



22-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminės konferencijos
TRANSPORTO INŽINERIJA IR VADYBA,
vykusios 2019 m. lapkričio 22-23 d. Vilniuje, straipsnių rinkinys

Proceedings of the 22th Conference for Junior Researchers 'Science – Future of Lithuania'
TRANSPORT ENGINEERING AND MANAGEMENT, 22-23 November 2019, Vilnius, Lithuania

Сборник статей 22-й конференции молодых ученых «Наука – будущее Литвы»
ИНЖЕНЕРИЯ ТРАНСПОРТА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК, 22-23 ноябрь 2019 г., Вильнюс, Литва

REGULIUOJAMO ORO APTAKO ĮTAKOS AUTOMOBILIO DINAMINĖMS SAVYBĖMS TYRIMAS

Linus Petrauskas¹, Vidas Žuraulis²

Automobilių inžinerijos katedra, Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius,

El. paštas: ¹linas.petrauskas@stud.vgtu.lt, ²vidas.zuraulis@vgtu.lt

Santrauka. Šiame straipsnyje nagrinėjama oro aptako įtaka automobilio dinaminėms savybėms, keičiant jo atakos kampą prie skirtingų važiavimo greičių. Naudojantis kompiuterine aerodinamikos simuliacijos programa Airfoil, tiriamos pasirinkto NACA12414 aptako aerodinaminės charakteristikos ir sudaroma oro aptako generuojamos vertikalios prispaudimo jėgos priklausomybė nuo jo atakos kampo bei nuo važiavimo greičio. Eksperimentinio tyrimo metu pagal pakabos poslinkius nustatytas pasirinkto automobilio BMW Z3M bendras pakabos standumo koeficientas. Atlikus bandomuosius važiavimus skirtingais atakos kampais sumontuotu oro aptaku ir išmatavus dinaminį pakabos poslinkį nustatytas vertikalaus prispaudimo jėgos dydis, tenkantis galiniams ratams įvairiais važiavimo greičiais. Naudojantis padangų sukibimo charakteristikomis, pagal gautą aerodinaminę prispaudimo jėgą nustatytos išilginės ir skersinės padangų sukibimo su keliu jėgų pokytis. Išnagrinėjus eksperimentinio bandymo ir teorinių skaičiavimų rezultatus nustatytas automobilio dinaminėms savybėms pokytis bei optimalios atakos kampo vertės, konkrečios lenktynių trasos ruože.

Raktiniai žodžiai: oro aptakas, automobilio dinamika, atakos kampas, prispaudimo jėga, pakabos deformacija, padangų sukibimas, aerodinamika.

Įvadas

Ištobulinius stacionarius automobilių oro aptakus, gautas efektas jau pasiekia savo ribas, todėl pradėti kurti kintamos atakos kampo aptakai. Naudojant oro aptakus, kurie gali keisti savo atakos kampą, keičiamos prispaudimo ir oro pasipriešinimo jėgos. Tai reiškia, jog automobilis įgauna aerodinamines savybes, kuriomis galima varijuoti priklausomai nuo to, kokių greičių važiuojama ar kokio intensyvumo posūkį norima įveikti. Ši tyrimą nuspręsta atlikti dėl problemos, jog automobilių sporte oro aptakai, kurie gali keisti atakos kampą, vis dar retai naudojami dėl jų produkcijos nebuvimo. Kintamo atakos kampo oro aptakai serijinės gamybos automobiliuose jau yra naudojami dešimtmetį, tačiau automobilių sporte, kuris vyksta nacionalinės lygos varžybose, nėra galimybės įsigyti tokio sertifikuoto aptako.

Šio tyrimo tikslas yra išanalizuoti, kaip pasikeis automobilio dinamika, kai bus naudojamas ne stacionarus, o dinamiškai veikiantis oro aptakas.

Literatūros apžvalga

Sportinis automobilis priklauso nuo daugelio elementų – variklis, padangos, pakaba ir, žinoma, aerodinamika. Šiandien automobilių žiedinės lenktynės net neįsivaizduojamos be oro aptakų. Nors aerodinamikos nauda automobilių sporte pradėta taikyti XX a. septintajame dešimtmetyje (Katz 1995), vis dėlto net ir po daugiau kaip 50 metų patirties šioje srityje yra atrandama naujovių ir iki galo neišnagrinėtų savybių. Šiame tyrime analizuojama, kaip keičiasi automobilių dinamika, kai yra keičiamas aptako atakos kampas jam generuojant skirtingas prispaudimo jėgas. Oro srautai ir jų kitimas leidžia automobiliui agresyviau judėti posūkyje, stabdyti ir efektyviau išnaudoti sukibimą su keliu (Rishi 2012). Oro aptakai turi būti derinami su kitomis automobilio savybėmis – kėbulo forma, važiuoklės charakteristikos. Aplink kėbulą judantis oro srautas atsiskiria, dėl to viršutinėje dalyje susidarantis mažesnis slėgis sukuria kėlimą, kuris veikia bagažinės dangčio paviršiaus plotą. Norint sumažinti šį aerodinaminį kėlimą tvirtinamas galinis aptakas, kad būtų sukurtas didesnis slėgis (Kumar *et al.* 2015). Slėgio pasiskirstymo analizė transporto priemonės paviršiuje atliekama naudojant Bernulio lygtį (Dasa, Riyada 2017).

Savo straipsnyje autoriai (Roberts *et al.* 2014) analizuoja oro aptakų skaičiavimo metodus. Aprašoma kaip aerodinamiškai veikia sparnas, jeigu jis yra apverčiamas. Oro aptako pagrindinė savybė – kurti prispaudimo arba kėlimo jėgas. Tam, kad būtų sukurta neigiama prispaudimo jėga (kėlimo), lėktuvuose sparnas yra apverčiamas – oras, aptekantis viršutiniu paviršiumi, yra greitesnis negu oras, keliaujantis žemesniu paviršiumi, atsiradęs slėgių skirtumas ir sukelia lėktuvo keliamąją jėgą.

Savo straipsnyje autoriai (Roberts *et al.* 2014) analizuoja oro aptakų skaičiavimo metodus. Aprašoma kaip aerodinamiškai veikia sparnas, jeigu jis yra apverčiamas. Oro aptako pagrindinė savybė – kurti prispaudimo arba kėlimo jėgas. Tam, kad būtų sukurta neigiama prispaudimo jėga (kėlimo), lėktuvuose sparnas yra apverčiamas – oras, aptekantis viršutiniu paviršiumi, yra greitesnis negu oras, keliaujantis žemesniu paviršiumi, atsiradęs slėgių skirtumas ir sukelia lėktuvo keliamąją jėgą.

Prispaudimo jėga, priklausomai nuo sparno padėties, yra išreiškiamą šia formule (Schütz 2016):

$$L = \frac{1}{2} \rho v^2 AC_L, \quad (1)$$

čia: ρ – oro tankis; v – srauto greitis; A – sparno projekcijos plotas; C_L – prispaudimo koeficientas.

Oro aptakai taip pat sukuria pasipriešinimo jėgą, kuri veikia judančio sparno priešinga kryptimi, horizontalioje automobilio padėtyje. Šis pasipriešinimas yra trinties pasipriešinimo ir slėgio pasiskirstymo sparno paviršiuje priežastis. Jėga yra apibūdinama analogiška išraiška kaip ir prispaudimo jėga tik vietoj prispaudimo koeficiento naudojamas pasipriešinimo judėjimui išilgine kryptimi koeficientas (C_D).

Abejose išraiškoje naudojami pasipriešinimo koeficientai C_L ir C_D , kurie priklauso nuo sparno charakteristikos: formos, dydžio ir padėties (Schütz 2016).

Kaip jau minėta, kėlimo bei pasipriešinimo jėgoms daug kas priklauso nuo geometrijos ir judančio objekto padėties. Kalbant konkrečiai apie sparną, kėlimo koeficientas net esant tai pačiai formai labai priklauso nuo jo atakos kampo.

Šiame darbe didžiausiais dėmesys yra skiriamas automobilio dinamikos tyrimams, kurie priklauso nuo prispaudimo jėgos ir nuo oro klampos. Oro klampumo reikšmė aerodinamikoje yra dvejopa. Dėl oro klampumo atsiranda trinties pasipriešinimas, kuris daugeliu atvejų yra nepageidautinas ir jį stengiamasi mažinti. Tačiau klampusis sluoksnis yra sūkuringas sluoksnis, sukuriantis keliamąją jėgą, kuri aviacijoje yra naudinga, automobilių aerodinamikos atveju tai prispaudimo jėga.

Oro klampumas apibūdina vidinę oro trintį. Ši savybė pasireiškia oro pasipriešinimu gretimų oro sluoksnių poslinkiui arba oro sluoksnio slydimui paviršiaus atžvilgiu (Schütz 2016). Oro pasipriešinimas slydimui kūno paviršiumi susijęs su tuo, kad oras kontaktuoja su paviršiumi. Chaotiškas judančio oro molekulių judėjimas susijungia su srauto judėjimu. Oro prilipimas prie aptekamojo paviršiaus reiškia, kad nepriklausomai nuo to, kokių kampu oro molekulė trenkiasi į paviršų, tikimybė jai atsokti į bet kurią pusę yra vienoda.

Kita svarbi savybė, norint suprasti oro aptakų principinį veikimą yra spūdimas. Spūdimas yra kūno savybė susispausti, veikiant išorinėms slėgio jėgoms. Dujų spūdimas yra gerokai didesnis už skysčių spūdimą. Aerodinamikoje spūdimas įtaka pasireiškia tada, kai aptekėjimo metu atsiradęs slėgio pokytis sukelia didelius tūrio pokyčius. Kadangi skysčių spūdimas mažesnis, tai skysčio srautas gali būti nagrinėjamas kaip nespūdisis srautas, tačiau didelio greičio dujų srautuose spūdimą įvertinti būtina. Mažų greičių dujų srautuose, orui judant iki 360 km/h, su nedidelėmis paklaidomis oro srautą galima nagrinėti kaip nespūdijį srautą. Oro spūdimas įtaka sraute priklauso nuo oro srauto greičio ir garso greičio santykio.

Teorinis oro aptako veikimo skaičiavimas

Norint apskaičiuoti pasirinkto oro aptako prispaudimo jėgos dydį keičiant jo atakos kampą, skaičiavimai atliekami naudojant 1 formulę. Siekiant gauti reikalingus duomenis pirmiausia randami oro aptako viršutinės pro-

jekcijos matmenys bei sparno šoninio profilio perimetras (1 pav.). Oro aptako profilio perimetras suskirstomas į taškus, kuriems priskiriamos koordinatės. Automobilio, kuriam projektuojamas reguliuojamas oro aptakas, numatytos važiavimo greičio ribos yra 0-200 km/h.

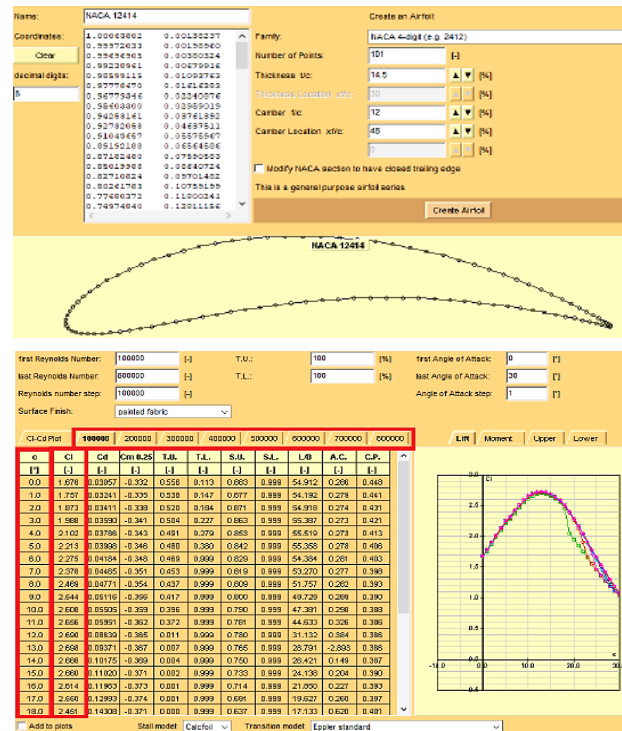


1 pav. Tyrime naudoto oro aptako prototipas.

Prispaudimo koeficientui C_L nustatyti naudojama specializuota kompiuterinė programa *JavaFoil* (2 pav.), kur skaičiavimų įvesties duomenimis yra sparno profilio koordinatės ir Reinoldso skaičius. Reinoldso skaičių randame kas penkis kilometrus per valandą Skaičiavimai atliekami programa *Aerospaceweb* (Aerospaceweb 2013). Ši programa atlieka skaičiavimus pagal formulę (McBeath 2006):

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu}, \quad (2)$$

čia: ρ – oro tankis; v – vėjo greitis; L – sparno profilio ilgis; μ – oro dinaminės klampos koeficientas.



2 pav. Programos *JavaFoil* vaizdai sparno koordinatėms ir aerodinaminiam kėlimo koeficientui nustatyti.

Įkėlus sparno profilio koordinatės į programą *JavaFoil*, matoma, jog tai asimetrinis NACA 12414 tipo sparno profilis. Ieškant prispaudimo jėgos koeficiento, Reinoldso skaičius skirstomas į 8 ruožus kas 10 000 skaičių. Greičio ruožus skirstome kas 25 km/h. Tokie ruožai pasirinkti pagal programos skaičiuojamą Reinoldso skaičiaus

atitikmenį. Programa *JavaFoil* rasti kėlimo koeficientai C_L esant skirtingiems važiavimo greičiams bei atakos kampams.

Taip gaunama sparno profilio NACA12414 kėlimo jėgos priklausomybes nuo važiavimo greičio, kai atakos kampas keičiasi. Didėjant greičiui, didėja ir prispaudimo jėgos koeficientas, vadinasi, didėja ir prispaudimo jėga. Tačiau didinant sparno atakos kampą, kėlimo jėgos koeficientas didėja netiesiškai (2 pav.). Tai reiškia, jog sparnas turi savybę didinti prispaudimo jėgos koeficientą tik iki tam tikros reikšmės, todėl yra būtina rasti sparno maksimalų atakos kampą. Maksimalus kampas nustatomas pagal didžiausią C_L reikšmę, kuri yra 13° .

Antsparniai oro aptako galuose reikalingi atskirti aukšto ir žemo slėgio zonas. Jei šios zonos nėra atskiriamos, sparno galuose atsiranda turbulencinės jėgos, maišantis aukšto ir žemo slėgio zonoms. Tokiu atveju prispaudimo jėgos efektyvumas stipriai mažėja, nes kuriama jėga yra koncentruojama ne automobilio spaudimui, o atsirandančių sukurių sąveikavimui (McBeath 2006). Antsparnių ploto skaičiavimas yra atliekamas pagal daugklį, kuris priklauso nuo sparno profilio ploto (Katz 1995):

$$S_a = S_s \cdot k_s, \quad (3)$$

čia: S_s – sparno profilio plotas; k_s – antsparnių ploto koeficientas (asimetriniam sparnu parenkama 5).

Kitas svarbus parametras reguliuojamo atakos kampo oro aptakui yra jo sukimosi taškas. Aerodinaminis centras yra taškas, kuriuo yra tikslingiausia keisti atakos kampą, kitu atveju keičiantis atakos kampui, keistųsi ir sparno padėtis kėbulo atžvilgiu. Aerodinaminis centras yra stygos ketvirčio dalis nuo priekinės briaunos (Lasauskas 2008).

Ekspimentinio oro aptako prispaudimo jėgos skaičiavimas

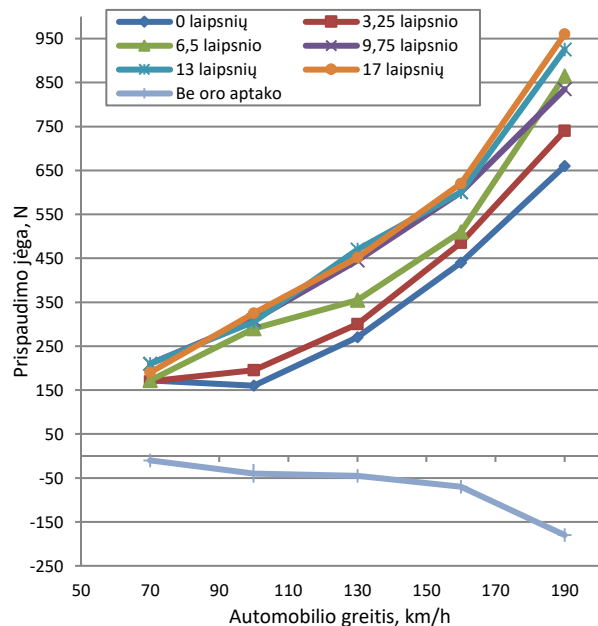
Ekspimentinį tyrimą sudaro dvi dalys. Pirmiausia laboratorijoje statiškai nustatomas pakabos ir pakabos su padanga standumas. Standumo koeficientas k apskaičiuojamas laboratorijoje atliekant poslinkio matavimus (Bonnick 2008). Automobilis yra pastatomas ant svėrimo plokščių, tada papildomais svoriais didinama apkrova oro aptako veikimo vietoje (3 pav.). Tuo pačiu metu poslinkio jutikliais fiksuojamos kėbulo eigos vertės. Pagal pridėtą svorį ir gautas pakabos ir pakabos su padanga deformacijos nustatytas standumo koeficientas.



3 pav. Standumo koeficiento nustatymas pagal pakabos deformaciją.

Antroje tyrimo dalyje buvo matuojamas kėbulo eigos pokytis automobiliui važiuojant skirtingais greičiais nuo 70 iki 190 km/h. Bandymai atliekant kiekvienu pasirinktu aptako atakos kampu nuo 0 iki 17 laipsnių. Kiekvienas bandymas kartojamas du kartus ir jo metu randamas pakabos poslinkio vidurkis. Žinant pakabos standumo koeficientą ir poslinkį, nustatomas realus aerodinaminių jėgų sukurtos prispaudimo jėgos dydis (4 pav.).

Ekspimentinio bandymo metu nustatyta, jog pasirinkto automobilio aerodinaminė forma, be oro aptako sukuria turbulenciją, kuri generuoja 183,5 N keliamąją jėgą (4 pav. kreivė *Be oro aptako*) ir tai buvo kompensuota nustatant bendrą aerodinaminę prispaudimo jėgą dėl oro aptako poveikio.



4 pav. Ekspimentinė aptako NACA 12414 generuojamos prispaudimo jėgos priklausomybė nuo važiavimo greičio.

Tyrimo rezultatai ir jų analizė

Nustačius oro aptako generuojamas prispaudimo jėgas, atliekami automobilio sukibimo posūkyje, esant skirtingiems oro aptako atakos kampams, skaičiavimai konkrečioje žiedinių lenktynių trasos atkarpoje (5 pav.).

Skaičiuojama maksimalus važiavimo greitis pasirinktame posūkyje, kai oro aptako atakos kampas 0 ir 13 laipsnių. Skaičiavimai atliekami, remiantis sąlyga, jog automobilį veikianti išcentrinė jėga turi būti ne didesnė kaip suminė padangų šoninio sukibimo jėga:

$$\sum F_y \geq F_{i\text{sc.}} \quad (4)$$

čia: $\sum F_y$ – suminė sukibimo jėga, kurią gali atlaikyti automobilio padangos; $F_{i\text{sc.}}$ – išcentrinė jėga, kuria yra veikiamas automobilis posūkyje.



5 pav. Automobilio dinaminų savybių vertinimas konkrečioje žiedinių lenktynių atkarpoje.

Padangų sukibimo jėgos šiuo atveju yra paimtos iš automobilio dinamikos modeliavimo programos *CarSim* (Žuraulis, Žukas 2012), o išcentrinė jėga apskaičiuota pagal išraišką:

$$F_{iśc.} = \frac{mv^2}{R}, \quad (5)$$

čia: m – automobilio masė; v – važiavimo greitis; R – posūkio trajektorijos spindulys (5 pav. raudona atkarpa).

Radus maksimalius važiavimo greičius posūkyje ieškoma oro aptako sukuriamos pasipriešinimo jėgos ir riedėjimo varžos įtaka tiesiojoje, keičiant atakos kampą.

Apskaičiuojamus automobilio traukos jėgos priklausomybes nuo važiavimo greičio kiekvienai pavarai, skaičiuojama kokią išilginę sukibimo jėgą gali atlaikyti galiniai varantieji automobilio ratai su pasirinktomis padangomis. Programos MATLAB paprograme *Curve Fitting Tool* nustatome padangos išilginės sukibimo jėgos dydžio priklausomybės nuo slydimo koeficiento ir vertikalios jėgos funkciją. Ją gauname pritaikius regresinės analizės modelį, sudarant trimatę funkciją. Gautas ketvirtojo laipsnio daugianaris.

Išanalizavus pasirinkto oro aptako parametrus, naudojantis kompiuterine aerodinamikos simuliacijos programa *Airfoil*, gautos sparno charakteristikos: profilio forma – NACA12414; atakos kampo, kai prispaudimo jėga didėja, ribinė vertė – 13° ; optimalus sparno aerodinaminis centas $0,0525$ m (nuo priekinės briaunos); būtinas antsparnių plotas $S_a = 0,0219$ m². Vertikali prispaudimo jėga, kritiniu oro aptako atakos kampu, automobiliui judant 200 km/h greičiu kinta nuo $2086,1$ N iki $1287,8$ N. Tai leidžia aptakui keisti prispaudimo jėgą 38 %, judant tuo pačiu greičiu.

Išvados

Atlikti eksperimentiniai oro aptako prispaudimo jėgos skaičiavimai ratams skirtingais greičiais ir atakos kam-

pais. Nustatyta, kad automobilio aerodinaminės kilmės jėgos, atsirandančios dėl oro aptako, spaudžiančios ratų, gali varijuoti 183 N ribose. Galimybė keisti oro aptako atakos kampą leidžia $19,8$ % padidinti prispaudimo jėgą galiniams ratams.

Naudojantis konkrečių padangų sukibimo pagal tenkančią apkrovą ir veikiančią slydimą charakteristika, ištirtos skersinio ir išilginio sukibimo su keliu jėgos. Gauta, kad posūkyje aptakas gali sukurti $154,03$ N papildomą skersinio sukibimo jėgą padangai, keičiant atakos kampą. Išilginė padangų sukibimo su keliu jėga, esant 130 km/h greičiui padidėja $337,1$ N.

Nustatyta, jog mažinant oro aptako atakos kampą, oro pasipriešinimo jėgos ir riedėjimo varžos suma tiesiojoje sumažėja iki $227,2$ N, tai lemia maksimalaus greičio galimą padidėjimą iki $9,3$ km/h. Didinant oro aptako atakos kampą posūkyje, tai padidina vidutinį važiavimo greitį $0,64$ km/h.

Posūkyje nustačius išcentrinės jėgos dydį, atlikti skaičiavimai parodo, jog papildomas sukibimas, atsirandantis didinant atakos kampą, gerina posūkio įveikimą $0,03$ s. Naudojantis šiais duomenimis, galima teigti, jog reguliuojamo atakos kampo oro aptakas, leidžia keisti charakteristikas, reikalingas automobiliui greičiau įveikti lenktynių trasą.

Literatūra

- Aerospaceweb. 2013. Žiūrėta 2017 m. kovo 15 d. Prieiga per internetą: <http://aerospaceweb.org/design/scripts/atmosphere/>
- Bonnick, A. 2008. *Automotive Science and Mathematics*. Elsevier Ltd. 241 p.
- Dasa, R. C.; Riyada, M. 2017. CFD Analysis of Passenger Vehicle at Various Angle of Rear End Spoiler, *Procedia Engineering* 194: 160 – 165.
- Katz, J. 1995. *Race car aerodynamics: designing for speed*. Bentley Stock. 278 p.
- Kumar, V. N.; Lalit, N. K.; Narasimha, L. N. V.; Sri, R. Y. 2015. Investigation of Drag and Lift Forces over the Profile of Car with Rearspoiler using CFD, *International Journal of Science and Research (IJSR)* 4(9): 1298–1305.
- Lausauskas, E. 2008. *Skrydžio principai*. Vilnius: Technika. 182 p.
- McBeath, S. 2006. *Competition car aerodynamics: A Practical Handbook*. Sparkford: Haynes. 224 p.
- Rishi, R. M. 2012. Spoilers, *International Journal For Engineering Applications and Technology (IJFEAT)*, ISSN: 2321-8134, October: 24–31.
- Roberts, L.S.; Correia, J.; Finnis, M.V.; Knowles, K. 2014. Investigation of forcing boundary layer transition on a single-element inverted wing in ground effect. *International Vehicle Aerodynamics Conference*, 14–15 October, 2014, Loughborough, UK.
- Schütz, T. 2016. *Aerodynamics of road vehicles*. Warrendale, PA : SAE International. 1289 p.
- Žuraulis, V.; Žukas, A. 2012. Simuliacinės programos „CarSim“ panaudojimo galimybes automobilių skersinės dinamikos tyrimuose. *Žemės ūkio inžinerija*. Raudondvaris: ASU. 44(1-3): 100–111.