

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Pāvels GAVRILOVS

**VAGONU NOBRAUKŠANAS NO SLIEDĒM IZPĒTE,
TIEM PĀRVIETOJOTIES LĪKUMOTOS CEĻA
POSMOS UN NOLAIŽOT NO ŠĶIROŠANAS UZKALNA**

Promocijas darba kopsavilkums

Rīga 2010

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Transporta un mašīnzinību fakultāte

Dzelzceļa transporta institūts

Pāvels Gavrilovs

Doktora studiju programmas „Dzelzceļa transports” doktorants

VAGONU NOBRAUKŠANAS NO SLIEDĒM IZPĒTE, TIEM PĀRVIETOJOTIES LĪKUMOTOS CEĻA POSMOS UN NOLAIŽOT NO ŠĶIROŠANAS UZKALNA

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Dr.sc.ing., asoc. profesors
D. SERGEJEVS

Rīga 2010

UDK 656.22.082(043.2)

Ga 932 v

Gavrilovs P. Vagonu nobraukšanas no sliedēm izpēte, tiem pārvietojoties līkumos ceļa posmos un nolaižot no šķirošanas uzkalna. Promocijas darba kopsavilkums – R.:RTU, 2010. – 31 lpp.

Iespiests saskaņā ar "RTU P-20" promocijas padomes
2010. gada 3. jūnijā lēmumu, protokols Nr. 01/2010



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā Fonda atbalstu projektā „Atbalsts RTU doktorantūras attīstībai”.

ISBN 978-9984-49-163-9

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2010. gada 15. novembrī plkst. 14.30 Rīgas Tehniskās universitātes Transportmašīnu tehnoloģiju institūtā, Rīga, Lomonosova ielā 1, V. korpusā, 218. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors, *Dr.hab.sc.ing.*, Sergejs Doroško
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Docents, *Dr.sc.ing.*, Guntis Strautmanis
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

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

APSTIPRINĀJUMS

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

Pāvels Gavrilovs.....(paraksts)

Datums: 2010. gada 11. jūnijs

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 4 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 7 pielikumus, 66 attēlus, 5 tabulas, kopā 121 lappuses. Literatūras sarakstā ir 139 nosaukumi.

ANOTĀCIJA

Promocijas darbu "Vagonu nobraukšanas no sliedēm izpēte, tiem pārvietojoties līkumos ceļa posmos un nolaižot no šķirošanas uzkalna" izstrādājis Pāvels Gavrilovs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Zinātniskais darba vadītājs Dr.sc.ing., asoc. profesors Dijs Sergejevs.

Darbā ir apkopota un izanalizēta kravas vagonu nobraukšanas no sliedēm statistika Latvijas dzelzceļā laika posmā no 1997. līdz 2009. gadam.

Veikts fizikālais eksperiments spēka faktoru noteikšanai, kas rada kravas vagonu nobraukšanu no sliedēm, tiem pārvietojoties līklīnijas ceļa posmos.

Eksperimentāli noteikta sausās berzes parametru vērtības virsbūves atbalsta mezglos, kas ļauj noteikt ratiņu griešanās pretestības momentu attiecībā pret vagona virsbūvi dažādu veidu kravas vagoniem, tiem pārvietojoties līkumos ceļa posmos.

Izpētīta vagonu atkabes dinamika šķirošanas uzkalna bremzēšanas pozīcijā ar mērķi noskaidrot iespējamās vagonu nobraukšanas no sliedēm iemeslus, nolaižot tos no uzkalna.

Izstrādātas rekomendācijas ratiņu griešanās pretestības momenta samazināšanai attiecībā pret vagona virsbūvi kustības laikā līkumotā ceļā un nolaišanas laikā no šķirošanas uzkalna.

SATURS

| | |
|--|----|
| 1. TĒMAS AKTUALITĀTE..... | 7 |
| 2. DARBA MĒRĶIS UN UZDEVUMI..... | 7 |
| 3. PĒTĪJUMU METODES UN METODIKA..... | 8 |
| 4. ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE UN GALVENIE PĒTĪJUMU REZULTĀTI | 8 |
| 5. DARBA PRAKTISKAIS PIELIETOJUMS | 8 |
| 6. DARBA APROBĀCIJA..... | 8 |
| 7. DARBA STRUKTŪRA | 10 |
| 7.1. Tēmas izpētes stāvoklis. Pētījuma uzdevuma uzstādīšana | 10 |
| 7.2. Kravas vagonu ratiņu griešanās pretestības ietekmējošo faktoru noteikšana attiecībā pret vagona virsbūvi | 13 |
| 7.3. Vagonu atkabju bremzēšanas modelēšana šķirošanas uzkalnā | 19 |
| 7.4. Vagonu svārstību amplitūdu izpēte uzkalna bremzēšanas pozīcijā..... | 22 |
| SLĒDZIENS | 29 |

1. TĒMAS AKTUALITĀTE

Dzelzceļa transports, veicot pasažieru un kravu pārvadājumu ievērojamus apjomus, kā arī pārvadājot bīstamas un īpaši bīstamas kravas, rada paaugstinātu avāriju situāciju risku.

Vagonu ar ķīmikālijām, naftas produktiem, indēm, nokļūšana avārijas situācijās, piesārņo apkārtējo vidi un prasa nozīmīgus materiālos tēriņus avārijas ekoloģisko seku likvidēšanā.

Ilggadējā dzelzceļa ekspluatācijas pieredze visā pasaulē pierāda, ka neskatoties uz pastāvīgi ieviešamiem pasākumiem drošu kravu pārvadājumu izveidē, avārijas, ko izsauc ritošā sastāva riteņpāru nobraukšana no sliedēm, notiek diezgan regulāri.

Latvijas dzelzceļā vislielākais vagonu nobraukšanas no sliedēm skaits sastādīja, 40 % – nolaižot tos no šķirošanas uzkalna, 27 % pārvietojoties līklīnijas ceļa posmos. Vagonu nobraukšana no sliedēm šķirošanas stacijās, nolaižot tos no uzkalna, rada kravu vilcienu formēšanas un nosūtīšanas aizkavējumus, kā arī neplānotus izdevumus, kas saistīti ar kravu bojājumiem, ritošā sastāva un ceļa remontu. Vagonu nobraukšana no sliedēm līklīnijas ceļa posmos arī noved pie vilcienu kustības grafika aizkavējuma. Dažreiz nobraukšana ir saistīta ar apkārtējās vides piesārņojumu un nozīmīgiem materiālajiem tēriņiem avārijas ekoloģisko seku likvidēšanā.

Finansiālie ieguvumi šāda tipa avāriju skaita samazināšanā ir acīmredzami. Tādēļ šķiet pilnīgi saprātīgi, spriežot par darbā pētāmo vagonu nobraukšanas no sliedēm problēmu, lietot terminu „nobraukšana”, saprotot to kā „vagona riteņpāra nobraukšanu, ko izsauc riteņpāra uzmalas pārvelšanās pār sliedes galviņu”.

Kravas vagonu nobraukšana no sliedēm, pārvietojoties līklīnijas ceļa posmos un vagonu atkabes nolaišanas laikā no šķirošanas uzkalna, ir aktuāla problēma Latvijas dzelzceļam.

2. DARBA MĒRĶIS UN UZDEVUMI

Mērķis: Vagonu nobraukšanas no sliedēm iemeslu izpēte likumos sliežu ceļos un šķirošanas uzkalnos, rekomendāciju izstrāde šīs parādības varbūtības samazināšanai.

Uzdevumi:

- apkopot un izanalizēt kravu vagonu nobraukšanas no sliedēm statistiku Latvijas dzelzceļā pēdējos desmit gados un veikt tās sistematizāciju;
- izpētīt kravu vagonu ratiņu atbalsta mezglu tehnisko stāvokli pirms depo un kapitālā remonta;
- noteikt parametrus, kas raksturo berzi starp virsatsperu siju un vagona rāmi atbalsta mezglos;
- noteikt kravu vagonu ratiņu pretestības spēka momentu, ratiņiem griežoties līkumotā ceļa posmā, atkarībā no virsbūves atbalsta iekārtu konstrukcijas un smērvielas esamības;
- izpētīt vagonu atkabju kustības dinamiku šķirošanas uzkalna lēninātāja bremsēšanas pozīcijā;
- izstrādāt rekomendācijas:
 - vagonu ratiņu griezes pretestības spēka momenta stabilizācijai, lai samazinātu vagonu nobraukšanas no sliedēm iespējas līklīnijas ceļa posmos;
 - vagonu atkabju bremsēšanas režīma izvēlei šķirošanas uzkalna lēninātāja bremsēšanas pozīcijā, lai samazinātu vagonu nobraukšanas no sliedēm iespējas šķirošanas uzkalnos.

3. PĒTĪJUMU METODES UN METODIKA

Pētījumā ir izmantota eksperimentālā metode kravas vagonu ratiņu pretestības spēka momenta noteikšanai, ratiņiem griežoties attiecībā pret vagona virsbūvi, atkarībā no virsbūves balsta iekārtu konstrukcijas un smērvielas esamības.

Mehānikas analītiskā svārstību teorijas metode izmantota aprakstot kravas vagonu vertikālās svārstības ar diferenciālvienādojumu sistēmu tiem pārvietojoties šķirošanas uzkalna bremsēšanas pozīcijās, kura ļauj novērtēt to kustības parametrus ņemot vērā vagonu masas centra atrašanās vietu, kopējās atkabes bremsēšanas garumu, bremsējošo vagonu izvietojumu kopējā atkabē. Diferenciālvienādojumu sistēmas risināšanai pielietotas MATH CAD paketes standarta līdzekļi.

4. ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE UN GALVENIE PĒTĪJUMU REZULTĀTI

1. Konstruēta ierīce, kas ļauj modelēt kravas vagonu virsatsperu sijas atbalsta mezglu darbības apstākļus, vagoniem pārvietojoties līklīnijas ceļa posmos.

2. Eksperimentālā ceļa noteikti berzes spēka faktoru parametri kravas ratiņu balstpēdas mezglā, atkarībā no vagona virsbūves atbalsta uz ratiņiem konstruktīviem risinājumiem un eļļošanas apstākļiem.

3. Noteikti ratiņu griešanās pretestības spēka momenti attiecībā pret virsbūvi dažāda tipa kravas vagoniem.

4. Konstatēts, ka eļļas trūkums vagona virsbūves atbalsta mezglos būtiski (apmēram 1,7...2,4 reizes) palielina ratiņu griešanas pretestības spēka momentu attiecībā pret vagona virsbūvi.

5. Eksperimentāli ir pierādīts, ka veltņa balstu uzstādīšana uz ratiņu virsatsperes slīdņa būtiski, 4...6 reizes, samazina ratiņu griešanās pretestības spēka momentu attiecībā pret virsbūvi.

6. Iegūts vagona svārstību matemātiskais modelis vagonu grupas atkabju mērķbremsēšanas analīzei, nolaižot vagonus no šķirošanas uzkalna.

7. Formulēts nosacījums, kas nosaka vagonu paaugstinātas nobraukšanas no sliedēm bīstamības stāvokli nolaižot vagonu atkabes no šķirošanas uzkalna.

5. DARBA PRAKTISKAIS PIELIETOJUMS

Pamatojoties uz veiktajiem pētījumiem ir izstrādātas rekomendācijas kravas vagonu remonta uzņēmumiem ratiņu griešanās pretestības spēka momenta samazināšanai attiecībā pret vagona virsbūvi, kas samazina kravas vagonu nobraukšanas no sliedēm varbūtību, tiem pārvietojoties līkumos ceļa posmos. Dotas rekomendācijas, bremsēšanas režīma izvēlei vagonu šķirošanas uzkalna operatoriem, kad tiek veikta vagonu atkabju nolaišana no šķirošanas uzkalna, kas ļauj nodrošināt vilcienu bezavāriju formēšanu.

6. DARBA APROBĀCIJA

Par darba rezultātiem ir ziņots, un tie ir apspriesti:

Latvijā:

1. RTU 47. starptautiskajā zinātniskajā konferencē, Rīga, RTU, 2006;

2. 5-ая международная конференция MET-2007, "Металлы, сварка и порошковая металлургия", Юрмала, Латвия, 2007;
3. RTU 48. starptautiskajā zinātniskajā konference, Rīga; RTU, 2007;
4. RTU 49. starptautiskajā zinātniskajā konference, Rīga; RTU, 2008.

Ārvalstīs:

1. Конференция молодых ученых Литвы, Наука – будущее Литвы, Вильнюс, ВГТУ, 2007;
2. IV международная научно-практическая конференция, Белоруссия, г. Гомель (БелГУТ), 2007;
3. V Konferencija Naukovo Techiczna, Poland, Szczyrk, 2008;
4. V Международная научно-практическая конференция, TRANS-МЕЧ-АТ, МИИТ, Россия, Москва, 2008;
5. VIII Scientific Conference TLTS'08, Poland, Katowice-Cieszyn, 2008;
6. II международная научно-практическая конференция, «Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса», Белоруссия, г. Гомель (БелГУТ), 2008;
7. 13TH International conference on computer systems aided science, industry and transport, conference „TRANSCOMP 2009”, Zakopane, Poland, 2009.

Publikācijas

Pamattēzes, secinājumi un rekomendācijas ir atspoguļotas šādās zinātniskajās publikācijās:

1. Гаврилов П. „Вкатывание гребня колеса колесной пары на головку наружной рельсовой нити”, Конференция молодых ученых Литвы, Наука – будущее Литвы, Вильнюс, ВГТУ, 2007, Сборник статей конференции: 299 – 304 стр.;
2. Гаврилов П. „Восстановление подпятника тележки вагона наплавкой”, 5-ая международная конференция MET-2007, "Металлы, сварка и порошковая металлургия", Юрмала, 2007, Сборник статей конференции: 123 – 128 стр.;
3. Гаврилов П., Сергеев Д. „Анализ сходов вагонов на Латвийской железной дороге” IV международная научно-практической конференция. Белоруссия. г. Гомель (БелГУТ), 2007, Сборник статей конференции: 7 – 8 стр.;
4. D. Sergejev, P. Gavrilov “Analysis of derailment of carriages on the Latvian railway”, RTU zinātniskie raksti. 6. sēr., Mašīnzinātne un transports: Dzelzceļa transports. - 25. sēj. (2007), 164 – 170 p.;
5. D. Sergejev, P. Gavrilov “Analysis of causes of wagons derailment”, RTU zinātniskie raksti. 6. sēr., Mašīnzinātne un transports: Dzelzceļa transports. - 25. sēj. (2007), 171 – 176. p.;
6. Gavrilov P., Sergejev D. „Derailments of wagons during sorting on marshalling humps at the hump yards”, V Konferencija Naukovo Techiczna, Poland, Szczyrk, 2008. Reports of conference: 92 – 92. p.;
7. Гаврилов П., Сергеев Д. “О сходах вагонов при маневровой работе”, TRANS-МЕЧ-АТ, МИИТ, Москва, 2008, Труды: 35 – 37 стр.;
8. П. Гаврилов, Д. Сергеев “Определение момента сопротивления повороту тележки грузового вагона в опорном узле”, RTU zinātniskie raksti. 6. sēr., Mašīnzinātne un transports: Dzelzceļa transports. - 30. sēj. (2008). - 37 – 40. lpp.;
9. Д. Сергеев, А. Сергеев, П. Гаврилов “Колебания вагонов, тормозимых замедлителем, при роспуске отцепов с горки на сортировочной станции”,

RTU zinātniskie raksti. 6. sēr., Mašīnzinātne un transports: Dzelzceļa transports. - 30. sēj. (2008). - 41 – 48. lpp.;

10. Gavrilov P., Sergejev D. „Resisting moment in the abutment to turning of freight car bogie”, VIII Scientific Conference TLTS'08, Poland, Katowice-Cieszyn, 2008. Reports of conference: 259 – 264. p.;
11. Гаврилов П., Сергеев Д. „Экспериментальное определение момента сопротивления вращению тележки грузового вагона в подпятниковом узле”, II международная научно-практическая конференция, «Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса», Белоруссия, 2008, Материалы докладов II-ой международной научно-технической конференции: 180 – 182 стр.;
12. D. Sergejev, A. Sergejev, P. Gavrilov „Determination of amplitudes at oscillation of carriages on brake position of moderator-coolant”, 13TH International conference on computer systems aided science, industry and transport, conference „TRANSCOMP 2009”, Zakopane, Poland, 2009. Reports of conference: 226 – 231. p.

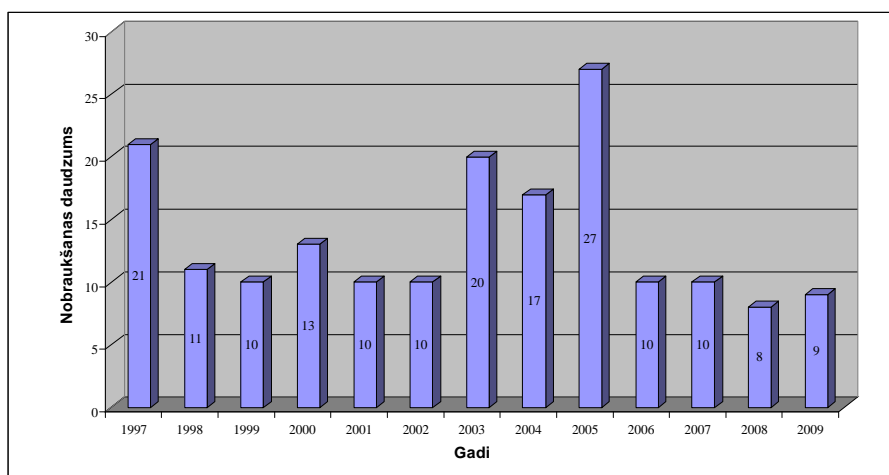
7. DARBA STRUKTŪRA

Darbs sastāv no ievada, 4 nodaļām, slēdziena, literatūras saraksta un pielikumiem.

Ievadā izklāstīta promocijas darba tēmas aktualitāte, formulēts darba mērķis un praktiskā promocijas darba nozīme.

7.1. Tēmas izpētes stāvoklis. Pētījuma uzdevuma uzstādīšana

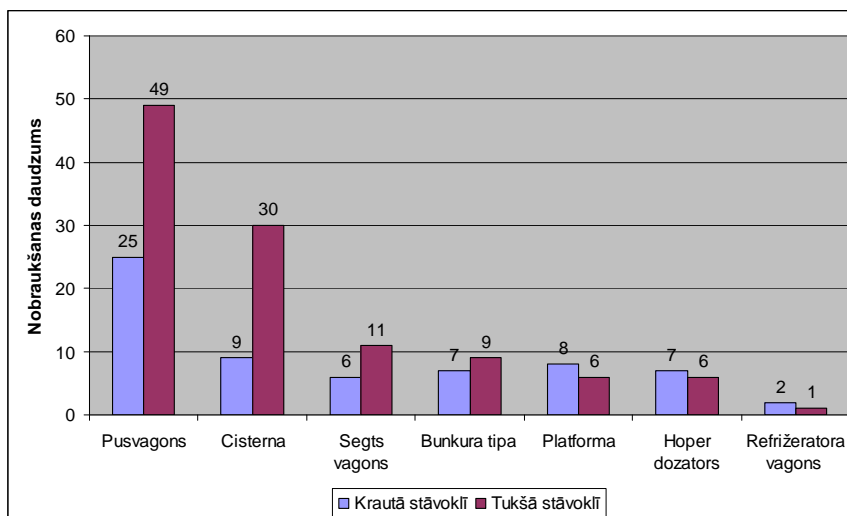
Pirmajā nodaļā ietverti statistikas dati un to analīze par kravu vagonu nobraukšanu no sliedēm Latvijas dzelzceļā laika posmā no 1997. gada līdz 2009. gadam (1.1. attēls).



1.1. att. Kravu vagonu nobraukšanas no sliedēm kopējā statistika no 1997. līdz 2009. gadam Latvijas dzelzceļā

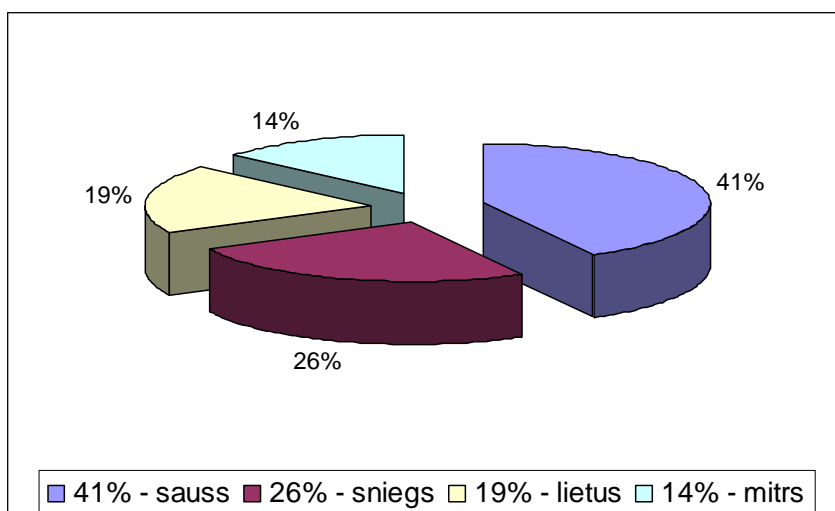
Vagonu nobraukšanas no sliedēm skaits krautiem un tukšiem vagoniem no 1997. gada līdz 2009. gadam ir dots 1.2. attēlā. Statistika norāda uz tukšo vagonu nobraukšanu no sliedēm pārsvaru. No apkopotajiem datiem var secināt, ka pārsvarā vagonu nobraukšanas no sliedēm gadījumi ir vagoniem ar augstu izvietotiem masas centriem. Cisternām masas centrs

atrodas 2,820 m augstumā no sliežu galviņu augšas līmeņa, pusvagonam attiecīgi – 1,742 m augstumā, segtiem vagoniem – 2,344 m, hoperdozatoriem – 2,326 m. Lielākā daļa avāriju, saistītu ar nobraukšanu no sliedēm, attiecināma uz pusvagoniem un cisternām.



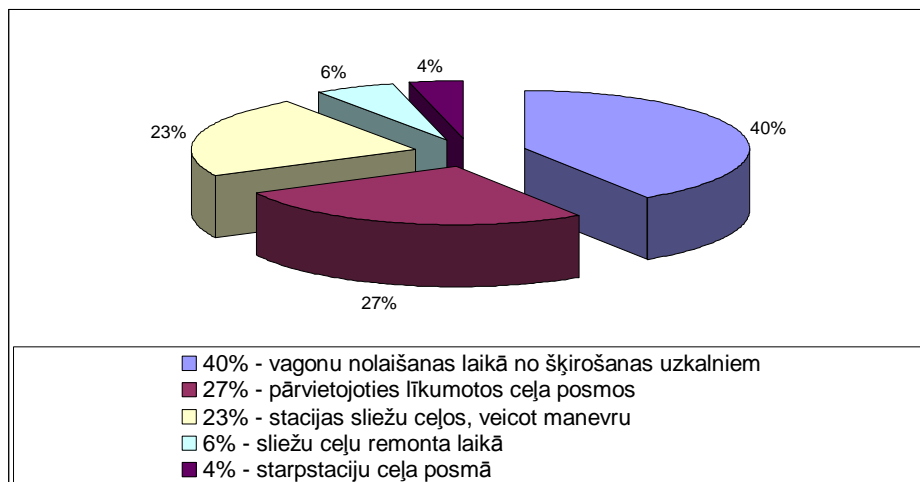
1.2. att. Vagonu nobraukšanas no sliedēm attiecība atkarībā no svara

No statistiskiem datiem izriet, ka lielākā daļa nobraukšanu no sliedēm (41%) ir notikusi jūnijā – augusta mēnešos, sausā laikā. Vagonu nobraukšanu no sliedēm sausā laikā var izskaidrot ar augstāku berzes koeficientu starp sliedes galviņu un riteņpāra riteni. Sausa laiks veicina berzes koeficienta pieaugumu, gan uz sliežu galviņas sānu virsmas, gan arī uz velšanās virsmas. Uz berzes pieauguma rēķina sistēmas „ritenis-sliede” kontaktā, tiek radīti apstākļi riteņa uzmalas uzbraukšanai uz sliedes galviņas virsmas. Daudz mazāks nobraukšanas no sliedēm skaits ir noticis slapjā laikā – 14% no visiem vagonu nobraukšanas no sliedēm gadījumiem (1.3. attēls).



1.3. att. Vagonu nobraukšanas no sliedēm un laika apstākļu likumsakarība

Pamatojoties uz statistiku, kas apkopota 1.4. attēlā, vislielākais vagonu nobraukšanas no sliedēm skaits ir noticis atkabju nolaišanas laikā no šķirošanas uzkalna un vagoniem pārvietojoties līkumosot ceļa posmos.



1.4. att. Kravas vagonu nobraukšanas no sliedēm sadalījums laika posmā no 1997. līdz 2009. gadam

Termins „vagona nobraukšana” tiek lietots samērā neformāli un sakarā ar to var tikt saprasts pārāk vispārīgi. Tā, V.S.Lisjuks [41] izdala riteņpāra nobraukšanu no sliedēm sakarā ar riteņa uzmalas uzbraukšanu uz sliedes galviņas, nobraukšanu no sliedēm sakarā ar izspīlēšanu no sliežu ceļa, nobraukšanu ekipāžas izspiešanas dēļ, nobraukšanu sliežu ceļa temperatūras pieauguma dēļ, nobraukšanu sliedes lūzuma dēļ. Apspriežot nobraukšanas no sliedēm problēmu, tiek dota priekšroka lietot precīzāku terminu „vagona riteņpāra nobraukšana”. Dotajā darbā uzmanība tiek pievērsta vagona nobraukšanai no sliedēm, ko izsauc riteņa uzmalas uzbraukšana uz sliedes galviņas un pārvelšanās pār sliedes galviņu.

Tika izvirzīts apgalvojums, ka viens no iespējamajiem iemesliem riteņpāra nobraukšanai no sliedēm, pārvietojoties līkumos ceļa posmos, varētu būt vagonu virsbūves un ratiņu atbalsta mezglu neapmierinošais tehniskais stāvoklis (1.5. att.). 17 cisternu ratiņu balstpēdu mezglu, 16 pusvagonu, 18 segto vagonu, 14 platformu un 14 graudu vagonu apskate, tos ievietojot depo vai kapitālajā remontā Daugavpils vagonu remonta centrā parādīja, ka 80 – 90% vagoniem nebija ieeļļoti atbalsta mezgli, vietām bija skrambas un nevienmērīgs berzes virsmu „pēda – balstpēda” nodilums neatkarīgi no vagona tipa. Pēc vagonu ekspluatācijas noteikumiem vagona virsbūves un ratiņu atbalsta mezgliem jābūt ieeļļotiem.



1.5. att. Vagona nobraukšana no sliedēm ratiņu iekļīšanās dēļ

7.2. Kravas vagonu ratiņu griešanās pretestības ietekmējošo faktoru noteikšana attiecībā pret vagona virsbūvi

Otrajā nodaļā, lai noskaidrotu kravas vagonu atbalsta mezglu neapmierinošā stāvokļa pamatošību, ir veikti eksperimentāli pētījumi ratiņu griešanās pretestības momenta noteikšanai kravas vagona modelim 18-100 balstpēdas mezglā.

Vagoniem pārvietojoties līkumos ceļa posmos, ratiņu pēdas gultnis tiek pagriezts attiecībā pret pēdu. Uz pēdas gultni iedarbojas vertikālā slodze no 15 līdz 47 ts. Sausā berze starp pēdu un balstpēdu rada berzes spēka momentu, kas traucē ratiņu pagriešanu. Turklāt, pretestības spēki balstpēdā traucē vagona ratiņu pagriešanos, kad tas iziet no līklīnijas uz taisnu ceļa posmu.

Nepieciešamā informācija, ratiņu griešanās pretestības momenta noteikšanai attiecībā pret vagona virsbūvi tika iegūta, lietojot speciāli izveidotu eksperimentālu iekārtu, kas parādīta 2.1. attēlā. Eksperimentālā iekārta ļāva modelēt kravas vagona virsatsperu sijas atbalsta mezgla darba apstākļus, vagoniem pārvietojoties līkumos ceļa posmos.

Veiktajā eksperimentā slodze uz balstpēdu tika nodota ar pēdas palīdzību, kura bija piestiprināta vagona virsbūves rāmja maketā. Virsbūves rāmja makets ir sametināts no divām U-profila sijām, kuru masa ir vienāda ar $m_0 = 200\text{kg}$. Uz rāmja maketa tika novietotas simetriskas kravas ar masu m_1 (2.1. att.). Tika izskatīti divi balstpēdas mezgla noslogojuma gadījumi. Pirmajā gadījumā par kravu tika izmantots pasažieru vagona riteņpāris, kura masa ir 1400 kg . Otrajā gadījumā tika lietota krava ar masu 450 kg .

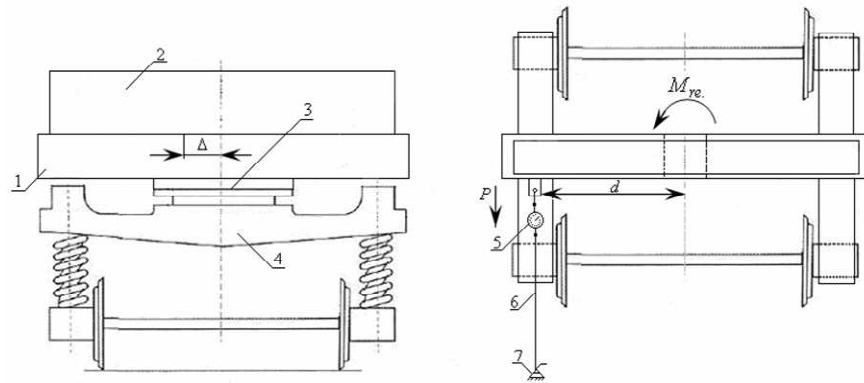


2.1. att. Eksperimentālā iekārta ratiņu griešanās pretestības momenta noteikšanai atbalsta mezglā:

- 1 – rāmis, 2 – krava, 3 – centrālais atbalsta mezgls, 4 – 18-100 modeļa ratiņi,
5 – dinamometrs un trose, kas savienota ar domkratu.

Ar spēka P palīdzību, kas tika mērīts ar dinamometru un pielikts rāmja maketam attālumā $d = 0,75\text{m}$ no centrālā atbalsta mezgla, eksperimentā tika noteikts griešanās pretestības moments, ko izraisa berze atbalsta mezglā. Spēka P vērtība tika reģistrēta vagona virsbūves rāmja maketa kopā ar kravu iekustēšanās brīdī attiecībā pret virsatsperu siju.

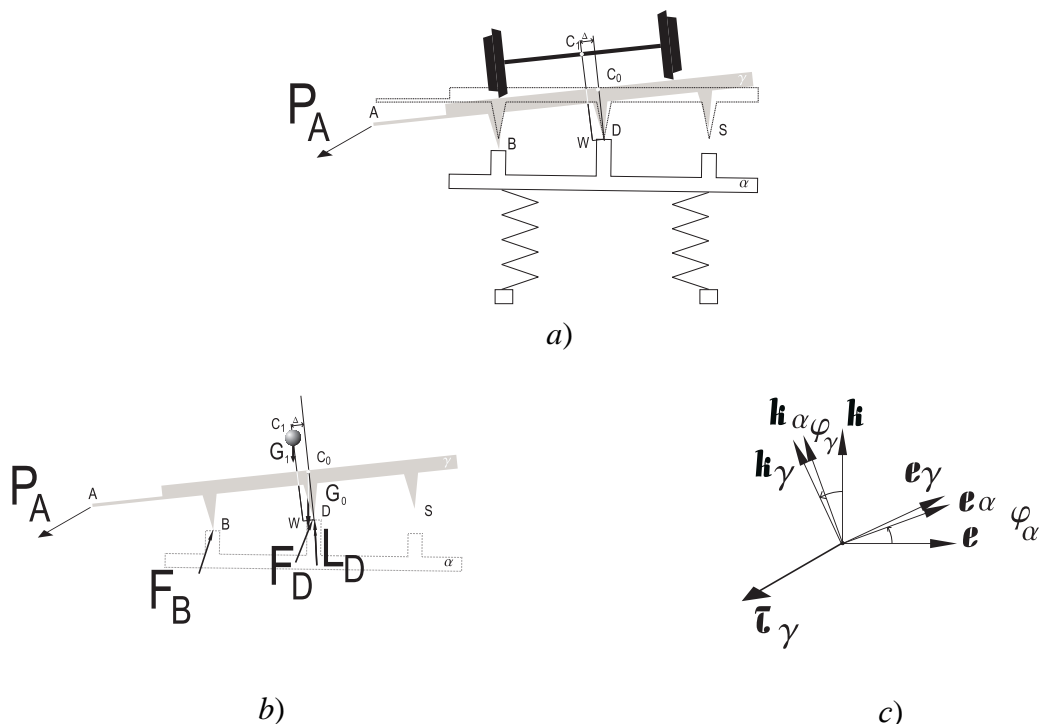
Iekārtas shēma, uz kuras tika veikti eksperimentālie mērījumi, parādīta 2.2. attēlā.



2.2. att. Eksperimentālās iekārtas shēma:

1 – virsbūves rāmja makets; 2 – krava; 3 – ratiņu atbalsta mezgls; 4 – 18-100 kravas vagona ratiņi; 5 – dinamometrs; 6 – trose; 7 – domkrats.

Lai veiktu parametra Δ izmaiņas, tika variēts masas centra attālums no kravas līdz ceļa asij. Tādā veidā tika modelēts paredzamais kravas izvietojums vagonā, pārvietojoties līkumos ceļa posmos. Uz eksperimentālo iekārtu (2.1. att.) balstītā aprēķina shēma ir parādīta 2.3. attēlā. Lai shēmā apzīmētu piepūles, 2.3. attēlā ir izmantots $P = P_A$. Apakšējais indekss norāda pielikšanas punktu. Daļēji zondējošs spēks P ir pielikts punktā A un apzīmēts ar P_A .



2.3. att. Aprēķina shēma eksperimentālās iekārtas līdzsvara nosacījumu noteikšanai, kura noslogota ar zondējošo spēku P_A ;

α – virsatsperu sija, γ – kravas vagona rāmja makets

$\tau_\gamma, e_\gamma, k_\gamma$ – bāze, kas cieši saistīta ar vagona rāmja maketu, $\tau_\alpha, e_\alpha, k_\alpha$ – bāze, kas cieši saistīta ar virsatsperu siju, φ_α – virsatsperu sijas pagriešanās leņķis ap ortu τ , φ_γ – vagona rāmja pagriešanās leņķis ap ortu τ

Eksperimentālās iekārtas sistēmas līdzsvara vienādojumi ir šādi:

$$\begin{aligned}
0 &= P_A - F_B^{fr} + N_D^e \\
0 &= -G_0 \sin \varphi_\alpha - G_1 \sin \varphi_\alpha + N_B^e + N_D^e \\
0 &= -G_0 \cos \varphi_\alpha - G_1 \cos \varphi_\alpha + N_B^k + N_D^k \\
0 &= l_{DC_0} G_0 \sin \varphi_\gamma + l_{DW} G_1 \cos \varphi_\gamma + l_{WC_1} G_1 \sin \varphi_\gamma - l_{DB} N_B^k \\
0 &= l_{DA} P_A - l_{DB} F_B^{fr} - L_D^{fr},
\end{aligned} \tag{1}$$

kur P_A – zondējošais spēks, kas pielikts virsbūves rāmja maketam punktā A; F_B^{fr} – berzes spēka lielums, kas rodas punktā B; N_B^i, N_D^i – normālās reakcijas slīdņi B un pēdas gultnī D; $G_0 = m_0 g$, $G_1 = m_1 g$, kur g – smaguma spēka paātrinājums; φ_α – virsatsperu sijas novirzes no horizontāles leņķis; $l_{DC_0} = 0,1$ m – attālums no punkta D līdz vagona rāmja smaguma centram; $l_{DW} = 0,23$ m – kravas masas centra nobīde attiecībā pret balsta centru virzienā uz slīdni (Δ); $l_{WC_1} = 0,475$ m – attālums no punkta W līdz kravas smaguma centram, kas uzstādīta uz vagona rāmja; l_{DB} – attālums no punkta D līdz ratiņu slīdnim, $l_{DB} = 0,75$ m; l_{DA} – attālums no punkta D līdz zondējošā spēka pielikšanas punktam, $l_{DA} = 0,75$ m; φ_γ – rāmja maketa novirzes leņķis no horizontāles; L_D^{fr} – pretestības moments, kas rodas pēdas gultnī D (2.3. att.).

Kulona berzes raksturs dod šādas noteiktas attiecības L_D^{fr} un F_B^{fr} :

$$L_D^{fr} = \theta N_D^k, \quad F_B^{fr} = f^{fr} N_B^k \tag{2}$$

kur θ un f^{fr} – Kulona berzes parametri.

Atbalsta reakcijām N_B^k un N_D^k no (1) iegūstam:

$$\begin{aligned}
N_B^k &= \left[\frac{l_{DC_0}}{l_{DB}} G_0 \sin \varphi_\gamma + \left(\frac{l_{DW}}{l_{DB}} \cos \varphi_\gamma + \frac{l_{WC_1}}{l_{DB}} \sin \varphi_\gamma \right) G_1 \right], \\
N_D^k &= \left(\cos \varphi_\alpha - \frac{l_{DC_0}}{l_{DB}} \sin \varphi_\gamma \right) G_0 + \left[\left(\cos \varphi_\alpha - \frac{l_{DW}}{l_{DB}} \cos \varphi_\gamma - \frac{l_{WC_1}}{l_{DB}} \sin \varphi_\gamma \right) G_1 \right].
\end{aligned} \tag{3}$$

No eksperimentālās iekārtas sistēmas līdzsvara vienādojumiem (1) izriet, ka modeļa robežlīdzsvara stāvoklis tiek pārkāpts, kad izpildās nevienādība:

$$l_{DA} P_A > L_D^{fr} + l_{DB} F_B^{fr} \tag{4}$$

Nevienādība (4) ir eksperimentālās iekārtas sistēmas līdzsvara nosacījums. Eksperimentā dotās nevienādības izpilde tika sasniegta uz zondējošā spēka P_A vērtības palielināšanas rēķina.

Nevienādības (4) kreisajā daļā atrodas eksperimentāli mērāmais lielums, labajā daļā – berzes rezultātā radušos spēku kombinācija, kas no vagona virsbūves maketa puses darbojas

uz virsatsperu siju. Dotā attiecība ļauj izdarīt slēdzienu par atbalsta reakciju kombināciju maksimālo vērtību, kas kavē virsatsperu sijas (un ratiņu) griešanos attiecībā pret vagona virsbūvi.

Eksperimenta mērķis bija berzes parametru θ un f^{fr} vērtību noteikšana atkarībā no atbalsta mezglu stāvokļa.

Vagona rāmja maketam, atbalstoties tikai uz virsatsperu sijas balstpēdu, kontakts starp rāmi un slīdņi neeksistē, $F_B^{fr} = 0$. Šajā gadījumā:

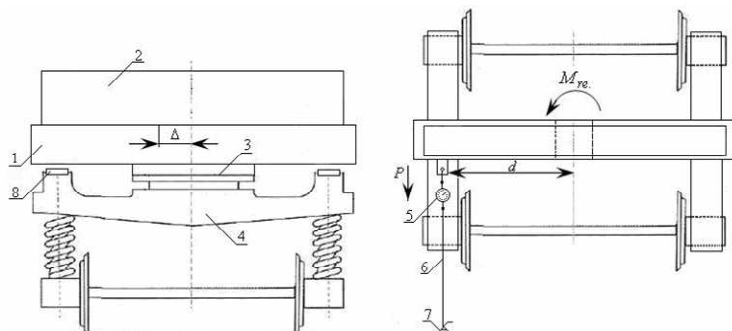
$$N_D = G_0 + G_1. \quad (5)$$

No nevienādības (4), ņemot vērā izteiksmi (2), kurā ir berzes parametrs θ un eksperimentāli izmērāmais spēks P_A , pie zināma smaguma spēka N_D , kurš darbojas uz kravas vagona virsatsperu sijas, var aprēķināt berzes parametru θ .

$$l_{DA} P_A = \theta N_D \quad (6)$$

Eksperimenta programma sastāvēja no šādām pārbaudēm:

- smērvielas uzklāšana atbalsta mezglā un slīdņos;
- atbalsta mezgls un slīdņi bez eļļas;
- slīdņi aprīkoti ar veltņiem (2.4. att.).



2.4. att. Eksperimentālās iekārtas shēma:

- 1 – virsbūves rāmja makets; 2 – krava; 3 – ratiņu atbalsta mezgls; 4 – 18-100 modeļa kravas vagona ratiņi; 5 – dinamometrs; 6 – trose; 7 – domkrats; 8 – slīdņa atbalsta veltņi.

Berzes parametra θ vērtības, iegūtās pie simetriska vagona rāmja noslodzes ar kravām parādītas 2.1. tabulā.

2.1. tabula

Berzes parametra θ vērtības pie dažādiem eksperimenta apstākļiem

| Eksperimenta numurs | Kravas svars 15680 N | | Kravas svars 6370 N | |
|---------------------|---|----------|---------------------|----------|
| | Parametrs θ , uzklājot smērvielu atbalsta mezglā | | | |
| | $l_{DA} P_A, Nm$ | θ | $l_{DA} P_A, Nm$ | θ |
| 1 | 297.92 | 0.019 | 114.66 | 0.018 |
| 2 | 329.28 | 0.021 | 127.40 | 0.020 |
| 3 | 313.60 | 0.020 | 108.29 | 0.017 |

| Eksperimenta numurs | Parametrs θ , sausā berze atbalsta mezglā | | | |
|---------------------|---|----------|-----------------|----------|
| | $l_{DA}P_A, Nm$ | θ | $l_{DA}P_A, Nm$ | θ |
| 1 | 548.80 | 0.035 | 210.21 | 0.033 |
| 2 | 439.04 | 0.028 | 229.32 | 0.036 |
| 3 | 470.40 | 0.030 | 222.95 | 0.035 |
| Eksperimenta numurs | Parametrs θ , uzklājot smilšu putekļus atbalsta mezglā | | | |
| | $l_{DA}P_A, Nm$ | θ | $l_{DA}P_A, Nm$ | θ |
| 1 | 721.28 | 0.046 | 299.39 | 0.047 |
| 2 | 658.56 | 0.042 | 318.50 | 0.050 |
| 3 | 705.60 | 0.045 | 286.65 | 0.045 |

Parametra θ_{med} vidējā vērtība katram atbalsta mezglas stāvoklim ir: uzklājot smērvielu atbalsta mezglā, $\theta_{med} = 0,019$; pie sausas berzes atbalsta mezglā, $\theta_{med} = 0,033$; uzklājot smilts putekļus atbalsta mezglā, $\theta_{med} = 0,046$.

Pie parametra θ_{med} vidējās vērtības un zondējošā spēka P_A izmērītās vērtības berzes parametrs f^{fr} tiek noteikts no izteiksmes:

$$l_{DA}P_A = \theta_{med}N_D^K + f^{fr}l_{DB}N_B^K, \quad (7)$$

kurā normālo reakciju vērtība N_D^K un N_B^K tiek izskaitļota no (3), ņemot vērā l_{DW} un leņķi $\varphi_\gamma = 0,01$.

Iegūtās berzes parametra vērtības f^{fr} dotas 2.2. tabulā.

2.2. tabula

Berzes parametra f^{fr} vērtības, kas iegūtas dažādos eksperimenta veikšanas apstākļos ar kravu masu 1600 kg un 650 kg

| Kravas svars 15680 N | | | Kravas svars 6370 N | | |
|-----------------------------|----------------|----------|---------------------|----------------|----------|
| Ar smērvielas klātbūtni | | | | | |
| $l_{DA}P_A, Nm$ | θ_{med} | f^{fr} | $l_{DA}P_A, Nm$ | θ_{med} | f^{fr} |
| 467.95 | 0.019 | 0.181 | 125.03 | 0.019 | 0,147 |
| Ar sauso berzi | | | | | |
| $l_{DA}P_A, Nm$ | θ_{med} | f^{fr} | $l_{DA}P_A, Nm$ | θ_{med} | f^{fr} |
| 565.95 | 0.033 | 0.210 | 229.50 | 0.033 | 0.255 |
| Ar smilšu putekļu klātbūtni | | | | | |
| $l_{DA}P_A, Nm$ | θ_{med} | f^{fr} | $l_{DA}P_A, Nm$ | θ_{med} | f^{fr} |
| 845.25 | 0.046 | 0.301 | 311.25 | 0.046 | 0.328 |

Pēc eksperimentālo mērījumu datiem, kas doti 2.1. un 2.2. tabulās ir atrastas berzes parametru θ_{med} un f_{med}^{fr} vidējās vērtības, kuras uzrādītas 2.3. tabulā.

2.3. tabula

Berzes parametru θ_{med} un f_{med}^{fr} vidējās vērtības

| Ar smērvielas klātbūtni | | Ar sauso berzi | | Ar smilšu putekļu klātbūtni | |
|-------------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------------|----------------|
| θ_{med} | f_{med}^{fr} | θ_{med} | f_{med}^{fr} | θ_{med} | f_{med}^{fr} |
| 0.019 | 0.164 | 0.033 | 0.232 | 0.046 | 0.314 |

Berzes parametru vērtības, kas dotas 2.3. tabulā, var tikt lietotas, lai novērtētu konkrēta vagona ratiņu griešanās pretestības momenta lielumu, tam pārvietojoties līkumos ceļa posmus. To var izdarīt pēc izteiksmes (7), jo kravas vagona ratiņu griešanās pretestības moments $M_{re} = l_{DA} P_A = \theta_{med} N_D^K + f^{fr} l_{DB} N_B^K$.

M_{re} aprēķina rezultāti tukšiem kravas vagoniem ir doti 2.4. tabulā, krautiem vagoniem attiecīgi 2.5. tabulā. Aprēķini tika veikti vienam ratiņam, pieņemot, ka slodze četrasu kravas vagonam ir vienmērīgi sadalīta starp diviem ratiņiem.

2.4. tabula

Ratiņu griešanās pretestības momenta M_{re} vērtības tukšiem kravas vagoniem

| | Griešanās pretestības moments M_{re} ar smērvielas klātbūtni, | | |
|---------------|---|---|--|
| | rāmim atbalstoties tikai uz virsatsperu sijas balstpēdu, Nm | rāmim ar kravu atbalstoties uz balstpēdu un vienu no slīdņiem, Nm | rāmim ar kravu atbalstoties uz balstpēdu un slīdņi ar veltņiem, Nm |
| Cisterna | 1298.11 | 1481.24 | 1264.92 |
| Pusvagens | 1186.88 | 4462.14 | 593.17 |
| Hoperdozators | 1186.88 | 6019.38 | 310.88 |
| | Griešanās pretestības moments M_{re} bez smērvielas klātbūtnes, | | |
| | rāmim atbalstoties tikai uz virsatsperu sijas balstpēdu, Nm | rāmim ar kravu atbalstoties uz balstpēdu un vienu no slīdņiem, Nm | rāmim ar kravu atbalstoties uz balstpēdu un slīdņi ar veltņiem, Nm |
| Cisterna | 2257.84 | 2505.73 | 2200.10 |
| Pusvagens | 2064.37 | 6498.00 | 1031.71 |
| Hoperdozators | 2064.37 | 8606.01 | 540.72 |
| | Griešanās pretestības moments M_{re} ar smilšu putekļu klātbūtni, | | |
| | un rāmim atbalstoties tikai uz virsatsperu sijas balstpēdu, Nm | rāmim ar kravu atbalstoties uz balstpēdu un vienu no slīdņiem, Nm | rāmim ar kravu atbalstoties uz balstpēdu un slīdņi ar veltņiem, Nm |
| Cisterna | 3143.52 | 3476.92 | 3063.13 |
| Pusvagens | 2874.17 | 8837.10 | 1436.42 |
| Hoperdozators | 2874.17 | 11672.23 | 752.82 |

Ratiņu griešanās pretestības momenta M_{re} vērtības krautiem kravas vagoniem

| | Griešanās pretestības moments M_{re} ar smērvielas klātbūtni, | | |
|---------------|---|---|--|
| | rāmim atbalstoties tikai uz virsatsperu sijas balstpēdas, Nm | rāmim ar kravu atbalstoties uz balstpēdu un vienu no slīdņiem, Nm | rāmim ar kravu atbalstoties uz balstpēdu un slīdņi ar veltņiem, Nm |
| Cisterna | 6868.46 | 27576.71 | 4174.26 |
| Pusvagens | 7592.43 | 29091.99 | 3695.11 |
| Hoperdozators | 7512.93 | 37394.58 | 1751.50 |
| | Griešanās pretestības moments M_{re} bez smērvielas klātbūtnes, | | |
| | rāmim atbalstoties tikai uz virsatsperu sijas balstpēdu, Nm | rāmim ar kravu atbalstoties uz balstpēdu un vienu no slīdņiem, Nm | rāmim ar kravu atbalstoties uz balstpēdu un slīdņi ar veltņiem, Nm |
| Cisterna | 11946.46 | 40324.65 | 7260.38 |
| Pusvagens | 13205.68 | 42309.11 | 6426.99 |
| Hoperdozators | 11924.67 | 53404.94 | 3046.42 |
| | Griešanās pretestības moments M_{re} ar smilšu putekļu klātbūtni, | | |
| | rāmim atbalstoties tikai uz virsatsperu sijas balstpēdu, Nm | rāmim ar kravu atbalstoties uz balstpēdu un vienu no slīdņiem, Nm | rāmim ar kravu atbalstoties uz balstpēdu un slīdņi ar veltņiem, Nm |
| Cisterna | 16632.71 | 54873.34 | 10108.42 |
| Pusvagens | 18385.89 | 57528.05 | 8948.121 |
| Hoperdozators | 16933.29 | 72420.64 | 4241.45 |

Eksperimentu rezultāti rāda, ka virsatsperu siju atbalsta mezglu stāvoklis būtiskā veidā ietekmē ratiņu griešanās pretestības momenta vērtību, kas kavē ratiņu griešanos ap pulku. Berzes parametra θ vērtība neieļļotam atbalsta mezglam ir 1,7...2,4 reizes lielāka par šāda parametra vērtību ieļļotam mezglam. Apmēram līdzīga attiecība ir iegūta f^{fr} parametram. Smilšu putekļu klātbūtne šo situāciju pasliktina vēl vairāk.

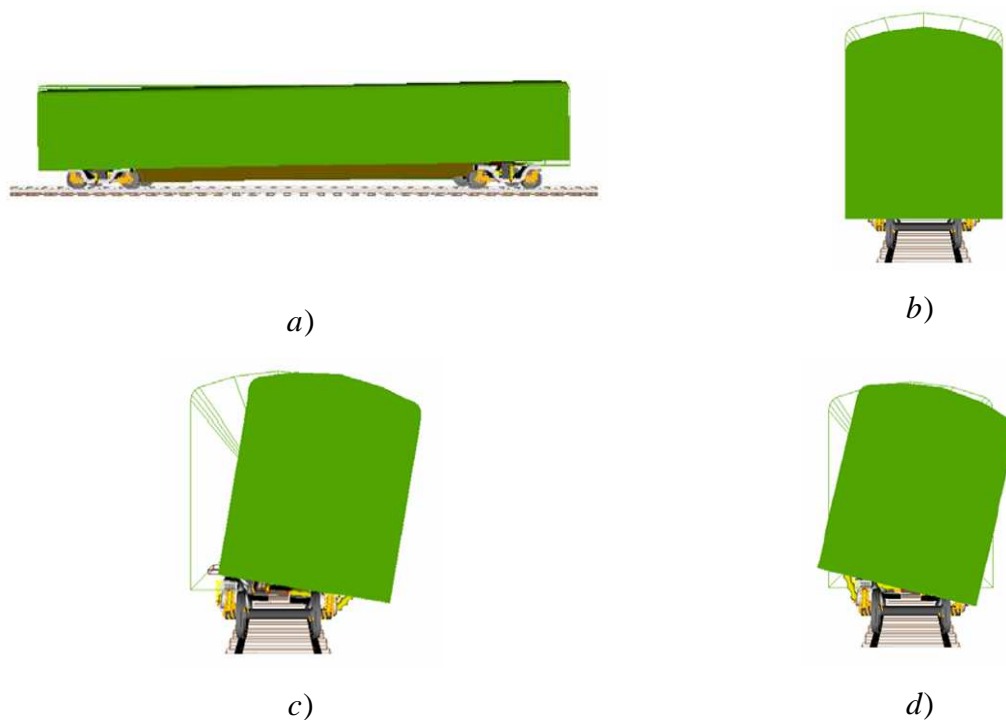
Iegādājoties jaunus kravas vagonus, ir ieteicams dot priekšroku vagoniem ar jaunās paaudzes ratiņiem, kuriem ir virsatsperu siju elastīgi veltņveida slīdņi, tā kā vagona virsbūves atbalstīšanās uz veltņa balstiem laikā, kad vagoni pārvietojās līkumos ceļa posmos, nodrošina ratiņu griešanās pretestības momenta samazinājumu 4...6 reizes salīdzinājumā ar tradicionālo mūsdienu konstrukciju. Šādi pasākumi būtiski samazinās atbalstu mezglu, riteņu pāru uzmalu, sliežu galviņu sānu šķautņu nodilšanu, kā arī samazinās vagonu nobraukšanas iespēju, tiem pārvietojoties līklīnijas ceļa posmos.

7.3. Vagonu atkabju bremzēšanas modelēšana šķirošanas uzkalnā

Latvijas dzelzceļā pēc statistikas datiem 40% vagonu nobraukšana no slīdēm notiek laikā, kad vagoni tiek nolaisti no šķirošanas uzkalna. Vagonu savstarpējā sasaiste, to atsperu

pakares konstrukcija un citi objektīvi apstākļi sekmē vagonu atkabes svārstību rašanās iespējamību, tiem pārvietojoties pa sliedēm.

Atkabes bremzēšanas sekas ir garenisko dinamisko spēku rašanās atkabē, kas izraisa vagona atkabes „lēkšošanu” un tās sānisko šūpošanos (3.1. att.).



3.1. att. Ritošā sastāva tipiskās kustības:
a – vagona lēkšošana; *b* – lēkāšana; *c* – apakšējā sāniskā šūpošanās;
d – augšējā sāniskā šūpošanās.

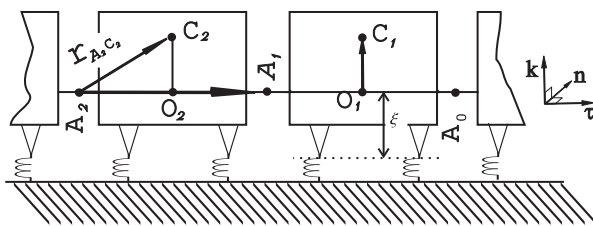
Šāda vagona virsbūves pārvietošanās saistīta ar vagonu atsperu komplektu deformāciju (3.1. att.). Deformācijas rezultātā daži atsperu komplekti no stāvokļa, kad tie ir saspiesti ar vagona pašsvaru, pāriet izstieptā stāvoklī – notiek tā saucamā riteņu atslogošana. Atsperu piekares atslogošanas pakāpe ir viens no faktoriem, kas nosaka sistēmas „ritenisliede” stabilitāti. Izstiepts atsperu stāvoklis pavājina šīs sistēmas stabilitāti. Atsperu pāreju izstieptā stāvoklī var traktēt kā sliedes un riteņa kontakta mijiedarbības vertikālā spēka samazināšanos. Eksploatācijas pieredze dod iemeslu pieņemt, ka atslogošana atvieglo riteņa uzmalas pārvelšanos pār sliedes galviņu. Pētot šos apstākļus pirmajā un otrajā darba nodaļā ir apskatītas labvēlīgu apstākļu rašanās iespējas kontakta zaudēšanai starp riteņi un sliedi, t.i., riteņpāra nobraukšanas no sliedēm iespējamības palielināšanās.

Lai apstiprinātu darba trešajā nodaļā izvirzīto hipotēzi, ir sastādīti vagonu svārstību diferenciālvienādojumi, bremzēšanas procesa laikā, kad atkabe tiek nolaista no stacijas šķirošanas uzkalna.

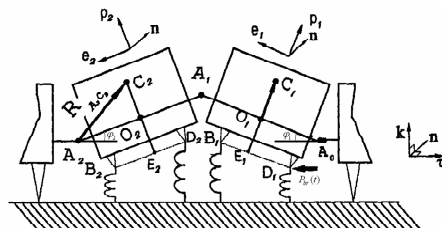
Par modeli tiek pieņemta ķēdes, kas sastāv no četriem virsatsperu elementiem, kustība vektoru τ un k plaknē (3.2. att.). Pirmais un pēdējais ķēdes elements attēlo vagonu atkabes galvas un astes daļas īpatnības. Starp tiem ir novietots, tā saucamais, vagona atkabes avārijas posms, kas sastāv no diviem virsatsperu elementiem.

Pirmajam un pēdējam ķēdes inerces elementam ir liegta vertikālas pārvietošanās iespēja, tāpēc teorētiski apskatāmajai sistēmai ir divas brīvības pakāpes: ķēdes pārvietošanās kā viena vesela gar sliežu ceļu kā vadotni u_0 un pieļaujamajām uz sistēmu uzklātajām saitēm

$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$ avārijas posma elementu saskaņotā griešanās ap asi, kas paralēla ortai \mathbf{n} (3.3. att.).



3.2. att. Atkabes atsaites konfigurācija līdz
bremzēšanas sākumam



3.3. att. Atkabes bremzēšanas
konfigurācija

Elastības spēki, kas rodas atsperu kompleksos, tiek aprakstīti ar šādām izteiksmēm:

$$\begin{aligned}
 F_{B_1}^{el} &= F_{B_1}^{el, st. initial} - c_v (l_{A_0 O_1} + l_{E_1 B_1}) \sin \varphi \\
 F_{D_1}^{el} &= F_{D_1}^{el, st. initial} - c_v (l_{A_0 O_1} - l_{E_1 B_1}) \sin \varphi \\
 F_{B_2}^{el} &= F_{B_2}^{el, st. initial} - c_v (l_{A_2 O_2} - l_{E_2 B_2}) \sin \varphi \\
 F_{D_2}^{el} &= F_{D_2}^{el, st. initial} - c_v (l_{A_2 O_2} + l_{E_2 B_2}) \sin \varphi
 \end{aligned} \tag{8}$$

kur $l_{A_0 O_1}$ – attālums no automātiskās sakabes līdz avārijas posma pirmā vagona vidum; $l_{E_1 B_1}$ – avārijas posma pirmā vagona bāzes puse; $l_{A_2 O_2}$ – attālums no automātiskās sakabes līdz avārijas posma otrajam vagonam; $l_{E_2 B_2}$ – avārijas posma otrā vagona bāzes puse; $F_{D_1}^{el, st. init.}$, $F_{B_1}^{el, st. init.}$ – avārijas posma pirmā vagona pirmo un otro ratiņu statiskās piespiešanas elastības spēks; $F_{D_2}^{el, st. init.}$, $F_{B_2}^{el, st. init.}$ – avārijas posma otrā vagona pirmo un otro ratiņu statiskās piespiešanas elastības spēks, φ – avārijas posma katra vagona pagriešanās leņķis; c_v – atsperu vertikālais stingums (3.3. att.).

Virsatperu ķēdes kustība ar divām brīvības pakāpēm, aprakstīta ar Lagranža otrā tipa diferenciālvienādojumiem, dod šādu diferenciālvienādojumu sistēmas risinājumu:

$$\begin{aligned}
 \dot{u}_0 &= u_1, \quad \dot{\varphi} = \psi_1, \\
 \dot{\psi}_1 &= -(a_{11} a_{22} - a_{12} a_{21})^{-1} (-a_{21} P_{\Sigma}^{br} - a_{11} g \varphi) \\
 \dot{u}_1 &= (a_{11} a_{22} - a_{12} a_{21})^{-1} (-a_{22} P_{\Sigma}^{br} - a_{12} g \varphi)
 \end{aligned} \tag{9}$$

Izmantoti apzīmējumi:

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= (m_f + m_1 + m_2 + m_r) \\
 a_{12} &= [m_1 z_{O_1 C_1} - m_2 z_{O_2 C_2}] \\
 a_{21} &= m_1 (l_{A_0 O_1} \varphi + z_{O_1 C_1}) + m_2 ((l_{A_0 A_1} + l_{A_1 O_2}) \varphi - z_{O_2 C_2}) + m_r (l_{A_0 A_1} + l_{A_1 A_2}) \varphi \\
 a_{22} &= m_1 (l_{A_0 O_1}^2 + z_{O_1 C_1}^2) + J_{1n}^{C_1} + J_{2n}^{C_2} + m_2 l_{A_0 A_1}^2 - 2m_2 l_{A_0 A_1} l_{A_1 O_2} + m_r (l_{A_0 A_1}^2 + l_{A_1 A_2}^2) \\
 P_{\Sigma}^{br} &= -P_{D_1}^{br} - P_{B_1}^{br} - P_{D_2}^{br} - P_{B_2}^{br}
 \end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
g = & G_1 z_{O_1 C_1} + G_2 z_{O_2 C_2} + G_1 l_{O_1 E_1} - G_2 l_{O_2 E_2} - \\
& - c_v (l_{A_0 O_1} - l_{E_1 B_1})^2 - c_v (l_{A_0 O_1} + l_{E_1 B_1})^2 - \\
& - c_v (l_{A_2 O_2} + l_{E_2 B_2}) [l_{A_0 A_1} - l_{A_1 O_2} + l_{E_2 D_2}] - \\
& - c_v (l_{A_2 O_2} - l_{E_2 B_2}) [l_{A_0 A_1} - l_{A_1 O_2} - l_{E_2 B_2}].
\end{aligned} \tag{11}$$

Sākumnosacījumi, kas atbilst nedeformētas atkabes bremsēšanas režīmam, kad tā tuvojas bremsēšanas pozīcijai ar ātrumu v_0 , ir šādi:

$$u_0(0) = 0, \varphi(0) = 0, \psi_1(0) = 0, u_1(0) = v_0. \tag{12}$$

Iepriekš iegūtās sistēmas (9) risinājumi aprēķināti ar paketes MathCad līdzekļiem. Šo vienādojumu risinājums apraksta atkabes garenvirziena kustību posmā, kas atrodas aiz bremsēšanas pozīcijas. Turklāt tā risināšanas procesā rodas ne tikai informācija par atsevišķu atkabes vagonu šķērsvirziena svārstību amplitūdu, kas ļauj novērtēt bremsēšanas režīmu no saprātīgas drošības nodrošināšanas viedokļa, novēršot riteņpāru nobraukšanu no sliedēm, kā arī tiek noteikts atkabes kā viena vesela garenvirziena pārvietojums vadīklā. Tādā veidā dotos vienādojumus var lietot mērķbremzēšanas uzdevumu risināšanā. Tie ļauj paredzēt garenvirziena ātrumu intensīvas bremsēšanas rezultātā ceļa posmā, kas atrodas aiz bremsēšanas pozīcijas.

Pamatojoties uz to, ka riteņa ar sliedi saistība apskatāmajā sistēmā, kas attēlota 3.2. un 3.3. attēlā, ir nenoturīga, atkabes avārijas posma jebkura vagona atsperēm, atrodoties darba stāvoklī, jāpaliek saspiestām. Atsperu pakares statisko deformāciju Δ_{st} , kas rodas no vagona svara, projektējot izvēlas ar nosacījumu, kas nodrošina nepieciešamās vagona gaitas īpašības. Turklāt ir tieksme samazināt vagona pašsvārstību frekvenci. Tas tiek sasniegts, palielinot atsperu pakares pakļāvību. Lai notiktu atslogošana, nepieciešams, lai atsperu dinamiskā deformācija svārstību procesā izstiepšanas laikā pārsniegtu atsperu statisko izlieci no vagona pašsvara, tātad summārajam lielumam, kas ir norādīts iekavās elastības spēku izteiksmēs (8), no pozitīva jākļūst par negatīvu. Pārbaudot doto nosacījumu ar vienādojumu palīdzību (9), ir pietiekami sekot $F_{D_2}^{el}$ izmaiņām izteiksmēs (8). Par normu tiek rekomendēti šādi statistiskā izliekuma lielumi kravas vagonu ratiņiem: krautā stāvoklī $\Delta_{st.gr.} = 0.045...0.065$ m, tukšā stāvoklī: $\Delta_{st.t.} = 0.006...0.009$ m.

Atsperu komplekta pagriešanās leņķi nosaka pēc izteiksmes:

$$\psi_{st} = \frac{\Delta_{st}}{(l_{A_1 O_0} + l_{E_1 B_1})}, \tag{13}$$

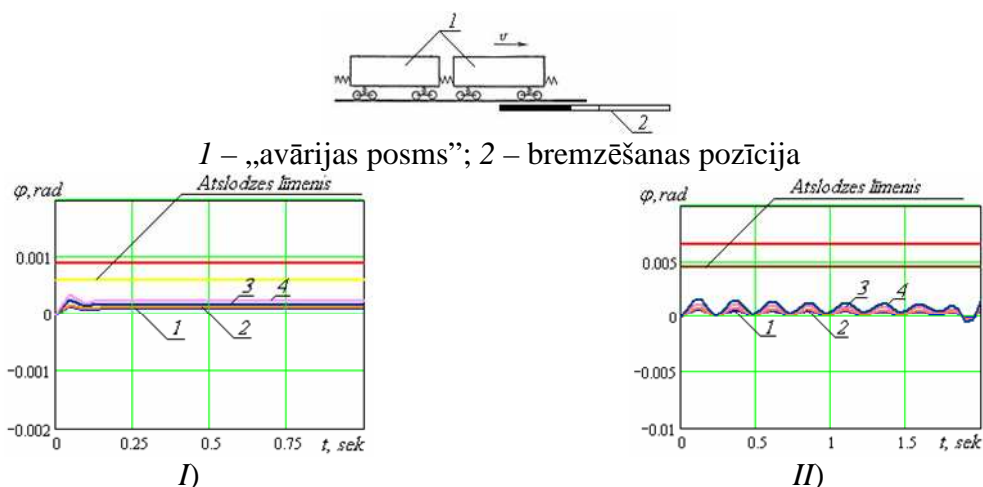
kur Δ_{st} – ratiņu atsperu komplekta statistiskais izliekums, $l_{A_1 O_0}$ – attālums no automātiskās sakabes līdz avārijas posma pirmā vagona vidum; $l_{E_1 B_1}$ – avārijas posma pirmā vagona bāzes puse.

7.4. Vagonu svārstību amplitūdu izpēte uzkalna bremsēšanas pozīcijā

Ceturtajā nodaļā ir doti diferenciālvienādojumu risinājumi, izmantojot MathCad paketes līdzekļus. Risinot diferenciālvienādojumus, tika variēts: vagonu atkabes garums, kravas vagonu tips un modelis, to iekraušanas lielums, kā arī bremsēšanas spēka lielums, kas

rodas no berzes koeficienta maiņas atkarības no klimatiskajiem apstākļiem un ritošā sastāva. Berzes koeficients būtiski samazinās ziemas periodā, mitra laikā un atkarībā no pārvadājamās kravas (sāls, cukurs, minerālmēsli u.c.), kas nokļūst uz riteņa velšanās virsmu un samazina berzes koeficientu. Nosakot svārstību amplitūdu, tika izpētītas atkabes, kas sastāv no diviem, trīs, četriem, sešiem un desmit vagoniem. Tika izpētīti krauti un tukši vagoni. Tika apskatītas situācijas, kad berzes koeficients starp riteņiem un bremžu lēninātāja kopni ir 0,08; 0,1; 0,15 un 0,2.

4.1. attēlā ir parādīts atkabes no diviem vagoniem novietojums uz lēninātāja bremzēšanas pozīcijas. Zemāk parādītas leņķa φ amplitūdas izmaiņas, kas rodas, tukšai un krautai atkabei no cisternām iebraucot lēninātāja bremzēšanas pozīcijā, kad berzes koeficients starp riteņiem un bremžu lēninātāja kopni ir 0,08; 0,15; 0,1 un 0,2.

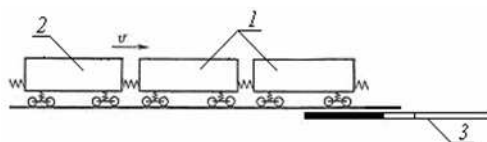


4.1. att. Pirmā vagona leņķa φ amplitūdas izmaiņas bremzēšanas rezultātā, tam tuvojoties lēninātājam ar ātrumu v_0 , ja atkabe sastāv no 2 cisternām:

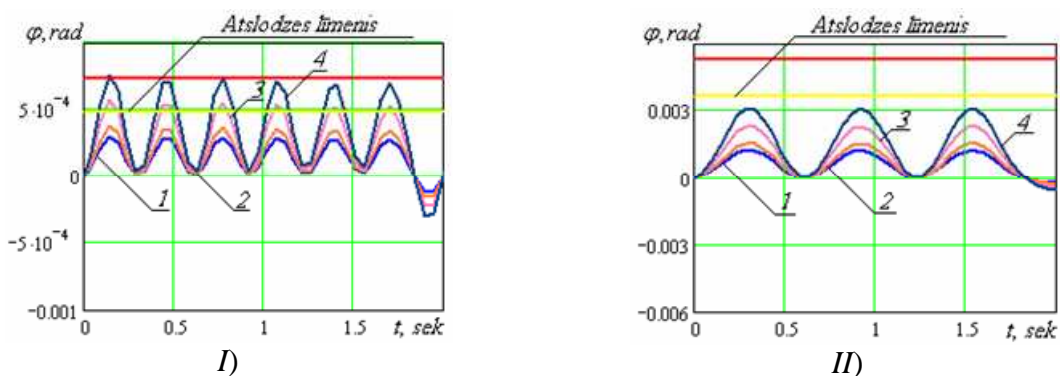
1. līnija – berzes koeficients starp riteņiem un bremžu lēninātāja kopni ir 0,08;
2. līnija – berzes koeficients starp riteņiem un bremžu lēninātāja kopni ir 0,1;
3. līnija – berzes koeficients starp riteņiem un bremžu lēninātāja kopni ir 0,15;
4. līnija – berzes koeficients starp riteņiem un bremžu lēninātāja kopni ir 0,2;

I – tukšai atkabei; II – krautai atkabei

4.2. un 4.3. att. parādīti „avārijas posma” divu atkabju novietojumi bremzēšanas pozīcijā, kas sastāv no trim vagoniem. Zemāk parādītas leņķa φ amplitūdas izmaiņas, kas rodas tukšai un krautai segtu vagonu atkabei iebraucot lēninātāja bremzēšanas pozīcijā, kad berzes koeficients starp riteņiem un bremžu lēninātāja kopni ir 0,08; 0,1; 0,15 un 0,2.



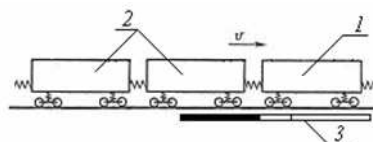
I – „avārijas posms”; 2 – „astesdaļa”; 3 – bremzēšanas pozīcija



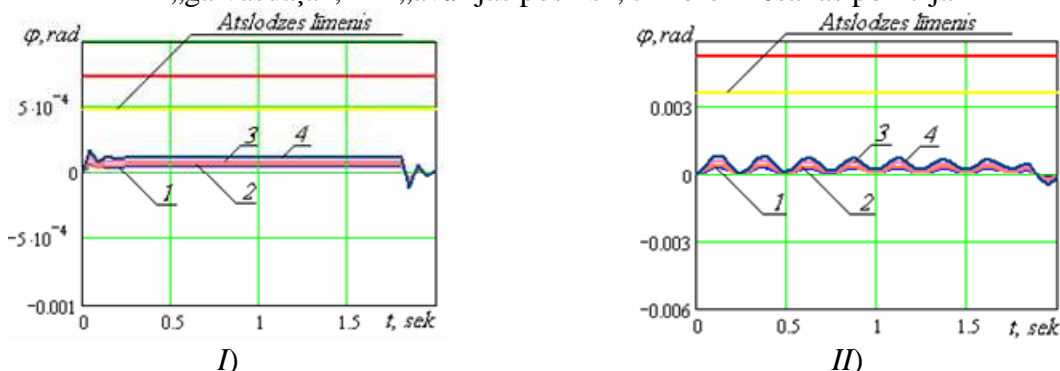
4.2. att. Pirmā vagona leņķa φ amplitūdas izmaiņas bremsēšanas rezultātā, tam tuvojoties lēninātājam ar ātrumu v_0 , ja atkabe sastāv no 3 segtiem vagoniem:

1. līnija – berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,08;
2. līnija – berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,1;
3. līnija – berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,15;
4. līnija – berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,2;

I – tukšai atkabei; *II* – krautai atkabei



1 – „galvasdaļa”; *2* – „avārijas posms”; *3* – bremsēšanas pozīcija

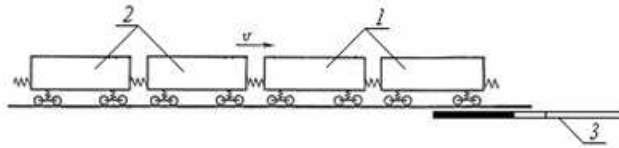


4.3. att. Otrā vagona leņķa φ amplitūdas izmaiņas bremsēšanas rezultātā, tam tuvojoties lēninātājam ar ātrumu v_0 , ja atkabe sastāv no 3 segtiem vagoniem:

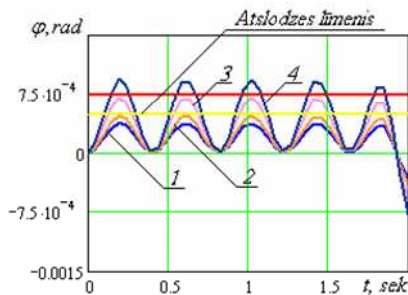
1. līnija – berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,08;
2. līnija – berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,1;
3. līnija – berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,15;
4. līnija – berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,2;

I – tukšai atkabei; *II* – krautai atkabei

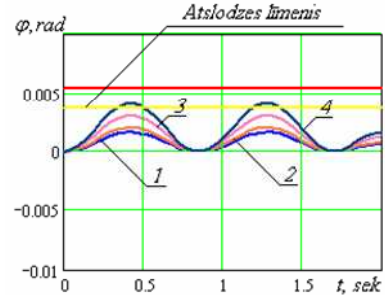
4.4. att., 4.5. att., 4.6. att. parādītas četru vagonu atkables „avārijas posma” novietojumi bremsēšanas pozīcijā. Zemāk parādītas leņķa φ amplitūdas izmaiņas, kas rodas tukšai un krautai četru platformu atkabei, iebraucot lēninātāja bremsēšanas pozīcijā, kad berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,08; 0,1; 0,15 un 0,2.



1 – „avārijas posms”; 2 – „astesdaļa”; 3 – bremsēšanas pozīcija



I)

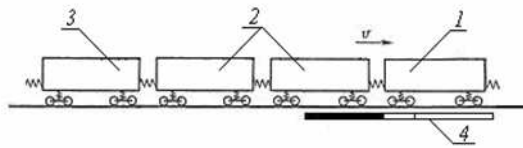


II)

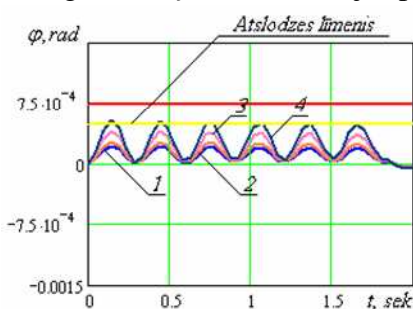
4.4. att. Pirmā vagona leņķa φ amplitūdas izmaiņas bremsēšanas rezultātā, tam tuvojoties lēninātājam ar ātrumu v_0 , ja atkabe sastāv no 4 platformām:

1. līnija – berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,08;
2. līnija – berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,1;
3. līnija – berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,15;
4. līnija – berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,2;

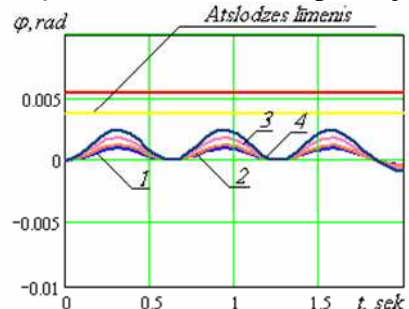
I – tukšai atkabei; II – krautai atkabei



1 – „galvasdaļa”; 2 – „avārijas posms”; 3 – „astesdaļa”; 4 – bremsēšanas pozīcija



I)

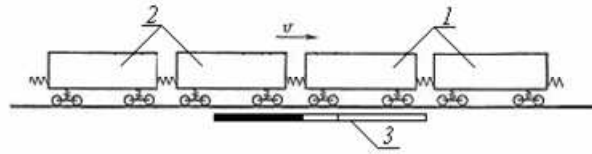


II)

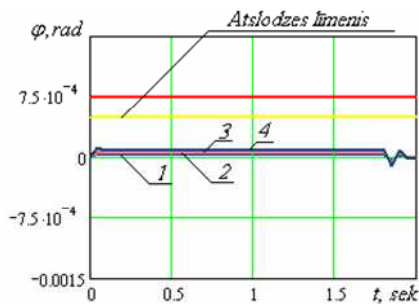
4.5. att. Otrā vagona leņķa φ amplitūdas izmaiņas bremsēšanas rezultātā, tam tuvojoties lēninātājam ar ātrumu v_0 , ja atkabe sastāv no 4 platformām:

1. līnija – berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,08;
2. līnija – berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,1;
3. līnija – berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,15;
4. līnija – berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,2;

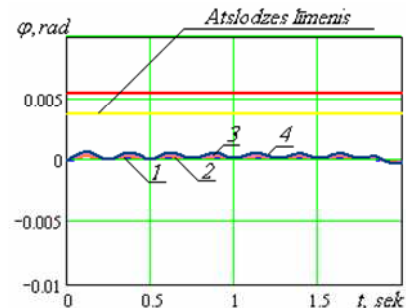
I – tukšai atkabei; II – krautai atkabei



1 – „galvas daļa”; 2 – „avārijas posms”; 3 – „astesdaļa”; 4 – bremzēšanas pozīcija



I)



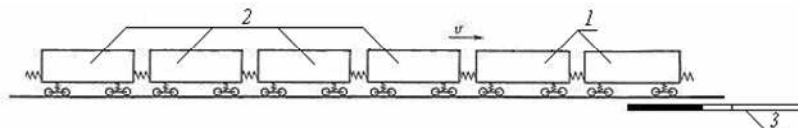
II)

4.6. att. Trešā vagona leņķa φ amplitūdas izmaiņas bremzēšanas rezultātā, tam tuvojoties lēninātājam ar ātrumu v_0 , ja atkabe sastāv 4 platformām:

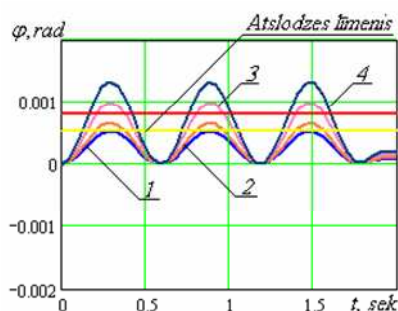
1. līnija – berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,08;
2. līnija – berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,1;
3. līnija – berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,15;
4. līnija – berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,2;

I – tukšai atkabei; II – krautai atkabei

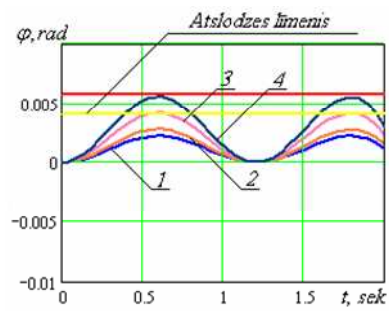
4.7. att., 4.8. att., 4.9. att. parādīti sešu pusvagonu atkabe „avārijas posma” novietojumi bremzēšanas pozīcijā. Tika apskatīti atkabe pirmā, trešā un piektā vagona bremzēšanas gadījumi. Zemāk parādītas leņķa φ amplitūdas izmaiņas, kas rodas tukšai un krautai sešu pusvagonu atkabei, iebraucot lēninātāja bremzēšanas pozīcijā, kad berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,08; 0,1; 0,15 un 0,2.



1 – „avārijas posms”; 2 – „astesdaļa”; 3 – bremzēšanas pozīcija



I)

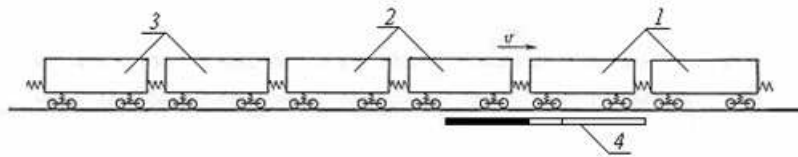


II)

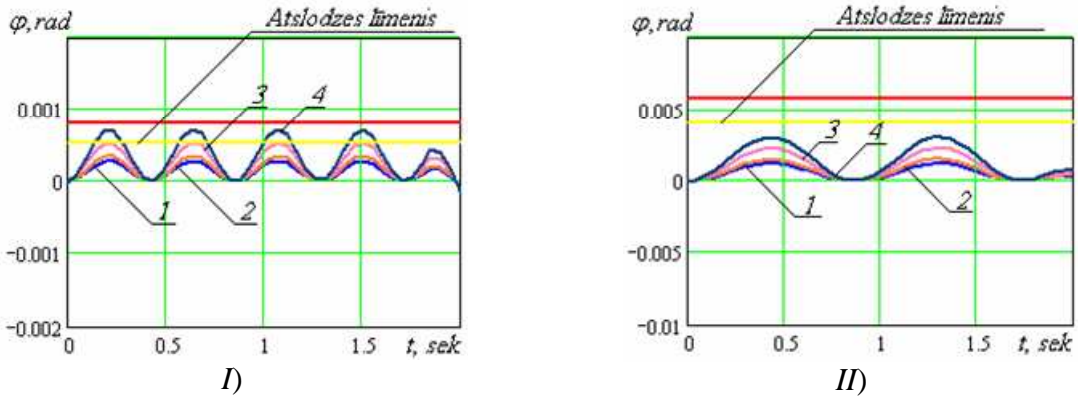
4.7. att. Pirmā vagona leņķa φ amplitūdas izmaiņas bremzēšanas rezultātā, tam tuvojoties lēninātājam ar ātrumu v_0 , ja atkabe sastāv no 6 pusvagoniem:

1. līnija – berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,08;
2. līnija – berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,1;
3. līnija – berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,15;
4. līnija – berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,2;

I – tukšai atkabei; II – krautai atkabei



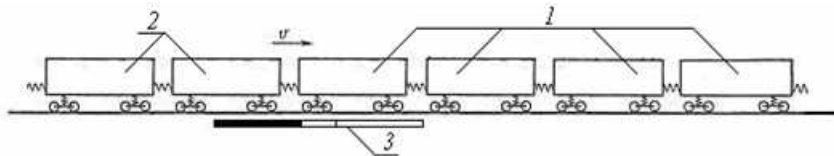
1 – „galvasdaļa”; 2 – „avārijas posms”; 3 – „astesdaļa”; 4 – bromzēšanas pozīcija



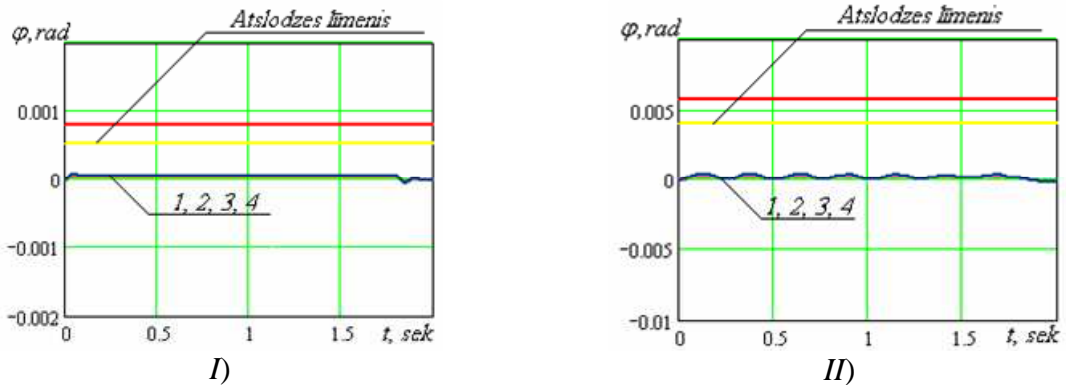
4.8. att. Trešā vagona leņķa φ amplitūdas izmaiņas bromzēšanas rezultātā, tam tuvojoties lēninātājam ar ātrumu v_0 , ja atkabe sastāv no 6 pusvagoniem:

1. līnija – berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,08;
2. līnija – berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,1;
3. līnija – berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,15;
4. līnija – berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,2;

I – tukšai atkabei; II – krautai atkabei



1 – „galvasdaļa”; 2 – „avārijas posms”; 3 – bromzēšanas pozīcija

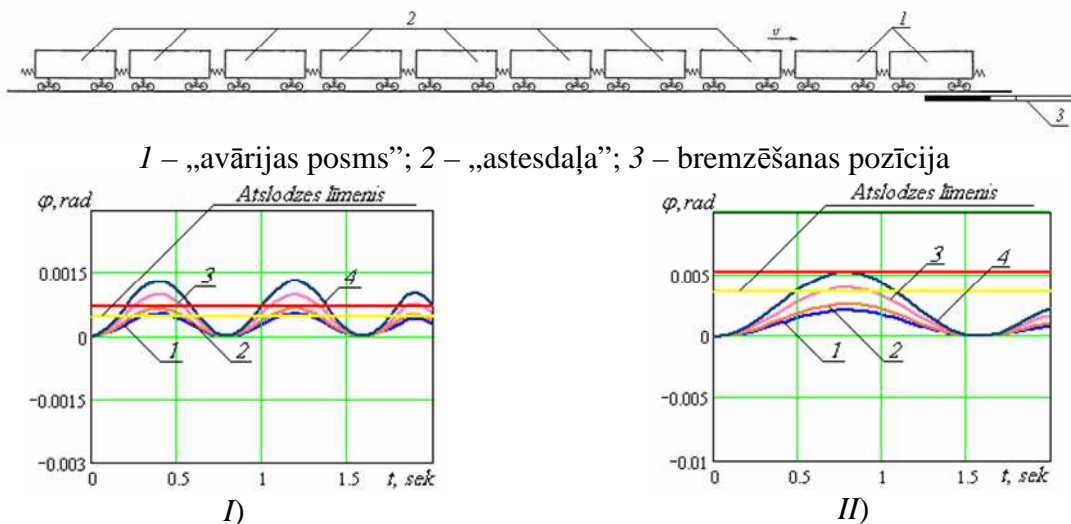


4.9. att. Piektā vagona leņķa φ amplitūdas izmaiņas bromzēšanas rezultātā, tam tuvojoties lēninātājam ar ātrumu v_0 , ja atkabe sastāv no 6 pusvagoniem:

1. līnija – berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,08;
2. līnija – berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,1;
3. līnija – berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,15;
4. līnija – berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,2;

I – tukšai atkabei; II – krautai atkabei

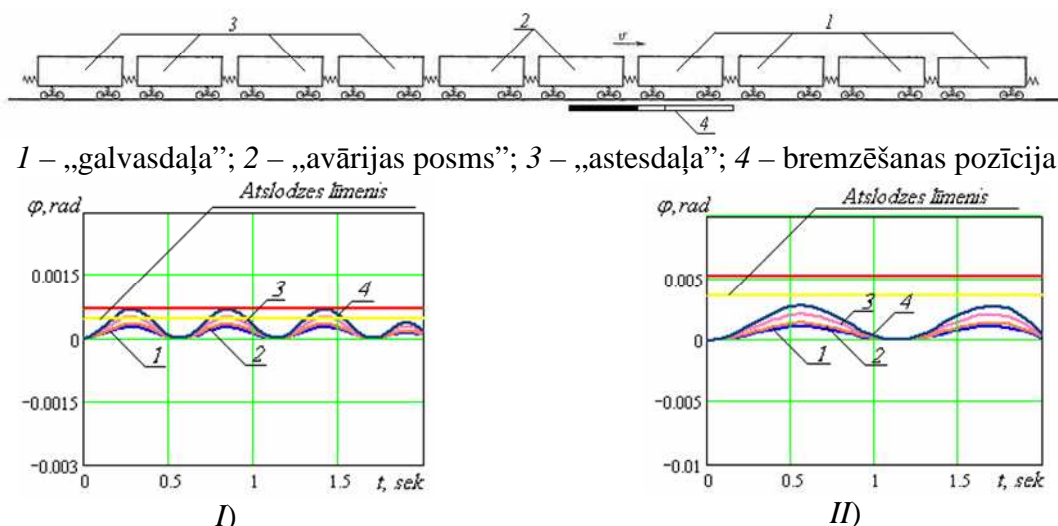
4.10. att., 4.11. att., 4.12. att. parādīti desmit vagonu atkabes „avārijas posma” novietojumi bremsēšanas pozīcijā. Tika apskatīti atkabes pirmā, piektā un devītā vagona bremsēšanas gadījumi. Zemāk parādītas leņķa φ amplitūdas izmaiņas, kas rodas tukšai un krautai desmit hoperdozatoru atkabei, iebraucot lēninātāja bremsēšanas pozīcijā, kad berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,08; 0,1; 0,15 un 0,2.



4.10. att. Pirmā vagona leņķa φ amplitūdas izmaiņas bremsēšanas rezultātā, tam tuvojoties lēninātājam ar ātrumu v_0 , ja atkabe sastāv no 10 hoperdozatoriem:

1. līnija – berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,08;
2. līnija – berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,1;
3. līnija – berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,15;
4. līnija – berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,2;

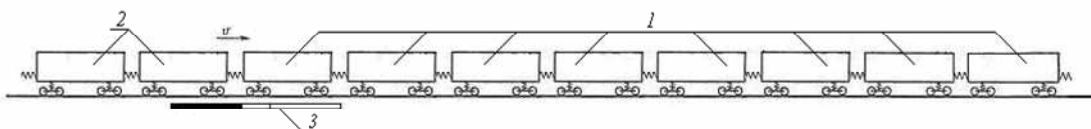
I – tukšai atkabei; II – krautai atkabei



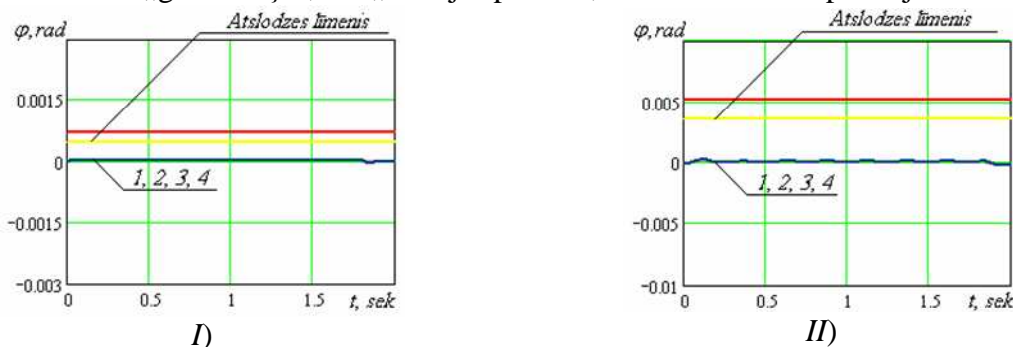
4.11. att. Piektā vagona leņķa φ amplitūdas izmaiņas bremsēšanas rezultātā, tam tuvojoties lēninātājam ar ātrumu v_0 , ja atkabe sastāv no 10 hoperdozatoriem:

1. līnija – berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,08;
2. līnija – berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,1;
3. līnija – berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,15;
4. līnija – berzes koeficients starp riteni un bremžu lēninātāja kopni ir 0,2;

I – tukšai atkabei; II – krautai atkabei



1 – „galvasdaļa”; 2 – „avārijas posms”; 3 – bremzēšanas pozīcija



4.12. att. Devītā vagona leņķa φ amplitūdas izmaiņas bremzēšanas rezultātā, tam tuvojoties lēninātājam ar ātrumu v_0 , ja atkabe sastāv no 10 hoperdozatoriem:

1. līnija – berzes koeficients starp riteņi un bremžu lēninātāja kopni ir 0,08;
2. līnija – berzes koeficients starp riteņi un bremžu lēninātāja kopni ir 0,1;
3. līnija – berzes koeficients starp riteņi un bremžu lēninātāja kopni ir 0,15;
4. līnija – berzes koeficients starp riteņi un bremžu lēninātāja kopni ir 0,2;

I – tukšai atkabei; II – krautai atkabei.

Iegūtie rezultāti ir par pamatu apgalvojumam – lai nepieļautu vagonu nobraukšanu no sliedēm, visdrošākā ir vagonu bremzēšana atkabes vidū. Pēc izpildītiem aprēķiniem tiek piedāvātas rekomendācijas vagonu atkabju nolaišanas no šķirošanas uzkalna procesa vadībai, lai samazinātu nobraukšanas no sliedēm gadījumus.

1. Atkabes nolaižot no uzkalna sausā laikā, kad berzes koeficients starp lēninātāja bremzēšanas kopni un riteņiem ir 0,2, nav vēlams bremzēt ar vagonu pirmajiem ratiņiem, ja atkabe sastāv no 3 līdz 6 tukšiem vagoniem un no 5 līdz 8 krautiem vagoniem.
2. Daudz drošāka un efektīvāka ir ratiņu bremzēšana atkabes vidū.
3. Vagonu atkabes nolaižot no uzkalna ziemā un lietainā laikā, kurās ir vagoni ar rūsas noklātiem un svaigi nokrāsotiem riteņu lokiem, berzes koeficients starp riteņiem un lēninātāja kopni samazinās līdz 0,08...0,15. Tādēļ, ir pieļaujama bremzēšana ar pirmā vagona pirmajiem ratiņiem, jo nenotiek atspere pakares atslodzes process, pieliktā bremzēšanas spēka impulsa samazināšanās dēļ.

SLĒDZIENS

Apkopjot paveiktā darba rezultātus var izdarīt šādus secinājumus:

1. Apkopota un analizēta kravas vagonu nobraukšanas no sliedēm statistika no 1997. līdz 2009. gadam Latvijas dzelzceļā. Veikta vagonu nobraukšanu no sliedēm sistematizācija, lai noskaidrotu, kādos apstākļos šī problēma ir visaktuālākā. Tika noskaidrots, ka lielākais vagonu nobraukšanu no sliedēm skaits: 40 % – ir nolaižot kravas vagonus no šķirošanas uzkalna, 27 % nobraukšanu rodas, pārvietojoties vagoniem līkumos ceļa posmos.

2. Tika izpētīts kravas vagonu virsbūves atbalsta mezglu stāvoklis uz ratiņiem pirms kapitālā vai depo remonta Daugavpils vagonu remonta centrā. Pētījumi parādīja, ka kravas vagonu virsbūves atbalsta mezgli starpremonta posmā strādā sausās berzes režīmā. Depo un kapitālajā remontā esošo vagonu balstpēdu mezglu apskate parādīja, ka horizontālās un vertikālās pēdas un pēdas gultņa darba virsmas ir izdilušas nevienmērīgi. Uz tām ir ierāvumi, kuros krājas smilšu putekļi, kā arī sausās berzes nospiedumu klātbūtne. Apskates rezultātā tika konstatēts, ka vislielākais atbalsta pēdas izdilums ir virsatsperu sijas iekšpusē (balstpēdas virsmā, kas vērsta uz vagona iekšpusi).
3. Konstruēta ierīce, kas ļāva noteikt berzes parametrus virsatsperu sijas un vagona rāmja atbalsta mezglos. Pēc eksperimentālu mērījumu rezultātiem tika atrasta vidējā Kulona berzes parametra vērtības θ_{med} atkarībā no virsbūves atbalsta mezgla tehniskā stāvokļa:
- ar smērvielas klātbūtni, $\theta_{med} = 0,019$;
 - ar sauso berzi, $\theta_{med} = 0,033$;
 - ar putekļu klātbūtni, $\theta_{med} = 0,046$.
- Vidējās Kulona berzes parametra vērtības f_{med}^{fr} , vagona rāmim balstoties uz pēdas gultni un vienu slīdni ir šādas:
- ar smērvielas klātbūtni, $f_{med}^{fr} = 0,164$;
 - ar sauso berzi, $f_{med}^{fr} = 0,232$;
 - ar putekļu klātbūtni, $f_{med}^{fr} = 0,314$.
- Eksperimentāli pierādīts, ka smērvielas trūkums ratiņu atbalsta mezglos apmēram 2 reizes palielina Kulona berzes parametrus, kas veicina ratiņu nobraukšanas no slīdēm iespējamību, vagoniem pārvietojoties līkumos ceļa posmus.
4. Analītiski noteikti ratiņu griešanās kustības pretestības momenti M_{re} attiecībā pret virsbūvi dažāda tipa kravas vagoniem, izmantojot eksperimentāli atrastos Kulona berzes parametrus vagona atbalsta mezglos. Aprēķinātās ratiņu griešanās kustības pretestības momentu M_{re} vērtības:
- tukšas cisternas atbalsta mezglā
 - ar smērvielas klātbūtni, kad rāmis balstās tikai uz virsatsperu sijas pēdas gultni – 1298,11 Nm; kad rāmis balstās uz virsatsperu sijas pēdas gultni un vienu slīdni – 1481,24 Nm; kad rāmis balstās uz virsatsperu sijas pēdas gultni un vienu slīdni, kas aprīkots ar veltņiem – 1264,92 Nm;
 - bez smērvielas klātbūtnes, kad rāmis balstās tikai uz virsatsperu sijas pēdas gultni – 2257,84 Nm; kad rāmis balstās uz virsatsperu sijas pēdas gultni un vienu slīdni – 2505,73 Nm; kad rāmis balstās uz virsatsperu sijas pēdas gultni un vienu slīdni, kas aprīkots ar veltņiem – 2200,10 Nm;
 - ar smilšu putekļu klātbūtni, kad rāmis balstās tikai uz virsatsperu sijas pēdas gultni – 3143,52 Nm; kad rāmis balstās uz virsatsperu sijas pēdas gultni un vienu slīdni – 3476,92 Nm; kad rāmis balstās uz virsatsperu sijas pēdas gultni un vienu slīdni, kas aprīkots ar veltņiem – 3063,13 Nm;
 - krautas cisternas atbalsta mezglā
 - ar smērvielas klātbūtni, kad rāmis balstās tikai uz virsatsperu sijas pēdas gultni – 6868,46 Nm; kad rāmis balstās uz virsatsperu sijas pēdas gultni un vienu slīdni – 27576,71 Nm; kad rāmis balstās uz virsatsperu sijas pēdas gultni un vienu slīdni, kas aprīkots ar veltņiem – 4174,26 Nm;

- bez smērvielas klātbūtnes, kad rāmis balstās tikai uz virsatsperu sijas pēdas gultni – 11946,46 Nm; kad rāmis balstās uz virsatsperu sijas pēdas gultni un vienu slīdni – 40324,65 Nm; kad rāmis balstās uz virsatsperu sijas pēdas gultni un vienu slīdni, kas aprīkots ar veltņiem – 7260,38 Nm;
 - ar smilšu putekļu klātbūtni, kad rāmis balstās tikai uz virsatsperu sijas pēdas gultni – 16632,71 Nm; kad rāmis balstās uz virsatsperu sijas pēdas gultni un vienu slīdni – 54873,34 Nm; kad rāmis balstās uz virsatsperu sijas pēdas gultni un vienu slīdni, kas aprīkots ar veltņiem – 10108,42 Nm;
5. Ratiņu griešanās kustības pretestības momentu M_{re} vērtību attiecībā pret virsbūvi analīze rāda, ka, aprīkojot ratiņu virsatsperu sijas slīdņus ar veltņiem, to griešanās pretestības moments pret virsbūvi samazinās 4...6 reizes. Iegādājoties jaunus kravas vagonus, priekšroka dodama jaunās paaudzes vagoniem, kam ir virsatsperu sijas elastīgi veltņu slīdņi. Šāda veida slīdņi samazinās atbalsta mezglu, riteņpāra uzmalu, sliežu galviņu sānu malu dilšanu un mazinās vagonu nobraukšanas no sliedēm iespējamību, tiem pārvietojoties līkumos ceļa posmos.
 6. Bez smērvielas vagona atbalsta mezglā ratiņu griešanās kustības pretestības moments attiecībā pret vagona virsbūvi palielinās 1,7...2,4 reizes, kas veicina intensīvu atbalsta mezgla elementu nodilumu. Lai samazinātu nodilumu un iespējamību vagoniem nobraukt no sliedēm līkumos ceļa posmos ieteicams organizēt smērvielas papildināšanu kravas vagonu ratiņu atbalsta mezglus vienu reizi pusotra gada laikā, uzrakstot tās izpildes datumu uz vagona virsbūves vai rāmja. Ir iespējams kravas vagonu atbalsta mezglus papildināt ar smērvielu tekošā atkabes remonta laikā.
 7. Piedāvāta atsperotas absolūti cietas ķēdes aprēķina shēma, lai izpētītu vagonu atkabju svārstības, kas radušās tām pārvietojoties šķirošanas uzkalna bremzēšanas pozīcijās. Iegūtā diferenciālvienādojumu sistēma ar divām brīvības pakāpēm apraksta atkabes kustību pa sliežu ceļu, kas atrodas aiz bremzēšanas pozīcijām. Izstrādāto vagonu atkabju kustības matemātisko modeli var izmantot, lai risinātu atkabes mērķtiecīgas bremzēšanas uzdevumus šķirošanas uzkalnā. Vagonu dinamikas teorētiskās analīzes rezultāti, atkabei pārvietojoties šķirošanas uzkalna bremzēšanas pozīcijās, apstiprina pieņēmumu, ka ir iespējama vagonu atsperu komplektu īslaicīga atslodze, kura rada priekšnosacījumus vagonu nobraukšanai no sliedēm.
 8. Vagonus nolaižot no šķirošanas uzkalna sausā laikā, kad berzes koeficients starp bremžu lēninātāja kopni un riteni ir 0,2, nav ieteicams bremzēt vagonu atkabes pirmos ratiņus, kas ienāk vagonu lēninātājā, atkabēm, kas sastāv no 3...6 tukšiem vagoniem, vai no 5...8 krautiem vagoniem. Optimālais atkabju bremzēšanas režīms ir bremzēšanas iedarbība uz vagoniem, kas atrodas atkabes vidū.
 9. Vagonu atkabēm, kam berzes koeficients starp bremžu lēninātāja kopni un riteni ir no 0,08 līdz 0,15 (vagoni ar rūsas pārklājumiem un nokrāsotiem riteņu lokiem, nolaižot atkabes ziemā un lietainā laikā), ieteicams bremzēt pirmā vagona ratiņus, kas ienāk uzkalna bremzēšanas lēninātājā, jo šajā gadījumā atsperu komplektu atslodzes iespējamība ir minimāla.