

Dmitrijs Gorbačovs

GUMIJAS KORDA ELASTĪGO SAJŪGU UN TO STIPRINĀJUMA BULTSKRŪVJU ATTEIKUMU PĒTĪJUMS

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Būvniecības un mašīnzinību fakultāte

Transporta institūts

Dmitrijs Gorbačovs

Doktora studiju programmas "Transports" doktorants

**GUMIJAS KORDA ELASTĪGO SAJŪGU
UN TO STIPRINĀJUMA BULTSKRŪVJU
ATTEIKUMU PĒTĪJUMS**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs

asociētais profesors *Dr. sc. ing.*

PĀVELS GAVRILOVS

Konsultanti

Dr. sc. ing. **ALEKSANDRS BOIKO**

Dr. sc. ing. **JĀNIS EIDUKS**

RTU Izdevniecība

Rīga 2024

Gorbačovs D. Gumijas korda elastīgo sajūgu un to stiprinājuma bultskrūvju atteikumu pētījums. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2024. – 56 lpp.

Publicēts saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-22” 2023. gada 7. decembra protokolu Nr. 04030-9.16.1/13.

Vāka attēla autors – Pjotrs Sokolovs



IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

Promocijas darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu darbības programmas “Izaugsme un nodarbinātība” 8.2.2. specifiskā atbalsta mērķa “Stiprināt augstākās izglītības institūciju akadēmisko personālu stratēģiskās specializācijas jomās” projektā Nr. 8.2.2.0/20/I/008 “Rīgas Tehniskās universitātes un Banku augstskolas doktorantu un akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās”.

<https://doi.org/10.7250/9789934370274>
ISBN 978-9934-37-027-4 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2024. gada 23. februārī plkst. 13.00 Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības un mašīnzinību fakultātē, Ķīpsalas 6B ielā, 513. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Asoc. profesors *Dr. habil. sc. ing.* Vladimirs Šestakovs,
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors *Dr. habil. sc. ing.* Marijonas Bogdevičius,
Viļņas Ģedimīna tehniskā universitāte, Lietuva

Profesors *Dr. sc. ing.* Valeriy Kuznetsov,
Instytut Kolejnictwa, Polija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Dmitrijs Gorbačovs (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 198 attēli, 51 tabula, 11 pielikumi, kopā 207 lappuses, ieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 89 nosaukumi.

SAĪSINĀJUMU SARAKSTS

C – ogleklis
Mn – mangāns
Si – silīcijs
V – vanādijs
Cr – hroms
N – slāpeklis
P – fosfors
S – sērs
Al – alumīnijs
Cu – varš
Ni – niķelis
Ti – titāns
W – volframs
Mo – molibdēns
Co – kobalts
Pb – svins
Zr – cirkonijs
HNO₃ – slāpekļskābe
HB – cietības vērtība pēc Brinela
ER1 – Rīgas elektrovilciens, 1. tips
ER2 – Rīgas elektrovilciens, 2. tips
ER2T – Rīgas elektrovilciens, 2. tips, ar rekuperatīvo un reostatu bremzēšanu
EP2P – Rīgas elektrovilciens, 2. tips, ar reostatu bremzēšanu
EP2T – Rīgas elektrovilciens, 2. tips, ar rekuperatīvo un reostatu bremzēšanu
EIII2 – Luhanskas elektrovilciens, 2. tips
ET2 – Toržokas elektrovilciens, 2 tips
EP9 – Rīgas elektrovilciens, 9. tips
EIII9 – Luhanskas elektrovilciens, 9. tips
ED9 – Demihovas elektrovilciens, 9. tips
DR1A – Rīgas dīzeļvilciens, 1. tips
TGM4 – manevru dīzeļlokomotīve ar hidropārvalu, 4. modelis
TGM6 – manevru dīzeļlokomotīve ar hidropārvalu, 6. modelis
TEM2 – manevru dīzeļlokomotīve ar elektropārvalu, 2. modelis
TA-2 – elektrovilcienu tehniskā apkope 2 apjomā
TA-3 – elektrovilcienu tehniskā apkope 3 apjomā
TR-1 – elektrovilcienu atjaunošanas remonts 1 apjomā
TR-3 – elektrovilcienu atjaunošanas remonts 3 apjomā
TR-3+ – elektrovilcienu atjaunošanas remonts 3 apjomā ar kalpošanas termiņa pagarinājumu
VR – elektrovilcienu atjaunošanas vidējais remonts
GR – elektrovilcienu atjaunošanas galvenais remonts
GEM – galīgo elementu modelēšana
LDz – valsts akciju sabiedrība “Latvijas dzelzceļš”

Saturs

IEVADS	7
1. PĒTĪJUMA OBJEKTA APSKATS.....	11
1.1. Gumijas korda sajūga un to stiprinājuma bultskrūvju bojājumu analīze Latvijas dzelzceļā.....	11
2. GUMIJAS KORDA SAJŪGU UN TO BULTSKRŪVJU STIPRINĀJUMU ATTEIKUMU NOVĒRŠANAS METODIKAS IZSTRĀDE.....	13
2.1. Statistisko datu apkopojums par bojājumu zonām.....	13
2.2. Gumijas korda sajūga uzsilšanas temperatūras noteikšanas	14
2.3. Gumijas korda sajūgu ģeometrisko izmēru kontrole.....	15
2.4. Gumijas korda sajūga cietības pārbaude.....	16
2.5. Gumijas korda sajūga sairšanas spēku aprēķins.....	17
2.6. Gumijas korda sajūga noviržu mērījumi.....	20
2.7. Gumijas korda sajūga frekvenču analīze	21
2.8. Gumijas korda sajūga materiāla īpašību pētījumi	21
2.9. Gumijas korda sajūga modeļa izstrāde GEM programmas pakotnē	22
2.10. Bultskrūvju bojājumu noteikšana ar dažādām metodēm.....	23
3. METODIKAS APROBĀCIJA UZ TOROIDĀLO GUMIJAS KORDA SAJŪGA PIEMĒRU	24
3.1. Gumijas korda sajūga sānu virsmas sagraušanas cēloņu izpēte.....	24
3.2. Gumijas korda sajūga uzsilšanas temperatūras noteikšanas rezultāti	24
3.3. Sajūga ģeometrisko izmēru kontrole	25
3.4. Cietības noteikšana pēc “Shore A” metodes atkarībā no temperatūras	25
3.5. Gumijas korda sajūga sagraušanas spēku aprēķins.....	26
3.6. Gumijas korda sajūgu aksiālās radiālās un leņķiskās novirzes mērījumu rezultāti.....	28
3.7. Gumijas korda sajūga elastīgā elementa aprēķins ar GEM modelēšanas programmas pakotnes palīdzību	30
3.8. Sajūgu apvalku paraugu izmēģinājumu rezultāti	30
3.9. <i>SolidWorks</i> programma aprēķināšanas modeļa izveidošana.....	32
3.10. Gumijas korda sajūga apvalka fragmenta modelēšana	32
3.11. Gumijas korda sajūga apvalka pilna modeļa modelēšana	37
3.12. Radiālo, aksiālo un leņķisko noviržu modulēšanas rezultāti.....	39

3.13. Gumijas korda sajūga frekvences analīze.....	41
3.14. Gumijas korda sajūga stiprinājuma bultskrūvju lūzumu rakstura un cēloņa veida apskats.....	42
3.15. Gumijas korda sajūga stiprināšanas <i>M-24</i> bultskrūvju sagraušanas veidu noteikšana.....	43
3.15.1. Sagraušanas veida un rakstura noteikšana, piemērojot statisko slodzi.....	43
3.15.2. Sagraušanas veida un rakstura noteikšana, piemērojot ciklisko slodzi.....	43
3.15.3. Sagraušanas veida un rakstura noteikšana pie <i>M-24</i> bultskrūvju triecienvibrācijas pārbaudes.....	44
3.16. <i>M-24</i> bultskrūvju pētīšanas standarta <i>ISO 898-1:2013</i> un <i>EN 10083- 3:2007-01</i> atbilstība prasībām.....	44
3.17. Bultskrūvju paraugu metalogrāfiskā analīze.....	46
3.18. Bultskrūvju stiprinājumu trieciena un vibrācijas spēka kontroles ierīču projektēšana	47
3.19. Triecienvibrācijas ierīces testēšana.....	48
3.20. Ekonomiskais efekts, ieviešot izstrādāto metodiku un triecienvibrācijas ierīces.....	52
SECINĀJUMI.....	53
LITERATŪRAS SARAKSTS.....	55

IEVADS

Mūsdienās mašīnbūvē tiek lietoti dažāda veida sajūgi. Rotācijas momenta pārraidei starp agregātiem, kas pakļauti nozīmīgām dinamiskām, vibrējošām un trieciena slodzēm, izmanto sajūgu, ko izgatavo no augsti elastīga silikona, gumijas vai gumijas ar nostiprinātām šķiedrām un tērauda kordu. Šāda tipa sajūgi ir paredzēti ievērojamu leņķu, asu vai radiālu nobīžu kompensēšanai. Maksimāli iespējamās nobīdes ražotājs norāda izstrādājuma pasē un standartā. Sajūgus ar augsti elastīgu U vai toroidāla profila apvalku lieto dažādās piedziņās: celtniecības mašīnās un ceļu būves tehnikā, mašīnbūves darbagaldos, velmēšanas un urbšanas iekārtās, sūkņu agregātos, transportā – motorvagonu ritošajā sastāvā, kā arī dažāda veida kuģu spēka piedziņā.

Katru gadu Eiropā tiek fiksēts ievērojams rūpniecisko iekārtu neplānoto remontu skaits saistībā ar elastīgā sajūga atteici. Elastīgās gumijas korda sajūga atteice izraisa rūpnieciskās iekārtas vai vilces ritošā sastāva vienības apturēšanu neplānotā remonta veikšanai. Savukārt neplānotā remonta veikšanai nepieciešams finansējums, lai atjaunotu iekārtas darbderīgumu. Vidēji viena neplānotā remonta cenu veido elastīgā sajūga cena, tai pievienotā agregāta nomaiņas, kā arī ražošanas iekārtu dīkstāves izmaksas. Latvijā laika periodā no 2012. līdz 2021. gadam VAS “Latvijas dzelzceļš” uzņēmumā, kas nodarbojas ar ritošā sastāva remontu, ir bijis 101 gadījums, kad noticis elastīgā gumijas korda sajūga atteikums. Finansiālie zaudējumi, lai veiktu bojātā sajūga nomaiņu, vidēji veidoja 575–594 eiro atkarībā no sajūga veida. Tāpēc rodas nepieciešamība savlaicīgi atklāt atteices iemeslu un ieviest mūsdienīgus tehniskus risinājumus, lai samazinātu neplānotos remontus un finanšu tēriņus saistībā ar gumijas korda sajūga atteici. Līdz ar to, izanalizējot radušos situāciju, promocijas darba autors ir izstrādājis savu aprēķina metodiku un ārējo faktoru ietekmes vērtējumu uz gumijas korda sajūga un to sānu virsmas apvalku. Metodika izstrādāta, par piemēru ņemot VAS “Latvijas dzelzceļš” elektrovilciens ritošā sastāva elastīgo sajūga pievadu ar toroidāla veida profila apvalku, kas uzstādīts *ER2* sērijas elektrovilciena vagoniem, un U veida profila apvalku, kas uzstādīts *ER2T* sērijas elektrovilciena vagoniem.

Darba mērķi un uzdevumi

Darba mērķis

Gumijas kordu sajūgu un to stiprinājuma bultskrūvju atteikumu iemeslu izpēte, metodikas izstrāde šīs parādības iespējamības samazināšanai.

Darba uzdevumi

1. Apkopot statistiskos datus par gumijas korda sajūgu un bultskrūvju atteikuma un sistematizēt tos.
2. Izstrādāt gumijas korda sajūga un tā stiprinājuma bultskrūvju atteikumu novēšanas metodiku un veikt to aprobāciju.
3. Modelēšanas programmas pakotnē izveidot gumijas korda sajūga elastīgā elementa aprēķina modeli.

4. Izstrādāt vibrācijas un triecienslodzes kontroles sistēmu, kas uztver tās gumijas korda sajūga stiprinājuma bultskrūvēs.
5. Izstrādāt rekomendācijas gumijas korda sajūgu un to stiprinājuma bultskrūvju atteikumu samazināšanai.

Pētījuma metodes

1. Eksperimenti gumijas korda materiāla fragmentu un gumijas korda sajūga virsmas gumijas slāņa īpašību noteikšanai pie stiepšanas vienass virzienā.
2. Galīgo elementu modelēšana *SolidWorks Simulation* vidē, izmantojot nelineārus augsti elastīga materiāla modeļus.
3. Modelēšana *SolidWorks Simulation* vidē, tika veikti sajūgu apvalku modālo formu, frekvenču un spriedzes-deformējošā stāvokļa pētījumi, lai novērtētu to atteices cēloņus.
4. Lai novērtētu gumijas korda sajūga stiprinājuma bultskrūvju sagraušanas cēloņus, tika veiktas bultskrūvju dinamiskās un statiskās stiepes pārbaudes, kā arī bultskrūvju materiāla mikrostrukturālā un ķīmiskā analīze.

Darba zinātniskā novitāte

1. Izstrādāta metodika savlaicīgai atteikumu novēršanai gumijas korda sajūgu apvalkam un to stiprinājuma bultskrūvēm.
2. Izstrādāts datormodelis *SolidWorks Simulation* vidē. Izmantota Mūnija–Rivlina metode, kas ļauj novērtēt slodzes ietekmi uz gumijas korda sajūgu un to maksimālas kritiskās vērtības, bīstamās frekvences un sprieguma lielumus pie dažādiem ātruma diapazoniem.
3. Izgudrota triecienvibrācijas ierīce, kas dod iespēju pastāvīgi uzkrāt un analizēt datus par trieciena spēku, ko uztver bultskrūves transportlīdzekļa ekspluatācijas laikā.

Iegūto rezultātu ticamība

Rezultātu ticamība tiek nodrošināta, vērtējot un salīdzinot rezultātus ar citu autoru rezultātiem un ar datiem, kas iegūti, vairāku sajūgu apvalku vienusējīgi deformējot pilna mēroga eksperimentu gaitā. Eksperimentālo datu ticamību nodrošina mērījumu precizitāte un salīdzināšana ar normatīvās dokumentācijas datiem.

Darba praktiskā nozīme

Rekomendācijas, kas izstrādātas, pamatojoties uz veiktajiem pētījumiem, ļaus samazināt gumijas korda sajūga atteikumus ekspluatācijā.

Ar izstrādāto bultskrūvju stiprinājumu trieciena un vibrācijas spēka kontroles ierīces palīdzību var pastāvīgi uzkrāt un analizēt datus par trieciena spēku, lai samazinātu dzelzceļa transporta ritošā sastāva vai citu nozaru transportlīdzekļu neplānoto remontu skaitu tā bojājumu dēļ, kā arī lai samazinātu avāriju vai citu negadījumu skaitu.

Darba aprobācija

Par darba rezultātiem ziņots un tie apspriesti vairākās zinātniskās konferencēs.

Latvija

1. 19th International Scientific Conference Economic Science for Rural Development Jelgava, Latvija 2020, Latvia University of Agriculture.
2. 20th International Scientific Conference Engineering for Rural Development 26.–28.05.2021. Jelgava, Latvia University of Agriculture.
3. 2021 IEEE 9th Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering Riga, Latvia, 2021 IEEE 2021.
4. 22th International Scientific Conference Engineering for Rural Development, 24.–26.05. 2023. Jelgava, Latvija 2023, Latvia University of Agriculture.

Ārvalstīs

1. 2020 IEEE 8th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering, Vilnius, Lithuania IEEE 2020.
2. XIII International Scientific Conference TRANSPORT PROBLEMS Poland, Katowice – Sulejów. Silesian University of Technology Faculty of Transport 2021.
3. Proceedings of the 10th International Scientific Conference Rural Development Kaunas, Lithuania 2021, Lietuva, Kaunas. Aleksandras Stulginskis University.
4. 26th International Scientific Conference. Transport Means. Kaunas University of Technology 2022.
5. Proceedings of the 11th International Scientific Conference Rural Development Kaunas, Lithuania 2023, Lietuva, Kaunas. Aleksandras Stulginskis University.

Publikācijas

1. Hardness Testing and the Chemical Composition Analysis of the Er2 And Er2t Series EMUs Traction Transmission Rubber-Cord Coupling Bolts. 326.–330. lpp. 19th International Scientific Conference Economic Science for Rural Development” Jelgava, Latvija 2020, Latvia University of Agriculture. ISSN 1691-5976.
2. Determination of the Causes of the Series ER2T Electric Multiple Unit Trains Traction Gear Rubber-Cord Shell Damage. 281.–287. lpp. 20th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development” 26.–28.05.2021. Jelgava, Latvia University of Agriculture. ISSN 1691-5976.
3. Analysis of the Formation of Defects in the Microstructure of the M-24 Bolts of the Rubber-Cord Coupling at Various Ranges of Mileage of Electric Trains Motor Cars. 1.–4. lpp. 2021 IEEE 9th Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering Riga, Latvia, 2021, IEEE 2021. ISBN 978-1-6654-6713-1.

4. Failure Analysis of Rubber-Cord Couplings of ER2 Series Electric Trains. 313.–320. lpp. 22th International Scientific Conference Engineering for Rural Development, 24.–26.05. 2023, Jelgava, Latvija 2023, Latvia University of Agriculture. ISSN1691-5976.
5. Determination of the Metal Structure, Testing of Hardness of the Fastening Bolts of the Rubber-cord Coupling for Traction Gear of Electric Trains of the ER2 Series. 42.–45. lpp. 2020 IEEE 8th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering, Vilnius, Lithuania IEEE 2020. ISBN 978-1-6654-3087-6.
6. Determination of the metal structure, analysis of the chemical composition, testing of hardness and determination off static breaking stresses of the fastening bolts of the rubber-cord coupling for traction gear of electric trains of the ER2t series. 214.–226. lpp. XIII International Scientific Conference TRANSPORT PROBLEMS Poland, Katowice – Sulejów. Silesian University of Technology Faculty of Transport 2021. ISBN 978- 83- 959742-1-2.
7. Reducing the Number of Unscheduled Repairs of Traction Gear of EMU Trains by Introducing Modern Technical Solutions, 113.–117. lpp. Proceedings of the 10th International Scientific Conference Rural Development Kaunas, Lithuania 2021, Lietuva, Kaunas. Aleksandras Stulginskis University. ISSN 2345-0916.
8. Determination of the Chemical Composition and Impact Strength of the M-24 Bolts for Fastening the Rubber-Cord Coupling of EMU Trains. 360.–365. lpp. 26thInternational Scientific Conference. Transport Means. Kaunas University of Technology 2022. ISSN 1822-296X.
9. D. Study of Damage to VAE Cross Crossing. *Наука и техника Казахстана*, 2022, No. 1, pp. 142–154. ISSN 2788-8770. Available from: doi:10.48081/NJAY4790 Zinātniskais raksts žurnāla «НАУКА И ТЕХНИКА КАЗАХСТАНА» 01.2022. ISSN 2788-8770. <http://stk.tou.edu.kz/storage/journals/132.pdf>.

Mācību (akadēmiskā) monogrāfija vai kolektīva monogrāfija, kas paredzēta lietošanai augstākās izglītības iestādēs

Ritošā sastāva remonta un tehniskās apkopes tehnoloģija: Laboratorijas darbi.
Gavrilovs, P., Gorbačovs, D. *Ritošā sastāva remonta un tehniskās apkopes tehnoloģija: Laboratorijas darbi*. Rīga: RTU Izdevniecība, 2021. 25 lpp.

1. PĒTĪJUMA OBJEKTA APSKATS

Līdz šim brīdīm, lai kompensētu slodzes starp vārpstām, tika izmantoti dažādi elastīgie sajūgi. Mašīnbūvē elastīgo sajūgu grupā ir sastopamas dažādas sajūgu konstrukcijas – ieliktnu-pirkstu, sajūgi ar elastīgu elementu zvaigznītes formā, toroidālā formā un citi. Ierīču vārpstās šāda tipa sajūgu savienojuma zonā parasti ir aksiālas, radiālas, leņķiskas novirzes. Tāpēc savienojumi ir pakļauti ievērojamām mehāniskām un termiskām slodzēm. Šādas slodzes bieži izraisa elastīgo elementu un stiprinājuma elementu savienojumu bojājumus.

• Elastīgo sajūgu klasifikācija

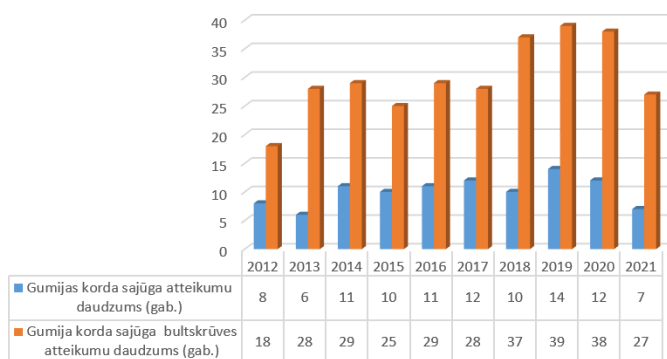
Mūsdienu mašīnbūvē plaši tiek izmantoti elastīgie sajūgi ar elastīgiem elementiem, kas paredzēti griezes momenta pārraidei starp agregātiem no vienas vārpstas uz otru. Elastīgie sajūgi darbības laikā tiek pakļauti ievērojamām vibrācijām, dinamiskām un triecienslodzēm plaša mēroga diapazonā. Elastīgie sajūgi samazina triecienus un sitienus, kā arī kalpo par aizsardzības līdzekli pret rezonējošām vērpes vibrācijām, kas rodas nevienmērīgas rotācijas rezultātā, turklāt elastīgie sajūgi pieļauj salīdzinoši lielas savienoto vārpstu asu nobīdes.

Mašīnbūvē ir zināmi dažāda veida elastīgie sajūgi, kuru konstrukcijai ir vairākas iezīmes:

- elastīgais ieliktnu-pirkstu sajūgs;
- elastīgie sajūgi ar elastīgu elementu zvaigznītes formā;
- elastīgie sajūgi ar toroidālam gumijas apvalkiem.

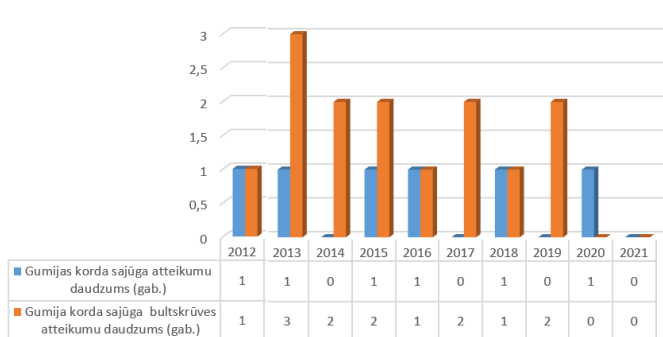
1.1. Gumijas korda sajūga un to stiprinājuma bultskrūvju bojājumu analīze Latvijas dzelzceļā

Gumijas korda sajūga un to stiprinājuma bultskrūvju atteikumu dati par laika posmu no 2012. līdz 2021. gadam redzami 1.1. attēlā.



1.1. att. ER2 un ER2T gumijas korda sajūga un gumijas korda sajūga bultskrūves atteikumi.

Dīzeļvilcienos šajā pašā laika posmā (no 2012. līdz 2021. gadam) tika konstatēti seši gumijas korda sajūga atteikumu gadījumi un 14 stiprinājuma bultskrūvju atteikumu gadījumi. Dati par atteikumu skaitu redzami 1.2. attēlā.



1.2. att. *DRIA* gumijas korda sajūga un gumijas korda sajūga bultskrūves atteikumi.

Analizējot statistikas datus (1.1., 1.2. att.), konstatēts, ka visvairāk gumijas korda sajūga un stiprinājuma bultskrūvju sagraušana notiek elektrovilcienos (1.3. att.).



1.3. att. Gumijas korda sajūga slāņa sagraušanas piemērs.

Attiecīgi rodas jautājums, kā dēļ notiek gumijas korda sajūga atteikumi? Un – vai šī problēma ir aktuāla arī citur pasaulē?

Līdz ar to izanalizētā esošā situācija saistīta ar datiem par sajūga darbības laiku līdz atteikumam, dažādu spēku spriegumu iedarbības ietekmē, temperatūras ietekmē, kā arī vārpstas noviržu ietekmē uz sajūgu. Ņemot vērā iepriekš minētās iedarbības, darba autors izstrādājis savu metodiku, kā aprēķināt un novērtēt ārējo faktoru ietekmi uz elastīgo sajūga apvalku. Metodika izstrādāta, izmantojot pieejamu “Latvijas dzelzceļa” motorvagona ritošās sastāva vilces piedziņas sajūgu piemēru ar toroidālo apvalku.

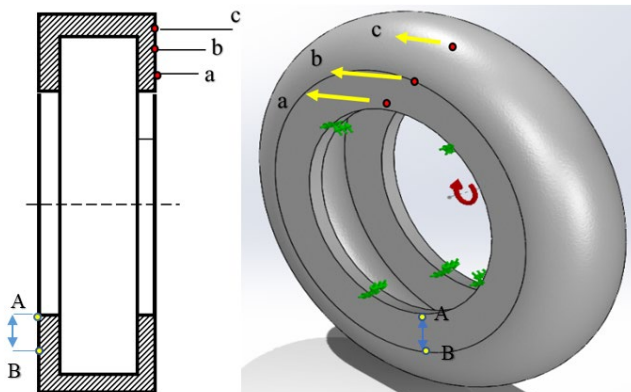
2. GUMIJAS KORDA SAJŪGU UN TO STIPRINĀJUMU BULTSKRŪVJU STIPRINĀJUMU ATTEIKUMU NOVĒRŠANAS METODIKAS IZSTRĀDE

Izstrādātās metodikas mērķis ir samazināt gumijas korda sajūga un to stiprinājuma bultskrūvju atteikuma skaitu, savlaicīgi noteikt elastīgā sajūga apvalka bultskrūves bojājuma cēloņus un izstrādāt pasākumus, lai panāktu sajūgu un to bultskrūvju atteikumu gadījumu samazināšanos. Gumijas korda sajūga un to bultskrūvju stiprinājuma atteikuma novēršanas metodika ietver 10 punktus.

1. Statistisko datu apkopojums par bojājumu zonām.
2. Uzsilšanas temperatūras kontrole.
3. Gumijas korda sajūgu cietības pārbaude.
4. Gumijas korda sajūgu izmēru kontrole.
5. Gumijas korda sajūgu sagraušanas spēku aprēķins.
6. Gumijas korda sajūgu noviržu mērījumi.
7. Gumijas korda sajūgu frekvenču analīze.
8. Gumijas korda sajūgu materiālā īpašību pētījumi pie stiepšanas vienas virzienā.
9. Gumijas korda sajūga modeļa izstrāde GEM programmas pakotnē.
10. Bultskrūvju bojājumu noteikšana ar dažādam metodēm.

2.1. Statistisko datu apkopojums par bojājumu zonām

Noteikt sajūgu bojājuma virsmas sastopamās ekspluatācijā, noteikt un izmērīt attālumu no stiprinājuma diska punkta A līdz bojājuma vietas punktam B (2.1. att.). Savākt atteikuma statistiku ne mazāk kā N gadījumus.



2.1. att. Gumijas korda sajūga apskates vietas:
a – apakšējā daļa; b – vidējā daļa; c – augšējā daļa.

Pēc vizuālās apskates tika konstatētas bojājumu zonas, kurās notiek atteikumi, kas liecina par problemātisku zonu klātbūtni gumijas korda sajūgā un kas ir jāizpēta. Ja ekspluatācijā tiek konstatēta gumijas korda sajūga sagraušana vai bojājums, tas ir jānomaina.

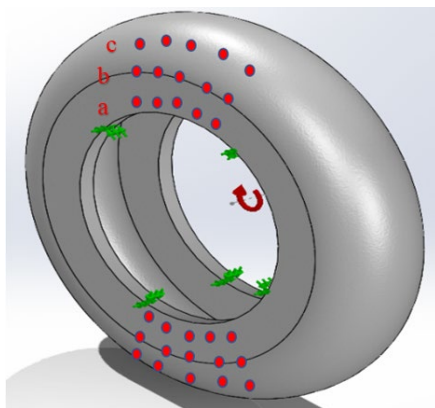
2.2. Gumijas korda sajūga uzsilšanas temperatūras noteikšanas

Gumijas korda sajūga silšanas temperatūras kontrole tehniskās apkalpošanas sistēmas ietvaros jāveic uzreiz pēc ražošanas aprīkojuma apstāšanās. Lai veiktu temperatūras kontroli, ir jāzina maksimālā ekspluatācijā pieļaujamā gumijas korda sajūga robežuzsilšanas temperatūra t_{max} . Sajūgu robežtemperatūru reglamentē normatīvo tehniska dokumentācija vai ISO; EN standarti. Temperatūras mērījumi jāveic:

- a – gumijas korda sajūga apakšējā daļā;
- b – gumijas korda sajūga vidusdaļā;
- c – gumijas korda sajūga augšējā daļā.

Temperatūru jāizmēra sajūga augšējā, vidējā un apakšējā daļā piecās vietās pa sajūga apli, vismaz 5–7 mm attālumā no iepriekšējā temperatūras mērījuma.

Temperatūras mērīšanas vietas redzamas 2.2. attēlā.



2.2. att. Temperatūras un cietības kontroles vietas:
a – apakšējā daļa; b – vidējā daļa; c – augšējā daļa.

Temperatūras mērīšanas vietas nosaka pēc diametru starpības ($D - d$):

- a – 10 % starpības apakšējā daļā;
- b – 50 % starpības vidējā daļā;
- c – 90 % starpības augšējā daļā.

Veikt uzsilšanas temperatūras pārbaudi N gumijas korda sajūgiem 30 punktos $t_1 \dots t_{30}$ (2.2. att.) no abām pusēm un noteikt uzsilšanas temperatūras vidējo vērtību (2.1. formula).

$$t_{\text{vid}} = \frac{\sum_{i=1}^{30} t_i}{30}, \quad (2.1)$$

kur t_i – uzsilšanas temperatūra, °C.

Saskaņā ar standarta datiem pārbaudīt vidējo noteikto temperatūru ar maksimāli pieļaujamu t_{max} (2.2. formula).

$$t_{\text{vid}} < t_{\text{max}} \quad (2.2)$$

Sajūgu uzsilšanas temperatūras parametru kontroles periodiskums jāveic atkarībā no ekspluatācijas temperatūras apstākļiem:

- –20 °C līdz 0 °C – reizi sešos mēnešos;
- 0 °C līdz +20 °C – reizi sešos mēnešos;
- +21 °C līdz +25 °C – reizi trīs mēnešos;
- +26 °C līdz +30 °C – reizi mēnesī;
- +31 °C līdz +35 °C – reizi nedēļā.

2.3. Gumijas korda sajūgu ģeometrisko izmēru kontrole

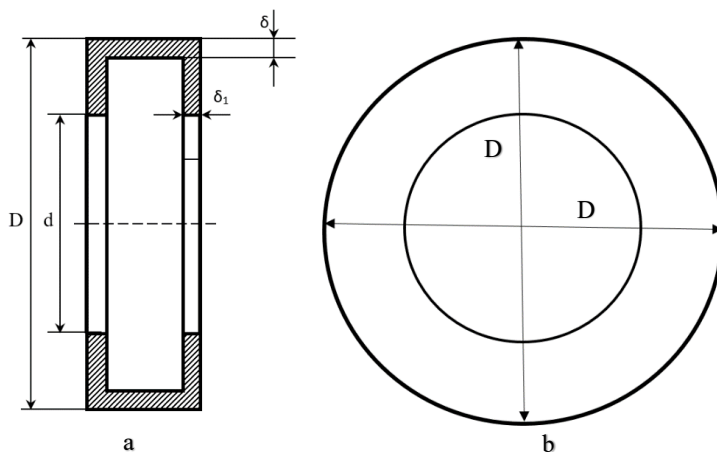
Ekspluatācijā tiek noteikt šādos sajūga ģeometriskos izmērus:

- ārējās virsmas diametrs D , mm;
- iekšējais sēžas diametrs d , mm;
- augšējās daļas biezums δ , mm;
- sānu sienas biezums δ_1 , mm.

Veicot gumijas korda sajūga mērījumus, jāzina sajūgu izmēru robežvērtības D , d , δ , δ_1 , kas ir pieļaujamas ekspluatācijā. Mērījumi jāveic uz nedarbojošās iekārtas sistēmas tehniskās apkalpošanas ietvaros. Veikt sajūgu izmēru kontrole, noteiktas D , d , δ (2.3. a att.). Izmērs δ tika izmantots spēka P_c aprēķiniem. Salīdzināt D , d , δ_1 ar standarta datiem D_{st} , d_{st} , δ_{1st} .

- $D_{st} < D < D_{st}$;
- $d_{st} < d < d_{st}$;
- $\delta_{1st} < \delta_1 < \delta_{1st}$.

Lai precīzi noteiktu sajūga diametru un pārbaudītu uz ekscentrisitātes, jāveic divi mērījumi horizontāli un vertikāli starp mērīšanas plāksnēm 90° leņķī. Ģeometrisko izmēru mērīšanas vietas redzamas 2.3. b attēlā.



2.3. att. Ģeometrisko izmēru noteikšana:
a – sajūgu izmēru kontrole; b – pārbaudīt uz ekscentrisitātes.

Sajūga diametru D , d un sānu virsmas δ , δ_1 mērījumi jāveic trīs vietās pa sajūga apli. Iegūtie sajūgu mērījumu rezultāti tiek salīdzināt ar *ISO EN* un *DIN* standartiem, kas reglamentē gumijas korda sajūga robežizmērus, kas pieļaujami ekspluatācijā.

Metodikas ietvaros tika piedāvāts selektīvi kontrolēt izmērus jauniem sajūgiem pirms ieviešanas ekspluatācijā. Ekspluatācijā esošiem sajūgiem ģeometriskos izmērus kontrolē atkarībā no apgriezību skaita:

- līdz 700 apgr./min. – vienu reizi gadā;
- no 701 līdz 1500 apgr./min. – vienu reizi pusgadā;
- no 1501 līdz 1800 apgr./min. – vienu reizi trijos mēnešos;
- no 1801 līdz 2000 apgr./min. – vienu reizi mēnesī.

Pēc mērījuma rezultātiem, ja sajūga izmērs atbilst standarta *ISO*, *EN*, *DIN* prasībām, sajūgu atļauts ekspluatēt, ja sajūga izmērs neatbilst *ISO*, *EN*, *DIN* standarta prasībām, tad šo sajūgu ekspluatēt nedrīkst. Sajūgu ģeometriskos izmērus tālāk izmanto, aprēķinot spēkus un spriegumus, kas iedarbojas uz sajūgu ekspluatācijas laikā (metodikas 2.5. solis).

2.4. Gumijas korda sajūga cietības pārbaude

Gumijas korda sajūga cietību reglamentē *ISO*, *EN* un *DIN* standarti. Atbilstoši standartiem gumijas korda sajūga cietība tiek noteikta ar Šora A metodes palīdzību, un tai jābūt no 50,0 – līdz 65,0 nosac. vien. robežās. Sajūgu cietības mērījumi jāveic dažādās temperatūras diapazonos:

- $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- $0\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Cietības mērījumi sajūga augšējā vidējā un apakšējā daļā jāveic vismaz 5–7 mm attālumā no iepriekšējā temperatūras mērījuma vietas. Cietības mērīšanas vietas redzamas 2.2. attēlā. Cietības mērīšanas vietas nosaka pēc diametru starpības ($D - d$):

- a – 10 % starpības apakšējā daļā;
- b – 50 % starpības vidējā daļā;
- c – 90 % starpības augšējā daļā.

Katrā temperatūras diapazonā jāveic pieci cietības mērījumi:

- gumijas korda sajūga apakšējā daļā;
- gumijas korda sajūga vidusdaļā;
- gumijas korda sajūga augšējā daļā.

Veikt cietības pārbaudi N gumijas korda sajūgiem 30 punktos un $C_1 \dots C_{30}$ (2.2. att.) no katra sajūga puses un aprēķināt vidējo vērtību (2.3. formula).

$$C_{\text{vid}} = \frac{\sum_{i=1}^{30} C_i}{30}, \quad (2.3)$$

kur C_i – cietība, nosac. vien.

Pārbaudīt vidējo noteikto C_{vid} ar maksimāli pieļaujamu C_{max} (2.4. formula).

$$C_{\text{st min}} < C_{\text{vid}} < C_{\text{st max}} \quad (2.4)$$

Cietības mērījumi jāveic atkarībā no temperatūras apstākļiem, kādos darbojas gumijas korda sajūgs:

- no -20 °C līdz 0 °C – reizi mēnesī;
- no $+1$ °C līdz $+20$ °C – reizi trīs mēnešos;
- no $+21$ °C līdz $+40$ °C – reizi mēnesī;
- no $+41$ °C līdz $+60$ °C – reizi nedēļā.

Ja sajūgu cietība neatbilst normatīvo dokumentu prasībām, tad sajūgu nedrīkst nodot ekspluatācijā bet ekspluatācijā esošo sajūgu ir jānomaina pret jaunu.

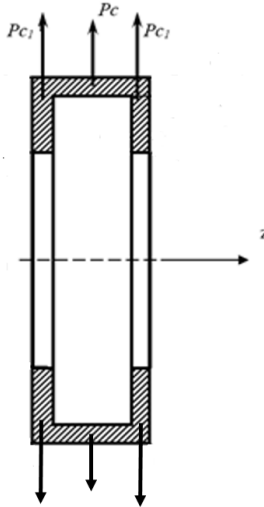
Ja nosacījumi netiek izpildīti, tad gumijas korda sajūgu jānomaina. Ja nosacījumi, pēc metodikas punktiem ir izpildīti, tad jāpāriet pie metodikas piektā punkta.

2.5. Gumijas korda sajūga sairšanas spēku aprēķins

Ja ekspluatācijas laikā notiek sajūgu atteikumi, bet sajūgu ģeometriskie izmēri, cietības parametri un silšanas temperatūra atbilst *ISO*, *EN*, *DIN* standartu prasībām, tad, lai identificētu sajūgu atteikuma cēloņus, nepieciešams veikt spēku, spriegumu un griezes momenta aprēķinus, kas iedarbojas uz sajūgu, un jānosaka to maksimālās vērtības ekspluatācijas apstākļos.

Centrbēdzes spēka P_c darbība redzama 2.4. attēlā.

Saskaņā ar metodikas 2.5. punktu spēku darbības noteikšana nepieciešama, lai identificētu gumijas korda sajūga bīstamos darbības režīmus pie dažādiem ātruma diapazoniem.



2.4. att. Centrbēdzes spēks, kas iedarbojas uz sajūgu, P_c , P_{c1} .

Rezultējošais īpatnējās centrālās spēks, kas iedarbojas uz sajūgu N/m:

1) darbojas sajūga centrā

$$P_c = \int_0^{b-2\delta_1} q \cdot dz = \int_0^{b-2\delta_1} \rho \cdot \delta \cdot \frac{D-\delta}{2} \cdot \omega^2 \cdot dz = \rho \cdot \delta \cdot \frac{D-\delta}{2} \cdot \omega^2 \cdot (b-2\delta_1), \quad (2.5)$$

kur ω – leņķiskais ātrums, rad/sek;

q – centrālās spēka intensitāte sajūga sānu virsmā, N/m²;

ρ – gumijas korda sajūga materiāla blīvums, kg/m³;

δ_1 – sajūga sānu virsmas biezums, mm;

b – sajūga biezums, mm;

D – sajūga diametrs, mm;

2) darbojas sānu virsmā

$$P_{c1} = \int_0^{\delta} q_1 \cdot dz = \int_0^{\delta} \rho \cdot \frac{D^2-d^2}{4} \cdot \omega^2 \cdot d \cdot dz = \rho \cdot \frac{D^2-d^2}{4} \cdot \omega^2 \cdot d \cdot \delta, \quad (2.6)$$

kur ω – leņķiskais ātrums, rad/sek;

ρ – gumijas korda sajūga materiāla blīvums, kg/m³.

q_1 – centrālās spēka intensitāte sajūga sānu virsmā, N/m²;

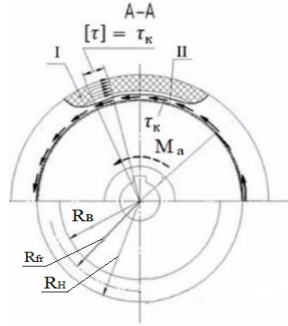
δ – sajūga augšējās virsmas biezums, mm;

b – sajūga biezums, mm;

D – sajūga diametrs, mm;

3) vērpes nobīdes tangenciālo spriegumu attiecība pret sajūga stiprinājuma atloku τ_k noteikšana.

Sajūgu bīdes tangenciālais spriegums attiecībā pret sajūga stiprinājuma atloku redzams 2.5. attēlā.



2.5. att. Vērpes bīdes tangenciālā sprieguma iedarbība.

R_B – gredzena iekšējais rādiuss; R_H – gredzena ārējais rādiuss; R_{Br} – berzes rādiuss;
 τ_k – vērpes bīdes tangenciālais spriegums attiecībā pret sajūga stiprinājuma atloku;
 M_a – enkura vārpstas griezes moments.

I – vērpes laukums; II – enkura vārpstas vērpes nobīdes

$$\tau_k = \frac{M_a}{\frac{\pi D^4}{32} \left(1 - \frac{d^4}{D^4}\right)} \frac{D}{2} = \frac{16 \cdot M_a}{\pi D^3 \left(1 - \frac{d^4}{D^4}\right)} \leq [\tau], \quad (2.7.)$$

kur M_a – vilces dzinēja griezes moments, k N m;

D – gredzena ārējais diametrs, mm;

d – gredzena iekšējais diametrs, mm;

$[\tau]$ – pieļaujamo tangenciālais spriegums 0,7–0,75 MPa [27].

Iegūtos griezes bīdes tangenciālo sprieguma aprēķina rezultātus jāsalīdzina ar pieļaujamo griezes bīdes tangenciālo spriegumu.

Griezes moments noteikts pēc 2.12. formulas.

$$M_a = \frac{30 \cdot P}{\pi \cdot n} \eta, \quad (2.8.)$$

kur P – vilces dzinēja jauda, k W;

n – vilces dzinēja apgriezieni, apgr./min.;

π – matemātiska konstante;

η – vilces dzinēja lietderības koeficients 86–92 %

Saskaņā ar 2.7. un 2.8. formulu griezes bīdes tangenciālais spriegums τ_k un moments M_a jānosaka pie maziem apgr./min (no 0 līdz 200 apgr./min.), centrālās spēka P_c darbību noteikt pie lieliem apgr./min (no 500 līdz 2000 apgr./min.).

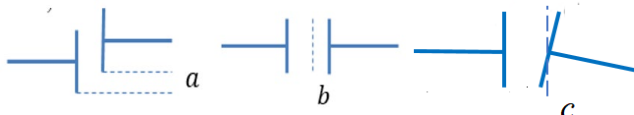
Sprieguma un momenta spēku skaitlisko vērtību nosaka ar precizitāti līdz simtdaļai (0,00) no aprēķinātajām vienībām.

Aprēķinātā spēka P_c vērtība un momenta M_a ietekme tālāk tiek izmantota GEM modelēšanas programmā.

2.6. Gumijas korda sajūga noviržu mērījumi

Sajūgu aksiālo radiālo un leņķisko noviržu pieļaujamās vērtības reglamentē *ISO, EN, DIN* standarti, un tās tiek mērītas:

- a – radiālā virzienā;
- b – aksiālā virzienā;
- c – leņķiskā virzienā.

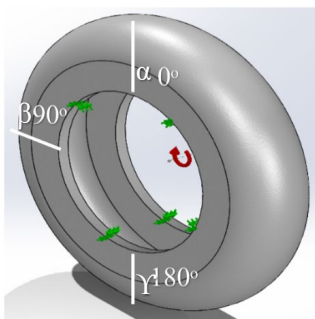


2.6. att. Sajūgu noviržu veidi:

a – radiālā virzienā; b – aksiālā virzienā; c – leņķiska virzienā.

Sajūga noviržu lielumu noteikšana jāveic uz nestrādājošām iekārtām tehniskās apkopes sistēmas ietvaros. Noviržu mērījumi N sajūgiem jāveic trīs vietās (2.7. att.) pa sajūga apli:

- sajūga augšējā daļā $\alpha - 0^\circ$;
- sajūga vidējā daļā $\beta - 90^\circ$;
- sajūga apakšējā daļā $\gamma - 180^\circ$.



2.7. att. Gumijas korda sajūga mērījuma vietas.

Katram sajūgam jāveic šādi mērījumi:

- radiālā $a_\alpha, b_\alpha, c_\alpha$;
- aksiālā $a_\beta, b_\beta, c_\beta$;
- leņķiskā $a_\gamma, b_\gamma, c_\gamma$.

Iegūtie mērījumu dati jāsalīdzina ar standarta datiem:

$$a_\alpha, b_\alpha, c_\alpha, a_\beta, b_\beta, c_\beta, a_\gamma, b_\gamma, c_\gamma < a_{st}, b_{st}, c_{st}.$$

Iegūtie aksiālo radiālo un leņķisko noviržu mērījumu dati tiek izmantoti modelēšanai GEM programmas vidē (9. metodikas solis), lai noteiktu noviržu ietekmi uz gumijas korda sajūga drošu darbību.

2.7. Gumijas korda sajūga frekvenču analīze

Lai veiktu gumijas korda sajūga frekvenču analīzi N paraugiem, nepieciešams noteikt:

- gumijas korda sajūga masu, M ;
- sajūga stinguma koeficientu, F ;
- sajūga rezonanses pašfrekvences, ω .

Gumijas korda sajūga masas noteikšana ar nosvēršanas palīdzību, izmantojot svarus ar precizitāti ± 50 g.

Noteikt sajūga stingumu K , k N m/rad (2.9. formula).

$$K = M_a/\varphi, \quad (2.9)$$

kur M_a – griezes moments, k N m;

φ – pagrieziena leņķis, rad.

Sajūga pašfrekvences ir atkarīgas no stinguma koeficienta un sajūga masas (2.10. formula).

$$\omega = (F/M)^{0.5}, \quad (2.10)$$

kur F – sajūga stinguma koeficients, H/m;

M – sajūga masa, kg.

Lai iegūtu rezultātus hercos, 2.10. formula jādala ar 2π

$$\omega = (F/M)^{0.5}/2\pi, \quad (2.11)$$

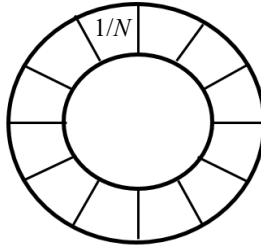
kur π – matemātiska konstante = 3,14.

Tālāk rezonanses frekvenču pētīšanā tika izmantota GEM modelēšanas programma (9. metodikas solis). Lai noteiktu bīstamās frekvences, pie kurām svārstībās piedalās noteikts sajūga masas daudzums.

2.8. Gumijas korda sajūga materiāla īpašību pētījumi

Pētījumu mērķis ir noteikt gumijas korda sajūga materiāla mehāniskās īpašības pie dažāda veida slodzēm. Materiāla īpašību noteikšana tika veikta ar stiepes pārbaudes iekārtu pie vienreizēja pārrāvuma un cikliskā veida slodzēm, pie tam maksimāli noslogojot sagraušanai pakļautās zonas.

Lai noteiktu materiāla īpašības, jāveic gumijas korda sajūga fragmentu sagraušanas un cikliskos eksperimentus. Sadalīt sajūgu uz N līdzīgam daļām un paņemt $1/N$ fragmentu sagraušanai un cikliskiem eksperimentiem.



2.8. att. Sajūga apvalka fragmentu paraugu izmēru un formu izvēle.

Veikt N_i izmēģinājuma sēriju pie vienreizējas sagraušanas un N_i pie cikliskas slodzes noteikt materiāla īpašības:

- 1) deformācijas L_i , mm;
- 2) relatīvās deformācijas, ε_i ;
- 3) elastības modulis E_i , MPa;
- 4) spriegumi σ_i , MPa.

Pēc izmēģinājuma rezultātiem noteikt atkarību $\sigma = f(\varepsilon)$, veikt to aproksimāciju:

$$\sigma = f(\varepsilon) = a\varepsilon^n + b\varepsilon^{n-1} + k_0 \quad (2.12)$$

kur σ – spriegums, MPa;

ε – relatīvā deformācija;

a ; b ; k_0 – koeficienti.

Pamatojoties uz testa rezultātiem, noteikt atkarības deformācijai no sprieguma un ar iegūto datu aproksimācijas rezultātiem, izveidot materiāla matemātisko modeli. Tālāk, pēc izmēģinājuma rezultātiem, dabūtās materiāla īpašības tiek izmantotas elastomēra materiāla modeļa izveidei GEM vidē un tiks izmantotas materiāla modeļa formēšanai metodikas 9. solī.

2.9. Gumijas korda sajūga modeļa izstrāde GEM programmas pakotnē

Lai realizētu šo metodikas punktu, jāizvēlas programma GEM pakotnē, kurā tiks veikta modelēšana (*ANSYS, ABAQUS, MD ADAMS MEDINA, SOLIDWORKS*). Noteikt piemērotākās programmas projektēšanai, aprēķinu modelēšanai un elastomēra materiāla sprieguma stāvokļa analīzei un izveidot GEM materiāla modeli.

Modeļa materiāla īpašības no metodikas 8. soļa un izmēģinājuma rezultātu datus, sprieguma σ atkarību no deformācijas ε ($\sigma = f(\varepsilon)$), pie vienreizēja pārrāvuma un cikliskā noslogojuma veida ievadīt GEM modelēšanas programmā. Izvēlēties elastomēra materiāla modeļus pēc:

- 1) Monija-Rivlina metodes – $\sigma_{MR} = f(\varepsilon)$;
- 2) Blatz - Ko metodes – $\sigma_{BL} = f(\varepsilon)$;

3) Nelineāro - elastīgo metodes (NLE) – $\sigma_{NLE} = f(\varepsilon)$.

Programmā GEM izveidot gumijas korda sajūga materiāla modeli katram no iepriekš minētajiem elastomēra materiāla modeļu paraugiem.

Noteikt modelēšanas kļūdu:

$$\Delta_1 = \sum(\sigma_{MR} - \sigma)^2, \quad (2.13)$$

$$\Delta_2 = \sum(\sigma_{BL} - \sigma)^2, \quad (2.14)$$

$$\Delta_3 = \sum(\sigma_{NLE} - \sigma)^2, \quad (2.15)$$

kur σ – spriegums pēc izmēģinājuma rezultātiem, MPa;

σ_{MR} ; σ_{BL} ; σ_{NLE} – spriegums pēc modelēšanas rezultātiem, MPa.

Izvēlēties modeli pēc – Δ_1 ; Δ_2 ; $\Delta_3 = \min$.

Tālāk ar izvēlēto materiāla modeli izpildīt jāveic parametru modelēšana P_c , M_a , a_α , b_α , c_α , ω , ar dažādiem modulēšanas parametriem jānosaka gumijas korda sajūga visvairāk noslogotās zonas un jāsalīdzina iegūtie dati ar P_c , M_a , a_α , b_α , c_α , ω robežvērtībām.

Pamatojoties uz modelēšanas rezultātiem GEM programmā, jānosaka gumijas korda sajūga visvairāk noslogotās zonas.

2.10. Bultskrūvju bojājumu noteikšana ar dažādām metodēm

Šī metodikas punkta mērķis ir noteikt bultskrūvju atteices cēloņus. Lai noteiktu bultskrūvju atteices cēloņus, nepieciešams veikt bultskrūvju izmēģinājumu ar dažādu nostrādāšanas laiku:

$$t_{\text{eksp}} = \sigma f(\Delta t), \quad (2.16)$$

kur t_{eksp} – ekspluatācijas laiks, st.;

σ_t – sagraušanas spriegums, MPa;

(Δt) – laika intervāls, st.;

- sagraušana pie statiskās slodzes P_s N paraugiem;
- sagraušana pie dinamiskās slodzes P_d N paraugiem;
- sagraušana pie triecienslodzes a_k dažādos temperatūras diapazonos N paraugiem;
- cietības noteikšana HB , N paraugiem;
- ķīmiskā sastāva noteikšana N paraugiem par kaitīgu fosfora P un sēra S piemaisījumu klātbūtni.

Izmēģinājumu mērķis ir noteikt gumijas korda sajūga bultskrūvju atteikumu iemeslus.

Iegūtie izmēģinājuma rezultāti jāsalīdzina ar *ISO* un *EN* standarta datiem.

Izmantojot iepriekš minētās izpētes metodes, noteikt gumijas korda sajūga bultskrūvju sagraušanas cēloņus un, ar metalogrāfiskās analīzes palīdzību apstiprināt mikroplaisu defektu un plaisu klātbūtni mikrostruktūrā.

3. METODIKAS APROBĀCIJA UZ TOROIDĀLO GUMIJAS KORDA SAJŪGA PIEMĒRU

3.1. Gumijas korda sajūga sānu virsmas sagraušanas cēloņu izpēte

Laikā no 09.2019. līdz 31.12.2021. tika konstatēts 21 sajūga bojājuma gadījums. Gumijas korda sajūga sānu virsmas sagraušanas piemēri redzami 3.1. attēlā.



3.1. att. Gumijas korda sajūga sānu virsmas sagraušanas piemēri:
a – 1. paraugs; b – 2. paraugs; c – sagraušanas zonas noteikšana.

Gumijas korda sajūga sānu virsmas sagraušanas bojājumi, laikā periodā no 09.2019. līdz 31.12.2021. sasniedza 21 gadījumus:

- Viens gadījums ir saistīts ar sajūga augšējās virsmas nodilumu, kas radies berzes rezultātā pret reduktora stiprinājuma bultskrūvi.
- 20 gadījumu saistīti ar bojājumu zonā, kur apvalks ir piestiprināts pie atlokiem.

Visi 20 gumijas korda sajūgu atteikumu gadījumi saistīti ar sānu virsmas sagraušanu. Konstatētā bojājuma vieta – sajūga siena 10–20 mm attālumā no ārējā diametra diska stiprinājuma vietas.

3.2. Gumijas korda sajūga uzsilšanas temperatūras noteikšanas rezultāti

Lai noteiktu gumijas korda sajūga uzsilšanas temperatūru saskaņā ar izstrādātās metodikas 2. punktu, darba autors veica trīs izmēģinājuma braucienus pēc atjaunošanas remonta TR-3 izpildes un trīs eksperimentālus braucienus ar pasažieru vilcieniem; divus braucienus ar elektrovilcienu Nr. 1307 un vienu ar elektrovilcienu Nr. 1342R.

Pēc izmēģinājumu braucien rezultātiem tika konstatēts, ka Latvijas dzelzceļā apstākļos tiek ievērots nosacījums sajūga uzsilšanai nepārsniegt $t^{\circ} + 75^{\circ}\text{C}$ [21].

Kopskaitā uzsilšanas temperatūra tika izmērīta 44 gumijas korda sajūgiem.

3.3. Sajūga ģeometrisko izmēru kontrole

Gumijas korda sajūgu veiktie mērījumi tika salīdzināti ar standartu *DIN EN 13913:2003-08* [1]. Gumijas korda sajūga 580 mm× 130 mm mērījumu dati un standarta dati apkopoti 3.1. tabulā.

3.1. tabula

Rādītāja nosaukums	Paraugu mērījumu rādītāji, mm			<i>DIN EN 13913:2003-08</i> , mm
	1. paraugs	2. paraugs	3. paraugs	
Ārējās virsmas diametrs D , mm	580,5 ^{+0,1} _{-0,1}	585,5 ^{+0,1} _{-0,1}	580,1 ^{+0,1} _{-0,1}	580 ⁺²
Iekšējais sēžas diametrs d , mm	354,5 ^{+0,1} _{-0,1}	354,8 ^{+0,1} _{-0,1}	354,2 ^{+0,1} _{-0,1}	354 ⁺² ₋₂
Sānu sienas biezums δ_l , mm	28,5 ^{+0,1} _{-0,1}	29,2 ^{+0,1} _{-0,1}	29,9 ^{+0,01} _{-0,01}	30 ⁺² ₋₂

Pamatojoties uz mērījumu rezultātiem, tika konstatēts, ka visi sajūgu izmēri, izņemot 2. paraugu, ārējās virsmas diametrs D atbilst *DIN EN 13913:2003-08* standarta prasībām. Kopumā tehnisko apkalpošanas laikā izmērīto gumijas korda sajūgu paraugu kopskats sastāda 53 gab. Pēc 53 sajūgu mērījumu rezultātiem tika konstatēts, ka trim sajūgiem ārējās virsmas diametrs D neatbilst standarta prasībām.

3.4. Cietības noteikšana pēc “Shore A” metodes atkarībā no temperatūras

Pētījuma mērķis ir noteikt cietību pie dažādam temperatūras režīmiem. Cietības mērījumi veikti RTU laboratorijā, izmantojot gumijas cietības mērītāju mērītāju “*Elcometer 3120 Shore Durometer A*” [10]. Cietības pārbaude tika veikta saskaņā ar *ISO 7619-1:2010* standarta [7] prasībām, trīs gumijas korda sajūga fragmentu cietības mērījumu dati tika salīdzināti ar *ISO 14691:2008* standarta datiem [8], cietības mērījumi saskaņā ar izstrādātās metodikas 3. punktu veikti četros dažādos temperatūras diapazonos:

- +60 °C;
- +22 °C;
- 0 °C;
- -20 °C.

Pēc iegūtajiem mērījumu rezultātiem tika konstatēts, ka:

- 1) -20 °C temperatūrā abu sajūgu izmērītās cietības vērtības pārsniedz standarta cietības parametrus [8] par 6,4–11,9 nosac.vien.;
- 2) 0 °C temperatūrā abu sajūgu izmērītās cietības vērtības pārsniedz standarta cietības parametrus[8] par 3–6,4 nosac. vien.;
- 3) +22 °C temperatūrā:

- 1. paraugam divas vidējās mērījumu vērtības pārsniedz standarta cietības parametrus [8] par 1,0–2,9 nosac. vien.;
 - 2. paraugam visas vidējās mērījumu vērtības pārsniedz standarta cietības parametrus [8] par 2,0–4,4 nosac. vien.;
- 4) +60 °C temperatūrā cietības vērtības abiem sajūgiem netiek pārsniegtas.

Pamatojoties uz cietības mērījumu rezultātiem, tika konstatēts būtisks cietības pieaugums ziemas periodā.

3.5. Gumijas korda sajūga sagraušanas spēku aprēķins

Lai noteiktu gumijas korda sajūga sagraušanas cēloņus, saskaņā ar metodikas 2.5 punktu tika veikti spēku, spriegumu un momentu, kas ekspluatācijas laikā darbojas sajūgu bojājuma zonās, aprēķini. Aprēķinu rezultātā tika noteikti spēki P_c , P_{c1} , kā arī tangenciālais spriegums τ_k un griezes moments M_a .

- **Griezes momenta noteikšana**

Piepilsētas satiksmes apstākļos ar īsiem ceļa posmiem un biežu elektrovilciena apstāšanos pieturās maksimālais griezes moments M_a tiek sasniegts pie maziem vilces dzinēja apgriezieniem elektrovilciena paātrinājuma laikā. Maksimālais griezes moments noteikts pēc 2.12. formulas.

Saskaņā ar aprēķinu rezultātiem griezes moments M_a piecos ātruma diapazonos redzams 3.2. tabulā.

3.2. tabula

Griezes momenta noteikšana

Elektrovilciena ātrums, km/h	Vilces dzinēja apgriezieni, apgr./min.	Griezes moments M_a , N m
5	64	$1,74 \cdot 10^4$
10	129	$8,65 \cdot 10^3$
20	258	$4,32 \cdot 10^3$
40	517	$2,15 \cdot 10^3$
120	1825	$0,96 \cdot 10^3$

Pēc aprēķinu rezultātiem tika konstatēts, ka pie 64 apgr./min. notiek gumijas korda sajūga stabilitātes zudums, kas saskaņā ar [21] notiek pie $1,2 \cdot 10^4$ N m. Gumijas korda sajūga stabilitātes zudums ir sajūga nespēja saglabāt sākotnējo stāvokli vai formu.

- **Centrbēdzes spēka noteikšana**

Centrbēdzes spēku P_c , P_{c1} . noteikšana pēc 2.5.–2.6 formulas pie 60 km/h un maksimālā ātrumā 120 km/h:

leņķiskais ātrums ω :

- pie ātruma 60 km/h $\omega = 72,24$ rad/sek;
- pie ātruma 120 km/h $\omega = 191,07$ rad/sek.

Sajūgu sānu virsmas mērīšanas rezultāti apkopoti 3.3. tabulā.

3.3. tabula

Sajūga mērījuma parametri

Parauga Nr.	δ sajūga augšējās virsmas biezums, mm	δ_1 sajūga sānu biezums, mm	b sajūga biezums, mm
1.	15,8	22,1	132,1
2.	16,5	22,4	131,6
3.	15,9	22,2	130,2

Pēc izstrādātās metodikas 2.5. punkta tika aprēķināti spēki, kas darbojas uz gumijas korda sajūgu, aprēķina dati apkopoti 3.4. tabulā.

3.4. tabula

Aprēķinu rezultāti

Sajūgu parametri	Leņķiskais ātrums ω , rad/sek	P_c , N/m	P_{c1} , N/m
1. paraugs	72,24	$7,80 \cdot 10^3$	$1,05 \cdot 10^4$
	191,07	$1,43 \cdot 10^4$	$1,93 \cdot 10^4$
2. paraugs	72,24	$7,95 \cdot 10^3$	$1,06 \cdot 10^4$
	191,07	$1,44 \cdot 10^4$	$1,95 \cdot 10^4$
3. paraugs	72,24	$7,61 \cdot 10^3$	$1,02 \cdot 10^4$
	191,07	$1,39 \cdot 10^4$	$1,88 \cdot 10^4$

- **Vērpes nobīdes tangenciālo spriegumu noteikšana**

Lai noteiktu vērpes bīdes tangenciālo spriegumu τ_k , nepieciešams veikt sajūga atloku mērījumus. Šim nolūkam tika veikti 1. un 2. parauga atloku mērījumi. 3. paraugam atloks netika mērīts, jo sajūgs ir jauns un nav bijis ekspluatācijā, mērījuma dati apkopoti 3.5. tabulā.

3.5. tabula

Sajūgu atloka mērīšanas dati

Parauga Nr.	Gredzena ārējais diametrs D , mm	Gredzena iekšējais diametrs d , mm	Sajūga piespiešanas vieta atlokam, berzes rādiuss ρ , mm	Berzes rādiusa laukums $d\rho$, mm
1.	$421,1^{+0,1}_{-0,1}$	$340,2^{+0,1}_{-0,1}$	$175,3^{+0,1}_{-0,1}$	$15,1^{+0,1}_{-0,1}$
2.	$420,2^{+0,1}_{-0,1}$	$339,9^{+0,1}_{-0,1}$	$175,1^{+0,1}_{-0,1}$	$15^{+0,1}_{-0,1}$

Aprēķina rezultāti apkopoti 3.6. tabulā.

Sajūgu sprieguma un spēku aprēķinu rezultāti

Parauga Nr.	Vilces dzinēja apgriezieni, apgr./min.	τ_k , MPa
1.	64	2,05
	129	1,02
	258	0,51
2.	64	2,07
	129	1,03
	258	0,51

Pēc aprēķinu rezultātiem tika konstatēts, ka maksimālais bīdes tangenciālais spriegums attiecībā pret sajūga stiprinājuma atloku τ_k tiek sasniegts brīdī, kad elektrovilciens tiek palaists no vietas brīdī, un tas ir līdz 64 apgr./min., kad tiek pārsniegts maksimālais tangenciālais spriegums:

- 1. paraugam – par 1,30 MPa;
- 2. paraugam – par 1,32 MPa.

3.6. Gumijas korda sajūgu aksiālās radiālās un leņķiskās novirzes mērījumu rezultāti

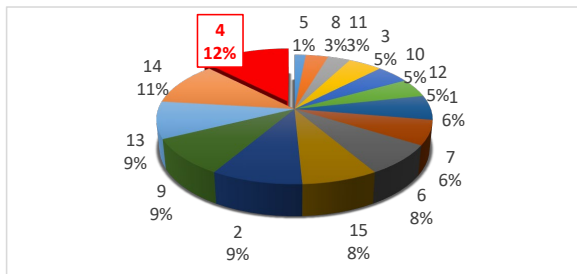
Uzstādot sajūgu ritošajam sastāvam, sajūga novirzēm tā uzstādīšanas laikā jāatbilst noteiktiem parametriem, ko reglamentē [19]. Saskaņā ar [19] gumijas korda sajūgu novirzes mērījumi tiek veikti pēc TR-3 [20] atjaunošanas remonta laikā.

Mērījumu vidējās vērtības dati (0° ; 90° ; 180°) apkopoti 3.7. tabulā.

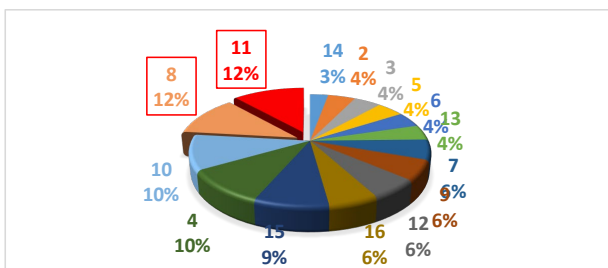
Sajūgu novirzes mērījuma dati (2021.–2022.)

Sajūga novirze	Radiālā novirze, mm	Asu novirze, mm	Leņķiskā novirze, grāds
Vidējā izmērītā vērtība	1–15 mm	2–16 mm	$0 \pm 4^\circ$
Maksimālā pieļaujamā vērtība	15,0	20,0	4,0

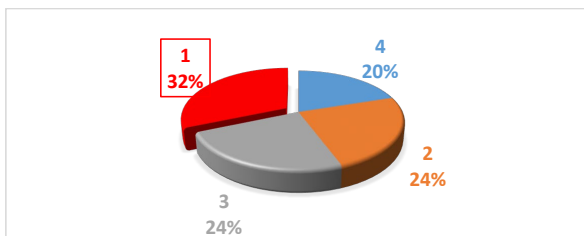
3.7. tabulā norādīto parametru noviržu mērījumu datu analīzes rezultātā tika iegūti šādi grafiki (3.2., 3.3., 3.4. att.).



3.2. att. Vārpstu radiālā lieluma novirze procentos.



3.3. att. Asu nobīdes lielumu novirze procentos.



3.4. att. Leņķiskās novirzes mērījumi procentos.

Analizējot novirzes datus, tika konstatēti elastīgo sajūgu būtisku deformāciju gadījumi radiālā, aksiālā un leņķiskā virzienā.

Mērījumu datu analīzes rezultātā tika konstatēts, ka ekspluatācijā visbiežāk sastopamie gadījumi ir:

- 1) 4 mm radiālajā novirzē – Šādu gadījumu skaits sastāda 8 gadījumus jeb 11,42 %;
- 2) 11 mm un 8 mm aksiālajā novirzē. Šādu gadījumu skaits sastāda 16 gadījumus jeb 22,85 %;
- 3) 3 mm leņķiskajā novirzē sastāda 17 gadījumus jeb 24,28 %.

Mērot vārpstu novirzi, tika konstatēts, ka uz vairākiem gumijas korda sajūgiem ir būtiskas vārpstu novirzes gan radiālajā, gan aksiālajā, gan leņķiskajā virzienā.

3.7. Gumijas korda sajūga elastīgā elementa aprēķins ar GEM modelēšanas programmas pakotnes palīdzību

Sajūga apvalka eksperimentālie pētījumi tika veikti, lai noteiktu sajūga apvalka darba slodzes un maksimālās spēka slodzes pie vienreizējas vienass izstiepšanas un pie cikliskās izstiepšanas. RTU laboratorijā tika veikti izmēģinājumi ar vairākiem elementiem. Izmēģinājumu laikā tika noteikta sajūga fragmentu optimālā forma un izmēri (3.8. tab.).

3.8. tabula

Sajūgu paraugu mērījumi

Sajūgu fragmentu izmēri	Loka garums apakšā, mm	Loka garuma augšā, mm	Sānu sienas biezums sagraušanas vietā, mm	Profila augšējās daļas biezums, mm
I paraugu grupa, 1. un 4. fragments	65 ± 2	105 ± 1	20 ± 2	15,5 ± 1
II paraugu grupa, 2., 3., 5. un 6. fragments	67 ± 2	96 ± 2	19 ± 2	15 ± 1

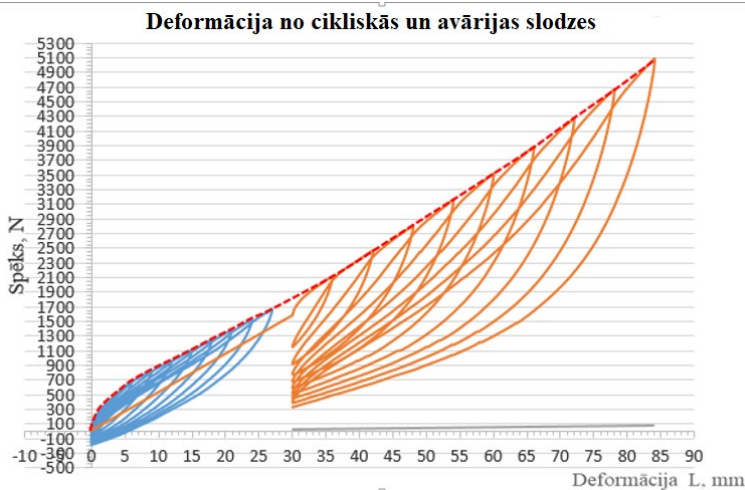
3.8. Sajūgu apvalku paraugu izmēģinājumu rezultāti

Deformācijas izmaiņas raksturs sajūgu 2. un 5. fragmentam pie cikliskās slodzes redzams 3.9. tabulā.

3.9. tabula

Sajūga apvalka fragmentu noslogošanas secība

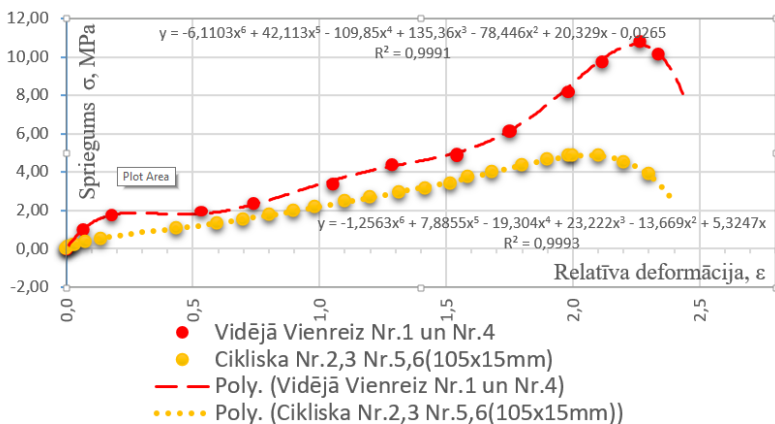
Slodzes raksturojums	Noslogojuma ciklu skaits, gab.	Noslogojuma ātrums, mm/s
Ekspluatācijas slodzes	10	0,4
Pēkšņas slodzes (līdz sagraušanai)	20	0,8



3.5. att. 2., 3 un 5., 6 fragmenta deformāciju grafiks atkarībā no ekspluatācijas un ekstremālām cikliskām slodzēm.

Cikliskās slodzes rezultāti liecina, ka, deformējot sajūga apvalka fragmentu līdz 25 mm, kas ir kritiskais lielums ekspluatācijā, spēka vērtība sasniedz aptuveni 1500 N. Sajūga apvalka fragmenta tālākai deformācijai līdz 80–90 mm tiek novērota sajūga apvalka materiāla stiprināšanas efekts, jo ar katru jaunu slodzojumu slodze palielinās nelineāri un sasniedz 7500 N pie maksimālās deformācijas 90 mm.

Sajūga 1. un 4. fragmenta vienvirziena izstiepšanas izmēģinājuma rezultātu salīdzinājums pie vienreizējas izstiepšanas ($R^2 = 0,9991$) un sajūgu 2. un 5. fragmenta pie ekspluatācijas un ekstremālām cikliskām slodzēs ($R^2 = 0,9995$) līdz sagraušanai redzams 3.6. attēla grafikā.



3.6. att. Vienpusējas izstiepšanas izmēģinājuma rezultātu salīdzinājums.

Pēc sajūga fragmentu izmēģinājuma rezultātiem tika aprēķināti elastīguma moduļi. Pie vienreizēja 1. un 4. fragmenta izstiepšanas aprēķinātais elastīguma modulis sastāda – 14 MPa. Pie sajūga 2. fragmenta cikliskām ekspluatācijas slodzēm, aprēķinātais elastīguma modulis sastāda - 10 MPa.

3.9. SolidWorks programma aprēķināšanas modeļa izveidošana

Lai izveidotu sajūga materiāla skaitlisko modeli, tika veikta vairāku testu rezultātu salīdzinošā analīze.

Pamatojoties uz iegūtajiem rezultātiem, tika veikti sajūga apvalka fragmentu aprēķini pie vienreizējas sagraušanas un cikliskās stiepšanas slodzes. Aprēķinu dati apkopoti 3.10. un 3.11. tabulā.

3.10. tabula

Sajūga 1. un 4. fragmenta vienreizējas stiepšanas vidējais rezultāts

Proporcionalitātes robeža, MPa	Elastības modulis, MPa	Stiprības robeža, MPa	Tecēšanas robeža, MPa	Sagraušanas spriegums, MPa
$\sigma_{0,2}$	E	σ_b	σ_y	Sagraušana
0,98	14,73	10,86	2,38	10,13

3.11. tabula

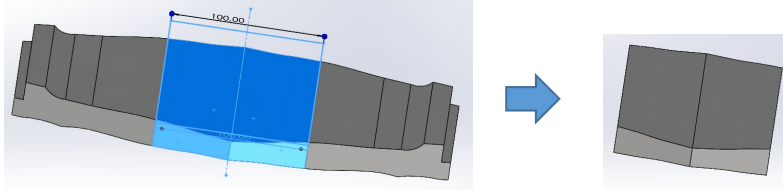
2. un 5. fragmenta cikliskā slodze

Proporcionalitātes robeža, MPa	Elastības modulis, MPa	Stiprības robeža, MPa	Tecēšanas robeža, MPa	Sagraušanas spriegums, MPa
$\sigma_{0,2}$	E	σ_b	σ_y	Sagraušana
0,102	15,24	4,87	0,50	3,88

Atbilstoši aprēķinātajiem materiāla raksturlielumiem *SolidWorks* aprēķinu kompleksā tika izstrādāts materiāla aprēķina modelis sajūga apvalka fragmentiem.

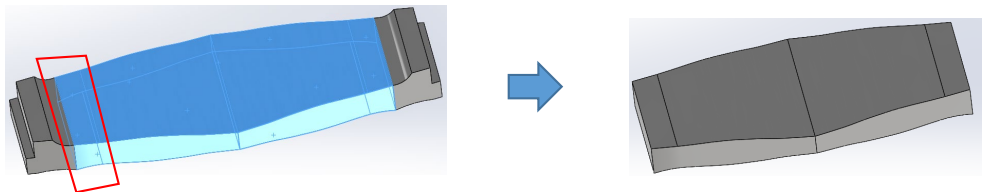
3.10. Gumijas korda sajūga apvalka fragmenta modelēšana

Tālāk tika izstrādāts sajūga apvalka fragmenta aprēķina modelis (3.7. att.). Veikti sajūga apvalka fragmenta aprēķinu varianti ar dažādām modelēšanas metodēm un dažādiem deformācijas lielumiem.



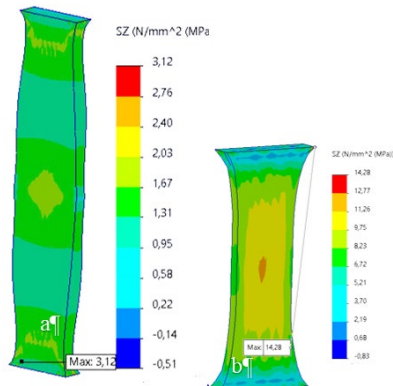
3.7. att. Apvalka fragmenta modelis ar stiepes zonu 100 mm.

Pārbaudes laikā spriedzei pakļautā apvalka fragmenta modelis ar 100–220 mm zonu un modificēts apvalka aprēķina modelis materiālu modeļu testēšanai redzams 3.8. attēlā.



3.8. att. Apvalka fragmenta modelis ar stiepes zonu 220 mm.

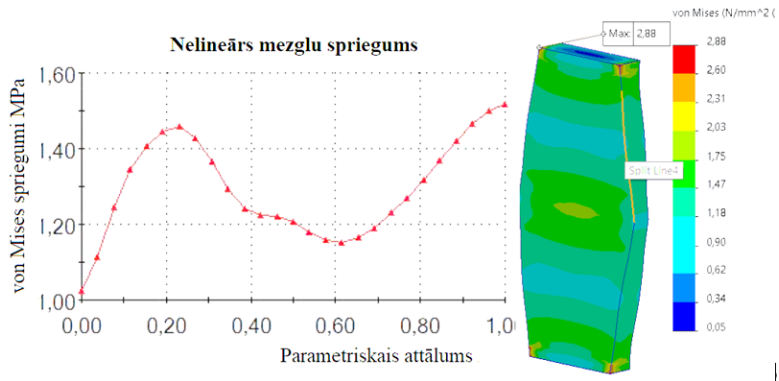
- **Superelastīga materiāla modelēšana, izmantojot *Mūnija – Rivlina* metodi**



3.9. att. Superelastīga materiāla izstiepšanas modelis:

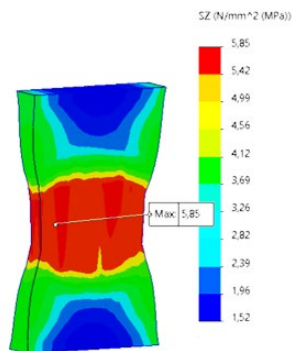
a – 220 mm modelis pie 135,9 mm izstiepšanas; b – 100 mm modelis pie 135,9 mm izstiepšanas.

Spriegumu sadalījums superelastīgā materiāla modeļa fragmenta vertikālajā malā pēc *Mūnija – Rivlina* metodes redzams 3.10. attēlā.



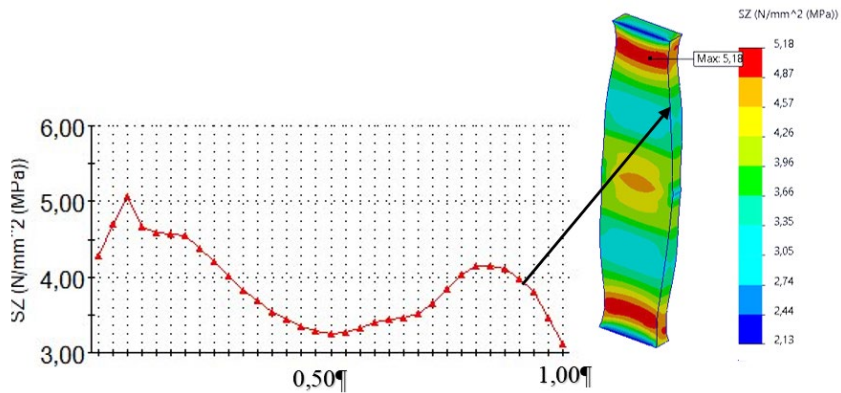
3.10. att. Apmales reakcija no stiprinājuma līdz 100 mm gara fragmenta vidusdaļai.

- Superelastīga materiāla modelēšana, izmantojot *Blatz* metodi



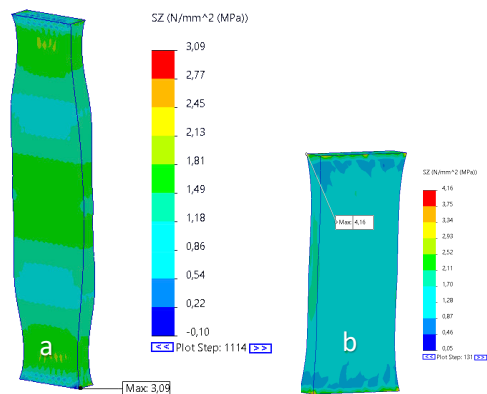
3.11. att. 100 mm gara fragmenta aprēķins izstiepšanai līdz 66,06 mm.

Spriegumu sadalījums superelastīgā materiāla modeļa fragmenta vertikālajā malā pēc *Blatz* metodes redzams 3.12. attēlā.

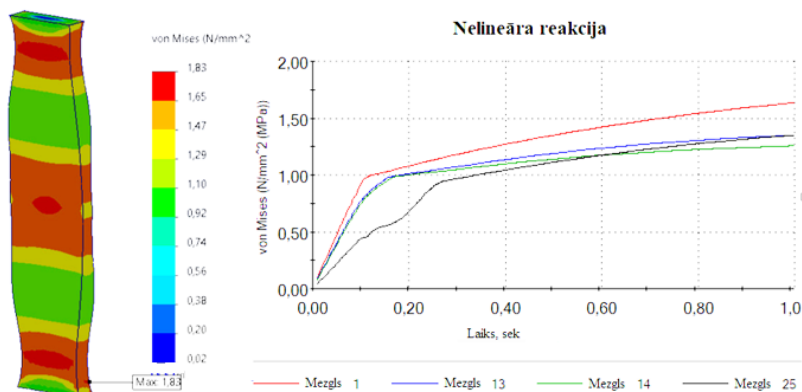


3.12. att. Sprieguma sadalījums no stiprinājuma vietas līdz fragmenta vidusdaļai veido 100 mm.

- Superelastīga materiāla modelēšana, izmantojot nelineāro elastīgo metodi (NLE)

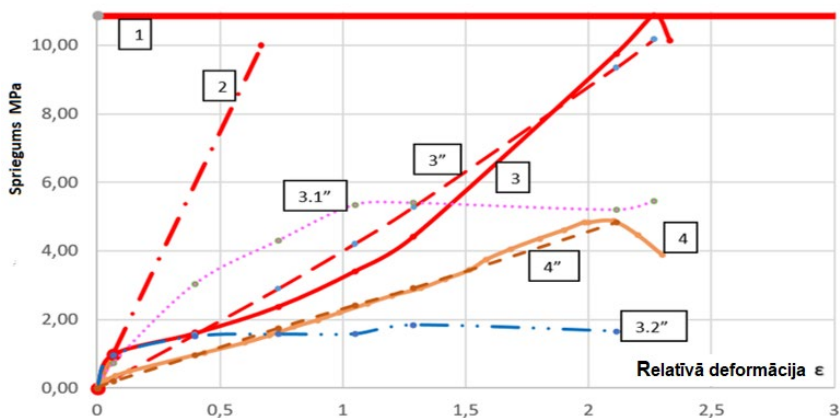


3.13. att. Spriegumu sadalījums pēc nelineārā elastīgā materiāla modeļa:
 a – modeļa garums 220 mm; b – modeļa garums 100 mm.



3.14. att. Mezgla reakcija nelineārā modeļa NLE (parauga garums 220 mm).

Konstatēts, ka *Blatz* metode, sasniedzot 130–140 % deformācijas, tālāk neatspoguļo eksperimentu rezultātus. Tādējādi nelielām sajūga apvalka deformācijām var izmantot abas metodes ar atbilstošu materiālu regulēšanu, savukārt deformācijām, kas lielākas par 130 %, *Mūnija–Rivlina* metodi. Lielām deformācijām pēc *Mūnija–Rivlina* metodes materiāla modelim nepieciešams pievienot trešo konstanti. Arī abu materiālu modeļu epīras ir atšķirīgas. Izmantojot *Blatz* metodi, deformācijas zona ir izteikta ar kakliņa veidošanos apvalka fragmenta turpmākās sagraušanas vietā stiepšanas laikā (3.11. att.).



3.15. att. Sajūga apvalka fragmentu stiepšanās modelēšanas rezultāti, lietojot dažādas metodes: 1 – stiprības robeža (10,86 MPa); 2 – elastības modulis 14,73 MPa; 3 – eksperimenta rezultāti – vienreizēja stiepšana līdz sagraušanai, 3" – rezultāti ar *Mūnija–Rivlina* metodi ar divām konstantēm; 3,1" – rezultāti ar *Blatz* metodi; 3,2" – rezultāti ar nelineāri elastīgo metodi; 4 – eksperimenta rezultāti – cikliska stiepšana līdz sagraušanai; 4" – rezultāti ar *Mūnija – Rivlina* metodi ar divām konstantēm, modificējot modeļa tīklu un gala elementu izmērus.

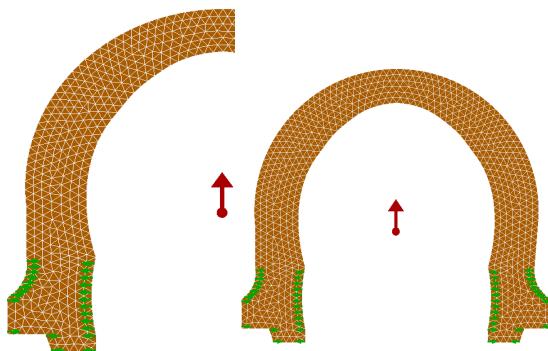
• Materiālu modelēšanas metožu novērtēšana

Mūnija–Rivlina metode modelēšanā ir darbietilpīgāka, bet ātrāka *SolidWorks* aprēķinos (vidēji aprēķini notiek 15–20 min. laikā), kā arī aprēķini tiek veikti ar apmierinošu precizitāti. Precīzākā ir nelineāri elastīgā metode līdz 20 mm spriegumam, bet pēc šīs vērtības precizitāte samazinās, bet paaugstināšana ar šo metodi aizņem apmēram sešas reizes vairāk laika (vidēji vairāk nekā 1,5 stundas) nekā *Mūnija–Rivlina* metode. *Blatz* metode parāda parauga retināšanu, un šāda veida parauga precizitāte izrādījās neapmierinoša (neuzrādīja precizitāti šāda veida uzdevumiem).

Turpmāk ar *Mūnija–Rivlina* metodi var modelēt pilnu gumijas korda sajūga apvalka modeli (3.15. att.).

3.11. Gumijas korda sajūga apvalka pilna modeļa modelēšana

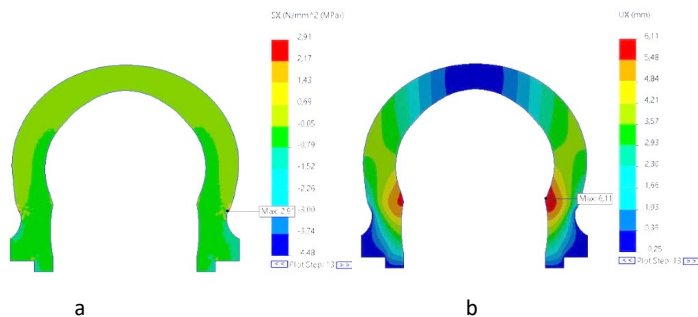
Metodes būtība ir sadalīt sektoru, kurā interesējošais parametrs mainās pēc sarežģīta likuma daudzos apakšsektoros, kas savstarpēji savienoti saskares punktos. Ņemot vērā lielo deformāciju stiprinājuma zonā un pielikto slodzi, noņemam galīgo elementu tīkla sabiezējumu. Ņemot vērā sajūga apvalka modeļa virsmas izliekumu, aprēķinu veikšanai tika izmantots orientēts tīkls (3.16. att.).



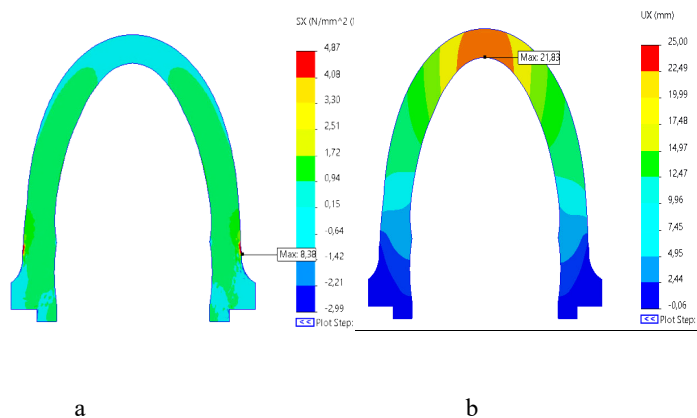
3.16. att. Sajūga skeļgriezums bez sabiezējuma.

Griezes momentam iedarbojoties uz sajūgu, vietā, kur sajūgs ir piestiprināts pie atlokiem, notiek sajūga pagarināšanās centrālās spēka iedarbības rezultātā.

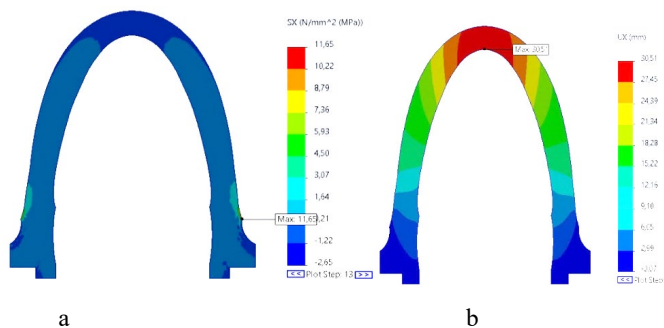
Sprieguma un nobīdes 2D modeļa epīri pa X asi no diska saspiešanas un rotācijas ātruma apgr./min. redzami 3.17.–3.19. attēlā.



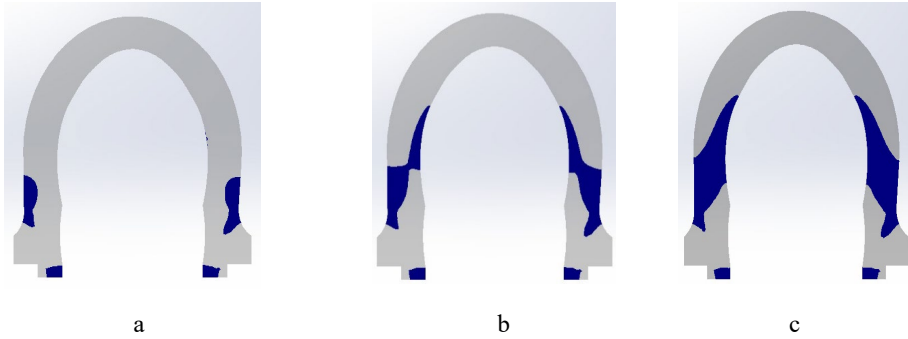
3.17. att. Sajūga spriegumi un pagarinājums pie 64 apgr./min. (5 km/h):
a – spriegums pa X asi; b – ekvivalenta nobīde pa X asi.



3.18. att. Sajūga spriegumi un pagarinājums pie 1521 apgr./min. (100 km/h):
a – spriegums pa X asi; b – ekvivalenta nobīde pa X asi.



3.19. att. Sajūga spriegumi un pagarinājuma pie 1825 apgr./min. (konstruktīvais ātrums 120 km/h):
a – spriegums pa X asi; b – ekvivalenta nobīde pa X asi.



3.20. att. Maksimālā sprieguma izplatšanās zona apvalka šķērsgriezumā pie dažādiem ātruma diapazoniem:

a – 1521 apgr./min. (100 km/h); b – 1673 apgr./min. (110 km/h); c – 1825 apgr./min. (120 km/h).

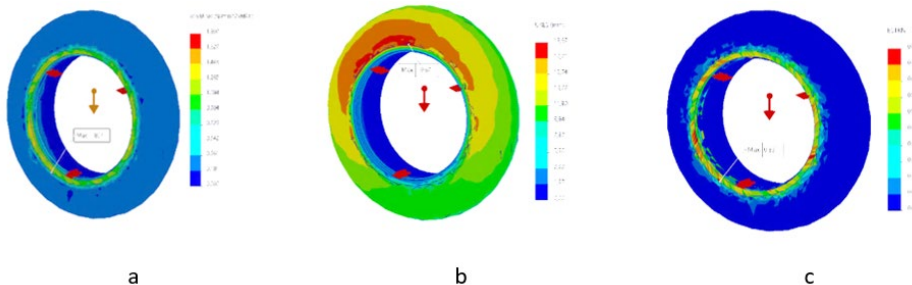
Konstatēts, ka pie griešanās ātruma no 1520 apgr./min. (100 km/h) spriegumi iedarbojas tikai uz ārējo virsmu, bet ar pieaugumu līdz 1670 apgr./min. (110 km/h) un 1825 apgr./min. (120 km/h) spriegumi izplatās pa visu sajūga šķērsgriezumu.

3.12. Radiālo, aksiālo un leņķisko noviržu modulēšanas rezultāti

Ar izstrādāto aprēķinu modeļu palīdzību šajā nodaļā pētīts sajūga sprieguma stāvoklis, ko ietekmē šādas slodzes:

- radiālā;
- aksiālā;
- leņķiskā.

Novērtējot radiālo, aksiālo un leņķisko slodžu ietekmi pie 130 apgr./min. (10 km/h), tika konstatēts, ka galvenā ietekme uz sajūgu tiek pārnesta paātrinājuma laikā, jo šajā laikā iedarbojas lielākais griezes moments. Radiālās slodzes un griezes momenta ietekme uz sajūgu ar maksimālo radiālo novirzi 15 mm redzama 3.21. attēlā.

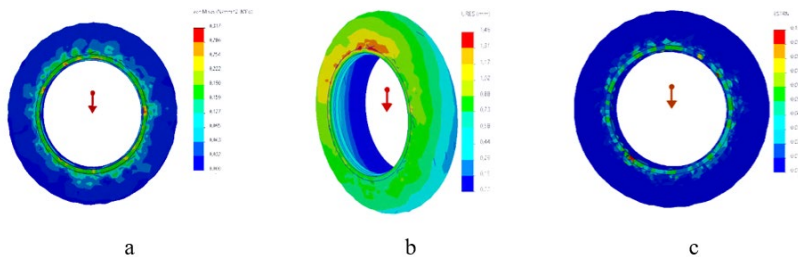


3.21. att. Radiālās slodzes ietekme uz sajūgu:

a – ekvivalentie spriegumi; b – ekvivalenta pārvietošana; c – ekvivalenta deformācija.

Momenta un radiālās novirzes slodzes iedarbība sadalās nevienmērīgi pa sajūga šķērsgriezumu un sasniedz maksimumu sajūga bojājuma vietā blakus nostiprināšanas diskam. Maksimālā sprieguma vērtība no radiālās novirzes sajūga stiprinājuma punktā veido 1,80 MPa, un ekvivalenta pārvietošana no radiālās slodzes šajā gadījumā veido 19,67 mm.

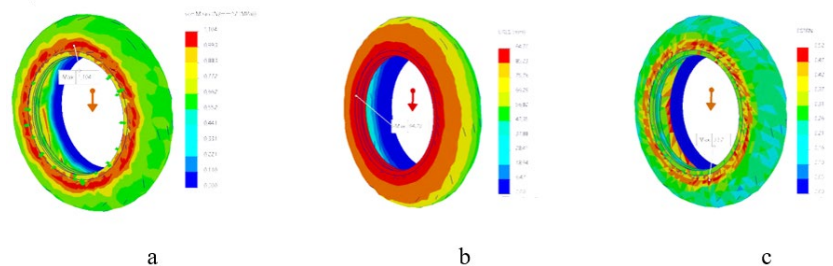
Novērtējot leņķisko slodžu un momenta ietekmi, tika konstatēts, ka galvenā ietekme uz sajūgu tiek pārnesta ar būtiskām vārpstu slīpuma leņķu novirzēm – 4 mm. Maksimālā sprieguma vērtība no leņķisko novirzes sajūga stiprinājuma punktā veido 0,31 MPa. Šajā gadījumā spriegumi tiek asimetriski sadalīti sajūga korpusa sienā un maina to zīmi ar katru sajūga apgriezianu. Sajūga deformācijas veids no leņķiskām slodzēm redzams 3.22. attēlā.



3.22. att. Leņķisko slodžu ietekme uz sajūgu:

a – ekvivalentie spriegumi; b – ekvivalenta pārvietošana; c – ekvivalenta deformācija.

Griezies momenta darbība pie 130 apgr./min. (10 km/h) ar aksiālo novirzi 20 mm redzama 3.23. attēlā.



3.23. att. Aksiālās slodzes ietekme uz sajūgu:

a – ekvivalentie spriegumi; b – ekvivalenta pārvietošana; c – ekvivalenta deformācija.

Modelēšanas rezultātā ar aksiālo novirzi 20 mm maksimālā sprieguma vērtība ir 1,10 MPa, maksimālā nobīde no aksiālās slodzes šajā gadījumā ir 94,70 mm. Vārpstu radiālās, aksiālās un leņķiskās novirzes laikā tika konstatēts, ka sajūga slīpuma leņķu iedarbības bojājumu vietas, kas parādās simulācijas procesā, sakrīt ar ekspluatācijas laikā konstatētajām bojājumu vietām.

3.13. Gumijas korda sajūga frekvences analīze

Rezonanses frekvenču kopsavilkums ar lielāko sajūga masas līdzdalību apkopots 3.12. tabulā.

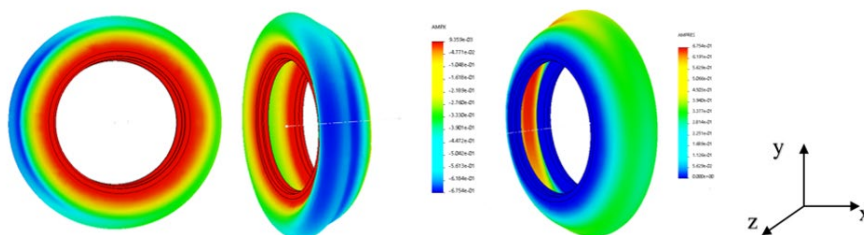
3.12. tabula

Apkopotie pašfrekvences rezultāti

Izmēģinājuma Nr.	Pašsvārstību frekvence, Hz	Sajūga masas līdzdalība koeficienti pa asīm		
		X	Y	Z
1.	54,87	0,5719	$1,28 \cdot 10^{-6}$	$8,34 \cdot 10^{-9}$
2.	56,27	0,0194	$2,66 \cdot 10^{-6}$	$3,23 \cdot 10^{-6}$
3.	56,37	0,0260	$1,97 \cdot 10^{-8}$	$5,89 \cdot 10^{-7}$
11.	88,25	$1,82 \cdot 10^{-8}$	0,0533	0,3882
12.	88,36	$2,14 \cdot 10^{-9}$	0,3881	0,0532
22.	126,05	$4,85 \cdot 10^{-7}$	0,0511	0,0028
23.	126,22	$1,89 \cdot 10^{-7}$	0,0048	0,0484

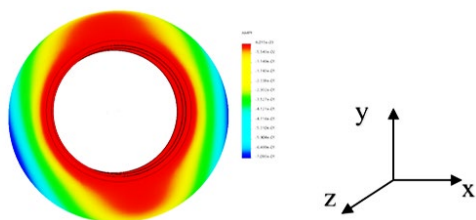
Šīs svārstīgās masas raksturo enerģijas daļu, kas iedarbojas uz sajūga apvalku un var izraisīt sajūga apvalka bojājumus.

Kā redzams 3.24. attēlā, pirmā un galvenā svārstību forma pie 54,87 Hz ar lielāko sajūga masas daļu 57,19 % aksiālā virzienā noslogo sajūga apvalka sānu sienu. Noslogotā zona sakrīt ar sajūga bojājuma zonu ekspluatācijas laikā.

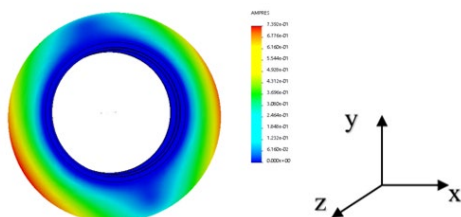


3.24. att. Sajūga svārstības pa X asi ar frekvenci 54,87 Hz.

Kā redzams 3.25. un 3.26. attēlā, svārstības forma pie 88,25 Hz un 88,36 Hz frekvencēm ar lielāko sajūga masas daļu, attiecīgi 38,82 % un 38,81 %, kas vērsta radiālā, horizontālā un vertikālā virzienā, izstiepj sajūga apvalka augšējo virsmu un sānu sienu radiālā virzienā. Noslogotās zonas ekspluatācijas laikā daļēji sakrīt ar sajūga bojājumu zonu.



3.25. att. Sajūga vibrācijas pa Y asi ar frekvenci 88,25 Hz.



3.26. att. Sajūga vibrācijas pa Z asi ar frekvenci 88,36 Hz.

Pie rezonanses frekvenču lielumos 56,37 Hz, 56,27 Hz, 126,05 Hz un 126,22 Hz svārstības piedalās ne vairāk kā 5 % gumijas korda sajūga masas, un tas ieguldījums svārstības neietekmē.

3.14. Gumijas korda sajūga stiprinājuma bultskrūvju lūzumu rakstura un cēloņa veida apskats

Bultskrūves izmantojamas gumijas korda sajūga stiprināšanai ritošā sastāvā un, īpaši elektrovilcienos, ekspluatācijas laikā tiek daudzkārt pakļautas periodiski laika gaitā mainīgām slodzēm un impulsa, augstfrekvences periodiskām un neperiodiskām, kā arī mainīgām amplitūdas un triecienslodzēm. Atkārtotas mainīgas triecienslodzes iedarbes rezultātā bultskrūvju materiāla izturība samazinās un gumijas korda sajūga *M-24* bultskrūves varētu būt pakļautas sagraušānai [13]...[17]. Gumijas korda sajūga bultskrūvju *M-24* lūzuma piemēri redzami 3.27. attēlā.



3.27. att. Gumijas korda sajūga sagraušanas paraugi:
a – vienas bultskrūves lūzums; b – divu bultskrūvju lūzumi; c – trīs bultskrūvju lūzumi.

Pie ievērojamu mainīgo un triecienslodžu un sitienu slodžu iedarbības materiāla spēja sacietēt ir izsmelta, un bultskrūvju materiāls var tikt pakļauts noguruma slodzēm, un tā rezultātā periodiski notiek augšējās virsmas slāņa izdrupšana [15]...[16].

Saistībā ar daudziem *M-24* bultskrūvju, kas tiek izmantotas gumijas korda sajūga stiprināšanai, atteikumiem, kā arī augstajām drošības prasībām stiprinājuma bultskrūvēm ir aktuāls jautājums par bultskrūves sagraušanas veida un rakstura cēloņu pētīšanu, kā arī bultskrūvju atbilstību *ISO 898-1:2013* [6] un *EN 10083-3:2007-01* [2] standartu prasībām.

3.15. Gumijas korda sajūga stiprināšanas *M-24* bultskrūvju sagraušanas veidu noteikšana

Gumijas korda sajūga stiprinājuma *M-24* bultskrūvju sagraušanas cēloņu izpēte saskaņā ar metodikas 10. punktu tika veikta RTU laboratorijā šādos virzienos:

- sagraušanas veida un rakstura noteikšana trim paraugiem pie statiskās slodzes;
- sagraušanas veida un rakstura noteikšana trim paraugiem pie cikliskas slodzes;
- statisko un ciklisko izmēģinājumā iegūto datu salīdzināšana ar *ISO 898-1:2013* standartu;
- triecienviskozitātes noteikšana trīs dažādos temperatūras diapazonos $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$; $0\text{ }^{\circ}\text{C}$; $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ un iegūto datu salīdzināšana ar *ISO 898-1:2013* standartu.

3.15.1. Sagraušanas veida un rakstura noteikšana, piemērojot statisko slodzi

Lai noteiktu sagraušanas sprieguma veidu un raksturu, RTU laboratorijā tika veiktas trīs *M-24* bultskrūvju paraugu statiskās pārbaudes uz sagraušanu Bultskrūvju paraugi tika paņemti no motorvagoniem ar šādiem nobraukuma datiem:

- 1. paraugs – nobraukums 214 596 km;
- 2. paraugs – nobraukums 105 764 km;
- 3. paraugs – bez nobraukuma (nobraukums 0 km).

Pārbaudes tika veiktas RTU laboratorijā, izmantojot “*Zwick/Roell Z600*” elektromehānisko testēšanas iekārtu ar slodzes palielināšanas ātrumu 1 mm minūtē.

3.15.2. Sagraušanas veida un rakstura noteikšana, piemērojot ciklisko slodzi

Lai bultskrūvēm *M-24* noteiktu sagraušanas veidu un raksturu, tika veikti cikliskie izmēģinājumi trim bultskrūves paraugiem (4., 5. un 6. paraugs; 10- testi – izstiepšana un slodzes noņemšana- un 11 tests – parauga izstiepšana līdz sagraušanai), ņemot vērā trīs dažādus nobraukuma diapazonus:

- 4. paraugs – nobraukums 22 543 km;
- 5. paraugs – nobraukums 155 365 km;
- 6. paraugs – nobraukums 210 298 km.

Cikliskie izmēģinājumi tika veikti RTU laboratorijā, izmantojot “Zwick/Roell Z60010” elektromehānisko testēšanas iekārtu ar pakāpenisku slodzes palielināšanu un noņemšanu. Noslogojuma pakāpes attiecīgi: 25 k N; 50 k N; 75 k N; 100 k N; 125 k N; 150 k N; 175 k N; 200 k N; 225 k N; 250 k N; sagraušana. Slodzes palielināšanas ātrums – 7 mm minūtē.

3.15.3. Sagraušanas veida un rakstura noteikšana pie *M-24* bultskrūvju triecienizturības pārbaudes

Šim nolūkam tiek piedāvāts veikt izmēģinājumu trīs bultskrūvju paraugiem (7., 8. un 9. paraugs) uz triecienizturību ar līdzīgiem nobraukuma datiem (85 tūkst. km.) trīs dažādos temperatūras diapazonos (–20 °C; 0 °C; +20 °C).

Patērētās enerģijas noteikšanas un triecienizturības dati apkopoti 3.13. tabulā.

3.13. tabula

Paraugu parametru noteikšana dažādās temperatūrās

Parauga parametri	Parauga Nr.		
	7.	8.	9.
Testēšanas temperatūra, t , °C	+20	0	–20
Potenciālā enerģija A , J	450	450	450
*Absorbētā enerģija A_1 , J	54,3	39,1	21,7
Nosacītā triecienizturība a_k , J/mm ²	67,9	48,7	26,9

* Prasības saskaņā ar *ISO 898-1:2013* prasībām absorbētā enerģija – min 27 J pilna profila testējamam paraugam.

3.16. *M-24* bultskrūvju pētīšanas standarta *ISO 898-1:2013* un *EN 10083- 3:2007-01* atbilstība prasībām

Lai noteiktu bultskrūvju sagraušanas cēloņus, jāpārbauda paraugu atbilstību *ISO 898-1:2013* [6] un *EN 10083-3:2007-01* [2] standartu prasībām, kas noteiktas *4Cr41* markas tēraudam. Izpētes objektiem tika izvēlētas salauztas bultskrūves (10., 11., 12. un 13. paraugs), kas demontētas no *ER2* un *ER2T* sērijas motorvagoniem, kā arī viena jauna bultskrūve (14. paraugs). Pētījumi tika veikti Rīgas Tehniskās universitātes laboratorijā šādos virzienos:

- cietības noteikšana;
- ķīmiskā sastāva analīze.

Iegūtie dati tika apobēti neatkarīgā laboratorijā *KIWA “Inspecta Latvia”*.

Dati par nobraukumu un bultskrūvju darbības laiku motorvagonos apkopoti 3.14. tabulā.

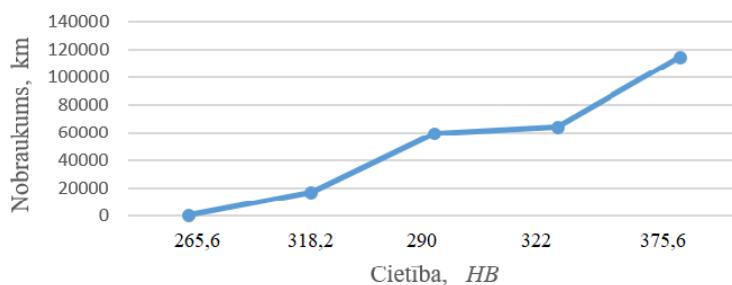
Dati par bultskrūvju darbību

Parauga Nr.	Vagona Nr.	TR-3 remonta izpildes datums	Atteikumu datums	Darbības laiks, dienas	Nobraukums, km
10.	Nr. 1342-02	12.12.2019.	29.06.2020.	201	59348
11.	Nr. 3034-06	23.05.2020.	30.10.2020.	160	64078
12.	Nr. 7117-04	20.11.2020.	02.01.2021.	43	17124
13.	Nr. 7113-06	20.04.2020.	03.06.2021.	408	114400
14.	Jauna bultskrūve	–	–	–	–

• Cietības noteikšana

Rīgas Tehniskās universitātes laboratorijā tika veikta tērauda cietības pārbaude pēc Brineļa skalas *HB* [18], izmantojot ierīci “*MIC 10*” [11]. Lai iegūtu lielāku eksperimenta precizitāti, mērījumi tika veikti piecos punktos visā paraugu šķērsgrīzumā.

Cietības *HB* atkarība no bultskrūvju nobraukuma redzama 3.28. attēla grafikā.



3.28. att. Sajūga bultskrūvju cietības atkarība no nobraukuma.

Pēc grafika rezultātiem var konstatēt, ka pie nobraukumu palielināšanās palielinās sajūgu bultskrūvju cietība, t. i., bultskrūvju materiāls kļūst stiprāks.

• Ķīmiskā sastāva analīze

Pēc tērauda ķīmiskā sastāva noteikšanas rezultātiem tika konstatēts, ka:

- 10. parauga tērauda marka – nav noteikta;
- 11. parauga tērauda marka – *34Cr4*;
- 12. parauga tērauda marka – nav noteikta;
- 13. parauga tērauda marka – nav noteikta;
- 14. parauga tērauda marka – *34Cr4*.

Veicot tērauda ķīmiskā sastāva izpēti, tika atklātas vairākas neatbilstības standarta *EN 10083-3:2007-01* [2] prasībām.

Oglekļa (C) saturs četros paraugos ir mazāks par normu un veido:

- 11. paraugam – 0,366 %;
- 12. paraugam – 0,261 %;
- 13. paraugam – 0,316 %;
- 14. paraugam – 0,322 %;
- 10. paraugā oglekļa saturs pārsniedz normu un ir 0,505 %.

Savukārt saskaņā ar *EN 10083-3:2007-01* [2] standarta prasībām tērauda markai *4Cr41* oglekļa saturam jābūt 0,38–0,45 % robežās. Samazinoties oglekļa daudzumam tēraudā, uzlabojas tā plastiskums un palielinās stingrība (triecienizturība). Palielinoties oglekļa saturam tērauda sastāvā, palielinās tērauda cietība, stiprība un stingrība, palielinās arī tecēšanas robeža σ_t un stiepes izturība σ_s , bet tajā pašā laikā samazinās plastiskums un triecienizturība un pasliktinās arī apstrādājamība un metināmība [23]...[24].

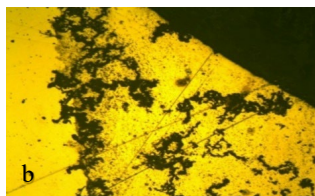
Pētījuma procesā bultskrūvju materiālā tika konstatēti kaitīgi fosfora un sēra piemaisījumi. Fosfora (P) procentuālais daudzums 1. paraugā – 0,125 %, 2. paraugā – 0,0050 %, 3. paraugā – 0,0813 %, 4. paraugā – 0,0898 %, 5. paraugā – 0,0671 %. Četros paraugos fosfora saturs būtiski pārsniedz *EN 10083-3:2007-01* [2] standartā noteiktās normas, kam jābūt mazāk par 0,025 %.

3.17. Bultskrūvju paraugu metalogrāfiskā analīze

Lai apliecinātu defektu klātbūtni mikrostruktūrā, 10. un 11. paraugam tika veikta metalogrāfiskā analīze. Pamatojoties uz pētījuma rezultātiem, bultskrūvju metalogrāfiskajā struktūrā tika konstatēta piemaisījumu un plaisu esamība. Bultskrūvju *M-24* metalogrāfiskā struktūra redzama 3.29. un 3.30. attēlā.



3.29. att. 10. parauga pētāmās bultskrūves mikrostruktūra, palielinājums: a – $\times 50$; b – $\times 200$.



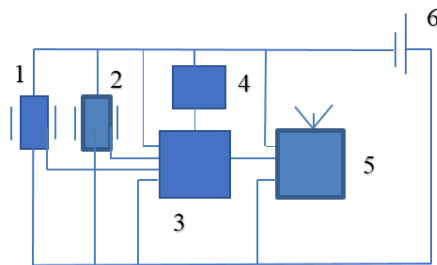
3.30. att. 11. parauga pētāmās bultskrūves mikrostruktūra, palielinājums a – $\times 50$; b – $\times 200$.

Metaloģrāfiskās analīzes rezultātā visos paraugos tika konstatēts liels skaits nemetālisku piemaisījumu, kas, palielinoties bultskrūves darbības laikam (nobraukumam), palielinās skaitā un izmēros, kas vēlāk izraisa lūzumus.

“Latvijas dzelzceļā” ekspluatācijas apstākļos gumijas korda sajūga stiprinājuma bultskrūves tika pakļautas triecienslodzei. Pētot bultskrūvju mikrostruktūru, tika konstatēts, ka notiek pakāpeniska defektu uzkrāšanās, kas rodas triecienslodzes darbības rezultātā. Lai kontrolētu trieciena slodzes lielumu, izstrādāta ierīce, kas fiksē triecienslodzes lielumu ekspluatācijā.

3.18. Bultskrūvju stiprinājumu trieciena un vibrācijas spēka kontroles ierīču projektēšana

Izgudrojuma mērķis ir izveidot bultskrūvju stiprinājumu trieciena un vibrācijas spēka kontroles ierīci, kas dotu iespēju pastāvīgi uzkrāt un analizēt datus par trieciena spēku, ko uztver bultskrūves transportlīdzekļa ekspluatācijas laikā, lai samazinātu dzelzceļa transporta ritošā sastāva vai citu nozaru transportlīdzekļu neplānoto remontu skaitu tā bojājumu dēļ, kā arī lai samazinātu avāriju vai citu negadījumu skaitu [14]. Izgudrojuma ierīču blokshēma redzama 3.31. attēlā.



3.31. att. Izgudrojuma ierīces blokshēma:

1 – vibrācijas devējs; 2 – trieciena devējs; 3 – mikrokontrolieris; 4 – atmiņas modulis; 5 – datu pārraides bloks; 6 – barošanas bloks.

Izgudrojuma mērķis ir sasniegts šādi: bultskrūvju stiprinājumu trieciena un vibrācijas spēka kontroles ierīce sastāv no korpusa, kam iekšā uzstādīti šādi elementi – vibrācijas devējs (4) un trieciena devējs (5), mikrokontrolieris (6), datu pārraides bloks (7) un barošanas bloks (8). Par vibrācijas devēju (4) un trieciena devēju (5) var tikt izmantots pjezoakselerometrs – sensors, kas pārvērš vibrācijas vai trieciena spēka vērtību elektroniskā signālā [9]...[12].

Izgudrojuma ierīces ieviešana ekspluatācijā ļaus iegūt objektīvus datus par trieciena spēku un vibrācijas slodzēm uz bultskrūvēm. Uzkrājot informāciju un to regulāri apstrādājot, var novērst gumijas-korda sajūga bultskrūvju bojājumus un attiecīgi samazināt elektrovilcienu neplānoto remontu skaitu. Ja, apstrādājot no izgudrojuma ierīces saņemto informāciju tehniskās apkopes (vai atjaunošanas remonta) laikā, konstatētas daudzkārt pārsniegtas pieļaujamās slodzes, tad bultskrūves jānomaina pret jaunām. Tādējādi tiek novērsta nepieciešamība veikt neplānotus

remontus bultskrūvju bojājuma dēļ, kas ir saistīti ar uzņēmuma lieliem finansiālajiem tēriņiem [3]...[4].

3.19. Triecienvibrācijas ierīces testēšana

Lai to realizētu, bija nepieciešams ar aprēķinu palīdzību noteikt trieciena spēku F , ko saņem bultskrūves, motorvagonam pārbraucot dzelzceļa sliežu salaidnes. Trieciena spēks F , ko uztver gumijas korda sajūga stiprinājuma bultskrūves, noteikts pēc 3.4. formulas). Lai to noteiktu, nepieciešams noteikt paātrinājumu, ar kādu motorvagonš pārbrauc pāri dzelzceļa sliežu salaidnēm. Šim nolūkam tika izmantota empīriskā formula (3.5. formula).

$$F = \omega_r \cdot q, \quad (3.4)$$

kur q – riteņpāra pusmasa, t;

ω_r – paātrinājums, ar kādu motorvagonš pārbrauc dzelzceļa sliežu salaidni, m/sek².

$$\omega_r = \left[2 + 0,13 \frac{V}{\sqrt{(2q)^2}} \right] \cdot g, \quad (3.5)$$

kur V – vagona ātrums, km/h;

q – riteņpāra pusmasa, kg;

g – brīvās krišanas paātrinājums, 9,81 m/s².

Paātrinājuma un trieciena spēka aprēķinu dati apkopoti 3.15. tabulā.

3.15. tabula

Paātrinājuma un triecienslodzes aprēķinu dati

Vagona ātrums V , km/h	Riteņpāra paātrinājums ω_r , m/sek ²	Sitiena spēks F , N
20	28,122	42 183
40	36,624	54 936
60	45,126	67 689
80	53,628	80 442
100	62,13	93 195
120	70,632	105 948

Tālāk, lai noteiktu triecienslodzi, “LDz” uzņēmumā, kas apkalpo elektrovilcienus, tika veikti gumijas korda sajūga stiprinājuma bultskrūvju sagraušanas slodzes izmēģinājumi, kuros tika izmantota izstrādātā triecienvibrācijas ierīce ar atšķirīgiem tuvu aprēķinātajiem trieciena spēka F datiem. Izmēģinājuma dati apkopoti 3.16. tabulā.

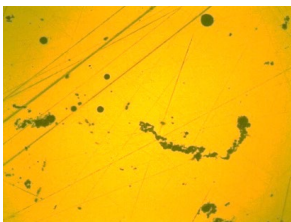
Triecienvibrācijas ierīces testēšana uz stenda

Izmēģinājuma Nr.	Bultskrūvju daudzums, gab.	Sitiena spēka lielums F , N	Sitiena daudzums, gab.	Trieciena līmeņa lielums, nosac. vien.
1.	16	20 000	1000	no 305 – līdz 317
2.	16	40 000	730	no 329 – līdz 338
3.	16	60 000	467	no 354 – līdz 362
4.	16	80 000	354	no 383 – līdz 395
5.	16	100 000	136	no 418 – līdz 430

Analizējot bultskrūvju trieciena izmēģinājuma datus, tika konstatēts, ka ar trieciena spēku, kas vienāds ar:

- 20 000 N (2 tonnas) – bultskrūvju sagraušana nenotiek;
- 40 000 N (4 tonnas) – pēc 730. trieciena notika vienas bultskrūves sagraušana;
- 60 000 N (6 tonnas) – pēc 467. trieciena notika vienas bultskrūves sagraušana, pēc 500 triecieniem bultskrūvju apskates laikā tika konstatēta otras bultskrūves sagraušana.
- 80 000 N (8 tonnas) – pēc 354. trieciena notika vienas bultskrūves sagraušana, pēc 360 triecieniem bultskrūvju apskates laikā tika konstatēta otras bultskrūves sagraušana;
- 100 000 N (10 tonnas) – pēc 136. trieciena tika konstatēts, ka sagraušanai pakļautas uzreiz divas bultskrūves, pārbaudot pēc 150 triecieniem, tika konstatēts, ka sagraušana notikusi vēl divām bultskrūvēm, kas ir kritiski ekspluatācijā.

Bultskrūvju, kas pakļautas 20 000 N; 100 000 N trieciena slodzei, metalogrāfiskā analīze redzama 3.32. un 3.33. attēlā.

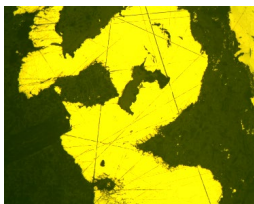


a

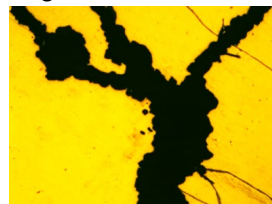


b

3.32. att. Metalogrāfiskā analīze pēc 1000 sitieniem ar spēku 20 000 N, palielinājums – $\times 200$;
a – 15. paraugs; b – 16. paraugs.



a

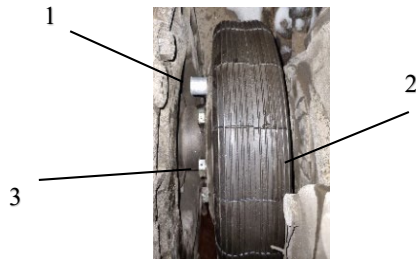


b

3.33. att. Metalogrāfiskā analīze pēc 150 sitieniem ar spēku 100 000 N, palielinājums – $\times 200$;
a – 17. paraugs; b – 18. paraugs.

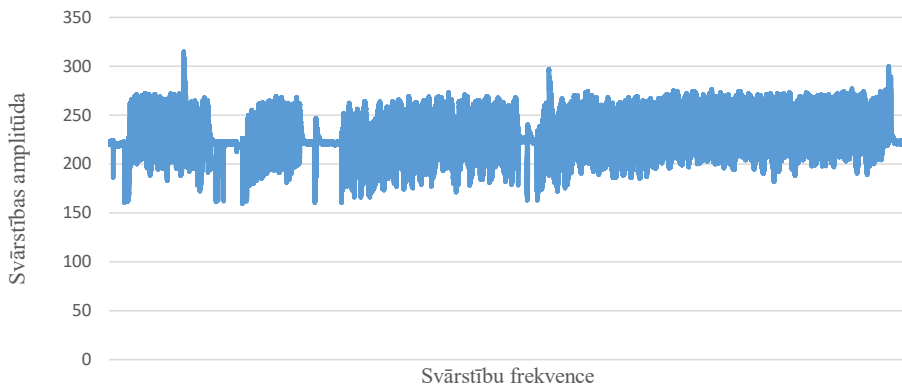
Metaloģrāfiskā analīze apstiprināja kritisko defektu un plaisu veidošanos mikrostruktūrā pie dažādām triecienu slodzes vērtībām, kas izraisīja bultskrūves sairšanu.

Lai kontrolētu triecienvibrācijas slodzi, ko uztver gumijas korda sajūga bultskrūves, triecienvibrācijas ierīce tika uzstādīta uz gumijas korda sajūga atloka. Ierīces uzstādīšanas vieta redzama 3.34. attēlā. Triecienvibrācijas ierīces darbības pārbaude tika veikta uz elektrovilcienu motorvagona Nr. 7118-10, sākot no 15.03.2023. No triecienvibrācijas ierīces saņemtie rezultāti redzami 3.35. attēlā.



3.34. att. Triecienvibrācijas ierīces izvietojuma vieta:

1 – triecienvibrācijas ierīce; 2 – gumijas korda sajūgs; 3 – stiprinājuma bultskrūve.



3.35. att. Triecienvibrācijas slodzes grafiks par vienu darba dienu.

3.35. attēla grafikā redzama vagona Nr. 7118-10 darba diena, vagona nobraukums ir 486 km, konstatētais sitienu daudzums – vairāk par 300 nosac. vien. sastāda 3 gab.

Reizi mēnesī, kad motorvagens sasniedza 10–15 tūkst. km. nobraukumu, viena bultskrūve tika demontēta, lai veiktu metaloģrāfisko analīzi. Bultskrūvju darbības pētījuma dati, izmantojot triecienvibrācijas ierīci, apkopoti 3.17. tabulā.

Triecienslodzes noteikšana

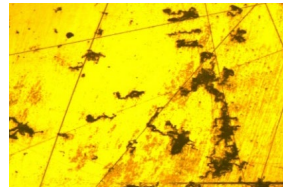
Parauga Nr.	M-24 bultskrūvju darbības rādītāji				
	Nobraukums, km	Triecienu devēja rādījumu lielums, nosac. vien.			
		300–330	331–360	361–390	391–420
19.	12 682	52	14	3	0
20.	25 632	116	21	4	2
21.	38 850	187	33	5	3
22.	52 512	236	42	8	3
23.	65 748	287	50	12	4
24.	79 906	314	61	15	5
Kritiskais līmenis	264 000	700	250	150	40

Kontroles laikā triecienslodzes maksimālais triecienvibrācijas līmenis ir 396 nosac. vien.

Bultskrūvju 19. un 24. parauga metalogrāfiskas analīzes rezultāti redzami 3.36. un 3.37. attēlā. Palielinājums – $\times 100$.



3.36. att. Bultskrūves 19. parauga metalogrāfiskā analīze, nobraukums 12 882 km.



3.37. att. Bultskrūves 24. parauga metalogrāfiskā analīze, nobraukums 79 906 km.

Pēc metalogrāfiskās analīzes rezultātiem tika konstatēta pakāpeniska defektu izveidošanās mikrostrukturā.

3.20. Ekonomiskais efekts, ieviešot izstrādāto metodiku un triecienvibrācijas ierīces

Metodikas ieviešanas ekspluatācija dot sekojošus rezultātus izmaksas uz neplānotiem remontiem nebūs, taču jāņem vērā cilvēciskais faktors, izmaksas būs saistītas tikai ar triecienvibrācijas ierīces un metodikas ieviešanu ekspluatācijā. Dati par neplānoto remonta izmaksām tika redzami 3.18. tabulā. Dati par triecienvibrācijas ierīču ieviešanu ekspluatācijā parādīti [13].

3.18. tabula

Neplānoto remontu izmaksas

Neplānotā remonta nosaukums	1. neplānotais remonts, EUR	Par 10. gadiem, EUR	Triecienvibrācijas ierīču ieviešana ekspluatācijā, EUR
Gumijas korda sajūga bultskrūvju nomainā	429	103 895	15 000
Gumijas korda sajūga nomainā	575	58 842	

Pēc (3.18. tab.) rezultātu datiem izmaksas par triecienvibrācijas ierīces uzstādīšanu un metodikas ieviešanu atmaksāsies divu gadu laikā.

SECINĀJUMI

Apkopojot darba rezultātus un pamatojoties uz tiem, var izdarīt sekojošus secinājumus:

1. Darbā detalizēti izpētīti statistikas dati par gumijas korda sajūgu un to stiprinājuma bultskrūvju atteikumi laikā perioda no 2012. līdz 2021. gadam. Gumijas korda sajūgu atteikumu skaits – 101 gadījums, bet to stiprinājuma bultskrūvju atteikumi – 298 gadījumi. Promocijas darbā tika veikta arī sajūgu un bultskrūvju atteikumu novērtējums pa sezonām, konstatējot, ka vislielākais atteikumu skaits attiecināms uz ziemas periodu:
 - gumijas korda sajūgu atteikumu skaits veido vairāk par 41 %;
 - gumijas korda sajūgu stiprinājuma bultskrūvju atteikumu skaits veido vairāk par 43 %.
2. Veicot gumijas korda sajūga un to stiprinājuma bultskrūvju pētījumus, saskaņā ar izstrādāto metodiku un to aprobācijas laikā tika iegūti šādi rezultāti:
 - pēc vizuālas apskates tika konstatētas, ka 95 % gumijas korda sajūgu bojājumu ir sānu virsmās, kas atrodas 10–20 mm attālumā no sajūga nostiprinājuma vietas pie atlokiem, sagraušana;
 - pēc gumijas korda sajūgu temperatūras mērījumiem “Latvijas dzelzceļa” apstākļos tika konstatēts, ka 100 % tiek ievērots nosacījums sajūga nesasilšanai vairāk par^o +75 °C saskaņā ar standarta *ISO 14691:2008* prasībām;
 - pēc gumijas korda sajūgu ģeometrisko izmēru mērīšanas rezultātiem tika konstatēts, ka 6 % gumijas korda sajūgu ārējais diametrs *D* neatbilst *ISO 14691:2008* standarta prasībām, tāpēc tika ierosināts gumijas korda sajūgus ar neatbilstošu ārējo diametru nomainīt pret jauniem;
 - pēc gumijas korda sajūgu cietības mērījumiem eksperimentāli pierādīts, ka temperatūras diapazonos:
 - –20 °C un 0 °C – 88 % sajūgu neatbilst standarta *ISO 14691:2008* prasībām, pārsniedzot standarta datus par 11,4–4,2 nosac. vien.;
 - +5 °C un +10 °C – 52 % sajūgu neatbilst standarta *ISO 14691:2008* prasībām, maksimāli pārsniedzot standarta datus par 9,2 nosac. vien.;
 - +15 °C un +20 °C – 20 % sajūgu neatbilst standarta *ISO 14691:2008* prasībām, maksimāli pārsniedzot standarta datus par 4,8 nosac. vien.

Pēc cietības mērījuma rezultātiem rekomendēts vienu no četriem gumijas korda sajūgiem nomainīt sakarā ar neatbilstību *ISO 14691:2008* standarta prasībām dažādos temperatūras diapazonos. Par pārējām gumijas korda sajūgu neatbilstībām *ISO 14691:2008* standarta prasībām izteikta rekomendācija ražotājam.

- Pamatojoties uz darbā veiktajiem eksperimentiem, tika pierādīts, ka gumijas korda sajūga stiprinājuma bultskrūvju atteikumi ir saistīti ar sagraušanas procesiem, kas rodas metāla noguruma un defektu uzkrāšanās mikrostrukturā dēļ, ko apstiprina arī metalogrāfiskās analīzes sagraušanas diagrammas jaunu bultskrūvju bez defektiem mikrostrukturā un bultskrūvju ar nobraukumu un defektu klātbūtni mikrostrukturā.

- Pēc mikrostruktūras pētījumu rezultātiem ar metalogrāfiskās analīzes palīdzību tika konstatēts mikrostruktūras defektu veidošanās apjoms bulskrūvēs, kas palielinās, palielinoties bulskrūves darbības laikam (nobrukumam).
 - Iegūtie bulskrūvju rezultāti ticamībā un precizitātē apliecināti sertificētā testēšanas laboratorijā *KIWA AS Inspecta Latvija*”.
3. Pēc aprēķināšanas modeļa izveides *SolidWorks* programmā ar izvelēto *Mūnija–Rivlina* elastomēro materiālu modeļu palīdzību iegūti šādi rezultāti:
- modelējot maksimālos aksiālās, radiālās un leņķiskas novirzes datus, tika konstatēts, ka kopējā spriegumu darbība no aksiālām radiālām un leņķiskām novirzēm pie cikliskas slodzes ir bīstama sajūgiem un var izraisīt sānu virsmas sairšanu, jo veido 3,21 MPa, kas ir vairāk nekā 60 % no stiprības robežas σ_b (4,87 MPa), kas pie cikliska veida slodzes izraisa sānu virsmas sairšanu;
 - modelējot dažādus leņķisko ātrumu diapazonus, tika konstatēts, ka pie 1670 apgr./min., kas ir vairāk par 110 km/h, spriegums sajūga nostiprinājuma vietā pie atlokiem vairāk nekā divas reizes pārsniedz stiprības robežu σ_b pie cikliskās slodzes un sāk izplatīties pa visu sajūga šķēsgriezumu;
 - pētot pirmo 40 rezonanses frekvenču ietekmi *SolidWorks* galīgās elementu modelēšanas programmā, noteiktas gumijas korda sajūga spriedzes zonas un konstatēts, ka rezonanses kritisko frekvenču ietekmē pa X, Y, Z asīm rodas sajūga svārstības, kurās iesaistās noteikts sajūga masas daudzums; visbīstamākās rezonanses frekvences ir pa X asi, kad svārstībās piedalās vairāk par 57 % sajūga pašmasas; pie šādas frekvences sajūga zonas pakļautas deformācijai un sakrīt ar bojājumu zonām, kas tiek konstatētas ekspluatācijā; lai samazinātu sajūga korpusa bojājumu risku, ir nepieciešams novērst sajūga ilgstošu darbību aprēķinātajās kritiskajās frekvencēs – 54,87 Hz; 88,25 Hz; 88,36 Hz;
 - modelēšanas rezultāti *SolidWorks* programmā apstiprināja, ka pie liela griezes momenta un aksiālās, radiālās vai leņķiskās novirzes, kā arī pie lieliem apgriezieniem visvairāk noslogotā sajūga zona ir tā sānu siena netālu no ārējā diametra diska stiprinājuma vietas.
4. Lai samazinātu bulskrūvju atteikumu skaitu, tika izstrādāta ierīce triecienvibrācijas slodzes kontrolei, kas izmēģināta ritošajā sastāvā, un ar šīs ierīces palīdzību iegūti triecienvibrācijas slodžu līmeņu dati reālos ekspluatācijas apstākļos.
- Pētot triecienvibrācijas ierīces iegūtos datus, tika noteikta triecienslodzes kritiskā vērtība, pie kuras tika rekomendēts nomainīt gumijas korda sajūga nostiprinošās bulskrūves. Rezultāti apstiprinājās arī ar metalogrāfiskās analīzes palīdzību, kad tika konstatētas mikroplaisas un liels skaits mikrostruktūras defektu.

LITERATŪRAS SARAKSTS

1. DIN EN 13913:2003-08 railway applications – rubber suspension components – elastomer-based mechanical parts, p. 54 .
2. EN 10083-3:2007-01 Technical delivery conditions for alloy steels English version of p. 54.
3. Gavrilovs, P., Dmitrijevs, 2016. A. Research in passenger car bogie central suspension roller and rod base metal and welded metal structure Engineering for Rural Development, 2016-January, p. 618–623.
4. Gavrilovs, P., Ivanovs, V 2017. Research of the defective frog wing of 1/11 mark Transport Problems, 12 (4), p. 119–126.
5. Gorbacovs. D, Mihailovs F, J Eiduks Analysis of the Formation of Defects in the Microstructure of the M-24 Bolts of the Rubber-Cord Coupling at Various Ranges of Mileage of Electric Trains Motor Cars 2021, 1.–4. lpp. IEEE.
6. ISO 898-1:2013 Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel p. 27
7. ISO 7619-1:2010 Rubber, vulcanized or thermoplastic – Determination of indentation hardness – Part 1: Durometer method (Shore hardness) p. 10.
8. ISO 14691:2008 Petroleum, petrochemical and natural gas flexible couplings for mechanical power transmission General-purpose applications p. 32
9. Komorska I., (2011) Vibroacoustic Diagnostic Model of the Vehicle Drive System, 130 p., ISBN-10: 837789016X, ISBN-13: 978-8377890165.
10. Kucherskij, A. M. A promising method for measuring hardness of rubber / A. M. Kucherskij // Polymer Testing. – 1997. – No. 16. – p. 481–490.
11. Kuzu C., Pelit E., Meral İ., A new design of Rockwell-Brinell-Vickers hardness standard machine at UME (2021) Acta IMEKO, 9 (5), p. 230–234.
12. Leonardson R, MacGugan D. Design and fabrication of a commercial triaxial accelerometer (1994) Sensors (Peterborough, NH), 11 (8), p. 22–23.
13. Mihailovs F., Eiduks J., Gorbačovs D. Reducing the number of unscheduled repairs of traction gear of EMU trains by introducing modern technical solutions. 10th International Scientific Conference Rual Development 2021. Kaunas Lithuania., vol. p. 118-122.
14. Stauffer, J.-M. Market opportunities for advanced MEMS accelerometers and overview of actual capabilities vs. required specifications (2004) Record – IEEE PLANS, Position Location and Navigation Symposium, pp. 78–82.
15. Steels Microstructure and Properties, Fourth edition, Harshad Bhadeshia, Robert Honeycombe, 2017, eBook ISBN: 978-0-08-100272-8, Hardcover ISBN: 978-0-08-100270-4, p. 488.
16. Taylor, J., Mehmanparast, A., Kulka, R., Moore, P., Farrahi, G.H., Xu, L. Compact crack arrest testing and analysis of EH47 shipbuilding steel (2021) Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 114, art. no. 103004.
17. Zaripov, R., Gavrilovs, P, Sembaev, N., 2019. Study of the stressed-deformed condition of a railway tank wagon with shock loading taking into account the decrease of fastenings

- Transport Means – Proceedings of the International Conference, 2019-October, p. 1112–1116.
18. Zhang, Z.-J., Zheng, P.-F., Chen, H., Cai, L.-X. (2021) The method for hardness prediction of metal materials based on energy equivalence principle [Article@基于能量等效原理的金属材料硬度预测方法] Gongcheng Lixue/Engineering Mechanics, 38 (3), p. 17–26.
 19. Elektrovilcienu tekošā remontu un tehniskas apkalpošanas noteikumi L31/97 Valsts akciju sabiedrība “Latvijas dzelzceļš” Rīga 1997. g. 152. lpp.
 20. AS “Pasažieru vilciens” vilces ritosā sastāva tehnisko apkopju un remontu sistēma Rikožims Nr. 38-2021, 2021. g. 5 lpp.
 21. Бирюков И. В., Беляев А. И., Рыбников Е. К. Тяговые передачи электроподвижного состава железных дорог. – М.: Транспорт, 1986. – 256 стр.
 22. Задель Х. Э., Коген-Далин В. В., Крымов В. В., Электротехника Москва: Высшая школа 1985. 480 стр.
 23. Никифоров В. М. Технология металлов и других конструкционных материалов: Москва: 2015. 384 стр.
 24. Сучков О. К., Пятигорский М. Г., Технология металлов и конструкционные материалы Москва: 1974. 446 стр.
 25. Спиридонова М. П. Эластомерные материалы, содержащие молекулярные комплексы и комплексные соединения с ϵ -капролактамом Волгоград: 2019. 352 стр.
 26. Тагер А. А. Физикохимия полимеров Москва: Химия, 1978. 544 стр.
 27. Тимофеев С. И. Детали машин – Ростов, Феникс, 2005 – 409 стр.; ISBN 5 222 05 122 6
 28. Эмануэль Н. М., Бучаченко А. Л. Химическая физика старения полимеров. – Москва: Наука, 1984. 342 стр.



Dmitrijs Gorbačovs dzimis 1974. Rīgā. Rīgas Tehniskajā universitātē ieguvis bakalaura grādu mašīnzinībās (2008) un maģistra grādu dzelzceļa transportā (2012). No 1994. līdz 2001. strādājis Rīgas lokomotīvu depo, no 2001. līdz 2007. gadam – SIA "LDZ ritošā sastāva serviss", ieņemot atslēdznieka amatu. Kopš 2007. gada ir AS "Pasažieru vilciens" vecākais inženieris tehnologs. Saņēmis dažādus Latvijas dzelzceļa transporta uzņēmuma apbalvojumus: "Par ilggadēju darbu dzelzceļa nozarē" (2009); "Labākais LDZ inženieris" (2012); Pateicības raksts "Par profesionālo prasmju paaugstināšanu un jauno darbinieku sagatavošanu" (2012).

Zinātniskās intereses saistītas ar pētījumiem dzelzceļa transporta nozarē.