

TAIKOMOSIOS PROGRAMOS „CARSIM“ PRITAIKYMAS, MODELIUOJANT
VIENGUBĄ IR DVIGUBĄ JUDĖJIMO JUOSTOS PAKAITIMO MANEVRĄ

Artūras Žukas

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
El. paštas arturas.zukas@vgtu.lt

Santrauka. Straipsnyje nagrinėjamos kompiuterinių modeliavimo programų pritaikymo galimybės automobilių konstrukcijoms tobulinti, dinaminėms savybėms gerinti. Trumpai minimi vairuotojo elgseną aprašantys mokslininkų jau sukurti modeliai. Aptariamas vairo rato pasukimo procesas, pateikiamos priimtinos vairuotojui ir automobilio keleiviams nesudaranti diskomforto skersinio pagreičio reikšmės. Atliekama trumpa taikomosios kompiuterinio modeliavimo programos „CarSim“ apžvalga. Šia programa atlikti viengubo ir dvigubo judėjimo juostos pakeitimo manevrai, esant skirtingiems automobilio judėjimo greičiams ant sauso asfalto. Pateikti vairo rato pasukimo, skersinių pagreičių reikšmių grafikai. Taip pat pateiktos visus ratus veikiančių išilginių ir skersinių jėgų bei ratų slydimo reikšmės esant 90 km/h greičiui.

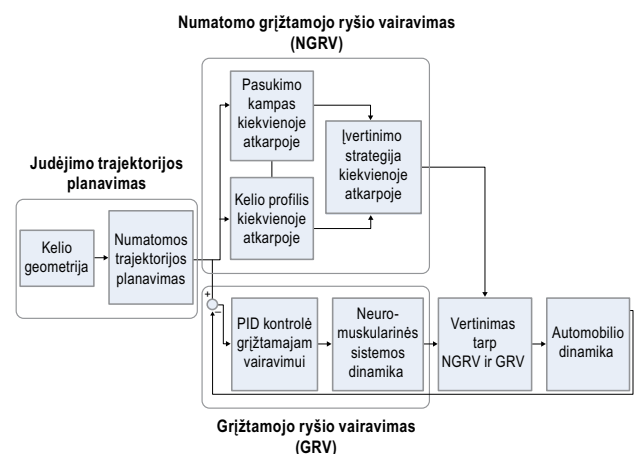
Reikšminiai žodžiai: judėjimo juosta, manevras, skersinis pagreitis, modeliavimo programa, vairo pasukimas, slydimo kampas.

Įvadas

Nemažai šiuolaikinių automobilių gamintojų deda daug pastangų tobulindami automobilių patikimumą, saugumą ir valdomumą. Jie taip pat stengiasi sukonstruoti automobilį, kuris būtų labiau prognozuojamas kelyje ar esant avarinei situacijai. Automobilio dinaminė elgsena dažnai tikrinama praktiškai realių bandymų metu. Tačiau stipriai tobulėjant kompiuterių pajėgumams, dažniausiai brangius, ilgai trunkančius bandymus galima pakeisti analogiškais, atliekamais virtualioje erdveje. Šiuo metu yra sukurta ne viena taikomoji kompiuterinė programa, kurioje naudojamas kelio – automobilio – vairuotojo modelis. Dėl jų automobilių gamintojai, eismo įvykių tyrėjai ir kiti suinteresuoti ekspertai gali išvengti papildomų prototipų kūrimo, testavimo realiomis sąlygomis ir pan. Be to, pastarąjį dešimtmetį skiriama ypač daug dėmesio eismo saugumui ir prevencijai, todėl tokių specializuotų taikomųjų programų naudojimas pramonėje yra itin svarbus ir aktualus. Šios programos leidžia įvertinti ir bene svarbiausius anksčiau minėtos sistemos komponentus – sąveiką tarp vairuotojo ir automobilio. Būtent šie du komponentai turi didžiausią įtaką eismo įvykių priežastims atsirasti. Todėl yra didžiulis poreikis tokio vairuotojo modelio, kuris elgtųsi taip pat arba bent jau labai panašiai į tikrąjį tipinį vairuotoją. O tai labai svarbu aktyvios saugos sistemų kūrimo ir tobulinimo požiūriu ir nustatant automobilių valdomumo ribas.

Daugelis studijų bandė nustatyti tikslius vairuotojo modelio reikalavimus. Pagrindinis vairuotojų modelių studijų tikslas – suprasti vairuotojų elgseną ir atgaminti jų

elgseną netikromis sąlygomis. Ashkens, McRuer (2002) ir McRuer (1980) pasiūlė du modelius: struktūrinį izomorfinį „žmogus – automobilis“ ir sukryžmintąjį. Struktūrinis „žmogus – automobilis“ modelis bando įvertinti daugelį posistemės aspektų, kurie priklauso nuo žmogaus vairuotojo ir į sistemą įeinančių ir išeinančių signalų poveikio (1 pav.). Naudodamiesi šiuo modeliu, daugelis šių laikų tyrėjų atliko įvairiausių tyrimų, nustatydami žmogaus, t. y. vairuotojo, elgseną tam tikrose situacijose. Allen ir kt. (1997, 2002) išskyrė dvi pagrindines sudedamąsias dalis, nusakančias vairuotojo sukamą vairo ratą: sekamoji ir kompensuojamoji. Sekamoji dalis priklauso nuo to, kaip vairuotojas mato ir atpažįsta kelio vingį ar manevro trajektoriją, apvažiuojantį



1 pav. Vairuotojo elgsenos modelis esant skersinei dinamikai
Fig. 1. A block diagram of a driver model for lateral dynamics

kitą automobilį / kliūtį, nepaisant nukrypimų nuo idealios trajektorijos. Tuo tarpu kompensuojamoji funkcija stengiasi automobilį grąžinti į idealią nustatytą trajektoriją.

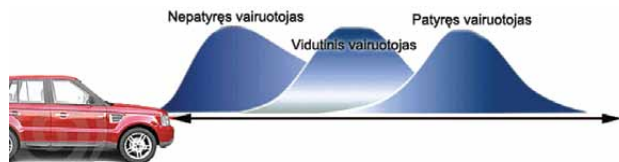
Nors buvo daug bandymų sukurti universalų vairuotojo modelį, iki šiol nėra nei vieno unifikuoto modelio, kuris būtų taikomas visais atvejais. Labiausiai komplikuoja modelio dalis – vairuotojo asmeninės savybės. Todėl žinant tai, tikro vairuotojo vairo pasukimas yra apibrėžiamas kaip procesas, kurio metu žmogus planuoja automobilio trajektoriją, imasi veiksmų, t. y. suka vairo ratą ir gauna viso to grįžtamąjį ryšį.

Žmogiškuoju faktoriumi, vadovaujantis (McRuer 1980), modeliuose laikoma vairuotojo matymo kampas, kūno motorikoje dalyvaujantys raumenys ir juos valdantys nerviniai signalai.

Vairo rato pasukimo procesas

Daugelis paprastų modelių remiasi tik tuo, kad vertina vairuotojo veiksmus viename taške. Tačiau, aišku, kad toks vertinimas nėra teisingas. Jei atkreiptume dėmesį į tai, kad tas taškas yra per toli nuo vietos, kur yra šiuo metu automobilis, arba per arti automobiliui dar neatlikus manevro – skaičiavimai bus netikslūs. Todėl dabar taikomi modeliai, įvertinantys daugelį taškų.

Praktika rodo, kad visi vairuotojai mato vienodą vizualinę informaciją, bet labiau patyrę vairuotojai susifokusuoja į tolimesnes kelio atkarpas, o nepatyrę vairuotojai toli nežiūri (2 pav.).



2 pav. Vairuotojų kelio vertinimo atstumai

Fig. 2. Distances analysed by drivers

Pabrėžtina ir tai, kad vairuotojai nesistengia sekti kelio centro linijos prieš artėdami į kelio vingį ar atlikdami manevrą. Todėl jie mintyse susikuria savo išivaizduojamą trajektoriją, kuria turi judėti automobilis. Nepaisant to, kad kiekvienas vairuotojas susikuria, jo manymu, idealią automobilio manevro trajektoriją, visiems atvejams būdinga tai, kad vairuotojas stengiasi, jog ji būtų kuo tolygesnė. Tai reiškia, kad vairuotojai nori manevrą atlikti ne tik esant kuo mažesniai skersiniam pagreičiui, bet ir sutrumpinti kelią. Studija apie automagistralių projektavimą (Krammes *et al.* 1995) teigia, kad vairuotojai pasirenka tokią greitį, kad manevro metu patirtų skersinį pagreitį, siekiantį tik iki 0,2–0,4 g (apie 1,9–3,9 m/s²). Kita studija (Allen *et al.*

1997) rodo, kad vairuotojams priimtinas skersinis pagreitis yra 0,3–0,5 g (apie 2,9–4,9 m/s²). Vadovaudamiesi tuo galime teigti, kad vairuotojai susikuria savo išivaizduojamą manevro kelią tam, kad jis būtų įveikiamas esant kuo mažesniai skersiniam pagreičiui. Be to, vairuotojai, įveikdami kelio vingį, renkasi kuo trumpesnę trajektoriją.

Taikomosios programos „CarSim“ apžvalga

Kaip užsiminta straipsnio pradžioje, šiuo metu yra sukurta nemažai taikomųjų programų, skirtų automobilio judėjimui simuliuoti. Straipsnyje plačiau panagrinėsime komercinės paskirties programą „CarSim“, kuri buvo sukurta kompanijos „Mechanical Simulation“. Ši programa naudojama visų didžiųjų automobilių, padangų gamybos ir kitų suinteresuotų specialistų.

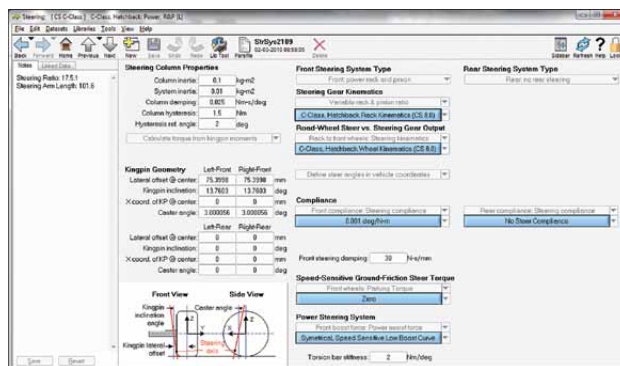
Šis programinis įrangos paketas ypač tinkamas:

- automobilių statikos ir dinamikos tyrimams;
- eismo saugumo inžinerinių problemų tyrimams;
- įvairioms eismo situacijoms modeliuoti;
- eismo saugumo inžinerinėms problemoms spręsti (pavojingiems kelių ruožams nustatyti, galimiems autoįvykiams modeliuoti ir prognozuoti);
- eismo įvykių ekspertizės rezultatams tikrinti.

Programa pasižymi tuo, kad ji turi net 55 judėjimo laisvės laipsnius. Aišku, daugelis jų yra tokių, kurie turi nedidelę arba nedaro jokios įtakos automobilio judėjimui keliu – variklio tipas, galingumas, pavarų dėžės tipas ir pan.

Tačiau nagrinėsime tik tuos parametrus, kurie turi vienokią ar kitokią reikšmę automobilio skersiniams pagreičiams. „CarSim“ programoje taip pat yra naudojamas vairo sistemos modelis, kuriam veikti būtini tokie parametrai: vairo pasukimo inercijos momentas, histerezė, slopinimas ir kiti (3 pav.).

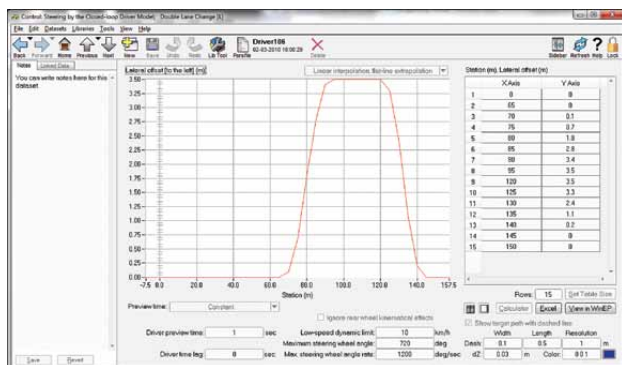
Pagrindinis programos veikimo principas – prieš bet kurio bandymo imitaciją programos vartotojas privalo numatyti transporto priemonės kelio, kuriuo ji judės, tipą, profilį, sukibimo koeficientą, judėjimo trajektoriją, greitį



3 pav. Pakabos parametrų įvedimo langas

Fig. 3. A window for entering suspension parameters

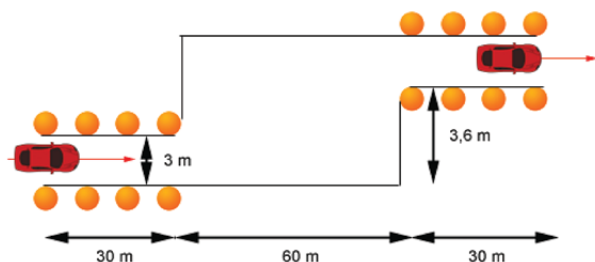
ir daugybę kitų parametų. Taip pat galima įvesti ir kitus parametrus, tokius kaip išorines jėgas, pvz., įvertinti šoninio vėjo įtaką, vairo rato pasukimo maksimalų kampą, maksimalų pasukimo greitį ir kt. Įvedus parametrus, taikant matematinį modelį gaunami rezultatai, kurie gali būti peržiūrėti grafiniu pavidalu, o vėliau eksportuojami (4 pav.). Kita naudinga programos savybė – galima vaizdus bandyti atkartoti trimatėje erdvėje.



4 pav. Automobilio judėjimo trajektorijos nustatymo langas
Fig. 4. A window for establishing the trajectory of car movement

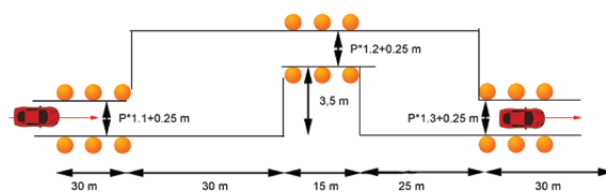
Modeliavimo metodika

Norėdami palyginti, kaip keičiasi skersiniai pagreičiai, kai automobilis manevruoja kelyje, esant skirtingiems greičiams, atliksime kompiuterinio modeliavimo bandymus. Bus atliekami viengubas ir dvigubas judėjimo juostos pakeitimo manevrai ant sauso asfalto, esant greičiams: 50, 70, 90, 110 ir 130 km/h. Laikoma, kad dangos sankibio koeficientas $\mu = 0,85$. Modeliuojama bus remiantis ISO 3888 standartu, kuris apibrėžia transporto priemonių dvigubo judėjimo juostos pakeitimo manevrą. Standarto apraše yra nustatytos metodikos tokiam testui atlikti. 5 ir 6 pav. pateiktas koridorius, kurį turi įveikti transporto priemonės, esant įvairiems judėjimo greičiams. Judėjimo juostos keitimo manevrai, praktikoje nagrinėjami itin dažnai, nes tai



5 pav. Viengubo judėjimo juostos pakeitimo manevro kelio trajektorija

Fig. 5. The trajectory of the road for the single lane change manoeuvre



6 pav. Dvigubo judėjimo juostos pakeitimo manevro kelio trajektorija pagal ISO 3888 standartą

Fig. 6. The trajectory of the road for the double lane change manoeuvre according to standard ISO 3888

dažniausiai naudojamas manevras, siekiant išvengti eismo įvykių (Žukas *et al.* 2010; Žukas, Sokolovskij 2009).

Bandymams buvo pasirinktas tipinis nedidelio dydžio sedano tipo automobilis. Pagrindiniai automobilio parametrai pateikti 1 lentelėje. Kiti, lentelėje nepateikti, parametrai bandymo rezultatams reikšmingos įtakos neturėjo, tačiau taikomoji programa „CarSim“ juos įvertino.

1 lentelė. Pagrindiniai automobilio parametrai

Table 1. The main parameters of the car

Parametrai	Mato vnt	Dydis
Ratų bazė	m	2,665
Bendra masė	kg	1289
Priekinės ašies masė	kg	799
Galinės ašies masė	kg	490
Svorio centro aukštis	m	0,61
Ilgis	m	4,420
Plotis	m	1,678
Aukštis	m	1,390

Modeliavimo rezultatai

Pirmiausia atliksime viengubo judėjimo juostos pakeitimo manevro kompiuterinį modeliavimą. Įvertinsime vairo rato pasukimo kampą esant skirtingiems automobilio judėjimo greičiams. Testo metu automobilio greitis bus fiksuotas ir viso manevro metu išliks vienodas (7 pav.).

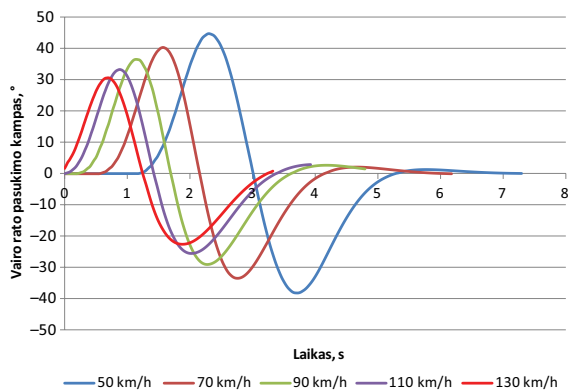
Didžiausias vairo pasukimo kampas yra esant mažiausiam modeliui greičiui – 50 km/h. Kai toks greitis, maksimalus vairo rato pasukimo kampas į kairę pusę buvo $44,5^\circ$, o į dešinę – $-38,2^\circ$. Tačiau šios reikšmės, esant 130 km/h, yra atitinkamai lygios $30,6^\circ$ ir $-22,7^\circ$.

Toliau matome, kaip automobilio judėjimo greitis veikia skersinį pagreitį, kuris atsiranda manevro metu ir veikia automobilį (8 pav.).

Mažiausias skersinis pagreitis veikia automobilį, judantį 50 km/h greičiu. Tada maksimali jo reikšmė siekia $2,43 \text{ m/s}^2$, o minimali – $-2,09 \text{ m/s}^2$. Tačiau didėjant greičiui, didėja ir skersinio pagreičio reikšmės. Esant 130 km/h greičiui jos atitinkamai yra $4,14$ ir $-3,09 \text{ m/s}^2$.

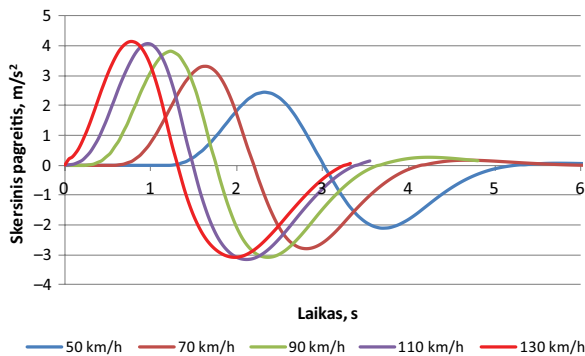
Pažvelkime, kaip atrodo vairo pasukimo diagrama, atliekant dvigubo judėjimo juostos pakeitimo manevrą. Šiuo atveju grafiškai pavaizduosime tik būdingesnių greičių (50, 90 ir 130 km/h) vairo rato pasukimo kreives (9 pav.).

Šiuo atveju iš kreivės matome, kad automobilio vairuotojas vairo ratą suka intensyviau, ir per mažesnį laiko



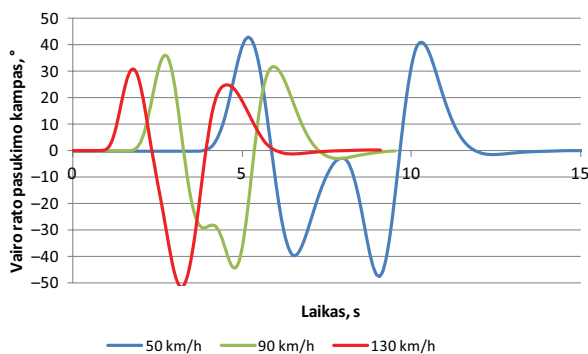
7 pav. Vairo rato pasukimo kampas viengubo juostos pakeitimo manevro metu, esant skirtingiems automobilio greičiams

Fig. 7. Steering wheel angle at various speeds during the single lane change manoeuvre



8 pav. Skersinis pagreitis viengubo juostos pakeitimo manevro metu, esant skirtingiems automobilio greičiams

Fig. 8. Lateral acceleration at various speeds during the single lane change manoeuvre



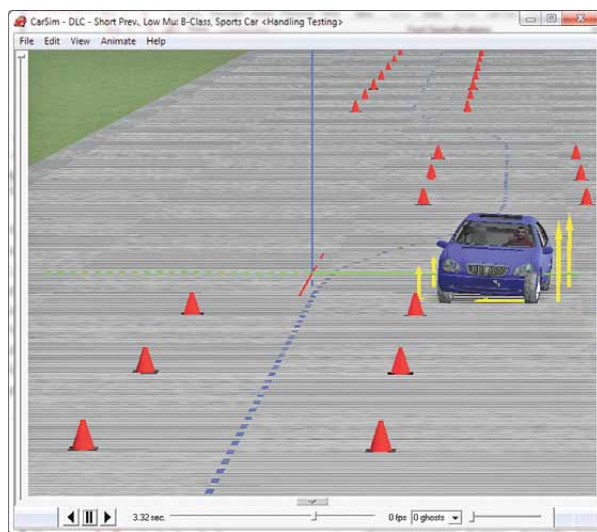
9 pav. Vairo rato pasukimo kampas dvigubo juostos pakeitimo manevro metu, esant skirtingiems automobilio greičiams

Fig. 9. Steering wheel angle at various speeds during the double lane change manoeuvre

tarpą vairas pasukamas didesne amplitude. Pažymėtina, kad automobiliui judant 130 km/h greičiu, vairuotojui pasukus automobilį į kairę pusę, kad automobilis sugrįžtų į pradinę judėjimo juostą, vairo ratą reikia per 1,4 sekundes pasukti net 82 laipsnių kampą. Tačiau nepaisant net ir tokių pastangų, automobilis nesugebėjo įveikti trajektorijos ir kliudė sustatytus trajektoriją žyminčius pilonus (10 pav.).

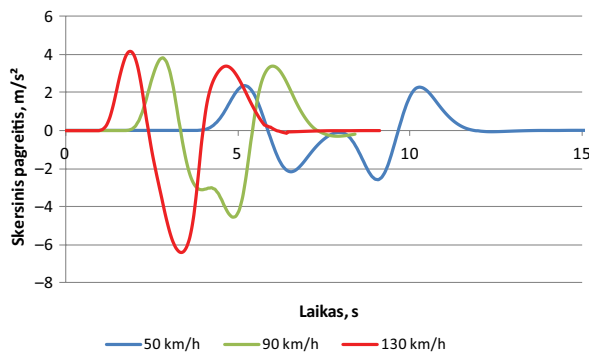
Skersinių pagreičių kitimo reikšmės atsižvelgiant į laiką pateiktos 11 paveiksle.

Akivaizdu, kad atliekant dvigubą judėjimo juostos pakeitimo manevrą atsiranda didesni neigiami pagreičiai. Esant 130 km/h, kaip ir minėjome, vairuotojas turi staiga pasukti vairo ratą, dėl ko skersinis pagreitis pasiekia net 6,41 m/s² reikšmę. Modeliavimo metu buvo laikoma, kad automobilis juda sausu asfaltu. Jei būtų modeliuojama ant slidžios kelio dangos, automobilis pradėtų slysti ir būtų nevaldomas (Sokolovskij 2007).



10 pav. Dvigubo juostos pakeitimo manevras, esant 130 km/h greičiui

Fig. 10. A double lane change manoeuvre at a speed of 130 km/h



11 pav. Skersinis pagreitis dvigubo juostos pakeitimo manevro metu, esant skirtingiems automobilio greičiams

Fig. 11. Lateral acceleration at various speeds during the double lane change manoeuvre

Pažiūrėkime visų automobilio ratų išilginių ir skersinių sankibio jėgų kitimą laike atliekant dvigubą judėjimo juostos pakeitimą esant 90 km/h greičiui (12 pav.).

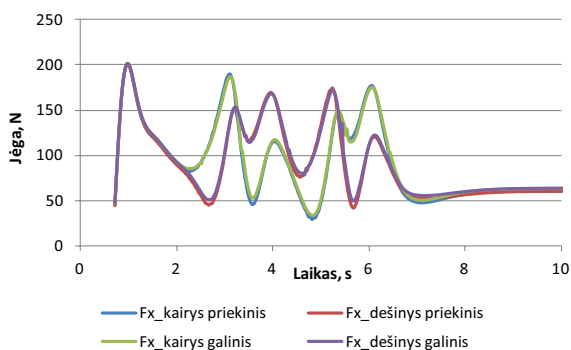
Kaip ir tikėtina, iš paveiklo matyti, kad jėgos manevro metu kinta labai mažai. Skersinio sankibio jėgos pateiktos 13 pav.

Šiuo atveju maksimali skersinė sankibio jėga, siekianti daugiau nei 4250 N, atsirado dešinės pusės priekiniame rate, o minimali reikšmė – -4124 N, taip pat priekiniame, bet jau dešinės pusės rate.

14 paveiksle pateiktas visų ratų skersinis slydimas

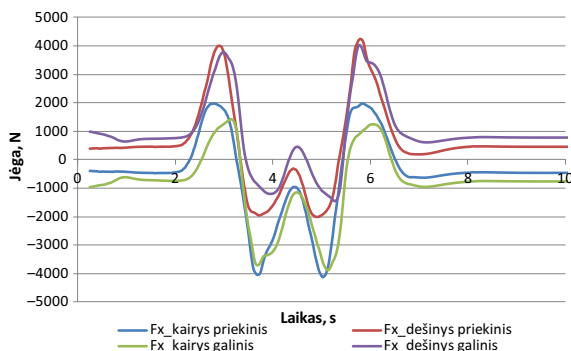
Maksimalus slydimo kampas, kuris buvo $2^{\circ}10'$, atsirado kairiajame galiniame rate, o minimalus slydimo kampas – $-2^{\circ}6'$ atsirado galiniame dešiniame rate.

Paminėtina, kad taikomoji programa „CarSim“ padangos kinematiniam judėjimui aprašyti taiko praplėstą Pacejka 5.2 versijos modelį. Modelis naudoja nelinejines lenteles, atvaizduojančias skersines, išilgines jėgas, ratų išsidėstymo momentus kaip funkcijas slydimo, apkrovos ir ratų pasvirimo kampams skaičiuoti. Be to, skersinėms ir išilginėms jėgoms taikyta kombinuotojo slydimo teorija pateikta mokslininkų Pacejka (2006) ir Sharp (2001).



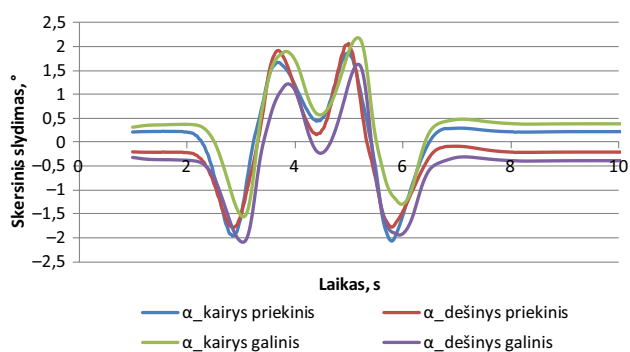
12 pav. Išilginės sankibio jėgos kiekviename rate, atliekant dvigubo juostos pakeitimo manevrą

Fig. 12. Longitudinal forces of each wheel during the double lane change manoeuvre



13 pav. Skersinės sankibio jėgos kiekviename rate, atliekant dvigubo juostos pakeitimo manevrą

Fig. 13. Lateral forces of each wheel during the double lane change manoeuvre



14 pav. Visų ratų skersinis slydimas, atliekant dvigubo juostos pakeitimo manevrą

Fig. 14. Lateral slip angle of each wheel during the double lane change manoeuvre

Išvados

1. Šiuo metu, užuot atlikę brangius ir ilgai trunkančius eksperimentinius tyrimus, daugelis gamintojų, tyrėjų ir ekspertų naudoja kompiuterines taikomąsias programas, kurių veikimas yra pagrįstas ir išbandytas ilgame patirtimi.
2. Atliktas viengubo ir dvigubo judėjimo juostos pakeitimo manevrų tyrimas dar kartą įrodo, kad dvigubas judėjimo juostos manevras reikalauja didesnio automobilio vairuotojo meistriškumo.
3. Remiantis modeliavimo rezultatais, aišku, kad atliekant anksčiau minėtus manevrus didesnis skersinis pagreitis atsiranda automobiliui judant didesniu greičiu.
4. Maksimalus modeliavimo metu pasiektas skersinis pagreitis yra $-6,41 \text{ m/s}^2$, esant 130 km/h greičiui. Tačiau to nepakako, kad automobilis įveiktų ISO 3888 standarte nustatytą trajektoriją.
5. Skersinė sankibio jėga, automobiliui atliekant dvigubą judėjimo juosto pakeitimo manevrą, esant 90 km/h, siekia daugiau nei 4250 N. Ji atsirado dešinės pusės priekiniame rate, kaip ir minimali -4124 N jėga, atsiradusi taip pat priekiniame, bet jau dešinės pusės rate.

Literatūra

- Allen, R. W.; Chrstos, J. P.; Aponso, B. L.; Lee, D. 2002. Driver/Vehicle Modeling and Simulation, *SAE Paper* No. 2002-01-1568.
- Allen, R. W.; Magdaleno, R. E.; Serafin, C.; Eckert, S.; Sieja, T. 1997. Driver-Car Following Behaviour Under Test Track and One-Road Driving Conditions, *SAE Paper* 970170, Society of Automotive Engineers, Warrendale PA. <http://dx.doi.org/10.4271/970170>
- Ashkens, I. L.; McRuer, D. T. 2002. A theory of handling qualities derived from pilot/vehicle system consideration, *Aerospace Engineering* 21(2): 83–102.

- ISO 3888. Test Track for a Severe Lane Change Maneuver. 1 ed. International Standard Organization.
- Krammes, R. A.; Brackett, R. Q.; Shafer, M. A.; Ottesen, J. L.; Anderson, I. B.; Fink, K. L.; Collins, K. M.; Pendleton, O. J.; Messer, C. J. 1995. *Horizontal – Consistency for Rural Two-Lane Highways*, FHWA-RD-94-034. Federal Highway Alignment Design Administration, Washington DC.
- McRuer, D. 1980. Human dynamics in man-machine systems, *Automatica* 16: 237–253.
[http://dx.doi.org/10.1016/0005-1098\(80\)90034-5](http://dx.doi.org/10.1016/0005-1098(80)90034-5)
- Pacejka, H. B. 2006. *Tyre and Vehicle Dynamics*. 2nd ed. SAE International.
- Sharp, R. S. 2001. Stability, control and steering, *Vehicle System Dynamics* 35(4–5): 291–318.
<http://dx.doi.org/10.1076/vesd.35.4.291.2042>
- Sokolovskij, E. 2007. Automobile braking and traction characteristics on the different road surfaces, *Transport* 22(4): 275–278.
- Žukas, A.; Sokolovskij, E. 2009. Įvairių automobilio manevravimo kelių ilgių palyginimas, *Mokslas – Lietuvos ateitis* [Science – Future of Lithuania] 1(6): 10–13.
- Žukas, A.; Zaranka, J.; Kemzūraitė, K. 2010. Automobilių manevravimo ir stabdymo palyginimas, *Mokslas – Lietuvos ateitis* [Science – Future of Lithuania] 2(6): 90–93.

APPLICATION OF COMPUTER PROGRAM *CARSIM* FOR MODELLING SINGLE AND DOUBLE LANE CHANGE MANOEUVRES

A. Žukas

Abstract

The paper analyzes the possibilities of using computer aided modelling programs for developing new cars to achieve better dynamical properties of control over vehicles. The article shortly reviews the behaviour of young and experienced drivers and models describing it. The paper covers the process of turning car steering wheel, considers acceptable values of lateral acceleration comfortable for a car driver and all car passengers and presents computer aided modelling program *CarSim* used for displaying single and double lane change manoeuvres at various speeds on dry asphalt. The given charts, including data about steering wheel angle and lateral acceleration values indicate single and double lane change manoeuvres performed by a car. Also, the values of longitudinal and lateral forces of each wheel during the double lane change manoeuvre are provided.

Keywords: lane change manoeuvre, lateral acceleration, modelling program, steering wheel angle, slip angle.