



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
TRANSPORTO INŽINERIJOS FAKULTETAS
MOBILIŲJŲ MAŠINŲ IR GELEŽINKELIŲ TRANSPORTO KATEDRA

Aistis Mozūraitis

**ELEKTRINIO PASPIRTUKO DINAMINIŲ CHARAKTERISTIKŲ
ANALIZĖ ESANT SKIRTINGOMS DANGOMS IR KLIŪTIMS**

**ANALYSIS OF AN ELECTRICAL KICK-SCOOTER DYNAMIC
CHARACTERISTIC'S ON DIFERENT PAVEMENTS AND OBSTACLES**

Baigiamasis magistro darbas

Transporto inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX058

Transporto priemonių inžinerijos specializacija

Transporto inžinerijos studijų kryptis

Vilnius 2025

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
TRANSPORTO INŽINERIJOS FAKULTETAS
MOBILIŲJŲ MAŠINŲ IR GELEŽINKELIŲ TRANSPORTO KATEDRA

Aistis Mozūraitis

**ELEKTRINIO PASPIRTUKO DINAMINIŲ CHARAKTERISTIKŲ
ANALIZĖ ESANT SKIRTINGOMS DANGOMS IR KLIŪTIMS**

**ANALYSIS OF AN ELECTRICAL KICK-SCOOTER DYNAMIC
CHARACTERISTIC'S ON DIFERENT PAVEMENTS AND OBSTACLES**

Baigiamasis magistro darbas

Transporto inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX058

Transporto priemonių inžinerijos specializacija

Transporto inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

doc. dr. Mykola Karpenko

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

Lietuvių kalbos konsultantė

lekt. Angelika Petrėtienė

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

Vilnius, 2025

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
TRANSPORTO INŽINERIJOS FAKULTETAS
MOBILIŲJŲ MAŠINŲ IR GELEŽINKELIŲ TRANSPORTO KATEDRA

Studijų kryptis: Transporto inžinerija
Studijų programa: Transporto inžinerija , valstybinis kodas 6211EX058
Specializacija: Transporto priemonių inžinerija

TVIRTINU
Katedros vedėjas
Algimantas Danilevičius
2025-05-25

MAGISTRO BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS

Nr. TPİfm-23-11026

Vilnius

Studentas (-ė): Aistis Mozūraitis

Baigiamojo darbo tema: Elektrinio paspirtuko dinaminų charakteristikų analizė esant skirtingoms dangoms ir kliūtims

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas pagal numatytą studijų kalendorinį grafiką.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Baigiamojo darbo užduotis: Šiame darbe reikia tirti elektrinio paspirtuko dinamines charakteristikas esant skirtingoms kelio dangoms ir kliūtims. Magistro baigiamąjį darbą reikia sudaryti teorinis elektrinio paspirtuko ir jo sąveikos su kelio danga matematinis modelis bei realūs eksperimentiniai matavimai (atliekame realiose miesto gatvėse) siekiant validuoti matematinį modelį. Bus siekiama nustatyti rizikos veiksnius, būdingus elektrinio paspirtuko vairuotojui važiuojant per kelio ar šaligatvio kliūtis.

Vadovas docentas Mykola Karpenko

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Transporto inžinerijos fakultetas
Mobiliųjų mašinų ir geležinkelių transporto katedra

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

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

Pavadinimas	Elektrinio paspirtuko dinaminių charakteristikų analizė esant skirtingoms dangoms ir kliūtims
Autorius	Aistis Mozūraitis
Vadovas	Mykola Karpenko

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe yra nagrinėjamos elektrinio paspirtuko dinaminės charakteristikos, sudaromas matematinis važiavimo modelis ir atliekama komforto bei saugos analizė. Literatūros apžvalgoje aprašomi moksliniai straipsniai, kuriuose tiriamos elektrinių paspirtukų važiavimo charakteristikos, nustatomos eksperimentiškai ir matematiškai. Apžvelgiamas komforto ir saugos vertinimas, kelio dangos įtaka judėjimui ir kelio paviršiaus nelygumų nustatymo metodologija. Tiriamojame dalyje nustatoma tyrimo metodologija, aprašomas eksperimentinis tyrimas važiuojant elektriniu paspirtuku skirtingomis dangomis ir per kliūtis. Sudaromas matematinis važiavimo elektriniu paspirtuku modelis „Matlab Simulink“ programa. Atliekama tyrimų rezultatų analizė ir matematinio modelio validavimas. Remiantis rezultatais atliekamas važiavimo komforto vertinimas ir suformuluojamos saugaus važiavimo rekomendacijos.

Darbo apimtis - 52 p. teksto, be priedų, 6 pagrindiniai skyriai, 38 paveikslai, 4 lentelės, 28 literatūros šaltinių.

Prasminiai žodžiai: elektrinis paspirtukas, dinaminių charakteristikų analizė, eismo saugumas, važiavimo komfortas, elektrinio paspirtuko vairuotojo sauga, važiavimas per kliūtis, važiavimas skirtingomis dangomis.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Transport Engineering
Department of Mobile Machinery and Railway Transport

ISBN	ISSN
Copies No.	
Date-.....-.....	

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

Title	Analysis of an electrical kick-scooter dynamic characteristic's on the different pavements and obstacles
Author	Aistis Mozūraitis
Academic supervisor	Mykola Karpenko

Thesis language: Lithuanian

Annotation

The final master thesis investigates dynamic characteristics of an electric scooter, mathematical riding model is developed, and an analysis of comfort and safety is performed. The literature review describes scientific articles that examine the riding characteristics of electric scooters, determined both experimentally and mathematically. The assessment of comfort and safety, the influence of road surface on movement, and the methodology for determining road surface irregularities are reviewed. The research section establishes the methodology of the study, describes the experimental research conducted while riding an electric scooter on different surfaces and over obstacles. A mathematical model of electric scooter riding is developed using „MATLAB Simulink“ software. An analysis of the research results and validation of the mathematical model are performed. Based on the results, a riding comfort assessment is conducted, and recommendations for safe riding are formulated.

The master's thesis consists of: 52 pages of text without appendices, 38 figures, 4 tables, 28 references

Keywords: electric scooter, dynamic characteristics analysis, traffic safety, riding comfort, electric scooter rider safety, riding over obstacles, riding on different surfaces.

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	7
LENTELIŲ SĄRAŠAS	9
ĮVADAS	10
1. TYRIMO APŽVALGA IR PAGRINDIMAS	12
1.1 Kelio parametrų įtakos elektrinio paspirtuko judėjimui tyrimų metodų apžvalga	12
1.1.1 Tyrimas realiomis sąlygomis	12
1.1.2 Tyrimas matematinio modeliu	14
1.2 Paspirtukininko sauga ir komfortas	16
1.3 Kelio nelygumų nustatymas.....	18
2. TYRIMO METODOLOGIJA.....	20
3 MATEMATINIS MODELIAVIMAS	21
3.1 Matematinio modelio sudarymas	22
3.2 Matematinio modelio simuliacija ir rezultatai	26
4. EKSPERIMENTINIS TYRIMAS	30
4.1 Tyrimo sąlygos.....	31
4.2 Tyrimo rezultatai.....	34
5. Validavimas	39
6. Komforto vertinimas ir saugos rekomendacijos	46
IŠVADOS	48
LITERATŪROS ŠALTINIAI	50

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Paspirtuko jutiklių išdėstymas ant tiriamo paspirtuko. 1 – įtempių jutiklis vairo apkrovai matuoti; 2 – kamera kelio stebėjimui; 3 – potenciomeras vairo susukimui matuoti; 4 – vaizdo kamera fiksuojanti paspirtukininko padėtį; 5 – duomenų kaupiklis su GPS imtuvu; 6 – akceleratoriaus ir stabdžių svirties jutikliai (Garman et al., 2020)	13
2 pav. „IMeasureU Blue Trident“ akcelerometrų išdėstymas ant kūno. (Garman et al., 2020) ...	14
3 pav. Glaustas paspirtuko be važiuklės dinaminių parametrų modelis (Asperti et al., 2020)...	15
4 pav. Paspirtuko sukimosi momentas kontakto su kliūtimi metu (Arslan & Uyulan, 2021)	16
5 pav. Nelygumų matavimo metodas (Souza et al., 2006)	18
6 pav. Simetrinis kelio nelygumų tyrimo metodas(Kilic & Hilsmann, 2016).....	19
7 pav. Asimetrinis kelio nelygumų tyrimo metodas(Kilic & Hilsmann, 2016).....	20
8 pav. Tyrimo metodologija.....	21
9 pav. Paspirtuko dinaminė schema, naudojama matematiniam modeliui sudaryti	22
10 pav. „Matlab Simulink“ sudarytas paspirtuko dinaminių charakteristikų tyrimo modelis	23
11 pav. Elektrinio paspirtuko rato dinaminis modelis „Matlab Simulink“ matematiniam pakete	25
12 pav. Važiavimo trinkelėmis išilgai simuliacijos poslinkio grafikas	26
13 pav. Važiavimo trinkelėmis išilgai simuliacijos pagreičio grafikas	27
14 pav. Važiavimo trinkelėmis skersai simuliacijos poslinkio grafikas	28
15 pav. Važiavimo trinkelėmis išilgai simuliacijos pagreičio grafikas	28
16 pav. a) važiavimo asfalto danga simuliacijos poslinkio grafikas; b) važiavimo asfalto danga simuliacijos pagreičio grafikas	29
17 pav. Važiavimo per 35 mm aukščio kliūtį simuliacijos poslinkio grafikas	29
18 pav. Važiavimo per 35 mm aukščio kliūtį simuliacijos poslinkio grafikas	30
19 pav. Elektrinis paspirtukas „Xiaomi Mi Pro 2“	31
20 pav. Tiriamosios kelio dangos: a) asfaltuotas takas, b) trinkelės sudėtos išilgai, c) trinkelės sudėtos skersai	32
21 pav. Elektrinio paspirtuko kliūtys: a) 22 mm aukščio kliūtis, b) 35 mm aukščio kliūtis.....	33
22 pav. Važiavimo trinkelėmis išilgai eksperimentinis poslinkio grafikas	34
23 pav. Važiavimo trinkelėmis išilgai eksperimentinis pagreičio grafikas	35
24 pav. Važiavimo trinkelėmis skersai eksperimentinis poslinkio grafikas	35

25 pav. Važiavimo trinkelėmis skersai eksperimentinis pagreičio grafikas	36
26 pav. Važiavimo asfalto danga eksperimentinis poslinkio grafikas	36
27 pav. Važiavimo asfalto danga eksperimentinis pagreičio grafikas	37
28 pav. Važiavimo per 35 mm kliūtį eksperimentinis poslinkio grafikas	38
29 pav. Važiavimo per 35 mm kliūtį eksperimentinis poslinkio grafikas	39
30 pav. Eksperimentinių ir matematinių poslinkio rezultatų palyginimas važiuojant išilgai trinkelėmis klota danga	40
31 pav. Eksperimentinių ir matematinių pagreičių rezultatų palyginimas važiuojant išilgai trinkelėmis klota danga	41
32 pav. Eksperimentinių ir matematinių poslinkio rezultatų palyginimas važiuojant skersai trinkelėmis klota danga	42
33 pav. Eksperimentinių ir matematinių pagreičio rezultatų palyginimas važiuojant skersai trinkelėmis klota danga	43
34 pav. Eksperimentinių ir matematinių poslinkio rezultatų palyginimas važiuojant asfaltuota danga	43
35 pav. Eksperimentinių ir matematinių pagreičio rezultatų palyginimas važiuojant asfaltuota danga	44
37 pav. Eksperimentinių ir matematinių poslinkio rezultatų palyginimas važiuojant per 35 mm kliūtį	44
38 pav. Eksperimentinių ir matematinių pagreičio rezultatų palyginimas važiuojant per 35 mm kliūtį	45

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Vibracijų lygio vertinimas komforto aspektu (ISO 2631-1, 2004)	17
2 lentelė. Elektrinio paspirtuko važiavimo trinkelėmis išilgai simuliacijos parametrai	26
3 lentelė. Elektrinio paspirtuko važiavimo trinkelėmis skersai simuliacijos parametrai.....	27
4 lentelė „Xiaomi Mi Pro 2“ elektrinio paspirtuko charakteristikos (Xiaomi, 2025).....	31

IVADAS

Mikromobilumas – viena pagrindinių transporto inovacijų, skirtų spręsti judėjimo mieste problematiką. Kelionės automobiliu didmiesčiuose tampa vis mažiau patrauklios dėl susidarančių spūsčių ir riboto parkavimosi vietų skaičiaus. Smulkios ir manevringos transporto priemonės padeda išspręsti šią problemą. Elektriniai paspirtukai ir mažų gabaritų motociklai išlieka pirmu pasirinkimu asmeniniam judėjimui urbanizuotose vietovėse (Gorges et al., 2017). Elektrinė mikrojūdumo priemonė – vienam asmeniui važiuoti skirta elektra varoma transporto priemonė (elektrinis paspirtukas, elektrinė riedlentė, elektrinis balansinis vienratis, riedis ir pan.), kurios didžiausioji naudingoji galia ne didesnė kaip 1 kW, didžiausias projektinis greitis ne didesnis kaip 25 km/h, o sėdimosios vietos, jeigu ji įrengta, atskaitos taško aukštis ne didesnis kaip 540 mm (Saugaus eismo automobilių keliais įstatymas, 2000). Paspirtukai yra viena greičiausiai augančių mikromobilumo rūšių, turinčių teigiamą poveikį aplinkai. Skaičiuojama, kad 2022 metais Europoje yra 520 000 per skirtingas platformas dalinamų paspirtukų. Palyginimui 2021 metais jų buvo 360 000 (Walton et al., 2022). Sąlyginai nedidelė kaina ir patogios platformos prisideda prie jų populiarumo augimo.

Pasirinkta tema yra glaudžiai susijusi su eismo saugumu. Susirūpinimą kelia susižalojimai, sukelti elektrinių paspirtukų avarijų. Elektriniams paspirtukams tampant vis populiariesniems įvairiuose pasaulio miestuose, nelaimingų atsitikimų skaičius, tikėtina, augs. Paskutiniu metu buvo atliekami skirtingi tyrimai siekiant nustatyti paspirtukų saugą skirtingomis sąlygomis (Rix et al., 2021). Nukritimai dėl prastų kelio sąlygų yra dažna susižalojimų priežastis (Posirisuk et al., 2022).

Skirtingos kelio dangos įtaką važiavimo kokybei galima nagrinėti eksperimentus, bet jie yra laikui imlūs, o rezultatai gali būti netikslūs dėl išorinių veiksnių. Universalesnis būdas įvertinti sąveikos charakteristikas yra paspirtuko matematinis modeliavimas. Kuo tiksliau pavyksta sumodeliuoti sąveikos sudedamąsias dalis, tuo tikslesnis būna bendras matematinis modelis.

Darbe nagrinėjama paspirtuko sąveika su keliu ant skirtingų kelio dangų su kliūtimis, nustatant pagrindinius sąveikos parametrus ir tyrimo metodus. Apžvelgiama teorinių tyrimų metodika, sudarant matematinį modelį ir praktiniai tyrimai, atliekami važiuojant realiomis sąlygomis.

Tyrimo objektas – elektrinio paspirtuko važiuojančio skirtingomis dangomis su kliūtimis charakteristika.

Šio darbo tikslas – nustatyti rizikos veiksnius, būdingus elektrinio paspirtuko vairuotojui, važiuojant per kelio ar šaligatvio kliūtis, sudaryti teorinį elektrinio paspirtuko ir jo sąveikos su kelio danga matematinį modelį, atlikti važiavimo bandymus realiomis sąlygomis ir validuoti gautus rezultatus. Darbo tikslui pasiekti sprendžiami šie uždaviniai:

- Atlikti teorinę elektrinio paspirtuko rizikos ir dinamikos tyrimų analizę.
- Sudaryti matematinį elektrinio paspirtuko modelį.
- Atlikti elektrinio paspirtuko eksperimentinius tyrimus realiomis sąlygomis.
- Atlikti matematinio modelio validavimą ir išanalizuoti gautus rezultatus.

1. TYRIMO APŽVALGA IR PAGRINDIMAS

Elektriniai paspirtukai tampa vis populiarešniu ir prieinamesniu transporto metodu. Jie yra žaliąji alternatyva mašinoms ir motociklams, padedanti sumažinti anglies dioksido emisijas ir grūstis urbanizuotose vietose (Posirisuk et al., 2022). Daugėjant kelionių elektriniais paspirtukais, daugėja sužeistų paspirtukininkų gydomų ligoninėse (Namiri et al., 2020).

Kelio danga nebūna visai lygi, o ją eksploatuojant, nuo daugelio veikiančių jėgų, nelygumų dar padaugėja (Malinovski 2011). Saugaus ir patogaus važiavimo užtikrinimui reikia nustatyti transporto priemonės judėjimo charakteristikas. Šiam tikslui pasiekti gali būti atliekamas matematinis modeliavimas arba eksperimentai realiomis sąlygomis.

Dviratėms transporto priemonėms yra sudėtingiau atlikti tyrimus, nei keturratėms. Važiavimo stabilumas yra viena esminių problemų tiriant transporto priemonės judėjimą. Žmogaus valdančio dviratę transporto priemonę veiksmams turi įtakos stabilumui (Pacejka, 2022). Daugiausia tyrimų atliekama su motociklais. Kadangi elektriniai paspirtukai yra sąlyginai naujo tipo transporto priemonė, bendrai priimtinas matematinis modelis dar nėra sukurtas. Toks modelis naudingas siekiant suprasti šios transporto priemonės dinamines savybes. Tai padeda tobulinti dizainą bei didinti nelaimingų atsitikimų prevenciją (Asperti et al., 2022).

1.1 Kelio parametrų įtakos elektrinio paspirtuko judėjimui tyrimų metodų apžvalga

Elektrinio paspirtuko dinamikos tyrimai realiomis sąlygomis padeda sukurti tikrovišką modelį simuliacijoms. Tai turi trumpalaikę ir ilgalaikę naudą. Trumpalaikėje perspektyvoje gali padėti nustatyti saugumo reikalavimus ir reguliavimą, pavyzdžiui ar turėtų posūkio signalas būti rodomas ranka, ar turėtų būti leidžiama paspirtuku važiuoti važiuojamąja kelio dalimi, pėsčiųjų ar dviratininkų takais. Ilgalaikėje – realistiški paspirtuko važiavimo modeliai gali leisti sudaryti arba validuoti autonominio valdymo funkcijas, ypač urbanizuotose vietovėse (Brunner et al., 2020).

1.1.1 Tyrimas realiomis sąlygomis

Realiams bandymams atlikti reikalingos specialios trasos. Remiantis Garman et al. (2020) bandymams reikalingos dvi trasos. Pirmoji – su išdėliotomis kliūtėmis imituojančios miesto sąlygas. Bandymų ruožas išdėstomas taip, kad vairuotojui reikėtų atlikti skirtingus manevrus apvažiuojant išdėliotus kūgius. Šis tyrimas yra skirtas įvertinti elektrinio paspirtuko manevringumą ir stabilumą.

Antroji bandymų trasa yra be papildomų kliūčių. Ilga tiesioji skirta ištirti paspirtuko charakteristikoms, tokioms kaip akceleracija, stabdymas ir vibracijos važiuojant nelygia kelio danga.

Tyrimo metu atliekami paspirtuko ir paspirtukininko judėjimo matavimai. Remiantis šaltiniu Garman et al. (2020) paspirtuko judėjimui stebėti naudojamas „Plex VMU 900 HD pro“ duomenų kaupiklis, renkantis duomenis apie akceleratoriaus padėtį, stabdžio nuspaudimo padėtį, vairo pasukimo kampą ir vairo apkrovimą traukiant arba spaudžiant. Kaupiklis turi GPS sekimo funkciją, leidžiančią nustatyti judėjimo trajektoriją ir greitį. Kartu su šiuo jutikliu naudojamos dvi video kameros. Abi kameros sumontuotos ant vairo. Pirmoji skirta stebėti testo kelią, antroji paspirtukininko padėtį ant paspirtuko platformos. Jutiklių ir kamerų montavimo vietas matomos 1 paveiksle.

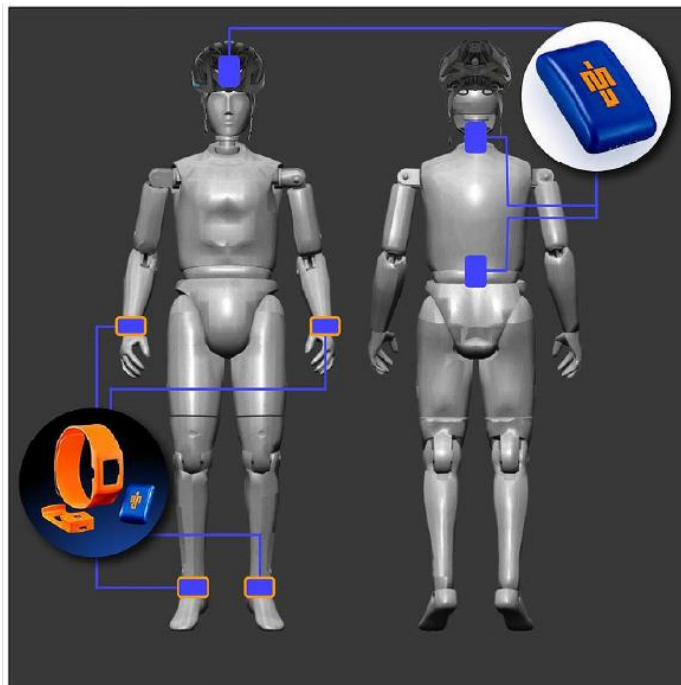


1 pav. Paspirtuko jutiklių išdėstymas ant tiriamo paspirtuko. 1 – įtempimų jutiklis vairo apkrovai matuoti; 2 – kamera kelio stebėjimui; 3 – potenciometras vairo susukimui matuoti; 4 – vaizdo kamera fiksuojanti paspirtukininko padėtį; 5 – duomenų kaupiklis su GPS imtuvu; 6 – akceleratoriaus ir stabdžių svirties jutikliai (Garman et al., 2020)

Paspirtukininko judėjimas stebimas šešiais „IMeasureU Blue Trident“ trijų laisvės laipsnių akcelerometrais, sumontuotais kostiume. Jie išdėstyti taip, kad būtų galima stebėti kūno ir paspirtuko judėjimą erdvėje skirtingais laiko momentais. Šie duomenys naudojami nustatyti

pasvirtukininko elgseną įvairiose situacijose visų bandymų metu. Akcelerometrų išdėstymą galima matyti 2 paveiksle.

Važiavimo saugumo ir valdymo kokybės tyrime gali būti atliekama ir kiekybinė analizė. (Leoni et al., 2022) tiria diskomfortą atsirandantį esant skirtingoms vertikaloms vibracijoms ir virpesių atsirandančių vaire poveikį stabilumui. Tyrime naudojamas GPS imtuvas „U-box 7“ fiksuojantis vertikalius ir horizontalius pokyčius 10 Hz dažniu, 6 ašių „Bosch IMU BMI 160“ fiksuojantis pagreičio pokyčius 100 Hz dažniu. Duomenims įrašyti naudojamas mikrokompiuteris „Raspberry Pi Zero W“. Tyrimui naudojami 7 elektriniai pasvirtukai. Važiavimus atlieka du vairuotojai. Tyrimas atliekamas trijose skirtingos kokybės asfalto dangos trasose. Maršruto ilgis 200 metrų. Važiavimai kartojami 12 km/h, 16 km/h ir 20 km/h greičiais.



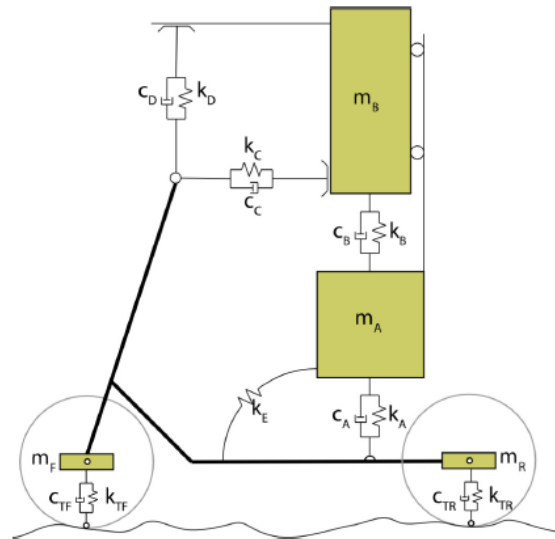
2 pav. „IMeasureU Blue Trident“ akcelerometrų išdėstymas ant kūno. (Garman et al., 2020)

1.1.2 Tyrimas matematiniais modeliais

Gamtoje visi esantys kūnai yra deformuojami (kūnas – vientisa sistema arba sistema su paskirstytais parametrais), tačiau tokių kūnų judėjimo analizė yra sudėtinga, todėl atliekant inžinerinius skaičiavimus transporto priemonė nagrinėjama kaip nedeformuojamų kūnų, kurie sujungti tam tikrais elementais, sistema (Bogdevičius, 2012).

Vertikaliai dinamiškai tirti naudojamas glaustas pasvirtuko parametrų modelis. Modelis (3 pav.) tiesiogiai siejamas su vairuotojo patogumu ir transporto priemonės stabilumu

skirtingomis važiavimo sąlygomis. Toks modelis populiarus literatūroje tiriant kitas transporto priemones, nes gaunami tikslūs rezultatai supaprastinant modelį (Asperti et al., 2022).



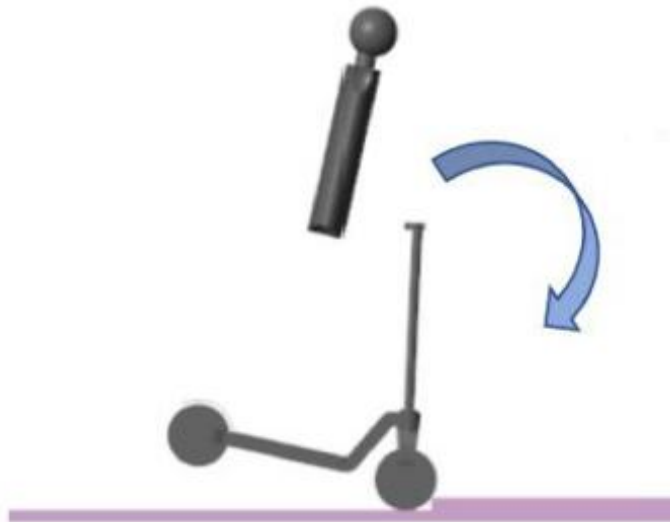
3 pav. Glaustas paspirtuko be važiuoklės dinamiųjų parametrų modelis (Asperti et al., 2020)

Vairuotojo simuliacija atliekama priimant, kad jo pozicija pagrindo atžvilgiu nekinta. Toks sprendimas atitinka sąlygą, kad vairuotojas važiuoja įtvirtinęs kojas ir nesuteikia jokio atsako sistemos valdymui. Priėmus šias sąlygas, valdytoją galima aprašyti standartine dviejų laisvės dviejų laipsnių forma (Matsumoto & Griffin, 2003).

Sudėtingos sistemos dinaminis modeliavimas gali būti atliekamas naudojant „Matlab Simscape“ programą. Programoje sumodeliuotas 3D kūnas išskaidomas į atskirus elementus. Aprašoma elementų sąveika ir savybės. Cano-Moreno et al. (2021) aprašoma elektrinio paspirtuko simuliacija „Matlab Simscape“ programa. Paspirtuko rėmo modelis be ratų įkeliamas į programą, kaip kietas kūnas. Nustatomi rėmo ir operatoriaus masės centrai nurodomi modelyje. Matematiniam pakete aprašomi ratų ir važiuoklės standumo koeficientai. Apskaičiuojama ir nurodoma masės centro inercija. Tarp simuliacijų keičiami parametrai modelyje: greitis (5 km/h, 10 km/h, 15 km/h, 20 km/h, 25 km/h), 5 lygiai kelio nelygumo, kelio paviršiaus ir padangos sukibimo amortizacijos koeficientas, priekinio rato pakabos kietumas. Atliekama 500 skirtingų simuliacijų variacijų, gaunami duomenys modeliuojami statistinėmis programomis ir gauti duomenys analizuojami.

Kelio nelygumai apima viską, pradedant duobėmis, atsirandančiomis dėl dangos pažeidimų ir baigiant leidžiamaisiais atsitiktiniais nuokrypiais atsirandančiais dangos klojimo ir priežiūros metu. Nelygumai apibūdinami kelio profilio iškilimu provėžoje, kuria rieda transporto

priemonės ratas. Kelio profilis patenka į „plataus ryšio atsitiktinio signalo“ kategoriją, todėl gali būti apibūdinamas pačiu profiliu arba statistinėmis jo savybėmis. Vienas populiariausių metodų tai padaryti – galios spektro funkcija (PSD) (Gillespie 2021).



4 pav. Paspirtuko sukimosi momentas kontakto su kliūtimi metu (Arslan & Uyulan, 2021)

Taip pat svarbi tyrimo sritis yra važiavimas per kliūtį. Paspirtuko ratas yra sąlyginai nedidelis, tad važiavimas per duobes ar aukštus kelio iškilimus sukelia papildomą riziką vairuotojui. Tokie tyrimai realiomis sąlygomis yra rizikingi, todėl jie atliekami matematiniais modeliavimu. Remiantis Arslan & Uyulan (2021) toks tyrimas atliekamas simuliuojant važiavimą trimis skirtingais greičiais. Greičiai parenkami sąlyginai nedideli. Pirmas greitis 6 km/h, antras – 8 km/h ir trečias – 10 km/h. Paspirtukui įsibėgėti paliekamas 2,7 m atstumas nuo priekinio rato iki kliūtis. Pasiekus numatytą greitį, sistemai nebeteikiama papildoma energija ir paspirtukas laisvai rieda per 5 centimetrų aukščio kliūtį. Smūgio į kliūtį metu susidaro didelės jėgos, galinčios neigiamai paveikti važiavimo balansą. Atsirandantis sukimo momentas, verčiantis paspirtuką per priekinį ratą, matomas 4 paveiksle.

1.2 Paspirtukininko sauga ir komfortas

Paspirtukininkas yra transporto priemonės valdytojas, tačiau jo sąveika su kitais eismo dalyviais yra sudėtingesnė bei mažiau reglamentuota, nei kitų transporto priemonių. Didelis greičių skirtumas tarp pėsčiųjų ir paspirtukų padidina susidūrimo tikimybę. Be to šaligatviai dažnai būna siauri ir nelygūs, dėl ko manevravimas jais tampa dar sudėtingesnis (Kazemzadeh et al., 2023). Važiuojant gatve atsiranda rizika susidurti su greičiau judančiomis transporto

priemonėmis. Paspirtukininkų sužeidimai dažnai būna sunkesni už motociklininkų, dėl saugos priemonių nedėvėjimo (Kazemzadeh et al., 2023).

Esminis paspirtuko dinaminių tyrimų tikslas užtikrinti paspirtukininko saugumą. Siekiant priimti tinkamus dizaino, reguliavimo ir valdymo sprendimus, būtina žinoti, kokie dažniausi sužeidimai atsiranda avarijos metu.

Sužeistos kūno vietos kategorizuojamos į penkias grupes: galvos (įskaitant veido); stuburo; liemens; viršutinių galūnių; apatinių galūnių. Norint nustatyti sužeidimų atsiradimo priežastis, būtina žinoti avarijos tipą (vienas nuvirtimas, paspirtuko atsitrenkimas į automobilį; dviratį; kitą paspirtuką; ar sužeistas kitas asmuo) ir avarijos priežastį (nuvirtimas; problemos kylanti valdymo metu; balanso išlaikymas; važiuojamosios dangos paviršiaus ypatumai (prastas sukibimas, duobės ir t.t.); paspirtuko gedimai) (Stigson et al., 2021). Remiantis Yavuz et al. (2022), 94,2 % sužeidimų, dėl kurių paspirtukininkai kreipiasi į gydymo įstaigas, atsiranda dėl nukritimo nuo paspirtuko. 4,3 % dėl susidūrimo su žmonėmis ar stovinčiais daiktais, 1,4 % dėl susidūrimų su judančia transporto priemone. Didžioji dalis sužalojimų kyla dėl nukritimų. Paspirtuko judėjimo charakteristikos gali sumažinti nelaimingų atsitikimų skaičių.

Transporto priemonei važiuojant kelio paviršiumi, jo nelygumai sukelia vibracijas, kurios yra perduodamos į kėbulą bei valdytoją. Remiantis Cossalter et al. (2006) vibracijas galima suskirstyti pagal dažnius į tris pagrindines grupes: (I) beveik statinės < 0.5 Hz, (II) 0.5 < važiavimo diapazonas < 20 Hz, (III) 20 Hz < akustinis diapazonas < 2000 Hz. Remiantis ISO-2631-1 (2004) standartu važiavimo vibracijų diapazonas 1–8 Hz yra svarbiausias vartotojo patogumui, nes žmogaus jautrumas visą kūną veikiančioms vibracijoms čia yra stipriausias.

Vibracijos perduodamos žmogaus kūnu gali paveikti skirtingų sistemų veikimą. Jas galima suskirstyti į tris pagrindines – fizinę, psichologinę ir neurologinę. Žemo dažnio (<10Hz) viso kūno vibracijos, ypač 4 – 10 Hz diapazone gali sukelti galvos svaigimą ir silpnumo pojūtį (Bhuiyan et al., 2022).

1 lentelė. Vibracijų lygio vertinimas komforto aspektu (ISO 2631-1, 2004)

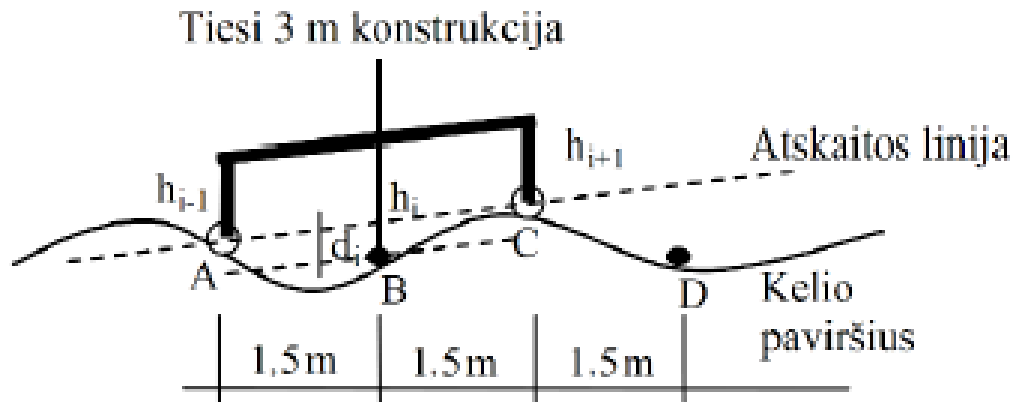
Spektras [m/s ²]	Žmogaus reakcija
<0,315	Nejaučiamas diskomfortas
0,315 – 0,63	Smulkus diskomfortas
0,5 – 1	Vidutinis diskomfortas
0,8 – 1,6	Diskomfortas

1,25 – 2,5	Didelis diskomfortas
>2	Ypač didelis diskomfortas

Vibracijų lygis vertinant komfortą nėra vienareikšmiškas. Viso kūno vibracijų pagreičiai vertinami nuo nejaučiamo diskomforto iki ypač didelio diskomforto. Pagreičių vertinimas transporto priemonėse reglamentuojamas standartais. Komforto lygio priklausomybė nuo pagreičio pateikiama 1 lentelėje (ISO-2631-1, 2004).

1.3 Kelio nelygumų nustatymas

Siekiant nustatyti kelio nelygumus, taikomas metodas matuojantis aukščio skirtumus nuo kelio dangos. Matavimai atliekami kas 1,5 m trijuose taškuose. Bandymo metu duomenys įsimenami, o siekiant didesnio tikslumo, naudojami lazeriai (Souza et al., 2006).



5 pav. Nelygumų matavimo metodas (Souza et al., 2006)

Matavimo rezultatai apdorojami pagal formulę:

$$d_i = h_i - \frac{1}{2}(h_{i-1} + h_{i+1}) \quad (1)$$

čia:

d_i – kelio profilio nelygumas;

h_i – atstumas matuojamas centriniame taške;

h_{i-1} – atstumas matuojamas 1,5 m iki centrinio taško;

h_{i+1} – atstumas matuojamas 1,5 m už centrinio taško.

Schemoje, pateiktoje 5 paveiksle, matoma, kad nustačius kelio profilio nelygumą d_i taške B, matavimai perkeltami į tašką D, ir atitinkamai nuokrypiai $h_{i-1} - B$, $h_i - C$ ir $h_{i+1} - D$. Pritaikant formulę 1 apskaičiuojama d_i reikšmė taške C. Atliekant daug matavimų gaunamos teigiamos ir neigiamos iškilimų reikšmės. Taip nustatomi aukščio skirtumai atsižvelgiant į

atskaitos liniją kas 1,5 m. Rekomenduojama standartinio nelygumo nuokrypio koeficientą apskaičiuoti iš 150 m kelio atkarpos užfiksuotų duomenų (Souza et al., 2006).

Standartinis nelygumo nuokrypis:

$$\sigma = \sqrt{\frac{n_r \sum d_i^2 - (\sum d_i)^2}{n_r(n_r - 1)}} \quad (2)$$

čia:

σ – standartinis išilginio nelygumo nuokrypis;

n_r – užfiksuotas duomenų skaičius.

Kitas kelio nelygumų nustatymo metodas – simetrinis. Šis metodas naudojamas skirtas nustatyti trijų metrų ir ilgesnes bangas. 6 paveiksle matyti tyrimo metodika. Lazeriniais jutikliais matuojamas atstumas 1, 3 ir 4 taškuose. Atstumas tarp taškų σ_s – 0,6 m (Kilic & Hilsmann, 2016). Nelygumas iš užfiksuotų duomenų apskaičiuojami pagal formulę:

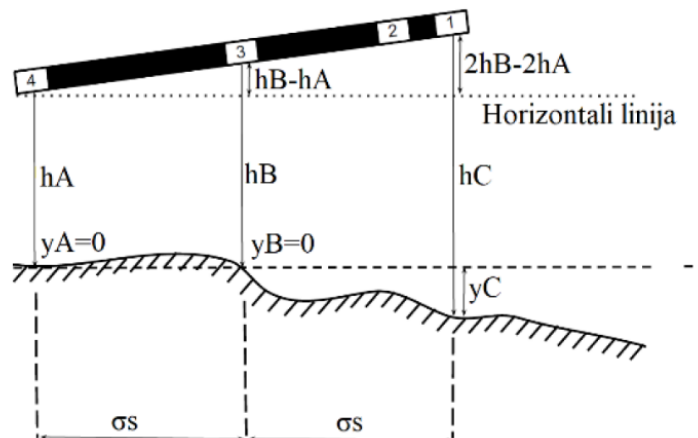
$$y_n = y_{n+1} + \sum_{i=1}^n U_i \quad (3)$$

čia:

y – vidutinis aukštis σ_s atstumu;

U – vidutinis aukštis σ_s atstumu.

$$U = -(h_1 - 2h_3 + h_4) \quad (4)$$



6 pav. Simetrinis kelio nelygumų tyrimo metodas(Kilic & Hilsmann, 2016)

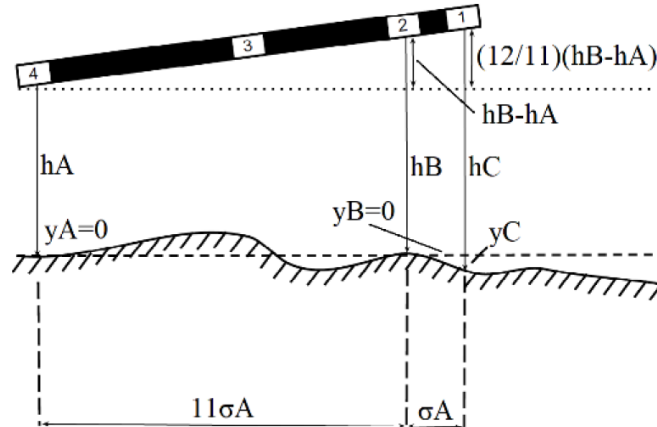
Simetrinį kelio nelygumų nustatymų metodą papildė asimetrinis, skirtas nustatyti mažesnio ilgio kelio bangas. Sistema ir naudoja tris lazerinius atstumo jutiklius, kurie išdėstyti

nesimetriškai. 7 paveiksle matoma, kad tarp 1 ir 2 jutiklių atstumas 0,1 m, tarp 2 ir 4 jutiklių – 1,1 m (Kilic & Hilsmann, 2016). Kelio nelygumo vidurkis apskaičiuojamas pagal 5 formulę:

$$W = -\left(h_1 - \frac{12}{11}h_2 + \frac{1}{11}h_4\right) \quad (5)$$

čia W – vidutinis matavimo aukštis σ a atstumu.

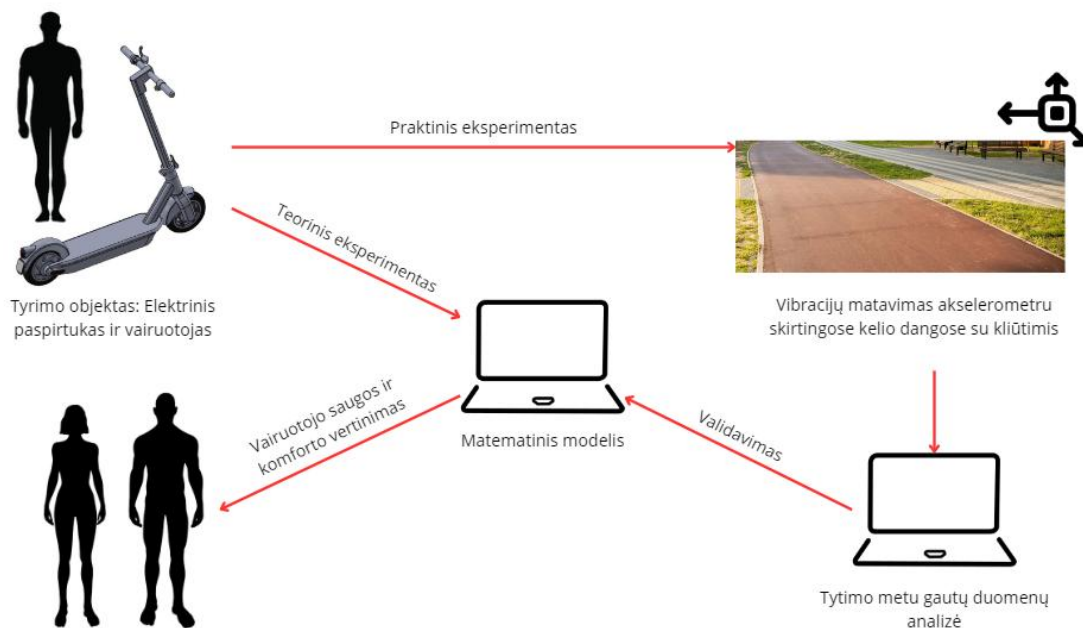
$$y_n = \frac{11}{12}y_{n-1} + \frac{1}{11}y_{n-12} + W_n \quad (6)$$



7 pav. Asimetrisis kelio nelygumų tyrimo metodas (Kilic & Hilsmann, 2016)

2. TYRIMO METODOLOGIJA

Šiame darbe atliekamas tyrimas vertina elektrinio paspirtuko vibracijas skirtingose kelio dangose ir važiuojant per kliūtis. Tikslas – nustatyti važiavimo poveikį vairuotojo saugai ir komfortui. Tyrimas grindžiamas vibracijų analize. Šis metodas taikomas vibracijų dydžiui ir dažniui nustatyti. Tyrimas susideda iš dviejų dalių. Pirmoji – matematinis modelis, skirtas simuliuoti važiavimą įvairiomis dangomis. Antroji dalis yra praktinis eksperimentas atliekamas elektriniu paspirtuku. Eksperimento eigą galima matyti 8 paveiksle.



8 pav. Tyrimo metodologija

Matematinis paketu „Matlab Simulink“ sukuriama elektrinio paspirtuko modelis. Važiavimo simuliacijai atlikti naudojami realaus elektrinio paspirtuko ir vairuotojo duomenys. Kelio dangos paviršius imituojamas matematinėmis funkcijomis. Šio modelio universalumas naudojamas skaitiniu metodu nustatyti vibracijų charakteristikas. Gaunami rezultatai lyginami su eksperimentinių bandymų duomenimis. Matematinis modelis validuojamas ir naudojamas tolimesniems važiavimo saugos tyrimams atlikti.

Eksperimentinis tyrimas atliekamas elektriniu paspirtuku, į kurį sumontuojamas akcelerometras fiksuojantis vibracijas važiavimo metu. Važiavimai atliekami asfaltuota ir skirtingomis trinkelėmis grįstomis dangomis bei per vertikalias kliūties. Bandymo metu paspirtukas įsibėgėja iki 10 km/h greičio ir likusią trasos dalį palaikomas pastovus greitis. Eksperimentų metu registruojama:

- paspirtuko pagreičiai (m/s^2),
- vibracijų dažnis (Hz)

Surinkti duomenys išanalizuojami ir palyginami su matematiniais skaičiavimais. Atliekamas teorinio modelio validavimas ir pritaikymas tirti skirtingas važiavimo situacijas.

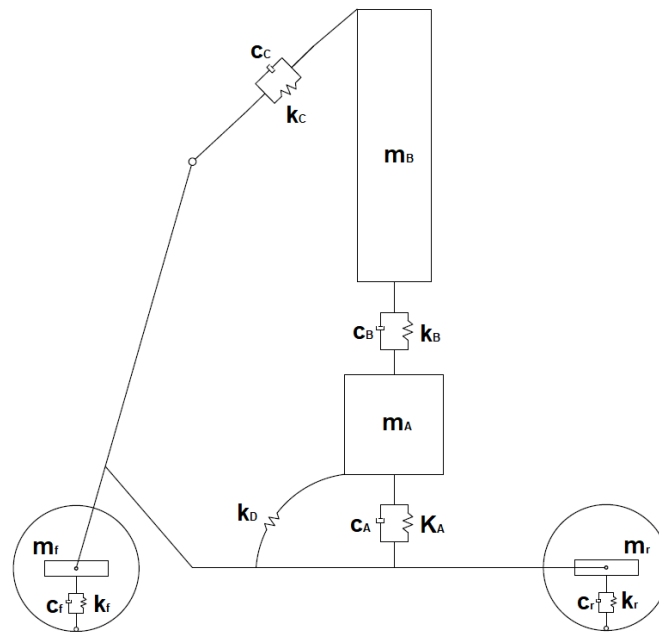
3 MATEMATINIS MODELIAVIMAS

Elektrinio paspirtuko judėjimas yra kompleksinė transporto priemonės, jos valdytojo ir kelio dangos sąveikos sistema. Sistemos ryšiams aprašyti sudaromas dinaminis modelis, kuris

supaprastina sistemą. Remiantis Bogdevičiumi (2012) tokioje sistemoje nedidelės masės kūnai nevertinami, deformuojami kūnai pakeičiami tampriai deformuojamais ir inerciniais ryšiais. Kiti kūnai, kuriems paliekamos inercinės savybės, vadinami materialiais taškais arba absoliučiai standžiais taškais. Kelio nelygumai ir vertikalios kliūtys vertinami kaip išorinis sužadinimas, veikiantys sistemą per padangą.

3.1 Matematinio modelio sudarymas

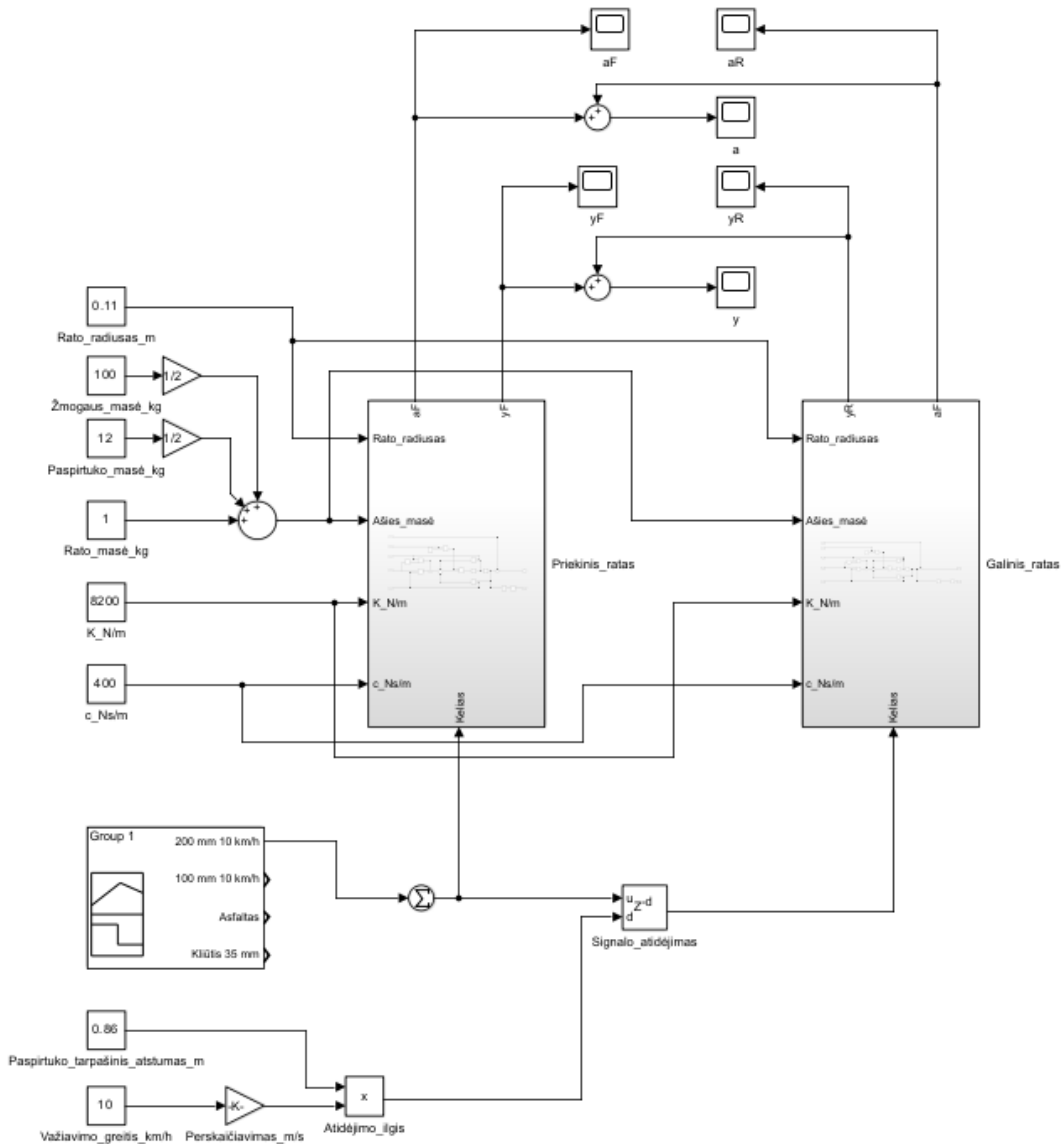
Sudarytas elektrinio paspirtuko dinaminis modelis matomas 9 paveiksle. Šis modelis turi tris laisvės laipsnius. Sistema žadinama virpesiais imituojančiais važiavimą per nelygia kelio dangą ar kliūtį.



9 pav. Paspirtuko dinaminė schema, naudojama matematiniam modeliui sudaryti

Remiantis sistemos dinaminio modeliu sudaromas matematinis modelis „Matlab Simulink“ matematinio paketu. Elektrinio paspirtuko modelis matomas 10 paveiksle. Žadinimas sukuriamas naudojant skirtingų charakteristikų periodines bangas, aprašant jų dažnį ir amplitudės aukštį. Dažnis nustatomas atsižvelgiant į paviršiaus nelygumų periodiškumą, amplitudė – nelygumų vertikalų pokytį. Numatomas važiavimo greitis tyrimo metu ir apskaičiuojamas per laiko vienetą įveikiamas atstumas, Remiantis norimo imituoti paviršiaus nelygumų periodišku išsidėstymu apskaičiuojamas funkcijos dažnis. Numatomos kliūtis aukštis simuliuojamas nustatant funkcijos amplitudę. Kelio signalui naudojama „Delay“ funkciją, siekiant įvesti atskirtį tarp priekinio ir galinio ratų. Numatomas įvesties atidėjimo laikas atitinka laiką, per kurį

įveikiamas elektrinio paspirtuko tarpašinis atstumas, važiuojant fiksuotu tyrimo greičiu. Važiavimas per kliūtį simuliuojamas sukuriant kelio signalo žingsnį, lygų kliūtis aukščiui.



10 pav. „Matlab Simulink“ sudarytas paspirtuko dinaminių charakteristikų tyrimo modelis

Tiriamos trys kelio dangos – asfaltas, išilgai trinkelėmis grįstas kelias ir skersai trinkelėmis grįstas kelias. Asfalto danga yra laikoma lygia, neturinčia didelės amplitudės nuokrypių. Trinkelės simuliuojamos sinusoide. Važiavimo greitis 10 km/h. Trinkelėlių 190x90 mm, tarp jų yra 13 mm pločio ir 3,5 mm gylio tarpai. Kelio paviršius imituojamas sinusoide, kurios amplitudė yra 3,5 mm, o dažnis apskaičiuojamas formule:

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (7)$$

čia:

f – dažnis, Hz;

v – greitis, m/s;

λ – bangos ilgis, m.

Naudojant 7 formulę, apskaičiuojamas trinkelių paviršiaus pokyčio dažnis išilgai – 13,68 Hz, skersai 23,38 Hz.

Kliūtys, esančios kelyje, gali būti skirtingo dydžio, todėl simuliacijos atliekamos nepalankiausiomis sąlygomis. Kliūtis aprašoma žingsnio funkcija, kuri nurodo kelio dangos pokytį. Tyrime naudojama 35 mm aukščio kliūtis.

Pradiniai simuliacijos duomenys:

- Važiavimo greitis – 10 km/h.
- Simuliacijos laikas važiuojant trinkelėmis – 5 s.
- Simuliacijos laikas važiuojant asfaltu – 10 s.
- Simuliacijos laikas važiuojant per kliūtį – 10 s.
- Slopavimo koeficientas 8200 N/m.
- Standumo koeficientas 400 Ns/m.

Simuliacijos metu daroma prielaida, kad paspirtukas važiuoja tiesia trajektorija, todėl sistemos neveikia kampinės jėgos ir pagreičiai. Priekiniam ir galiniam ratui naudojama ta pati kelio simuliacija, tačiau dėl atstumo tarp ašių įvedamas signalo fazės atidėjimas. Sistemos modelis pavaizduotas 10 paveiksle. Kairėje pusėje konstantomis nurodomi elektrinio paspirtuko „Xiaomi Mi Pro 2“ parametrai. Kelio dangos simuliacija atliekama „Signal generator“ bloku. Asfaltuoto kelio danga imituojama lygi, važiavimas trinkelėmis aprašomas sinuso funkcija remiantis 7 formule. Kelio kliūtis aprašoma kaip staigus horizontalios plokštumos lygio pasikeitimas, atitinkantis kliūtis aukštį. Paspirtuko rėmo masė išdalinama tolygiai priekiniai ir galiniai ašiai.

Priekinis ir galinis ratai matematiniam modelyje turi vienodas charakteristikas, todėl jų skaičiavimo modeliai yra vienodi. Elektrinio paspirtuko rato dinaminis modelis matomas 11 paveiksle. Modelyje atsižvelgiama į paspirtuko ašiai tenkančią masę, padangos slopinimo ir spyruokliavimo koeficientus, kelio paviršiaus poslinkius ir rato radiusą. Modelis sudaromas remiantis antros eilės sistemos standartine formule:

$$\ddot{x} + 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n \cdot \dot{x} + \omega^2 \cdot x = \frac{1}{m} (c \cdot \dot{y} + k \cdot y) \quad (8)$$

čia:

x – slopinamo kūno vertikalios ašies poslinkis, m;

\dot{x} – slopinamo kūno vertikalios ašies judėjimo greitis, m/s;

\ddot{x} – slopinamo kūno vertikalios ašies pagreitis, m/s²;

y – kelio paviršiaus vertikalios ašies poslinkis, m;

\dot{y} – kelio paviršiaus vertikalios ašies judėjimo greitis, m/s;

ζ – slopinimo koeficientas;

ω_n – natūralusis dažnis;

m – ašies masė, kg;

k – spyruoklės standumo koeficientas. N/m;

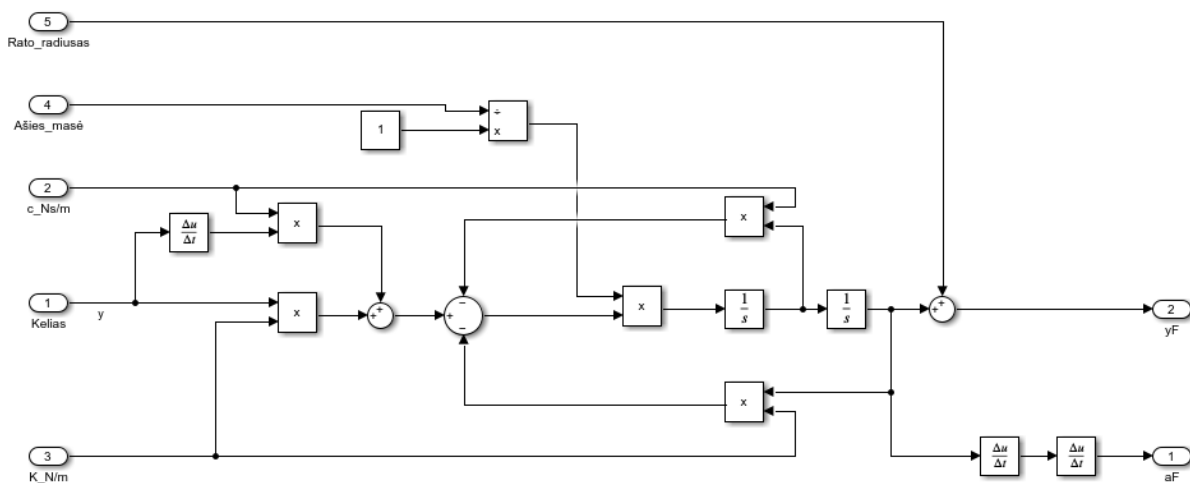
c – slopinimo koeficientas, Ns/m.

Natūralusis dažnis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (9)$$

Slopinimo koeficientas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\zeta = \frac{c}{2 \cdot \sqrt{k \cdot m}} \quad (10)$$



11 pav. Elektrinio paspirtuko rato dinaminis modelis „Matlab Simulink“ matematiniam pakete

Keičiant kelio įvestį atliekamos simuliacijos važiavimo skirtingomis dangomis ir per kliūtį. Gauti priekinio ir galinio ratų poslinkiai sumuojami, taip nustatant bendrą sistemos poslinkį. Gaunami rezultatai fiksuojami „Scope“ funkcija ir eksportuojami iš „Matlab Simulink“ matematinio paketo į „Microsoft Excel“ skaičiuoklę, kurioje atliekama rezultatų analizė.

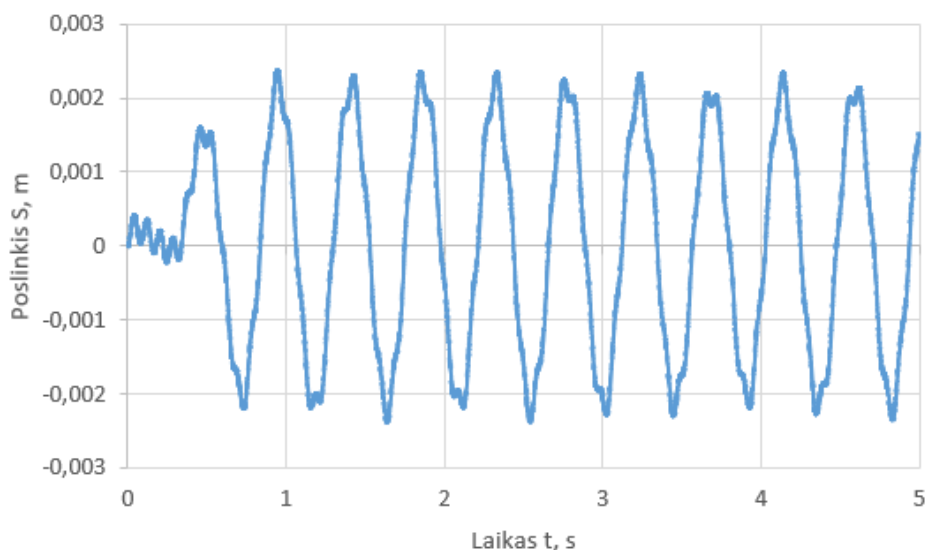
3.2 Matematinio modelio simuliacija ir rezultatai

Važiavimo simuliacijų rezultatai pateikiami grafiškai. Elektrinio paspirtuko poslinkio kreivė, fiksuota važiavimo trinkelėmis išilgai skaičiavimo metu, matoma 12 paveiksle. Tyrimo sąlygos pateikiamos 2 lentelėje.

2 lentelė. Elektrinio paspirtuko važiavimo trinkelėmis išilgai simuliacijos parametrai

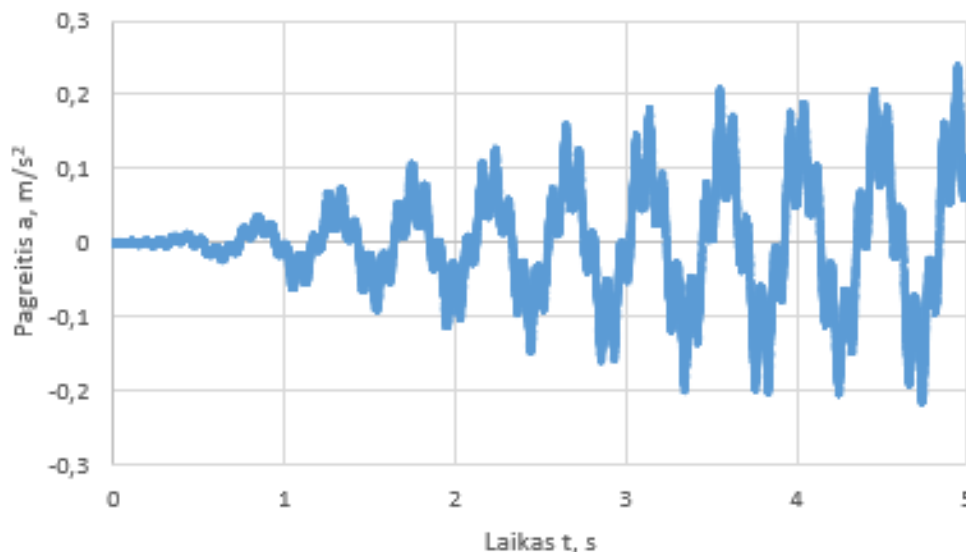
Trinkelės ilgis	190 mm.
Įdubimo gylis	3,5 mm
Atstumas tarp įdubimų	203 mm
Įdubimų gylis (amplitudė)	0,0035 m
Dažnis	13,68 Hz
Važiavimo greitis	10 km/h.

Pradiniai aukšto dažnio poslinkiai iš dalies slopinami pneumatinės padangos. Slopavimo procesas keičia virpesių pobūdį. Kelio paviršiaus sukelti virpesiai transformuojasi iš 13,68 Hz į 2,5 Hz, o amplitudė išauga nuo 3,5 mm iki 5 mm. Toks ryškus dažnio sumažėjimas ir amplitudės išaugimas atsiranda dėl kelio virpesių rezonanso su savituoju sistemos dažniu.



12 pav. Važiavimo trinkelėmis išilgai simuliacijos poslinkio grafikas

Važiavimo komfortą apibūdina sistemos pagreičiai. Vertikalaus judėjimo simuliacijų metu apskaičiuojami pagreičiai matomi 13 paveiksle. Grafike pateikiamas pagreičių pokytis laike. Apskaičiuotos reikšmės svyruoja sinusoidės forma. Pagreičio reikšmės svyravimas auga iki trečios sekundės, o tada nusistovi. Didžiausia apskaičiuota reikšmė $0,244 \text{ m/s}^2$.



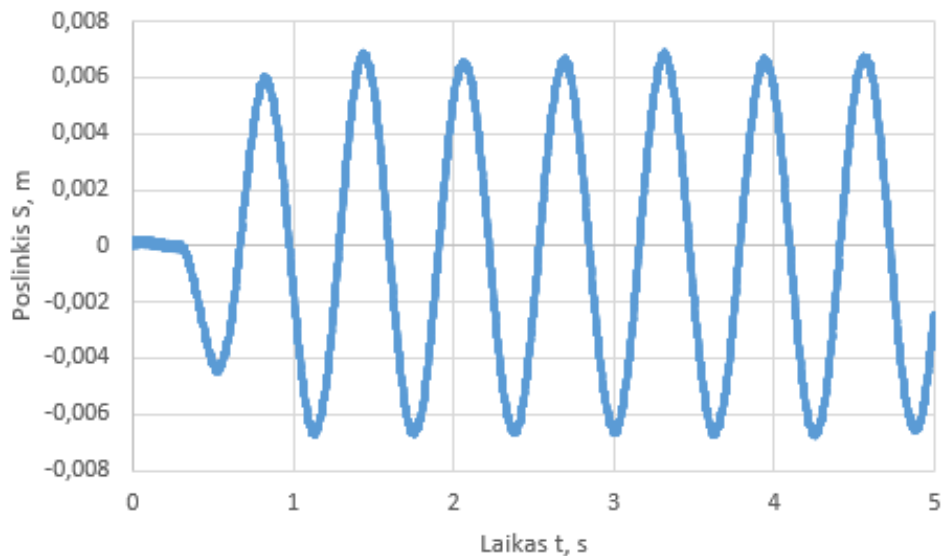
13 pav. Važiavimo trinkelėmis išilgai simuliacijos pagreičio grafikas

Elektrinio paspirtuko poslinkio važiuojant skersai trinkelėmis dengtu paviršiumi grafikas pateikiamas 14 paveiksle. Tyrimo sąlygos pateikiamos 3 lentelėje.

3 lentelė. Elektrinio paspirtuko važiavimo trinkelėmis skersai simuliacijos parametrai

Trinkelės ilgis	90 mm.
Įdubimo gylis	3,5 mm
Atstumas tarp įdubimų	103 mm
Įdubimų gylis (amplitudė)	0,0035 m
Dažnis	24,39 Hz
Važiavimo greitis	10 km/h.

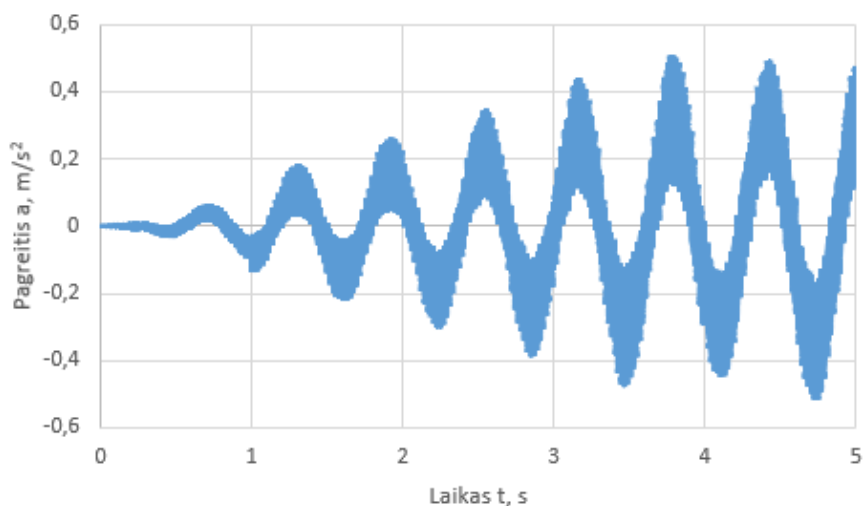
Analizuojant virpesių dinamiką važiuojant skersai trinkelėms, pastebimas reikšmingas sistemos atsako kitimas. Aukštas sužadinto dažnis dėl sistemos savybių transformuojasi į žemesnio dažnio, bet gerokai intensyvesnius virpesius. Virpesių amplitudė išauga nuo 3,5 iki 14 mm, o dažnis sumažėja iki 1,4 Hz.



14 pav. Važiavimo trinkelėmis skersai simuliacijos poslinkio grafikas

Lyginant važiavimą skirtingomis trinkelėmis dengtomis dangomis, važiuojant skersai kelio paviršiaus nelygumų dažnis išauga 1,8 karto, bet elektrinio paspirtuko perduodamų vibracijų dažnis sumažėja 1,7 karto. Virpesių amplitudė didėjant paviršiaus žadinimo dažniui išauga 3 kartus.

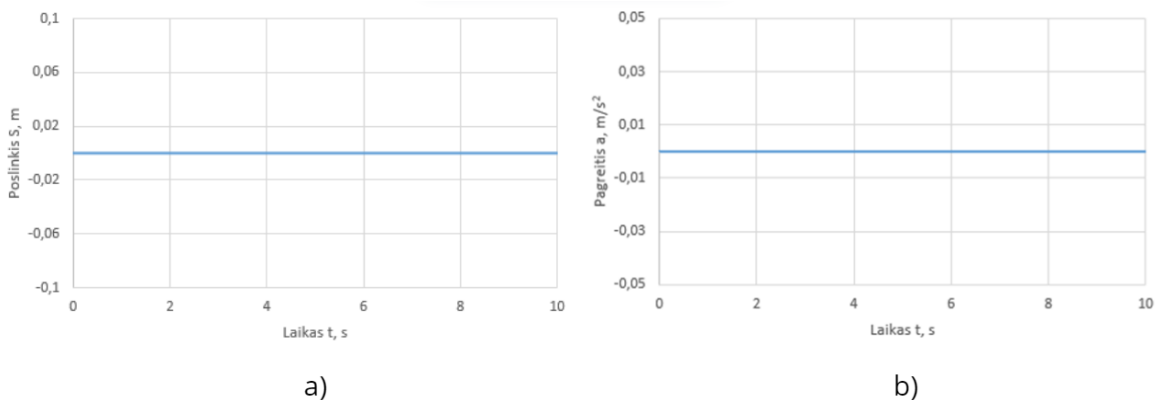
Važiavimo krypties pakeitimas turi didelę įtaką važiavimo komfortui. Kelio dangos su trinkelėmis klotomis skersai važiavimo krypties simuliacijoje apskaičiuoti pagreičiai matomi 15 paveiksle. Didžiausias apskaičiuotas pagreitis $0,48 \text{ m/s}^2$.



15 pav. Važiavimo trinkelėmis išilgai simuliacijos pagreičio grafikas

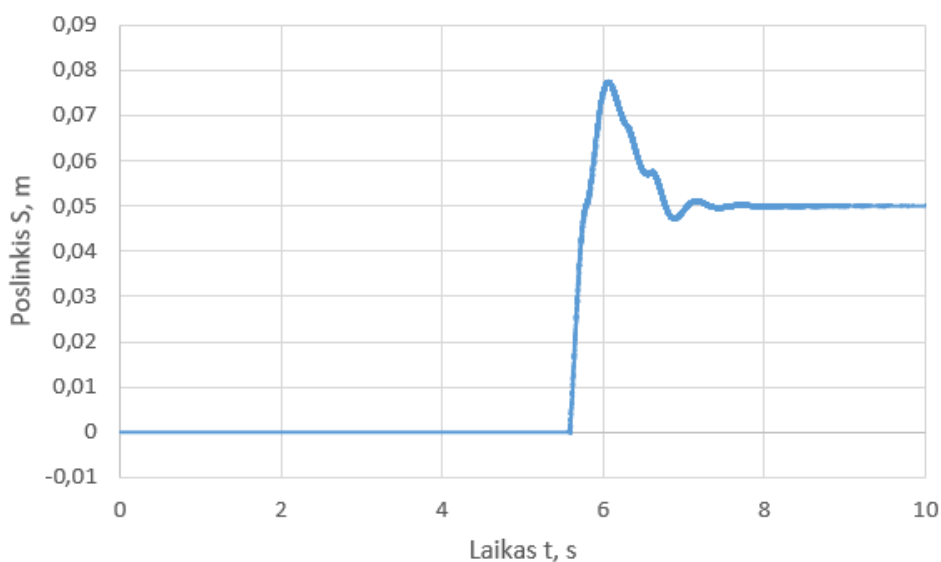
Važiavimo asfaltuotu keliu simuliacija matoma 16 paveiksle. Asfaltuotas kelias yra sąlyginai lygus ir neturi didelės amplitudės įdubimų, kurie sukeltų pastebimas vibracijas.

Paviršiuje esantys nelygumai neturi periodinio atsikartojimo. Šių paviršiaus savybių negalima aprašyti periodine funkcija, todėl poslinkiai nėra fiksuojami. Kelias simuliuojamas kaip lygus, todėl poslinkio ir pagreičio reikšmės atitinkamai lygios 0.



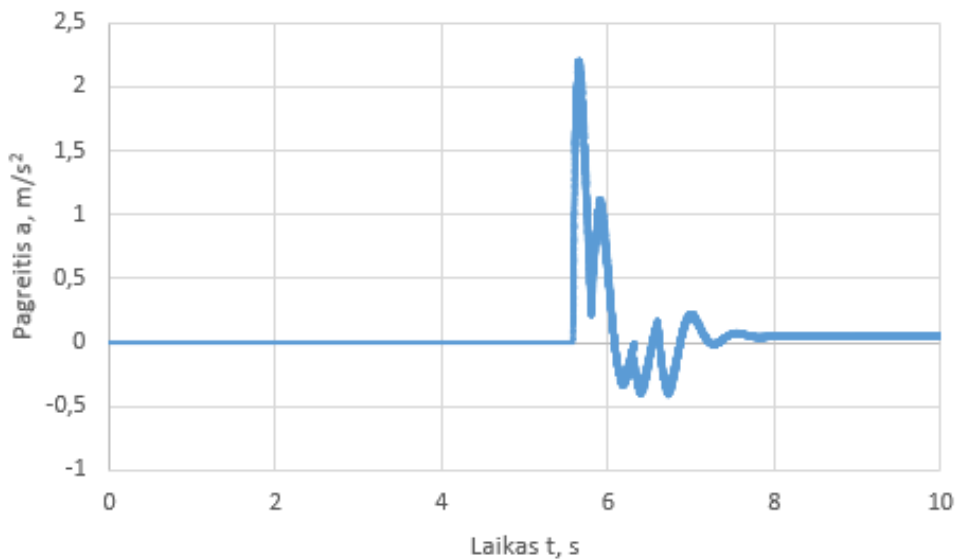
16 pav. a) važiavimo asfalto danga simuliacijos poslinkio grafikas; b) važiavimo asfalto danga simuliacijos pagreičio grafikas

Važiavimo elektriniu paspirtuku per 35 mm aukščio kliūtį poslinkio grafikas matomas 17 paveiksle. Susidūrimas su kliūtimi įvyksta 5,8 s nuo simuliacijos pradžios. Smūgio metu atsiranda staigus poslinkis, kuris 6,1 sekundę pasiekia piką ir yra lygus 76 mm. Nuo 6,1 iki 7,2 sekundės vyksta nusileidimas ir slopinimas, kurio metu poslinkis krenta iki 45 mm. Nuo 7,2 sekundės prasideda sistemos nusistovėjimas ir sistema nusistovi 8 sekundę.



17 pav. Važiavimo per 35 mm aukščio kliūtį simuliacijos poslinkio grafikas

Simuliacijos metu apskaičiuoti važiavimo vertikalieji pagreičiai pateikiami 18 paveiksle. Smūgio metu patiriami ypač dideli pagreičiai. Didžiausia užfiksuota reikšmė $2,32 \text{ m/s}^2$. Užvažiavus ant kliūtis, sistemos nusistovėjimo metu pagreičio reikšmės svyruoja apie $0,41 \text{ m/s}^2$.



18 pav. Važiavimo per 35 mm aukščio kliūtį simuliacijos poslinkio grafikas

Taip greitai išaugantis ir krentantis poslinkis leidžia teigti, kad smūgio metu įvyksta trumpalaikis kontakto su kelio paviršiumi praradimas, po kurio sistema sugeria nusileidimo energiją, stabilizuojasi ir nusistovi. Kontakto su kliūtimi didelė pagreičio reikšmė reiškia, kad sistema patiria apkrovą, kurios metu įvyksta šuolis ir nusileidimas. Tolimesnio važiavimo metu sugerama energija ir sistema nusistovi. Šuoliai yra ypač pavojingi, nes jų metu sistema tampa ypač nestabili ir išauga rizika nusiversti.

4. EKSPERIMENTINIS TYRIMAS

Elektrinio paspirtuko matematinis modelis aprašo supaprastintą dinaminę sistemą, kurioje neatsižvelgiama į visus realius veiksnius, tokius kaip oro pasipriešinimas, padangų netiesinis standumas ar netolygūs kelio sąlyčio su paviršiumi efektai. Siekiant nustatyti, ar matematiniam modelyje gauti rezultatai atitinka realybę, atliekamas eksperimentinis tyrimas.

Tyrimui naudojamas „Xiaomi Mi Pro 2“ elektrinis paspirtukas su sumontuotu daugiafunkčiu inerciniu jutikliu „WitMotion WT901BLECL“. Jutiklis skirtas objektų judėjimui ir padėčiai erdvėje matuoti. Duomenys fiksuojami gamintojo programa „WitMotion“ skirta „Android“ mobiliesiems įrenginiams, duomenys perduodami belaidžiu tinklu. Dėl jutiklio

techninių ribų matavimai atliekami ne pastoviu laiko intervalu, o su kintamu atrankos dažniu, todėl vėliau reikalinga papildoma duomenų apdorojimo procedūra. Eksperimento metu jutiklis fiksuoja paspirtuko judėjimo pagreitį, kuris vėliau integruojamas, kad būtų gautas poslinkis.

4.1 Tyrimo sąlygos

Tyrimui naudojamas „Xiaomi Mi Pro 2“ elektrinis paspirtukas (19 pav.). Šis paspirtukas pasirinktas dėl plačiai paplitusios 8,5 ratų konfigūracijos. Remiantis Xiaomi (2025) interneto svetainėje pateikiamais duomenimis, paspirtuko charakteristikos nurodomos 4 lentelėje. Elektrinį paspirtuką rekomenduojama naudoti asfaltuotuose arba kituose kietos dangos keliuose.

Tyrimo metu padangose nustatomas dviejų barų slėgis. Akcelerometras „WitMotion WT901BLECL“, skirtas elektrinio paspirtuko vibracijoms matuoti, sumontuojamas ant stovėjimo pagrindo. Paspirtukui stovint tiesiai atliekamas jutiklio kalibravimas.



19 pav. Elektrinis paspirtukas „Xiaomi Mi Pro 2“

Matavimai atliekami koordinačių sistemoje XYZ, čia X – judėjimas išilgai paspirtuko, Y – vertikalus sistemos judėjimas, Z – sistemos judėjimas skersai paspirtuko pagrindui. Tyrime naudojama Y ašimi fiksuojamas pagreitis, kuris vėliau perskaičiuojamas į poslinkį.

4 lentelė „Xiaomi Mi Pro 2“ elektrinio paspirtuko charakteristikos (Xiaomi, 2025)

Charakteristika	Reikšmė
Galia	300 W

Didžiausias projektinis greitis	25 km/h
Matmenys	1130x430x1180 mm
Tarpašinis atstumas	860 mm
Rato skersmuo	8,5 colio (216 mm)
Padangos tipas	Pneumatinė
Stovėjimo platformos aukštis	87,5 mm
Svoris	14,2 kg.

Tyrimui parinktos dvi tipinės miesto dviračių takų dangos – asfaltas ir trinkelės, kuriomis važiuojama pastoviu 10 km/h greičiu naudojant „Xiaomi Mi Pro 2“ elektrinį paspirtuką. Mažo skersmens ir siauros paspirtuko padangos jautriai reaguoja į kelio paviršiaus pasikeitimus, todėl trinkelėmis grįsta danga tiriama skirtingomis kryptimis, važiuojant išilgai ir skersai. Tiriamosios kelio dangos matomos 20 paveiksle.

Važiavimai visomis trasomis atliekami po 3 kartus, surenkami duomenys apibendrinami, kad būtų pašalinamas jutiklio fiksuojamas trikšmas.



a)

b)

c)

20 pav. Tiriamosios kelio dangos: a) asfaltuotas takas, b) trinkelės sudėtos išilgai, c) trinkelės sudėtos skersai

Asfaltbetonio danga yra sąlyginai lygi. Išlieta vientisa danga neturi dažnų smulkių įdubimų, kurie gali sukelti aukšto dažnio ir didelės amplitudės vibracijas. Asfalto danga per laiką degraduoja, joje atsiranda įtrūkimų ir įdubimų. Paviršiaus netobulumai gali sukelti papildomas vibracijas. Tyrimas atliekamas važiuojant asfalto danga 10 km/h greičiu.

Betono trinkelės yra viena populiariausių pėsčiųjų ir dviračių takų danga. Dėl specifinės savo formos trinkelėmis važiavimai atliekami dviem kryptim – išilgai ir skersai. Važiavimas ta pačia danga, bet kita kryptimi sukelia visiškai skirtingo dažnio vibracijas. Trinkelės paviršiaus

matmenys 190x90 mm, tarpas tarp jų yra įdubimas, kurio gylis 3,5 mm, o plotis 13 mm. Važiavimai atliekami 10 km/h greičiu.

Gatvės ir šaligatvio ar dviračių tako susikirtimo vietoje kelio paviršiai neretai būna skirtingame aukštyje, o šis skirtumas gali siekti net kelis centimetrus. Kertant gatvę paspirtuku, reikia nuvažiuoti nuo šaligatvio ar dviračių tako ir vėl užvažiuoti ant jo. Tokios vietos ypač pavojingos paspirtukų vartotojams, nes važiuojant dideliu greičiu mažo skersmens ratas, atsitrenkęs į staigų pakilimą ar kitą kliūtį, gali sukelti smarkų smūgį, dėl kurio gali išbalansuoti visa sistema, o vairuotojas – netekti pusiausvyros ir nukristi. Skirtingų kliūčių pavyzdžiai matomi 21 paveiksle.



a)

b)

21 pav. Elektrinio paspirtuko kliūtys: a) 22 mm aukščio kliūtis, b) 35 mm aukščio kliūtis

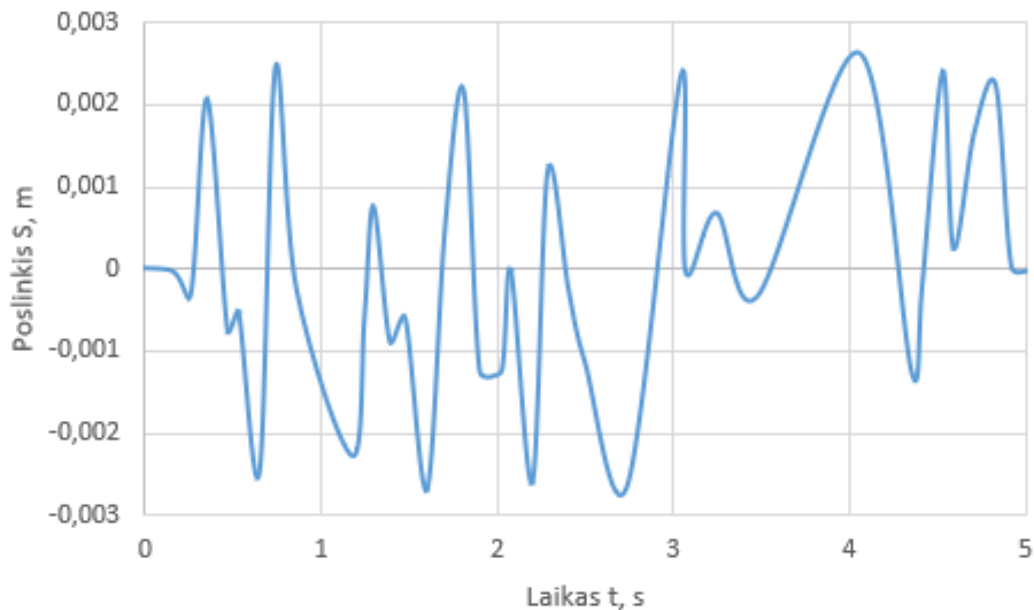
Kliūties įveikimo pavojus tiesiogiai priklauso nuo kliūties aukščio, todėl tyrimui naudojama didžiausia dažnai kelyje sutinkama kliūtis, kurios aukštis 35 mm. Tyrimo metu važiuojama per kliūtis, 10 km/h greičiu. Atliekant važiavimus per mažesnes kliūtis, sistemos stabilumas išliks didesnis, o rizika nukristi sumažins.

4.2 Tyrimo rezultatai

Atliekami važiavimai ir surenkami duomenys akcelerometru „WitMotion WT901BLECL“. Jutiklis fiksuoja G – jėgas, kurios vėliau yra konvertuojamos į pagreitį, greitį ir poslinkį. Tyrime analizuojamas poslinkio pokytis laike. Važiavimai visomis dangomis atliekami po 3 kartu ir išvedamas duomenų vidurkis.

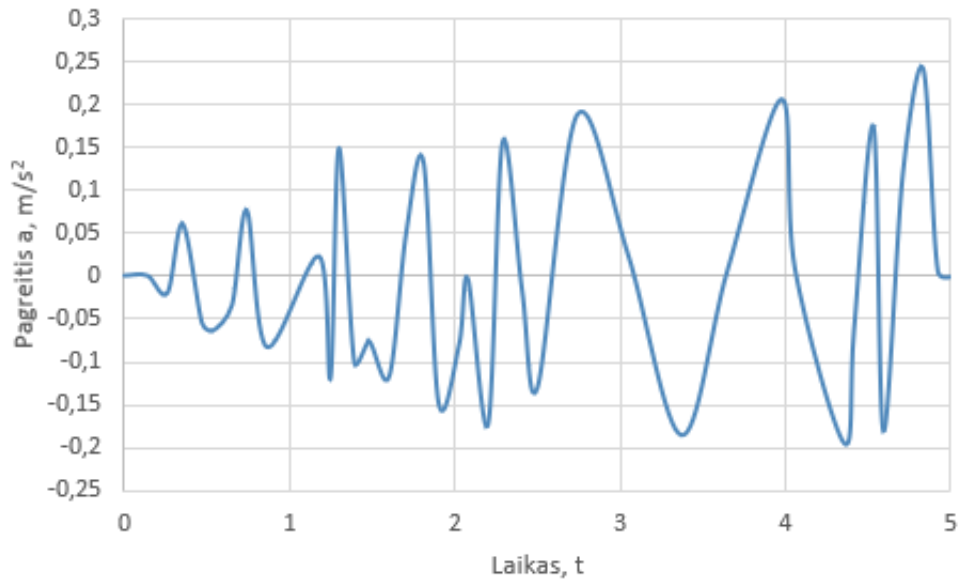
Važiavimas atliekamas išilgai betoninėmis trinkelėmis. Gaunami rezultatai matomi 22 paveiksle. Važiavimas atliekamas paviršiumi, su 3,5 mm įdubimais atsirandančiais kas 200 mm. Duomenys fiksuojami 5 sekundes.

Iš rezultatų matoma, kad vibracija yra artima periodiškai, bet, rezultatuose yra triukšmai ir netolygumai. Jutiklio renkami duomenys nėra fiksuoto laiko žingsnio, todėl gauti duomenys gali būti dalinai iškreipti. Vibracijų amplitudžių dydis nėra tolygus, dėl kelio dangos netobulumo.



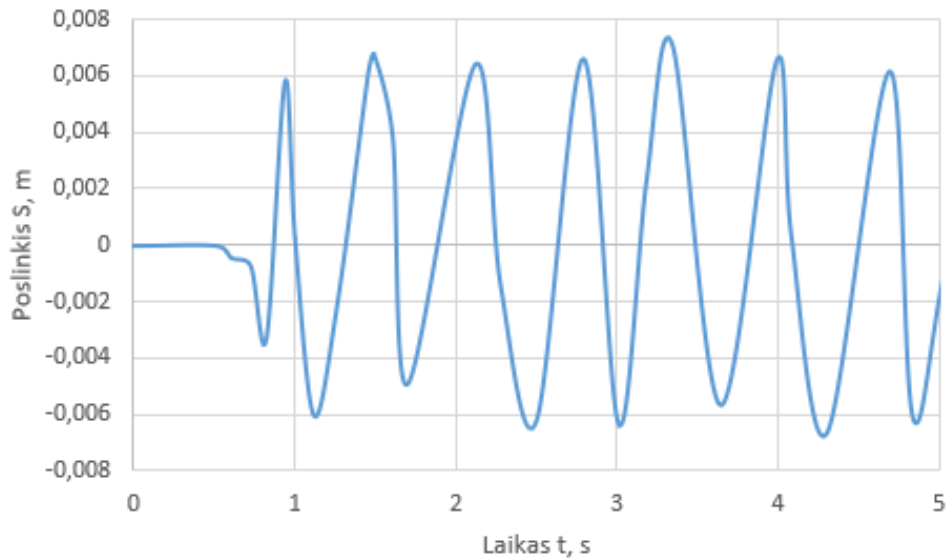
22 pav. Važiavimo trinkelėmis išilgai eksperimentinis poslinkio grafikas

Eksperimentinio tyrimo išilgai važiavimo krypties klotomis trinkelėmis pagreičių reikšmės pateikiamos 23 paveiksle. Reikšmių svyravimai nėra periodiškai dėl triukšmo fiksuojamo akcelerometru. Didžiausia užfiksuota pagreičio reikšmė $0,248 \text{ m/s}^2$.



23 pav. Važiavimo trinkelėmis išilgai eksperimentinis pagreičio grafikas

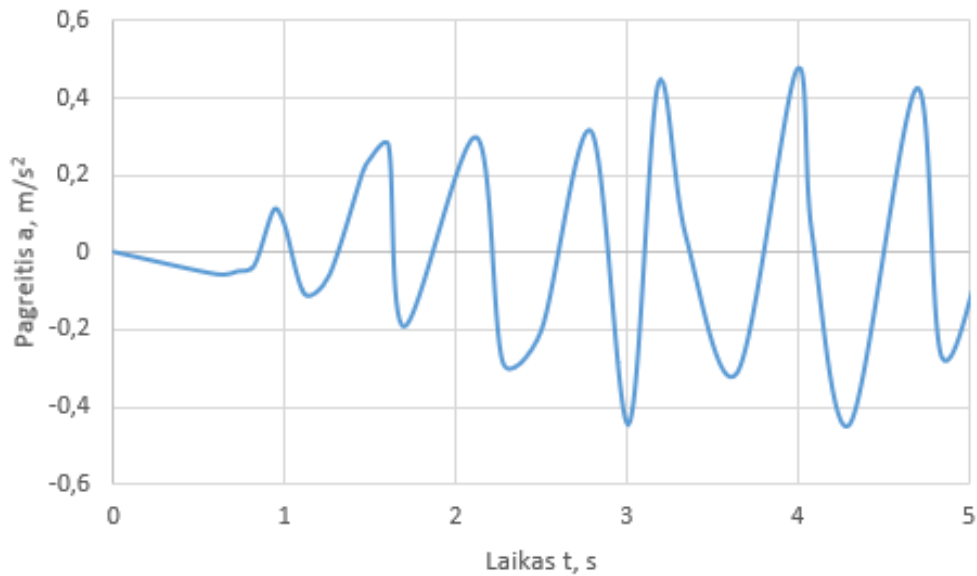
Eksperimentiniai poslinkio rezultatai, važiavimo betonines trinkelėmis, paklotomis skersai važiavimo krypties rezultatas matomas 24 paveiksle. Važiavimas atliekamas paviršiumi, turinčiu pasikartojančią struktūrą. Duomenys fiksuojami 5 sekundes.



24 pav. Važiavimo trinkelėmis skersai eksperimentinis poslinkio grafikas

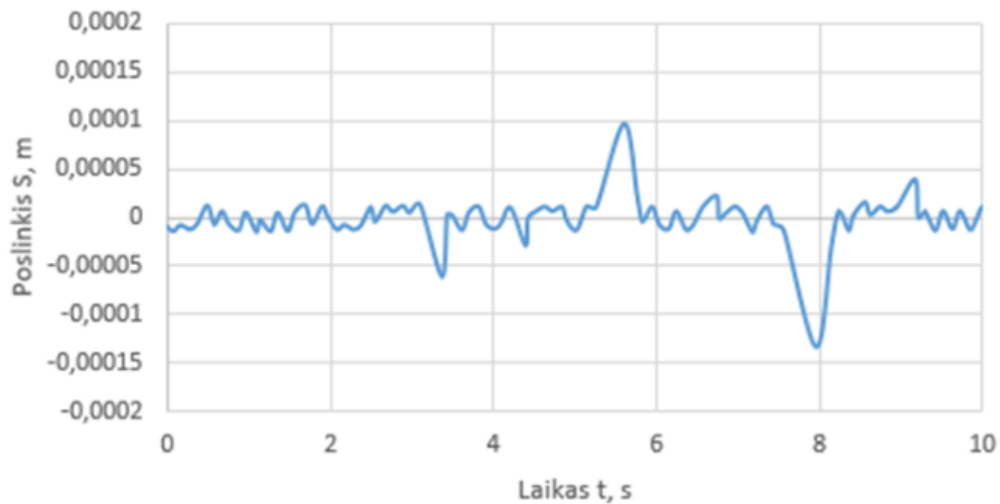
Iš pateiktų rezultatų matoma artima periodinei vibracija, atsirandanti važiuojant paviršiumi, su 3,5 mm įdubimais atsirandančiais kas 100 mm. Grafike amplitudės reikšmės nėra tolygios. Reikšmių skirtumus gali nulemti trinkelėlių aukščio ir bendras kelio netolygumas.

Važiavimo skersai klotomis trinkelėmis pagreičio kitimas vaizduojamas 25 paveiksle. Pagreičio reikšmės svyravimai artimi sinusoidei. Didžiausias pagreitis užfiksuotas $0,45 \text{ m/s}^2$.



25 pav. Važiavimo trinkelėmis skersai eksperimentinis pagreičio grafikas

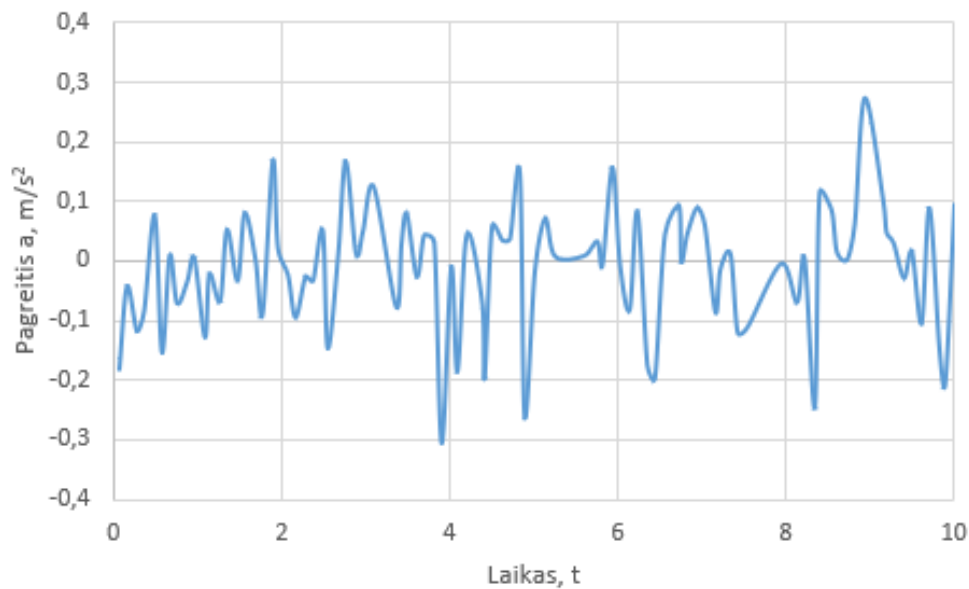
Asfalto danga yra sąlyginai lygi ir neturi didelių periodinių įdubimų, tačiau turi smulkių įtrūkimų. Važiavimo rezultatai matomi 26 paveiksle. Grafike matomi poslinkiai yra itin maži. Didžiausias poslinkis yra $0,14 \text{ mm}$.



26 pav. Važiavimo asfalto danga eksperimentinis poslinkio grafikas

Svyravimai nėra sinusiniai, tačiau vietomis yra artimi jiems, nes asfalto danga yra iš smulkios frakcijos skaldos. Dideli nukrypimai nuo sinusoidės gali atsirasti dėl įtrūkimų ar kitų kelio netobulumų.

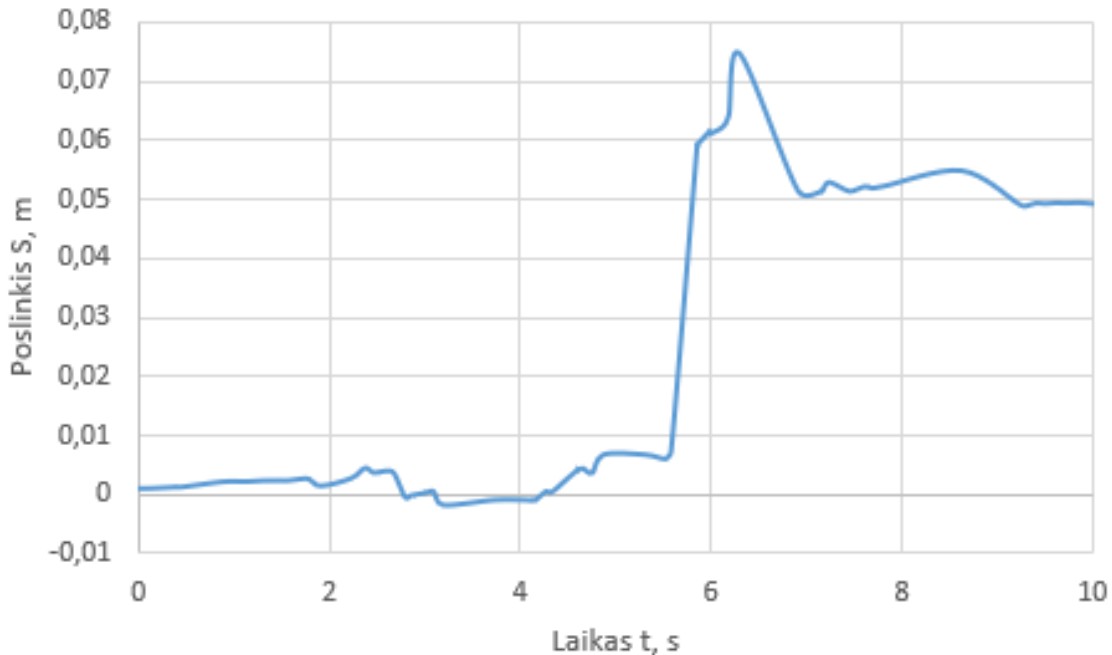
Važiavimo asfaltuota danga pagreičių reikšmės vaizduojamos 27 paveiksle. Iš grafiko matoma, kad svyravimai ne periodiški. Didžiausias pagreitis fiksuojamas $0,31 \text{ m/s}^2$.



27 pav. Važiavimo asfalto danga eksperimentinis pagreičio grafikas

Važiavimas per kliūtis yra ypač pavojingas. Sistemos stabilumui labai kenkia staigūs didelės amplitudės poslinkiai. Kliūties dydis nulemia poslinkį, o kartu ir žmogaus patiriamas jėgas. Matavimai buvo atliekami skirtingų aukščių kliūtims, tačiau kaip pavojingiausias analizuojamas didžiausias, 35 mm aukščio užvažiuojimas.

Važiavimo per 35 mm kliūtį poslinkio grafikas matomas 28 paveiksle. Pirmomis sekundėmis matomas važiavimas sąlyginai lygiu keliu. 5.3 sekundę įvyksta priekinio rato smūgis su kliūtimi, paspirtukas pašoka ir ratas užvažiuoja ant jos. 6.1 sekundę galinis ratas atsitrenkia į tą pačią kliūtį ir ant jos užvažiuoja. 6.3 sekundę pasiekiamas aukščiausias taškas 74 mm. Smūgio jėga slopinama ir nusistovi 9 sekundę. Grafike aiškiai matomas didžiulis poslinkis yra ypač pavojingas elektrinio paspirtuko vairuotojui, nes jo metu gali būti prarasta transporto priemonės kontrolė. 74 mm poslinkis rodo, kad paspirtukas patiria didelę dinaminę apkrovą ir pneumatinės padangos amortizacijos neužtenka smūgio jėgos sugėrimui.



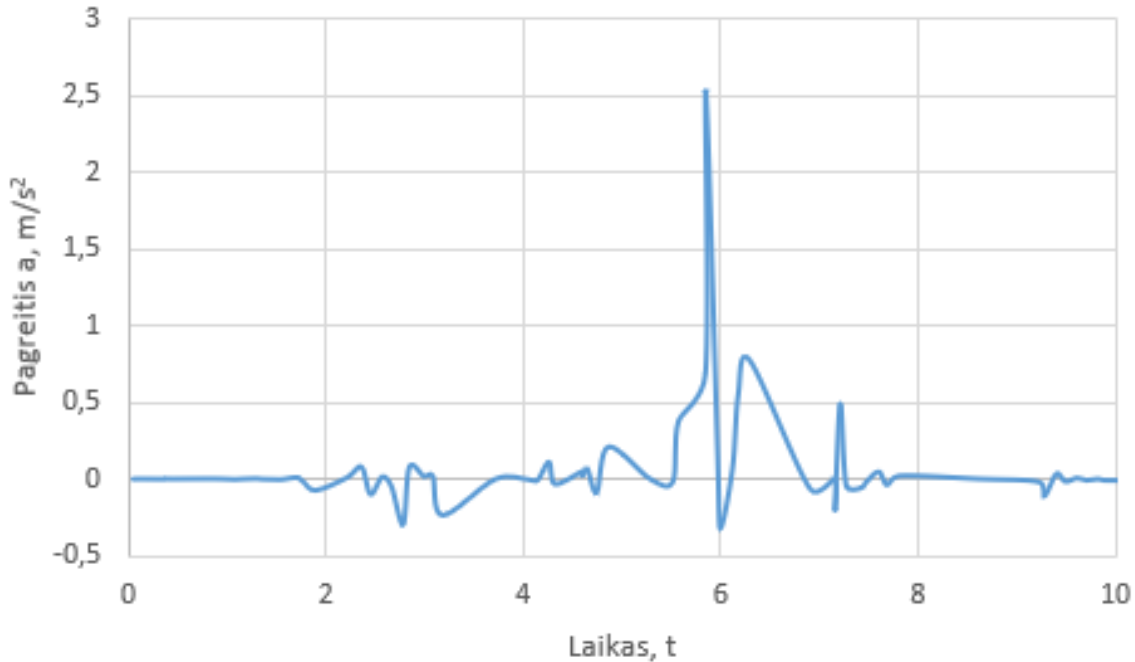
28 pav. Važiavimo per 35 mm kliūtį eksperimentinis poslinkio grafikas

Eksperimentinio važiavimo per 35 mm aukščio kliūtį vertikalaus pagreičio kitimas pateikiamas 29 paveiksle. Važiavimą galima suskirstyti į 3 dalis:

Pirmoji – važiavimas iki kliūties. Iš grafiko matoma, kad iki 5,3 sekundės paspirtukas važiuoja sąlyginai lygiu keliu. Smulkūs pagreičio svyravimai iki $0,3 \text{ m/s}^2$ yra normalūs važiavimui lygia danga.

Antroji – smūgis. 5,3 sekunde įvyksta susidūrimas su kelio bortu. Smūgio metu trumpą laiką patiriamas didelis pagreitis, siekiantis $2,51 \text{ m/s}^2$. Toks staigus pagreičio išaugimas rodo, kad paspirtukas pašoko į orą.

Trečioji – sistemos nusistovėjimas. Nusileidus ant kelio sistemos judėjimas palaispniui stabilizuojasi, tačiau vis dar patiriami dideli pagreičiai viršijantys $0,5 \text{ m/s}^2$. Šie svyravimai rodo, kad sistema nėra grįžusi į pusiausvyrą. Nuo 8 sekundės nebepatiriami ryškūs pagreičio svyravimai, sistemą galima laikyti nusistovėjusia.



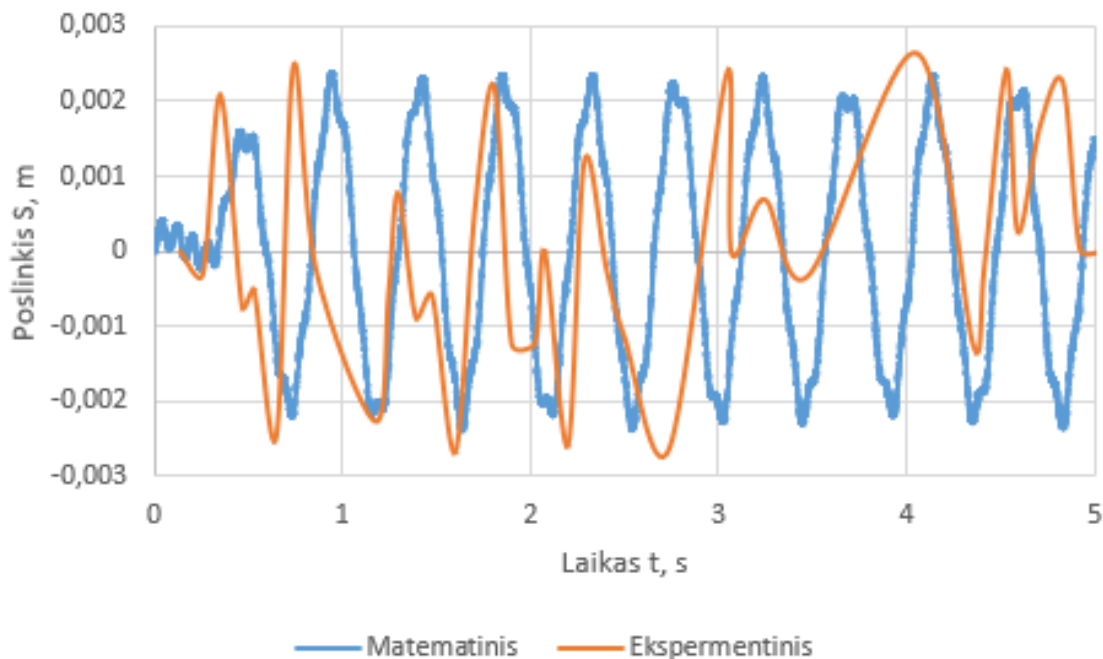
29 pav. Važiavimo per 35 mm kliūtį eksperimentinis poslinkio grafikas

Didelis pagreitis smūgio metu gali paveikti važiavimo stabilumą ir sukelti pavojų vairuotojui. Smūgio metu susidaranti didelė jėga gali pakenkti paspirtuko konstrukcijai.

5. Validavimas

VLKK Konsultacijų banke (n.d.) validacija apibūdinama, kaip veiksmas, kuriais įrodoma, kad metodas ar sistema yra tinkami nustatytiems rezultatams gauti. Matematinis modelis sudaromas remiantis bendrosiomis formulėmis ir sistema yra supaprastinama. Validavimo metu lyginami skaičiavimo ir realaus eksperimento rezultatai.

Matematinis modelis yra teisingas tik tada, kai jo prognozės sutampa su elektrinio paspirtuko elgesiu realiomis sąlygomis, todėl validavimas turi būti atliekamas esant skirtingiems scenarijams. Įvairių važiavimo sričių matematinis modeliavimas atskleidžia sistemos jautrumą pradinių parametrų keitimui. Simuliuojamos sistemos rezultatai turi koreliuoti su eksperimentiniais duomenimis. Nustačius neatitikimus modelis turi būti koreguojamas, tol, kol gaunami rezultatai tampa artimi realioms sąlygoms.

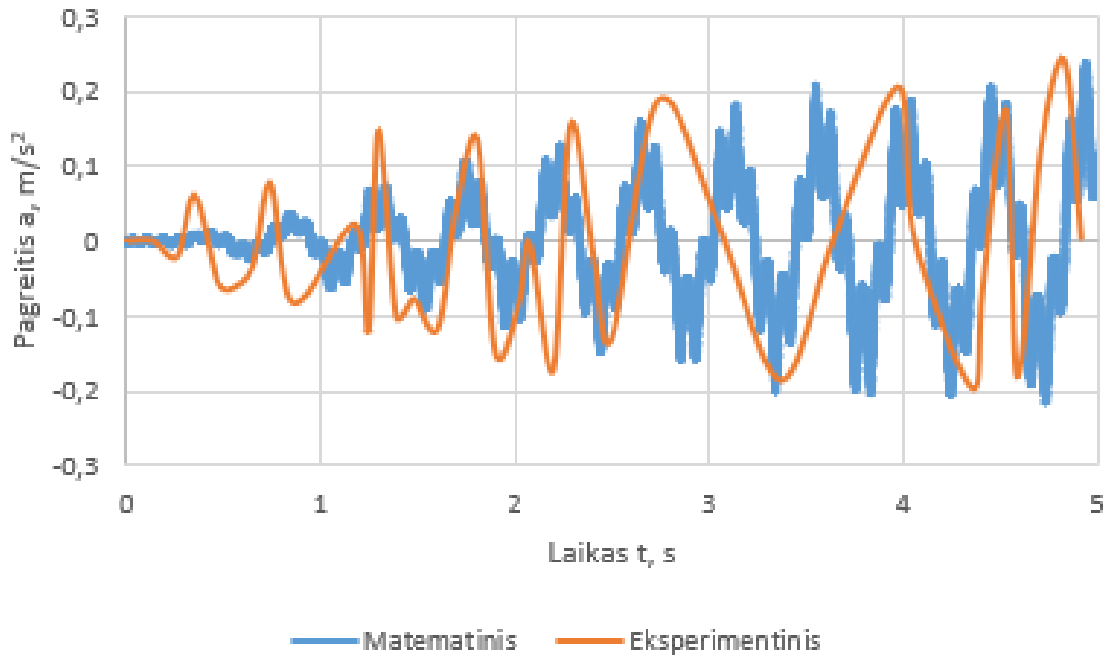


30 pav. Eksperimentinių ir matematinų poslinkio rezultatų palyginimas važiuojant išilgai trinkelėmis klotą dangą

Važiavimo trinkelėmis, paklotomis išilgai judėjimo krypties, poslinkio rezultatai pateikti 30 paveiksle. Grafike lyginami matematinio modeliavimo ir eksperimentiniai rezultatai. Iš paveikslo matoma, kad amplitudės yra artimos. Praktinio eksperimento metu gautas grafikas dėl nevienodų laiko žingsnių, kelio paviršiaus netobulumų neatitinka tobulos sinusoidės, bet yra artimas jai. Grafikų dažnis yra artimas, didžiausių teorinės ir eksperimentinės reikšmių skirtumas 0.0004 m (10 %).

Elektrinio paspirtuko judėjimo kelio danga, grįsta trinkelėmis išilgai važiavimo krypties, pagreičių rezultatų palyginimas matomas 31 paveiksle. Iš grafiko galima teigti, kad matematinio modeliavimo ir eksperimentiniai rezultatai yra artimi.

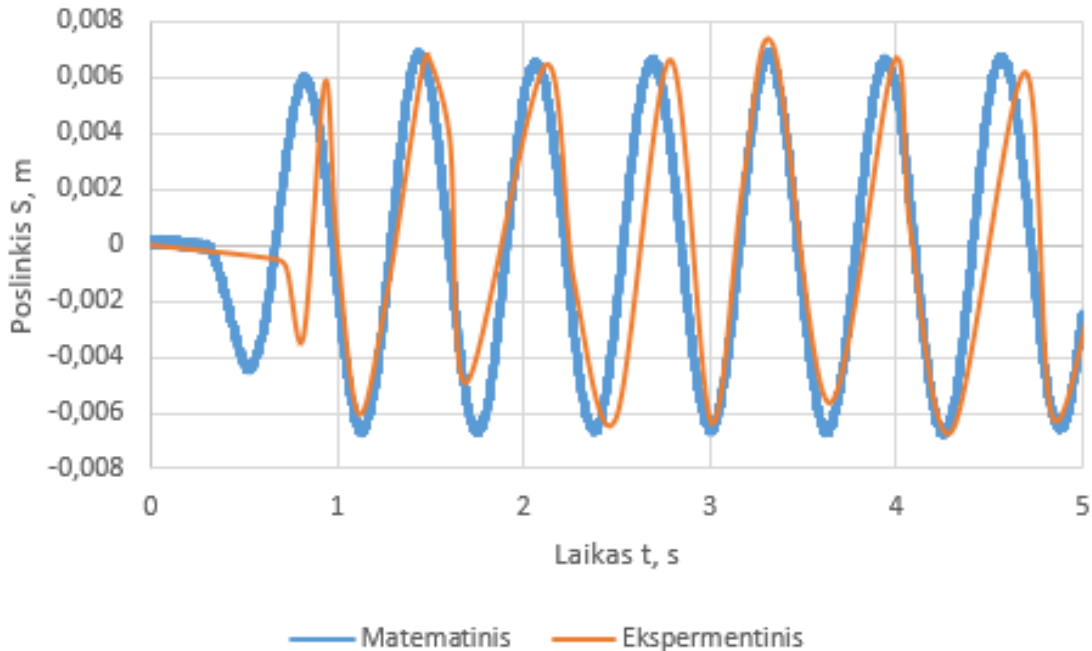
Pagreičio amplitudės augimas eksperimentiniam tyrimui yra greitesnis, tačiau bendra tendencija yra artima matematiniam modeliui. Virpesių dažnis yra artimas, tačiau eksperimentiniuose duomenyse, dėl neperiodinio laiko duomenų fiksavimo, atsiranda laikinas nesutapimas. Didžiausi fiksuojamo pagreičiai yra artimi. Matematinio modelio didžiausias apskaičiuotas pagreitis $0,244 \text{ m/s}^2$, eksperimentiškai užfiksuotas – $0,248 \text{ m/s}^2$ (skirtumas 1,6 %). Virpesių dažnis, kurį patiria paspirtuko vairuotojas – 2,2 Hz.



31 pav. Eksperimentinių ir matematinių pagreičių rezultatų palyginimas važiuojant išilgai trinkelėmis klotą dangą

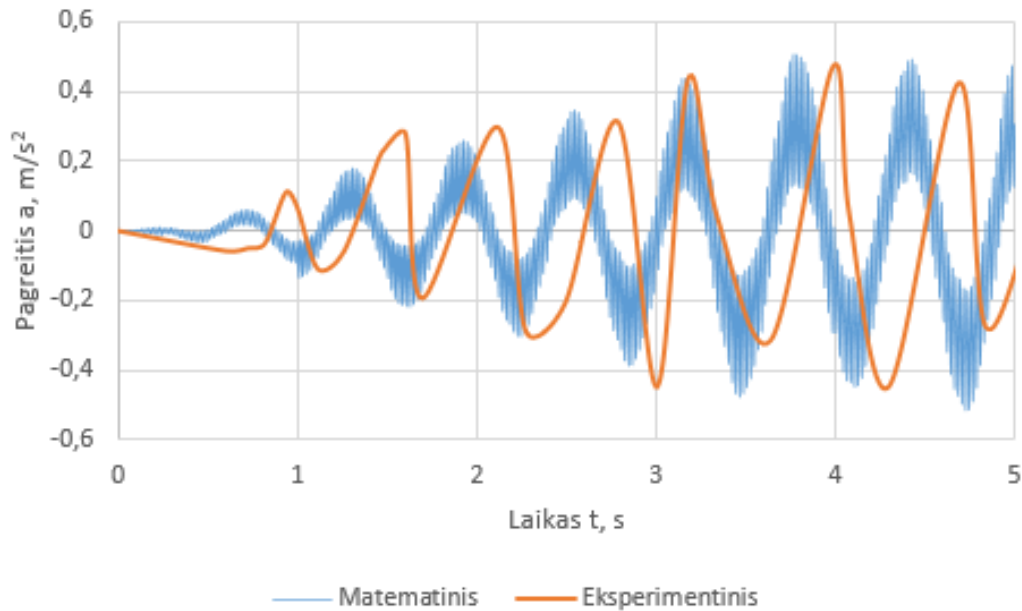
Važiavimo trinkelėmis, paklotomis skersai judėjimo krypties, matematinio modeliavimo ir praktinio eksperimento poslinkių rezultatų palyginimas matomas 32 paveiksle. Iš paveikslo matoma, kad grafikai yra artimi vienas kitam. Praktinio eksperimento poslinkiai nėra tobula sinusoidė, bet labai artima jai. Važiavimo pradžioje matomas fazės skirtumas, tačiau nusistovėjus važiavimo greičiui grafikų dažniai sutampa.

Matematiškai apskaičiuota ir realiomis sąlygomis užfiksuota vibracijų amplitudė skiriasi, dėl realaus kelio netobulumų. Važiuojant atkarpa, kurioje įdubimai tarp plytelių mažesni, nei numatyti simuliacijoje, gaunamas rezultatas, kad nepasiekiamą teorinę amplitudę. Didžiausias skirtumas tarp teorinės ir eksperimentinės amplitudės 0,0012 m (10 %),



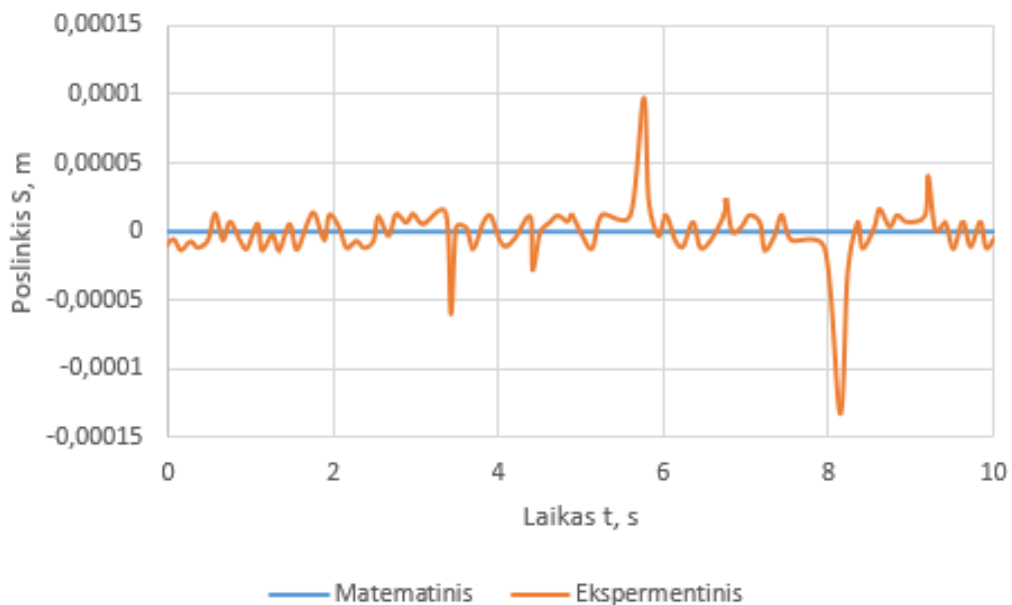
32 pav. Eksperimentinių ir matematinių poslinkio rezultatų palyginimas važiuojant skersai trinkelėmis
klota danga

Elektrinio paspirtuko judėjimo kelio danga, klota trinkelėmis skersai važiavimo krypties, pagreičių rezultatų palyginimas matomas 33 paveiksle. Iš grafiko galima teigti, kad rezultatai tendencingai artimi. Matematinio modeliavimo ir eksperimentinio važiavimo pagreičių dažniai sutampa, tačiau prasilenkia laike. Matematinės simuliacijos rezultatai atsilieka 0,2 sekundės, lyginant su eksperimentiniais. Pagreičio amplitudės augimas eksperimentiniam tyrimui yra greitesnis, tačiau bendra tendencija yra artima matematiniam modeliui. Didžiausi fiksuojamo pagreičiai yra artimi. Matematinio modelio didžiausias apskaičiuotas pagreitis $0,48 \text{ m/s}^2$, eksperimentiškai užfiksuotas – $0,45 \text{ m/s}^2$ (skirtumas 6 %). Virpesių dažnis, kurį patiria paspirtuko vairuotojas – 1,4 Hz.



33 pav. Eksperimentinių ir matematinių pagreičio rezultatų palyginimas važiuojant skersai trinkelėmis klotą dangą

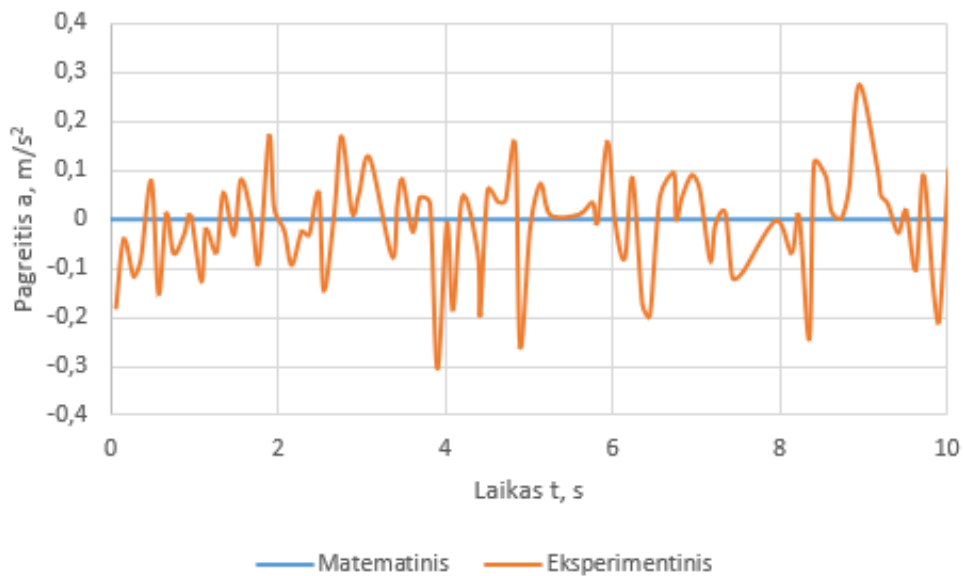
Važiavimo asfalto danga rezultatai, matomi 34 paveiksle, rodo, kad poslinkiai yra neperiodiniai ir netolygūs, tačiau jie yra labai maži. Vidutiniai poslinkiai yra 0,4 mm, o didžiausi, važiuojant per kelio įtrūkimus, siekia 1,4 mm.



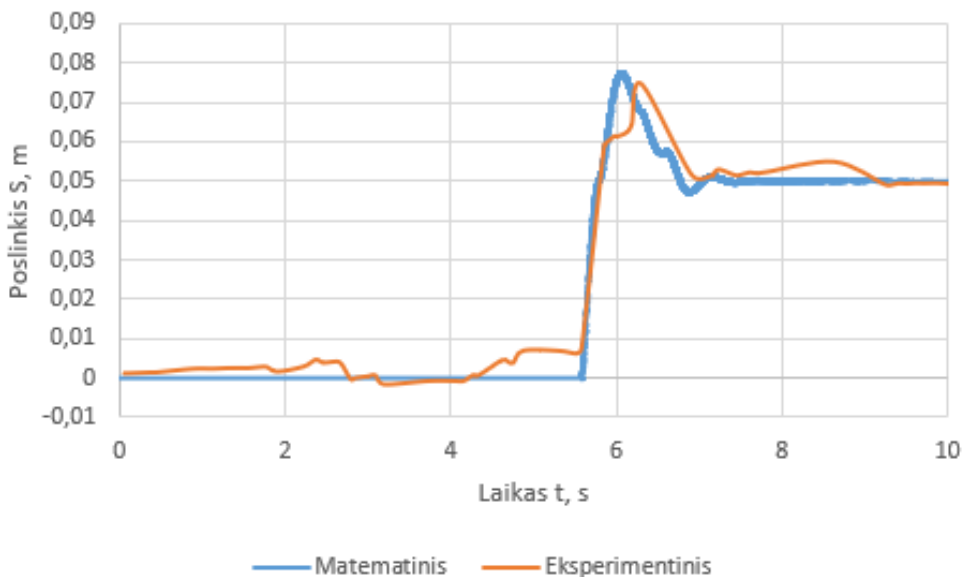
34 pav. Eksperimentinių ir matematinių poslinkio rezultatų palyginimas važiuojant asfaltuota dangą

Važiavimo asfalto danga eksperimentiškai nustatytos pagreičio reikšmės matomos 35 paveiksle. Pagreičio reikšmės svyruoja neperiodiškai, didžiausias nustatytas pagreitis – 0,3 m/s².

Matematiniam modelyje asfaltuota danga simuliuojama kaip lygus kelias, todėl pagreičiai viso važiavimo metu – 0 m/s^2 . Siekiant didesnio tikslumo ir atitikimo realioms sąlygoms, kelio paviršių reikėtų atvaizduoti kintančia funkcija. Virpesių dažnis, kurį patiria paspirtuko vairuotojas – $3,1 \text{ Hz}$.



35 pav. Eksperimentinių ir matematinių pagreičio rezultatų palyginimas važiuojant asfaltuota danga



36 pav. Eksperimentinių ir matematinių poslinkio rezultatų palyginimas važiuojant per 35 mm kliūtį

Važiavimo per kliūtį poslinkio rezultatų palyginimas matomas 37 paveiksle. Iš rezultatų galima teigti, kad teorinis ir praktinis ir matematinis eksperimentai seka tą pačią trajektoriją. Eksperimentą galima suskirstyti į 3 dalis.

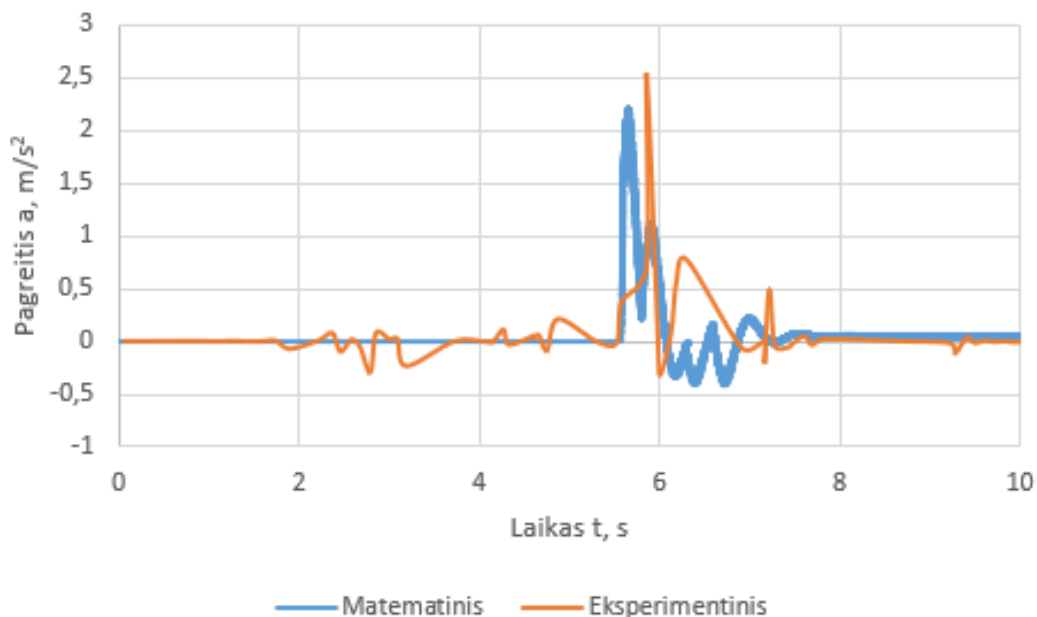
1 – Važiavimas lygia danga. Matematiniam modeliui laikoma, kad iki 5,3 sekundės paspirtukas važiuoja lygiu keliu ir tada atsitrenkia į kliūtį, realiame eksperimente tuo metu paspirtukas įsibėgėja ir važiuoja kelio danga, dėl ko atsiranda papildomi poslinkiai.

2 – Smūgis į kliūtį. Matematinėje simuliacijoje laikoma, kad kliūtis yra statmenas 35 mm aukščio žingsnis, tačiau realybėje ši forma yra kiek sudėtingesnė, todėl 6 sekundę atsiranda trumpas sistemos stabilizavimasis prieš įvykstant tolimesniam poslinkiui. Poslinkio amplitudė tarp teorinio ir praktinio eksperimento skiriasi 0,003 m (4 %).

3 – Nusistovėjimas. Abi sistemos pasiekusios piką krenta žemyn vienodu tempu ir nusistovi įvykus keliems smulkiems svyravimams.

Matematinio modelio skaičiavimu sistema po smūgio pašokusi turėtų nusileisti anksčiau ir nusistovėti mažesniame poslinkyje, bet abi sistemos seka tokią pačią kelio trajektoriją. Modelis yra artimas realybei.

Važiavimo per 35 mm kliūtį pagreičio rezultatų palyginimas pateikiamas 38 paveiksle. Grafike matomos pagreičio reikšmės iki 5,3 sekundės yra važiavimas lygia danga. 5,8 sekundę įvyksta smūgis. Praktinio tyrimo metu fiksuojamas $2,51 \text{ m/s}^2$ pagreitis, o matematinio modeliui apskaičiuojamas $2,32 \text{ m/s}^2$ (skirtumas 8%). Praktiniame ir teoriniame tyrime matoma, kaip po staigaus smūgio sistema iki 8 sekundės yra nestabili, svyruoja, o nuo 8 sekundės nusistovi.



37 pav. Eksperimentinių ir matematinių pagreičio rezultatų palyginimas važiuojant per 35 mm kliūtį

6. Komforto vertinimas ir saugos rekomendacijos

Remiantis matematinio modeliavimo ir eksperimentinio tyrimo rezultatais, pateikiamais 3 – 5 skyriuose, suformuluojamos rekomendacijos, skirtos užtikrinti važiavimo elektriniu paspirtuku saugumą ir komfortą.

Matematinio modelio ir eksperimento realiomis sąlygomis rezultatai leidžia įvertinti elektrinio paspirtuko naudojimo pavojų sveikatai. Remiantis ISO 2631-1 (2004) standartu virpesiai, kurių pagreitis yra iki $0,315 \text{ m/s}^2$ sveikatai pavojaus nekelia. Taip pat standarte nurodoma, kad šios vibracijos nesukelia diskomforto jausmo. Šią sąlygą atitinka važiavimas asfaltuota ir trinkelėmis klotomis išilgai važiavimo kryptimi dangos. Važiavimas kelio danga, kai trinkelės klojamos skersai važiavimo krypties sukelia virpesius, kurių pagreitis siekia iki $0,48 \text{ m/s}^2$. Šios vibracijos, patiriant trumpą laiką, pavojaus sveikatai nesukelia, bet patenka į žemesnę komforto klasę. Važiavimas per kliūtį neturi pasikartojančių virpesių, tačiau smūgio metu atsirandantis pagreitis $2,5 \text{ m/s}^2$ yra ypač pavojingas. Standarto vertinimu jis yra blogiausių virpesių, kurie sukelia ypač didelį nepatogumą kategorijoje. Saugumo vertinime toks pagreitis vertinamas kaip ypač pavojingas, nes net labai trumpalaikiai virpesiai gali sukelti pavojų sveikatai.

Vertinant važiavimo saugą ne ką mažiau svarbu įvertinti ir virpesių dažnį. Iš paveikslų 31 ir 33 matoma, kad svyravimų, kuriuos patiria paspirtuko vairuotojas važiuodamas trinkelėmis grįsta danga priklauso nuo klojimo krypties. Išilgai važiavimo krypties – $2,2 \text{ Hz}$, skersai – $1,4 \text{ Hz}$. Asfaltu dengta danga sukuria didžiausio dažnio – $3,1 \text{ Hz}$ virpesius. Šie virpesiai yra žemo dažnio, nesutampa su žmogaus kūno natūraliaisiais dažniais, todėl rizikos sveikatai ir gyvybei nekelia.

Elektrinio paspirtuko pneumatine padanga atlieka slopinimą efektyviai važiuojant nelygia danga. Aukšto dažnio kelio paviršiaus nelygumai paverčiami žemo dažnio.

Paviršiai sudaryti iš periodiškai atsikartojančių elementų, turėtų būti projektuojami parenkant kiek įmanoma didesnio išilginio matmens grindinio elementus. Tyrime matoma aiški vibracijų amplitudės mažėjimo tendencija, didinant trinkelės dydį. Tyrimo metu vertinama skirtinga dangos išdėjimo kryptis. Dėl stačiakampių trinkelės formos, kai plotis nuo ilgio skiriasi 2 kartus galima daryti prielaidą, kad paviršiaus nelygumų periodiškumas gali kartais sumažinti patiriamas vibracijas.

Esant galimybei naudoti asfaltą kelio dangai. Periodinių nelygumų nebuvimas leidžia užkirsti kelią rezonansinių dažnių atsiradimui. Dangos lygumas užtikrina didžiausią komfortą važiuojant.

Nuvažiavimo ir užvažiuavimo ant šaligatvio aukštis yra kritiškai svarbu paspirtukininko saugumui. Tokios kelių sankirtos turėtų būti projektuojamos maksimaliai sumažinant atsirandančios kliūtys dydį. Jei negalima išvengti didelio aukščių skirtumo, tokiose vietose turėtų būti įrengiami užvažiuavimai, leidžiantys išvengti staigaus smūgio į kliūtį. Vairuotojui rekomenduojama prieš tokią kliūtį mažinti greitį, o reikalui esant visai sustoti ir rankomis perkelti transporto priemonę.

Vairuotojui rekomenduojama naudoti saugos priemones. Tyrimo metu nustatyta, kad kelio susikirtimo vietoje esančios kliūtys gali būti ypač pavojingos sistemos stabilumui. Taip pat važiavimas periodiškai nelygia danga gali tapti rezonansiniu ir išbalansuoti sistemą. Sistemai tapus nevaldoma išauga tikimybė nukristi ir susižaloti, Siekiant sumažinti rimtų traumų galimybes būtina naudoti asmeninės apsaugos priemones.

IŠVADOS

1. Pagal išnagrinėtus literatūros šaltinius, galima teigti, kad elektriniai paspirtukai kelia didesnę sužeidimų riziką nei kitas transportas. Didžioji dalis sužeidimų atsiranda nukritus nuo elektrinio paspirtuko. Viena pagrindinių nukritimo priežasčių – nelygumai, tokie kaip duobės ir trinkelėlių tarpai. Jie sukelia dinامينius krūvius, kurie gali sutrikdyti paspirtuko balansą, todėl viso važiavimo metu būtina užtikrinti sistemos stabilumą.

2. Sukurtas matematinis modelis, simuliuojantis elektrinio paspirtuko patiriamus virpesius važiuojant skirtingomis dangomis. Modelis pritaikytas atlikti tyrimus keičiant važiavimo parametrus ir kelio dangą. Gaunami rezultatai yra artimi važiavimui realiomis sąlygomis.

3. Trinkelėlių klojimo kryptis turi didelę įtaką važiavimo komfortui. Skersai suklotos trinkelės sukelia 3 kartus didesnes vibracijas nei išilgai. Eksperimentai parodė, kad skersai trinkelėlių važiuojant (24,39 Hz dažniu) vibracijų amplitudė siekė 14 mm, o išilgai (13,68 Hz) – tik 5 mm. Tai rodo, kad trinkelėlių klojimo kryptis turi esminę įtaką vartotojo patiriamam diskomfortui.

4. Asfalto danga užtikrina minimalų diskomfortą Važiavimo asfaltu metu fiksuoti poslinkiai buvo tik 0,14 mm, o vibracijų dažnis neperiodiškas. Tai patvirtina, kad lygios dangos yra optimalios elektriniams paspirtukams, nes jų poveikis komfortui yra nereikšmingas.

5. Pneumatinės padangos nepakankamai slopina aukšto dažnio vibracijas Matavimai parodė, kad trinkelėmis važiuojant išilgai ir skersai, natūralusis sistemos dažnis gaunamas atitinkamai 2,5 Hz ir 1,4 Hz. Gautas rezultatas buvo daug mažesnis už kelio sužadavimo dažnį 13,68 Hz ir 24,39 Hz. Didžiausią pavojų sistemos stabilumui ir vairuotojo saugumui sukelia smarkiai išauganti vibracijų amplitudė.

6. 35 mm aukščio kliūtys sukelia didžiulius (74 mm) poslinkius. Smūgis į tokią kliūtį važiuojant 10 km/h greičiu lemia staigų paspirtuko pakilimą, kurio metu prarandamas kontaktas su keliu. Staigus smūgis ir šuolis išbalansuoja sistemą ir sukelia riziką negriūti bei susižeisti.

7. Pagreičių analizė atskleidė, kad važiuojant keliu, grįstu trinkelėmis išilgai važiavimo kryptimi ir asfaltuota kelio danga, vairuotojas nepatiria diskomforto. Pagrečio reikšmė neviršija $0,315 \text{ m/s}^2$. Važiuojant keliu, grįstu trinkelėmis skersai važiavimo kryptimi, nustatytos $0,48 \text{ m/s}^2$ pagrečio reikšmės rodo, kad yra sukeliama smulkus diskomfortas. Važiavimo per kliūtį patiriamas $2,5 \text{ m/s}^2$ pagreitis yra pavojingas sistemos stabilumui ir vairuotojo sveikatai.

8. Matematinio ir eksperimentinio tyrimo rezultatai sutapo su 1,6–10 % paklaida. Validavimas atskleidė, kad modelio prognozės apie poslinkius bei pagreičius važiuojant trinkelėmis ir per kliūtis buvo tikslios:

- Išilgai trinkelių: poslinkis 10 % skirtumas (0,4 mm).
- Išilgai trinkelių: pagreitis 1,6 % skirtumas (0,004 m/s²).
- Skersai trinkelių: poslinkis 10 % skirtumas (1,2 mm).
- Skersai trinkelių: pagreitis 6 % skirtumas (0,04 m/s²).
- 35 mm kliūtis: poslinkis 4 % skirtumas (0,003 m).
- 35 mm kliūtis: pagreitis 8 % skirtumas (0,19 m/s²).

LITERATŪROS ŠALTINIAI

- Arslan, E., & Uyulan, Ç. (2022). Analysis of an e-scooter and rider system dynamic response to curb traversing through physics-informed machine learning methods. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 237(7), 1555 – 1571. <https://doi.org/10.1177/09544070221100111>
- Asperti, M., Vignati, M., & Braghin, F. (2022). Modelling of the Vertical Dynamics of an Electric Kick Scooter. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(7), 9266–9274. <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3098438>
- Asperti, M., Vignati, M., & Braghin, F. (2022). Modeling of the Vertical Dynamics of a Kick e-Scooter on Distributed Road Irregularity. Iš *Advances in Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks II* (pp. 180–190). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-07305-2_99
- Bhuiyan, M. H. U., Fard, M., & Robinson, S. R. (2022). Effects of whole-body vibration on driver drowsiness: A review. *Journal of Safety Research*, 81, 175–189. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2022.02.009>
- Bogdevičius, M. (2012). *Transporto priemonių dinamika*. Technika.
- Brunner, P., Locken, A., Denk, F., Kates, R., & Huber, W. (2020). Analysis of experimental data on dynamics and behavior of e-scooter riders and applications to the impact of automated driving functions on urban road safety. Iš *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, (pp, 219–225). <https://doi.org/10.1109/IV47402.2020.9304835>
- Cano-Moreno, J.D., Islán, M.E., & Blaya, F.(2020). E-scooter Vibration Impact on Driver Comfort and Health. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 9, 1023–1037. <https://doi.org/10.1007/s42417-021-00280-3>
- Cossalter, V., Doria, A., Garbin, S., & Lot, R. (2006). Frequency-domain method for evaluating the ride comfort of a motorcycle. *Vehicle System Dynamics*, 44(4), 339–355. <https://doi.org/10.1080/00423110500420712>
- Garman, C., Como, S., Campbell, I., & Wishart, J. (2020). Micro-Mobility Vehicle Dynamics and Rider Kinematics during Electric Scooter Riding. *SAE Technical Paper*, 2020(01). 16. <https://doi.org/10.4271/2020-01-0935>.
- Gillespie, T. (2021). Fundamentals of Vehicle Dynamics. *Michigan: SAE International*

- Stigson, H., Malakuti, I., & Klingegård, M. (2021). Electric scooters accidents: Analyses of two Swedish accident data sets. *Accident Analysis & Prevention*, *163*, 106466. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106466>
- Gorges, C., Öztürka, K., & Liebich, R. (2017). Customer loads of two-wheeled vehicles. *Vehicle System Dynamics*, *55*(12), 1842–1864. <https://doi.org/10.1080/00423114.2017.1335874>
- Yavuz, B. G., Temel, T. Z., Satilmis D. S., Guven, R., & Colak, S. (2021). Analysis of electric scooter injuries admitted to the emergency service. *Irish Journal of Medical Science*, *191*, 915–918. <https://doi.org/10.1007/s11845-021-02628-w>
- Kazemzadeh, K., Haghani, M., & Speri, F. (2023). Electric scooter safety: An integrative review of evidence from transport and medical research domains. *Sustainable Cities and Society*, *89*, 11. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104313>
- Kilic, F.; & Hilsmann, J. (2016). Application and Improvement of the TRRL (Transport and Road Research Laboratory) High-Speed Laser Profilometer Algorithm with Sensor Fusion, IFAC. *IFAC (International Federation of Automatic Control) PapersOnLine*, *49*(15), 260–265. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.761>
- Konsultacijų bankas. (2025, April 25). *Validacija*. <https://www.vlkk.lt/konsultacijos/5010-validacija>.
- Leoni, J., Tanelli, M., Strada, S. C., & Savaresi, S. M. (2022). Assessing e-scooters safety and drivability: a quantitative analysis. *IFAC Symposium on Advances in Automotive Control*, *55*(24), 260–265. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.294>
- Lietuvos Respublikos Seimas. (2000). Lietuvos Respublikos saugaus eismo automobilių keliais įstatymas. (2000, sausio 1, Nr, VIII-2043). <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.111999/asr>
- Lietuvos standartizacijos departamentas. (2004). *Vibracijos, veikiančios visą žmogaus kūną, poveikio įvertinimas. 1 dalis. Bendrieji reikalavimai (ISO 2631-1:1997)*.
- Malinovski, J. (2011). *Kelių asfalto dangos plyšių didėjimo dinamika ir įtaka automobilių eismo parametrams* [Baigiamasis masgistro darbas, Vilniaus Gedimino technikos universitetas]. Lietuvos akademinė elektroninė biblioteka. <https://talpykla.elaba.lt/elaba-fedora/objects/elaba:1902833/datastreams/MAIN/content>

- Matsumoto, Y., & Griffin, M. (2003). Mathematical models for the apparent masses of standing subjects exposed to vertical whole-body vibration. *Journal of Sound and Vibration*, 260(3), 431 – 451. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(02\)00941-0](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(02)00941-0)
- Mi Electric Scooter Pro 2. (2025, April 19). Xiaomi. <https://www.mi.com/global/product/mi-electric-scooter-pro-2-mercedes-amg-petronas-f1-team-edition/specs/>.
- Pacejka, H. (2012). *Tire and Vehicle Dynamics*. (3-oji laida). Butterworth-Heinemann.
- Namiri, N. K., Lui, H., Tangney, T., Allen, I. E., Cohen, A. J., & Breyer, B. N. (2020). Electric scooter injuries and hospital admissions in the United States, 2014–2018. *JAMA Surgery*, 155(4), 357 – 359. <https://doi.org/10.1001/jamasurg.2019.5423>
- Posirisuk, P., Baker, C., & Ghajari, M., (2022). Computational prediction of head-ground impact kinematics in e-scooter falls. *Accident Analysis and Prevention*, 167. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2022.106567>
- Rix, K., Demchur, N. J., Zane, D. F., & Brown, L. H. (2021). Injury rates per mile of travel for electric scooters versus motor vehicles. *The American Journal of Emergency Medicine*, 40, 166 – 168. <https://doi.org/10.1016/j.ajem.2020.10.048>
- Souza, R. O., Neto, S. D., & Farias, M. M. (2006). Improving Pavements With Long-Term Pavement Performance: Products for Today and Tomorrow. *International Contest on Long-Term Pavement Performance Data Analysis*, 103.
- Walton, T., Torija, A. J., & Elliott, A. S. (2022). Development of electric scooter alerting sounds using psychoacoustical metrics. *Applied Acoustics*, 201. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.109136>