



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

TRANSPORTO INŽINERIJOS FAKULTETAS

AUTOMOBILIŲ TRANSPORTO KATEDRA

Tautvydas Jakas

**SLYDIMĄ IMITUOJANČIOS SISTEMOS ĮTAKOS LENGVOJO
AUTOMOBILIO DINAMINĖMS CHARAKTERISTIKOMS TYRIMAS**

**THE RESEARCH OF INFLUENCE OF SKIDCAR SYSTEM ON VEHICLE
DYNAMIC CHARACTERISTICS**

Baigiamasis magistro darbas

Transporto inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621E20003

Automobilių transporto inžinerijos specializacija

Sausumos transporto inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2015

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

TRANSPORTO INŽINERIJOS FAKULTETAS

AUTOMOBILIŲ TRANSPORTO KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

Saugirdas Pukalskas
(Vardas, pavardė)

(Data)

Tautvydas Jakas

**SLYDIMĄ IMITUOJANČIOS SISTEMOS ĮTAKOS LENGVOJO
AUTOMOBILIO DINAMINĖMS CHARAKTERISTIKOMS TYRIMAS**

**THE RESEARCH OF INFLUENCE OF SKIDCAR SYSTEM ON VEHICLE
DYNAMIC CHARACTERISTICS**

Baigiamasis magistro darbas

Transporto inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621E20003

Automobilių transporto inžinerijos specializacija

Sausumos transporto inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Konsultantas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2015

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Transporto inžinerijos fakultetas
Automobilių transporto katedra

ISBN
Egz. sk.
Data-.....-.....

ISSN

Antrosios pakopos studijų **Transporto inžinerijos** programos magistro baigiamasis darbas

Pavadinimas **Slydimą imituojančios sistemos įtakos lengvojo automobilio dinaminėms
charakteristikoms tyrimas**

Autorius **Tautvydas Jakas**

Vadovas **doc. dr. Saulius Nagurnas**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamajame darbe yra įvertinama lengvojo automobilio slydimą imituojančios sistemos įtaka automobilio dinaminėms charakteristikoms: nagrinėjamos automobilio kėbulo svyravimų, dinaminių rato išvrtimo kampų priklausomybės nuo automobilio skersinio pagreičio bei automobilio kritiniai ir charakteringi greičiai. Pirmiausia, nustatomos automobilio dinaminės charakteristikos su slydimą imituojančia sistema. Atliekami eksperimentai, važiuojant nekintamo spindulio apskritimo trajektorija, didinant automobilio judėjimo greitį, kol automobilis praranda sukibimą su kelio danga. Remiantis ta pačia bandymų metodika, atliekami eksperimentiniai tyrimai be automobilio slydimą imituojančios sistemos. Pagal gautus rezultatus daromos išvados, kurioms automobilio dinaminėms charakteristikoms didžiausią įtaką turi slydimą imituojanti sistema. Tyrimų rezultatai suteikia galimybę įvertinti, kaip skiriasi automobilio dinaminės charakteristikos imituojant skirtingo sukibimo su kelio danga sąlygas nuo realių charakteristikų važiuojant skirtingomis kelio dangomis.

Darbo apimtis – 65 p. teksto be priedų, 49 paveikslai, 13 lentelių. Atskirai pridedami darbo priedai.

Prasminiai žodžiai: dinaminės charakteristikos, automobilio svyravimai, išvrtimo kampas, skersinis pagreitis, kritinis greitis, charakteringas greitis.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Transport Engineering
Department of Automobile Transport

ISBN _____ ISSN _____
Copies No.
Date~.....~.....

Master Degree Studies **Transport Engineering** study programme Master Graduation Thesis

Title **The research of influence of skidcar system on vehicle dynamic characteristics**

Author **Tautvydas Jakas**

Academic supervisor **Assoc Prof Dr Saulius Nagurnas**

**Thesis
language:**
Lithuanian

Annotation

In this final work, the influence of skidcar system on vehicle dynamic characteristics is evaluated, – vehicle body roll, wheel camber angle, critical and characteristic speed are investigated. Firstly, dynamic characteristics with skidcar system is explored. Vehicle steady-state cornering behaviour is presented according to constant radius turn test procedure. According to the same experimental methodology, dynamic characteristics without skidcar system is explored. To evaluate the results find the vehicle dynamic characteristics, which is influenced the most by the skidcar system. The results show the difference of dynamic characteristic in real conditions and conditions imitated with skidcar system. The findings and recommendations.

The size of the work – 65 pages without enclosures, 49 figures, 13 tables.

Keywords: dynamic characteristics, body roll, wheel camber angle, critical speed, characteristic speed

TURINYS

IVADAS.....	11
1. LITERATŪROS ANALIZĖ.....	12
1.2. Mokslinių straipsnių apžvalga.....	12
2. TRANSPORTO PRIEMONIŲ DINAMIKOS TEORINIAI ASPEKTAI.....	26
2.1. Transporto priemonę veikiančios jėgos.....	26
2.2. Išilginė dinamika.....	27
2.3. Skersinė dinamika.....	29
2.4. Automobilio rato sukibimas su keliu.....	31
3. AUTOMOBILIO SU SLYDIMĄ IMITUOJANČIA ĮRANGA DINAMINIŲ SAVYBIŲ EKSPERIMENTINIS TYRIMAS.....	34
3.1. Eksperimentinių tyrimų atlikimo metodika ir sąlygos.....	34
3.1.1. Pastovaus greičio metodas.....	34
3.1.2. Nekintamo spindulio metodas.....	35
3.1.3. „Briedžio testas“	35
3.2. Eksperimentinių tyrimų metu naudota įranga.....	36
3.3. Eksperimento atlikimo tvarka.....	42
3.4. Eksperimento rezultatai.....	43
3.4.1. Eksperimentinių tyrimų metu nustatyti automobilio kėbulo svyravimai.....	43
3.4.2. Eksperimentinių tyrimų metu nustatytas automobilio ratų išvirtimo kampas.....	47
3.4.3. Eksperimentinių tyrimų metu nustatytas automobilio kritinis ir charakteringas greičiai.....	50
4. AUTOMOBILIO BE SLYDIMĄ IMITUOJANČIOA ĮRANGOS EKSPERIMENTINIS TYRIMAS.....	53
4.1. Eksperimentinių tyrimų atlikimo metodika ir sąlygos.....	53
4.2. Teorinės eksperimento prielaidos.....	53
4.3. Eksperimentinių tyrimų metu naudota įranga.....	53
4.4. Eksperimento atlikimo tvarka.....	54
4.5. Eksperimento rezultatai.....	54
4.5.1. Eksperimentinių tyrimų metu nustatyti automobilio kėbulo svyravimai.....	55
4.5.2. Eksperimentinių tyrimų metu nustatytas automobilio ratų išvirtimo kampas.....	56
4.5.3. Eksperimentinių tyrimų metu nustatytas automobilio kritinis ir charakteringas pagreičiai.....	57
5. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ REZULTATŲ ANALIZĖ.....	59
IŠVADOS IR PASIŪLYMAI.....	66
LITERATŪRA.....	67
PRIEDAI.....	69

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Vairo mechanizmo jautrumo, vairo sukimo momento gradiento, skersinio pagreičio ir automobilių judėjimo greičio santykis.....	12
2 pav. Skersinio pagreičio priklausomybė nuo vairo pasukimo kampo.....	13
3 pav. Dvigubas juostos pakeitimo manevras.....	14
4 pav. Skersinės automobilių dinamikos bandymo metodų pasiskirstymas.....	15
5 pav. Skersiniai pagrečiai esant snieguotai kelio dangai su asfalto provėžomis.....	16
6 pav. Skersiniai pagrečiai esant snieguotai kelio dangai.....	16
7 pav. Simuliacijos „CarSim“ programa bei „Crash Test“ metu gauti slydimo ir virtimo kampai.....	17
8 pav. Bandymams skirta transporto priemonė.....	18
9 pav. Matavimams skirta transporto priemonė.....	18
10 pav. Šoninio pagreičio ir slydimo kampo intensyvumo priklausomybė nuo laiko.....	19
11 pav. Šoninio slydimo kampo ir vairo pasukimo momento priklausomybė nuo laiko.....	20
12 pav. Kraštinės pakabos ir kėbulo būsenos.....	20
13 pav. Automobilio su torsio-elastiniu vėlu dinaminis modelis.....	21
14 pav. Aktyvios stabdymo sistemos veikimas posūkyje.....	22
15 pav. Kontroliuojamo ir nekontroliuojamo automobilių slydimo kampo intensyvumo priklausomybė nuo laiko atliekant dvigubo juostos keitimo manevrą.....	23
16 pav. Kontroliuojamo ir nekontroliuojamo automobilių slydimo kampo intensyvumo priklausomybė nuo laiko atliekant J formos manevrą.....	23
17 pav. Eksperimentinis automobilis.....	24
18 pav. Automobilio judėjimo trajektorija.....	24
19 pav. Automobilį veikiančios jėgos ir jų momentai.....	26
20 pav. Išilginės dinamikos modelis.....	27
21 pav. Skersinės dinamikos modelis.....	30
22 pav. Rato sukibimo su keliu charakteristika.....	32
23 pav. Nekintamo greičio metodo schema.....	34
24 pav. Nekintamo spindulio bandymo schema.....	35
25 pav. „Briedžio testo“ principinė trasos schema.....	36
26 pav. Duomenų surinkimo ir apdorojimo įrenginys „Corrsys-Datron DAS-3“.....	37
27 pav. „Corrsys-Datron TANS-3215003M5“ trijų ašių pagreičio jutiklis.....	38
28 pav. Bekontaktis greičio ir pagreičio jutiklis CORREVIT S-350.....	39
29 pav. Lazerinis kėbulo padėties jutiklis CORREVIT HF-500C.....	39
30 pav. Ratų padėties jutiklis KISTLER RV-4.....	40
31 pav. Automobilio slydimą imituojanti sistema.....	41

32 pav. Automobilis „Mazda 626“ su slydimą imituojančia bei matavimo įranga.....	42
33 pav. <i>Correxit S-350</i> jutiklio bendras vaizdas ant automobilio MAZDA 626	43
34 pav. <i>Correxit HF-500C</i> jutiklio bendras vaizdas ant automobilio MAZDA 626.....	44
35 pav. <i>Correxit HF-500C</i> jutiklio bendras vaizdas ant automobilio MAZDA 626.....	44
36 pav. Sumontuotos įrangos bendras vaizdas MAZDA 626 automobilyje.....	45
37 pav. Jutiklių h1 ir h2 padėtys.....	45
38 pav. Automobilio su slydimo sistema kėbulo skersinio svyravimo priklausomybė nuo automobilį veikiančio skersinio pagreičio.....	46
39 pav. Rato išvirtimo kampas ir jo matavimas.....	47
40 pav. Išfiltruotų duomenų forma <i>MS Excel</i> programoje	48
41 pav. Vidinio vairuojamojo rato išvirtimo kampo priklausomybė nuo automobilio skersinio pagreičio.....	49
42 pav. Išfiltruotų duomenų forma <i>MS Excel</i> programoje.....	51
43 pav. Automobilio vairo pasukimo kampo priklausomybė nuo automobilio judėjimo greičio.....	52
44 pav. Automobilio su slydimo sistema kėbulo skersinio svyravimo priklausomybė nuo automobilį veikiančio skersinio pagreičio.....	55
45 pav. Vidinio vairuojamojo rato išvirtimo kampo priklausomybė nuo automobilio skersinio pagreičio.....	56
46 pav. Automobilio vairo pasukimo kampo priklausomybė nuo automobilio judėjimo greičio.....	58
47 pav. Didžiausios bandyto automobilio kėbulo pasvirimo reikšmės: I – judėjimas 20 m spindulio apskritimu, esant aukščiausiai automobilio padėčiai, II – judėjimas 20 m spindulio apskritimu, esant žemiausiai automobilio padėčiai, III – judėjimas 15 m spindulio apskritimu, esant aukščiausiai automobilio padėčiai, IV – judėjimas 15 m spindulio apskritimu, esant žemiausiai automobilio padėčiai, V – judėjimas 20 m spindulio apskritimu, VI – judėjimas 15 m spindulio apskritimu.....	59
48 pav. Automobilio kėbulo skersinio svyravimo priklausomybė nuo automobilį veikiančio skersinio pagreičio.....	60
49 pav. Didžiausios bandyto automobilio rato išvirtimo reikšmės.....	61
50 pav. Vidinio vairuojamojo rato išvirtimo kampo priklausomybė nuo automobilio skersinio pagreičio.....	62
51 pav. Automobilio vairo pasukimo kampo priklausomybė nuo automobilio judėjimo greičio.....	63
52 pav. Didžiausios bandyto automobilio skersinio pagreičio reikšmės. I – aukščiausias automobilio pakėlimas, II – žemiausias automobilio pakėlimas, III – be slydimo sistemos	64

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Slydimą imituojančios sistemos techniniai parametrai.....	41
2 lentelė. Automobilio kėbulo svyravimų kampo reikšmės.....	47
3 lentelė. Didžiausios automobilio ratų išvirtimo kampo reikšmės.....	50
4 lentelė. Didžiausios automobilio kritinio greičio reikšmės.....	52
5 lentelė. Automobilio kėbulo svyravimų kampo reikšmės.....	56
6 lentelė. Didžiausios automobilio ratų išvirtimo kampo reikšmės.....	57
7 lentelė. Didžiausios automobilio charakteringo greičio reikšmės.....	58
8 lentelė. Eksperimentinio ir teorinio kritinio greičio reikšmės.....	65

IVADAS

Šiais laikais vis daugiau dėmesio yra skiriama automobilių techninių charakteristikų bei priemonių, padedančių užtikrinti automobilių saugumą, tobulinimui. Siekiant visokeriopo automobilio saugumo yra diegiamos vis naujesnės ir modernesnės aktyviosios ir pasyviosios saugos priemonės. Automobilių gamintojai nuolat ieško sprendimų gerinant automobilių dinamines savybes. Siekiant ištirti lengvųjų automobilių dinamines charakteristikas atliekami įvairūs eksperimentai. Automobilio stovumas, gebėjimas stabiliai įveikti posūkius ir kitos dinaminės charakteristikos yra svarbiausios automobilio saugiam eismui automobilių keliais užtikrinti. Nepakankamas automobilio sukibimas su kelio danga dažnai tampa skaudžių nelaimių priežastimi. Dėl to šio darbo tema yra aktuali, nes saugumo klausimai negali būti ignoruojami.

Atsižvelgiant į problematiką, darbo tikslas – ištirti slydimą imituojančios sistemos įtaką lengvojo automobilio dinaminėms charakteristikoms.

Tikslui pasiekti suformuoti šie uždaviniai:

1. Išanalizuoti lengvojo automobilio skersinės dinamikos charakteristikas.
2. Išanalizuoti automobilio slydimą imituojančios sistemos pritaikymo automobilio dinamikos tyrimams galimybes.
3. Pasirinktu dinaminio stovumo eksperimentiniu metodu ištirti lengvojo automobilio su slydimą imituojančia sistema dinامينius parametrus, ištirti lengvojo automobilio be slydimą imituojančios sistemos dinامينius parametrus. Įvertinti ratų sukibimą su kelio danga, esant skirtingiems sistemos pakėlimo aukščiams.
4. Tyrimų rezultatų analizė, automobilio dinaminė charakteristikų palyginimas, naudojant slydimą imituojančią sistemą ir be jos.

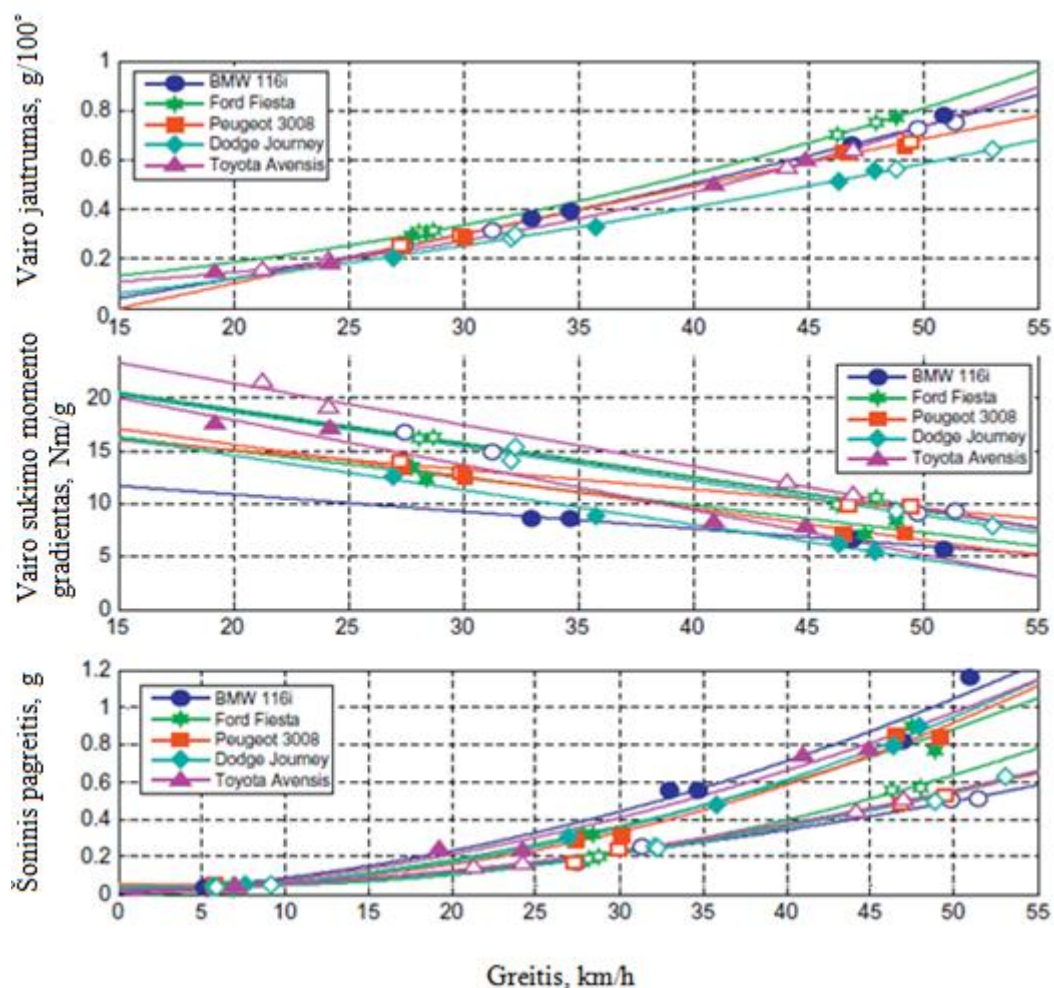
Pirmajame darbo skyriuje yra nagrinėjami literatūros šaltiniai, kurie savo tematika yra susiję su šiame darbe nagrinėjama tema. Antrajame skyriuje aprašomos transporto priemonę veikiančios jėgos. Trečiajame skyriuje apžvelgiami dinaminio stovumo eksperimentinių tyrimų metodai, įranga, aprašomas lengvuju automobiliu su slydimą imituojančia sistema atliktas eksperimentas, gauti rezultatai pateikiami grafiškai. Kitame skyriuje aprašomas eksperimentas, atliktas su automobiliu be slydimą imituojančios sistemos, pateikiami rezultatai. Penktajame skyriuje pateikiama rezultatų analizė, palyginami automobilio dinaminiai parametrai. Pakutiniame skyriuje pateikiamos tyrimo išvados bei pasiūlymai.

1. LITERATŪROS ANALIZĖ

1.2. Mokslinių straipsnių apžvalga

Ruošiantis atlikti baigiamąjį darbą, buvo domimasi kitų autorių atliktais darbais, buvo ieškoma mokslinių straipsnių, internetinių šaltinių ir kitos informacijos, kuri yra artima pasirinktai darbo temai.

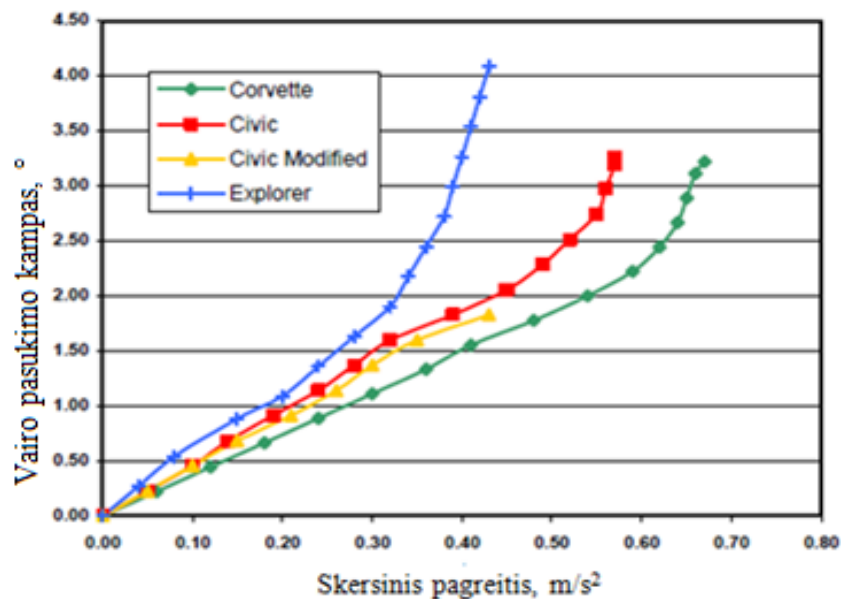
D. Katzourakis, J. C. F. de Winter, S. de Groot, R. Happee (2012) straipsnyje aprašomas penkių lengvųjų automobilių parametrų tyrimas atliekant staigaus persirikiavimo manevrą tarp dviejų eismo juostų. Bandymo metu matuojamas automobilių greitis, vairo pasukimo kampas, skersinis pagreitis, vairo sukimo momentas. Vertinama automobilių reakcija į vairo sukimo momentą, esant skirtingiems judėjimo greičiams. Pateiktuose grafikuose (1 pav.) autorius parodo automobilių vairo mechanizmo jautrumo, vairo sukimo momento gradiento, skersinio pagreičio priklausomybę nuo automobilių judėjimo greičio.



1 pav. Vairo mechanizmo jautrumo, vairo sukimo momento gradiento, skersinio pagreičio ir automobilių judėjimo greičio santykis

Labai išsamiai ir įdomiai J. Boot (2005) darbe aprašomas keturiais ratais varomo ir keturiais ratais valdomo automobilio modelis. Šio autoriaus darbe projektuojami visi automobilio mazgai, tačiau daugiausia dėmesio skiriama automobilio dinamikai. Autorius pabrėžia, kad sunkiausia sukurti automobilio valdymo sistemą, kuri išlaikytų automobilio tiesiškumą judant tiesiąja bei užtikrintų automobilio kontrolę įveikiant posūkius. Darbe aprašomi keturi dinaminiai modeliai: automobilio ketvirčio modelis, plokštuminis modelis, skirtingų masių modelis. Autorius lygindamas modelius teigia, jog neužtenka vieno dinaminio modelio norint apskaičiuoti tokio automobilio dinamines charakteristikas. Šiame darbe neaprašomi bandymai, atlikti su suprojektuotu automobiliu.

Mokslininko Daniel A. Fittanto (2004) darbe analizuojami procesai, vykstantys automobiliui judant nustatyto spindulio apskritimu. Tyrimo metu bandomi lengvieji automobiliai ir visureigiai. Analitinėje dalyje standartinė Akermano kampo išraiška pakeičiama patikslintu variantu: $d = \frac{57,3L}{R} + K \frac{v^2}{gR}$ (čia: K – pasukamumo gradientas, v – greitis, g – laisvasis kritimo pagreitis, L – bazės ilgis). Darbe pateikiama išvada, kad stabilesni automobiliai yra tie, kurių pasukamumas yra nepakankamas. Autoriaus pateiktame grafike (2 pav.) matoma automobilių, su kuriais buvo atliekami bandymai, skersinio pagreičio priklausomybė nuo vairo pasukimo kampo atliekant posūkį. Šiame darbe pasiūlyti analitiniai skaičiavimo metodai bei atlikti bandymai, jų rezultatų grafikai bei analizės gali būti puikiai pritaikomi lengvojo automobilio dinamikos charakteristikoms tirti.



2 pav. Skersinio pagreičio priklausomybė nuo vairo pasukimo kampo

Kitas aktualus straipsnis – tai L. Imsland (2008) straipsnis, publikuotas moksliniame žurnale „Automatica“. Šiame straipsnyje yra pateikiami automobilių sukibimo tyrimo rezultatai, gauti atliekant bandymus ant skirtingų kelio dangų, ir gretinami su analitiniu būdu gautais rezultatais. Bandymų metu naudojami du automobiliai: pirmasis varomas galiniais ratais, o antrasis varomas visais keturiais ratais. Šis straipsnis savo tematika yra tinkamas mano pasirinktai temai, nes straipsnyje taip pat aprašomas bandymas automobiliams važiuojant nustatyto spindulio apskritimu, gauti rezultatai ir diagramos gali būti pritaikomos skirtingų automobilių dinaminėms charakteristikoms lyginti.

Vienas aiškiausių ir daugiausiai dinaminių dėsnių bei teorijų aprėpiantis – T. D. Gillespie (1998) vadovėlis. Autorius savo vadovėlyje išsamiai išnagrinėjo visus automobilių dinamikos parametrus – įsibėgėjimą, stabdymą, aerodinamiką, pakabos, padangų, vairavimo sistemos įtaką dinamikai. Itin naudingos iliustracijos su specifinių dinaminių procesų paaškinimais. Pateikiami aiškiai suprantami skaičiavimų metodai su pavyzdžiais. Šaltinyje esanti medžiaga puikiai pritaikoma atliekant lengvojo automobilio dinaminis skaičiavimus, todėl šia knyga remiuosi atlikdamas savo baigiamąjį darbą.

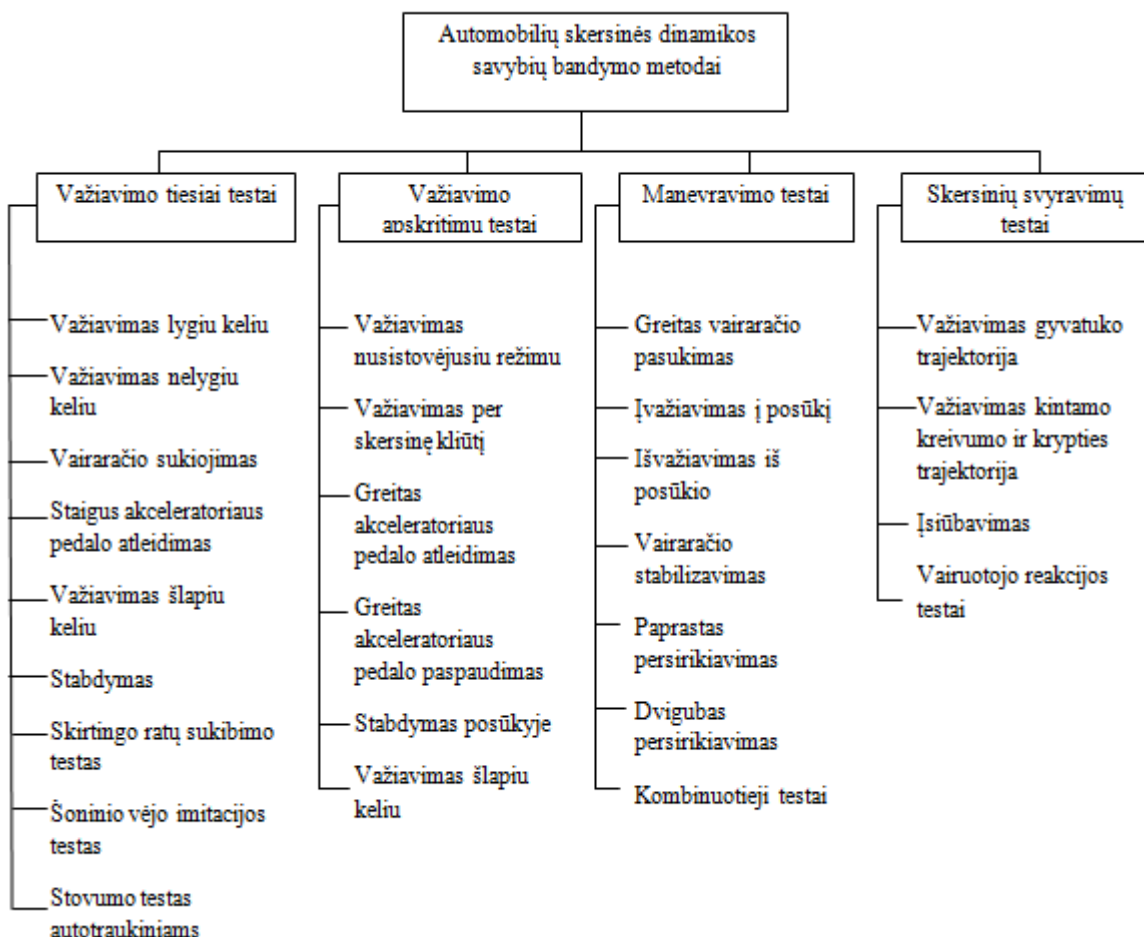
A. Žuko (2012) straipsnyje nagrinėjamas taikomosios programos „CarSim“ pritaikymas, modeliuojant viengubą ir dvigubą judėjimo juostos pakeitimo manevrą. Straipsnis labai naudingas, nes aprašomos „CarSim“ programos taikymo galimybės. Supažindinama su programos įvesties parametrais, pateikiami sumodeliuoto automobilio juostos pakeitimo manevro rezultatai. Programa gautus rezultatus galima lengvai palyginti su realaus bandymo rezultatais. Straipsnyje pateikiamas „CarSim“ programa gautas animuotas manevro eskizas (3 pav.) bei vairo rato pasukimo, skersinio pagreičio, skersinio slydimo priklausomybių nuo laiko grafikai.



3 pav. Dvigubas juostos pakeitimo manevras

Nemažai informacijos pateikiama G. Rill (2006) knygoje. Autorius glaustai pateikia ir aprašo visus dinامينius aspektus (skersinės, išilginės, vertikalios, horizontalios dinamikos sąvokas bei procesus). Ši knyga skirta pažengusiems, todėl nesigilinama į paprastų procesų aiškinimus. Autorius naudoja *MATLAB* programą, tačiau išsamiai nepaaiškina, kaip gaunami rezultatai. Nepaisant to, yra ir naujų dinامينių procesų aiškinimo pavyzdžių, todėl ši knyga yra tinkama kaip informacijos šaltinis atliekant šį baigiamąjį darbą.

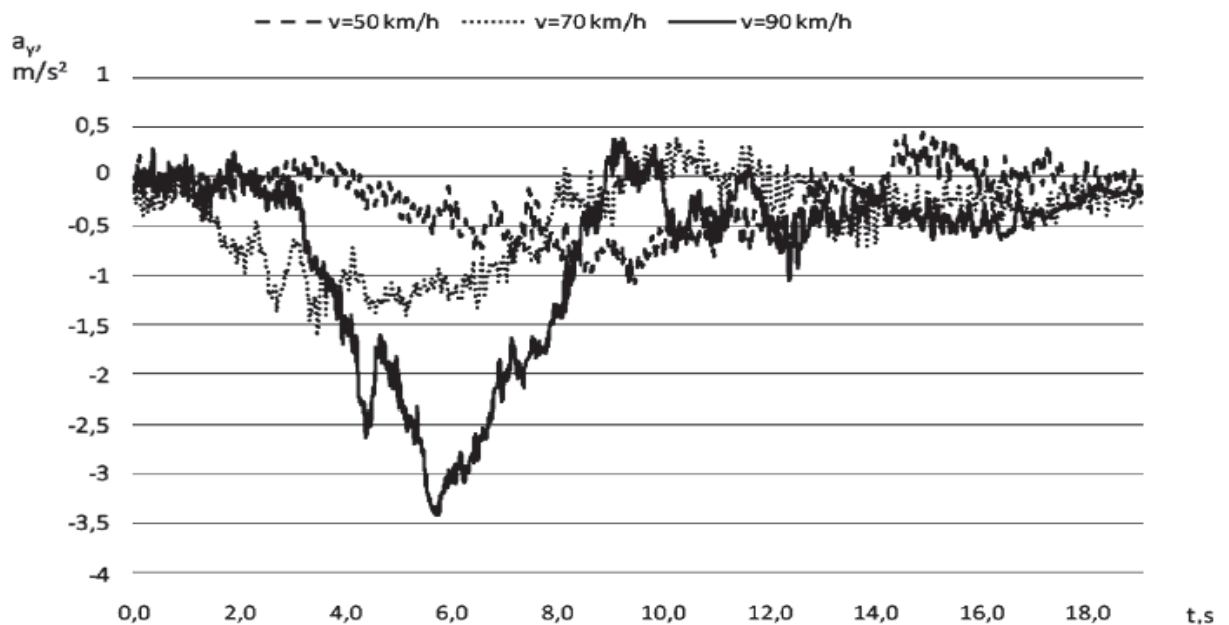
V. Mitunevičiaus (2000) straipsnyje išsamiai nagrinėjami skersinės automobilio dinamikos tyrimo metodai. Autorius nagrinėja bandymų metodus ir suskirsto juos į keturias grupes: važiavimo tiesiai, važiavimo apskritimu, manevravimo ir skersinių svyravimų testus. Šis straipsnis labai naudingas ruošiantis atlikti automobilio dinامينių charakteristikų tyrimą. Atlikdamas bandymus remiuosi autoriaus pateikiamais bandymų metodais (4 pav.)



4 pav. Skersinės automobilių dinamikos bandymo metodų pasiskirstymas

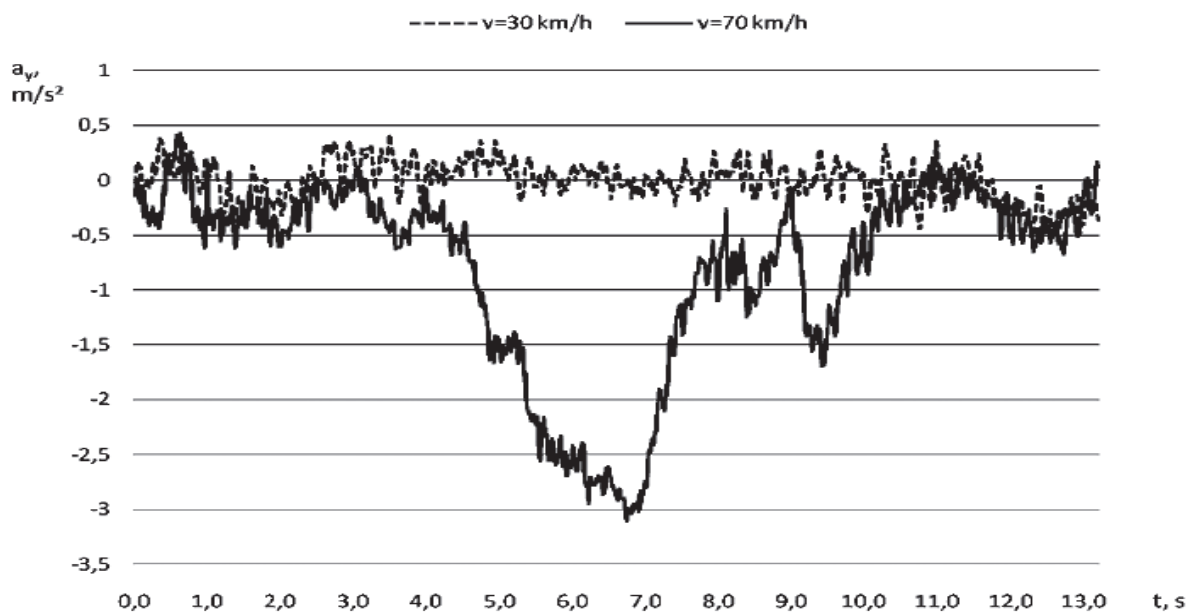
Galima teigti, kad K. Kemzūraitės (2011) straipsnis yra artimiausias mano atliekamo tiriamojo darbo tematikai. Šiame straipsnyje aprašomas dviejų skirtingų automobilių judėjimo apskritimu tyrimas. Pirmiausia tirtas automobilio judėjimas posūkyje, kai danga buvo snieguota

su asfalto provėžomis. Posūkyje buvo važiuojama nuo 50 km/h iki 90 km/h. Skersinio pagreičio reikšmės pateikiamos grafike (5 pav.). Automobilis judėjo 120 m spindulio posūkiu.



5 pav. Skersiniai pagrečiai esant snieguotai kelio dangai su asfalto provėžomis

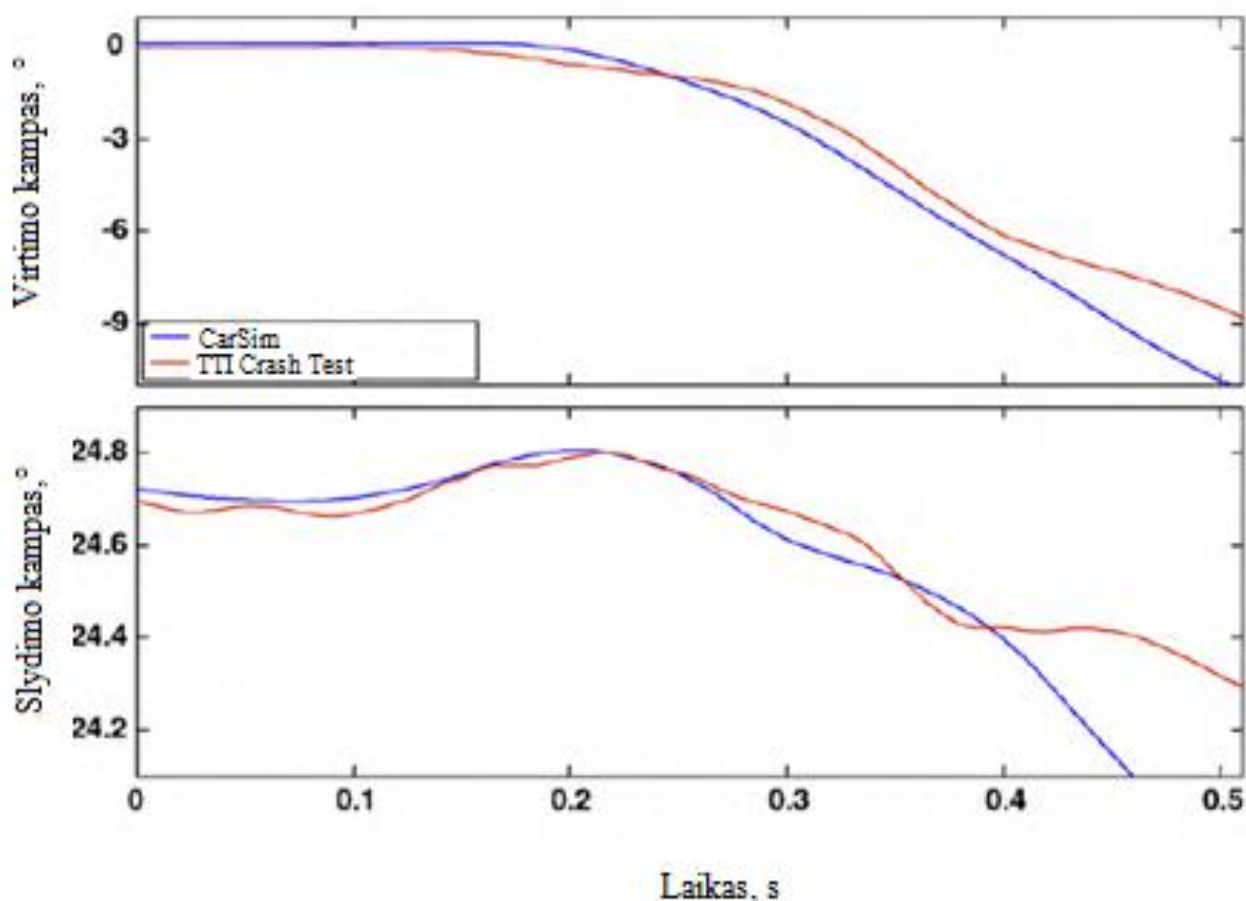
Antras bandymas atliekamas ant snieguotos kelio dangos, straipsnyje pateikiamas grafikas (6 pav.).



6 pav. Skersiniai pagrečiai esant snieguotai kelio dangai

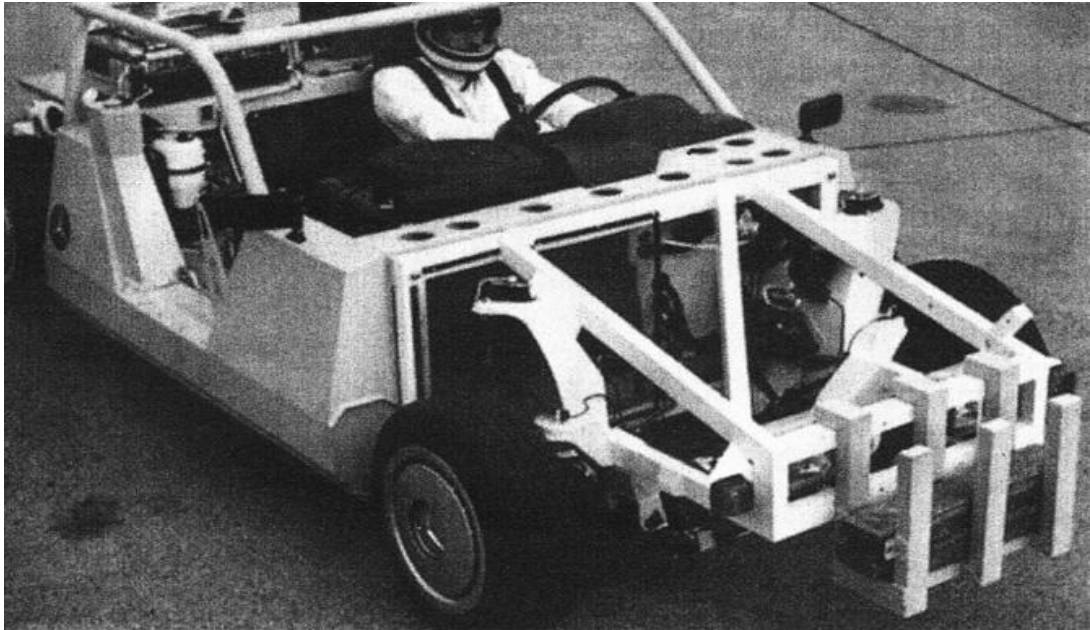
Straipsnyje autorė teigia, jog važiavimas snieguota kelio danga yra daug pavojingesnis už važiavimą snieguota kelio danga su sauso asfalto provėžomis.

Jason S. Stine (2010) straipsnyje puikiai pagrindžiamas mano pasirinktos temos aktualumas. Autorius straipsnyje aprašo automobilio dinaminių parametrų tyrimą bei pabrėžia, kad aukų, žūstančių automobilių avarijose, skaičius gali būti gerokai sumažintas tobulinant automobilių dinamines charakteristikas. Tiriant automobilių dinamines charakteristikas daugiausia dėmesio autorius skyrė vartimo kampo nustatymui bei slydimo kampo nustatymui. Bandymų simuliacijai buvo pasirinkta „CarSim“ modeliavimo programa, nes ją galima susieti su MATLAB ir „Simulink“ programomis. „CarSim“ programa dar naudinga tuo, kad atliekant dinamines simuliacijas ji atsižvelgia į automobilio geometrinius parametrus, vairuotojo veiksmus, pakabos deformaciją, vertikalias jėgas, veikiančias padangas, bei kelio paviršiaus parametrus. Šiame straipsnyje automobilių vartimo bei slydimo kampai, nustatyti „CarSim“ programa, buvo lyginami su „TTI crash test 452106-3“ testo metu gautais rezultatais (7 pav.).



7 pav. Simuliacijos „CarSim“ programa bei „Crash Test“ metu gauti slydimo ir vartimo kampai

Jaroslav A. Pytka (2011) savo tiriamajame straipsnyje tiria automobilio, skirto bekelei, dinamines charakteristikas. Jis išskiria dvi pagrindines transporto priemones, skirtas atlikti dinامينius tyrimus: bandymams skirtos transporto priemonės bei matavimams skirtos transporto priemonės. Kaip teigia autorius, bandomosios transporto priemonės yra specialiai suprojektuotos ir pastatytos bandymams, jos leidžia pakeisti dizaino parametrus, tokius kaip transporto priemonės masė ir ilgis, tarpuratis ir masės pasiskirstymas tarp ašių (8 pav.).

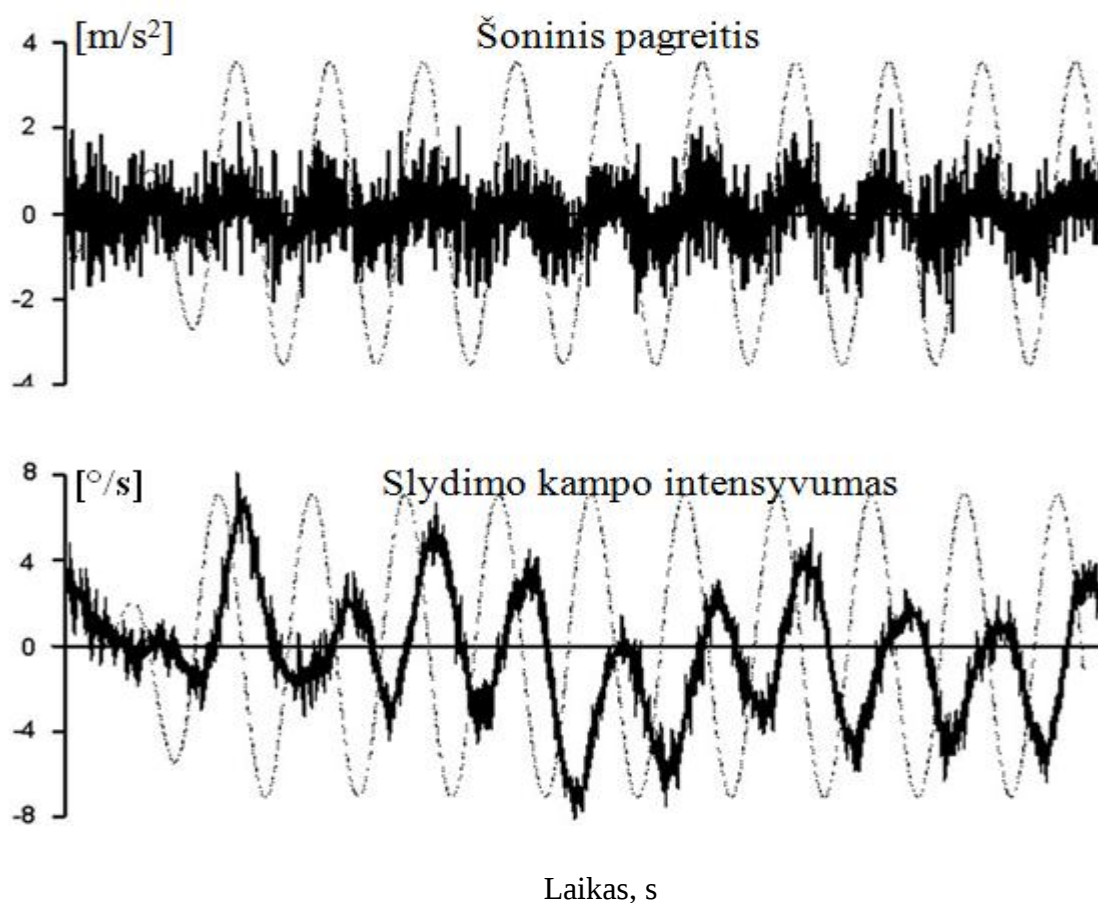


8 pav. Bandymams skirta transporto priemonė



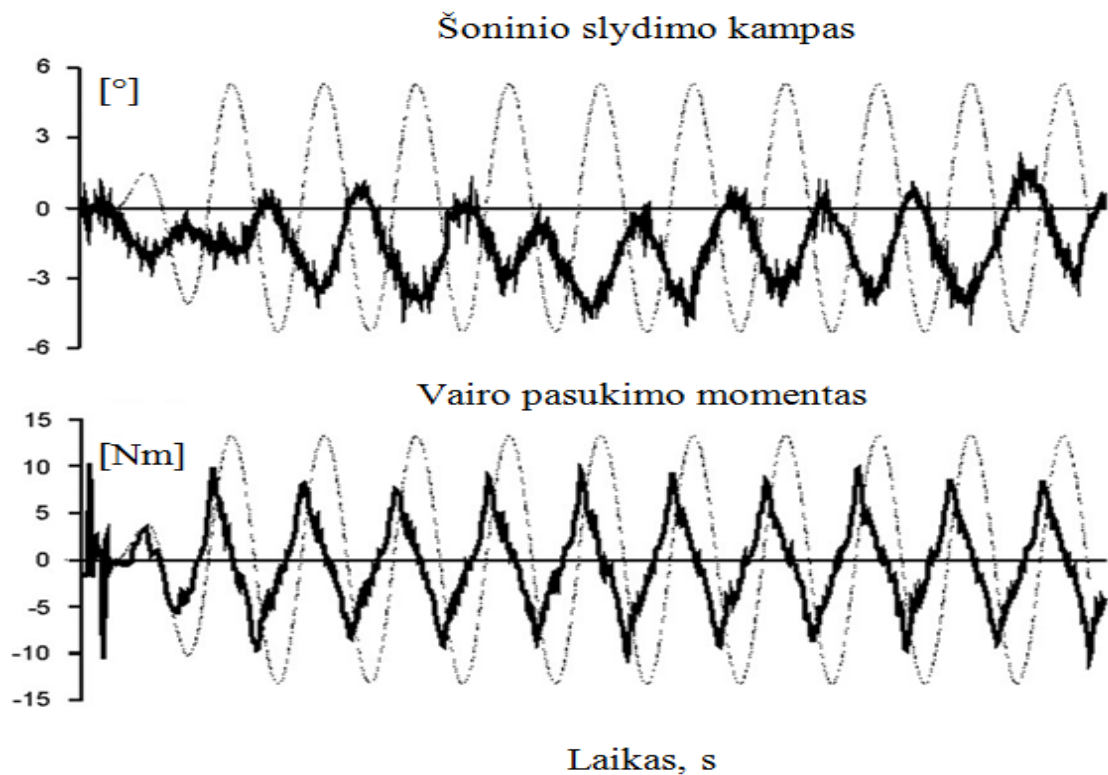
9 pav. Matavimams skirta transporto priemonė

Matavimams skirtos transporto priemonės ypatingos tuo, kad jų matmenys bei kitos dizaino charakteristikos nekinta, tai yra paprasčiausi kasdieniai automobiliai su pritvirtinta specialia matavimo įranga, skirta dinaminiams automobilio parametrų nustatyti. Ji matuoja transporto priemonės išilginius ir skersinius pagreičius, šoninio slydimo kampą, vairo ir ratų pasukimo kampų skirtumus, lygina realią važiavimo trajektoriją su kelio linijomis, pateiktomis GPS įrenginio (9 pav.). Šiame straipsnyje aprašomas automobilio dinaminis tyrimas, naudojant matavimams skirtą transporto priemonę. Bandymas buvo atliktas ant sauso dirvožemio kelio paviršiaus.



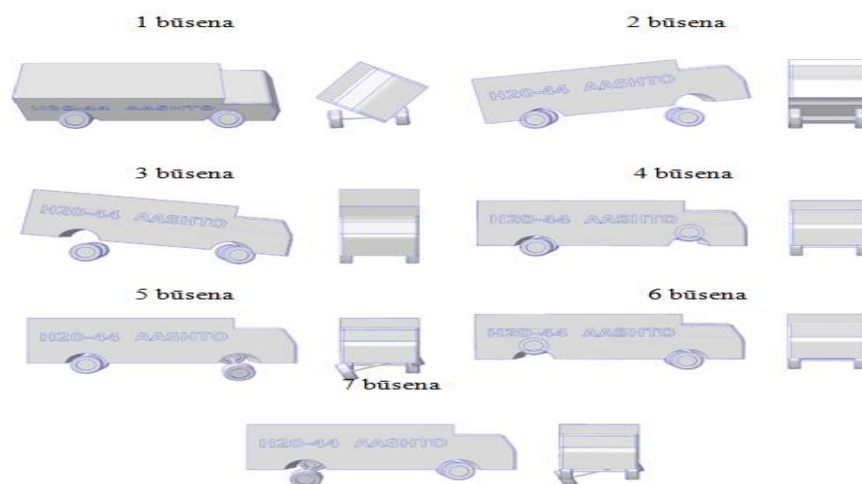
10 pav. Šoninio pagreičio ir slydimo kampo intensyvumo priklausomybė nuo laiko

Važiuojama pastoviu greičiu sinusoidės formos trajektorija ir matuojami, kaip autorius pabrėžė, pagrindiniai dinaminiai parametrai: šoninis pagreitis, slydimo kampo intensyvumas, šoninio slydimo kampas, vairo pasukimo momentas (10, 11 pav.).



11 pav. Šoninio slydimo kampo ir vairo pasukimo momento priklausomybė nuo laiko

Javier Oliva (2013) savo straipsnyje aprašo kelio ir transporto priemonės sąveikos tyrimą. Jis atkreipia dėmesį į automobilių poveikį tiltų bei viadukų konstrukcijoms. Šiame straipsnyje aiškiai vaizduojamas labai aktualus mano pasirinktai tematikai objektas – dinaminis automobilio modelis. Pateikiamas dinaminis sunkiasvorio automobilio modelis bei kraštinės pakabos ir automobilio kėbulo būsenos, įveikiant kelio nelygumus (12 pav.).

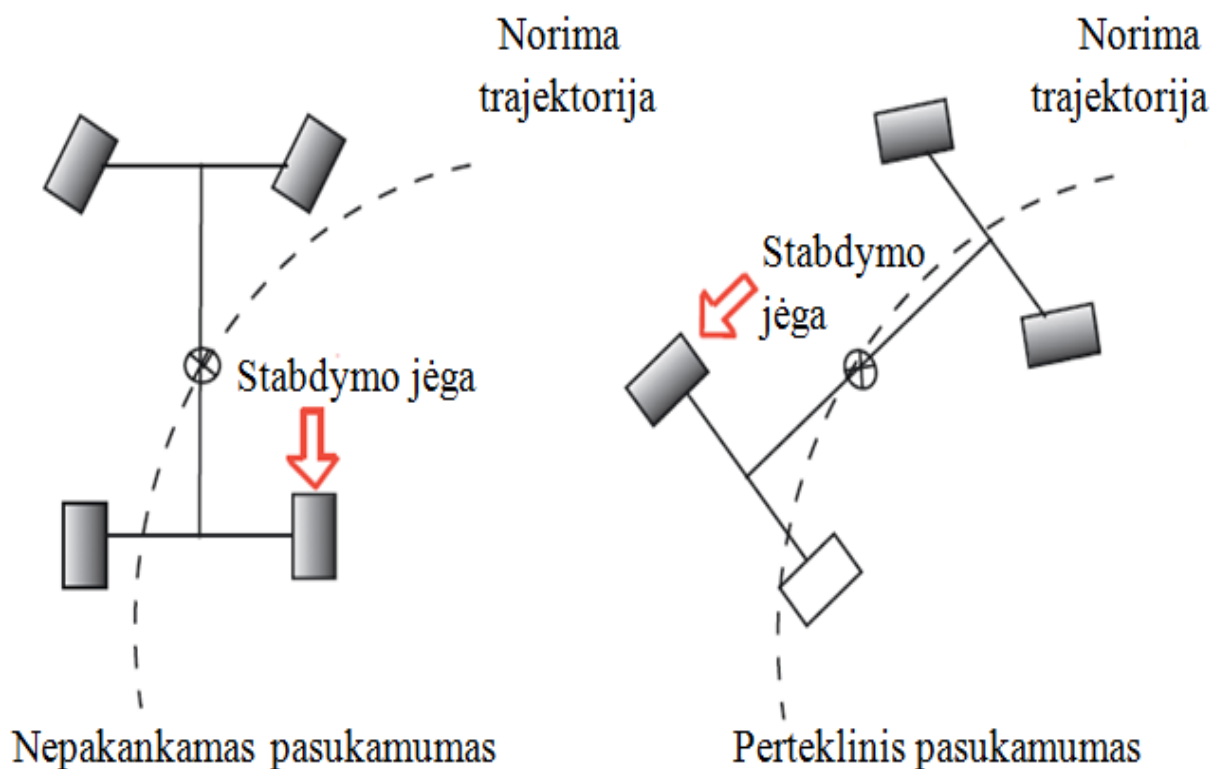


12 pav. Kraštinės pakabos ir kėbulo būsenos

13 pav. Automobilio su torsio-elastiniu velenu dinaminis modelis

Sudaromas trimatis automobilio dinaminis modelis (13 pav.). Aprašomi rezultatai, gauti atlikus simuliacinius važiavimus dviem skirtingais kelio profiliais. Gauti automobilio dinaminiai parametrai lyginami su automobilio parametrais, kurio pakaboje nėra torsio-elastinio veleno. Įdomu tai, kad automobilio pakaba su torsio-elastiniu velenu galinėje pakabos dalyje net 38 % geriau slopina kėbulo virpesius, lyginant su pakaba be šio elemento.

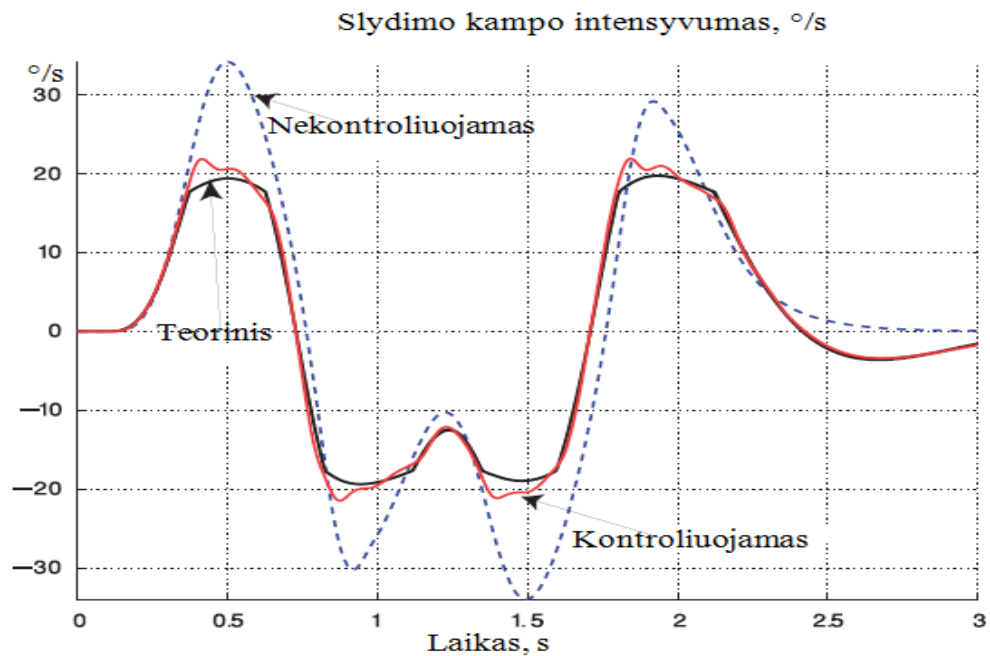
Mustapha Doumiati (2013) straipsnyje aprašomas lengvojo automobilio dinamikos tyrimas įdiegus jame dvi dinaminių parametrų reguliavimo sistemas: aktyvaus vairo mechanizmo reguliavimo sistemą ir aktyvią stabdžių sistemą. Autoriaus teigimu, šios abi sistemos pradeda veikti tik tada, kai transporto priemonė tampa nebevaldoma. Centrinis sistemos valdymo blokas nustato važiavimo situaciją pagal signalus, gaunamus iš: ratų sukimosi greičių, skersinio ir išilginio pagreičių, slydimo kampo jutiklių. Kaip sistema kontroliuoja slydimą, autorius pateikia schemoje (14 pav.).



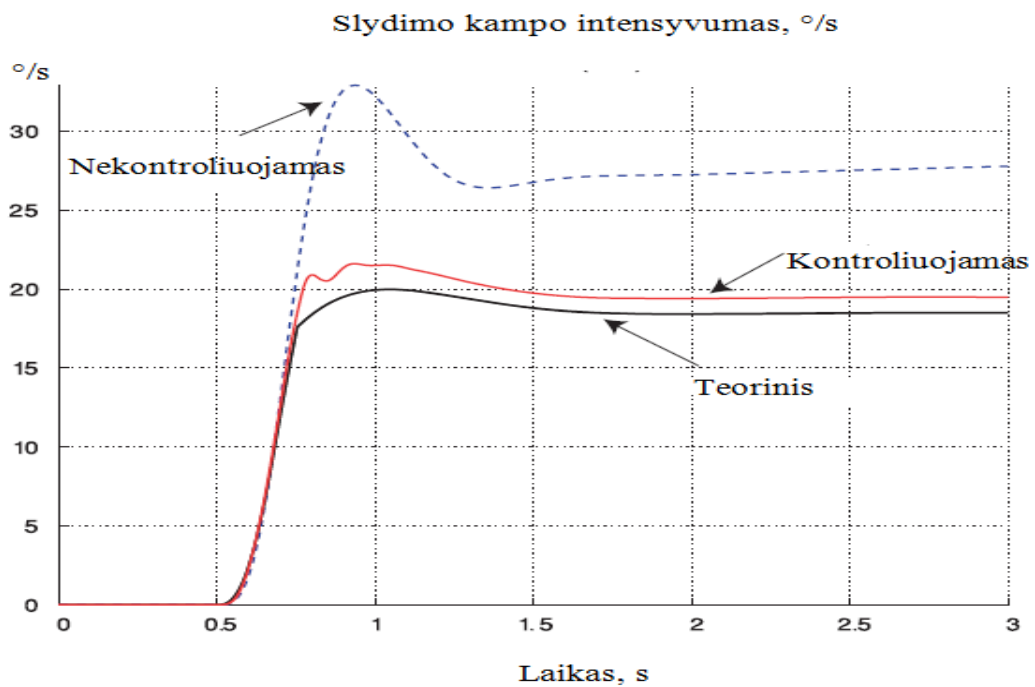
14 pav. Aktyvios stabdymo sistemos veikimas posūkyje

Toliau straipsnyje aprašomi dinaminiai tyrimai, atliekami su automobiliu, kuriame yra šios aktyviosios sistemos. Atliekamas dvigubas juostos keitimo manevras bei J formos posūkio

manevras. Bandymų metu fiksuojami automobilio dinaminiai parametrai ir lyginami su automobilio parametrais, kuris nėra kontroliuojamas minėtų sistemų (15, 16 pav.).



15 pav. Kontroliuojamo ir nekontroliuojamo automobilių slydimo kampo intensyvumo priklausomybė nuo laiko atliekant dvigubo juostos keitimo manevrą



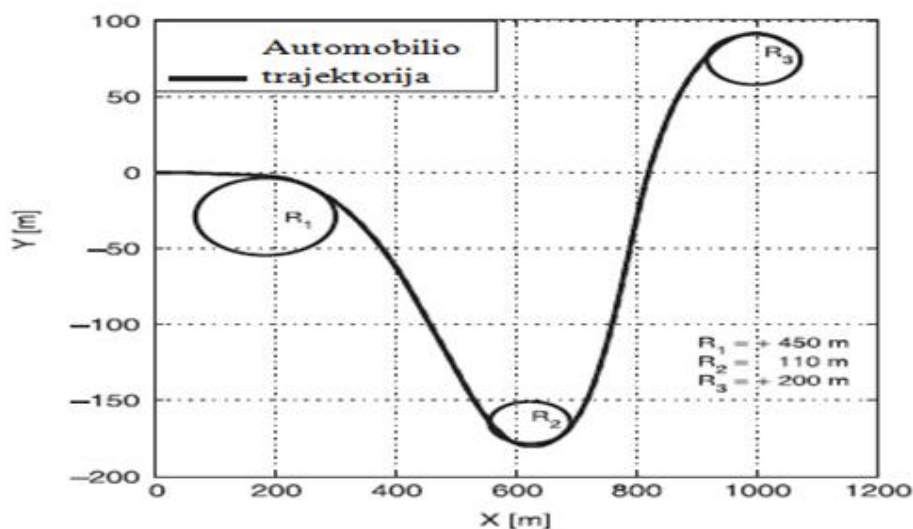
16 pav. Kontroliuojamo ir nekontroliuojamo automobilių slydimo kampo intensyvumo priklausomybė nuo laiko atliekant J formos manevrą

Lghani Memhour (2014) straipsnyje aprašo lengvojo automobilio bandymus įdiegus vairavimo kontrolės sistemą. Ši sistema kontroliuoja du parametrus: slydimo kampą bei šoninį automobilio nuokrypį nuo trajektorijos. Atliekami dinaminiai patobulinto automobilio bandymai (17 pav.).



17 pav. Eksperimentinis automobilis

Buvo atliekami dviejų rūšių bandymai. Pirmiausia buvo aiškinamasi automobilio galimybės įveikiant posūkius, stebima, kada automobilis praras sukibimą su kelio danga ir taps nevaldomas. Po to eksperimentinis automobilis buvo bandomas esant visiško sukibimo su kelio danga sąlygoms. Buvo įrodyta, kad važiuojant dideliu greičiu antru (R_2) apskritimu (18 pav.) yra daug didesnė rizika prarasti automobilio kontrolę nei važiuojant pirmu (R_1) ar trečiu (R_3) apskritimu.



18 pav. Automobilio judėjimo trajektorija

Atliekant bandymus buvo nustatytas skersinis, išilginis automobilio pagreitis, slydimo kampas, vairo ir ratų pasukimo kampai, šoninio slydimo kampai. Įdomu tai, kad automobilis bandymų metu pasiekdavo net iki 118 km/h greitį ir tai padėjo išsiaiškinti įdiegtos sistemos silpnąsias vietas. Nustatyta, kad klaidų, atsiradusių sistemoje, skaičius proporcingai didėja didėjant automobilio greičiui.

V. Žuraulis (2013) straipsnyje aprašomas lengvojo automobilio dinaminis tyrimas. Atkreipiamas dėmesys į automobilį veikiančias skersines jėgas, automobilio slydimą bei nustatomas automobilio kritinis greitis iki slydimo pradžios.

Moksliniuose straipsniuose aprašomi įvairūs dinaminiai tyrimai, kuriuose dažnai naudojamas judėjimo nekintamo spindulio trajektorija tyrimo metodas (Fittanto, Senalik 2004). Šis metodas atliekamas pagal standarto ISO 4138 reikalavimus.

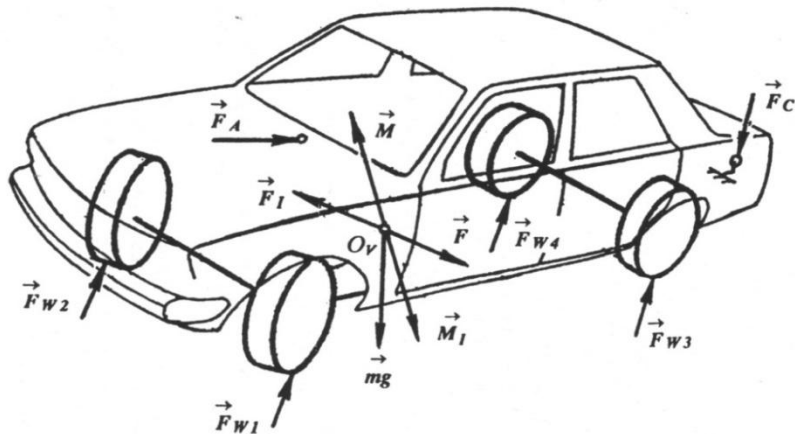
Apibendrinant apžvelgtą literatūrą galima teigti, kad darbe iškelta problema yra nagrinėjama ne viename straipsnyje. Tai atliekama tiek bandant įdiegtas sistemas, tiek lyginant teorinius skaičiavimus su realiais parametrais. Tačiau dinaminiai lengvojo automobilio tyrimai, naudojant slydimą imituojančią sistemą, nėra plačiai paplitę. Todėl svarbu įvertinti tokios sistemos specifines savybes, lemiančias automobilio dinamiką, kuomet atliekami automobilių aktyviosios saugos eksperimentiniai tyrimai. Atsižvelgiant į šiame darbe iškeliamą problematiką, šio darbo tikslas – ištirti slydimą imituojančios sistemos įtaką lengvojo automobilio dinaminėms charakteristikoms.

2. TRANSPORTO PRIEMONIŲ DINAMIKOS TEORINIAI ASPEKTAI

2.1. Transporto priemonę veikiančios jėgos

Kinematinius judančios transporto priemonės kriterijus lemia jos geometriniai ir masės parametrai bei ją veikiančios išorinės apkrovos. Automobilio dinamikoje supaprastinimo tikslais kiekvienos rūšies elementariųjų paskirstytųjų jėgų poveikis pakeičiamas jų bendrąja jėga ir bendroju momentu, kurių poveikis automobilio judėjimui yra adekvatus šios rūšies elementariųjų jėgų poveikiui. Išorinės apkrovos gali būti redukuotos į šias bendrąsias jėgas (žr. 19 pav.) (Dulevičius 2000):

- automobilio svorio jėgą – mg ;
- aerodinaminę jėgą – F_A ;
- ratus veikiančias jėgas – F_{wi} ;
- sukabinimo įtaise veikiančia jėga – F_C .



19 pav. Automobilį veikiančios jėgos ir jų momentai

Automobilio svorio jėga yra pridėta jo masių centre – taške O_v , aerodinaminė jėga – vadinamajame aerodinaminio poveikio centre, ratą veikianti jėga – geometriniame rato kontakto centre, sukabinimo įtaise veikianti jėga – sukabinimo įtaiso centre.

Išvardytos bendrosios jėgos (išskyrus svorio jėgą) sukelia momentus automobilio masių centro atžvilgiu.

Automobilį veikiančios išvardytos išorinės bendrosios apkrovos gali būti redukuotos į bendrąją atstojamąją jėgą F ir bendrąjį atstojamąjį momentą M . Jėga F yra pridėta automobilių

masių centre, o momento M kryptis sutampa su linija, kertančia masių centrą. Išorinių apkrovų bendrajai atstojamajai jėgai F priešinasi automobilio inercijos jėga F_I , kuri sukelia atitinkamą momentą M_I . Pagal d'Alambert'o principą, $F = -F_I$, $M = -M_I$.

Kadangi automobilių dinamikoje yra priimta judėjimą skirstyti į išilginį, šoninį ir vertikalus, nagrinėjamos atstojamosios jėgos F projekcijos į tarpinės koordinatų sistemos ašis X , Y , Z :

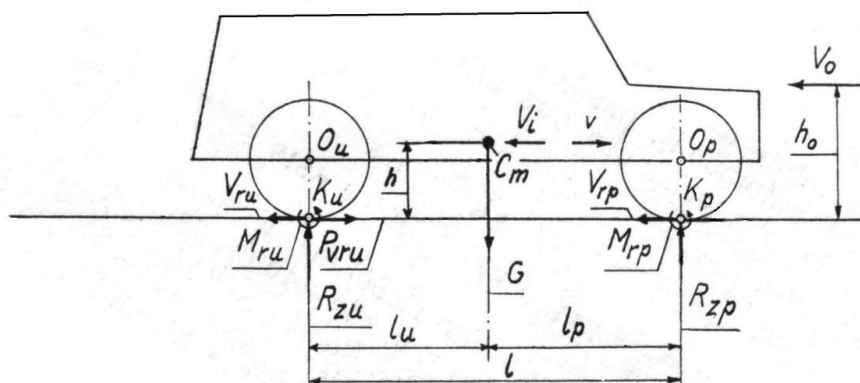
- išilginė jėga F_x ;
- skersinė jėga F_y ;
- vertikali jėga F_z .

Analogiškai gali būti suprojektuotas į ašis X , Y , Z bendrasis atstojamasis momentas M .

2.2. Išilginė dinamika

Išilginė dinamika – tai traukos ir stabdymo dinaminės savybės.

Tarkime, kad automobilis greitėdamas važiuoja tiesiu keliu (20 pav.). Variklis suka galinius automobilio ratus. Prie ratų pridėtos variklio jėgos P_{vru} , riedėjimo varžos V_{rp} ir V_{ru} , statmenos kelio reakcijos R_{zp} ir R_{zu} .



20 pav. Išilginės dinamikos modelis

Statmenų kelio reakcijų vektorius pravedėme per ratų centrus, todėl prie ratų reikia pridėti riedėjimo varžos momentus M_{rp} ir M_{ru} . Svorio jėgą G yra statmena kelio paviršiui. Jeigu automobilis važiuotų į kalną, svorio jėgą G suskaidytume į kelio paviršiui statmeną jėgą $G \cos \alpha$

ir į lygiagrečią jėgą $G \sin \alpha$. Automobilį veikia dar ir šios jėgos: inercijos varža V_i ir oro varža V_o . Jėgos $G \sin \alpha$, V_i ir V_o sudaro momentą:

$$(G \sin \alpha + V_i)h + V_p h_p + V_o h_o, \quad (1)$$

kuris reakciją R_{zp} mažina, o R_{zu} – didina. Visas šias jėgas projektuojame į kelio plokštumą. Projektijas sudedame ir jų sumą prilyginame nuliui (viena iš automobilio pusiausvyros sąlygų):

$$P_{vru} - V_{rp} - V_{ru} - V_o - G \sin \alpha - V_i = 0. \quad (2)$$

Jėgos $R_{xp} = P_{vtp} - V_{tp}$ ir $R_{xu} = P_{vru} - V_{ru}$ sudaro tangentes kelio reakcijas į ratus.

Išskleidę lygybės narius, rašome:

$$M_{vp} u_{tp} \eta_{tp} \frac{1}{r_p} + M_{vu} u_{tu} \eta_{tu} \frac{1}{r_u} - R_{zp} f_p - R_{zu} f_u - kFv^2 - G \sin \alpha - m\delta v = 0. \quad (3)$$

Šia lygybe išreiškiamas ryšys tarp automobilį varančios jėgos ir judėjimo varžų. Ji vadinama automobilio judėjimo energetine diferencialine lygtimi. Joje besisukančių masių inertiškumas įvertintas koeficientu δ , todėl, skaičiuojant P_{vru} , į besisukančių masių inerciją neatsižvelgta.

Dažniausiai $r_p = r_u$, $f_p = f_u = f$, $\eta_{tp} = 0$, $\eta_{tu} = \eta_t$, $u_{tp} = 0$, $u_{tu} = u_t$, $M_{vp} = 0$, $M_{vu} = M_v$, todėl:

$$M_v u_t \eta_t \frac{1}{r} - G(f \cos \alpha + \sin \alpha) - kFv^2 - m\delta v = 0. \quad (4)$$

Nauduodamiesi antruoju Niutono dėsniu, šią lygtį trumpiau parašome taip:

$$m\delta v = P_{vr} - \Sigma V; \quad (5)$$

Čia ΣV – visų judėjimo varžų suma.

Stabdant automobilį, pasikeis jėgų V_i ir P_{vru} kryptys.

Matuojant išilginę dinamiką galima sužinoti tokius automobilio parametrus:

- Greitėjimo ir lėtėjimo pagreitį;
- Automobilio elgesį stabdymo metu;
- Pasipriešinimą judėjimui (ratų, oro);
- Variklio charakteristikas stabdymo ir greitėjimo metu;
- Kuro sąnaudas;
- Maksimalų greitį;
- Stabdymo kelią.

2.3. Skersinė dinamika

Skersinė dinamika – tai savybių visuma, apibrėžianti jo skersinį judėjimą. Svarbiausios skersinės dinamikos savybės yra stovumas, valdomumas ir manevringumas.

Automobiliui sukantis visada kinta jo greičio kryptis, taip pat gali kisti ir greičio didumas (modulis). Todėl, remdamiesi antruoju Niutono dėsnio ir d'Alamberto principu, sakome, kad besisukančio automobilio masę visada veikia inercijos jėga. Jos kryptis priešinga greičio pokyčio kryptiai, o modulis lygus masės ir greičio pokyčio sandaugai. Inercijos jėga veikia kiekvieną masės dalelę, bet paprasčiau skaičiuoti, imant inercijos jėgų sumą, pridėtą masės centre. Tariame, kad visa automobilio masė sukoncentruota viename taške – masės centre C_m (žr. 21 pav.). Šiuo atveju greičio pokyčio projekcijos ašyse x ir y yra tokios :

$$j_{mx} = \dot{v}_{mx} = \dot{v}_u - \omega^2 l_u ; \quad (6)$$

$$j_{my} = \dot{v}_{my} = \omega v_u + (\varepsilon' + \varepsilon'') l_u , \quad (7)$$

o inercijos jėgos projekcijos tokios:

$$P_{ix} = m j_{mx} = m(\dot{v}_u - \omega^2 l_u) ; \quad (8)$$

$$P_{iy} = m j_{my} = m[\omega v_u + (\varepsilon' + \varepsilon'') l_u] . \quad (9)$$

Taigi automobilį taške C_m veikia inercijos jėga

$$P_i = \sqrt{P_{ix}^2 + P_{iy}^2}. \quad (10)$$

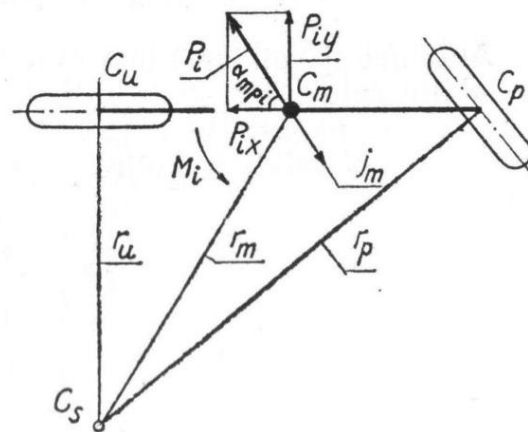
Visą automobilio masę sukoncentravome viename taške C_m . Kad toks automobilis dinamiškai būtų tapatus su tikruoju, reikia dar pridėti inercijos jėgų momentą $M_i = I\varepsilon$, kurio kryptis priešinga kampinio greičio pokyčio ε kryptčiai. Automobilio inercijos momentą I vertikalios ašies z , einančios per masės centrą C_m , atžvilgiu apskaičiuojame iš automobilio brėžinių arba randame eksperimentuodami. Žinodami I ir turėdami galvoje, kad $G=mg$, taip pat apskaičiuojame ir automobilio inercijos spindulį ρ :

$$I = m\rho^2; \rho = \sqrt{\frac{I}{m}} = 3,13\sqrt{\frac{I}{G}}. \quad (11)$$

Vektoriaus P_i kryptį randame grafiškai arba apskaičiuojame taip:

$$\operatorname{tg} \alpha_{mpj} = \operatorname{tg} \alpha_{mj} = \frac{P_{iy}}{P_{ix}}. \quad (12)$$

Kvadrantą P_i sužinome taip pat, kaip ir kvadrantą j_m .



21 pav. Skersinės dinamikos modelis

Matuojant skersinę dinamiką galima sužinoti tokius automobilio parametrus:

- Skersinį pagreitį;
- Automobilio valdymą šoninio pagreičio metu;

- Leistiną ir kritinį greitį;
- Pasukimo kampą;
- Nustatyti masės centrą;
- Inercijos momentą ir padangų pasipriešinimą slydimui.

2.4. Automobilio rato sukibimas su keliu

Rato sukibimą su keliu nulemia trinties ir slydimo procesai jų kontakto plote. Nagrinėjant rato tiesiaegio ir įstrižojo riedėjimo procesus buvo akcentuojama, kad abiem atvejais ratas, kontaktuojamas su keliu, slysta. Šio slydimo intensyvumas priklauso nuo išilginės kelio reakcijos į ratą reikšmės, tiksliau nuo šios reakcijos ir statmenos kelio apkrovos santykio.

Išilginės ir statmenos kelio reakcijų į ratą santykis vadinamas santykine išilgine jėga .

$$\mu_{xw} = \frac{F_{xw}}{F_{zw}} , \quad (13)$$

Rato perduodama išilginė jėga yra ribojama rato ir kelio trintimi. Reikėtų žinoti, kad bet kuriuo momentu, kai per ratą yra transformuojama išilginė jėga, liesdamasis su keliu, ratas slysta. Kitaip tariant, be rato slydimo jokios jėgos negali būti transformuojamos kelio plokštumoje. Kai rato išilginio slydimo koeficientas $S_{xw} = 0.10 - 0.25$, transformuojama išilginė jėga yra didžiausia esamomis važiavimo sąlygomis (t.y. esant fiksuotai vertikaliai apkrovai, oro slėgiui padangoje, judėjimo greičiui ir kt.).

Didžiausios rato transformuojamos išilginės jėgos santykis su vertikalia apkrova vadinamas maksimaliu sukibimo koeficientu išilgine kryptimi.

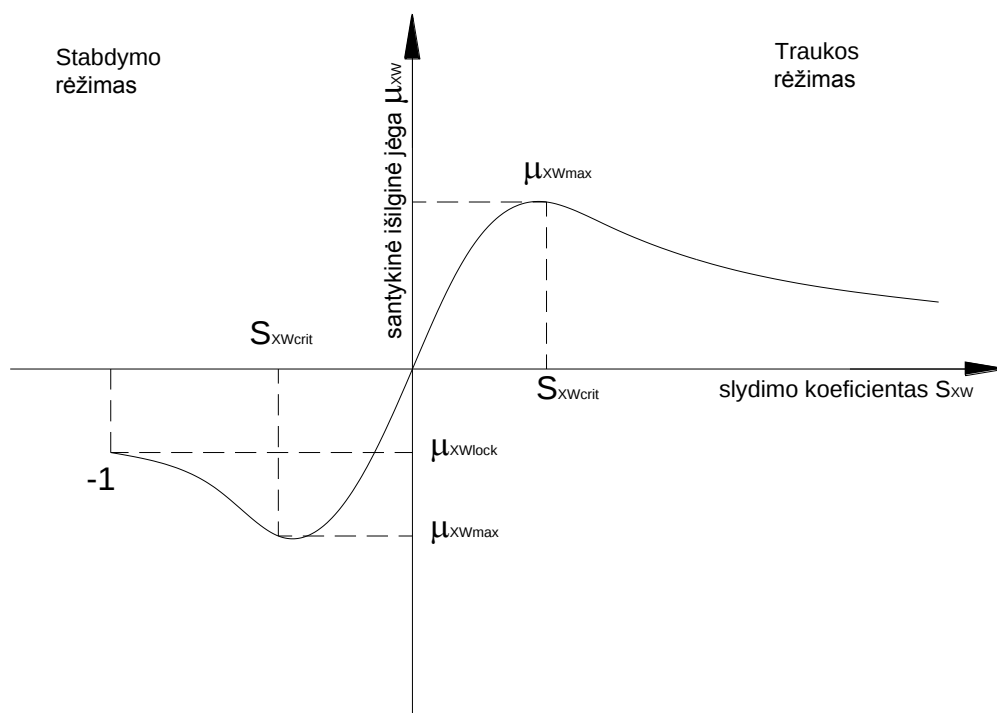
$$\mu_{xw \max} = \frac{F_{xw \max}}{F_{zw}} , \quad (14)$$

Rato išilginio slydimo koeficientas, kuriam esant pasiekiamas didžiausias sukibimo koeficientas, vadinamas kritiniu rato išilginio slydimo koeficientu $S_{xw \text{crit}}$.

Jei rato slydimo koeficientas yra didesnis nei kritinis, tai rato transformuojama jėga kiek sumažėja, atitinkamai sumažėja ir santykinė išilginė jėga μ_{xw} .

Santykinė, išilginė jėga, nustatyta, kai $S_{xw} = -1$, vadinama užblokuoto rato sukibimo koeficientu išilgine kryptimi μ_{xwlock} , literatūroje šis koeficientas kartais pateikiamas su neigiamu ženklu.

22 pav. pavaizduota išilginės rato jėgos koeficiento μ_{xw} priklausomybė nuo rato išilginio slydimo koeficiento.



22 pav. Rato sukibimo su keliu charakteristika

Didžiausio sukibimo koeficiento $\mu_{xw \max}$ reikšmė stabdymo atveju yra neigiama, o varančiajam ratui – teigiama. Absoliučios sukibimo koeficiento reikšmės abiem atvejais yra beveik vienodos. Tačiau eksperimentas paprasčiau yra nustatyti stabdomojo rato koeficientus $\mu_{xw \max}$ bei μ_{xwlock} . Maksimalus sukibimo koeficientas išilgine kryptimi $\mu_{xw \max}$ yra 10 – 30 % didesnis nei užblokuoto rato sukibimo koeficientas μ_{xwlock} .

Rato potencinės savybės pagal sukibimą su keliu galima apibūdinti sukibimo panaudojimo koeficientu – santykinės išilginės jėgos ir maksimalaus sukibimo koeficiento išilgine kryptimi santykiu:

$$\varepsilon_{xw} = \frac{\mu_{xw}}{\mu_{xw \max}}, \quad (15)$$

Šis koeficientas yra ne didesnis kaip 1.

Rato skersinio slydimo įvertinimo kriterijai yra analogiški išvardintiems. Apibūdinkime juos.

Skersinės ir statmenos kelio reakcijų į ratą santykis vadinamas santykine skersine jėga.

$$\mu_{YW} = \frac{F_{YW}}{F_{ZW}}, \quad (16)$$

Didžiausios rato perduodamos skersinės reakcijos su statmena apkrova santykis, nustatytas riedančiam ratui tam tikromis sąlygomis (esant nustatytai statmenai rato apkrovai, oro slėgiui padangoje ir kt.) vadinamas maksimaliu sukibimo koeficientu skersine kryptimi.

$$\mu_{YW \max} = \frac{F_{YW \max}}{F_{ZW}}, \quad (17)$$

Užblokuoto rato sukibimo koeficientu skersine kryptimi – vadinamas skersinės kelio reakcijos ir vertikaliosios apkrovos santykis, nustatytas nesisukančiam išilgine kryptimi ratui.

$$\mu_{YWlock} = \frac{F_{YWlock}}{F_{ZW}}, \quad (18)$$

Didžiausią santykinės skersinės jėgos reikšmę turi laisvasis ratas. Šiuo atveju išilginė kelio reakcija į riedantį ratą lygi nuliui. Didėjant šiai jėgai (atitinkamai – išilginio slydimo koeficientui ir santykinei išilginei jėgai) koeficientas μ_{YW} mažėja ir įgyja mažiausią reikšmę, kai ratas yra visai užblokuotas arba sukasi vietoje ($S_{xw} = -1$ arba $S_{xw} = 1$). Toks reiškinys paaiškina, kad ratas turi ribotą sukibimo potencialą: vienakryptė trintis neišvengiamai sumažina sukibimo savybes kita kryptimi. Paprastai mažiausia santykinės skersinės jėgos reikšmė yra 4 – 5 kartus mažesnė nei maksimalus sukibimo koeficientas skersine kryptimi. Todėl užblokuoti arba buksuojantys ratai negali atsverti išorinių šoninių apkrovų. Šiuo atveju automobilis iš esmės yra nevaldomas.

Paprastai maksimalus sukibimo koeficientas skersine kryptimi yra tiek didesnis nei atitinkamas išilginio sukibimo koeficientas (šiuolaikinių padangų $\mu_{xw \max} = 1-1,2$).

3. AUTOMOBILIO SU SLYDIMĄ IMITUOJANČIA ĮRANGA DINAMINIŲ SAVYBIŲ EKSPERIMENTINIS TYRIMAS

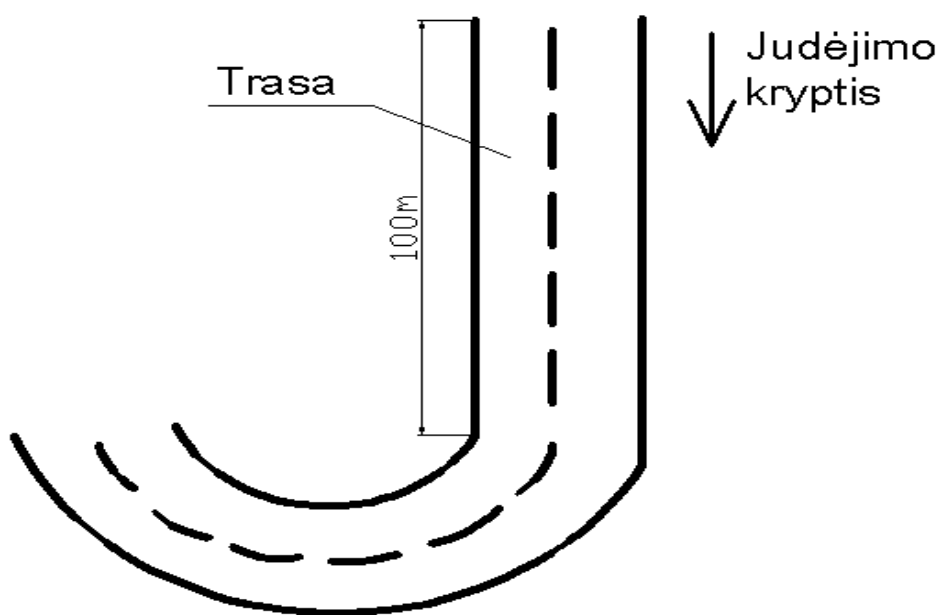
3.1. Eksperimentinių tyrimų atlikimo metodika ir sąlygos

Eksperimento tikslas – išmatuoti ir įvertinti automobilio „Mazda 626“ (1998 m.) kartu su slydimą imituojančia įranga (31 pav.) dinامينius parametrus. Eksperimento metu atliekami dinaminio stovumo bandymai, kurių metu nustatomi automobilio kėbulo su slydimą imituojančia sistema svyravimai, ratų pasukimo kampo reikšmės, ratų dinaminio išvrtimo kampo kitimas. Gauti rezultatai bus lyginami su rezultatais, gautais atliekant eksperimentus su tuo pačiu automobiliu, bet be slydimą imituojančios įrangos.

Prieš atliekant eksperimentus reikia pasirinkti dinaminio stovumo bandymo metodus. Pasirenkamas vienas iš populiariausių metodų dinaminiams automobilio parametrams įvertinti.

3.1.1. Pastovaus greičio metodas

Vyksta judėjimas atitinkamo ilgio tiesiąja, pasiekiamas užsibrėžtas greitis ir atliekamas posūkio manevras atitinkamu kampu (žr. 23 pav.). Šis metodas vadinamas nekintamo greičio metodu, būtina sąlyga – pasiekti pasirinktą greitį. Jį pasiekus atliekamas posūkio manevras. Posūkio kampas matuojamas specialiu prietaisu.

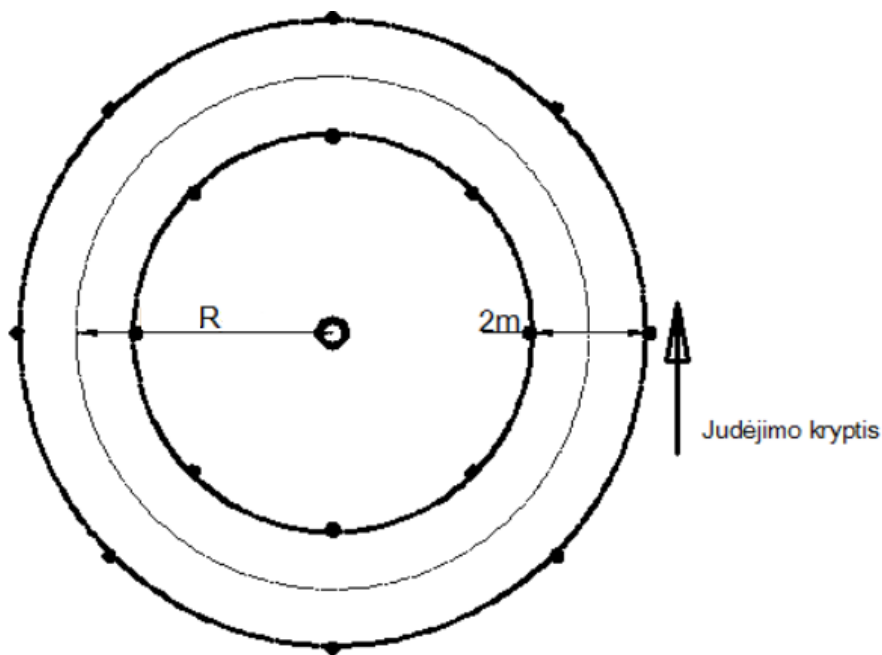


23 pav. Nekintamo greičio metodo schema

Šis metodas yra naudingas tuo, kad jo metu gaunamas didelis duomenų kiekis: išmatuojami pagreičiai bei veikiančių jėgų dydžiai tuo momentu, kai yra atliekamas tam tikro kampo posūkis. Pagrindinis metodo trūkumas – saugumas, klaidingai apskaičiavus greitį ar posūkio kampą galimas apsisvertimas.

3.1.2. Nekintamo spindulio metodas

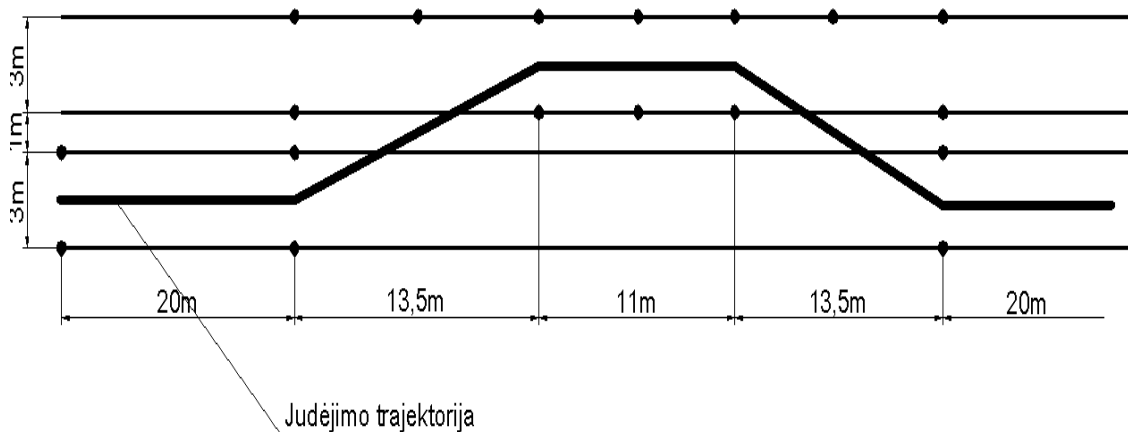
Eksperimentas vyksta atliekant judėjimą ratu, nuolat didinant greitį (žr. 24 pav.). Judėjimas vyksta pastoviu kampu, tolygiai didinant greitį, kol pasiekama kritinė stovumo riba, t. y. automobilis praranda sukibimą su kelio danga ir ima slysti arba vidinės posūkio pusės ratai atsiplėšia nuo žemės. Šis metodas yra vienas paprasčiausių bei saugiausių. Vairuotojas lengvai jaučia automobilio poziciją, todėl jaučiama ir riba iki nevaldomo automobilio slydimo. Trūkumai – mažesnis gaunamų duomenų kiekis lyginant su kitais metodais.



24 pav. Nekintamo spindulio bandymo schema

3.1.3. „Briedžio testas“

„Briedžio testas“ skirtas nustatyti maksimalų greitį, kuriuo automobilis gali įveikti kliūtį nekliudydamas kuoliukų. Šis testas turi griežtus trasos matmenis, kurie pavaizduoti schemoje (žr. 25 pav.). Bandymas plačiai žinomas ir taikomas automobilių bandymuose.



25 pav. „Briedžio testo“ principinė trasos schema

Iš šių bandymų pasirenkame judėjimo nekintamo spindulio žiedu metodą, nes šis metodas yra paprasčiausias, saugiausias iš paminėtų galimybių.

Eksperimentinių tyrimų atlikimo sąlygos:

- Tyrimai atlikti su automobiliu „Mazda 626“.
- Tiriamajame automobilyje sumontuojama slydimą imituojanti įranga, įranga, kuri matuoja automobilio kėbulo poslinkius, skersridės kampą, automobilio greitį bei automobilio judėjimo pagreitį skersine, vertikalia kryptimis.
- Bandymai atlikti važiuojant asfaltuota danga, važiuojama trijų skirtingo spindulio apskritimų trajektorijomis, kiekviena trajektorija keičiant slydimą imituojančios sistemos pakėlimo aukščius.
- Tiriamojo automobilio ekipažą sudarė vairuotojas, kuris valdė naudojamą įrangą.

3.2. Eksperimentinių tyrimų metu naudota įranga

Automobilio dinaminėms savybėms nustatyti buvo fiksuojamas automobilio greitis, skersinis pagreitis, vairuojamųjų ratų išvirthimo kampas, vairo pasukimo kampas, automobilio kėbulo svyravimai, slydimą imituojančios įrangos pakėlimo aukščiai. Tam naudota automobilių dinaminiams matavimams skirti jutikliai, duomenų surinkimo ir apdorojimo įrenginiai bei pati slydimą imituojanti sistema.

Naudota įranga:

- Duomenų surinkimo ir apdorojimo įrenginys „Corrsys-Datron DAS-3“.
- Trijų ašių navigacinis modulis su pagreičio ir sukimosi greičio jutikliais „Corrsys-Datron TANS-3215003M5“.

- Bekontaktis greičio bei slydimo kampo jutiklis CORREVIT S-350.
- Lazeriniai kėbulo padėties jutikliai CORREVIT HF-500C (125 – 325 mm, $\pm 0,2$ %).
- Ratų padėties jutiklių sistema KISTLER RV-4.
- Slydimą imituojanti sistema (keturių ratų specialus vežimėlis su hidrauline pakėlimo aukščio reguliavimo įranga).
- Nešiojamieji kompiuteriai *Lenovo N500* ir *Lenovo ThinkPad*.
- 12 V akumuliatorius.

Duomenų surinkimo ir apdorojimo įrenginys „**Corrsys-Datron DAS-3**“ susideda iš bazinio duomenų surinkimo modulio ir valdymo bloko su ekranu (26 pav.). Šiame modelyje yra interneto UTP, USB, COM jungtys, taip pat papildomos jungtys ekranui. Papildomi išplėtimo moduliai gali būti lengvai prijungiami prie bazinio modulio.

DAS-3 – (2 priedas) kompaktiškas duomenų surinkimo įrenginys, kuris gali būti naudojamas:

- stabdymo atstumo matavimams;
- pagreičių matavimams;
- degalų sąnaudoms skaičiuoti;
- maksimaliam pagreičiui.

Tiriamų parametrų nustatymus realiuoju laiku galima valdyti naudojant DAS valdymo pultą. Sistemos parametrus taip pat galima nustatyti naudojant kompiuterį, kuriame veikia *CeCalWin Pro* kompiuterinė programinė įranga.



26 pav. Duomenų surinkimo ir apdorojimo įrenginys „Corrsys-Datron DAS-3“

Prie duomenų surinkimo ir apdorojimo įrenginio buvo prijungti trijų ašių pagreičio jutiklis „Corrsys-Datron TANS-3215003M5“ (27 pav.), bekontakčio greičio bei pagreičio jutiklis CORREVIT S-350 (28 pav.), lazeriniai kėbulo padėties jutikliai CORREVIT HF-500C (29 pav.) ir ratų padėties jutikliai KISTLER RV-4 (30 pav.).

Trijų ašių navigacinis modulis su pagreičio ir sukimosi greičio jutiklio **Corrsys-Datron TANS-3215003M5** (3 priedas) funkcijas sudaro:

- Sinchroninis matavimas iki 6 ašių (3 ašys giroskopo ir 3 ašys pagreičiui).
- ± 3 g pagreičio.
- ± 150 g $^{\circ}/s$ giroskopo.
- Darbinė temperatūra nuo -40 iki $+85$ $^{\circ}C$.
- Puikus terminis stabilumas.
- Mažos kubinės formos, 30 g masės.
- Paviršius, pagamintas iš anoduoto aliuminio.



27 pav. „Corrsys-Datron TANS-3215003M5“ trijų ašių pagreičio jutiklis

Bekontakčio greičio bei pagreičio jutiklio **Correvit S-350** (4 priedas) funkcijas sudaro:

- Matavimo ribos: 350 ± 100 mm, 0,5 – 250 km/h.
- Galimybė nustatyti judėjimo kryptį.
- Lengvai sudaroma sistema su giroskopu slydimo kampui nustatyti.
- Kompaktiškas ir mažo svorio.

CORREVIT S-350 (28 pav.) dviejų kryptų greičio bei pagreičio jutiklis, kurį sudaro optiniai bei elektriniai elementai. DSP ir FPGA signalai iš jutiklio yra perduodami surinkimo moduliui 250 Hz dažniu.



28 pav. Bekontaktis greičio ir pagreičio jutiklis CORREVIT S-350

Lazerinio kūbulo padėties jutiklio *Correvit HF-500C* (5 priedas) funkcijas sudaro:

- Matavimo ribos: 350 ± 130 mm.
- Atstumo iki kelio paviršiaus matavimas.
- Kompaktiškas ir mažo svorio.

CORREVIT H-500C (29 pav.) lazerinis kūbulo padėties jutiklis, kurį sudaro optiniai bei elektriniai elementai. DSP ir FPGA signalai iš jutiklio yra perduodami surinkimo moduliui 250 Hz dažniu.



29 pav. Lazerinis kūbulo padėties jutiklis CORREVIT HF-500C

Ratų padėties jutiklio **Kistler RV-4** (6 priedas) funkcijas sudaro:

- Išsamiai įvertinama rato padėtis.
- Nustatomas ratų išvirtimo kampo pokytis posūkyje.
- Lengvai sudaroma sistema su rato greičio jutikliu.
- Kompaktiškas ir mažo svorio.

Ratų padėties jutiklis KISTLER RV-4 (30 pav.) yra skirtas nustatyti besisukančio rato centro padėtį, rato koordinates penkiomis ašimis. Jutiklį sudaro penki padėčių jutikliai, kurie veikia kartu ir perduoda duomenis apie rato išvirtimą, judėjimą x, y, z ašimis.



30 pav. Ratų padėties jutiklis KISTLER RV-4

Slydimą imituojančios sistemos (31 pav.) funkcijas sudaro:

- Kiekvienas automobilio ketvirtis gali būti pakeltas arba nuleistas.
- Hidraulinių cilindrų pakėlimai valdomi automobilio viduje specialiu pultu.
- Sistemos pagalbiniai ratai sukasi aplink savo ašį 360° kampu.

Automobilio slydimą imituojanti sistema yra skirta imituoti automobilio važiavimą skirtingomis kelio dangomis. Ant sistemos rėmo yra tvirtinamas automobilis, automobilyje įrengiamas hidraulinis siurblys, kuris veikia naudojamas automobilio generatoriaus gaminamą elektros energiją. Keturi hidrauliniai cilindrai keturiuose sistemos kampuose gali būti valdomi atskirai, jais automobilis nuleidžiamas arba pakeliamas automobilio svorį perduodant laisvai besisukantiems slydimo sistemos ratams (1 lentelė).



31 pav. Automobilio slydimą imituojanti sistema

1 lentelė. Slydimą imituojančios sistemos techniniai parametrai

Tipas	
Hidraulinių cilindrų eiga	100 mm
Rėmo ilgis	4600 mm
Rėmo plotis	2600 mm
Sistemos svoris	150 kg
Hidraulinės sistemos slėgis	50 bar

3.3. Eksperimento atlikimo tvarka

Eksperimentai atliekami sausoje asfaltbetonio dangos aikštelėje. Slydimo sistema, pagal V. Žuraulio ir kitų mokslininkų metodiką (2014), buvo standžiai pritvirtinta prie automobilio kėbulo. Automobilio dinaminėms savybėms nustatyti buvo fiksuojamas automobilio judėjimo greitis, sukimosi greitis apie vertikalią ašį, automobilio kėbulo padėtis bandymų aikštelės dangos atžvilgiu, automobilio priekinių ratų eiga visomis kryptimis, automobilio judėjimo greitis pagal automobilio ratų sukimąsi bei nuvažiuotas kelias, automobilio rato dinaminio išvrtimo kampas, slydimą imituojančios sistemos pakėlimo aukščiai. Automobilis buvo su slydimą imituojančia įranga, todėl buvo matuojami įrangos hidraulinių cilindrų pakėlimo aukščiai. Visi prietaisai buvo sukalibruoti siekiant užtikrinti aukštą bandymų tikslumą.



32 pav. Automobilis „Mazda 626“ su slydimą imituojančia bei matavimo įranga

Buvo pasirinktos dvi bandymų trajektorijos, t. y. judėjimas nekintamo 15 ir 20 metrų spindulio žiedais. Eksperimentai kiekviena trajektorija buvo atliekami dviem etapais. Pirmajame etape slydimą imituojanti sistema automobilį pakeldavo į aukščiausią pasirinktą padėtį ($\Delta z = 50$ mm, Δz – hidraulinio cilindro koto padėtis cilindro atžvilgiu). Taip nustatoma 1 padėtis. Antrame etape automobilis buvo žemiausioje padėtyje – $\Delta z = 160$ mm (2 padėtis). Kiekvienas bandymas buvo vykdomas judant apskritimu, nuolat didinant automobilio judėjimo greitį pagal standarto ISO 4138 reikalavimus. Automobilio judėjimas vyksta nustatytu vairo pasukimo kampu, kol

pasiekama kritinė automobilio stovumo riba, – didėjant automobilio greičiui mažėja padangų generuojama kontaktinė jėga ir automobilis ima slysti.

3.4. Eksperimento rezultatai

Eksperimentų metu buvo fiksuojama visa jutikliais gaunama informacija, tačiau daugiau dėmesio skirta kėbulo posvyrio kampo, vairuojamųjų ratų išvrtimo kampo, vairo pasukimo kampo, maksimalaus greičio bei skersinio pagreičio stebėjimui. Siekiant nusatyti šių parametrų didžiausias reikšmes, jų pasiskirstymą ir kitimą, tyrimų metu gauti rezultatai buvo atvaizduojami grafiškai.

3.4.1. Eksperimentinių tyrimų metu nustatyti automobilio kėbulo svyravimai

Be anksčiau minėtų parametrų, labai svarbu įvertinti kėbulo svyravimus. Visa naudota KISTLER ir CORREVIT įranga buvo sumontuota tiriamajame automobilyje ir sujungta į vientisą sistemą. Sumontuotos įrangos vaizdai tiriamajame automobilyje pateikti 33, 34, 35, 36 paveiksluose.



33 pav. *Correvit S-350* jutiklio bendras vaizdas ant automobilio MAZDA 626

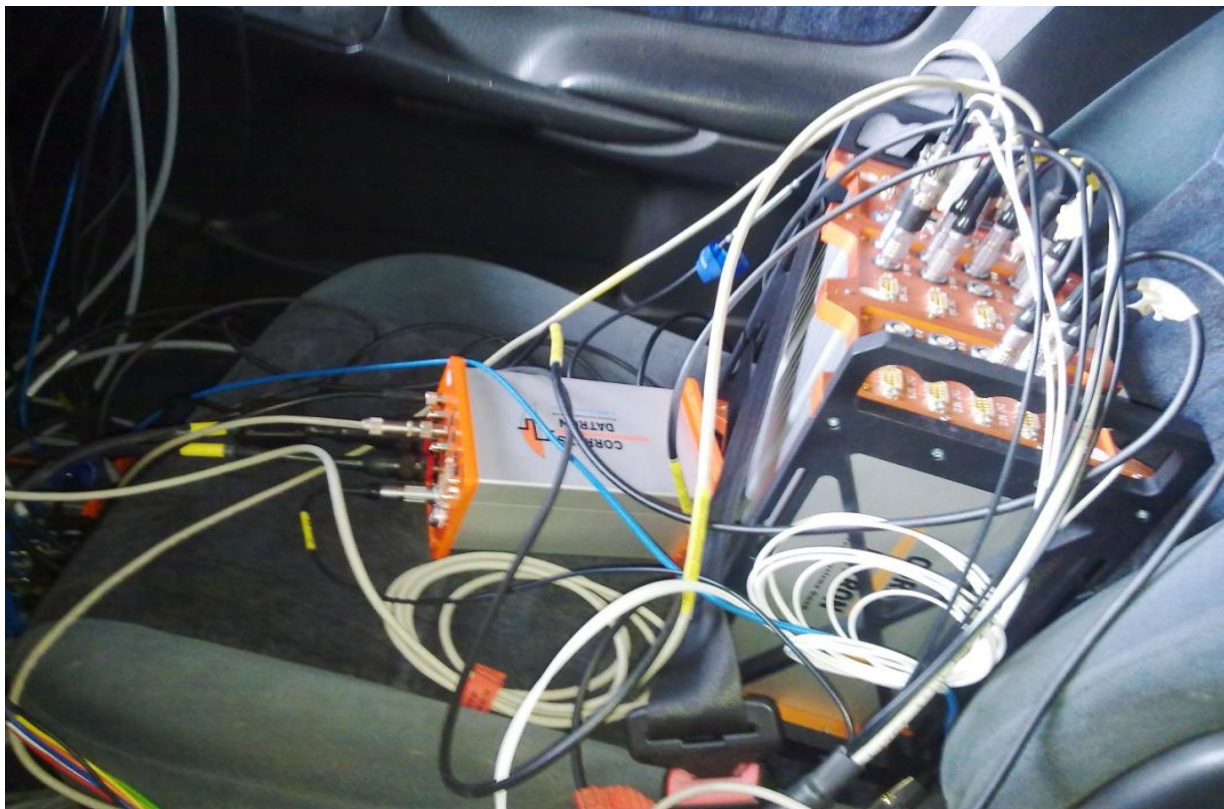
Automobilio kėbulo posvyrio kampui nustatyti naudojamas jutiklis CORREVIT S-350, pritvirtintas prie automobilio kėbulo priekinės dalies, du jutikliai CORREVIT HF-500C (h1, h2) (37 pav.) tvirtinami skirtinguose automobilio šonuose ir duomenų surinkimo ir apdorojimo įrenginys „Corrsys-Datron DAS-3“.



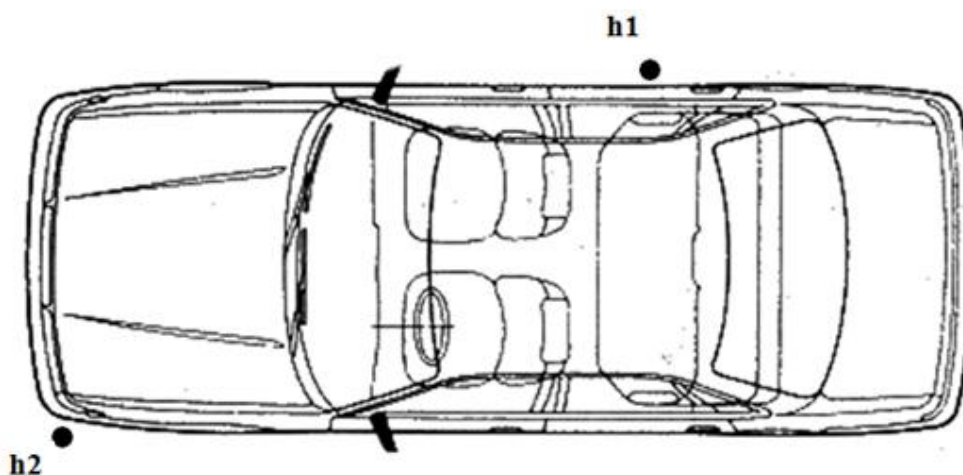
34 pav. *Correvit HF-500C* jutiklio bendras vaizdas ant automobilio MAZDA 626



35 pav. *Correvit HF-500C* jutiklio bendras vaizdas ant automobilio MAZDA 626



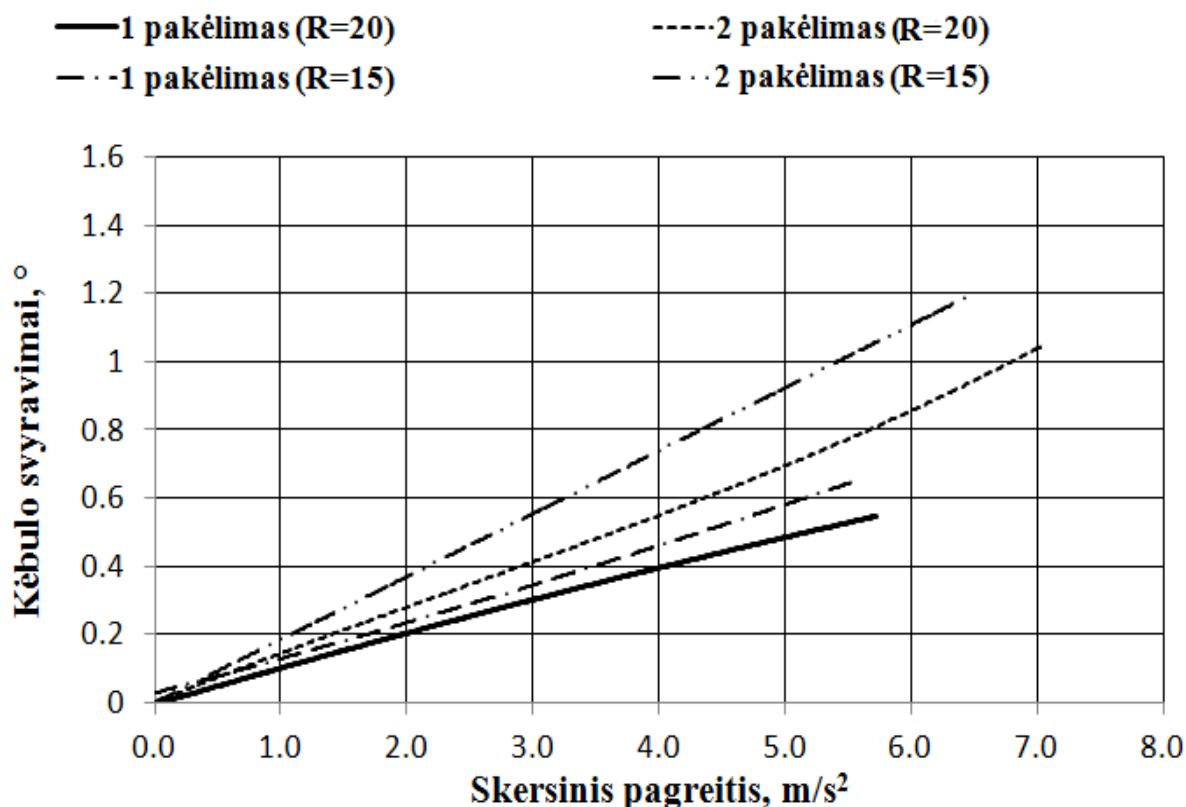
36 pav. Sumontuotos įrangos bendras vaizdas MAZDA 626 automobilyje



37 pav. Jutiklių h1 ir h2 padėtys

Automobiliui važiuojant asfaltuotu keliu tolygiai greitėjant jutikliais h1 ir h2 buvo fiksuojami automobilio kėbulo atstumai iki kelio paviršiaus (37 pav.). Automobiliu važiuojama 20 m ir 15 m spinduolio apskritimo formos trajektorijomis pagal laikrodžio rodyklę. Eksperimentai atliekami automobilį dirbtinai pakeliant į aukščiausią ir nuleidžiant į žemiausią slydimo sistemos padėtį. 38 paveiksle pateikta automobilio kėbulo svyravimų priklausomybė nuo automobilio skersinio pagreičio. Pateikiamos keturios kreivės, viena kurių rodo automobilio

aukščiausią pakėlimo padėtį (1 pakėlimas), atliekant manevrą 20 m spindulio trajektorija, antra – žemiausią (2 pakėlimas), atliekant manevrą 20 m spindulio trajektorija. Trečia kreivė rodo svyravimus atliekant manevrą 15 m spindulio trajektorija, aukščiausioje padėtyje, ketvirta – svyravimus atliekant manevrą 15 m spindulio trajektorija, žemiausioje padėtyje.



38 pav. Automobilio su slydimo sistema kėbulo skersinio svyravimo priklausomybė nuo automobilį veikiančio skersinio pagreičio

38 paveiksle matyti, kad automobiliui atliekant manevrą 20 m spindulio trajektorija ir esant žemiausioje padėtyje, didėjant automobilio skersiniam pagreičiui, automobilio kėbulas dėl inercijos jėgų linkęs pasvirti $\approx 0,4^\circ$ didesniu kampu nei automobiliui esant aukščiausioje padėtyje. Automobiliui judant 15 m spindulio trajektorija, automobilio kėbulas pasvyra labiau (iki beveik $1,5^\circ$, esant $\approx 6,5 \text{ m/s}^2$ pagreičiui).

Įvertinus didžiausias bei mažiausias automobilio kėbulo svyravimų reikšmes, randamos automobilio kėbulo svyravimo kampo reikšmės, kada automobilis juda apskritimu. Toliau esančioje 2 lentelėje pateikiamos svyravimų kampo reikšmės.

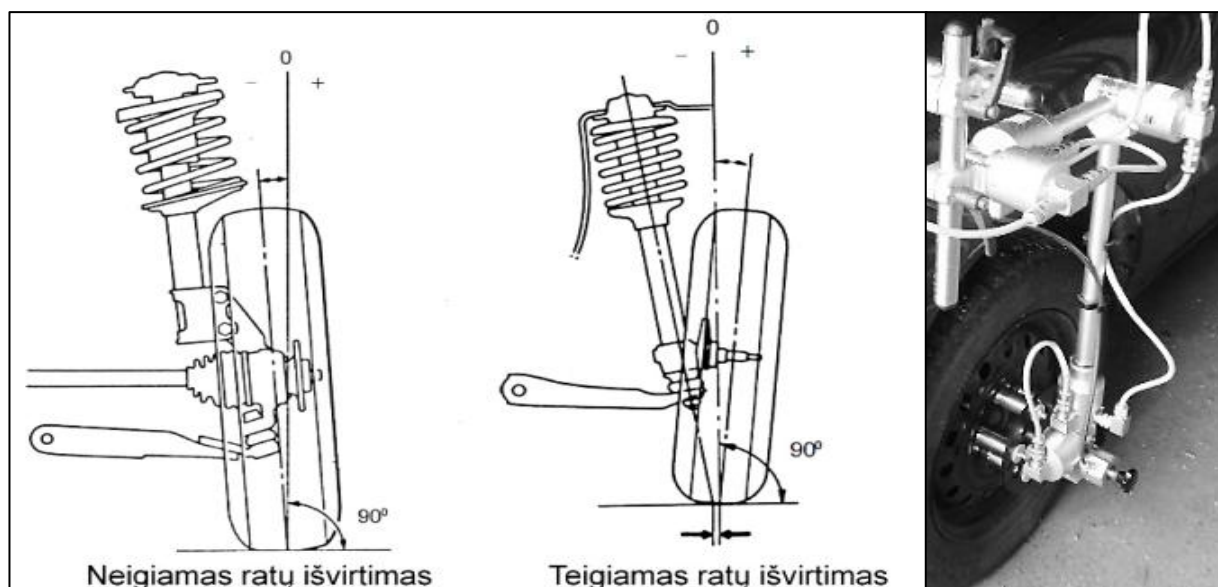
2 lentelė. Automobilio kėbulo svyravimų kampo reikšmės

	Judėjimo apskritimo spindulys			
	R=20		R=15	
	1 pakėlimas	2 pakėlimas	1 pakėlimas	2 pakėlimas
Automobilio kėbulo didžiausias pasvirimo kampas, °	0,55	1,05	0.65	1,5

Iš 2 lentelės reikšmių matoma, kad automobiliui atliekant manevrą mažesnio apskritimo spinduliu slydimo sistemos įtaka, keičiant automobilio pakėlimo aukštį, yra ryškiau pastebima.

3.4.2. Eksperimentinių tyrimų metu nustatytas automobilio ratų išvirthimo kampas

Kitas svarbus dinaminis parametras – tai rato išvirthimo kampas (39 pav.). Ratų išvirthimu vadinamas kampas tarp tiesės, esančios rato sukimosi plokštumoje, ir statmens rato riedėjimo plokštumai, ratams esant vidurinėje padėtyje (važiuojant tiesiai). Jeigu rato viršutinė dalis pakrypusi į išorę, išvirthimas vadinamas teigiamu, o jeigu pakrypusi į vidų – neigiamu. Neigiamas ratų išvirthimas didina šonines jėgas. Teigiamas ratų išvirthimas didina ašinę jėgą, kuri spaudžia rato stebulę prie vidinio guolio, sumažina išorinio guolio bei šerdės apkrovą. Teigiamas išvirthimas sumažina ratų pasukimo momentą, taip pat palengvina automobilio vairavimą, padidina automobilio stabilumą. Neigiamas ratų išvirthimas padidina automobilio stabilumą posūkyje (Baffet *et al.* 2009).



39 pav. Rato išvirthimo kampas ir jo matavimas

Tyrimų metu naudojama matavimų įranga (39 pav.) įvertinama automobilio rato dinaminio išvrtimo kampo priklausomybė nuo automobilio skersinio pagreičio. Be ankstesniuose eksperimentuose naudotų jutiklių į bendrą sistemą prijungiami jutikliai KISTLER RV-4. Tiriamajame automobilyje sumontuoto jutiklio vaizdas pateiktas 39 paveiksle. Jutikliai KISTLER RV-4 tvirtinami prie automobilio priekinių ratų.

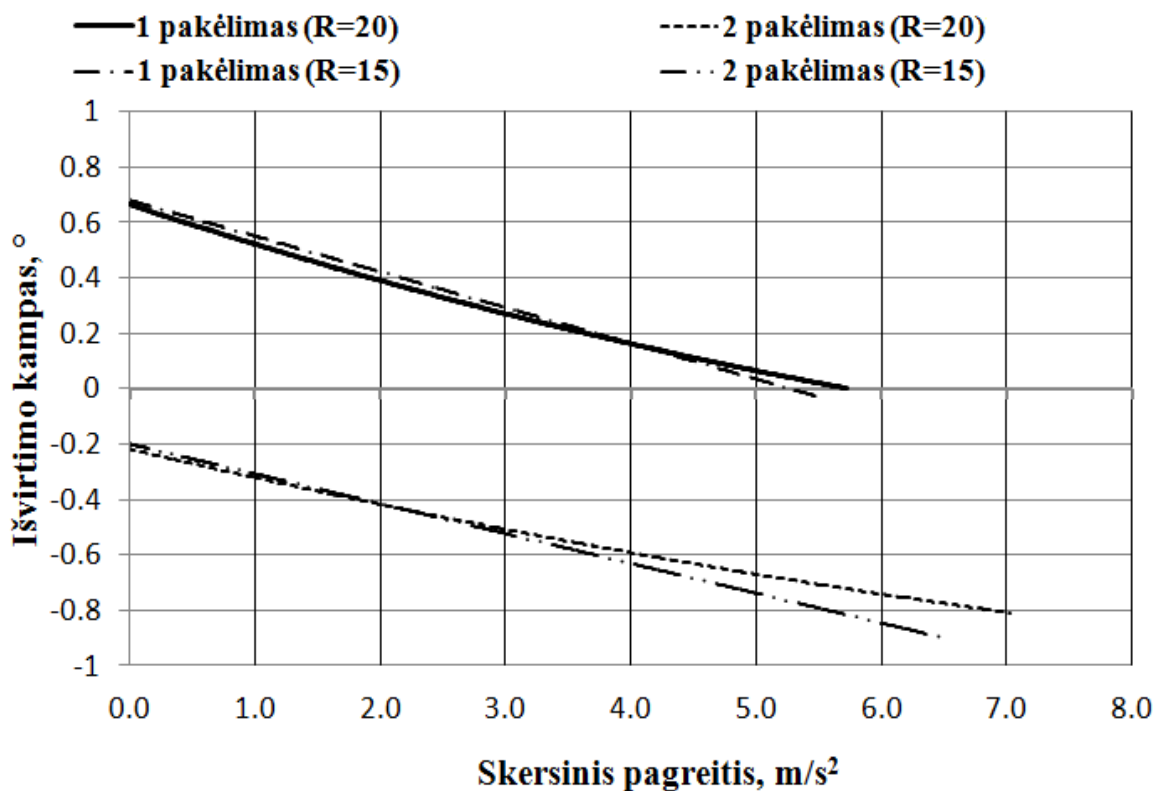
Jutikliai KISTLER RV-4 perduoda informaciją apie ratų pasukimo, išvrtimo kampus, jutiklis CORREVIT S-350 nustato automobilio judėjimo trajektoriją. Informacija perduodama ir įrašoma į duomenų surinkimo–apdorojimo įrenginio KISTLER DAS–3 atminties kortelę. Atminties kortelėje esančiai informacijai nuskaityti naudojamas kompiuteris, kuriame įdiegta *Race Technology Data Analysis* duomenų apdorojimo kompiuterinė programa. Apdorojus duomenis jie pateikiami *MS Excel* programos formatu (40 pav.).

40 pav. Išfiltruotų duomenų forma *MS Excel* programoje

Išfiltruoti duomenys pateikiami *MS Excel* formato bylomis, kuriose AI stulpelyje pateiktos automobilį veikiančio skersinio pagreičio reikšmės, AJ stulpelyje pateiktos

vairuojamojo rato išvrtimo kampo reikšmės esant atitinkamam automobilį veikiančiam skersiniam pagreičiui. Kituose stulpeliuose pateikti duomenys vertinami nebuvo.

Važiavimo sąlygos tokios pačios kaip matuojant automobilio kėbulo svyravimus. Automobilis važiuojo asfaltuotu keliu tolygiai greitėjęs. Automobiliumi važiuojama 20 m ir 15 m spindulio apskritimo formos trajektorijomis pagal laikrodžio rodyklę. Eksperimentai atliekami automobilį dirbtinai pakeliant į aukščiausią ir nuleidžiant į žemiausią slydimo sistemos padėtį. Toliau 41 paveiksle pateiktos eksperimento metu gautos automobilio vairuojamųjų ratų dinaminio išvrtimo kampo reikšmės didėjant skersiniam pagreičiui.



41 pav. Vidinio vairuojamojo rato išvrtimo kampo priklausomybė nuo automobilio skersinio pagreičio

41 paveiksle matyti, kad automobiliui esant žemiausioje padėtyje, didėjant skersiniam pagreičiui, automobilio priekinio rato išvrtimo kampas pasikeičia $\approx 0,1^\circ$ mažesniu kampu nei automobiliui esant aukščiausioje padėtyje, didėjant automobilio skersiniam pagreičiui. Matoma, kad kai automobilis yra su slydimą imituojančia sistema rato išvrtimo kampas mažėja. Automobiliui esant aukščiausioje padėtyje ratų išvrtimas yra teigiamas, žemiausioje – neigiamas. Atliekant manevrą 15 m spindulio trajektorija išvrtimo kampas kinta greičiau.

Įvertinamos didžiausios automobilio ratų išvrtimo kampo kitimo amplitudės reikšmės (3 lentelė).

3 lentelė. Didžiausios automobilio ratų išvartimo kampo reikšmės

	Judėjimo apskritimo spindulys			
	R=20		R=15	
	1 pakėlimas	2 pakėlimas	1 pakėlimas	2 pakėlimas
Didžiausios ratų išvartimo kampo kitimo amplitudės reikšmės, °	0,7	0.6	0,75	0.7

Iš 3 lentelės matyti, kad šiuo atveju išvartimo kampo kitimo amplitudė didesnė važiuojant esant 1 pakėlimui (pastebimas $\approx 0,7^\circ$ kampo pokytis) bei pastebimas didesnis išvartimo kampo pokytis atliekant manevrą 15 metrų spindulio trajektorija.

3.4.3. Eksperimentinių tyrimų metu nustatytas automobilio kritinis ir charakteringas greičiai

Automobiliui judant nekintamo spindulio apskritimo trajektorija, automobilio slydimą apibūdina pasukamumo gradientas K . Jis nusako, koks yra automobilio slydimas. Perteklinio pasukamumo atveju $K < 0$. Atliekant važiavimus perteklinio pasukamumo sąlygomis pasiekiamas kritinis greitis v_{kr} . Kritinis greitis įgyja priklausomybę (Abe 2009):

$$v_{kr} = \sqrt{\frac{-1}{K}} \quad (19)$$

Nepakankamo pasukamumo atveju $K > 0$. Atliekant manevrą nepakankamo pasukamumo sąlygomis pasiekiamas charakteringas greitis v_{ch} :

$$v_{ch} = \sqrt{\frac{1}{K}} \quad (20)$$

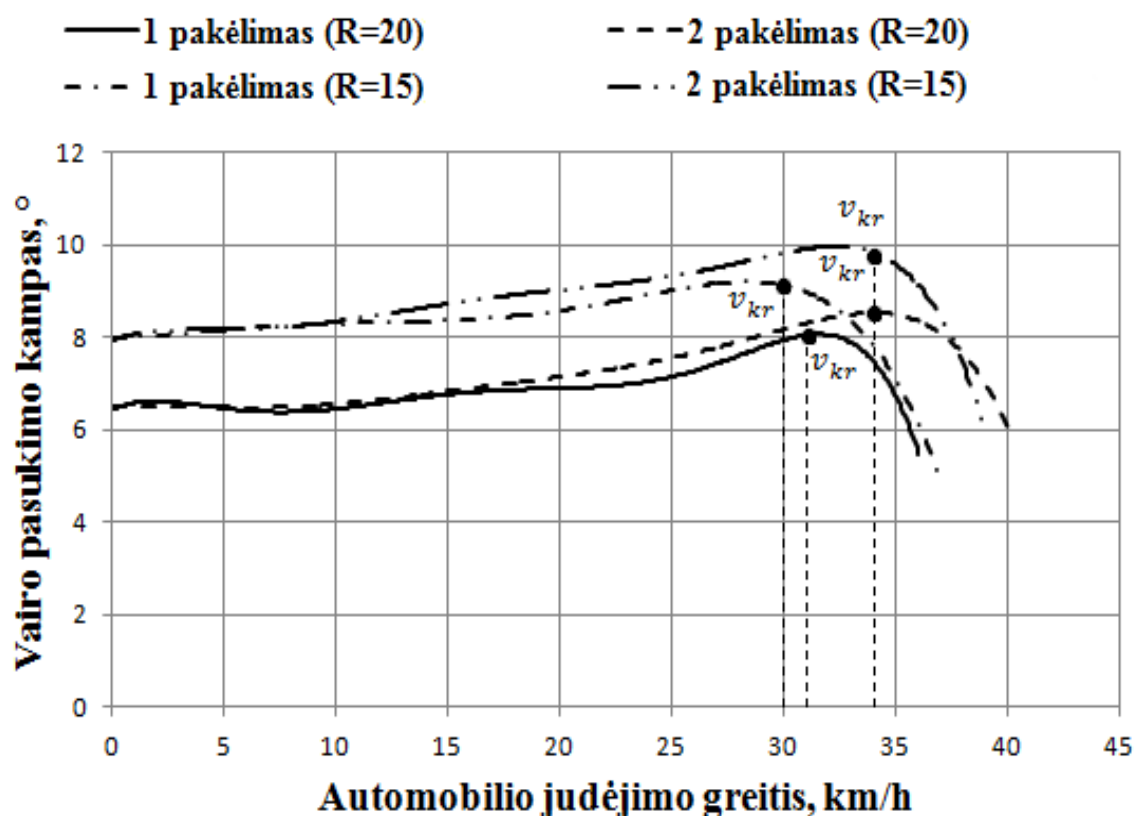
Eksperimentinio tyrimo metu buvo fiksuojamas automobilio judėjimo greitis bei vairuojamųjų ratų pasukimo kampas tam, kad būtų nustatytas kritinis bei charakteringas automobilio judėjimo greitis (43 pav.).

Kaip ir ankstesniuose eksperimentuose į bendrą sistemą prijungiamas jutiklis KISTLER RV-4. Jutiklis KISTLER RV-4 tvirtinamas prie automobilio priekinės dalies. Jutiklis KISTLER RV-4 perduoda informaciją apie automobilio su slydimą imituojančia sistema vairuojamųjų pasukimo kampą, jutiklis CORREVIT S-350 nustato automobilio judėjimo greitį. Informacija kaip ir ankstesniuose eksperimentuose perduodama ir įrašoma į duomenų surinkimo ir apdorojimo įrenginio „Corrsys-Datron DAS-3“ atminties kortelę. Atminties kortelėje esančiai

[illegible]

Važiavimo sąlygos tokios pačios kaip matuojant automobilio kėbulo svyravimus. Automobilis važiuoja asfaltuotu keliu tolygiai greitėjant. Automobiliumi važiuojama 20 m ir 15 m spinduolio apskritimo formos trajektorijomis pagal laikrodžio rodyklę. Eksperimentai atliekami automobilį dirbtinai pakeliant į aukščiausią ir nuleidžiant į žemiausią slydimo sistemos padėtį. Toliau 43 paveiksle pateiktos eksperimento metu gautos automobilio kritinio greičio reikšmės.

51



43 pav. Automobilio vairo pasukimo kampo priklausomybė nuo automobilio judėjimo greičio

Įvertinamos didžiausios automobilio kritinio greičio reikšmės (4 lentelė).

4 lentelė. Didžiausios automobilio kritinio greičio reikšmės

	Judėjimo apskritimo spindulys			
	R=20		R=15	
	1 pakėlimas	2 pakėlimas	1 pakėlimas	2 pakėlimas
Didžiausios automobilio kritinio greičio reikšmės, km/h	31	34	30	34

Iš 4 lentelės reikšmių matoma, kad automobilio su slydimą imituojančia sistema kritinio greičio reikšmė pasiekia apie 30 km/h vidutinę reikšmę važiuojant nustačius aukščiausią slydimo sistemos padėtį apskritimo formos trajektorija ir apie 34 km/h vidutinę reikšmę važiuojant nustačius aukščiausią slydimo sistemos padėtį apskritimo formos trajektorija. Pastebima, jog važiuojant vienodais pakėlimo aukščiais, skirtingo spindulio apskritimo trajektorijomis pasiekiamas kritinis greitis yra apytiksliai vienodas.

4. AUTOMOBILIO BE SLYDIMĄ IMITUOJANČIOS ĮRANGOS EKSPERIMENTINIS TYRIMAS

4.1. Eksperimentinių tyrimų atlikimo metodika ir sąlygos

Eksperimento tikslas – išmatuoti ir įvertinti automobilio „Mazda 626“ dinامينius parametrus. Eksperimento metu atliekami dinaminio stovumo bandymai, kurių metu automobilis yra bandomas pasirinktu dinaminio stovumo metodu.

Gauti rezultatai bus lyginami su rezultatais, gautais atliekant eksperimentus su tuo pačiu automobiliu su slydimą imituojančia įranga.

4.2. Teorinės eksperimento prielaidos

Kaip ir ankstesniuose eksperimentuose, pasirenkame judėjimo nekintamo spindulio žiedu metodą. Pasirenkame, nes šis metodas yra paprasčiausias, saugiausias iš minėtų galimybių.

Eksperimentinių tyrimų atlikimo sąlygos:

- Tyrimai atlikti su automobiliu „Mazda 626“ .
- Tiriamajame automobilyje sumontuojama įranga, kuri matuoja automobilio kėbulo svyravimus, ratų išvirthimo kampą, vairo pasukimo kampą, automobilio greitį bei automobilio judėjimo pagreitį skersine kryptimi.
- Bandymai atlikti važiuojant asfaltuota danga, važiuojama dviejų skirtingo spindulio apskritimų trajektorijomis, kiekviena trajektorija keičiant slydimą imituojančios sistemos pakėlimo aukščius.
- Tiriamojo automobilio ekipažą sudarė vairuotojas, kuris valdė naudojamą įrangą.

4.3. Eksperimentinių tyrimų metu naudota įranga

Automobilio dinaminėms savybėms nustatyti buvo fiksuojamas automobilio greitis, skersinis pagreitis, vairuojamųjų ratų išvirthimo kampas, vairo pasukimo kampas, automobilio kėbulo svyravimai, slydimą imituojančios įrangos pakėlimo aukščiai. Tam naudota automobilių dinaminiams matavimams skirti jutikliai, duomenų surinkimo – apdorojimo įrenginiai bei pati slydimą imituojanti sistema.

Naudota įranga:

- Duomenų surinkimo ir apdorojimo įrenginys „Corrsys -Datron DAS-3”.
- Trijų ašių navigacinis modulis su pagreičio ir sukimosi greičio jutikliais „Corrsys-Datron TANS-3215003M5“.
- Bekontaktis greičio bei slydimo kampo jutiklis CORREVIT S-350.
- Lazeriniai kėbulo padėties jutikliai CORREVIT HF-500C (125 – 325 mm, $\pm 0,2$ %).
- Ratų padėties jutiklių sistema KISTLER RV-4.
- Nešiojamieji kompiuteriai *Lenovo N500* ir *Lenovo ThinkPad*.
- 12 V akumuliatorius.

4.4. Eksperimento atlikimo tvarka

Eksperimentai atliekami sausoje asfaltbetonio dangos aikštelėje. Slydimo sistema buvo standžiai pritvirtinta prie automobilio kėbulo. Automobilio dinaminėms savybėms nustatyti buvo fiksuojamas automobilio judėjimo greitis, sukimosi greitis apie vertikalią ašį, automobilio kėbulo padėtis bandymų aikštelės dangos atžvilgiu, automobilio priekinių ratų eiga visomis kryptimis, automobilio judėjimo greitis pagal automobilio ratų sukimąsi bei nuvažiuotas kelias, automobilio rato dinaminio išvirtimo kampas, slydimą imituojančios sistemos pakėlimo aukščiai. Visi prietaisai buvo sukalibruoti siekiant užtikrinti aukštą bandymų tikslumą.

Buvo pasirinktos dvi bandymų trajektorijos, t. y. judėjimas nekintamo 15 ir 20 metrų spindulio žiedais. Kiekvienas bandymas buvo vykdomas judant apskritimu, nuolat didinant automobilio judėjimo greitį pagal standarto ISO 4138 reikalavimus. Automobilio judėjimas vyksta nustatytu vairo pasukimo kampu, kol pasiekama kritinė automobilio stovumo riba, – didėjant automobilio greičiui mažėja padangų generuojama kontaktinė jėga ir automobilis ima slysti.

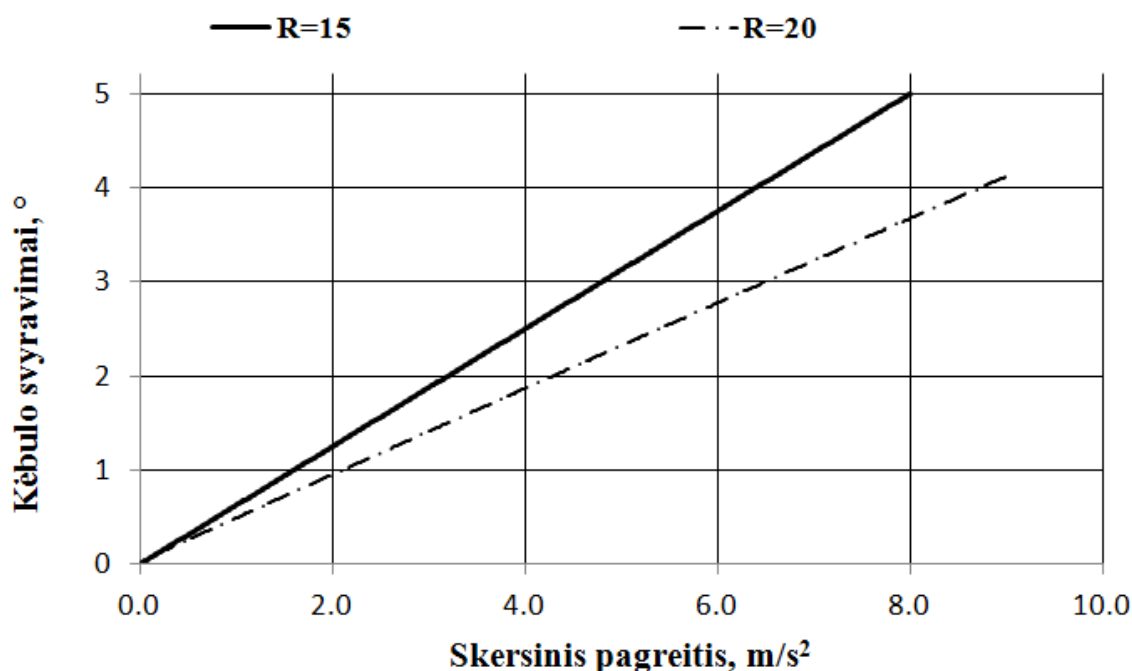
4.5. Eksperimento rezultatai

Eksperimentų metu buvo fiksuojama visa jutikliais gaunama informacija, tačiau daugiau dėmesio skirta kėbulo posvyrio kampo, vairuojamųjų ratų išvirtimo kampo, vairo pasukimo kampo, maksimalus greičio bei skersinio pagreičio stebejimui. Siekiant nusatyti šių parametru didžiausias reikšmes, jų pasiskirstymą ir kitimą, tyrimų metu gauti rezultatai buvo atvaizduojami grafiškai.

4.5.1. Eksperimentinių tyrimų metu nustatyti automobilio kėbulo svyravimai

Be anksčiau minėtų parametrų, labai svarbu įvertinti kėbulo svyravimus. Visa naudota KISTLER ir CORREVIT įranga buvo sumontuota tiriamajame automobilyje ir sujungta į vientisą sistemą. Naudojama ta pati įranga, kuri aprašoma 3.4.1. skyriuje.

Automobiliui važiuojant asfaltuotu keliu tolygiai greitėjant buvo fiksuojami automobilio kėbulo svyravimų kampai (44 pav.). Automobiliu važiuojama 20 m ir 15 m spindulio apskritimo formos trajektorijomis pagal laikrodžio rodyklę. 38 paveiksle pateikta automobilio kėbulo svyravimų priklausomybė nuo automobilio skersinio pagreičio. Pateikiamos dvi kreivės, viena kurių rodo automobilio manevrą 20 m spindulio trajektorija, antra – manevrą 15 m spindulio trajektorija.



44 pav. Automobilio su slydimo sistema kėbulo skersinio svyravimo priklausomybė nuo automobilį veikiančio skersinio pagreičio

44 paveiksle matyti, kad automobilis be slydimo sistemos pasvyra labiau (iki beveik 5°, esant $\approx 8 \text{ m/s}^2$ pagreičiui). Tai galima aiškinti tuo, kad nenaudojant slydimą imituojančios sistemos, gaunamas daug didesnis automobilio kėbulo masių persiskirstymas, važiuojant ratu.

Įvertinus didžiausias bei mažiausias automobilio kėbulo svyravimų reikšmes, randamos automobilio kėbulo svyravimo kampo reikšmės, kada automobilis juda apskritimu. Toliau esančioje 10 lentelėje pateikiamos svyravimų kampo reikšmės.

5 lentelė. Automobilio kėbulo svyravimų kampo reikšmės

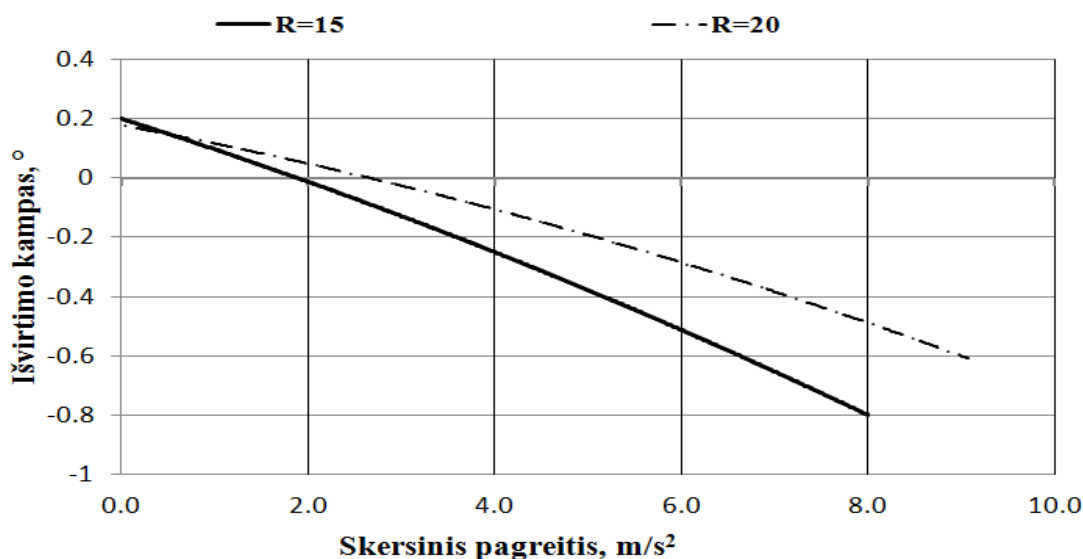
	Judėjimo apskritimo spindulys	
	R=20	R=15
Didžiausias automobilio kėbulo pasvirimo kampas, °	4,1	5,0

Iš 5 lentelės reikšmių matoma, kad automobiliui atliekant manevrą mažesnio apskritimo spinduliu automobilio kėbulas pasvyra $\approx 1^\circ$ daugiau.

4.5.2. Eksperimentinių tyrimų metu nustatytas automobilio ratų išvirthimo kampas

Kitas svarbus dinaminis parametras – tai rato išvirthimo kampas (39 pav.). Tyrimų metu naudojama matavimų įranga įvertinama automobilio rato dinaminio išvirthimo kampo priklausomybė nuo automobilio skersinio pagreičio. Be ankstesniuose eksperimentuose naudotų jutiklių į bendrą sistemą prijungiami jutikliai KISTLER RV-4. Sumontuoto jutiklio vaizdas tiriamajame automobilyje pateiktas 39 paveiksle. Jutikliai KISTLER RV-4 tvirtinami prie automobilio priekinių ratų (plačiau 3.4.2 skyriuje).

Važiavimo sąlygos tokios pačios kaip matuojant automobilio kėbulo svyravimus. Toliau 45 paveiksle pateiktos eksperimento metu gautos automobilio vairuojamųjų ratų dinaminio išvirthimo kampo reikšmės didėjant skersiniam pagreičiui.



45 pav. Vidinio vairuojamojo rato išvirthimo kampo priklausomybė nuo automobilio skersinio pagreičio

Apžvelgiant gautus automobilio judėjimo apskritimo formos trajektorija grafikus matyti, kad automobilio išvartimo kampas yra nepastovus. Matoma, kad kaip ir tuo atveju, kai automobilis buvo su slydimą imituojančia sistema, automobilio be šios sistemos rato išvartimo kampas mažėja, tačiau šiuo atveju išvartimo kampo kitimo amplitudė didesnė (pastebimas $\approx 0,8^\circ$ kampo pokytis). Taip yra dėl pasiekiamo didesnio skersinio pagreičio ($\approx 9 \text{ m/s}^2$), t. y. veikia didesnė skersinė jėga, lėmusi didesnę kėbulo pasvirimą ir pakabos eigą.

Įvertinamos didžiausios automobilio ratų išvartimo kampo kitimo amplitudės reikšmės (6 lentelė).

6 lentelė. Didžiausios automobilio ratų skersridės kampo reikšmės

	Judėjimo apskritimo spindulys	
	R=20	R=15
Didžiausios ratų išvartimo kampo kitimo amplitudės reikšmės, $^\circ$	0,8	1,0

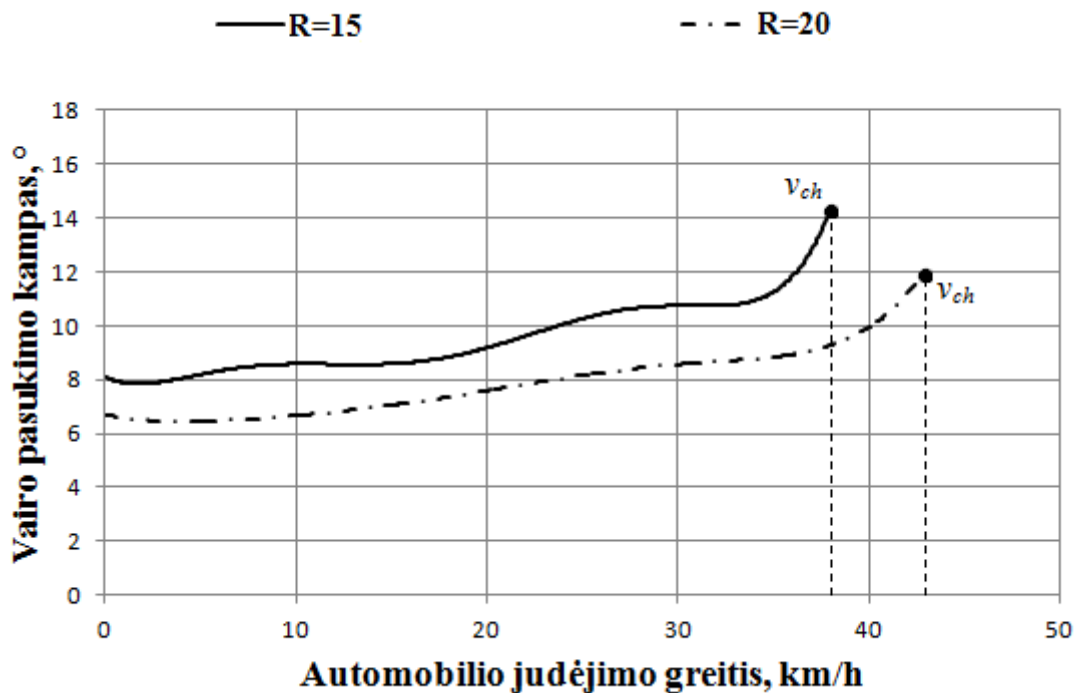
Iš 6 lentelės matoma, kad šiuo atveju išvartimo kampo kitimo amplitudė didesnė atliekant manevrą 15 metrų spindulio trajektorija (pastebimas $\approx 1,0^\circ$ kampo pokytis).

4.5.3. Eksperimentinių tyrimų metu nustatytas automobilio kritinis ir charakteringas greičiai

Kaip ir ankstesniuose eksperimentuose į bendrą sistemą prijungiamas jutiklis KISTLER RV-4 ir jutiklis CORREVIT S-350 (plačiau 3.4.3. skyriuje).

Važiavimo sąlygos tokios pačios kaip matuojant automobilio kėbulo svyravimus. Automobilis važiavo asfaltuotu keliu tolygiai greitėjant. Automobiliu važiuojama 20 m ir 15 m spindulio apskritimo formos trajektorijomis pagal laikrodžio rodyklę. Toliau 46 paveiksle pateiktos eksperimento metu gautos automobilio charakteringo greičio reikšmės.

Atliekant manevrą be slydimo sistemos, automobilis juda nepakankamo pasukamumo sąlygomis. Šiuo atveju siekiama išlaikyti judėjimo trajektoriją didinant vairo pasukimą. Automobiliui pradėjus slysti vairas dar labiau sukamas vidine posūkio kryptimi, siekiant stabilizuoti automobilį (46 pav.).



46 pav. Automobilio vairo pasukimo kampo priklausomybė nuo automobilio judėjimo greičio

Atliekant manevrą 15 m spindulio žiedu pasiekiamas ≈ 5 km/h mažesnis charakteringas greitis nei judant 20 m spindulio žiedu. Be slydimo sistemos pasiekiamas ≈ 12 km/h didesnis charakteringas greitis, lyginant su kritiniu automobilio judėjimo greičiu su slydimo sistema.

Įvertinamos didžiausios automobilio charakteringo greičio reikšmės (7 lentelė).

7 lentelė. Didžiausios automobilio charakteringo greičio reikšmės

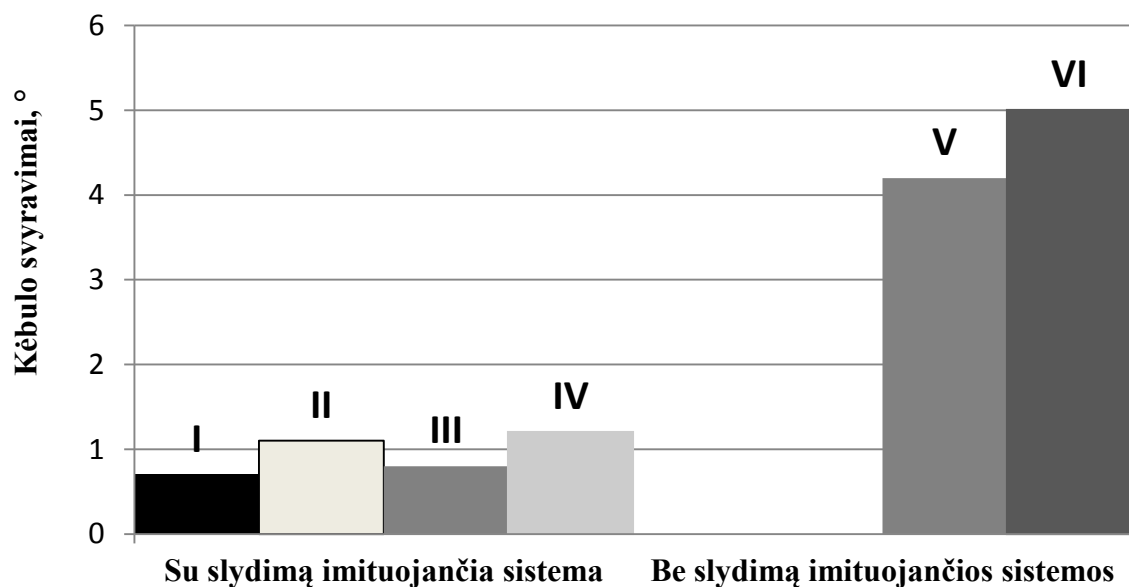
	Judėjimo apskritimo spindulys	
	R=20	R=15
Didžiausios automobilio charakteringo greičio reikšmės, km/h	43	38

Iš 7 lentelės reikšmių matoma, kad automobilio be slydimą imituojančios sistemos charakteringas greitis pasiekia apie 11 % mažesnę reikšmę atliekant manevrą 15 m spindulio trajektorija nei 20 m trajektorija.

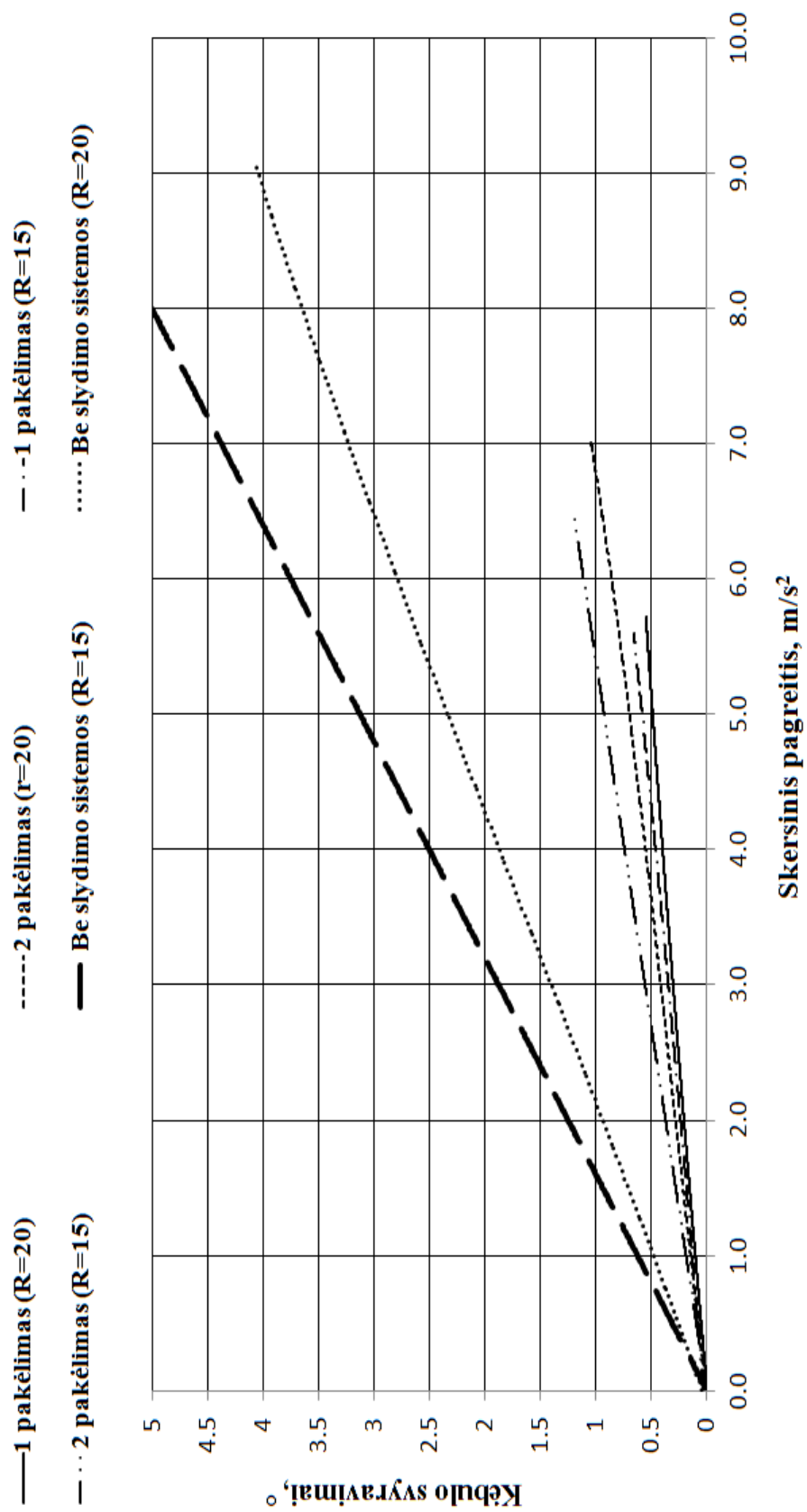
5. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ REZULTATŲ ANALIZĖ

Atlikta eksperimentinių tyrimų rezultatų analizė, vertinant lengvojo automobilio MAZDA 626 pagrindines dinamines charakteristikas: kėbulo svyravimus, ratų dinaminio išvrtimo kampą, automobilio kritinį bei charakteringą judėjimo greitį.

Didžiausios bandomo automobilio kėbulo vertikalių svyravimų reikšmės kinta nuo maždaug 1° iki 5° (47 pav.). Pastebima, kad automobiliui važiuojant mažesnio spindulio apskritimo trajektorija bei esant žemesnei pakėlimo padėčiai pasiekiamos didesnės kėbulo pasvirimo kampo reikšmės. Ryškiausias skirtumas pastebimas lyginant kėbulo svyravimus su slydimą imituojančia sistema ir be jos (48 pav.). Atliekant dinامينius automobilio be slydimą imituojančios sistemos tyrimus pasiekiamos apie 4° didesnės kėbulo svyravimų kampo reikšmės, lyginant su reikšmėmis, gautomis tyrimų su slydimą imituojančia sistema metu. Tai paaiškinama slydimą imituojančios sistemos savybe automobiliui suteikti papildomą kėbulo stabilumą vertikalųjų posvyrių atžvilgiu.

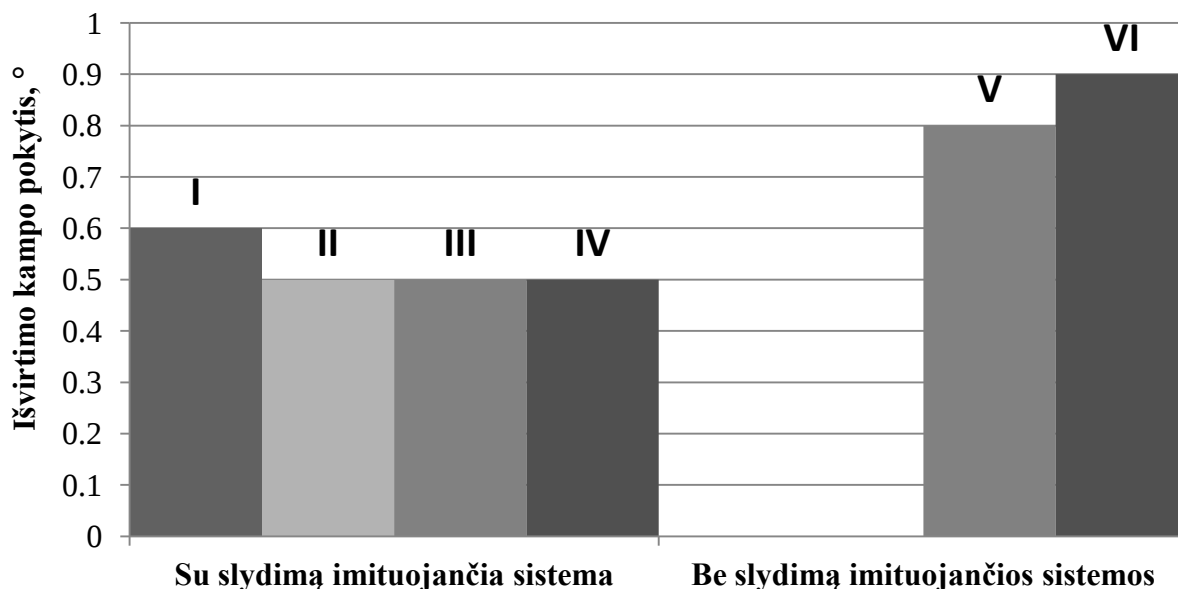


47 pav. Didžiausios bandyto automobilio kėbulo pasvirimo reikšmės: I – judėjimas 20 m spindulio apskritimu, esant aukščiausiai automobilio padėčiai, II – judėjimas 20 m spindulio apskritimu, esant žemiausiai automobilio padėčiai, III – judėjimas 15 m spindulio apskritimu, esant aukščiausiai automobilio padėčiai, IV – judėjimas 15 m spindulio apskritimu, esant žemiausiai automobilio padėčiai, V – judėjimas 20 m spindulio apskritimu, VI – judėjimas 15 m spindulio apskritimu



48 pav. Automobilio kėbulo skersinio svyravimo priklausomybė nuo automobilį veikiančio skersinio pagreičio

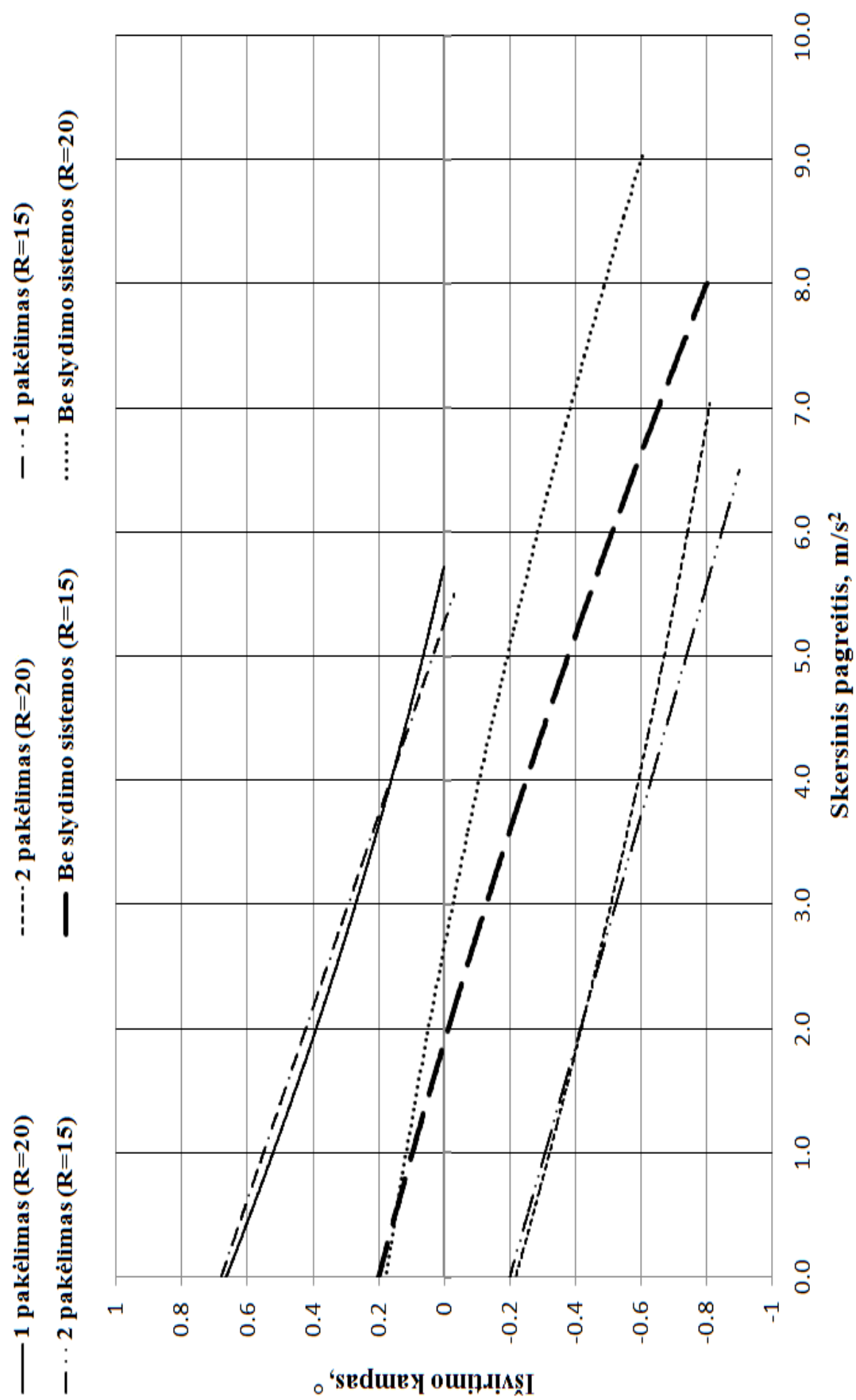
Ištyrus lengvojo automobilio su ir be slydimą imituojančios sistemos dinaminio išvartimo kampo priklausomybę nuo automobilio skersinio pagreičio pastebima, kad didžiausios rato išvartimo kampo kitimo amplitudės reikšmės svyruoja nuo $\approx 0,5^\circ$ iki $\approx 1^\circ$ (49 pav.).



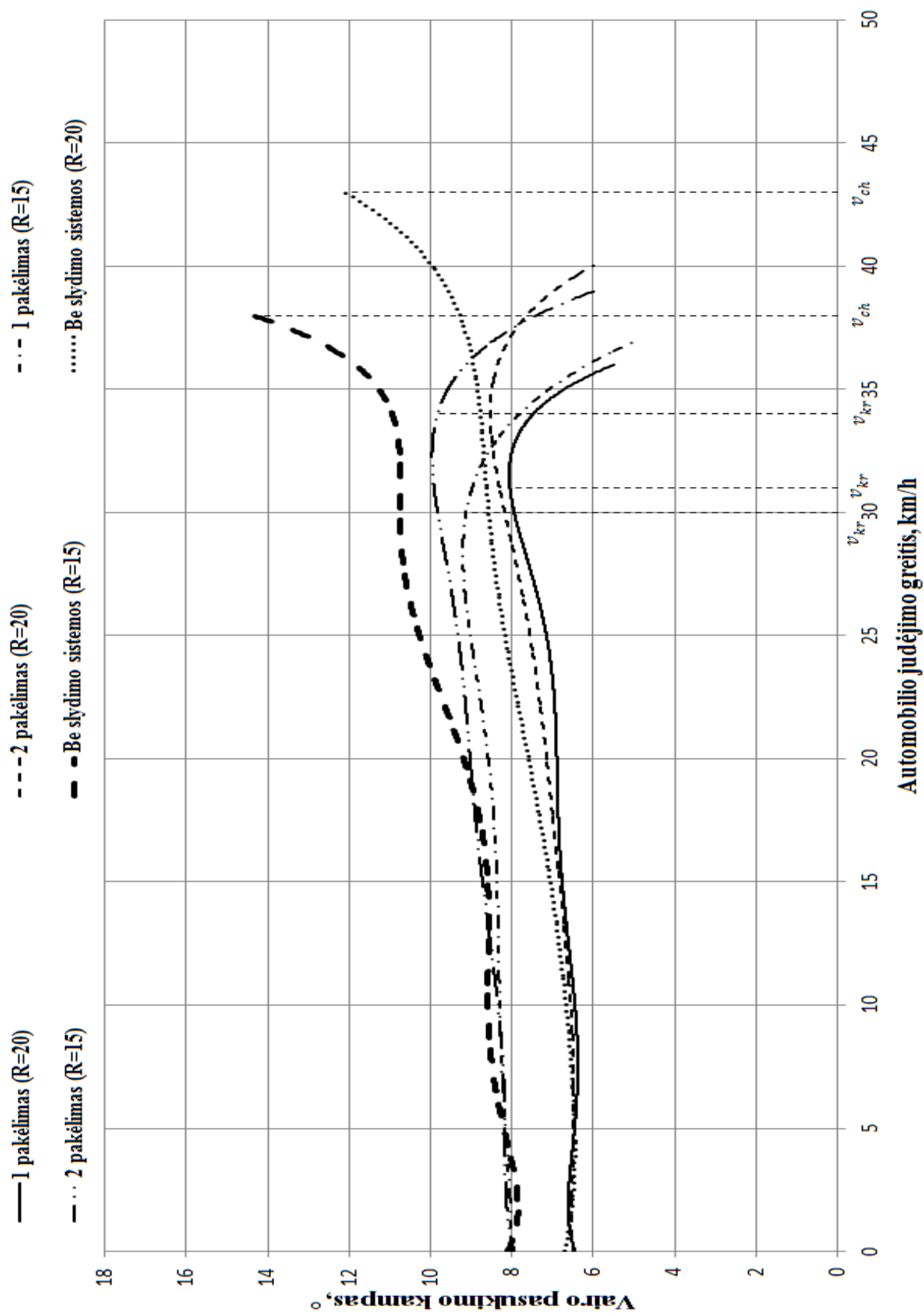
49 pav. Didžiausios bandyto automobilio rato išvartimo reikšmės

Automobiliui judant apskritimo formos trajektorija su slydimą imituojančia sistema, išvartimo kampo pokytis yra pastovus (pastebimas $\approx 0,5^\circ$ kampo pokytis). Šiuo atveju slydimo sistemos pakėlimo aukštis bei judėjimo spindulių dydis įtakos neturi. Judant skirtingų spindulių apskritimais be slydimą imituojančios sistemos išvartimo kampo pokyčio reikšmės išauga iki $\approx 1^\circ$ (50 pav.). Toks dinaminio ratų išvartimo kampo pokytis labiau pagerina automobilio stabilumą atliekant posūkius nei važiuojant automobiliu su slydimą imituojančia sistema.

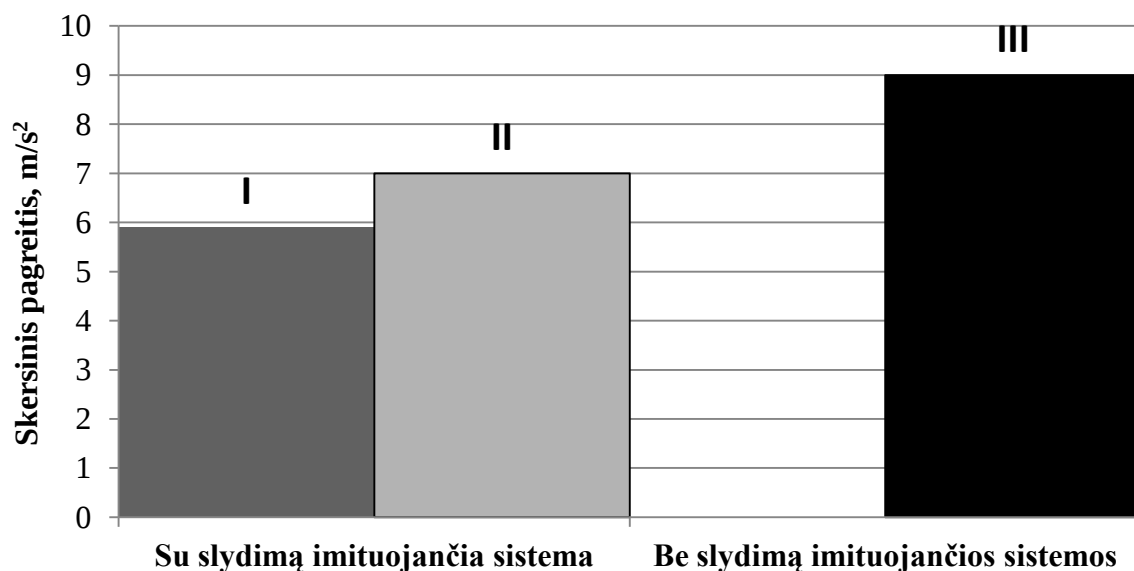
Atliekant eksperimentus su slydimą imituojančia sistema automobilis pradeda slysti pasiekęs vidutiniškai 3 m/s^2 mažesnę skersinę pagreitį, lyginant su automobiliu be slydimą imituojančios sistemos (38, 41, 43, 44, 45, 46, 48, 50, 51, 52 pav.). Kaip matyti, didelę įtaką automobilio skersiniam pagreičiui daro slydimo sistemos pakėlimo aukštis. Automobilis, būdamas aukščiausioje slydimo sistemos padėtyje pradeda slysti pasiekęs maždaug 1 m/s^2 mažesnę skersinę pagreitį, nei esant žemiausiam pakėlimo aukščiui (38, 41, 43, 44, 45, 46, 48, 50, 51, 52 pav.).



50 pav. Vidinio vairuojamojo rato išvrtimo kampo priklausomybė nuo automobilio skersinio pagreičio



51 pav. Automobilio vairo pasukimo kampo priklausomybė nuo automobilio judėjimo greičio



52 pav. Didžiausios bandyto automobilio skersinio pagreičio reikšmės: I – aukščiausias automobilio pakėlimas, II – žemiausias automobilio pakėlimas, III – be slydimo sistemos

Automobilis su slydimą imituojančia sistema juda perteklinio pasukamumo sąlygomis, automobilio vairo pasukimo kampas, automobiliui pradėjus slysti, mažėja, nes vairas sukamas priešinga kryptimi siekiant ištiesinti automobilį. Automobilis be slydimo sistemos juda nepakankamo pasukamumo sąlygomis (51 pav.).

Automobilio kritinis greitis, pasiekiamas automobiliu su slydimą imituojančia sistema važiuojant žiedu, gali būti palyginamas su tam kelio paviršiui būdingu teoriniu greičiu (Brach 1997). Teorinio kritinio greičio reikšmė, kuriai esant žiedu judantis automobilis praranda sukibimą su kelio danga, randama pagal formulę:

$$v = \sqrt{v_y' \cdot R} = \sqrt{\mu_y g R}, \quad (21)$$

čia: v_y' – skersinis pagreitis; μ_y – kelio dangos trinties koeficientas; g – laisvojo kritimo pagreitis.

Lyginant automobilio kritinį greitį gautą eksperimentų metu, (51 pav.) ir kritinį greitį, apskaičiuotą pagal (21) formulę, pastebimi kritinių greičių skirtumai. Automobilis, eksperimento metu važiuodamas nekintamo 20 metrų spindulio trajektorija, praranda sukibimą su kelio danga ir pradeda slysti pasiekęs 43 km/h kritinį greitį. Automobilis su slydimo sistema pasiekia 31

km/h greitį, esant aukščiausiam automobilio pakėlimui, ir 35 km/h greitį, esant žemiausiai automobilio padėčiai (8 lentelė).

8 lentelė. Eksperimentinio ir teorinio kritinio greičio reikšmės

	I pakėlimas		II pakėlimas		Be slydimo sistemos	
Judėjimo trajektorijos apskritimo spindulys R , m	15	20	15	20	15	20
Kritinis greitis, nustatytas eksperimentų metu v'_{cr} , km/h	30	31	34	35	38	43
Kritinis greitis, nustatytas teoriniais skaičiavimais v_{cr} , km/h	36	42	36	42	36	42
Teorinio ir realaus kritinio greičio skirtumas, %	-16	-26	-6	-17	5	2

Teoriniu būdu nustatytas kritinis automobilio greitis, važiuojant 20 metrų žiedu, yra 42 km/h, kuris yra labai artimas eksperimentiniu būdu gautam charakteringam greičiui be slydimo sistemos. Eksperimentiniai bei teoriniai kritiniai greičiai, važiuojant 15 ir 20 metrų spindulio žiedais, jų skirtumai pateikti 13 lentelėje.

IŠVADOS IR PASIŪLYMAI

Atlikus eksperimentinius tyrimus, skirtus įvertinti slydimą imituojančios sistemos įtaką lengvojo automobilio dinaminėms charakteristikoms, formuluojamos šios išvados:

1. Automobiliui važiuojant apskritimine trajektorija su slydimą imituojančia sistema bei esant žemiausiai ($\Delta z = 160$ mm) slydimo sistemos pakėlimo padėčiai pasiekiamos maždaug $0,4^\circ$ (t. y. 40 %) didesnės kėbulo svyravimo kampo reikšmės, nei esant aukščiausiam pakėlimui ($\Delta z = 50$ mm). Atliekant dinaminius automobilio be slydimą imituojančios sistemos tyrimus pasiekiamos apie 3° (t. y. 75 %) didesnės kėbulo svyravimų amplitudžių reikšmės, lyginant su reikšmėmis, gautomis tyrimo su slydimą imituojančia sistema metu. Tai paaiškinama slydimą imituojančios sistemos savybe automobiliui suteikti papildomą kėbulo stabilumą vertikalųjų posvyrių atžvilgiu, t. y. apriboti pakabos eigą.
2. Veikiant skersinėms apkrovoms, automobilio su slydimą imituojančia sistema rato dinaminio išvirmo kampo reikšmės kinta maždaug $0,5^\circ$. Automobiliui judant be slydimą imituojančios sistemos, dinaminio rato išvirmo kampo reikšmės kinta iki 1° . Tai patvirtina, jog slydimo sistema riboja kėbulo svyravimus ir pakabos eigas, o tai lemia mažesnę rato išvirmo kampo kitimą ir riboja gamintojo numatytą automobilio konstrukcijos kinematiką.
3. Atliekant eksperimentus su slydimą imituojančia sistema automobilis pradeda slysti pasiekęs vidutiniškai 3 m/s^2 (30 %) mažesnę skersinę pagreitį, lyginant su automobiliu be slydimą imituojančios sistemos. Tą lemia pagrindinė slydimą imituojančios sistemos savybė mažinti padangų skersines kontaktines jėgas.
4. Automobilio kritinis greitis iki slydimo pradžios, naudojant slydimo sistemą, yra iki 26 % mažesnis už teorinį kritinį greitį. Tai paaiškinama slydimo sistemos savybe aukščiau pakeliant automobilį sumažinti automobilio valdomumą posūkyje, kritinį greitį bei ratų trinties koeficientą skersine kryptimi.
5. Iš tyrimo metu gautų vairo pasukimo priklausomybių nuo automobilio greičio nustatyta, kad automobilio su slydimo sistema pasiektas kritinis greitis yra maždaug 27 % mažesnis už be slydimo sistemos pasiektą charakteringą greitį. Be to, automobilis su slydimo sistema apskritimu juda su pertekliniu pasukamumu, kai automobilis be slydimo sistemos tomis pačiomis sąlygomis juda su nepakankamu pasukamumu. Tai atskleidžia slydimo sistemos galimybes besitreniruojančiam vairuotojui išbandyti skirtingas automobilio valdymo technikas.
6. Remiantis tyrimo rezultatais, slydimą imituojanti sistema suteikia galimybę ekstremalaus vairavimo mokymų metu kiekvienam automobiliui suteikti skirtingas pakabos kinematinės savybes, keisti automobilio dinamines, sukibimo su kelio danga bei valdomumo savybes.

LITERATŪRA

- Abe, M. 2009. *Vehicle Handling Dynamics*. Theory and application. Oxford. 287 p.
- Baffet, G.; Charara, A.; Lechner, D. 2009. Estimation of vehicle sideslip, tire force and wheel cornering stiffness. *Control Engineering Practice*. Vol.17: p. 1255–1264.
- Boot, J. 2005. ATV Control regulating a 4WD/4WS autonomous guided vehicle. *Master's Thesis*. Hoofddorp. 128 p.
- Brach, R. M. 1997. An Analytical Assesment of the Critical Speed Formula, *SAE Paper* No. 970957.
- Doumiati, M.; Sename, O.; Dugard, L. 2013. Integrated vehicle dynamics control via coordination of active front steering and rear braking, *European Journal of Control* 19: 121–143.
- Dulevičius, J.; Žiliukas, P. 2000. *Mašinų elementai: skaičiavimai ir konstravimas*. Kaunas: Technologija, 459 p.
- Fittanto, D. A.; Senalik, A. 2004. Passenger Vehicle Steady-State Directional Stability Analysis Utilizing EDVSM and SIMON, *Engineering Dynamics Corporation*. 9 p.
- Gillespie, T. D. 1998. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. Warendale. 294 p.
- Imsland, L.; Johansen, T. A.; Fossena, T. I. 2008. Nonlinear vehicle side-slip estimation with friction adaptation, *Automatica* 44: 611 – 622.
- ISO 4138:2004(E). Passenger Cars – Steady-state Circular driving behavior – Open-loop Test Methods. International Organization for Standartization. Geneva.
- Katzourakis, D.; de Winter, J. C. F.; de Groot S.; Happee R. 2012. Driving simulator parameterization using double-lane change steering metrics as recorded on five modern cars, *Simulation Modelling Practice and Theory* 26: 96–112.
- Kemzūraitė, K.; Mikaliūnas, Š.; Sokolovskij, E.; Garbinčius, G. 2011. Automobilio judėjimo posūkyje tyrimas žiemos sąlygomis, *Mokslas* – 2011 3(6): 25–28.
- Menhour, L.; Charara, A.; Lechner, D. 2014. Switched LQR/H steering vehicle control to detect critical driving situations, *Control Engineering Practice* 24: 1–14.
- Mitunevičius, V. 2000. Skersinės automobilių dinamikos kriterijų tyrimo kryptys, *Transportas* – 2000, XV t., Nr. 5.
- Oliva, J.; Goicolea, J. M.; Antoln, P.; Astiz, M. 2013. Relevance of a complete road surface description in vehicle–bridge interaction dynamics, *Engineering Structures* 56: 466–476.
- Pazooki, A.; Rakheja, S.; Cao, D. 2012. Modeling and validation of off-road vehicle ride dynamics, *Mechanical Systems and Signal Processing* 28: 679–695.

- Petrėtienė, A. 2009. *Transportininkų kalbos kultūra*. Vilnius: Technika. 199 p.
- Pytko, J. A.; Tarkowski, P.; Fijałkowski, S.; Budzynski, P. 2011. An instrumented vehicle for offroad dynamics testing, *Journal of Terramechanics* 48: 384–395.
- Rill, G. 2006. Vehicle Dynamics, *Lecture notes*. Regensburg. 157 p.
- Stine, J.S.; Hamblin, B.C., Brennan, S.N.; Donnell, E.T. 2010. Analyzing the influence of median cross-section design on highway safety using vehicle dynamics simulations, *Accident Analysis and Prevention* 42 (2010): 1769–1777.
- Vehicle dynamics & Durability Testing* [interaktyvus]. 2015. „Kistler“ [žiūrėta 2015 m. vasario 3 d.]. Prieiga per internetą: http://corrsys-datron.com/support/PDF_Downloads/200-632e-06.10.pdf.
- Žukas, A. 2012. Taikomosios programos „CarSim“ pritaikymas, modeliuojant viengubą ir dvigubą judėjimo juostos pakeitimo manevrą, *Transportas* – 2012 4(4): 397–402.
- Žuraulis, V; Sokolovskij, E; Matijošius, J. 2013. The opportunities for establishing the critical speed of the vehicle on research in its lateral dynamics. *Eksplotacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2013; 15 (4): 312–318.
- Žuraulis, V; Kemzūraitė, K; Więckowski, D. Investigation of dynamic properties of vehicle in various friction condition simulated with use of skidcar system. *The archives of automotive engineering – Archiwum motoryzacji*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN. ISSN 1234-754X. Vol. 63, no.1 (2014), p. 89–99, 195–205.

PRIEDAI