

Vagona mērīšanas sistēmas konstruktīvās formas optimizācija

Alexander Boyko, *Riga Technical University*, Alexander Janushevskis, *Riga Technical University*,
Anatolijs Melnikovs, *Riga Technical University*, Igors Vuchetich, *Baltic Testing center*

Kopsavilkums. Šajā darbā risināts tenzometrisko riteņpāru unifikācijas uzdevums, lai samazinātu izmēģinājumu izdevumus. Darbs izpildīts uz kravas vagona ratiņu riteņpāra piemēra bāzes. Izstrādāts noņemamais mērīšanas aprīkojums, kas nodrošina iespēju veikt mērījumus vagona vai lokomotīves sistēmas ritenisliede monitoringa laikā, izmantojot štata riteņpāri kā tenzometrisko. Noņemamais aprīkojums ievērojami samazina materiālos izdevumus un gaitas dinamisko un stiprības izmēģinājumu sagatavošanas laiku. Atrasta mērīšanas sistēmas noņemamā diska optimālā forma – elipse ar pastiprinājumu šķērsvirzienā diska vidējā daļā liklīnijas virsmas veidā.

Atslēgas vārdi: vagona izmēģinājums, mērīšanas sistēma, formas optimizācija.

I. IEVADS

Mūsdienās sistēmas riteņpāris – sliede monitoringam izmanto speciālus tenzometriskos riteņpārus. Katram ritošā sastāva pārbaudāmās vienības tipam (elektrovilciens, dīzeļvilciens vai lokomotīve) jāizgatavo speciālu tenzometrisko riteņpāri, jo ir nepieciešama atbilstība pēc diametra (riteņa velšanās virsmas nodilums) un pēc nostiprināšanas veida (bukses mezgla konstrukcija). Speciālu tenzometrisko riteņpāru izmantošana un piegāde uz izmēģinājumu vietu prasa ievērojamus materiālos izdevumus, kā arī palielina gaitas dinamisko un stiprības izmēģinājumu sagatavošanas laiku.

Lai vienkāršotu izmēģinājumu sagatavošanu, tenzometriskā riteņpāra vietā tiek piedāvāts izmantot uz ritošā sastāva jau esošo (štata) riteņpāri. Uz štata riteņpāra ass tiek piedāvāts nostiprināt maināmu (uzliekamu un noņemamu) aprīkojumu, uz kura savukārt uzmontēta bezvadu mērīšanas un datu pārraides sistēma ar antenu.

Par prototipu ir pieņemts maināmais aprīkojums, kas paredzēts 80 tonnu kravas vagona riteņpārim, noņemama diska veidā no metāla 5052-H32 ar taisnstūra šķērsgrīzumu. Noņemamais disks (1. att.) tiek nostiprināts uz riteņpāra ass riteņa diska ārpusē. Savukārt uz noņemamā diska ārējās virsmas ir nostiprināti divi raidītāji ar paralēlskalda formu un izmēriem 20x55x80 mm un katrs ar masu 0.1 kg. Mērīšanas kompleksa raidītāju barošanai un datu pārraidei tiek izmantota magnētiskā rāmja antena. Magnētiskās antenas rāmis ir 10 mm plata folijas plāksne, kas piestiprināta pie noņemamā diska uz tekstolīta pamatnes. Magnētiskās rāmja antenas apraksts un darbības princips dots darbā [1].

Kravas vagona kustības ātrums izmēģinājumu laikā var sasniegt 120 km/st. Pie kam slodzes no tādiem ceļa negludumiem kā sliežu salaidumi un sliežu pārmijas, kā arī no riteņpāru formas defektiem (šļūces) tiek nodotas uz riteņpāri un noņemamo disku, kas cieši nostiprināts uz riteņpāra ass, var būt ievērojamas. Tāpēc, lai nodrošinātu mērīšanas sistēmas noņemamā aprīkojuma drošu ekspluatāciju, ir nepieciešams veikt noņemamā diska stiprības novērtējuma aprēķinus, kā arī veikt diska formas optimizāciju.

II. RITEŅPĀRA SLODZES

Mērīšanas sistēmas noņemamā diska konstrukcijas aprēķini tiek veikti ņemot vērā maksimālās iespējamās ekspluatācijas slodzes. Maksimālās slodzes darbojas vertikālā virzienā un veidojas sliedes un riteņa (šļūce) negludumu dēļ. Pie kam noņemamais disks uzņem atbilstošās riteņpāra slodzes, jo ir cieši nostiprināts.

Maksimālo slodžu vertikālā virzienā veidošanās nosacījumi piekrauta vai tukša vagona gadījumā ir atšķirīgi. Pie tam, kā parādīts 1. tabulā, maksimālās slodzes riteņpāros ar šļūci ap 2 mm dziļumā veidojas pie maziem kustības ātrumiem [2].

1. TABULA

SLODZES ATKARĪBĀ NO VAGONA KUSTĪBAS ĀTRUMA

Vagona ātrums m/s	Maksimālā spēka lielums trieciena momentā, kN	
	Tukšs vagona	Piekrauts vagona
Statiskā slodze	22.8	104.5
1	136.1	251.3
2	170.2	316.4
5	297.8	367.2
10	271.3	620.6
20	276.6	604.9

Maksimālās slodzes uz riteņpāri tukša vagona gadījumā veidojas pie kustības ātruma 5 m/sek, bet piekrauta vagona gadījumā – pie ātruma 10 m/sek.

Variantu aprēķini tika veikti maksimālai vertikālai slodzei 620.6 kN piekrautam vagonam pie horizontālas un vertikālas noņemamā diska raidītāju orientācijām. Jāatzīmē, ka riteņpāra paātrinājums var sasniegt 12 g.

Rēķinot stiprību atkarībā no griešanās slodzēm ir pieņemts, ka riteņa disks ir jauns (nodilums pa rītes apli ir minimāls), kravas vagona maksimālais kustības ātrums ir 120 km/st, pie kam riteņpāra griešanās frekvence ir 670.8 apgriezienu minūtē.

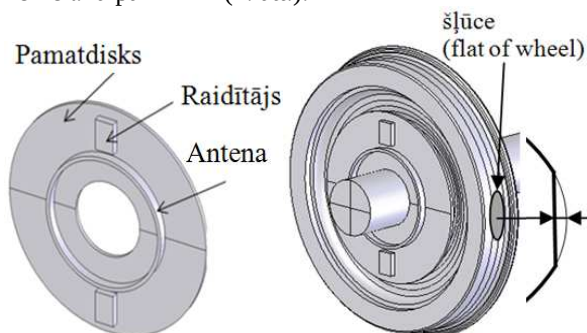
Lai novērtētu frekvenču raksturojumus un atklātu iespējamo rezonanses mijiedarbību starp noņemamo disku un riteņpāri ir nepieciešams veikt arī frekvenču aprēķinu.

Zinot maksimālo vertikālo slodžu rašanās ātrumus un riteņpāra diametru ir atrastas kritiskās frekvences riteņpāra formas defekta - šļūces gadījumā. Piekrautam vagonam ātrumā 10 m/sek kritiskā frekvence ir 3.352 Hz, bet maksimāli iespējamā ātrumā - 11.2 Hz. Gadījumā, ja noņemamā diska pašfrekvences sakrīt ar kritiskām frekvencēm, tad diska svārstību amplitūdas ievērojami pieaugs un mērījumu dati var būt kropļoti, bet pati noņemamā diska konstrukcija - pārslogota.

III. APRĒĶINU MODELIS

Diska ģeometriskais modelis tika izveidots ar programmas SolidWorks® palīdzību. Stiprības aprēķini tika veikti izmantojot galīgo elementu programmu CosmosWorks®.

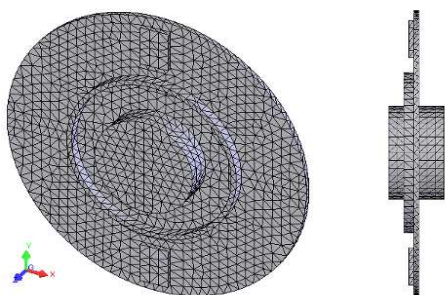
Aprēķinu modelī ņemti vērā diska, raidītāju un antenas forma, svārs un izmēri. Lai antena droši darbotos, nepieciešams nodrošināt atstarpi starp to un uztvērēja antenu ne lielāku par 2 mm (1. att.).



1. att. Noņemamais disks ar mērīšanas aparāturu un tā uzstādīšanas vieta

Tāpēc aprēķinu gaitā tiek kontrolēts noņemamā diska pārvietošanās antenas zonā šķērsvirzienā. Aprēķinu modelī stiprinājuma palīgelementi un tiem nepieciešamie urbumi netika ņemti vērā.

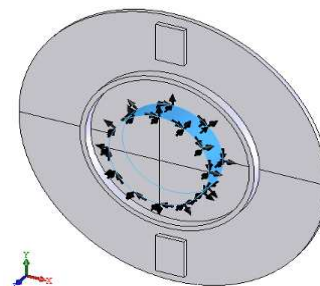
Lai izveidotu aprēķinu modeļa galīgo elementu tīklojumu, tika izmantoti telpiskie cietķermeņa otrās kārtas elementi -



2. att. Noņemamā diska aprēķinu modeļa galīgo elementu režģis

tetraedri. Izmantotajiem galīgajiem elementiem katrā mezglā ir trīs brīvības pakāpes. Noņemamā diska galīgo elementu modelim caurmērā ir ap 18354 mezglu, 10317 elementu un 55062 brīvības pakāpes (2. att.).

Noņemamā diska cilindriskās šķautnes pārvietošanās savienojuma zonā ar riteņpāra asi ir ierobežots trijos virzienos (3. att.).



3. att. Noņemamā diska aprēķinu modeļa nostiprināšanas shēma

IV. NOŅEMAMĀ DISKA STIPRĪBAS APRĒĶINS

Noņemamā diska stiprības un diska pārvietošanās antenas zonā novērtēšana tika veikta dažāda biezuma taisnstūra formas šķērsgrīzumam atkarībā no augstāk aprakstītajām maksimālajām slodzēm. Sākotnējais diska biezums - 8 mm, diametrs - 600 mm. Diska materiāla 5052-H32 tecēšanas robeža ir $\sigma_T = 195$ Mpa, bet stiprības robeža - $\sigma_B = 230$ MPa. Saskaņā ar Normām [3] materiāla izturības robežu jāaprēķina pēc sekojošas formulas:

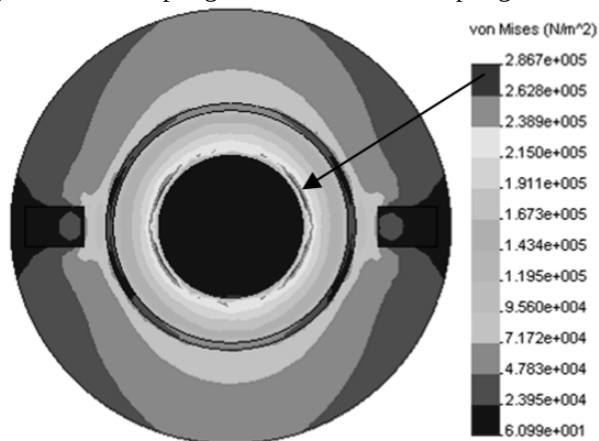
$$\sigma_{-1} = 0.4 \cdot \sigma_B \quad 1)$$

Ievērojot noņemamā diska noslogojuma režīmu, noņemamā diskā aprēķina spriegumi nedrīkst būt lielāki par $\sigma_{-1} = 92$ MPa, lai nepieļautu noņemamā diska noguruma sagrūšanu.

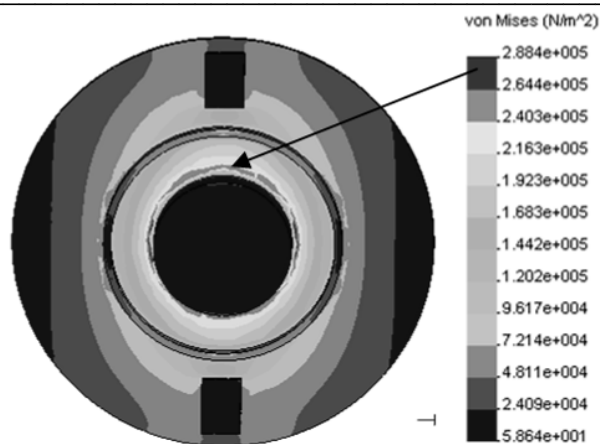
4. attēlā parādīti spriegumi kravas vagona diskā raidītāju horizontālās orientācijas gadījumā no maksimālām slodzēm pie ātruma 10 m/s.

5. att. parādīti spriegumi tādos pašos noslogojuma apstākļos, bet pie vertikālās raidītāju orientācijas.

Kā redzams, raidītāju orientācija samērā maz ietekmē noņemamā diska sprieguma stāvokli. Tomēr spriegumi



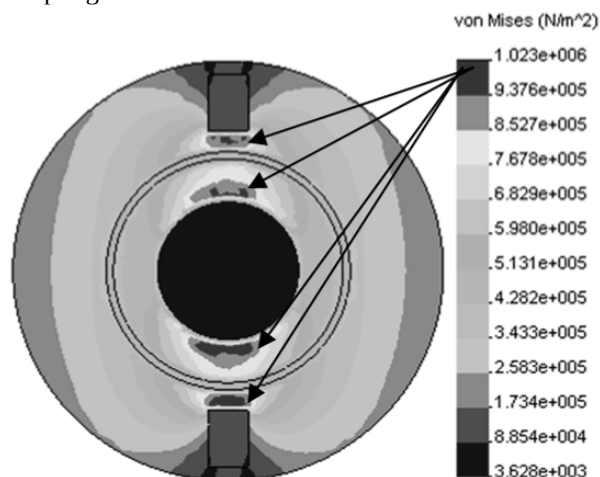
4. att. Spriegumi 8 mm biezā diskā no triecienslodzes (šļūces gadījumā) ar paātrinājumu 119.3 m/s². Raidītāji orientēti horizontāli



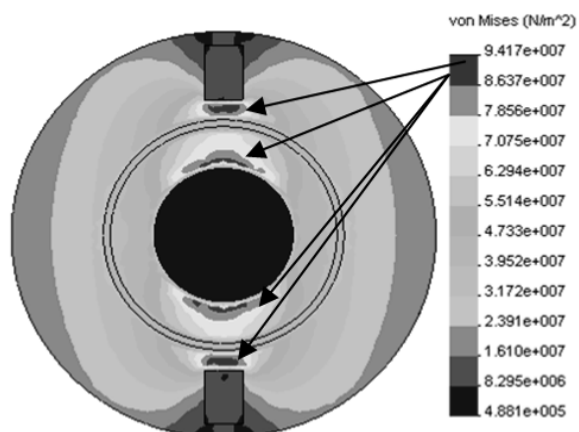
5. att. Diska spriegumi. Raidītāji orientēti vertikāli

noņemamā diska stiprinājuma zonā uz riteņpāra asi ir nedaudz lielāki, kad raidītāji orientēti vertikāli. Tāpēc tālākie aprēķini tika veikti diskam ar raidītāju vertikālo orientāciju.

Aprēķina rezultāti parādīja (6. att.), ka griešanās slodzēm no riteņpāra rotācijas ir ievērojami lielāks ieguldījums noņemamā diska sprieguma stāvoklī.



6. att. Spriegumi 8 mm biezā diskā pie griešanās slodzēm (670.8 apgr./min)



7. att. Summārie spriegumi 8 mm biezā diskā

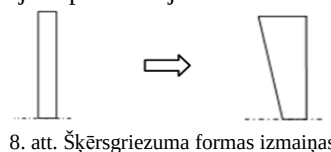
Kā redzams 7. attēlā, summārais spriegums no triecienslodzes (šļūces gadījumā) ar paātrinājumu 119.3 m/s^2 un griešanās slodzēm (670.8 apgr./min) sasniedz $\sigma = 94 \text{ MPa}$, kas pārsniedz materiāla izturības robežu $\sigma_{-1} = 92 \text{ MPa}$.

Noņemamā diska cilindriskās skaldnes maksimālais augstums (diska biezums) savienošanas zonā ar riteņpāra asi ir konstruktīvi ierobežots līdz 10 mm. Palielinoties šķērsriezuma biezumam līdz 10 mm, summārais spriegums no triecienslodzes un no griešanās slodzēm sasniedz $\sigma = 89 \text{ MPa}$, kas praktiski sakrīt ar materiāla izturības robežu.

Tāpēc ir nepieciešams veikt noņemamā diska šķērsriezuma formas optimizāciju.

V. NOŅEMAMĀ DISKA FORMAS OPTIMIZĀCIJA

8. attēlā ir parādītas noņemamā diska šķērsriezuma formas izmaiņas sākotnējās optimizācijas laikā.

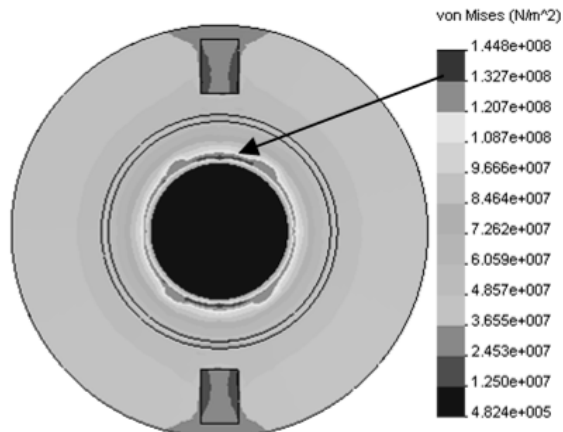


8. att. Šķērsriezuma formas izmaiņas

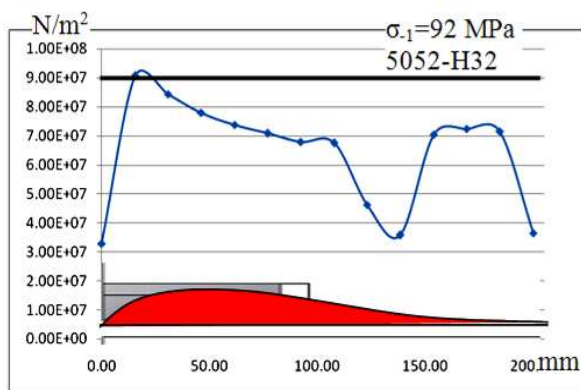
Izveidojot šķērsriezumu trapeces veidā (8. att.) ar biezumiem 10 mm noņemamā diska pamatnē un 20 mm augšpusē, spriegumi savienojuma zonā palielinājās līdz 144.8 MPa (9. att.), kas ir saistīts ar diska masas palielinājumu. Tāpēc ievērojot spriegumu sadalījuma raksturu (10. att.), ir lietderīgi izmainīt diska šķērsriezuma formu maksimālo spriegumu zonās, kas parādītas 7. attēlā.

Ar splaina funkcijām izveidotā līklīnijas šķērsriezuma forma parādīta 10. un 11. attēlos un tālāk tekstā tiek saukta par efektīvo. Jaunā forma atļauj samazināt maksimālos spriegumus līdz $\sigma = 64 \text{ MPa}$ (12. att.), kas atbilst Normu [3] prasībām. Pie tam noņemamā diska pārvietojums antenas zonā sastāda 0.025 mm (13. att.), kas arī apmierina uzstādītās prasības.

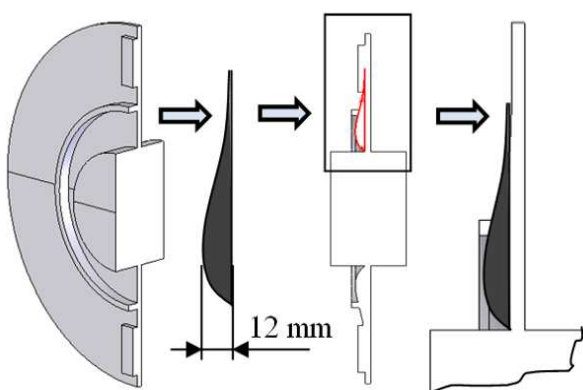
Nenoslogotajās zonās (12. att.), kas praktiski nepiedalās slodžu uzņemšanā, var tikt noņemts materiāls. Līdz ar to paša noņemamā diska forma tika izmainīta uz elipsi, lai ietaupīt materiālu un lai nodrošinātu labāku pieeju pie riteņa ārējās virsmas. Pie tam maksimālais spriegums tagad sasniedz



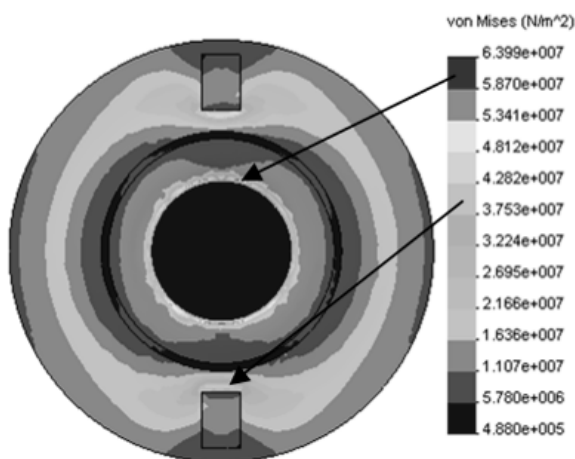
9. att. Summārie spriegumi diskā ar mainīgo biezumu (10 mm pamatnē un 20 mm augšpusē)



10. att. Summāro spriegumu sadalījums 8 mm biezā diskā zonā starp asi un raidītāju (attēla apakšējā daļā parādīts diska šķēsgriezums)



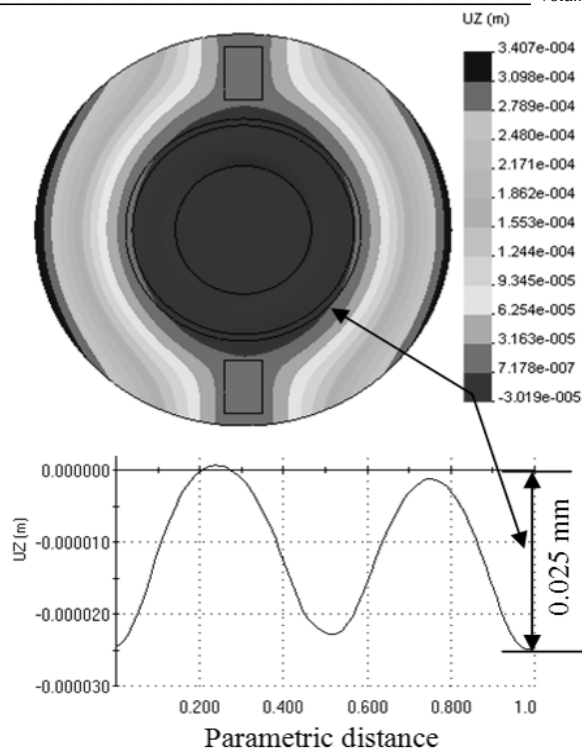
11. att. Līklīnijas šķēsgriezuma forma, kas pastiprina noņemamā diska vidējo daļu



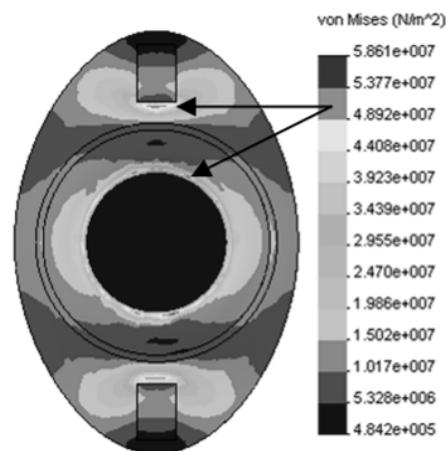
12. att. Summārie spriegumi diskā pie tā efektīvā šķēsgriezuma

$\sigma = 58 \text{ MPa}$, bet pārvietojums antenas zonā sastāda 0.075 mm, kas redzams 14. un 15. attēlos.

Aprēķinu rezultātā tika noskaidrots, ka, lai samazinātu materiāla izmaksas un lai nodrošinātu pieeju pie riteņpāra diska ārējās virsmas tenzometrisko devēju montāžai, ir nepieciešams izmantot elipses formu (600 x 200 mm) noņemamajam diskam ar pastiprinājumu šķēsvirzienā diska vidējā daļā (šķēsgriezums parādīts 11. attēlā).



13. att. Pārvietojums šķēsvirzienā diskā pie tā efektīvā šķēsgriezuma

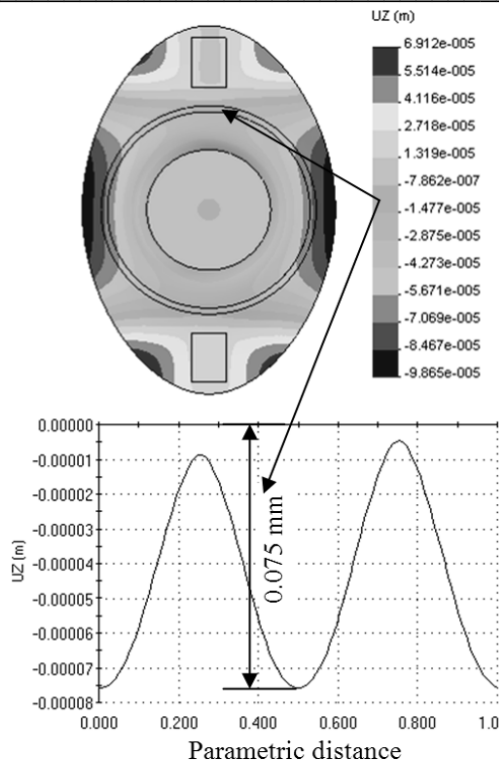


14. att. Summārie spriegumi elipsveida diskā pie tā efektīvā šķēsgriezuma

Tika veikta arī noņemamā diska frekvenču analīze. Diska pirmā pašfrekvence ir 463.24 Hz, bet ierosmes frekvence no riteņpāra ar 2 mm dziļu šļūci pie piekrauta vagona maksimālā kustības ātruma 120 km/st sastāda tikai 11.2 Hz.

Tātad kravas vagona kustībā pieļaujamo ātrumu diapazonā ierosmes frekvence nesasniedz noņemamā diska pašfrekvenci, tāpēc noņemamais disks nenonāk rezonanses režīmā.

Optimizācijas rezultātā iegūtie noņemamā diska šķēsgriezuma forma un izmēri var tikt izmantoti dažāda tipa ritošajam sastāvam, ja mērīšanas aparātūras raksturojumi būtiski neatšķiras no aprēķinu lielumiem. Lai uz diska nostiprinātu citu aprīkojumu ar lielākiem izmēriem un masu, kas atšķiras vairāk nekā par 20% no aprēķinu lielumiem, kā arī



15. att. Elipsveida diskā ar efektīvo šķērsgriezumu pārvietojums šķērsvirzienā

pie lielākiem vagona kustības ātrumiem, ir nepieciešams veikt diska stiprības novērtējumu. Pie nepietiekamas stiprības ir lietderīgi palielināt diska šķērsgriezuma izmērus un atkārtot diska formas optimizāciju.

VI. SECINĀJUMI

Darbā uz kravas vagona piemēra bāzes ir apstiprināta iespēja izmantot štata riteņpāri ar noņemamu mērīšanas aprīkojumu kā tenzometrisko riteņpāri sistēmas ritenis-sliede

monitoringam. Atrasta mērīšanas sistēmas noņemamā diska optimālā forma. Noņemamais aprīkojums ievērojami samazinās materiālos izdevumus un gaitas dinamisko un stiprības izmēģinājumu sagatavošanas laiku. Lai izmantotu noņemamo mērīšanas aprīkojumu, ir nepieciešama atbilstoša tarēšana.

PATEICĪBAS

Šis darbs ir daļēji atbalstīts un veikts ESF projekta Nr. 2009/0144/1DP/1.1.2.1.2/09/IPIA/VIAA/005, RTU projekta Nr. FLPP 2009/45 un LZP granta projekta Nr. 09.1267 ietvaros.

LITERATŪRA

1. **Hart, Ted**, W5QJR. *The Loop. Small high efficiency antennas*. USA: Sage- American Co. ISBN 1-877992- 75-5.
2. **Сладковский, А., Погорелов, Д.Ю.** Исследование динамического взаимодействия в контакте колесо-рельс при наличии ползунов на колесной паре. *Вісник Східноукраїнського національного університету*. – N 5 (2008), с. 88-95.
3. *Нормы расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)*. Москва: ГосНИИВ – ВНИИЖТ, 1996.

Alexander Boyko, Dr.sc.ing., researcher, Riga Technical University, Institute of Mechanics. Address: 6 Ezermalas Street, Riga, LV-1006, Latvia. Phone +371 67089396. E-mail: aleksandrs.boiko@rtu.lv

Alexander Janushevskis, Dr.sc.ing., assoc.Professor, leading researcher, Riga Technical University, Institute of Mechanics. Address: 6 Ezermalas Street, Riga, LV-1006, Latvia. Phone +371 67089396. E-mail: janush@latnet.lv

Anatolijs Melnikovs, M.sc.ing., postgraduate student, Riga Technical University, Address: 6 Ezermalas Street, Riga, LV-1006, Latvia. Phone +371 67089396. E - mail: marshallm-80@inbox.lv

Igors Vuchetich, deputy director, Baltic Testing center. Address: 201 Brivibas Street, Riga, LV-1039, Latvia. Phone +371 67801726. E-mail: btc@btcentr.com

Alexander Boyko, Alexander Janushevskis, Anatolijs Melnikovs, Igors Vuchetich. Constructive Shape Optimization of Wagon Measurement System

In this work the task of unification of the tensometric wheel pairs and reducing of the expenses required for testing is decided. The task is developed on basis of the wheel pair of railway freight wagon as an example. The equipment allowing realization of the measurements for the monitoring of wagon or locomotive system wheel-railing using standard wheel pair is elaborated. The possibility to use the standard wheel pair with removable measurement equipment as tensometric wheel pair reduce the material and time expenses required for preparing of testing. The optimal shape of removable disc – ellipse with the curved transverse strengthening in the middle part of disc – is founded.

Александр Бойко, Александр Янушевскис, Анатолий Мельников, Игор Вучетич. Оптимизация конструктивной формы измерительной системы вагона

В работе решается задача унификации тензометрических колесных пар и тем самым снижения затрат на проведение испытаний. Работа выполнена на примере колесной пары тележки грузового вагона. Разработано оборудование, обеспечивающее возможность выполнять измерения по мониторингу системы колесо-рельс на вагоне либо локомотиве, используя его штатную колесную пару. Отсутствие необходимости замены колесной пары на специальную тензометрическую и самого ее создания сокращает затраты и время на проведение испытаний. Найдена оптимальная форма съемного диска измерительной системы вагона в виде эллипса с усилением в поперечном направлении в средней части в виде криволинейной поверхности.