



20-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminės konferencijos
TRANSPORTO INŽINERIJA IR VADYBA,
vykusios 2017 m. gegužės 12 d. Vilniuje, straipsnių rinkinys

Proceedings of the 20th Conference for Junior Researchers 'Science – Future of Lithuania'
TRANSPORT ENGINEERING AND MANAGEMENT, 12 May 2017, Vilnius, Lithuania

Сборник статей 20-й конференции молодых ученых «Наука – будущее Литвы»
ИНЖЕНЕРИЯ ТРАНСПОРТА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК, 12 мая 2017 г., Вильнюс, Литва

RIEDMENŲ PAKABOS ELEMENTŲ PARAMETRŲ ĮTAKOS RIEDĖJIMUI TYRIMAS

Laurynas Šilalė, Rimantas Subačius, Stasys Steišūnas

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Geležinkelių transporto katedra
El. paštas: laurynas.silale@gmail.com; rimantas.subacius@vgtu.lt; stasys.steisunas@vgtu.lt

Santrauka. Straipsnyje nagrinėjama riedmenų tolygaus riedėjimo priklausomybė nuo pakabos trampriųjų elementų parametru kaitos. Riedmenims judant bėgių keliu sužadunami kėbulo svyravimai, kurių pobūdžiui turi įtakos vežimėlių tamprioji pakaba. Sumodeliavus dinaminį krovinio vagono modelį su dviem *SIMPLE 18_100* keturiais vežimėliais ir bėgių kelią su vertikaliais ir horizontaliais nelygumais, nustatyta vagono kėbulo svyravimų amplitudžių priklausomybė nuo pakabos tampriųjų elementų vertikalios ir skersinio standumo. Be to, darant tyrimą stebima ir vagono masės įtaka tiriamoms kėbulo svyravimo amplitudėms.

Reikšminiai žodžiai: riedmenų dinamika, judėjimo stabilumas, programinis paketas „Universal mechanism“, kelio nelygumai, pakabos tampriųjų elementų standumas.

Įvadas

Geležinkelių transportas – viena iš svarbiausių transportavimo rūšių šalies teritorijoje. Geležinkelių riedmenimis pervežama apie 50 % šalyje transportuojamų krovinių, o svarbiausias geležinkelio įmonės tikslas – kokybiškas vežimas. Norint tai įgyvendinti reikia nuolat tobulinti ir prižiūrėti riedmenų parką.

Tobulėjant traukos priemonėms, didėjant judėjimo greičiui, kai keliami vis didesni eismo saugumo reikalavimai, vis daugiau dėmesio skiriama riedmenų dinamišioms procesams nagrinėti ir rato sąveikos su bėgių jėgoms tirti (Steišūnas *et al.* 2013). Išnagrinėjus važiavimui turinčių įtakos dinaminį riedmenų savybes galima stipriai pagerinti saugumo, važiavimo greičio bei važiavimo komforto parametrus. Nustatyta, kad norint sumažinti vagono virpesius, būtina tobulinti vežimėlių pakabas ir mažinti kelio nelygumų sužadintą jėgą (Keršys *et al.* 2001).

Vis daugiau geležinkelio keliuose naudojant besandūrį bėgių kelią (Podagėlis 2006) riedmenų nuriedėjimas nuo bėgių tampa retesnė problema. Todėl ženkliai išaugo važiavimo greičiai, kurie turi įtakos riedmenų dinamišioms savybėms. Šių laikų technologijos leidžia tirti ypač sudėtingus ir kelio ir riedmenų modelius, kai galime pasirinkti daugybę abiejų objektų parametru susietų į visumą (Steišūnas *et al.* 2014). Tokiu būdu išnagrinėti tiriamieji objektų parametrai nenutolsta nuo realiuose bandymuose gautų dinaminų savybių.

Bėgių kelio vėžė – tai geležinkelio bėgiai pritvirtinti prie pabėgių tam tikru atstumu vienas nuo kito ir sudarantys kelią. Geležinkelio vėžė apibūdinama jos pločiu ir bėgių išsidėstymu pagal lygį (Podagėlis 2006). Projektuojamasis kelias turi daugybę parametru, kurie turi būti įgyvendinami jo tiesimo metu, tačiau eksploatacijos metu, kelias sėda, slenkasi ir deformuojasi, o tai lemia atsirandančias papildomas dinamines jėgas riedmenų aširačiuose, kurios perduodamos į jo visus konstrukcijos elementus tokius kaip aširačiai, pakabos tamprieji elementai, kėbulas ir pan. Todėl tiriant vagonų dinamika būtina projektuoti kelią kuo artimesnį realioms eksploatacijos sąlygoms.

Riedmenų modeliavimas realiomis sąlygomis yra labai ilgai trunkantis, pernelyg sudėtingas ir brangus procesas (Balevičius *et al.* 2014). Šiame darbe naudojami moksliskai pagrįsti vagonų pakabos veikimo ir aširačio rato sąveikos su bėgiais vertinimo skaičiuojamieji metodai. Šie metodai leidžia riedmenų natūrinius bandymus pakeisti patikimais kompiuteriniais imitaciniais tyrimais, kuriuos į bendrą visumą apjungia Briensko valstybiniame technikos universitete sukurtas ir sertifikuotas programinis paketas „Universal mechanism“. Pastarasis suteikia galimybę vykdyti kompiuterinius eksperimentus su iki 110 laisvės laipsnių turinčiais riedmenų dinaminiais modeliais (Steišūnas *et al.* 2017).

Išnagrinėjus šią modeliavimo programą galima pasitebėti, kad tai įrankis gebantis nagrinėti kelis tyrimo objekto parametrus vienu metu. Tas ypač sutrumpina ban-

dymų skaičių, tyrimo trukmę ir pagerina gautų rezultatų tikslumą.

Prekinio vagono dinaminis modelis

Sudarant dinaminį modelį reikia vadovautis prielaida, jog netiriami riedmens elementai yra standūs kūnai ir yra standžiai sujungti vieni su kitais.

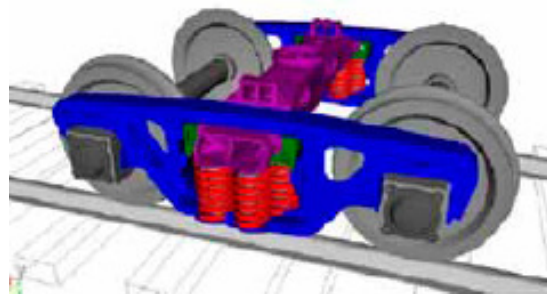
Išskyrus spyruoklinę pakabą visi kiti vagono elementai modeliuojami kaip standūs kūnai, kurie gali judėti visomis trimis Dekarto koordinatinių sistemos kryptimis. Pakaba sudaryta iš spyruoklių ir trinties pleištu, kurie leidžia skersinius ir vertikaliuosius poslinkius. Aširačių ir šoninių sijų jungimo ryšys leidžia šoninėms sijoms pasisukti aširačių atžvilgiu.

Norint supaprastinti bandymo objektą ir išvengti ypač sudėtingų skaičiavimų priimamos prielaidos, kurios neturi arba turi minimalią įtaką riedėjimo tolygumo parametrui:

- visi vagono elementai (išskyrus spyruoklinę pakabą) sugrupuojami į du kūnus sujungtus standžiai į vieną bendrą visumą, kuri gali judėti visomis trimis Dekarto koordinatinių sistemos kryptimis;
- riedmens važiuoklės tamprieji elementai neturi jokių laisvės laipsnių apribojimų;
- vagono kėbulas turi galimybę pasisukti aplink savo ašį;
- vagono kėbulas ir pakaba yra idealiai simetriški centro linijos atžvilgiu.

Pagal aprašytus tiriamojo eksperimentinio modelio apribojimus, suteiktas prielaidas ir atsižvelgiant į AB „Lietuvos geležinkeliai“ eksploatuojamų prekinį vagonų važiuoklės konstrukcijas, suprojektuotas riedmuo turintis du dviašius *Simple 18_100* vežimėlius, kurie apkrauti kėbulo svoriu ir stebima, kaip keičiasi važiavimo tolygu-

mo parametrai keičiant pakabos elementų charakteristikas.



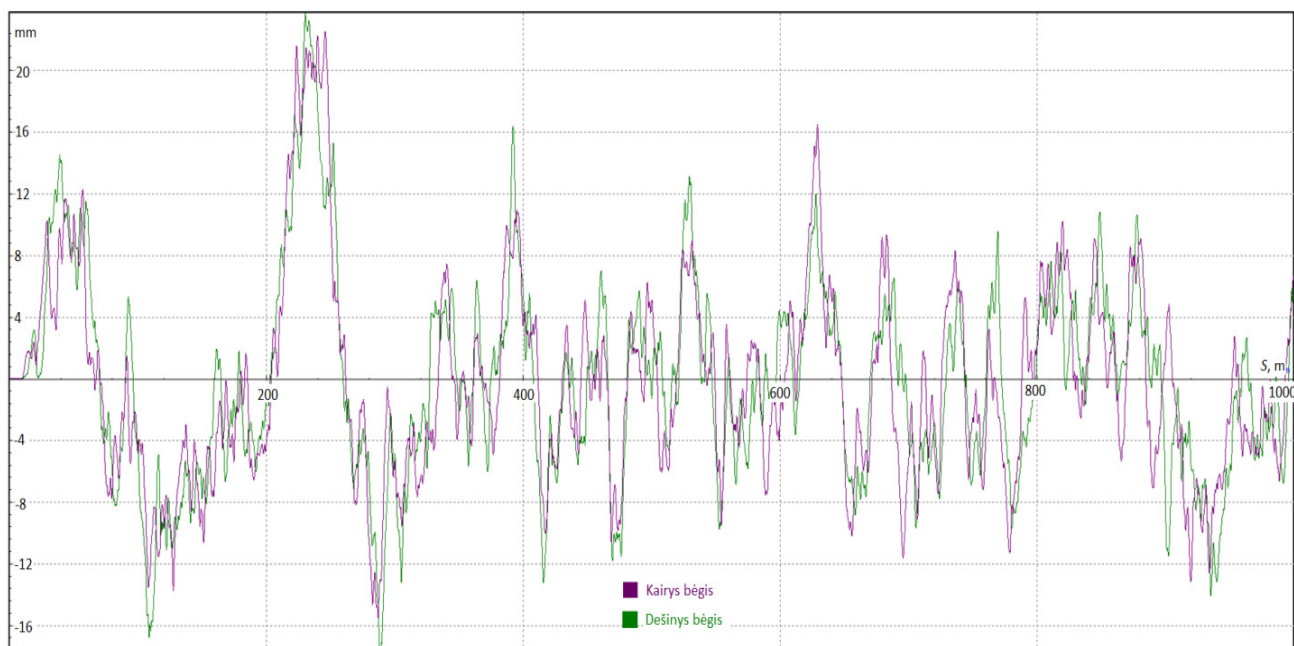
1 pav. Krovininio vagono vežimėlio modelio bendras vaizdas

Modeliuojamo bėgių kelio parametrai

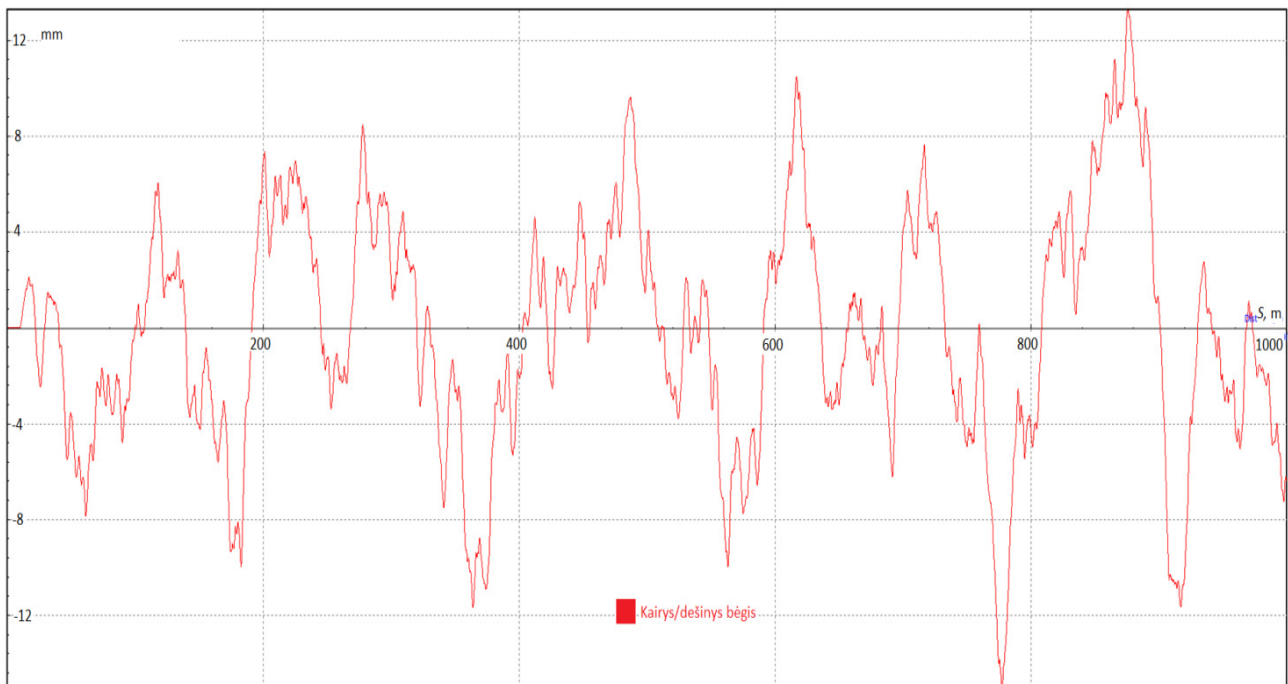
Nelygumai priskiriami atskirai kiekvienam bėgiui. Siekiant gauti kuo didesnius vagono virpesius modeliuojamas bėgių kelias, kuriame dažnai pasitaiko skersinių ir vertikalių nelygumų.

Sumodeliuotas bėgių kelio ruožas, kurio ilgis 1000 m, atsisakyta kelio plano kreivių, įkalnių ir nuokalnių norint išfiltruoti aiškius, nuo važiuoklės parametru priklausančius, parametrus. Keliui priskiriami sinusoidiniai vertikalieji nelygumai, kurių didžiausia amplitudė 41 mm (2 pav.) ir skersiniai nelygumai, kurių didžiausia amplitudė 30 mm (3 pav.).

Kiekvienam iš bėgių vertikalieji ir horizontalieji pokyčiai priskiriami atskirai, neatkartojant kito bėgio nelygumų. Tokiu būdu didinama tampriųjų pakabos elementų standumo parametru įtaka riedmens kėbulo virpesiams ir jų pagreičiams.



2 pav. Vertikalieji bėgių vėžės nelygumai



3 pav. Skersiniai bėgių vėžės nelygumai

Kelio modelis sudarytas iš balasto, pabėgių, besandūrių bėgių ir standžių bėgių tvirtinimo elementų. Kadangi modeliuojant kelią priskiriami tyrimui reikalingi aukščio ir padėties pokyčiai, norint neiškraipyti važiavimo sąlygų visi kelio elementai parenkami kaip standūs kūnai neturintys nei vieno laisvės laipsnio.

Modeliuojamo vagono dinaminį procesų tyrimo rezultatai

Bandymų metu vagonui priskiriamas 10 m/s judėjimo greitis, o norint imituoti vagono pakrovimą jo masė pasirenkama 20 t, 40 t, 60 t, 80 t ir bandymas kartojamas.

Pakabos standumas keičiamas 4 kartus:

- 1) vertikalus pakabos spyruoklių standumas 200 kN/m, skersinis spyruoklių standumas 210 kN/m;
- 2) vertikalus pakabos spyruoklių standumas 400 kN/m, skersinis spyruoklių standumas 410 kN/m;
- 3) vertikalus pakabos spyruoklių standumas 600 kN/m, skersinis spyruoklių standumas 610 kN/m;
- 4) vertikalus pakabos spyruoklių standumas 800 kN/m, skersinis spyruoklių standumas 810 kN/m.

Tyrimo metu nustatinėjami šie parametrai:

- a) vertikalūs kėbulo svyravimai;
- b) vertikalų kėbulo svyravimų pagreičiai;
- c) skersiniai kėbulo svyravimai;
- d) skersinių kėbulo svyravimų pagreičiai;
- e) Nadalio kriterijaus reikšmė kairiame, priekiniame aširačio rate.

Tyrimo rezultatai rodo, kad vertikalų vagono kėbulo poslinkių reikšmių kitimui įtakos turi ne tik pakabos standumo parametrai, bet ir vagono bendra masė.

4 paveiksle pateiktame grafike matyti, kad didėjantis pakabos standumas didžiausią įtaką vagono kėbulo poslinkių amplitudėms turi tada, kai vagono masė yra didesnė nei 40 t: kai vagono masė 60 t minėtasis parametras

sumažėja 0,0025 m ir 0,0023 m, kai vagono masė 80 t. Kitais atvejais šios reikšmės kitimas minimalus.

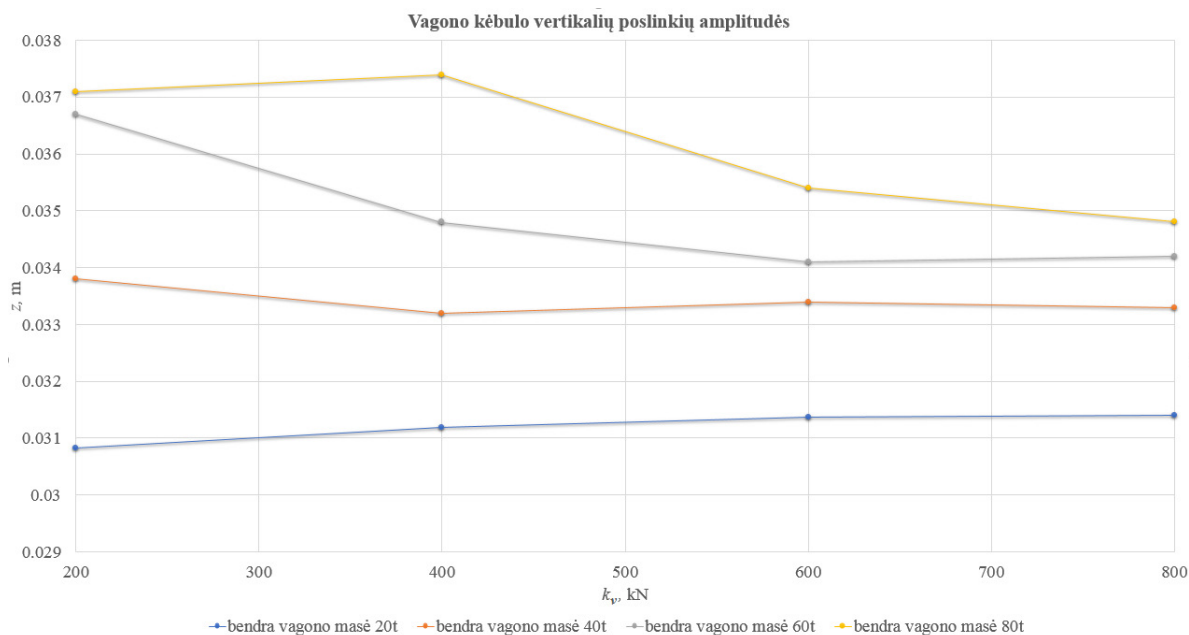
Iš 5 paveiksle pateikto grafiko matyti, kad varijuojant tampriųjų pakabos elementų standumo reikšmėmis vertikalūs kėbulo poslinkių pagreičiai padidėjo: 1,4 karto, kai vagono masė 20 t; 1,9 karto kai vagono masė 40 t; 2,0 karto, kai vagono masė 60 t ir 1,58 karto, kai vagono masė 80 t.

Iš gautų rezultatų pastebima priklausomybė, jog tampriųjų pakabos elementų standumo didinimas didina kėbulo vertikalų poslinkių pagreičių reikšmes, o didžiausia įtaka pasireiškia tuomet, kai vagono bendra masė yra apie 60 t (vertikalų kėbulo poslinkių pagreičių reikšmė padidėjo 0,126 m/s²).

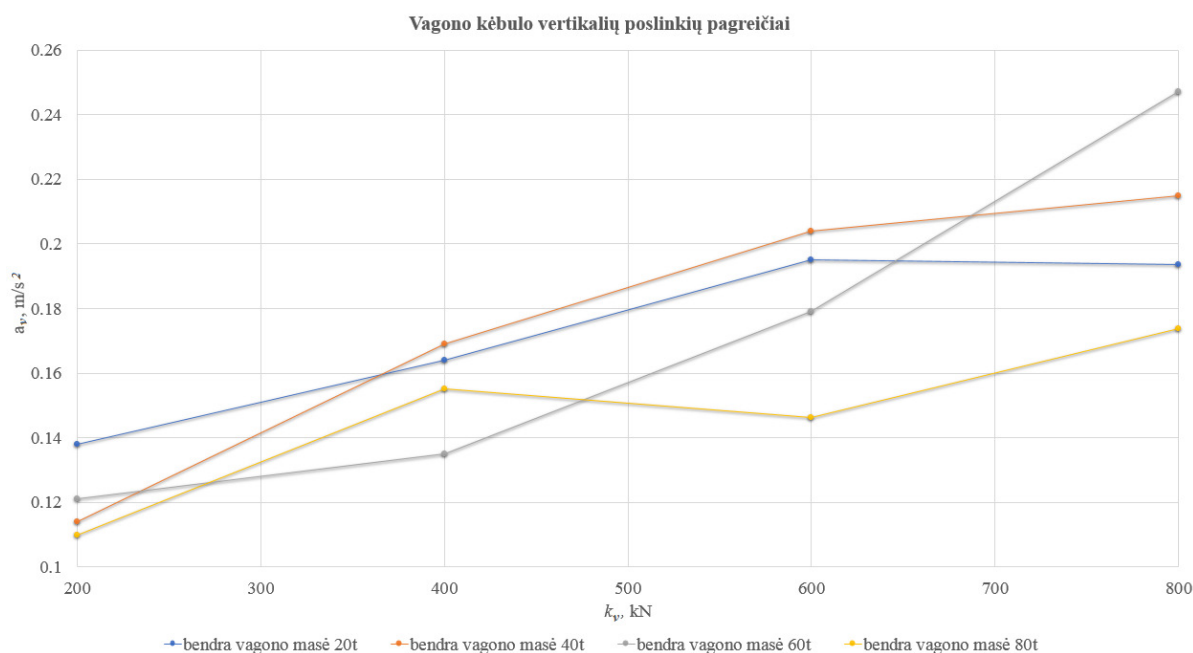
Iš 6 paveiksle pateikto grafiko matyti, kad varijuojant tampriųjų pakabos elementų standumo reikšmėmis, skersiniai kėbulo poslinkiai padidėjo: 0,027 m, kai vagono masė 20 t; 0,007 m, kai vagono masė 40 t; 0,079 m, kai vagono masė 60 t, 0,177 m, kai vagono masė 80 t. Be to, pastebima, kad vagono masei esant mažesnei nei 40 t – skersiniai kėbulo poslinkiai kinta minimaliai dėl tampriųjų pakabos elementų standumo didinimo.

Iš gautų rezultatų pastebima, kad vagonai, kurių masė mažesnė įgyja mažesnius skersinius kėbulo svyravimų poslinkius didėjant pakabos tampriųjų elementų standumui. Tačiau vagono masei esant didesnei negu 40 t – pakabos standinimas stipriai įtakoja skersinių vagono kėbulo poslinkių amplitudės didėjimą.

7 paveiksle pateiktame grafike matyti, kad varijuojant tampriųjų pakabos elementų standumo reikšmėmis skersinių kėbulo poslinkių pagreičių didėjimą galima prilyginti tiesiniam kitimui. Šis parametras padidėjo: 1,4 karto, kai vagono masė 20 t; 1,9 karto kai vagono masė 40 t; 2,0 karto, kai vagono masė 60 t ir 1,58 karto, kai vagono masė 80 t.



4 pav. Keturašio krovininio vagono vertikalūs kėbulo poslinkiai kintant pakabos tampriųjų elementų standumui ir esant skirtingoms vagono masėms



5 pav. Keturašio vagono vertikalūs kėbulo poslinkių pagreičiai kintant pakabos tampriųjų elementų standumui ir esant skirtingoms vagono masėms

Iš gautų rezultatų galima teigti, kad tampriųjų pakabos elementų standumo didinimas didina kėbulo skersinių poslinkių pagreičių reikšmes, o jiems didžiausia įtaka pasireiškia tuomet, kai vagono bendra masė yra apie 60 t (vertikalų kėbulo poslinkių pagreičių reikšmė padidėjo 0.126 m/s^2).

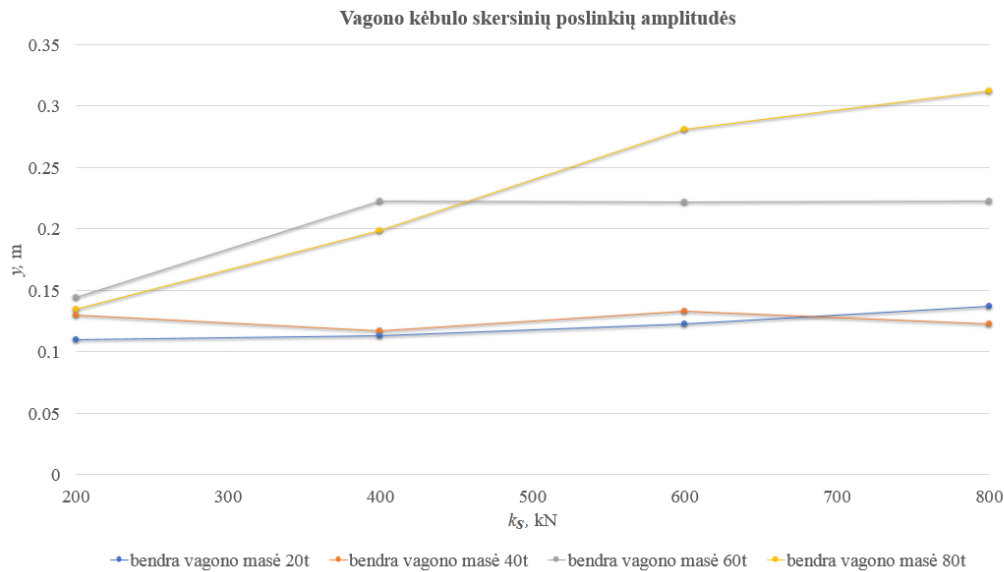
Nadalio reikšmių gautų tyrimo metu rezultatų analizė

Vienas svarbiausių riedmenų eksploatacijos rodiklių yra saugumas. Norint išanalizuoti tampriųjų pakabos elementų standumo parametru įtaką važiavimo tolygu-

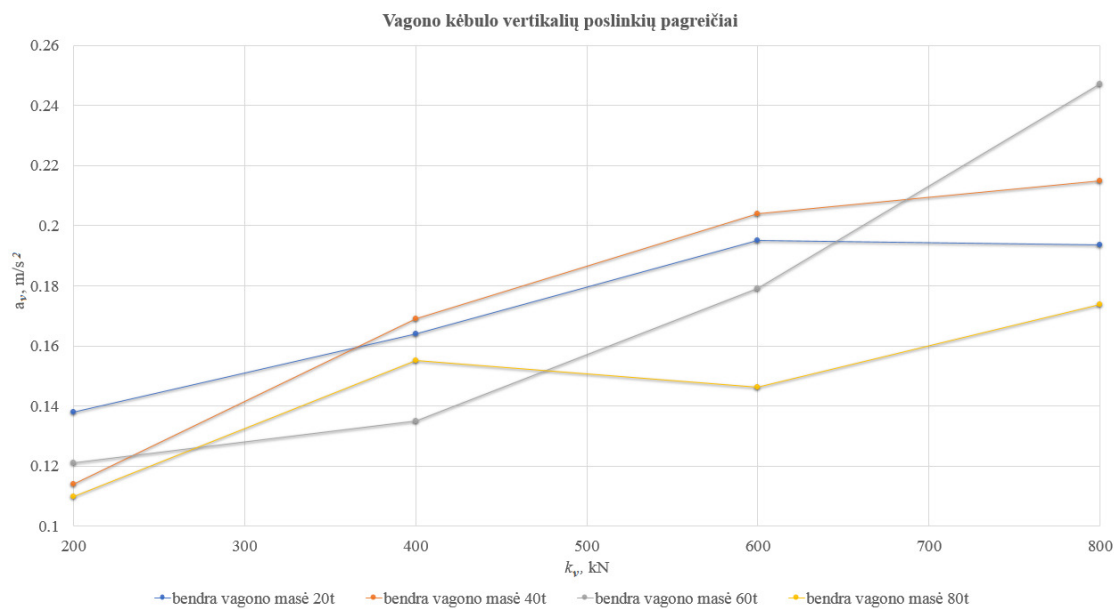
mui, būtina patikrinti saugumo kriterijus kintant pakabos standumo parametrams. Saugaus riedėjimo parametru pasirinktas Nadalio kriterijus.

Atlikto šio kriterijaus priklausomybės tyrimo nuo tiriamųjų parametru, gauti rezultatai pateikti 1 lentelėje.

Iš pateiktos lentelės galima pastebėti, jog Nadalio kriterijaus nustatymui buvo atlikta 16 modelio bandymų jų važiavimų virtualioje aplinkoje, keičiant pakabos standumo ir bendros masės parametrus. Tokiu būdu įvertinta ne tik pakabos, tačiau ir vagono masės įtaka šio kriterijaus reikšmių kitimui. 1 lentelėje pateiktų rezultatų grafinis vaizdavimas pateiktas 8 paveiksle.



6 pav. Skersinių kėbulo svyravimų amplitudžių priklausomybė nuo vagono pakabos standumo ir esant skirtingoms vagono masėms



7 pav. Skersinių kėbulo svyravimų pagreičių priklausomybė nuo vagono pakabos standumo ir esant skirtingoms vagono masėms

1 lentelė. Nadalio kriterijaus reikšmės

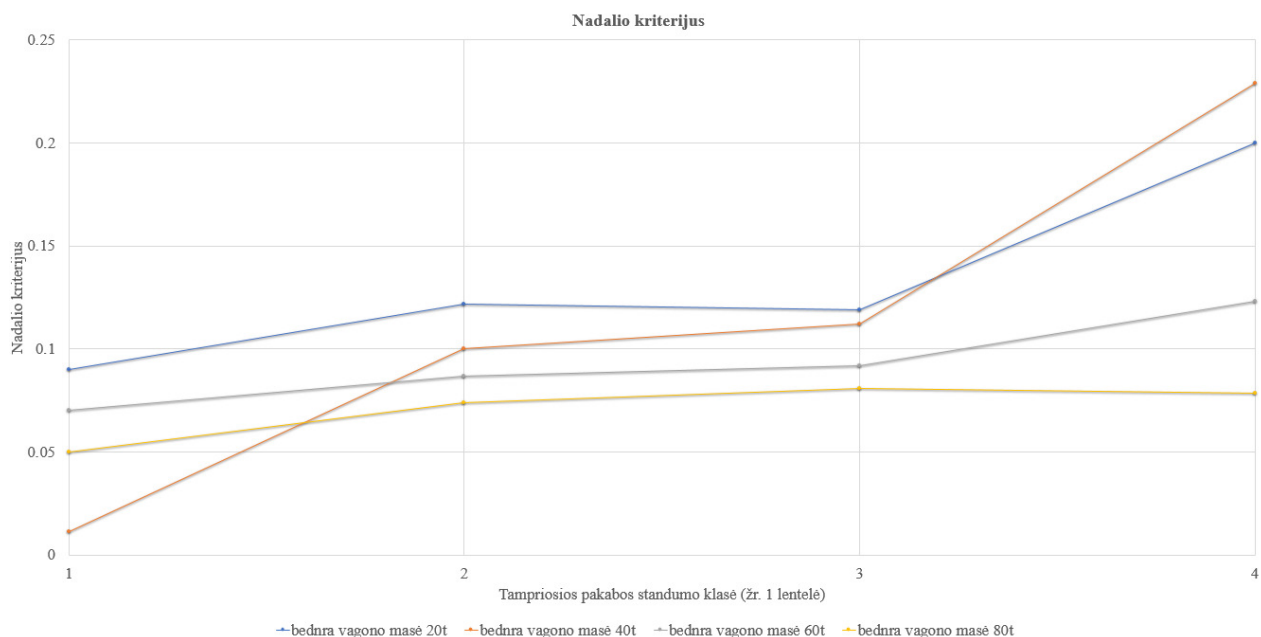
Nadalio kriterijus	Pakabos spyruoklių standumas, kN/m (standumo klasė)	Vagono masė, t
0,09	$k_v - 200, k_s - 210^{(1)}$	20
0.0114		40
0.07		60
0.05		80
0.1219	$k_v - 400, k_s - 410^{(2)}$	20
0.1		40
0.0868		60
0.074		80
0.1189	$k_v - 600, k_s - 610^{(3)}$	20
0.112		40
0.0918		60
0.0806		80
0.1998	$k_v - 800, k_s - 810^{(4)}$	20
0.2292		40
0.123		60
0.0786		80

Išvados

Išnagrinėjus gautų rezultatų reikšmes, pateiktas 1 lentelėje ir sudarytame Nadalio kriterijaus priklausomybės nuo pakabos tampriųjų elementų standumo ir vagono masės grafike (8 pav.), galima teigti, kad nei vienu bandomojo važiavimo atveju Nadalio kriterijaus ribinė reikšmė (0,85) nepasiekta ir visų bandomųjų objektų eksploatacija yra saugi. Tačiau didinamas pakabos tampriųjų elementų standumas didina Nadalio kriterijaus reikšmes.

1. Pakabos standumo parametrų didėjimas yra neišvengiamas tuščio vagono eksploatacijos sąlygomis, nes pakabos standumą padidinus 4 kartus, vagono vertikalūs svyravimai:

- a. padidėjo 0,0006 m, kai vagono masė 20 t;
- b. sumažėjo 0,0023 m, kai vagono masė 80 t.



8 pav. Tuščio keturašio vagono Nadalio kriterijus

2. Tampriųjų pakabos elementų įtaka vertikalųjų kėbulo poslinkių amplitudėms ženkliai pasireiškia didinant riedmens masę. Minėtąjį parametą padidinus 4 kartus, vertikalųjų kėbulo svyravimų amplitudė kinta:

- a. 0,0063 m, kai spyruoklių standumas k_v – 200 kN/m, k_s – 210 kN/m;
- b. 0,0034 m, kai k_v – 800 kN/m, k_s – 810 kN/m.

3. Pakabos standumo parametų didėjimas priverčia mažėti kėbulo vertikaliosios svyravimo pagreičius. Keičiant pakabos spyruoklių standumą nuo k_v – 200 kN/m, k_s – 210 kN/m iki k_v – 800 kN/m, k_s – 810 kN/m vertikalųjų kėbulo svyravimų pagreičiai sumažėja:

- a. $0,0555 \text{ m/s}^2$, kai vagono masė 20 t;
- b. $0,101 \text{ m/s}^2$, kai vagono masė 40 t;
- c. $0,126 \text{ m/s}^2$, kai vagono masė 60 t;
- d. $0,0638 \text{ m/s}^2$, kai vagono masė 80 t.

4. Tampriųjų pakabos elementų standinimas, didina skersinius kėbulo poslinkius. Šis, neigiamas reiškinys, pasireiškia tada, kai vagono bendra masė didėja. Spyruoklių standumo parametrus padidinus 4 kartus, skersinių kėbulo poslinkių reikšmės padidėjo:

- a. 0,0027 m – kai vagono masė 20 t;

- b. 0,177 m – kai vagono masė 80 t.

5. Keičiant pakabos spyruoklių standumą (nuo k_v – 200 kN/m, k_s – 210 kN/m iki k_v – 800 kN/m, k_s – 810 kN/m) vagono skersinių svyravimų pagreičių reikšmės padidėjo:

- a. $0,91 \text{ m/s}^2$, kai vagono masė 20 t;
- b. $0,69 \text{ m/s}^2$, kai vagono masė 80 t.

6. Didėjantis pakabos tampriųjų elementų standumas turi neigiamos įtakos tuščio vagono vertikaliesiems kėbulo poslinkiams, o didėjanti vagono masė minėtąsias reikšmes verčia mažėti.

7. Vertikalūs vagono kėbulo poslinkių pagreičiai mažėja didinant pakabos tampriųjų elementų standumo parametrus.

8. Didėjant pakabos standumui, nepriklausomai nuo vagono masės, vagono kėbulo skersinių poslinkių ir jų pagreičių reikšmės linkę didėti.

9. Nadalio kriterijaus reikšmės priklausomos ir nuo vagono masės ir nuo jo pakabos tampriųjų elementų standumo. Didėjanti masė (nuo 20 t iki 80 t) minėtojo kriterijaus reikšmę padidina 2.1 karto. 4 kartus padidintas pakabos standumas šią reikšmę padidina 2.6 karto.

Literatūra

- Balevičius, V.; Steišūnas, S.; Bureika, G. 2014. Prekinių vagonų pakabos parametų įtakos važiavimo tolygumui tyrimas 2014. In *Science – future of Lithuania, Civil and transport engineering, Aviation technologies*. ISSN 2029-2341. 6(5): 538–545.
- Bazaras, Ž.; Dundulis, R. 1996. *Vagonai ir konteineriai*: mokomoji knyga. Kaunas: Technologija.
- Bureika, G.; Mayamlin, S.; Leonas, P.; Bogdevičius, M. 2009. Determination of the dynamic characteristics of freight wagons with various bogie, *Transport* 30(1): 88–92. ISSN 1648-4142.
- Petrenko, V. 2013. Railway accident investigation using computer simulation modelling, in *The 8th International Conference TRANSBALTICA 2013: selected papers*, 6–8 May 2013, Vilnius, Lithuania. Vilnius: Technika, p. 160–165.
- Podagėlis, I. 2006. *Geležinkelių inžinerija: viršutinė kelio konstrukcija: mokomoji knyga*. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius: Technika, p. 5, 25.

Steišūnas, S.; Bureika, G.; Liudvinavičius, L. 2013. Survey of assessment methods of rolling-stock chassis hunting and derailment processes, in *The 8th International Conference TRANSBALTICA 2013: selected papers*, 9–10 May 2013, Vilnius, Lithuania. Vilnius: Technika, p. 218–224.

Steišūnas, S.; Bureika, G. 2014. Study of freight wagon running dynamic stability taking into account the track stiffness variation. In *Transport problems = Problemy transport* 9(4): 131–143. ISSN 1896-0596.