



Kauno technologijos universitetas
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Automobilio stabilumo tyrimas atliekant įvairius manevrus
Baigiamasis magistro projektas

Artūras Sadauskas
Projekto autorius

Dr. Dainius Vaičiulis
Vadovas

Panevėžys, 2019



Kauno technologijos universitetas
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Automobilio stabilumo tyrimas atliekant įvairius manevrus
Baigiamasis magistro projektas
Transporto priemonių inžinerija (6211EX021)

Artūras Sadauskas
Projekto autorius

Dr. Dainius Vaičiulis
Vadovas / Vadovė

Recenzentas / Recenzentė



Kauno technologijos universitetas
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas
Artūras Sadauskas

Automobilio stabilumas atliekant įvairius manevrus

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Artūro Sadausko, baigiamasis projektas tema „Automobilio stabilumas atliekant įvairius manevrus“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Kauno technologijos universitetas
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

TVIRTINU
TVKC vadovė
Doc. dr. Nida Kvedaraitė

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Diplomantui Artūriui Sadauskui

Baigiamojo projekto tema lietuvių kalba

AUTOMOBILIO STABILUMO TYRIMAS ATLIEKANT ĮVAIRIUS MANEVRUS

Baigiamojo projekto tema anglų kalba

RESEARCH OF THE VEHICLE STABILITY ON DIFFERENT MANOEUVRES

Patvirtinta 2019 m. kovo 29 d. dekanı potvarkiu Nr.V25-13-10

Irišto baigiamojo projekto pateikimo į TVKC terminas iki 2019 m. gegužės 29 d.

Duomenys, reikalavimai ir sąlygos baigiamajam projektui

Tyrimuose įvertinti:

- *automobilio svorio centro padėtį ir judėjimo greitį;*
- *kelio dangos būklę;*
- *galimą skirtingą ratų sukibimą su kelio danga.*

Baigiamojo projekto užduotys / uždaviniai / klausimai, kurie turi būti atskleisti projekte

Atlikti mokslinės literatūros apžvalgą baigiamojo projekto tematika. Ištirti kokią įtaką automobilio stabilumui turi įvairūs automobilio manevrai (ne mažiau dviejų).

Vadovas / Vadovė

dr. Dainius Vaičiulis

(vadovo pareigos, vardas, pavardė, parašas)

Užduotį gavau

Artūras Sadauskas

(studento vardas, pavardė, parašas)

2019 m. balandžio 12 d.

Sadauskas, Artūras. Automobilio stabilumo tyrimas atliekant įvairius manevrus. Magistro studijų baigiamasis projektas / vadovas doc. Dainius Vaičiulis; Kauno technologijos universitetas, Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis: sausumos transporto inžinerija, technologijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: automobilio stabilumas, skersinis pagreitis, sukibimas

Panevėžys, 2019. 65 p.

Santrauka

Magistriniame baigiamajame darbe tiriamas automobilio stabilumas skirtingais važiavimo greičiais, pasirinktais 3 apkrovos atvejais, kurių metu pasikeičia svorio centro padėtis. Tyrimu metu atliekami trys stabilumo testai, kurie reglamentuojami ISO standartais. Pirmojo – nusistovėjusio būvio važiuojant apskritimu nustatymo testo metu, kai važiuojama 30 m spindulio apskritimu keičiant važiavimo greitį kiekvienu apkrovos atveju pasinaudojus ratų pasukamumo grafikais nustatytas skersinis pagreitis, kuriam esant automobilis praranda sukibimą su kelio dangai ir tuo pačiu stabilumą. Antrojo – dvipusio judėjim juostos keitimo testo metu kiekvienu apkrovos atveju keičiant transporto priemonės važiavimo greitį pasinaudojus pirmojo testo metu gautomis ribinio skersinio pagreičio vertėmis nustatyti atvejai, kuriais transporto priemonė praranda stabilumą. Trumpalaikės skersinės reakcijos tyrimo metu tiriamas automobilio stabilumas važiuojant 4 skirtingomis kelio dangomis važiuojant dviem skirtingais važiavimo greičiais ir atliekant staigų vairo pasukimą 4 posūkio kampais. Atliekant šią tyrimo dalį ribinės skersinio pagreičio vertės kiekvienai kelio dangai buvo apskaičiuotos pagal kelio dangų sukibimo koeficiento proporcijas.

Sadauskas, Artūras. Research of the Vehicle Stability on Different Manoeuvres. Master's Final Degree Project / supervisor Doc., Dainius Vaičiulis; Panevėžys Faculty of Technologies and Business, Kaunas University of Technology.

Study field and area: Overland Transport Engineering, Technology Sciences.

Keywords: vehicle stability, lateral acceleration, grip

Panevėžys, 2019. 65 pages.

Summary

The Master's thesis examines the stability of the vehicle at different speeds selected in 3 load cases where the center of gravity position changes. The study involves three stability tests, which are governed by ISO standards. During the first steady-state circular driving behaviour test, when driving at a radius of 30 meters circle, changing the travel speed for each load. Limit of lateral acceleration has been determined by handling diagrams. The vehicle loses its adhesion to the road surface while maintaining stability when limit of acceleration is achieved. During double lane change test in each load case, when the vehicle speed is changed the cases in which the vehicle loses stability were determined. The lateral transient response test examines the vehicle's stability when traveling on 4 different road surfaces at two different speeds and a sharp steering turn at 4 angles. For this part of the study limit of lateral acceleration for each road pavement were calculated from the ratio of the coefficient of adhesion of the road surfaces.

The influence of driving speed, weight center position and road surface influence on car stability is investigated. The stability of the car is assessed by comparing the lateral acceleration of the car center of gravity with the limit of lateral acceleration.

Turinys	
Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Įvadas.....	12
1 Automobilio stabilumas ir dinamika	13
1.1 Automobilio stabilumo sąvoka ir pagrindiniai dinamikos apibrėžimai.....	13
1.2 Automobilio stabilumo ir valdymo sąsaja	15
1.3 Automobilio stabilumo tyrimo būdai.....	16
1.4 Automobilio padangų savybės.....	17
1.5 Dviratis dviejų laisvės laipsnių tiesinis modelis	19
1.6 Transporto priemonės nusistovėjimo būvis važiuojant posūkyje	22
1.7 Mokslinių šaltinių apžvalga	25
2 Tyriamoji dalis.....	28
2.1 Automobilio stabilumo tyrimo atvejai	28
2.2 Transporto priemonė.....	28
2.3 Matavimo įranga	30
2.4 Jutikliai ir jų charakteristikos.....	31
2.1 Nusistovėjusio būvio važiuojant apskritimu nustatymo testas	33
2.5 Dvipusio judėjimo juostos keitimo testas	40
2.6 Trumpalaikės skersinės reakcijos stabilumo testas.....	44
2.7.1 Trumpalaikės skersinės reakcijos tyrimas važiuojant sausu asfaltu.....	46
2.7.2 Trumpalaikės skersinės reakcijos tyrimas važiuojant šlapiu asfaltu	50
2.7.3 Trumpalaikės skersinės reakcijos tyrimas važiuojant kelkraščiu	54
2.7.4 Trumpalaikės skersinės reakcijos tyrimas važiuojant žvyrkeliu	57
Išvados	62
Literatūros sąrašas	64

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Automobilio Seat Alhambra techniniai parametrai	28
2 lentelė. Automobilio Seat Alhambra svorio pasiskirstymas ašių atžvilgiu	30
3 lentelė. Indukcinio rato kampinio greičio jutiklio Bosch 0216210104 parametrai	31
4 lentelė. Jutiklio Bosch 0265005258 sudaryto iš giroskopo ir akselerometro parametrai	32
5 lentelė. Vairo pasukimo kampo jutiklio Bosch 0265005411 parametrai	32
6 lentelė. Nusistovėjusio būvio tyrimo važiuojant apskritimu nustatymo metodai.....	33
7 lentelė. Ribinės skersnio pagreičio vertės važiuojant šlapiu asfaltu.....	50
8 lentelė. Ribinės skersnio pagreičio vertės važiuojant kelkraščiu	54
9 lentelė. Ribinės skersnio pagreičio vertės važiuojant žvyrkeliu.....	58

Paveikslų sąrašas

1 pav. Automobilio akrovų pasiskirstymas	14
2 pav. Automobilio koordinačių sistema.....	15
3 pav. Vairuotojas – automobilis – aplinka sistema	16
4 pav. Automobilio padangos charakteristikų grafikas ir rato koordinačių sistema su veikiančiomis jėgomis ir momentais	18
5 pav. Kompleksinis šoninės ir stabdymo jėgų veikimas.....	19
6 pav. Dviratis automobilio modelis.....	20
7 pav. Dviračio modelio judėjimas posūkyje	22
8 pav. Pasukamumo kreivės	24
9 pav. Automobilis Seat Alhambra priekinės ašies svėrimo metu	29
10 pav. Diagnostinės įrangos Autocom CDP+ fiksuojami ABS/ESP sistemų valdymo bloko duomenys.....	30
11 pav. Indukcinio rato kampinio greičio matavimo jutiklio konstrukcija	31
12 pav. Automobilis Seat Alhambra ir jo ABS/ESP sistemų komponentų išsidėstymas.....	32
13 pav. Tyrimo atlikimo vietos vaizdas iš viršaus	34
14 pav. Vairo pasukimo kampo priklausomybė nuo skersinio pagreičio, kai automobilio svorio pasiskirstymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu yra 52/48.....	37
15 pav. Skersinio pagreičio kitimas laike važiuojant skirtingais greičiais, kai automobilio svorio pasiskirstymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu yra 52/48.....	37
16 pav. Vairo pasukimo kampo priklausomybė nuo skersinio pagreičio, kai automobilio svorio pasiskirstymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu yra 55/45.....	38
17 pav. Skersinio pagreičio kitimas laike važiuojant skirtingais greičiais, kai automobilio svorio pasiskirstymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu yra 55/45.....	38
18 pav. Vairo pasukimo kampo priklausomybė nuo skersinio pagreičio, kai automobilio svorio pasiskirstymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu yra 49/51	39
19 pav. Skersinio pagreičio kitimas laike važiuojant skirtingais greičiais, kai automobilio svorio pasiskirstymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu yra 49/51	39
20 pav. Dvipusio judėjimo juostos keitimo testo trajektorijos schema	40
21 pav. Dvipusio judėjimo juostos keitimo manevro trajektorija	41
22 pav. Skersinio pagreičio kitimas laiko atžvilgiu važiuojant skirtingais greičiais, kai transporto priemonės svorio pasiskirstymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu yra 55/45.....	43
23 pav. Skersinio pagreičio kitimas laiko atžvilgiu važiuojant skirtingais greičiais, kai transporto priemonės svorio pasiskirstymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu yra 52/48.....	42
24 pav. Skersinio pagreičio kitimas laiko atžvilgiu važiuojant skirtingais greičiais, kai transporto priemonės svorio pasiskirstymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu yra 49/51	44
25 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo kelias Panevėžys – Krekenava	46

26 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo kelias Trakiškis – Subačius	46
27 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant sausu asfaltu 60 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 55/45	48
28 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant sausu asfaltu 80 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 55/45	48
29 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant sausu asfaltu 60 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 52/48	47
30 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant sausu asfaltu 80 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 52/48	47
31 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant sausu asfaltu 60 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 49/51	49
32 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant sausu asfaltu 80 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 49/51	49
33 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant šlapiu asfaltu 60 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 55/45	52
34 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant šlapiu asfaltu 80 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 55/45	52
35 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant šlapiu asfaltu 60 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 52/48	51
36 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant šlapiu asfaltu 80 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 52/48	51
37 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant šlapiu asfaltu 60 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 49/51	53
38 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant šlapiu asfaltu 80 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 49/51	53
39 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant sauso asfalto – žvyro danga 60 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 55/45	56
40 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant sauso asfalto – žvyro danga 80 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 55/45	56

41 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant sauso asfalto – žvyro danga 60 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 52/48.....	55
42 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant sauso asfalto – žvyro danga 80 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 52/48.....	55
43 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant sauso asfalto – žvyro danga 60 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 49/51.....	57
44 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant sauso asfalto – žvyro danga 80 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 49/51.....	57
45 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant žvyro danga 60 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 55/45.....	59
46 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant žvyro danga 80 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 55/45.....	60
47 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant žvyro danga 60 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 52/48.....	58
48 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant žvyro danga 80 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 52/48.....	59
49 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant žvyro danga 60 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 49/51.....	60
50 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant žvyro danga 80 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 49/51.....	61

Įvadas

Automobilio judėjimas kelyje iš pirmo žvilgsnio gali pasirodyti labai paprastas vairuotojo veiksmų atkartojimas. Vairo pasukimas, akseleratoriaus ar stabdžių pedalo paspaudimas, pavarų perjungimas – pagrindiniai veiksmai, kuriuos vairuotojas turi atlikti, kad transporto priemonė galėtų judėti. Tačiau iš tikro visi įvardinti veiksmai sudaro dalį labai sudėtingos dinaminių procesų visumos. Automobilio judėjimą kelyje priklauso nuo kelio dangos, aplinkos, automobilio savybės ir vairuotojo veiksmų. Važiuojant veikia įvairios jėgos ir apkrovos, kurios tarpusavyje sąveikaudamos, įtakoja transporto priemonės valdymą ir stovumą kelyje. Būtent valdymas ir stovumas siejamas kartu su transporto priemonės stabilumu, kuris laikomas vienu svarbiausių aspektų automobilio judėjime. Stabilumas tiesiogiai įtakoja transporto priemonės saugumą važiuojant keliu, nes stabilumo praradimo atvejais dažniausiai įvyksta eismo įvykiai, kurių metu automobilis būna praradęs kontrolę ir sukibimą su kelio danga. Nagrinėjant stabilumą naudojamosi automobilio dinamine analize, kurioje įvertinamos automobilio, kelio, aplinkos savybės, išorinės apkrovos ir reakcijos, kurios priešinasi apkrovoms, bei kiti svarbūs veiksniai.

Darbo tikslas: eksperimentiškai ištirti automobilio svorio centro, važiavimo greičio ir kelio dangos įtaką transporto priemonės stabilumui atliekant įvairius manevrus.

Darbo uždaviniai:

1. Nustatyti ribines stabilumo vertes, kuriomis vadovaujantis bus įvertinamas stabilumas;
2. Surasti kokią įtaką stabilumui turi svorio centro padėties pakitimas;
3. Apžvelgti kelio dangos įtaką stabilumui;

Konferencijose skaityti pranešimai:

Pranešimas tema „Automobilio stabilumo tyrimas atliekant įvairius manevrus“ studentų mokslinėje konferencijoje „Technologijų ir verslo aktualijos – 2018“. Panevėžys: Kauno Technologijos Universitetas, 2018 m. gegužės 4 d.

1 Automobilio stabilumas ir dinamika

1.1 Automobilio stabilumo sąvoka ir pagrindiniai dinamikos apibrėžimai

Transporto priemonės stabilumu laikomas jos gebėjimas sugrįžti į pradinę judėjimo trajektoriją po tam tikro staigaus trajektorijos pakitimo. Nukrypimas nuo kurso gali įvykti dėl įvairiausių priežasčių: kliūties apvažiavimo, šoninio vėjo jėgos, užsiblokavusių ratų stabdant, ratų praslidimų ir pan. Stabilumas nagrinėjamas kaip viena iš pagrindinių transporto priemonės judėjimo ypatybių. Todėl analizuojant automobilio judėjimą remiamasi dinamikos pagrindais. W. Milliken [1] transporto priemonės dinamiką apibrėžia kaip „inžinerijos šaką, kuri remdamasi Niutono judesio dėsniais sujungia automobilį veikiančias jėgas su judėjimo metu atsirandančiais greičiais ir pagreičiais, bei tiriančią poveikį, kurį įtakoja transporto priemonės transmisijos, padangų, važiuoklės ir aerodinaminės charakteristikos“. Kadangi automobilis yra erdvinis kūnas sudarytas iš daugybės atskirų elementų jo dinaminių charakteristikų nagrinėjimas tampa labai sudėtingas. Todėl norint ištirti tam konkrečius dinامينius procesus galima bendrąją dinaminę sistemą suskirstyti į mažesnes ir konkretesnes. Remiantis S. Bogdevičiaus mokomąja knyga „Transporto priemonių dinamika“ [2] išsikiriami svarbiausi moksliniuose tyrimuose nagrinėjami transporto priemonės dinamikos atvejai:

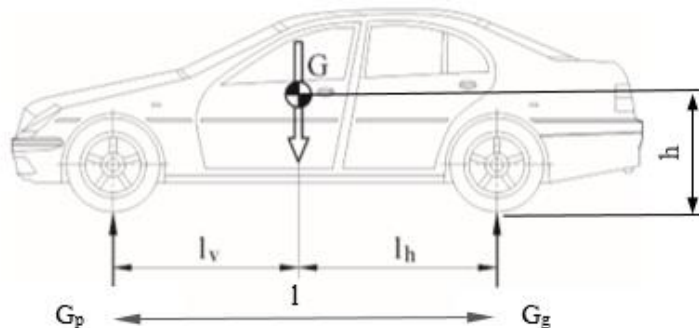
- Išilginė dinamika;
- Šoninė dinamika;
- Vertikali dinamika;
- Vertikalus svyravimas;
- Išilginis svyravimas;
- Ratų judėjimo dinamika.

Bandant suprasti automobilio dinamines savybes svarbu pažinti pagrindinius apibrėžimus ir sąvokas. Būtent sąvokos leidžia konkrečiai nieko bendro su transporto priemonės dinamika neturinčiam žmogui įgauti tam tikrų pagrindų, kuriais vadovaujantis galima žymiai lengviau suprasti dinaminės sistemos ypatybes. Vienas iš apibrėžimų – svorio centras. Svorio centru vadinamas erdvinis kūno taškas, kuriame sukongcentruotas visas kūno svoris. Kadangi automobilio konstrukcija yra sudaryta iš įvairių mazgų, kurių masės yra skirtingos ir jų išsidėstymas transporto priemonės simetrijos ašių atžvilgiu yra ganėtinai sudėtingas, svorio pasiskirstymas dažniais atvejais yra netolygus. Todėl nagrinėjant dinامينius procesus dažniausiai įvetinama ne tik automobilio masė, bet ir svorio centro padėtis. Kadangi kūno svorio centras yra erdvinis taškas jis turi horizontalią, skersinę ir vertikalią padėtis laisvai pasirinkto taško atžvilgiu. Taip pat per automobilio svorio centro tašką eina trys pagrindinės ašys – išilginė, skersinė ir vertikaloji.

Horizontalioji svorio centro padėtis automobilių dinamikoje apibrėžiama atstumu tarp priekinės ar galinės ašių ir svorio centro taško G (žr. 1 pav.) arba svorio pasiskirstymu priekinės ir galinės ašių atžvilgiu, kuris nurodomas svorio dalimi tenkančia vienai iš ašių procentais. Dažniausiai atliekant tyrimus horizontalioji svorio centro padėtis randama sveriant transporto priemonės ašis. Žinodami ašių apkrovas ir atstumą tarp ašių nesunkiai galima rasti horizontalią svorio centro padėtį ašių atžvilgiu, kuri apskaičiuojama pritaikius statinės pusiausvyros lygtis apie vieną iš ašių. Svorio centro padėtis priekinės ašies atžvilgiu:

$$l_p = \frac{G_g \cdot l}{G} \quad (1)$$

čia l_p – atstumas tarp priekinės automobilio ašies ir horizontalios svorio centro padėties; G_g – galinės automobilio ašies apkrova; G – automobilio svoris.



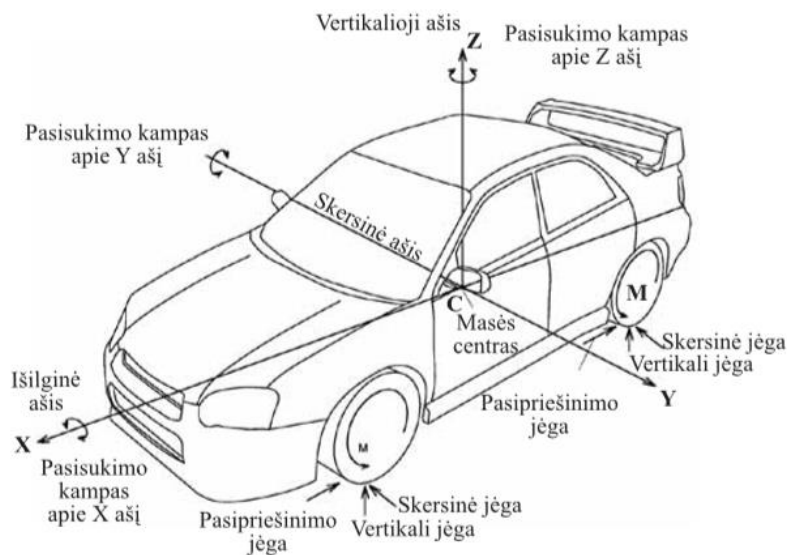
1 pav. Automobilio akrovų pasiskirstymas [3 p. 19]

Skersinė transporto priemonės svorio centro padėtis parodo sunkio jėgos pasiskirstymą tarp kairės ir dešinės pusių. Automobilų konstruktoriams tenka nemaža užduotis teisingai išdėstyti visus komponentus taip, kad svoris pasiskirstytų tolygiai kiekvienai pusei. Todėl atliekant dinaminę analizę laikoma, kad transporto svoris eksploatuoti paruoštame automobilyje kairės ir dešinės ratams yra vienoda, o tai reiškia kad skersinė svorio centro padėtis yra automobilio simetrijos linijos taškas.

Vertikaloji automobilio svorio centro padėtis dar yra vadinama svorio centro aukščiu, o nuo jo priklauso išilginės ašies, kuri literatūroje dar vadinama vartimo ašimi, padėtis kelio dangos atžvilgiu. Būtent nuo vartimo ašies aukščio priklauso transporto priemonės stabilumas vartimo atveju. Kuo šis aukštis didesnis, tuo tikimybė apvirsti posūkio metu yra didesnė. Vertikaloji svorio centro padėtis nustatoma pasvėrus vieną iš transporto priemonės ašių, kuri yra pakeliama į pasirinktą aukštį. Žinant transporto priemonės ratų bazės ilgį ir svorį, pasinaudojus statinės pusiausvyros formulėmis apskaičiuojama vertikali svorio centro padėtis.

Nagrinėjant automobilio judėjimą labai svarbi automobilio svorio centro padėtis erdvėje. Transporto priemonei važiuojant keliu kinta svorio centro koordinatės, kurios apibrėžiamos bendrąja koordinacinių sistema OXYZ (žr. 2 pav.), o ją reglamentuoja ISO 8855 standartas [2]. Remiantis standartu X ašis yra nukreipta į priekį išilgai transporto priemonės ir vadinama išilgine automobilio ašimi, Y ašis – skersinė – statmena X ašiai ir žiūrint iš jos viršūnės yra nukreipta į dešinę pusę, Z ašis – vertikaloji – nukreipta į viršų ir statmena OXY plokštumai. Įvertinant automobilio judėjimą teigiamais poslinkiais laikomi tie, kurių kryptys sutampa su X, Y, Z ašių kryptimis, o teigiamos posūkių kampų reikšmės – remiantis dešiniojo sraigto taisykle. Pasukimo kampai atitinkamai pagal ašis skirstomi į: vartimo kampą φ , veikiantį apie X ašį; išilginio supimo kampą θ – apie Y ašį; nukrypimo nuo kurso kampą ψ apie Z ašį. Posūkių kampai apie X, Y ir Z ašis atsiranda dėl automobilių veikiančių jėgų momentų. Automobilių veikiančios jėgos apie jo svorio centrą sukuria jėgų momentus, kurie tiesiogiai įtakoja judėjimą erdvėje. Jėgų momentai galintys veikti automobilių skirstomi į šiuos momentus:

- Virtimo – veikia išilginės ašies atžvilgiu;
- Išilginio supimo – veikia apie skersinę ašį;
- Nukrypimo nuo kurso – veikia vertikaliosios ašies atžvilgiu.



2 pav. Automobilio koordinatinių sistema [2 p. 19]

Svarbus aspektas nagrinėjant transporto priemonių dinamiką – jėgos. Automobilui stovint jis yra veikiamas sunkio jėgos, tačiau jam judant atsiranda daugybė kitų jėgų – pasipriešinimo (trinties) jėga tarp kelio dangos ir padangų, oro pasipriešinimo, šoninio vėjo, inercijos jėgos greitėjant ir stabdant, išcentrinė jėga atliekant posūkio manevrą bei kitos jėgos. Visos važiuojančią transporto priemonę veikiančios jėgos ir momentai gali būti išreikšiami nebūtinai jėgos dydžiais, bet greičiais ir pagreičiais. Apibendrinus šį skyrių galima teigti, kad norint nagrinėti automobilio stabilumą reikia įvertinti pagrindinius dinaminės sistemos elementus – kūno masę, svorio centro padėtį bei jo judėjimą erdvėje arba plokštumoje, veikiančias jėgas ir momentus, greičius ir pagreičius. Tik žinodami išvardintus kriterijus galima nuodugnai ištirti transporto priemonės judėjimą.

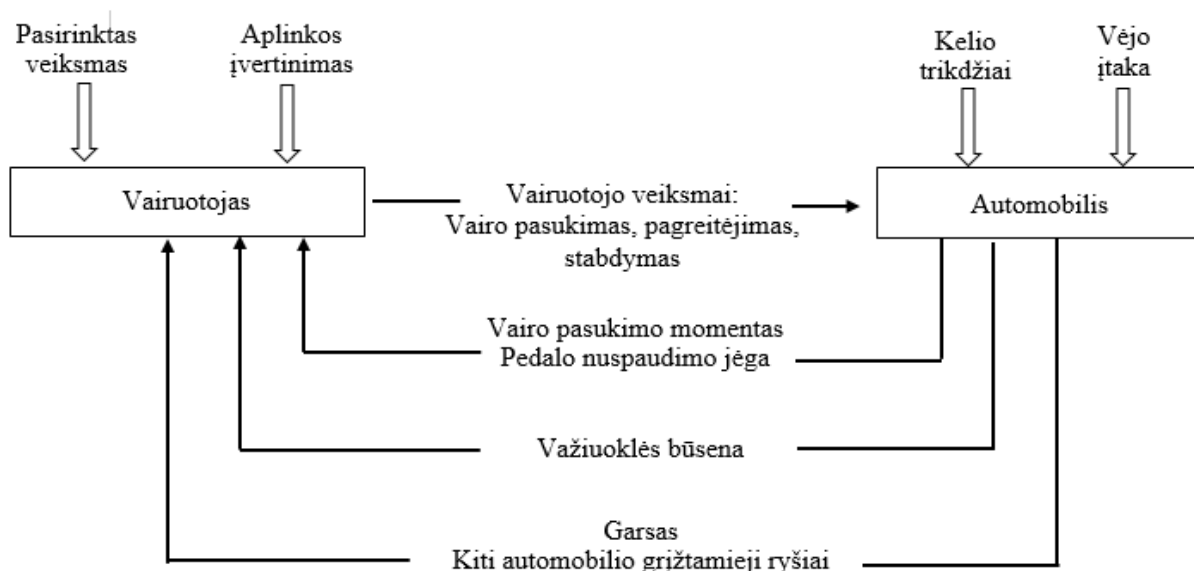
1.2 Automobilio stabilumo ir valdymo sąsaja

Automobilio stabilumas kaip jau buvo minėta susijęs su trajektorijos išlaikymu po atlikto manevro. Anot P.Chrtos [4] ir H.B. Pacejkos [5] teigimu transporto priemonės stabilumas ir valdomumas yra du vienas nuo kito sunkiai atsiejami reiškiniai. Stabilumas susijęs su automobilio – aplinkos sistemos atsaku į išorinius šios sistemos trikdžius. Valdomumas siejamas su galimybe valdyti transporto priemonę kelyje. Būtent stabilumas įtakoja valdomumo savybes, o valdymas – stabilumą. Šias sąvokas atskleidžiantis P.Chrtos savo moksliniame darbe taip pat išvelgia dvi automobilio valdymą įtakančias sistemas:

- Atviros grandinės (angl. *open loop*)
- Uždaros grandinės (angl. *closed loop*)

Atviros grandinės sistema dar vadinamas automobilio – aplinkos arba automobilio – kelio sistema. Šioje sistemoje automobilis yra veikiamas išorinių aplinkos veiksnių, kurių stebėseną leidžia įvertinti transporto priemonės stabilumą. Būtent šiuo atveju galima įvertinti pačios transporto priemonės ir aplinkos charakteristikas bei jų įtaką stabilumui, nustatyti stabilumo ribas.

Uždaros grandinės sistema nuo atvirosios skiriasi tuo, kad joje atsiranda dar vienas veiksnys – vairuotojas. Vairuotojas – automobilis – aplinka sistemoje pagrindinis dėmesys skiriamas ne tik stabilumui, bet ir automobilio valdymui kelyje. Taip pat ši sistema leidžia ištyti vairuotojo grįžtamąjį ryšį esant aplinkos veiksnių įtakai važiavimui. Vairuotojas jausdamas įvairius automobilio važiavimo būsenos pakitimus gali pats valdyti automobilio elgseną kelyje, pvz. automobiliui pradėjus slysti priklausomai nuo varančiosios ašies pasukti vairą slydimo arba priešinga kryptimi. Taip pat svarbu pabrėžti tai, kad vairuotojo veiksmai turi tiesioginę įtaką transporto priemonės elgsenai kelyje ir tuo pačiu stabilumui. Todėl uždarosios grandinės sistema dažnai naudojama konstruojant transporto priemones, nes vienas iš šios sistemos „valdiklių“ yra vairuotojas ir jis yra tos sistemos dalis (žr. 3 pav.), o jo įtaka automobilio valdymui yra labai svarbi. Atliekant eksperimentinius stabilumo tyrimus didelis dėmesys skiriamas ne tik gautiems duomenims, bet ir profesionalių vairuotojų išvalgomis ir komentarams, kurie padeda tiksliau įvertinti ir suprasti tyrimo metu užfiksuotus duomenis ir jų įtaką automobilio valdymo savybėms. Būtent ne tik stabilumas, bet ir valdomumas yra labai svarbios transporto priemonės savybės, nes kaip teigia P. Chrtos, kiekvienas vairuotojas yra individualus todėl transporto priemonė turi būti sukurta taip, kad ją galėtų valdyti bet kuris vairuotojas.



3 pav. Vairuotojas – automobilis – aplinka sistema [4 p. 12]

1.3 Automobilio stabilumo tyrimo būdai

Automobilio stabilumo tyrimas gali būti atliekamas eksperimentiniu ir analitiniu būdais. Tiek analitinių, tiek eksperimentinių tyrimų metu naudojami matematiniai modeliai, kuriais įvertinama transporto

priemonės dinamika ir tuo pačiu stabilumas. Matematiniai modeliai skirstomi į plokštuminius ir erdvinius. Plokštuminiai modeliai naudojami tiriant judėjimą plokštumoje, o erdviniuose – erdvėje. Todėl erdvinis tyrimas yra tikslesnis tačiau sudėtingesnis. Plokščio judėjimo metu nagrinėjamas tik tos plokštumos jėgų veikimas, todėl jėgos veikiančios kitose plokštumose nevertinamos pvz.: tiriant automobilio judėjimą horizontalioje plokštumoje nevertinami svyravimo ir virtimo jėgų momentai.

Taip pat matematiniai modeliai skirstomi pagal laisvės laipsnių skaičių. Kuo šis skaičius mažesnis tuo sistema yra paprastesnė, o jos sprendimas lengvesnis. Tačiau mažinant suvaržymų skaičių t.y. didinant laisvės laipsnius tyrimas tampa tikslesnis ir išsamesnis. Tokiu atveju sprendžiama lygčių sistema, aprašanti dinaminės sistemos elgesnį, tampa sudėtingesnė.

Dažniausiai nagrinėjant automobilio stabilumą naudojami 2 – 3 laisvės laipsnių plokštuminiai modeliai. Tokie modeliai yra nesudėtingi ir aiškūs. Jie padeda nustatyti pagrindines judėjimo lygtis ir svarbiausius parametrus. Dviejų laisvės laipsnių dviratis modelis apžvelgtas 1.5 skyriuje.

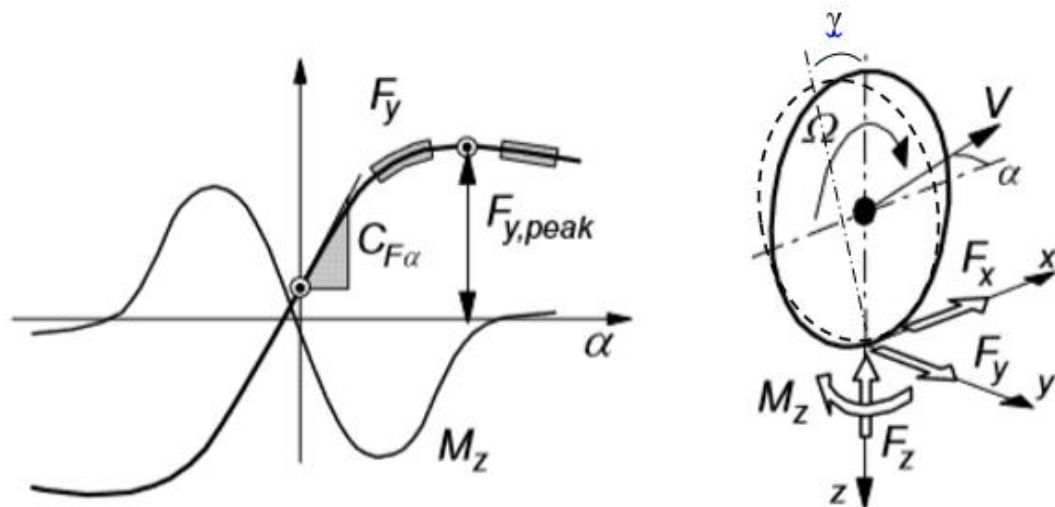
1.4 Automobilio padangų savybės

Transporto priemonės valdymas ir stabilumas priklauso nuo padangų savybių, kurių nagrinėjimui dažniausiai pasitelkiami grafikai (žr. 4 pav.). Automobilio ratas, kai kelio paviršius yra tiesus ir lygus, paveiktas jėgos, kurios pakanka nugalėti riedėjimo trintį, gali riedėti. Tuo pačiu metu dėl nevisiškai simetriškos padangos struktūros pradeda veikti šoninė jėga ir savaiminio tiesinimo momentas, kurie atsiranda todėl, kad besisukanti padanga deformuojama ir jos kontakto su keliu plote įvyksta sąlyginis slydimas. Remiantis Pacejka pakako keleto eksperimentinių tyrimų, kuriais įrodomas tiesioginis ryšys tarp slydimo kiekybinių elementų ir jėgų bei momentų. Automobilio rato išilgine kryptimi veikia išilginis slydimas. Kai laisvai besisukančiam ratui suteikiamas papildomas sukimo momentas, staigiai nuspaudus aksleratoriaus pedalą, išilginis slydimas padidėja ir jo pokytis randamas pagal formule (2)[5]:

$$\kappa = -\frac{V_x - r_e \Omega}{V_x} = -\frac{\Omega_0 - \Omega}{\Omega_0} \quad (2)$$

čia κ – išilginis slydimas; V_x – išilginis važiavimo greitis; r_e – efektyvusis riedančio rato sukimosi spindulys; Ω_0 – laisvai besisukančio rato kampinis greitis; Ω – padidintas kampinis rato kampinis greitis.

Išilginio slydimo ženklas priklauso nuo veikiačios jėgos. Jeigu automobilis didina greitį slydimas įgyja teigiamą reikšmę, o esant slidžiai dangai ši reikšmė dar labiau didėja. Stabdymo metu slydimo reikšmė tampa neigiama, o užsiblokavus automobilio ratams $\kappa = -1$.



4 pav. Automobilio padangos charakteristikų grafikas ir rato koordinatčių sistema su veikiančiomis jėgomis ir momentais [5]

Skersiniu slydimu laikoma sąveika tarp išilginių ir skersinių jėgų. Skersinio slydimo kampo tangens yra išilginio ir skersinio greičio santykis [5]:

$$\tan\alpha = -\frac{V_x}{V_y} \quad (3)$$

čia V_x – išilginis greitis; V_y – skersinis greitis.

Trečiasis slydimo komponentas, kurį įvardija Pacejka, yra rato pasisukimas apie kelio normalės ašį x (žr. 4 pav.). Nukrypimo nuo kurso kampinis greitis (angl. *Yaw Rate*), kai skersinis slydimo kampas lygus 0, ir rato plokštumos posvyrio kampas γ su kelio dangos ašimi x , sukuria sukimosi slydimą. Slydimo elementai yra sąlyginiai jėgų F_x , F_y ir tiesinimo momento M_z kintamieji, kurie kartu su rato svorio apkrova bendruoju atveju gali būti aprašyti funkcijomis [5]:

$$F_x = F_x(\kappa, \alpha, \gamma, F_z) \quad (4)$$

$$F_y = F_y(\kappa, \alpha, \gamma, F_z) \quad (5)$$

$$M_z = M_z(\kappa, \alpha, \gamma, F_z) \quad (6)$$

Grynojo slydimo atvejis laikomas tuomet, kai išilginis arba skersinis slydimas vyksta atskirai. Grynojo slydimo atvejai, kai $\kappa=0$ ir $\alpha=0$, palyginami su kompleksiniu slydimo atvejais 5 paveiksle, kai slydimas veikia abiejomis kryptimis. Kaip matyti iš paveikslo staigus jėgos sumažėjimas pradeda didėti ir kreivė tampa tolygesnė, kai atsiranda kitos krypties slydimas. Žiūrint į jėgų kitimo grafikus (žr. 5 pav.) matomas jėgos sumažėjimas paaiškinamas tuo, kad horizontalioji trinties jėga negali viršyti maksimalios vertės, kuri priklauso nuo trinties koeficiento ir svorio apkrovos. Slydimo kreivės kilimo kampas (žr. 4 pav.), kuris yra tarp slydimo kampo ir skersinės jėgos kreivės, parodo padangos slydimo standumą. Išilginis padangos standumas žymimas $C_{F\kappa}$, o skersinis – $C_{F\alpha}$. Skersinis padangos standumas svarbiausias padangos parametras, kuris įtakoja automobilio valdymą ir stabilumą. Tiesinimo momento veikimui

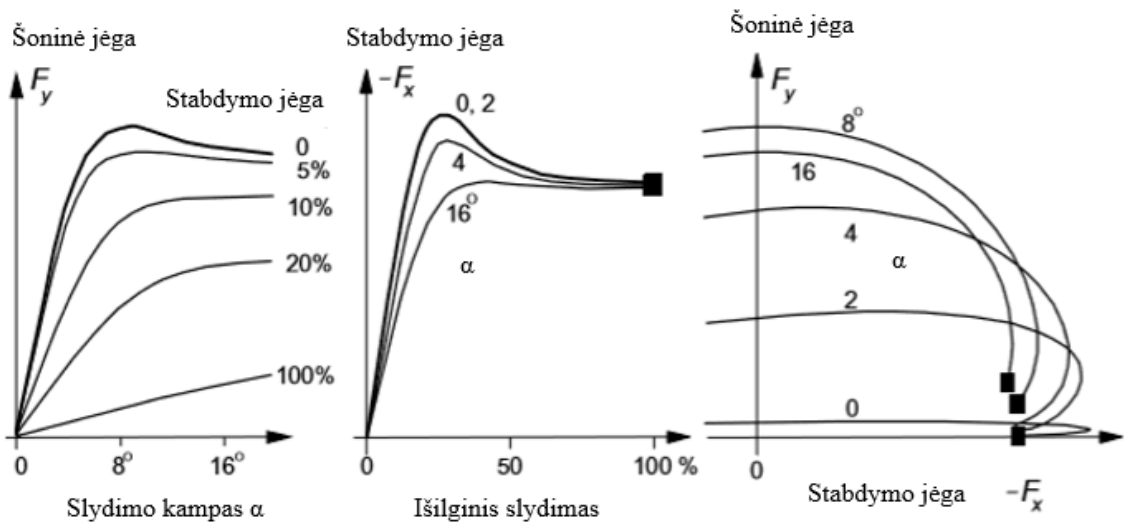
priešinasi padangos tiesinimo momento standumas $C_{M\alpha}$. Tiesinės padangų veikiančių jėgų ir standumo išraiškos, kuriose taip pat įvertinamas rato posvyrio kampas γ [5]:

$$F_x = C_{F\kappa} \cdot \kappa \quad (7)$$

$$F_y = C_{F\alpha} \cdot \alpha + C_{F\gamma} \cdot \gamma \quad (8)$$

$$M_z = -C_{M\alpha} \cdot \alpha + C_{M\gamma} \cdot \gamma \quad (9)$$

čia F_x , F_y – išilginė, skersinė apkrovos; $C_{F\kappa}$ – išilginis padangos standumas; κ – išilginis slydimas; $C_{F\alpha}$ – skersinis padangos standumas; α – skersinis padangos slydimas; $C_{F\gamma}$ – posvyrio standumas; γ – rato plokštumos su kelio paviršiumi posvyrio kampas; M_z – rato tiesinimo momentas; $C_{M\alpha}$ – tiesinimo momento standumas; $C_{M\gamma}$ – sukimosi slydimo standumas.



5 pav. Kompleksinis šoninės ir stabdymo jėgų veikimas: kairėje išilginio – slydimo atvejis; viduryje – išilginio slydimo atvejis; dešinėje – stabdymo ir skersinės jėgos pasiskirtymas nuo skersinio slydimo kampo [5]

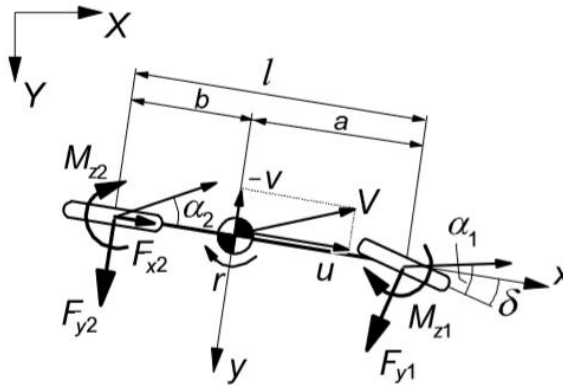
1.5 Dviratis dviejų laisvės laipsnių tiesinis modelis

Daugelis ši modelį vadina dviračiu (angl. *bicycle*) arba vienos vėžės (angl. *single track*) modeliu, nes vietoje keturių automobilio ratų yra naudojami du (žr. 6 pav.). Dviejų laisvės laipsnių modelis dažniausiai pasirenkamas dėl savo paprastumo. Tokio modelio pakanka išnagrinėti esminius dinامينius parametrus automobilio judėjimo metu. Jis naudojamas tiriant transporto priemonės plokštuminį judėjimą todėl taikant šį modelį nevertinamas automobilio virtimas ir svyravimas bei jų įtaka automobilio svorio persiskirstymui. Taip pat laikoma, kad važiavimo greitis V yra pastovus ir lygus išilginiam greičiui u . Todėl visos jėgos ir reakcijos veikiančios kiekvieną ašies ratą taikant šį modelį įvertinamos kaip abiejų ratų suminė jėga. Bendra priekinės ašies skersinė jėga – F_{y1} , galinės – F_{y2} . Tos pačios sąlygos galioja su slydimo kampais, kurie atitinkamai yra α_1 – priekinės ašies slydimo kampas, α_2 – galinės ašies slydimo kampas. Modelis nagrinėjamas pasinaudojus judėjimo lygtimis [5]:

$$m(\dot{v}+ur)=F_{y1}+F_{y2} \quad (10)$$

$$I\dot{r}=aF_{y1}-bF_{y2} \quad (11)$$

čia m – automobilio masė; v – skersinis greitis; u – išilginis greitis; r – kampinis greitis; F_{y1} – automobilio priekinės ašies skersinės apkrovos; F_{y2} – automobilio galinės ašies skersinės apkrovos; I – inercijos momentas (I_z) apie z ašį; a – atstumas tarp priekinės automobilio ašies ir svorio centro; b – atstumas tarp galinės automobilio ašies ir svorio centro.



6 pav. Dviratis automobilio modelis [5 p. 16]

Skersinės jėgos laikomos skersinių jėgų funkcijos priklausančios nuo slydimo kampų [5]:

$$F_{y1}=F_{y1}(\alpha_1) \quad (12)$$

$$F_{y2}=F_{y2}(\alpha_2) \quad (13)$$

čia α_1 – priekinės ašies slydimo kampas; α_2 – galinės ašies slydimo kampas.

Atkreipus dėmesį į 6 paveiksle pateiktą dviratį modelį priekinės ir galinės ašies ratų slydimo kampai apskaičiuojami [5]:

$$\alpha_1=\delta-\frac{l}{u}(v+ar) \quad (14)$$

$$\alpha_2=-\frac{l}{u}(v-br) \quad (15)$$

čia δ – ratų posūkio kampas; u – išilginis greitis; v – skersinis greitis; a – atstumas tarp priekinės ašies ir svorio centro; b – atstumas tarp galinės ašies ir svorio centro; r – kampinis greitis.

Kai nagrinėjamas tiesiaeigis judėjimas ir nukrypimas nuo kurso yra toks mažas ir judėjimas nėra trikdomas, galima taikyti tiesines kampinio standumo charakteristikas. Tokiu atveju tarp skersinių jėgų ir sumažėjusių slidimo kampų taikomas tiesinis ryšys [5]:

$$F_{yi} = C_i \alpha_i \quad (16)$$

čia F_{yi} – skersinė jėga; C_i – kampinis standumas; α_i – slydimo kampas.

Pasinaudojus priekinės (14) ir galinės ašies (15) slydimo kampų lygtimis, skersinių ašių jėgų iš slidimo kampų tiesines nepriklausomybes ir jas įstačius į (10) ir (11) fomules gaunamos pirmos eilės diferencialinės lygtys [5]:

$$mv + \frac{1}{u}(C_1 + C_2)v + \left(mu + \frac{1}{u}(aC_1 - bC_2) \right) r = C_1 \delta \quad (2)$$

$$Ir + \frac{1}{u}(a^2 C_1 + b^2 C_2)r + \frac{1}{u}(aC_1 - bC_2)v = aC_1 \delta \quad (18)$$

Iš (17) lygties išreiškus skersinį greitį v ir jį panaudojus (18) lygtyje gaunama antros eilės diferencialinė lygtis (19), kurią galima panaudoti kampinio greičio r skaičiavimams [5]:

$$Im\ddot{r} + \{I(C_1 + C_2) + m(a^2 C_1 + b^2 C_2)\}r + \frac{1}{u}\{C_1 C_2 l^2 - mu^2(aC_1 - bC_2)\}\dot{r} = muaC_1 \delta + C_1 C_2 l \dot{\delta} \quad (19)$$

Gautos lygtys gali būti supaprastintos pasinaudojus priklausomybėmis [5]:

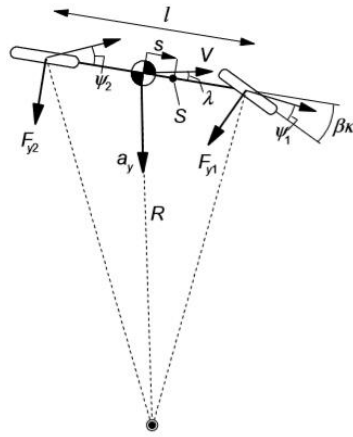
$$C = C_1 + C_2 \quad (20)$$

$$Cs = C_1 a - C_2 b \quad (21)$$

$$Cq^2 = C_1 a^2 + C_2 b^2 \quad (22)$$

$$mk^2 = I \quad (23)$$

čia C – transporto priemonės bendras kampinis standumas; s – atstumas nuo svorio centro iki neutralaus vairavimo (angl. *Neutral Steer*) taško S (žr. 7 pav.); q – vidutinio sukimo momento peties ilgis; k – pasisukimo apie z ašį kampas.



7 pav. Dviračio modelio judėjimas posūkyje [5 p. 27]

Pasinaudojus (20), (21), (22) ir (23) išraiškomis galima supaprastinti (17), (18) ir (19) lygtis [5]:

$$m(\dot{v}+ur)+\frac{C}{u}v+\frac{Cs}{u}r=C_1\delta \quad (24)$$

$$mk^2r+\frac{Cq^2}{u}r+\frac{Cs}{u}v=C_1a\delta \quad (25)$$

$$m^2k^2u^2\ddot{r}+mC(q^2+k^2)u\dot{r}+(C_1C_2l^2-mu^2Cs)r=mu^2aC_1\delta+u\dot{C}_1C_2l\delta \quad (26)$$

Neutralaus vairavimo tašku laikomas transporto priemonės išilginės ašies taškas S, kuriame pridėjus išorines veikiančias jėgas nepakinta nukrypimo nuo kurso kampas. Jeigu apkrova veikia priekinėje automobilio dalyje šio taško atžvilgiu nukrypimas nuo kurso vyks jėgos veikimo kryptimi, o jeigu jėgos veikia už šio taško, nukrypimo ir jėgos kryptys bus priešingos.

1.6 Transporto priemonės nusistovėjimo būvis važiuojant posūkyje

Transporto priemonės stabilumas manevro metu nagrinėjamas nusistovėjusiam būvyje (angl. *steady state behaviour*), kai išorinių apkrovų veikimas nebetrikdo automobilio judėjimo ir jis gali išlaikyti pastovią judėjimo trajektoriją. Automobiliui važiuojant kreiva trajektorija, kurios spindulys R, išlaikant pastovų važiavimo greitį V ir posūkio kampą δ galioja ryšys [5]:

$$\frac{l}{R}=\frac{r}{V}\approx\frac{r}{u} \quad (27)$$

čia R – trajektorijos spindulys; r – kampinis greitis; V – automobilio greitis; u – išilginis greitis.

Pasinaudojus (18) formule ir išilginį greitį u pakeitus greičiu V gaunama nauja judėjimo trajektorijos ryšį nusakančios (19) lygties išraiška [5]:

$$\frac{l}{R}=\frac{C_1C_2l}{C_1C_2l^2-mV^2(aC_1-bC_2)}\delta \quad (28)$$

Automobilio posūkio kampas, kuris reikalingas važiavimo posūkio trajektorija metu, gali būti išreiškiamas pasinaudojus (28) formulės išraiška. Todėl gaunama tokia posūkio kampo lygtis [5]:

$$\delta = \frac{l}{R} \left(l - mV^2 \frac{aC_1 - bC_2}{C_1 C_2 l} \right) = \frac{l}{R} - \frac{mV^2}{R} \frac{aC_1 - bC_2}{C_1 C_2 l} \quad (29)$$

Remiantis Pacejka posūkio kampo lygtį galima pertvarkyti į žymiai paprastesnę pasinaudojus pasukamumo gradientu, kuris išreiškiamas (30) formule [5].

$$\eta = -\frac{mg aC_1 - bC_2}{l C_1 C_2} = -\frac{s mg C}{l C_1 C_2} \quad (30)$$

Automobiliui važiuojant posūkiu jis yra veikiamas išcentrinio pagreičio, kuris nagrinėjant nusistovėjusį būvį laikomas lygus skersiniai pagreičiui. Išcentrinio pagreičio formulė [5]:

$$a_y = Vr = \frac{V^2}{R} \quad (31)$$

Todėl pasinaudojus pasukamumo gradiento (30) ir skersinio pagreičio (31) išraiškomis ir jas įstačius į vairo pasukimo kampo formulę (29) gaunama išraiška [5]:

$$\delta = \frac{l}{R} + \eta \frac{a_y}{g} \quad (32)$$

Kaip matyti iš (32) formulės pasukimo kampas priklauso nuo transporto priemonės ratų bazės ilgio, išcentrinio pagreičio ir pasukamumo gradiento. Posūkio kampo priklausomybę galima išskirti į dvi dalis geometrinę ir dinaminę. Geometrinė dalis priklauso nuo automobilio tarpašinio atstumo ir trajektorijos spindulio, todėl važiuojant konkrečia trajektorija ši dalis negali kisti. Ratų bazės ilgio ir trajektorijos spindulio santykis dar vadinama Ackermano kampu. Antroji posūkio kampo dalį galima laikyti dinamine. Ji priklauso nuo skersinio arba kitaip tariant įcentrinio pagreičio, kuris priklauso nuo važiavimo greičio kvadrato. Taip pat svarbus posūkio kampo lygties narys – pasukamumo gradientas. Būtent jis atspindi dinamines savybes. Priklausomai nuo gradiento reikšmės važiuojant posūkiu galimi trys pasukamumo variantai:

- Neutralus;
- Nepakankamas;
- Perteklinis.

Neutralaus pasukamumo atveju pasukamumo gradiento reikšmė lygi 0. Tokiu atveju automobilio priekinės ir galinės ašies ratai manevro metu išlaiko balansą. Be to neutralaus pasukamumo metu slydimo kampai taip pat lygūs 0. Reikalingas posūkio kampas neutralaus pasukamumo atveju lygus Ackermano kampui.

Nepakankamo pasukamumo atveju pasukamumo gradiento reikšmė yra teigiama. Todėl važiuojant to paties spindulio trajektorija didinant važiavimo greitį būtinas didesnis posūkio kampas, priešingu atveju transporto priemonė pradeda važiuoti didesnio spindulio trajektorija.

Perteklinio pasukamumo atvejis yra priešingas nepakankamam todėl gradiento reikšmė yra neigiama. Kadangi gradientas yra neigiamas trajektorijos įveikimui reikalingas mažesnis posūkio kampas. Perteklinio pasukamumo atvejis lyginant su nepakankamu yra pavojingesnis.

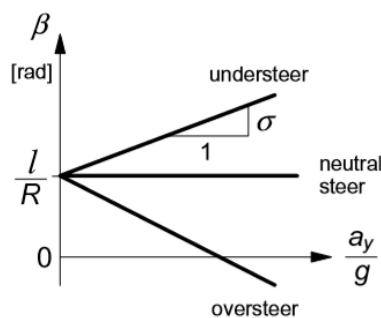
Svarbu paminėti, kad pasukamumo gradientas parodo tiesioginį ryšį tarp priekinės ir galinės ašių ratų slydimo kampų [5]:

$$\alpha_1 - \alpha_2 = \eta \frac{a_y}{g} \quad (33)$$

Kaip matyti tarp slydimo kampų skirtumo ir pasukamumo gradiento galioja tiesinis ryšys. Taigi nagrinėjant transporto priemonės judėjimą posūkyje galima įvertinti jos priekinės ir galinių ašių elgseną manevro metu. Taip pat įvertinant automobilio pasukamumą naudojamos pasukamumo arba valdymo (angl. *Handling*) kreivėmis, kurių pavyzdys pateikiamas 8 pav. Automobilio priekinės ašies ratų slydimo kampas nepasukamumo atveju yra didesnis nei galinės ašies. Perteklinio pasukamumo atveju galinės ašies ratų slydimo kampas yra didesnis nei priekinės ašies. Perteklinio pasukamumo atvejis laikomas pavojingesniu, nes kaip teigia Pacejka automobilis tokiu atveju tampa nestabilus. Nepakankamo pasukamumo metu automobilis yra stabilus tol, kol išlaikomas sukibimas tarp kelio dangos ir padangų, o tai įvyksta, kai automobilio ratų posūkio kampas yra virš nepasukamumo kreivės. Nagrinėjant transporto priemonės pasukamumo gradientą šis gali būti randamas iš kritinio ir charakteringo greičio išraiškų [5]:

$$v_{crit} = \sqrt{\frac{gl}{-\eta}}, \text{ kai } \eta < 0 \quad (34)$$

$$v_{char} = \sqrt{\frac{gl}{\eta}}, \text{ kai } \eta > 0 \quad (35)$$



8 pav. Pasukamumo kreivės

8 paveiksle pateikiami visi trys galimi pasukamumo atvejai: neutralus (angl. *Neutral*); nepakankamas (angl. *Understeer*); perteklinis (angl. *Oversteer*). Grafiko abscisių ašis atitinka skersinio (įcentrinio) pagreičio su laisvojo kritimo pagreičiu g santykį, o ordinačių ašis – posūkio kampą.

1.7 Mokslinių šaltinių apžvalga

Švedijos mokslininkai Stravos Angelis ir kt. 2014 metais savo darbe „Optimal Steering for Double Lane Change Entry Speed Maximization“ [6] pateikia metodiką, kuri leidžia atlikti dvipusio judėjimo juostos keitimo tyrimo modeliavimą didesniu transporto priemonės greičiu. Straipsnyje pagrindinis dėmesys skiriamas automobilio vairo pasukimo veiksmui, kuris tiesiogiai įtakoja transporto priemonės valdymą. Vairo pasukimo kampų optimizavimas „briedžio testo“ metu leidžia atlikti sklandų dvipusio judėjimo juostos keitimo manevrą. Būtent tinkamas važiavimo trajektorijos pasirinkimas leidžia padidinti važiavimo greitį, kurio metu automobilis išlieka stabilus. Mokslinio staipsnio autoriai įvertinę testo kelio skersines ribas išreiškė matematinėmis lygtimis, kuriose įvertinamas trajektorijos kreivės tolydumas. Pasinaudoję Pacejkos „magiškąją“ padangų formulę ir 7 laisvės laipsnių dinaminio automobilio modeliu sukūrė dvipusio judėjimo juostos keitimo manevro, 2011 metų laidos priekiniais ratais varomo automobilio Volvo S60, optimalų valdymo metodą. Tyrimas atliktas modeliuojant Matlab paketu TOMLAB/PROPT ir atliekant eksperimentą pasinaudojus vairavimo robotą SR60. Modeliavimo metu atliekant „briedžio testą“ ir pritaikius vairavimo optimizavimo metodą didžiausias pasiektas važiavimo greitis su dinaminio stabilumo sistema – 71,99 km/h, be jos 70,8 km/h. Eksperimento metu didžiausias pasiektas važiavimo greitis su dinaminio stabilumo sistema 74,34 km/h, be sistemos – 65,88 km/h. Autoriai pabrėžia, kad važiavimas tinkama trajektorija, kuri priklauso nuo vairo pasukimo, tiesiogiai įtakoja automobilio stabilumą.

Vilniaus Gedimino technikos studentė Eglė Dūdėnaitė moksliniame darbe „Mažų (B1 klasės) automobilių skersinio dinaminio stabilumo analizė“ [7] nagrinėja 4 skirtingų gamintojų automobilių: VW Polo; Seat Ibiza; Ford Fiesta; Kia Rio – stabilumą atliekant dvipusio judėjimo juostos keitimo manevrą. Tyrimas atliekamas ant sauso asfalto dangos, važiavimo greičiai – 50, 60 ir 70 km/h. Eksperimento metu naudojamas triašis askelerometras, triašis giroskopas, greičio matavimo jutiklis Correvit S-350 ir du lazeriniai aukščio pokyčio matavimo jutikliai HF-500 C, kurių duomenys fiksuojami Corrsys – Datron duomenų surinkimo įrenginiu DAS – 3. Autorė automobilio stabilumą vertina slydimo kampu, kuris yra tarp transporto priemonę veikiančio išilginio ir skersinio pagreičio. Tyrimo metu nustatyta, kad visi automobiliai važiuodami 70 km/h greičiu nebegali atlikti testo, nes kliūdomos kelio ribas žyminčios gairės. Prasčiausiai tyrimo metu pasirodė Ford Fiesta automobilis, kuris buvo su žieminėmis padangomis. Todėl autorė pabrėžia, kad automobilio stabilumas tiesiogiai priklauso nuo skersinio pagreičio, kėbulo pasvirimo kampo ir intensyvumo apie išilginę ašį bei sukimosi intensyvumo apie vertikaliąją ašį bei transporto priemonės padangų savybių.

D. A. Panke ir N. A. Ambrohe straipsnyje „Experimental Testing of Transient and Steady State Handling Characteristics of Passenger Vehicle“ [8] aprašo atliktą nusistovėjusio būvio ir trumpalaikės skersinės reakcijos testus. Tyrimo metu naudotas visais ratais varomas automobilis, kuris atliko ISO 4138 standarto: pastovaus važiavimo spindulio ir pastovaus greičio testus, ir ISO 7401 standarto tolygaus vairo pasukimo testą. Pastovaus spindulio testas atliktas automobiliui važiuojant 30 m spindulio apskritimu 10 km/h, 15 km/h, 20 km/h, 25 km/h ir 30 km/h greičiais. Pastovaus greičio testo metu važiavimo greitis 25 km/h, o trajektorijos spinduliai - 120 m, 100 m, 80 m, 60 m ir 30 m. Įvardintų testų metu nagrinėjamos skersinio pagreičio kitimas atitinkamai nuo važiavimo greičio ir trajektorijos spindulio. Autoriai pastebi, vairo pasukimo tiesinę priklausomybę nuo skersinio pagreičio tol, kol pasiekus 0,25 G pagreičio ribą

atliekant pastovaus spindulio testą vairo pasukimo kampas staigiai sumažėja ir po to vėl pradeda didėti didėjant skersiniam pagreičiui. Atlikus pastovaus važiavimo testą transporto priemonės pasukamumas yra nepakankamas, o kai skersinis pagreitis yra iki $0,25G$ vairo posūkio kampo ir skersnio pagreičio ryšys yra tiesinis, tačiau kai vairo posūkio kampas yra didinamas ir peržengiama $0,25G$ riba, skersinis pagreitis pradeda didėti neproporcingai palyginus su posūkio kampu. Tolygaus vairo pasukimo testo metu tiriamas automobilio laikas per kurį skersinio pagreičio veikimas nuslopsta ir pasiekiamas nusistovėjęs būvis. Autoriai pabrėžia, kad automobilio nusistovėjimo būvis pasiekiamas per 2 – 6 sekundžių laiko tarpą priklausomai nuo važiavimo greičio.

Kristinos Kemzūraitės, Šarūno Mikaliūno ir kt. straipsnyje „Automobilio judėjimo posūkyje tyrimas žiemos sąlygomis“ [9] pateikiamas transporto priemonės eksperimentinis tyrimas važiuojant dviem dangomis – sniego danga ir sniego danga su provėžomis. Tyrimas atliekamas lengvuju automobilio Vw Golf, kuris važiuoja 120 metrų spindulio posūkiu, keisdamas važiavimo greitį nuo 30 iki 90 km/h, o greičio keitimo žingsnis – 10 km/h. Atliekant posūkio manevrą matavimo prietaisu XL Meter Pro Gamma fiksuojamas skersinio pagreičio kitimas. Straipsnyje teigiama, kad važiuojant sniego danga su asfalto provėžomis skersinio pagreičio kitimas kinta $1,1 – 3,4 \text{ m/s}^2$ ribose, o važiuojant sniego danga 70 km/h greičiu automobilis patiria kontroliuojamą slydimą – užfiksuotas $3,1 \text{ m/s}^2$ skersinis pagreitis. Palyginę pagrečių reikšmes 70 km/h greičiais važiuojant skirtingą sukibimo koeficientą turinčiomis dangomis autoriai įžvelgia, kad skersinio pagreičio dydžiai skiriasi beveik 2 kartus t.y. važiuojant sniego danga tyrimo metu užfiksuotas pagreitis yra didesnis nei važiuojant sniego danga su asfalto provėžomis.

Švedijos Chalmers universiteto studentas Anderson Karlsson savo darbe „Test Procedures and Evaluation Tools for Passenger Vehicle Dynamics“ [10] nagrinėja ISO standartais reglamentuojamus stabilumo testus. Autorius darbe pateikia standartų atlikimo metodiką. Taip pat automobiliais Volvo XC90 ir Saab 93 buvo atliekami nusistovėjusi būvio ISO 4138 pastovaus važiavimo greičio testas, dvipusio judėjimo juostos keitimo testas ISO 3388 ir trumpalaikės skersinės reakcijos tyrimas, kurio metu naudotas besitęsiantis sinusoidinis vairo sukiojimo metodas. Testų metu užfiksuoti duomenys panaudoti kompiuterinio modeliavimo metu. Autorius pasinaudojo aktyviųjų ir pasyviųjų sistemų balanso BAPS (angl. *balanced active and pasive systems*) modeliu, ir sukūrė matematinį įrankį. Sukurtas matematinis modelis liudžia nagrinėti transporto priemonės dinamiką, o pats modelis kaip teigia autorius atkartoja realius tyrimo rezultatus.

Jorge Gomez Fernandez darbe „Vehicle Dynamics Model for Driving Simulators“ [11] kurdamas dinaminį transporto priemonės modelį, kurį panaudojo vairavimo simulatoriaus algoritmo kurimui, panaudoja automobilio Saab 93 stabilumo testų tyrimo duomenis. Tyrimo metu duomenys buvo fiksuojami naudojant automobilio CAN sąsają prisijungus prie aktyviosios stabilumo sistemos. Autorius atliko tris stabilumo testus – nusistovėjusio būvio tyrimo važiuojant pastovaus spindulio apskritimu testą ISO 4138, skersinės reakcijos sinusoidinio metodo testą ISO 7401 ir dvipusio judėjimo juostos keitimo testą. Tyrimo metu buvo fiksuojami išilginis ir skersinis pagreitis, kampinis greitis, vairo posūkio kampas, skersinis greitis, virtimo ir svyravimo kampai. Užfiksuoti duomenys panaudoti važiavimo simulatoriaus valdymo algoritmo kūrimui.

Chen Jie ir kt. straipsnyje „A Novel Pre – Control Method of Vehicle Dynamics Stability Based on Critical Stable Velocity during Transient Steering Maneuvering“ [12] naudodami 7 laisvės laipsnių matematinį modelį atlikdami dvipusio judėjimo juostos keitimo testo kompiuterinį modeliavimą nagrinėja dinaminės nukrypimo nuo kurso *DYC* (angl. *dynamic yaw control*) valdymo algoritmus. Autoriai automobilio stabilumą sieja su kritiniu važiavimo greičiu. Taip pat išvelgia tiesioginę automobilio važiavimo greičio įtaką skersiniam pagreičiui ir automobilio stabilumui atleikant dvipusio judėjimo juostos keitimo manevrą. Tyrimo metu nustatyta, kad greičio sumažinimas 5 km/h (t.y. nuo 60 km/h iki 55 km/h), esant dideliame kelio trinties koeficientui ($\mu=0,8$) leidžia padidinti nagrinėtos transporto priemonės vairo pasukimo kampą 100° , išlaikant stabilumo ribas.

2 Tyrimoji dalis

2.1 Automobilio stabilumo tyrimo atvejai

Transporto priemonės stabilumo tyrimas atliekamas remiantis tarptautinės standartų organizacijos ISO stabilumo tyrimo testų metodika. Stabilumo nagrinėjimas atliekamas eksperimentiškai pasinaudojus 3 testais:

- ISO 4138 – nusistovėjusio būvio važiuojant apskritimu nustatymo testas [13];
- ISO 3388 – dvipusio judėjimo juostos keitimo testas („briedžio testas“) [14];
- ISO 7401 – trumpalaikės skersinės reakcijos tyrimas [15].

Įvardinti testai skirstomi į atvirios grandinės (angl. open loop) – ISO 4138 ir uždaros grandinės (angl. closed loop) – ISO 7401 ir ISO 3388 – sistemas. Tyrimo testų metu naudotas automobilis Seat Alhambra, kurio parametrai ir apkrovų atvejai pateikiami 2.2 skyriuje. Eksperimentų metu duomenys fiksuojami naudojantis Autocom CDP+ diagnostine įranga, kuri leidžia prisijungti prie transporto priemonės ABS/ESP sistemų bloko ir naudotis jutiklių matuojamus parametrų vertėmis. Diagnostinės įrangos ir jutiklių apžvalgos pateikiamos 2.3 ir 2.4 skyriuose.

2.2 Transporto priemonė

Tyrimai buvo atliekami važiuojant lengvuju automobiliu Seat Alhambra (žr. 9 pav.), kurio važiuoklė prieš atliekant tyrimus buvo nuodugnai patikrinta. Įsitikinus, jog pakabos elementai neturi akivaizdžių pažeidimų ir gedimų, papildomai atliktas ratų geometrijos suvedimas. Transporto priemonė testų metu buvo su naujomis šiltiesiems metų sezonams pritaikytomis padangomis. Automobilio techniniai parametrai pateikti 1 lentelėje.

1 lentelė. Automobilio Seat Alhambra techniniai parametrai [16]

Parametras	Reikšmė
Markė, modelis	Seat Alhambra
Gamybos metai	2003
Automobilio masė, kg	1790
Priekinės ašies masė, kg	1040
Priekinės, galinės ašies svorio pasiskirstymas svorio centro atžvilgiu	52:48
Ratų bazės ilgis, mm	2841
Automobilio ilgis, mm	4643
Priekinės / galinės ašies plotis, mm	1530/1524
Automobilio plotis, mm	1810
Vairo pavaros perdavimo santykis	16,0:1

Prieš atliekant eksperimentus nuspręsta, kad tyrimo metu bus nagrinėjama transporto priemonės svorio centro padėties įtaka stabilumui. Remiantis ISO 19634:2016 standarte pateiktomis transporto priemonės

ir jos ašų apkrovų rekomendacijomis pasirinkta, kad automobilio svorio centro padėtis bus įvertinama 3 apkrovos atvejais:

1. Transporto priemonės su vairuotoju ir keleiviais.
2. Transporto priemonė su vairuotoju.
3. Transporto priemonė su vairuotoju ir kroviniu.

Pirmuoju atveju tuščio automobilio svoris yra prilyginamas eksploatuoti paruoštos transporto priemonės masei su pilnu kuro baku, gamintojo numatytu įrankių komplektu ir vairuotoju, kurio masė 75 kg. Antruoju atveju įvertinama automobilio masė su vairuotoju ir keleiviais. Pasirinkta, kad tyrimo metu imituojant keleivius buvo naudojama smėliu pripildyti maišai, kurių kiekvieno masė 70 kg. Atsižvelgus į tai, kad žmogaus svorio centro padėtis yra ties juosmeniu, nuspręsta maišus dėti ne ant grindų, o ant sėdynių tam, kad bandymai atitiktų kuo realesnes situacijas. Trečiuoju atveju automobilio bagažinėje sutalpinami tie patys 4 smėliu pripildyti maišai, kurie sudedami vienas šalia kito tam, kad apkrova pasiskirstytų per visa bagažinės grindų plotą. Kiekvienu apkrovos atveju atlikti 2 svėrimai – priekinės automobilio ašies svėrimas (žr. 9 pav.) ir automobilio. Žinant automobilio ir ašies mases galima nesunkiai apskaičiuoti automobilio svorio pasiskirtymą ašų atžvilgiu bei įvertinti svorio centro padėtį kiekvienu apkrovos atveju. Svėrimo metu gautos automobilio ir priekinės ašies masės pateiktos 2 lentelėje.



9 pav. Automobilis Seat Alhambra priekinės ašies svėrimo metu

Žinodami priekinės automobilio ašies ir automobilio mases bei ratų bazės ilgį galime apskaičiuoti atstumus tarp svorio centro ir priekinės, ir galinės ašų:

$$l_g = \frac{m_p}{m} \cdot l \quad (36)$$

$$l_p = l - l_g \quad (37)$$

čia l_p – atstumas tarp priekinės ašies ir svorio centro, m; l_g – atstumas tarp galinės ašies ir svorio centro, m; l – ratų bazės ilgis, m; m_p – priekinės ašies masė, kg; m – automobilio masė, kg.

Transporto priemonės svorio pasiskirstymą priekinės ir galinės ašių atžvilgiu galima išreikšti svorio dalies tenkančios priekiniai ir galiniai ašims santykiu:

$$\frac{\frac{m_p}{m} \cdot 100\%}{\frac{m_g}{m} \cdot 100\%} = \frac{\frac{m_p}{m} \cdot 100\%}{\frac{m-m_p}{m} \cdot 100\%} \quad (38)$$

čia m_p – priekinės automobilio ašies masė, kg; m – automobilio masė, kg; m_g – automobilio galinės ašies masė, kg

2 lentelė. Automobilio Seat Alhambra svorio pasiskirstymas ašių atžvilgiu

Apkrovos atvejis	Bendra masė, kg	Priekinės ašies masė, kg	Atstumas tarp priekinės ašies ir svorio centro, m	Atstumas tarp galinės ašies ir svorio centro, m	Svorio pasiskirstymas priekinės/galinės ašies atžvilgiu
1	2070	1130	1,278	1,563	55/45
2	1790	1040	1,364	1,477	52/48
3	2070	1010	1,449	1,392	49/51

2.3 Matavimo įranga

Automobilio stabilumo eksperimento metu buvo naudojama diagnostinė įranga Autocom CDP+, kurios pagalba buvo fiksuojami tyrimui reikalingi duomenys. Pasinaudojus įranga per OBD2 (angl. *on board diagnostic*) jungtį prisijungta prie transporto priemonės stabdžių antiblokavimo sistemos (ABS) ir elektroninės stabilumo sistemos (ESP) valdymo bloko. ABS/ESP sistemos jutiklių fiksuojami duomenys yra elektriniais impulsais perduodami CAN jungtimis į valdymo bloką. Valdymo blokas įvertinęs gautus signalus tam tikrais algoritmais perduoda valdymo signalus ABS/ESP sistemų valdikliams, kurie užtikrina transporto priemonės aktyviają saugą. Būtent prijungus diagnostinę įrangą galima matyti jutiklių fiksuojamus duomenis realiu laiku. Šie duomenys gali būti pateikiami skaitiniu arba grafiniu būdu (žr. 10 pav.)



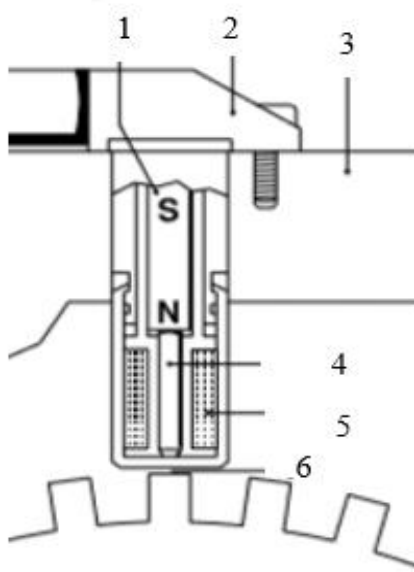
10 pav. Diagnostinės įrangos Autocom CDP+ fiksuojami ABS/ESP sistemų valdymo bloko duomenys: kairėje skaitinės duomenų reikšmės; dešinėje – grafinės

2.4 Jutikliai ir jų charakteristikos

Eksperimento metu transporto priemonės greičio, vairo pasukimo kampo, skersinio pagreičio, kampinio greičio parametrai gaunami iš ABS ir ESP sistemų valdymo bloko (žr. 12 pav. 1). Būtent šis blokas ne tik fiksuoja parametrus, bet ir atlieka aktyviųjų sistemų elementų valdymą. Automobilio greitis fiksuojamas automobilio ratų stebulėse sumontuotais Bosch 0216210104 indukciniais ratų kampinio greičio jutikliais, kurio konstrukcija pateikta 11 paveiksle, o parametrai 3 lentelėje. Važiuojant keičiasi ne tik transporto priemonės važiavimo greitis, bet ir kampinis greitis ir skersinis pagreitis, kuriuos matuoja ir valdymo blokui pateikia Bosch 0265005258 jutiklis, kurio parametrai pateikti 4 lentelėje. Jutiklis sudarytas iš giroskopo, kurio funkcija – matuoti kampinį greitį, ir akselerometro – skersinį pagreitį. Giroskopo ir akselerometro funkcijas turintis jutiklis (žr. 12 pav. 4) montuojamas ties transporto priemonės svorio centru kadangi jo veikimo principas pagrįstas Koriolio efektu. Kitas labai svabus automobilio aktyviosios sistemos elementas – vairo pasukimo kampo jutiklis Bosch 0265005411, kuris sumontuotas ant vairo mechanizmo konstrukcijos (žr. 12 pav. 3) ir matuojantis vairo pasukimo kampą. Šio jutiklio parametrai pateikti 5 lentelėje.

3 lentelė. Indukcinio rato kampinio greičio jutiklio Bosch 0216210104 parametrai [17]

Parametras	Reikšmė, matavimo vienetai
Fiksuojamos kampinio greičio ribos	20...7000, aps/min
Darbinė temperatūra	-40...+120, °C
Maksimalus atsparumas vibracijai	1200, m/s ²
Darbinė varža esant 20°C temperatūrai	860±10%, Ω
Indukcija esant 1 kHz dažniui	370±15%, mH



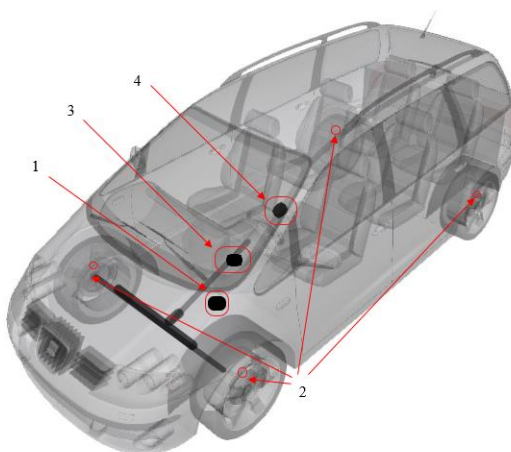
11 pav. Indukcinio rato kampinio greičio matavimo jutiklio [17]: 1 – magnetas; 2 – jutiklio korpusas; 3 – stebulė; 4 – geležies šerdis; 5 – indukcinė ritė; 6 – tarpelis

4 lentelė. Jutiklio Bosch 0265005258 sudaryto iš giroskopo ir akselerometro parametrai [17]

Parametras	Reikšmė, matavimo vienetai
Giroskopas	
Matavimo ribos	± 100 °/s
Minimalus fiksuojamas dydis	$\pm 0,2$ °/s
Jautrumas	18 mV/(°/s)
Maksimali paklaida	$\leq 1\%$ FSO
Akselerometras	
Matavimo ribos	$\pm 1,8g$ m/s ²
Minimalus fiksuojamas dydis	0,06 g
Jautrumas	1000/g mV/(m/s ²)
Maksimali paklaida	$\leq 3\%$ FSO
Bendrieji parametrai	
Darbinė temperatūra	-30...+85 °C
Darbinė įtampa (nominali)	12 V

5 lentelė. Vairo pasukimo kampo jutiklio Bosch 0265005411 parametrai [17]

Parametras	Reikšmė, matavimo vienetai
Matavimo ribos	-780...+780, °
Minimalus fiksuojamas dydis	0,10 °
Nuokrypis	-2,50...2,50, °
Histerizė visoje matavimo riboje	0...5, °
Darbinė temperatūra	-40...+85, °C



12 pav. Automobilis Seat Alhambra ir jo ABS/ESP sistemų komponentų išsidėstymas [18]: 1 – ABS/ESP valdymo blokas; 2 – indukciniai ratų kampinio greičio jutikliai; 3 – vairo pasukimo kampo jutiklis; 4 – jutiklis, kuriame įmontuotas giroskopas su mikromechaniniu akselerometru.

2.1 Nusistovėjusio būvio važiuojant apskritimu nustatymo testas

ISO 4138 testo metu nagrinėjamas automobilio nusistovėjęs būvis (angl. *steady state*) važiuojant tam tikro spindulio apskritimu. Kadangi atviros grandinės sistemoje nagrinėjamas automobilio – kelio arba automobilio – aplinkos ryšys, testo metu galima nustatyti tiesioginę automobilio dinaminį rodiklių įtaką automobilio stabilumui. Taip pat įvertinama skersinio pagreičio įtaka transporto priemonės stabilumui bei randama ribinė skersinio pagreičio reikšmė, kurią pasiekus automobilis praranda stabilumą. Testą galima atlikti 3 skirtingais metodais, kurių sąlygos pateiktos 6 lentelėje:

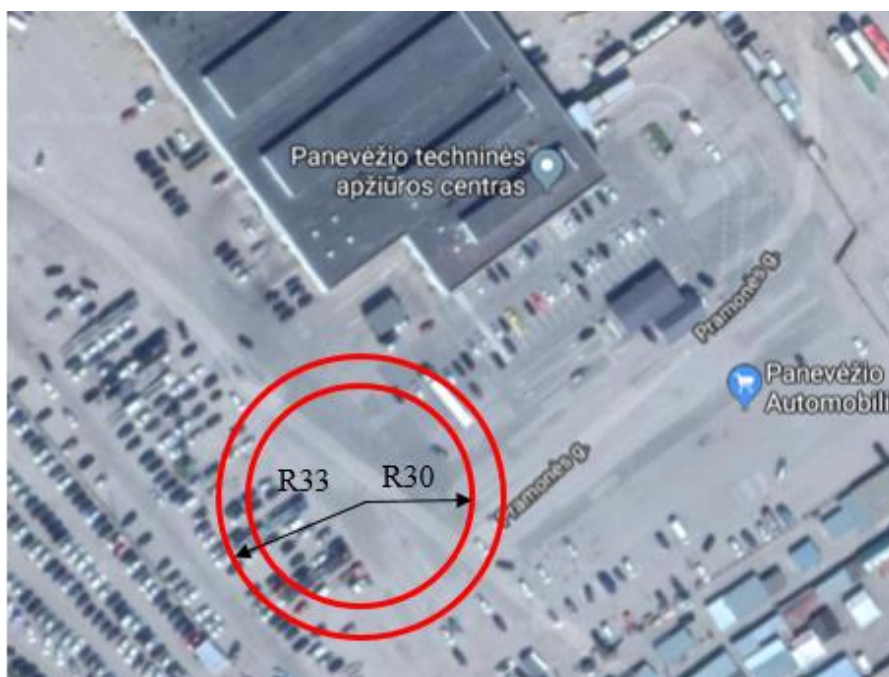
1. Pastovaus važiavimo spindulio;
2. Pastovaus vairo pasukimo kampo;
3. Pastovaus greičio.

6 lentelė. Nusistovėjusio būvio tyrimo važiuojant apskritimu nustatymo metodai [13]

Testo metodas	Pastovus dydis	Kintamas dydis	Matuojamas arba apskaičiuojamas dydis
Pastovaus spindulio	Spindulys	Greitis	Vairo pasukimo kampas
Pastovaus vairo pasukimo kampo	Vairo pasukimo kampas	Greitis	Spindulys
Pastovaus greičio su kintamu spinduliu	Greitis	Spindulys	Vairo pasukimo kampas
Pastovaus greičio su kintamu vairo pasukimo kampu	Greitis	Vairo pasukimo kampas	Spindulys

Kiekvieno metodo metu pasirenkamas vienas iš pastovių dydžių. Pirmasis ir trečiasis metodas leidžia įvertinti automobilio gebėjimą išlaikyti važiavimo trajektoriją. Antro metodo metu, kai vairo pasukimo kampas yra fiksuotas pasinaudojus inercinių instrumentų duomenimis apskaičiuojama transporto priemonės važiavimo kursas. Kiekvieno metodo metu vienas iš šių dydžių: važiavimo greitis, apskritimo spindulys arba vairo pasukimo kampas – turi būti pastovus, antras keičiamas, o trečias matuojamas arba apskaičiuojamas.

Nagrinėjant transporto priemonės stabilumą šio testo metu buvo pasirinktas pirmasis metodas – važiavimas pastovaus spindulio trajektorija keičiant važiavimo greitį. Remiantis standartu testą rekomenduojama atlikti ant lygaus paviršiaus kelio dangos t.y. kelias turi būti be nuolydžio. Taip reglamentuojamas apskritimo, kuriuo bus važiuojama spindulys. Rekomenduojamas 100 metrų, tačiau leistinas minimalus spindulys – 30 metrų. Panevėžio mieste ar jo apylinkėse nėra tinkamo dydžio aikštelės, kurioje būtų galima važiuoti 100 metrų spindulio apskritimu, nutarta, kad tyrimo metu bus važiuojama 30 metrų spindulio apskritimu. Tyrimo atlikimo vieta – Panevėžyje Pramonės g. 12 adresu esančioje aikštelėje (žr. 13 pav.), kurios danga – sausas asfaltas. Testo metu pasirinkti važiavimo greičiai – 30, 40 ir 50 km/h. Tyrimo metu važiavimo greitis turi nekisti. Pastovus automobilio važiavimo greitis išlaikytas pasinaudojus greičio palaikymo sistema – autopilotu. Taip pat tyrimo metu buvo vertinama automobilio svorio centro padėties įtaka stabilumui, todėl duomenys buvo fiksuojami skirtingais apkrovos atvejais. Apkrovų atvejai ir svorio centro padėtys ašių atžvilgiu apžvelgti 2.2 skyriuje.



13 pav. Tyrimo atlikimo vietos vaizdas iš viršaus

Kiekvienu apkrovos atveju, važiuojant skirtingais greičiais, fiksuojamas transporto priemonės skersinis pagreitis ir vairo pasukimo kampas. Kadangi transporto priemonės vairo mechanizmą sudaro sliekinė pavara vairo ir ratų pasukimo kampų santykis yra lygus sliekinės pavaros perdavimo santykiui 16:1. Tai reiškia, kad vairas pasukamas 16 kartų didesniu kampu nei pasisuka automobilio ratai. Todėl tyrimo metu gautas vairo pasukimo kampų reikšmes reikia padalinti iš 16.

Būtina įvertinti labai svarbų apskėtą. Važiuojant apskritimu, kurio spindulys 30 metrų, transporto priemonės svorio centro trajektorijos spindulys yra didesnis. Taip pat svarbu numatyti, kad automobilio vairuotojas negali tiksliai atkartoti apskritimo trajektorijos t.y. važiuoti šalia apskritimo ribas žyminčius bokštelių yra sudėtinga ir pavojinga. Todėl pravartu nustatyti važiavimo kurso ribas. Transporto priemonės trajektorija turi būti ribojama skirtingo skersmens apskritimais – vidiniu ir išoriniu. Remiantis Lietuvos Respublikos kelių techniniame [19] reglamente nustatytomis kelių projektinio pločio vertėmis primta, kad transporto priemonės važiavimo trajektorijos spindulys gali kisti 30-33 metrų ribose. Įvertinus transporto priemonės plotį, kuris yra 1,81 m, svorio centro spindulys važiuojant apskritimu kinta 30,905 – 32,095 m ribose. Žinodami svorio centro spindulio kitimo ribas ir transporto priemonės ratų bazės ilgį, kuris yra 2,841 m, galime apskaičiuoti Ackermano kampus [5]:

$$\delta_{Amin} = \frac{l}{R_{max}} = \frac{2,841 \text{ m}}{32,095 \text{ m}} = 0,08852 \text{ rad} = 5,072^\circ \quad (4)$$

$$\delta_{Amax} = \frac{l}{R_{min}} = \frac{2,841 \text{ m}}{30,905 \text{ m}} = 0,09193 \text{ rad} = 5,267^\circ \quad (40)$$

čia δ_{Amin} – mažiausias Ackermano kampas, °; δ_{Amax} – didžiausias Ackermano kampas, °; l – automobilio ratų bazės ilgis, m; R_{min} – minimalus svorio centro trajektorijos spindulys, m; R_{max} – maksimalus svorio centro trajektorijos spindulys, m.

Jeigu transporto priemonės ratų pasukimo kampas priklausys Ackermano kampų ribose laikysime, kad vairavimas yra neutralus. Tačiau nereikia pamiršti, kad didinant automobilio greitį didėja ir skersinis pagreitis važiuojant pastovaus spindulio trajektorija. Didėjant skersiniam pagreičiui taip pat ir didėja išcentrinė jėga, kuri gali pakeisti transporto priemonės kelio trajektoriją. Todėl tiriant automobilio stabilumą pasitelkiama transporto priemonės ratų pasukimo kampo priklausomybės nuo skersinio pagreičio diagrama pagal kurią galima įvertinti valdymo ribas. Šioje diagramoje pateikiama ne tik neutralus valdymo, bet ir nepakankamo ar perteklinio pasukamumo tiesės. Būtent pasukamumo tiesės atspindinti transporto priemonės valdymo ribas. Norint gauti kreives būtina apskaičiuoti pasukamumo gradientą. Automobilio pasukamo gradientas yra atvirkščiai proporcingas charakteringo ir kritinio greičio reikšmėms, o šie greičiai randami iš (3) ir (4) formulių [5]:

$$v_{ch} = \sqrt{\frac{l \cdot g}{\eta}}, \text{ kai } \eta > 0 \quad (41)$$

$$v_{crit} = \sqrt{\frac{l \cdot g}{-\eta}}, \text{ kai } \eta < 0 \quad (42)$$

čia v_{ch} – charakteringas greitis, m/s; v_{crit} – kritinis greitis, m/s; l – transporto priemonės ratų bazės ilgis, m; g – laisvojo kritimo pagreitis – 9,81 m/s²; η – pasukamumo gradientas.

Atkreipus dėmesį į (41) ir (42) formules galima pastebėti, kad kritinio ir charakteringo greičio išraiškos tokios pačios. Vienintelis skirtumas – gradiento ženklas. Taip yra todėl, kad transporto priemonės įgyja teigiamą gradiento reikšmę esant nepakankamo pasukamumo atveju, o neigiamą – perteklinio. Pasinaudojus charakteringo ar kritinio greičio išraiškėmis randamas pasukamumo gradientas:

$$\eta = \frac{l \cdot g}{v_{ch}^2} \text{ arba } \eta = -\frac{l \cdot g}{v_{crit}^2} \quad (43)$$

čia η – pasukamumo gradientas; l – automobilio ratų bazės ilgis, m; g – laisvojo kritimo pagreitis – 9,81 m/s²; v_{ch} – charakteringas važiavimo greitis, m/s; v_{crit} – kritinis važiavimo greitis, m/s.

Turėdami pasukamumo gradiento reikšmes galima apskaičiuoti ribines nepakankamo pasukamumo kampus [5]:

$$\delta_{nmin} = \frac{l}{R_{max}} + \eta \cdot \frac{a_y}{g} = \frac{l}{R_{max}} + \eta_v \cdot \frac{v^2}{R_{max} \cdot g} \quad (44)$$

$$\delta_{nmax} = \frac{l}{R_{min}} + \eta \cdot \frac{a_y}{g} = \frac{l}{R_{min}} + \eta_v \cdot \frac{v^2}{R_{min} \cdot g} \quad (45)$$

čia δ_{nmin} – minimalus ratų pasukimo kampas nepasukamumo atveju, °; δ_{nmax} – maksimalus nepasukamumo kampas, °; a_y – įcentrinis automobilio pagreitis, m/s²; v – važiavimo greitis, m/s.

Taip pat pasukamumo gradientas leidžia apskaičiuoti perteklinio pasukamumo ribinius kampus [5]:

$$\delta_{pmin} = \frac{l}{R_{max}} - \eta \cdot \frac{a_y}{g} = \frac{l}{R_{max}} - \eta_v \cdot \frac{v^2}{R_{max} \cdot g} \quad (5)$$

$$\delta_{pmax} = \frac{l}{R_{min}} - \eta \cdot \frac{a_y}{g} = \frac{l}{R_{min}} - \eta_v \cdot \frac{v^2}{R_{min} \cdot g} \quad (47)$$

čia δ_{pmin} – minimalus ratų pasukimo kampas perteklinio pasukamumo atveju, °; δ_{pmax} – maksimalus perteklinio pasukamumo kampas, °; a_y – icentrinis automobilio pagreitis, m/s²; v – važiavimo greitis, m/s.

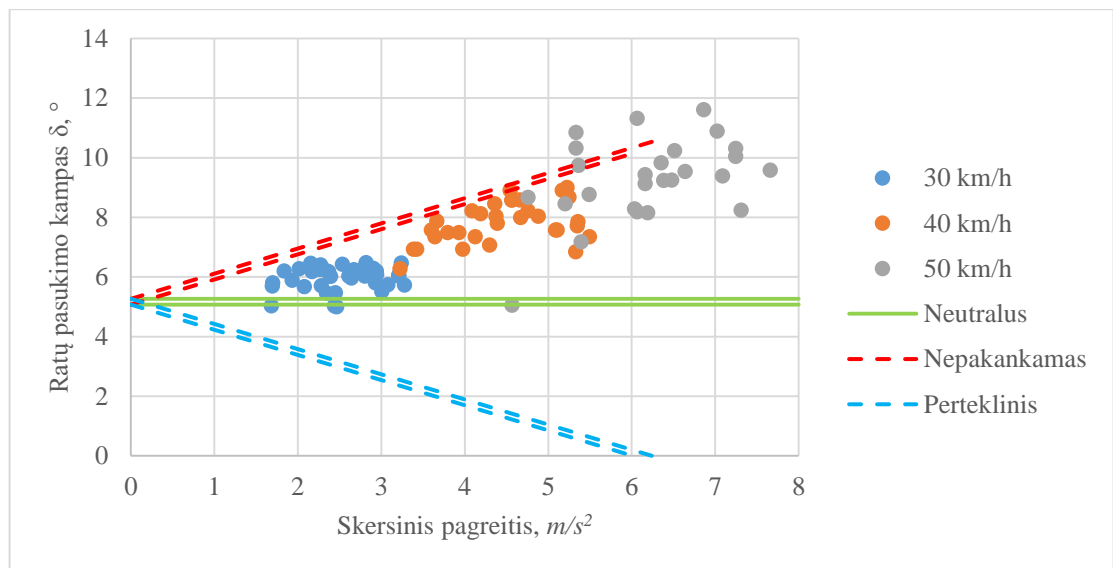
Remiantis gautomis ribinėmis ratų pasukimo kampų vertėmis galime įvertinti transporto priemonės valdomumą ir stabilumą. Automobilio valdomumas laikomas neutraliu ir tuo pačiu stabilu, kai vairo pasukimo kampo reikšmė priklauso ribinių Ackermano kampų reikšmių intervalui [5,072°; 5,267°].

Jeigu transporto priemonės ratų pasukimo kampas yra didesnis nei 5,267° pasukamumas laikomas nepakankamu. Nepasukamumo atveju priklausomai nuo trajektorijos spindulio gaunamos ribinės vairo pasukimo kampų reikšmės – 10,143° ir 10,534°. Esant nepakankamam pasukamumui transporto priemonė gali išlaikyti važiavimo trajektoriją tiek, kiek leidžia trinties jėga. Būtent viršijus nepasukamumo kampų intervalo [5,267°; 10,534°] ribas automobilio valdomumas yra nebeįmanomas, nes priekinė automobilio ašis praranda sukibimą su kelio danga ir automobilis išslįsta iš trajektorijos.

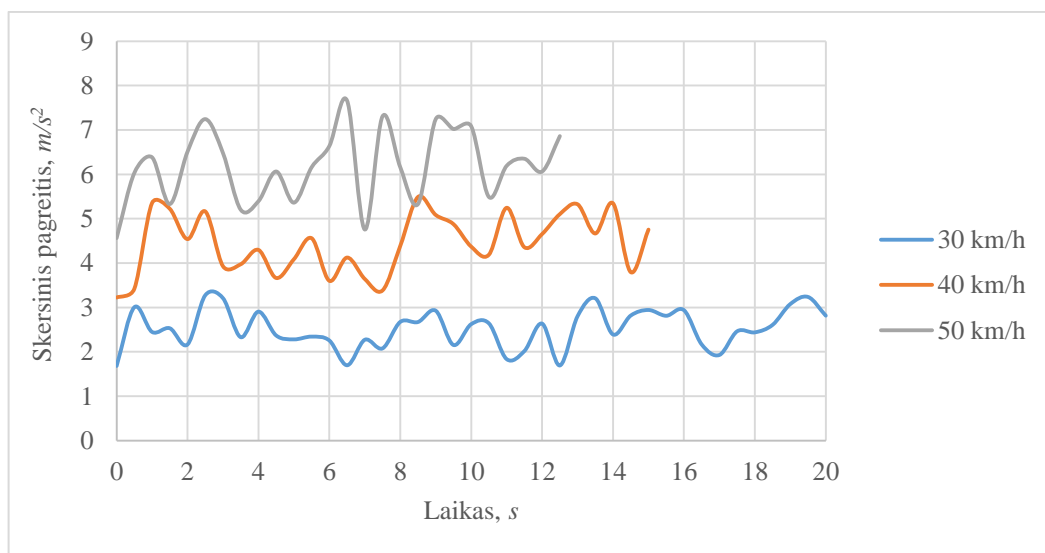
Pertekliniu pasukamumu laikomas toks atvejis, kai vairo pasukimo kampų reikšmės yra mažesnės nei Ackermano kampo. Šiuo atveju transporto priemonės galinės ašies ratų slydimo kampai yra didesni nei priekinių. Remiantis literatūros šaltiniais toks atvejis yra pavojingesnis palyginus su nepasukamumu ir todėl automobilis yra nestabilus. Apskaičiavus ribinius posūkio kampus gautas perteklinio pasukamumo kampų intervalas [0°; 5,072°].

Turimos ribinės neutralaus, perteklinio ir nepakankamo pasukimo kampų reikšmės ratų pasukimo priklausomybės nuo skersinio pagreičio grafikuose leidžia nubrėžti tieses, kurios grafiškai atspindi pasukamumo režius. Jeigu transporto priemonės ratų pasukimo kampų vertės neperžengia nepasukamumo arba neutralų pasukamumą žyminčias tieses toks važiavimo atvejis laikomas stabilu, priešingu atveju – nestabilu. Todėl nagrinėjant transporto priemonės stabilumą remtasi būtent šiais teiginiais.

Nagrinėjant pirmąjį apkrovos atvejį, kai automobilis yra su keleiviais, ratų pasukimo kampo priklausomybės grafikas pateiktas 14 paveiksle. Visais važiavimo greičiais transporto priemonės pasukamumas yra – nepakankamas. Kai greitis yra 30 ir 40 km/h ratų posūkio kampų reikšmės yra nepasukamumo kampų ribose todėl važiavimas šiais greičiais laikomas stabilu. Tačiau važiuojant 50 km/h greičiu keletas transporto priemonės ratų pasukimo kampų viršija nepasukamumo ribą t.y. kampų reikšmės yra virš nepasukamumo tiesės. Šis atvejis laikomas nestabilu, nes transporto priemonės priekinė ašis pradeda slįsti.



14 pav. Vairo pasukimo kampo priklausomybė nuo skersinio pagreičio, kai automobilio svorio pasiskirstymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu yra 55/45



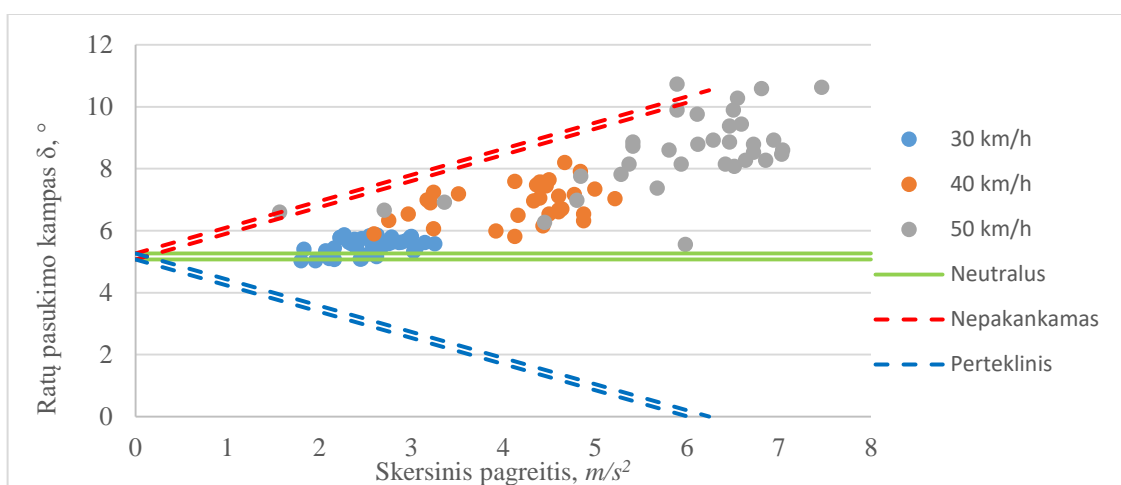
15 pav. Skersinio pagreičio kitimas laike važiuojant skirtingais greičiais, kai automobilio svorio pasiskirstymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu yra 55/45

Išnagrinėjus tyrimo metu gautus duomenis įvertinta mažiausia skersinio pagreičio vertė, kurią pasiekus transporto priemonės ratų posūkio kampas viršija nepasukamumo kampų ribinę vertę, o tai reiškia, kad automobilis tampa nestabilus. Tyrimo metu užfiksuota skersinio pagreičio vertė – $5,33 \text{ m/s}^2$. Būtent pasiekus tokį skersinį pagreitį automobilis, kai jo svorio pasiskirstymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu yra 52/48, laikomas nestabiliu, nes nesugeba išlaikyti trajektorijos dėl priekinės ašies ratų slydimo.

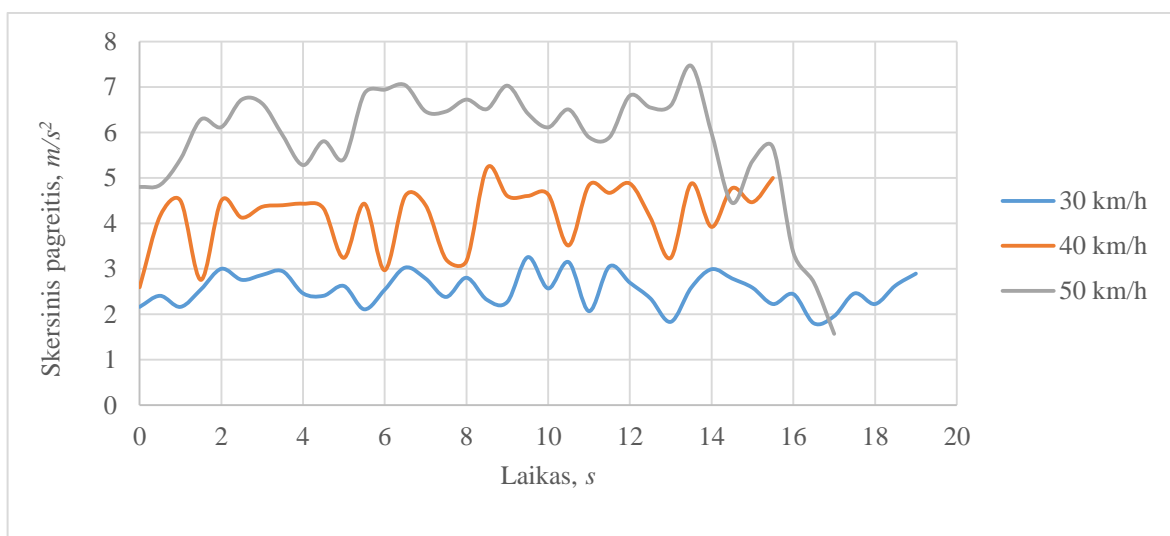
Antruoju atveju, kai transporto priemone važiuoja tik vairuotojas, ratų pasukimo kampo priklausomybė nuo skersinio pagreičio grafikas pateikiamas 16 paveiksle, o skersinio pagreičio kitimas laike skirtingais važiavimo greičiais – 17 paveiksle. Remiantis 16 paveikslu galime teigti, kad tyrimo metu automobilio

pasukamumas buvo nepakankamas važiuojant visais greičiais. Važiuojant 30 km/h ir 40 km/h greičiais transporto priemonė laikoma stabilia, nes ratų pasukimo kampų taškai yra žemiau nepasukamumo ribos tiesių. Antrą apkrovos atveju tyrimo metu automobilis tapo nestabilus važiuojant 50 km/h greičiu. Būtent esant tokiam greičiui trinties jėga tarp kelio dangos ir padangų tampa mažesnė nei išcentrinė jėga veikianti automobilį. Šiuo atveju automobilio aktyviojo saugumo sistemos automatiškai išjungė greičio palaikymo sistemą. Todėl automobilio greitis sumažėjo todėl atkreipus dėmesį į 17 pav., kuriame pateikiamas skersinio pagreičio kitimas laike, galima pastebėti, kad skersinis pagreičio kreivė važiuojant 50 km/h greičiu staigiai nusileidžia žemyn.

Išnagrinėjus tyrimo duomenis nustatyta, kad nepasukamumo ribos viršijamos, kai skersinis pagreitis yra $5,89 \text{ m/s}^2$. Todėl automobilio skersinio pagreičio stabilumo atžvilgiu, kai svorio pasiskirstymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 55/45, ribinė vertę laikysime $5,89 \text{ m/s}^2$.

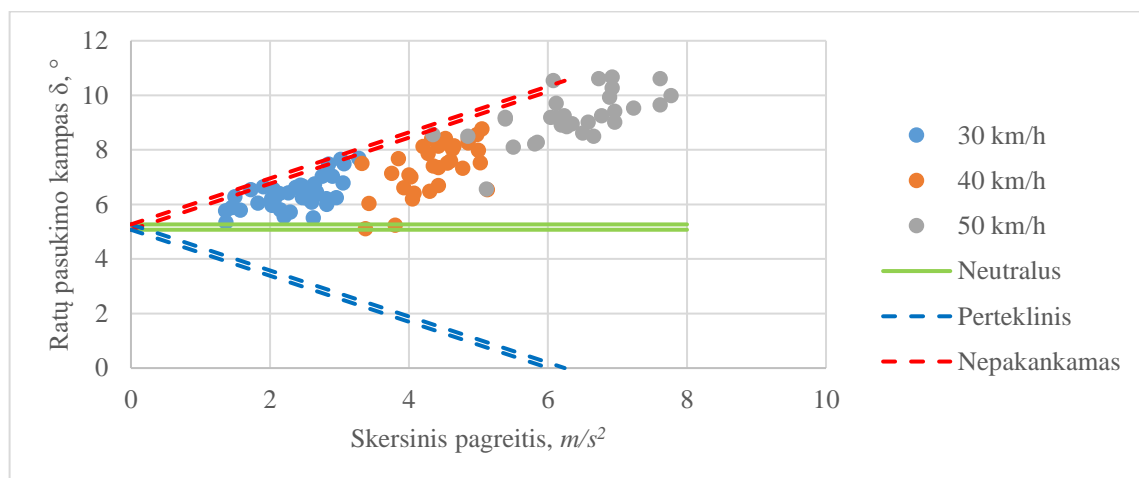


16 pav. Vairo pasukimo kampo priklausomybė nuo skersinio pagreičio, kai automobilio svorio pasiskirstymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu yra 52/48

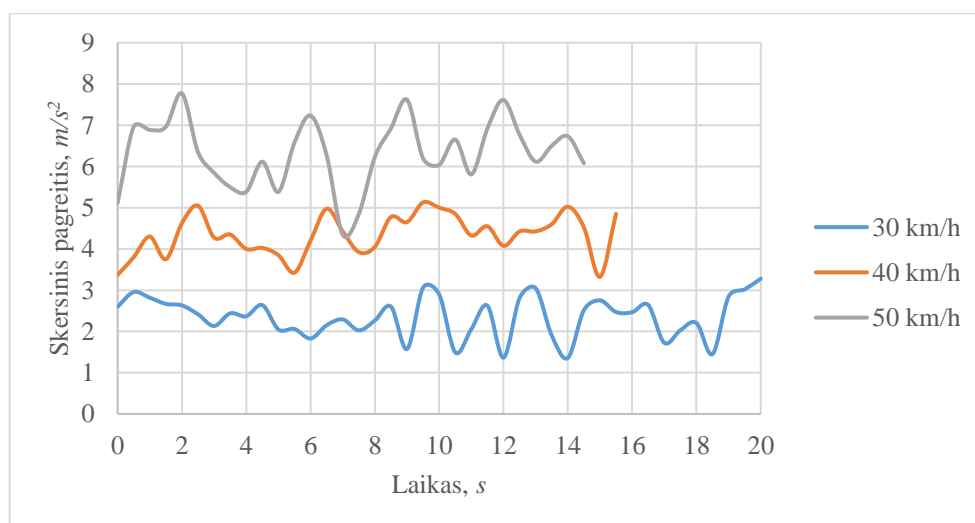


17 pav. Skersinio pagreičio kitimas laike važiuojant skirtingais greičiais, kai automobilio svorio pasiskirstymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu yra 52/48

Nusistovėjusio būvio tyrimo trečiojo apkrovos atveju metu, gautos vairo kampų reikšmės esant atitinkamiems skersinio pagreičio dydžiams rodo, kad nepasukamumas buvo visais važiavimo greičiais (žr. 18 pav.). 30 ir 40 km/h greičio atvejai laikomi stabiliais, nes ratų posūkio kampai yra nepasukamumo ribose. Tačiau šiame etape važiuojant 50 km/h greičiu ratų pasukimo kampai viršija nepasukamumo ribą žyminčią tiesę. Todėl toks atvejis laikomas nestabiliu. Išnagrinėjus duomenis nustatyta, kad mažiausia skersinio pagreičio vertė su kuria ratų pasukimo kampas yra didesnis nei nepasukamumo riba yra $6,08 \text{ m/s}^2$.



18 pav. Vairo pasukimo kampo priklausomybė nuo skersinio pagreičio, kai automobilio svorio pasiskirstymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu yra 49/51



19 pav. Skersinio pagreičio kitimas laike važiuojant skirtingais greičiais, kai automobilio svorio pasiskirstymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu yra 49/51

Atlikus nusistovėjusio būvio važiuojant apskritimu testą gautos skersinio pagreičio vertės, kurioms esant automobilis tampa nestabilus: transporto priemonės su vairuotoju atveju – $5,89 \text{ m/s}^2$; transporto priemonės su keleiviais – $5,33 \text{ m/s}^2$; transporto priemonės su kroviniu – $6,08 \text{ m/s}^2$. Būtent šios skersinio pagreičio vertės bus laikomos ribinėmis, kuriomis bus remiamasi važiuojant sauso asfalto danga ir nagrinėjant automobilio stabilumą kitų stabilumo tyrimo testų metu.

2.5 Dvipusio judėjimo juostos keitimo testas

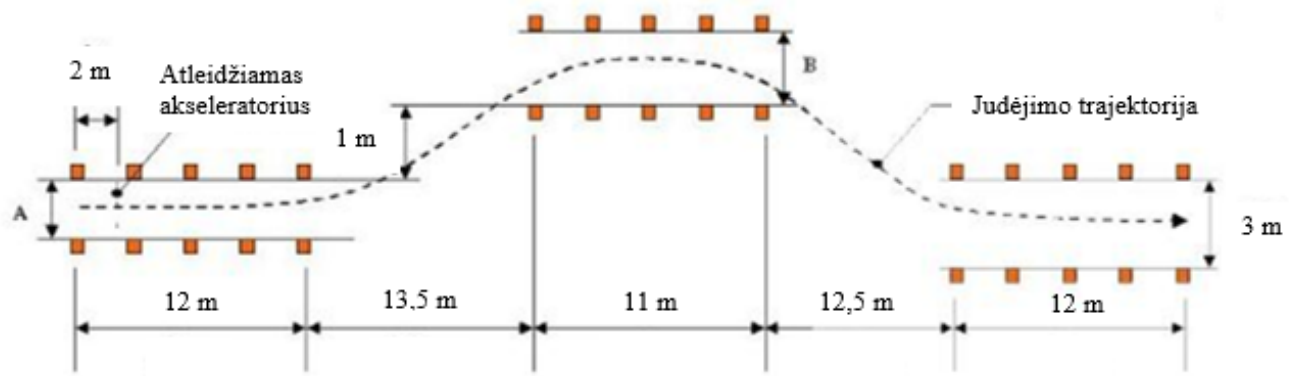
Dvipusio judėjimo juostos keitimo stabilumo testas dar gerai žinomas kaip „briedžio testas“. Šis testas reglamentuojamas ISO 3388:2011 standartu [14]. Tyrimo metu nagrinėjamos transporto priemonės manevringumo ir stabilumo savybės atliekant kliūtis apvažiavimo manevrą. Stabilumas nagrinėjamas dviem aspektais – gebėjimu išlaikyti važiavimo trajektoriją ir išsilaikyti ant kelio dangos – neapvirsti. Todėl tyrimas skirtas nagrinėti ne tik skersinę, bet ir tuo pačiu vertikaliąją transporto priemonės dinamiką. Taip pat svarbu pabrėžti, kad testas priskiriamas uždaros grandinės (angl. *closed loop*) sistemai, kurią sieja automobilio, kelio ir vairuotojo tarpusavio ryšys. Todėl vairuotojo veiksmai turi tiesioginę įtaką tyrimui ir jo metu užfiksuotiems duomenims. Svarbu paminėti tai, kad darbe tiriamas transporto priemonės stabilumas plokštumoje iš viršaus. Todėl šio testo metu tiriamas tik plokščias aprovos būvis. Nors šio tyrimo metu automobilis veikiamas skersinių ir vertikaliųjų dinamiųjų apkrovų, nagrinėjama tik skersinė dinamika.

Testo metu automobilis važiuodamas tam tikru greičiu turi sugebėti atkartoti standartu numatytą trajektoriją (žr. 20 pav.), kuria imituojamas kliūtis apvažiavimas. Kliūtis apvažiavimo kelias skirstomas į tris dalis: įvažiavimą, laisvąją juostą, grįžimo juostą. Įvažiavimo ir grįžimo juostų ilgiai yra lygūs t.y. 12 metrų, laisvosios zonos ilgis 11 m. Persirikiavimo manevrui iš įvažiavimo zonos į laisvąją išilgine kryptimi numatytas atstumas yra 13,5 m, o skersine – 1 m. Grįžimo manevrui atstumas išilgine kryptimi yra 12,5 m, skersine – 1 m. Grįžimo juostos plotis 3 m, o įvažiavimo ir laisvosios juostų pločiai priklauso nuo transporto priemonės pločio ir yra apskaičiuojami [14]:

$$A = 1,1 \cdot b + 0,25 \quad (48)$$

$$B = b + 1 \quad (49)$$

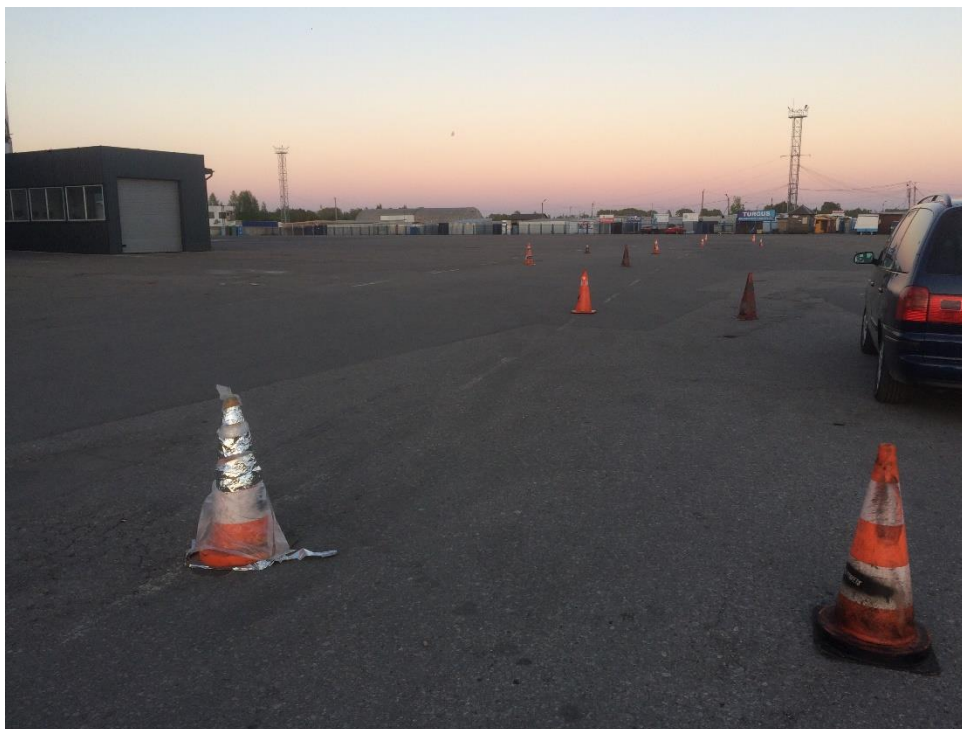
čia A – įvažiavimo juostos plotis, m; b – transporto priemonės plotis, m. B – laisvosios juostos plotis, m.



20 pav. Dvipusio judėjimo juostos keitimo testo trajektorijos schema [14]

Tyrimo metu nuvažiavus pirmuosius 2 metrus transporto priemonės akseleratoriaus pedalas turi būti atleidžiamas. Išvažiavus iš įvažiavimo juostos turi įvykti persirikiavimas į laisvąją juostą. Pasiekus laisvąją juostą transporto priemonė turi grįžti į pradinę padėtį skersine kryptimi. Todėl išvažiavus iš laisvosios juostos turi įvykti antrasis manevras – grįžimas. Tyrimo metu persirikiavimo ir grįžimo manevrams skiriami skirtingi atstumai išilgine kryptimi, o jų skirtumas yra 1 m. Todėl reikia įvertinti,

kad grįžimo manevras gali būti sudėtingesnis. Viso tyrimo metu transporto priemonės greitis didinamas tol, kol ji sugeba atkartoti važiavimo trajektoriją t.y. nenumušami bokšteliai žymintys trajektorijos ribas (žr. 21 pav.).

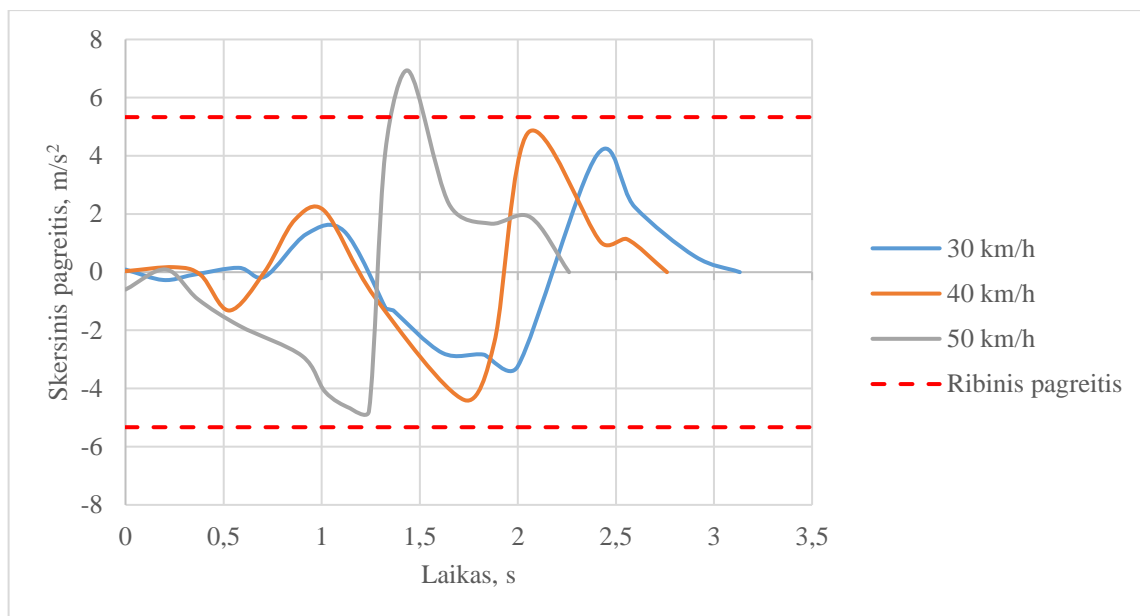


21 pav. Dvipusio judėjimo juostos keitimo manevro trajektorija

Pasirinkta, kad tyrimo metu važiavimo greičio pokytis 10 km/h. Pradinis važiavimo greitis 30 km/h. Tyrimas atliekamas tol, kol didinant važiavimo greitį įmanoma atlikti testą nekliudžius gairelių. Numatyta, kad transporto priemonės apkrovos atvejai tie patys kaip ir svorio pasiskirstymas ašių atžvilgiu. Tyrimas atliktas toje pačioje aiškelėje kaip ir nusistovėjusio būvio nustatymo tyrimas, o tai reiškia, kad kelio dangos savybės yra tos pačios. Atsižvelgus į tyrimo vietą ir apkrovų būvius tyrimo duomenų analizei pasinaudota ribinėmis skersinio pagreičio vertėmis. Kiekvienu apkrovos atveju užfiksuoti skersinio pagreičio kitimai laike važiuojant skirtingais greičiais pateikiami 22, 23 ir 24 paveiksluose.

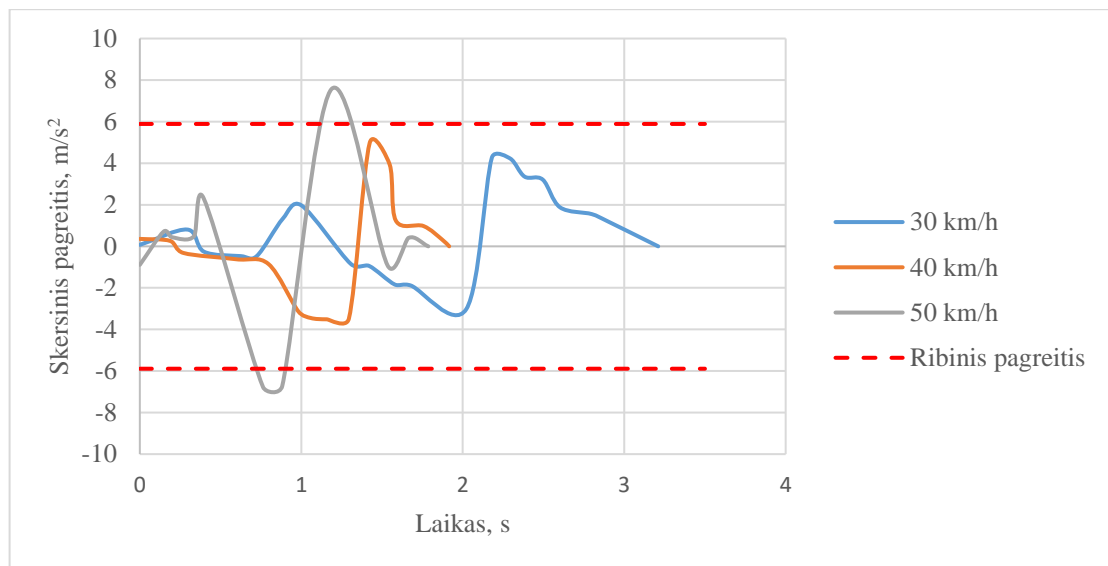
Transporto priemonės su keleiviais atveju dvipusio judėjimo juostos keitimo tyrimo metu užfiksuotas skersinio pagreičio kitimas laike pateikiamas 23 paveiksle. Šio bandymo metu važiuojant 30 ir 40 km/h greičiais užfiksuotas automobilio svorio centro skersinis pagreitis neviršija ribinės skersinio pagreičio vertės – $5,33 \text{ m/s}^2$. Persirikiavimo manevro metu didžiausias užfiksuotas skersinis pagreitis 30 km/h greičiu – $3,23 \text{ m/s}^2$, 40 km/h – $4,4 \text{ m/s}^2$, o grįžimo manevro metu 30 km/h – $4,03 \text{ m/s}^2$, 40 km/h – $4,81 \text{ m/s}^2$. Taip pat kliūtis apvažiavimo ir grįžimo manevrai atlikti nekliudant kelio ribas žyminčių gairelių. Važiuojant 50 km/h greičiu transporto priemonei persirikiavimas iš įvažiavimo į laisvąją kelio juostą įvyko sklandžiai, skersinio pagreitis – $4,78 \text{ m/s}^2$. Tačiau grįžimo manevro metu transporto priemonės ratai praslydo, buvo girdimas padangų cypimas, bei slystanti transporto priemonė kliudė gairelę. Taip pat atkreipus dėmesį į skersinio pagreičio kitimą pastebimas ribinę pagreičio vertę žyminčios tiesės kirtimas,

o užfiksuotas skersinis pagreitis – $6,91 \text{ m/s}^2$. Įvertinus pateiktus aspektus galima teigti, kad pirmuoju apkrovos atveju, važiuojant 30 ir 40 km/h greičiais transporto priemonė išlieka stabili ir valdoma, o kai važiavimo greitis 50 km/h – kliūtis apvažiavimas yra kontroliuojamas ir stabilus, bet staigiai grįžtant prarandamas transporto priemonės valdymas ir stabilumas.



22 pav. Skersinio pagreičio kitimas laiko atžvilgiu važiuojant skirtingais greičiais, kai transporto priemonės svorio pasiskirstymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu yra 55/45

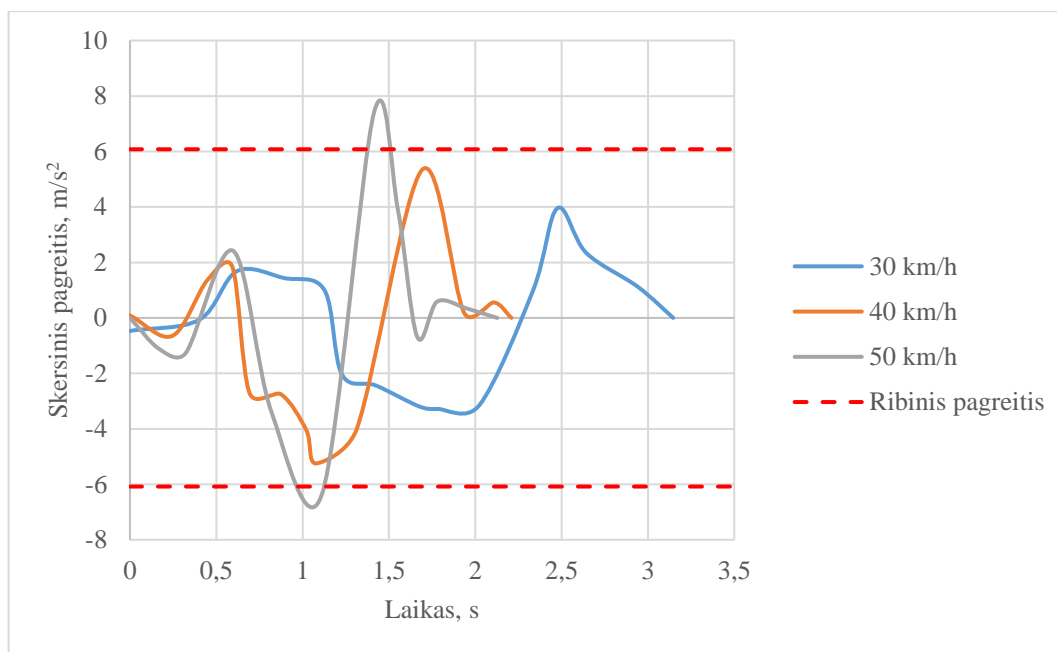
Atliekant tyrimą, kai buvo vairuojama tuščia transporto priemonė, važiuojant 30 ir 40 km/h greičiais trajektorijos įveikimas buvo sklandus. Atliekant persirikiavimo manevrą 30 km/h greičiu užfiksuotas didžiausias skersinis pagreitis – $3,02 \text{ m/s}^2$, 40 km/h – $3,51 \text{ m/s}^2$. Kadangi kliūtis apvažiavimas atliekamas pasukant vairą į kairę, skersinis pagreitis įgyja neigiamą reikšmę, todėl žiūrint į skersinio pagreičio kitimo grafiką matyti, kad kreivė nukreipta žemyn. Grįžimo manevro metu užfiksuota didžiausia skersinio pagreičio vertė važiuojant 30 km/h – $4,27 \text{ m/s}^2$, 40 km/h – $4,98 \text{ m/s}^2$. Važiuojant 50 km/h greičiu kliūtis apvažiavimo metu tarp automobilio padangų ir kelio dangos įvyko praslydimas. Tai įrodo ne tik padangų cypimas, bet ir 22 paveiksle pateikta skersinio pagreičio kreivė, didžiausia vertė persirikiavimo manevro metu – $6,77 \text{ m/s}^2$. Skersinio pagreičio kreivė važiuojant 50 km/h greičiu kerta ribinę skersinio pagreičio vertę ($5,89 \text{ m/s}^2$) žyminčią tiesę. Nors automobilio ratai praslydo pirmąjį manevrą pavyko atlikti. Tačiau grįžimo manevro metu transporto priemonė vėl prarado sukibimą su kelio danga. Pažvelgus į skersinio pagreičio kreivę matyti, kad ji vėl kerta tiesę žyminčią ribinę skersinio pagreičio vertę. Šiuo atveju skersinis pagreitis įgyja $7,56 \text{ m/s}^2$ vertę. Taip pat šio manevro metu transporto priemonė kliudė kelio ribas žyminčią gairelę. Įvertinus skersinio pagreičio kitimo laiko atžvilgiu grafikus ir tai, kaip transporto priemonė įveikė dvipusio judėjimo juostos keitimo manevrus, galima teigi, kad transporto priemonė važiuojant 30, 40 km/h greičiais buvo kontroliuojama ir stabili. Kai važiavimo greitis 50 km/h automobilio skersinis pagreitis ne tik viršijo ribinę vertę, bet ir nesugebėjo išlaikyti važiavimo trajektorijos. Todėl galima teigti, kad automobilis buvo nestabilus.



23 pav. Skersinio pagreičio kitimas laiko atžvilgiu važiuojant skirtingais greičiais, kai transporto priemonės svorio pasiskirstymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu yra 52/48

Trečiuoju apkrovos atveju – automobilis su kroviniu, skersinio pagreičio kitimo grafikai važiuojant 30, 40 ir 50 km/h greičiais pateikiami 24 paveiksle. Važiuojant tiek 30 km/h, tiek 40 km/h greičiais transporto priemonės trajektorija atitiko kliūties išvengimo trajektorijos ribas t.y. nebuvo kliūdytos gairės. Skersinio pagreičio didžiausios užfiksuotos vertės persirikiavimo manevro metu: 30 km/h – 3,3 m/s²; 40 km/h – 5,25 m/s², o grįžimo manevro metu: 30 km/h – 3,96 m/s²; 40 km/h – 5,34 m/s². Atsižvelgus į užfiksuotas pagreičio vertes ribinis skersinis pagreitis nebuvo pasiektas – 6,08 m/s². Važiuojant didžiausiu greičiu – 50 km/h kliūties apvažiavimo ir grįžimo manevrų metu buvo girdimas padangų cypimas. Apvažiuojant kliūtį automobilis nekliudė kelio ribas žyminčių gairelių, tačiau grįžtant į kelio juostą gairės kliūdimas buvo neišvengiamas. Atkreipus dėmesį į skersinio pagreičio kitimą laiko atžvilgiu važiuojant 50 km/h greičiu pastebimas ribinę skersinio pagreičio vertę žyminčios tiesės kirtimas tiek persirikiavimo metu – 6,37 m/s², tiek grįžimo manevro metu – 7,41 m/s². Apibendrinus automobilio su kroviniu apkrovos atvejį galima teigti, kad automobilis atlikdamas dvipusio judėjimo juostos keitimą tampa nestabilus, kai važiavimo greitis yra 50 km/h, nes važiuojant šiuo greičiu ne tik įvyksta kelio ribas žyminčių gairelių kliūdimas, padangų praslydimas ant kelio dangos, bet ir viršijamas ribinis skersinis pagreitis.

Dvipusio judėjimo juostos keitimo manevro tyrimo metu transporto priemonė visais apkrovos atvejais yra stabili važiuojant 30 ir 40 km/h greičiais. Tačiau 50 km/h greičiu kliūties ažiūravimo ir grįžimo manevras yra pavojingas, nes automobilis praranda stabilumą ir kerta kelio ribas, o tai realiu atveju gali turėti labai rimtų ir skaudžių pasėkmių.



24 pav. Skersinio pagreičio kitimas laiko atžvilgiu važiuojant skirtingais greičiais, kai transporto priemonės svorio pasiskirstymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu yra 49/51

2.6 Trumpalaikės skersinės reakcijos stabilumo testas

Trumpalaikės skersinės reakcijos (angl. *lateral transient response*) stabilumo testą reglamentuoja ISO 7401:2012 standartas [15]. Testas skirtas išnagrinėti skersinės jėgos poveikį transporto priemonės stabilumui, kurį dažniausiai sukelia staigus vairo pasukimo veiksmas. Šis tyrimas priklauso atviros grandinės (angl. *open loop*) sistemai, todėl reikia įvertinti, kad vairuotojo veiksmai turi tiesioginę įtaką automobilio stabilumui. Remiantis standartu transporto priemonės skersinės reakcijos testas gali būti nagrinėjamas aliekant vairo sukiojimą vienu iš penkių metodų :

- Staigus
- Sinusoidinio (vieno periodo)
- Atsitiktinio
- Pulsinis
- Besitęsiantis sinusoidinis

Staigus ir sinusoidinis vairo pasukimo metodų metu vairo pasukimo ir gražinimo veiksmas atliekamas tik vieną kartą, todėl fiksuojami tyrimo duomenys nagrinėjami laiko atžvilgiu. Atsitiktinio, pulsinio ir besitęsiančio sinusoidinio metodų metu vairo pasukimas vyksta periodiškai, o tyrimo metu užfiksuoti parametrai nagrinėjami dažnio priklausomybės atžvilgiu. Staigus vairo pasukimo metu nagrinėjamas transporto priemonės skersinio pagreičio arba kampinio greičio, kurie atsiranda dėl manevro sukeltos skersinės reakcijos, priklausomybę nuo vairo pasukimo kampo. Sinusoidinio metodo metu yra atliekamas tolygus vairo pasukimas ir gražinimas į pradinę padėtį, o pats veiksmas atliekamas vieną kartą. Šio metodo metu nagrinėjamas skersinio pagreičio arba kampinio greičio pokytis t.y. skersinio pagreičio ir vairo pasukimo kampo arba kampinio greičio ir vairo pasukimo kampo santykiai, uždelsimo

laikas: tarp skersinio pagreičio veikimo ir vairo pasukimo veiksmo, ir kampinio greičio veikimo ir vairo pasukimo. Atsitiktinio testo metu nagrinėjamas vairo pasukimo kampas ir jo dažnis, kai vairas yra sukiojamas periodiškai – pasukamas ir gražinamas keletą kartų, o automobilio skersinio pagreičio vertė neviršija 4 m/s^2 . Pulsinis metodas yra labai panašus į atsitiktinį tik jo metu vairo pasukimo trukmė yra nustatyta ir turi kisti nuo 0,3 iki 0,5 s. Besitęsiančio sinusoidinio testo metu vairas yra sukiojamas didinant vairo pasukimo dažnį ir posūkio kampo amplitudę tol, kol pasiekama ribinė skersinio pagreičio vertė – 4 m/s^2 .

Pasirinkta, kad trumpalaikės skersinės reakcijos tyrimas bus atliekamas staigaus vairo pasukimo metodu. Bandymo metu automobilis turi važiuoti tiesia trajektorija, o jo greitis privalo būti pastovus, kuris remiantis standarto rekomendacijomis turi būti 100 km/h , tačiau ši vertė nėra būtina. Įvertinus rekomenduojamo greičio vertę nuspręsta, kad Panevėžio mieste ir jo apylinkėse nėra tokios uždaros erdvės ar aikštelės, kurioje būtų galima išvystyti tokį greitį, juo važiuoti tam tikrą laiko tarpą ir tuo pat metu atlikti manevrą. Todėl nuspręsta, kad tyrimas bus atliekamas bendrojo naudojimo mažai apkrautuose užmiesčio keliuose, kuriuose leistini važiavimo greičiai yra 70 ir 90 km/h . Standarte pažymima, kad atliekant testą keliais skirtingais greičiais jų skirtumas turi būti 20 km/h . Atsižvelgus į atliktų tyrimų duomenis ir važiavimo greičius nuspręsta, kad šis testas bus atliekamas 60 ir 80 km/h greičiais. Kadangi transporto priemonės važiavimo greitis testo metu turi būti pastovus, pasinaudota greičio palaikymo sistema – autopilotu.

Tyrimo metu automobilio vairas turi būti pasukamas ir gražinamas į pradinę padėtį kiek galima greičiau. Tokiu atveju automobilis važiuojantis tiesiai pastoviu greičiu veikiamas atsiradusių skersinių reakcijų keičia padėtį ne tik išilgine, bet ir skersine kryptimi. Atsiradusios skersinės reakcijos veikia tam tikrą laiko tarpą. Kadangi jėga priklauso nuo masės, kuri mūsų atveju nekinta, ir skersinio pagreičio, matuojamas skersinio pagreičio kitimas laike tol, kol jo vertė tampa lygi 0. Tyrimo metu vairo pasukimo kampas yra keičiamas ir stebimas jo poveikis skersinio pagreičio dydžiui, kuris tiesiogiai proporcingas skersinei reakcijai. Standarte nurodoma, kad vairo pasukimo kampas gali būti pasirenkamas laisvai todėl pasirinkta, kad testo metu vairas bus pasukamas: 30° , 45° , 60° ir 75° kampais.

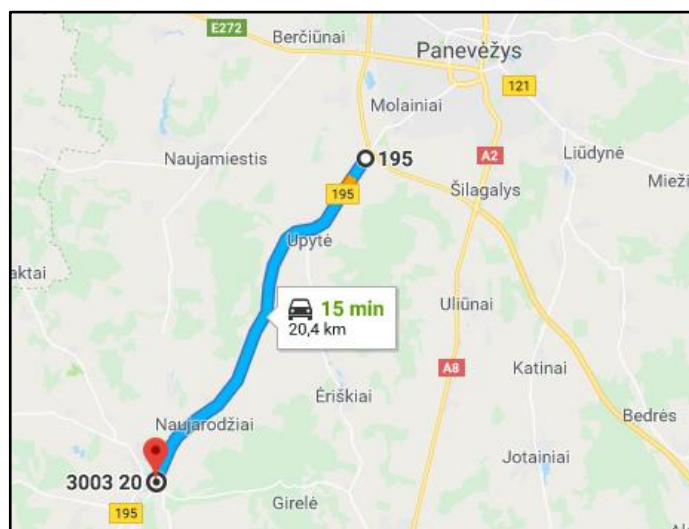
Nuspręsta, kad šio bandymo metu bus nagrinėjamas kelio dangos įtaka automobilio skersinėms reakcijoms ir stabilumui. Todėl tyrimas atliekamas važiuojant keturiomis skirtingomis kelio dangomis:

- Sausas asfaltas
- Šlapias asfaltas
- Asfalto – žvyro danga (vienos pusės automobilio ratai važiuoja asfaltu, o kiti kelkraščiu – žvyru)
- Žvyro danga

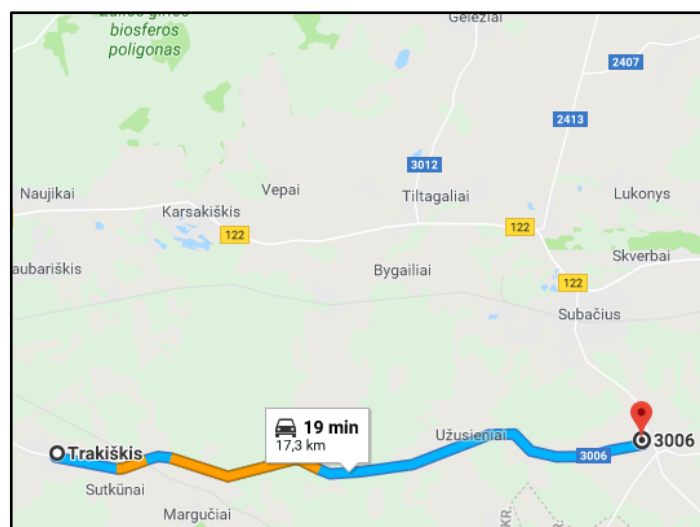
Kaip jau buvo minėta tyrimas atliktas bendro naudojimo keliuose. Tyrimams važiuojant sausu, šlapiu ir asfalto – žvyro dangomis atlikti buvo pasirinkta kelio Panevėžys – Krekenava atkarpa (žr. 25 pav.) Remiantis Lietuvos kelių techniniu reglamentu KTR 1.01:2008 „Automobilių keliai“ [19] šis kelias priskiriamas V kategorijos keliams, turintiems po vieną eismo juostą skirtingomis važiavimo kryptimis, dangos tipas – asfaltas, leidžiamas važiavimo greitis 70 ir 90 km/h . Tyrimai važiuojant žvyro danga buvo atliekami kelyje tarp Trakiškio ir Subačiaus (žr. 26 pav.), kuris priskiriamas I_v kategorijai. Šis kelias turi

po vieną važiavimo juostą skirtingomis kryptimis, dangos tipas – žvyras, o leistinas važiavimo greitis 70 km/h.

Automobilio apkrovų atvejai išlieka tie patys: automobilis su vairuotoju, svorio pasiskirstymas priekinės / galinės ašių atžvilgiu – 52 / 48; automobilis su keleiviais – 55 / 45; automobilis su kroviniu – 49 / 51. Todėl nagrinėjant transporto priemonės stabilumą ribinės skersinio pagreičio vertės išlieka tos pačios. Būtent ribinės vertės leis įvertinti automobilio stabilumą kiekvienu atveju.



25 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo kelias Panevėžys – Krekenava



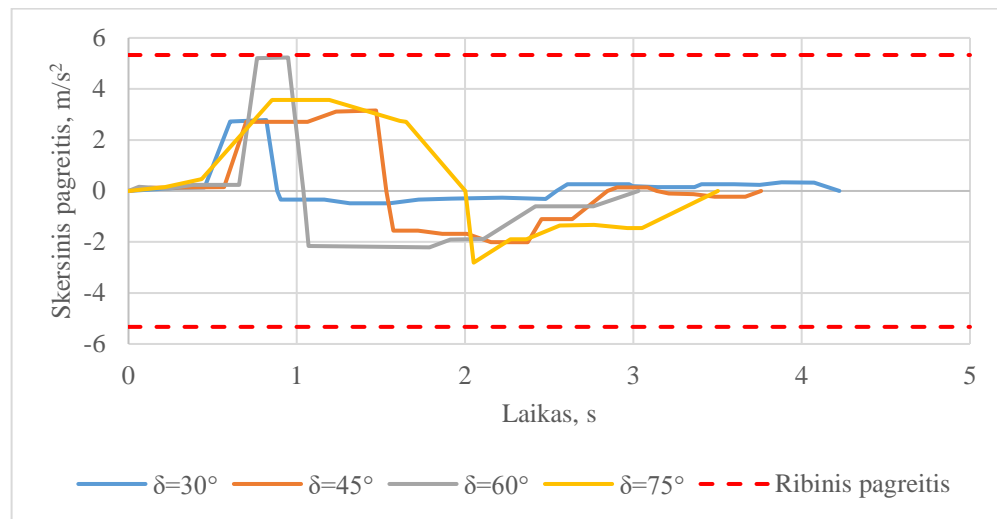
26 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo kelias Trakiškis – Subačius

2.7.1 Trumpalaikės skersinės reakcijos tyrimas važiuojant sausu asfaltu

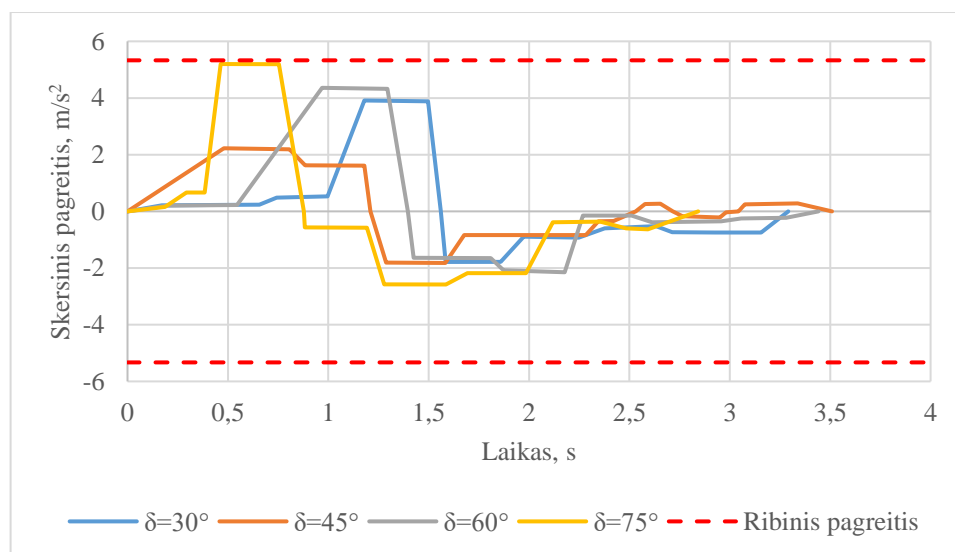
Nagrinėjant automobilio stabilumą trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu pasinaudota ribinėmis skersinio pagreičio reikšmėmis, kurios nustatytos nusistovėjusio būvio tyrimo metu. Priklausomai nuo transporto priemonės svorio pasiskirstymo ašių atžvilgiu ribinės skersinio pagreičio vertės važiuojant sauso asfalto danga yra šios:

- $5,33 \text{ m/s}^2$ – svorio pasiskirstymas priekinės / galinės ašių atžvilgiu yra 55 / 45;
- $5,89 \text{ m/s}^2$ – svorio pasiskirstymas priekinės / galinės ašių atžvilgiu yra 52 / 48;
- $6,08 \text{ m/s}^2$ – svorio pasiskirstymas priekinės / galinės ašių atžvilgiu yra 49 / 51.

Tyrimo metu, kai transporto priemonė yra su keleiviais, skersinio pagreičio kitimas laike važiuojant 60 km/h greičiu pateiktas 27 pav., o 80 km/h – 28 pav. Didžiausia skersinio pagreičio vertė važiuojant 60 km/h greičiu – $5,23 \text{ m/s}^2$, kai vairo pasukimo kampas yra 60° . Važiuojant 80 km/h greičiu didžiausias skersinis pagreitis pasiektas, kai vairo posūkio kampas – 75° , o jo vertė – $5,2 \text{ m/s}^2$. Įvertinus didžiausias skersinio pagreičio reikšmes ir tai, kad neviršijamas ribinis skersinis pagreitis, galima teigti, kad automobilis su keleiviais, kuriuo važiuojant 60 km/h ir 80 km/h greičiais atliekant staigų vairo pasukimą, kelyje išlieka stabilus.

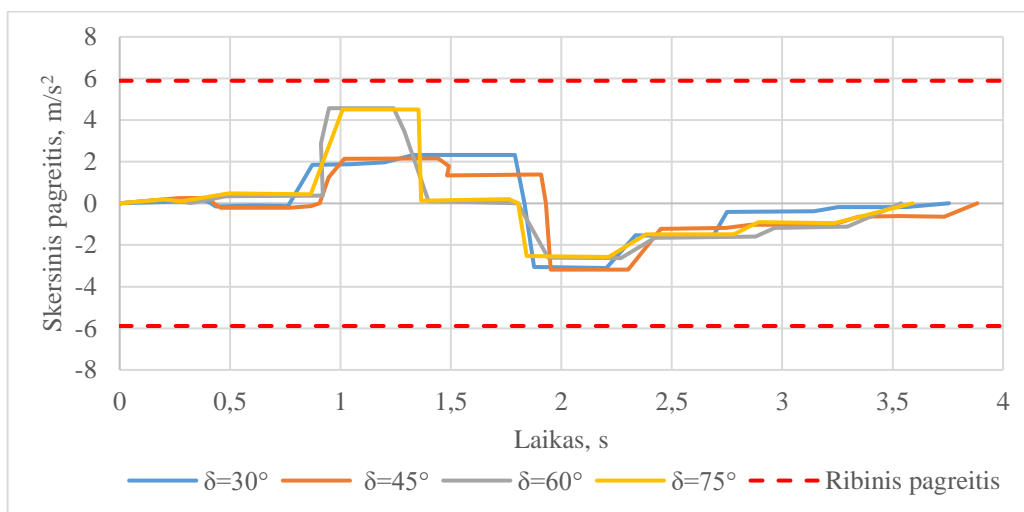


27 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant sausu asfaltu 60 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirstymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 55/45

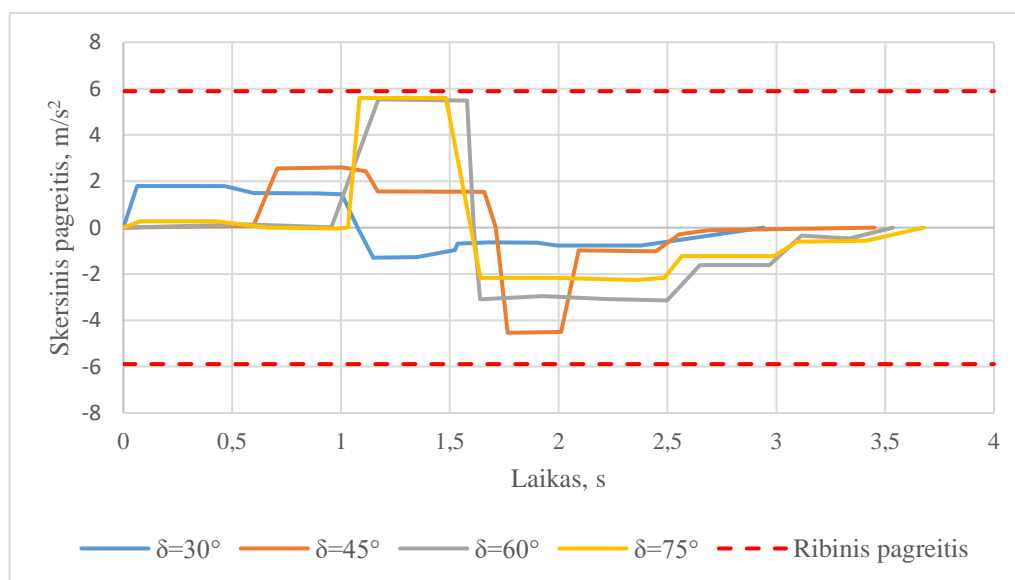


28 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant sausu asfaltu 80 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirstymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 55/45

Transporto priemonės su vairuotoju, kai svorio pasiskirstymas priekinės / galinės ašių atžvilgiu yra 52 / 48, tyrimo metu užfiksuoto skersinio pagreičio kitimas laike važiuojant 60 km/h greičiu pateiktas 29 pav., 80 km/h – 30 pav. Automobiliui važiuojant 60 km/h greičiu atlikus staigaus vairo pasukimo veiksmą didžiausia užfiksuota skersinio pagreičio vertė – $4,57 \text{ m/s}^2$, kai vairo pasukimo kampas δ yra 60° . Kadangi užfiksuotas skersinis pagreitis neviršija ribinės vertės automobilis laikomas stabiliu. Didžiausia užfiksuota skersinio pagreičio vertė – $5,6 \text{ m/s}^2$, važiuojant 80 km/h greičiu, kai $\delta=75^\circ$. Ribinė skersinio pagreičio vertė neviršija todėl galima teigti, kad transporto priemonė važiuojant 80 km/h greičiu ir atliekant staigaus vairo pasukimo manevrą yra stabili.

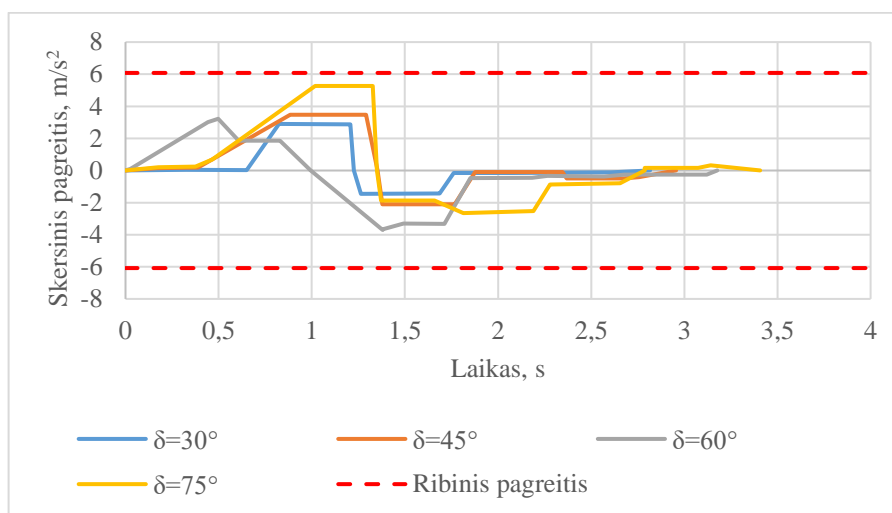


29 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant sausu asfaltu 60 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirstymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 52/48

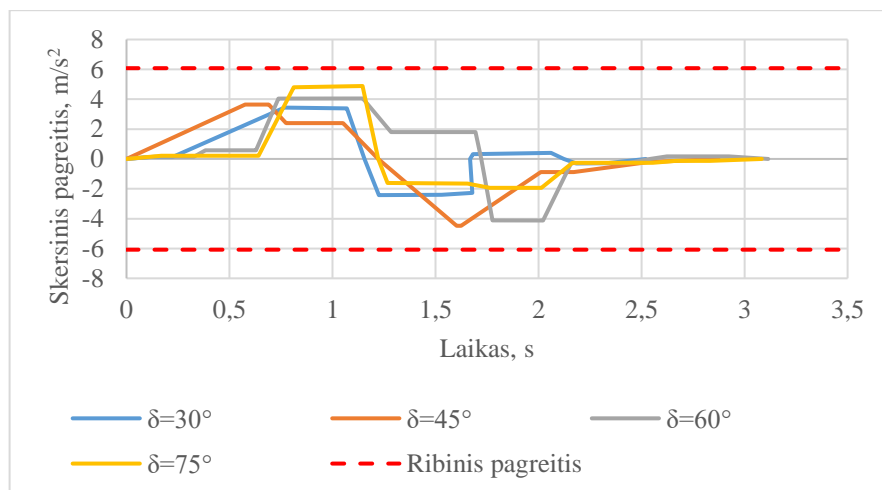


30 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant sausu asfaltu 80 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirstymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 52/48

Transporto priemonės su krovinio skersinio pagreičio kitimo laike kreivės, kai svorio pasiskirstymas priekinės / galinės ašių atžvilgiu yra 49 / 51, pateiktos 31 ir 32 pav., kai važiavimo greitis atitinkamai yra 60 km/h ir 80 km/h. Didžiausios skersinio pagreičio vertės tiek 60 km/h, tiek 80 km/h greičiais pasiektos, kai vairo posūkio kampas – 75° . Kadangi skersinis pagreitis 60 km/h – $5,28 \text{ m/s}^2$ ir 80 km/h – $4,88 \text{ m/s}^2$ yra mažesnis nei ribinis skersinis pagreitis – $6,08 \text{ m/s}^2$, galima teigti, kad automobilis, kurioje bagažinėje yra vežamas krovinys, atliekant trumpalaikės skersinės reakcijos tyrimą išlieka stabilus.



31 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant sausu asfaltu 60 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirstymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 49/51



32 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant sausu asfaltu 80 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirstymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 49/51

Įvertinus trumpalaikės skersinės reakcijos tyrimo metu gautus duomenis, skersinio pagreičio kitimo laike grafikus kiekvienu transporto priemonės apkrovos atveju galima teigti, kad automobilis išlieka stabilus atlikus staigaus vairo pasukimo manevrą. Tokia išvada daroma todėl, kad užfiksuotos didžiausios skersinio pagreičio vertės neviršija ribinio skersinio pagreičio verčių, kurios gautos atlikus nusistovėjusio būvo tyrimo metu.

2.7.2 Trumpalaikės skersinės reakcijos tyrimas važiuojant šlapia asfaltu

Tyrimo metu transporto priemonė važiuoja šlapio asfalto danga. Kelio paviršius tyrimo metu yra lygus todėl sumažėja akvaplaningo tikimybė. Kadangi padangų sukibimas su sausa kelio danga yra geresnis palyginus sukibimą su šlapia turime įvertinti tai, kad transporto priemonės stabilumas važiuojant šlapia asfaltu bus prastesnis. Todėl ribinės skersinio pagreičio vertės, kai kelio danga yra sausas asfaltas tampa netinkamos atliekant šią tyrimo dalį. Norint įvertinti automobilio stabilumą ant šlapio asfalto dangos reikia naujų ribinių pagreičio verčių. Ribinio pagreičio apskaičiavimui pasinaudota literatūroje pateikti kelio dangos sukibimo koeficientai, kai transporto priemonės važiavimo greitis 60-80 km/h [5 p. 168]:

- Sausas asfaltas – $\mu=0,7\dots0,9$;
- Šlapias asfaltas – $\mu=0,4\dots0,6$;

Kadangi automobilio padangų sukibimo savybės didėjant automobilio greičiui prastėja, sukibimo koeficiento reikšmė yra didesnė važiuojant mažesniu greičiu, o važiuojant didesniu greičiu – mažesnė. Todėl priimta, kad 60 km/h greičiu sukibimo koeficiento reikšmė: važiuojant sausu asfaltu – 0,9, o šlapia – 0,6. Kai greitis yra 80 km/h sukibimo koeficientas: sausu asfaltu – 0,7; šlapia – 0,4. Turimos ribinės skersinio pagreičio reikšmės važiuojant sausu asfaltu ir sukibimo koeficientai leidžia apskaičiuoti ribines skersinio pagreičio reikšmes:

$$a_{ribš} = \frac{\mu_s}{\mu_s} \cdot a_{ribs} \quad (50)$$

čia $a_{ribš}$ – ribinis skersinis pagreitis, kai danga – šlapias asfaltas, m/s^2 ; μ_s – šlapio asfalto sukibimo koeficientas; μ_s – sauso asfalto sukibimo koeficientas; a_{ribs} – ribinis skersinis pagreitis, kai danga – sausas asfaltas, m/s^2 .

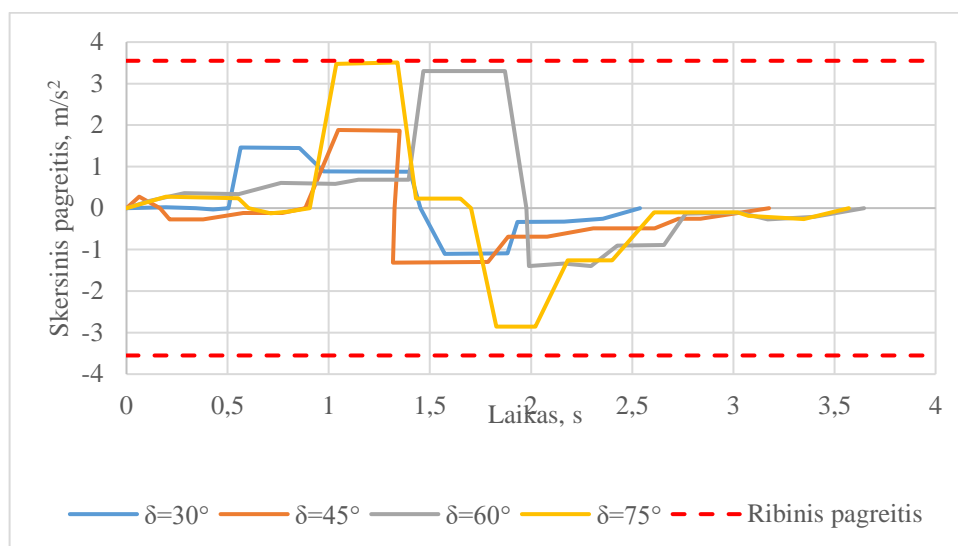
Pasinaudojus (50) formule apskaičiuotos ribinės skersinio pagreičio vertės, kuriomis vertinamas automobilio stabilumas, važiuojant šlapio asfalto danga kiekvienu apkrovos atveju ir skirtingais važiavimo greičiais pateikiamos 7 lentelėje.

7 lentelė. Ribinės skersinio pagreičio vertės važiuojant šlapia asfaltu

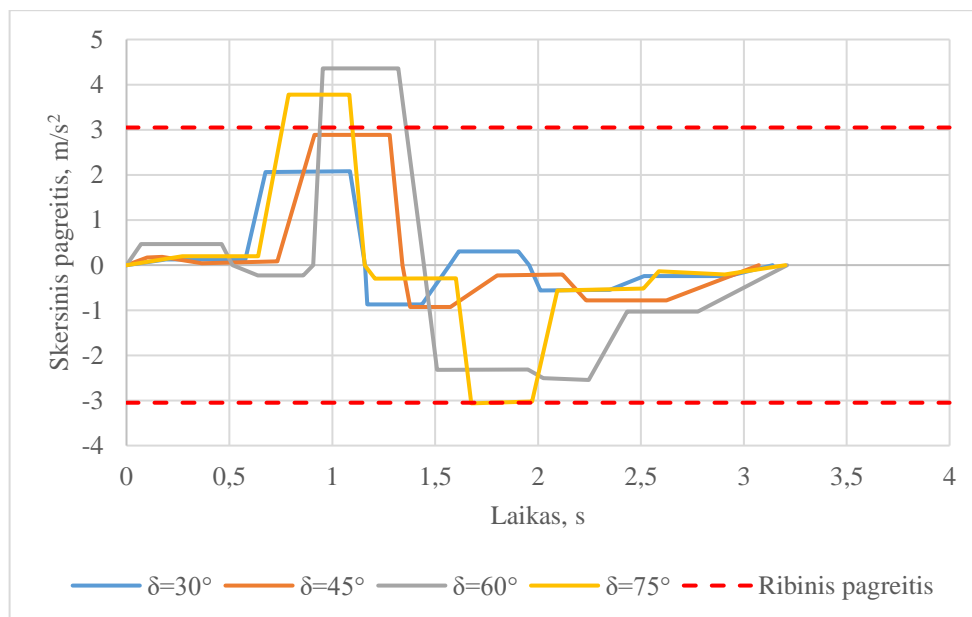
Apkrovos metodas	Važiavimo greitis, km/h	Ribinis skersinis pagreitis, m/s^2
Transporto priemonė su keleiviais	60	3,55
	80	3,05
Transporto priemonė su vairuotoju	60	3,93
	80	3,37
Transporto priemonė su kroviniu	60	4,05
	80	3,47

Transporto priemonės su keleiviais apkrovos atveju važiuojant šlapio asfalto kelio danga trumpalaikės skersinės reakcijos tyrimo metu užfiksuoto skersinio pagreičio kitimo laike grafikai pateikiami 33 ir 34

pav. Automobiliui važiuojant 60 km/h greičiu didžiausia skersinio pagreičio vertė – 3,51 m/s², kai vairo posūkio kampas – 75°. Didžiausias skersinis pagreitis – 4,36 m/s² užfiksuotas važiuojant 80 km/h greičiu, kai vairo pasukimo kampas – 60°. Šiuo atveju viršijama ribinio pagreičio vertė. Taip pat ribinė vertė viršijama ir tuomet, kai $\delta=75^\circ$, o skersinis pagreitis – 3,78 m/s². Įvertinus tyrimo duomenis galima teigti, kad transporto priemonės su keleiviais apkrovos metu važiuodama 80 km/h greičiu atlikus staigius vairo pasukimus 60° ir 75° kampais praranda stabilumą.



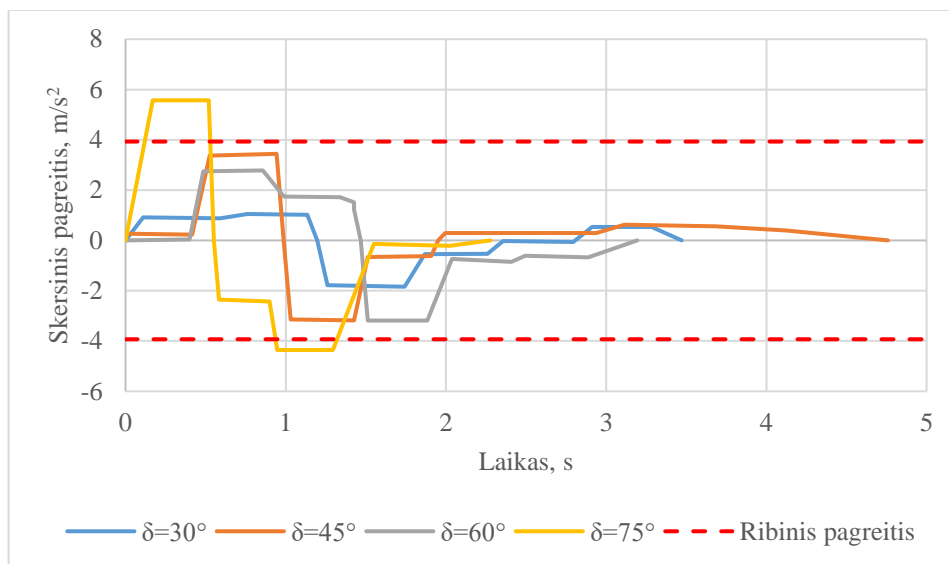
33 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant šlapiu asfaltu 60 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 55/45



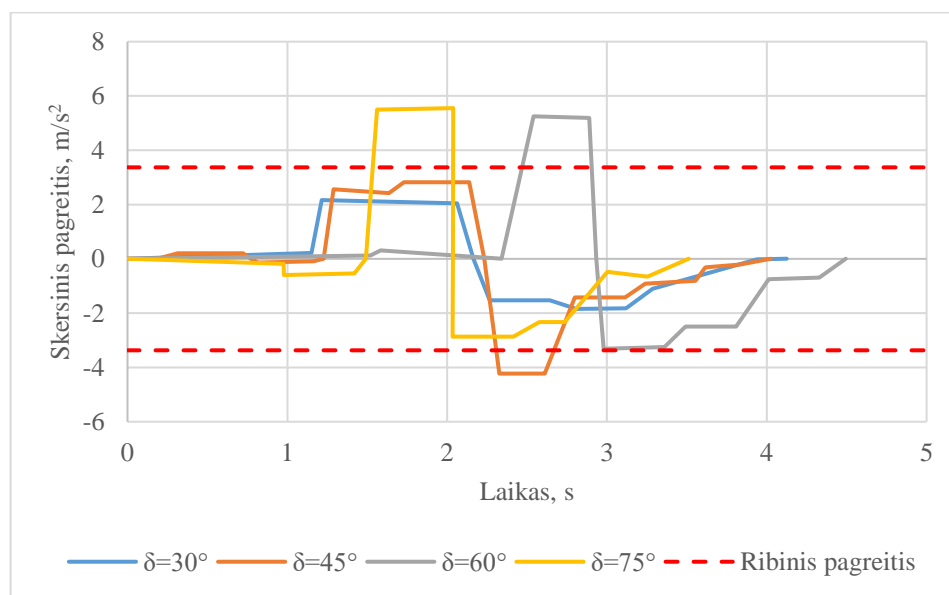
34 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant šlapiu asfaltu 80 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 55/45

Transporto priemonės su vairuotoju apkrovos atveju svorio centro skersinio pagreičio grafikai važiuojant 60 ir 80 km/h greičiais šlapiu asfaltu pateikiami 35 ir 36 pav. Kai važiavimo greitis 60 km/h, užfiksuotas

didžiausias skersinis pagreitis – $5,57 \text{ m/s}^2$, kai vairo pasukimo kampas – 75° . Kadangi užfiksuota skersinio pagreičio vertė yra didesnė nei ribinė toks atvejis laikomas nestabiliu. Transporto priemonei važiuojant 80 km/h greičiu užfiksuoti 3 ribinio pagreičio viršijimo atvejai: kai $\delta = 45^\circ$ skersinis pagreitis – $4,23 \text{ m/s}^2$; $\delta = 60^\circ$ – $5,25 \text{ m/s}^2$; $\delta = 75^\circ$ – $5,55 \text{ m/s}^2$. Įvertinus tyrimo metu užfiksuotas ir ribinio pagreičio vertes galima teigti, kad transporto priemonė važiuojant 80 km/h greičiu atlikus staigų vairo pasukimą 45° , 60° ir 75° kampais tampa nestabili.



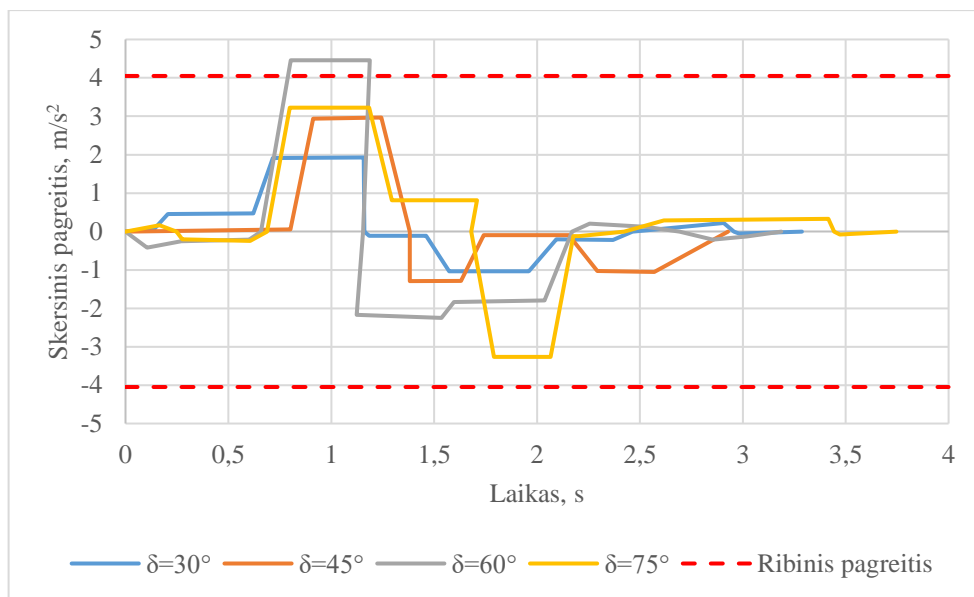
35 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant šlapiu asfaltu 60 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 52/48



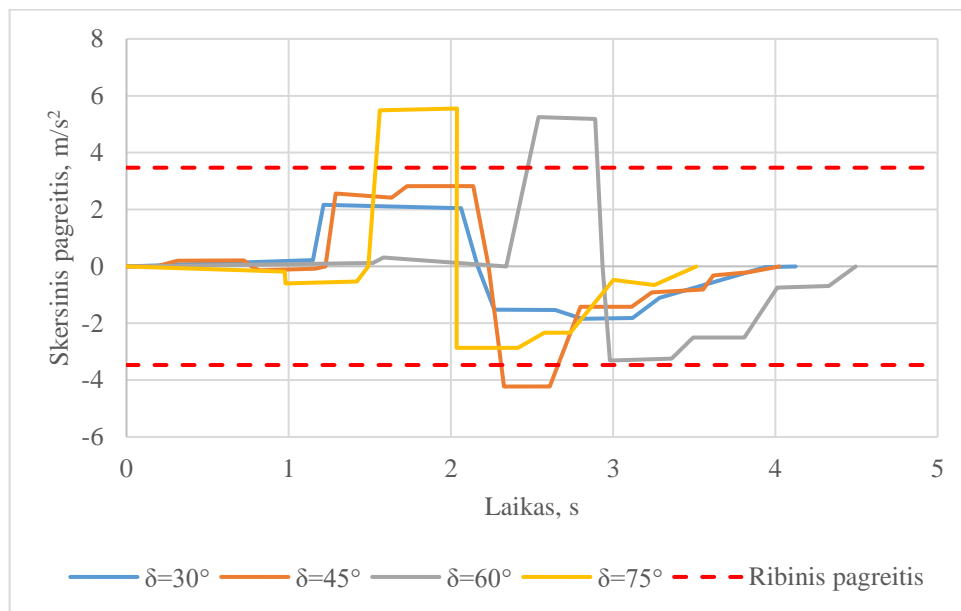
36 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant šlapiu asfaltu 80 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 52/48

Tyrimo metu transporto priemonei važiuojant su kroviniu 60 km/h greičiu užfiksuotas ribinės skersinio pagreičio vertės viršijimas (žr. 37 pav.), kai vairas staigiai pasukamas 60° kampui, o didžiausias skersinis

pagreitis – $4,46 \text{ m/s}^2$. Būtent toks atvejis laikomas nestabiliu. Tačiau važiuojant 80 km/h greičiu transporto priemonės skersinio pagreičio kreivės kerta ribinį pagreitį žyminčią tiesę (žr. 38 pav.), kai vairo posūkio kampai ir skersinio pagreičio vertės: $\delta=45^\circ$ – $4,11 \text{ m/s}^2$; $\delta=60^\circ$ – $4,12 \text{ m/s}^2$; $\delta=75^\circ$ – $4,7 \text{ m/s}^2$. Visais įvardintais atvejais automobilis laikomas nestabiliu.



37 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant šlapiu asfaltu 60 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 49/51



38 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant šlapiu asfaltu 80 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 49/51

2.7.3 Trumpalaikės skersinės reakcijos tyrimas važiuojant kelkraščiu

Tyrimo metu nagrinėsime transporto priemonės stabilumą važiuojant dviem skirtingomis dangomis vienu metu. Vienos pusės automobilio ratai riedės ant sauso asfalto, kitos – žvyro. Svarbu pabrėžti tai, kad įvardintų dangų sukibimo savybės skiriasi. Todėl norint įvertinti stabilumą būtina apskaičiuoti naujas ribines skersinio pagreičio vertes kiekvienu apkrovos atveju ir kiekvienu važiavimo greičiu. Pirmiausiai įvertintas sukibimo koeficientas tarp padangų ir sauso žvyro kelio dangos važiuojant 60-80 km/h greičiais. Žinant sukibimo koeficiento reikšmes, kurios yra 0,5 važiuojant 80 km/h greičiu ir 0,6 – 60 km/h, galime apskaičiuoti ribines skersinio pagreičio vertes važiuojant žvyro danga:

$$a_{ribž} = \frac{\mu_z}{\mu_s} \cdot a_{rib} \quad (6)$$

čia $a_{ribž}$ – ribinis skersinis pagreitis važiuojant žvyru, m/s^2 ; μ_z – žvyro sukibimo koeficientas; μ_s – sauso asfalto sukibimo koeficientas; a_{rib} – ribinis skersinis pagreitis važiuojant sausu asfaltu.

Kadangi transporto priemonė tyrimo metu važiuoja dviem skirtingomis dangomis galima teigti, kad ekvivalentinis skersinis ribinis pagreitis šiuo atveju bus abiejų dangų ribinių pagreičių aritmetinis vidurkis:

$$a_{ribk} = \frac{a_{rib} + a_{ribž}}{2} \quad (52)$$

čia a_{ribk} – ekvivalentinis skersinis pagreitis važiuojant dviem skirtingomis kelio dangomis vienu metu, m/s^2 ; a_{rib} – ribinis skersinis pagreitis važiuojant sausu asfaltu, m/s^2 ; $a_{ribž}$ – ribinis skersinis pagreitis važiuojant žvyru, m/s^2 .

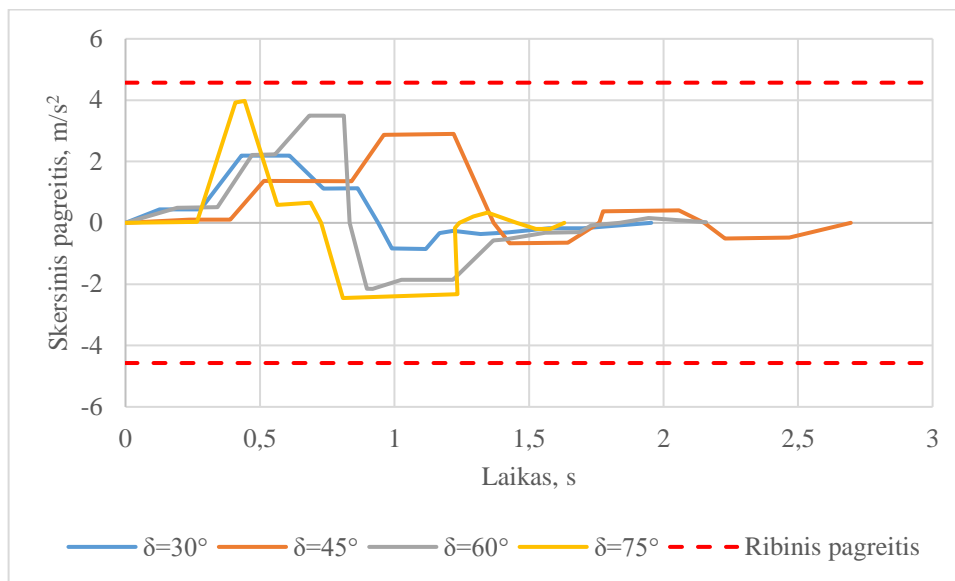
Apskaičiuotos ribinio skersinio pagreičio vertės kiekvienu apkrovos atveju ir kiekvienu važiavimo greičiu pateikiamos 3 lentelėje.

8 lentelė. Ribinės skersinio pagreičio vertės važiuojant kelkraščiu

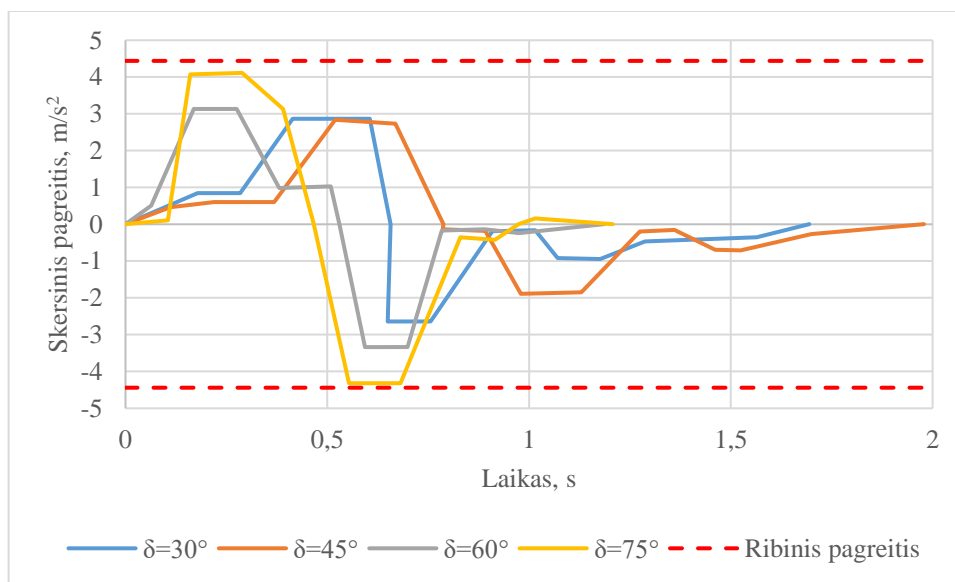
Apkrovos metodas	Važiavimo greitis, km/h	Ribinis skersinis pagreitis, m/s^2
Transporto priemonė su keleivias	60	4,57
	80	4,44
Transporto priemonė su vairuotoju	60	5,05
	80	4,91
Transporto priemonė su kroviniu	60	5,21
	80	5,07

Nagrinėjant transporto priemonės su keleiviais atvejį užfiksuoto skersinio pagreičio kitimo laike grafikas važiuojant 60 km/h greičiu pateikiamas 39 paveiksle, o 80 km/h – 40 paveiksle. Didžiausios skersinio pagreičio vertės – $3,98 m/s^2$ važiuojant 60 km/h ir $\delta=75^\circ$; $4,32 m/s^2$ važiuojant 80 km/h ir $\delta=75^\circ$. Kadangi

didžiausi užfiksuoti pagreičiai neviršija ribinių pagreičio verčių automobilis išlieka stabilus 60 ir 80 km/h greičiais visais staigaus vairo pasukimo kampų atvejais.



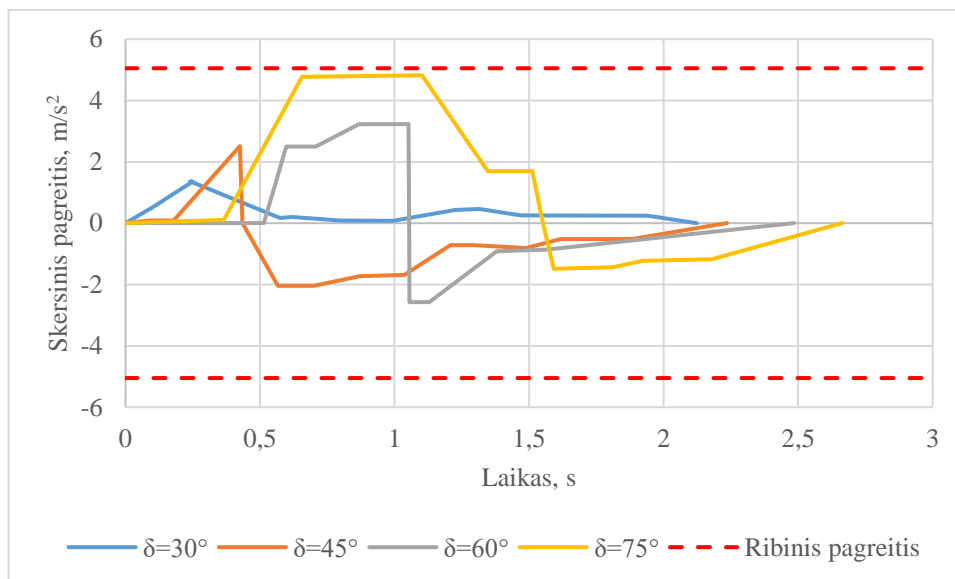
39 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant sauso asfalto – žvyro danga 60 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 55/45



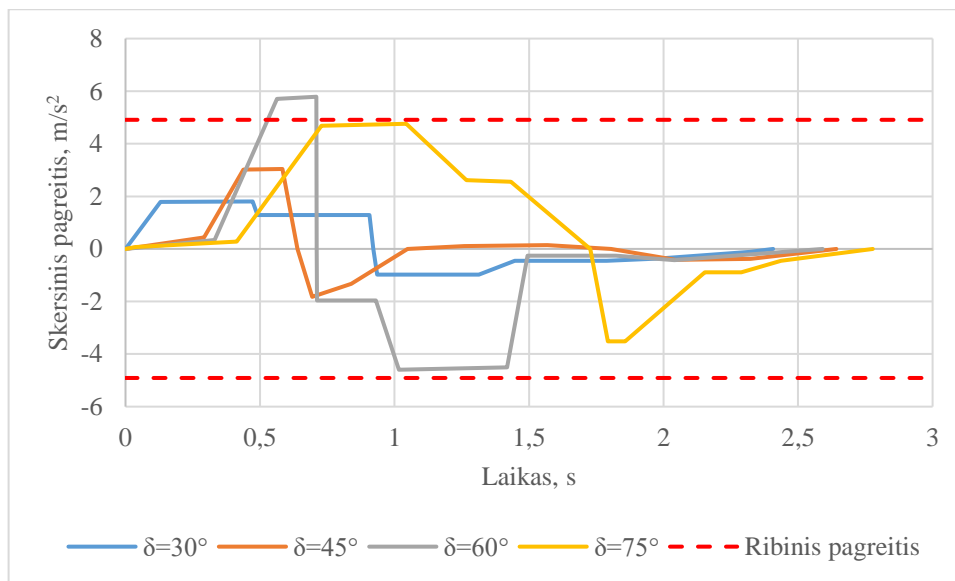
40 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant sauso asfalto – žvyro danga 80 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 55/45

Antruoju apkrovos atveju, kai transporto priemonė vairuojama vairuotojo, tyrimo metu užfiksuoto skersinio pagreičio kitimas laiko atžvilgiu grafikai pateikiami 41 ir 42 pav. Važiuojant 60 km/h greičiu didžiausia skersinio pagreičio vertė – 4,82 m/s², kai vairas yra pasukamas 75° kampu. Kadangi skersinis pagreitis neviršija ribinės vertės (žr. 39 pav.) važiavimą 60 km/h greičiu galima laikyti stabiliu visais

atvejais. Tačiau važiuojant 80 km/h greičiu ir vairą pasukus 60° kampu pasiekta didžiausia skersinio pagreičio vertė – 5,79 m/s² viršija ribinį skersinį pagreitį (žr. 40 pav.). Todėl šiuo atveju transporto priemonė laikoma nestabilia.



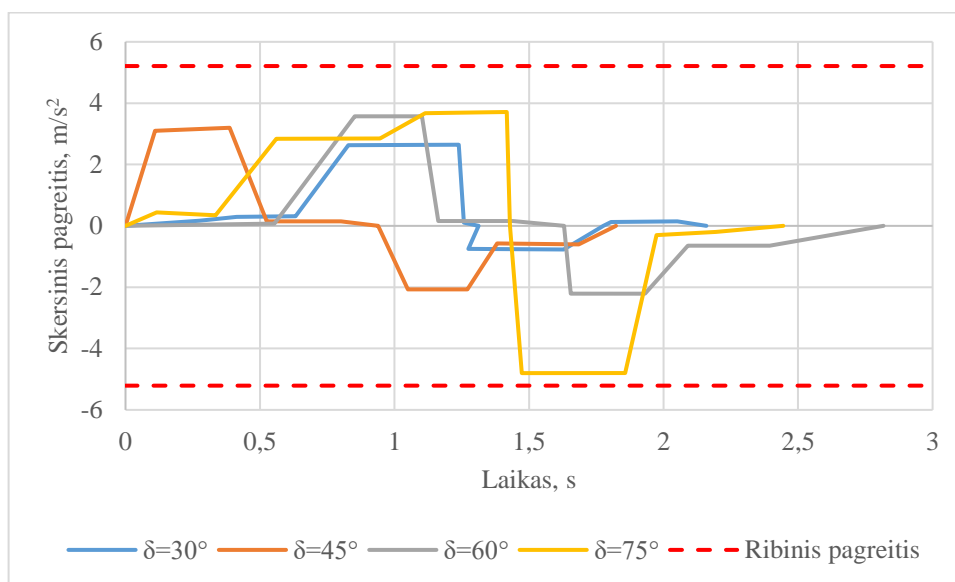
41 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant sauso asfalto – žvyro danga 60 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 52/48



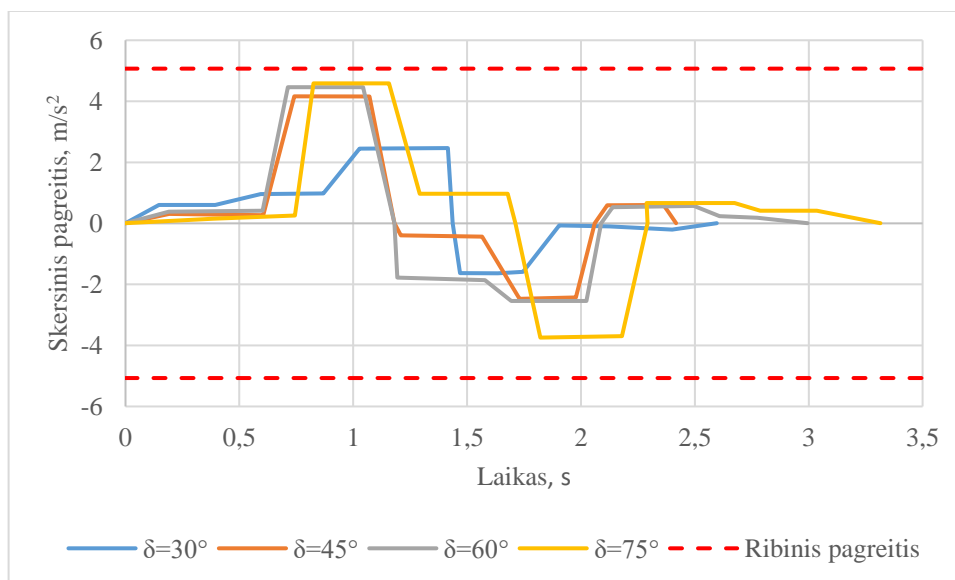
42 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant sauso asfalto – žvyro danga 80 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 52/48

Automobilio su kroviniu apkrovos atveju skersinio pagreičio grafikas važiuojant 60 km/h greičiu pateikiamas 43 pav., o 80 km/h – 44 pav. Atsižvelgus į paveiksluose pateiktus grafikus akivaizdžiai pastebima, kad tyrimo metu užfiksuotas skersinis pagreitis neviršija ribinės skersinio pagreičio vertės, nes didžiausios vertės – 3,71 m/s² 60 km/h greičiu, kai vairas pasukamas 75° kampu; 4,59 m/s² 80 km/h

greičiu, o $\delta=75^\circ$. Todėl galima teigti, kad transporto priemonės su kroviniu apkrovos atveju, automobilis išlieka stabiliu staigiai pasukus vairą visais posūkio kampais tiek 60 km/h, tiek 80 km/h greičiais.



43 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant sauso asfalto – žvyro danga 60 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 49/51



44 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant sauso asfalto – žvyro danga 80 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 49/51

2.7.4 Trumpalaikės skersinės reakcijos tyrimas važiuojant žvyrkeliu

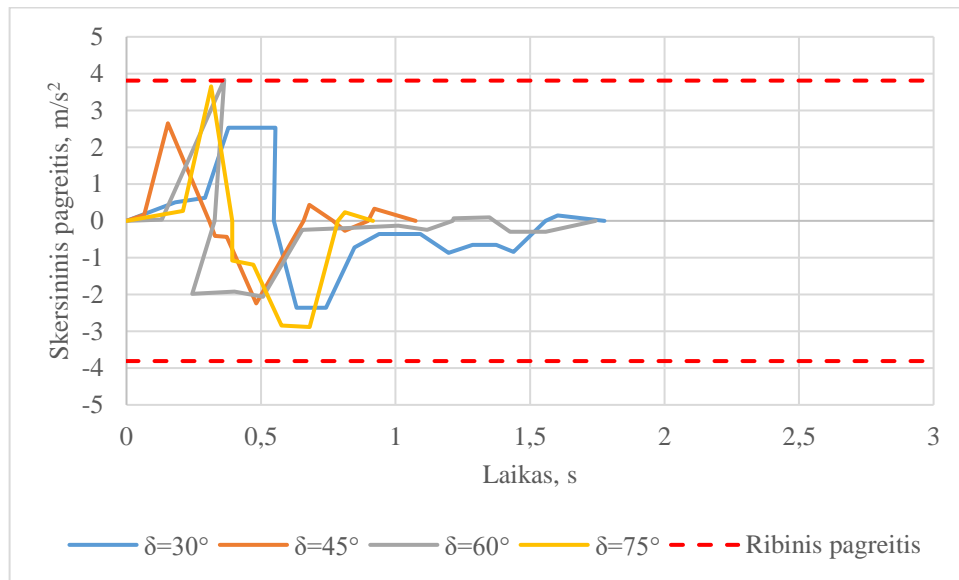
Nagrinėjant transporto priemonės stabilumą važiuojant sauso žvyro danga pirmiausiai reikia įvertinti ribines skersinio pagreičio vertes, kurios apskaičiuotos remiantis 1.7.3 skyriuje pateiktomis žvyrkelio sukibimo koeficiento reikšmėmis ir apskaičiuotos pagal (51) formulę. Ribinės skersinio pagreičio vertės kiekvienu apkrovos atveju ir skirtingais važiavimo greičiais pateikiamos 9 lentelėje. Visais apkrovų atvejų

metu gautos skersinio pagreičio vertės lyginamos su ribinėmis vertėmis taip įvertinant automobilio stabilumą.

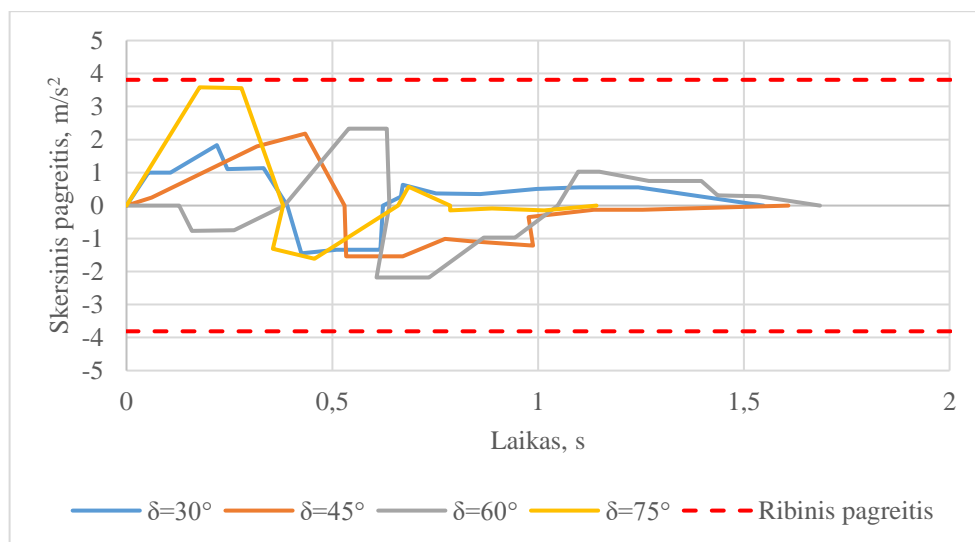
9 lentelė. Ribinės skersinio pagreičio vertės važiuojant žvyrkeliu

Apkrovos metodas	Važiavimo greitis, km/h	Ribinis skersinis pagreitis, m/s^2
Transporto priemonė su keleiviais	60	3,81
	80	3,55
Transporto priemonė su vairuotoju	60	4,21
	80	3,93
Transporto priemonė su kroviniu	60	4,34
	80	4,05

Atliekant tyrimą, kai automobilio svorio pasiskirstymas priekinės / galinės ašių atžvilgiu yra 55 / 45 t.y. transporto priemonė su keleiviais, važiuojant 60 km/h greičiu užfiksuotas didžiausias skersinis pagreitis – $3,83 m/s^2$, kai vairo posūkio kampas – 60° . Šiuo atveju skersinio pagreičio kreivė kerta ribinio skersinio pagreičio tiesę (žr. 45 pav.) todėl jis laikomas nestabiliu. Važiuojant 80 km/h greičiu užfiksuoto skersinio pagreičio grafikai neviršija ribinės vertės (žr. 46 pav.), o didžiausia pagreičio reikšmė – $3,58 m/s^2$, kai $\delta=75^\circ$. Todėl galima teigti, kad transporto priemonė važiuojant 80 km/h greičiu yra stabili visais vairo pasukimo kampų atvejais.

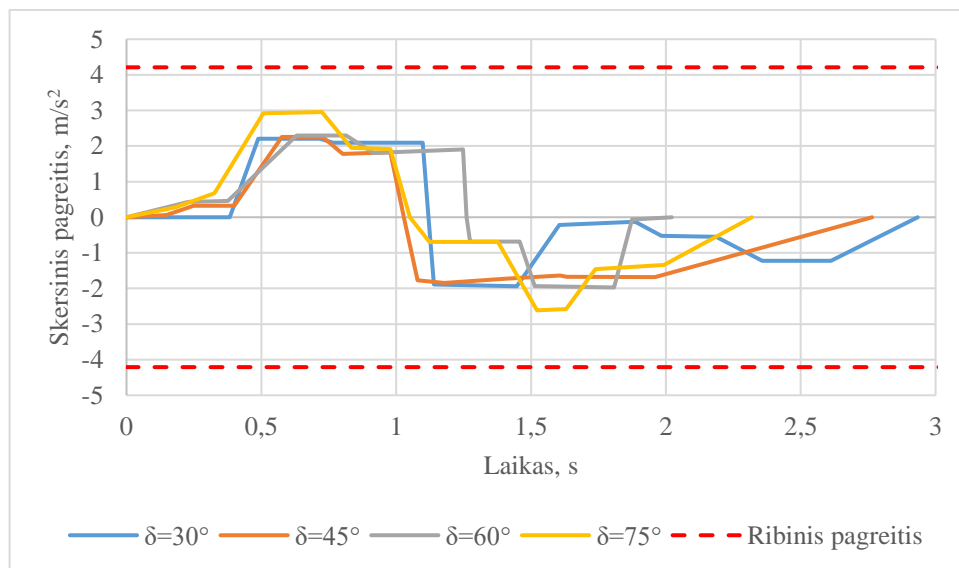


45 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant žvyro danga 60 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirstymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 55/45



46 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant žvyro danga 80 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 55/45

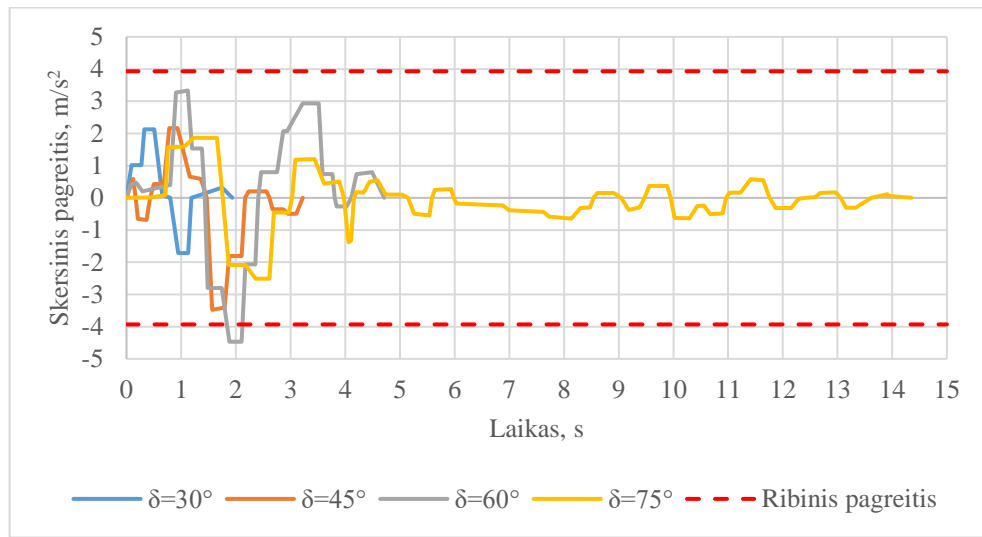
Antruoju apkrovos atveju, kai transporto priemone važiuoja vairuotojas, tyrimo metu užfiksuotas skersinio pagreičio kitimas laike pateikiamas 47 ir 48 paveiksluose. Automobiliui važiuojant 60 km/h greičiu atlikus staigų vairo pasukimą didžiausia užfiksuota pagreičio reikšmė – 2,95 m/s², o vairo pasukimo kampas - 75°. Todėl važiavimas sausu asfaltu 60 km/h greičiu atliekant staigus vairo pasukimo manevrą visais posūkio kampais yra stabilus.



47 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant žvyro danga 60 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 52/48

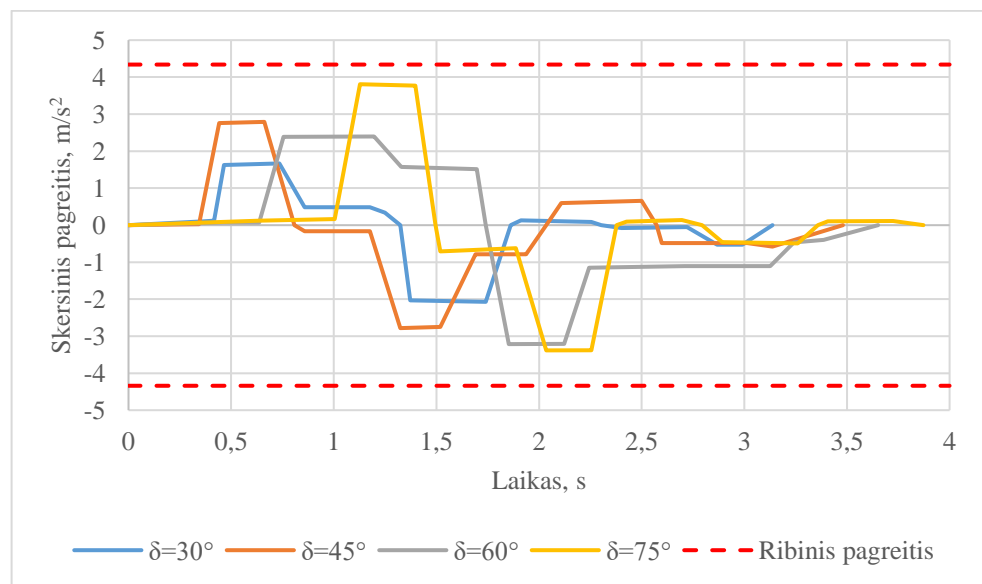
Tačiau važiuojant 80 km/h greičiu transporto priemonė tampa nestabili 2 atvejais, kai vairo posūkio kampai 60° ir 75°. Pasukus vairą 60° kampu automobilio skersinio pagreičio grafikas kerta ribinę vertę žyminčią tiesę (žr. 48 pav.), o didžiausia pagreičio reikšmė – 4,47 m/s². Atliekant staigų vairo pasukimą 75° kampu didžiausias užfiksuotas skersinis pagreitis– 2,51 m/s², nors ši reikšmė neviršija ribinio

pagreičio reikšmės, automobilis tyrimo metu pradėjo blaškytis po kelią dėl neslopstančio skersinio pagreičio veikimo, kuris truko 14,2 s ir buvo numalšintas tik sumažinus važiavimo greitį iki 20 km/h.

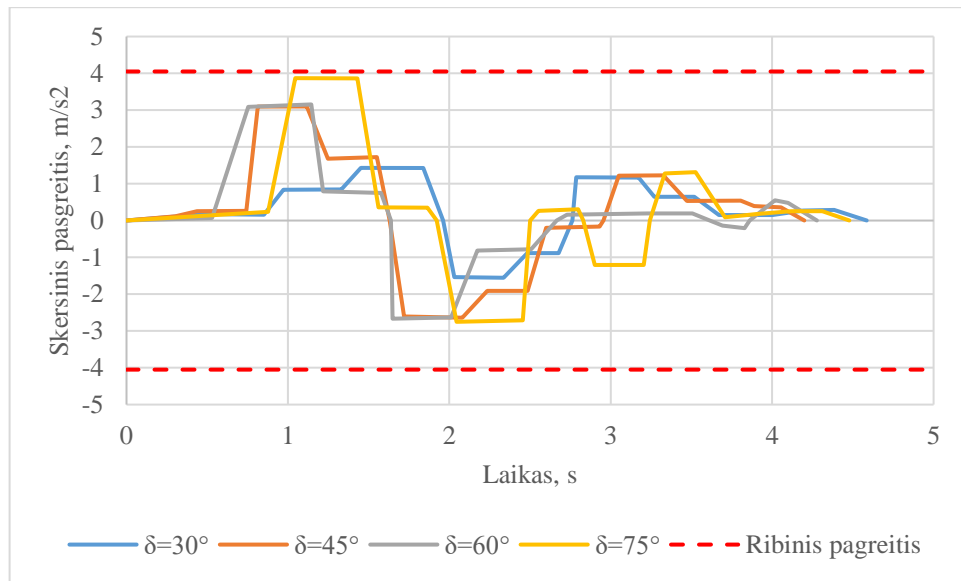


48 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant žvyro danga 80 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 52/48

Trečiuoju apkrovos atveju, kai automobilis yra su krovinium, skersinio pagreičio kitimo laike grafikai važiuojant 60 ir 80 km/h greičiais pateikiami 49 ir 50 pav. Didžiausias skersinis pagreitis užfiksuotas, kai važiavimo greitis 60 km/h ir vairas pasukamas 75° kampū – $3,81 m/s^2$, kuris neviršija ribinio pagreičio vertės. Transporto priemonei važiuojant 80 km/h greičiu visais vairo pasukimo kampų atvejais skersinio pagreičio kitimo laike kreivės nekerta ribinio pagreičio tiesių. Didžiausias skersinis pagreitis 80 km/h greičiu – $3,87 m/s^2$, kai $\delta=75^\circ$. Galima teigti, kad transporto priemonė važiuojant su krovinium 60 ir 80 km/h greičiais visais vairo posūkio kampų atvejais yra stabili.



49 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant žvyro danga 60 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 49/51



50 pav. Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant žvyro danga 80 km/h greičiu skersinio pagreičio kitimas laike, kai svorio pasiskirtymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 49/51

Išvados

Automobilio stabilumas buvo nagrinėjamas trimis apkrovos atvejais:

- Pirmasis apkrovos atvejis – automobilis su keleiviais, svorio pasiskirstymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 55/45;
- Antrasis apkrovos atvejis – automobilis su vairuotoju, svorio pasiskirstymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 52/48;
- Trečiasis apkrovos atvejis – automobilis su kroviniu, svorio pasiskirstymas priekinės/galinės ašių atžvilgiu 49/51.

Automobilio stabilumas buvo nustatomas trimis skirtingais metodais:

- Pirmasis metodas – nusistovėjusio būvio testas važiuojant apskritimu;
- Antrasis metodas – dvipusio judėjimo juostos keitimo testas;
- Trečiasis metodas – trumpalaikės skersinės reakcijos testas;

Eksperimentiškai atlikus automobilio Seat Alhambra stabilumo tyrimus nustatyta, kad:

1. Atlikus nusistovėjusio būvio testą važiuojant apskritimu, kurio vidutinis spindulys yra apie 30 m, nustatyta, kad pirmuoju, antruoju ir trečiuoju apkrovos atvejais važiuojant 50 km/h greičiu pasiekti ribiniai skersiniai pagreičiai (tokį pagreitį pasiekus automobilis pradeda slysti skersine kryptimi) atitinkamai yra $5,33 \text{ m/s}^2$, $5,89 \text{ m/s}^2$ ir $6,08 \text{ m/s}^2$. Didėjant važiavimo greičiui skersiniai pagreičiai didėja, o jų priklausomybės nuo greičio kitimas yra artimas tiesės dėsniai.
2. Svorio centro padėties atstumą nuo priekinės ašies padidinus 3% skersinis pagreitis:
 - Nusistovėjusio būvio testo metu važiuojant 30 km/h greičiu padidėja 0,8%, o 40 km/h ir 50 km/h greičiais atitinkamai sumažėja 7% ir 5%;
 - Dvipusio judėjimo juostos keitimo testo metu padidėja 9%;
 - Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant 60 km/h, 80 km/h greičiais atitinkamai: ant sauso asfalto dangos sumažėja 13%, padidėja 8%; ant šlapio asfalto dangos padidėja 1% ir 27%; ant asfalto – žvyro dangos padidėja 21% ir 34%; ant žvyro dangos sumažėja 23%, padidėja 34%.
3. Svorio centro padėties atstumą nuo priekinės ašies padidinus 6% skersinis pagreitis:
 - Nusistovėjusio būvio testo metu važiuojant 30 km/h, 40 km/h greičiais atitinkamai sumažėja 6%, 3%, o 50 km/h greičiu padidėja 2%;
 - Dvipusio judėjimo juostos keitimo testo metu padidėja 7%;
 - Trumpalaikės skersinės reakcijos testo metu važiuojant 60 km/h, 80 km/h greičiais atitinkamai: ant sauso asfalto dangos padidėja 1%, sumažėja 6%; ant šlapio asfalto dangos sumažėja 19%, padidėja 8%; ant asfalto – žvyro dangos sumažėja 7% , padidėja 6%; ant žvyro dangos sumažėja 0,5%, padidėja 9%.
4. Atlikus trumpalaikės skersinės reakcijos testą automobilis stabiliausias važiuojant sauso asfalto danga (visais bandymais skersinis pagreitis neviršija ribinio pagreičio vertės), nestabiliausias – šlapio asfalto danga (trinties koeficientas yra apie 1,6 kartų mažesnis lyginant su sausos asfalto dangos trinties koeficientu), nes 8 iš 24 bandymų viršijamas ribinis skersinis pagreitis, kuris pirmuoju, antruoju ir trečiuoju apkrovos atvejais važiuojant 60 km/h greičiu atitinkamai yra $3,55 \text{ m/s}^2$, $3,93 \text{ m/s}^2$, $4,05 \text{ m/s}^2$, o

važiuojant 80 km/h – 3,05 m/s², 3,37 m/s², 3,47 m/s²). Važiuojant asfalto – žvyro danga (trinties koeficientas yra apie 1,2 kartų mažesnis lyginant su sausos asfalto dangos trinties koeficientu) ribinio skersinio pagreičio viršijimas įvyksta vieną kartą iš 24 bandymų. Kai važiuojama žvyro danga (trinties koeficientas yra apie 1,45 kartų mažesnis lyginant su sausos asfalto dangos trinties koeficientu) ribinio skersinio pagreičio viršijimas įvyksta 3 iš 24 bandymų.

Literatūros sąrašas

1. MILLIKEN, William F. ir Douglas L. Milliken. *Race Car Vehicle Dynamics*. Warrendale, U.S.: SAE International, 1995. ISBN 1560915269
2. BOGDEVIČIUS, Marijonas. *Transporto priemonių dinamika: mokomoji knyga*. Vilnius: Technika, 2012. ISBN 9786094572968
3. PEČELIŪNAS, Robertas ir Edgaras Sokolovskij. *Automobilių dinamika: mokomoji knyga*. Vilnius: Technika, 2012. ISBN 9786094571848
4. CHRTOS, Jeffrey P. *Use of Vehicle Dynamics Modeling to Quantify Race Car Handling Behaviour*. Ohio State University, 2001.
5. PACEJKA, Hans B. *Tyre and Vehicle Dynamics. Second Edition*. Oxford: Elsevier, 2006. ISBN 9800750669184
6. STRAVOS, Angelis ir kt. Optimal Steering for Double-Lane Change Entry Speed Maximization [interaktyvus] Conference Paper from 12th International Symposium on Advanced Vehicle Control, AVEC' 14, Tokyo Japan [žiūrėta 2019-02-20]. Prieiga per internetą: <https://www.researchgate.net/publication/263274107>
7. DUDĖNAITĖ, Eglė ir kt. Mažų (B1 klasės) automobilių skersinio dinaminio stabilumo analizė. *Mokslas – Lietuvos ateitis* [interaktyvus]. Vilnius: VGTU, 2014, 552-527 [žiūrėta 2019-02-20]. ISSN 2029-2341. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.3846/mla.2014.699>
8. PANKE, D. A. ir N.H. Ambhore. Experimental Testing of Transient and Steady State Handling Characteristics of Passenger Vehicle. *International Journal of Current Engineering and technology* [interaktyvus]. Pune, Oct. 2014, Vol. 4, No. 5 [žiūrėta 2019-02-22]. Prieiga per internetą: <http://inpressco.com/category/ijcet>
9. KEMZŪRAITĖ, Kristina ir kt. Automobilio judėjimo posūkyje tyrimas žiemos sąlygomis. *Mokslas – Lietuvos ateitis* [interaktyvus]. Vilnius: VGTU, 2011 3(6), 25-28 [žiūrėta 2019-02-22]. ISSN 2029-2252.
10. KARLSSON, Anders. *Test Procedures and Evaluation Tools for Passenger Vehicle Dynamics* [interaktyvus]. Gotenburg: Master's thesis, 2014 [žiūrėta 2019-02-25]. ISSN 1652-8557
11. FERNANDEZ, Jorge Gomez. *A Vehicle Dynamics Model for Driving Simulators* [interaktyvus]. Gotenburg: Master's thesis, 2012 [žiūrėta 2019-02-25]. ISSN 1652-8557.
12. CHEN, Jie ir kt. A Novel Pre-Control Method of Vehicle Dynamics Stability Based on Critical Stable Velocity during Transient Steering Maneuvering. *Chinese Journal of Mechanical Engineering* [interaktyvus]. Beijing: 2016, Vol. 29, No. 3 [žiūrėta 2019-02-26]. Prieiga per: Springerlink.com
13. Passenger cars – Steady-state circular driving behaviour – Open-loop test methods (ISO 4138:2012)

14. Passenger cars – Test track for a severe lane-change manoeuvre Part 1: Double lane change – Closed-loop test methods (ISO 3388:2011)
15. Road vehicles – Lateral transient response test methods – Open-loop test methods (ISO 7401:2011)
16. Automobilio Seat Alhambra techniniai parametrai [žiūrėta 2019-03-01]. Prieiga per internetą: <https://www.auto-data.net/en/seat-alhambra-i-7ms-1.9-tdi-115hp-13400>
17. Automobilio ABS/ESP sistemos elementų – jutiklių parametrai [žiūrėta 2019-03-03]. Prieiga per internetą: <https://www.meecs.nl/wp-content/uploads/2017/09/sensors-2-1.pdf>
18. Seat Alhambra 3D CAD paveikslas [žiūrėta 2019-03-05]. Prieiga per internetą: <https://www.3dcadbrowser.com/3d-model/seat-alhambra>
19. Kelių techninis reglamentas KTR 1.01:2008. [žiūrėta 2019-03-05]. Prieiga per internetą: <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.3383DAEA9386>