

IŠILGINIO KELIO PROFILIO ĮTAKA AUTOMOBILIO
LĖTĖJIMO PAGREIČIUI

Vidas Žuraulis

*Vilniaus Gedimino technikos universitetas
El. paštas vidas.zuraulis@vgtu.lt*

Santrauka. Straipsnyje analizuojama kelio išilginio profilio įtaka automobilio stabdymo efektyvumui, kuris įvertinamas lėtėjimo pagreičio reikšme. Atliekant teorinius skaičiavimus taikomos skirtingos formulės, todėl siekiant gauti kuo tikslesnius rezultatus, buvo atliekami eksperimentiniai stabdymai skirtingo nuolydžio keliuose. Lėtėjimo pagreitis, kaip vienas svarbiausių eismo saugumo parametrų, priklauso nuo stabdžių sistemos techninės būklės, kelio sąlygų ir nuo kitų automobilio konstrukcinių ir dinaminių ypatybių. Išilginis kelio profilis gali gerokai paveikti automobilio valdomumą, nes vyksta svorio persislinkimas, atsiranda papildomos kelio varžos, dėl ko pasikeičia bendras automobilio balansas ir nuo tam tikrų kritinių reikšmių keičiasi dinaminių charakteristikų pobūdis. Patikslinus lėtėjimo pagreičio priklausomybę nuo išilginio kelio profilio, rezultatai gali būti pritaikomi tiriant eismo įvykius, optimizuojant eismo reguliavimo priemonių veikimą, diegiant pažangias automobilių aktyviosios saugos sistemas.

Reikšminiai žodžiai: išilginis kelio profilis, lėtėjimo pagreitis, stabdymo jėga, svorio persislinkimas, eismo saugumas.

Įvadas

Siekiant užtikrinti saugų eismą keliuose išskirtinį dėmesį transporto priemonių gamintojai skiria stabdžių sistemai. Šiuo tikslu įdiegiamos stabdžių antiblokavimo, jėgos pasiskirstymo, elementų nusidėvėjimo kontrolės, stabdžių aktyvavimo prieš galimą avarinę situaciją ir kitos sistemos. Europos Sąjungoje registruojamoms naujoms transporto priemonėms taikomi Europos Tarybos direktyvos 71/320/EB reikalavimai. Ši direktyva reglamentuoja atskirų kategorijų transporto priemonių ir jų priekabų stabdžiams bei jų tikrinimui keliamus reikalavimus, taip pat stabdžių sistemų ir jų tikrinimo reikalavimus.

Stabdymo efektyvumas tiesiogiai priklauso nuo važiuojimo greičio, tačiau net ir esant tam pačiam greičiui, bet skirtingoms kelio sąlygoms, stabdymo charakteristikos gali labai skirtis (Sokolovskij 2007). Taigi kelio įtaka yra išorinis faktorius, darantis didelę įtaką stabdymo efektyvumui, ir nors gamintojai nuolatos tobulina stabdžių sistemas, tačiau natūralūs fizikos dėsniai nenustoja veikę. Siekiant nuolatos gerinti eismo saugumą, būtina visą dėmesį skirti ne tik automobiliui tobulinti, bet ir keliui įvertinti.

Kelio paviršius, kuriuo rieda transporto priemonės, skiriasi dangos tipu, šiurkštumu ir geometriniais parametrais. Vienas iš tokių parametrų, stipriai veikiančių stabdymo kelią, yra išilginiai vertikalūs nelygumai. Reljefas verčia prie to pritaikyti transporto infrastruktūrą ir transporto priemonių technologijas (Bureika 2008; Bogdevičius *et al.* 2004). Net

ir technologiškai moderni kelių statybos technika dažnai nepajėgia žemės paviršiaus pilnutinai pritaikyti saugiam judėjimui. Net ir esant tokiai galimybei, investicijų kaina viršytų galimas finansines galimybes. Todėl automobiliais dažnai tenka važiuoti tam tikromis įkalnėmis ar nuokalnėmis. Transporto priemonių stabdžių efektyvumas yra tikrinamas ir esant kelio nuolydžiui. Tokie tikrinimai atliekami visų klasių automobiliams ir O₄ klasės priekaboms. Tikrinama važiuojant 30 km/h greičiu pakrauta transporto priemone, stabdant 6 proc. nuolydžio 6 kilometrų kelio atkarpoje.

Keliuose pasitaikantys vertikalūs nuolydžiai (įkalnės ir nuokalnės) nėra didelė kliūtis ir ją automobilis gali įveikti, tačiau tai yra didesnio pavojaus zona, nes pablogėja matomumas ir keičiasi automobilio valdymo charakteristikos. Tiek įsibėgėjimo, tiek stabdymo savybės įkalnėse ir nuokalnėse gerokai skiriasi, todėl siekiant užtikrinti eismo saugumą yra ribojamas greitis.

Atliekant stabdymo tyrimus ilgose kelio atkarpose su nuolydžiu, buvo nustatyta iki trijų kartų didesnis avaringumas. Viena iš pagrindinių priežasčių yra labiau kaitantys stabdžių darbiniai paviršiai. Pasiiekus 400–460 °C temperatūrą standartinių stabdžių efektyvumas sumažėja 20–25 proc., o esant dar didesnei temperatūrai stabdymo jėga nukrenta iki pavojingos ribos. Tyrimų rezultatais siekta atkreipti kelių projektuotojų dėmesį į kelio nuolydžio įtaką eismo saugumui (Enhui *et al.* 2010).

Stabdymo efektyvumui didelę įtaką turi tiek sistemos darbinių paviršių (stabdžių diskai, trinkelės) būklė, tiek hidraulinės ar pneuminės sistemos tinkamas veikimas. Sistemos nesandarumas gali sukelti ne tik blogesnę stabdymą, bet ir stabdymo netolygumą atsiradus nesandarumui viename iš kontūrų, o tai komplikuoja automobilio valdomumą (Straky *et al.* 2002).

Tinkamas pradinio greičio nustatymas pagal stabdymo parametrus yra pagrindinis veiksnys tiriant eismo įvykius, todėl kiekvienas toks veiksnys pagal reikšmingumo lygmenį yra svarbus ir turi būti įvertinamas kuo tiksliau (Nagurnas *et al.* 2007).

Problema

Įvairioje transporto priemonių dinaminėse skaičiavimų literatūroje lėtėjimo pagreičiui skaičiuoti dažnai pateikiamos skirtingos formulės – vertinami skirtingi parametrai ir procesai:

$$j' = j \pm i \cdot g, \quad (1)$$

$$j'' = g \left(\frac{\varphi}{k} \cos \alpha \pm \sin \alpha \right), \quad (2)$$

$$j''' = g \left(f \cos \alpha \pm \sin \alpha + \frac{P_{st}}{m \cdot g} \right), \quad (3)$$

čia: j – lėtėjimo pagreitis, esant lygiam kelio paviršiui, m/s^2 , nustatytas atlikus bandomuosius stabdymus lygiame kelyje; vidutinė reikšmė $j = 8,4 m/s^2$; j' , j'' , j''' – lėtėjimo pagreitis, gautas taikant skirtingas skaičiavimo metodikas; i – kelio nuolydžio rodiklis įkalnei su pliuso ženklu +, nuokalnei su minuso ženklu –; g – laisvojo kritimo pagreitis, $g = 9,81 m/s^2$; φ – sukibimo koeficientas, kuris esant sausam, lygiam asfaltui $\varphi = 0,85$; k – stabdymo efektyvumo koeficientas, taikomas lengvajam automobiliui, kai stabdoma visais keturiais ratais, $k = 1$; α – kelio nuolydis laipsniais; f – riedėjimo varžos koeficientas, taikomas lengvajam automobiliui ant sauso asfalto stabdymo metu $f = 0,01$; m – automobilio bendroji masė, kg; P_{st} – automobilio stabdymo jėga, susidedanti iš atskiroms automobilio ašims tenkančių stabdymo jėgų (Wong 2001), kuri apskaičiuojama papildomai vertinant automobilio geometrinius parametrus:

$$P_{st} = P_{st_{pr}} + P_{st_u}, \quad (4)$$

$$P_{st_{pr}} = \frac{\varphi \cdot mg [j + h(\varphi + f)]}{l}, \quad (5)$$

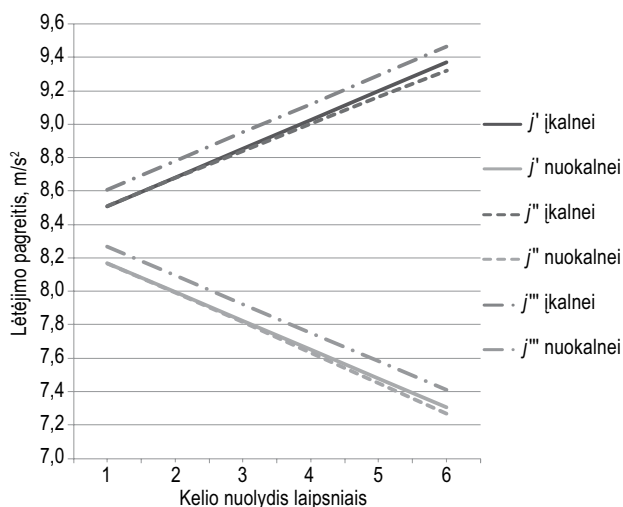
$$P_{st_u} = \frac{\varphi \cdot mg [j - h(\varphi + f)]}{l}, \quad (6)$$

čia $P_{st_{pr}}$ – priekinės automobilio ašies ratų stabdymo jėga, N; P_{st_u} – užpakalinės automobilio ašies ratų stabdymo jėga, N; h – automobilio svorio centro aukštis, m; l – automobilio bazė (atstumas tarp ašių), m.

Vertinant kelio profilio įtaką stabdymo efektyvumui svarbu išskirti automobilio priekinės ir užpakalinės ašies stabdymo jėgas. Šiuo atveju reikšmingą funkciją atlieka automobilio stabdymo jėgų reguliatorius.

Atlikus palyginamuosius skaičiavimus (1–3) formulėmis, didėjant kelio nuolydžiui gautas skirtumas pavaizduotas 1 paveiksle. (1) formule apskaičiuojamas didžiausias galimas lėtėjimo pagreitis įvertinant kelio nuolydį. (3) formulė – tai išplėstinė antrosios forma papildomai dar įvertinant priekinei ir galinei automobilio ašims tenkančias stabdymo jėgas kelyje su nuolydžiu, kai įvyksta didesnis apkrovų persiskirstymas ašims (1 pav.). Tokiu atveju ratų sukibimas su kelio danga yra ne visai išnaudojamas ir realieji stabdymo proceso parametrai skiriasi nuo teoriškai apskaičiuotų.

Visomis trimis formulėmis gauti rezultatai kinta tiesiškai, tačiau reikšmės skiriasi, o esant didesniam kelio nuolydžio kampui, gaunamos trys skirtingos reikšmės. Siekiant nustatyti tikrąją lėtėjimo pagreičio charakteristiką kintant kelio nuolydžiui, buvo atliktas tyrimas.



1 pav. Skirtingos lėtėjimo pagreičio reikšmės

Fig. 1. Different deceleration values

Eksperimentinio tyrimo metodika

Tyrimai buvo atliekami dviem techniškai tvarkingais lengvaisiais automobiliais: „Toyota Avensis“ ir „Toyota Prius“. Abiejuose automobiliuose įmontuota stabdžių antiblokavimo sistema (ABS). Stabdyti pasirinktos dvi skirtingo išilginio nuolydžio neintensyvaus eismo kelio atkarpos už-

miestyje. Kelio nuolydis keletą kartų per kelio plotį stabdymo zonoje matuotas gulsčiuuku. Gulsčiuukas buvo laikomas tiksliai horizontalioje padėtyje, vieną jo galą padėjus ant kelio paviršiaus, o kitu matuojant atstumą iki kelio paviršiaus. Žinant gulsčiuuko ilgį iš gauto stataus trikampio pagal trigonometrines funkcijas apskaičiuotas nuolydžio kampas. Pirmosios kelio atkarpos gautas nuolydis yra 4,77 proc. ($2,73^\circ$), antrosios – 7,82 proc. ($4,47^\circ$).

Bandymų metu stabdymo parametrus fiksuoti buvo naudojamas pagreičių matavimo prietaisas „XL Meter Pro“. Jis tvirtinamas automobilio salone prie priekinio stiklo, kaip parodyta 2 paveiksle. Kiekvieną kartą pritvirtintas ir įjungtas prietaisas automatiškai susikalibruoja. Prieš bandymus prietaise pakeičiami nustatymai: parenkamas stabdymo režimas, nustatomas matavimams pakankamas 50 Hz dažnis.

Stabdymo metu prietaisu „XL Meter Pro“ registruojami šie parametrai:

1. važiuojimo greitis prieš stabdymą, km/h;
2. lėtėjimo pagreitis stabdymo metu, m/s^2 ;
3. stabdymo laikas, s;
4. stabdymo kelias, m.

Pagrindinis parametras, pagal kurį vertinta kelio nuolydžio įtaka stabdymo keliui, buvo lėtėjimo pagreitis.

Stabdymai buvo atliekami įsibėgėjus iki 50 km/h ir staiga nuspaužiant stabdžių pedalą. Kad kiekvieno stabdymo metu stabdžio pedalas būtų spaudžiamas tokia pat jėga, ant pedalo buvo pritvirtintas jutiklis. Jutikliu užfiksuota 300 N pedalo paspaudimo jėga kiekvieno stabdymo metu svyravo ne daugiau kaip 10 N. Gauti stabdymo rezultatai po kiekvieno bandymo buvo registruojami ir analogiška tvarka kartojami. Vienu tyrimo etapu buvo atliekama po dešimt stabdymų važiuojant įkalnėje ir nuokalnėje, po to tas pats kartojama kitu automobiliu. Vėliau bandymas kartojamas



2 pav. Prietaiso „XL Meter Pro“ pritvirtinimas automobilyje bandymų metu

Fig. 2. Positioning device XL Meter Pro in the car during tests

ir kitoje kelio atkarpoje. Kas penkis stabdymo bandymus buvo daroma pertraukėlė, nes kaistantys stabdžių darbiniai paviršiai gali neigiamai paveikti matavimų rezultatus. Visų bandymų metu kelio danga buvo sausas lygus asfaltas, aplinkos oro temperatūra – $15\text{--}20^\circ\text{C}$.

Eksperimentinių tyrimų rezultatai

Atlikus tyrimus abiem automobiliais mažesnėje ir didesnėje kelio nuokalnėje iš viso buvo gauta 80-ties stabdymų rezultatai. Rezultatai suvesti, sugrupuoti ir pagal atitinkamą kelio profilį (1 lentelė) apskaičiuotos lėtėjimo pagreičio vidutinės reikšmės.

1 lentelė. Tyrimo metu gautos lėtėjimo pagreičio reikšmės

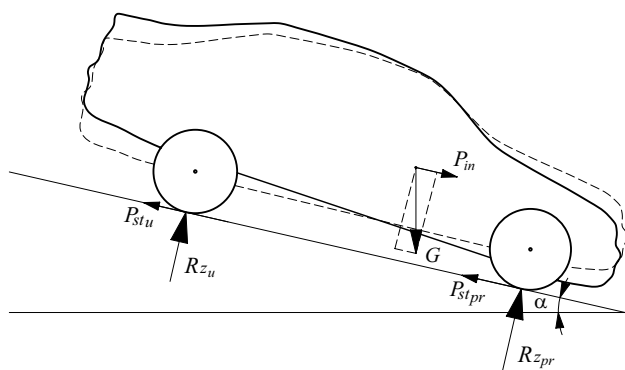
Table 1. Investigation into deceleration values

Nuolydis	Lėtėjimo pagreitis, m/s^2 įkalnėje	
	4,77 proc. ($2,73^\circ$)	7,82 proc. ($4,47^\circ$)
Automobilis		
Toyota Avensis	8,6	8,8
Toyota Prius	8,55	8,77
Vidurkis:	8,58	8,79
	Lėtėjimo pagreitis, m/s^2 nuokalnėje	
	4,77 proc. ($2,73^\circ$)	7,82 proc. ($4,47^\circ$)
Toyota Avensis	8,29	7,56
Toyota Prius	8,23	7,40
Vidurkis:	8,26	7,48

Kaip matyti iš gautų rezultatų, lėtėjimo pagreitis važiuojant įkalne (teigiamas kelio nuolydis) yra didesnis už pagreitį nuokalnėje (neigiamas kelio nuolydis). Didžiausios ir mažiausios lėtėjimo pagreičio reikšmės gautos stabdant kelyje su didesniu nuolydžiu (7,82 proc.).

Taigi pagal atlikto tyrimo rezultatus pastebima, kad lėtėjimo pagreičiui kelio nuolydžio dydis gerokai didesnę įtaką turi stabdant nuokalnėje. Nuokalnėje, kai kelio nuolydis kinta nuo $2,73$ iki $4,47$ laipsnio, pagal 1 lentelėje pateiktus rezultatus apskaičiuotas lėtėjimo pagreičio skirtumas yra 9,44 %, o stabdant įkalnėje, esant tokiam pačiam nuolydžio kitimui, lėtėjimo pagreičio skirtumas yra tik 2,39 %. Taigi padidėjus nuokalnei lėtėjimo pagreitis labiau sumažėja, o tai padidina eismo įvykio tikimybę nuokalnėje, nes padidėja stabdymo kelias. Važiuojant įkalnėje lėtėjimo pagreitis padidėja, todėl eismo saugumui neigiamo poveikio tai nesukelia.

Priekiniai automobilio ratai stabdymo metu apkraunami daugiau, o nuokalnėje reakcijos priekinei ašiai dar padidėja (3 pav.). Tą sukelia persilenkančios masės dėl inercijos jėgos, įkalnės varža, pakabos standumas (Jazar 2008).



3 pav. Stabdomą automobilį veikiančios jėgos nuokalnėje
Fig. 3. Forces acting on the car braking downhill

Pasikeitus ašių apkrovai, pasikeičia ir automobilio valdomumas (Law *et al.* 2004). Tai patvirtina atliktas tyrimas stabdant įkalnėje ir nuokalnėje, o didesnę lėtėjimo pagreitį įkalnėje lemia įkalnės varža, kuri yra priešingos krypties nei inercijos jėga.

Automobilių stabdžių sistema yra pritaikyta svoriui persislinkti į priekinę dalį stabdymo metu – priekinės ašies stabdymo efektyvumas yra didesnis. Lengvuosiuose automobiliuose montuojami diskiniai stabdžiai (dažnai priekinių ratų diskai yra didesnio skersmens, geriau aušinami), įrengiami stabdymo jėgos reguliatoriai. Šiuolaikiniuose automobiliuose montuojamos elektroninės sistemos, kontroliuojančios, kad ratas neužsiblokuotų ir stabdymo jėgos būtų optimaliai paskirstytos priklausomai nuo kiekvieno rato sukibimo.

4 paveiksle pavaizduota teorinių ir eksperimentinių lėtėjimo pagreičių reikšmių nesutapimai. Eksperimentiškai gautos kreivės (4 paveiksle – juoda stora linija) parodo charakteristiką pagal tris taškus, tačiau to pakanka nesutapimams ir tendencijoms įvertinti, nes lėtėjimo pagreitis, užfiksuotas, esant 4,47° išilginiam kelio nelygumui, įkalnėje ir nuokalnėje gerokai skiriasi. Charakteristikos prognozavimą rodo punktyrais pratęstos kreivės.

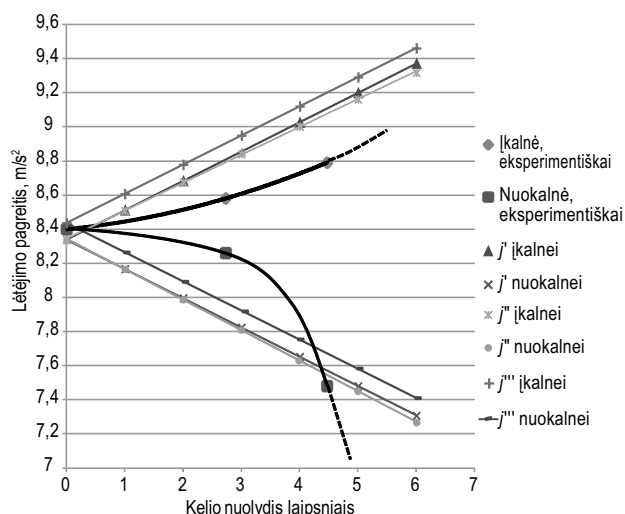
Eksperimentiškai gauta lėtėjimo charakteristika kelio nuokalnei, priklausomai nuo nuolydžio kampo, kinta pagal priklausomybę:

$$j_{nuok.}(\alpha) = -0,021\alpha^3 + 0,064\alpha^2 - 0,0739\alpha + 8,4. \quad (7)$$

Lėtėjimo charakteristika kelio įkalnei kinta pagal priklausomybę:

$$j_{ik.}(\alpha) = 0,0122\alpha^2 + 0,0325\alpha + 8,4. \quad (8)$$

Šios priklausomybės aprašo bandymais gautus būdingus taškus aproksimuojančią kreivę. Tai polinominė funkcija $f(x) = \sum a_i x^i$, kai i kinta nuo 0 iki n . Priklausomybės buvo gautos pagal eksperimentais nustatytus taškus (4 pav.), sudarius ir išsprendus lygčių sistemas.



4 pav. Teorinės ir eksperimentiškai gautos lėtėjimo pagreičių priklausomybės nuo kelio profilio

Fig. 4. Theoretical and experimentally obtained deceleration dependence on the road profile

Bandymais nustatyta, kad didėjant kelio nuokalnei lėtėjimo pagreitis kinta eksponentiškai. Esant nedideliame nuolydžiui lėtėjimo pagreitis mažėja lėčiau nei pagal teorinius skaičiavimus, o kai kelio nuolydis didesnis kaip 3 laipsniai, pagreitis sparčiai mažėja ir viršijus 4 laipsnių nuolydį lėtėjimo pagreitis yra mažesnis, nei teoriškai apskaičiuotas. Kelyje su įkalne bandymų metu gautas lėtėjimo pagreitis nesiekia teorinių reikšmių. Taigi atliekant dinaminis skaičiavimus, kur yra kelio nuolydis, būtina papildomai įvertinti lėtėjimo pagreičio dydžius, nes galimas nesutapimas su teoriškai apskaičiuotais dydžiais. Siekiant pagerinti eismo saugumą keliuose, kuriuose yra išilginis profilio nuolydis, būtina taikyti greičio ribojimo priemones.

Išvados

1. Atlikus lėtėjimo pagreičio skaičiavimo skirtingomis formulėmis analizę nustatyta, kad didėjant kelio nuolydžiui teorinis lėtėjimo pagreitis kinta tiesiškai. Pagal skirtingas skaičiavimo metodikas gaunami iki 1,6 proc. rezultatų skirtumai. Didėjant kelio nuolydžiui iki 5–6 laipsnių, rezultatai skiriasi labiau, nei esant mažiems kelio profilio nuolydžiams.
2. Didesnis lėtėjimo pagreičio lyginant su teoriškai gautu neatitikimas nustatytas kelio nuokalnėse. Didėjant kelio nuolydžiui lėtėjimo pagreitis mažėja sparčiau: kelio nuolydžiui keičiantis nuo 2,73° iki 4,47° nuokalnėje nustatytas lėtėjimo pagreičio pokytis yra 9,44 proc., o įkalnėje – 2,39 proc. Taigi, pagal apibendrintus rezultatus galima teigti, kad eismo saugumui dėl sparčiau

mažėjančio stabdymo efektyvumo didesnį pavojų kelia žemėjančios nuokalnės.

3. Pagal atlikto eksperimento rezultatus nustatytos skirtingos lėtėjimo charakteristikos kelio įkalnėje ir nuokalnėje leis tiksliau įvertinti automobilio stabdymą atliekant eismo įvykių ekspertizes, padės nustatant eismo reguliavimo priemonių veikimą.

Literatūra

- Bogdevičius, M.; Prentkovskis, O.; Vladimirov, O. 2004. Engineering solutions of traffic safety problems of road transport, *Transport* 19(1): 43–50.
- Bureika, G. 2008. A mathematical model of train continuous motion uphill, *Transport* 23(2): 135–137.
<http://dx.doi.org/10.3846/1648-4142.2008.23.135-137>
- Council Directive 71/320/EEC of 26 July 1971 on the approximation of the laws of the Member States relating to the braking devices of certain categories of motor vehicles and of their trailers.
- Enhui, X.; Yan, F.; Rui, W. 2010. Road Safety Analysis of Long Downgrade Highway Based on the Property of Vehicle Brakes Heat-Resistant, in *International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, 258–261.
- Jazar, N. R. 2008. *Vehicle Dynamics: Theory and Application*. New York: Springer. 1015 p.
<http://dx.doi.org/10.1007/978-0-387-74244-1>
- Law, S. S.; Bu, J. Q.; Zhu, X. Q.; Chan, S. L. 2004. Vehicle axle loads identification using finite element method, *Engineering Structures* 26: 1143–1153.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.03.017>
- Nagurnas, S.; Mitunevičius, V.; Unarski, J.; Wach, W. 2007. Evaluation of veracity of car braking parameters used for the analysis of road accidents, *Transport* 22(4): 307–311.
- Sokolovskij, E. 2007. Automobile braking and traction characteristics on the different road surfaces, *Transport* 22(4): 275–278.
- Straky, H.; Kochem, M.; Schmitt, J.; Isermann, R. 2002. Influences of braking system faults on vehicle dynamics, *Control Engineering Practice* 11(2003): 337–343.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0967-0661\(02\)00301-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0967-0661(02)00301-5)
- Wong, J. Y. 2001. *Theory of Ground Vehicles*. New York: John Wiley & Sons. 528 p.

IMPACT OF THE ROAD PROFILE ON VEHICLE DECELERATION

V. Žuraulis

Abstract

The article analyzes the impact of the longitudinal road profile on the efficiency of car braking estimated applying deceleration value. Different formulas are used for theoretical calculations, and therefore experimental brakes in different road slopes were performed to obtain the most accurate results. Deceleration, as one of the most important safety parameters, depends on the technical condition of the braking system, road conditions and

structural and dynamic properties of the other car. Road alignments can significantly affect car manageability, because of weight transfer and extra track resistance, which may change the overall balance of the car and affect the nature of dynamic characteristics that may vary from certain critical values. The results of corrections to deceleration dependence on the road profile can be used for investigating traffic accidents, optimizing traffic control arrangements and implementing advanced systems for automotive active safety.

Keywords: longitudinal road profile, deceleration, braking force, weight transfer, traffic safety.