



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Savdarbio elektrinio mopedo dinaminių ir stabilumo savybių tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Einius Bubinas
Projekto autorius

Doc. Darius Juodvalkis
Vadovas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Savadarbio elektrinio mopedo dinaminių ir stabilumo savybių tyrimas

Baigiamasis magistro projektas
Transporto priemonių inžinerija (6211EX021)

Einius Bubinas

Projekto autorius

Doc. Darius Juodvalkis

Vadovas

Doc. Ramūnas Skvireckas

Recenzentas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Einius Bubinas

Savadarbio elektrinio mopedo dinaminių ir stabilumo savybių tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Einius Bubinas

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Magistro baigiamojo projekto užduotis

Išduota studentui (-ei) – Einius Bubinas

1. Projekto tema

Savadarbio elektrinio mopedo dinaminis ir stabilumo savybių tyrimas

(Lietuvių kalba)

Research on the Dynamics and Stability of a Self-Built Electric Moped

(Anglų kalba)

2. Projekto tikslas ir uždaviniai

Tikslas: Įvertinti elektrinio mopedo dinamines stabilumo savybes naudojant fizinius tyrimus ir matematinius modelius.

Uždaviniai:

1. sudaryti elektrinio mopedo stabilumo vertinimo matematinį modelį naudojant mokslinės literatūros šaltinius.
2. atlikti elektrinio mopedo fizinius stabilumo tyrimus.
3. palyginti fizinių tyrimų ir matematinio modelio rezultatus.

3. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos

Įvertinti elektrinio mopedo dinamines stabilumo savybes naudojant fizinius tyrimus ir matematinius modelius. Po atliktų tyrimų, atlikti palyginimą tarp fizinių tyrimų ir matematinio modelio.

4. Papildomi reikalavimai projektui, ataskaitai ir jos priedams

Netaikoma

Projekto autorius

Einius Bubinas

2026-02-15

(Vardas, Pavardė)

(Data)

Projekto vadovas

Darius Juodvalkis

2026-02-15

(Vardas, Pavardė)

(Data)

Krypties studijų
programų vadovas

Artūras Keršys

2026-02-15

(Vardas, Pavardė)

(Data)

Bubinas, Einius. Savadarbio elektrinio mopedo dinaminių ir stabilumo savybių tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. Darius Juodvalkis; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Transporto inžinerija (E12), Inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: elektrinis mopedas, projektas.

Kaunas, 2026. 52 p.

Santrauka

Darbo tikslas yra įvertinti elektrinio mopedo dinamines stabilumo savybes naudojant fizinius tyrimus ir matematinį modelį. Atliekama literatūros analizė, kurioje aptariami kokie parametrai įtakoja mažų transporto priemonių valdomumą. Didžiausią poveikį mažose dviratėse transporto priemonėse turi ratų bazė, priekinės šakės kampas, geometrinis takas, priekinės ašies poslinkis. Aptariamas *Whipple* – *Meijaard* dviratės transporto priemonės dinaminis modelis, kuris bus naudojamas prototipo stabilumo reikšmėms apskaičiuoti. Norint palyginti, kaip geometriniai parametrai įtakoja mopedo valdymą, *Solidworks* aplinkoje modeliuojamas mopedas, kuriame galima keisti geometrinius parametrus. Pasirinkta tirti 3 mopedo konfigūracijas: bazinė (ratų bazė 0,96 m, 0 m priekinės ašies poslinkis), inertiška (ratų bazė 1 m, -0,03 m priekinės ašies poslinkis), vikri (ratų bazė 0,9 m, +0,03 m priekinės ašies poslinkis). Naudojantis šiais modeliais yra gaunamos reikšmės reikalingos skaičiavimams matematiniam modeliui, tokie kaip atskaitos taškai, masės centro koordinatės, inercijos momentai. Matematinis modelis perkeliamas į *Matlab* aplinką ir skaičiuojamos mopedo stabilumo savybės. Pagaminamas 3D modelius atitinkantis prototipas iš plieno vamzdžių, elektros variklio, variklio valdiklio, ličio jonų baterijos, ratų. Paruošiama jutiklių sistema, kuri matuos mopedo akceleracijas ir giroskopinius momentus masės centre, vairo kampa, rato greitį ir išsaugos išmatuotus duomenis į *MicroSD* kortelę. Duomenys apdorojami, kad būtų sumažinta variklio ir statinio triukšmo įtaka rezultatams. Atliekami tyrimai: pastovaus posūkio spindulio tyrime 10 km/h greičiu važiuojama 5 m spindulio ratu kelis kartus, stebima ar mopedas išlieka lengvai valdomas pastovaus posūkio metu; staigaus išvengimo manevro tyrime riedant 15 km/h greičiu, staigiai pasukamas vairas, stebima, kaip stabilizuosis mopedas po trikdžio; virtimo ribos lėtėjant tyrime riedama nuo 15 km/h greičio ir stebima, kada mopedas pradės virsti pats. Atlikus fizinius tyrimus rezultatai yra lyginami su matematinio modelio rezultatais. Vikri konfigūracija matematiniam modelyje niekada neperžengė nestabilumo ribos, tačiau dėl didžiausio sistemos dažnio buvo jautriausia krypčių pakitimams. Inertiška konfigūracija matematiniam modelyje pasižymėjo mažesniu sistemos dažniu, kas parodė, kad sistemą mažiau veikia svyravimai, o stabilumo ribą pasiekia vėliau nei vikrioje konfigūracijoje. Fiziniuose tyrimuose vikri konfigūracija išliko stabili, turėjo jautrų ir tikslų vairavimą dėl kurio net mažais greičiais išliko stabilesnė nei kitos konfigūracijos, tačiau reikalavo daug korekcijų tiek važiuojant tiesiai, tiek ratu. Inertiška konfigūracija pasižymėjo geriausiu kryptiniu stabilumu, tačiau lėčiau reagojo į vairavimą, kas atitinka su matematinio modelio padidintą dažnių slopinimą. Bazinė konfigūracija matematiniam modelyje ir fiziniuose tyrimuose pasižymėjo tarpinėmis savybėmis tarp vikrios ir inertiškos konfigūracijos, buvo kaip atskaitos taškas kitoms konfigūracijoms.

Bubinas, Einius. Research on the Dynamics and Stability of a Self-Built Electric Moped. Master's Final Degree Project / supervisor assoc. prof. Darius Juodvalkis; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Transport Engineering (E12), Engineering Science.

Keywords: electric moped, project.

Kaunas, 2026. 52.

Summary

The research objective is to evaluate the dynamic stability properties of an electric moped using physical testing and a mathematical model. A literature analysis is performed, discussing which parameters influence the handling of small vehicles. In small two-wheeled vehicles, the wheelbase, rake angle, geometric trail, and front axle offset have the most significant impact. The Whipple–Meijaard two-wheeled vehicle dynamic model is discussed, which will be used to calculate the stability values of the prototype. To compare how geometric parameters influence moped handling, the moped is modeled in a *Solidworks* environment, where geometric parameters can be adjusted. Three moped configurations were chosen for investigation: base (wheelbase 0.96 m, 0 m front axle offset); inert (wheelbase 1 m, -0.03 m front axle offset); agile (wheelbase 0.9 m, +0.03 m front axle offset). Using these models, values required for calculations in the mathematical model are obtained, such as reference points, center of mass coordinates, and moments of inertia. The mathematical model is transferred to the *Matlab* environment, and the moped's stability properties are calculated. A prototype matching the 3D models is manufactured from steel tubes, an electric motor, a motor controller, a lithium-ion battery, and wheels. A sensor system is prepared to measure moped accelerations and gyroscopic moments at the center of mass, steering angle, and wheel speed, saving the measured data to a *MicroSD* card. Data is processed to reduce the influence of motor and static noise on the results. The following experiments are conducted: constant radius turn test – riding at 10 km/h in a 5 m radius circle several times, observing if the moped remains easy to control during a constant turn; sudden avoidance maneuver test – while coasting at 15 km/h, the steering is turned suddenly, observing how the moped stabilizes after the disturbance; Capsize limit deceleration test – coasting from 15 km/h and observing when the moped begins to tip over on its own. After performing the physical tests, the results are compared with the mathematical model results. The Agile configuration in the mathematical model never crossed the instability threshold, but due to the highest system frequency, it was the most sensitive to directional changes. The Inert configuration in the mathematical model was characterized by a lower system frequency, indicating that the system is less affected by oscillations and reaches the stability limit later than in the agile configuration. In physical tests, the Agile configuration remained stable and had sensitive and precise steering, which allowed it to stay more stable than other configurations even at low speeds, but it required many corrections while riding both straight and in a circle. The Inert configuration was characterized by the best directional stability but reacts more slowly to steering, which corresponds to the lowest system frequency of the mathematical model. The Base configuration in the mathematical model and physical tests was characterized by intermediate properties between the agile and inert configurations, serving as a reference point for the other configurations.

Turinys

Lentelių sąrašas	9
Paveikslų sąrašas	10
Įvadas.....	11
1. Dviračių elektrinių transporto dinaminė savybių apžvalga.....	12
1.1. Dviračių transporto priemonių valdomumas ir stabilumas	12
1.2. Geometriniai parametrai	12
1.3. Posvyrio kampas.....	15
1.4. Statinis stabilumas ir svorio pasiskirstymas	16
1.5. Girokopinis momentas	16
1.6. Supaprastintas dinaminis modelis	16
1.7. Svyravimai ir slopinimas	18
1.8. Skaičiavimo eiga ir interpretacija	19
1.9. Prototipo duomenys gaunami iš <i>Solidworks</i>	22
1.10. Supaprastinto dinaminio modelio perkėlimas į <i>Matlab</i> aplinką.....	24
2. Tyrimo ypatybės	26
2.1. Tyrimo aplinka	26
2.2. Tyrimo manevrai	26
2.2.1. Pastovaus posūkio spindulio tyrimas.....	26
2.2.2. Staigaus išvengimo manevro tyrimas	26
2.2.3. Virtimo ribos lėtėjant tyrimas.....	27
2.3. Reguluojama prototipo geometrija	27
2.3.1. Reguluojamos geometrinės konfigūracijos	28
2.4. Jutiklių sistema	28
2.4.1. Jutiklių specifiška ir montavimas.....	29
2.4.2. Jutiklių kalibravimo procedūros	31
2.4.3. Duomenų surinkimas	32
3. Tyrimų eiga ir rezultatų palyginimas	34
3.1. Savadarbio prototipo duomenys	34
3.2. Matematiniai skaičiavimai.....	36
3.3. Vairavimo tyrimai	39
3.3.1. Statinis ir variklio triukšmas matavimuose	39
3.3.2. Pastovaus posūkio spindulio tyrimas.....	40
3.3.3. Staigaus išvengimo manevro tyrimas	42
3.3.4. Virtimo ribos lėtėjant tyrimas.....	45
3.4. Rezultatų palyginimas	48
Išvados	50
Literatūros sąrašas	51
Priedai.....	53
1 priedas. Matematinio modelio <i>Matlab</i> kodas	53
2 priedas. Triukšmo analizės <i>Matlab</i> kodas	57
3 priedas. Pastovaus posūkio spindulio tyrimo rezultatų analizės <i>Matlab</i> kodas.....	58
4 priedas. Staigaus išvengimo manevro tyrimo rezultatų analizės <i>Matlab</i> kodas	59
5 priedas. Staigaus išvengimo manevro tyrimo papildomų bandymų grafikai	60
6 priedas. Virtimo ribos lėtėjant tyrimo <i>Matlab</i> kodas.....	63

7	priedas. Virtimo ribos lėtėjant tyrimo papildomi tyrimai.....	64
8	priedas. Jutiklių sistemos <i>Arduino IDE</i> kodas.....	66

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Skirtingų konfigūracijų geometriniai parametrai	34
2 lentelė. Skirtingų konfigūracijų atskaitos taškai	34
3 lentelė. Bazinės konfigūracijos dalių masė ir masės centro koordinatės	34
4 lentelė. Inertiškos konfigūracijos dalių masė ir masės centro koordinatės	35
5 lentelė. Vikrios konfigūracijos dalių masė ir masės centro koordinatės	35
6 lentelė. Bazinės konfigūracijos dalių inercijos momentai.....	35
7 lentelė. Inertiškos konfigūracijos dalių inercijos momentai	35
8 lentelė. Vikrios konfigūracijos dalių inercijos momentai	35
9 lentelė. Bazinės konfigūracijos staigaus išvengimo manevro pikų ir slopinimo koeficiento lentelė	43
10 lentelė. Inertiškos konfigūracijos staigaus išvengimo manevro pikų ir slopinimo koeficiento lentelė	44
11 lentelė. Vikrios konfigūracijos staigaus išvengimo manevro pikų ir slopinimo koeficiento lentelė	44
12 lentelė. Kritinio virtimo greičio rezultatų lentelė.....	47
13 lentelė. Fizinių ir matematinio tyrimų skirtingų mopedo konfigūracijų charakteristikos.....	48

Paveikslų sąrašas

1 pav. Ratų bazė [4]	13
2 pav. Priekinės šakės geometriniai parametrai [4]	13
3 pav. Priekinės šakės kampas [4]	14
4 pav. Geometrinio tako dydis, priklausantis nuo priekinės šakės poslinkio [4]	14
5 pav. Vairuotojo ir motociklo masės centrai [1].....	15
6 pav. Mopedo su vairuotoju 3D modelis <i>Solidworks</i> aplinkoje	22
7 pav. Nuo kairės į dešinę: vikri, bazinė, inertiška mopedo konfigūracijos <i>Solidworks</i> aplinkoje... 22	22
8 pav. <i>Mass properties</i> funkcijoje matomos priekinės šakės reikšmės.....	23
9 pav. Atskaitos taškų koordinatų matavimas, naudojant <i>evaluate measure</i> funkciją	24
10 pav. Naudojant <i>evaluate measure</i> funkciją, randamas priekinės šakės kampas	24
11 pav. Kairėje galinės ašies tvirtinimo taškai, dešinėje – priekinė ašies tvirtinimo taškai	27
12 pav. Elektros variklio tvirtinimas rėme	28
13 pav. Principinė jutiklių sistemos schema	29
14 pav. <i>Nano arduino</i> valdiklio <i>CH340</i> schema [16]	29
15 pav. Inercijos momentų jutiklis <i>MPU-9250</i> [18]	29
16 pav. Magnetinis rotacinis jutiklis <i>AS5600</i> [22].....	30
17 pav. Magnetinis jutiklis <i>KY-003</i> [21].....	30
18 pav. Sujungta jutiklių sistema	30
19 pav. Mopedas su jutiklių sistema	31
20 pav. Duomenų surinkimo failo pavyzdys	32
21 pav. Bazinės konfigūracijos stabilumo ir dažnių grafikai	36
22 pav. Inertiškos konfigūracijos stabilumo ir dažnių grafikai.....	37
23 pav. Vikrios konfigūracijos stabilumo ir dažnių grafikai.....	38
24 pav. Triukšmo analizės grafikai	40
25 pav. Vairo kampo priklausomybė nuo šoninio pagreičio pastovaus spindulio posūkio eksperimentuose	41
26 pav. Bazinės konfigūracijos staigaus išvengimo manevro 1 bandymo duomenų grafikas	42
27 pav. Inertiškos konfigūracijos staigaus išvengimo manevro 1 bandymo duomenų grafikas	43
28 pav. Vikrios konfigūracijos staigaus išvengimo manevro 1 bandymo duomenų grafikas.....	44
29 pav. Bazinės konfigūracijos virtimo ribos 1 bandymo duomenų grafikas.....	46
30 pav. Inertiškos konfigūracijos virtimo ribos 1 bandymo duomenų grafikas.....	46
31 pav. Vikrios konfigūracijos virtimo ribos 1 bandymo duomenų grafikas	47

Įvadas

Augant tvarių, elektra varomų, transporto priemonių skaičiui miestuose, sparčiai kinta ir asmeninių dviračių transporto priemonių rinka. Rinkoje matyti daug skirtingų transporto priemonių, kurios tinkamos eksploatuoti įvairiomis kelio dangomis, skirtingais atstumais bei greičiais. Norint padidinti žmogaus mobilumą miestuose ir neužimti daug vietos sandėliuojant ar statant elektrinę dviratę transporto priemonę, vis daugiau žmonių renkasi mažesnes transporto priemones. Nuolat tobulėjančios technologijos šioms transporto priemonėms ne tik leidžia nuvažiuoti didesnius atstumus, bet ir leidžia pasiekti kelionės taškus greitai ir patogiai. Šio tyrimo tikslas – įsigilinti į elektrinių dviračių transporto priemonių dinamikos ir stabilumo savybes, sudarant elektrinio mopedo vertinimo matematinį modelį, naudojantis mokslinės literatūros šaltiniais. Didėjant šių transporto priemonių paklausai, svarbu optimizuoti transporto priemonių stabilumo savybes, kad būtų užtikrintas vairuotojo saugumas ir tobulinamos technologijos būtų naudingos vairuotojams. Sudarius matematinį modelį, būtų galima lengviau įvertinti elektrinio mopedo stabilumo savybes ir jas palyginti su analogais ar gautais fiziniiais tyrimais. Atliekant fizinius tyrimus su savadarbiu elektriniu mopedu galima rinktis, į kurias stabilumo savybes atsižvelgiama labiausiai. Palyginus fizinių tyrimų rezultatus su matematinio modeliu, galima tobulinti matematinį modelį, taip gaunant tikslesnius skaičiavimus. Tai leistų pakeisti elektrinio mopedo savybes modelyje ir apskaičiuoti stabilumo faktorius, prieš atliekant pakeitimus realiame elektriniame mopede ir atliekant fizinius tyrimus iš naujo.

Uždaviniai:

1. Sudaryti elektrinio mopedo stabilumo vertinimo matematinį modelį naudojant mokslinės literatūros šaltinius.
2. Atlikti elektrinio mopedo fizinius stabilumo tyrimus.
3. Palyginti fizinių tyrimų ir matematinio modelio rezultatus.

1. Dviračių elektrinių transporto dinaminė savybių apžvalga

1.1. Dviračių transporto priemonių valdomumas ir stabilumas

Dviračių transporto priemonių dinamikos tyrimai apima daug skirtingų mokslo sričių, tokių kaip statika, transporto priemonių inžinerija, vairuotojo įtaka, važiuoklės ir padangų ypatumai. Nors įprasti motociklai ir dviračiai valdomi tais pačiais principais, jų funkcionavimas skiriasi nuo transporto priemonės geometrijos, svorio pasiskirstymo ir greičio. Mažos dviratės transporto priemonės, tokios kaip mini-mopedai, susilankstantys elektriniai dviračiai ar elektriniai paspirtukai, didžiąją laiko dalį yra eksploatuojami mažais greičiais, kur yra daug kliūčių, todėl geometriniai parametrai dažnai turi didesnę įtaką nei inercinės ar giroskopinės jėgos. [1, 2, 3]

Dauguma tyrimų buvo atlikti įprasto dydžio motociklams, kuriuose buvo išanalizuoti jų stabilumo modeliai, valdymo charakteristikos ir sąveika tarp vairuotojo ir transporto priemonės. Tačiau šie tyrimai naudojo didesnius ratus, kitokius svorio pasiskirstymus, didesnio greičio diapazonus, kurie smarkiai skiriasi nuo mažų dviračių transporto priemonių. [1]

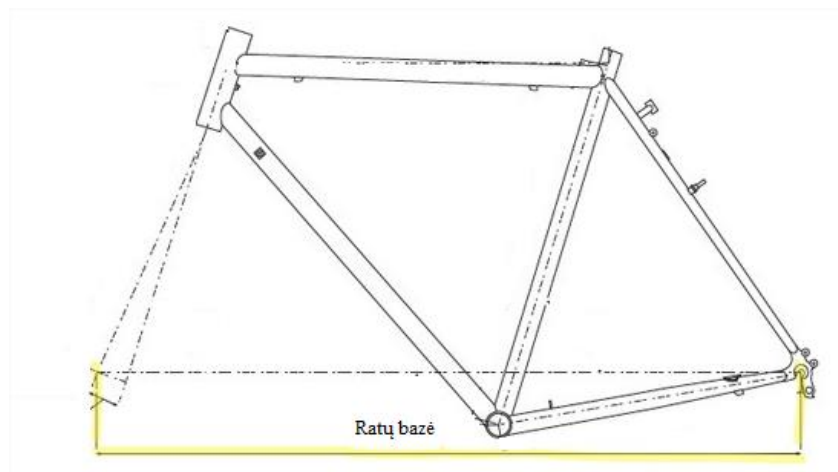
Dėl mažų ratų, trumpesnės ratų bazės ir aukštesnio masės centro, mažoms dviratėms transporto priemonėms geometriniai parametrai daro didesnę įtaką.

Maži ratai ir trumpesnė ratų bazė padidina kelio nelygumų įtaką ir vairavimo jautrumą, o aukštesnis masės centras bei mažesni išvystomis greičiai sumažina dinaminį stabilizavimą. Šios charakteristikos leidžia mažose transporto priemonėse tirti tik geometrines ypatybes, nepaisant jėgų, kurios atsiranda eksploatuojant transporto priemonę dideliais greičiais.

1.2. Geometriniai parametrai

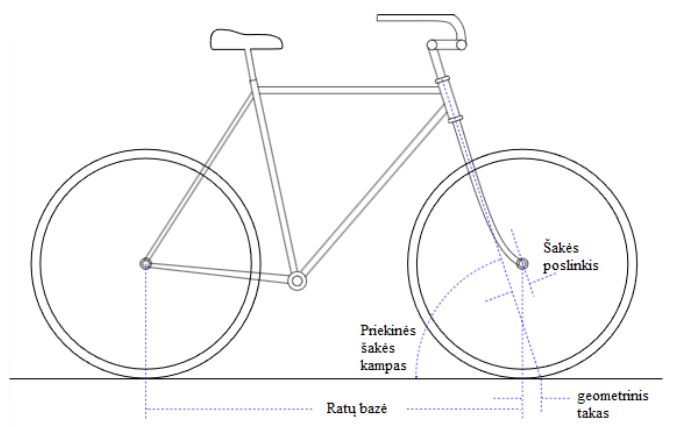
Geometriniai parametrai nusako transporto priemonės sąveiką tarp kelio, ratų ir rėmo. Šie parametrai gali stipriai pakeisti transporto priemonės valdymą, todėl net maži pokyčiai juose gali pakeisti daug valdymo aspektų. Be to, keičiant vieną iš geometrinių parametru, kiti parametrai taip pat keisis. Tai reiškia, kad vieno koregavimas dažnai reikalauja kompensuojamų pokyčių kituose. Mažoms dviratėms transporto priemonėms geometriniai parametrai yra svarbesni, nes šiose priemonėse naudojami maži ratai neturi didelės įtakos vairavimui. [1]

Ratų bazė yra atstumas nuo galinės iki priekinės ašies. Dažnu atveju ilgesnė ratų bazė padidina tiesiaieigio judėjimo stabilumą, tačiau sumažina valdymą posūkiuose. Trumpesnė ratų bazė veikia atvirkščiai – padidina vikrumą posūkiuose, tačiau sumažina stabilumą. Tai reiškia, kad esant trumpesnei ratų bazei, kelio nelygumai yra jaučiami daug labiau. [1, 4, 25]



1 pav. Ratų bazė [4]

Geometrinis takas yra horizontalus atstumas tarp vairavimo ašies tiesės susikirtimo su žeme ir padangos susilietimo su žeme atstumas. Tai yra viena pagrindinių stabilumą suteikiančių savybių. Didesnis geometrinis takas transporto priemonei padeda save centruoti suteikiant daugiau stabilumo važiuojant tiesiai ar posūkiuose. Mažesnis geometrinis takas suteikia staigesnį atsaką į vairavimą, tačiau sumažina stabilumą. [1, 5]



2 pav. Priekinės šakės geometriniai parametrai [4]

Mažos dviratės transporto priemonės turi mažesnius geometrinius takus dėl mažo ratų dydžio ir bendro rėmo dydžio apribojimo. Jis yra apskaičiuojamas naudojant (1) formulę [1]:

$$T = \frac{R \cos(\theta) - FO}{\sin(\theta)}; \quad (1)$$

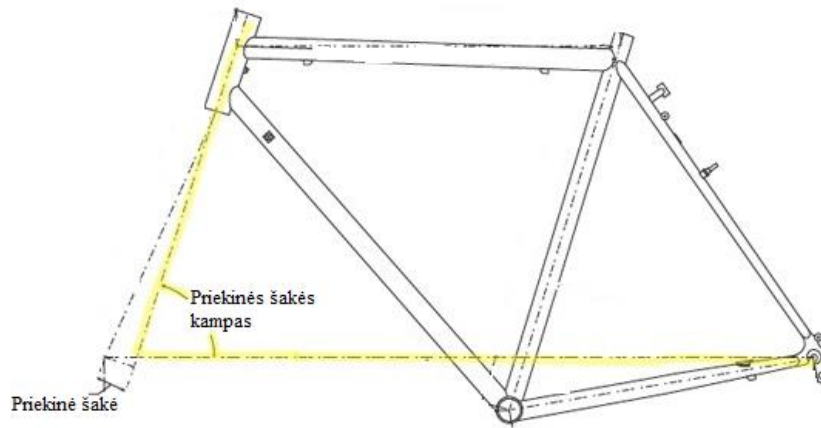
čia T – geometrinis takas, m;

R – rato spindulys, m;

θ – priekinės šakės kampas, laipsniai arba radianai;

FO – šakės poslinkis, m.

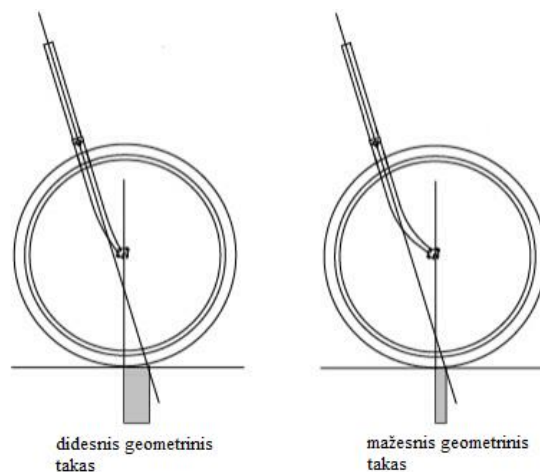
Priekinės šakės kampas yra kampas tarp priekinės šakės ir žemės. Statesnis kampas sukuria staigesnį atsaką į vairo valdymą, tačiau sumažina geometrinį taką. Smailesnis kampas padidina stabilumą valdant ir padidina geometrinį taką. Mažos dviratės transporto priemonės dažnai naudoja statesnius priekinės šakės kampus dėl mažų ratų ar rėmo dydžio apribojimų. [1, 4, 25]



3 pav. Priekinės šakės kampas [4]

Priekinės šakės kampui nustatyti yra matuojamas kampas tarp horizontalios ašies (žemės) ir priekinės šakės. Daugumoje dviračių priekinės šakės kampas yra statesnis nei motocikluose, nes jų eksploatuojamas greitis bei girokopinės jėgos yra mažesnės.

Šakės poslinkis yra horizontalus atstumas tarp vairo kolonėlės ašies ir priekinio rato ašies centro. Didesnis poslinkis sumažina geometrinį taką, taip vairavimą padaro vikresniu ir lengvesniu. Neigiamas poslinkis padidina geometrinį taką bei stabilumą, tačiau apsunkina vairo pasukimą. [1, 4]



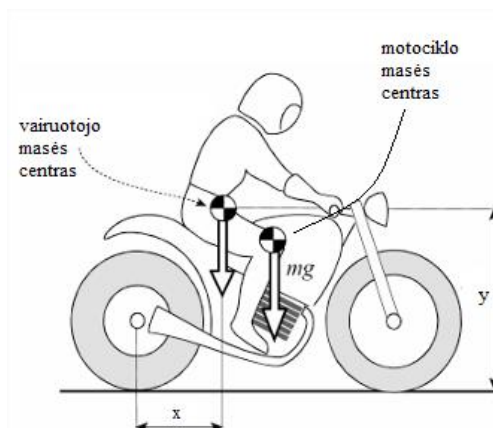
4 pav. Geometrinio tako dydis, priklausantis nuo priekinės šakės poslinkio [4]

Šakės poslinkis yra matuojamas sukuriant paralelinę ašį priekinei šakei, kuri prasideda nuo priekinio rato ašies, tuomet matuojamas atstumas tarp šakės ir naujos ašies. Šis poslinkis gali būti nukreiptas į abi šakės puses, norint pasiekti norimą geometrinį taką.

Šakės poslinkis yra matuojamas pratęsiant priekinės vairavimo ašies liniją iki padangos kontakto su žeme paviršiaus, sukuriama statmena linija iki žemės paviršiaus nuo priekinio rato ašies, tuomet matuojamas atstumas tarp pratęstos vairavimo ašies tiesės iki statmenos rato ašies linijos. Norint pasiekti norimą geometrinį taką šis poslinkis gali būti nukreiptas ir toliau nuo vairavimo ašies arba arčiau rėmo.

Masės centras daro įtaką svorių pasiskirstymui ašyse, vairo sukimo momentui, virtimo inercijai, stabdymo stabilumui. Dėl mažo dviračių transporto priemonių dydžio jų masės centras yra ganėtinai

aukštai, tad dauguma sunkių komponentų, tokių kaip variklis ar baterija yra dedami kuo žemiau, kad masės centras būtų kuo arčiau žemės. Mažoms dviratėms transporto priemonėms ir dviračiams didžiąją masės dalį sudaro vairuotojas. [1, 2]



5 pav. Vairuotojo ir motociklo masės centrai [1]

Skirtingų dviratės transporto priemonės komponentų ir vairuotojo masės centras gali būti apskaičiuojamas naudojantis tokiomis programomis kaip *Solidworks* arba suskirstant visą transporto priemonę į mažesnius komponentus, išmatuojant jų masę ir koordinates, parenkant kiekvienam komponentui jo geometrinį centrą, ir tuomet apskaičiuojant masės centrą. Didžiausia problema su geometriniais parametrais yra tai, kad keičiant vieną iš parametru, yra pakeičiamas ir kitas pvz.: didinant šakės poslinkį yra sumažinamas geometrinis takas, todėl reikėtų reguliuoti priekinės šakės kampą.

1.3. Posvyrio kampas

Posvyris posūkyje atsiranda dėl įcentrinės jėgos balanso su horizontalia normaliosios jėgos dedamąja. Naudojant šią formulę, yra daroma prielaida, kad posūkis yra atliekamas ant tiesaus paviršiaus, nesant vėjo poveikiui, pilnam padangų sukibimui ir nėra papildomo vairuotojo posvyrio rėmo atžvilgiu. [1]

Posvyris posūkyje yra apskaičiuojamas pagal (2) formulę:

$$\tan(\phi) = \frac{v^2}{gR}; \quad (2)$$

čia ϕ – posvyrio kampas, laipsniai arba radianai;

v – greitis, m/s;

g – laisvo kritimo pagreitis, 9,81 m/s²;

R – posūkio spindulys, m.

Šoninio pagreičio (a_y) formulė leidžia įvertinti didžiausią šoninį pagreitį esant tam tikram greičiui ir rato spinduliui:

$$a_y = \frac{v^2}{R}; \quad (3)$$

Šios formulės padeda nustatyti posvyrio kampą ir šoninį pagreitį posūkio metu, kuris bus naudingas lyginant su tyrimo metu gautais rezultatais.

1.4. Statinis stabilumas ir svorio pasiskirstymas

Statinis stabilumas parodo transporto priemonės atsparumą virtimui stovint vietoje ar lėtai judant. Svarbu atkreipti dėmesį, kad dviratės transporto priemonės nėra statiškai stabilios, nes jos liečiasi su žeme tik dvejuose taškuose, todėl reikia išorinių atramų ar korekcijų, norint išlaikyti stabilumą. Dėl to statinis stabilumas nėra skaičiuojamas.

Svorio pasiskirstymas yra apskaičiuojamas norint suprasti kaip svorio centras paveikia ašis. Priekinei ašiai svorio centras apskaičiuojamas pagal (3) formulę, o galinei ašiai pagal (4) formulę [1]:

$$F_{\text{priek.}} = \frac{L_{\text{gal.}}}{L} mg; \quad (4)$$

$$F_{\text{gal.}} = \frac{L_{\text{priek.}}}{L} mg; \quad (5)$$

čia $F_{\text{priek.}}$ – svoris priekinėje ašyje, N;

$F_{\text{gal.}}$ – svoris galinėje ašyje, N;

$L_{\text{priek.}}$ – atstumas nuo svorio centro iki priekinės ašies, m;

$L_{\text{gal.}}$ – atstumas nuo svorio centro iki galinės ašies, m;

L – ratų bazė, m;

m – masė, kg;

g – laisvo kritimo pagreitis, 9,81 m/s².

Žinant svorio pasiskirstymą galima rasti masės centro vietą horizontalioje ašyje. Tai yra naudinga, kai atliekama prototipo gamyba.

1.5. Giroskopinis momentas

Giroskopinis momentas parodo stabilizuojantį momentą, kuris yra sukuriamas ratams sukantis. Jis apskaičiuojamas pagal (5) formulę [1]:

$$M_g = I_w \omega \dot{\phi}; \quad (6)$$

čia M_g – giroskopinis momentas, Nm;

I_w – rato rotacinė inercija, kg m²;

ω – rato kampinis greitis, rad/s;

$\dot{\phi}$ – riedėjimo greitis, rad/s.

Kadangi maži ratai turi mažą rotacinę inerciją, giroskopinis stabilizavimas yra silpnas. Ši formulė paaiškina kodėl giroskopiniai efektai turi mažą įtaką mažoms dviratėms transporto priemonėms jas eksploatuojant mažais greičiais.

1.6. Supaprastintas dinaminis modelis

Dviračių transporto priemonių dinaminis valdymas gali būti apibūdintas įvairiais matematiniais modeliais, svyruojant nuo didelio tikslumo netiesinių formulių iki apytikslių duomenų, kurie gaunami su paprastomis formulėmis. Šiam darbui bus naudojama supaprastintas *Meijaard – Whipple* linijinis dviratės transporto priemonės modelis. Šis modelis yra ganėtinai tikslus ir matematiškai paprastas. Jis gali parodyti sąveiką tarp posvyrio ir vairavimo ir tai yra vienas pagrindinių stabilumo faktorių, eksploatuojant transporto priemonę mažais greičiais. [6, 7, 40].

Modelis reikalauja kelių prielaidų:

- transporto priemonė važiuoja pastoviu greičiu;
- posvyrio kampas ir posūkio kampas yra maži;
- ratų kontaktas su žeme yra modeliuojamas kaip disko ašmuo, be šoninio slydimo, darant prielaidą, kad padangos yra labai plonos;
- rėmas, priekinė šakė ir ratai yra standūs objektai;
- nėra važiuoklės elementų, kurie galėtų sugerti nelygumus, tokių kaip amortizatoriai ir t.t.;
- kontaktas tarp žemės ir padangos yra neslidus, nėra šoninio slydimo.

Šios prielaidos leidžia supaprastinti sistemą iki ketvirtosios eilės linijinio modelio su dvejais laisvės laipsniais, kuris yra pakankamai tikslus stabilumo analizei ir skirtingos geometrijos patikrinimui.

Supaprastinto modelio konfigūraciją apibūdina dvi apibendrintos koordinatės – ϕ posvyrio kampas rėme ir δ priekinės šakės posūkio kampas. Konfigūracijos vektorius yra:

$$q = \begin{bmatrix} \phi \\ \delta \end{bmatrix}; \quad (7)$$

Išvedus nelinijines formules į linijines, joms remiantis tiesiaiegiu judėjimu, modelis formuojamas taip:

$$M \ddot{q} + v C_1 \dot{q} + (K_0 + v^2 K_2) q = 0; \quad (8)$$

čia M – masės ir inercijos matrica;

C_1 – greičio proporcingo slopinimui ir giroskopinė matrica;

K_0 – gravitacijos ir geometrinio standumo matrica;

K_2 – greičio, pakelto kvadratu standumo matrica;

v – greitis, m/s.

Masės matrica M parodo pradinis pasipriešinimus posvyriui ir sukimo greitėjimams. Joje yra nurodytos rėmo ir ratų inercijos, masės pasiskirstymas, geometriniai parametrai, tokie kaip ratų bazė ir priekinės šakės kampas. Slopinimo matrica C_1 atsakinga už stabilumo elgseną, tokią kaip vinguriavimą. Joje yra nurodomi giroskopiniai efektai, kuriuos patiria besisukantys ratai, rotacinis ir vibracijų sąryšis tarp posvyrio ir posūkio, nuo greičio priklausomos stabilizuojančios ir destabilizuojančios sąveikos. Standumo matrica K_0 parodo gravitacijos įtaką, geometrinio tako ir priekinės šakės kampo įnašus. Kvadratinio greičio standumo matrica K_2 parodo greičio įtaką vairavimo geometrijai, padangų kontakto kinematiką, dinaminis masės pokyčius. [6, 7]

Formulės išvestinė sudaroma:

1. nustatant standžius kūnus (ratai, rėmas, priekinė vairavimo šakė);
2. naudojant Lagranžo formules gaunamos pilnos netiesinės dinaminės formulės;
3. pasirenkamas pradinis pusiausvyros taškas – tiesiaiegis judėjimas pastoviu greičiu;
4. formulės padaromos tiesinėmis aplink pusiausvyros tašką (maži kampai ir smulkūs trikdžiai);
5. visi koeficientai sugrupuojami pagal greitį;
 - Nepriklausomi nuo greičio M, K_0 ;
 - Proporcingi greičiui vC_1 ;
 - Proporcingi kvadratiniam greičiui v^2K_2 ;
6. sumodeliuoti dvejų laisvės laipsnių sistemą.

Nors modelis yra aprašomas tik dvejais laisvės laipsniais (ϕ ir δ), tiriant dinaminę sistemą reikia įvertinti ne tik jų poslinkius, bet ir kitimo greičius ($\dot{\phi}$ ir $\dot{\delta}$). Transformuojant (7) lygtį į būsenos erdvę, sudaroma 4 x 4 matrica, kurioje 4 tikrinės reikšmės apibūdina sistemos stabilumą.

1.7. Svyravimai ir slopinimas

Supaprastintas dinaminis modelis leidžia apibūdinti dviratės transporto priemonės dinaminį elgesį pagal jos natūralius režimus. Šie režimai atsiranda dėl susietos rėmo posvyrio ϕ ir vairo posūkio δ dinamikos todėl jie nusako, kaip transporto priemonė reaguoja į išorinius trikdžius važiuojant. Nagrinėjamos mažoms dviratėms transporto priemonėms šie režimai svarbūs, nes maži geometriniai pokyčiai (priekinės svirties kampas, geometrinis takas) gali smarkiai veikti valdymą. [6, 7, 40]

Natūralūs režimai gaunami gaunant tikrines reikšmes iš *Meijaard* lygčių sistemos:

$$M \ddot{q} + v C_1 \dot{q} + (K_0 + v^2 K_2)q = 0; \quad q = \begin{bmatrix} \phi \\ \delta \end{bmatrix}; \quad (7, 8)$$

Priimant $q(t) = ue^{\lambda t}$ formos sprendinius, tuomet formulė tampa:

$$de t(\lambda^2 M + \lambda v C_1 + K_0 + v^2 K_2) = 0; \quad (9)$$

Tikrinės reikšmės λ apibūdina sistemos natūralų dažnį ir svyravimus. Jei $\delta < 0$, trikdžiai yra slopinami – sistema stabili, jei $\delta > 0$ – trikdžiai didėja, sistema nestabili. Tikrinių reikšmių bendroji forma yra:

$$\lambda = \delta \pm i \omega_d; \quad (10)$$

čia δ – reali dalis, kuri apibūdina režimo stabilumą;

ω_d – įsivaizduojama dalis, kuri nurodo nuslopintą dažnį.

Yra 2 pagrindiniai režimai, kurie nusako svyravimus transporto priemonėje – vinguriavimas (angl. *weave*) ir virpėjimas (angl. *wobble*).

Vinguriuojant vyksta mažo dažnio svyravimai sistemoje tarp posvyrio ir vairavimo kampo. Įprastai transporto priemonė važiuodama svyruoja iš vieno šono į kitą, keisdama posūkio kampą į priešingą pusę, norėdama išlaikyti balansą. Mažais greičiais šis režimas dažniausiai yra nestabilus, tačiau didesniais greičiais jis yra labiau slopinamas dėl groskopinių efektų ir geometrinio tako įtakos. Didžiausią įtaką šiam režimui turi svorio pasiskirstymas, priekinės šakės kampas, geometrinis takas, ratų bazė, greitis. [1, 6, 7, 23]

Virpėjimas yra aukšto dažnio vairavimo svyravimai priekinėje vairavimo sistemoje. Šie svyravimai vyksta priekinėje ašyje, kurioje yra perduodama posūkio jėga, rėmo posvyrio įtaka šiame režime yra minimali. Važiavimo metu vykstant virpėjimui priekinė šakė pradeda dideliu dažniu keisti vairavimo kryptį, kuri slopinama pakeičiant greitį į didesnę arba sulaukiant kol ji nuslops pati. Šį režimą labiausiai veikia vairavimo inercijos momentas, padangų, priekinės šakės konstrukcinis standumas. Priešingai nei vinguriavimas, virpėjimas yra gerai slopinamas visame greičių diapazone, tačiau gali atsirasti esant specifiniams masės ir standumo santykiams bei esant netvarkingai vairavimo sistemai. [1, 6, 7, 23]

Taip pat yra 2 papildomi režimai, kurie turi mažesnę įtaką bendram eksploatavimui, nes jų svyravimai yra monotoniniai ir turi mažesnę įtaką bendram eksploatavimui:

1. Virtimo režimas (angl. *capsize*) yra lėtas, nesvyruojantis nestabilumas, kuris atsiranda vidutiniuose ir dideliuose greičiuose. Šiame režime dviratė transporto priemonė iš lėto virsta į vieną pusę, nebent yra pataisoma vairuotojo. Pagrindinę įtaką apsisvertimo režimui turi bendros masės centras, rėmo geometrija. [1, 23]
2. Kasterio režimas (angl. *caster*) yra stabilus, nesvyruojantis režimas, glaudžiai susijęs su priekinio rato savi lygiavimu. Tai yra natūrali priekinio rato tendencija save išlygiuoti dėl geometrinio tako ir priekinės šakės kampo. [1, 23]

Šie režimai ypač svarbūs mažoms transporto priemonėms, nes esant mažiems ratams, mažam geometriniam takui, stačiam priekinės šakės kampui, mažiems greičiams transporto priemonė tampa jautri posvyrio ir vairavimo pokyčiams. Randant natūralius dažnius ir jų slopinimo koeficientus galima įvertinti, kokiais greičiais transporto priemonė bus stabiliausia. Pagal tai, galima keisti geometriją, norint optimizuoti stabilumą.

1.8. Skaičiavimo eiga ir interpretacija

Prieš pradėdant skaičiavimus surenkami prototipo duomenys:

- geometriniai parametrai, tokie kaip ratų bazė, priekinės šakės kampas, geometrinis takas, masės centro koordinatės, kurios yra gaunamos iš 3D prototipo modelio;
- prototipo su vairuotoju mase, kurie yra gaunami iš 3D modelio ir būsimų komponentų masės, tokių kaip variklio ir baterijos;
- inercijos momentai, kurie yra gaunami iš 3D modelio su vairuotoju;
- greitis, kurio diapazonas yra pasirenkamas.

Norint nustatyti dviratės transporto priemonės dinaminis režimus, tiesinės judėjimo formulės yra pakeičiamos į kvadratinės tikrinių reikšmių formules. Naudojant apibendrintą kampų (posvyrio ir posūkio) vektorių $q = \begin{bmatrix} \phi \\ \delta \end{bmatrix}$, Tiesine judesio formulė yra:

$$M\ddot{q} + v C_1\dot{q} + (K_0 + v^2 K_2)q = f; \quad (8)$$

čia M – masės ir inercijos matrica, kg m²;

\ddot{q} – antrinė išvestinė, nusakanti kampinius pagreičius, rad/s²;

v – greitis, m/s;

C_1 – greičio, proporcingo slopinimui, matrica, kg m²/s²;

\dot{q} – pirminė išvestinė, nusakanti kampinius greičius, rad/s;

K_0 – gravitacijos ir standumo matrica, kg m²/s²;

K_2 – dinaminio standumo, priklausomo nuo greičio, matrica, kg m²/s²;

Tuomet skaičiuojamos tikrinės vertės. Naudojama standartinė eksponentinė formulė:

$$q(t) = \hat{q}e^{\lambda t}; \quad (11)$$

Kurioje λ yra tikrinė reikšmė, o \hat{q} yra tikrinis vektorius, kuris nusako posvyrio ir vairavimo kampo amplitudes skaičiuojamame režime. Pakeičiant šią išraišką į judesio formules, laiko išvestinės yra pakeičiamos į algebrinius faktorius [6]:

$$\dot{q} = \lambda \hat{q} e^{\lambda t}; \ddot{q} = \lambda^2 \hat{q} e^{\lambda t}; \quad (12, 13)$$

Padalijus ne nulinę eksponentinę dalį, formulė tampa:

$$(\lambda^2 M + \lambda v C_1 + K_0 + v^2 K_2) \hat{q} = 0; \quad (14)$$

Tai yra kvadratinė tikrinių reikšmių formulė. Sprendinys, kuriame ne visi kintamieji yra lygūs nuliui, egzistuoja tik tada, kai koeficiento matricos determinantas yra nulis:

$$\det(\lambda^2 M + \lambda v C_1 + K_0 + v^2 K_2) = 0; \quad (15)$$

Išsprendžiant šią formulę yra gaunamos tikrinės reikšmės, kurių realiosios ir įsivaizduojamos dalys nusako sistemos stabilumą ir svyravimų dažnį. Kiekvienai tikrinei reikšmei yra priskiriamas tikrinis vektorius, kuris gaunamas išsprendžiant homogeninę tiesinių lygčių sistemą. Visa tai nusako kaip rėmo posvyrio ir vairavimo kampai paveikia važiavimą kiekviename dinamiame režime, tokiaime kaip vinguriavimas ir virpėjimas.

Kiekvienam pasirinktam greičiui dviratės transporto priemonės linijinė dinamika yra įvertinama surenkant matricas M , C_1 , K_0 ir K_2 . Šios matricos nusakomos kvadratinė tikrinių reikšmių formule, iš kurių yra gaunamos tikrinės reikšmės ir tikrinių reikšmių vektoriai. Šios matricos sudaro *Meijaard* modelio pagrindą, jos visos yra 2×2 dydžio, nes tiesiogiai atitinka sistemos posvyrį ϕ ir vairavimą δ . Matricos yra sudaromos:

- M – masės ir inercijos matrica apibūdina masės ir inercijos pasiskirstymą. Jos reikšmės apskaičiuojamos naudojantis transporto priemonės ir vairuotojo mase, masės centrų koordinatėmis ir inercijos momentais. Ji įvertina modelyje esantį pasipriešinimą kampiniam greičiui.
- C_1 – greičio, proporcingo slopinimui, matrica aprašo jėgas, kurios yra proporcingos važiavimo greičiui. Pagrindiniai parametrai matricoje yra abiejų ratų inercijos momentai, geometriniai ryšiai tarp posvyrio ir vairo sukimosi greičių. Ji parodo, kaip besisukantys ratai bando stabilizuoti sistemą.
- K_0 – gravitacijos ir standumo matrica apibūdina gravitacijos įtaką ir sistemos geometrinę konfigūraciją nejudant. Ji sudaroma iš laisvojo kritimo pagreičio, bendros masės ir priekinės šakės posvyrio kampo. Ši matrica parodo sistemos tendenciją nuvirsti dėl svorio jėgos.
- K_2 – dinaminio standumo, priklausomo nuo greičio matrica nusako jėgas, kurios yra priklausomos nuo kvadratinio greičio. Ji apima išcentrines jėgas bei geometrinius efektus, taip parodanti, kaip transporto priemonė tiesinasi važiuodama dideliu greičiu.

Tikrinės reikšmės nusako stabilumo ir svyravimų elgesį, o tikrinių reikšmių vektoriai nusako santykinį posvyrio ir vairavimo kampo judesį kiekviename režime.

Prie kiekvieno greičio, kvadratinė tikrinių reikšmių formulė yra išsprendžiama:

$$(\lambda^2 M + \lambda v C_1 + K_0 + v^2 K_2) x_i = 0. \quad (16)$$

Paverčiant tikrinių reikšmių formą į:

$$\lambda_i = \sigma_i \pm i \omega_{d,i}; \quad (17)$$

čia σ_i – reali dalis režime i ;

$\omega_{d,i}$ – nuslopintas natūralus dažnis, rad/s;

x_i – tikrinės reikšmės vektorius.

Žinant tikrines reikšmes, galima rasti modalias reikšmes, kurios nusako dažnį ir slopinimą. Šios reikšmės leidžia lyginti kaip kiekviename režime dviratė transporto priemonė elgiasi skirtingais greičiais.

Nuslopintas natūralus dažnis parodo kaip greitai režimas svyruoja kai sistema yra slopinama. Jis yra skaičiuojamas [8]:

$$\omega_{d,i} = \text{Im}(\lambda_i); \quad (18)$$

čia $\text{Im}(\lambda_i)$ – įsivaizduojama tikrinės reikšmės dalis.

Nenuslopintas natūralus dažnis nurodo teorinį svyravimų dažnį, jei sistemoje nėra jokio slopinimo, sujungiant realią ir įsivaizduojamą tikrinės reikšmes dalis. Tai padeda lyginti režimus atskirai nuo stabilumo efektų. [8]

$$\omega_{n,i} = \sqrt{\sigma_i^2 + \omega_{d,i}^2}; \quad (19)$$

čia σ_i – tikra tikrinės reikšmės dalis.

Slopinimo koeficientas parodo kaip greitai svyravimai nyksta arba didėja. Tai nusako ar sistema yra lengvai, stipriai slopinama, bei ar režimas yra nestabilus. [8]

$$\zeta_i = -\frac{\sigma_i}{\omega_{n,i}}; \quad (20)$$

Dažnis parodo kiek ciklų per sekundę režimas užbaigia ir yra skaičiuojamas pagal (20) formulę [9]:

$$f_i = \frac{\omega_{d,i}}{2\pi}. \quad (21)$$

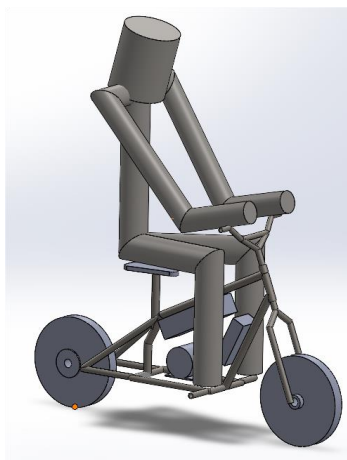
Pagal tikrinių reikšmių vektorių kryptį, natūralius dažnius, slopinimą, galima atpažinti dinaminis dviratės transporto priemonės režimus. Pagrindiniai režimai į kuriuos bus atsižvelgta yra vinguriavimas ir virpėjimas. Abu jie pasižymi specifinėmis dažnio amplitudėmis ir posvyrio su vairavimo kampu santykio modeliais.

Virpėjimas yra aukšto dažnio vairavimo kampo svyravimas, dažniausiai apibūdinamas kaip greitas vairavimo šakės krypties keitimasis iš vienos pusės į kitą, esant mažam posvyrio pokyčiui. Dažnu atveju šio režimo dažnis svyruoja nuo 6 – 10 Hz, vairavimo tikrinės reikšmės vektorius komponentas δ yra didesnis nei posvyrio tikrinės reikšmės vektorius komponentas ϕ . Virpėjimas dažniausiai yra stabilus, tačiau jo slopinimas priklauso nuo priekinės šakės inercijos, geometrinio tako ir padangų savybių.

Vinguriavimo režimas yra žemo dažnio posvyrio ir vairavimo kampo svyravimas, kuriame dviratė transporto priemonė keliauja svyruojančia kreive. Svyravimo režimo dažnis yra nuo 2 iki 4 Hz. Vairavimo tikrinės reikšmės vektorius komponentas δ ir posvyrio tikrinės reikšmės vektorius komponentas ϕ yra panašūs. Šis režimas mažais greičiais yra nestabilus, tačiau pasiekus tam tikrą kritinį greitį, giroskopinės jėgos ir geometrija pradeda stabilizuoti transporto priemonę. Pagrindiniai faktoriai, paveikiantys svyravimo režimą, yra svorio pasiskirstymas ir bendra rėmo geometrija. [1]

1.9. Prototipo duomenys gaunami iš *Solidworks*

Norint atlikti dinaminio modelio skaičiavimus, reikia surinkti įvairius duomenis iš *Solidworks* aplinkos, kurioje yra sumodeliuotas 3D prototipo modelis su vairuotojo maketu.



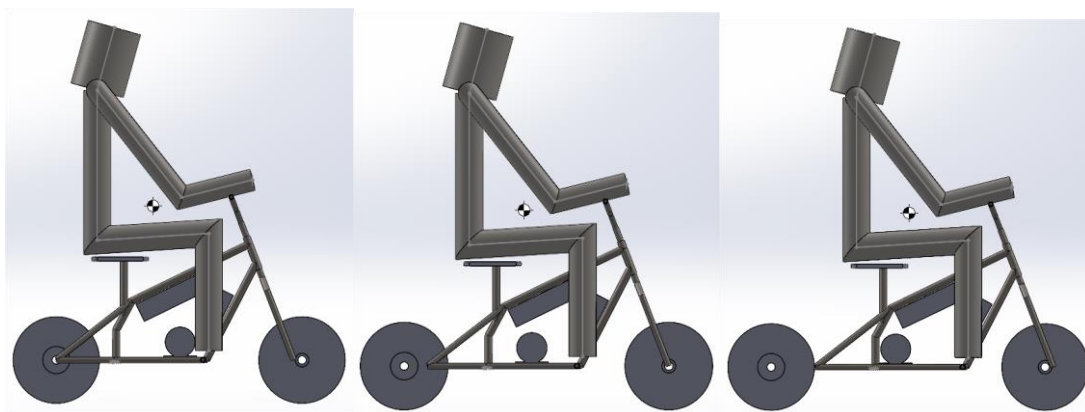
6 pav. Mopedo su vairuotoju 3D modelis *Solidworks* aplinkoje

Mopedo 3D modelis susideda iš kelių dalių:

- Rėmo su sėdyne;
- Priekinės šakės;
- Galinio ir priekinio ratų;
- Vairuotojo maketo;
- Baterijos;
- Variklio valdymo bloko;
- Elektros variklio.

Yra kuriamos 3 mopedo konfigūracijos, kuriose keičiasi tik ratų bazė ir priekinės ašies poslinkis, o komponentai, rėmas ir vairuotojas lieka tokie pat:

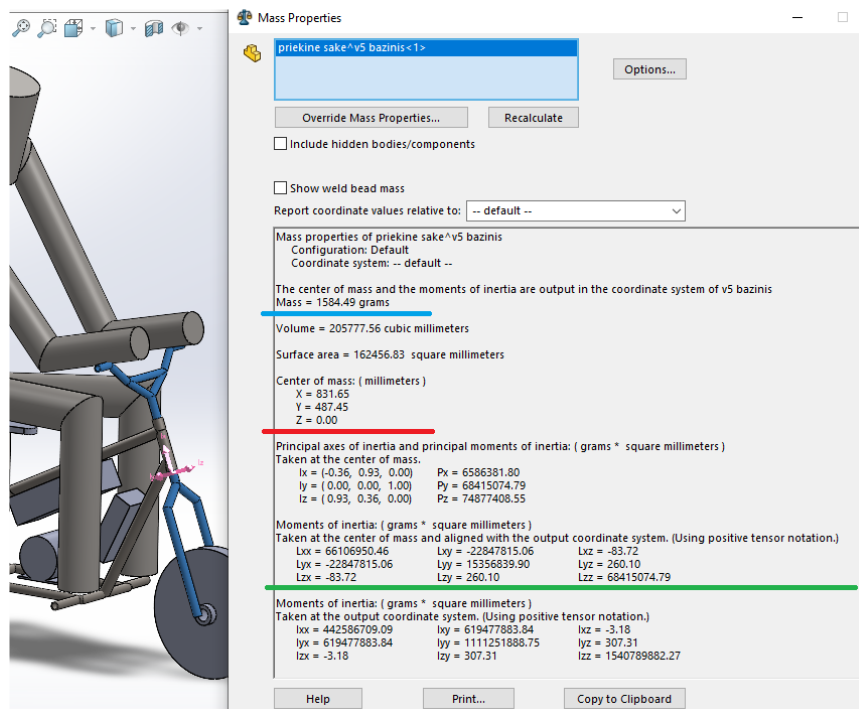
- Vikri – mažiausia ratų bazė ir teigiamas priekinės ašies poslinkis siekiant sumažinti geometrinį taką.
- Bazinė – vidutinė ratų bazė ir nėra priekinės šakės poslinkio.
- Inertiška – ilgiausia ratų bazė, o priekinės šakės poslinkis yra neigiamas siekiant padidinti geometrinį taką.



7 pav. Nuo kairės į dešinę: vikri, bazinė, inertiška mopedo konfigūracijos *Solidworks* aplinkoje

7 paveikslėlyje taip pat yra pavaizduotas bendras masės centras, kuriame matoma, kad ir keičiant ratų bazės ilgį, jis mažai pasikeičia atsižvelgiant į vairuotojo sėdėjimo vietą. Tai reiškia, kad didžiąją dalį masės sudaro vairuotojas. Be to, keičiasi ir elektros variklio pozicija, nes tolinant galinį ratą nuo rėmo, siekiant nekeisti grandinės ir reguliuoti jos tempimą, yra judinamas variklis.

Masės ir inercijos reikšmėms gauti buvo naudojama *mass properties* funkcija. Naudojant *mass properties* funkciją, yra surenkami rėmo, priekinės šakės masės, šioms dalims priskyrus pieno medžiagą. Kitoms dalims, tokioms kaip vairuotojas, variklis, baterija ir t.t., yra priskiriamos vertės pagal tikro ekvivalento masę naudojant *override mass properties*. Kiekviename modelyje bendras koordinatinių sistemos pradžios taškas yra galinio rato susilietimo su važiuojamu paviršiumi vieta.



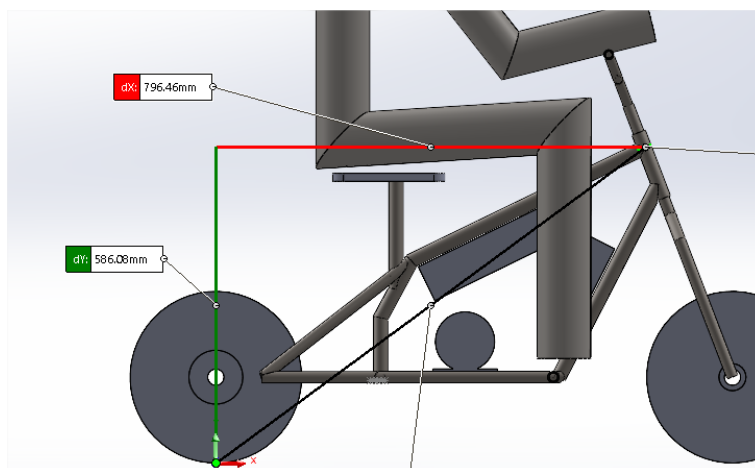
8 pav. *Mass properties* funkcijoje matomos priekinės šakės reikšmės

8 paveikslėlyje mėlyna tiesė parodo detalės ar junginio masės reikšmę, jei ji nebuvo pakeista rankiniu būdu, raudona tiesė parodo pasirinktos detalės masės centro koordinatas.

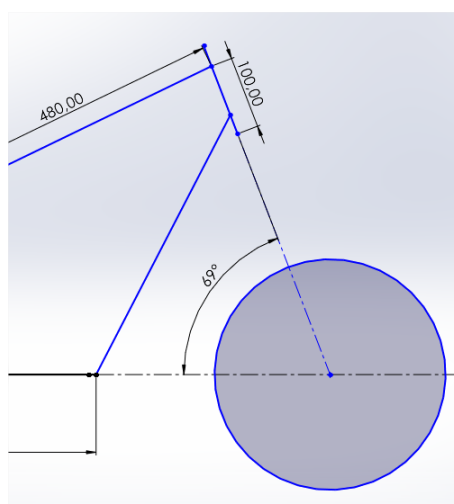
Žalia tiesė parodo inercijos momentų reikšmes detalėje, kurios yra matuojamos detalės masės centro vietoje ir sulygiuotos su bendra modelio koordinatinių sistema. Jie yra reikalingi masės ir inercijos M , giroskopinei $C1$, geometrinio standumo $K0$, kvadratinio greičio $K2$ matricoms apskaičiuoti. *Solidworks* aplinkoje, inercijos momentai yra pateikiami forma:

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{xy} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{xz} & -I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix}; \quad (22)$$

Meijaard modelio skaičiavimams yra reikalingi atskaitos taškai, kurie nurodo modeliui kur yra judėjimas 3D modelyje. Šie taškai parodo galinio rato ašies, priekinės šakės ir rėmo sujungimo vietas, valdymo rankenų ir sėdynės koordinatas. Jie matuojami nuo bendros koordinatinių ašies pradžios taško naudojantis *evaluate measure* funkciją.



9 pav. Atskaitos taškų koordinacių matavimas, naudojant *evaluate measure* funkciją
Geometriniai parametrai gaunami naudojant *evaluate measure* funkciją modelio brėžinyje.



10 pav. Naudojant *evaluate measure* funkciją, randamas priekinės šakės kampas

10 paveikslėlyje yra matomas priekinės šakės kampas. Naudojant tą pačią funkciją gali būti išmatuota ir ratų bazė. Geometrinis takas yra apskaičiuojamas naudojantis (1) formulę.

Surinkus visus duomenis, svarbu juos konvertuoti į SI sistemos vienetus. Taip pat svarbu, kad *Solidworks* ir *Meijaard* modelio koordinacių sistemos būtų vienodos. Joms skiriantis, *Solidworks* gautas reikšmes reikia suvienodinti su *Meijaard* koordinacių sistema.

1.10. Supaprastinto dinaminio modelio perkėlimas į *Matlab* aplinką.

Dviratės transporto priemonės dinaminis elgesys pagal *Meijaard* modelį yra apskaičiuojamas naudojant *Matlab* aplinką. Joje yra naudojamas kodas, kuris nusako sistemos parametrus, sudaro dinaminio modelio matricas, apskaičiuoja tikrines reikšmes skirtingų greičių diapazone ir parodo šias reikšmes grafikuose.

Visos skirtingų konfigūracijų geometrinės ir inercijos momentų vertės yra įrašomos į kodą, kurias pagrindinis kodas naudos įvertinti skirtingoms prototipo geometrijoms. Kiekvienoje iš jų yra nurodomi duomenys:

- Rėmo su vairuotoju ir komponentais, priekinės šakės, ratų masės ir jų masių centrai;

- Inercijos momentai;
- Ratų spinduliai;
- Geometriniai parametrai, tokie kaip ratų bazė, geometrinis takas, priekinės šakės kampas;
- Greičio diapazonas.

Kadangi suprojektuoto 3D modelio koordinačių ašis skiriasi nuo *Meijaard* modelio koordinačių ašies, *Matlab* kode šios reikšmės yra sulyginamos su *Meijaard* koordinačių ašimi. *Meijaard* koordinačių sistema: $x = i$ priekį, $y = i$ dešinę, $z = i$ apačią. Projektuoto 3D modelio *Solidworks* koordinačių sistema: $x = i$ priekį, $y = i$ viršų, $z = i$ dešinę.

Tuomet yra konstruojamos matricos M , C_1 , K_0 , K_2 nusakančios sistemos posvyrio ϕ ir vairavimo δ reikšmes:

- Masės matrica M – naudoja masės ir inercijos duomenis ir nusako sistemos kinetinę energiją ir pasipriešinimą pagreičiui.
- Slopinimo ir giroskopinė matrica C_1 – naudojant ratų inercijos momentus ir geometrinius parametrus, aprašo giroskopinius momentus, kurie atsiranda keičiantis posvyrio ir vairavimo kampams judant.
- gravitacijos standumo matrica K_0 – naudojant laisvo kritimo pagreitį ir masės centrų pozicijas, nurodo kaip svorio jėga veikia sistemą.
- Nuo kvadratinio greičio priklausomo standumo matrica K_2 – naudoja geometrinius parametrus ir greičio įtakos koeficientus, taip parodant jėgas, kurios leidžia vairui išlikti stabiliam dėl išcentrinių jėgų ir geometrinio tako.

Šios matricos nustato pagrindinę antro laipsnio dviračių transporto priemonių dinamine lygtį:

$$M \ddot{q} + v C_1 \dot{q} + (K_0 + v^2 K_2) q = 0, \quad (7)$$

kurioje $q = [\phi, \delta]^T$ (7) nusako posvyrio ir vairavimo kampus.

Kadangi stabilumas priklauso nuo važiavimo greičio, kodas turi būti vykdomas iteracijomis, naudojant $\det(\lambda^2 M + \lambda v C_1 + K_0 + v^2 K_2) = 0$ (14) formulę, kad būtų rastos 4 tikrinės reikšmės.

Paskutinė kodo dalis apdoroja gautus kompleksinius skaičius $\lambda_i = \sigma_i \pm i\omega_{d,i}$ (16) ir juose yra išskiriama realioji dalis δ , jei $\delta < 0$, tuomet režimas yra stabilus, o iš įsivaizduojamos dalies ω_d yra apskaičiuojami natūralieji režimo dažniai hercais. Žinant realiąsias ir įsivaizduojamas kompleksinių skaičių dalis, yra nubraižomos stabilumo diagramos, kurios leidžia vizualiai nustatyti savaiminio stabilumo zoną.

2. Tyrimo ypatybės

Tyrimai su prototipine maža dvirate transporto priemone padeda suprasti dinامينius šių transporto priemonių konceptus. Kadangi mažos transporto priemonės eksploatuojamos mažais greičiais, kuriose rėmo geometrinės savybės yra svarbesnės nei dinaminiai stabilizavimai judant, tyrimai padeda patvirtinti matematiškai apskaičiuotus rezultatus. Palyginus tyrimų rezultatus galima sužinoti kaip mopedo geometrija paveikia valdomumą.

2.1. Tyrimo aplinka

Visi tyrimai yra atliekami lauke, kontroliuojamoje aplinkoje, kur būtų galima tyrimą atkartoti kelis kartus. Tyrimai gali būti atlikti ant asfaltuotos kelio dangos ir žvyro.

Aplinkos sąlygos įrašomos prieš kiekvieną tyrimą. Jas apima aplinkos temperatūra, vėjo greitis ir jei buvo kritulių – jų įtaką kelio dangai. Dėl tiksliausių rezultatų, tyrimams atlikti tinkamiausios aplinkos sąlygos yra sausa kelio danga ir vėjas iki 3 m/s. Temperatūra gali turėti įtakos tik padangoms, kurios mažais greičiais nėra pilnai naudojamos, todėl tyrimai galimi įvairiomis temperatūromis. Norint išlaikyti saugumą tyrimai yra atliekami šviesiu paros metu. Taip pat yra naudojamos papildomos saugos priemonės – šalmas. [1, 34, 35, 38]

2.2. Tyrimo manevrai

Buvo pasirinkta atlikti 3 pagrindinius judesio ir 4 papildomus tyrimus kurie padėtų sukalibruoti sistemą. Šie tyrimo manevrai yra svarbūs lėtaeigiam stabilumo ir vairavimo tyrimams. Kiekvienas tyrimas pasirinktas dėl savo paskirties parodyti reikiamus stabilumo aspektus važiuojant mažu greičiu.

2.2.1. Pastovaus posūkio spindulio tyrimas

Manevras atliekamas važiuojant 5 m spindulio ratu aplinkui jį. Vairuotojas lėtai įvažiuoja į rato trajektoriją, stabilizuoja vairavimą ir pradeda ją sekti pastoviu greičiu kelis kartus apvažiuodamas visą ratą. Tyrimo metu yra stebima kaip pasikeičia posvyrio kampas ir kiek korekcijų reikia padaryti, norint išlaikyti tą pačią trajektoriją. Tyrimas atliekamas apvažiuojant ratą po 3 kartus pagal ir prieš laikrodį, esant 10 km/h greičiui.

Šis tyrimas parodo kaip transporto priemonė pati pasvyra posūkio metu link rato centro skirtingais greičiais. Taip pat parodoma kaip skirtinga rėmo geometrija gali pakeisti išlaikomą stabilumą posūkio metu ar kaip greitis paveikia bendra sistemos svyravimą vairavimo metu.

Šis tyrimas leistų tiesiogiai palyginti gautus rezultatus su posvyrio kampo formule ir palyginti skirtingus rezultatus tarp skirtingų rėmo geometrijos konfigūracijų. [1, 2]

2.2.2. Staigaus išvengimo manevro tyrimas

Tyrimo metu vairuotojas pasiekia 15 km/h greitį tiesia trajektorija. Tuomet atleidžiamas akseleratorius ir pradeda trumpam riedėti. Tada atliekamas staigus vairo pakrypimas į vieną pusę ir silpnai prilaikant vairavimo rankenas leidžiama mopedui išsitiesinti pačiam. Tyrimas kartojamas 3 kartus, norint gauti reikšmių vidurkius.

Šis tyrimas parodytų kaip greitai transporto priemonė pradėtų svirti, bei kaip greitai būtų nuslopinami bendri rėmo svyravimai judant. Tyrimo metu būtų surenkama duomenys apie vairavimo greitį laiko ir posūkio kampo atžvilgiu, posvyrio kampą manevro metu, posvyrio greitį, bendrą greitį tyrimo metu. [1, 2]

2.2.3. Virtimo ribos lėtėjant tyrimas

Tyrimas pradedamas įsibėgėjant iki 15 km/h greičio, tuomet yra riedama be akceleracijos iki sustojimo ribos tiesia trajektorija. Mažėjant greičiui mopedas praras stabilumą ir pradės virsti. Tyrimo metu bandoma rasti, koks yra kritinis greitis, kai mopedas praranda stabilumą, tai yra kuomet reikia stabilizuoti mopedą pasukant vairą ar atsiremiant kojomis į žemę. Kuo mopedas geometriškai stabilesnis, tuo lėtesniu greičiu jis turėtų pradėti virsti. Tyrimas kartojamas 2 kartus, norint gauti kritinio greičio vidurkį.

2.3. Reguliuojama prototipo geometrija

Norint tiksliau iširti mažų dviračių transporto priemonių stabilumą, pasirinkta tyrimus atlikti su kintamos rėmo geometrijos prototipu. Prototipe būtų galima lengvai pakeisti kelias geometrines savybes nepakeičiant visos rėmo konstrukcijos. Prototipas yra pagaminamas iš apvalių plieno vamzdžių, todėl yra užtikrinamas bendras rėmo standumas.

Mopede galima reguliuoti ratų bazės ilgį keičiant galinės ašies montavimo tašką rėmo galinėje plokštelėje bei keisti priekinio rato ašies poslinkį pakeičiant priekinės ašies tvirtinimo vietą priekinės šakės plokštelėje.



11 pav. Kairėje galinės ašies tvirtinimo taškai, dešinėje – priekinė ašies tvirtinimo taškai

Abu geometrijos pakeitimai turi įtakos bendram transporto priemonės stabilumui, pavyzdžiui, pailginus ratų bazę ir į neigiamą pusę patraukus priekinės ašies tvirtinimą, transporto priemonė būtų labiau inertiška lyginant su transporto priemonės trumpa ratų baze ir teigiamu priekinės ašies poslinkiu dėl padidėjusios ratų bazės ir geometrinio tako. [1, 2]

Norint supaprastinti tyrimus, ratų dydis ir padangos nėra keičiamos, nes skaičiavimuose padangų deformacija nėra įtraukta. Taip pat vairuotojo sėdėjimo pozicija, komponentų, tokių kaip elektros variklio, valdymo bloko ir elektros baterijos pozicijos nėra keičiamos, tačiau variklis gali būti judinamas tik x ašimi mopedo rėme, norint įtempti grandinę keičiant ratų bazės ilgį (12 pav.). Į tai atsižvelgta ir 3D projektuotose modeliuose.



12 pav. Elektros variklio tvirtinimas rėme

2.3.1. Reguliuojamos geometrinės konfigūracijos

Tyrimai atliekami keliomis skirtingomis geometrijos konfigūracijomis. Jose reguliuojamos prieš tai minėtos geometrinės savybės.

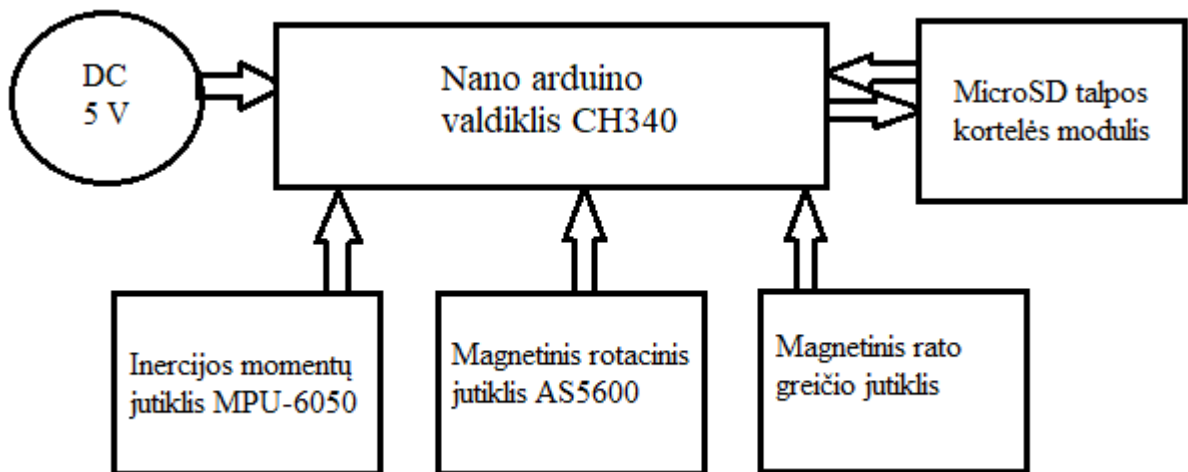
Pirmoji konfigūracija (bazinė) turėtų vidutinę ratų bazę ir nulinį priekinės ašies poslinkį. Ši konfigūracija būtų naudojama kaip atskaitos taškas kitoms konfigūracijoms, nes ji leistų įvertinti kaip geometrijos pakeitimai nukrypsta nuo neutralios valdymo elgsenos bei kokį poveikį tai turi stabilumui ir valdomumui. Antroji konfigūracija (inertiška) turėtų ilgesnę ratų bazę, $-0,03$ m priekinės ašies poslinkį, padidinant geometrinį taką. Trečioji konfigūracija (vikri) turėtų trumpiausią ratų bazės ilgį, taip pat turėtų $+0,03$ m priekinės ašies poslinkį, taip sumažinant geometrinį taką ir padidinant vikrumą. [1, 2, 4, 10]

2.4. Jutiklių sistema

Tyrimo metu norint surinkti duomenis yra naudojami įvairūs jutikliai ir valdiklis, kuriais galima išmatuoti įvairius parametrus, tokius kaip posvyrio kampą, posvyrio greitį, vairavimo kampą, ratų greitį. Sistema yra valdoma 5 V įtampos valdikliu, kuris turi atskirą maitinimo šaltinį nei varomoji sistema, tad šios dvi sistemos yra atskirtos.

Jutiklių sistema susideda iš:

- *Nano arduino* valdiklis *CH340*;
- Inercijos momentų jutiklis *MPU-6050*;
- Magnetinis rotacinis jutiklis *AS5600*;
- Magnetinis rato greičio jutiklis;
- *MicroSD* talpos kortelės modulis;
- Sujungiamosios plokštės ir laidų.

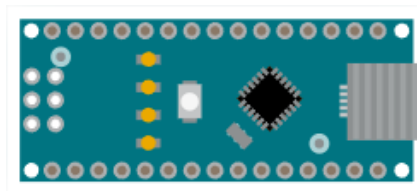


13 pav. Principinė jutiklių sistemos schema

13 paveikslėlyje pavaizduota principinė jutiklių sistemos sistema, kurioje, matoma, kad valdiklis naudoja 5 V nuolatinės srovės elektros šaltinį. Tuomet prie valdiklio yra prijungti 3 jutikliai: inercijos momentų, magnetinis rotacinis jutiklis, magnetinis rato greičio jutiklis. Visi jie siunčia informaciją į valdiklį. Valdiklis naudoja *MicroSD* talpos modulį kartu su talpos kortele, kurioje valdiklis išsaugo rezultatus.

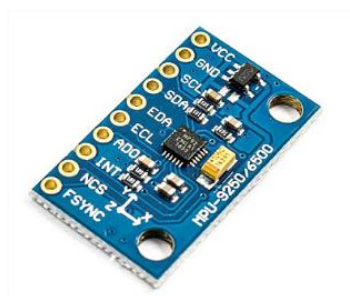
2.4.1. Jutiklių specifiika ir montavimas

Nano arduino valdiklis *CH340* yra mažas valdiklis, galintis gauti ir siųsti signalus skaitmeniniu ir analoginiu būdu. Valdiklis gali programuojamas naudojant *USB* jungtį, tuomet gali vykdyti paskirtas komandas. [16, 17]



14 pav. *Nano arduino* valdiklio *CH340* schema [16]

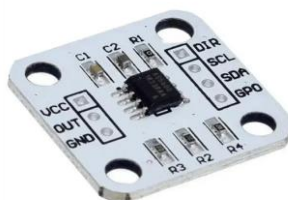
Inercijos momentų jutiklis *MPU-9250* matuoja inercijos pokyčius 6 ašimis, sujungiant 3 ašių akselerometras ir 3 ašių giroskopas. Akselerometras matuoja linijinį pagreitį trijose ašyse, matavimo vienetai – g, kur $1\text{ g} \approx 9,81\text{ m/s}^2$. Giroskopas matuoja kampinį sukimosi greitį ir yra matuojamas rad/s. [18]



15 pav. Inercijos momentų jutiklis *MPU-9250* [18]

Jutiklis standžiai montuojamas kuo arčiau apskaičiuoto masės centro kartu su vairuotoju, norint sumažinti rėmo rotacinius poslinkius ir kitas vibracijas.

Magnetinis rotacinis jutiklis *AS5600* matuoja kampą tarp jutiklio ir magneto magnetinių laukų. Norint tyrimų metu tiksliai žinoti vairo susukimo kampą šis jutiklis montuojamas prie priekinės šakės sukimosi ašies. Siunčiami jutiklio duomenys yra skaitmeniniai, pilnas apsisukimas siunčia duomenis 4096 žingsnių diapazone. [19, 22]



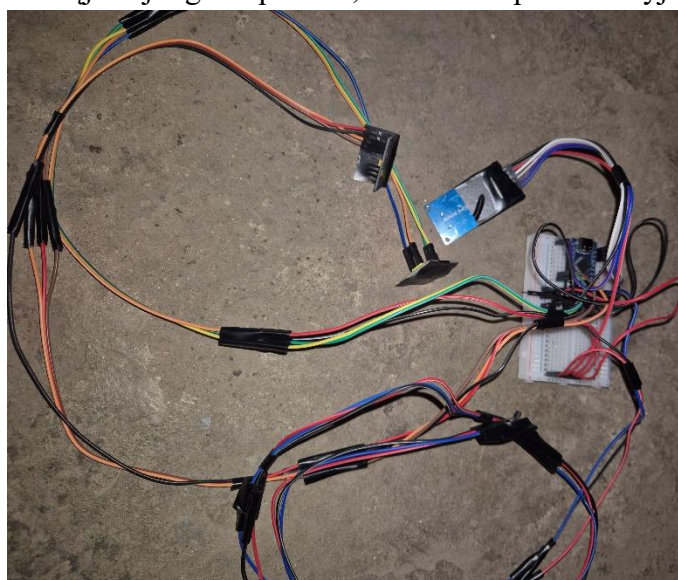
16 pav. Magnetinis rotacinis jutiklis *AS5600* [22]

Magnetinis rato greičio jutiklis matuoja rato apsisukimų dažnį. Jutiklis montuojamas ant galinės ašies, o ant rato yra primontuojamas magnetas, pagal kurį jutiklis parodo rato greitį. Kiekvieną kartą ratui apsisukus, jutiklis fiksuoja magneto aptiktą impulsą. [20, 21]



17 pav. Magnetinis greičio jutiklis *KY-003* [21]

Visi jutikliai ir *MicroSD* talpos modulis yra prijungiami prie *Arduino Nano* valdiklio, naudojantis sujungimo laidais ir bandomąja sujungimo plokšte, matomi 18 paveikslėlyje.



18 pav. Sujungta jutiklių sistema

Ant mopedo jutiklių sistema montuojama metalo plokštelėmis, joms suteikiant atramas, kad būtų išvengta didesnio jutiklių judėjimo vairavimo metu. Siekiant išvengti jutiklių kontakto tarpusavyje, jų metaliniai kontaktai yra izoliuojami naudojant elektros izoliacinę juostą. Jutikliai tvirtinami prie laikiklių plastmasiniais tvirtinimo dirželiais, kad būtų galima lengvai pakeisti jų poziciją. Mopedas su jutiklių sistema yra matomas 19 paveikslėlyje.



19 pav. Mopedas su jutiklių sistema

2.4.2. Jutiklių kalibravimo procedūros

Norint teisingai surinkti duomenis, reikia atlikti papildomus tyrimus, norint pamatyti kokius trikdžius išmatuoja jutikliai. Trikdžiai gali atsirasti dėl kitų elektros prietaisų veikimo, tokių kaip variklis, vibracijų važiavimo metu, aplinkos sąlygų. Matavimo metu atsiranda įvairios paklaidos, kurios kiekvienam jutikliui pasireiškia skirtingai. Giroskopiniai parametrai gali būti paveikiami deviacijomis nuo laiko ir jeigu jie nėra ištaisomi, akcelerometro duomenų triukšmas gali atsirasti dėl vibracijų nuo motoro, kelio būklės bei temperatūros. Taip pat svarbu, kad jutikliai būtų tinkamai sureguliuoti su jiems skirtais magnetais, norint išvengti mažų kampinių poslinkių ar deviacijų dėl atstumo. [14, 15]

Atliekami trikdžius parodantys tyrimai:

1. Statinio triukšmo tyrimas – mopedas pastatomas ir nejudinamas, jutikliai 30 s matuoja reikšmes. Bet kokie jutiklių išmatuotų reikšmių kylimai ar mažėjimai šiame diapazone yra laikomi kaip trikdžiai.
2. Variklio ir grandinės vibracijų tyrimas – mopedas pastatomas taip, kad ratai nelieštų žemės bei galėtų lengvai sukis. Įjungiamas variklis ir pradedama tolygiai sukuti galinį ratą skirtingais greičiais, palaikant vienodą greitį bent kelias sekundes, jutikliams fiksuojant vibracijas mopede. Taip sužinomi variklio ir varomosios pavaros sukeliami trikdžiai mopede.
3. Vairo kampo nustatymas – mopedas pastatomas taip, kad nebūtų judinamas rėmas. Tuomet yra matuojamos reikšmės vairui esant tiesioje pozicijoje, tuomet susukus pilnai vairą į dešinę pusę, tuomet pilnai susukus vairą į kairę pusę. Taip bus galima rasti jutiklio matuojamų reikšmių amplitudę.
4. Sistemos kontrolės tyrimas – atsisėdama ant mopedo ir įsibėgėjama iki 10 km/h greičio ir važiuojama bent 20 m. Šis tyrimas atliekamas kiekviena kartą pakeitus mopedo konfigūraciją, surinkti duomenys patikrinami kiekviena kartą prieš atliekant pagrindinius tyrimus. Jis parodo, ar visi jutikliai veikia tinkamai ir yra pritvirtinti gerai.

2.4.3. Duomenų surinkimas

Duomenys yra surenkami valdiklio, kuris visą informaciją išsaugo į *MicroSD* kortelę. Šiuos duomenis galima analizuoti ar apdirbti *Matlab* ar *Excel* programomis. Jutiklių duomenys renkami fiksuotu dažniu, 20 ms. Kiekviena valdiklio išsaugoma informacijos eilutė susideda iš vidinio valdiklio laiko, posvyrio kampo, posvyrio greičio, posūkio kampo, greičio. [12, 13]

Į valdiklį yra įrašomas kodas, kuris įjungia jutiklius, renka ir išsaugo duomenis į *MicroSD* kortelę. Kodas naudoja jutiklių bibliotekas, kurios nurodo, kaip turi būti apdoroti duomenys. [30, 31, 32, 33]
Kodo veikimo ypatumai:

1. Jutiklių duomenų nuskaitymas:

- Vairo kampo matavimas (*AS5600*): naudojamas magnetinis rotacinis jutiklis, kuris fiksuoja vairo pasukimo kampą (ant vairo esančio magneto magnetinius laukus). Jutiklis siunčia skaitmeninę reikšmę (0 – 4095), kuri programiškai yra paverčiama laipsniais naudojant koeficientą $0,08789^\circ$.
- Inerciniai matavimai (*MPU9250*): jutiklis matuoja pagreitį trijose ašyse (x, y, z) ir kampinį greitį (akceleracija ir giroskopinės jėgos).
- Greičio nustatymas (*KY-003*): greitis skaičiuojamas matuojant laiko tarpą tarp rato apsisukimų, kuriuos jutiklis aptinka ant rato esančio magneto pagalba. Programoje įvestas rato skersmuo leidžia iškart įrašyti ratų greitį, o ne apsukas.

2. Tyrimų duomenų tikslumui užtikrinti programoje yra užtikrinamas:

- Duomenų nuskaitymo dažnis: duomenys nuskaunami kas 10 ms, kas atitinka 100 Hz dažnį.
- Duomenų matavimo laikas: kiekvienoje išmatuotų reikšmių eilutėje yra nurodomas laikas milisekundėmis, kas leidžia sulyginėti atliktus veiksmus su gautais rezultatais.

3. Norint išvengti netikėtų jutiklio sistemos išsijungimų ir duomenų praradimo, programoje rezultatai yra saugomi naudojant:

- Automatinį numeravimą: įjungiant jutiklių sistemą yra nuskaitymas *count.txt* failas ir kiekvienai sesijai yra sukuriamas naujas failas (pvz. *log001.csv*). Tai padeda atskirti tyrimų bandymus.
- Valdiklio operatyvios atminties optimizavimas: kadangi valdiklis turi ribotą operatyviąją atmintį, o esant jos trūkumui jutiklių sistema gali netinkamai veikti, yra naudojami kodo optimizavimo metodai, tokie kaip tekstinių simbolių saugojimas vidinėje pastovioje atmintyje, metodai.
- Duomenų išsaugojimas: naudojant *flush* komandą, kas 500 ms, duomenys yra įrašomi į SD kortelę. Tai užtikrina, kad net netikėtu maitinimo dingimo atveju, bus prarasta ne daugiau kaip pusės sekundės trukmės duomenų.

Duomenys išsaugomi į failą ir atrodo kaip pavaizduoti 20 paveikslėlyje.

time_ms	angle_deg	accX	accY	accZ	gyroX	gyroY	gyroZ	wheel_kmh
1107	241.52	-1196	80	17780	-77	179	29	0.00
1117	241.52	-1224	12	17720	-33	135	44	0.00
1127	241.26	-1264	264	17704	-8	138	21	0.00

20 pav. Duomenų surinkimo failo pavyzdys

Prieš analizuojant duomenis, juos reikia apdoroti:

1. Matavimo vienetų konvertavimas: akcelerometre naudojamas matavimo diapazonas iki $\pm 2 G$, todėl reikšmes reikia padalinti iš 16384, kad būtų gautas pagreitis G vienetais ir tuomet galima paversti į m/s^2 . Giroskopo reikšmės dalijamos iš jutiklio jautrumo koeficiento, priklausomai nuo jutiklio nustatymų ir tuomet deg/s matmenis pakeičiame į rad/s . Vairo kampo pradinė pozicija nustatoma matavimo pradžioje tiesiai laikant vairą ir tuomet atimant išmatuotą pradinę reikšmę, kad būtų galima matyti kampą posūkio metu. [39]
2. Triukšmo filtravimas: *Matlab* aplinkoje yra naudojama *butterworth* funkcija, kuri pašalina aukšto dažnio variklio trikdžius, kurie yra virš 10 – 15 Hz, taip paliekant tik mopedo judesius. [28, 29] Atliekant tuos pačius tyrimus po kelis kartus, galima naudoti tyrimų vidurkį, taip padidinant tikslumą.
3. Duomenų segmentavimas: iš duomenų failų yra naudojamos tik tos vietos, kuriose vyksta tyrimas, taip išvengiama nereikalingų duomenų apdorojimo.

Tyrimai yra atliekami po kelis kartus, norint pamatyti duomenų dėsningumą. Matuojant reikšmes po kelis kartus leidžia identifikuoti ir pašalinti atsitiktines paklaidas, kylančias dėl aplinkos, jutiklių triukšmo ar žmogiškojo faktoriaus. Skaičiuojant gautų reikšmių aritmetinį vidurkį, pasiekiamas didesnis duomenų tikslumas, pagal juos galima daryti išvadas, kurios nesiremia vienkartinio nuokrypiu, o parodo tikrą sistemos elgseną tyrimuose. [36, 37]

3. Tyrimų eiga ir rezultatų palyginimas

3.1. Savadarbio prototipo duomenys

Sukurtos 3 konfigūracijos, kurios bus lyginamos:

- Konfigūracija 1, bazinė – ratų baze 0,96 m, 0 m priekinės ašies poslinkis;
- Konfigūracija 2, inertiška – ratų baze 1 m, -0,03 m priekinės ašies poslinkis;
- Konfigūracija 3, vikri – ratų baze 0,9 m, +0,03 m priekinės ašies poslinkis.

Norint pradėti skaičiuoti dinامينius modelius, reikia surinkti duomenis apie prototipų konfigūracijas. Duomenys yra gaunami iš sukurtų *Solidworks* modelių. Pagrindiniai renkami duomenys yra ratų bazė, priekinės šakės kampas, geometrinis takas, dalių masė, dalių masės centrų koordinatės, atskaitos taškų koordinatės, dalių inercijos momentai.

Gautos reikšmės iš *Solidworks* aplinkos:

1 lentelė. Skirtingų konfigūracijų geometriniai parametrai

Konfigūracija	Ratų spindulys r , m	Ratų bazė L , m	Priekinės šakės kampas θ , °	Priekinės šakės poslinkis FO , m	Geometrinis takas T , m
Bazinė	0,159	0,96	69	0	0,061145784
Inertiška	0,159	1,00	69	-0,03	0,093287672
Vikri	0,159	0,90	69	0,03	0,029003895

Koordinatės renkamos pagal *Solidworks* koordinačių sistemą $x = i$ priekį, $y = j$ viršų, $z = k$ dešinę (i mopedą žiūrima iš galinės pusės).

2 lentelė. Skirtingų konfigūracijų atskaitos taškai

Konfigūracija	Rėmo galinės ašies koordinatės, m	Priekinės šakės sukinėjimosi koordinatės, m	Vairuotojo sėdynės koordinatės, m	Rankenų pozicijos koordinatės, m
Bazinė	0; 0,159; 0	0,797; 0,585; 0	0,320; 0,537; 0	0,734; 0,759; 0
Inertiška	0; 0,159; 0	0,942; 0,585; 0	0,398; 0,537; 0	0,810; 0,759; 0
Vikri	0; 0,159; 0	0,711; 0,585; 0	0,235; 0,537; 0	0,648; 0,759; 0

3 lentelė. Bazinės konfigūracijos dalių masė ir masės centro koordinatės

Dalis	Masė, kg	Masės centro koordinatės, m
Rėmas su vairuotoju ir komponentais	77,558	0,426; 0,750; -0,02
Priekinė šakė	1,584	0,831; 0,487; 0
Galinis ratas	1,400	0; 0,159; 0
Priekinis ratas	1,200	0,957; 0,159; 0

4 lentelė. Inertiškos konfigūracijos dalių masė ir masės centro koordinatės

Dalis	Masė, kg	Masės centro koordinatės, m
Rėmas su vairuotoju ir komponentais	77,558	0,499; 0,749; -0,02
Priekinė šakė	1,584	0,909; 0,487; 0
Galinis ratas	1,400	0;159;0
Priekinis ratas	1,200	1,005; 0,159; 0

5 lentelė. Vikrios konfigūracijos dalių masė ir masės centro koordinatės

Dalis	Masė, kg	Masės centro koordinatės, m
Rėmas su vairuotoju ir komponentais	77,558	0,345; 0,749; -0,02
Priekinė šakė	1,584	0,746; 0,487; 0
Galinis ratas	1,400	0;159;0
Priekinis ratas	1,200	0,902; 0,159; 0

Nurodomos inercijos momentų reikšmės, kurios yra matuojamos detalės masės centro vietoje ir sulygiuotos su bendra modelio koordinačių sistema.

6 lentelė. Bazinės konfigūracijos dalių inercijos momentai

Dalis	I_{xx} , kg m ²	I_{yy} , kg m ²	I_{zz} , kg m ²	I_{xy} , kg m ²	I_{xz} , kg m ²	I_{yz} , kg m ²
Rėmas su vairuotoju ir komponentais	10,4107832	3,010706332	12,110497	-2,8270576	-0,004007479	0,065946125
Priekinė šakė	0,06610695	0,015356839	0,0684151	-0,0228478	-0,000000083	0,000000026
Galinis ratas	0,00893458	0,008934579	0,0174098	0	0	0
Priekinis ratas	0,00771066	0,007710656	0,0150711	0	0	0

7 lentelė. Inertiškos konfigūracijos dalių inercijos momentai

Dalis	I_{xx} , kg m ²	I_{yy} , kg m ²	I_{zz} , kg m ²	I_{xy} , kg m ²	I_{xz} , kg m ²	I_{yz} , kg m ²
Rėmas su vairuotoju ir komponentais	10,4142623	3,011823609	12,115093	-2,6546244	0,005406594	0,065944036
Priekinė šakė	0,06610695	0,015356839	0,0684151	-0,0228478	-0,000000083	0,000000026
Galinis ratas	0,00893458	0,008934579	0,0174098	0	0	0
Priekinis ratas	0,00771066	0,007710656	0,0150711	0	0	0

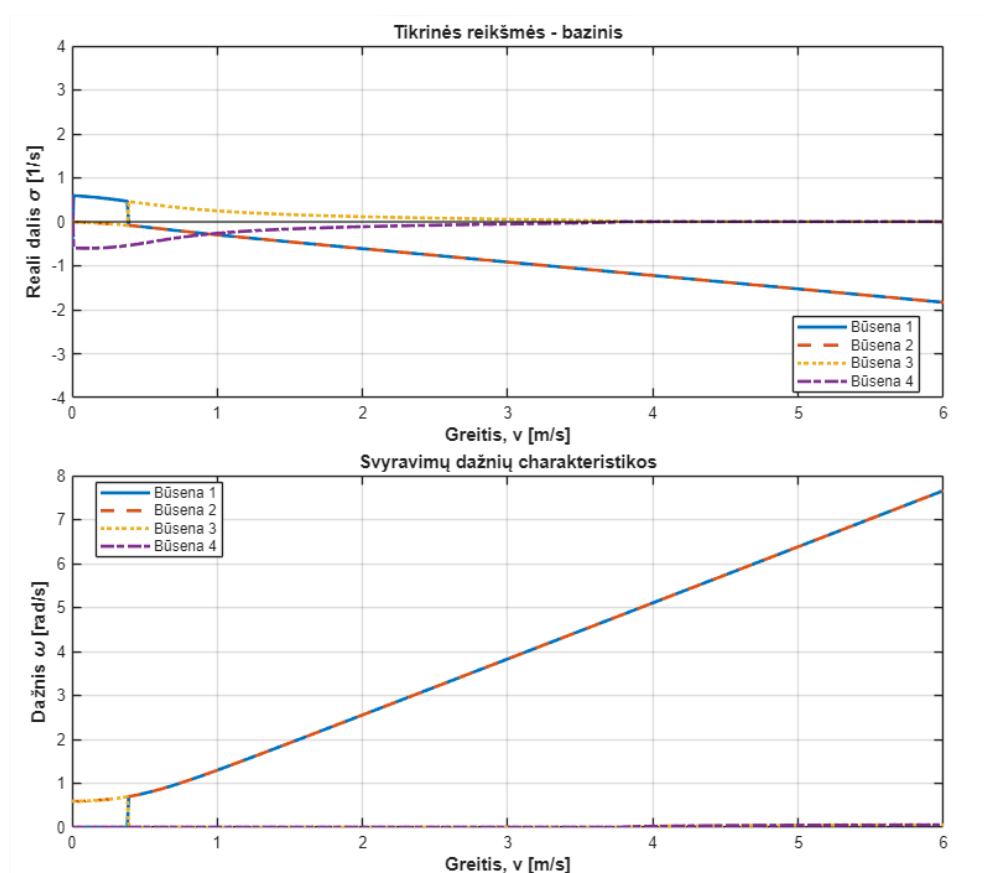
8 lentelė. Vikrios konfigūracijos dalių inercijos momentai

Dalis	I_{xx} , kg m ²	I_{yy} , kg m ²	I_{zz} , kg m ²	I_{xy} , kg m ²	I_{xz} , kg m ²	I_{yz} , kg m ²
Rėmas su vairuotoju ir komponentais	10,4115454	3,056934833	12,157487	-2,9944538	-0,013004684	0,06594549
Priekinė šakė	0,06610695	0,015356839	0,0684151	-0,0228478	-0,000000083	0,000000026
Galinis ratas	0,00893458	0,008934579	0,0174098	0	0	0
Priekinis ratas	0,00771066	0,007710656	0,0150711	0	0	0

3.2. Matematiniai skaičiavimai

Turint duomenis apie prototipus, galima pradėti skaičiuoti dinaminį modelį matematiškai. Bus naudojama suprastintas *Meijaard* dviračių transporto priemonių dinaminis modelis *Matlab* aplinkoje. Rezultatai parodys tikrinių reikšmių tikrąsias vertes grafikuose, dažnių svyravimus skirtinguose režimuose bei jų palyginimą.

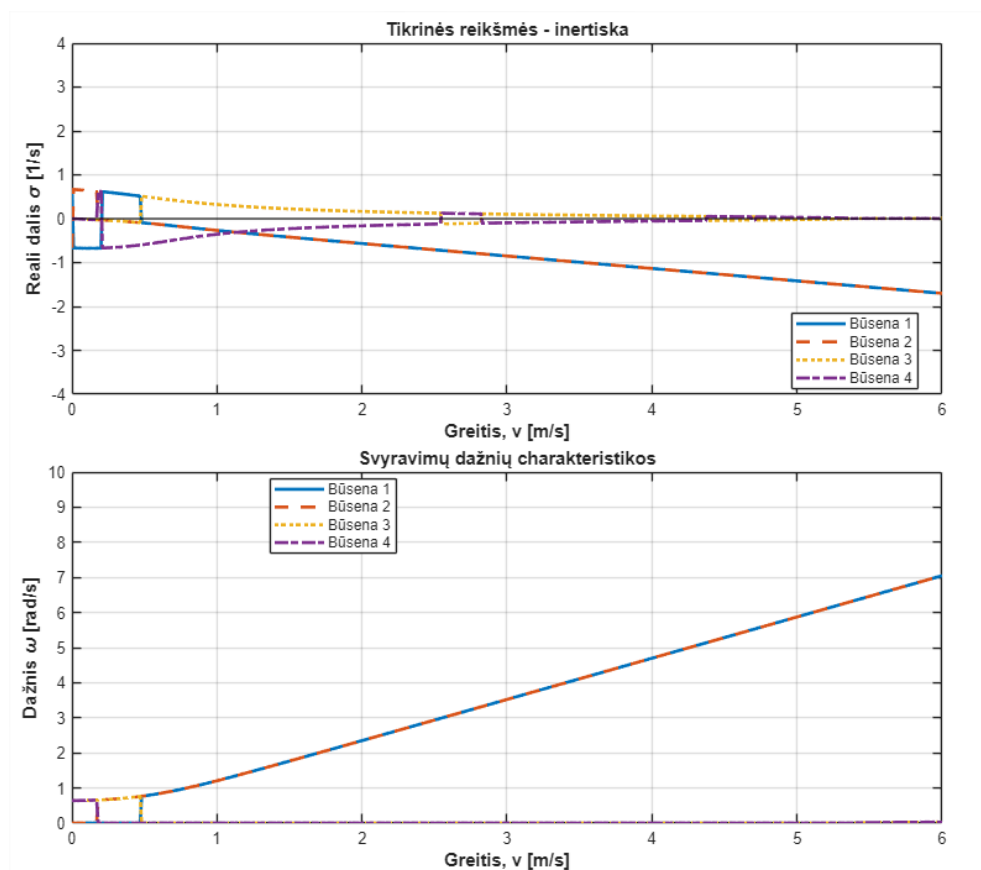
Stabilumo diagramos buvo sukurtos apskaičiuojant tikrines reikšmes greičio diapazone nuo 1 iki 6 m/s, 0,01 m/s žingsniu. Šis greitis pasirinktas, nes fiziniuose tyrimuose nebus viršijama 15 km/h greičio riba, todėl lygimui naudojamos reikšmės iki 22 km/h greičio. Jei tikrinė reali reikšmė yra teigiama, tai parodo nestabilų režimą, jei neigiama – stabilų režimą, jei reikšmė kerta nulinę ribą, tuomet parodomas kritinis greitis, kai keičiasi režimo slopinimas.



21 pav. Bazinės konfigūracijos stabilumo ir dažnių grafikai

21 paveikslėlyje matomi bazinės mopedo konfigūracijos stabilumo ir dažnių grafikai. Svarbu paminėti, kad grafikuose naudojamas bendrinis žymėjimas „Būsena 1, 2, 3, 4“, nes tai yra tiesioginio skaičiavimo rezultatai, tuomet būsenoms priskiriami pavadinimai kaip vinguriavimas, virpėjimas virtimas ar kasteris yra suteikiami tik po interpretacijos. Analizuojant stabilumo grafiką, matoma kaip „būsena 1“ kreivė esant labai mažam greičiui yra nestabili ($\delta > 0$), tačiau pasiekus maždaug 0,4 m/s greitį, ši kreivė susijungia su „būsena 2“ kreive į kompleksinę porą ir tampa neigiamos. Tai parodo, kad šios būsenos yra vinguriavimo režimas ir didėjant greičiui jis yra vis labiau slopinamas ir stabilesnis. „Būsena 3“ po pradinio šuolio iš lėto stabilizuojasi arti nulio teigiamoje srityje. Ši kreivė pradeda stabilizuotis tada, kai vinguriavimo režimas tampa stabilus. Tai parodo, kad šis režimas yra virtimo režimas – mopedas turi tendenciją iš lėto virsti, tačiau tai lengvai gali koreguoti vairuotojas. „Būsena 4“ kreivė pradinėje fazėje yra stabiliausia, tačiau didėjant greičiui artinasi prie nulio

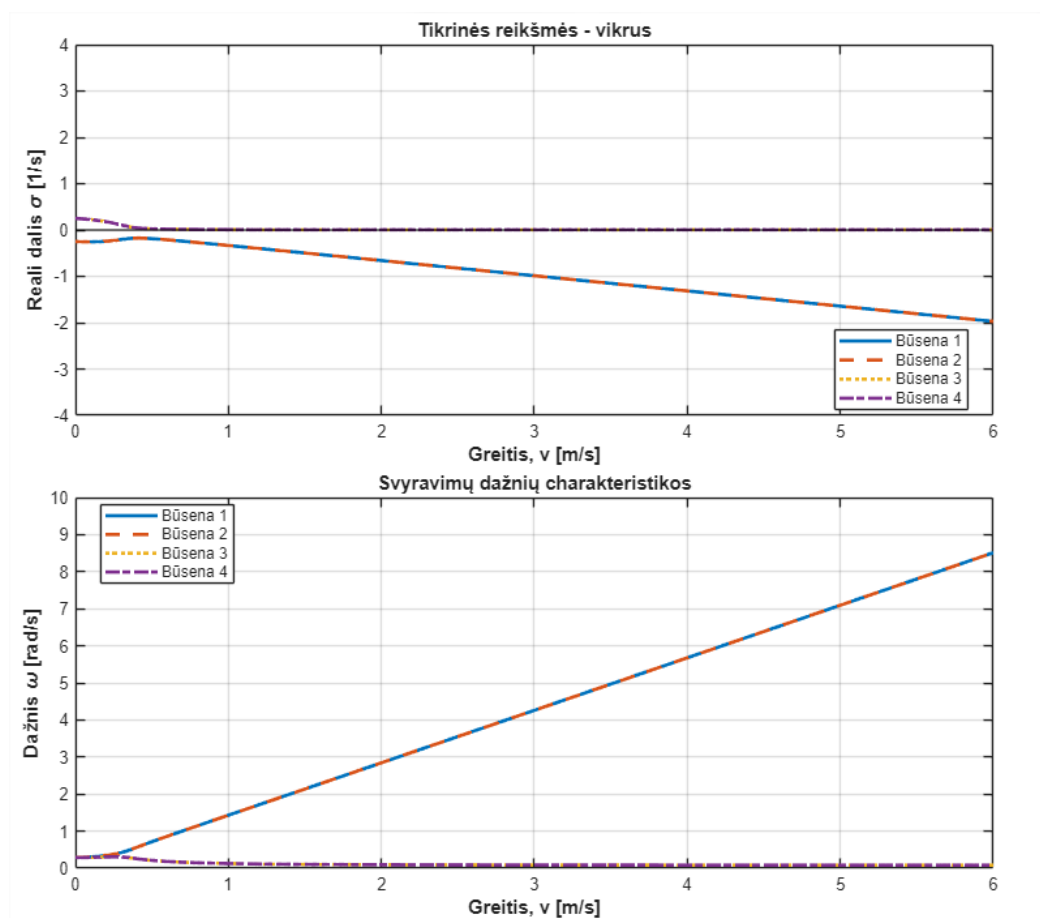
reikšmės, bet išlieka neigiama. Tai parodo, kad šis režimas yra kasterio režimas, kuris padeda mopedui grįžti į pradinę padėtį dėl priekinės šakės geometrijos. Virpėjimo režimas šiame diapazone nepasireiškia. Dažnių grafike matoma įsivaizduojama tikrinių reikšmių dalis, kuri nurodo kurie režimai yra svyruojantys, o kurie monotoniniai. 1 ir 2 būsenos kreivės parodo, kad jos iki 0,39 m/s greičio neturi svyravimų, tačiau pasiekus šį kritinį greitį, pradeda svyruoti 0,699 rad/s dažniu ir svyravimas tolygiai didėja – pasiekus 6 m/s greitį, svyravimai pasiekia 7,65 rad/s. „Būsena 3 ir 4“ didžiąją dalį laiko išlieka ties nuline riba, tai patvirtina, kad virtimo ir kasterio režimai nėra svyruojantys, tačiau matoma, kad iki kritinio greičio virtimo režimas yra padidėjęs – dėl mažais greičiais esančių mažų giroskopinių jėgų, masės centro įtaka verčia mopedą virsti, tačiau šis svyravimas greitai išnyksta.



22 pav. Inertiškos konfigūracijos stabilumo ir dažnių grafikai

22 paveikslėlyje matomas inertiškos konfigūracijos stabilumo grafikas. Jame matomos 1 ir 2 būsenos kreivės nurodo vinguriavimo režimą, kuris kerta nulinę ribą kelis kartus iki kol pasiekia 0,48 m/s kritinį greitį, tuomet tampa kompleksine pora ir stabilizuojasi. Tai parodo, kad ši konfigūracija yra sunkiau valdoma esant labai mažam greičiui, bei stabilizuojasi vėliau nei su bazine konfigūracija. „Būsena 3“ yra virtimo režimas, jis kaip ir bazinėje konfigūracijoje labiausiai artėja nulinės ribos esant didesniai greičiui, tai parodo, kad mopedas taip pat turi tendencija virsti be vairuotojo vairavimo pataisymų. 4 kreivė parodo, kad didžiąją dalį laiko kasterio režimas išlieka stabilus, tačiau greičio diapazone 2,54 – 2,83 m/s trumpam tampa nestabilus, apsikeičia vietomis su virtimo režimu, tai gali įvykti dėl to, kad virtimo režimo slopinimas būtent tuo metu tapo stipresnis nei kasterio režimas, o vėliau vėl apsikeitė vietomis. Dažnių grafike matyti, kad 1 ir 2 kreivės pradeda svyruoti 0,765 rad/s esant 0,48 m/s greičiui, o pasiekus 6 m/s greitį svyravimai pasiekia 7,04 rad/s. Kaip ir

bazinėje konfigūracijoje, 3 ir 4 kreivės esant mažiems greičiams turi mažus svyravimus, tačiau pasiekus kritinį greitį nebesvyruoja.



23 pav. Vikrios konfigūracijos stabilumo ir dažnių grafikai

23 paveikslėlyje stabilumo grafike matoma, kad 1 ir 2 kreivės niekada neperžengia nestabilumo ribos, kas parodo, kad vinguriavimo režimas visą laiką yra slopinamas, net ir esant mažiems greičiams. Nors iki 0,4 m/s greičio kompleksinė pora pradeda artėti link nulinės ribos, tačiau didėjant greičiui ji stabilizuojasi dar labiau. 3 ir 4 kreivės iki kritinio 0,4 m/s greičio išlieka aukščiau nulinės ribos, tačiau tuomet labai priartėja prie jos. Tai parodo, kad ir virtimo ir kasterio režimas greitai stabilizuojasi ir smarkiai nekinta. Dažnių grafikas parodo, kad vinguriavimo režimas nuo pradžios pradeda iš lėto svyruoti, tuomet svyravimai didėja tolygiai. Kritinio 0,4 m/s greičio metu pasiekiamas 0,561 rad/s svyravimas. Esant 6 m/s greičiui, svyravimo dažnis vinguriavimo režime pasiekia 8,51 rad/s, kas parodo, kad sistema yra jautresnė vairavimo prasme. Tuo pačiu metu virtimo ir kasterio iš lėto artėja nulinio dažnio, kas užtikrina, kad šie režimai yra nekintantys.

Lyginant konfigūracijas tarpusavyje, pastebima, kad vikri konfigūracija turi geriausias stabilumo savybes, nes vinguriavimo režimas yra slopinamas visame greičio diapazone. Inertiška konfigūracija stabilizuojasi vėliausiai (0,48 m/s). Tai reiškia, kad važiuojant lėtai, ši konfigūracija reikalaus daugiausiai vairuotojo pastangų pusiausvyrai išlaikyti. Svyravimų dažnis parodo kaip greitai transporto priemonė reaguoja į valdymą: esant 6 m/s greičiui, vikrioje konfigūracijoje pasiekiamas dažnis yra 8,51 rad/s, kas parodo, kad ji yra manevringiausia ir greičiausiai reaguoja į vairuotojo impulsus. Inertiška konfigūracija pasižymi žemiausiu dažniu (7,04 rad/s), kas rodo, kad sistema lėčiau reaguoja į vairavimą, yra labiau inertiška. Visose konfigūracijose virtimo režimas išlieka silpnai

nestabilus, tačiau smarkiai nekinta, kas patvirtina teorinę prielaidą, kad ši nestabilumą vairuotojas gali nesunkiai suvaldyti. Net ir išplėtus greičio diapazoną iki 30 m/s, visose konfigūracijose nebuvo pastebėtas virpėjimo režimas, kuris dažniausiai pastebimas dideliuose greičiuose. Tai patvirtina, kad *Meijaard* modelis su standžių ratų prielaida yra labiau orientuotas į viso mopedo vinguriavimo ir virtimo stabilumo analizę, o ne į aukšto dažnio priekinės šakės virpesius. Tam reikalingas sudėtingesnis padangų modelis, kuris atkartotų padangų elastines savybes. [24] Nors šis matematinis modelis neįtraukia padangų deformacijos į režimų skaičiavimus, tačiau išlieka tinkamas lyginimui su fiziniais tyrimais. Tiek matematiniam modelyje, tiek fiziniuose tyrimuose, važiavimo greičiai išlieka maži, o tai reiškia, kad padangų šoninio slydimo kampai ir kontaktinio paviršiaus deformacijos išlieka mažomis – mopedo dinamika labiau priklauso nuo jo geometrinių parametrų ir masės pasiskirstymo. Virpėjimo režimas dažniausiai pasireiškia pasiekus didesnius greičius arba specifinius rezonansinius dažnius, kurių mažuose greičiuose nebūna. Standžių padangų prielaida leidžia tiksliau identifikuoti vinguriavimo režimą, kuris egzistuoja eksploatuojant mažais greičiais. Todėl šis modelis išlieka tinkamu mopedo dinamikos vertinimui mažuose greičiuose.

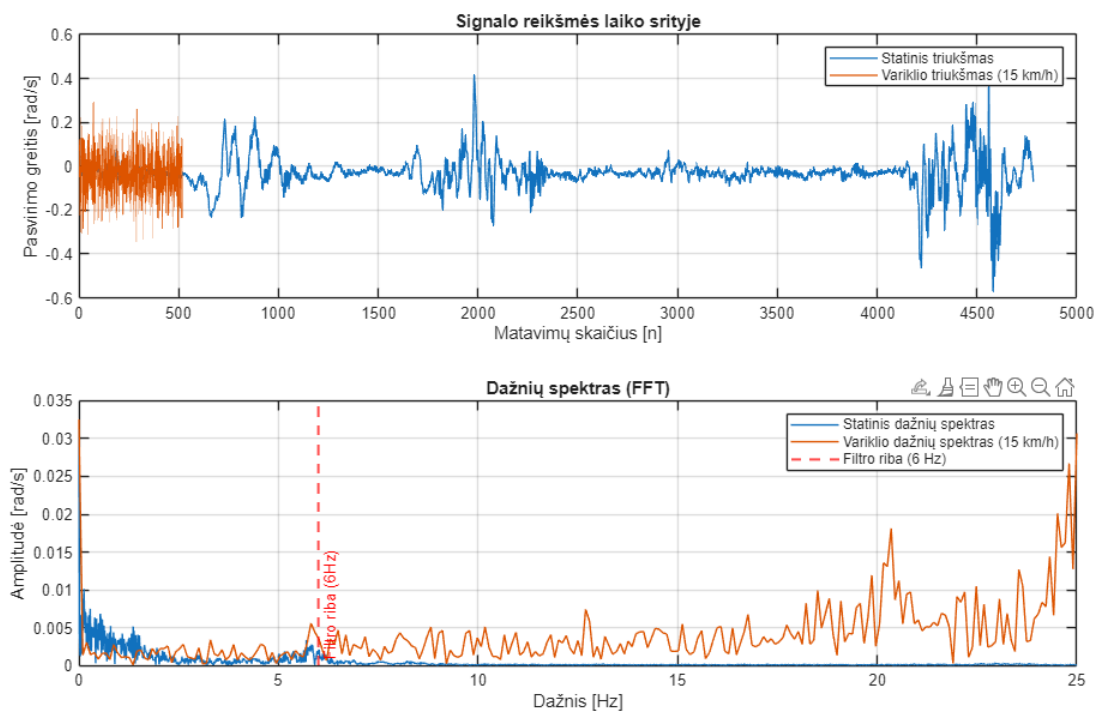
3.3. Vairavimo tyrimai

Fizikiniai tyrimai reikalingi, norint patikrinti ar matematiškai apskaičiuotas stabilumo modelis yra teisingas. Taip pat, šie tyrimai gali suteikti įžvalgų į kaip geometriniai parametrai gali paveikti mažą transporto priemonę, judant mažais greičiais.

Statinio ir variklio triukšmo bei vairo posūkio kampo tyrimai buvo atlikti uždaroje aplinkoje, reikšmės matuotos mažiausiai 5 sekundes. Atliekant variklio triukšmo tyrimą, mopedas buvo pastatytas ant rėmo apačios, kad ratai nesiektų žemės. Pastovaus posūkio, staigaus išsvengimo manevro ir virtimo ribos lėtėjant tyrimai buvo atlikti lauke, ant sausos asfalto dangos. Oro sąlygos tyrimų metu: debesuota, oro temperatūra +12°, vėjo greitis 2 m/s, šviesus paros laikas.

3.3.1. Statinis ir variklio triukšmas matavimuose

Prieš pradėdant tyrimus, yra atliekami keli papildomi tyrimai, norint pamatyti kokie trikdžiai gali būti sistemoje. Atliekamas statinis triukšmo ir variklio triukšmo tyrimas. Pirmojo tyrimo metu galima pamatyti, kokias reikšmes matuoja jutikliai, nors mopedas yra visai nejudinamas. Variklio triukšmo tyrime matomos jutiklių reikšmės, kai variklis suka galinį ratą skirtingais greičiais. Kadangi vinguriavimo režimas yra aptinkamas iki 6 Hz dažnio, aukštesnio dažnio parodymus galima ignoruoti. Taip pat, naudojant papildomus filtrus, galima sumažinti bendrinio triukšmo reikšmes, kurios matomos statinio triukšmo tyrimo metu. Naudojantis *Matlab* aplinka, sukuriamas kodas, kuris naudotų šių dvejų tyrimų duomenis, juos apdorotų (naudotų tik 15 km/h greičio reikšmes bei pakeistų matavimo vienetus), parodytų jutiklių reikšmių ir jų kiekio grafiką bei dažnio ir jo amplitudės grafiką.



24 pav. Triukšmo analizės grafikai

24 paveikslėlyje matomi grafikai parodo triukšmo tyrimų rezultatus. Signalų reikšmių grafike matomi giroskopinės x ašies posūkio greičiai ir matavimų skaičiai. Variklio triukšmo kreivė šiame grafike yra trumpesnė, nes naudojami duomenys yra tik iš nuo 14 iki 16 km/h greičio diapazono. Dažnių spektro grafikas parodo pasiskirsčiusius dažnius ir jų amplitudes tuose dažniuose. Iš grafiko matoma, kad statinio triukšmo dažnių amplitudė yra kiek didesnė esant mažam dažniui, tačiau dažniui didėjant amplitudė sumažėja. Variklio dažnių amplitudės didėja didėjant dažniui. Kadangi svarbiausi tyrimai svyravimai atliekant tyrimus mažais greičiais pasirodo iki 6 Hz dažnio, didesnio dažnio reikšmes galima filtruoti naudojant žemo dažnio filtrą.

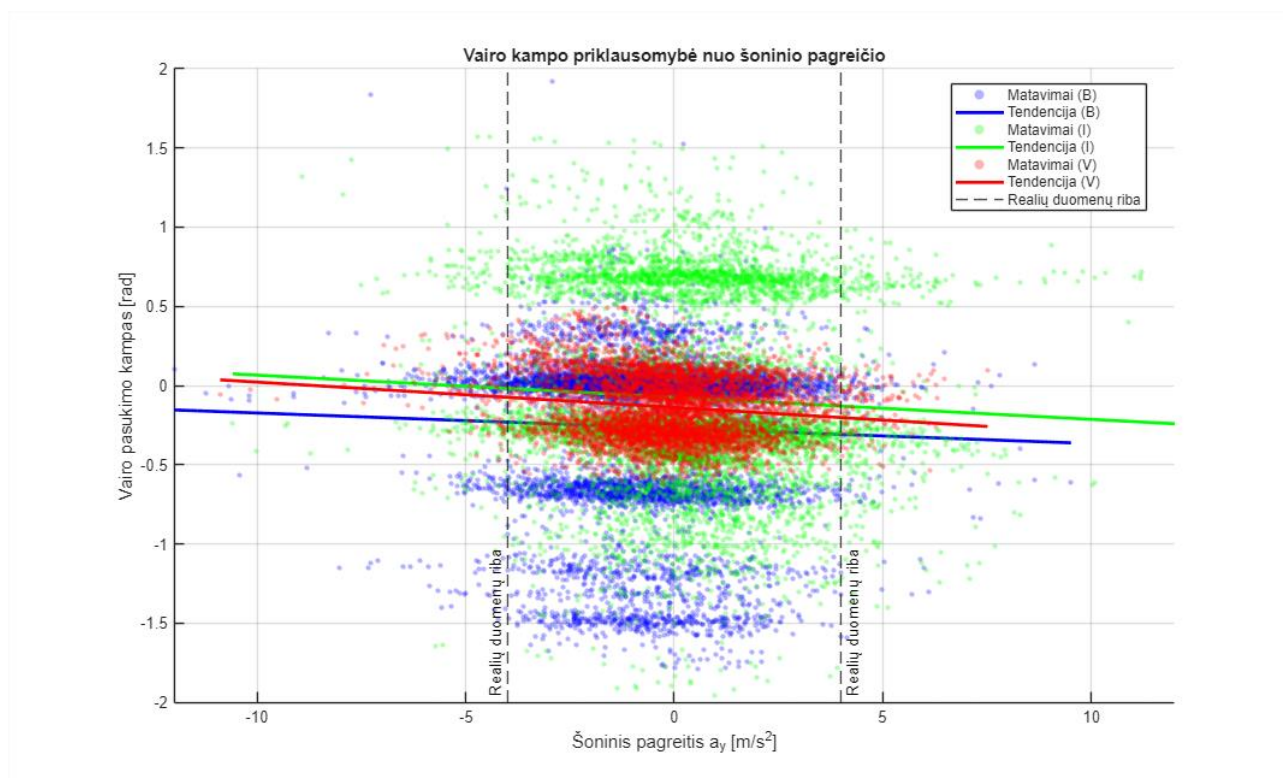
3.3.2. Pastovaus posūkio spindulio tyrimas

Pastovaus posūkio spindulio tyrimas atliekamas su visomis konfigūracijomis, 3 kartus apvažiuojant 5 m spindulio ratą 10 km/h greičiu pagal laikrodžio rodyklę, vėliau prieš laikrodžio rodyklę. Apvažiuojant ratą po 3 kartus, rezultatai bus tikslesni ir parodys konfigūracijų elgseną šio tyrimo metu. Šis eksperimentas padės suprasti mopedo vairavimo charakteristiką – bus ieškoma ryšio tarp vairo pasukimo kampo (δ) ir šoninio pagreičio (a_y) posūkio metu. Tai parodys kaip ratų bazės ir geometrinio tako pakeitimai paveikia mopedo manevringumą ir stabilumą posūkyje.

Grafike bus atvaizduotas mopedo standumas posūkyje, vaizduojant priklausomybę tarp šoninio pagreičio ir vairo pasukimo kampo. Visame grafike bus pavaizduoti duomenų taškai, kurie reprezentuoja jutiklių matavimo reikšmes 50 Hz dažniu. Jei taškai išsidėstę tankiai, tai rodo stabilų važiavimą ratu, o jei taškai išsibarstę – tai galimos variklio ar kelio nelygumų sukeltos trikdžių reikšmės. Taip pat grafike bus matomos tendencijų linijos K – tai stabilumo faktorius, kuris nurodo sistemos jautrumą. Kuo K reikšmė labiau teigiama, tuo sistema stabilesnė [26]. Ji skaičiuojama naudojant (23) formulę, laikant, kad C yra laisvasis narys, įvertinantis reikšmės poslinkį:

$$\delta = K * a_y + C; \quad (23)$$

Taip pat naudojami filtrai padeda filtruoti surinktus duomenis: naudojant *butterworth* filtras *Matlab* aplinkoje pasižymi tolygia amplitude filtruojant duomenis, todėl smarkiai neiškraipo reikšmių. Taip pat grafikuose yra nubrėžta „realių duomenų riba“ ties $\pm 4 \text{ m/s}^2$ pagreičio riba, nes naudojant (3) formulę apskaičiuojama, kad 2 m spindulio ratą važiuojant 10 km/h greičiu šoninis pagreitis bus $3,86 \text{ m/s}^2$, o važiuojant 5 m spindulio ratu važiuojant tokiu pat greičiu – $1,53 \text{ m/s}^2$. Tai reiškia, kad didesnės nei $\pm 4 \text{ m/s}^2$ pagreičio reikšmės neturėtų būti galimos važiuojant tokiais greičiais, todėl jos prilyginamos sistemos triukšmui.



25 pav. Vairo kampo priklausomybė nuo šoninio pagreičio pastovaus spindulio posūkio eksperimentuose

25 paveikslėlis parodo vairo kampo priklausomybę nuo šoninio pagreičio pastovaus spindulio posūkio eksperimentuose. Mėlyna spalva matoma bazinės konfigūracijos duomenys, žalia – inertiškos, raudona – vikrios. Atlikus konfigūracijų tendencijų skaičiavimus, gauta, kad bazinės konfigūracijos $K = -0,0097 \text{ rad/(m/s}^2)$, šis tendencijos nuolydis parodo, kad ši konfigūracija posūkyje elgiasi geriausiai – vairuotojui reikia mažiausiai valdyti vairą, norint išlaikyti tą patį posūkio kampą. Inertiškos konfigūracijos $K = -0,0139 \text{ rad/(m/s}^2)$, tai parodo, kad prailginta ratų bazė ir padidintas geometrinis takas sukelia pasipriešinimą trajektorijos kitimui. Taip yra, nes geometrinis takas sukuria didesnę savaiminio išsitiesinimo jėgą, kas reiškia, kad norint pasiekti tuos pačius šoninius pagreitus kaip ir bazinėje konfigūracijoje, vairuotojas privalo pasukti vairą didesniu kampu, nes sistema labiau linkusi save stabilizuoti važiuojant į priekį. Vikrios konfigūracijos $K = -0,0160 \text{ rad/(m/s}^2)$ parodo, kad net jei konfigūracija suprojektuota vikresniam manevringumui, gautas didžiausias jautrumo koeficientas. Tai reiškia, kad sumažinus geometrinį taką, mopedas praranda savaiminio stabilizavimą ir labiau virstą į posūkio vidų. Todėl norint išlaikyti tą pačią trajektoriją, vairuotojui reikia atlikti daugiau vairo korekcinį veiksmų.

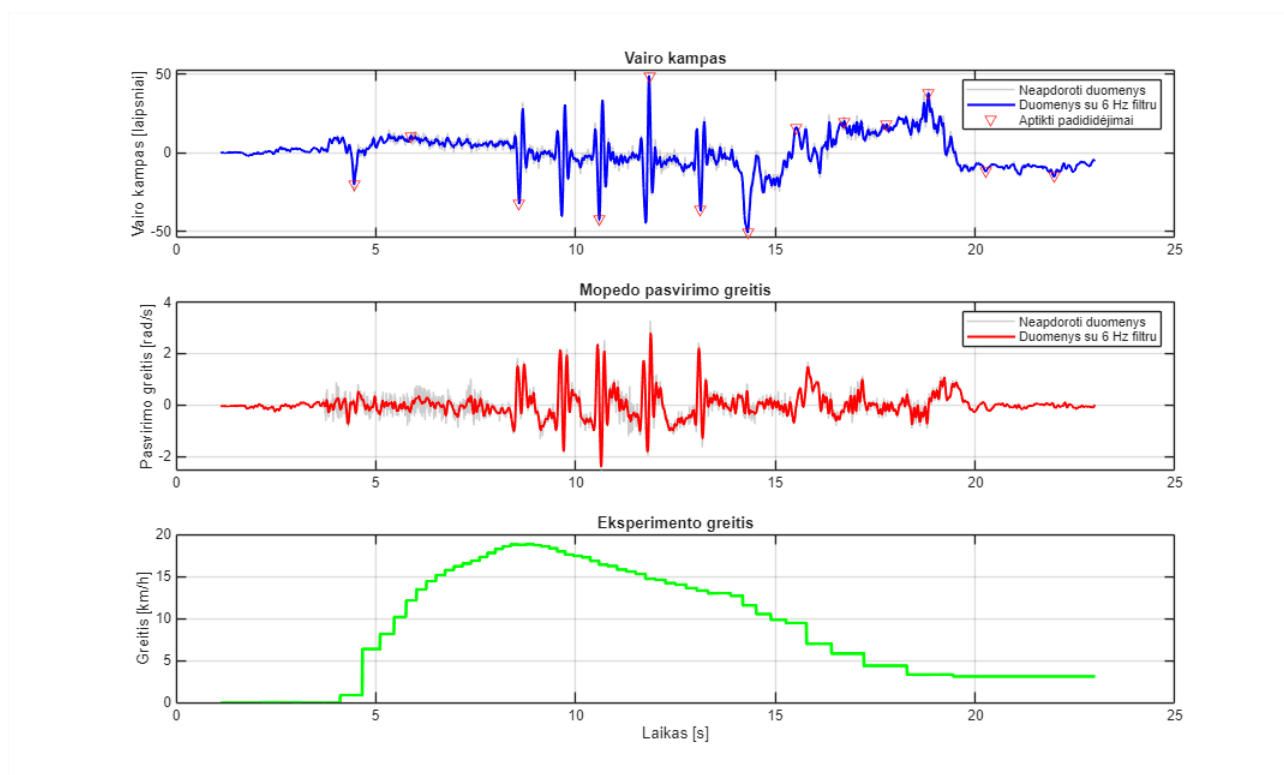
Šis eksperimentas parodo, kad smarkiai pakeistos geometrinės savybės, tokios kaip geometrinis takas, gali paveikti mopedo vairavimo ypatybes posūkiuose. Taip pat, pakeitus šias geometrinės savybes, mopedas gali pasirodyti blogiau nei tikėtasi tam tikrais eksploataavimo scenarijais. Inertiška konfigūracija lieka pranašesnė tiesiame važiavime dėl padidėjusių savaiminio centravimo savybių, o vikri konfigūracija – išlieka stabili greitai keičiant važiavimo kryptį, o ne laikantis pastovaus posūkio. Šiuo atveju, geriausių rezultatų parodė bazinė konfigūracija, kuri yra vikrios ir inertiškos konfigūracijų tarpinis variantas ir būtent šiame tyrime buvo stabiliausia ir lengviausiai valdoma.

3.3.3. Staigus išvengimo manevro tyrimas

Eksperimentai atliekami po 3 kartus kiekvienai skirtingai konfigūracijai. Tyrimu metu, staigus vairo pasukimas atliekamas kelis kartus lėtėjant. Matuojamos posvyrio greičio reikšmės ir skaičiuojamas slopinimo koeficientas.

Iš rezultatų bus kuriami 3 grafikai: pirmas grafikas mėlyna kreive atvaizduoja vairo posūkio kampą, raudona kreivė atvaizduoja giroskopo parodymus, kurie nurodo mopedo pasvirimą aplink x ašį, žalia kreivė parodo eksperimento metu buvusį greitį. Eksperimentas pradedamas įsibėgėjant iki maždaug 15 km/h greičio, tuomet pradedama riedėti ir staigiai pasukamas vairas ir laukiama kol mopedas vėl išsitiesins. Tai galima atlikti kelis kartus tuo pačiu važiavimu arba iš naujo pradėti eksperimentą.

Pirmiausia atliekami eksperimentai su bazine mopedo konfigūracija.



26 pav. Bazinės konfigūracijos staigus išvengimo manevro 1 bandymo duomenų grafikas

26 paveikslėlyje matomos pirmo bazinės konfigūracijos staigus išvengimo manevro bandymo reikšmės. Iš grafikų pasirenkamos pasvirimo greičio reikšmės, kuriuose matosi du aiškūs svyravimo pikai toje pačioje pusėje, o mopedo greitis yra apie 15 km/h. Pirmas pikas turi būti didesnis už antrąjį, tuomet apskaičiuojamas jų santykis. Suskaičiuojamas šio santykio logaritminis dekrementas Λ ir tuomet apskaičiuojamas slopinimo koeficientas ζ , kurie skaičiuojami su formulėmis [27]:

$$\Lambda = \ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right); \quad (24)$$

$$\zeta = \frac{\Lambda}{\sqrt{4\pi^2 + \Lambda^2}}; \quad (25)$$

čia A_1 – pirmojo piko reikšmė;

A_2 – antrojo (sekančio) piko reikšmė.

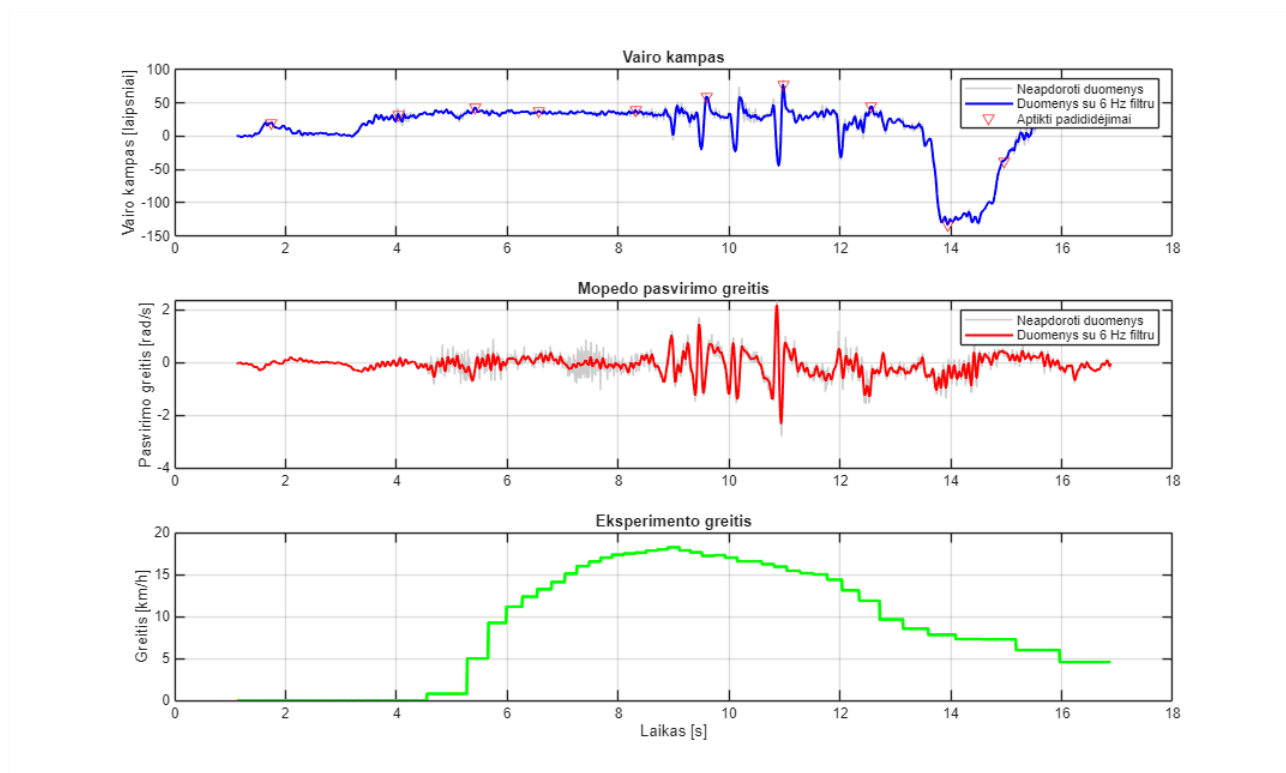
Norint gauti tikslesnius rezultatus, atliekami 3 bandymai su ta pačia konfigūracija. Tai leis iš rezultatų apskaičiuoti slopinimo koeficiento vidurkį, kuris geriau parodys konfigūracijos elgseną tyrime. Likę bandymų grafikai yra pridėti „Priedai“ skyrelyje. Iš trijų bandymų, surenkami duomenys:

9 lentelė. Bazinės konfigūracijos staigaus išvengimo manevro pikų ir slopinimo koeficiento lentelė

Bandymo numeris	Pirmas pikas, rad/s	Antras pikas, rad/s	Logaritminis dekrementas Λ	Slopinimo koeficientas ζ
1	2,188	0,950	0,362	0,058
2	2,387	0,849	0,449	0,071
3	3,255	1,992	0,213	0,034
Vidurkis	2,610	1,263	0,342	0,054

Iš rezultatų matoma, kad slopinimo koeficientas bazinėje konfigūracijoje yra 0,054. Tai bus atskaitos taškas, pagal kurį bus lyginamos kitos konfigūracijos.

Toliau tyrimai atliekami su inertiškos konfigūracijos mopеду. Jame, ratų bazė yra ilgesnė, priekinės ašies poslinkis yra neigiamas – arčiau rėmo ir turi padidintą geometrinį taką.



27 pav. Inertiškos konfigūracijos staigaus išvengimo manevro 1 bandymo duomenų grafikas

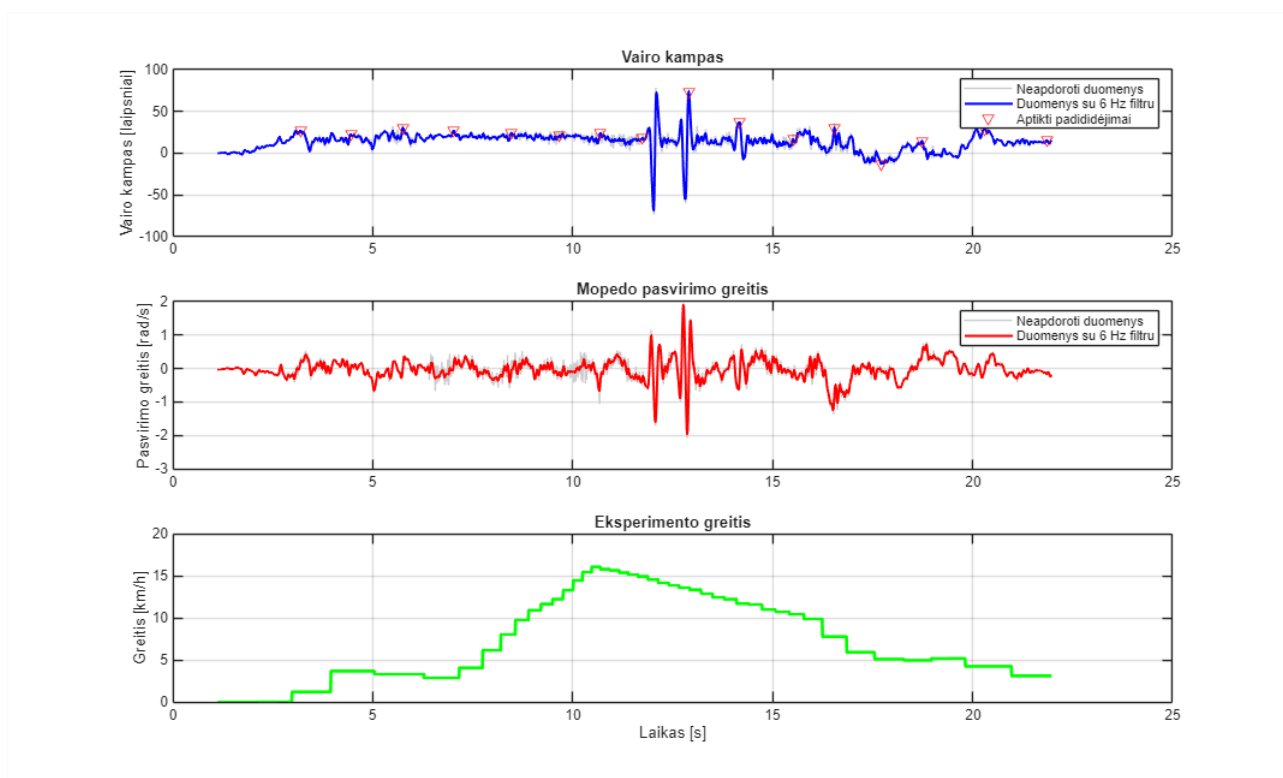
Randami pasvirimo kampo reikšmių pikai, esant 15 km/h greičiui:

10 lentelė. Inertiškos konfigūracijos staigaus išvengimo manevro pikų ir slopinimo koeficiento lentelė

Bandymo numeris	Pirmas pikas, rad/s	Antras pikas, rad/s	Logaritminis dekrementas Λ	Slopinimo koeficientas ζ
1	2,140	0,754	0,453	0,072
2	2,687	0,797	0,528	0,084
3	2,228	1,134	0,293	0,047
Vidurkis	2,351	0,895	0,425	0,067

Iš rezultatų matoma, kad slopinimo koeficientas (0,067) padidėjo inertiškoje konfigūracijoje. Šioje konfigūracijoje, geometriniai parametrai neleidžia vairui taip greitai svyruoti, nes priekinis ratas veikia kaip stabilizatorius dėl padidinto geometrinio tako.

Atliekami staigaus išvengimo manevro tyrimai su vikria mopedo konfigūracija. Čia ratų bazė yra trumpiausia, priekinės ašies poslinkis yra teigiamas, kas reiškia, kad geometrinis takas yra mažiausias.



28 pav. Vikrios konfigūracijos staigaus išvengimo manevro 1 bandymo duomenų grafikas

Skaičiuojamas slopinimo koeficientas, esant 15 km/h greičiui:

11 lentelė. Vikrios konfigūracijos staigaus išvengimo manevro pikų ir slopinimo koeficiento lentelė

Bandymo numeris	Pirmas pikas, rad/s	Antras pikas, rad/s	Logaritminis dekrementas Λ	Slopinimo koeficientas ζ
1	1,884	1,428	0,120	0,019
2	1,640	0,981	0,223	0,036
3	0,895	0,679	0,120	0,019
Vidurkis	1,473	1,029	0,154	0,025

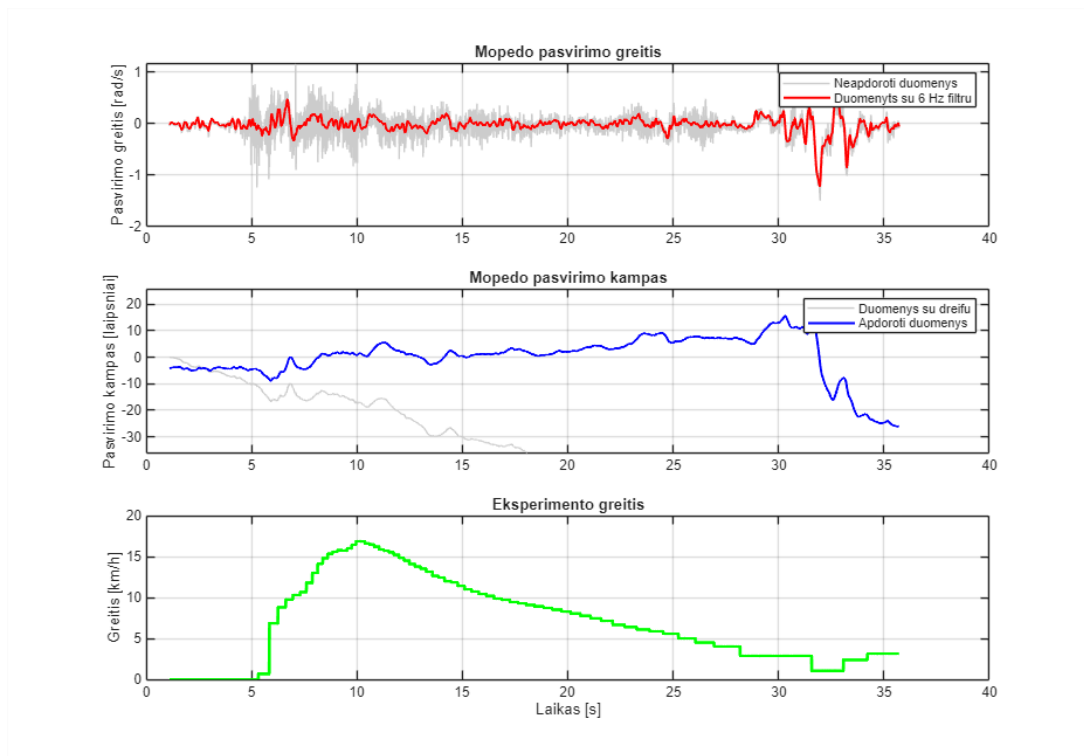
Rezultatai parodo, kad vikrios mopedo konfigūracijos slopinimo koeficientas yra mažiausias – 0,025. Slopinimas yra smarkiai sumažėjęs, lyginant su kitomis konfigūracijomis. Tai reiškia, kad mopedo vairavimas yra jautrus, jis svyruoja ilgiau. Tačiau dėl lengvo vairavimo, mopeda suvaldyti lengviau.

Atlikus staigaus išvengimo manevro eksperimentą, matomos vidutinės slopinimo koeficiento reikšmės, kurios padeda nustatyti priklausomybę tarp mopedo geometrijos ir jo dinaminio stabilumo. Eksperimentai parodo, kad vikrios konfigūracijos mopedo slopinimas yra mažiausias (0,025), o inertiškos didžiausias - 0,067. Bazinėje konfigūracijoje slopinimo koeficientas yra 0,054, kas pasižymi nuosekliu svyravimų slopinimu. Inertiškoje konfigūracijoje, slopinimas yra 19,5 % didesnis nei bazinėje, kas parodo, kad ši konfigūracija efektyviau sugeria svyravimus sistemoje. Vikrios konfigūracijos slopinimo koeficientas yra 2,2 kartų mažesnis nei bazinės konfigūracijos, kas parodo, kad mopedas yra jautresnis trikdžiams, savaiminis stabilizavimas užtrunka ilgiau. Tačiau ši konfigūracija tampa manevringesnė, nors ir reikalauja daugiau vairavimo pataisymų norint išlaikyti tiesiaicigį judėjimą.

3.3.4. Virtimo ribos lėtėjant tyrimas

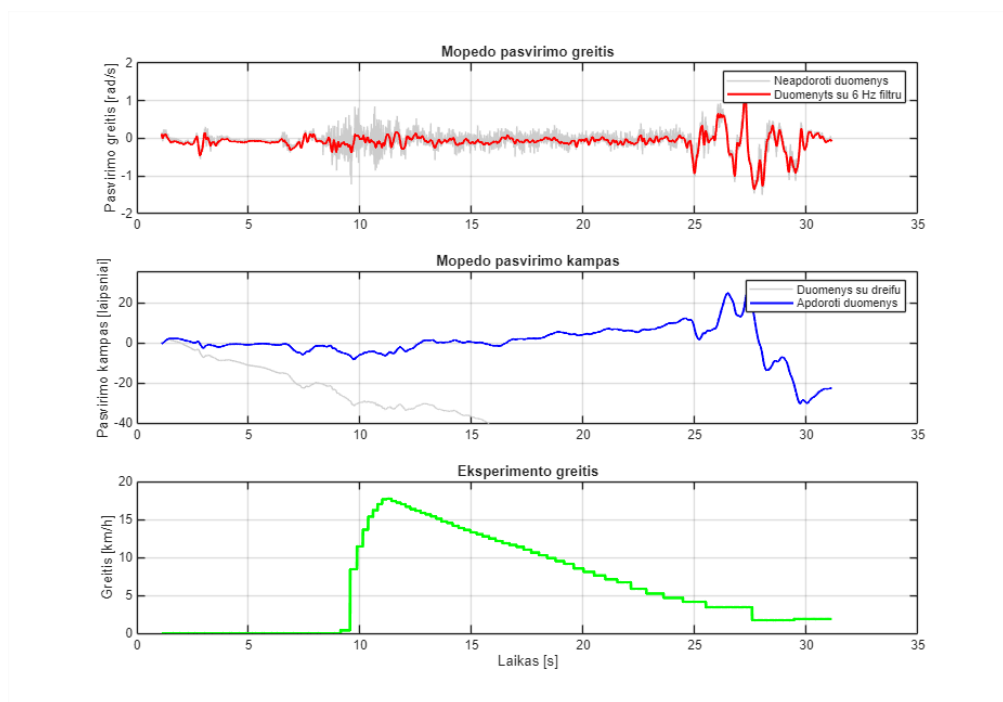
Eksperimentai atliekami po 2 kartus su kiekviena konfigūracija. Tyrime įsibėgėjama iki 15 km/h greičio, tuomet pradedama riedėti iki tol, kol vairuotojui reikės pasukti vairą arba atremti koją į žemę, kad būtų išvengta nuvirtimo. Bus ieškomas mopedo polinkis lėtai virsti. Tyrimas atliekamas po 2 bandymus, taip užtikrinamas duomenų tikslumas.

Grafikuose bus atvaizduotas mopedo pasvirimo greitis, pasvirimo kampas ir eksperimento greitis. Pasvirimo greičio grafike duomenys bus apdoroti žemo dažnio filtrų *butterworth* ir *filtfilt*, bei paliekant tik reikšmės mažesnes nei 6 Hz. Taip pat pašalinama giroskopo statinė paklaida – nulinis poslinkis. Šis poslinkis imamas kaip pirmosios eksperimento sekundės vertė ir atimama iš visų išmatuotų reikšmių. Pasvirimo kampo grafikas yra skaičiuojamas naudojant pasvirimo greitį laiko atžvilgiu su funkcija *cumtrapz*. Taip daroma, nes akselerometro reikšmės yra veikiamos išcentrinių jėgų, todėl gali ne taip tiksliai parodyti mopedo kampą. Tačiau, naudojant šiuos duomenis, net ir mažos paklaidos gali iškraipyti duomenis, todėl yra pasiteikiami papildomi filtrai ir šalinamas grafiko dreifas.



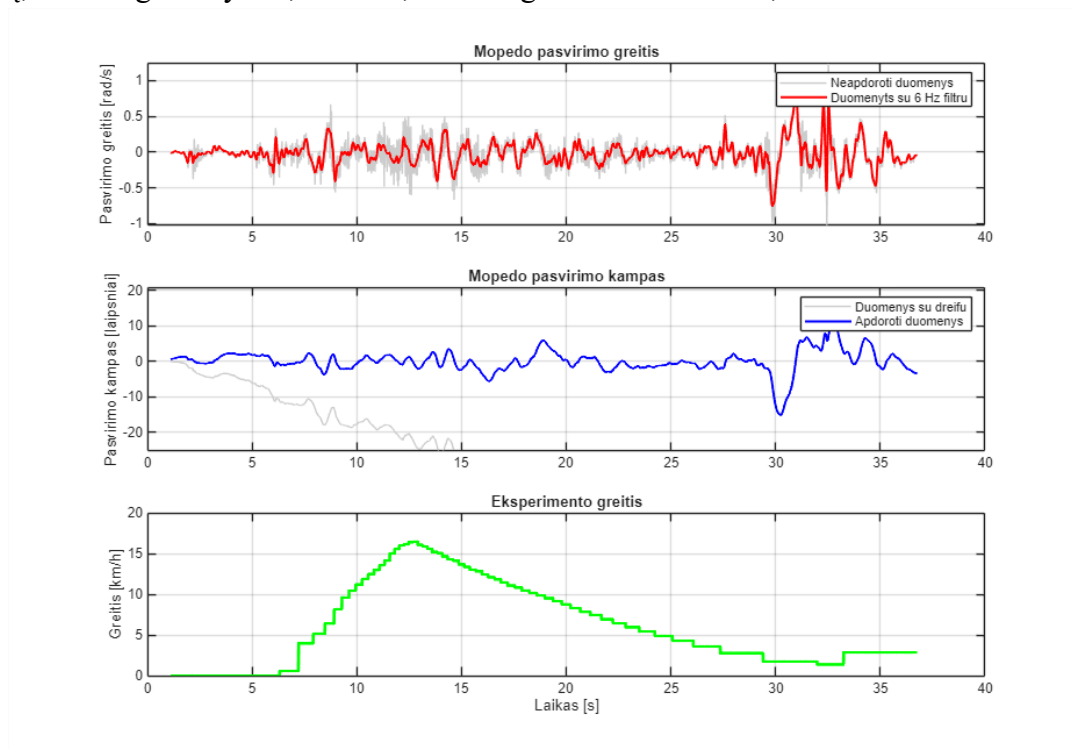
29 pav. Bazinės konfigūracijos virtimo ribos 1 bandymo duomenų grafikas

29 paveikslėlyje matoma, kad važiuojant greičiu nuo 15 iki 5 km/h, pasvirimo kampas išlieka gana stabilus, svyruodamas $\pm 5^\circ$ ribose. Tai parodo, kad bazinė konfigūracija turi pakankamą savi stabilumą vidutiniuose greičiuose. Greičiui nukritus iki 2,9 km/h, matomas staigus pasvirimo kampo nukrypimas, kuris parodo, kad vairuotojas bandė stabilizuoti sistemą, kas matoma iš padidėjusio mopedo pasvirimo greičio. Antro bandymo metu (grafikas pridėtas „Priedai“ skyrelyje), greitis kai mopedo pasvirimo kampas staigiai padidėjo buvo 2,69 km/h, vidurkis – 2,80 km/h.



30 pav. Inertiškos konfigūracijos virtimo ribos 1 bandymo duomenų grafikas

Atliekant tyrimą su inertiška konfigūracija matoma, kad mopedas yra stabilesnis važiuojant tiesia linija dėl savaiminio priekinio rato stabilizavimo didesnio geometrinio tako dėka. Lyginant su bazinės konfigūracijos mopedu, šios konfigūracijos kur kas ilgiau išlaiko stabilią vertikalią padėtį – tai yra mažesni mopedo kampo posvyriai iki kritinio greičio. Greičiui pasiekus 3,45 km/h ribą, pasvirimo kampas padidėja, o pasvirimo greitis taip pat išauga – pasiektas kritinis greitis. Atlikus antrą bandymą, kritinis greitis yra 2,72 km/h, kritinio greičio vidurkis – 3,09 km/h.



31 pav. Vikrios konfigūracijos virtimo ribos 1 bandymo duomenų grafikas

Vikrios konfigūracijos mopedas parodo, kad sumažintas geometrinis takas transporto priemonę paverčia jautriausiai valdomą. Priešingai nei prieš tai buvusiuose bandymuose su kitomis konfigūracijomis, mopedo pasvirimo kampo reikšmės svyruoja daug labiau, tai reiškia, kad reikėjo daugiau vairuotojo vairavimo impulsų norint išlaikyti tiesią trajektoriją riedant, kur be giroskopinių varomųjų jėgų mopedas tampa ne toks stabilus. Tačiau dėl jautraus valdymo ir minimalių vairo korekcijų, pasiektas mažiausias kritinis greitis 1,79 km/h ir tik tuomet matomas staigus mopedo pasvirimo kampo padidėjimas. Antro bandymo metu kritinis greitis buvo 3,02 km/h, tad kritinio greičio vidurkis šiai konfigūracijai buvo 2,405 km/h.

Atlikus eksperimentus su skirtingomis konfigūracijomis, gauti kritiniai greičiai:

12 lentelė. Kritinio virtimo greičio rezultatų lentelė

Konfigūracija	1 bandymo kritinis greitis, km/h	2 bandymo kritinis greitis, km/h	Kritinio greičio vidurkis, km/h
Bazinė	2,90	2,69	2,80
Inertiška	3,45	2,72	3,09
Vikri	1,79	3,02	2,41

Po šio tyrimo galima daryti išvadą, kad mopedo savaiminis lėtėjimo stabilumas priklauso nuo geometrinio tako ir ratų bazės dydžio. Nors inertiškos konfigūracijos mopedas tiesia linija važiuo

tiesiausiai ir pasižymėjo geriausiu kryptinių stabilumu, tačiau turėjo aukščiausią vidutinį kritinį greitį (3,09), kurio metu pradeda virsti. Bazinė konfigūracija tyrimuose taip pat pasižymėjo geru kryptiniu stabilumu, vidutinis kritinis greitis buvo 2,80 km/h. Vikri konfigūracija priešingai nei bazinė ar inertiška pasižymėjo blogu kryptiniu stabilumu – reikėjo daug vairavimo korekcijų norint važiuoti tiesiai, tačiau buvo pasiektas mažiausias vidutinis kritinis greitis – 2,41 km/h. Tai patvirtina teorinę prielaidą, kad sumažintas geometrinis takas padidina vairavimo jautrumą ir leidžia vairuotojui greitai ir tiksliai atlikti pusiausvyros korekcijas esant net ir mažiems greičiams. Tačiau tokią sistemą yra sunkiau vairuoti, nes ji reikalauja nuolatinio aktyvaus valdymo, priešingai nei inertiška ar bazinė konfigūracijos.

3.4. Rezultatų palyginimas

Norint palyginti matematinio modelio skaičiavimų ir fizinių tyrimų rezultatus, sukuriama tyrimų metu rastų charakteristikų lentelė.

13 lentelė. Fizinių ir matematinio tyrimų skirtingų mopedo konfigūracijų charakteristikos

Konfigūracija	Pastovaus posūkio spindulio tyrimas	Staigaus išvengimo manevro tyrimas	Virtimo ribos lėtėjant tyrimas	Matematinis modelis
Bazinė	Vairavimo elgsena važiuojant pastoviu posūkiu reikalauja mažiausios vairo korekcijos, norint išlaikyti tą pačią trajektoriją.	Pasižymi nuosekliu svyravimų slopinimų.	Stabilus pasvirimo kampas riedant tiesiai parodo pakankamą savi stabilumą.	Vidutinis vinguriavimo režimo stabilizavimasis, vidutiniai dažnių svyravimai sistemoje parodo, kad sistema yra pakankamai stabili.
Inertiška	Padidintas geometrinis takas priešinasi trajektorijos kitimui - reikia pasukti vairą didesniu kampu, nes vairavimo sistema linkusi labiau stabilizuoti vairavimą tiesia linkme.	Didesnis svyravimų slopinimas, geometriniai parametrai neleidžia vairui taip greitai svyruoti dėl to, kad priekinis ratas veikia kaip stabilizatorius dėl padidinto geometrinio tako.	Važiavimas tiesiai reikalauja mažiausiai vairo korekcijų, tačiau didžiausias kritinis greitis virtimo metu. Didesnis geometrinis takas padeda stabilizuoti mopedą važiuojant, bet virstant reikalauja didesnių korekcijų.	Vinguriavimo režimas stabilizuojasi vėliausiai, tačiau sistemoje esantys svyravimai yra mažiausi, tai parodo, kad konfigūracija lėčiau reaguoja į vairavimą, yra labiau inertiška.
Vikri	Sumažinus geometrinį taką, vairavimas virsta labiau į posūkio vidų, reikalauja daugiau vairo korekcinių veiksmų.	Mažiausias svyravimų slopinimas, vairavimas tampa jautrus ir lengvas, svyruoja ilgiau, tačiau dėl jo lengvumo, mopedą suvaldyti yra lengviau.	Važiavimas jautrus, reikalaujantis daug korekcijų riedant tiesiai, tačiau lengvas valdymas leidžia modeliui pasiekti mažiausią kritinį greitį prieš virtimą.	Vinguriavimo režimas niekada neperkopia nestabilios ribos, virtimas ir kasteris išlieka stabilūs ir mažai kintantys. Didžiausias svyravimo dažnis parodo kad vairavimo sistema yra jautriausia.

Lyginant matematinio ir fizinių tyrimų rezultatus matoma, kad matematiniai rezultatai atitinka fizinius tyrimus. Vikrioje konfigūracijoje didesnis jautrumas vairavimui ir vairavimo lengvumas yra matomas ir staigaus išvengimo manevro slopinimo koeficiente, ir virtimo ribos lėtėjant, ir pastebimams matematinio modelio svyravimo dažnyje. Tai parodo, kad mopedas yra vikrus

posūkiuose ir esant mažiems greičiams, dėl geometrijos nepereina į vinguriavimo ar virpėjimo režimus, tačiau vairuojant reikalauja daugiausiai vairavimo korekcijų norint išlaikyti tą pačią trajektoriją. Inertiška konfigūracija matematiname modelyje parodė mažiausius sistemoje esančius svyravimus. Tai reiškia, kad konfigūracija lėčiau reaguoja į vairavimo impulsus. Tai yra matoma ir staigaus išvengimo manevro tyrime, kur svyravimų slopinimas buvo didžiausias, o pastovaus posūkio tyrime dėl didesnio geometrinio tako sistemai reikėjo daugiau sukti vairą, norint įveikti geometrinio tako savaiminio stabilizavimo jėgas. Bazinė konfigūracija tiek matematinuose skaičiavimuose, tiek fiziniuose tyrimuose pasižymėjo kaip vidurinė reikšmė tarp vikrios ir inertiškos konfigūracijos. Pastovaus spindulio posūkio tyrime parodė geriausius rezultatus dėl subalansuotų geometrinių parametrų.

Išvados

1. Sudarytas elektrinio mopedo stabilumo matematinis modelis naudojantis *Meijaard – Whipple* linijinis dviratės transporto priemonės modelį. Jame buvo iširtos 3 konfigūracijos – bazinė (0,96 m ratų bazė, 0 m priekinės ašies poslinkis), inertiška (1 m ratų bazė, - 0,03 m priekinės ašies poslinkis) ir vikri (0,9 m ratų bazė, + 0,03 m priekinės ašies poslinkis). Grafikuose matoma, kad vikri konfigūracijoje vinguriavimo režimas išlieka stabilus, tačiau pasižymi aukščiausiu svyravimo dažniu 8,51 rad/s – ši konfigūracija greičiausiai reaguoja į vairavimo impulsus. Inertiškoje konfigūracijoje pasiekiamas žemiausias svyravimo dažnis – 7,04 rad/s parodo, kad ši konfigūracija lėčiau reaguoja į vairavimą, yra labiau inertiška.
2. Atlikti 3 pagrindiniai eksperimentai, kurie parodo mopedo dinamines savybes. Pastovaus spindulio posūkio tyrimo metu buvo nustatyta, kad bazinės konfigūracijos mopedas važiuojant pastoviu posūkiu reikalauja mažiausios vairo korekcijos. Vikrios ir inertiškos konfigūracijos tyrime reikalavo daugiausiai vairo korekcijų dėl sumažinto ir padidinto savi lygiavimo mopede. Staigaus išvengimo manevro tyrime mažiausias svyravimų slopinimas aptiktas vikrioje konfigūracijoje, tad tai reiškia, kad ji yra jautriausia vairavimui. Inertiškos konfigūracijos svyravimų slopinimas buvo didžiausias – padidintas geometrinis takas veikia kaip stabilizatorius priekinėje ašyje. Virtimo ribos lėtėjant tyrime pastebėta, kad inertiška konfigūracija pasižymi geriausiu kryptiniu stabilumu, tačiau virtimo ribos greitis lėtėjant buvo didžiausias – 3,09 km/h. Vikrios konfigūracijos vairavimui reikalavo daugiausiai korekcijų riedant tiesiai, tačiau dėl jautraus vairavimo buvo galima išlaikyti mažesnę kritinį greitį – 2,41 km/h.
3. Fizinių tyrimų rezultatai patvirtina matematinio modelio rezultatus. Pagal juos abu, vikri mopedo konfigūracija pasižymi stabilumu vinguriavimo režime, yra manevringa ir jautri vairavimui, vairavimas yra tikslus, reikalaujantis daug korekcijų. Inertiška konfigūracija pasižymi geresniu svyravimo dažnių slopinimu. Tai reiškia, kad mopedas lėčiau reaguoja į vairavimą, tačiau pasižymi ir geriausiu kryptiniu stabilumu. Bazinė konfigūracija pasižymėjo geru kryptiniu stabilumu, buvo kaip atskaitos taškas kitoms konfigūracijoms.

Literatūros sąrašas

1. Cossalter, V. *Motorcycle dynamics (2th ed.)*. Lulu.com, 2006. ISBN 978-1430308614.
2. Wilson, D. G., & Schmidt, T. *Bicycling science (4th ed.)*. MIT Press, 2020. ISBN 978-0262232371.
3. Bike Gremlin. *Bicycle geometry explained* [interaktyvus]. 2026 [žiūrėta 2026-01-23]. Prieiga per internetą: <https://bike.bikegremlin.com/1279/bicycle-geometry-explained/>
4. CyclingAbout. *Understanding bicycle frame geometry* [interaktyvus]. 2013 [žiūrėta 2026-01-23]. Prieiga per internetą: <https://www.cyclingabout.com/understanding-bicycle-frame-geometry/>
5. Bike Insights. *Trail* [interaktyvus]. 2026 [žiūrėta 2026-01-25]. Prieiga per internetą: <https://bikeinsights.com/cyclopedia/trail>
6. Meijaard, J. P., Papadopoulos, J. M., Ruina, A., & Schwab, A. L. (2007). Linearized dynamics of an uncontrolled bicycle. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 463(2084), 1955–1982. Prieiga per internetą: <http://bicycle.tudelft.nl/schwab/Publications/meijaard2007linearized.pdf>
7. Schwab, A. L., & Meijaard, J. P. (2013). A review on bicycle dynamics and rider control. *Vehicle System Dynamics*, 51(12), 1721–1740. Prieiga per internetą: <http://bicycle.tudelft.nl/schwab/Publications/schwab2013review.pdf>
8. Ogata, K. *Modern control engineering (5th ed.)*. Prentice Hall, 2010. ISBN 978-9332550162.
9. Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. *Fundamentals of physics (10th ed.)*. John Wiley & Sons, 2013, ISBN 9781118230718.
10. *Angle Headset* [interaktyvus]. 2025 [žiūrėta 2026-02-03]. Prieiga per internetą: <https://www.wolfteethcomponents.com/pages/geoshift-angle-headset>
11. Botasys. *What is sensor calibration and why it matters* [interaktyvus]. 2024. [žiūrėta 2026-02-13]. Prieiga per internetą: <https://www.botasys.com/post/sensor-calibration>
12. Arduino. *SD library documentation and examples* [interaktyvus]. 2024. [žiūrėta 2026-02-13]. Prieiga per internetą: <https://docs.arduino.cc/libraries/sd/>
13. Texas Instruments. *Principles of Data Acquisition and Conversion (Rev. A)* [interaktyvus]. 2015. [žiūrėta 2026-02-14]. Prieiga per internetą: <https://www.ti.com/lit/an/sbaa051a/sbaa051a.pdf>
14. IEEE. *Sensor calibration and performance evaluation* [interaktyvus]. 2024. [žiūrėta 2026-02-14]. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=10713263>
15. Fabian. *Technical document (PDF)* [interaktyvus]. 2018. [žiūrėta 2026-02-14]. Prieiga per internetą: <https://www.fabian.com.mt/viewer/40286/pdf.pdf>
16. *Arduino Nano hardware documentation* [interaktyvus]. [žiūrėta 2026-02-26]. Prieiga per internetą: <https://docs.arduino.cc/hardware/nano/>
17. *NanoBoard User Manual (PDF)* [interaktyvus]. [žiūrėta 2026-02-26]. Prieiga per internetą: <https://m.media-amazon.com/images/I/B1dPmopz9jL.pdf>
18. *Interfacing MPU-9250 9-DOF Sensor with Arduino* [interaktyvus]. 2026 [žiūrėta 2026-02-26]. Prieiga per internetą: <https://www.flyrobo.in/blog/mpu9250-arduino>
19. *AS5600 magnetic rotary position sensor* [interaktyvus]. 2026 [žiūrėta 2026-02-26]. Prieiga per internetą: <https://ams-osram.com/products/sensor-solutions/position-sensors/ams-as5600-position-sensor>
20. *SSZT164 – Technical article* [interaktyvus]. 2023 [žiūrėta 2026-02-26]. Prieiga per internetą: <https://www.ti.com/document-viewer/lit/html/SSZT164>

21. *Arduino Hall Effect Sensor KY-003 — Wiring & Code* [interaktyvus]. 2026 [žiūrėta 2026-02-27]. Prieiga per internetą: <https://arduinomodules.info/ky-003-hall-magnetic-sensor-module/>
22. *How to Use the AS5600 Magnetic Rotary Encoder with Arduino* [interaktyvus]. 2026 [žiūrėta 2026-02-27]. Prieiga per internetą: <https://38-3d.co.uk/blogs/blog/how-to-use-the-as5600-magnetic-rotary-encoder-with-arduino>
23. *Vibration modes of motorcycles* [interaktyvus] 2013. [žiūrėta 2026-03-02]. Prieiga per internetą: https://www.dynamotion.it/dinamoto/8_on-line_papers/wobble-weave/wobble-weave_eng.html
24. Pacejka, H. B. *Tire and Vehicle Dynamics*. Elsevier Science & Technology, 2006. ISBN 9780750669184.
25. Foale, T. *Motorcycle Handling and Chassis Design: The Art and Science*. Tony Foale, 2006. ISBN 9788493328634.
26. Reza N. Jazar. *Vehicle Dynamics Theory and Application*. Springer New York, 2013. ISBN 9781461485445.
27. Singiresu S. Rao. *Mechanical Vibrations*. Pearson Education, Incorporated, 2017. ISBN 9780134361307.
28. Steven W. Smith. *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. California Technical Pub., 1997. ISBN 9780966017632.
29. *MATLAB and Signal Processing Toolbox*. 2023. [žiūrėta 2026-03-21] Prieiga per: <https://se.mathworks.com/products/signal.html>
30. *Arduino Libraries*. 2026. [žiūrėta 2026-03-14] Prieiga per internetą: <https://www.arduinolibraries.info/authors/arduino-libraries>
31. Rob Tillaart *AS5600 arduino library*. 2026. [žiūrėta 2026-03-21] Prieiga per internetą: <https://github.com/RobTillaart/AS5600>
32. Sparkfun *MPU-9250 library*. 2018 [žiūrėta 2026-03-21] Prieiga per internetą: https://github.com/sparkfun/MPU-9250_Breakout
33. *Arduino Wire Library*. 2026. [žiūrėta 2026-03-22] Prieiga per internetą: <https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/communication/wire/>
34. INTERNATIONAL STANDARD. ISO 15037-1:2019. Road vehicles – Vehicle dynamics test methods – Part 1: General conditions for passenger. Šveicarija: ISO, 2019
35. INTERNATIONAL STANDARD. ISO 11838:1997/Amd 1:2011. Motorcycle and motorcycle – rider kinematics – Vocabulary. Šveicarija: ISO, 2011
36. Montgomery, D. C. *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons, Incorporated, 2017. ISBN 9781119113478.
37. Taylor, J. R. *An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements*. MIT Press, 1997. ISBN 9780935702422.
38. INTERNATIONAL STANDARD. Motorcycles – measurement of maximum speed. ISO 7117:1995. Šveicarija: ISO, 1995
39. W. Bolton. *Instrumentation and Control Systems*. Newnes 2004. ISBN 9780080470399.
40. Kooijman, J. & Meijaard, J.P. & Papadopoulos, Jim & Ruina, Andy & Schwab, Arend. (2011). A Bicycle Can Be Self-Stable Without Gyroscopic or Caster Effects. *Science*. New York. 2011. 332. 339-42. [žiūrėta 2026-03-21]. Prieiga per: [10.1126/science.1201959](https://doi.org/10.1126/science.1201959).

Priedai

1 priedas. Matematinio modelio *Matlab* kodas

```
clear variables; close all; clc;

config='inertiska'; % pasirenkama skaičiuojama konfigūracija
g=9.81;

fprintf('kraunami konfigūracijos duomenys: %s\n',config);

switch config
  case 'bazinis'
    %geometriniai parametrai
    w=0.96;%[m] ratu baze
    c=0.061145;%[m] geometrinis takas
    lambda_deg=69;%[deg] kampas tarp žemes ir priekines sakes

    %galinio rato duomenys (R)
    SW_rR=0.159;%[m] rato spindulys
    SW_mR=1.4;%[kg] mase
    SW_Ixx_R=0.008934579;%[kg*m^2] x ašies inercija iš SW
    SW_Izz_R=0.017409819;%[kg*m^2] z ašies inercija iš SW

    %remo su vairuotoju duomenys (B)
    SW_mB=77.558;%[kg] mase
    SW_xB=0.426;%[m] mases centras X
    SW_yB=0.750;%[m] mases centras Y
    SW_Ixx_B=10.41078318;%[kg*m^2] x ašies inercija iš SW
    SW_Iyy_B=3.010706332;%[kg*m^2] y ašies inercija iš SW
    SW_Izz_B=12.11049662;%[kg*m^2] z ašies inercija iš SW
    SW_Ixy_B=-2.827057607;%[kg*m^2] xy inercija iš SW

    %priekines sakes duomenys (H)
    SW_mH=1.584;%[kg] mase
    SW_xH=0.831;%[m] mases centras x
    SW_yH=0.487;%[m] mases centras y
    SW_Ixx_H=0.06610695;%[kg*m^2] x ašies inercija iš SW
    SW_Iyy_H=0.015356839;%[kg*m^2] y ašies inercija iš SW
    SW_Izz_H=0.068415074;%[kg*m^2] z ašies inercija iš SW
    SW_Ixy_H=-0.022847815;%[kg*m^2] xy inercija iš SW

    %priekinio rato duomenys (F)
    SW_rF=0.159;%[m] rato spindulys
    SW_mF=1.2;%[kg] mase
    SW_Ixx_F=0.007710656;%[kg*m^2] x ašies inercija iš SW
    SW_Izz_F=0.007710656;%[kg*m^2] y ašies inercija iš SW

  case 'inertiska'
    w=0.96;
    c=0.093287;
    lambda_deg=69;

    SW_rR=0.159;
    SW_mR=1.4;
    SW_Ixx_R=0.008934579;
    SW_Izz_R=0.017409819;

    SW_mB=77.558;
    SW_xB=0.499;
    SW_yB=0.749;
    SW_Ixx_B=10.41426227;
    SW_Iyy_B=3.011823609;
    SW_Izz_B=12.11509299;
    SW_Ixy_B=-2.654624395;
```

```

SW_mH=1.584;
SW_xH=0.909;
SW_yH=0.487;
SW_Ixx_H=0.06610695;
SW_Iyy_H=0.015356839;
SW_Izz_H=0.068415074;
SW_Ixy_H=-0.022847815;

SW_rF=0.159;
SW_mF=1.2;
SW_Ixx_F=0.007710656;
SW_Izz_F=0.007710656;

case 'vikrus'
w=0.96;
c=0.029003;
lambda_deg=69;

SW_rR=0.159;
SW_mR=1.4;
SW_Ixx_R=0.008934579;
SW_Izz_R=0.017409819;

SW_mB=77.558;
SW_xB=0.345;
SW_yB=0.749;
SW_Ixx_B=10.41154545;
SW_Iyy_B=3.056934833;
SW_Izz_B=12.15748739;
SW_Ixy_B=-2.994453838;

SW_mH=1.584;
SW_xH=0.749;
SW_yH=0.487;
SW_Ixx_H=0.06610695;
SW_Iyy_H=0.015356839;
SW_Izz_H=0.068415074;
SW_Ixy_H=-0.022847815;

SW_rF=0.159;
SW_mF=1.2;
SW_Ixx_F=0.007710656;
SW_Izz_F=0.007710656;

otherwise
error('netinkamas konfigūracijos pavadinimas, pakeisti.');
```

end

```

% Meijaard koordinatių sistema: X= i priekį, Y= i dešinę, Z= i apačią
% Solidwork koordinatių sistema: x= i priekį, y= i viršų, z= i dešinę

% priekines sakes kampas matuojamas su vertikalia linija ir priekine sake
lambda =(90-lambda_deg)*pi/180;

% galinis ratas
rR=SW_rR;
mR=SW_mR;
IRxx=SW_Ixx_R;
IRyy=SW_Izz_R; % SW Z ašis tampa Meijaard Y ašis

% rėmas su vairuotoju
mB=SW_mB;
xB=SW_xB;
zB=-SW_yB;% apverčiamas aukštis
IBxx=SW_Ixx_B;
IByy=SW_Izz_B;% SW Z tampa Meijaard Y
IBzz=SW_Iyy_B;% SW Y tampa Meijaard Z
```

```

IBxz=-SW_Ixy_B; % SW XY tampa -XZ dėl apverstos vertikalios ašies

%priekine sake
mH=SW_mH;
xH=SW_xH;
zH=-SW_yH;% apverčiamas aukštis
IHxx=SW_Ixx_H;
IHyy=SW_Izz_H;% SW Z tampa Meijaard Y
IHzz=SW_Iyy_H;% SW Y tampa Meijaard Z
IHxz=-SW_Ixy_H;% SW XY tampa -XZ

%priekinis ratas
rF=SW_rF;
mF=SW_mF;
IFxx=SW_Ixx_F;
IFyy=SW_Izz_F;% SW Z tampa Meijaard Y

%tarpiniai skaičiavimai (A dalis)
mT=mR+mB+mH+mF;
xT=(xB*mB+xH*mH+w*mF)/mT;
zT=(-rR*mR+zB*mB+zH*mH-rF*mF)/mT;

mA=mH+mF;
xA=(xH*mH+w*mF)/mA;
zA=(zH*mH-rF*mF)/mA;

uA=(xA-w-c)*cos(lambda)-zA*sin(lambda);

Txx=IRxx+IBxx+IHxx+IFxx+mR*rR^2+mB*zB^2+mH*zH^2+mF*rF^2;
Txz=IBxz+IHxz-mB*xB*zB-mH*xH*zH+mF*w*rF;
Tzz=IRzz+IBzz+IHzz+IFzz+mB*xB^2+mH*xH^2+mF*w^2;

Axx=IHxx+IFxx+mH*(zH-zA)^2+mF*(rF+zA)^2;
Axz=IHxz-mH*(xH-xA)*(zH-zA)+mF*(w-xA)*(rF+zA);
Azz=IHzz+IFzz+mH*(xH-xA)^2+mF*(w-xA)^2;

Sr=IRyy/rR;
Sf=IFyy/rF;
ST=Sr+Sf;
Su=mA*uA+mF*c;

% Matricų surinkimas
% mases matrica (M)
M11=Txx;
M12=Txz*cos(lambda)+Tzz*sin(lambda)+mA*xA*uA+c*mF*w;
M21=M12;
M22=Axx*sin(lambda)^2+2*Axz*sin(lambda)*cos(lambda)+Azz*cos(lambda)^2+mA*uA^2+mF*c^2;
M=[M11, M12; M21, M22];

% gravitacijos ir geometrinio standumo matrica (K0)
K0_11=mT*zT;
K0_12=-Su;
K0_21=K0_12;
K0_22=-Su*sin(lambda);
K0=[K0_11, K0_12; K0_21, K0_22];

% greičio, pakelto kvadratu, standumo matrica (K2)
K2_11=0;
K2_12=((ST-mT*zT/w)*cos(lambda)-Su/w);
K2_21=0;
K2_22=((Su+Sf*sin(lambda))*cos(lambda)/w);
K2=[K2_11, K2_12; K2_21, K2_22];

% greičio proporcingo slopinimo ir giroskopine matrica (C1)
C1_11=0;

```

```

C1_12=(c/w)*ST+Sf*cos(lambda)+(Txz*cos(lambda)-Tzz*sin(lambda))/w-(mA*xA*uA+c*mF*w)/w;
C1_21=-(c/w)*ST-Sf*cos(lambda);
C1_22=Sf*sin(lambda)+(c/w)*Sf*cos(lambda)+(Axz*cos(lambda)-Azz*sin(lambda))/w;
C1=[C1_11, C1_12; C1_21, C1_22];

%tikriniu reikšmių skaičiavimas
v_range=0:0.01:6;%greičio intervalas nuo 0 iki 6 m/s su 0,01 m/s žingsniu
num_speeds=length(v_range);
eigenvalues=zeros(num_speeds, 4);

for i=1:num_speeds
    v=v_range(i);

    C=v*C1;
    K=g*K0+v^2*K2;

    % būsenos erdves matrica
    A=[zeros(2,2) eye(2,2);
        -M\K,      -M\C];

    roots=eig(A);
    eigenvalues(i,:)=roots.';
end

%grafikai
fig=figure('Color','w');
t=tiledlayout(2,1,'Padding','compact','TileSpacing','compact');

colors={'#0072BD','#D95319','#EDB120','#7E2F8E'};
lineStyles={'-','--',':','-.'};

%Reali dalis (Stabilumas)
ax1=nexttile;
hold on; grid on; box on;

for j=1:4
    plot(v_range,real(eigenvalues(:,j)),'LineWidth',2,'Color', colors{j}, 'LineStyle',
lineStyles{j},'DisplayName', ['Būsena ' num2str(j)]);
end

yline(0,'k','LineWidth',1.2,'HandleVisibility','off');
xlabel('Greitis, v [m/s]');
ylabel('Reali dalis \sigma [1/s]');
title(['Tikrinės reikšmės - ', config]);

ylim([-4 4]);
legend('Location','best');

%Įsivaizduojama dalis (Dažnis)
ax2=nexttile;
hold on; grid on; box on;

for j=1:4
    plot(v_range,abs(imag(eigenvalues(:,j))),'LineWidth',2,'Color', colors{j}, 'LineStyle',
lineStyles{j},'DisplayName', ['Būsena ' num2str(j)]);
end

xlabel('Greitis, v [m/s]');
ylabel('Dažnis \omega [rad/s]');
title('Svyravimų dažnių charakteristikos');

ylim([0 10]);
legend('Location','best');

```

2 priedas. Triukšmo analizės *Matlab* kodas

```
%Triukšmo tyrimas: statinis ir variklio
clear; clc; close all;

static_data = readtable('statinio triuksmo testas.CSV');
motor_data = readtable('variklio triuksmo testas 1.CSV');

fs=50;
gyro_scale=65.5;

static_gyro=deg2rad((static_data.gyroX / gyro_scale));

mask=motor_data.wheel_kmh >= 14 & motor_data.wheel_kmh <= 16;
motor_gyro_15=deg2rad((motor_data.gyroX(mask) / gyro_scale))

get_mag=@(sig) abs(fft(sig))/length(sig);
mag_static=get_mag(static_gyro);
mag_motor=get_mag(motor_gyro_15);

f_static=(0:length(mag_static)-1)*fs/length(mag_static);
f_motor=(0:length(mag_motor)-1)*fs/length(mag_motor);

figure('Color','w');
subplot(2,1,1);
plot(static_gyro,'LineWidth', 1); hold on;
plot(motor_gyro_15,'LineWidth', 1);
title('Signalų reikšmės laiko srityje');
ylabel('Pasvirimo greitis [rad/s]');
xlabel('Matavimų skaičius [n]');
legend('Statinis triukšmas','Variklio triukšmas (15 km/h)');
grid on;

subplot(2,1,2);
plot(f_static,mag_static); hold on;
plot(f_motor,mag_motor);
xline(6,'--r','Filtro riba (6Hz)','LineWidth',1.5);
title('Dažnių spektras (FFT)');
xlabel('Dažnis [Hz]');
ylabel('Amplitudė [rad/s]');
xlim([0 25]);
legend('Statinis dažnių spektras','Variklio dažnių spektras (15 km/h)','Filtro riba (6 Hz)');
grid on;
```

3 priedas. Pastovaus posūkio spindulio tyrimo rezultatų analizės *Matlab* kodas

```
clear; clc; close all;

failai={'pastovaus posukio testas bazinis.CSV', ...
        'pastovaus posukio testas inertiskas.CSV', ...
        'pastovaus posukio testas vikrus.CSV'};
legendos={'Bazinis', 'Inertiškas', 'Vikrus'};
spalvos={'b', 'g', 'r'};

fs=50;
acc_scale=16384;
g=9.81;
deg2rad=pi/180;

figure('Color', 'w', 'Name', 'Vairavimo charakteristikos (rad)');
hold on;

for i=1:length(failai)
    data=readtable(failai{i});

    [b,a]=butter(2,6/(fs/2), 'low');
    clean_steer=filtfilt(b,a,data.angle_deg);
    clean_accY=filtfilt(b,a,data.accY);
    straight_mask=data.wheel_kmh >= 1 & data.wheel_kmh <= 4;

    if any(straight_mask)
        steer_offset=mean(clean_steer(straight_mask));
        accY_offset=mean(clean_accY(straight_mask));
    else
        steer_offset=mean(clean_steer(1:50));
        accY_offset=mean(clean_accY(1:50));
    end

    rel_steer_deg=clean_steer-steer_offset;
    rel_steer_rad=rel_steer_deg*deg2rad;
    ay_ms2=((clean_accY-accY_offset)/acc_scale)*g;
    mask=data.wheel_kmh>3 & data.wheel_kmh<12;
    scatter(ay_ms2(mask),rel_steer_rad(mask),10,spalvos{i}, 'filled', 'MarkerFaceAlpha',0.3);
    p=polyfit(ay_ms2(mask),rel_steer_rad(mask),1);
    plot_x=linspace(min(ay_ms2(mask)),max(ay_ms2(mask)),100);
    plot_y=polyval(p,plot_x);
    plot(plot_x,plot_y,spalvos{i}, 'LineWidth',2);
    fprintf('%s konfigūracijos vairavimo nuolydis K: %.4f rad/(m/s^2)\n',legendos{i},p(1));
end

xlabel('Šoninis pagreitis a_y [m/s^2]');
ylabel('Vairo pasukimo kampas [rad]');
title('Vairo kampo priklausomybė nuo šoninio pagreičio');
x1 = xline(4,'--k','Realių duomenų
riba','LabelVerticalAlignment','bottom','LabelHorizontalAlignment','right');
x2 = xline(-4,'--k','Realių duomenų
riba','LabelVerticalAlignment','bottom','LabelHorizontalAlignment','left');
legend('Matavimai (B)','Tendencija (B)','Matavimai (I)','Tendencija (I)','Matavimai (V)','Tendencija
(V)','Realių duomenų riba','Location','best');
grid on;
ylim([-2 2]);
xlim([-12 12]);
```

4 priedas. Staigaus išvengimo manevro tyrimo rezultatų analizės *Matlab* kodas

```
clear; clc; close all;

fs=50;
fc=6;
acc_scale=4096;
gyro_scale=65.5;

filename='nudge test bazinis (1)';
data=readtable(filename);

time=data.time_ms/1000;
wheel_speed=data.wheel_kmh;

steer_offset=mean(data.angle_deg(1:0.5*fs));
steer_deg=data.angle_deg - steer_offset;

accY_g=data.accY/acc_scale;
gyroX_rad=deg2rad((data.gyroX/gyro_scale));

[b,a]=butter(2,fc/(fs/2));
clean_steer=filtfilt(b,a,steer_deg);
clean_roll=filtfilt(b,a,gyroX_rad);

[peaks,locs]=findpeaks(abs(clean_steer),'MinPeakHeight',10,'MinPeakDistance',2*fs);

figure('Color','w');

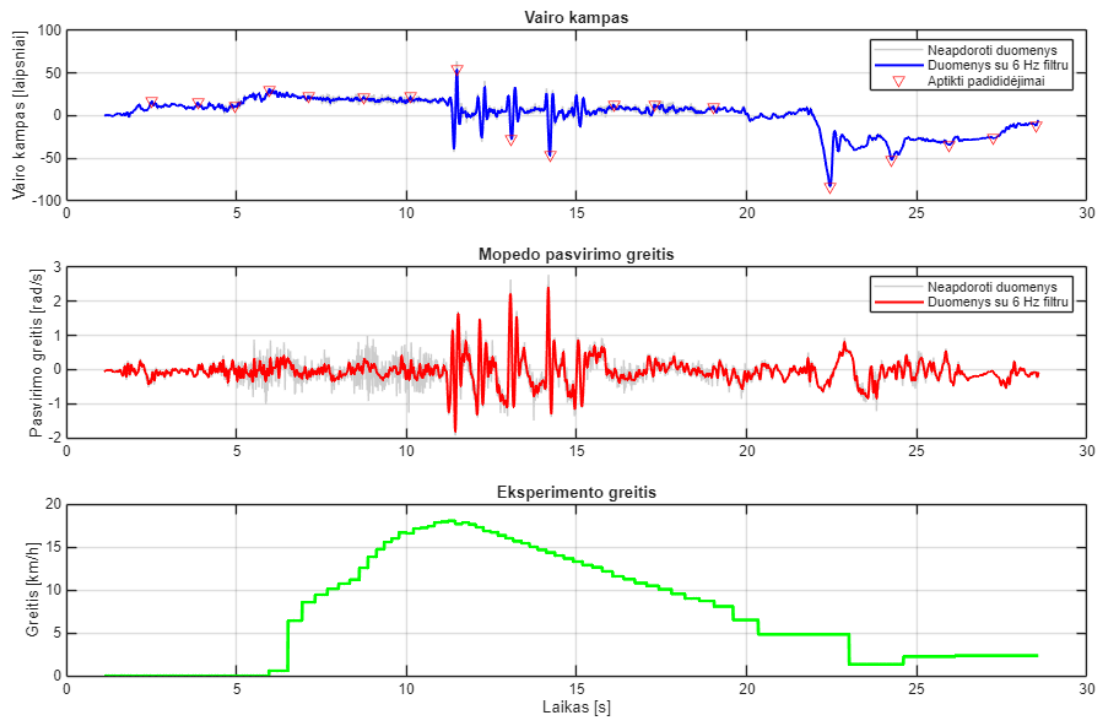
subplot(3,1,1);
plot(time,steer_deg,'Color',[0.8 0.8 0.8]);hold on;
plot(time,clean_steer,'b','LineWidth',1.5);
plot(time(locs),clean_steer(locs),'rv');
title('Vairo kampas');
ylabel('Vairo kampas [laipsniai]');
grid on;
legend('Neapdoroti duomenys','Duomenys su 6 Hz filtru','Aptikti padididėjimai');

subplot(3,1,2);
plot(time,gyroX_rad,'Color',[0.8 0.8 0.8]);hold on;
plot(time,clean_roll,'r','LineWidth',1.5);
title('Mopedo pasvirimo greitis');
ylabel('Pasvirimo greitis [rad/s]');
grid on;
legend('Neapdoroti duomenys','Duomenys su 6 Hz filtru');

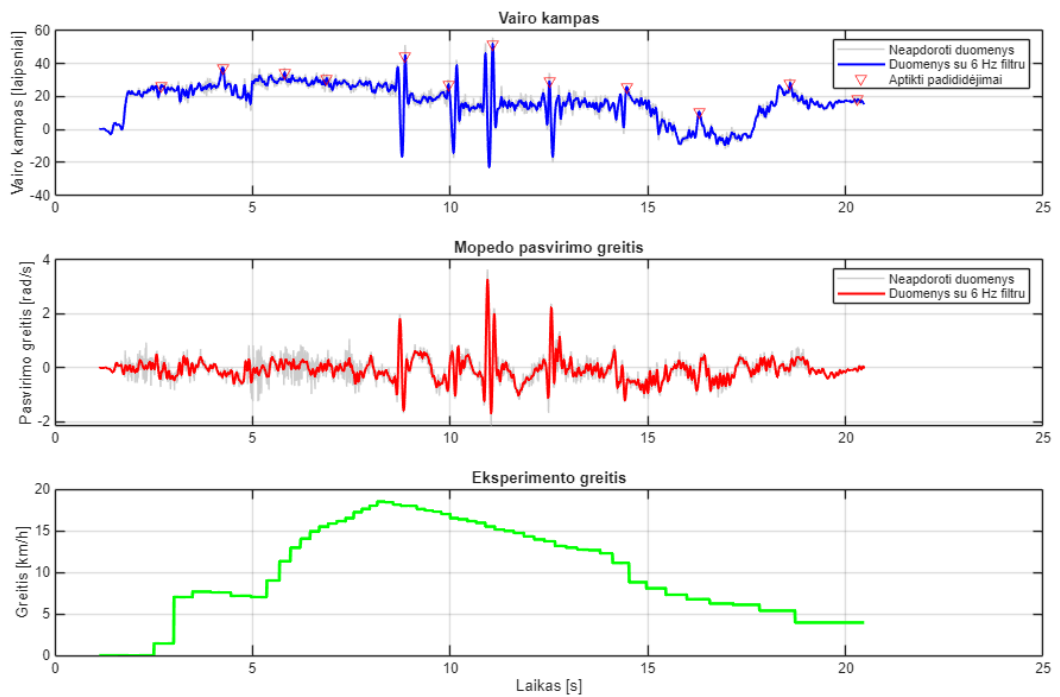
subplot(3,1,3);
plot(time, wheel_speed,'g','LineWidth', 2);
title('Eksperimento greitis');
ylabel('Greitis [km/h]');
xlabel('Laikas [s]');
grid on;
```

5 priedas. Staigaus išvengimo manevro tyrimo papildomų bandymų grafikai

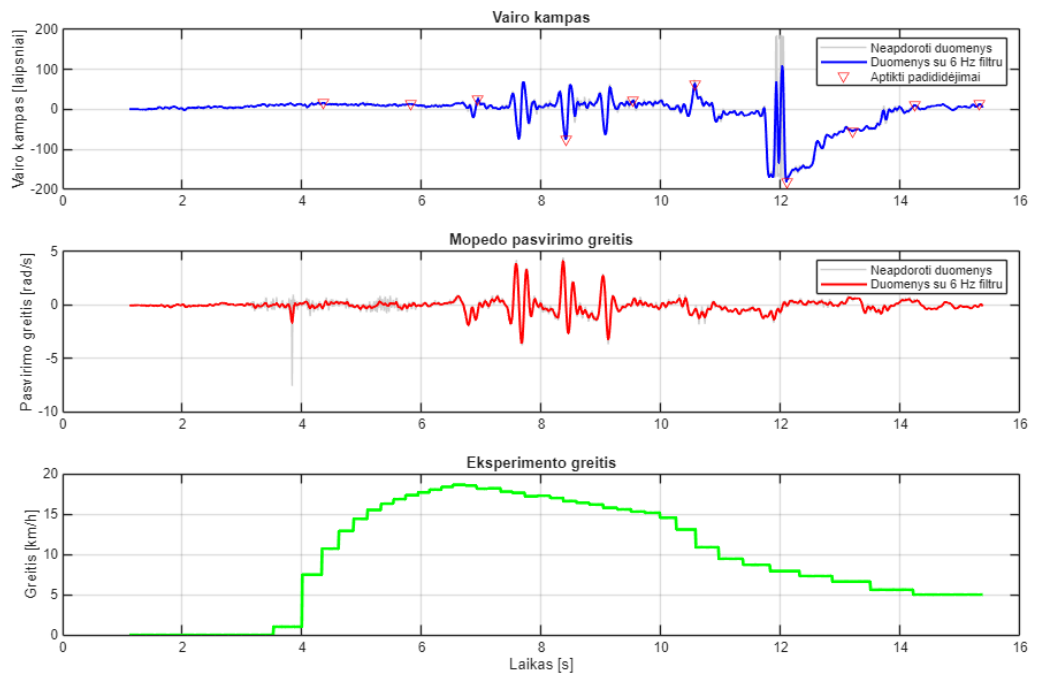
Bazinės konfigūracijos 2 bandymas:



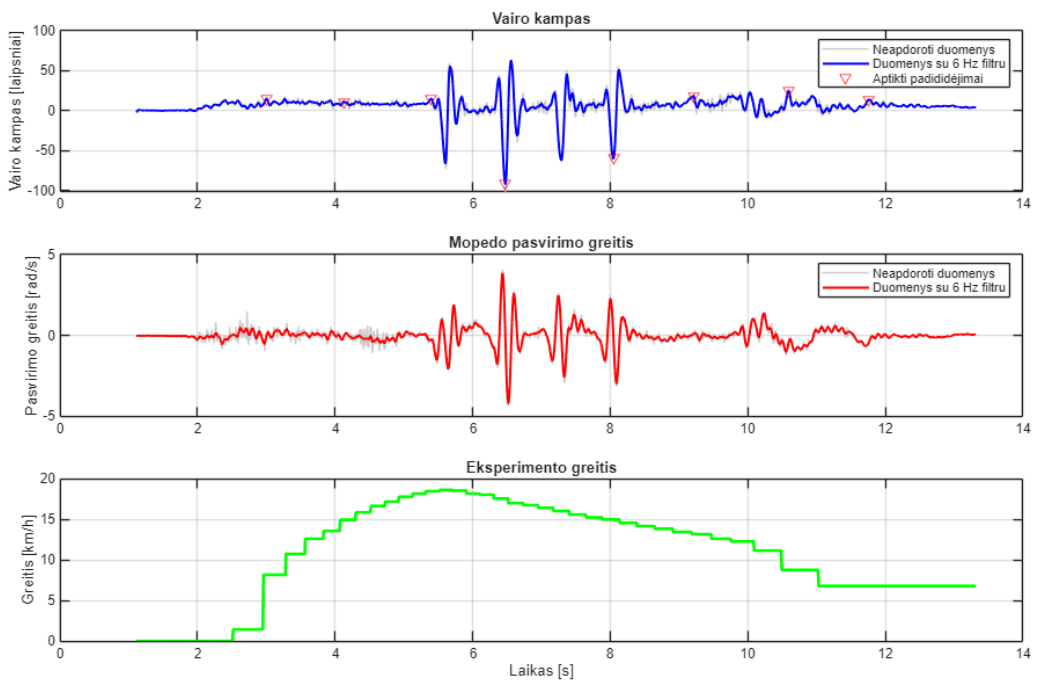
Bazinės konfigūracijos 3 bandymas:



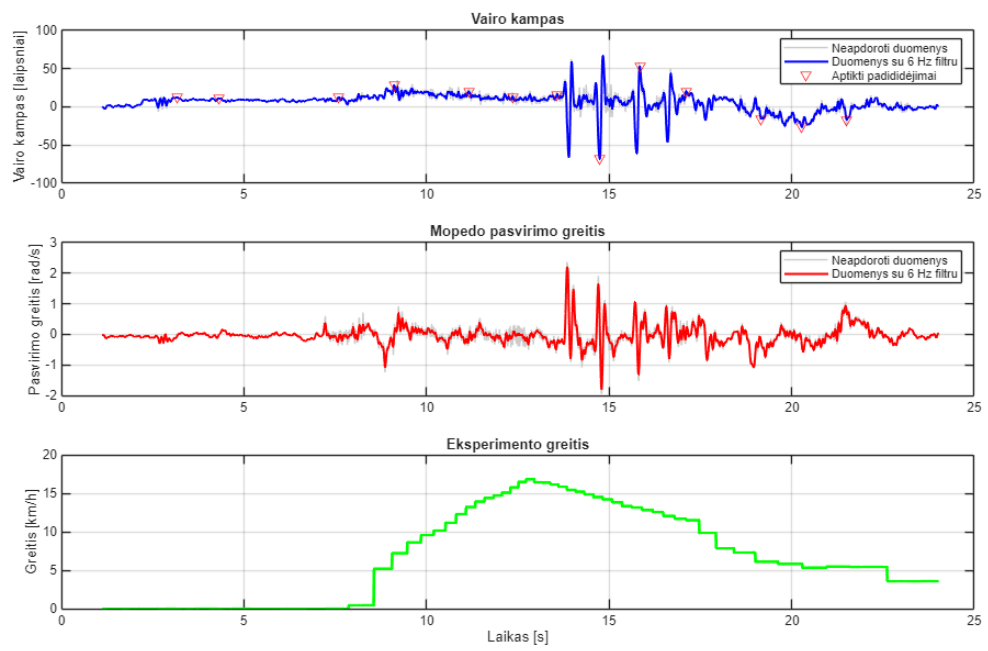
Inertiškos konfigurācijas 2 bandymas:



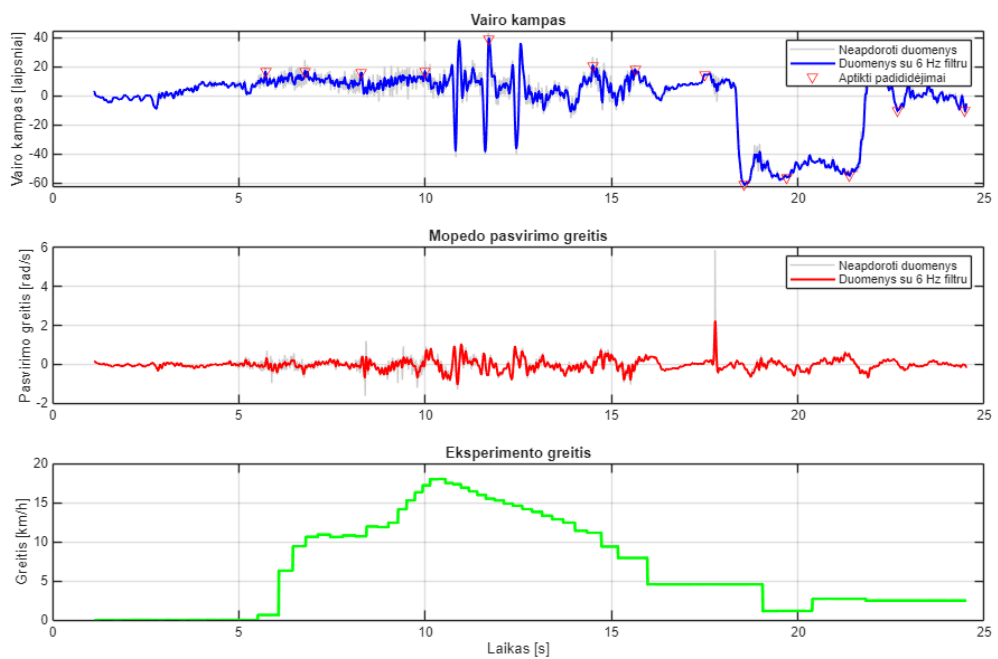
Inertiškos konfigurācijas 3 bandymas:



Vikrios konfigurācijas 2 bandymas:



Vikrios konfigurācijas 3 bandymas:



6 priedas. Virtimo ribos lėtėjant tyrimo *Matlab* kodas

```
clear; clc; close all;

fs=50;
fc=3;
acc_scale=4096;
gyro_scale=65.5;
deg2rad=pi/180;

filename='capsize testas bazinis (2).CSV';
data=readtable(filename);

time=data.time_ms/1000;
wheel_speed=data.wheel_kmh;

gyroX_rad_raw=(data.gyroX/gyro_scale)*deg2rad;

[b,a]=butter(2,fc/(fs/2));
clean_roll_rate=filtfilt(b,a,gyroX_rad_raw);

drift_offset=mean(clean_roll_rate(1:fs));
corrected_roll_rate=clean_roll_rate-drift_offset;

raw_roll_angle_deg=cumtrapz(time,gyroX_rad_raw)/deg2rad;

roll_angle_rad=cumtrapz(time, corrected_roll_rate);
roll_angle_deg=roll_angle_rad/deg2rad;
roll_angle_deg=detrend(roll_angle_deg);

figure('Color','w');

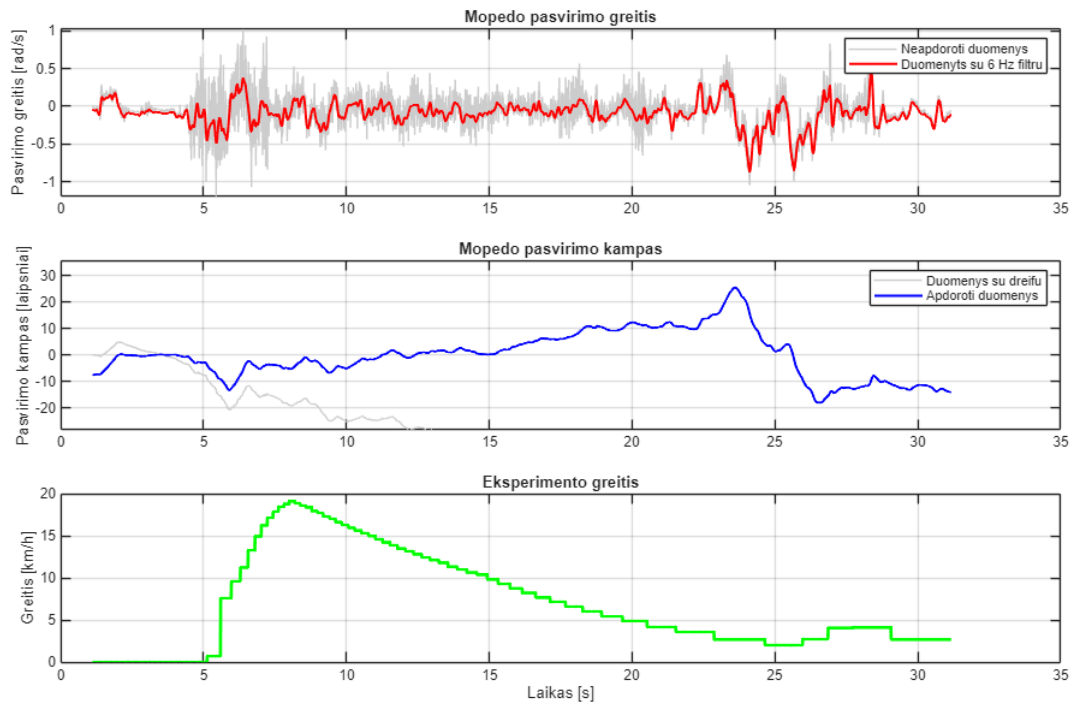
subplot(3,1,1);
plot(time,gyroX_rad_raw,'Color',[0.8 0.8 0.8]);hold on;
plot(time,corrected_roll_rate,'r','LineWidth',1.5);
title('Mopedo pasvirimo greitis');
ylabel('Pasvirimo greitis [rad/s]');
legend('Neapdoroti duomenys','Duomenys su 6 Hz filtru');
grid on;

subplot(3,1,2);
plot(time,raw_roll_angle_deg,'Color',[0.8 0.8 0.8]);hold on;
plot(time,roll_angle_deg,'b','LineWidth',1.5);
title('Mopedo pasvirimo kampas');
ylabel('Pasvirimo kampas [laipsniai]');
ylim([min(roll_angle_deg)-10,max(roll_angle_deg)+10]);
legend('Duomenys su dreifu','Apdoroti duomenys ');
grid on;

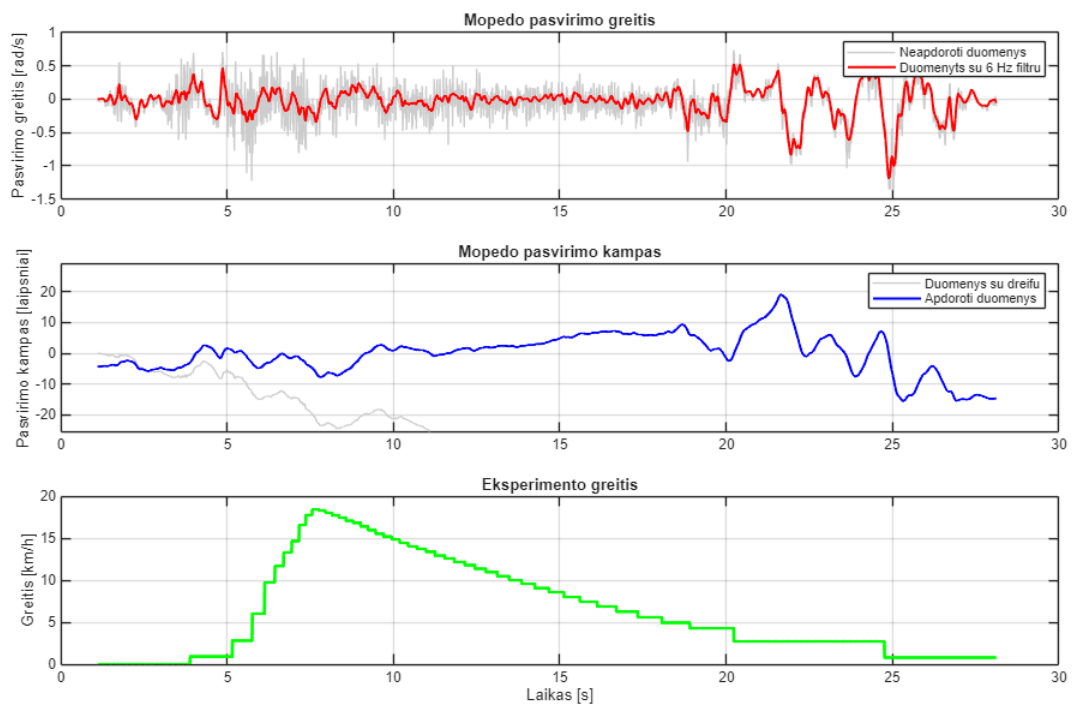
subplot(3,1,3);
plot(time,wheel_speed,'g','LineWidth',2);
title('Eksperimento greitis');
ylabel('Greitis [km/h]');
xlabel('Laikas [s]');
grid on;
```

7 priedas. Virtimo ribos lėtėjant tyrimo papildomi tyrimai

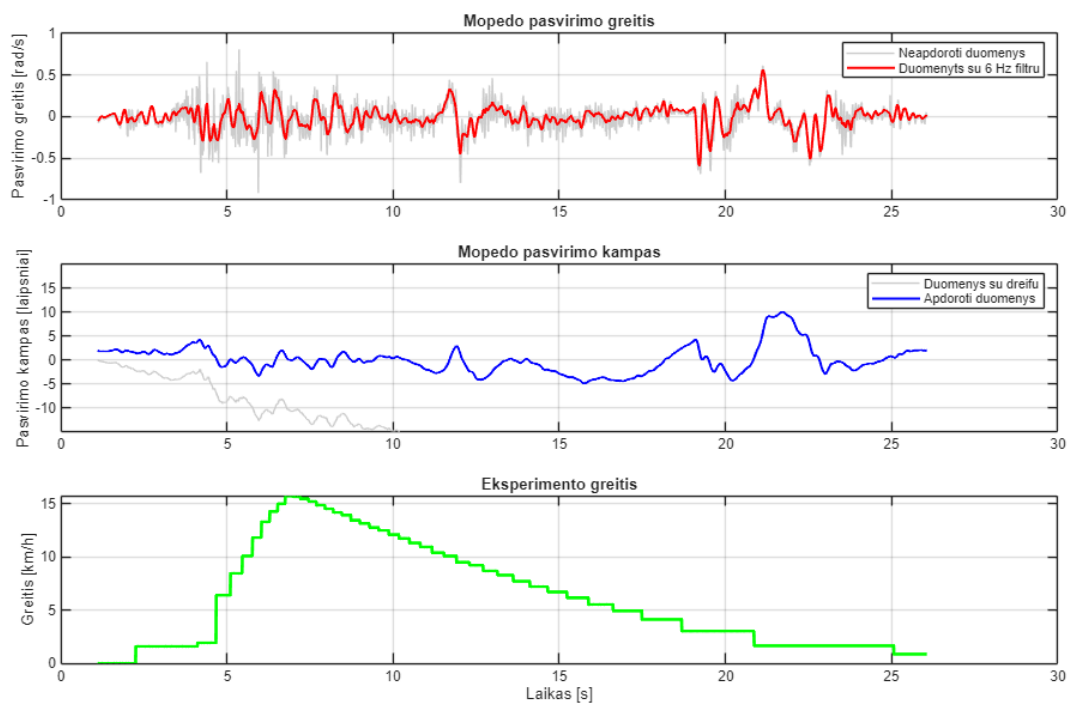
Bazinės konfigūracijos 2 bandymas:



Inertiškos konfigūracijos 2 bandymas:



Vikrios konfigūracijos 2 bandymas:



8 priedas. Jutiklių sistemos *Arduino IDE* kodas

```
#include <Wire.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <AS5600.h>
#include <MPU9250.h>
// ----- jutikliai -----
AS5600 as5600;
MPU9250 imu;
// buferis
int16_t accelCount[3];
int16_t gyroCount[3];
// ----- magnetinis impulsu jutiklis -----
const int hallPin = 2;
volatile unsigned long lastPulse = 0;
volatile unsigned long pulseInterval = 0;
volatile bool newPulse = false;

float wheelSpeed = 0;
const float wheelCirc = 2 * 3.14159 * 0.159; // m
// ----- MicroSD -----
const int chipSelect = 10;
File logFile;

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  Serial.println(F("Booting..."));

  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
  digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);

  pinMode(10, OUTPUT); digitalWrite(10, HIGH);
  pinMode(11, OUTPUT); digitalWrite(11, HIGH);
  pinMode(12, OUTPUT); digitalWrite(12, HIGH);
  pinMode(13, OUTPUT); digitalWrite(13, HIGH);

  Wire.begin();
  Wire.setClock(400000);

  Serial.println(F("SD init..."));
  if (!SD.begin(chipSelect)) {
    Serial.println(F("SD FAILED"));
    while (1);
  }

  // ----- failu skaiciuokle -----
  int fileIndex = 0;

  if (SD.exists("count.txt")) {
    File countRead = SD.open("count.txt", FILE_READ);
    if (countRead) {
      fileIndex = countRead.parseInt();
      countRead.close();
    }
  }

  fileIndex++;

  SD.remove("count.txt");
  File countWrite = SD.open("count.txt", FILE_WRITE);
  if (countWrite) {
    countWrite.print(fileIndex);
    countWrite.close();
  }

  char filename[13];
```

```

sprintf(filename, "log%03d.csv", fileIndex);

logFile = SD.open(filename, FILE_WRITE);
if (!logFile) {
  Serial.println(F("Open FAILED"));
  while (1);
}

Serial.print(F("Logging to: "));
Serial.println(filename);

// pradinis stulpelis
logFile.println(F("time_ms,angle_deg,accX,accY,accZ,gyroX,gyroY,gyroZ,wheel_kmh"));
logFile.flush();

// ----- jutikliu ijungimas -----
if (!as5600.begin()) {
  Serial.println(F("AS5600 FAIL"));
}
as5600.setOutputMode(AS5600_MODE_DEGREES);

if (imu.begin() != 0) {
  Serial.println(F("IMU FAIL"));
}

// ----- hall ijungimas -----
pinMode(hallPin, INPUT_PULLUP);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(hallPin), hallISR, FALLING);

digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
Serial.println(F("Ready!"));
}

void loop() {
  static unsigned long lastLoop = 0;
  if (millis() - lastLoop >= 10) {
    unsigned long t = millis();
    lastLoop = t;

    // skaitoma AS5600
    int raw = as5600.rawAngle();
    float angle = raw * 0.087890625;

    // skaitomas akselerometras
    imu.readAccelData(accelCount);
    imu.readGyroData(gyroCount);

    // greicio apskaiciavimas
    if (newPulse) {
      noInterrupts();
      unsigned long interval = pulseInterval;
      newPulse = false;
      interrupts();

      if (interval > 0) {
        float freq = 1e6 / interval;
        wheelSpeed = (freq * wheelCirc) * 3.6;
      }
    }
  }

  // irasoma i SD kortele
  logFile.print(t);
  logFile.print(F(", "));
  logFile.print(angle);
  logFile.print(F(", "));
  logFile.print(accelCount[0]);
  logFile.print(F(", "));
}

```

```

    logFile.print(accelCount[1]);
    logFile.print(F(", "));
    logFile.print(accelCount[2]);
    logFile.print(F(", "));
    logFile.print(gyroCount[0]);
    logFile.print(F(", "));
    logFile.print(gyroCount[1]);
    logFile.print(F(", "));
    logFile.print(gyroCount[2]);
    logFile.print(F(", "));
    logFile.println(wheelSpeed);
}

static unsigned long lastFlush = 0;
if (millis() - lastFlush > 500) {
    logFile.flush();
    lastFlush = millis();
}
}

void hallISR() {
    unsigned long now = micros();
    if (now - lastPulse > 2000) {
        pulseInterval = now - lastPulse;
        lastPulse = now;
        newPulse = true;
    }
}
}

```