



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

Deividas Navikas

AUTOMOBILIO SU PRIEKABA AERODINAMIKOS TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

doc. dr. Darius Juodvalkis

KAUNAS, 2017

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

AUTOMOBILIO SU PRIEKABA AERODINAMIKOS TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas
Transporto priemonių inžinerija (kodas 621E20001)

Vadovas

(parašas) doc. dr. Darius Juodvalkis
(data)

Recenzentas

(parašas) doc. dr. Paulius Griškevičius
(data)

Projektą atliko

(parašas) Deividas Navikas
(data)

KAUNAS, 2017



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

(Fakultetas)

Deividas Navikas

(Studento vardas, pavardė)

Transporto priemonių inžinerija, 621E20001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Automobilio su priekaba aerodinamikos tyrimas“
AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 ____ m. _____ d.

Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Deivido Naviko**, baigiamasis projektas tema „Automobilio su priekaba aerodinamikos tyrimas“ 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
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS
TRANSPORTO INŽINERIJOS KATDERA

Suderinta:

Studijų krypties programų vadovas
prof. Artūras Keršys

Transporto inžinerijos katedros vedėjas
doc. Rolandas Makaras

2016 m. vasario mėn. 8 d.

MAGISTRO BAIGIAMOJO PROJEKTO UŽDUOTIS

Išduota studentui: Deividui Navikui

1. Projekto tema: „Automobilio su priekabos aerodinamikos tyrimas“

Patvirtinta: 2017 m. balandžio mėn. 21 d. dekanų įsakymu Nr. V25-11-8

2. Projekto tikslas: Ištirti automobilio su priekaba aerodinamiką.

3. Projekto uždaviniai ir reikalavimai:

- Atlikti automobilių ir jų sąstatų aerodinamikos tyrimų analizę;
- Sudaryti natūrinių eksperimentų metodiką ir parinkti reikiamą jiems įrangą;
- Atlikti natūrinius eksperimentus, kurių tikslas automobilio su priekaba aerodinamikos tyrimas;
- Remiantis eksperimentiniais rezultatais, sudaryti automobilio su priekaba degalų sąnaudų prognozavimo metodiką;
- Nustatyti velkamos priekabos įtaką automobilio degalų sąnaudoms.

5. Užduoties išdavimo terminas: 2016 m. vasario mėn. 8 d.

Užbaigto projekto pateikimo terminas: 2017 m. gegužės mėn. 18 d.

Vadovas: Doc. Dr. Darius Juodvalkis

(vardas, pavardė)

(parašas)

Užduotį gavau: Deividas Navikas

(studento vardas, pavardė)

(parašas)

Navikas, Deividas. Automobilio su priekabos aerodinamikos tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Darius Juodvalkis; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: Technologijos mokslai, Transporto inžinerija (03T)

Reikšminiai žodžiai: *priekabos aerodinamikos tyrimas, priekaba, oro pasipriešinimas, aerodinamika, eksperimentiniai bandymai, tyrimų metodika.*

Kaunas, 2017. 55 p.

SANTRAUKA

Šiame darbe tiriama automobilinės priekabos aerodinamika, kaip junginys susidedantis iš automobilio ir priekabos.

Pirmoje dalyje atlikta automobilių ir jų sąstatų aerodinamikos tyrimų analizė. Šioje dalyje atlikta skirtingų priekabų analizė, skirtingų automobilių analizė, aprašytas automobilinės priekabos įtaka automobiliui.

Antroje dalyje parenkamas tinkamas natūrinių eksperimentinių bandymų metodas. Eksperimentiniams bandymams nustatyti priekabos pasipriešinimo jėga reikalingas sukabinimo įtaisas, kuris galės užfiksuoti tuo metu veikiančią priekabos oro pasipriešinimą. Pagamintas priekabai sukabinimo įtaisas turi atitikti tokį reikalavimą: pasikeisti vietoje originalaus kablo neprarandant atstumo tarp priekabos ir automobilio, kad neturėtų įtakos gautiems rezultatams.

Trečioje dalyje iš gautų eksperimentinių bandymų rezultatų apskaičiuota priekabą veikianti pasipriešinimo jėga, bei apskaičiuotas teorinis priekabos pasipriešinimas. Gauti rezultatai palyginti tarpusavyje.

Ketvirtoje dalyje atlikti ekonominiai skaičiavimai. Iš gautų eksperimentinių bandymų rezultatų nustatyta kaip priekabos pasipriešinimas įtakojo degalų sąnaudoms skirtingiems automobiliams. Bei apskaičiuota kiek papildomai suvartotų degalų kiekį sunaudos automobilis traukiantis priekaba.

Pagal darbe esančius uždavinius, aprašytos išvados.

Navikas, Deividas. The car with a trailer aerodynamics research: Master's thesis in / supervisor assoc. prof. Darius Juodvalkis. The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Research area and field: Technological Science, Transport Engineering (03T)

Key words: trailers aerodynamics research, trailer, air resistance, aerodynamics, experimental testing methods.

Kaunas, 2017. 55 p.

SUMMARY

This work examined the case of the trailer aerodynamics, as a compound, consisting of a vehicle and the trailer.

In the first part of the car and carried out their maximum aerodynamics testing. In this section the different trailers carried out analysis, analysis of different cars, in the case described the influence of the trailer car.

In the second part shall be selected on the proper method of experimental tests to barter. Experimental trials to determine the strength of the resistance of the trailer coupling is required, which will be able to capture at the time operating the trailer air resistance produced by coupling the trailer must meet the following requirement: change the location of the original hook, without losing any of the distance between the trailer and the car, that shouldn't affect the results obtained.

The third part of the test results from the experimental estimated the force acting on the trailer, and the resistance of the calculated theoretical results obtained compared to the resistance of the trailer.

In the fourth paragraph to make the economic calculations. From the experimental results of the test set to the resistance of the trailer was influenced by different fuel consumption cars. And the estimated quantity of fuel consumed as much as an additional full car eye-catching trailer.

In accordance with the objectives described in the conclusions of the work.

Turinys

ĮVADAS	8
1. AUTOMOBILIŲ SU PRIEKABA AERODINAMIKOS TYRIMŲ APŽVALGA.....	9
1.1. Automobilinių priekabų analizė	9
1.1.1. Atviro tipo automobilinė priekaba	11
1.1.2. Uždaro tipo automobilinė priekaba (su žemu tentu)	11
1.1.3. Uždaro tipo automobilinė priekaba (su aukštu tentu)	12
1.2. Automobilinės priekabos įtaka automobiliui	12
1.3. Aerodinaminių savybių tyrimas	13
1.4. Automobilų kėbulų analizė	15
1.5. Oro srauto parametrų nustatymas naudojant kompiuterines programas	17
2. TYRIMŲ METODIKA	19
2.1. Automobilio su priekaba matematinis modelis.....	19
2.2. Pasipriešinimas riedėjimui	20
2.3. Aerodinaminis pasipriešinimas	22
2.4. Eksperimentiniams bandymams naudojamos priekabos.....	23
2.4.1. Priekaba be tento	23
2.4.2. Priekaba su žemu tentu.....	24
2.4.3. Priekaba su aukštu tentu	25
2.5. Lengvojo automobilio aerodinaminis pasipriešinimas.....	26
2.6. Eksperimentiniams bandymams naudojami automobiliai.....	28
2.6.1. Automobilis Volkswagen Passat.....	28
2.6.2. Automobilis Volkswagen Bora	29
2.6.3. Automobilis Opel Frontera.....	30
2.7. Eksperimentiniams tyrimams pagamintas sukabinimo įtaisas	31
2.8. Eksperimentinių tyrimų atlikimo metodika ir sąlygos	34
2.9. Eksperimentinių tyrimų naudota įranga	35
3. EKSPERIMENTINIS AUTOMOBILIO SU PRIEKABA AERODINAMIKOS TYRIMAS.	38
3.1. Gauti rezultatai su priekaba be tento	41
3.2. Gauti rezultatai priekaba su žemu tentu	43
3.3. Gauti rezultatai priekaba su aukštu tentu	46
4. EKONOMINIAI SKAIČIAVIMAI.....	49
4.1. Degalų suvartojimas	49
4.2. Specifinis degalų sunaudojimas	49
4.3. Pasipriešinimo koeficiento įtaka degalų sąnaudoms.....	50
4.4. Degalų sąnaudų prognozavimas.....	50
PALYGINIMAS SU KITU PANAŠIU TYRIMU	53
IŠVADOS	54
NAUDOTA LITERATŪRA.....	55

IVADAS

Šiame darbe tiriama automobilinės priekabos aerodinamika, kaip junginys susidedantis iš automobilio ir priekabos. Automobilis su priekaba naudojamas gabenti kroviniams, todėl kaip junginio aerodinaminės savybės visada yra svarbios. Didelis aerodinaminis pasipriešinimas yra blogas veiksnys degalų sąnaudoms. Problema su kuria yra susiduriama tai priekabos su automobiliu kaip junginio aerodinamikos gerinimo ieškojimo kaina – reikia labai daug lėšų norint atlikti bandymus vėjo tunelyje tikrų matmenų modeliais. Šiuo metu sparčiai tobulėjant kompiuterinei technikai, bei jos programinei įrangai didžioji dalis šių tyrimų gali būti tiesiog atliekami analitiniais skaičiavimais ir bandymais programine įranga, kuri leidžia sumažinti išlaidas.

Pirmame skyriuje apžvelgiama automobilių su priekaba aerodinamikos tyrimų apžvalga.

Antrame skyriuje apžvelgiama tyrimų metodika, kuri bus naudojama ištirti automobilio su priekaba aerodinamika.

Trečiame skyriuje atlikta eksperimentinių bandymų rezultatų analizė.

Ketvirtame skyriuje iš gautų eksperimentinių bandymų rezultatų yra apskaičiuojama, kaip skirtinga automobilinė priekaba įtakoja automobilio ekonomiškumui – degalų sąnaudoms.

Probleminis klausimas – kokia priekabos įtaka automobilio degalų sąnaudoms?

Tyrimo objektas – lengvieji automobiliai su priekabomis.

Darbo tikslas – ištirti automobilio su priekaba aerodinamiką.

Uždaviniai:

1. Atlikti automobilių ir jų sąstatų aerodinamikos tyrimų analizę;
2. Sudaryti natūrinių eksperimentų metodiką ir parinkti reikiamą jiems įrangą;
3. Atlikti natūrinius eksperimentus, kurių tikslas automobilio su priekaba aerodinamikos tyrimas;
4. Remiantis eksperimentiniais rezultatais, sudaryti automobilio su priekaba degalų sąnaudų prognozavimo metodiką;
5. Nustatyti velkamos priekabos įtaką automobilio degalų sąnaudoms.

1. AUTOMOBILIŲ SU PRIEKABA AERODINAMIKOS TYRIMŲ APŽVALGA

1.1. Automobilinių priekabų analizė

Automobilinės priekabos yra labai plačiai naudojamos. Įprastai, automobilinė priekaba yra suprojektuota iš karkaso, pagaminta iš stipraus metalo, pavyzdžiui, plieno arba aliuminio. Priekaba gali turėti vieną ar kelias ašis, kurios yra nustatomos pagal priekabos naudojimo paskirtį, jei priekaba skirta nedideliems kroviniams (iki 750 kg bendro svorio), tai dažniausiai naudojama viena ašis, jei daugiau kaip 750 kg bendro svorio, gali būti naudojamos dvi ašys. Šios priekabos taip pat turi atitikti tam tikrus reikalavimus, kad galėtų dalyvauti eisme.

Automobilinės priekabos stabdžių sistema turi būti tokia, kad, nutrūkus sukabinimo įtaisui, kai priekaba juda, ji būtų stabdoma automatiškai. Šis reikalavimas netaikomas priekabai, kurios didžiausia masė neviršija 1,5 tonos, jeigu šioje priekaboje, be pagrindinio sukabinimo įtaiso, papildomai yra antrinių sukabinimo įtaisų (grandinė, lynas), kurie, atsijungus pagrindiniam sukabinimo įtaisui, neleidžia vilkčiai liesti žemės ir leidžia valdyti priekabos judėjimo kryptį [5]

Taip pat automobilinė priekaba turi turėti du galinius žibintus, kurie nurodo posūkio, stabdžių, gabaritų signalus bei numerio apšvietimo žibintą. Šios priekabos turi turėti priekyje po du baltos spalvos atšvaistus, kiekviename šone po du oranžinės spalvos ir gale du trikampio formos raudonus atšvaistus. Automobilinę priekabą, kurios didžiausioji leistinoji masė yra ne daugiau kaip 750 kg, galima eksploatuoti su B vairuotojo kategorijos pažymėjimu. Jei priekabos didžiausioji leistinoji masė viršija 750 kg bet ne didesnė nei 3500 kg, tai priekabos didžiausioji leidžiamoji masė turi būti ne didesnė už automobilio masę be krovinio, tada bus galima eksploatuoti su BE vairuotojo kategorijos pažymėjimu.

Linginė pakaba yra viena iš pirmųjų pasaulyje. Ji atsirado vos atsiradus pirmosioms transporto priemonėms, lingės jau buvo naudojamos netgi žirgų traukiamose kariatose. Techninis progresas jau išstumia linginę pakabą priekabose iki 750 kg, o iki 3500 kg dominuojančią padėtį užima torsioninė. Prieš 20-30 metų pagamintos priekabos buvo komplektuojamos iš tuo metu gamintų automobilių detalių, todėl jos turėjo žymiai didesnę faktinę keliamąją galią negu nurodyta priekabos gamintojo, turėjo nemenką atsargą. Vakarų Europos gamintojams pradėjus gaminti didesnių gabaritų priekabas su 750 kg torsioninę pakaba, važiuojant ant nelygios dangos keliais nuo perkrovų ji susideformuodavo arba net lūždavo, nes buvo pritaikyta maksimaliai apkrovai eksploatuoti tik ant lygios dangos kelio. Nors to neatsitikdavo su didesnio galingumo sustiprinta ir turinčia atsargą torsionine pakaba, tačiau pasklido gandas, neva linginė pakaba patikimesnė už torsioninę. Siekdami išpiginti linginę pakabą, kai kurie gamintojai supaprastina konstrukciją – amortizatorius montuoja skersai priekabos judėjimo kryptčiai, jo viršutinę dalį klasikiniu būdu tvirtindami ties kėbulo viduriu, o apatinę prie ašies ties linge arba netgi atvirkščiai – viršus prie kėbulo kraštų o apačia ties ašies viduriu. Tokiu atveju amortizatoriai veikia neefektyviai arba beveik išvis neveikia, nes pilnai pakrovus priekabą amortizatorių padėtis

artima horizontaliai. Pasitaiko ir tokių priekabų gamintojų, kurie išvis nemontuoja amortizatorių. Geriausiai amortizatoriai veikia ir efektyviausiai slopina supimąsi, kai jie sumontuoti išilgai priekabos judėjimo kryptį, sujungiant ašį su kėbulu kuo labiau iš išorės. Jei amortizatoriai sumontuoti už ašies ir pasvirę prieš priekabos judėjimo kryptį, jie veikia maksimaliai efektyviai [6].

Torsioninės pakabos privalumai:

- Stabilesnė, kas labai svarbu esant maksimaliai pakrautai priekabai;
- Žemesnė - žemiau priekabos svorio centras;
- Nepriklausoma pakaba - vienam ratui užvažiuavus ant kliūties, apkrova neperduodama kitam ant tos pačios ašies esančiam ratui;
- Lengvesnė;
- Pigesnė.

Torsioninės pakabos trūkumai:

- Kietesnė pakaba, ypač netinka vežti labai lengvus ir dūžtančius ar neatsparius vibracijai krovinius duobėtais keliais, važiuojant tuščia priekaba ji labiau šokinėja;
- Didesnis spaudimas į rėmą - apkrova labiau koncentruota, reikalingas stipresnis rėmas.

Linginės pakabos privalumai:

- Minkštesnė pakaba, tuščia priekaba mažiau šokinėja, ypač tinka vežti lengvus ir dūžtančius bei bijančius vibracijos krovinius važiuojant blogais keliais;
- Mažesnis spaudimas į rėmą - apkrova labiau išskirstyta, pakanka silpnesnio rėmo.

Linginės pakabos trūkumai:

- Mažiau stabili, ypač esant maksimaliai pakrautai priekabai;
- Reikalaujanti daugiau priežiūros: dėvisi amortizatoriai, atramos, išdyla įvorės, rūdyja bei dyla pačios lingės;
- Didesni gabaritai;
- Sunkesnė ir daugiau sudėtinių detalių;
- Aukštesnė - aukščiau svorio centras, dėl ko mažėja stabilumas;
- Priklausoma pakaba- vienam ratui užvažiuavus ant kliūties, apkrova perduodama ir kitam ant tos pačios ašies esančiam ratui;
- Brangesnė.

1.1.1. Atviro tipo automobilinė priekaba

Populiariausios yra atviro tipo priekabos (1.1.1.1 pav.), į kurias galima pakrauti įvairių matmenų krovinius. Atviro tipo priekabų paklausa yra viena iš didžiausių. Pagal tai, ką matome keliuose, šios priekabos tipas yra populiariausias – kadangi yra pigesnės lyginant su priekabomis, kurios yra su tentais. Šios priekabos dažniausiai būna iki 1,0 metro aukščio su bortais nuo žemės pagrindo.



1.1.1.1 pav. Atviro tipo automobilinė priekaba [7]

1.1.1.1 paveikslėlyje pavaizduota priekaba yra pagaminta iš nerūdijančio plieno. Šios priekabos važiuoklė yra standartinė linginė. Turi galinį atidaromą – nuimamą bortą, priekabos dugne yra keturios kilpos, kuriomis galima pritvirtinti krovinį. Ši priekaba su atraminiu ratuku.

1.1.2. Uždaro tipo automobilinė priekaba (su žemu tentu)

Šio tipo automobilinės priekabos (1.1.2.1 pav.) dažniausiai yra naudojamos gabenti tokius krovinius kurie lauko sąlygomis, kaip lietus, sniegas, vėjas, saulės tiesioginiai spinduliai, gali būti pažeisti. Šio tipo priekabose labai didelių matmenų krovinių negalima pakrauti, nes trukdys žemo profilio paaukštinimas su tentu, todėl galima vežti tik ribotų matmenų krovinius, kurie bus po tentu. Šio tipo automobilinės priekabos yra brangesnės lyginant su atviro tipo automobilinėmis priekabomis. Su žemo profilio tentu priekabos maždaug būna nuo 1,0 - 1,4 metro aukščio.



1.1.2.1 pav. Uždaro tipo automobilinė priekaba (su žemu tentu) [8]

Būtent šiai priekabai pagaminti tentą gali kainuoti iki 70 €. Perkant naują priekabą, tentas būna kaip papildoma komplektacija. Priekabos su tentais yra visuomet brangesnės už priekabas be tento.

1.2.2.1 paveikslėlyje pavaizduota priekaba yra pagaminta iš plieno. Ji padengta grunto sluoksniu, kad būtų atsparesnė korozijai, o ant viršaus nudažyta. Šios priekabos važiuoklė yra torsioninė. Turi galinį atidaromą – nuimamą bortą. Priekaba turi paaukštintą karkasą ant kurio dedasi tentas, jis tvirtinasi prie priekabos šonų esančių kilpų.

1.1.3. Uždaro tipo automobilinė priekaba (su aukštu tentu)

Šio tipo automobilinės priekabos (1.1.3.1 pav.) dažnai yra naudojamos gabenti tokius krovinius, kurie lauko sąlygomis, kaip lietus, sniegas, vėjas, saulės tiesioginiai spinduliai, gali pažeisti krovinį. Tokio tipo priekabose galima gana nemažai pakrauti krovinio, kad jis būtų apsaugotas po tentu nuo išorinės aplinkos. Šio tipo automobilinės priekabos yra brangiausios lyginant su atviro tipo automobilinėmis priekabomis. Šio tipo priekabos būna nuo 1,4 – 2,0 metro aukščio.



1.1.3.1 pav. Uždaro tipo automobilinė priekaba (su aukštu tentu) [9]

Šios priekabos rėmas yra sustiprintas, rėmas suvirintas karštai cinkuotas. Ši priekaba yra su torsionine važiuokle. Galinis ir priekinis bortas yra atidaromas ir nuimamas. Tentas šioje priekaboje atsidengia iš visų šonų. Tokiai priekabai pagaminti tentą kuris pavaizduotas 1.1.3.1 paveikslėlyje kainuoja nuo 150 – 200 €.

1.2. Automobilinės priekabos įtaka automobiliui

Kylant degalų kainoms ir alternatyvių išteklių panaudojimui, aerodinamikos svarba automobilių pramonėje darosi vis labiau svarbesnė. Lyginant šių laikų automobilius ir tuos, kurie buvo prieš dvidešimt metų ir senesni, matomas atsiradęs labai didelis skirtumas. Šiuolaikinių automobilių formos

yra aptakesnės ir turinčios mažesnę pasipriešinimą, nes automobilių pramonėje atsirado poreikis sumažinti oro pasipriešinimą. Kad priekaba (1.2.1 pav.) būtų kuo labiau aerodinamiškesnės formos turi būti panašesnės į krentančio lašo formas, nes taip tolydžiau apteka oro srautai. Važiuojant nedideliais greičiais, aerodinamikos svarba nėra didelė, nes didelę dalį viso pasipriešinimo sudaro riedėjimo trintis. Augant važiavimo greičiui, riedėjimo pasipriešinimo koeficientas kinta labai nežymiai, o aerodinaminis: sparčiai didėja. Aerodinaminis pasipriešinimas tiesiogiai priklauso nuo dinaminio slėgio, kuris priklauso nuo srauto greičio kvadrato. Jeigu greitis padidėja du kartus, pasipriešinimo jėga padidėja keturis.



1.2.1 pav. Aerodinamiškesnė automobilinė priekaba, kuri primena lašo forma[10]

Automobiliams tempiant priekabas atsiranda, papildomos pasipriešinimo jėgos. Taip atsiranda problema dėl priekabos stabilumo. Priekabos stabilumas gali nelemti saugumą kelyje. Automobilinės priekabos gali linguoti į šonus, dėl prastos priekabos važiuoklės, netolygaus pakrovimo ar kitų veiksnių. Yra žinoma, kad nestabilios priekabos sukėlė transporto priemonių nelaimingų atsitikimų. Kai kuriais atvejais nestabilios priekabos manevravimas gali net nuversti automobilį nuo kelio. Stabilumas yra ypač jautri mažesnių priekabų būtinybė. Be to, uždaros automobilinės priekabos paprastai turi aukštesnį svorio centrą dėl didesnės talpos, dengiamos tentu ir gali turėti didesnę polinkį tapti nestabilios.

1.3. Aerodinaminių savybių tyrimas

Laboratorinių darbų metu, atliekant tyrimus su sumažintu modeliu, norint gauti tuos pačius aerodinaminius koeficientus yra būtina išlaikyti tokį patį Reynoldso skaičių ir Macho kriterijų. Kadangi automobiliai niekada neviršija 0,3 M ir spūdumo reiškiniai nepasireiškia, šio kriterijaus

paisyti nėra būtina. Reynoldso kriterijus yra daug svarbesnis. Kūno pasipriešinimo koeficientas gali skirtis labai smarkiai esant skirtingoms Reynoldso reikšmėms. Reynoldso skaičius parodo srauto panašumą, jeigu kūno forma yra ta pati. Esant tokiam pačiam Reynoldso skaičiui, aptekėjimo spektras bus identiškas, nepriklausomai nuo realių kūno matmenų. Kartais aerodinaminuose vamzdžiuose nagrinėjami smarkiai sumažinti modeliai ir išlaikyti tokį patį Reynoldso skaičių yra labai sunku ar net neįmanoma. Tarkim jei automobilis su priekaba yra sumažintas 24 kartus, norint aerodinaminame vamzdyje pasiekti tokį patį Reynoldso skaičių kaip esant 60 km/h (16,6 m/s) važiavimo greičiui, srauto greitis turėtų būti 1440 km/h (398 m/s). Bet bandymai esant tokiam greičio srautui vis tiek nebūtų tikslūs, nes Macho kriterijus nebūtų išlaikytas. Esant tokiam srauto greičiui, pasireikštų spūdumo įtaka, formuotųsi garso banga ir aptekėjimo spektrai būtų visiškai nepanašūs. Reynoldso skaičių, nedidinat srauto greičio ir kūno matmenų, galima pakeisti keičiant dujų tankį ar klampą. Bet tam reikalingi brangūs uždari aerodinaminiai vamzdžiai. Kūnų pasipriešinimo koeficientas paprastai nusistovi kai jį apteka turbulentinis srautas. Natūralu, kad esant didesniems Reynoldso skaičiams toks nusistovėjimas turėtų būti būdingas ir kitiems kūnams. Pasiekus tam tikrą Reynoldso ribą, pasipriešinimo koeficientas smarkiai nebekinta ir tada galima spręsti apie realaus kūno pasipriešinimo koeficientą. Paprastai koeficiento nusistovėjimas yra pasiekiamas esant didesniems Reynoldso skaičiams. Jei nėra išlaikomi vienodi Reynoldso skaičiai, tarp modelio ir tikro automobilio, svarbu, kad srauto virsmas (iš laminarinio į turbulentinį) įvyktų bent panašioje vietoje. Tai dar labiau priartina bandomojo srauto spektro panašumą su tikroju. Imituojant automobilių su priekaba aptekėjimą aerodinaminame vamzdyje kelio įtaka yra labai svarbi. Aerodinaminame vamzdyje sienos stovi vietoje, o srautas jas apteka. Dėl trinties į sienelės susidaro pasienio sluoksnis. Kadangi automobilis su priekaba juda keliu, o srautas stovi vietoje, prie pat paviršiaus klamos jėgų nėra, pasienio sluoksnis nesusidaro. Tai turi gana didelę reikšmę pasipriešinimo koeficiento dydžiui. Dėl to, dideliuose aerodinaminuose vamzdžiuose (kur bandomi modeliai nuo 1:5 iki 1:1) yra sumontuoti konvejeriai, ant kurių stovi bandomasis modelis. Konvejerio greitis sutampa su srauto greičiu. Kad pasienio sluoksnis nesusidarytų, prieš pat konvejerį jis yra „nutraukiamas“. Yra ir paprastesnių kelio imitavimo būdų, kaip pasienio sluoksnio atskyrimas arba nutraukimas [3].

Pasipriešinimo, prispaudimo ir šoninio slydimo koeficientai yra apskaičiuojami įprastiniu būdu naudojant automobilio Midelio plotą (plotą žiūrint iš automobilio priekio) kaip atskaitos plotą.

Aerodinaminis vamzdis – tai toks prietaisas, kuris yra naudojamas tirti ir matuoti objektų aerodinamines savybes. Dažniausiai aerodinaminiai vamzdžiai naudojami lėktuvų ir automobilių savybių tyrimams. Automobilių atveju siekiama nustatyti, kokia forma turi mažiausią oro pasipriešinimą, o tiriant lėktuvų savybes svarbios ir kitos savybės, pvz., keliamosios plokštumos profilis, stabilumas, valdymas. Taip pat, aerodinaminame vamzdyje gali būti tiriamas teršalų sklidimas aplinkoje, ieškoma efektyviausios sportininko pozicijos ir aukštų pastatų aerodinaminės savybės. Pastaruoju atveju svarbu nustatyti, ar pastatas audros atveju išlaiko vėjo spaudimą ir

nepradeda svyruoti. Aerodinamiame vamzdyje dažniausiai naudojami tiriamų objektų modeliai. Tai sukelia tam tikrų keblumų: modelis turi būti tiksli objekto kopija, turi būti pakankamas oro greitis, oro tekėjimo režimas turi atitikti režimą natūroje. Modelis neturi užimti daugiau kaip 10 % aerodinaminio vamzdžio skerspjūvio ploto, kuriame atliekami matavimai, tačiau mažinant modelį didėja matavimų paklaidos, todėl automobilių, lėktuvų bandymams skirtų aerodinaminių vamzdžių matavimo skerspjūvis siekia dešimtis m² ploto, o ventiliatorių galia 100 tūkst. kW. Tokias savybes turinčius aerodinaminius vamzdžius gali pasistatyti tik turtingos firmos ar tarptautinės organizacijos. Aerodinaminiai vamzdžiai gali būti atviri ir uždari [3].

Atviruose aerodinamiuose vamzdžiuose panaudotas oras išmetamas į patalpą arba į atmosferą, taip prarandama visa orui šildyti, vėsinti, pūsti sunaudota energija, todėl atviri aerodinaminiai vamzdžiai paprastai būna tik maži – iki kelių šimtų kW galios, keliolikos metrų ilgio [14].

Uždarieji aerodinaminiai vamzdžiai yra sudėtingesni – oras juose cirkuliuoja ratu, todėl taupoma energija. Bandymai tokiuose aerodinamiuose vamzdžiuose yra brangūs, tačiau leidžia tirti mažai žinomus reiškinius [14].

1.4. Automobilių kėbulų analizė

Pirmieji automobiliai buvo sukurti 18 – amžiuje, kai arkliniam vežimui buvo pritaikytas mechaninis variklis – 1769 m. Prancūzijoje arkliniam vežimui pritaikyta garo mašina. Pirmieji pasaulyje automobiliai galėjo išvystyti 2 – 4 km/h greitį. 1814 m. sukurtas vairo mechanizmas, 1821 m. – krumplinė pavara, 1831 m. – diferencialas. 1831 m. Didžiojoje Britanijoje keleiviams pervežti buvo naudojami omnibusai, kurie pasiekdavo iki 30 km/h greitį. 1835 metais buvo sukurta elektros akumuliatorinė pavara [15].

19 amžiuje. pabaigoje automobiliams buvo pradėta taikyti benzininiai varikliai. 1895 m. buvo sukurtos padangos, kurios naudojamos iki šiol. 1903 m. H. Fordas pradėjo serijinę automobilių gamybą JAV rinkoje. 1966 m. buvo sukurti saugos diržai automobiliams, 1989 m. – buvo sukurtas pirmasis dizelinis variklis su elektroniniu valdymu [15].

Šių laikų automobiliai gali turėti rėmą ant kurio bus uždėtas kėbulas ar kabina, dažniausiai naudojami – visureigiams. Kėbulai dažniausiai naudojami lengvuose automobiliuose. Visi automobiliai gali turėti: vidaus degimo variklius arba gali būti hibridai, arba turi tik elektrinius variklius. Automobiliai turėdami tik variklį negali pajudėti, be transmisijos, kuri būna mechaninė ar automatinė. Taip pat automobiliui kelyje reikalinga važiuoklė kuri galėtų sugerti kelio netolygumus ir neprarasti kontrolės esant skirtingiems dangos reljefams. Kad automobilis kelyje galėtų prieš tam tikrą kliūtį sustoti, jam reikalingi stabdžiai, kuriuos kiekvienas gamintojas projektuoja pagal savo automobilį. Kiekvienas automobilis turi vairavimo įtaisą, kurio dėka galime valdyti automobilį

posūkiuose, kelyje. Automobiliai turi ir elektros instaliacija, kurios dėka yra šviesų sistemos, komforto sistemos, saugumo sistemos.

Automobiliai yra skirstomi pagal kėbulų tipus: hečbekas, kabrioletas, kupė, limuzinas, sedanas, universalas, visureigis. Eksperimentiniams bandymams pasirinkau tris skirtingus kėbulus, kuriuos naudosiu: sedanas, universalas ir visureigis.



1.4.1 pav. Sedano kėbulu automobilis Volkswagen Passat B7 [11]

Sedano kėbulu automobiliai (1.4.1 pav.) yra populiariausi, nes šio kėbulu automobilių gatvėse yra daugiausiai. Šio tipo automobilis yra populiariausias keleivinis automobilis kuris turi dvi sėdimas eiles sėdynių. Dažniausiai sedano kėbulu automobiliai būna penkių sėdimų vietų, bet rečiau pasitaiko ir su keturiomis sėdimomis vietomis. Sedano kėbulu automobilis turi atskirą bagažinę, kuri nepriklauso nuo galinio stiklo ir atsidaro bagažinės dangčiu. Automobiliai sedano kėbulu pasižymi tuo kad bagažinė yra atskirta nuo salono, kuri leidžia važiuojant sumažinti багаžo bei galinės automobilio pakabos triukšmą.



1.4.2 pav. Universalio kėbulu automobilis Volkswagen Passat B8 [12]

Universalo kėbulo automobiliai (1.4.2 pav.) yra taip pat populiarius kaip ir sedanai. Universalo kėbulo automobiliai yra praktiškesni už sedanus. Kadangi universaluose yra didesnė bagažinė, o jei dar atlenksime sėdynes, tai dar labiau padidinsime bagažinės talpa. Tačiau šio tipo automobiliuose atsiranda minusų: dėl didelio salono erdvės sunkiau palaikyti pastovų mikroklimatą, dėl atviros bagažinės atsiranda girdimi triukšmai iš galinės automobilio važiuoklės. Universalo kėbulo automobiliai yra sunkesni už sedanus. Galinis universalso dangtis yra linkęs kaupti dulkes bei nešvarumus, todėl galiniuose dangčiuose yra būtinas valytuvas.



1.4.3 pav. Visureigio kėbulo automobilis Volkswagen Touareg [13]

Visureigio kėbulo automobiliai (1.4.3 pav.) yra rečiau sutinkami gatvėse nei sedanai ar universalai. Visureigiai labai gerai įveikia prastus kelius tokius kaip žvyrkeliai ar net bekeles. Visureigiai turi didelį pravažumą dėl savo aukštos prošvaisos ir visų varomų ratų sistemos. Visureigių kėbulai būna aukšti, bagažinė būna gana didelė ir talpi, o atlenkus sėdynes tai dar labiau padidės bagažinės talpa.

1.5. Oro srauto parametrų nustatymas naudojant kompiuterines programas

CFD tipo programos apskaičiuoja oro srauto greitį ir slėgį visuose modelio taškuose. Kad programa atliktų daug skaičiavimų ir gautų tikslius rezultatus, ryšys tarp slėgio, klampumo ir judesio kiekio momento jėgų yra paremtas Navier – Stokes lygtimis. Kad modelis būtų tikroviškesnis reikia, kad oro srautai turėtų pakankamai vietos aptekėti aplink modelį [4].

Siūlinis metodas

Kompiuterine programa apskaičiuotus rezultatus galima patikrinti naudojant aerodinaminiam vamzdyje oro srauto parametrąs nustatyti taikytinus metodus; tiriamasis objektas apklijuojamas siūlais ir yra stebimi bei registruojami vaizdai iš vidaus arba iš šalies. Siūlai tiesiogiai atspindi oro srauto judėjimą toje vietoje: tiesūs siūlai, esantys išilgai srauto, rodo esant laminarinį srautą; besiplaikstantys ar net apsisukę prieš srautą – turbulentinį [4].

Empirinis metodas

Alternatyvus metodas – apskaičiuoti pasipriešinimo koeficientą yra atliekant riedėjimo lėtėjimo bandymus. Tokius bandymus reikia atlikti tiesioje ir horizontalioje kelio atkarpose nevėjuotą dieną. Norint gauti tikslūs rezultatus, tą patį bandymą reikia atlikti į abi puses. Bandymas pradedamas, kai automobilis pasiekia pradinį greitį 80 km/h. (v_1) ir laisva pavara rieda iki tol, kol pasieks 75 km/h (v_2) greitį. Tada išmatuojamas lėtėjimo laikas, per kurį automobilio greitis sumažėjo nuo pradinio v_1 iki v_2 . Naudojama apskaičiuoti vidutinį lėtėjimo pagreitį a_1 ir a_2 [4].

Vidutinio greičio formulė:

$$V_l = \frac{v_{a1} + v_{b1}}{2} \quad (1.5.1)$$

Vidutinio lėtėjimo formulė:

$$a_l = \frac{v_{a1} - v_{b1}}{t} \quad (1.5.2)$$

2. TYRIMŲ METODIKA

2.1. Automobilio su priekaba matematinis modelis

Automobilio ir priekabos junginys gali būti netinkamai eksploatuojamas, velkant didelės masės priekabas (2.1.1 pav.), nei tai numatyta gamintojo reglamentuose. Jei automobilinė priekaba bus perkrauta, gali atsirasti horizontalieji svyravimai važiuojant ant kelio dangos. Tokie nesklaidumai gali sukelti nestabilumą ant kelio dangos, kuris gali nulemti automobilio ar priekabos sugadinimą [3]

Sistemos kinetinė energija:

$$T = \frac{1}{2}m(\dot{q}_1^2 + 2\dot{q}_1L_1\cos\varphi + (4\dot{\varphi})^2 + V^2 + 2VL_1\dot{\varphi}\sin\varphi); \quad (2.1.1)$$

čia m – priekabos masė, q_1 – apibendrinta koordinatė, L_1 – atstumas nuo kablo iki priekabos masių centro, V – judėjimo greitis.

Priekabos potencinė energija:

$$II = \frac{1}{2}kg_1^2; \quad (2.1.2)$$

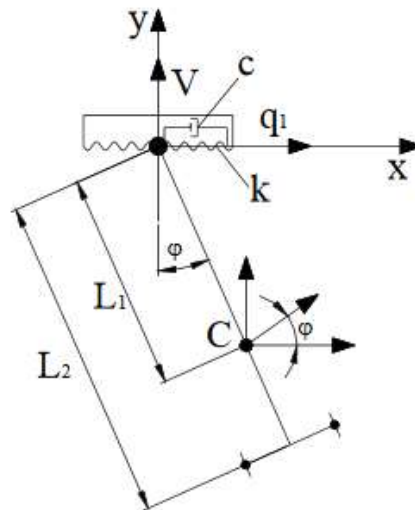
Priekabos disipatyvinė funkcija:

$$\Phi = \frac{1}{2}c\dot{q}_1^2; \quad (2.1.3)$$

Naudodami Lagranžo II laipsnio lygtį, gauname judėjimo lygtis:

$$\begin{cases} (mL_1\cos\varphi)q_1 + \ddot{m}L_1^2\ddot{\varphi} = Q_\varphi; \\ m\dot{q}_1 - mL_1\dot{\varphi}^2\sin\varphi + mL_1\ddot{\varphi}\cos\varphi + kq_1 + c\dot{q}_1 = Q_{q_1}. \end{cases} \quad (2.1.4)$$

čia Q_φ , Q_{q_1} – apibendrintos jėgos.



2.1.1 pav. Automobilinės priekabos masės centrą veikiančių jėgų schema [3]

Skersridės jėga, veikianti ratą, priklauso nuo skersridės kampo δ ir ją galima išreikšti tokiu pavidalu:

$$R_y(\delta) = C_1\delta + C_3\delta^3 + C_5\delta^5; \quad (2.1.5)$$

čia $C_i (i = 1, 3, 5)$ – konstantos.

Jei skersridės kampas δ mažas, tai skersridės kampa δ užrašysime taip:

$$\delta = \frac{L_1 \dot{\varphi} + q_1 \dot{\cos \varphi} + V \sin \varphi}{V \cos \varphi - q_1 \sin \varphi}. \quad (2.1.6)$$

Gautos jėgos išreiškiamos taip:

$$Q_{q_1} = -R_y \cos \varphi; \quad (2.1.7)$$

$$Q_q = -L_2 R_y(\delta). \quad (2.1.8)$$

Galutinė nagrinėjamos sistemos lygčių sistema yra:

$$\begin{cases} m\ddot{q}_1 + (mL_1 \cos \varphi)\ddot{\varphi} + kq_1 + c\dot{q}_1 = 2R_y(\delta)\ddot{\cos} + mL_1\dot{\varphi}^2 \sin \varphi, \\ (mL_1 \cos \varphi)\dot{q}_1 + (L_1^2 m)\varphi = -2R_y(\delta)L_2. \end{cases} \quad (2.1.9)$$

Tarkim, kad $V \gg \dot{q}_1$ ir φ apie 0, tada skersridės kampo ir jėgos išraiškas užrašysime taip:

$$\delta = \frac{L_2 \dot{\varphi} + q_1 + V\varphi}{V} = \varphi + \left(\frac{L_2}{V}\right)\dot{\varphi} + \left(\frac{1}{V}\right)\dot{q}_1; \quad (2.1.10)$$

$$R_y(\delta) = C_1 \delta = C_1 \left(\varphi + \left(\frac{L_2}{V}\right)\dot{\varphi} + \left(\frac{1}{V}\right)\dot{q}_1\right); \quad (2.1.11)$$

$$R_y(\delta) \cos \varphi \approx C_1 \left(\varphi + \frac{L_2}{V}\dot{\varphi} + \frac{1}{V}\dot{q}_1\right) + \dots \quad (2.1.12)$$

Įvertinus anksčiau paminėtas prielaidas, gausime netiesinių diferencialinių lygčių sistemą:

$$m\ddot{q}_1 + mL_1\ddot{\varphi} + CC\dot{q}_1 + kg + 2C_1\left(\varphi + \frac{L_2}{V}\dot{\varphi} + \frac{1}{V}\dot{q}_1\right) = mL_1\dot{\varphi}^2 q; \quad (2.1.13)$$

$$mL_1\dot{q}_1 + (mL_1^2)\ddot{\varphi} + 2C_1L_2(\varphi + b_1\varphi + b_2\dot{q}_1) = 0 \quad (2.1.14)$$

Arba matricinė forma:

$$[M]\{\ddot{q}\} + [C]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = \{F(q, \dot{q})\}, \quad (2.1.15)$$

Norint įvertinti automobilinės priekabos judėjimo stabilumą, reikia nustatyti sistemos savuosius dažnius ir parodyti kaip jie priklauso nuo pagrindinių parametru, kaip: masės m , greičio V , skersridės jėgos C_l [3].

2.2. Pasipriešinimas riedėjimui

Atliekant įprastinius transporto priemonės pasipriešinimo jėgų matavimus, ratams riedant atsižvelgiama į bendrąjį lėtinantį jų poveikį dėl guolių trinties, pasipriešinimo riedėjimui, priekinių ratų suvedimo ir jei yra šlapia kelio danga dėl vandens pasipriešinimo. Nors praktikoje pakanka nustatyti pasipriešinimą riedėjimui, nes tai sudaro didesnę ratų pasipriešinimo dalį.

Ratų pasipriešinimas skaičiuojamas proporcingai statmenai rato apkrovai G :

$$F_R = f_R \cdot G,$$

čia f_R – yra riedėjimo varžos koeficientas.

Šis koeficientas f_R labai priklauso nuo kelio dangos (2.2.1 lentelė)

Pasipriešinimo riedėjimui koeficientai

Kelio danga:	Riedėjimo varžos koeficientas
Betonas, asfaltas, žvyras	0,010 – 0,020
Žvyrkelis	0,040 – 0,080
Birus smėlis	0,15 – 0,30

Kadangi f_R priklauso ne tik nuo kelio dangos, bet ir nuo važiavimo greičio, padangų sandaros, slėgio padangose, padangų skersmens; tačiau jų įtaka nėra tokia didelė, todėl praktikoje esant 100 – 120 km/h greičiui įprastiniuose keliuose f_R gali būti nustatytas 0,015, tačiau atsparumas riedėjimui palyginti su kitais veiksniais vėl yra mažiausiai svarbus [3].

$$F_{pasipriešinimo} = F_r + F_{oro} \quad (2.2.1)$$

$$F_r = f \cdot m \cdot g \quad (2.2.2)$$

$$f = f_0 \left(1 + \frac{v^2}{1800} \right) \quad (2.2.3)$$

čia:

$F_{pasipriešinimo}$ – visa veikianti jėga (N);

F_r – rato pasipriešinimo riedėjimui jėga (N);

F_{oro} – oro pasipriešinimo jėga (N);

f – rato pasipriešinimo koeficientas;

m – priekabos masė (kg);

f_0 – rato pasipriešinimo koeficientas kai rieda asfalto danga;

$f_0 = 0,01$.

2.3. Aerodinaminis pasipriešinimas

$$F_M = 0,778 (B_a H_a); \quad (2.3.1)$$

čia:

B_a - automobilio plotis (m);

H_a - automobilio aukštis (m).

$$F_M = 0,778 (1,814 \cdot 1,748) = 2,47 \text{ m}^2;$$

Apytikslės F reikšmės:

- didelių autobusų – $4 \dots 6,5 \text{ m}^2$;
- sunkvežimių – $2 \dots 5 \text{ m}^2$;
- lengvųjų automobilių – $1,5 \dots 2,8 \text{ m}^2$;
- lenktyninių automobilių – $0,75 \dots 1,5 \text{ m}^2$.

Oro pasipriešinimo jėga:

$$F_{oro} = 0,61 \cdot C_x \cdot F_M \cdot v_i^2; \quad (2.3.2)$$

čia:

C_x – automobilio aerodinaminio pasipriešinimo koeficientas. Automobilio aerodinaminis pasipriešinimo koeficientas;

F_m – automobilio midelio plotas;

v_i^2 – automobilio greitis.

$$C_x = \frac{F_{oro}}{0,61 \cdot F_M \cdot v_i^2}; \quad (2.3.3)$$

2.4. Eksperimentiniams bandymams naudojamos priekabos

2.4.1. Priekaba be tento

Su priekaba be tento (2.4.1.1 pav.) bus atliekami eksperimentiniai bandymai su skirtingais automobiliais. Šios priekabos važiuoklė yra torsioninė.



2.4.1.1 pav. Priekaba be tento

Priekabos kėbulo vidaus matmenys: ilgis 1620 mm, plotis 1520 mm, aukštis 330 mm, atstumas tarp esančių sparnų yra 1045 mm. Kiti priekabos duomenys pateikti 2.4.1.1 lentelėje.

2.4.1.1 lentelė

Priekabos be tento duomenys

Gamybos metai	2002
Ilgis	2621 mm
Plotis	1579 mm
Aukštis	880 mm
Svoris	225 kg
Maksimalus svoris	525 kg

2.4.2. Priekaba su žemu tentu

Su priekaba žemu tentu (2.4.2.1 pav.) bus atliekami eksperimentiniai bandymai su skirtingais automobiliais. Šios priekabos važiuoklė yra torsioninė.



2.4.2.1 pav. Priekaba su žemu tentu

Priekabos su žemu tentu kėbulo vidaus matmenys: ilgis 1620 mm, plotis 1520 mm, aukštis iš šonų 490 mm, aukštis per vidurį 640 mm, atstumas tarp esančių sparnų yra 1045 mm. Kiti priekabos duomenys pateikti 2.4.2.1 lentelėje.

2.4.2.1 lentelė

Priekabos su žemu tentu duomenys

Gamybos metai	2002
Ilgis	2621 mm
Plotis	1579 mm
Aukštis	1190 mm
Svoris	237 kg
Maksimalus svoris	525 kg

2.4.3. Priekaba su aukštu tentu

Su priekaba aukštu tentu (2.4.3.1 pav.) bus atliekami eksperimentiniai bandymai su skirtingais automobiliais. Šios priekabos važiuoklė yra torsioninė.



2.4.3.1 pav. Priekaba su aukštu tentu

Priekabos su aukštu tentu kėbulo vidaus matmenys: ilgis 1620 mm, plotis 1520 mm, aukštis 1560 mm, atstumas tarp esančių sparnų yra 1045 mm. Kiti priekabos duomenys pateikti 2.4.3.1 lentelėje.

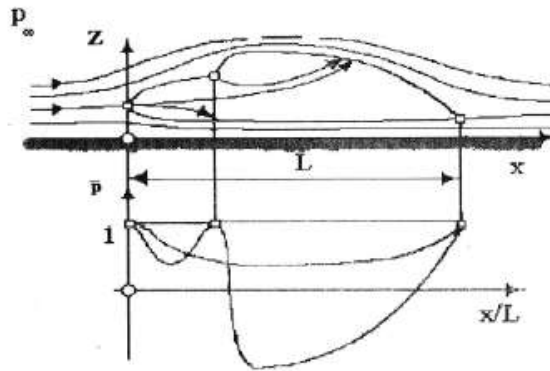
2.4.3.1 lentelė

Priekabos su aukštu tentu duomenys

Gamybos metai	2002
Ilgis	2621 mm
Plotis	1579 mm
Aukštis	1880 mm
Svoris	266 kg
Maksimalus svoris	525 kg

2.5. Lengvojo automobilio aerodinaminis pasipriešinimas

Remiantis knygomis yra atlikta daug eksperimentinių tyrimų, kurie analizuoja aerodinaminį pasipriešinimą. Bet nuosekliai aprašytos teorijos, kuri galėtų pagrįsti automobilio aerodinamiką nėra.



2.5.1 pav. Šiame paveikslėlyje pavaizduotas automobilis, kurio paviršiuje pasiskirsto srauto greitis ir slėgis [3]

2.5.1 paveikslėlyje apatinėje dalyje parodytas slėgio pasiskirstymas automobilio kontūre, kuris yra išreikštas priklausomybe $\bar{p} = f\left(\frac{x}{L}\right)$.

Paveikslėlyje matome, jog ant automobilio paviršiaus yra susidarę trys taškai, kuriuose srautas yra stabdomas: automobilio priekyje, prieš priekinio automobilio stiklo ir užpakalinėje automobilio dalyje. Dydis „ \bar{p} “ yra bedimensis slėgio koeficientas [16].

$$\bar{p} = (p - p_{\infty}) \frac{\rho v_{\infty}^2}{2}; \quad (2.5.1)$$

Pagal Bernulio lygtį:

$$p + \frac{\rho v^2}{2} = p_{\infty} + \frac{\rho v_{\infty}^2}{2}; \quad (2.5.2)$$

v – srauto greitis prie pat automobilio paviršiaus,

v_{∞} – srauto greitis, kuris yra nutolęs labai toli nuo automobilio paviršiaus

Iš (2.16) ir (2.17) lygčių gauname naują lygtį:

$$\bar{p} = 1 - \left(\frac{v}{v_{\infty}}\right)^2 \quad (2.5.3)$$

Visiškai sustabdyto srauto taške:

$$v = 0$$

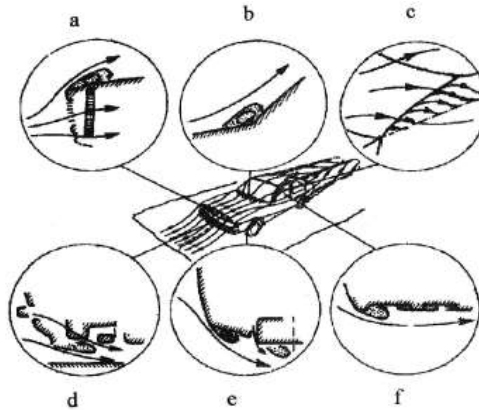
ir

$$\bar{p} = 1.$$

Automobilio apatinėje kėbulo dalyje teigiamas srauto greitis mažai keičiasi. Kadangi automobilio dugnas yra labai arti kelio paviršiaus, taip gali atsirasti apatinėje automobilio dalyje neigiamas slėgis. Automobilio priekyje ties apatine stiklo briauna srautas yra sustabdomas ($\bar{p} = 0$). Automobilio priekinio stiklo viršutinėje briaunoje slėgis greitai sumažėja, artėjant prie užpakalinės automobilio dalies, srautas yra visiškai stabdomas [16].

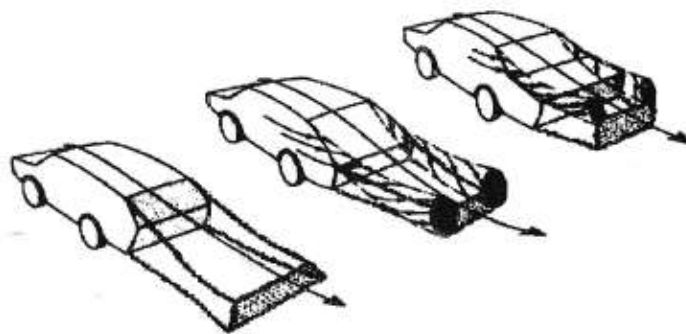
Suminė teigiamo slėgio ir neigiamo slėgio jėga yra didesnė viršutinėje automobilio pusėje, nei apatinėje. Todėl dedamoji nukreipta į viršų [3].

Dvimačiu srauto tekėjimu galima laikyti tekėjimą esančiame paveikslėlyje a, b, d, e, f zonose. Zonoje c esančiame srauto tekėjimui negalime laikyti dvimačio srauto, nes jau čia yra trimatis. Trimatis, kai srauto tekėjimas per tris ašis (X, Y, Z) [3].



2.5.2 pav. Šiame paveikslėlyje pavaizduotos būdingos automobilio zonos, kuriose apteka srautas [3].

Automobilio priekinėje dalyje a) ties variklio kapotu atitrūksta srautas, o vėliau vėl priglunda prie automobilio paviršiaus. Atitrūkimo vietoje atsiranda sūkurys. Atitrūkimo zonos ilgis priklauso nuo kapoto posvyrio kampo esančio X ir Z plokštumoje. Taip pat toks pats atitrūkimo srautas atsiranda ties priekiniu kapotu ir stiklu b). O atitrūkimo zonos ilgis priklauso nuo posvyrio kampo esančio tarp priekinio kapoto ir stiklo. Zonoje f) tarp automobilio šoninio stiklo ir durų karkaso taip pat susidarys atitrūkimo zona. Zonoje c) srautas yra trimatis, nes srautas užlinksta ties priekinio stiklo rėmu ir šoninėmis durimis X, Y, Z ašimis. Zonoje d) srautas užlinksta po automobiliu ir tai lemia priekinio bamperio kampas tarp kelio paviršiaus. Zonoje e) automobilio priekinis sparnas su priekinių ratų išsikišimu iš po sparno lemia atitrūkimo srauto ilgi [3].



2.5.3 pav. Šiame paveikslėlyje pavaizduoti automobiliai su skirtingais kūbulais, kuriuos apteka srautas ir taip automobilio gale atsiranda sūkuriai [3].

Esant skirtingiems automobilių kūbulams (2.5.3 pav.), skiriasi ir automobilių užpakalinės dalies nuolydžių kampai ir taip atsiranda už automobilių užpakalinės dalies sūkurių pėdsakai.

2.6. Eksperimentiniams bandymams naudojami automobiliai

2.6.1. Automobilis Volkswagen Passat

Eksperimentiniams bandymams bus naudojamas automobilis sedano kėbulu. Naudojamas automobilis – Volkswagen Passat (B6). Pagal gamintojo reglamentus, šio automobilio aerodinaminis pasipriešinimo koeficientas yra 0,27.



2.6.1.1 pav. Bandymuose naudojamas automobilis Volkswagen Passat sedano kėbulu

2.6.1.1 paveikslėlyje pavaizduotas automobilis yra 2008 metų gamybos, dyzelinis variklis 2.0 TDI 140 AG, variklio galia 103 kW.

2.6.1.1 lentelė

Volkswagen Passat techniniai duomenys

Gamybos metai	2005 – 2010
Gamintojas	Volkswagen
Modelis	Passat (B6)
Kėbulo tipas	Sedanas
Durų skaičius	4
Vietų skaičius	5
Ilgis	4765 mm
Plotis	1820 mm
Aukštis	1472 mm
Ratų bazė	2709 mm
Svoris	1454 kg
Maksimalus svoris	2060 kg

2.6.2. Automobilis Volkswagen Bora

Eksperimentiniams bandymams bus naudojamas automobilis universalso kėbulu. Naudojamas automobilis – Volkswagen Bora (1J6). Pagal gamintojo reglamentus, šio automobilio aerodinaminis pasipriešinimo koeficientas yra 0,30.



2.6.2.1 pav. Bandymuose naudojamas automobilis Volkswagen Bora universalso kėbulu

2.6.2.1 paveikslėlyje pavaizduotas automobilis yra 2000 metų gamybos, dyzelinis variklis 1.9 TDI 115 AG, variklio galia 85 kW.

2.6.2.1 lentelė

Volkswagen Bora techniniai duomenys

Gamybos metai	1998 – 2005
Gamintojas	Volkswagen
Modelis	Bora Variant (1J6)
Kėbulo tipas	Universalas
Durų skaičius	5
Vietų skaičius	5
Ilgis	4409 mm
Plotis	1735 mm
Aukštis	1473 mm
Ratų bazė	2515 mm
Svoris	1360 kg
Maksimalus svoris	1880 kg

2.6.3. Automobilis Opel Frontera

Eksperimentiniams bandymams bus naudojamas automobilis visureigio kėbulu. Naudojamas automobilis – Opel Frontera B. Pagal gamintojo reglamentus, šio automobilio aerodinaminis pasipriešinimo koeficientas yra 0,37.



2.6.3.1 pav. Bandymuose naudojamas automobilis Opel Frontera visureigio kėbulu

2.6.3.1 paveikslėlyje pavaizduotas automobilis yra 2001 metų gamybos, dyzelinis variklis 2.2 DTI 116 AG, variklio galia 85 kW.

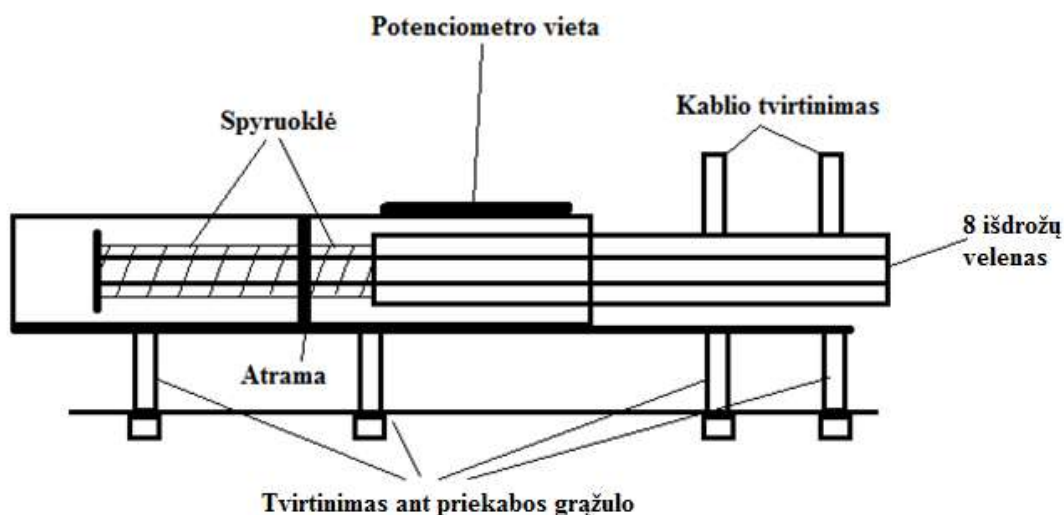
2.6.3.1 lentelė

Opel Frontera techniniai duomenys

Gamybos metai	1998 – 2004
Gamintojas	Opel
Modelis	Frontera B
Kėbulo tipas	Visureigis
Durų skaičius	5
Vietų skaičius	5
Ilgis	4658 mm
Plotis	1814 mm
Aukštis	1748 mm
Ratų bazė	2702 mm
Svoris	1780 kg
Maksimalus svoris	2450 kg

2.7. Eksperimentiniams tyrimams pagamintas sukabinimo įtaisas

Automobilio su priekaba aerodinamikos tyrimui reikalingas suprojektuotas ir pagamintas sukabinimo įtaisas (2.7.1 pav.), kuris montuosis vietoje originalaus priekabos kablo. Šis sukabinimo įtaisas bus reikalingas išmatuoti priekabos oro pasipriešinimą tempiant skirtingiems automobilių kėbulų tipams (sedanas, universalas, visureigis), su viena ir ta pačia automobiline priekaba, tik trijų skirtingų tipų: pirmasis – atvira automobilinė priekaba, antrasis – su žemo profilio aukščio tentu, trečiasis – su aukštu tentu.



2.7.1 pav. Suprojektuoto sukabinimo įtaiso principinė schema

Sukabinimo įtaiso gamybai panaudotas aštuonių išdrožų velenas. Jis ypatingas tuo kad, neleis sukotis į šonus. Veleno slankiojimui pirmyn ir atgal savo ašimi, panaudotos spyruoklės, kurios viena kitos atžvilgiu turės grįžti į pradinę būseną. Viena pilno ilgio spyruoklė naudojama priekabos traukimo kryptimi, o kitos spyruoklės $\frac{1}{4}$ dalis sušvelnina stabdymą. Pasipriešinimo jėgą apskaičiuojama iš šliaužiklinio tiesinio potenciometro eigos pasikeitimo ir spyruoklės standumo, kuris keičiasi nuo jėgos. Naudojamas šliaužiklis 10 Kohm tiesinis potenciometas su prijungimo jungtele. Matmenys 60,51 x 13,95 mm; potenciometro eigos ilgis 40 mm, su galinės padėties šviesos diodu, maitinimas 5 V.



2.7.2 pav. Sukabinimo įtaise naudojama spyruoklė

Spyruoklės (2.7.2 pav.) ilgis neutralioje būsenoje yra 9,4 cm. Pilnai suspausta 4,2 cm. Spyruoklės vidinis skersmuo yra 2,4 cm, o išorinis 3,2 cm. Spyruoklės standumas apskaičiuojamas: ant

jos uždedamas tam tikras svoris ir išmatuojamas poslinkio pokytis. Kiekvienu kartu uždedamas vis didesnis svoris. Kadangi spyruoklės standumas yra tiesinis, taip gaunama poslinkio priklausomybę nuo svorio.

- Užkrovus 10 kg spyruoklė susispaudė 0,1cm.,
- Užkrovus 20 kg spyruoklė susispaudė 0,2cm.,
- Užkrovus 30 kg spyruoklė susispaudė 0,3cm.,

Pagal gautus rezultatus, apskaičiuotas spyruoklės standumas:

$$F = -k \cdot x; \quad (2.7.1)$$

čia:

x – deformaciją apibūdinantis dydis (dažniausiai pailgėjimas), mm;

k – nuo medžiagos rūšies, kūno matmenų ir formos priklausančią kūno savybę apibūdinantis

dydis – tamprumo (standumo) koeficientas, SI vienetų sistemoje matuojamas Niutonais metrui (N/m).

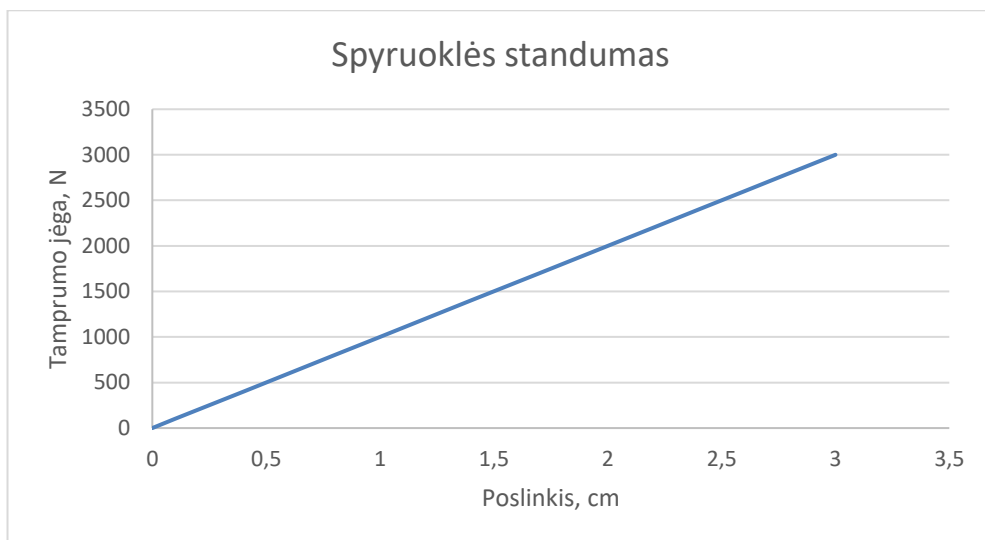
$$F = m \cdot g; \quad (2.7.2)$$

$$k = -(F/x); \quad (2.7.3)$$

$$k_1 = -(100/0,1) = -1000;$$

$$k_2 = -(200/0,2) = -1000;$$

$$k_3 = -(300/0,3) = -1000.$$



2.7.3 pav. Spyruoklės standumas

Pagal gautą vienodą k – koeficientą, spyruoklės poslinkis yra tiesinis tamprumo jėgai (2.7.3 pav.). Pagal gautus duomenys toliau skaičiuojama priekabos pasipriešinimo jėga tempiant pastoviu greičiu: 20 km/h, 40 km/h, 60 km/h, 80 km/h, 100 km/h, 120 km/h.

Pagamintas sukabinimo įtaisas (2.7.4 pav.), kuris yra montuojamas vietoje originalaus kablo. Ant šio sukabinimo įtaiso jau uždėtas sukabintuvas ir potenciometras.



2.7.4 pav. Pagamintas sukabinimo įtaisas

Sukabinimo įtaisas (2.7.5 pav. ir 2.7.6 pav) sumontuotas vietoje originalaus kablo, taip neprarandant buvusio atstumo tarp automobilio ir priekabos.



2.7.5 pav. Pagamintas sukabinimo įtaisas sumontuotas ant priekabos gražulo



2.7.6 pav. Pagamintas sukabinimo įtaisas sumontuotas ant priekabos gražulo

2.8. Eksperimentinių tyrimų atlikimo metodika ir sąlygos

Eksperimentiniai tyrimai buvo atliekami:

Bandymai buvo atlikti su 2008 metų gamybos Volkswagen Passat automobiliu sedano kėbulu, su 2000 metų gamybos Volkswagen Bora automobiliu universalu kėbulu, su 2001 metų gamybos Opel Frontera automobiliu visureigio kėbulu ir su „Radviliškio mašinų gamyklos“ automobiline priekaba 2002 metų gamybos. Bandymuose naudojama priekaba trijų skirtingų tipų: pirmasis – atvira priekaba (priekabos masė – 225 kg, aukštis 88 cm), antrasis – su žemo profilio aukščio tentu (priekabos aukštis su tentu 119 cm nuo žemės pagrindo, priekabos masė – 237 kg), trečiasis – su aukštu tentu (priekabos aukštis su tentu 188 cm nuo žemės pagrindo, priekabos masė – 266 kg).

Bandymai buvo atliekami 2017 metų balandžio 18 dieną. Visi bandymai buvo atliekami eiliškumo tvarka:

- Sedanas, universalas, visureigis su atviro tipo priekaba.
- Sedanas, universalas, visureigis su žemo profilio aukščio tentu.
- Sedanas, universalas, visureigis su aukšto profilio aukščio tentu.

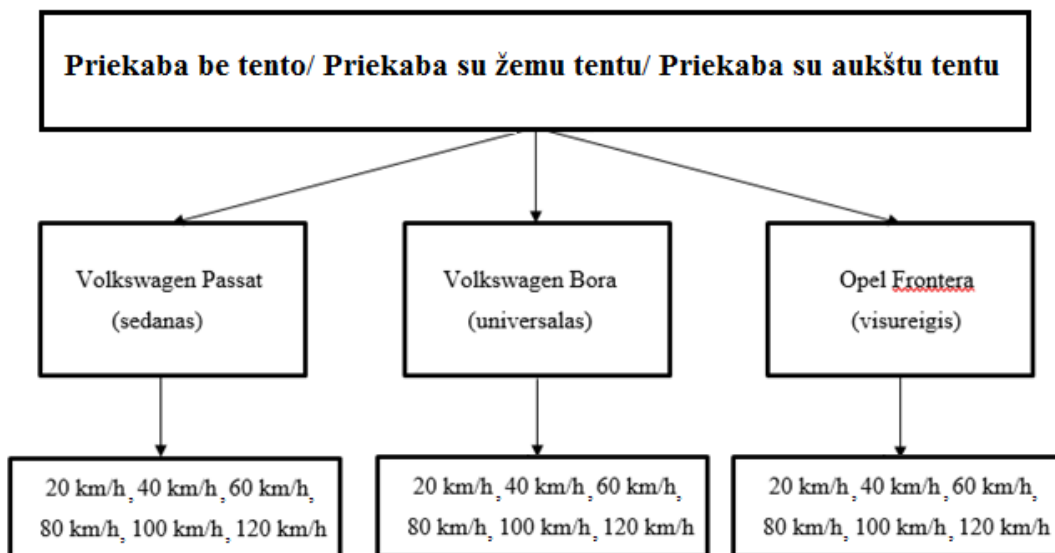
Bandymu metu buvo 6 C^o oro temperatūra, asfalto danga buvo sausa.

Bandymu metu pūtė šiaurės, šiaurės rytų vėjas 4 – 7 m/s greičiu. Kelio atžvilgiu tai buvo šoninis vėjas, kuris bandymams didelės įtakos neturėjo.

Bandymai buvo atliekami esant pastoviams važiavimo greičiams ant asfalto dangos: 20 km/h, 40 km/h, 60 km/h, 80 km/h, 100 km/h 120 km/h.

Bandymų metu automobilio ekipažą sudarė vairuotojas ir keleivis, prižiūrintis bandymams naudojamą įrangą.

Eksperimentinių bandymų atlikimo schema (2.8.1 pav.).



2.8.1 pav. Priekaba be tento/ priekaba su žemu tentu/ priekaba su aukštu tentu bandymų schema

2.9. Eksperimentinių tyrimų naudota įranga

Eksperimentiniams bandymams naudota DL – 1 įranga. Įranga sudaro DL – 1 įrenginys , GPS imtuvas, akumuliatorius. Atminties kortelė, laidai reikalingi sujungti potenciometrą.



2.9.1 pav. DL – 1 įranga

DL – 1 tai įranga (2.9.1 pav.) skirta registruoti ir įrašinėti važiuojančio automobilio duomenis. DL – 1 registruoja automobilio greitį, pagreitį visomis kryptimis, jo padėtį (turi GPS sistemą) ir daugybę kitokių duomenų. Sukaupiti duomenys apdorojami kompiuterine programa „Race Technology Analysis Software“.

DL – 1 techninė specifikacija

Atmintis	Kompaktinės atminties I tipo. FAT16 kompiuterio duomenų formato. Minimalus atminties kortelės dydis 32 MB, maksimalus kortelės dydis 2 GB (FAT16 ribojama), ar didesnis jei suformatuotas DOS..
GPS	Padėties pozicija, greitis, pozicijos tikslumo ir greičio tikslumas kiekvienam 100 MS be interpoliacijos. GPS sekimo kilpos optimizuota paraiškų iki maždaug 4 g. Sekti visus palydovus, atvaizduoti vieta.
GPS antena	Magnetinis pagrindas, 3.3 V aktyvi antena su SMA jungtimi
Analoginę įvestis	8 Išorinės įvestys, visos 12 bitų skiriamosios gebos. Visi 0 – 12 V skalėje. Visos įvestys apsaugotas du kartus maksimaliai jėgimo įtampa.
Dažnio jėjimai	4 išoriniai dažnio jėjimai su maksimaliu įvesties dažniu > 2 kHz. Aparatūros dalytuvai 4 ar 16 . Reikalauja mažos įtampos jėjimo < 1 V ir nemažai > 4 V ir didžiausias 15 V.
Energijos tiekimo reikalavimai	12 V nominali įvestis, ne mažiau kaip 10 V, ne daugiau kaip 15 V. Srovės stipris, apie 180 mA GPS imtuvui.
Išėjimo įtampa 5 V	Maksimali srovė 100 mA, leistinasis nuokrypis 1 %.
Pagrindinis procesorius	24 MHz RISC
Akselerometrai	3 – ašis, skaitmeninio tikslumo išėjimas. Garantuota minimali 2 g. Rezoliucija 0,005 g. 6 g.
Vibracijos	Gamykloje patikrintos vibracijos: 25 g, 50 Hz sinusoid 5 minutes (su įdėta atminties kortelė).
Temperatūra	Gamykloje patikrintos darbo sąlygos: nuo – 20 °C iki 70 °C.

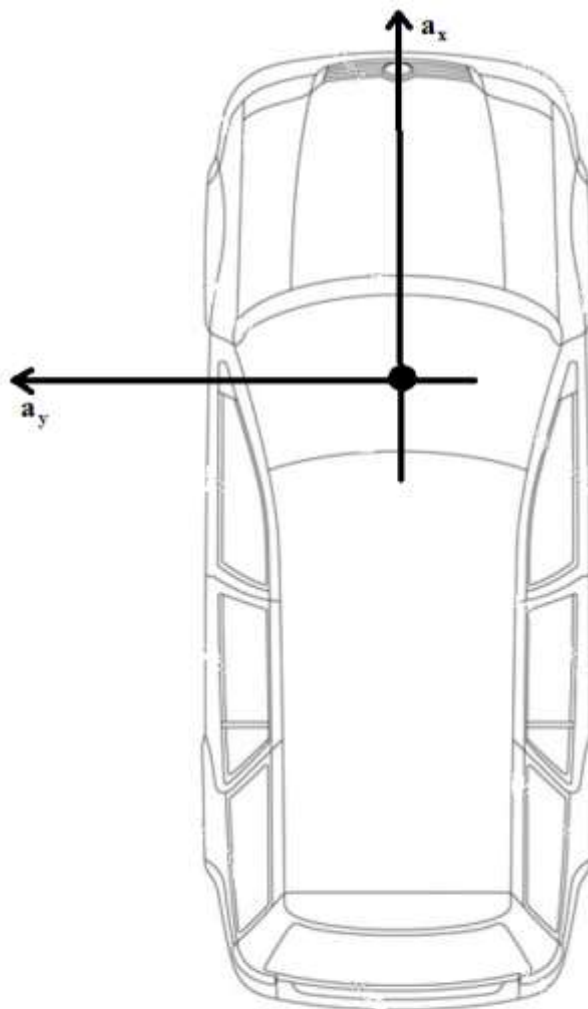
DL – 1 įrangos montavimo automobilyje schema.



2.9.2 pav. DL - 1 įrangos komponentų išdėstymas

2.9.2 paveikslėlyje parodytas DL – 1 įrangos montavimo schema Volkswagen Passat automobilyje.

DL – 1 įrangos montavimo schema 2.9.3 paveikslėlyje.

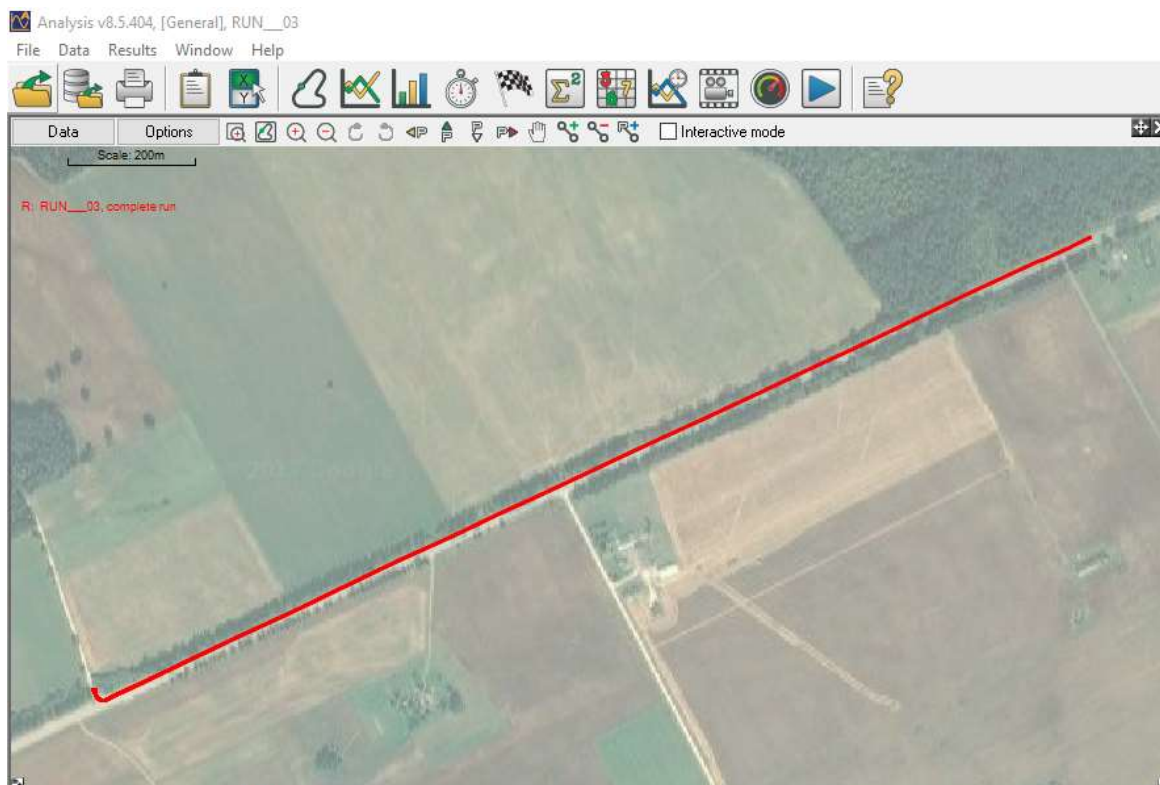


2.9.3 pav. DL – 1 tvirtinimas automobilyje, matavimo ašys

DL – 1 įrangos montavimo vieta, bandomuose automobiliuose su priekaba. Automobiliuose šis įrenginys tvirtinamas ant priekinės panelės, maždaug automobilio centre. Šį įrenginį būtina tinkamai pritvirtinti prie priekinės panelės, jog jis negalėtų judėti. Įrenginio tvirtinimui naudojama dvipusė lipni juostelė. Dar šį įrenginį reikia sumontuoti automobilyje teisinga kryptimi, nes kitaip gauti duomenys bus netikslūs. Jis turi būti montuojamas: priekiu esančiomis lemputėmis, mygtuku ir atminties kortele žiūrint į vairuotoją bei keleivį. Šiuo atveju sumontavus šį įrenginį bus teisingai gauti duomenys, bus teigiami greičiai ir pagreičiai. Jei atvirkščiai sumontuosime, tai gausime greitį bei pagreitį minuso reikšme. Todėl labai svarbu teisingai sumontuoti šį įrenginį.

3. EKSPERIMENTINIS AUTOMOBILIO SU PRIEKABA AERODINAMIKOS TYRIMAS

Naudojantis programa „Race Technology Analysis Software“ iš bandymo metu GPS imtuvo nustatyta bandymų vietos vaizdas (3.1 pav.).



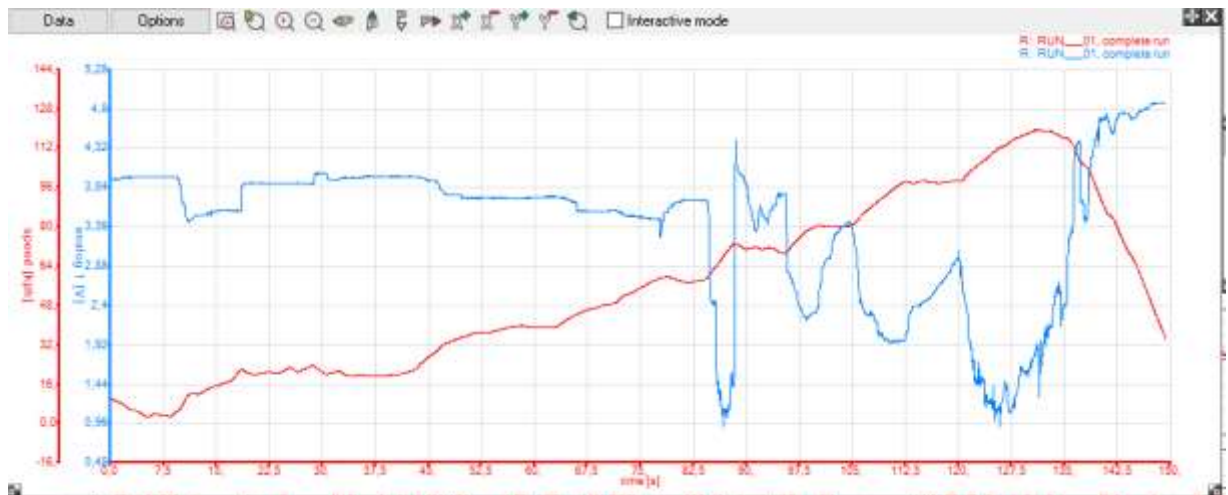
3.1 pav. Iš programos „Race Technology Analysis Software“ gautas žemėlapis, kuriame atliktas eksperimentinis tyrimas.

Eksperimentiniai tyrimai buvo atliekami magistralinio kelio atkarpoje A6, Ukmergė – Utena ties Juodmiškio kaimu. Ši kelio atkarpa pasirinkta, todėl kad yra su lygia kelio danga ir tiesioji atkarpa, bei nėra įkalnių ar nuokalnių. Bandymai buvo atliekami 2017 metų balandžio 18 dieną. Visi bandymai buvo atliekami eiliškumo tvarka:

- Sedanas, universalas, visureigis su atviro tipo priekaba.
- Sedanas, universalas, visureigis su žemo profilio aukščio tentu.
- Sedanas, universalas, visureigis su aukšto profilio aukščio tentu.

Bandymu metu buvo 6 C^o oro temperatūra, asfalto danga buvo sausa. Bandymu metu pūtė šiaurės, šiaurės rytų vėjas 4 – 7 m/s greičiu. Kelio atžvilgiu tai buvo šoninis vėjas, kuris bandymams didelės įtakos neturėjo. Bandymai buvo atliekami esant pastoviams važiavimo greičiams ant asfalto dangos: 20 km/h, 40 km/h, 60 km/h, 80 km/h, 100 km/h, 120 km/h. Bandymų metu automobilio ekipažą sudarė vairuotojas ir keleivis, prižiūrintis bandymams naudojamą įrangą.

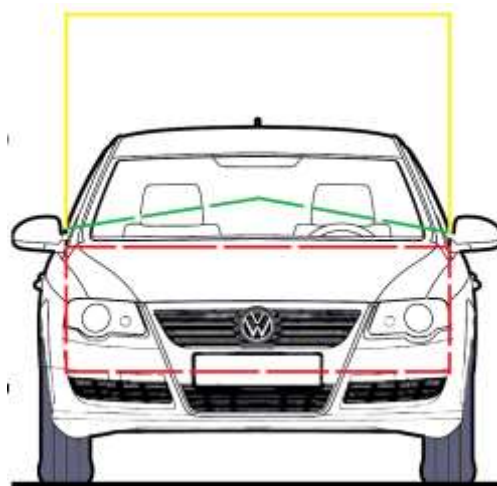
Grafikas 3.2 paveikslėlyje yra naudojamas tolimesniuose skaičiavimuose.



3.2 pav. Iš programos „Race Technology Analysis Software“ gauti greičio ir įtampos priklausomybė nuo laiko.

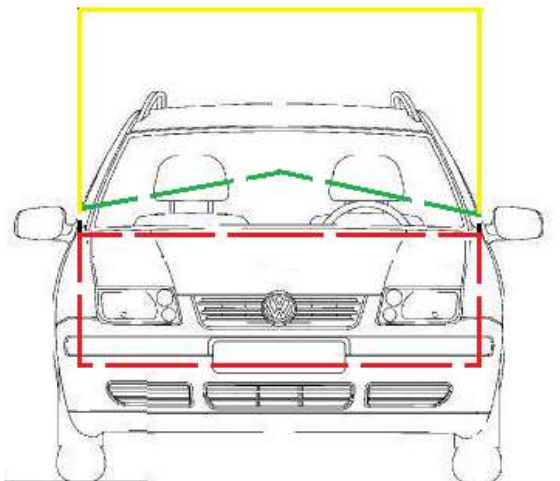
Atlikus eksperimentinius važiavimus su trimis skirtingais automobilių kėbulais ir trimis skirtingais priekabos tipais, buvo viso atlikti 9 bandymai. Iš DL – 1 įrenginio gautų duomenų, juos apdorojus „Race Technology Analysis Software“ programa, gauta 1 iš 9 grafikas (3.2 pav.). Šie grafikai iš „Race Technology Analysis Software“ programos buvo eksportuoti į „Microsoft Excel“ formatą, ir iš ten buvo atrenkama prie 20 km/h, 40 km/h, 60 km/h, 80 km/h, 100 km/h, 120 km/h greičio gauti įtampo rodmenys. Gauta įtampa apskaičiuota į pasipriešinimo jėga iš 2.7 skyriuje esančių formulių. Iš gautos priekabos pasipriešinimo jėgos yra atimama kelio pasipriešinimo riedėjimui jėga (2.2 skyrius), ir taip yra gaunamas tikras priekabos aerodinaminis pasipriešinimas.

Eksperimentiniams bandymams atlikti naudojamo Volkswagen Passat automobilio su skirtingomis priekabomis vaizdas iš priekio.



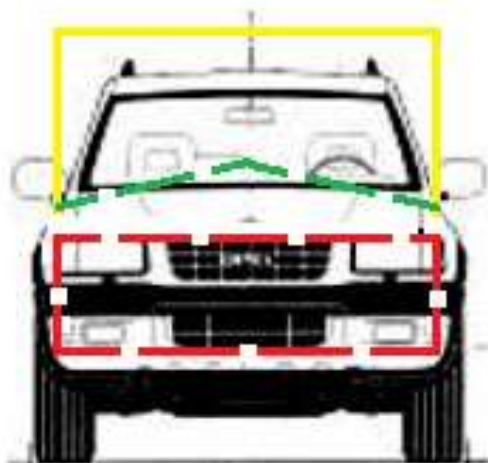
3.3 pav. Vaizdas iš priekio Volkswagen Passat su priekaba: raudonas brūkšninis kontūras, tai priekaba be tentu; žalias brūkšninis kontūras, tai priekaba su žemu tentu; geltonas kontūras, tai priekaba su aukštu tentu.

Eksperimentiniams bandymams atlikti naudojamo Volkswagen Bora automobilio su skirtingomis priekabomis vaizdas iš priekio.



3.4 pav. Vaizdas iš priekio Volkswagen Bora su priekaba: raudonas brūkšninis kontūras, tai priekaba be tento; žalias brūkšninis kontūras, tai priekaba su žemu tentu; geltonas kontūras, tai priekaba su aukštu tentu.

Eksperimentiniams bandymams atlikti naudojamo Opel Frontera automobilio su skirtingomis priekabomis vaizdas iš priekio.



3.5 pav. Vaizdas iš priekio Opel Frontera su priekaba: raudonas brūkšninis kontūras, tai priekaba be tento; žalias brūkšninis kontūras, tai priekaba su žemu tentu; geltonas kontūras, tai priekaba su aukštu tentu.

Iš esančių 3.3, 3.4, ir 3.5 paveikslėlių matomas automobilio ir už jo esančios priekabos vaizdas. Priekabos aerodinaminis pasipriešinimas skiriasi pagal jos esantį dydį. Mažiausias pasipriešinimas bus priekabos be tento, o didžiausias tai priekabos su aukštu tentu.

3.1. Gauti rezultatai su priekaba be tento

Pirmasis eksperimentinis bandymas buvo atliktas su Volkswagen Passat automobiliu ir priekaba be tento.



3.1.1 pav. Bandymas su priekaba be tento, automobiliu Volkswagen Passat

Atkabinus priekaba nuo Volkswagen Passat automobilio ir sukabinus su Volkswagen Bora automobiliu buvo perduodama naudojama įranga ir taip atliekamas sekantis eksperimentinis bandymas.



3.1.2 pav. Bandymas su priekaba be tento, automobiliu Volkswagen Bora

Atkabinus priekaba nuo Volkswagen Bora automobilio ir sukabinus su Opel Frontera automobiliu buvo perduodama naudojama įranga ir taip atliekamas sekantis eksperimentinis bandymas.



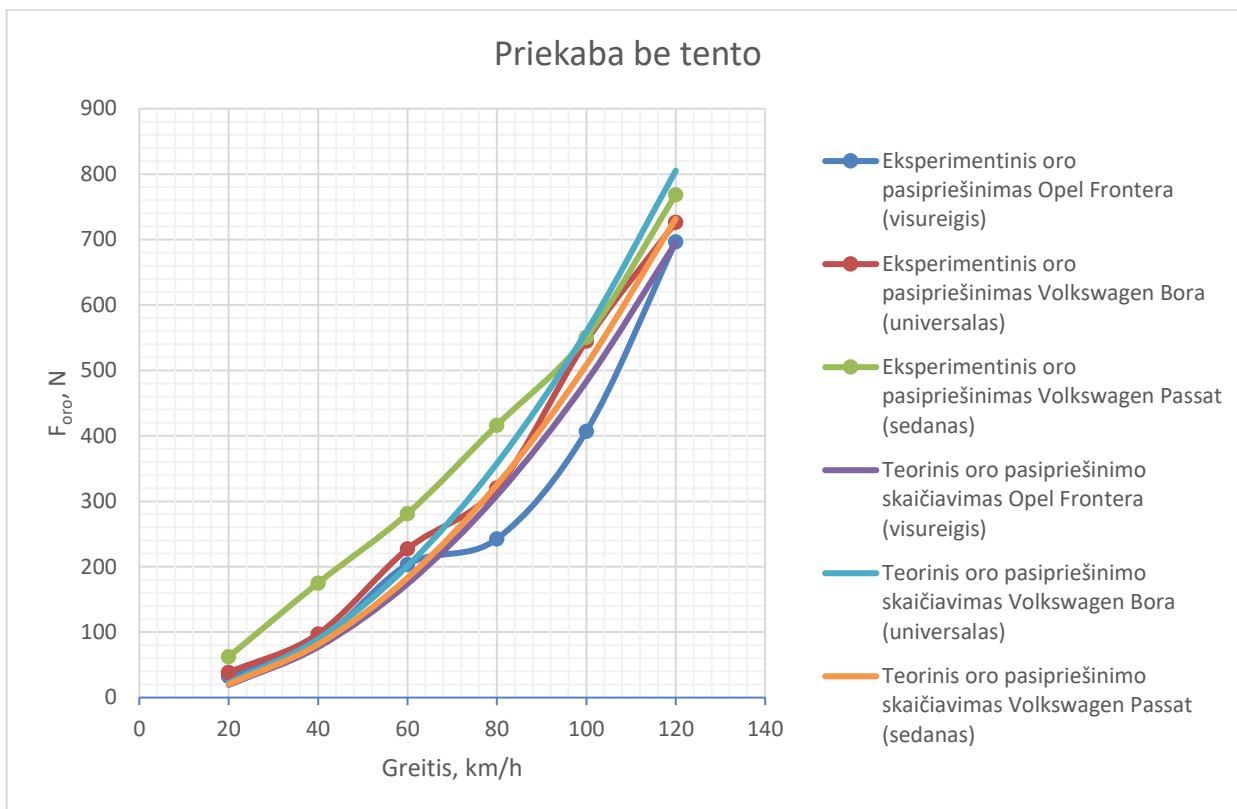
3.1.3 pav. Bandymas su priekaba be tento, automobiliu Opel Frontera

Gauti rezultatai oro pasipriešinimo jėgos, veikiančios priekaba be tento

Greitis	20 km/h	40 km/h	60 km/h	80 km/h	100 km/h	120 km/h
Automobilis						
Eksperimentinio bandymo oro pasipriešinimas Volkswagen Passat	62,44 N	175,20 N	281,22 N	416,45 N	550,93 N	768,58 N
Teorinis oro pasipriešinimo apskaičiavimas Volkswagen Passat	20,33 N	81,33 N	183,00 N	325,33 N	508,33 N	732,00 N
Eksperimentinio bandymo oro pasipriešinimas Volkswagen Bora	38,46 N	92,27 N	227,27 N	320,53 N	544,93 N	726,61 N
Teorinis oro pasipriešinimo apskaičiavimas Volkswagen Bora	22,37 N	89,47 N	201,30 N	357,87 N	559,17 N	805,20 N
Eksperimentinio bandymo oro pasipriešinimas Opel Frontera	32,46 N	85,28 N	203,29 N	242,60 N	407,05 N	696,64 N
Teorinis oro pasipriešinimo apskaičiavimas Opel Frontera	19,32 N	77,27 N	173,85 N	309,07 N	482,92 N	695,40 N

Iš 3.1.1 lentelės gautų eksperimentinio bandymo rezultatų matome kad didžiausią oro pasipriešinimą traukiant priekaba turi Volkswagen Passat automobilis. Apskaičiuotas teorinis oro pasipriešinimas yra šiek tiek mažesnis, nei eksperimentinio metu gautas. Tai galėjo įtakoti tą dieną pūtęs vėjas 4 – 7 m/s greičiu. Mažiausią eksperimentinio bandymo metu gauta oro pasipriešinimą traukiant priekaba turi Opel Frontera automobilis. Apskaičiuotas Opel Frontera oro pasipriešinimas beveik sutampa su eksperimentinio metu gautais rezultatais.

Iš 3.1.1 lentelės duomenų yra nubraižomas grafikas.



3.1.4 pav. Gautas eksperimentinio bandymo ir teorinio apskaičiavimo metodo oro pasipriešinimas, veikiantis priekaba be tento skirtingais automobiliais

3.2. Gauti rezultatai priekaba su žemu tentu

Po pirmų trijų eksperimentinių bandymų su priekaba be tento, buvo sumontuotas žemo profilio paaukštėjimas ir uždedamas tentas.



3.2.1 pav. Bandymas su priekaba žemu tentu, automobiliu Volkswagen Passat

Ekspimentinis bandymas su Volkswagen Passat automobiliu ir priekaba žemu tentu (3.2.1 pav.).

Atkabinus priekaba su žemu tentu nuo Volkswagen Passat automobilio ir sukabinus su Volkswagen Bora automobiliu buvo perdedama naudojama įranga ir taip atliekamas sekantis eksperimentinis bandymas.



3.2.2 pav. Bandymas su priekaba žemu tentu, automobiliu Volkswagen Bora

Atkabinus priekaba su žemu tentu nuo Volkswagen Bora automobilio ir sukabinus su Opel Frontera automobiliu buvo perdedama naudojama įranga ir taip atliekamas sekantis eksperimentinis bandymas.



3.2.3 pav. Bandymas su priekaba žemu tentu, automobiliu Opel Frontera

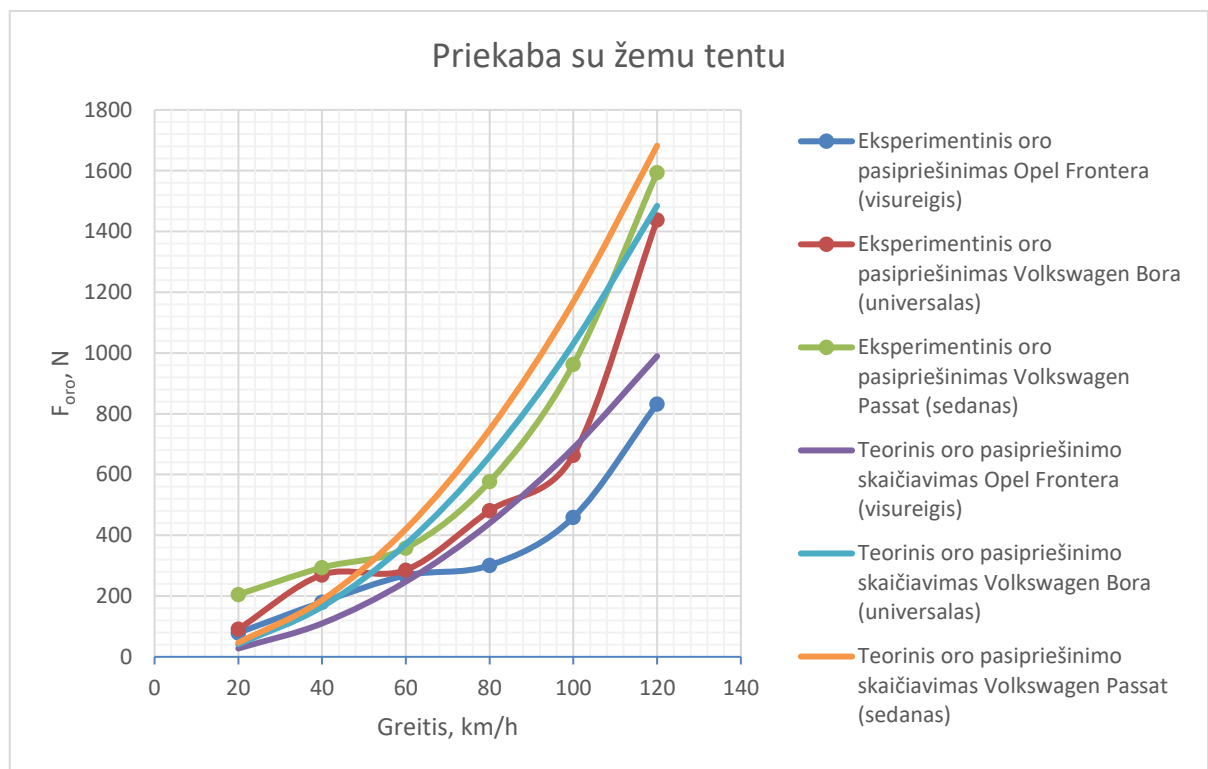
3.2.1 lentelė

Gauti rezultatai oro pasipriešinimo jėgos, veikiančios priekaba su žemu tentu

Greitis	20 km/h	40 km/h	60 km/h	80 km/h	100 km/h	120 km/h
Automobilis						
Eksperimentinio bandymo oro pasipriešinimas Volkswagen Passat	205,12 N	293,84 N	357,79 N	576,81 N	962,89 N	1593,96 N
Teorinis oro pasipriešinimo apskaičiavimas Volkswagen	46,73 N	186,92 N	420,56 N	747,66 N	1168,23 N	1682,24 N

Passat						
Eksperimentinio bandymo oro pasipriešinimas Volkswagen Bora	91,21 N	269,86 N	285,86 N	480,90 N	663,15 N	1438,10 N
Teorinis oro pasipriešinimo apskaičiavimas Volkswagen Bora	41,23 N	164,93 N	371,08 N	659,70 N	1030,79 N	1484,33 N
Eksperimentinio bandymo oro pasipriešinimas Opel Frontera	79,22 N	179,94 N	267,87 N	301,05 N	459,32 N	832,61 N
Teorinis oro pasipriešinimo apskaičiavimas Opel Frontera	27,49 N	109,95 N	247,39 N	439,80 N	687,19 N	989,56 N

Iš 3.2.1 lentelės gautų rezultatų matome kad eksperimentinio bandymo metu gauta oro pasipriešinimo jėga skiriasi su teoriniu apskaičiavimu. Tai galėjo įtakoti šoninis vėjas gautiems bandymo rezultatams.



3.2.4 pav. Gautas eksperimentinio bandymo ir teorinio apskaičiavimo metodo oro pasipriešinimas, veikiantis priekaba su žemu tentu skirtingais automobiliais

3.2.4 paveikslėlyje nubraižytas grafikas iš 3.2.1 lentelės gautų duomenų.

3.3. Gauti rezultatai priekaba su aukštu tentu

Po eksperimentinių bandymu su priekaba žemu tentu, buvo nuimtas žemo profilio paaukštinimas su tentu ir montuojamas aukšto profilio paaukštinimas su tentu.



3.3.1 pav. Bandymas su priekaba aukštu tentu, automobiliu Volkswagen Passat

Atkabinus priekaba su aukštu tentu nuo Volkswagen Passat automobilio ir sukabinus su Volkswagen Bora automobiliu buvo perdedama naudojama įranga ir taip atliekamas sekantis eksperimentinis bandymas.



3.3.2 pav. Bandymas su priekaba aukštu tentu, automobiliu Volkswagen Bora

Atkabinus priekaba su aukštu tentu nuo Volkswagen Bora automobilio ir sukabinus su Opel Frontera automobiliu buvo perdedama naudojama įranga ir taip atliekamas paskutinis eksperimentinis bandymas.

Eksperimentinis bandymas su Opel Frontera automobiliu ir priekaba aukštu tentu (3.3.3 pav.).



3.3.3 pav. Bandymas su priekaba aukštu tentu, automobiliu Opel Frontera

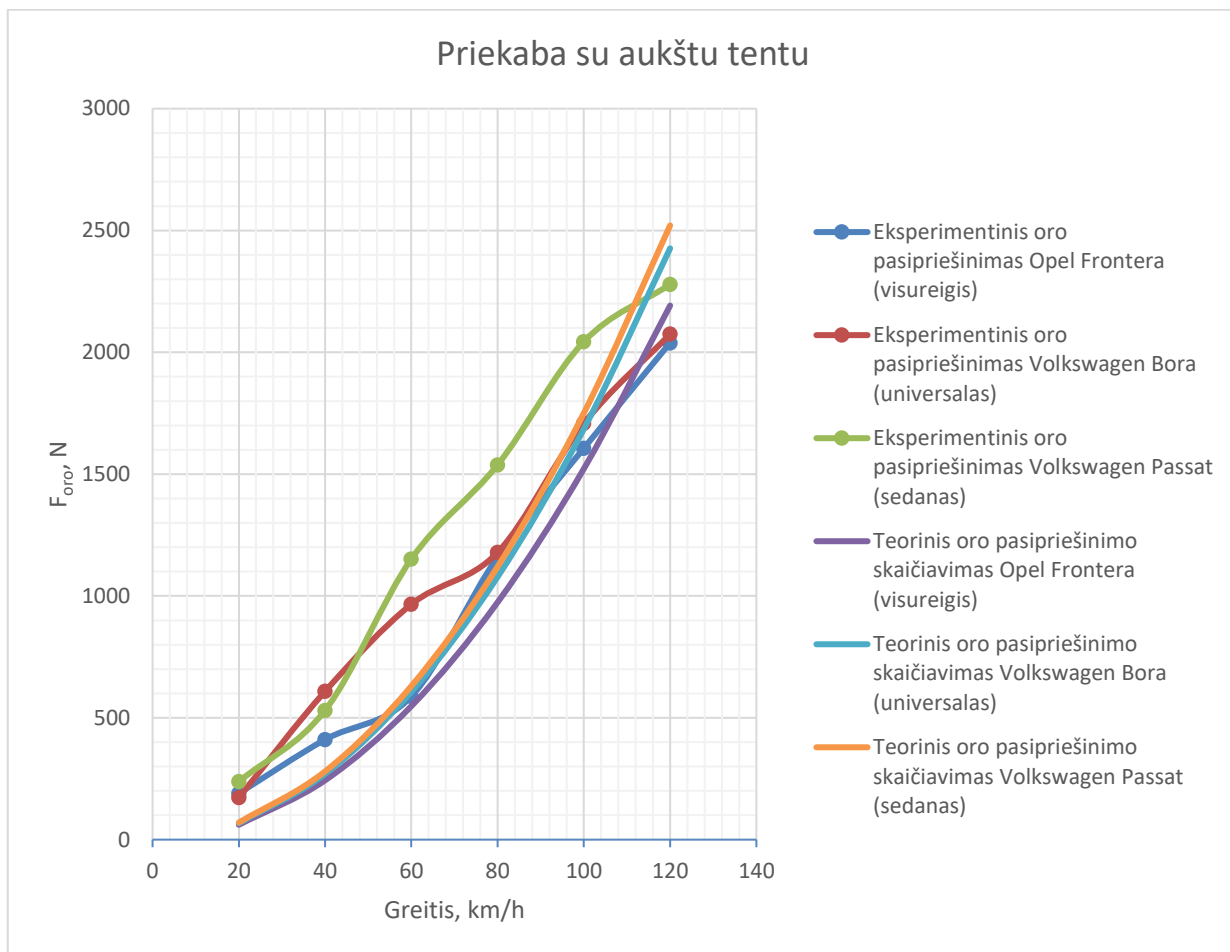
3.3.1 lentelė

Gauti rezultatai oro pasipriešinimo jėgos, veikiančios priekaba su aukštu tentu

Greitis	20 km/h	40 km/h	60 km/h	80 km/h	100 km/h	120 km/h
Automobilis						
Eksperimentinio bandymo oro pasipriešinimas Volkswagen Passat	238,19 N	530,60 N	1151,83 N	1538,36 N	2043,90 N	2278,77 N
Teorinis oro pasipriešinimo apskaičiavimas Volkswagen Passat	70,02 N	280,08 N	630,18 N	1120,32 N	1750,50 N	2520,72 N
Eksperimentinio bandymo oro pasipriešinimas Volkswagen Bora	172,25 N	608,53 N	965,99 N	1178,67 N	1708,19 N	2074,95 N
Teorinis oro pasipriešinimo apskaičiavimas Volkswagen Bora	67,41 N	269,64 N	606,70 N	1078,57 N	1685,27 N	2426,78 N
Eksperimentinio bandymo oro pasipriešinimas Opel Frontera	190,23 N	410,70 N	588,31 N	1160,69 N	1606,27 N	2038,98 N
Teorinis oro pasipriešinimo apskaičiavimas Opel Frontera	60,89 N	243,55 N	547,98 N	974,19 N	1522,18 N	2191,93 N

3.3.1 lentelėje pateiktų rezultatų skirtumas tarp eksperimentinių bandymų ir teorinių skaičiavimų yra didesnis, lyginant bandymus atliktus su priekaba be tento. Tokį skirtumą galėjo paveikti šoninis vėjas 4 – 7 m/s. Eksperimentiniai bandymai niekada nebus idealus su teoriniais skaičiavimais, nes neįmanoma padaryti idealių sąlygų eksperimentiniams bandymams.

Iš 3.3.1 lentelės pateiktų duomenų nubraižomas grafikas 3.3.4 paveikslėlyje.



3.3.4 pav. Gautas eksperimentinio bandymo ir teorinio apskaičiavimo metodo oro pasipriešinimas, veikiantis priekaba su aukštu tentu skirtingais automobiliais

4. EKONOMINIAI SKAIČIAVIMAI

4.1. Degalų suvartojimas

Degalų suvartojimas automobiliui važiuojant tam tikrą laiką tarpą T paprastai apibūdinamas kaip santykis.

$$B = \frac{\int_0^T \dot{b} dt}{\int_0^T v dt} \quad (4.1.1)$$

čia b yra degalų kiekio norma per laiką tam tikrą laiką tarpą.

Kuro kiekis paprastai matuojamas L/100km.

Nagrinėdami atvejį kai variklis išvysto traukos galią $F_T > 0$, reikalingas šios jėgos kiekis skaičiuojamas pagal formulę:

$$P_T = F_T V \quad (4.1.2)$$

Traukos jėga prilyginama variklio galiai:

$$P_T = F_{b,T} \eta_D \quad (4.1.3)$$

čia η_D yra važiuoklės naudingumo koeficientas.

Tokiu atveju degalų kiekį išreiškiame taip:

$$\dot{b} = \frac{b_e}{\rho_{kuro} \eta_D} P_T = \frac{b_e}{\rho_{kuro} \eta_D} F_T V \quad (4.1.4)$$

čia b_e yra specifinis degalų sunaudojimas.

4.2. Specifinis degalų sunaudojimas

Specifinis degalų suvartojimas yra aprašomas taip:

$$b_e = \frac{\dot{m}_{kuro}}{P_{b,T}} = \rho_{kuro} \frac{\dot{b}}{P_{b,T}} \quad (4.2.1)$$

Specifinis degalų sunaudojimas nėra pastovus, jis priklauso nuo variklio apsisukimų skaičiaus.

Tačiau minimalus specifinis degalų sunaudojimas daugeliui variklių svyruoja nuo 200 iki 300 g/Kwh:

4.3. Pasipriešinimo koeficiento įtaka degalų sąnaudoms

Šis paprastas pavyzdys įrodo, kad visi faktoriai turintys įtaką degalų sunaudojimui išlieka nepakitę, pasipriešinimo koeficientas yra tiesiogiai proporcingas degalų sunaudojimui. Todėl sumažinus pasipriešinimo koeficientą 10 % degalų sąnaudos taip pat sumažėtų apie 10 %. Siekiant apskaičiuoti tikslesnį degalų sunaudojimo pasikeitimą naudojame šias formules [2].

$$\frac{\Delta B}{B} = 0,40 \frac{\Delta C_D}{C_{D0}} \text{ benzininiam automobiliui} \quad (4.3.1)$$

$$\frac{\Delta B}{B} = 0,50 \frac{\Delta C_D}{C_{D0}} \text{ dyzeliniam automobiliui} \quad (4.3.2)$$

Degalų sunaudojimo pokyčiui apskaičiuoti naudojame šią išraišką [2]:

$$\Delta B = B \cdot 0,40 \frac{\Delta C_D}{C_{D0}} \text{ benzininiam automobiliui} \quad (4.3.3)$$

$$\Delta B = B \cdot 0,50 \frac{\Delta C_D}{C_{D0}} \text{ dyzeliniam automobiliui} \quad (4.3.4)$$

4.4. Degalų sąnaudų prognozavimas

Volkswagen Bora 1J6 1.9 TDI 85 kW (universalo kėbulas) be priekabos standartiškai 100km sunaudoja 6 l dyzelino. Tokiu atveju įvertiname, koks bus degalų pokytis. Kadangi automobilio su priekaba pasipriešinimo koeficientas padidėjo visais atvejais degalų sąnaudos taip pat bus padidėjusios.

Volkswagen Passat B6 3.6 V6 220 kW (sedano kėbulas) be priekabos standartiškai 100km sunaudoja 10,1 l benzino. Tokiu atveju įvertiname, koks bus degalų pokytis. Kadangi automobilio su priekaba pasipriešinimo koeficientas padidėjo visais atvejais degalų sąnaudos taip pat bus padidėjusios.

Opel Frontera 2.2 DTI 85 kW (visureigio kėbulas) be priekabos standartiškai 100km sunaudoja 10,5 l dyzelino. Tokiu atveju įvertiname, koks bus degalų pokytis. Kadangi automobilio su priekaba pasipriešinimo koeficientas padidėjo visais atvejais degalų sąnaudos taip pat bus padidėjusios.

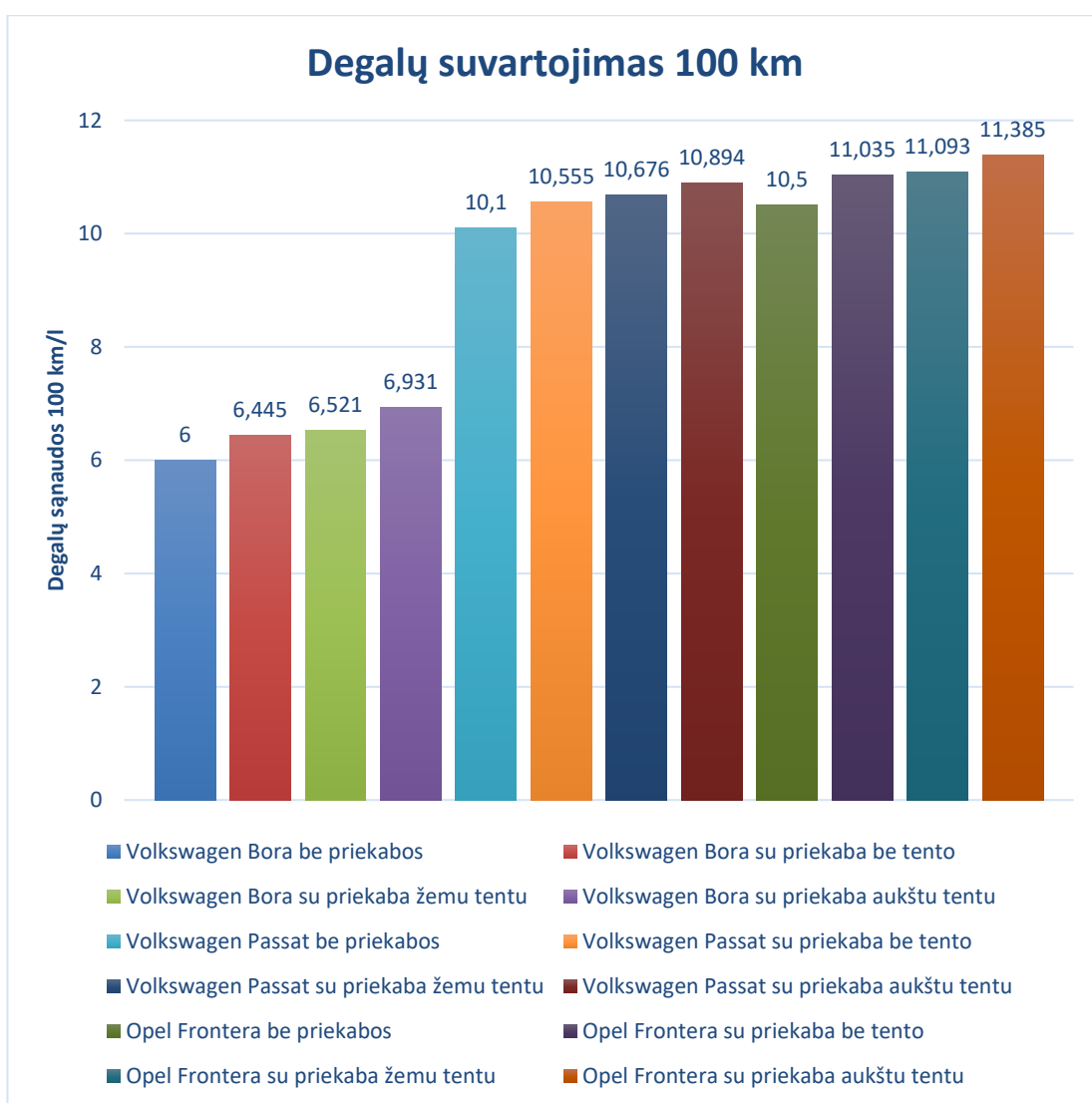
4.4.1 lentelė

Papildomai sunaudoti degalai

Automobilis:	+1/100 km
Volkswagen Bora su priekaba be tento	0,445
Volkswagen Bora su priekaba žemu tentu	0,521
Volkswagen Bora su priekaba aukštu tentu	0,931

Volkswagen Passat su priekaba be tento	0,455
Volkswagen Passat su priekaba žemu tentu	0,576
Volkswagen Passat su priekaba aukštu tentu	0,794
Opel Frontera su priekaba be tento	0,535
Opel Frontera su priekaba žemu tentu	0,593
Opel Frontera su priekaba aukštu tentu	0,885

Lentelėje 4.4.1 pateiktuose rezultatuose matyti, kaip aerodinaminių elementų paveiktas pasipriešinimo koeficiento padidėjimas neigiamai veikia automobilį su priekaba degalų sąnaudas l/100km. Šie rezultatai pavaizduoti grafiškai esančiame 4.4.1 paveiksle.

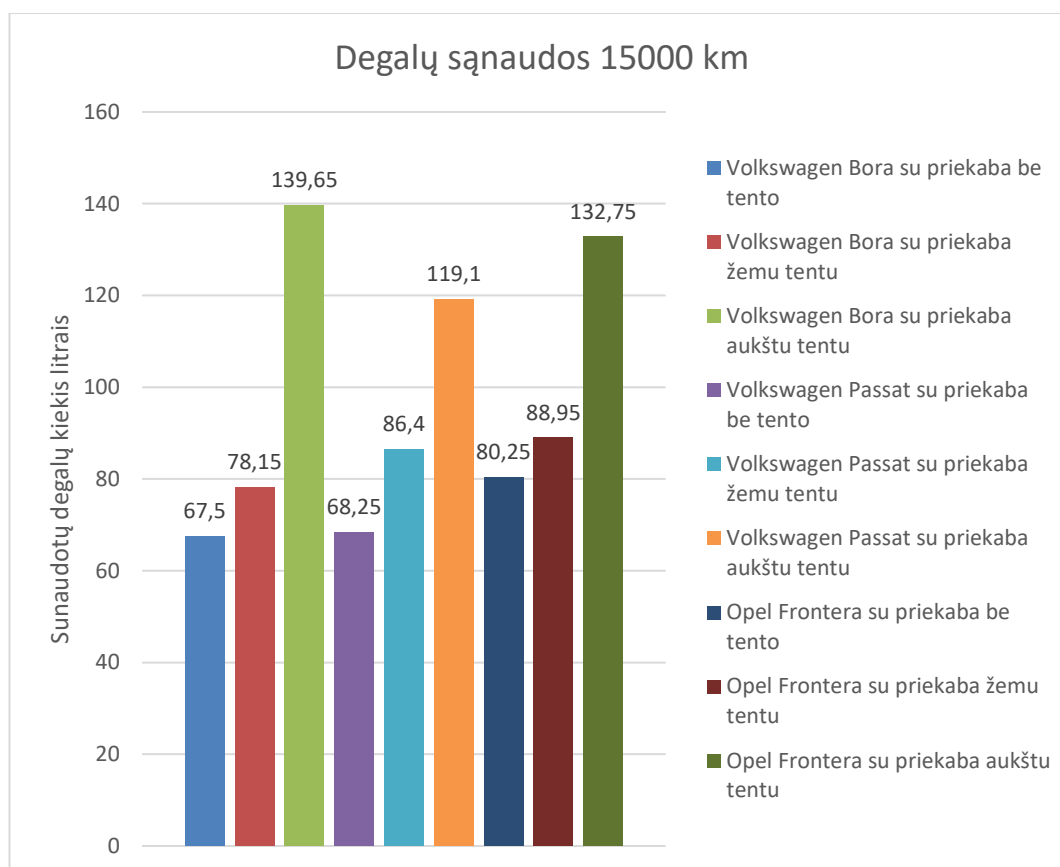


4.4.1 pav. Degalų suvartojimas 100 km/l

Skaičiuojama jei per metus su automobiliu nuvažiuosime 15000 km tokios bus degalų sąnaudos:

15000 km papildomai sunaudotų degalų kiekis

Automobilis:	Sunaudotų degalų kiekis, l
Volkswagen Bora su priekaba be tento	67,5
Volkswagen Bora su priekaba žemu tentu	78,15
Volkswagen Bora su priekaba aukštu tentu	139,65
Volkswagen Passat su priekaba be tento	68,25
Volkswagen Passat su priekaba žemu tentu	86,4
Volkswagen Passat su priekaba aukštu tentu	119,1
Opel Frontera su priekaba be tento	80,25
Opel Frontera su priekaba žemu tentu	88,95
Opel Frontera su priekaba aukštu tentu	132,75



4.4.2 pav. Papildomai sunaudotos degalų sąnaudos 15000 km su skirtingomis priekabomis

PALYGINIMAS SU KITU PANAŠIU TYRIMU

Remiantis 2015 metų magistro baigiamuoju darbu „Degalų sunaudojimo priklausomybė nuo stilistinių aerodinaminių elementų“ kurį atliko N. Sutekus. Degalų sąnaudos labai priklauso nuo aerodinaminio koeficiento pasipriešinimo. Tame darbe buvo nagrinėta automobilio su skirtingais spoileriais pasipriešinimo jėga. Tame darbe nustatyta kad priklauso nuo skirtingo spoilerio degalų sąnaudų dydis. Šiame darbe „Automobilio su priekabos aerodinamikos tyrimas“ yra nustatyta kad traukiant skirtingo tipo priekabas yra gaunamas skirtingas aerodinaminis pasipriešinimas. Taip pat kiekvienos priekabos gautas aerodinaminis pasipriešinimas yra skirtingas. Nustatyta kad tempiant priekaba su aukštu tentu, degalų sąnaudos bus didžiausios, o tempiant priekaba be tento gautas mažiausias pasipriešinimo koeficientas, kuris lems mažesnes degalų sąnaudas.

IŠVADOS

1. Atlikta automobilių ir jų sąstatų aerodinamikos tyrimų analizė.
2. Natūriniam eksperimentams suprojektuotas sukabinimo įtaisas, duomenims registruoti ir įrašyti pasirinktas DL – 1 įrenginys su priedais.
3. Remiantis natūrinio eksperimento gautais rezultatais: nustatytas mažiausias Opel Frontera priekabos be tento aerodinaminis pasipriešinimo koeficientas yra 0,46, priekabos su žemu tentu aerodinaminis pasipriešinimo koeficientas yra 0,59, priekabos su aukštu tentu aerodinaminis pasipriešinimo koeficientas yra 0,88.
4. Remiantis eksperimentinių bandymų rezultatais nustatyta, kad automobilis su priekaba ir aukštu tentu sunaudos daugiau degalų, nei automobilis su priekaba be tento – 72,15 litrų per 15000 km.
5. Velkamos priekabos įtaką degalų sąnaudoms nulemia priekabos matmenys.

NAUDOTA LITERATŪRA

1. R. Pečeliūnas, E. Sokolovskij. Automobilių dinamika: mokomoji knyga. Vilnius: Technika, 2012. 141 p.
2. VOLOTKEVIČ, V. and BOGDEVIČIUS, M. Automobilio Su Priekaba Dinaminių Charakteristikų Tyrimas.
3. PAKNYS, L. *Transporto Priemonių Aerodinamikos Pagrindai: Mokomoji Knyga*. Kaunas: Technologija, 1999.
4. BAJORINAS, M. Aerodynamic Modifications Testing. *Aviation Technologies*, 2014, vol. 2, no. 1. pp. 49-52.
5. Automobilinės priekabos stabdžių sistema. [žiūrėta 2017-04-16] Prieiga per internetą: <https://www.vta.lt/wp-content/uploads/2016/05/2B-290-VTA-puslapiui.pdf>
6. Automobilinių priekabų tipai. [žiūrėta 2017-04-16] Prieiga per internetą: http://www.tauriga.lt/lt/priekabu_tipai
7. Automobilinė priekaba be tento. [žiūrėta 2017-04-16] Prieiga per internetą: <http://www.priekabostau.lt/index.php/tauras-priekabos-prekyba-atstovas>
8. Automobilinė priekaba su žemu tentu. [žiūrėta 2017-04-16] Prieiga per internetą: http://gaminama.lt/pagaminta/priekabos_ir_puspriekabes?c=30
9. Automobilinė priekaba su aukštu tentu. [žiūrėta 2017-04-16] Prieiga per internetą: <http://www.priekabostau.lt/index.php/tauras-priekabos-prekyba-atstovas>
10. Aerodinamiškesnė automobilinė priekaba. [žiūrėta 2017-04-16] Prieiga per internetą: http://www.tauriga.lt/lt/priekabos/vienaases_be_stabdziu/tauras_b_704s
11. Automobilis Volkswagen Passat sedano kėbulu. [žiūrėta 2017-04-16] Prieiga per internetą: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:VW_Passat_B7_2.0_TDI_DSG_Highline_Kaschmirbraun.JPG
12. Automobilis Volkswagen Passat universalio kėbulu. [žiūrėta 2017-04-16] Prieiga per internetą: <http://www.automobilesreview.com/auto-news/bb-improves-the-new-vw-passat-b8/99123/>
13. Automobilis Volkswagen Touareg visureigio kėbulu. [žiūrėta 2017-04-16] Prieiga per internetą: <http://www.autoblog.com/2014/12/05/2015-volkswagen-touareg-quick-spin-review-video/>
14. Aerodinaminis vamzdis. [žiūrėta 2017-04-16] Prieiga per internetą: https://lt.wikipedia.org/wiki/Aerodinaminis_vamzdis
15. Automobilio istorija. [žiūrėta 2017-04-24] Prieiga per internetą: https://lt.wikipedia.org/wiki/Automobilio_istorija
16. Automobilio pasipriešinimo koeficientas. [žiūrėta 2017-04-26] Prieiga per internetą: https://en.wikipedia.org/wiki/Automobile_drag_coefficient