀCIJAS PĒTĪJUMI**

**Promocijas darba kopsavilkums**

Zinātniskais vadītājs  
Dr. habil. sc. ing., profesors  
**J.RUDZĪTIS**

**Rīga 2010**

UDK 629.12.05:594.647

Ļitvinovs D. Divpakāpju planetārā motora-  
reduktora ar nekustīgu gredzenzobratu vibrācijas  
pētījumi. Promocijas darba kopsavilkums.  
R.:RTU, 2010.- 25 lpp.

Iespiests saskaņā ar MTI institūta 2009.gada  
10. decembra lēmumu, protokols Nr.7/09

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā „Atbalsts RTU doktora  
studiju īstenošanai”.

**PROMOCIJAS DARBS  
IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI  
RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2010. gada 23. martā, plkst. 15.00 Rīgas Tehniskās universitātes Transporta un mašīnzinību fakultātē, Ezermalas ielā 6, 405. auditorijā.

**OFICIĀLIE RECENZENTI**

Profesors, Dr.sc.ing. Ruslans Dorošenko  
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors, Dr.sc.ing. Edgars Bervalds  
Latvijas Zinātņu akadēmija

Profesors, Dr.sc.ing. Reins Lāneots (Rein Laaneots)  
Tallinas Tehniskā universitāte, Igaunija

**APSTIPRINĀJUMS**

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

Dmitrijs Ļitvinovs .....(Paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts krievu valodā, satur ievadu, 7 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 5 pielikumus, 82 zīmējumus un ilustrācijas, 23 tabulas, kopā 173 lappuses. Literatūras sarakstā ir 126 nosaukumi.

## SATURS

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS.....	5
Publikācijas.....	7
<b>IEVADS</b> .....	8
<b>1. PLANETĀRA MOTORA-REDUKTORA VIBRĀCIJU PĒTĪJUMU</b>	
<b>APSKATS</b> .....	8
1.1. Rotējošo iekārtu vibrāciju mērījumu eksistējošo standartu analīze.....	8
1.2. Vibrācijas analīze, kas rodās zobratu sazbē.....	9
1.3. Eksperimentu, metodiku un parametru apskats pasaulē, kuri ir pielietoti planetāro reduktoru vibrāciju analīzei.....	10
1.4. Pētījuma galvenie uzdevumi.....	10
<b>2. MOTORA-REDUKTORA GALVENIE RAKSTURLIELUMI</b> .....	11
2.1 Planetārais motors-reduktors.....	11
2.1.1 Planetāro pārvadu aprēķina īpatnības.....	11
2.1.2 Pielietojuma diapazons un priekšrocības.....	11
2.1.3 Planetāro motora-reduktoru vibrācijas analīze.....	11
<b>3. TEORĒTISKIE ASPEKTI MOTORA-REDUKTORA ANALĪZĒ</b> .....	12
3.1 Stohastiskā analīze.....	12
3.1.1 Reduktora darbmūžs pie pakāpeniskiem atteikumiem.....	12
3.1.2 Reduktora darbmūžs pie pēkšņiem atteikumiem.....	12
3.1.3 Reduktora darbmūžs pie pēkšņu un pakāpenisku atteikumu kopīgas darbības.....	13
3.2 Vibrācijas analīze.....	13
3.2.1 Vibrācijas analīze laika joslā.....	13
3.2.2 Vibrācijas analīze frekvenču joslā.....	13
3.2.3 Daudzparametriskā vibrācijas analīze.....	14
3.2.4 Relatīvās vibrācijas analīze.....	14
3.2.5 Vibrācijas mērīšanas lielumi.....	14
3.3 Planetāro motora-reduktora pamatmezglu analīzes metodes.....	14
3.3.1 Ritgultņi.....	14
3.3.2 Planetārs zobpārvals.....	14
3.3.3 Elektromotors.....	14
<b>4. EKSPERIMENTU VEIKŠANAS IEKĀRTAS</b> .....	15
4.1 Planetāra motora-reduktora pētīšanas iekārta (stends).....	15
4.2 Frekvences pārveidotājs.....	15
4.3 Datu mērīšanas un analīžu aprīkojums.....	15
4.4 Vibrācijas signālu mērīšanas kļūdas.....	15
<b>5. EKSPERIMENTU VEIKŠANA</b> .....	16
5.1 Pamatmezglu frekvenču noteikšana.....	16
5.2 Motora-reduktora vibrāciju mērīšana.....	17
5.2.1 Vibrācijas augstfrekvences sastāvdaļas apliecošā signāla veidošanas princips.....	17
5.2.2 Mērīšanas secības formēšana.....	18
5.2.3 Motora-reduktora pirmā pakāpe.....	18
5.2.4 Motora-reduktora otrā pakāpe.....	20
5.2.5 Elektromotors.....	20
5.3 Vibrācijas pieļaujamo robežu definēšana.....	20
<b>6. MOTORA-REDUKTORA VIBRĀCIJAS MATEMĀTISKĀ MODEĻA</b>	
<b>IZVEIDOŠANA</b> .....	21
<b>7. MOTORA-REDUKTORA TEHNISKĀ STĀVOKĻA NOTEIKŠANAS</b>	
<b>METODIKA</b> .....	22
<b>SECINĀJUMI</b> .....	23
<b>LITERATŪRA</b> .....	24

## PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

### Tēmas aktualitāte

Izvēlētā darbā «Divpakāpju planetārā motora-reduktora ar nekustīgu gredzenzobratu vibrācijas pētījumi» ir veikti divpakāpju planetārā motora-reduktora vibrācijas pētījumi, kā arī ir izstrādāta motora-reduktora galveno mezglu vibrācijas analīzes metodika.

Pašreiz nav izstrādātas metodes, kas atļauj saņemt nepieciešamo informāciju par motora-reduktora stāvokli bez tā izjaukšanas. Viena no informatīvākajām metodēm ir rotoru iekārtu galveno mezglu vibrācijas analīze. Tā dod iespēju gan ražotāju, gan patērētāju prognozēt motora-reduktora ekspluatācijas laiku.

### Darba mērķis un uzdevumi

Dotā darba mērķis ir veikt divpakāpju planetārā motora-reduktora ar nekustīgu gredzenzobratu vibrācijas pētījumi, kā arī dotā *motora-reduktora galveno mezglu vibrācijas analīzes metodikas izstrādāšana bez to izjaukšanas*.

Pamatojoties uz augstākminēto ir izvirzīti sekojošie uzdevumi:

1. Speciālas iekārtas izveidošana divpakāpju planetārā motora-reduktora vibrāciju signālu mērījumiem.
2. Galveno motora-reduktora mezglu vibrācijas pētījuma paveikšana bez to pilnas izjaukšanas.
3. Izstrādāt vibrācijas signāla precīzas noņemšanas veidu no gredzenzobrata, neizjaucot motoru-reduktoru.
4. Veikt mērījumu un vibrācijas analīzi pieļaujamo vibrāciju robežvērtību noteikšanai.
5. Izveidot motora-reduktora vibrācijas matemātisko modeli.
6. Izstrādāt metodiku motora-reduktora galveno mezglu tehniskā stāvokļa noteikšanai.

### Pētījumu metodika

Divpakāpju planetārā motora-reduktora vibrāciju signālu pētījumā tika pielietotas sekojošas vibrācijas analīzes metodes:

- Laika signāla vibrāciju raksturlielumu statistiskā analīze;
- Vibrāciju spektrālanalīze;
- Vibrāciju analīze ar augstfrekvences sastāvdaļas aplieцоšo signālu.

Lai izveidotu vibrāciju signāla mērījuma maršrutus, kā arī analīzei un vibrāciju signāla pārveidošanai grafiskā veidā, tika izmantots programmas nodrošinājums DREAM 32 v.4.0 (91.311), ko sagatavojusi VAST asociācija (Krievija). Eksperimentālu datu statistiskai apstrādei tika izmantota programma STATISTICA v.7.0.

### Zinātniskā novitāte un galvenie pētījuma rezultāti

Dotā darba zinātniskā novitāte un rezultāti ir:

1. Divpakāpju planetārā motora-reduktora vibrāciju signālu iekārta mērījumiem bez tā izjaukšanas.
2. Gredzenzobrata vibrāciju mērījuma paņēmiens ar taustu palīdzību, kas dod iespēju samazināt reduktora korpusa vibrācijas ietekmi uz gredzenzobrata vibrāciju. Uz tausta konstrukciju ir iesniegts patenta pieteikums Nr. P-09-141.
3. Motora-reduktora vibrācijas matemātiskas modelis.
4. Divpakāpju planetārā motora-reduktora ar nekustīgiem gredzenveida zobratiem tehniskā stāvokļa noteikšanas metodika.

Iegūtie rezultāti ir jauns ieguldījums mašīnzinātnes nozarē planetāru reduktoru vibrāciju analīzē.

### **Praktiskais pielietojums**

Pētījumi, kuri ir veikti dotajā promocijas darbā „Divpakāpju planetārā motora-reduktora ar nekustīgiem gredzenzobratiem vibrācijas analīze” ļauj noteikt mērīšanas punktus, kuros lietderīgi mērīt vibrāciju ar speciāla tausta palīdzību.

Izstrādātais tausts ļauj diezgan vienkārši mērīt vibrāciju un novērtēt motora-reduktora tehnisko stāvokli. Uz taustu ir iesniegts patenta pieteikums Nr. P-09-141.

Izstrādātā metodika dot iespēju gan ražotājam, gan patērētājam noteikt reduktora tehniskā stāvokli:

1. Reduktora ražotājs izgatavošanas gaitā sagatavo punktus vibrāciju mērījumiem.
2. Reduktora lietotājs izmantojot metodiku, saņem precīzāku informāciju par motora-reduktora tehnisko stāvokli tā darbības laikā.

### **Autors aizstāv šajā darbā**

1. Eksperimentālu iekārtu divpakāpju planetārā motora-reduktora ar nekustīgiem gredzenzobratiem galveno mezglu vibrācijas pētījumiem.
2. Planetārā motora-reduktora vibrācijas mērīšanas paņēmieni bez galveno mezglu izjaukšanas.
3. Planetārā motora-reduktora vibrācijas matemātisko modeli.
4. Planetārā motora-reduktora galveno mezglu tehniskā stāvokļa noteikšanas metodiku.

### **Darba aprobācija**

Par galvenajiem panākumiem un disertācijas rezultātiem tika saņemti paziņojumi, kuros saņemti atzinīgi novērtējumi no sekojošajām konferencēm un semināriem:

#### Latvija:

- Rīgas Tehniskās Universitātes 48. Starptautiskā Zinātniskā Konference, 11.10. – 13.10.2007
- Rīgas Tehniskās Universitātes 49. Starptautiskā Zinātniskā Konference, 13.10. – 15.10.2008
- Rīgas Tehniskās Universitātes 50. Starptautiskā Zinātniskā Konference, 12.10. – 16.10.2009
- 6<sup>th</sup> International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”, 24.05-25.05.2007, Latvija, Jelgava
- 7<sup>th</sup> International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”, 29.05-30.05.2008, Latvija, Jelgava
- RTU TMF Promocijas padomes P-16 seminārs. Rīga. 2009.gada 11. jūnijs.

#### Ārvalstīs:

- 11<sup>th</sup> International Research/Expert Conference ”Trends in the Development of Machinery and Associated Technology” TMT 2007, 05.09-09.09.2007, Hammamets, Tunisia
- XII. International Colloquium on Surfaces 28.01-29.01.2008 Čemnics, Vācija
- 4<sup>th</sup> International Conference Mechatronic Systems and Materials, 14.07.-17.07.2008, Bialystok, Poland

- 12<sup>th</sup> International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology" TMT 2008, 25.08-30.08.2007, Istanbul, Turkey
- 9<sup>th</sup> International Conference on Vibrations in Rotating Machinery, Streatham Court, University of Exeter, 09.09 – 11.09.2008, Exeter, England
- 9<sup>th</sup> International Workshop on Research and Education in Mechatronics, 18.09. – 19.09.2008, Bergamo, Italija
- 6<sup>th</sup> ICCSM International Congress of Croatian Society of Mechanics, September 30 – October 2, Dubrovnik, Croatia.

Ir iesniegts patenta pieteikums Nr. P-09-141 « Tausts planetārā reduktora vibrācijas mērījuma precizitātes paaugstināšanai » no 11.08.2009.

### **Publikācijas**

Par veikto pētījumu rezultātiem un izstrādāšanu ir nopublicēti deviņi zinātniski raksti:

1. Litvinovs D. Study of different factors influence on the pump aggregates vibration// ISSN 1407-8015. Scientific proceedings of Riga Technical University. Transport and Engineering. - 6.Sērija - 22.Sējums - Rīga: Izdevniecība "RTU", 2007. - 39.-48. lpp.
2. Litvinov D., Rudzitis J. Industrial equipment design based on vibration monitoring and diagnostics systems sensors reliable location// Proceedings of 6<sup>th</sup> International Scientific Conference "Engineering for Rural Development". - Jelgava: Latvia University of Agriculture Faculty of Engineering, 2007. - pp. 205-208.
3. Litvinov D., Rudzitis J. Precision laser shaft alignment and rolling bearings of rotating machines high-frequency vibration// Proceedings of 11<sup>th</sup> International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology" TMT 2007. - Tunisia, Hammamets, 2007. - pp. 559-562.
4. Litvinov D., Rudzitis J. Roughness estimation of self-aligning ball bearings outer race under various levels of vibration// Proceedings of XII. International Colloquium on Surfaces. - Germany, Chemnitz, 2008. - pp. 70-77.
5. Litvinovs D. Planetary reduction gearmotor vibration diagnostics// Proceedings of 7<sup>th</sup> International Scientific Conference "Engineering for Rural Development". - Jelgava: Latvia University of Agriculture Faculty of Engineering, 2008. - pp. 187-192.
6. Litvinov D. High-frequency vibration analysis of planetary reduction gearmotor// Proceedings of 12<sup>th</sup> International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology" TMT 2008. - Turkey, Istanbul, 2008. - pp. 1145-1148.

7. Litvinov D. Centrifugal pumps uncoupled shafts laser alignment and its influence on vibration level// Proceedings of 9<sup>th</sup> International Conference on Vibrations in Rotating Machinery. Volume II. - Exeter: University of Exeter, UK, 2008. - pp. 489 – 495.
8. Litvinov D., Rudzitis J. High frequency vibration monitoring and diagnostics of high-speed pump rolling bearings// ISSN 1898-4088. Acta mechanica et automatica. Volume 2. - no.3. – Bialystok: Bialystok Technical University, 2008. - pp. 76 – 79.
9. Litvinov D., Rudzitis J. High-frequency vibration analysis of planet gears of two-stage planetary gearmotor// Proceedings of 6th ICCSM International Congress of Croatian Society of Mechanics. - Dubrovnik: University of Zagreb, Croatia, 2009. - 6 p. (CD-ROM).

### **Darba struktūra un apjoms**

Promocijas darbs ir uzrakstīts krievu valodā, satur ievadu, 7 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 5 pielikumus, 82 attēlus, 23 tabulas, kopā 173 lapaspuses. Literatūras sarakstā ir 126 nosaukumi.

## **PROMOCIJAS DARBA SATURS**

### **Ievads**

Viena no pašām informatīvākajām metodēm iekārtas stāvokļa atpazīšanai bez to izjaukšanas ir rotoru iekārtas galveno mezglu vibrācijas analīze. Vibrāciju signālu analīzes un tieši planetārā motora-reduktora stāvokļa ātra novērtējuma metodikas izstrādāšanas nepieciešamība radās tādēļ, ka šobrīd tieši šis motoru-reduktoru tips ir visas rūpniecības pielietojuma motoru-reduktoru īpaši progresīvais veids.

## **1.nodaļa. PLANETĀRA MOTORA-REDUKTORU VIBRĀCIJAS PĒTĪJUMU APSKATS**

Šajā nodaļā ir izdarīts pasaules literatūras apskats par planetāro pārvalu un reduktoru vibrāciju signālu analīzes jautājumiem kurā iekļauti:

- 1.1 Rotējošo iekārtu vibrāciju mērījumu eksistējošo standartu analīze.
- 1.2 Vibrācijas analīze, kas rodās zobu sažobē.
- 1.3 Eksperimentu, metodiku un parametru apskats pasaulē, kas ir pielietojamas planetāro reduktoru vibrāciju analīzei.
- 1.4 Pētījuma galvenie uzdevumi.

### **1.1. Rotējošo iekārtu vibrāciju mērījumu eksistējošo standartu analīze**

Rotoru iekārtu vibrācijas mērīšanas, apstrādes un analīzes mūsdienīgu metožu pielietojums pēdējās desmitgadēs sekmēja tehniska stāvokļa definēšanas rekomendāciju izstrādāšanu, kuri labi sevi rekomendējuši pasaules praksē. Ar ISO/TC 108 starptautiskās Tehniskās komitejas «Mechanical vibration, shock and condition monitoring» palīdzību ir izstrādāta starptautisku standartu rinda, kas ir virzīti, lai sakārtotu mērīšanas tehnoloģijas un rotoru mašīnu stāvokļa



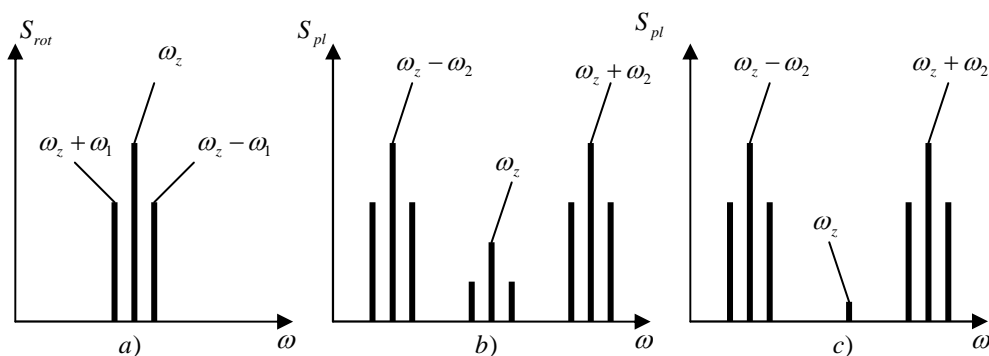
kontroles nodrošinājumu pie kuriem attiecas arī planetārie motori-reduktori. Pie šiem standartiem attiecas: ISO 10816; ISO 7919; ISO 13373-1: 2002; ISO 15242; ISO 8579-2: 1993; ISO 10817-1: 1998 [1].

No standartiem, kas noteikti Latvijā, var minēt: LVS ISO 7919-1: 2001 (Bez turpatpakaļkustības mašīnu mehāniskā vibrācija. Rotējošu vārpstu mērījumi un vērtēšanas kritēriji. Vispārīgie norādījumi), LVS EN 12096:2001 (Mehāniskā vibrācija - Vibrācijas emisijas vērtību deklarēšana un verifikācija). Šobrīd Latvijā nav apstiprināti pietiekami daudz rotoru iekārtu vibrāciju standartu, bet process turpinās un tuvākajā laikā tie tiks apstiprināti. Standartu apskats rāda, ka planetāro reduktoru vibrācijas mērīšanas un analīzes metodes nevienā no standartiem nav noteiktas.

## 1.2. Vibrācijas analīze, kas rodās zobratu sažobē.

Vieni no svarīgiem un atbildīgiem agregātiem rotoru mašīnu starpā ir dažādi reduktori un motori-reduktori. Pateicoties savām specifiskajām konstruktīvajām īpašībām, planetārie motori-reduktori bija un paliek vieni no īpaši progresīvo reduktoru veidiem visā rūpniecībā. Pieredze rāda, ka nepieciešams ne tikai ieviest ražīgāku un progresīvu iekārtu, bet arī mācēt viņu kontrolēt un apkalpot. Tam ir nepieciešama informācija par planetāro motoru-reduktoru svarīgāko mezglu reālo stāvokli. Bet to var nodrošināt tikai vibrāciju signālu mērīšanas un analīzes ceļā. Akustiska signāla izmaiņu rakstura kopējas likumsakarības pie zobu mehānismu kļūdām (tai skaitā arī planetāro pārvadu) darbā, kas ir izsaukti ar izgatavošanas, salikšanas un ekspluatācijas defektiem, kas ir reduktoru tehniskā stāvokļa novērtējuma informācijas avoti un aprakstīti A.Barkova (1.1. att.), N. Barkovai [3], F. Balitska [4], A. Goljdina [5], M. Genkina [6], A. Sokolovai, S. Kelli [7], R. Mobli [8], Dž. Smita [9], M. Botmana [10], M. Adamsa [11], D. Volkera [12], Dž. Tejlora [13], K. De Silvi [14], R. Parkera [15], Dž. Lina, A. Gorelika [16], P. Sparisa, Dž. Vačsevanosa [17], P. Makfadena [18], V. Vonga [19], Dž. Zakrajseka un D. Taunsenda [20] darbos.

Analizējot iepriekšminēto autoru darbus var konstatēt, ka tajos nekur nav aplūkojama mērīšanas un vibrācijas analīzes metodika ar taustu palīdzību.

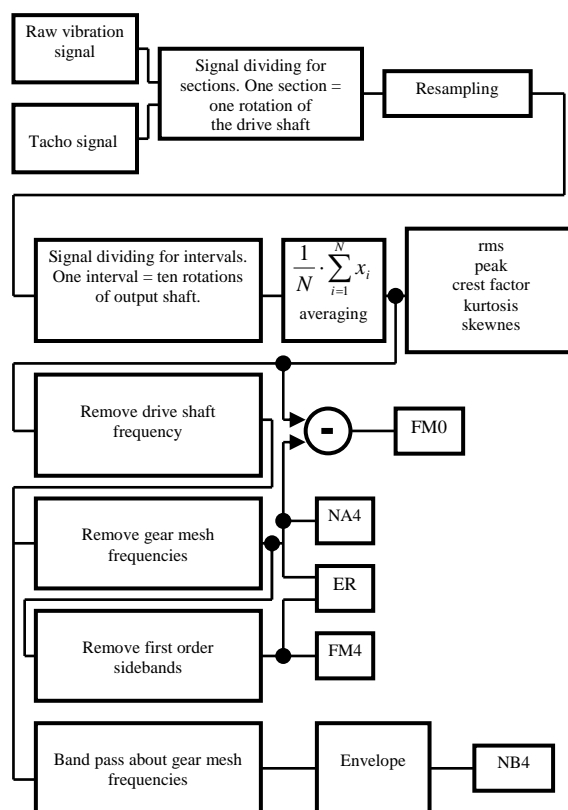


1.1.att. Starppārvalu un planetārā motora-reduktora korpusa vibrācijas spektru frekvence ( $\omega_z$ ) zobu apkārtņē pie kontaktējošu virsmu lokālu defektu esamībās ( $\omega_1$  - riteņa ar defektu griešanās frekvence,  $\omega_2$  - ierosmes avota pārvietoējuma frekvence telpā attiecībā pret devēju) : **a** –starppārvalu zobu pārvades summārās (vērpes un šķērs) svārstības; **b** - planetārā zobu pārvada summārās (vērpes un šķērs) svārstības; **c** – planetārā pārvada šķērsvārstības [2]

### 1.3. Eksperimentu, metodiku un parametru apskats pasaulē, kuri ir pielietoti planetāro reduktoru vibrāciju analīzei.

Tādu autoru darbos kā G. Dženkinsa un D. Vatsa, D. Brendvuda, L. Frenksa, R. Hemminga, L. Rabinera, V. Zvereva, J. Sato, S. Marpla j., D. Njulanda, B. Golda un Č. Reidera, K. Raushera, A. Sergijenko, L. Goldenberga, R. Rendala, izskatītas spektrālanalīzes un filtrācijas dažādas metodes, kuras plaši pielietojamas planetāro motoru-reduktoru vibrācijas un tehniskā stāvokļa novērtējuma analīzēs [21,22,23,24]. Autori P. Samuel un D. Pains, M. Lebold, N. Svonson, R. Stjuart, H. Dekker, P. Dempsi, P. Večer izskata savos darbos svarīgu parametru aprēķina un novērtējuma aprakstu ASV helikopteru transmisiju planetāro reduktoru zobu pārvades stāvokļiem: (FM0 (R. Stjuart), FM4 (R. Stjuart), NA4 (Dž. Zakrajsek), M6A (H. Martin), M8A (H. Martin un c.), kuri ir izstrādāti armijai (1.2. att) [25].

Dota metodika ir sarežģīta un praktiski tiek pielietota tika armijas vajadzībām (helikopteru, lidmašīnu un c.). Tāpēc rūpniecības vajadzībām (ierīču piedziņai, transportieriem un c.) nepieciešams šo metodi vienkāršot.



1.2. att. Vibrāciju signāla ciparu apstrādes piemērs, izmantojot parametrus mašīnas stāvokļa indikācijai

### 1.4. Pētījuma galvenie uzdevumi

Uz literatūras apskata bāzes var izdarīt secinājumu, ka rūpniecības vajadzībām ir nepieciešams novērst minētos trūkumus.

Tas ļauj noformulēt dotā promocijas darba uzdevumus:

1. Speciālas iekārtas izveidošana divpakāpju planetārā motora-reduktora vibrāciju signālu mērījumiem.
2. Galveno motora-reduktora mezglu vibrācijas pētījuma paveikšana bez to pilnas izjaukšanas.
3. Izstrādāt vibrācijas signāla precīzas noņemšanas veidu no gredzenzobrata, neizjaucot motoru-reduktoru.
4. Veikt mērījumu un vibrācijas analīzi pieļaujamo vibrāciju robežvērtību noteikšanai.
5. Izveidot motora-reduktora vibrācijas matemātisko modeli.
6. Izstrādāt metodiku motora-reduktora galveno mezglu tehniskā stāvokļa noteikšanai.

## 2.nodaļa. MOTORA-REDUKTORA GALVENIE RAKSTURLIELUMI

Jebkurai rotoru mašīnai darba laikā rodas mezglu svārstības, kuras tiek nododas uz korpusu vibrācijas veidā. Veicot radušās vibrācijas mērījumus un pēc tam to analīzi, var spriest par mašīnas darba mezglu stāvokli.

### 2.1 Planetārais motors-redukators

Reduktori ar zobu pārvadēm, kurās ir zobrati ar pārvietojošām asīm, saucas par planetāriem reduktoriem. Planetārie motori-redukatori ir tieši tie paši planetārie reduktori, bet tikai kuru sastāvā ietilpst arī elektromotori.

#### 2.1.1 Planetāro pārvadu aprēķina īpatnības

Šī nodaļa ir veltīta planetāriem reduktoriem, to galveno raksturlielumu aprēķina parametriem, pielietojuma diapazoniem un priekšrocībām, salīdzinot ar citiem reduktoru veidiem.

Zobu pārvadu, kas ietilpst 1 un 2 pakāpju sastāvā, galveno informatīvu frekvenci aprēķina pēc formulām.

- Satelīta zobu frekvence (Hz):  $f_{P1}$  un  $f_{P2}$ , tiek noteikta attiecīgi 1 un 2 pakāpei:

$$f_P = \frac{P_S \cdot P_T}{60} \quad (2.1)$$

kur,  $P_S$  - satelīta apgriezību skaits,  $P_T$  - satelīta zobu skaits

- Saules zobrata zobu frekvence (Hz):  $f_{S1}$  un  $f_{S2}$ , tiek noteikta attiecīgi 1 un 2 pakāpei:

$$f_{S1} = \frac{S_S \cdot S_T}{60} \quad (2.2)$$

kur,  $S_S$  - saules zobrata griešanās apgriezību skaits,  $S_T$  - zobu skaits

- Satelīta pārejas pa epiciklu frekvence (Hz):  $f_{E1}$  un  $f_{E2}$ , tiek noteikts attiecīgi 1 un 2 pakāpei:

$$f_E = \frac{3 \cdot C_S}{60} \quad (2.3)$$

kur,  $C_S$  - vaduļa griešanās apgriezību skaits [26,27].

#### 2.1.2 Pielietojuma diapazons un priekšrocības

Planetāro reduktoru kompakts un augsts lietderības koeficients nozīmē, ka tie ideāli ir piemēroti praktiski jebkādam metālapstrādes iekārtām un var aizvietot visas rūpniecības reduktoru dažādus tipus tādiem uzdevumiem, kā metāla un kokapstrādes darbgaldu padeves piedziņas, konveijeri, ekstrūderi, mikseri, maisītāji un tā tālāk.

#### 2.1.3 Planetāro motora-reduktoru vibrācijas analīze

Planetāro motoru-reduktoru vibrācijas analīzei īpaši izplatīto metožu starpā tiek pielietoti:

1. Vibrācijas analīze laika apgabalā:
  - Statistiska analīze;
  - Korelāciju analīze;
  - Pašsvārstības analīze - modāla analīze

2. Vibrācijas analīze frekvenču apgabalā:
  - Spektrālanalīze;
  - Apliecošā spektrālanalīze;
  - Kepstrālanalīze.
3. Daudzparametriskā vibrācijas analīze:
  - Daudzdimensionālā analīze;
  - Bispektrālanalīze;
  - Viļņu veida (wavelet) analīze.

### 3.nodaļa. TEORETISKIE ASPEKTI MOTORA-REDUKTORA ANALĪZĒ

#### 3.1. Stohastiskā analīze

Šeit tiek dota planetārā motora-reduktora darbības teorētiska analīze ar stohastiskas analīzes palīdzību. Tajā ietilpst darbības definēšana pie pakāpeniskiem atteikumiem, pie pēkšņiem atteikumiem, pie pēkšņu un pakāpenisku atteikumu mijiedarbības [28].

##### 3.1.1 Reduktora darbmūžs pie pakāpeniskiem atteikumiem

Atteikuma varbūtība: 
$$Q(t) = F(t) = \Phi\left(\frac{t - T_{cp}}{\sigma}\right) \quad (3.1)$$

kur, 
$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp\left(-\frac{v^2}{2}\right) dv$$
 - Laplasa funkcija

$T_{cp}$  - reduktora vidējais darbmūžs;

$\sigma$  - nejaušu lielumu izkliedes vidējā kvadrātiskā novirze

Nepārtraukta darba varbūtība:

$$P(t) = 1 - \Phi\left(\frac{t - T_{cp}}{\sigma}\right) \quad (3.2)$$

Atteikumu intensitāte:

$$\lambda(t) = \frac{\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t - T_{cp})^2}{2\sigma^2}\right]}{\left[1 - \Phi\left(\frac{(t - T_{cp})}{\sigma}\right)\right]} \quad (3.3)$$

##### 3.1.2 Reduktora darbmūžs pie pēkšņiem atteikumiem

1. Pie  $t = T_{cp}$  nepārtraukta darba varbūtība  $P(t) = \exp(-\lambda T_{cp}) = \exp(-1) = 0,37$ . Reduktoru detaļu relatīvi augstu drošumu, pēkšņu atteikumu nosacījumos, var nodrošināt tikai pie  $t \ll T_{cp}$ .

2. Mūsdienīgiem reduktoriem ir nepieciešama nepārtraukta darba augsta varbūtība ( $P(t) > 0,9$ ).

$$P(t) = 1 - \lambda t = 1 - \frac{t}{T_{cp}} \quad (3.4)$$

$$T_{cp} \approx \frac{t}{1 - P(t)} \quad (3.5)$$

Tādējādi, reduktora elementu vidējais darbmūžs var būt novērtēts pēc nepārtraukta darba varbūtības, bez izkārtojuma  $\lambda$  likuma definēšanas.

3. Ja pēkšņi atteikumi reti notiek, tā kā  $P(t) \approx 1,0$ , tad tie pakļaujas vienādas varbūtības likumam ar blīvumu  $f(t) = \lambda$ .

### 3.1.3 Reduktora darbmūžs pie pēkšņu un pakāpenisku atteikumu kopīgas darbības.

Darbmužu varbūtību izkārtojuma blīvumam ir aina:

$$f(t) = c\alpha t^{\alpha-1} \exp(-ct^\alpha); c > 0; \alpha > 0 \quad (3.6)$$

Bezatteikuma darba varbūtība:

$$P(t) = \int_t^\infty f(t)dt = \exp(-ct^\alpha) \quad (3.7)$$

Matemātiskā darbmūža gaidīšana:

$$T_{cp} = MT = \int_0^\infty tf(t)dt = c^{-\frac{1}{\alpha}} \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \quad (3.8)$$

kur,  $\Gamma$  - gamma-funkcija, kam ir tabulētas nozīmes.

Atteikumu intensitāte:

$$\lambda(t) = c\alpha t^{\alpha-1} \quad (3.9)$$

Pie motora-reduktora kalpošanas laika novērtēšanas jāizmanto pēdējais gadījums, kad darbojas kopīgi pēkšņi un pakāpeniskie atteikumi.

Kalpošanas laika aprēķins jāveic pirms reduktora pieslēgšanas, lai aptuveni zinātu paredzamo reduktora drošas darbības laiku.

## 3.2 Vibrācijas analīze

Tālāk šajā nodaļā tiek dotas vibrāciju analīzes galvenās metodes, kuras plaši izplatītas pasaulē un kuras tiek pielietotas planetāro reduktoru tehniskā stāvokļa novērtējumam. Tie ir – vibrāciju analīze laika apgabalā (signāla formas analīze, stohastiskā analīze, pašsvārstības korelāciju analīze), vibrāciju analīze frekvenču apgabalā (filtrācija, spektrālanalīze, apliecošās spektrālanalīze, ķepstrālanalīze), daudzparametriskā vibrāciju analīze (daudzdimensionālā analīze, bispektrālanalīze, veivletanalīze), relatīvās vibrācijas analīze [2].

### 3.2.1 Vibrācijas analīze laika joslā

Tiek aprakstīti dažādi analīzes veidi, kuri attiecas pie vibrācijas analīzes laika apgabalā. Tie ir – signāla formas analīze, statistiskā analīze, korelāciju analīze, pašsvārstības analīze.

### 3.2.2 Vibrācijas analīze frekvenču joslā

Tiek aprakstīti dažādi analīzes veidi, kuri attiecas pie vibrācijas frekvenču joslā analīzes, piemēram, filtrācija, kura ir nepieciešama vibrācijas signāla dažādu frekvenču sastāvdaļu sadalīšanai. Pie frekvenču analīzes attiecas spektrālanalīze, apliecošās spektrālanalīze, ķepstrālanalīze.

### 3.2.3 Daudzparametriskā vibrācijas analīze

Tiek aprakstīti tādi analīzes veidi, kuri attiecās pie daudzparametriskās analīzes kā, piemēram: daudzdimensionālā analīze, bispektrālanalīze, viļņu veida (wavelet) analīze.

### 3.2.4. Relatīvas vibrācijas analīze

Relatīvas vibrācijas mērīšana nozīmē, viena kustīga mašīnas mezgla vibrācijas mērījumus attiecībā pret nekustīgu.

### 3.2.5. Vibrācijas mērīšanas lielumi

Aplūkojami gan lineāri gan relatīvas vibrācijas mērvienības.

## 3.3 Planetāro motora-reduktora pamatmezglu analīzes metodes

Pie planetāro motora-reduktora īpaši atbildīgiem mezgliem attiecas: ritgultņi, zobrati, kā arī piedziņas elektromotora stāvoklis.

### 3.3.1 Ritgultņi

Ritgultņa darbs planetārā motora-reduktora sastāvā pie defekta esamības tajā, var izraisīt iespaidu uz vibrāciju un procesiem, kuri modulē to, ar sekojošām galvenajām frekvencēm:

- Kustīga gredzena griešanās frekvence attiecībā pret nekustīgu:  $f_{rot}$ ; [29]
- Separators griešanās frekvence attiecībā pret ārējo gredzenu:

$$f_r = \frac{1}{2} \cdot f_{rot} \cdot \left( 1 - \frac{d_{sr}}{d_r} \cdot \cos(\alpha) \right); \quad (3.9)$$

Rites ķermeņu pārrīpināšanas frekvence pa ārējo gredzenu:

$$f_{out} = \frac{1}{2} \cdot f_{rot} \left( 1 - \frac{d_{sr}}{d_r} \cdot \cos(\alpha) \right) \cdot z = f_r \cdot z; \quad (3.10)$$

- Rites ķermeņu pārrīpināšanas frekvence pa iekšējo gredzenu:

$$f_{in} = \frac{1}{2} \cdot f_{rot} \left( 1 + \frac{d_{sr}}{d_r} \cdot \cos(\alpha) \right) \cdot z = (f_{rot} - f_r) \cdot z; \quad (3.11)$$

- Rites ķermeņa griešanās frekvence attiecībā pret gredzenu virsmu:

$$f_{rbc} = \frac{1}{2} \cdot f_{rot} \cdot \frac{d_r}{d_{sr}} \left( 1 - \frac{d_{sr}^2}{d_r^2} \cdot \cos^2(\alpha) \right); \quad (3.12)$$

### 3.3.2 Planetārais zobpārvals

Šeit tiek dotas galvenās un modulācijas frekvences, analizējot kuras, ar spektrālanalīzes palīdzību, var spriest par motora-reduktora stāvokli.

### 3.3.3 Elektromotors

Šeit tiek doti vibrācijas komponentu un strāvas frekvences kā asinhronmotora (AM) defektu diagnostiskas pazīmes.

#### 4.nodaļa. EKSPERIMENTU VEIKŠANAS IEKĀRTAS

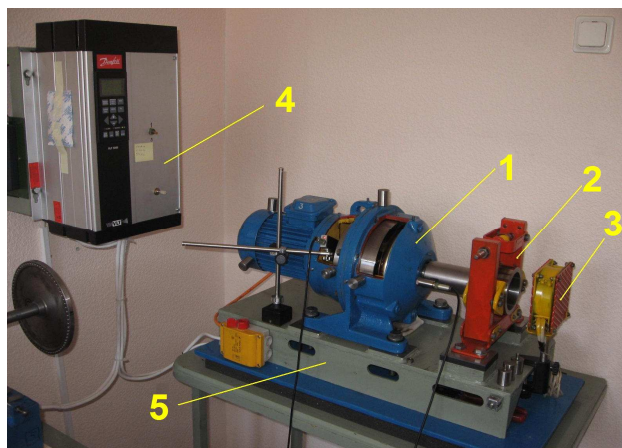
Lai izpildītu uzdevumus, kas ir aprakstīti dotā darba 1.nodaļas 1.4. punktā, nepieciešams ne tikai veikt teorētiskus pētījumus, bet arī izstrādāt un izgatavot iekārtu (stendu) eksperimentu veikšanai. Mērījumu un datu apstrādei, kuri saņemti eksperimentu gaitā, ir nepieciešama aparatūra un programmas nodrošinājums.

##### 4.1 Planetārā motora-reduktora pētīšanas iekārta (stends)

Eksperimentu veikšanai ir izstrādāta un izgatavota eksperimentāla iekārta (stends) (4.1.att).

Šis stends sastāv no sekojošajiem komponentiem:

1. Divpakāpju planetārais motora-reduktors ar nekustīgiem epicikliem. reduktora pilnā pārnesuma attiecība:  $u = 55,2$ ;
2. Bremžu mehānisms, mākslīgas slodzes radīšanai. Mehānisms atrodas bremzēšanas režīmā pastāvīgi;
3. Dzesēšanas ventilators.



4.1.att. Eksperimentālā iekārta (stends)

4. Frekvenču pārveidotājs piedziņas elektromotora griešanās dažādām frekvencēm testēšanas iespējai;
5. Iekārtas statne.

##### 4.2 Frekvences pārveidotājs

Eksperimenta gaitā tiek izmantots firmas Danfoss frekvenču pārveidotājs VLT® 5001. sērija.

##### 4.3 Datu mērīšanas un analīžu aprīkojums

Divpakāpju planetārā motora-reduktora mērījumam un vibrācijas analīzei tiek izmantots sekojošais aprīkojums un programmas nodrošinājums:

1. SD-21 vibroanalizators
2. VAST FD-2 apgriezīgu (infrasarkans fotodevējs) devējs;
3. Vibrācijas pārveidotājs AR28I;
4. Programmu pakete monitoringam un rotoru mašīnu analīzei (DREAM for Windows);
5. Programma Vibro 12 SD-21 vibroanalizatora analīzei.

##### 4.4. Vibrācijas signālu mērīšanas kļūdas.

Sistēmas, sastāvoša no vibroanalizatora SD-21 un vibropārveidotāja AR28I ar ieejas signālu pilnā kļūda:

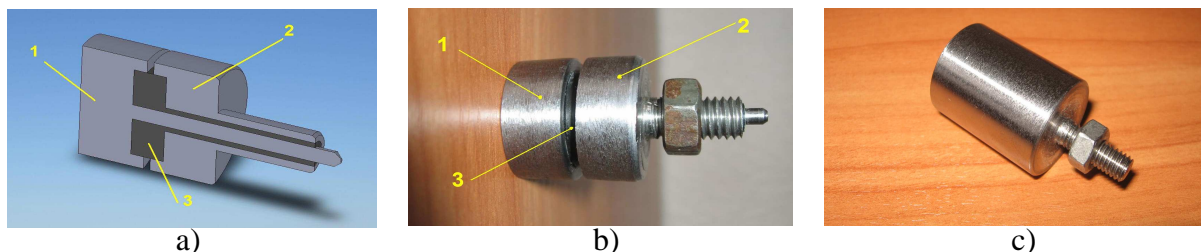
$$\delta \theta_0 = \delta \theta_1 + \delta \theta_2 = 10\% + 5\% = \pm 15\% \quad (4.1)$$

kur,  $\delta \theta_1$  - vibropārveidotāja AR28I relatīvā kļūda;

$\delta \theta_2$  - vibroanalizatora SD-21 relatīvā kļūda.

## 5.nodaļa. EKSPERIMENTU VEIKŠANA

Ar 4.nodaļā aprakstītā aprīkojuma palīdzību, tika veikti planetārā motora-reduktora galveno elementu vibrāciju signālu mērījumi un analīžu eksperimenti. Eksperimentu gaitā paveikta pielietojuma efektivitātes pārbaude taustam A (5.1.att.a; b) un taustam B (5.1.att., c), kuri paredzēti vibrāciju signāla mērīšanai tieši no gredzenzobrata virsmas.



5.1.att. **a; b** - mērīšanas tausts A vibrāciju signāla mērījumam no gredzenzobrata virsmas: 1 – adata; 2 – pamats; 3 – gumijas izolators. **c** - mērīšanas tausts B

### 5.1 Pamatmezglu frekvenču noteikšana

Lai veiktu vibrācijas analīzi, kā arī pareizi aprēķinātu planetārā reduktora pamatkomponentu ritgultņu informatīvo harmoniku frekvences lielumus (5.2.tabula), nepieciešams izdalīt apgriezienu faktisko skaitu un zobu sazojbu galveno harmoniku frekvences (zobu frekvences) aprēķinu pie dažādiem piedziņvārpstas griešanās apgriezieniem (10,28; 18,25; 25,14 Hz) (5.1.tabula).

5.1.tabula

Apgriezienu faktiskais skaits un zobu sazojbes galveno harmoniku frekvences pie piedziņvārpstas rotācijas frekvences 25,14 Hz

Apzīmējums	Parametra nosaukums	Dimensija	Parametra nozīme katrai pakāpei	
			1 pakāpe	2 pakāpe
$S_{S_{25,14}}$	Saules zobrata rotācijas skaits	apgr./min	1508,4	-209,5
$R_T$	Gredzenzobrata zobu daudzums	gab.	123	135
$P_T$	Satelītu zobrata zobu daudzums	gab.	54	54
$S_T$	Saules zobrata zobu daudzums	gab.	15	27
$T_V$	Pārnesumskaitlis		0,12195	0,2
$C_{S_{25,14}}$	Vaduļa apgriezienu skaits	apgr./min	-209,5	-52,375
$P_{S_{25,14}}$	Satelīta apgriezienu skaits	apgr./min	477,194	130,938
$P_{SA_{25,14}}$	Satelīta apgriezienu skaits absolūts	apgr./min	-267,694	-78,563
$R_S$	Gredzenzobrata apgriezienu skaits (epicikla)	apgr./min	0	0
$f_{P_{25,14}}$	Satelīta zobu frekvence	Hz	429,475	117,844
$f_{S_{25,14}}$	Saules zobrata zobu frekvence	Hz	377,1	94,275
$u$	Pārnesuma attiecība		9,2	6
$f_E$	Satelīta pārejas pa epiciklu frekvence	Hz	10,475	2,619



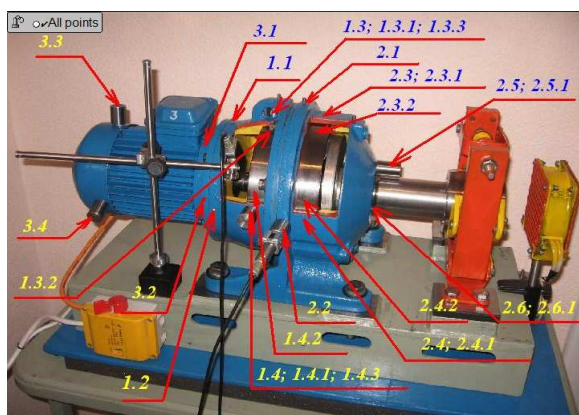
Gultņa 62304-2RS1 defektu galveno harmoniku frekvences

Apzīmējums	Galveno gultņu frekvences nosaukums	Galveno gultņu frekvenču nozīmes pie dažādiem darba režīmiem (Hz)		
$f_{rot}$	Piedziņas rotācijas frekvence	10,28	18,25	25,14
$f_r$	Separatora rotācijas frekvence	3,78	6,71	9,24
$f_{rbc}$	Rites ķermeņu kontakta frekvence	18,07	32,07	44,18
$f_{out}$	Rites ķermeņu pārripināšanas frekvence pa ārējo gredzenu	26,46	46,97	64,71
$f_{in}$	Rites ķermeņu pārripināšanas frekvence pa iekšējo gredzenu	45,50	80,78	111,27

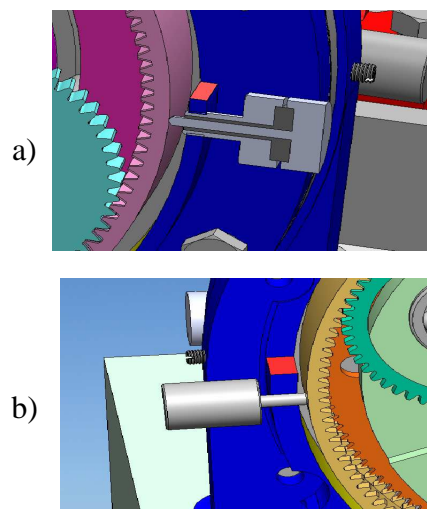
Nodaļā aprakstīts eksperiments, vibrācijas kontroles punkti, A un B mērīšanas taustu uzstādīšanas veidi. Dota arī iepriekšējs mērīšanas secība, kuru var koriģēt eksperimenta gaitā.

## 5.2 Motora-reduktora vibrāciju mērīšana

Motora-reduktora vibrācijas mērījums tiek veikts ar akcelerometru AR-28 26 punktos (5.2.att.). Kopā veikti 78 mērījumi.



5.2.att. Kontrolpunktu izvietojuma shēma un numerācija



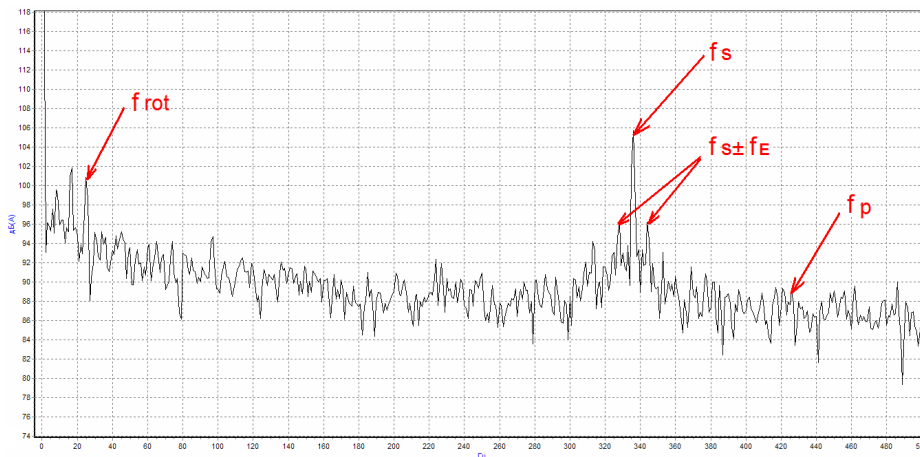
5.3.att. a – tausta A piestiprinājums uz korpusa; b – tausts B

### 5.2.1. Vibrācijas augstfrekvences sastāvdaļās apliecošā signāla veidošanas princips.

Šajā nodaļā aprakstīts princips un filtra izvēles grafiks nejaušās vibrācijas augstfrekvences apliecošās spektra veidošanai:

1. Ar SD-21 vibroanalizatoru palīdzību ir veikta taisna spektra mērījuma konfigurēšana ar augšējo robežfrekvenci  $f_{rob} = 25600 \text{ Hz}$
2. Ar vibropārveidotāja AR28I palīdzību tiek izmērītā vibrācija noteiktā punktā uz agregāta virsmas.
3. Tiek veiktā informācijas ievadē datorā ar programmu DREAM 32.

4. Programmā DREAM 32 izvēlams funkciju «izvēlēties filtru», un veic piemērotu filtru atlasi.
5. SD-21 vibroanalizatorā izvēlams frekvences diapazonu apliecošā signāla spektram ar augšējo robežfrekvenci (parasti  $f_{rob} \leq 1000 \text{ Hz}$ ).
6. Pēc mērījumu veikšanas, datus no SD-21 ievadā datorā un veic informatīvu frekvences iezīmēšanu (skat. 5.4. att.).



5.4.att. Vibrācijas augstfrekvences apliecošā signāla spektra fragments (robežfrekvence  $f_{rob} = 800 \text{ Hz}$ ,  $1/3$  oktāvas filtrs ar  $f_{vid} = 6400 \text{ Hz}$ ) ar informatīvām frekvencēm (tab. 5.1 – 1. pakāpe), kas ir izmērītas punktā 1.3.3 pie  $f_{rot} = 25,14 \text{ Hz}$

## 5.2.2. Mērījumu secības formējums

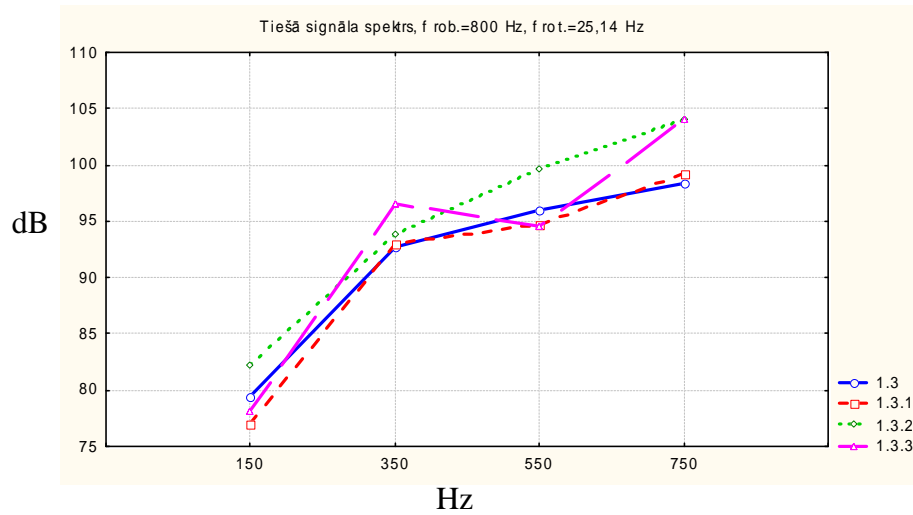
Pamatojoties uz pielietojamo filtru veikto analīzi tiek izvēlēts īpaši optimāls filtrs apliecošās augstfrekvences vibrācijas spektra formējumam ( $1/3$  oktāvu filtrs ar centrālu frekvenci  $f_{vid} = 1000 \text{ Hz}$ ), un tiek ieviesta korekcija vibrācijas mērījumu sākotnējā secībā. Pēc tām tiek sastādīta galīgā mērījumu secība.

## 5.2.3. Motora-reduktora pirmā pakāpe

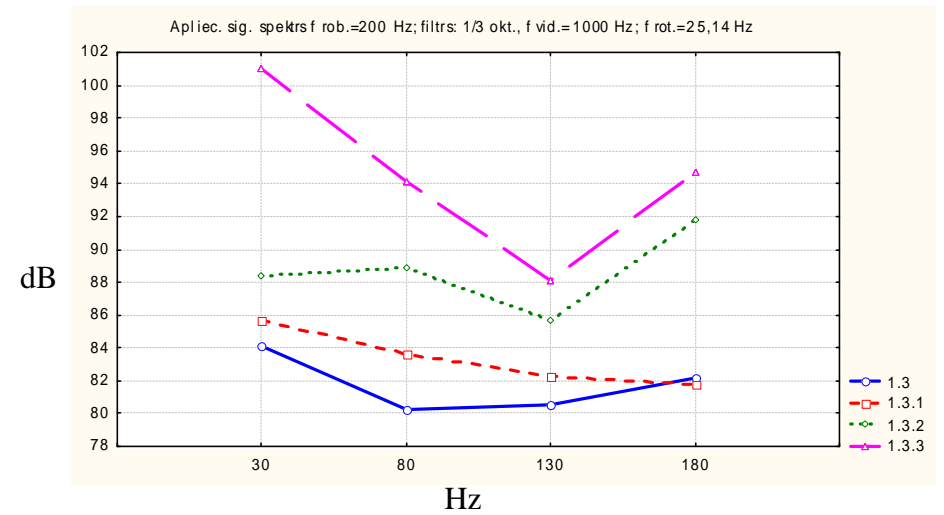
Pie reduktora pirmās pakāpes galveno mezglu vibrācijas analīzes pirmkārt jāpievērš uzmanību uz signāla uztveres precizitāti punktu rajonā: 1.3; 1.3.1; 1.3.2; 1.3.3; 1.4; 1.4.1; 1.4.2; 1.4.3. Šie punkti vajadzīgi akselerometra izvietojumam, lai izmērītu signālu reduktora 1. pakāpes planetārās pārvades rajonā. Šo punktu organizācijas mērķis: pārbaudīt hipotēzi par to, ka pielietojot taustu A var kontrolēt vibrāciju uz gredzenzobrata ar maksimālu precizitāti. Tādēļ, lai izanalizētu tiešā signāla spektrus saņemtus 1.3; 1.3.1; 1.3.2; 1.3.3 punktos vertikālā virzienā un 1.4; 1.4.1; 1.4.2; 1.4.3 punktos horizontālā virzienā, nepieciešams izvēlēties kontrolfrekvences. Uz tiešā signāla spektriem tas ir 150; 350; 550; 750 Hz, bet uz apliecošās spektriem tas ir 30; 80; 130; 180 Hz. Uz šīm frekvencēm pierakstās vibrācijas līmeņi dB(A). Uz šo datu pamata zīmējas vibrācijas līmeņu atkarību grafiki no devēju izvietojuma un secināmi par katra punkta informativitāti.

Analizējot grafikus uz 5.5; 5,6; 5,7; 5,8. att. var secināt, ka pie planetārā motora-reduktora vibrācijas pirmās pakāpes signāla mērījuma, īpaši informatīvais punkts ir punkts 1.3.3. Punkts 1.4.3 tāpat nepieciešams, tā kā signālam, kurš ir izmērīts dotajā punktā, ir augstāks līmenis vidusfrekvenču apgabalā (180 – 750 Hz), salīdzinot ar punktiem 1.4 un 1.4.1.

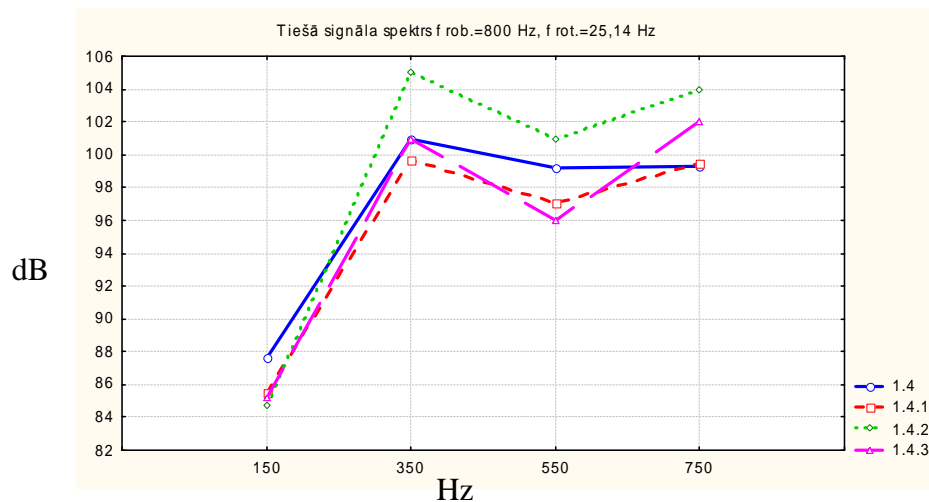
Piemēram, 5.4.att. tiek dotas zobu saobju un gultņu galvenās harmonikas pie piedziņvārpstas rotācijas frekvences 25,14 Hz.



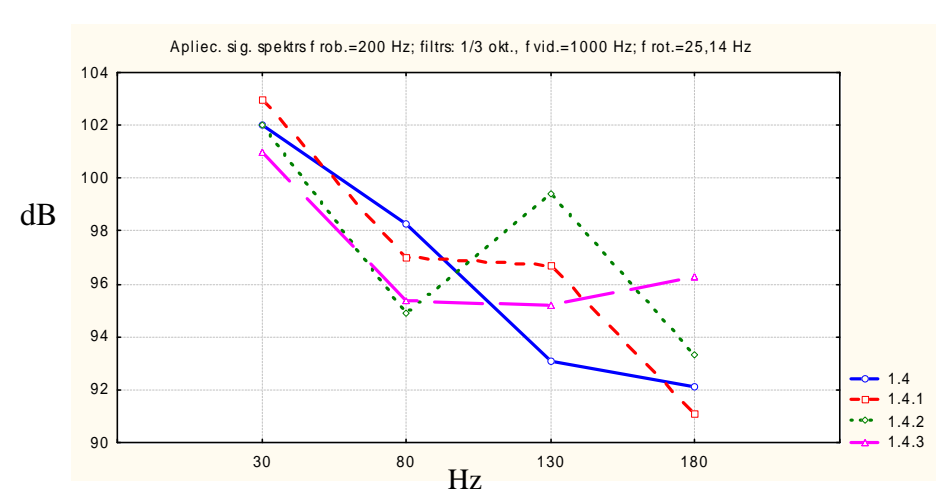
5.5.att. Vibrācijas līmeņa atkarība no devēja izvietojanas punktiem. Tiešā signāla spektrs. Vertikāls virziens



5.7.att. Vibrācijas līmeņa atkarība no devēja izvietojanas punktiem. Apliecošās signāla spektrs. Vertikāls virziens



5.6.att. Vibrācijas līmeņa atkarība no devēja izvietojanas punktiem. Tiešā signāla spektrs. Horizontāls virziens



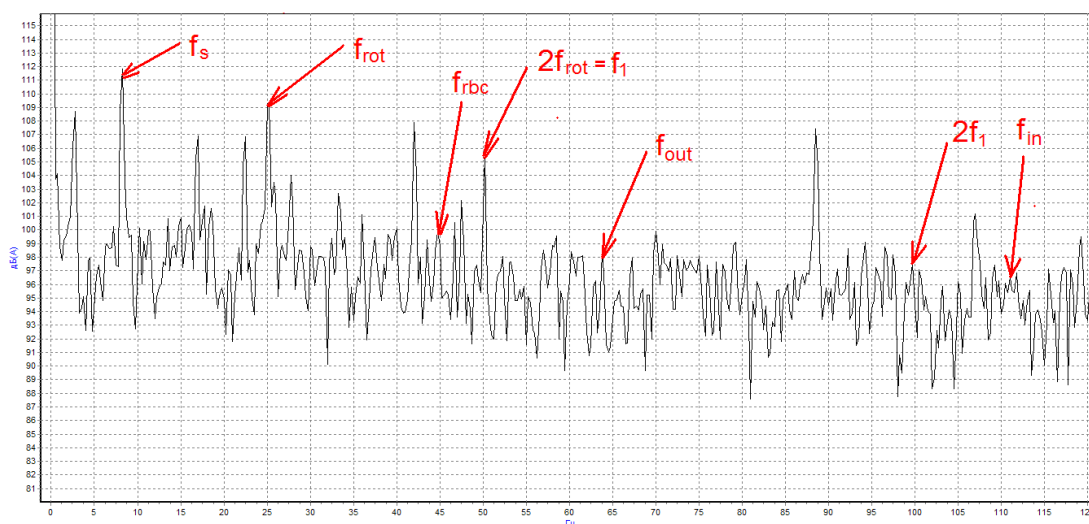
5.8.att. Vibrācijas līmeņa atkarība no devēja izvietojanas punktiem. Apliecošās signāla spektrs. Horizontāls virziens

## 5.2.4. Motora-reduktora otrā pakāpe

Planetāra reduktora otrās pakāpes vibrācijas analīze ir analogiska pirmās pakāpes analīzei, ar vienīgo atšķirību: uz otrās pakāpes netiek izmantots mērīšanas tausts A. Tas ir izskaidrojams ar to, ka nav nepieciešamības to pielietot eksperimentā, tomēr viņa pielietojums ir nepieciešams reālā reduktorā.

## 5.2.5. Elektromotors

Lai noteiktu planetārā reduktora konkrētās piedziņas (ar  $f_{rot} = 25,14 \text{ Hz}$ ) tehnisko stāvokli - asinhronam elektromotoram pietiek ar 3 taisna spektra un augstfrekvences vibrācijas apliecošās spektra secīgu mērījumu ar augšējo robežu frekvenci  $f_{rob} = 800 \text{ Hz}$ . Pie tam tiek novērtēts ne tikai rotora balsta gultņu stāvoklis (5.9.att.), bet arī elektromagnētiskā cilmes vibrācijas sastāvdaļas. Pie tiem attiecas: statora tinumu defekti (infofrekvence:  $2f_1$ ), rotora tinumu defekti (infofrekvence:  $kf_{rot}$ ;  $f_z$ ), spēles statistiskā ekscentricitāte (infofrekvence:  $2f_1$ ), spēles dinamiskā ekscentricitāte (infofrekvence:  $f_{rot}$ ).



5.9.att. Augstfrekvences vibrācijas apliecošās spektra fragments, (robežfrekvence  $f_{rob} = 200 \text{ Hz}$ ,  $1/3$  oktāvas filtrs ar  $f_{vid} = 1000 \text{ Hz}$ ) ar informatīvām frekvencēm (tab. 5.2), kas ir izmērītas punktā 3.3 pie  $f_{rot} = 25,14 \text{ Hz}$ .

## 5.3 Vibrācijas pieļaujamo robežu definēšana

Vibrāciju signālu analīzes visas metodes ir varbūtīgas. Tas dod iespēju noteikt varbūtību par kļūdainiem slēdzieniem:

- par viltus trauksmi, t.i. tiek saņemts signāls, bet nav defekta;
- par defektu neesamību, t.i. netiek saņemts signāls par esošu defektu.

Vidēju un bīstamu stāvokļu iepriekšējās robežas var noteikt šādi:

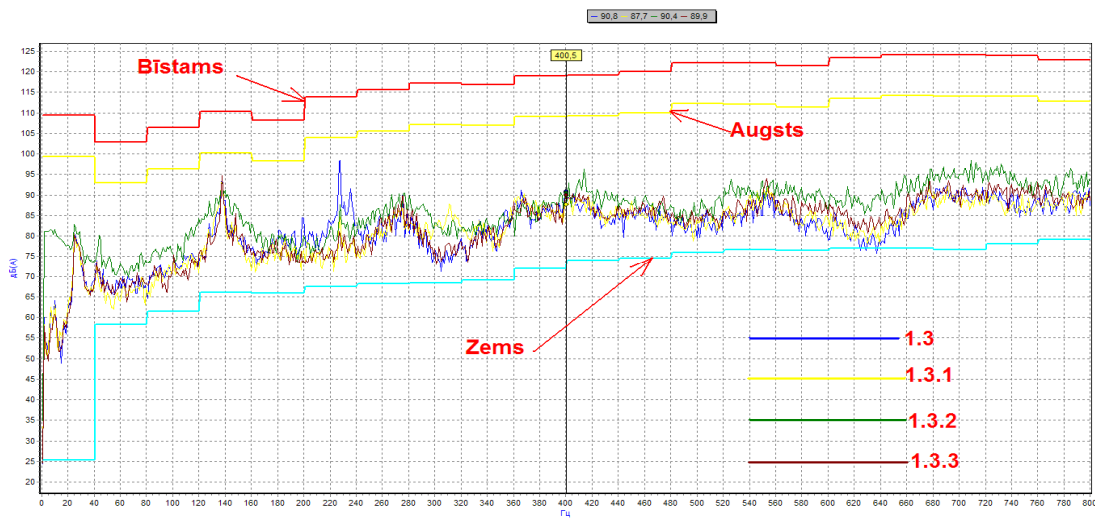
$$X_{ROB}^{VID} = \overline{X_O} + 2\sigma_{0X} \quad (5.1)$$

$$X_{ROB}^{MAX} = \overline{X_O} + 4\sigma_{0X} \quad (5.2)$$

kur,  $\overline{X_O}$  - diagnostiskā parametra vidēja vērtība;

$\sigma_0$  - diagnostiskā parametra vidējā kvadrātiskā novirze.

Kā, piemēram, 5.10.att. tiek dots tiešā signāla spektrs ar uzstādītajām robežām, kas ir izmērītas 1.3; 1.3.1; 1.3.2; 1.3.3 punktos pie  $f_{rot} = 10,28 \text{ Hz}$ .



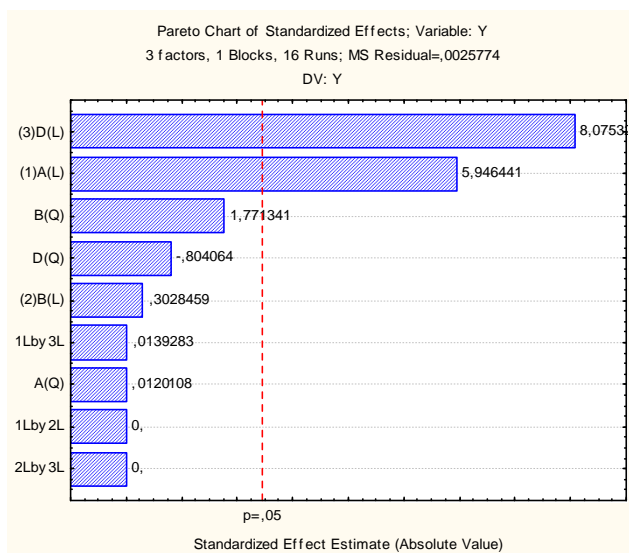
5.10.att. Tiešā signāla spektrs ar uzstādītajām robežām, kas ir izmērītas 1.3; 1.3.1; 1.3.2; 1.3.3 punktos pie  $f_{rot} = 10,28 Hz$

Lai noteikt motora-reduktora tehnisko stāvokļa atbilstību pieļaujamiem robežiem ir nepieciešams mērījumu atkārtojums (vismaz 3 reizes).

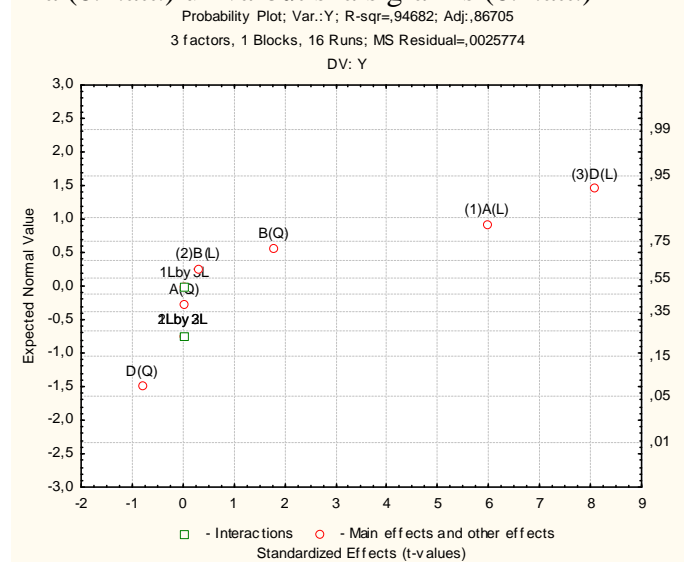
## 6.nodala. MOTORA-REDUKTORA VIBRĀCIJAS MATEMĀTISKĀ MODEĻA IZVEIDOŠANA

Šajā nodaļā tiek doti eksperimenta veikšanas rezultāti ar centrālu kompozicionālu plānu metodi atbalss virsmām. Atbalss ir vibrācijas amplitūdas virsotnes relatīvas nozīmes lielums (pīķa-faktors).

Lai noteiktu vibrācijas devēja uzstādīšanas vietu, kurā var izmērīt maksimāli precīzi vibrāciju signālu, kas nāk no reduktora pirmās pakāpes zobu pārvades, nepieciešams paveikt eksperimentu ar tam sekojošu rezultātu analīzi. Tam veiksīm mērījumus četros punktos vertikālā virzienā pirmās pakāpes gredzenzobrata rajonā. Vibrācijas mērījumi tiek veikti uz elektromotora rotācijas darba frekvences –  $25,14 Hz$ . Eksperimenta plānošana un rezultātu apstrāde notika ar centrālu kompozicionālu plānu metodi atbalss virsmām. Eksperimenta rezultātus pārskatāmi demonstrē Pareto diagramma (6.1.att.) un varbūtiskais grafiks (6.2.att.)



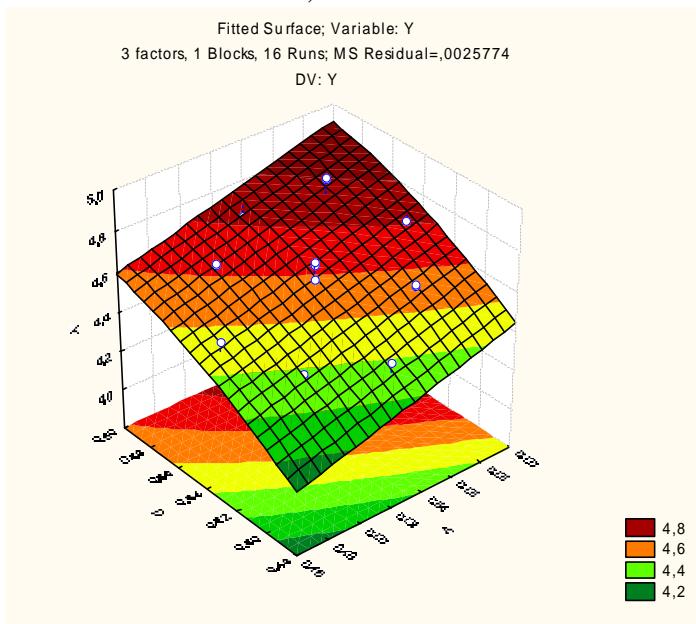
6.1.att. Pareto diagramma



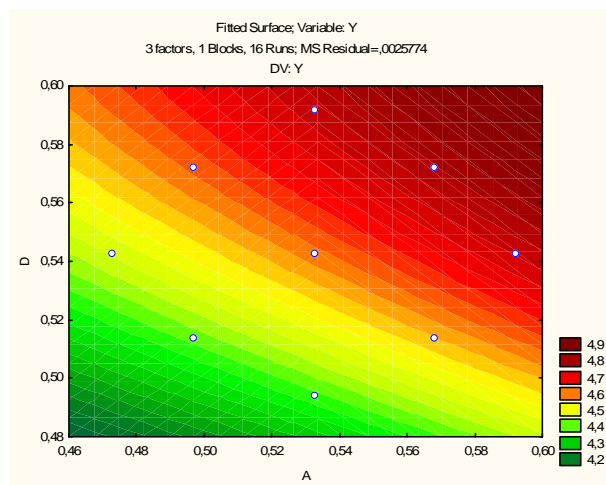
6.2.att. Varbūtiskais grafiks

Analizējot doto diagrammu (6.1.att.) var ievērot, ka tikai (1)A(L) un (3)D(L) diviem faktoriem ir nozīme. Atbilstošās ailes krusto vertikālo līniju, kura sastāda 95% ticamu varbūtību.

Pie grafika (6.2.att.) analīzes ir redzams, ka **(3)D(L)** un **(1)A(L)** faktoru punkti atrodas pie lielā attālumā no 0, tātad tiem ir statistiska nozīme.



6.3.att. Atbildes virsma ar faktoru A un D iedarbību



6.4. att. Kontūru atbildes virsma ar faktoru A un D iedarbību

Vizuāli, faktoru A un D iedarbību uz atbildes virsmu var aplūkot 6.3.att. un 6.4.att. Tāpat svarīgs eksperimenta rezultāts ir regresija (6.1), kas pauž pīķa-faktora lieluma atkarību no vibrācijas devēja uzstādīšanas dažādām metodēm:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 x_2 + b_{13} \cdot x_1 x_3 + b_{23} \cdot x_2 x_3 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2 = \quad (6.1)$$

$$4,5917 + 0,1634 x_1 - 0,0083 x_2 + 0,2218 x_3 + 0,0005 x_1 x_3 + 0,0004 x_1^2 - 0,0591 x_2^2 - 0,0268 x_3^2$$

kur,  $b_0; b_1; b_2; b_3; b_{12}; b_{13}; b_{23}; b_{11}; b_{22}; b_{33}$  - regresijas teorētiskie koeficienti;

$x_1$  - amplitūdas vidējā iztaisnotā vērtība 1.3.punktā (faktors A);

$x_2$  - amplitūdas vidējā iztaisnotā vērtība 1.3.1.punktā (faktors B);

$x_3$  - amplitūdas vidējā iztaisnotā vērtība 1.3.3.punktā (faktors D).

## 7.nodaļa. MOTORA-REDUKTORA TEHNISKĀ STĀVOKĻA NOTEIKŠANAS METODIKA

Darba rezultātā tika sagatavota metodika, kas ļauj noteikt planetārā motora-reduktora tehnisku stāvokli.

Metodika dod sekojošajās iespējas:

- Motora-reduktora vibrācijas mērīšana un analīze bez to izjaukšanas;
- Motora-reduktora iepriekšējā tehniskā stāvokļa uzstādīšana pēc pirmā mērījuma, un galīgā pēc trijiem mērījumiem;
- Nav nepieciešamības pēc dārga mērīšanas aprīkojuma un specializētas programmas;

Pie metodikas pamatnoteikumiem attiecas:

1. Informācijas iegūšana par visiem motora-reduktora sastāvdaļām.
2. Sagatavošanās mērījumiem.
3. Vibrācijas līmeņa mērīšana pēc ISO 10816-97.
4. Motora-reduktora galveno mezglu informatīvo frekvenču aprēķins.
5. Tieša signāla spektra mērīšana ar maksimālu platumu.
6. Joslas filtru izvēle.

7. Mērīšanas secības izvēle un mērīšanas veikšana.
8. Informatīvo frekvenču un robežu apzīmēšana uz spektriem.
9. Analīzes veikšana un slēdziena par objekta stāvokli formulējums.

## SECINĀJUMI

Darba rezultāta pamatā var izdarīt sekojošus secinājumus:

1. Literatūras apskata rezultātā par planetāro motoru-reduktoru vibrācijas mērīšanu ir izdarīti secinājumi, ka rūpniecības vajadzībām nepieciešams izveidot metodiku motora-reduktora galveno mezglu tehniskā stāvokļa noteikšanai.
2. Motora-reduktora tehniskā stāvokļa pētīšanai izveidota speciāla eksperimentālā iekārta, kas darbojas apstākļos, kuri tuvi 2 pakāpju planetārā motora-reduktora darba apstākļiem. Iekārta dod iespēju veikt motora-reduktora galveno mezglu vibrāciju pētīšanu bez tā izjaukšanas. Iekārta atļauj pētīt dažādu faktoru ietekmi uz vibrāciju veidošanos.
3. Izstrādāti un aprobēti divu tipu (A un B tipa) mērīšanas tausti gredzenzobratu vibrācijas mērīšanai motora-reduktora 1. un 2. pakāpju rajonā. Mērīšanas tausts A, kas ir izstrādāts eksperimentu gaitā, ir aizsargāts ar Latvijas patentu pieteikumu Nr. P-09-141.
4. Veikti motora-reduktora dažādu sastāvdaļu vibrācijas mērījumi. Pierādīts, ka vibrāciju pētīšanai nepieciešams izmantot vibrācijas augstfrekvences apliecošā signāla raksturlielumu pētījumus.
5. Eksperimentāli pierādīts, ka nav nepieciešams veikt vibrāciju mērījumus pie reduktora un elektromotora darba rotācijas frekvences. Šo elementu vibrāciju pētījumus var veikt arī pie frekvences, kas ir pat divreiz zemāka par darba frekvenci, gadījumos, kad nav iespējams pieslēgt reduktoru uz pilnu jaudu, vai ja blakus strādā īpaši jūtīga iekārta.
6. Veikta motora-reduktora pamatelementu vibrācijas analīze ar vairāku metožu palīdzību, izmantojot laika signāla statistiku, spektrālanalīzi, augstfrekvences vibrācijas apliecošā signāla analīzi, kas dod iespēju pilnīgāk novērtēt motora-reduktora vibrācijas.
7. Pie zobu pārvada vibrācijas mērījumiem gan 1. gan 2. pakāpēm var rekomendēt izmantot A tipa mērīšanas taustu, kurš atļauj saņemt precīzāku vibrāciju signālu. Vibrācijas mērījumiem pirmajai pakāpei tausta A pielietojums lietderīgi izmantot vertikālā virzienā, jo tā var iegūt spēcīgāku signālu. Mērīšanas tausta A pielietojums dod iespēju precīzāk noteikt zobu pārvada vibrācijas. Starpība spektru līmeņos starp mērījumiem uz korpusa un ar tausta A palīdzību ir apmērām 4,5 dB pie tiešā signāla spektra analīzes, kas ir būtiska motora-reduktora tehniskā stāvokļa novērtēšanai.
8. Eksperimentu rezultātā tika izstrādāts motora-reduktora vibrāciju matemātiskais modelis, izmantojot eksperimentu plānošanas teoriju (centrālo kompozicionālu plānu metode). Modelis ļauj izpētīt dažādu faktoru ietekmi uz vibrācijas lielumu.
9. Izstrādāta divpakāpju planetārā motora-reduktora ar nekustīgiem gredzenzobratiem vibrācijas mērīšanas un analīzes metodika. Metodikas pielietošana konkrētam uzņēmumam ļauj samazināt izdevumus iekārtas apkalpošanai, jo ar tās palīdzību var novērtēt motora-reduktora elementu tehnisko stāvokli bez to izjaukšanas.

## LITERATŪRA

1. Жуков Р. В., Обзор некоторых стандартов ISO/TC 108 в области диагностики машинного оборудования// *Контроль и диагностика* – 2004 - № 12 – 61-66 с.
2. Ключев В.В., *Неразрушающий контроль: Справочник: Том 7, Книга 2.* – Москва: Машиностроение. 2005. – 829 с.
3. Барков А.В., Баркова Н.А., Азовцев А.Ю. *Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации.* – Санкт-Петербург: Изд.центр СПбГМТУ, 2000. – 159 с.
4. Балицкий Ф. Я., Иванова М. А., и др., *Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов.* – Москва: Наука. 1984. – 120 с.
5. Гольдин А. С. *Вибрация роторных машин.* – Москва: Машиностроение, 1999. – 344 с.
6. Генкин М. Д., Соколова А. Г. *Виброакустическая диагностика машин и механизмов.* – Москва: Машиностроение, 1987. – 288 с.
7. Kelly Graham S., *Fundamentals of Mechanical Vibrations.* – Boston: McGraw Hill, 2000. – 632 p.
8. Mobley R. K., *An Introduction to Predictive Maintenance.* - Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. – 438 p.
9. Smith J.D., *Gear Noise and Vibration.*–Cambridge: Marcel Dekker,Inc., 2003.– 298 p.
10. Botman M. *Vibration measurements on planetary gears of aircraft turbine engines // Journal of Aircraft.* - № 17(5) – 1980. – 351-357 p.
11. Maurice L. Adams, Jr., *Rotating Machinery Vibration From Analysis to Troubleshooting.* - New York: Marcel Dekker,Inc., 2001. – 355 p.
12. Fahy F., Walker J. *Advanced Applications in Acoustics, Noise and Vibration.* – London: Spon Press, 2004. – 640 p.
13. Taylor J. I., *The Vibration Analysis Handbook.* – New York: VCI, 2003. – 375 p.
14. Clarence W. de Silva, *Vibration Fundamentals and Practice.* – London: CRC Press. 2000. – 938 p.
15. Robert G. Parker, Jian Lin. *Modeling, Modal Properties, and Mesh Stiffness Variation Instabilities of Planetary Gears.* – Columbus: Ohio State University, 2001. – 121 p.
16. Горелик А. Л. и др. *Методы технической диагностики машин и механизмов.* – Москва: НТЦ «Информатика», 1990. – 204 с.
17. Sparis P., Vachtsevanos G. *A Helicopter Planetary Gear Plate Crack Analysis and Feature Extraction Based on Ground and Aircraft Data //Proceedings of the 2005 IEEE Conference on Control and Automation.* – 27-29 June, 2005. – 646-651 p.
18. McFadden P. D. *A Technique for Calculating the Time Domain Averages of the Vibration of the Individual Planet Gears and the Sun Gear in an Epicyclic Gearbox// Journal of Sound and Vibration.* - № 144(1) – 1991. – 163-172 p.
19. Wang W., Wong A. K. *A Model-Based Gear Diagnostic Technique / Internets.* - <http://dSPACE.dsto.defence.gov.au/dSPACE/bitstream/1947/4127/1/DSTO-TR-1079PR.pdf>
20. Zakrajsek J. J., Townsend D. P., Decker H. J. *An analysis of gear fault detection methods as applied to pitting fatigue failure data // 47<sup>th</sup> Mechanical Failure Prevention Group.* – Virginia Beach, VA. – 1995. – 10 p.
21. Jenkins G.M., Watts D.G., *Spectral analysis and its applications. Part 1-2* – San Francisco: Holden-Day, 1969-1971.
22. Rabiner L.R., Gold B., *Theory and Application of Digital Signal Processing.* – New Jersey: Prentice-Hall, 1975. – 836 p.
23. Марпл-мл. С. Л., *Цифровой спектральный анализ и его приложения.* – Москва: Мир, 1990. – 584 с.
24. Рандалл Р. Б. *Частотный анализ.* – Глоструп: К. Ларсен и сын, 1989. – 389 с.



25. Večeř P., Kreidl M., Šmíd R. *Condition Indicators for Gearbox Condition Monitoring Systems // Acta Polytechnica.* – 2005. - № 6. – 35-43 p.
26. Барков А. В. и др. *Диагностика механических передач.* – Санкт-Петербург: Издательский центр СПбГМТУ, 2005. – 51 с.
27. Singleton K. *Analysis of Two Stage Planetary Gearbox Vibration / Internets.* - <http://www.vibration.org/Presentation/Case Study Analysis Planetary Gearbox Sept 5 2006.pdf>
28. Рудзит Я. А., Плуталов В. Н. *Основы метрологии, точность и надежность в приборостроении.* – Москва: Машиностроение, 1991. – 304 с.
29. Баркова Н. А. *Вибрационная диагностика подшипников качения.* – Санкт-Петербург: Издательский центр СПбГМТУ, 2007. – 72 с.