



16-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminės konferencijos
TRANSPORTO INŽINERIJA IR VADYBA,
vykusios 2013 m. gegužės 8 d. Vilniuje, straipsnių rinkinys

Proceedings of the 16th Conference for Junior Researchers 'Science – Future of Lithuania'
TRANSPORT ENGINEERING AND MANAGEMENT, 8 May 2013, Vilnius, Lithuania

Сборник статей 16-й конференции молодых ученых «Наука – будущее Литвы»
ИНЖЕНЕРИЯ ТРАНСПОРТА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК, 8 мая 2013 г., Вильнюс, Литва

KELIO NELYGUMŲ ĮTAKA AUTOMOBILIO JUDĖJIMUI

Loreta Levulytė¹, Jan Uzialo², Vidas Žuraulis³, Edgar Sokolovskij⁴

^{1, 2, 3, 4}Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: ¹loreta.levulyte@vgtu.lt, ²uzialo.jan@gmail.com, ³vidas.zuraulis@vgtu.lt, ⁴edgar.sokolovskij@vgtu.lt

Santrauka. Straipsnyje analizuojama kelio dangos nelygumų įtaka automobilio pakabai ir neamortizuotoms masėms. Apžvelgiami automobilio ir kelio profilio analizei taikomi modeliai ir metodikos. Nagrinėjama kokius vertikalius pagreičius įgyja ratas žiemos sąlygomis esant specialiu profilometru išmatuotiems kelio nelygumams. Automobilio elementų judėjimo dėsninčiai tirti atlikus važiavimo bandymus 20, 60 ir 80 km/h greičiams. Taip pat analizuojami pakabos eigos priklausomybės nuo kelio dangos nelygumų aukščio, rato įgyjamų vertikalųjų pagreičių dėsninčiai nustatant rato kontakto su keliu netikslaus atkartojimo atvejus. Straipsnio pabaigoje pateikiami apibendrinti tyrimo rezultatai ir išvados.

Reikšminiai žodžiai: ratas, kelio nelygumai, greitis, pagreitis, pakaba.

Įvadas

Pastovus automobilio ratų sukibimas su kelio danga yra vienas iš svarbiausių faktorių užtikrinančių eismo saugumą ir automobilio stabilumą. Eismo saugumo efektyvumui vertinti naudojamas avaringumo koeficientas, įvertinantis kelio dangos nelygumus (Филиппов *et al.* 2009). Pastovus automobilio padangos sukibimas su kelio danga galimas tik idealiais atvejais, kai kelio danga yra lygi ir pakankamo šiurkštumo. Realiomis sąlygomis sukibimas su kelio danga kinta, jo kitimas priklauso nuo kelio dangos lygumo, meteorologinių sąlygų, važiavimo greičio, pakabos konstrukcijos. Rato sąveikos su kelio danga analizė yra ypač svarbi, nes ratas yra elementas, per kurį automobilis sąveikauja su kelio danga.

Automobiliui važiuojant keliu jo amortizuotos ir neamortizuotos masės įgyja skirtingus pagreičius dėl kurių atsiranda automobilio svyravimai. Nuo rato įgyjamų pagreičių, padangos kontakto ploto su kelio danga priklauso ne tik eismo saugumas, bet automobilio važiavimo savybės. Automobilį veikiančias jėgas galima suskirstyti į tris dedamąsias: išilginę (X), skersinę (Y) ir vertikalią (Z). Analizuojant rato ir kelio kontaktą, svarbiausios yra charakteristikos, kurias sukelia vertikaliosios jėgos (Dimaitis 2000).

Straipsnyje analizuojama kelio dangos nelygumų įtaka automobilio pakabai ir neamortizuotoms masėms, nagrinėjama kokius vertikalius pagreičius įgyja ratas žiemos sąlygomis ant tam tikrų kelio dangos nelygumų priklausomai nuo važiavimo greičio. Analizuojami pakabos eigos priklausomybės nuo kelio dangos nelygumų aukščio ir rato įgyjamų vertikalųjų pagreičių dėsninčiai.

Mokslo publikacijų apžvalga

Automobilio stabilumui ypač svarbi kelio ir padangos sąveika. Nagrinėjant šią sąveiką kuriami įvairūs kelio dangos – automobilio matematiniai modeliai, kuriais remiantis bandoma kuo tiksliau aprašyti kelio nelygumų įtaką automobilio judėjimui (Rouillard 2008).

Automobiliui judant nelygia kelio danga įvyksta atsitiktinis automobilio ratų su kelio danga kontakto praradimas. Kelio dangos paviršius gali būti modeliuojamas baigtiniais elementais, kurių kiekviename mazge parenkamas tam tikras kelio dangos paviršiaus nelygumo aukštis, paviršiaus ir automobilio rato sukibimo koeficientai rato išilgine ir skersine kryptimi. Modeliavimo rezultatai – grafikai, iliustruojantys automobilio judėjimo dinamines savybes kelyje stabdymo režimu įvairiomis eismo sąlygomis bei automobilio vertikaliosios judėjimo dinamiš-

kumą važiuojant per greičio mažinimo kalnelį (Prentkovskis ir Bogdevičius 2002). Pagrindinis kelio charakteristikos kriterijus skaičiuojant kelių transporto priemonių einamąsias išlaidas yra kelio lygumas (Miškinis 2002). Transporto ir kelių tyrimų institutas atlieka kelių tinklo tyrimus, o lygumas yra vienas pagrindinių kelių kokybės rodiklių (Celko *et al.* 2009). Kelio lygumui įvertinti naudojamas tarptautinis kelio nelygumo indeksas (International Roughness Index (IRI)). Straipsnyje Celko *et al.* (2009) apibendrintai aprašoma transporto priemonės judėjimo ir kelio nelygumo, įvertinto IRI indeksu, priklausomybė. Analizuojama nelygumų įtaka automobiliui judant įvairiomis kelio dangomis, taip pat teigiama, kad kelio dangos lygumas yra vienas iš pagrindinių kelio kokybės rodiklių įtakojančių eismo saugumą ir važiavimo komfortą bei pabrėžiama, kad kelio nelygumai įtakoja padangos ir rato tarpusavio sąveikos kontakto plotą.

Disertacijoje Schmeitz (2004) aprašo padangos imitacinį modelį pagal kurį galima nustatyti padangos dinamines charakteristikas jai judant nelygia kelio danga. Aprašomas rato modelis veikia imituojamame trimačiame kelio dangos profilyje, iš kurio nustatomas dinaminis padangos atsakas į kelio dangos nelygumus.

Straipsnyje Dimaitis ir Sapragonas (2000) kelio nelygumai aprašomi išskiriant kelio nelygumų bangas, kurių ilgis yra 0,1 – 100 m. Tyrimais nustatyta, kad minimalūs matuojamos atkarpos ilgiai keliams su lygiomis ir vidutinės kokybės dangomis – 50 m, o nelygioms dangoms – 250 m. Kelio paviršiaus būklė (nelygumai, danga, sniegas, lietus ir t.t.) įtakoja automobilio stabilumą, o nuo jo priklauso automobilio judėjimas. Nuo kelio dangos lygumo priklauso važiavimo greitis, saugumas ir patogumas. Didžiausią įtaką kelio lygumo kitimui turi jos dangos konstrukcijos stipris, sunkiųjų transporto priemonių eismo intensyvumas ir ašių masė per visą eksploataavimo laikotarpį. Pagrindinę neigiamą įtaką Lietuvos keliams daro perkrauti kroviniai automobiliai, viršijantys leistinąsias ašių apkrovų normas. Statinio ir dinaminio krovinių automobilių svėrimo įrenginiai ir technologija nagrinėjami (Sokolov ir Sivilevičius 2011) straipsnyje.

Teksaso transporto instituto mokslininkai (Mounce ir Bartoskewitz 2008) tyrė akvalplaniravimo įtaką automobilio stabilumui. Daugybės eismo įvykių priežastis yra transporto priemonės stabilumo dėl sukibimo su kelio paviršiumi praradimas, o viena iš priežasčių stabilumui prarasti yra akvalpaniravimas. Geros kokybės kelyje neturi susidaryti didesnės vandens sankaupos, tačiau ilgai nenuiteka. Neigiamas vandens efektas stabilumui pasi-

reiškia tuomet, kai vandens pleišto jėga ratą pilnai pakelia nuo kelio dangos (Kirka *et al.* 2001).

Dauguma autorių nagrinėja kelio nelygumus arba automobilio dinamiką atskirai, tačiau norint įvertinti kelio nelygumų įtaką automobilio judėjimui, reikia kompleksiskai įvertinti sąveiką tarp kelio dangos ir automobilio rato, kaip pirminio sąveikaujančio elemento su kelio danga, nes nuo rato savybių (neamortizuota masė) absorbuoti kelio nelygumus (esant tam tikriems važiavimo greičiams) priklauso pačio rato sukibimo su kelio danga koeficientas bei kėbulo (amortizuotų) masių vertikalios dinamikos (komforto) savybės, kurios gali būti įvertinamos pagal ratą ir kėbulą veikiančius pagreičius bei pakabos eigos kitimus.

Teorinis rato ir kelio sąveikos įvertinimas

Rato reakcija į kelią automobilio judėjimo metu nerpertraukiamai keičiasi ir tai įtakoja rato reakcijas skersine, išilgine ir vertikalia kryptimis. Automobilio rato ir kelio sąveiką charakterizuoja jėgos vektorius R . Daugeliu atvejų jėgos vektorius susideda iš trijų dedamųjų (Тарасик 2006):

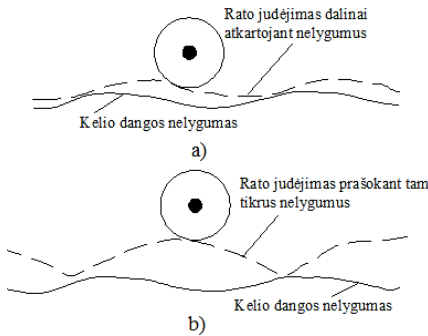
$$\vec{R} = \vec{R}_x + \vec{R}_y + \vec{R}_z, \quad (1)$$

čia: R_x , R_y , R_z – atitinkamai jėgos, veikiančios išilgine, skersine ir vertikalia kryptimis.

Vertikali rato eiga, kai ratas kyla arba leidžiasi, gali būti kelių tipų ir priklauso nuo kelio nelygumų aukščio, padangų standumo savybių, pločio bei pakabos dinaminės savybių ir konstrukcijos. Galima išskirti du pagrindinius rato judėjimo per nelygumus atvejus: kai ratas dalinai atkartoja kelio nelygumus (1 pav. a) ir kai juos prašoka (1 pav. b). Padanga, pasiekusi didžiausią nelygumo aukštį, kitą nelygumą tarsi prašoka (smarkaus smūgio tipas), pašokdama iki taško, nuo kurio rato vertikali eigos amplitudė mažėja, kaip parodyta 1 pav., b. Šiuo atveju kyla grėsmė eismo saugumui, nes prarandamas rato sukibimas su kelio danga, kuris gali sukelti automobilio slydimą kai papildomai veikia skersinės jėgos važiuojant posūkyje, esant kelio nuolydžiui ar pučiant stipriam šoninio vėjui.

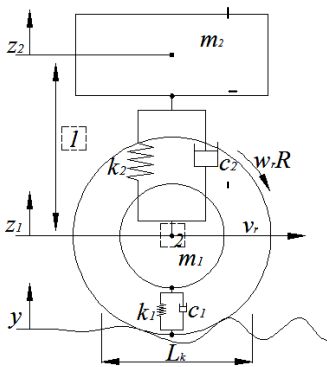
Esant mažesniai vertikaliai žadanimui (kelio nelygumui) rato vertikali eiga mažesnė ir ratas su tam tikru vėlavimu atkartoja kelio nelygumą (1 pav., a). Galima daryti prielaidą, kad rato gebėjimas atkartoti kelio paviršių priklauso nuo važiavimo greičio, nelygumų išsidėstymo bei aukščio. Dalį kelio nelygumų dėl savo elastingumo kompensuoja padanga, kuri esant staigiam ir nedideliu, lygint su jos spinduliu, nelygumui sugeba

momentiška deformuotis, o pravažiuojus nelygumą su-
spėja atsistaiyti. Tačiau kuo geresnį rato prispaudimą prie
kelio sąlygoja pakabos elementai. Spyruoklės gebėjimas
kuo greičiau spausti ratą atsiradus erdvei po juo ir amorti-
zatoriaus slopinimo greitis yra optimizuojami parametrai
reguliuojant automobilio komforto bei stabilumo savybes.



1 pav. Rato vertikalios eigos tipai

Sudėtingą rato ir kelio paviršiaus sąveiką galima
įvertinti nagrinėjant automobilio ketvirčio modelį
(2 pav.). Pateikto modelio pagalba analizuojamos sąsajos
tarp kelio nelygumų ir automobilio dinamikos. Dinamai-
kai įvertinti naudoti 2 pav. 1 ir 2 pozicijomis pažymėti
jutikliai.



2 pav. Automobilio ketvirčio dinaminis modelis: 1–pakabos
eigos jutiklis; 2 – rato pagreičio jutiklis; m_1 – automobilio rato
ir ašies masė, kg; m_2 – ketvirčio automobilio kėbulo masė, kg;
 k_1, k_2 – atitinkamai padangos ir pakabos standumo koeficientai,
N/m; c_1, c_2 – atitinkamai padangos ir pakabos slopinimo
koeficientai, Ns/m; w_r – kampinis greitis, rad/s; z_1, z_2 –
neamortizuotos ir amortizuotos masės vertikalūs poslinkiai,
mm; y – kelio profilio funkcija nuo laiko.

Naudojant ketvirčio automobilio dinaminį modelį
galima aprašyti amortizuotų ir neamortizuotų masių grei-
čius, pagreičius ir poslinkius lygtimis:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{z}_1 + k_1(z_1 - y) + c_1(\dot{z}_1 - \dot{y}) &= 0 \\ m_2 \ddot{z}_2 + k_2(z_2 - z_1) + c_2(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Remiantis literatūra (Bogdevičius 2012), kai išma-
tuotas kelio nelygumų aukštis $z(x_i)$ yra matuojamas tam
tikruose kelio taškuose x_i , kelio profilio aukštis gali būti
aprašomas formule:

$$z(x_i) = \frac{1}{NK} \sum_{i=1}^{i+NK-1} z(x_j), \quad (3)$$

čia: NK – taškų skaičius, kuriuose skaičiuojama nelygu-
mų aukščio vidutinė reikšmė.

Kitas parametras, įvertinantis kelio nelygumus, yra
IRI indeksas, kuris gerai koreliuoja su automobilio kėbu-
lo pagreičiais (komforto kriterijus) ir rato apkrovimu.
Matematiškai IRI indeksas apskaičiuojamas:

$$IRI = \frac{1}{L} \int_0^{L/v} |\ddot{z}_2 - \ddot{z}_1| dt, \quad (4)$$

čia: v – automobilio judėjimo greitis, km/h; L – matuoja-
mo kelio ilgis, m.

Kelio nelygumo aukštis po padanga lygus:

$$z(x) = \frac{1}{L_k} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} z(y) dy, \quad (5)$$

čia: L_k – kontakto ilgis; x – vertikali koordinata;
čia: $x_{\min} = x - \frac{L_k}{2}$; $x_{\max} = x + \frac{L_k}{2}$.

Kai automobilis juda greičiu v ir kelio profilio nely-
gumai registruojami kaip laiko funkcija $z(t)$, įvertinus,
kad $t = x/v$, tuomet išraišką (4) galima užrašyti:

$$z(t) = \frac{1}{L_k} \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} z(t) dt, \quad (6)$$

čia: t – laikas, s; $t_{\min} = t - \frac{L_k}{2v}$; $t_{\max} = t + \frac{L_k}{2v}$.

Padangos lyginamosios savybės gali nuslopinti
aukšto dažnio kelio profilio virpesius iki tam tikro ribinio
dažnio:

$$\omega_{rib} = \frac{2\pi v}{L_k}, \quad (7)$$

Iš išraiškos (6) matyti, kad ribinis dažnis tiesiog
proporcingas judėjimo greičiui ir atvirkščiai proporcingas
kontakto ilgiui. Kai $L_k \rightarrow 0$ (kontakto taškas), ribinis
dažnis $\omega \rightarrow \infty$, tai kai padanga praleidžia visus kelio nely-
gumų sukeltus dažnius. Didėjant kontakto ilgiui, ribi-
nis dažnis mažėja t.y. slopinama vis didesnė aukšto
dažnio dalis.

Padangos ir kelio kontakto ploto ilgį L_k apytiksliai
galima nustatyti:

$$L_k = 2\sqrt{aH(D - aH)}, \quad (8)$$

čia: a – parametras, kinta intervale, $a = 0,1...0,11$; D – padangos išorinis skersmuo; H – padangos profilio aukštis.

Padangos ir kelio kontakto plotis priklauso nuo pačios padangos geometrinių parametru ir savybių bei važiavimo greičio.

Tyrimų metodika

Eksperimento metu buvo atlikti kelio dangos ir automobilio dinamikos tyrimai, kuriais buvo siekiama nustatyti rato pagreičius ir pakabos eigą bei palyginti jų atitiktą kelio dangos nelygumams. Tyrimas buvo atliktas abejomis važiavimo kryptimis kaip parodyta 2 pav. Tiriomojo ruožo ilgis – 100 m.



2 pav. Tiriamasis ruožas ir važiavimo kryptys

Pasirenkant eksperimentinį kelio ruožą buvo atsižvelgiama į tai, kad eksperimento sąlygos atitiktų realias važiavimo sąlygas. Kelio dangos nelygumams matuoti naudotas prietaisas „Merlin“, (3 pav.) skirtas automobilių kelių dangos nelygumų matavimui bei kitų prietaisų kalibravimui IRI skalėje.



3 pav. Nelygumų matavimo prietaisas „Merlin“

Šis prietaisas zondo pagalba fiksuoja vidutinį nukrypimą nuo menamos horizontalės, einančios per jo atramas. Kelio profilio ordinatės atskaitomos kas ketvirtadalį prietaiso rato žingsnio t.y. kas 0,395 m. Matavimo metodas pagrįstas matavimo skaičiumi t.y. tiriamo ruožo

ilgis turi būti toks, kad jame būtų ne mažiau 200 taškų. Gauti kelio dangos profilio ordinačių rezultatai į IRI skalę perskaičiuojami pagal „Merlin“ prietaisui sukurtą formulę (Cundill 1991):

$$IRI = 0,593 + 0.0471 \cdot D, \quad (9)$$

čia: D – matavimo duomenų dispersija (sklaidos dydis) (Uzialis 2012).

Automobilio dinaminiai bandymai atlikti tvarkingu standartiniu lengvuoju automobiliu „Toyota Avensis“, (2 pav.) kurio pagrindinės techninės charakteristikos pateikiamos 1 lentelėje.

1 lentelė. Bandymams naudoto automobilio „Toyota Avensis“ techninės charakteristikos

Pagaminimo metai	1999
Varančioji ašis	Priekinė
Automobilio kėbulo ilgis/plotis/aukštis	4490/1710/1425 mm
Ratų bazė	2630 mm
Ratų tarpvėžė	1480 mm
Prošvaisa	140 mm
Pakabos standumo koeficientas	20928,00 N/m
Pakabos slopinimo koeficientas	2354,40 Ns/m
Padangų parametrai	185/65 R15 H88, žieminės
Masė, tenkanti priekinei ir galinei ašiai (su vairuotoju)	750/540 kg

Pakabos eiga bandymų metu matuota vieliniu potenciometriniu jutikliu „Kuebler D8“, kuris fiksuoja linijinės eigos pokytį tarp amortizatoriaus apatinio ir viršutinio tvirtinimo taško. Jutiklio didžiausia matuojamos eigos geba 500 mm, jautrumas 20,0 mV/mm, didžiausiais matuojamas eigos pagreitis 85 m/s², masė 330 g. Rato vertikalus pagreitis matuotas talpinės varžos kitimo principu paremtu jutikliu „Kistler 8395A“, kurio pagreičio matavimo ribos ±50 G, jautrumas matuojant 100 Hz dažniu – 80 mV/G, ±5 %. Pagreičio jutiklio masė 30 g, todėl galima teigti, jis neįtakoja neamortizuotos masės (rato) inertiškumo charakteristikų. Duomenys iš jutiklių 100 Hz dažniu fiksuoti mobiliu surinkimo – apdorojimo įrenginiu „Corrsys Datron DAS-3“.

Tyrimo rezultatų įvertinimas

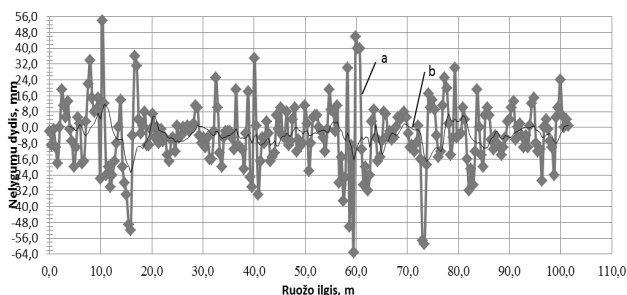
Kelio dangos nelygumas buvo matuotas automobilio važiavimo kryptimis, vėžėse. Kelio nelygumų įvertinimas pagal IRI, remiantis (8) formule pateiktas 2 lentelėje.

Eksperimento metu išmatuotą kelio ruožą pagal IRI indekso reikšmes galima įvertinti kaip vidutinio lygumo kelią. Kelio dangos nelygumų grafinis vaizdas pateiktas 4 pav.

2 lentelė. Kelio nelygumų įvertinimas pagal IRI

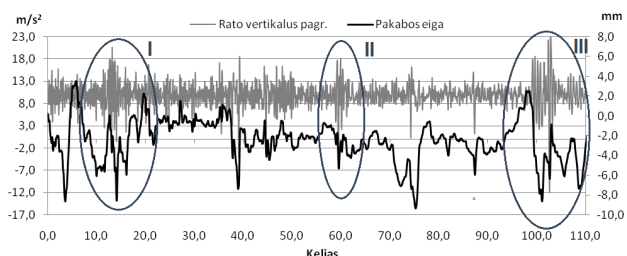
Parametras	Rezultatai	
	Dešinė	Kairė
Vėžė		
<i>D</i>	43	57
<i>IRI</i> , m/km	2,618	3,277

Kreivė *a* žymi eksperimento metu tiesiogiai išmatuotus kelio nelygumus taškuose, o kreivė *b* gauta įvertinus visus 350 išmatuotus kelio nelygumų taškus, išvedant apibendrintą kelio paviršiaus profilogramą. Ši kelio paviršiaus charakteristika naudojama lyginant automobilio elementų vertikalų judėjimą.

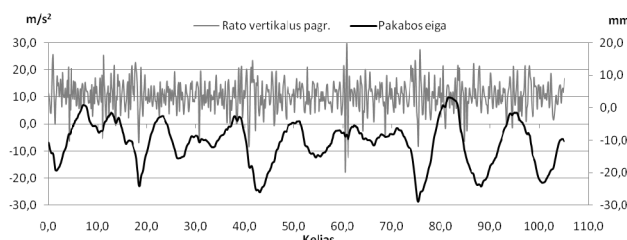


4 pav. Kelio dangos nelygumas po dešiniu ratu:
a– eksperimento duomenų kreivė; b – teorinė kreivė

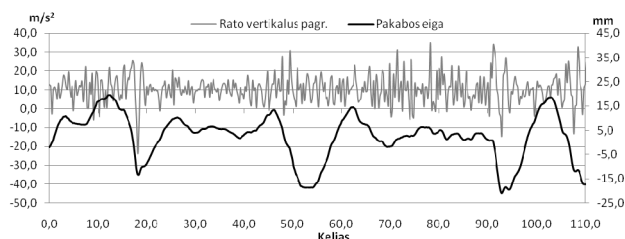
Eksperimentas buvo atliktas 20 km/h, 60 km/h ir 80 km/h greičiais. Bandymo metu gauti rezultatai grafiškai pateikti 5, 6 ir 7 pav.



5 pav. Rato vertikalus pagreitis ir pakabos eiga automobiliui važiuojant 20 km/h greičiu



6 pav. Rato vertikalus pagreitis ir pakabos eiga automobiliui važiuojant 60 km/h greičiu



7 pav. Rato vertikalus pagreitis ir pakabos eiga automobiliui važiuojant 80 km/h greičiu

Pastebima, kad važiuojant 20 km/h greičiu rato pagreičio kreivę galima sieti su kelio dangos nelygumų atkartojimu. Rato pagreitis fiksuojamas ribose tarp $-11,83 \text{ m/s}^2$ ir $23,77 \text{ m/s}^2$, kai per tirtą 100 m ilgio kelio ruožą, nelygumų aukštis pasiskirstęs ribose tarp -63 mm ir 54 mm . Rato pagreičio reikšmės atitinka nelygumo aukščio kryptis t.y. esant kelio dangos įdubimui išryškėja neigiamas pagreitis, o esant iškilimui – teigiamas. Tai reiškia, kad rato pagreičio ir kelio dangos nelygumų kryptys važiuojant 20 km/h greičiu sutampa (5 pav. I, II, III vaizdai). Lyginant pakabos eigą su kelio nelygumų aukščiu galima pastebėti, kad kai nėra ženklensnio kelio nelygumo aukščio pokyčio (5 pav., III vaizdas), pakabos eigos kryptis apytiksliai sutampa su kelio dangos nelygumų aukščio kryptimi. Tačiau atsiradus ženklensniam kelio nelygumo aukščiu, pakabos eiga vėluoja (nesuspėja) atkartoti kelio nelygumo krypties (5 pav. I vaizdas). Kai yra didesnių ir priešingos krypties nelygumų (5 pav. II vaizdas), tai matomas pakabos eigos sumažėjimas abejomis kryptimis.

Važiuojant 60 km/h greičiu, rato pagreičio kitimo dažnis mažėja ir jo maksimalios pikinės reikšmės išauga intervale nuo $-17,75 \text{ m/s}^2$ iki $29,60 \text{ m/s}^2$. Rato pagreičio ir kelio nelygumo kryptys, kaip ir esant 20 km/h greičiui, sutampa. Galima daryti prielaidą, kad greičiui didėjant ratas tiksliai neatkartoja kelio nelygumo aukščio pokyčių. Ženklesnės pakabos vertikalios eigos reikšmės pastebimos, kai yra didesni negu $\pm 10 \text{ mm}$ aukščio nelygumai.

Važiuojant 80 km/h greičiu rato vertikalus pagreičio reikšmės išauga nuo $-23,96 \text{ m/s}^2$ iki $34,67 \text{ m/s}^2$, pagreičio kitimo dažnis dar sumažėja ir rato pagreičio koreliacija su kelio paviršiaus nelygumais yra mažesnė. Nesutapimus įtakoja ribotas amortizatoriaus slopinimo greitis, kuris didėjant važiavimo greičiui sąlygoja pasikeitusį rato judėjimą. Ženklesnę pakabos vertikalią eigą lemia tik didesni kelio nelygumai, tai matosi lyginant 4 pav. teorinę kelio nelygumų kreivę su kėbulo eiga (7 pav.). Važiuojant 80 km/h greičiu pakabos eiga kinta (reaguoja) nuo ne mažesnių kaip $\pm 25 \text{ mm}$ kelio nelygumų aukščio.

Išvados

1) Važiuojant 60 km/h greičiu pakabos eiga kinta nuo ne mažesnių kaip ± 10 mm aukščio nelygumų, o važiuojant 80 km/h greičiu – nuo ne mažesnių kaip ± 25 mm. Taigi, didėjant važiavimo greičiui sumažėja rato savybė reaguoti į kelio nelygumus, tą parodo vertikalaus rato pagreičio ir pakabos eigos kreivių dažnio kitimas.

2) Automobilio greičiui padidėjus iki 80 km/h, pagal ratų dinamikos savybes didėja jo riedėjimo spindulys, kuris įtakoja mažesnę padangos vertikalią deformaciją ir taip sumažėja ne tik padangos kontakto su keliu plotas, bet ir kontakto trukmė, todėl ratas yra linkęs tiesinti savo vertikalaus judėjimo trajektoriją, kas mažina rato sukibimą.

3) Didėjant važiavimo greičiui didėja pikinės rato vertikalių pagreičių reikšmės: teigiamos reikšmės esant 60 km/h ir 80 km/h greičiui padidėja atitinkamai 25% ir 46%, o neigiamos reikšmės esant 60 km/h greičiui padidėja 50%, o esant 80 km/h greičiui netgi padvigubėja. Didesnį neigiamų pagreičio pikinių reikšmių atsiradimą kelio nelygumo keterą.

4) Gautus tyrimų rezultatus galima panaudoti vertinant kelio nelygumų įtaką automobilio judėjimui, formuojant kelių priežiūros principus priklausomai nuo kelio ruože leistino važiavimo greičio, automobilio važiavimo komforto analizei.

Padėka

Straipsnio autoriai dėkoja Vilniaus Gedimino technikos universiteto Automobilų transporto katedrai ir VĮ „Transporto ir kelių tyrimo institutas“ už suteiktą galimybę pasinaudoti matavimo įranga.

Literatūra

- Bogdevičius, M., 2012. *Transporto priemonių dinamika. Mokomoji knyga*. Vilnius: Technika. 205 p.
- Celko, J., Decky M., Kovas M., 2009. An anglysis of vehicle – road surface interaction for classification of IRI in the of slovak PMS. *Maintenance and Reliability*. 1: 15–21.
- Cundill, M.A. 1991. The Merlin low – cost road roughness measuring machine, Transport and road research laboratory. Research Report 301. 25 p. ISSN 0266-5247.
- Dimaitis, M., Sapragnas J., 2000. Kelių dangos aprašymas modeliuojant automobilių pakabas. *Transportas – Transport Engineering*. 15 (2): 72–76.
- Kirka, A. Jurkauskas, A.; 1998. *Automobilio eksploatacinės savybės. Vadovėlis*. Kaunas. 205 p.
- Miškinis, D., 1999. Kelio charakteristikų įtaka automobilių atšarginėms dalims. *Transportas – Transport Engineering*. 14 (4): 180–183.

Mounce, J. M., Bartoskewitz, R. T., 1993. Hydroplaning and roadway tort liability. *Transportation Research Record*: 177–124. ISSN: 0361-1981.

Prentkovskis, O., Bogdevičius M., 2002 Dynamics of a motor vehicle taking into consideration the interaction of wheels and pavement surface. *Transport*. 17 (6): 244–253.

Rouillard, V., 2008. Generating road vibration vest schedules from pavement profiles for packaging optimization. *Packaging Technology And Science*: 501–514. DOI: 10.1002/pts.840.

Schmeitz, A.J.C. 2004. *A semi empirical three dimensional model of pneumatic tyre rolling over arbitrarily uneven road*. Netherlands.295. ISBN:90 9018380-9.

Sokolov, J., Sivilevičius, H., 2011. Sunkiųjų automobilių sąveikos su kelio danga ir jų įtakos konstrukcijos sluoksniams analizė. *Mokslas Lietuvos ateitis*. 3(2): 103–109. DOI:10.3846/mla.2011.040.

Uzialis, J., 2012. Meteorologinių sąlygų įtakos transporto priemonės rato sukibimo su danga parametrų analizė. *Technologijos mokslo darbai vakarų Lietuvoje*: 328–343. ISSN 1822-4652.

Тарасик, В. П.; 2006. *Теория движения автомобиля: Учебник для вузов*. Санкт–Петербург. БХВ – Петербург. 473 с. УДК 629.113(075.8)

Филиппов, В. В.; Смирнова, Н. В.; Кияшко, Д. И. 2009. *Оценка влияния неровностей дорожных покрытий на безопасность движения, Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета* 47: 63–65.