



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
TRANSPORTO INŽINERIJOS FAKULTETAS
AUTOMOBILIŲ INŽINERIJOS KATEDRA

Lukas Balčiūnas

ELEKTROMOBILIŲ ĮSIBĖGĖJIMO DINAMIKOS TYRIMAS
RESEARCH OF ACCELERATION DYNAMICS OF ELECTRIC CARS

Baigiamasis magistro darbas

Transporto inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX058

Automobilių transporto inžinerijos specializacija

Transporto inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2024

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

TRANSPORTO INŽINERIJOS FAKULTETAS

AUTOMOBILIŲ INŽINERIJOS KATEDRA

Lukas Balčiūnas

ELEKTROMOBILIŲ ĮSIBĖGĖJIMO DINAMIKOS TYRIMAS
RESEARCH OF ACCELERATION DYNAMICS OF ELECTRIC CARS

Baigiamasis magistro darbas

Transporto inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX058

Automobilių transporto inžinerijos specializacija

Transporto inžinerijos studijų kryptis

Vadovas _____prof. dr. Edgar Sokolovskij_____

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, pavardė)

Lietuvių kalbos konsultantė _____lekt. Angelika Petrėtienė_____

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, pavardė)

Vilnius, 2024

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
TRANSPORTO INŽINERIJOS FAKULTETAS
AUTOMOBILIŲ INŽINERIJOS KATEDRA

Studijų kryptis: Transporto inžinerija

Studijų programa: Transporto inžinerija , valstybinis kodas 6211EX058

Specializacija: Automobilių transporto inžinerija

TVIRTINU

Katedros vedėjas

Saugirdas Pukalskas

2024-05-21

MAGISTRO BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS

Nr. ATfm-22-1533

Vilnius

Studentas (-ė): Lukas Balčiūnas

Baigiamojo darbo tema: Elektromobilių įsibėgėjimo dinamikos tyrimas

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas pagal numatytą studijų kalendorinį grafiką.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Baigiamojo darbo užduotis:

Įvadas. 1. Literatūros šaltinių apžvalga. 2. Transporto priemonių įsibėgėjimo dinamikos analizė, įvertinant elektromobilių įsibėgėjimo proceso specifiką. 3. Tyrimų atlikimo metodika. 4. Elektromobilių įsibėgėjimo dinamikos eksperimentinių tyrimų rezultatai ir jų analizė. 5. Išvados. Literatūra.

Vadovas profesorius Edgar Sokolovskij

Vilniaus Gedimino technikos universitetas Transporto inžinerijos fakultetas Automobilių inžinerijos katedra		ISBN Egz. sk. Data	ISSN
---	--	-------------------------------------	------

Antrosios pakopos studijų Transporto inžinerijos programos magistro baigiamasis darbas	
Pavadinimas	Elektromobilių įsibėgėjimo dinamikos tyrimas
Autorius	Lukas Balčiūnas
Vadovas	Edgar Sokolovskij

	Kalba: lietuvių
--	------------------------

Anotacija Baigiamajame magistro darbe atlikti tyrimai, susiję su elektromobilių įsibėgėjimo dinamika keičiant važiavimo režimus. Panaudotas elektromobilio matematinis modelis. Nustatyti skirtingų konstrukcijų elektromobilių įsibėgėjimo parametrai naudojant pasirinktą matavimo įrangą. Išanalizuoti šios tematikos moksliniai straipsniai, tai leido nustatyti analogiškų atliktų tyrimų apimtį. Įvertintas elektromobilio įsibėgėjimo procesas ir dinamikos specifiška. Sudaryta eksperimentinių tyrimų metodika ir atliktas įsibėgėjimo dinamikos eksperimentinis tyrimas, įvertinant elektromobilių įsibėgėjimo pagreičius važiuojant skirtingais įsibėgėjimo režimais, nustatyta jų priklausomybė nuo elektromobilio techninių parametrų. Atlikta išsami rezultatų analizė ir apibendrinimas. Pateiktos lyginamosios išvados. Darbą sudaro: Pirmoji darbo dalis susideda iš teorinės apžvalgos, teorinės dinamikos apžvalgos bei literatūros ir mokslinių publikacijų apžvalgos. Antrojoje baigiamojo darbo dalyje sudarytas ir aprašytas matematinis elektromobilio modelis, sudaryta eksperimentinio tyrimo metodika. Trečioji dalis skirta eksperimentiniam tyrimui ir gautiems rezultatams analizuoti. Ketvirtoje dalyje pateikiami visų bandymų rezultatai ir jų analizė. Darbo apimtis – 78 p. teksto be priedų, 4 pagrindiniai skyriaus, 37 paveikslai, 1 lentelė, 36 bibliografiniai šaltiniai, priedai.

Prasminiai žodžiai: elektromobilis, dinamika, matematinis modelis, įsibėgėjimas, įsibėgėjimo pagreitis, įsibėgėjimo parametrai, įsibėgėjimo priklausomybė, techniniai parametrai, akumuliatorių baterijos, elektromobilio traukos savybės.
--

Vilnius Gediminas Technical University Faculty of Transport Engineering Department of Automobile Engineering		ISBN Copies No. Date-.....-.....	ISSN
Master Degree Studies Transport Engineering study programme Master Graduation Thesis			
Title	Research of acceleration dynamics of electric cars		
Author	Lukas Balčiūnas		
Academic supervisor	Edgar Sokolovskij		
		Thesis language: Lithuanian	
Annotation In the Master's final thesis, research was carried out on the acceleration dynamics of electric vehicles when changing driving modes. A mathematical model of an electric vehicle has been used. The acceleration parameters of different electric vehicle designs were determined using selected measuring equipment. Scientific articles on this topic were analyzed, which allowed to determine the scope of similar studies carried out. The acceleration process and dynamics specificity of the electric vehicle were evaluated. The methodology of experimental research was developed and an experimental study of acceleration dynamics was carried out, assessing the accelerations of electric vehicles in different acceleration modes, and determining their dependence on the technical parameters of the electric vehicle. A detailed analysis and generalization of the results is carried out. Comparative conclusions are presented. The work consists of: The first part of the thesis consists of a theoretical review, a review of theoretical dynamics and a review of literature and scientific publications. In the second part of the thesis, a mathematical model of an electric vehicle is used and described, and an experimental methodology is developed. The third part is devoted to the experimental investigation and the analysis of the results obtained. The fourth part presents the results of all the tests and their analysis. The thesis consists of 78 pages of text without appendices, 4 main chapters, 37 figures, 1 table, 36 bibliographical references and appendices.			
Keywords: electric vehicle, dynamics, mathematical model, acceleration, acceleration, acceleration parameters, acceleration dependence, technical parameters, battery packs, traction properties of electric vehicle.			

Turinys

Paveikslų sąrašas	8
Lentelių sąrašas	10
Įvadas	11
1. Mokslinių publikacijų analizė ir apibendrinimas	13
2. Teorinė dinamikos apžvalga.....	29
2.1. Išilginė dinamika	30
2.2. Automobilio posvyrio kampo įtaka įsibėgėjimui	32
2.3. Aerodinaminių jėgų poveikis.....	32
2.4. Maksimalios akceleracijos nustatymas.....	33
2.5. Trinties apribojimai įsibėgėjimui	34
2.6. Vienos ašies pavaros akceleracija	35
2.7. Optimalus važiavimo jėgų pasiskirstymas	36
2.8. Skersinė dinamika	36
2.9. Rato slydimo įtaka, jėgos padangose.....	37
2.10. Šoniniai slydimai	38
2.11. Svorio centro įtaka dinamikai.....	40
2.12. Transporto priemonės dinamika ir svorio centro santykio įtaka	41
2.13. Elektromobilių konstrukciniai ypatumai	42
3. Elektromobilio matematinis modelis.....	45
3.1. Elektromobilio matematinio modelio simuliacijų duomenys.....	46
3.2. Virtualaus elektromobilio modelio įsibėgėjimas.....	47
3.3. Elektromobilio matematinio modelio įsibėgėjimo priklausomybė nuo įkrovos ...	48
4. Elektromobilių įsibėgėjimo eksperimentinis tyrimas	52
4.1. Tyrimo metodika	54
4.2. Elektromobilių techninės charakteristikos.....	57

4.3.	Eksperimentinio tyrimo matavimo prietaisai	58
4.4.	Bandymų rezultatai.....	60
4.5.	Elektromobilių įsibėgėjimo pagreičių kitimas.....	60
4.6.	Elektromobilio „VW eUP“ įsibėgėjimo pagreičių kitimas esant žemai įkrovai ...	64
4.7.	Elektromobilio „Peugeot e-2008“ įsibėgėjimo pagreičių kitimas esant žemai įkrovai	66
4.8.	Elektromobilio „VW ID.4“ įsibėgėjimo pagreičių kitimas esant žemai įkrovai ...	68
4.9.	Elektromobilių įsibėgėjimo parametrų palyginimas su hibridiniu automobiliu	70
	Išvados.....	72
	Literatūros šaltiniai.....	73
	PRIEDAI	77

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Ratų praslydimo koeficiento pokytis naudojant antrojo tipo PID valdiklį (Junwei & Baojun, 2009)	19
1.2 pav. Ratų praslydimo koeficiento pokytis naudojant pirmojo tipo PID valdiklį (Junwei & Baojun, 2009)	20
2.1 pav. Paprastas transporto priemonės modelis	30
2.2 pav. Atsirandančios jėgos transporto priemonei su pokrypiu.....	32
2.3 pav. Transporto priemonė ir aerodinaminės jėgos.....	33
2.4 pav. Masės centro padėties pokytis staigiai pajudėjus iš vietos	41
2.5 pav. Dviejų tipų elektros varikliai: sinchroninis ir asinchroninis elektros varikliai (* Nuolatiniai magnetai)	43
2.6 pav. Bešepetėlio ir komutacinio pasipriešinimo elektros variklio pagrindinė konstrukcinė sandara	43
3.1 pav. Elektromobilio matematinio modelio sudarymo algoritmas.....	45
3.2 pav. Pagrindinė sudaryto elektromobilio matematinio modelio schema.....	46
3.3 pav. Virtualaus elektromobilio pagreičio kitimas įsibėgėjimo metu 0–100 km/h režimu.....	47
3.4 pav. Elektromobilio simuliacijų įsibėgėjimo pokytis esant skirtingoms įkrovoms	48
3.5 pav. Elektromobilio simuliacijų įkrovos priklausomybė nuo laiko esant visiškai įkrovai	49
3.6 pav. Elektromobilio simuliacijų įkrovos priklausomybė nuo laiko esant 20 % įkrovai ..	49
3.7 pav. Elektromobilio simuliacijų įkrovos priklausomybė nuo laiko esant 10 % įkrovai ..	50
3.8 pav. Virtualaus elektromobilio įtampos pokytis baterijoje esant skirtingoms įkrovoms.	50
3.9 pav. Virtualaus elektromobilio elektros srovės pokytis baterijoje esant skirtingoms įkrovoms	51
4.1 pav. Sudaryti važiavimo režimai eksperimentui atlikti. I, II, III – važiavimo režimai, kur I – 0–100 km/h, II – 50–100 km/h ir III – 50 metrų įsibėgėjimas	53
4.2 pav. Elektromobilių įsibėgėjimo parametrų nuo įkrovos lygio eksperimentinio tyrimo eiga	53
4.3 pav. Sudarytas važiavimo maršrutas visiems važiavimo režimams (Sudaryta pagal Google Maps)	56
4.4 pav. Atkarpa, skirta I važiavimo režimui (Sudaryta pagal Google Maps)	56
4.5 pav. Atkarpa, skirta II važiavimo režimui (Sudaryta pagal Google Maps)	57
4.6 pav. Atkarpa, skirta III važiavimo režimui (Sudaryta pagal Google Maps).....	57

4.7 pav. „XL Meter“ prietaisas kairėje (Šaltinis: Steffens GmbH) ir tvirtinimo vieta automobilyje bandymo metu dešinėje (Sudaryta darbo autoriaus)	58
4.8 pav. Prietaiso tvirtinimo vieta transporto priemonėje (Šaltinis: Steffens GmbH).....	59
4.9 pav. „Matlab“ akcelerometro aplikacijos iškarpa (Sudaryta darbo autoriaus)	59
4.10 pav. 0–100 km/h elektromobilių įsibėgėjimo palyginimas.....	61
4.11 pav. 50–100 km/h elektromobilių įsibėgėjimo palyginimas.....	62
4.12 pav. Bandomų elektromobilių 50 metrų įsibėgėjimas, kai akceleratorius iki galo nuspaustas.....	63
4.13 pav. Elektromobilio „VW eUP“ 0–100 km/h lyginamasis įsibėgėjimas esant skirtingoms įkrovoms	64
4.14 pav. Elektromobilio „VW eUP“ 50–100 km/h lyginamasis įsibėgėjimas esant skirtingoms įkrovoms	65
4.15 pav. Elektromobilio „Peugeot e-2008“ 0–100 km/h lyginamasis įsibėgėjimas esant skirtingoms įkrovoms	66
4.16 pav. Elektromobilio „Peugeot e-2008“ 50–100 km/h lyginamasis įsibėgėjimas esant skirtingoms įkrovoms	67
4.17 pav. Elektromobilio „VW ID.4“ 0–100 km/h lyginamasis įsibėgėjimas esant skirtingoms įkrovoms	68
4.18 pav. Elektromobilio „VW ID.4“ 50–100 km/h lyginamasis įsibėgėjimas esant skirtingoms įkrovoms	69
4.19 pav. 0–100 km/h elektromobilių ir hibridinio automobilio įsibėgėjimo palyginimas ..	70
4.20 pav. 50–100 km/h elektromobilių ir hibridinio automobilio įsibėgėjimo palyginimas .	71

Lentelių sąrašas

4.1 lentelė Elektromobilių tyrimo duomenys (Sudaryta pagal Auto-Data.net)	57
--	----

Ivadas

Elektromobilių plėtra yra svarbus ir sparčiai augantis reiškinys, kuris formuoja ateities transporto sektorių. Naujausi technologiniai pasiekimai, didėjantis aplinkos apsaugos sąmoningumas ir energijos efektyvumo siekimas skatina vis didesnę žmonių susidomėjimą elektromobiliais. Šis žymus pokytis automobilių industrijoje ne tik pakeičia tradiciniais degalais varomas transporto priemones, bet ir lemia įvairių sektorių pokyčius, įskaitant energetiką, urbanistiką ir ekonominę plėtrą.

Sparčiai besiplečiantis elektromobilių parkas turi daug potencialių pranašumų prieš įprastus vidaus degimo variklio varomus automobilius. Nėra išmetamųjų dujų keliuose, nekeliami tiek triukšmo taršos miestuose, elektromobilių veikimas neparemtas iškastiniu kuru. Taigi, sparčiai griežtėjantys reikalavimai transporto sektoriui ekologijos klausimais atveria vis didesnę galimybių elektromobiliams bei kuro elementų elektromobiliams. Labai geras pavyzdys – Europos žaliasis kursas (angl. *Green Deal*). Kaip žinoma, klimato kaita ir aplinkos būklės blogėjimas kelia egzistencinę grėsmę ne tik Europai, bet ir pasauliui. Europos žaliasis kursas teigia padėsiantis įveikti šiuos iššūkius ir prisidės prie to, kad Europos Sąjunga taptų modernia, efektyviai išteklius naudojančia ir konkurencinga ekonomika, o vienas pagrindinių siekių – iki 2050 metų grynasis šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekis būtų lygus nuliui (Siddi, 2020). Be to, priimta Europos Parlamento direktyva 2019/1161 dėl aplinkosaugos skatinimo apibrėžia įsipareigojimus ir paramos formas įsigyjant aplinką tausojančias transporto priemones (Europos Parlamentas, 2019). Būtent toks užsibrėžtas tikslas ir siekis privers smarkiai pasikeisti transporto priemonėms, kursuojančioms po šį žemyną. Tai paskatinimas greičiau žengti atsinaujinančios energetikos link ir praplėsti elektromobilių skaičių. Suprantama, kad ne tik ekologija, kenksmingos išmetamosios dujos, griežti reikalavimai gamintojams turi būti didžiausias rūpestis, tačiau sparčiai atsirandančių elektromobilių manevringumas esant skirtingoms sąlygoms ir saugumas simuliuojant įvairius eksploataavimo režimus, avarines situacijas taip pat labai svarbus faktorius. Siekiant geriausių rezultatų vis diegiamos naujos sistemos, pagalbinės vairavimo priemonės ir asistentai. Ne išimtis ir elektromobiliai, čia dar ir geresnės galimybės įdiegti valdymo bei autonomines sistemas, kurios užtikrintų saugų ir komfortiškesnę važiavimą kelionės metu. Ne tik dėl Europos žaliojo kurso, tačiau ir dėl patogumo, spėjama, kad ateityje elektromobilius bus dar labiau renkama trumpiems ir miesto režimo važiavimams. Elektromobiliai ne tik keičia tai, kaip mes judame, bet ir turi didelį poveikį visuomenei, technologijoms ir aplinkai. Būtent šiame magistro darbo tyrime dėl artėjančios smarkios plėtros elektromobilių srityje nagrinėjamos ir analizuojamos mokslinės publikacijos įsibėgėjimo dinamikos tematika, vertinamas elektromobilio įsibėgėjimo procesas ir dinamikos specifika, siekiant suprasti,

išsiaiškinti galimus trūkumus, numatyti patobulinimus. Tiksliau įvertinti teorinės analizės rezultatus pasitelkiamas eksperimentinis tyrimas, kuriuo siekiama įvertinti elektromobilių įsibėgėjimo pagreičius važiuojant skirtingais įsibėgėjimo režimais, jų priklausomybę nuo elektromobilio techninių parametrų: elektros variklių išdėstymo, naudojamų elektros variklių galios, elektromobilio baterijų talpos, tyrimo metu esančio įkrovos lygio, aplinkos sąlygų. Įvertintas greito įsibėgėjimo pranašumas kritinėse situacijose. Išanalizuoti atlikto tyrimo rezultatai, suformuluotos ir apibendrintos baigiamojo darbo išvados.

Tikslas: atlikus eksperimentinius tyrimus ir panaudojus matematinį elektromobilio modelį, nustatyti elektromobilio įsibėgėjimo pagreičio reikšmes, dėsningumus, palyginti su hibridinių automobilių įsibėgėjimo pagreičio parametrais.

Tyrimo aktualumas: elektromobiliams sparčiai įžengiant į rinką, norima pasiekti vis geresnių manevringumo rezultatų, ypač perduodant didelę momentinę galią įsibėgėjant, kuri labai svarbi įsibėgėjimo ir važiavimo dinamikai. Atlikus daugiau tyrimų šiuo klausimu, galima išnagrinėti elektromobilių dinamikos tendencijas, suprasti kylančias problemas, kaip tinkamiausiai optimizuoti naudojamą energiją ir taip tausoti baterijas, nešvaistyti jų resursų. Išanalizuoti tiesioginę elektromobilio konstrukcijos įtaką įsibėgėjimui bei trūkstant specifinių parametrų surinkti duomenų tolesniems tyrimams.

Darbo objektas: darbo objektu pasirinkti elektromobiliai „VW eUP“, „Peugeot e-2008“ ir „VW ID.4“, su kuriais atliekamas tyrimas siekiant atlikti įsibėgėjimo dinamikos analizę ir įvertinti įsibėgėjimo dinamiką kintant važiavimo režimams.

Darbo uždaviniai:

- Atlikti mokslinių publikacijų analizę.
- Nustatyti elektromobilių įsibėgėjimo pagreičio reikšmes.
- Nustatyti priklausomybę, kaip keisis įsibėgėjimo rodikliai keičiantis pagrindiniams techniniams parametrams (elektromobilio svorio, varančiosios ašies, galios ir svorio santykio ir t. t.);
- Sudaryti matematinį elektromobilio modelį.
- Nustatyti elektromobilių įsibėgėjimo pagreičio kitimo tendencijas, dėsningumus.
- Nustatyti elektromobilių įkrovos lygio įtaką įsibėgėjimo parametrams.
- Atlikti lyginamąją analizę su kitų automobilių įsibėgėjimo pagreičio parametrais.

1. Mokslinių publikacijų analizė ir apibendrinimas

Apskritai dar šiandieniniuose automobiliuose apstu galimybių išstobulinti įvairiausių mazgus, o tyrinėjant dinamiką, pastebima, kad dar yra tobulintinų vietų. Inžinieriai šioje srityje atlikdami įvairius tyrimus randa spragų ar neatitikimų, kuriuos galima optimizuoti, tokiu būdu pagerinant važiavimo kokybę ir automobilio mazgų ilgalaikiškumą. Kadangi šiame baigiamajame magistro darbe aktualiausia įsibėgėjimo dinamika, pirmiausia reikia apžvelgti, kokie aktualiausi su tuo susiję tyrimai randami šių dienų mokslinėse publikacijose.

Įvairiuose moksliniuose šaltiniuose bei su įsibėgėjimo dinamika susijusiuose straipsniuose pateikiama informacija, pastabos, matavimai, eksperimentinių tyrimų rezultatai, išvados, kaip elektromobilio įsibėgėjimas padeda išvengti susidūrimų, kritinių situacijų keliuose, nuodugnai apibendrinami elektromobilio įsibėgėjimo manevringumo faktoriai posūkiuose ar esant netolygiai dangai, kintant svarbiausiems techniniams parametrams. Be to, svarbu paminėti, kad pagrindinius elektromobilio įsibėgėjimo dinamikos faktorius galima apibendrintai pateikti taip:

- Elektromobilio pagreičio dinamiką lemia elektros variklio, akumulatoriaus ir pavaros sąveika.
- Elektros variklis akimirksniu perduoda sukimo momentą, užtikrindamas momentinį didelį ir sklandų pagreitį. Elektriniai varikliai turi didelį galios santykį, todėl elektromobiliai gali pasiekti didelius pagreičio rodiklius, lyginant su vidaus degimo varikliais.
- Akumuliatoriuje sukaupta energija naudojama elektros varikliui, kuris varo transporto priemonę, maitinti. Didesnė akumulatoriaus talpa reiškia, kad variklis turi daugiau energijos, todėl greičiau įgaunamas pagreitėjimas, tačiau didesnės akumuliatorių baterijos taip pat reiškia ir padidėjusią masę.
- Pavaros išdėstymas taip pat turi įtakos įsibėgėjimo dinamikai. Galiniais ratais varomi elektromobiliai paprastai pasižymi geresne sukibimo ir įsibėgėjimo charakteristika nei modeliai su priekiniais ratais, o visais ratais varomi modeliai taip pat gali pagerinti ir pasiekti pastovesnį pagreitį, paskirstydami galią visiems keturiems ratams.
- Dauguma elektromobilių turi funkciją vadinamą „regeneraciniu stabdymu“, kuri gali susigrąžinti energiją ir kaupti ją atgal į akumuliatorių stabdant. Tai gali pagerinti pagreitį, nes sukaupta energija gali būti naudojama dar sykį įsibėgėjimui.
- Elektromobilių valdymo programinė įranga taip pat gali būti optimizuota, kad pirmenybė būtų teikiama greitėjimui, valdant galios paskirstymą varikliui ir ratams bei valdant regeneracinę stabdžių sistemą.

Apskritai elektromobilio įsibėgėjimo dinamiką lemia bendras elektros variklio, akumuliatoriaus, pavaros, regeneracinės stabdžių sistemos ir programinės įrangos veikimas kartu sudėjus. Taip pat prie techninių parametrų, kurie lemia geresnę dinamiką, reikia paminėti ir vairuotojo vaidmenį. Vairuotojas gali paveikti elektromobilio įsibėgėjimo dinamiką keliais būdais:

- Tai, kaip agresyviai vairuotojas spaudžia akceleratoriaus pedalą, gali labai paveikti įsibėgėjimą. Agresyvesnė įvestis padidins pagreitį.
- Jei elektromobilyje yra pavarų dėžė arba kintama perdavimo sistema, vairuotojo pavarų pasirinkimas taip pat gali turėti įtakos įsibėgėjimui. Žemesnės pavaros suteiks daugiau sukimo momento ratams, todėl įsibėgėjimas bus greitesnis.
- Bendras vairuotojo vairavimo stilius taip pat gali turėti įtakos elektromobilio įsibėgėjimui. Pavyzdžiui, agresyvesnis vairuotojas gali sunaudoti daugiau turimos akumuliatoriaus energijos, todėl įsibėgės greičiau.
- Vairuotojo gebėjimas numatyti eismo ir kelio sąlygas gali padidinti elektromobilio įsibėgėjimą. Pavyzdžiui, vairuotojas, kuris gali numatyti raudoną šviesoforo signalą, sulėtins greitį greičiau, todėl elektromobilis galės pasinaudoti regeneracinio stabdymo pranašumais ir kaupti energiją atgal į akumuliatorių baterijas.
- Dar vienas iš faktorių tai, kad vairuotojas naudoja klimato kontrolę. Tai taip pat gali turėti įtakos įsibėgėjimui, nes ji eikvoja energiją iš akumuliatoriaus, kuri galėtų būti naudojama važiavimui ir įsibėgėjimui. Todėl galima iš karto pabrėžti ir tai, kad šaltu oru, elektromobilio efektyvumas smarkiai turėtų kristi.

Apibendrinant galima teigti, kad vairuotojas atlieka svarbų vaidmenį elektromobilio įsibėgėjimo dinamikoje, nes spausdamas akceleratoriaus pedalą, pasirinkdamas pavaras, turėdamas savitą vairavimo stilių, eismo numatymą ir kontroliuodamas kitas funkcijas, taip nulemia elektromobilio elgseną kelyje.

Atliktame tyrime, siekiant įvertinti elektromobilio įtaką realiuose keliuose, kurį atliko Vienos technologijų instituto autoriai, pabrėžia įsibėgėjimo svarbą, esminius skirtumus tarp įprasto automobilio su vidaus degimo varikliu ir elektromobilio bei pačių vairuotojų elgsenos kelyje vairuojant skirtingas transporto priemones (Nitsche et al., 2014). Atliktas tyrimas iš anksto parinktame maršrute Vienoje, Austrijoje, o tyrime dalyvavo 90 savanorių, kurie turėjo maršrutą įveikti su elektromobiliu ir su įprastu automobiliu. Važiavimas su kiekvienu automobiliu trūko apie valandą. Viskas buvo fiksuojama specialia įranga norint išsaugoti pagrindinius važiavimo parametrus, važiavimas filmuojamas bei sekamas GPS įranga.

Kaip pabrėžia autoriai, elektromobiliai neišvengiamai vis labiau integruosis į rinką, tačiau šiam reikalui įgyvendinti būtina labiau pritaikyti infrastruktūrą miestuose. Elektromobilius reikia įvertinti iš įvairių perspektyvų, pavyzdžiui, kad skleidžiama mažai triukšmo, kad pasiekiamas daug didesnis sukimo momentas, kad važiavimui įtakos turi ir energijos regeneracija (Nitsche et al., 2014). Iš tyrimo išvadų, pirmiausia reikia pažymėti, kad tarp dalyvių buvo ir tokių, kurie pirmą sykį vairuoja elektromobilį. Atlikus testus pastebėta, kad labai greitai priprantama prie važiavimo jais ir vairuotojams tai nekelia nepatogumų. Taigi, pagrindinis autorių siekis atliekant šį tyrimą buvo įvertinti esminius skirtumus tarp automobilių dinamikos skirtumų bei vairuotojų elgsenos vairuojant elektromobilį ir įprastą automobilį su vidaus degimo varikliu. Pirmojoje tyrimo dalyje pabrėžiama tyrimo metodologijos svarba, antrojoje – tyrimo dizaino ypatybės, trečiojoje – paaiškinamas testavimo maršrutas ir, žinoma, paskutinėje dalyje apibendrinamos išvados ir gautų rezultatų važiavimo dinamikai įvertinimas.

Metodologijoje vertinta:

- Pajudėjimai sankryžose (reguliuojamose ir nereguliuojamose).
- Stabdymas sankryžose.
- Pasukimas į kairę sankryžose prieš srautą.
- Važiavimas žiedinėse sankryžose.
- Važiavimas prie pėsčiųjų perėjų.
- Važiavimai posūkiuose.

Tyrimo atlikimui autoriai pasirinko naudoti iš viso 4 automobilius – 2 iš jų elektromobiliai. Buvo naudojami „Mitsubishi i-MiEV“ ir „Renault Fluence Z.E.“ elektromobiliai ir įprasti „Hyundai i10“ bei „Renault Megane Combi“. Elektromobiliams buvo nustatytas vidutinis regeneracijos lygis. Autorių sudarytas maršrutas siekė apie 43 km. Kaip teigiama atliktame autorių tyrime, buvo renkami tokie pagrindiniai duomenys: GPS duomenys, filmuojama plataus kampo lėšiu, fiksuojami judesio jutiklių rodmenys – išilginis, skersinis ir vertikalus pagreitėjimas ir lėtėjimas, posūkio greitis, sukimosi greitis ir pasvyrimo kampai.

Iš viso tyrimo metu buvo atlikta beveik 200 važiavimų, daugiau nei 200 valandų vairavimo ir daugiau nei 8000 įveiktų kilometrų. Atlikus autorių pateiktų rezultatų analizę, galima teigti, kad su elektromobiliais pasiektas daug stabilesnis greitėjimas, taip pat analogiškai pasiekiamas ir daug stabilesnis stabdymas pasitelkiant regeneravimo sistemas. Tačiau apibendrinus visus duomenis, pateikiama, kad tyrime naudotų elektromobilių išilginis pagreitėjimas labai nesiskiria nuo įprastų automobilių su vidaus degimo varikliu. Kiti pastebėti dalykai – didesnė pagreitėjimo galimybė leidžia išvengti susidūrimų, kai reikia įsilieti į srautą, tačiau kitais atvejais, važiavimas elektromobiliais

didesnių esminių skirtumų neišskyrė ir greitėjimo bei važiavimo dinamika, anot autorių, išliko panaši, dar vienas didesnis skirtumas buvo tarp automatinės, mechaninės ir elektromobilio pavaros.

Norint parengti šį magistro baigiamąjį darbą, svarbu ne tik važiavimo režimų imitavimas keliuose, bet svarbu įvertinti ir kitus važiavimo parametrus. Pavyzdžiui, kitame tyrime, kurį atliko nacionalinio Zaporožės politechnikos universiteto autoriai, išnagrinėjo masės centro pokyčio įtaką elektromobilio įsibėgėjimui. Tai buvo atlikta kompiuterinėmis simuliacijomis.

Masės centro padėtis leidžia geriau paskirstyti ratams norimą sukimo momentą ir užtikrinti optimaliausią sukibimą su kelio paviršiumi, tai, be kita ko, leidžia padidinti elektromobilio saugumą ir manevringumą, be to sumažina energijos sąnaudas (Nazarova et al., 2020). Apibendrinant galima teigti, kad šių autorių pagrindinis darbo tikslas – ištirti masės centro padėties įtaką elektromobilio dinamikai, kai keičiasi varančiųjų ratų sistema, t. y. visi, galiniai ar priekiniai ratai.

Pirmojoje tyrimo dalyje pateikiami metodai, kuriais remiantis, buvo keičiami parametrai, antrojoje – pateikiami pagrindiniai rezultatai, trečiojoje – apibendrinimas.

Autoriai matematiškai modeliavo ir skaičiavo esminius pasikeitimus po masės centro koordinatų keitimo elektromobilyje, kiekvienu atveju po tris kartus, priklausomai nuo varančiųjų ratų. Rezultatuose gauti grafikai, kuriuose galima įžvelgti geriausią kombinaciją.

Mažiausias efektyvumas įsibėgėjimo dinamikai tiesioje atkarpoje buvo pasiektas su priekiniais varančiaisiais ratais, kai masės centro padėtis buvo (3; 1).

Geriausieji rezultatai maksimaliam įsibėgėjimui ir minimaliam įsibėgėjimo laikui buvo pasiekti su galiniais varančiaisiais ratais, kai masės centro padėties koordinatės (1; 3), tačiau šiuo konkrečiu atveju pastebėta, kad gaunamos reakcijos jėgos ratuose artimos 0, o tai reiškia, kad smarkiai blogėja manevringumas (Nazarova et al., 2020).

Visi varantieji ratai, kai masės centro koordinatės perkeltos (3; 1), leido pasiekti optimaliausias reikšmes įsibėgėjimo dinamikoje, kai 60 % elektromobilio masės perkelta ant priekinės ašies.

Taigi, apibendrintai galima teigti, kad elektromobilio masės arba svorio centras gali turėti didelės įtakos pagreitėjimui ir stabilumui:

- Žemesnis masės centras gali pagerinti elektromobilio pagreitį. Taip yra todėl, kad transporto priemonės svoris pasiskirsto tolygiau, tai sumažina energijos kiekį, reikalingą transporto priemonei išjudinti. Žemesnis masės centras taip pat pagerina ratų sukibimą, leidžiantį geriau įsibėgėti.
- Žemesnis masės centras taip pat pagerina elektromobilio stabilumą. Svoris pasiskirsto tolygiau, o svorio centras – tai taškas, kuriame transporto priemonės svoris yra labiausiai koncentruotas, todėl esant žemam svorio centrui, transporto priemonė yra stabilesnė ir mažesnė tikimybė, kad ji apvirs.

- Žemesnis svorio centras taip pat pagerins elektromobilio važiavimą posūkiuose ir mažiau stabiliam kelyje. Taip yra todėl, kad svoris pasiskirsto tolygiau, o tai sumažina transporto priemonės polinkį per mažai arba per daug pasukti.
- Kad pagerintų transporto priemonės dinamiką, elektromobilių gamintojai dažnai stengiasi projektuoti elektromobilio korpusą ir išdėstyti akumulatorius taip, kad jų svorio centras būtų kuo žemesnis,

Dar vienas reikšmingas tyrimas, kuriuo galima pastebėti pokyčius elektromobilio įsibėgėjimo dinamikoje, – masės pokytis. Tyrimą atliko Latvijos motorinių transporto priemonių instituto tyrėjai, kurie siekė pabrėžti baterijų kiekio ir padėties svarbą elektromobilyje, nes svoris ir jo pasiskirstymas ant ašių nulemia dinamikos parametrus. Tyrėjai analizuoja automobilio energijos suvartojimo priklausomybę nuo paskirstyto svorio, svorio įtaką sukibimui su keliu, baterijų talpos ir svorio santykį ir įtaką elektromobilio įsibėgėjimui.

Jei elektromobilis aprūpintas moderniomis ličio jonų baterijomis, dabartinės technologijos leidžia pasiekti apie 600 km nuvažiuojamą atstumą per vieną įkrovą. Taip pat verta pabrėžti, kad toks baterijų kiekis užima ir didelę dalį vietos – 600 litrų automobilio viduje, taip pat ir bendras svoris siekia apie 2000 kg (Berjoza & Jurgena, 2017). Autoriai lygina įprasto automobilio ir elektromobilio energijos talpyklas – važiuojant su degalais, jie palaipsniui mažėja, taip pat ir svoris, deja, elektromobilyje, baterijų svoris nuo įkrovos lygio nekinta. Aprūpinus elektromobilį didesnės talpos ir sunkesnėmis baterijomis, visas svoris išauga, taip pat reikalingas ir didesnės galios elektros variklis, norint dinamiškesnio važiavimo. Lyginant tos pačios klasės automobilius, galima teigti, kad norint didesnio nuvažiuojamo atstumo, išauga jų svoris. Mažiausias toks santykis gaunamas benzininiuose ir dyzeliniuose automobiliuose, toliau hibridiniuose elektriniuose automobiliuose ir paskutiniai – elektromobiliai. Smarkiai išaugęs elektromobilio svoris ne tik pablogina eksploatacines savybes, bet ir sutrumpina važiuoklės mazgų eksploatacinį laiką (Berjoza & Jurgena, 2017).

Tyrime įvertinamas naudingumas, atsižvelgiant į specifinį elektromobilio svorį, apskaičiuojamas specifinis baterijų koeficientas, kuriuo įvertinamas baterijų paketo naudingumas. Atliktuose pirminiuose tyrimo skaičiavimuose galima pastebėti, kad nepriklausomai nuo elektromobilio klasės ir tipo, pavyzdžiui „Tesla Model S“ ir „Aixam Electric“, skaičiuojamas baterijų koeficientas išlaiko reikšmes nuo 0,25 iki 0,28. Nagrinėjant konkrečius atvejus, tyrime pastebima, kad smarkiai išaugus baterijų energijos talpai elektromobilyje, jie tampa ekonomiškai neefektyvūs (Berjoza & Jurgena, 2017).

Apibendrinant tyrimą, galima išskirti tokius pagrindinius faktus:

Atliktas skaičiavimo algoritmas buvo pritaikytas populiariausiems 30 elektromobilių modelių ir nustatytas jų baterijų energijos talpos, svorio ir nuvažiuojamo atstumo santykis. Įvertinta, kad

nepriklausomai nuo elektromobilio klasės, skaičiuojamas koeficientas nebūtinai išauga. Renkantis elektromobilį su didelės talpos baterijomis automatiškai išauga jo svoris, išauga suvartojamos energijos kiekis, didelis svoris turi įtakos manevringumui ir įsibėgėjimui.

Po išsamios mokslinės publikacijos analizės galima teigti, kad patį straipsnį ir tyrimą galima tobulinti, pateikti daugiau faktų ir esminių elektromobilių dinamikos dalykų.

Dar vienas tyrimas tiesiogiai susijęs su elektromobilio svarbiausiu komponentu – baterijomis. Tyrimą atliko Tiandzino technologijos universiteto tyrėjai, straipsnis publikuotas ICCNEA. Pagrindinis šio publikuoto tyrimo tikslas – keičiant baterijų pozicijas, dydį ir kitus esminius parametrus, nustatyti pokyčius elektromobilio dinamikai ir bendrai važiavimo kokybei. Tyrime sudarytas virtualus elektromobilio modelis su baterijomis, priekinės ir galinės važiuoklės elementais, vairavimo sistema ir kitais kėbulo elementais naudojant „Adams View“ programinę įrangą (Dong et al., 2022).

Tyrimo metu sudarytas supaprastintas elektromobilio modelis, kaip minėta prieš tai. Šis elektromobilio modelis iš viso turi 10 laisvės laipsnių, iš kurių 6 – kėbulo, 2 – priekinės važiuoklės ir 2 – galinės važiuoklės.

Esminiai atliktos simuliacijos dalykai – skersinis, išilginis pagreitis, jų pokyčiai kintant baterijų parametrams ir paslenkant baterijų svorį į skirtingas elektromobilio dalis.

Apibendrinant visą atliktą tyrimą, galima teigti, kad elektromobilio modelis, įskaitant baterijas ir kitus prieš tai minėtus komponentus, naudojant „Adams“ programinę įrangą, tinkamas elektromobilio dinamikos charakteristikoms analizuoti. Simuliacijos rezultatai parodo, kad baterijų pozicijos parametrai turi daug įtakos elektromobilio dinamikos charakteristikoms. Simuliacijoje visada imituojant vienodas važiavimo sąlygas, elektromobilio skersinis pagreitis didėja, kai baterijų ilgis ir aukštis didinamas, o talpa paliekama ta pati. Priešingai, kai baterijų plotis didinamas, elektromobilio skersinis pagreitis mažėja. Taip pat pastebėta, kad skersinis pagreitis smarkiai didėja, kai skersinis, išilginis ir vertikalūs baterijų parametrai padidinami tiek pat (Dong et al., 2022). Atliktas tyrimas rodo, kad būtent šioje srityje dar galima tobulinti elektromobilio dinamikos charakteristikas.

Labai svarbų vaidmenį elektromobilio įsibėgėjimo dinamikai turi tinkamas ratų praslydimo reguliavimas. Kuo geresnė sistema, tuo geresni rezultatai pasiekiami, todėl aktualu nagrinėti su tuo susijusius tyrimus. Konkrečiai šiam tyrimui atlikti naudojamas dviejų varančiųjų ratų ketvirčio dinaminis modelis su įsibėgėjimo praslydimo reguliavimo (angl. *Acceleration Slip Regulation* – ASR) sistemos algoritmu. Minėtoji sistema šiais laikais plačiai naudojama automobiliuose siekiant pagerinti automobilio įsibėgėjimo charakteristikas. Pagrindinis šios sistemos tikslas – stengtis išlaikyti optimalų įsibėgėjimo koeficientą nepaaukojant stabilumo ir galimybės valdyti transporto

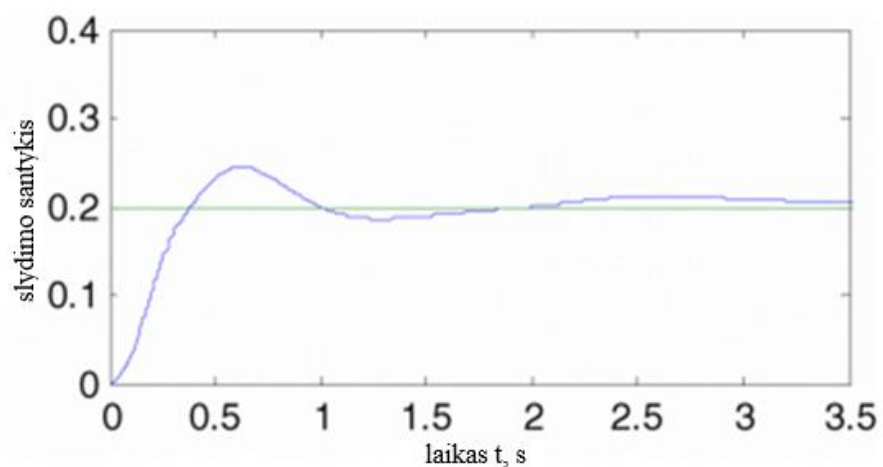
priemonę (Junwei & Baojun, 2009). Tyrimui atlikti buvo sukurtas matematinis modelis ir parinktas tinkamas programuojamas valdiklis slydimo reguliavimo sistemai imituoti, skaičiavimai atlikti „Matlab“ programa.

Pagrindiniai tyrimo tikslai:

- Sudaryti matematinį elektromobilio modelį.
- Sudaryti elektrinio variklio modelį.
- Atlikti pagrindinius teorinius skaičiavimus.
- Sudaryti rato modelį.
- Sukonfigūruoti grįžtamojo ryšio reguliatorių.

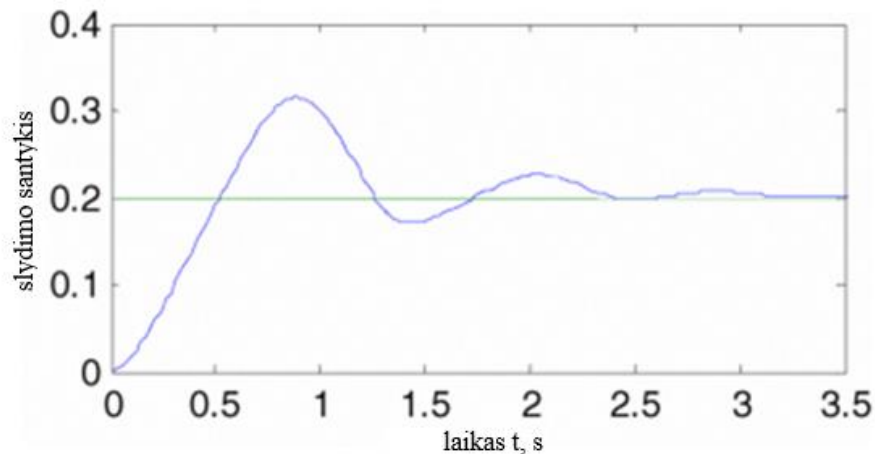
Siekiant prieš tai išvardytų tikslų, atlikti pagrindiniai skaičiavimai, įvertintos galimybės ir gauti norimo tyrimo rezultatai.

Pagrindiniai elektromobilio modelio parametrai ir koeficientai autorių buvo parinkti ir jais remiantis atlikti skaičiavimai, be to, atskirai naudoti dviejų tipų parametriškai optimizuojami grįžtamojo ryšio reguliatoriai (angl. *Proportional Integral Derivative* – PID) – neapibrėžtas ir vienakryptis.



1.1 pav. Ratų praslydimo koeficiento pokytis naudojant antrojo tipo PID valdiklį (Junwei & Baojun, 2009)

Autorių gauti rezultatai ir sudaryti grafikai rodo, kad naudojant suprogramuotą neapibrėžtąjį valdiklį, pasiekama norima ratų praslydimo koeficiento reikšmė elektromobiliui įsibėgėjant, pateikta 1.1 pav., o naudojant kitą valdiklį, gautos reikšmės pateiktos 1.2 pav.



1.2 pav. Ratų praslydimo koeficiento pokytis naudojant pirmojo tipo PID valdiklį (Junwei & Baojun, 2009)

Apibendrinant galima teigti, kad prie elektromobilio įsibėgėjimo dinamikos pagerinimo labai prisideda reikiamos sukibimo kontrolės sistemos naudojimas ir tinkamas jos sukonfigūravimas.

Analogiškai išanalizuotas kitas atliktas tyrimas, susijęs su ratų praslydimo sistema, tik šiuo atveju keturių varančiųjų ratų sistemai. Tyrimą atliko Pekino technologijos instituto tyrėjai, sukūrę teorinį modelį su „Matlab Simulink“ programine įranga. Sudarytas elektromobilio dinaminis modelis, rato ir padangos modelis, elektros variklio modelis ir slydimo dažnio apskaičiavimo modelis. Iš gautų rezultatų buvo nustatyta, kad tinkamai optimizuota ir skirtingiems veiksniams pritaikyta įsibėgėjimo praslydimo reguliavimo (angl. *Acceleration Slip Regulation* – ASR) sistema gali geriau išlaikyti varančiųjų ratų stabilumą, sumažinti slydimo tikimybę bei pagerinti išilginį elektromobilio važiavimo stabilumą (Hongwen et al., 2014). Simuliacija buvo atlikta imituojuojant tris skirtingus kelio paviršiaus sukibimo koeficientus: aukšto, vidutinio ir žemo sukibimo. Be to, sistema varijavo tarp tokių sukimo momentų paskirstymo valdymo metodų: vidutinis tarp ašinis sukimo momento paskirstymas, kai turimas aukštas sukibimo koeficientas su keliu; optimalus tarp ašinis sukimo momento paskirstymas, kai turimas vidutinis sukibimo koeficientas su keliu; nepriklausomas optimalus paslydimo reguliavimas, kai turimas žemas kelio sukibimo koeficientas. Anot autorių, atlikto tyrimo metu išsiaiškinta, kad pritaikyta tinkama sukibimo reguliavimo sistema optimaliai išnaudoja sukimo momentą ratams ir elektromobilio įsibėgėjimo metu mažiau eikvoja energijos, be to, pasiekiami geresni įsibėgėjimo rezultatai, kai elektromobilio valdymo sistema persijungia ir parenka optimalų valdymo algoritmą.

Dar nuodugniau nagrinėjant elektromobilių konstrukcijas ir norint įvertinti elektromobilio įsibėgėjimo dinamiką iš visų perspektyvų, išnagrinėta Pekino technologijos instituto mokslininkų publikacija apie elektromobilio važiavimo savybes, kintant kelio dangai ir aplinkos sąlygoms. Naudojant „RecurDyn“ programinę įrangą, mokslininkai atliko skirtingų kelio sąlygų teorinį įsibėgėjimo tyrimą.

Apibendrinant, sukurtas matematinis modelis, pritaikyti pagrindiniai parametrai ir koeficientai tyrimui su kelio danga atlikti. Atlikus gautų rezultatų ir grafikų analizę, akivaizdžiai matyti kelio dangos svarba. Kietoje kelio dangoje tyrėjų gauti rezultatai rodo, kad elektromobilis pasieks 83 km/h per 15 sekundžių, o molingame kelyje per tą patį įsibėgėjimo laiką bus pasiektas tik 46 km/h greitis (Wang et al., 2014). Ne tik pasiektas greitis svarbu įsibėgėjimo metu.

Remiantis šiuo tyrimu, galima teigti, kad ir baigiamojo magistro darbo eksperimentiniam tyrimui daug įtakos turi parinkto maršruto kelio dangos kokybė. Siekiant įvertinti elektromobilio įsibėgėjimo dinamikos charakteristikas iš įvairių perspektyvų, manevringumą bei stabilumą, reikalingi įvairūs kelio dangos paviršiai.

Kitame tyrime nagrinėjama sukimo momento paskirstymo strategija visų varančiųjų ratų elektromobilyje, siekiant kuo geresnio rezultato įsibėgėjimo metu pasirinktoje kelio atkarpoje. Pagrindinė tyrimo strategija – skirtingų tipų elektros variklių įdiegimas elektromobilio priekinėje ir galinėje ašyje. Straipsnyje pabrėžiama, kad esant keturiems vienodiems elektros varikliams, maksimalus naudingumas pasiekiamas tik tada, kai visiems varikliams paskirstomas tik vienodas sukimo momentas. Pateikiamos strategijos naudingumas patikrintas naudojant sudarytą važiavimo grafiką miesto režimu su specialia įranga (angl. *Urban Dynamometer Driving Schedule – UDDS*) arba dar kitaip žinomą kaip FTP-72. Autoriai pabrėžia, kad elektromobilio įsibėgėjimo proceso optimizavimui naudotas ir dinaminis programavimo metodas, kuris leido sutrumpinti įsibėgėjimo laiką ir eikvojamos energijos kiekį (Song et al., 2020). Atlikto tyrimo metu nustatyta, kad pritaikyta strategija leidžia sutaupyti iki 15 % elektros energijos, kuri naudojama įsibėgėjimui.

Pagrindinė priežastis, kodėl autoriai atliko nuodugnesnį tyrimą, atsirado dėl sparčiai augančio elektromobilių populiarumo rinkoje, dėl vis griežtėjančių ekologinių reikalavimų ir dėl smarkiai senkančių naftos išteklių pasaulyje. Be to, autoriai pabrėžia, kad lyginant transporto priemones su vidaus degimo varikliais ir elektromobilius, galima išskirti pagrindinius pranašesnius aspektus elektromobilių naudai (Song et al., 2020):

- Elektromobilių sukimo momento atsakas iki 100 kartų greitesnis nei vidaus degimo variklių.
- Jei naudojami rate integruoti varikliai, kiekvieną ratą galima atskirai kontroliuoti bei nustatyti atitinkamus galios parametrus.
- Sukimo momentą galima reguliuoti priklausomai nuo tiekiamos srovės.

Tyrimui atlikti naudotas nedidelis elektromobilis su keturių varančiųjų ratų sistema, kurio bendras leistinas svoris siekia 660 kg.

Atlikti skaičiavimai ir grafikai rodo esminius optimizavimo pasiekimus – sumažintus energijos nuostolius įsibėgėjimo momentu. Naudota strategija patvirtino du dalykus: jei naudojami visi vienodi elektros varikliai, siekiant geriausių rezultatų sukimo momentas privalo būti paskirstytas

tolygiai; naudojant skirtingus elektros variklius, atsiranda poreikis naudoti specifinį momentų paskirstymo valdymo būdą ir valdiklius – dinaminį programavimą (Song et al., 2020). Remiantis strategija, tyrėjams pavyko įrodyti iškeltus darbo tikslus – kuo daugiau sumažinti netinkamai išnaudojamos energijos kiekį elektromobilio įsibėgėjimo metu,. Nuo pritaikyto valdymo būdo, galima suprasti, kad keičiasi ir elektromobilio atsakas, žinoma, prisideda ir stabilumo kontrolė. Apibendrinant galima teigti, kad baigiamojo magistro darbo tyrime renkantis elektromobilį reikės atsižvelgti į varančiųjų ašių skaičių, pagal technines charakteristikas įsivertinti, kokių principu paskirstomas sukimo momentas, nes tai turi tiesioginės įtakos tyrimo rezultatams.

Kitos mokslinės publikacijos sugeneruota pagrindinė idėja – sukurti elektromobilio valdymo modelį ir plėtoti algoritmą, kuris vairuotojui ar apskritai tariant, elektromobilio naudotojui, pateiktų išsamią informaciją apie geriausią įsibėgėjimo ir važiavimo režimą, siekiant kuo geriau išnaudoti elektromobilio baterijos energijos resursus. Tyrimui atlikti naudotas 2016 metų automobilis „Nissan Leaf“.

Pagrindinė tyrimo atlikimo priežastis – kadangi atitinkamos kategorijos elektromobilių nuvažiuojamas atstumas dar nėra didelis, pavyzdžiui, 200 km, naudojant suprojektuotą algoritmą būtų galima tinkamai išnaudoti elektros energiją visais važiavimo režimais, vienas jų – įsibėgėjimas. Algoritmas siunčia naudotojui grįžtamąjį ryšį, koks šiuo metu tinkamiausias važiavimo būdas, norint pasiekti visus užsibrėžtus maršruto tikslus.

Tyrimo metu atliktas pagrindinis elektromobilio modeliavimas – sukurtas dinaminis matematinis modelis, kuris įvertina visus parametrus, susijusius su elektromobilio energijos suvartojimu.

Pagrindiniai tyrimo etapai:

- Elektromobilio dinaminio matematinio modelio kūrimas.
- Labai tikslus visų veikiančių jėgų įvertinimas.
- Reikiamos energijos elektromobiliui įvertinimas.
- Atliktų skaičiavimų rezultatų apibendrinimas, tyrimo patobulinimas ateityje.

Tyrime įvertintos pagrindinės veikiančios jėgos, tokios kaip riedėjimo pasipriešinimas, oro pasipriešinimas, aerodinaminės savybės, važiavimo į įkalnę jėgos, tiesinio pagreičio jėgos. Atliktuose skaičiavimuose ir gautuose rezultatuose autoriai pabrėžia, kad didžiausias iššūkis įvertinant tinkamą energijos panaudojimą atsiranda, kai važiavimas imituojamas įkalnėje. Pagal visus nustatytus parametrus, šio elektromobilio matematiniam modeliui įsibėgėjimo metu įveikinėjant 15 % įkalnę, algoritmas leidžia panaudoti apribotą 40 kW galią ir leidžia pasiekti maksimalų 58 km/h greitį norint optimaliai išnaudoti energiją. Taip pat autoriai pabrėžia, kad elektromobilio energijos poreikiai turi

tiesinę priklausomybę nuo esančio slėgio padangose ir tyrimo metu esamos aplinkos temperatūros ir, žinoma, nuo važiavimo atkarpos.

Tyrėjai ties gautais rezultatais neapsiriboja ir ateityje planuoja tyrimą patobulinti sumodeliuodami ir įdiegdami saulės baterijas elektromobilio energijai generuoti.

Jau žinoma, kad elektromobiliai, be abejo, sparčiausiai į rinką žengianti naujiena, tačiau suprantama, juos dar yra be galo kur tobulinti. Lygiai taip pat pastebi ir tyrimų autoriai, ypač pabrėžia problemas dėl didelio baterijų svorio ir trumpų nuvažiuojamų atstumų. Siekdami tai pagerinti, šiame tyrime autoriai siekia minimizuoti neefektyviai eikvojamą elektros energiją įdiegdami sistemą, kuri kontaktuotų su keliuose esančiais šviesoforais ir sudarytų galimybę visada važiuoti per žalią signalą. Taip būtų eliminuoti nereikalingi elektromobilio įsibėgėjimai, kurie sunaudoja daugiausia energijos. Tyrimui atlikti pasirinkta reali 4 km miesto atkarpa, nustatyti pagrindiniai atkarpos parametrai.

Tyrimo atlikimo metodika ir sistemos dizainas:

- Elektromobilio energijos suvartojimo modelis.
- Eismo dinamikos įvertinimas eismo srauto reguliavimo vietose.
- Greičio optimizavimas remiantis dinaminio programavimu.

Atlikti skaičiavimai ir programavimas „Matlab“ bei „Sumo“ programomis. Sudarytas algoritmas, apskaičiuojantis eismo srautus, pravažiuojančius automobilius sankryžose ir įvertinantis laukiančių automobilių pajudėjimo laiką. Autorių gauti rezultatai rodo, kaip patobulinamas važiavimas, neprailginant kelionės laiko, o naudojamos energijos kiekis sumažinamas 17,5 %. Apibendrinant, galima teigti, kad važiuojant elektromobiliu su optimizuota važiavimo dinamika, išvengiama nereikalingų įsibėgėjimų.

Kitos mokslinės publikacijos autoriai atliko tokį tyrimą: elektromobilio pagreičio kreivės optimizavimas priklausomai nuo energijos sąnaudų ir baterijos likučio. Tyrime teoriškai nagrinėjamos elektromobilio įsibėgėjimo galimybės sumažinant energijos suvartojimą pritaikant genetinį algoritmą. Atliktuose skaičiavimuose ir teoriniuose modeliuose gautas 12,76 % mažesnis energijos suvartojimas įsibėgėjant nuo 0 iki 32 km/h ir 12,36 % mažesnė baterijos talpos iškrova. Įsibėgėjant nuo 0 iki 50 km/h gautas 13,20 % mažesnis energijos suvartojimas ir 0,21 % sumažinta talpos iškrova (Li & Liu, 2019). Apibendrinant, galima teigti, kad išsprendus elektromobilio konstrukcinius trūkumus ir optimizavus važiavimą, pasiekiami geresni rezultatai esant mažesniems įsibėgėjimo greičiams. Įsibėgėjimuose nuo 0 iki 100 km/h sumažintos energijos kiekis jau nežymus, tačiau vis tiek prasmingas.

Kitos mokslinės publikacijos tema – elektroninis diferencialas skirtas elektromobiliui su galiniais varančiaisiais ratais. Veikimo principas labai panašus į įprasto mechaninio diferencialo. Tokio diferencialo tikslas – patobulinti elektromobilio pavaros naudingumą įvairioms važiavimo

sąlygoms ir prailginti nuvažiuojamą atstumą. Įtraukiamas 3 laisvės laipsnių modelis, įskaitant skersinį ir išilginį svorio perkėlimą ir padangų dinaminį modelį. Suformuluotas tyrimo tikslas – ištirti, kokia įsibėgėjimo įtaka sukibimui kiekvienam elektromobilio ratui atskirai, kaip tai apskritai paveikia dinamiką ir kokio elektromobilio atsako tikėtis greitėjant posūkyje (Folgado et al., 2022).

Autorių gautuose rezultatuose ir tyrimo apibendrinime parodoma, kad įprastam elektromobiliui įsibėgėjant įprastomis sąlygomis, naudojant diferencialą su vienodo sukimo momento paskirstymu, elektromobilis daug stabilesnis ir saugesnis, nes galinės ašies šoninio slydimo tikimybė maža. Naudojant netolygiai paskirstomo sukimo momento diferencialą, labai išauga šoninio slydimo tikimybė, padangų sukibimo jėgos atsiduria nestabilioje padėtyje. Apibendrinant galima teigti, kad prie elektromobilio įsibėgėjimo dinamikos pagerinimo labai daug prisideda naudojami pavaros komponentai. Ir šiame baigiamajame magistro darbe atliekant eksperimentinį tyrimą, turi būti atsižvelgta į prieš tai analizuotus mokslinės publikacijos dalykus.

Iš įvairių elektromobiliuose naudojamų elektros variklių, vieni jų – ašiniai srauto elektros varikliai. Analizuotame tyrime autoriai optimizuoja ašinį srauto indukcinį elektros variklį, kuris naudojamas elektromobilyje. Tyrimas atliktas analitiniu būdu, remiantis Maksvelio lygtimis. Tyrimo tikslas – tiksliai sumodeliuoti ir nuspėti ašinio srauto variklio charakteristikas per trumpą įsibėgėjimo laiką ir optimizuoti parametrus (Dianati et al., 2019). Autoriai šį tyrimą nusprendė atlikti dėl ašinio srauto variklio didelio naudingumo koeficiento, didelio sukimo momento išvystymo, didelio momentinio sukimo momento važiavimo pradžioje, nuolatinės galios plataus spektro, atsparumo gedimams ir sąlyginai nedidelių techninės priežiūros kaštų. Visi išvardyti parametrai sudaro geras galimybes plačiai įtraukti ašinio srauto elektros variklius į elektromobilių projektavimą. Iš tyrimo rezultatų aktualiausia didelis naudingumas, didelis sukimo momentas ir didelis momentinis sukimo momentas elektromobilio pajudėjimo iš vietos metu. Apibendrinant galima teigti, kad atlikto tyrimo rezultatai parodo, kad ašiniai srauto varikliai išties yra labai kompaktiški ir lyginant su tokios pačios galios nuolatinių magnetų elektros varikliais yra daug lengvesni. Jei toks elektros variklis montuojamas į šiuo metu sparčiai populiarėjančią konstrukciją – ratus, tai leidžia smarkiai nepadidinti neamortizuotosios masės, o tai pradiniam įsibėgėjimui, manevringumui ir važiavimui posūkiuose suteikia daugiau saugumo. Integruoti keturi ašinio srauto elektros varikliai optimizuojami atskirai, o kaip žinoma, esant dideliems sukimo momentams, tai suteikia galimybę kuo greičiau pasiekti norimą greitį išlaikant geriausią komfortą.

Sparčiai daugėjant elektromobilių su ratuose integruotais elektros varikliais (angl. *In-Wheel Motor* – IWM), atsiranda ir didelis poreikis atlikti saugumo tyrimus, norima patobulinti jų dinamines savybes. Naudojamos įvairios sistemos saugumo užtikrinimui, manevringumui, geram įsibėgėjimui

ir optimizuotam elektromobilio važiavimui. Tyrimo autoriai išskiria tris pagrindinius elektromobilių pranašumo aspektus:

- Sukimo momentas varančiuose varikliuose greitai ir tiksliai generuojamas.
- Apie varomąjį sukimo momentą galima lengvai spręsti iš tiekiamos srovės elektros varikliui.
- Kiekvienas rate integruotas variklis gali būti atskirai optimizuojamas ir valdomas.

Dar kartą reikia pabrėžti, kad prieš tai išvardyti aspektai elektromobilio dinamikai suteikia pranašumo įvairiuose važiavimo režimuose. Kiekvienas atskirai valdomas elektros variklis staigaus įsibėgėjimo metu suteikia galimybę, kad elektromobilis nepraras stabilumo, bus tiksliau paskirstomas sukimo momentas, elektros energija bus efektyviai panaudojama. Tikslus elektromobilio valdymas – didelis pranašumas siekiant išvengti nepageidaujamų reakcijos jėgų posūkiuose ir manevrų vietose (Nam et al., 2012). Suprantama, kad įsibėgėjimo metu svarbiausias dalykas yra ne tik kaip greitai elektromobilis pasieks norimą greitį, tačiau ir kaip stabiliai tai bus atlikta. Baigiamajame magistro darbe atliekant eksperimentinį tyrimą taip pat labai svarbu įvertinti stabilumą maksimalaus įsibėgėjimo metu.

Panašus tyrimas atliktas ir Šanchajaus Transporto inžinerijos institute. Tyrėjų tikslas – įvertinti elektromobilio keturių varančiųjų ratų dinaminio valdymo sistemą, kuria siekiama pagerinti transporto priemonės stabilumą kritinėmis važiavimo sąlygomis. Optimizuojamos transporto priemonės dinamikos valdiklį sudaro trys moduliai: judesio sekimo valdymas, valdymo paskirstymas ir transporto priemonės būsenos įvertinimas. Valdymo modulis apskaičiuotus apibendrintus jėgos reikalavimus paskirsto kiekvienam varikliui atskirai, remdamasis kvadratinio programavimo teorija ir atsižvelgdamas į padangos išilginės ir šoninės jėgos ryšio charakteristiką (Xiong et al., 2012). Valdymo algoritmui patikrinti atliekami modeliavimai įvairiomis važiavimo sąlygomis. Modeliavimo rezultatai rodo, kad siūlomas transporto priemonės stabilumo valdiklis gali veiksmingai stabilizuoti transporto priemonės judėjimą kritinėmis važiavimo sąlygomis.

Dar vienas tyrimas tiesiogiai susijęs su elektromobilio stabilumo ir pakabos optimizavimu. Tyrimo tikslas – pakabos sistemos kinematinis modeliavimas siekiant išanalizuoti jų kinematinės charakteristikas, kai automobilis perdaromas ir vietoje vidaus degimo variklio sumontuojama elektrinė pavarą. Mokslinėje publikacijoje daugiausia dėmesio skiriama transporto priemonės šoninio pagreičio, posvyrio kampo ir posvyrio greičio charakteristikoms. Naudojant optimizavimo programinę įrangą „Altair Hyperstudy“, sudaryti priekinės ir galinės pakabos modeliai. Atlikus elektromobilio pakabos sistemos dinaminį savybių optimizavimą (Hsu et al., 2010). Atlikus optimizavimo procesą su programine įranga, nustatyta, kad norint optimizuoti elektromobilio šoninį pagreitį, posvyrio kampą ir posvyrio greitį iki panašių originalaus automobilio su varikliu

charakteristikų, reikia standesnių priekinės bei galinės pakabos spyruoklių ir padidinti stabilizatoriaus skersmenį. Apibendrinant galima teigti, kad tinkamas pakabos tipas ir jos elementų parametrai tiesiogiai koreliuoja su įsibėgėjimo dinamika.

- Optimali pakabos sistema gali pagerinti elektromobilio įsibėgėjimą, nes padangos išlaiko sąlytį su kelio paviršiumi. Pakaba, leidžianti transporto priemonei išlaikyti stabilų važiavimą greitėjant, gali padėti pagerinti trauką ir sumažinti ratų praslydimą, tai gali pagerinti transporto priemonės įsibėgėjimo pagreitį.
- Optimali pakabos sistema taip pat gali pagerinti elektromobilio stabilumą, nes sumažina kėbulo posvyrį, tai padeda išlaikyti didesnę transporto priemonės stabilumą posūkiuose, stabdant ir greitėjant. Pakaba, kuri gali išlaikyti žemą ir stabilų transporto priemonės svorio centrą, gali padėti pagerinti bendrą transporto priemonės stabilumą.
- Pakabos sistema taip pat gali prisidėti prie elektromobilio energijos vartojimo efektyvumo, nes ji sumažina energijos nuostolius, patiriamus dėl pakabos judėjimo, tad galima teigti, kad tinkamai funkcionuojanti pakaba gali padidinti elektromobilio nuvažiuojamą atstumą.
- Gerai suprojektuota pakabos sistema taip pat gali padėti apsaugoti elektromobilio akumuliatorių ir kitas sudedamąsias dalis nuo pažeidimų dėl kelio nelygumų ar didelių apkrovų.

Apibendrinant galima teigti, kad pakaba prisideda prie elektromobilio dinamikos, nes pagerina įsibėgėjimą, stabilumą, manevringumą, energijos vartojimo efektyvumą ir apsaugo transporto priemonės komponentus. Elektromobilių gamintojai, siekdami pagerinti elektromobilio charakteristikas, naudoja pažangesnes pakabos technologijas.

Analogiškai išnagrinėtas dar vienas tyrimas, susijęs su elektromobilio slydimu po eismo įvykio. Tyrimas atliktas Šanchajaus mechanikos ir mechatronikos instituto mokslininkų. Anot autorių, jau esami tyrimai rodo, kad transporto priemonės nestabilumas, pavyzdžiui, slydimas ir sukimasis atsiradęs po pirmojo smūgio autoįvykyje, gali turėti dar rimtesnių pasekmių kelių transporto priemonių susidūrimuose. Mokslinės publikacijos tikslas – pateikti keturių nepriklausomai valdomų elektromobilio ratų stabilumo kontrolės schemą po smūgio. Sukurtas optimizavimu pagrįstas algoritmas, skirtas optimaliam ratų sukimo momento paskirstymui ir vairavimo kampo koordinavimui, kad būtų laikomasi išvesto atskaitos posvyrio momento. Modeliavimas tikrinamas „Matlab Simulink“ ir „CarSim“ programomis. Bandymų rezultatai rodo, kad sukurta schema veikia gerai ir gali išlaikyti bandomosios transporto priemonės stabilumą po didžiausio 3500 Ns šoninio ir galinio smūgio (Wang et al., 2020). Apibendrinant galima teigti, kad atliktas tyrimas patvirtina, kaip svarbu tinkama programinė įranga ir sistema atsakinga už elektromobilio stabilumą. Tai parodo, kad

ne tik įsibėgėjimui, potencialiai kokybiškam važiavimui ir manevringumui reikalinga sistema, bet ir saugumo užtikrinimui.

Tęsiant tyrimus susijusius su stabilumu – stabdymo stabilumas yra taip pat labai svarbus saugumo kriterijus elektromobiliuose, o stabilumo kontrolė turi tiesioginės įtakos elektromobilių stabdymo stabilumui. Elektromobilio stabdymo slydimo koeficientas optimizuojamas aktyviai reguliuojant sukimo momentą, tokiu būdu siekiant užtikrinti, kad rato slydimo koeficientas galėtų būti išlaikytas artimas optimaliam slydimo koeficientui, ir kad ratas įgytų didelį išilginį sukibimą bei neleistų ratui užsiblokuoti, taip pat pagerintų saugumą (Zhang et al., 2019). Taigi, elektromobilio greitas įsibėgėjimas – svarbus aspektas, tačiau reikia nepamiršti, jog stabdymas pasiekus atitinkamą greitį taip pat labai svarbus aspektas siekiant išvengti susidūrimo. Avarinio stabdymo metu atsiradusios jėgos paveikia stabilumą, todėl labai svarbu, kad už stabilumo kontrolę atsakingos sistemos veiktų tinkamai ir būtų optimizuotos taip, kad būtų pasiekti geriausi rezultatai.

Šiandiniame pasaulyje be galo sparčiai tobulėjant technologijoms, vis daugiau elektronikos įtraukiama į visas transporto sritis. Pagrindinis kriterijus – elektronikos komponentai turi būti patikimi ir ilgaamžiai, tačiau vis tiek pasitaiko įvairių gedimų. Vienu atveju tai gali būti lengvai pakeičiamas mazgas, tačiau sudėtinguose mazguose, kurie reikalauja didelio tikslumo ir kurių kaštai daug didesni, tikimasi atsparumo. Šiuolaikinės transporto priemonės, o ypač elektromobiliai, aprūpinti dideliu kiekiu elektronikos sistemų, kurios atsakingos už daugelį faktorių (Hu et al., 2011). Sauga, stabilumas – vieni iš pagrindinių. Kaip ir daugelyje nagrinėtų straipsnių ir mokslinių publikacijų, šio tyrimo autoriai taip pat išskiria didelę elektromobilio saugumo, stabilumo ir geresnės dinamikos svarbą, o kaip nagrinėta prieš tai, tai priklauso nuo galimybės atskirai valdyti elektros variklius. Autorių iškelta svarba šiame tyrime – patikima stabilumo kontrolė, užtikrinanti ilgą eksploatacinį laiką. Tyrimo metu sudarytas matematinis modelis, kuris užtikrina stabilų elektromobilio važiavimą įvairiomis sąlygomis.

Transporto priemonių judėjimas, jų dinamika ir dinamikos teorijos taikymas plačiai išanalizuotas dar viename straipsnyje (Reza, 2008). Analizuotoje publikacijoje išskiriama daug su transporto priemonių dinamika susijusių aktualijų. Straipsnyje išanalizuoti algoritmai, skaičiavimo metodikos, kaip jos taikomos, be to, atsižvelgiama ir į daugelį kitų faktorių, kurie taip pat turi įtakos, vieni jų – transporto priemonės padangų deformacijos, pateikiama kiek daug įtakos turi pakaba ir skirtingos jų konstrukcijos, įvertina vairuotojo ir ekipažo kūno masės poslinkius. Visi prieš tai paminėti dalykai nulemia transporto priemonės dinamines savybes. Publikacijoje judėjimo dinamikos lygtys išreiškiamos paprastai, pritaikant pagrindinį judėjimo koordinačių modelį, kuris orientuojamas apink masės centrą. Transporto priemonės dinamika plokštumose įvertinama nagrinėjant automobilio

virtimo kampą ir momentą aplink x ašį, posvyrio kampą ir momentą aplink y ašį ir pokrypio kampą ir momentą aplink z ašį.

Mokslininkai Sol ir Watanabe (1992) aprašo savo išrastą prietaisą, skirtą automobilio inercijai ir masės centro padėčiai įvertinti. Prietaisas, apskaičiuodamas vidutinius automobilio masių poslinkius, dėl degalų, keleivių bei krovinio kiekio pokyčio, įvertina automobilio masės pasikeitimus, masės centro padėtį transporto priemonės kėbulo atžvilgiu ir inercijos momentą išilginės automobilio ašies atžvilgiu. Reaguodamas į akceleratoriaus paspaudimą (pagreitį), prietaisas įvertina prieš tai minėtus pasikeitimus, pagal kuriuos įvertinamos bendros automobilio valdymo savybės ir pagal tai pakeičiama arba paliekama apkrova. Tai parodo, kad automobilio masės centras turi labai daug įtakos automobilio dinamikai, dėl ko daugelis mokslininkų stengiasi kaip įmanydami sukurti prietaisus ir metodus, tiksliai šio parametro įvertinimui (Šližys, 2011).

Daug medžiagos pateikiama profesoriaus knygoje (Gillespie, 1992). Profesorius plačiai žinomas savo moksliniais straipsniais automobilių dinamikos tyrinėjimo srityje. Knygoje plačiai aprašoma automobilio masės centro įtaka kėbulo svyravimams greitėjimo, stabdymo, įvažiuojant į posūkį metu.

Dar vienas mokslinis straipsnis, aprašantis, kaip elektromobilio ir hibridinės transporto priemonės elektrinė pavara ir transmisija tiesiogiai koreliuoja su dinamikos pokyčiu. Autoriai aptaria valdymo sistemas, elektros energijos regeneraciją ir taip pat poveikį joms (Crolla & Cao, 2012). Straipsnį publikavo Didž. Britanijos Sunderlando universiteto mokslininkai. Teigiama, kad į rinką sparčiai žengiančioms elektromobilių technologijoms, vis dar mažai skiriama dėmesio ir literatūroje negalima rasti visų aktualijų. Kaip teigiama, pastarieji du XXI a. dešimtmečiai automobilių inžinerijoje kryo į elektrifikaciją ir daug dėmesio buvo skiriama tyrimams. Vis atsirandant naujoms technologijoms elektrifikuotose transporto priemonėse, daugėja ir pokyčių joms, tačiau kaip suprantama, naujai diegiamos technologijos daro įtaką ir kitiems transporto priemonės eksploataciniams aspektams. Publikacijoje daugiausia dėmesio skiriama naujų elektrifikuotų agregatų integracijai ir transporto priemonės dinamikos bei valdymo sistemų pokyčiui apžvelgti. Bendrine prasme, agregatų integracijos poveikį galima išreikšti per tris pagrindinius transporto priemonės judėjimo aspektus: posvyrio kampas z ašimi (vertimosi plokštuma), posvyrio kampas x ašimi (posvyris į priekį ir atgal), posvyrio kampas y ašimi (pasisukimo kampas), be to, visi šie aspektai tarpusavyje labai susiję. Autoriai pabrėžia, kad elektromobiliams sparčiai žengiant į rinką, taip pat sparčiai turi ir tobulėti sistemos ir posistemės atsakingos už saugumą bei sprendimai leisiantys užtikrinti dinamines transporto priemonės savybes. Teigiama, kad prie elektromobilio dinamikos savybių prisideda ir elektros energijos regeneravimo sistema. Taip pat išskiriama, kad transporto priemonės dinamikos valdymui ir krypties stabilumui didžiausią įtaką daro transporto priemonės

šoniniai, posvyrio ir riedėjimo judesiai, o transporto priemonės važiavimo, padėties valdymo ir sukibimo su keliu charakteristikoms didžiausią įtaką daro posvyrio plokštumos judesiai.

Pagrindinis komponentas elektrifikuotose transporto priemonėse, kuris susieja eksploatacines savybes su dinaminėmis savybėmis – elektros variklis, nes jie pasižymi trimis pagrindinėmis svarbiomis savybėmis:

- Itin jautriai reaguoja į sukimo momento arba greičio poreikius ir tiksliai valdomi.
- Veikiantys kaip variklis ir generatorius, todėl jie yra vienodai efektyvūs.
- Efektyviai išnaudojama energija, o naudingumas siekia iki 90 %.

Naudojant dabartines technologijas, akumuliatorių baterijos elektromobiliuose vis dar labai sunkios, tai galima išskirti elektromobilyje „Tesla“, kur akumuliatorių bloko svoris siekia 450 kg, o pavyzdžiui „Nissan Leaf“ akumuliatorių blokas sveria apie 300 kg. Verta paminėti ir rate integruojamų elektros variklių technologiją, kai neamortizuota masė išauga nuo 20 iki 50 %. Visi konstrukciniai pokyčiai ir svorio centro padėties pasikeitimai daro įtaką transporto priemonės dinamikai ir valdymui. Išaugusi amortizuota masė ir svorio centro aukščio padidėjimas lemia blogesnį važiavimo stabilumą, o sunkesnis kėbulas prisideda prie didesnės dinaminės šoninės apkrovos vairuojant (Crolla & Cao, 2012). Apibendrinant galima teigti, kad straipsnyje apžvelgiama elektrifikuotų transporto priemonių dinamika, valdymas, kokią įtaką turi įvairūs jų agregatai važiavimui, stabilumui. Pagrindiniai publikacijos akcentai:

- Išilgine kryptimi elektros varikliai užtikrina geresnį sukimo momento valdymą.
- Kalbant apie važiavimo komfortą – padidėjusi kėbulo ir neamortizuota masė tai pablogina, atsiranda vibracijos, kurios netenkina ISO standartų. Neabejojama, kad neamortizuota masė tiesiogiai koreliuoja su pablogėjusiu manevringumu ir pablogėja važiavimas.
- Važiuklės ir transmisijos valdymo sistemos turi būti pritaikytos taip, kad pagerintų transporto priemonės dinamiką ir stabilumą.

2. Teorinė dinamikos apžvalga

Kinematinis judančios transporto priemonės kriterijus lemia jos geometriniai ir masės parametrai bei ją veikiančios išorinės apkrovos. Toliau pateikiami teoriniai skaičiavimai teorinei apžvalgai papildyti. Automobilio dinamikoje supaprastinimo tikslais kiekvienos rūšies elementariųjų paskirstytųjų jėgų poveikis pakeičiamas jų bendrąja jėga ir bendruoju momentu, kurių poveikis automobilio judėjimui yra adekvatus šios rūšies elementariųjų jėgų poveikiui (Lenkauskas, 2011). Išorinės apkrovos gali būti redukuotos į šias bendrąsias jėgas:

- Automobilio svorio jėgą.

- Aerodinaminę jėgą.
- Ratus veikiančias jėgas.
- Sukabinimo įtaise veikiančią jėgą.

Automobilį veikiančios išvardytos išorinės bendrosios apkrovos gali būti redukuotos į bendrąją atstojamąją jėgą F ir bendrąjį atstojamąjį momentą M . Jėga F pridėta automobilių masių centre, o momento M kryptis sutampa su linija, kertančia masių centrą. Išorinių apkrovų bendrajai atstojamajai jėgai F priešinasi automobilio inercijos jėga FI , kuri sukelia atitinkamą momentą MI . Pagal d’Alambert’o principą, $F=-FI$, $M=-MI$

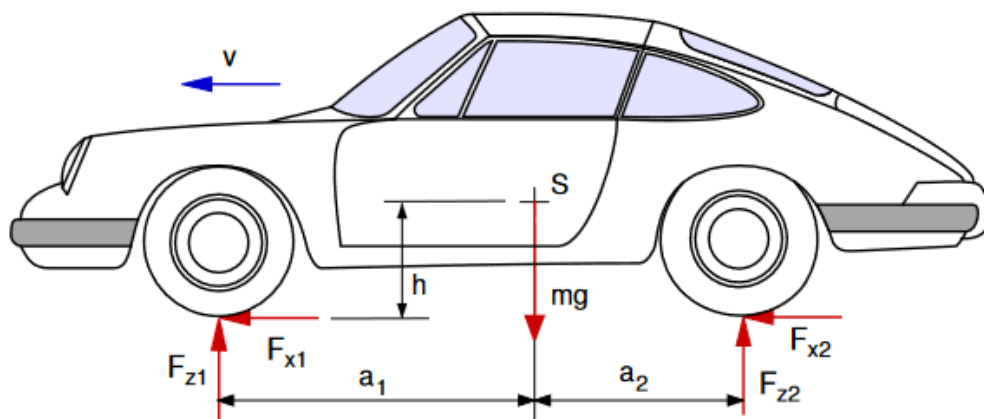
2.1. Išilginė dinamika

Paaikškinimui priimamas paprastas transporto priemonės modelis.

Išilginė dinamika – tai traukos ir stabdymo dinaminės savybės. Matuojant išilginę dinamiką galima sužinoti tokius automobilio parametrus:

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

Transporto priemonė yra laikoma kaip vientisas standus kūnas, kuris juda idealiai tiesiu ir horizontaliu keliu. Kiekvienoje transporto priemonės ašyje, ratų kontaktiniame sąlyčio taške su keliu susidarančios jėgos yra sudedamos, t. y. normalinės ir išilginės jėgos (Rill, 2009).



2.1 pav. Paprastas transporto priemonės modelis

Jeigu aerodinaminių jėgų (pasipriešinimo, teigiamo ir neigiamo posvyrio kampo) iš pradžių nepaisoma, tuomet lygtys x ir z plokštumose bus tokios:

$$m\dot{v} = F_{x1} + F_{x2}; \quad (2.1)$$

$$0 = F_{z1} + F_{z2} - mg; \quad (2.2)$$

$$0 = F_{z1} \cdot a_1 - F_{z2} \cdot a_2 - (F_{x1} + F_{x2}) \cdot h; \quad (2.3)$$

čia: $\dot{v}$ – automobilio pagreitis;

$a_1 + a_2$ – automobilio ratų bazė;

h – svorio centro aukštis.

Prieš tai pateiktos lygtys skirtos tik keturioms nežinomosioms jėgoms $F_{x1}, F_{x2}, F_{z1}, F_{z2}$, tačiau jei į lygtį bus įterpta 2.1 lygtis, tuomet pašalinami du nežinomieji:

$$0 = F_{z1} \cdot a_1 - F_{z2} \cdot a_2 + m\dot{v}h; \quad (2.4)$$

Dabar iš 2.1 ir 2.4 lygčių galima apskaičiuoti ašines apkrovas:

$$F_{z1} = mg \cdot \frac{a_1}{a_1 + a_2} - \frac{h}{a_1 + a_2} \cdot m\dot{v}; \quad (2.5)$$

Statinė dalis aprašo svorio pasiskirstymo savybę priklausomai nuo horizontalios svorio centro pozicijos.

$$F_{z1}^{st} = mg \cdot \frac{a_2}{a_1 + a_2}; \quad (2.6)$$

Svorio centro vertikalė pozicija daro įtaką tik dinaminei ašių apkrovai:

$$F_{z1}^{din} = -mg \cdot \frac{h}{a_1 + a_2} \cdot \frac{\dot{v}}{g}; \quad (2.7)$$

Kai transporto priemonė greitėja, $\dot{v} > 0$, tai priekinės ašies apkrova mažėja, taip pat kaip ir stabdymo atveju galinės ašies apkrova mažėja $\dot{v} < 0$.

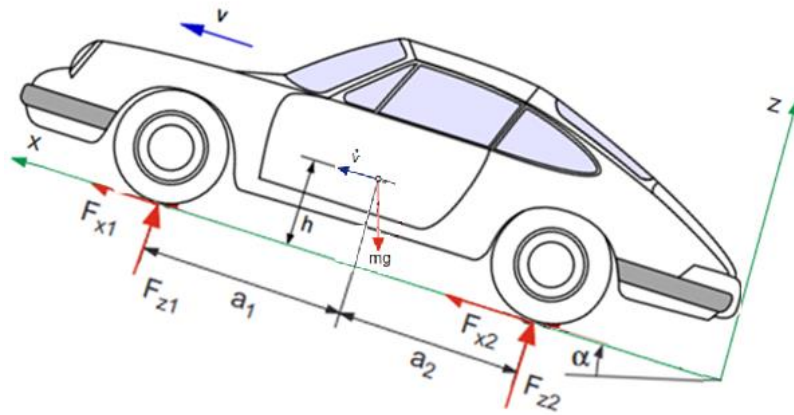
2.2. Automobilio posvyrio kampo įtaka įsibėgėjimui

Transporto priemonei, važiuojančiai įkalnėje, pastarosios lygtis gali būti pritaikytos:

$$m\dot{v} = F_{x1} + F_{x2} - mg \cdot \sin\alpha; \quad (2.8)$$

$$0 = F_{z1} + F_{z2} - mg \cdot \cos\alpha; \quad (2.9)$$

$$0 = F_{z1} \cdot a_1 - F_{z2} \cdot a_2 - (F_{x1} + F_{x2}) \cdot h; \quad (2.10)$$



2.2 pav. Atsirandančios jėgos transporto priemonei su pokrypiu

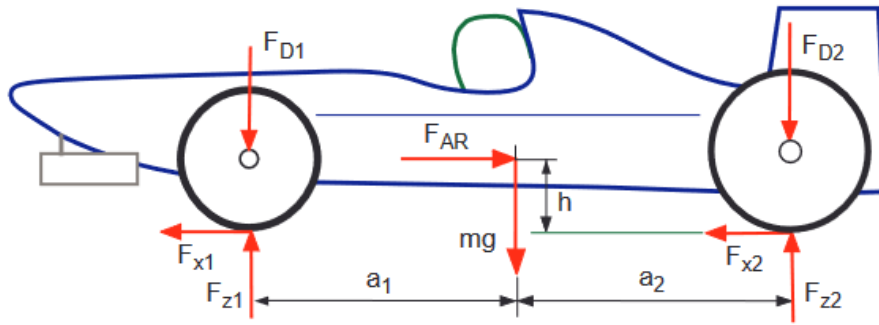
Čia α pažymi posvyrio kampą. Pritaikius prieš tai esančias lygtis, gaunama:

$$F_{z1} = mg \cdot \cos\alpha \cdot \frac{a_2 - h \cdot \tan\alpha}{a_1 + a_2} - \frac{h}{a_1 + a_2} \cdot m\dot{v}; \quad (2.11)$$

Dinaminės dalys išlieka nepakitusios, o statinės dalys taip pat priklauso nuo posvyrio kampo ir svorio centro aukščio.

2.3. Aerodinaminių jėgų poveikis

Daugumos transporto priemonių forma arba tam tikri prie transporto priemonės pritvirtinti sparnai sukuria aerodinamines jėgas ir sukimo momentus. Šių aerodinaminių jėgų poveikį galima pavaizduoti pasipriešinimo jėga, veikiančia svorio centre ir „žemyn veikiančiomis jėgomis“, kurios paveikia tiek priekinę, tiek galinę ašis (Rill, 2009).



2.3 pav. Transporto priemonė ir aerodinaminės jėgos

Jei priimama, kad važiavimo greitis yra teigiamas, $v > 0$, tuomet:

$$m\dot{v} = F_{x1} + F_{x2} - F_{AR}; \quad (2.12)$$

$$0 = F_{z1} - F_{D1} + F_{z2} - F_{D2} - mg; \quad (2.13)$$

$$0 = (F_{z1} - F_{D1}) \cdot a_1 + (F_{z2} - F_{D2}) \cdot a_2 + (F_{x1} + F_{x2})h; \quad (2.14)$$

Čia: F_{AR}, F_{D1}, F_{D2} – nurodo oro pasipriešinimą ir žemyn nukreiptas jėgas. Dinaminėms ašių apkrovoms skaičiuoti naudojama:

$$F_{z1} = F_{D1} + mg \cdot \frac{a_2}{a_1 + a_2} - \frac{h}{a_1 + a_2} \cdot (m\dot{v} + F_{AR}); \quad (2.15)$$

Nukreiptosios jėgos žemyn F_{D1}, F_{D2} prideda statinę ašių apkrovą, o oro pasipriešinimas F_{AR} atliekant skaičiavimus sugeneruoja papildomai dinaminį narį.

2.4. Maksimalios akceleracijos nustatymas

Įprastai transporto priemonės gali veikti kelių sunkio jėgomis. Jeigu bus priimta, kad $F_{z1} > 0$ ir $F_{z2} > 0$, tuomet galioja lygtis pateikta toliau:

$$\frac{\dot{v}}{g} \leq \frac{a_2}{h} \cos \alpha - \sin \alpha; \quad (2.16)$$

Pastarąsias lygtis sujungus, gaunama:

$$-\frac{a_1}{h} \cos \alpha \leq \frac{\dot{v}}{g} + \sin \alpha \leq \frac{a_2}{h} \cos \alpha; \quad (2.17)$$

Iš čia didžiausia pasiekama akceleracija ir lėtėjimas yra apriboti posvyrio kampo α ir svorio centro pozicijos a_1, a_2 . Kai $a_1 \rightarrow 0$, tuomet gaunama:

$$-\frac{a_1}{h} \leq \operatorname{tg} \alpha \leq \frac{a_2}{h}; \quad (2.18)$$

Lygtis aprašo transporto priemonės gebą įsibėgėti ir leisti įkalnė. Verta pabrėžti, kad aerodinaminės savybės pablogina važiavimo sąlygas, tačiau šiuo atveju, aerodinaminės savybės svarbios esant dideliems greičiams. Šiuo atveju, transporto priemonės maksimalus įsibėgėjimas normaliai apribotas variklio galios arba šiuo konkrečiu atveju tyrime – elektros variklio galios (Rill, 2009.)

2.5. Trinties apribojimai įsibėgėjimui

Suprantama, maksimalų galimą pagreitį taip pat riboja ir trinties sąlygos:

$$|F_{x1}| \leq \mu F_{z1}; \quad (2.19)$$

Trinties koeficientas μ priimamas tiek priekinei, tiek galinei ašiai vienodai. Ribiniu atveju:

$$|F_{x1}| = \pm \mu F_{z1}; \quad (2.20)$$

O linijinis momentas, paminėtas prieš tai esančioje 2.20 lygtyje, gali būti užrašytas:

$$mv_{\max} = \pm \mu (F_{z1} + F_{z2}) - mg \cdot \sin \alpha; \quad (2.21)$$

Pritaikius lygtį, gaunama:

$$\left(\frac{\dot{v}}{g}\right)_{\max} = \pm \mu \cdot \cos \alpha - \sin \alpha; \quad (2.22)$$

Vadinasi, kai greitėjama į įkalnę ($\dot{v} > 0, \alpha > 0$), arba stojama nuokalnėje ($\dot{v} < 0, \alpha < 0$), tam reikalingas bent toks trinties koeficientas $\mu \geq tg|\alpha|$.

Atsižvelgiant į transporto priemonės matmenis ir trinties jėgų vertes, didžiausias greitėjimas ir lėtėjimas yra apriboti anksčiau pateiktų lygčių.

Jei prie šių jėgų įtrauksime ir aerodinaminės jėgas, tuomet maksimalus įsibėgėjimas ir lėtėjimas horizontaliame kelyje bus apribotas pagal:

$$-\mu \left(1 + \frac{F_{D1}}{mg} + \frac{F_{D2}}{mg} \right) - \frac{F_{AR}}{mg} \leq \frac{\dot{v}}{g} \leq \mu \left(1 + \frac{F_{D1}}{mg} + \frac{F_{D2}}{mg} \right) - \frac{F_{AR}}{mg}; \quad (2.23)$$

Reikėtų pabrėžti, kad veikiančios aerodinaminės jėgos, oro pasipriešinimas pagerina transporto priemonės stabdymo savybes.

2.6. Vienos ašies pavaros akceleracija

Priimkime atvejus, kai varoma tik priekinė arba galinė ašis. Ribiniais atvejais, kai varoma galinė ašis, $F_{x1} = 0$ ir $F_{x2} = \mu F_{z2}$, tuomet taikant lygtis, tiesinio momento lygtis gaunama:

$$m\dot{v}_{RWD} = \mu \cdot mg \left[\frac{a_1}{a_1 + a_2} + \frac{h}{a_1 + a_2} \cdot \frac{\dot{v}_{RWD}}{g} \right]; \quad (2.24)$$

Čia indeksas RWD tik nurodo, kad naudojama galinės ašies pvara. Tuomet maksimali galiniais ratais varomos transporto priemonės akceleracija yra tokia:

$$\frac{\dot{v}_{RWD}}{g} = \frac{\mu}{1 + \frac{h}{a_1 + a_2}} \cdot \frac{a_2}{a_1 + a_2}; \quad (2.25)$$

Įvertinus, kad $F_{x1} = \mu F_{z1}$ ir $F_{x2} = 0$, maksimali akceleracija, kuri gali būti pasiekama, kai varančioji ašis priekinė, apskaičiuojama:

$$\frac{\dot{v}_{FWD}}{g} = \frac{\mu}{1 + \frac{h}{a_1 + a_2}} \cdot \frac{a_2}{a_1 + a_2}; \quad (2.26)$$

Čia indeksas FWD nurodo, kad naudojama priekinės ašies pavara. Priklausomai ir nuo parametrų μ, a_1, a_2, h , išibėgėjimas apriojamas ir nuo posvyrio kampo, t. y. priklausomybė nuo posvyrio $\frac{\dot{v}}{g} \leq \frac{a_2}{h}$.

2.7. Optimalus važiavimo jėgų pasiskirstymas

Nagrinėjant skaičiavimus, matyti, kad išilginių jėgų suma pagreitina arba sulėtina transporto priemonę. Kai dimensijos neapibrėžtos, iš pirmosios lygties formulę galima pateikti:

$$\frac{\dot{v}}{g} = \frac{F_{x1}}{mg} + \frac{F_{x2}}{mg}; \quad (2.27)$$

Tam tikras greitėjimo arba lėtėjimo pagreitis gali būti pasiektas su skirtingomis išilginių jėgų kombinacijomis F_{x1} ir F_{x2} . Remiantis lygtimi išilginės jėgos ribojamos ratų apkrova ir trinties. Optimali F_{x1} ir F_{x2} kombinacija bus pasiekta, kai priekinė ir galinė ašys įgis vienodą slydimo pasipriešinimą.

$$F_{x1} = \pm \nu \mu F_{z1}; \quad (2.28)$$

Pridėjus lygtis gaunama:

$$\frac{F_{x1}}{mg} = \pm \nu \mu \left(\frac{a_2}{h} - \frac{\dot{v}}{g} \right) \cdot \frac{h}{a_1 + a_2}; \quad (2.29)$$

Tuomet:

$$\frac{\dot{v}}{g} = \pm \nu \mu; \quad (2.30)$$

$$\frac{F_{x1}}{mg} = \frac{\dot{v}}{g} \left(\frac{a_2}{h} - \frac{\dot{v}}{g} \right) \cdot \frac{h}{a_1 + a_2}; \quad (2.31)$$

2.8. Skersinė dinamika

Skersinė dinamika – tai savybių visuma, apibrėžianti jo skersinį judėjimą. Svarbiausios

skersinės dinamikos savybės yra stovumas ir manevringumas.

Automobiliui sukantis visada kinta jo greičio kryptis, taip pat gali kisti ir greičio didumas (modulis). Todėl, remiantis antruoju Niutono dėsniu ir d'Alamberto principu, teigiama, kad besisukančio automobilio masę visada veikia inercijos jėga. Jos kryptis priešinga greičio pokyčio kryptiai, o modulis lygus masės ir greičio pokyčio sandaugai. Inercijos jėga veikia kiekvieną masės dalį, bet paprasčiau skaičiuoti, imant inercijos jėgų sumą, pridėtą masės centre.

Matuojant skersinę dinamiką galima sužinoti tokius automobilio parametrus:

- skersinį pagreitį;
- automobilio valdymą šoninio pagreičio metu;
- leidžiamą ir kritinį greitį;
- pasukimo kampą;
- nustatyti masės centrą;
- inercijos momentą ir padangų pasipriešinimą slydimui.

2.9. Rato slydimo įtaka, jėgos padangose

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

Priešingai nei kinematiniam padangos modelyje, priimsime, kad leistini šoniniai judesiai sąlyčio taškuose. Esant nedideliems šoniniams slydimams, šoninę jėgą galima aproksimuoti tiesiniu metodu:

$$F_y = c_s \cdot s_y \quad (2.32)$$

čia: c_s – konstanta, priklausanti nuo rato apkrovos F_z ;

s_y – šoninis slydimas.

Priimama, kad šiuo metu transporto priemonė nei greitėja, nei lėtėja, riedėjimo sąlyga tenkinama kiekviename rate:

$$r_D \cdot \Omega = e_x^T \cdot v_{0P} \quad (2.33)$$

čia: r_D – dinaminis rato spindulys;

v_{0P} – kontaktinio taško greitis;

e_x^T – vienetinis vektorius išilgine kryptimi.

Tuomet šoninis padangos greitis:

$$v_y = e_y^T \cdot v_{0P}; \quad (2.34)$$

Taigi, pagal lygtį galima apskaičiuoti šoninį slydimą:

$$s_y = \frac{-e_y^T \cdot v_{0P}}{|e_x^T \cdot v_{0P}|}; \quad (2.35)$$

čia: e_y^T – padangos vienetinis vektorius skersine kryptimi;

Tuomet šoninės jėgos:

$$F_{y1} = c_{s1} \cdot s_{y1}; \quad (2.36)$$

2.10. Šoniniai slydimai

Šoninis padangos slydimas priekinėje ašyje apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$s_y = \frac{+\sin\delta \cdot (v \cdot \cos\beta) - \cos\delta \cdot (v \cdot \sin\beta + a_1 \cdot \dot{\gamma})}{|\cos\delta \cdot (v \cdot \cos\beta) - \sin\delta \cdot (v \cdot \sin\beta + a_1 \cdot \dot{\gamma})|}; \quad (2.37)$$

Šoninis slydimas galinėje transporto priemonės ašyje apskaičiuojamas:

$$s_{y2} = \frac{v \cdot \sin\beta - a_2 \cdot \dot{\gamma}}{|v \cdot \cos\beta|}; \quad (2.38)$$

čia: $\dot{\gamma}$ – transporto priemonės posvyrio greitis;

β – šoninio slydimo kampas;

δ – vairavimo mechanizmo pasukimo kampas.

Priimami nereikšmingi prieš tai išvardyti dydžiai.

$$|a_1 \dot{\gamma}| \ll |v|$$

$$|a_2 \dot{\gamma}| \ll |v|$$

$$|\beta| \ll 1$$

$$|\delta| \ll 1$$

Kadangi šoninio slydimo kampas visada žymi mažesnę kampą tarp greičio vektoriaus ir transporto priemonės išilginės ašies, vietoje $v \cdot \sin\beta \approx v \cdot \beta$, aproksimacija:

$$v \cdot \sin\beta \approx |v| \cdot \beta; \quad (2.39)$$

Tuomet lygtis atrodo taip:

$$s_{y1} = -\beta - \frac{a_1}{|v|} \cdot \dot{\gamma} + \frac{v}{|v|} \delta; \quad (2.40)$$

$$s_{y2} = -\beta + \frac{a_2}{|v|} \cdot \dot{\gamma}; \quad (2.41)$$

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

$$\mu_{sr} = \frac{F_x}{F_z}; \quad (2.42)$$

Rato perduodama išilginė jėga yra ribojama rato ir kelio trintimi. Reikėtų žinoti, kad bet kuriuo momentu, kai per ratą yra transformuojama išilginė jėga, liksdamasis su keliu, ratas slysta. Kitaip tariant, be rato slydimo jokios jėgos negali būti transformuojamos kelio plokštumoje. Kai rato išilginio slydimo koeficientas $S_{sr} = 0,1 - 0,25$ transformuojama išilginė jėga yra didžiausia esamomis važiavimo sąlygomis (t. y. esant fiksuotai vertikaliai apkrovai, oro slėgiui padangoje, judėjimo greičiui ir kt.) (Lenkauskas, 2011).

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

$$\mu_{srmax} = \frac{F_{xmax}}{F_z}; \quad (2.43)$$

Rato išilginio slydimo koeficientas, kuriam esant pasiekiamas didžiausias sukibimo koeficientas, vadinamas kritiniu rato išilginio slydimo koeficientu S_{xcrit} .

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

Santykinė, išilginė jėga, nustatyta, $S_{sr} = -1$ vadinama užblokuoto rato sukibimo koeficientu išilgine kryptimi μ_{srlock} .

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

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

$$\varepsilon_{sr} = \frac{\mu_{sr}}{\mu_{srmax}}; \quad (2.44)$$

Šis koeficientas ne didesnis kaip 1.

Didžiausią santykinės skersinės jėgos reikšmę turi laisvasis ratas. Išilginė kelio reakcija į riedantį ratą lygi nuliui. Ratas turi ribotą sukibimo potencialą: vienakryptė trintis neišvengiamai sumažina sukibimo savybes kita kryptimi. Paprastai mažiausia santykinės skersinės jėgos reikšmė yra 4–5 kartus mažesnė nei maksimalus sukibimo koeficientas skersine kryptimi. Todėl užblokuoti arba buksuojantys ratai negali atsverti išorinių šoninių apkrovų. Šiuo atveju automobilis iš esmės yra nevaldomas.

Maksimalus sukibimo koeficientas skersine kryptimi yra kiek didesnis nei atitinkamas išilginio sukibimo koeficientas – šiuolaikinių padangų $\mu_{srmax} = 1-1,2$.

2.11. Svorio centro įtaka dinamikai

Kuo aukštesnis automobilis, tuo aukščiau yra jo masės centras ir atvirkščiai: kuo žemesnis automobilis, tuo žemiau yra jo masės centras.

Transporto priemonės masės centro padėtis yra labai svarbus aspektas nagrinėjant šiuos rodiklius:

- Stabdymo ir greitėjimo pagreičius.
- Stovumą važiuojant įkalne ir nuokalne.
- Projektuojant automobilio stabdžių sistemą bei visų ratų varančiąją pavarą.

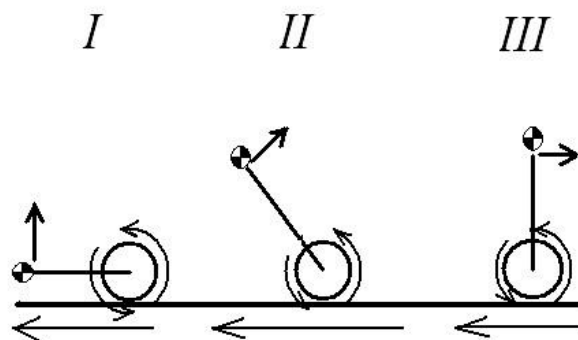
- Nagrinėjant vibracijos aspektus ir projektuojant atskirų automobilio komponentų (agregatų, detalių ir pan.) masės centrus.
- Važiavimo stabilumą posūkyje.
- Nustatant inercijos momentus ir kt.

Žemesnėje padėtyje esantis masės centras pagerina automobilio stovumą posūkiuose ir jo šoninį stovumą. Ratai geriau sukimba su kelio paviršiumi, kuriuo važiuoja automobilis, didėja ratų šoninis sukibimas, nes automobilio ratams tenkanti apkrova tolygiau pasiskirsto (Šližys, 2011). Transporto priemonės masės centras ar šiuo konkrečiu atveju elektromobilio – labai priklausomas nuo apkrovos. Priklausomai nuo to, kiek transporto priemonėje keleivių, kiek pakrauta transporto priemonė, masės centras gali kisti, o kartu su tuo keičiasi ir automobilio dinaminės savybės.

2.12. Transporto priemonės dinamika ir svorio centro santykio įtaka

Apskritai, kai projektuojama bet kokia transporto priemonė, kūbulas turi būti subalansuotas taip, jog įsibėgėjimo metu varantieji ratai gautų maksimalų įmanomą kūbulo svorį. Būtent, kūbulo balansas lemia ne ką mažiau, nei automobilio galia ar specifinė transmisija.

Yra žinoma, jog automobiliui pajudant iš vietos, kūbulas tarsi „atsilošia“, „permesdamas“ svorį iš kūbulo priekinės dalies į galinę. Akivaizdu, jog norėdami efektyviai pajudėti iš vietos, mes norime gauti automobilio masės centrą tokioje padėtyje, kad kuo didesnis kūbulo svoris atsidurtų tiesiai virš varančiosios ašies, t. y. maksimaliai prispaustų varančiuosius ratus prie trasos dangos. Dėl šios priežasties yra svarbu išnagrinėti, kiek, startavus automobiliui, pasikeičia jo masės centro padėtis, bei kurioje vietoje jis yra.



2.4 pav. Masės centro padėties pokytis staigiai pajudėjus iš vietos

2.4 pav. pateiktas modelis su trimis skirtingomis masės centro padėtimis varančiosios ašies atžvilgiu, tačiau tuo pačiu atstumu nuo jos:

I – įprasta galinių varančiųjų ratų automobilio masės centro padėtis. Šiuo atveju – kuo prastesnis varančiosios ašies ratų sukibimas su kelio danga, tuo blogesnė masės centro padėtis.

II – įprasta visų keturių varančiųjų ratų automobilių masės centro padėtis, kuri ne taip stipriai priklauso nuo ratų sukibimo ir tolygiai pasiskirsto startuojant automobiliui.

III – priekinių varančiųjų ratų automobilio masės centro padėtis. Kaip matome iš paveikslėlio, šiuo atveju bet koks masės centro judėjimas atgal yra nuostolingas, nes varantiesiems ratams tenka mažiau svorio, kas mažina sukibimą su kelio danga.

2.13. Elektromobilių konstrukciniai ypatumai

Norint išskirti elektromobilio skirtumus nuo įprastos transporto priemonės, pirmiausia reikia atskirai išnagrinėti konstrukcinius ypatumus, tokius kaip elektros variklių tipas, baterijos, perdavimo sistema ir t.t.. Žvelgiant iš įsibėgėjimo dinamikos perspektyvos, pirmiausia reikia išnagrinėti, kokios skirtingos elektros variklių konfigūracijos gali būti naudojamos. Elektromobiliuose naudojami kelių tipų elektros varikliai, kurių kiekvienas pasižymi savitomis savybėmis ir privalumais. Variklio tipo pasirinkimas priklauso nuo tokių veiksnių, kaip kaina, efektyvumas, galios tankis ir taikymo reikalavimai. Dažniausiai elektromobiliuose naudojami tokie elektros variklių tipai:

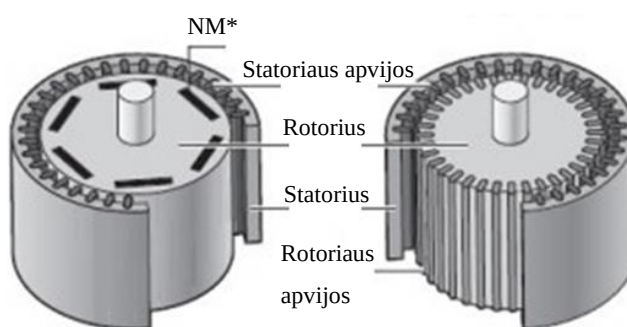
- Nuolatinių magnetų sinchroniniai varikliai (angl. *Permanent Magnet Synchronous Motor* – PMSM) (3.1 pav.) magnetiniam laukui sukurti naudoja nuolatinius magnetus. Varikliai pasižymi dideliu efektyvumu, galios intensyvumu bei yra plačiai naudojami elektrinėse transporto priemonėse dėl savo puikių charakteristikų, susijusių su sukimo momentu ir efektyvumu.
- Bešepetėliniai nuolatinės srovės varikliai (angl. *Brushless Direct Current* – BLDC) (3.2 pav.) dar vadinami elektroninės komutacijos varikliais (angl. *Electronically Commutated Motors* – ECM), mechaniniam judesiui generuoti naudoja nuolatinių magnetų ir elektroninės komutacijos derinį. Varikliai pasižymi patikimumu, efektyvumu ir mažais techninės priežiūros reikalavimais.
- Indukciniai varikliai (asinchroniniai varikliai) (3.1 pav.) nuolatinių magnetų, vietoje to jie naudoja elektromagnetinę indukciją, kad sukurtų besisukantį magnetinį lauką. Nors jų galios tankis gali būti šiek tiek mažesnis nei nuolatinių magnetų variklių, jie garsėja savo tvirtumu ir paprasta konstrukcija.
- Komutaciniai pasipriešinimo varikliai (angl. *Switched Reluctance Motors* – SRM) (3.3 pav.) paremti mažiausio magnetinio lauko pasipriešinimo principu, kai rotorius dėl

mažiausio pasipriešinimo kelio susilygina su statoriaus magnetiniu lauku. Šie varikliai žinomi dėl savo mechaninio paprastumo ir mažesnės kainos.

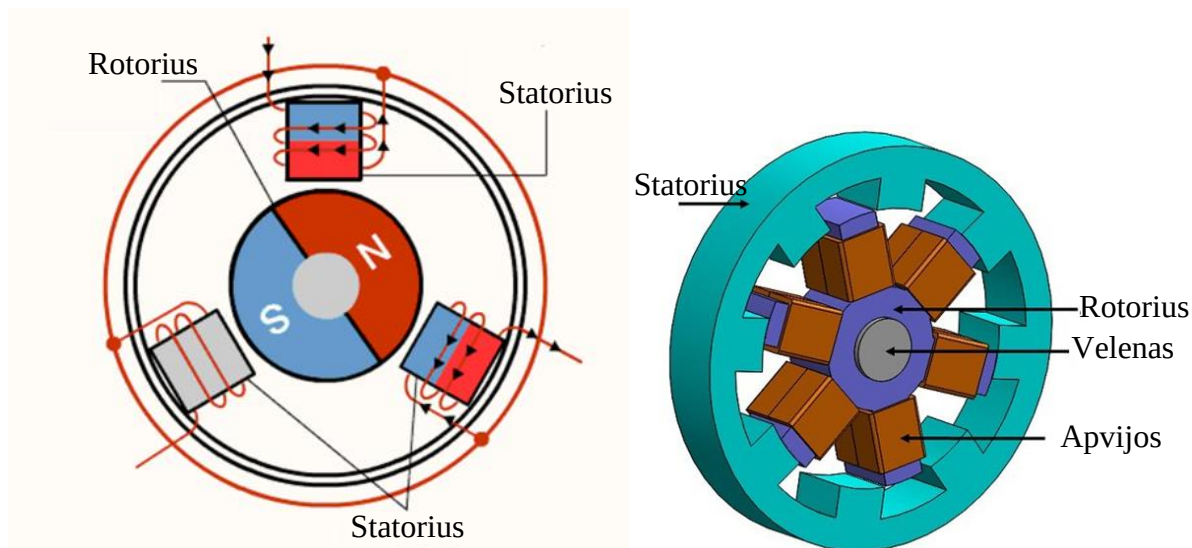
- Tiesioginės pavaros varikliai nepriklausomai nuo konkretaus variklio tipo, tiesiogiai jungiami prie transporto priemonės ratų, nenaudojant pavarų dėžės. Tai sparčiai populiarėjanti technologija, kuri vadinama rate integruotu elektros varikliu (angl. *In-Wheel Motor* – IWM). Konstrukcija sumažina mechaninius energijos nuostolius, nes panaikinami transmisijos mazgai ir pagerina bendrą efektyvumą, tačiau gali padidinti neamortizuotą masę.

Nuolatinių magnetų (sinchroninis)

Indukcinis (asinchroninis)



2.5 pav. Dviejų tipų elektros varikliai: sinchroninis ir asinchroninis elektros varikliai (* Nuolatiniai magnetai)



2.6 pav. Bešepetėlio ir komutacinio pasipriešinimo elektros variklio pagrindinė konstrukcinė sandara

Atlikus šiuolaikinių elektromobilių konstrukcinę analizę, galima teigti, kad elektromobiliai daugumoje varomi nuolatinių magnetų sinchroninių elektros variklių. Nagrinėjant pagrindinius šių elektros variklių principus, reikėtų išskirti pagrindinį, kaip konstrukcijos aspektą – didėjant variklio

sūkiams ir apskritai elektromobilio greičiui, kartu didėja ir elektros variklio elektromagnetinė jėga, o dėl akumulatoriaus įtampos apribojimo nuo tam tikro greičio turi sumažėti statoriaus apvijų priimamas magnetinis srautas. Tai atliekama suteikiant neigiamą jai srovę, kuri sukuria magneto srautui priešingą srautą (Belahcen, 2016).

Suprantama tai, kad tinkamam veikimui, elektros varikliams turi būti tiekiamas pakankamai elektros energijos, todėl prie svarbių konstrukcinių dalykų reikia išskirti akumuliatorių baterijas. Iš elektromobilio įsibėgėjimo perspektyvos, svarbiausia, kad akumuliatorių baterijos gebėtų tiekti visą reikalaujamą momentinę elektros energiją, todėl šioje vietoje taip pat labai svarbi baterijų valdymo sistema (angl. *Battery Management System* – BMS). Akumulatoriaus valdymo sistema atlieka svarbų vaidmenį palaikant nuoseklų įsibėgėjimą, kurio metu valdydama įvairius akumulatoriaus veikimo aspektus siekia optimizuoti parametrus (Emanet & Kiyak, 2021). Pirmiausia reikia pabrėžti, kad sistema nuolat stebi akumulatoriaus įkrovos būseną, kuri parodo akumuliatoriuje sukauptos energijos kiekį, palyginti su visa jo talpa. Informacija būtina norint nustatyti turimą panaudojamą energiją ir taip apskaičiuoti bei įvertinti likusį važiavimo atstumą.

Remdamasi realaus laiko duomenimis apie baterijų įkrovos lygį (angl. *State Of Charge* – SOC) ir transporto priemonės varomosios sistemos energijos poreikį, akumuliatorių valdymo sistema optimizuoja elektros energijos tiekimą iš akumulatoriaus į elektros variklį. Tai užtikrina, kad variklis gautų pakankamai galios, kad išlaikytų pastovų pagreitį ir išvengtų akumulatoriaus perkrovos arba per didelio iškrovimo.

Akumulatoriaus valdymo sistema taip pat kontroliuoja akumulatoriaus temperatūrą, kad užtikrintų optimalų veikimą ir ilgaamžiškumą. Didelio energijos poreikio momentais, pavyzdžiui, greitu įsibėgėjimu, akumuliatorių valdymo sistema gali reguliuoti tiekiamą galią, kad būtų išvengta akumulatoriaus elementų perkaitimo. Temperatūros valdymas padeda išlaikyti pastovų veikimą ir apsaugo akumuliatorių baterijas nuo pažeidimų.

Akumuliatorių valdymo sistema stebi atskirų elementų įtampą ir subalansuoja apkrovą tarp elementų, kad būtų užtikrintas vienodas energijos paskirstymas. Tai apsaugo nuo per daug arba per mažai įkrautų elementų, o tai gali pabloginti veikimą ir turėti įtakos pagreitėjimui.

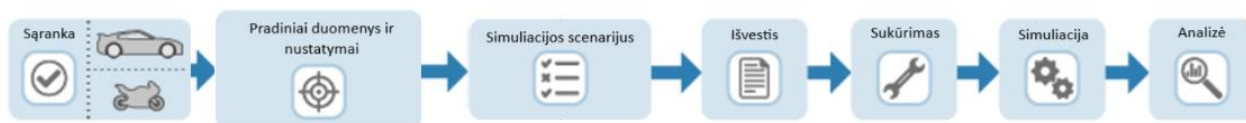
Reikia pabrėžti, kad pažangios sistemos gali naudoti algoritmus, kad numatytų galios poreikį, pagrįstą važiavimo sąlygomis, reljefu ir vairuotojo elgesiu (Emanet & Kiyak, 2021). Prognozuodamas galios poreikį, elektromobilio sistema gali aktyviai reguliuoti energijos tiekimą, kad išlaikytų pastovų pagreitį ir optimizuotų energijos vartojimą.

Nagrinėjant labai staigius įsibėgėjimo momentus su elektromobiliu, reikia įvertinti tai, kad gali atsirasti įtampos kritimas. Tai reiškiny, atsirandantis, kai akumulatoriaus įtampa laikinai nukrenta esant dideliame srovės poreikiui, todėl sumažėja elektros potencialas akumulatoriaus

gnybtuose (Wangsupphaphol et al., 2014). Šis reiškinys dažniausiai pastebimas įvairių tipų akumuliatoriuose, įskaitant ličio jonų baterijas, naudojamas elektromobiliuose ir tai gali turėti įtakos tiek akumuliatoriaus veikimui, tiek įrenginių, maitinamų iš akumuliatoriaus, veikimui. Įtampos kritimas gali turėti įtakos akumuliatoriaus veikimui ir elektromobilio važiavimui, pavyzdžiui gali pasireikšti sumažėjęs našumas, nes dėl įtampos kritimo gali sumažėti akumuliatoriaus išėjimo galia, o tai gali turėti įtakos elektros variklių ar kitų elektros komponentų, maitinamų iš akumuliatoriaus, veikimui (Sepulchre, 2018).

3. Elektromobilio matematinis modelis

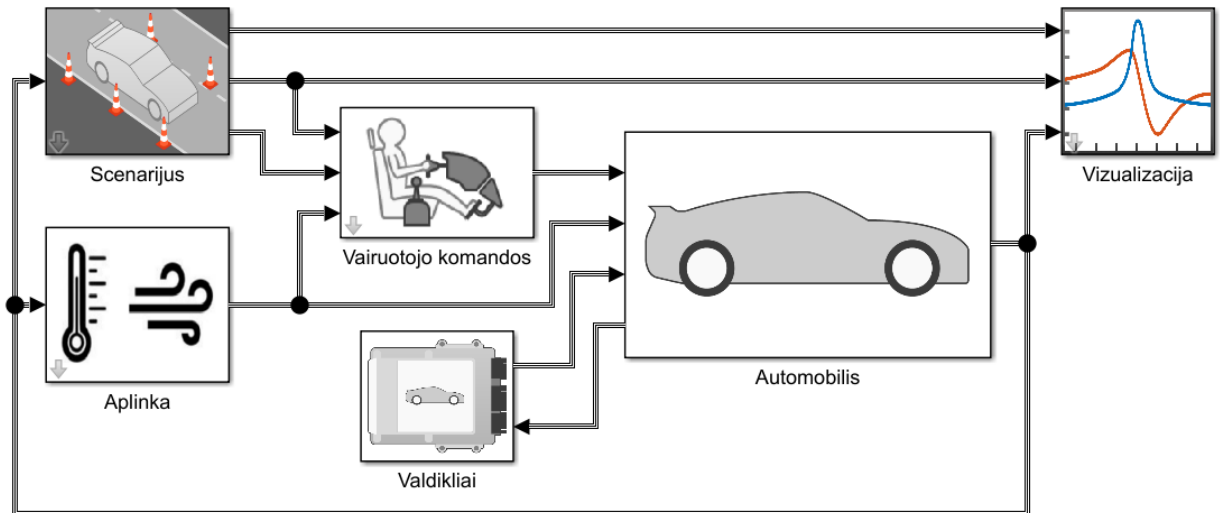
Panaudotas virtualaus elektromobilio matematinis modelis „Matlab“ programoje įsibėgėjimo matavimams ir įsibėgėjimo priklausomybės nuo įkrovos lygio patikrinimui atlikti. Matematinio modelio simuliacijos darytos „Matlab Simulink“ programa naudojant „Virtual Vehicle Composer“ posistemę ir programos matematinio modelio formules. Virtualaus elektromobilio modelio simuliacijų eiga sudaroma pagal standartinę programos algoritmą, pateiktą 3.1 pav.



3.1 pav. Elektromobilio matematinio modelio algoritmas „Virtual Vehicle Composer“ aplinkoje
Simuliacijos algoritmo eiga:

- Pasirenkamas automobilio tipas. Šiuo atveju – elektra varoma transporto priemonė su vienu elektros varikliu, priekine varančiąja ašimi ir atvirojo tipo diferencialu.
- Naudojami standartiniai „Matlab“ elektromobilio parametrai, tačiau gali būti ir keičiami reikiami elektromobilio parametrai (žr. Priedas A).
- Nustatomas simuliacijos scenarijus. Kadangi norima patikrinti esant maksimaliai apkrovai, sudaromas važiavimo scenarijus, kai maksimaliai nuspaustas akceleratoriaus pedalas (angl. *Wide Open Throttle* – WOT) iki 100 km/h greičio.
- Nustatoma, kokius duomenis pateikti po simuliacijos ir kokie grafikai turi būti sudaryti.
- Atlikus simuliaciją, duomenys perkeliama ir analizuojami, sudaromi galutiniai grafikai ir atliekama lyginamoji gautų rezultatų analizė.
- Suformuluojamos išvados apie pasiektus rezultatus, pateikiami lyginamieji matematinio modelio simuliacijų grafikai su analize.

„Virtual Vehicle Composer“ posistemėje sugeneruotas demonstracinis elektromobilio modelis pateiktas 3.2 pav.



3.2 pav. Pagrindinė sugeneruoto elektromobilio matematinio modelio schema

Elektromobilio matematinio modelio simuliacijomis nustatyta:

- Greičio kitimo tendencija simuliacijoje.
- Pagreičio priklausomybės kitimo tendencija simuliacijoje.
- Virtualaus elektromobilio įsibėgėjimo priklausomybė nuo elektromobilio baterijų įkrovos lygio ir parametrų dinamiškumas.

3.1. Elektromobilio matematinio modelio simuliacijų duomenys

Atlikta pradinė simuliacija su elektromobilio matematiniu modeliu „Matlab“ programa siekiant nustatyti galimus modelio įsibėgėjimo parametrus. Nustatytas elektromobilio pagreičio ir greičio kitimas laike.

Simuliacija atliekama imituojant staigų elektromobilio pajudėjimą iš vietos. Pradinis elektromobilio greitis 0 km/h, tikslas – 100 km/h. Pasiekus norimą greitį, modelis apribojamas ties pasiektu greičiu iki kol bus gautas akceleratoriaus atleidimo signalas.

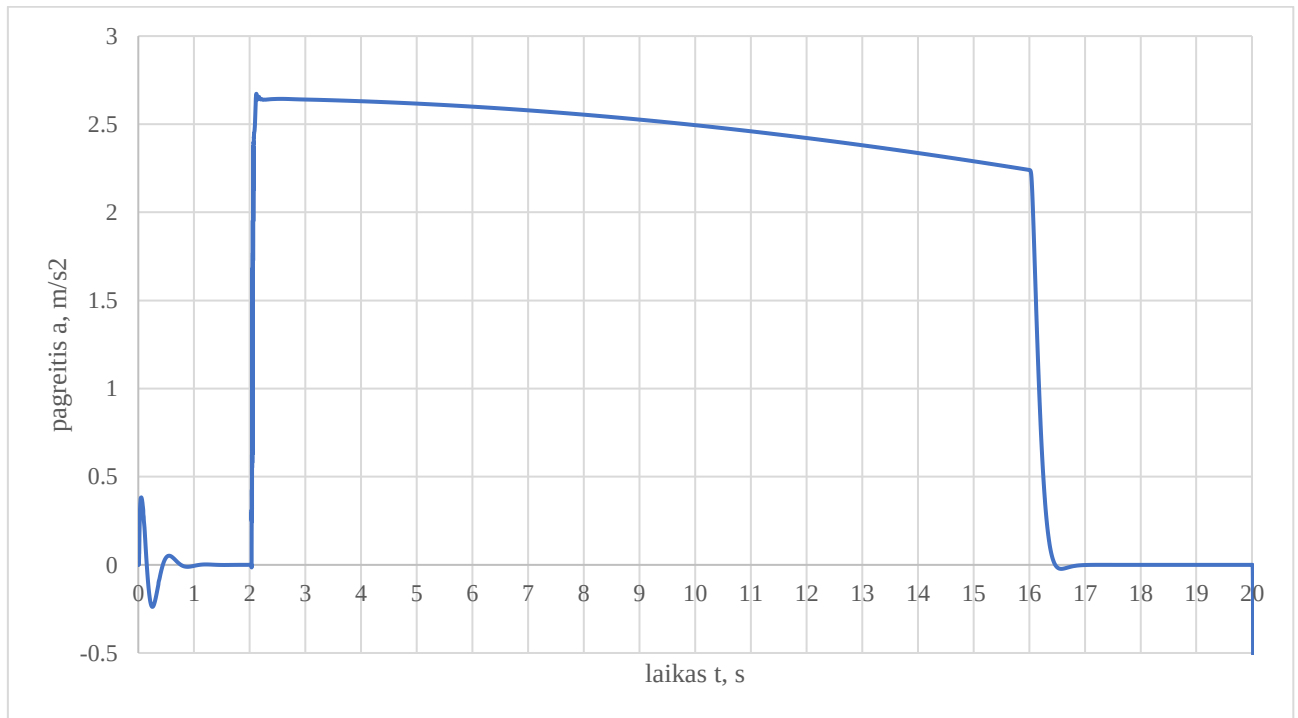
Atliekamos simuliacijos leidžia nustatyti pagrindines parametrų reikšmes. Iki eksperimentinio tyrimo pradžios su atlikta simuliacija galima įvertinti, kokių pagreičio kreivės kitimo tendencijų tikėtis. Pagrindiniai simuliacijų parametrai:

- Simuliacijos trukmė – 40 s. Važiavimas vyksta nuo 2 iki 20 s. Ties 20 s gaunamas signalas stabdyti.
- Norimas pasiekti greitis – 100 km/h.

- Baterijų įkrovos simuliacijos metu – 100 %, 20 % ir 10 %.

3.2. Virtualaus elektromobilio modelio įsibėgėjimas

Atliktos atsikartojančios elektromobilio modelio simuliacijos 0–100 km/h režimu, patikrintas korektiškas veikimas, gauti duomenys ir sudarytas pagreičio kitimo priklausomybės grafikas.



3.3 pav. Virtualaus elektromobilio pagreičio kitimas įsibėgėjimo metu 0–100 km/h režimu

Simuliacija atlikta be apribojimų ir nekeičiant baterijų įkrovos lygio. Pradinė simuliacija siekiama parodyti elektromobilio įsibėgėjimo pagreitį. Sudarytame grafike matyti elektromobilio modelio pagreičio kitimas su ypač staigiais pokyčiais. Iki simuliacijos pradžios matomas susvyravimas iki 1 s, kuris nėra važiavimo dalis. Simuliacija pradedama antrąją sekundę. Matyti, kad momentinis išvystomas pagreitis simuliacijos pradžioje nuo 2 iki 3 s pasiekia apie $2,7 \text{ m/s}^2$, atsiranda nežymus susvyravimas ir tuomet pagreitis stabilizuojasi. Didėjant elektromobilio greičiui, pagreitis tolygiai pradeda mažėti iki 16 sekundės, kur pasiekiamas 100 km/h, pagreitis siekia apie $2,3 \text{ m/s}^2$ ir baigiasi simuliacija. Staigus nuokrytis pagreičio kreivėje simbolizuoja bandymo pabaigą, kai pasiekus 100 km/h greitį, baigiasi įsibėgėjimo signalas. Iš sudaryto važiavimo režimo matyti, kad bendras įsibėgėjimo laikas siekia apie 14 s. Pasiekiamas didžiausias $2,7 \text{ m/s}^2$ ir mažiausias $2,3 \text{ m/s}^2$ pagreitis, bendras skirtumas – $0,4 \text{ m/s}^2$ tarp pradinės didžiausios ir galinės mažiausios pagreičio reikšmės. Pagreitis išlaikomas su nedideliu pokyčiu per visą įsibėgėjimo laiką, įsibėgėjimo pagreičio kitimas itin staigiai kinta.

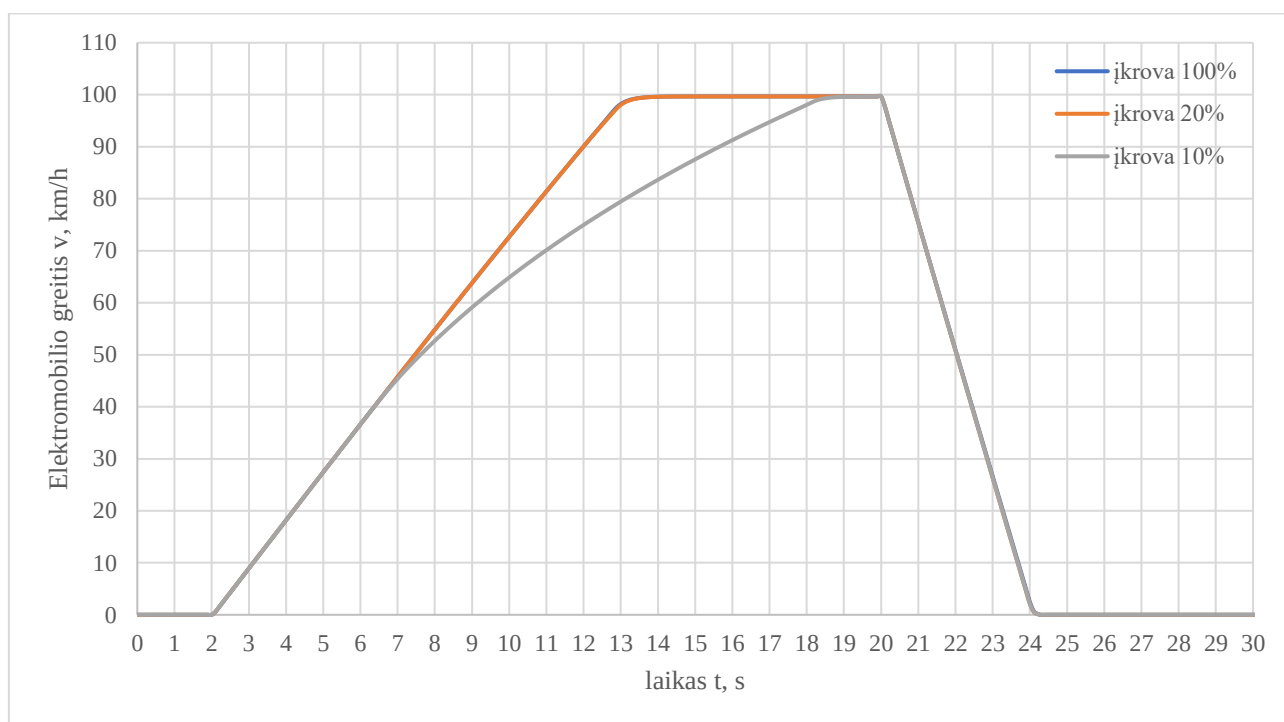
3.3. Elektromobilio matematinio modelio įsibėgėjimo priklausomybė nuo įkrovos

Su sugeneruotu elektromobilio modeliu atliekamos simuliacijos įsibėgėjimo priklausomybei nuo baterijų įkrovos lygio patikrinti. Visi bandymai atliekami su identiškais elektromobilio parametrais, tik pakeičiant baterijų įkrovą.

Kartu su įsibėgėjimo grafikais pateikiami ir pagrindiniai elektromobilio baterijų parametrai – įtampa bei simuliacijos metu fiksuojami elektros srovės pokyčiai.

Atlikta po 3 pakartotinius bandymus su skirtingomis įkrovomis. Sudaryti grafikai ir pagrindiniai parametrai pateikiami toliau esančiuose paveiksluose.

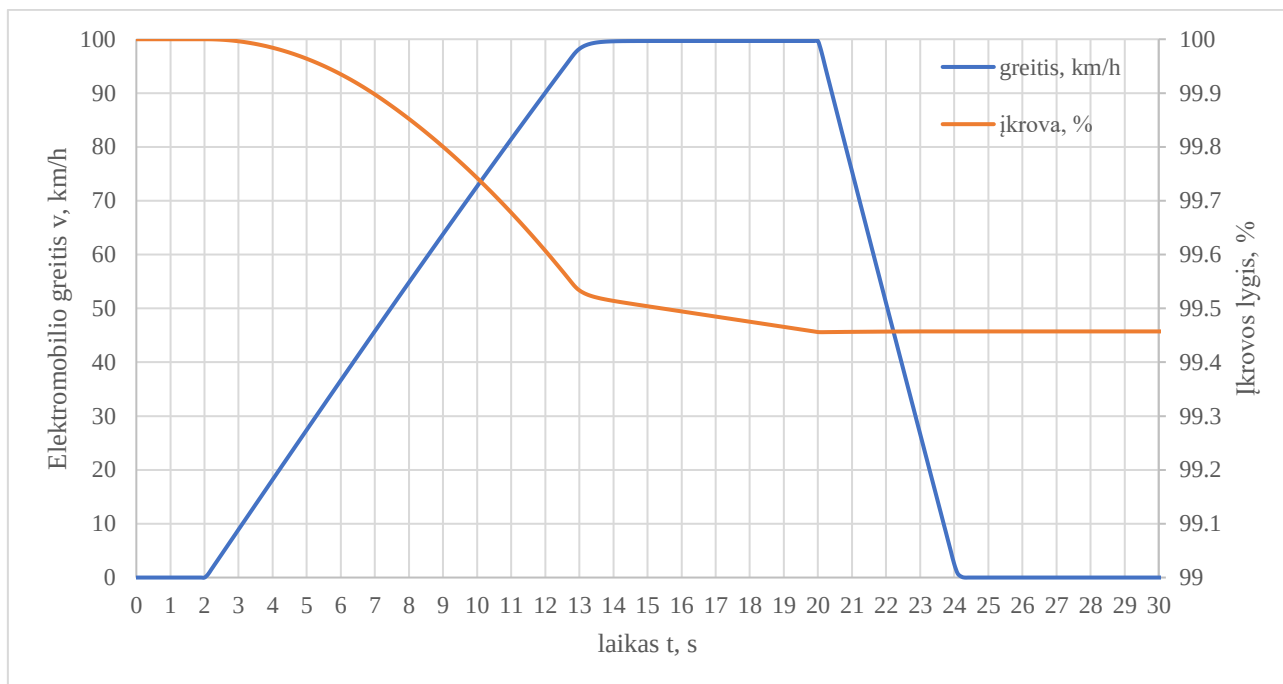
3.4 pav. sudarytas grafikas rodo, kaip kinta virtualaus elektromobilio įsibėgėjimas esant skirtingai baterijų įkrovai.



3.4 pav. Elektromobilio simuliacijų įsibėgėjimo pokytis esant skirtingoms įkrovoms

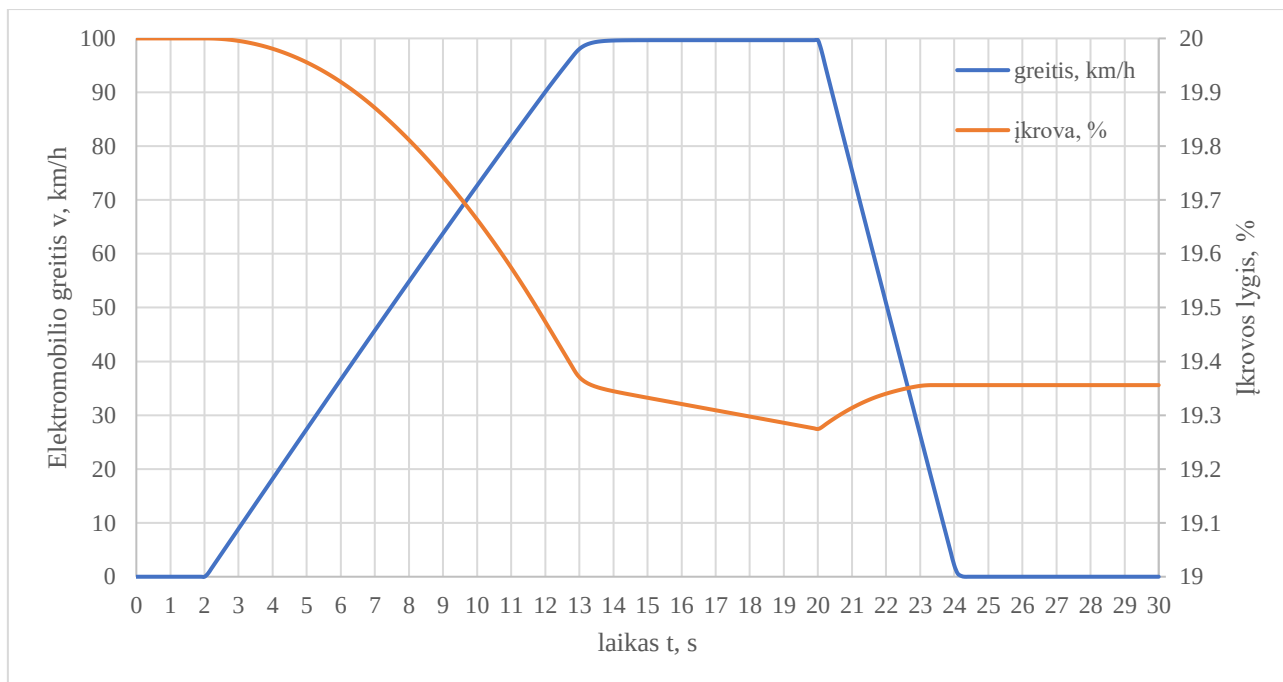
Siekiant įvertinti parametrų dinamiškumą atliekant simuliacijas, sudaryti greičio kitimo grafikai kurie parodo, kaip kartu kinta ir virtualaus elektromobilio įkrovos lygis visos simuliacijos metu. Žemiau pateikti grafikai visų skirtingų įkrovų lygiams analizuoti.

Pirmasis grafikas (3.5 pav.) rodo, kaip kinta įkrova, kai simuliacija atlikta esant visiškai įkrovai – prasidėjus simuliacijai nuo 2 s, įsibėgėjimo metu, iki kol pasiekiamas reikiamas greitis, įkrova krinta iki 99,5 % ties 13 s ir akceleratoriaus atleidimo momentu ties 20 s, matyti, kad regeneracija nevyksta.

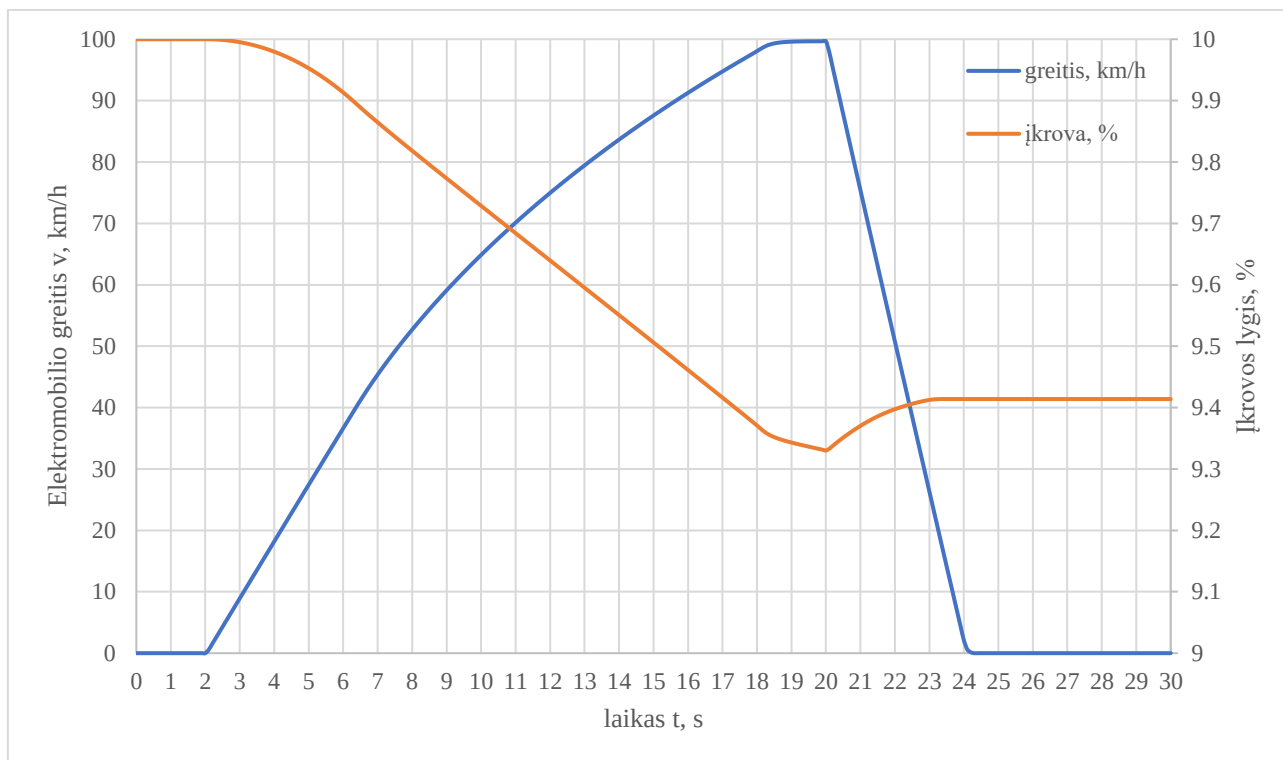


3.5 pav. Elektromobilio simuliacijų įkrovos priklausomybė nuo laiko esant visiškai įkrovai

Toliau pagal eiliškumą atlikta antroji simuliacija su 20 % įkrovos. Sudarytame grafike (3.6 pav.) matyti, kad prasidėjus įsibėgėjimui nuo 2 s, iki kol pasiekiamas reikiamas greitis, įkrova krinta iki 19,4 % ties 13 s, palaikant tolygų važiavimą dar krinta iki 19,3 %, o akceleratoriaus atleidimo momentu ties 20 s, matyti, kad regeneracija pradeda vykti ir simuliacijos pabaigoje įkrova vėl siekia 19,4 %.

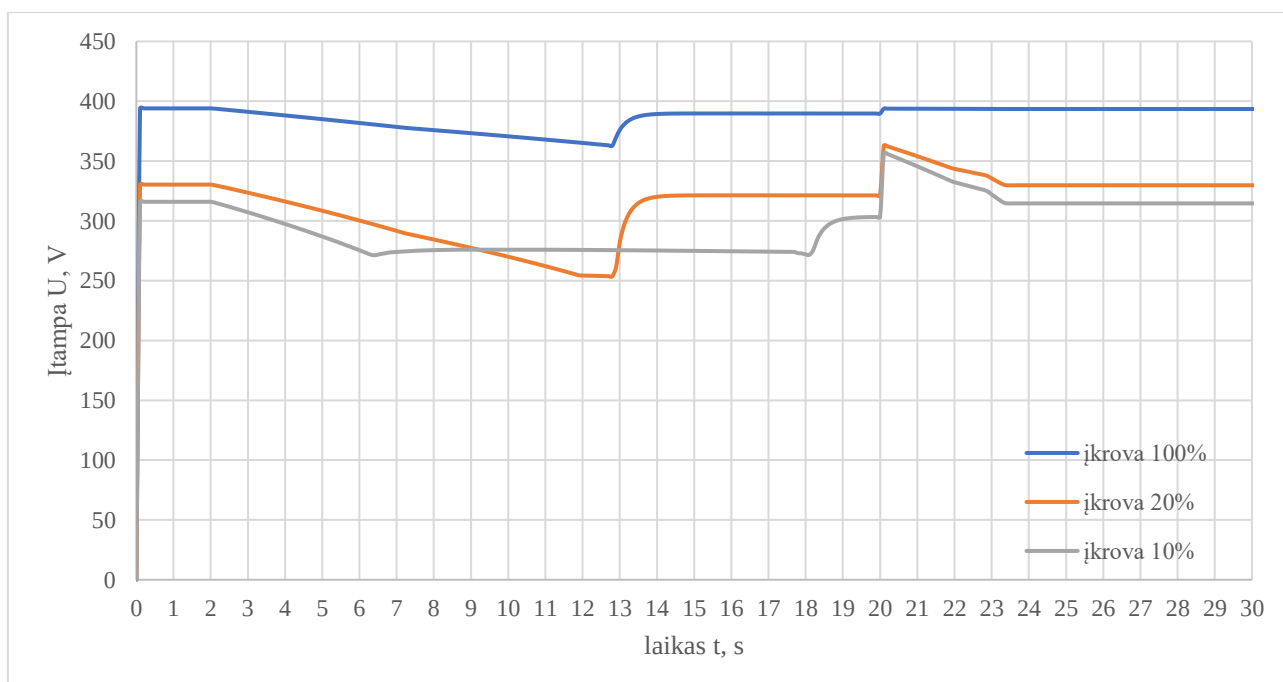


3.6 pav. Elektromobilio simuliacijų įkrovos priklausomybė nuo laiko esant 20 % įkrovai

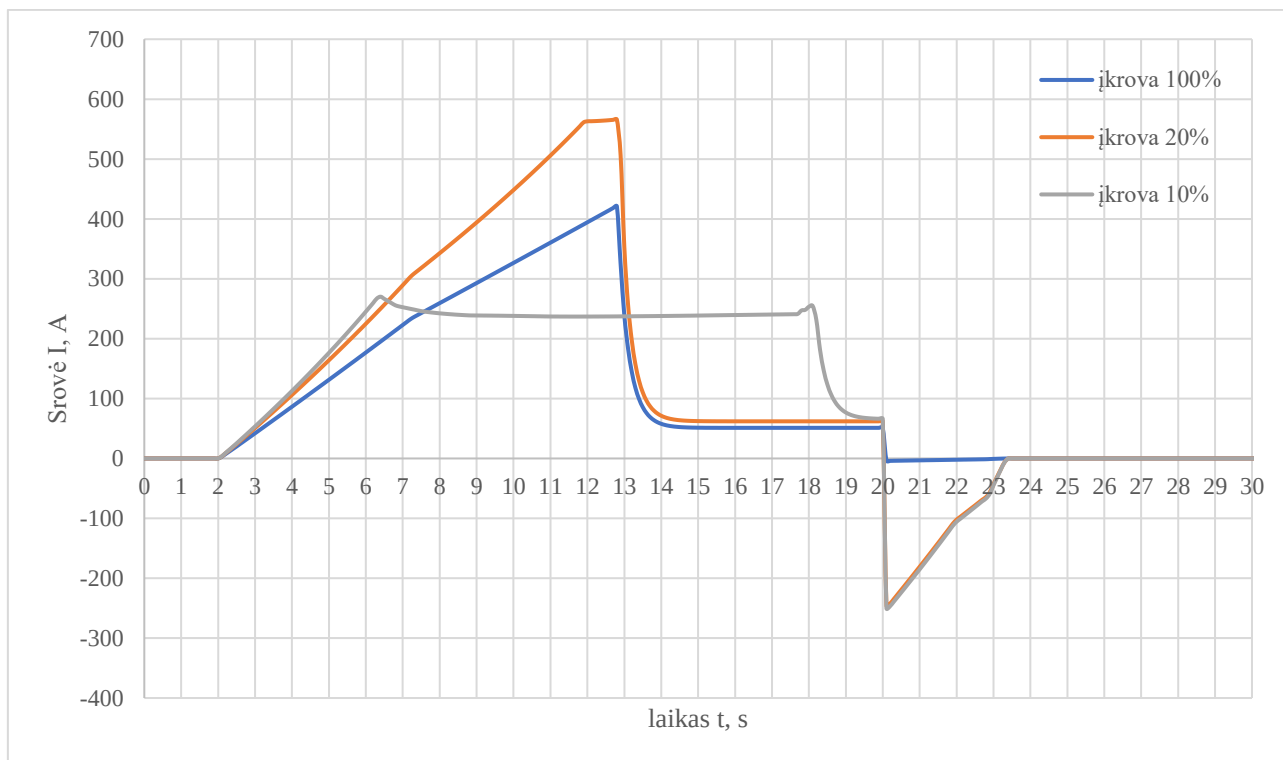


3.7 pav. Elektromobilio simuliacijų įkrovos priklausomybė nuo laiko esant 10 % įkrovai

Toliau pagal eiliškumą atlikta trečioji simuliacija su 10 % įkrovos. Sudarytame grafike (3.7 pav.) matyti, kad prasidėjus įsibėgėjimui nuo 2 s, iki kol pasiekiamas reikiamas greitis, įkrova krinta kiek žemiau 9,4 % ties 18 s, palaikant tolygų važiavimą dar krinta iki 9,3 %, o akceleratoriaus atleidimo momentu ties 20 s, matyti, kad regeneracija pradeda vykti ir simuliacijos pabaigoje įkrova siekia kiek daugiau nei 9,4 %.



3.8 pav. Virtualaus elektromobilio įtampos pokytis baterijoje esant skirtingoms įkrovoms



3.9 pav. Virtualaus elektromobilio elektros srovės pokytis baterijoje esant skirtingoms įkrovoms

Apibendrinant, atliktos demonstracinio matematinio modelio simuliacijos keičiant baterijų įkrovos lygį 0–100 km/h režimu. Gauti parametrai ir sudaryti grafikai. Iš duomenų matyti, kad besikeičianti įkrova tiesiogiai koreliuoja su elektromobilio modelio įsibėgėjimu. Reikia pabrėžti, kad atlikus bandymus su 100 % ir 20 %, gautas labai nežymus duomenų skirtumas, duomenys persidengia, todėl akivaizdaus skirtumo tarp jų kreivių 3.4 pav. nematyti. Simuliacijos tiek su 100 %, tiek 20 % pasiekia 100 km/h greitį apie 14 važiavimo sekundę, o bandymas su 10 % pasiekia 100 km/h apie 18,5 sekundę. Skirtumas įsibėgėjime žema elektromobilio įkrova apie 4,5 sekundes.

Galima paanalizuoti kaip keičiasi pagrindiniai baterijų parametrai: esant 100 % įkrovai, matyti, kad įtampa simuliacijos pradžioje nominali, apie 400 V, pradėjus važiavimą pastebimas nežymus įtampos nuokrytis, pasiekus 100 km/h, įtampos reikšmė grįžta į pradinę padėtį. Esant 20 % įkrovai, įtampa kiek mažesnė, apie 330 V, pradėjus važiavimą pastebimas didžiausias įtampos nuokrytis – nuo 330 V iki 250 V. Pasiekus 100 km/h grįžta į pradinę reikšmę, o prasidėjus stabdymui, matyti, kad vyksta elektros energijos regeneracija. Esant 10 % baterijos įkrovai, įtampa siekia apie 320 V, pradėjus važiavimą matomas įtampos nuokrytis, tačiau pastebimas ir apribojimas – įtampa krenta iki 270 V ir tokią reikšmę palaiko iki 100 km/h ties 18 s. Analogiškai matyti panaši kitimo tendencija ir su elektros srove baterijose.

4. Elektromobilių įsibėgėjimo eksperimentinis tyrimas

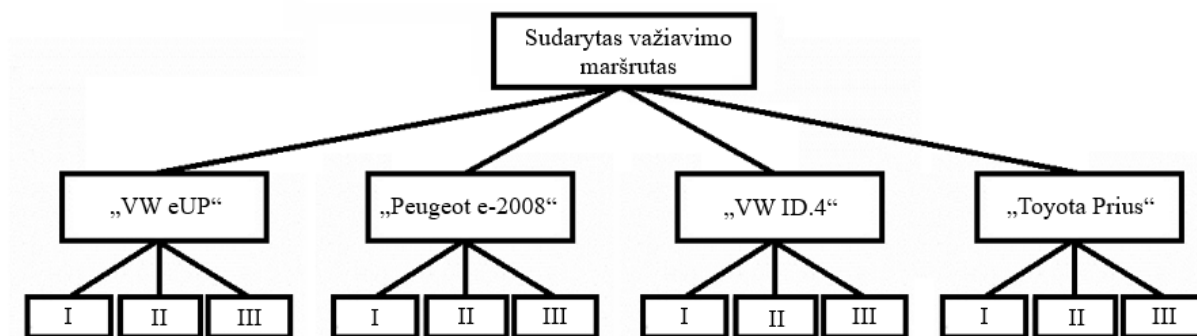
Nustatyti transporto priemonės charakteristikas, pavyzdžiui, maksimalų judėjimo greitį, stabdymo kelią, šoninį ir išilginį pagreitį, galima su vienu universaliu prietaisu, arba su keliais, iš kurių kiekvienas atlieka vieno ar kelių dydžių matavimus. Bandant elektromobilį ir siekiant didelio matavimų tikslumo, reikia naudoti vieną ar kelis matavimo prietaisus, kurių kiekvienas atliktų savo funkciją, tai yra matuotų tuos dydžius, kuriems matuoti yra sukurtas. Taip pat, norint gauti didesnę tikslumą, svarbu naudoti ir pritvirtinti kelis vienodus prietaisus skirtingose automobilio vietose, nes greitėjimo, stabdymo, sukimo metu automobilį nuolatos veikia skirtingo dydžio jėgos. Jei didelio tikslumo nereikia, yra ir paprastesnių matavimo prietaisų. Tokie įrenginiai neužima daug vietos, jie kompaktiški. Dažniausiai būna tvirtinami salono viduje ir prijungiami prie maitinimo. Jų viduje įtaisyti keli matavimų elementai, kuriais yra apskaičiuojami keli pagrindiniai dydžiai, o visi kiti dydžiai ir charakteristikos yra apskaičiuojamos pagal formules, remiantis bandymo metu gautais rezultatais.

Elektromobilio įsibėgėjimo dinamikos parametrus galima išbandyti keliais metodais:

- Pirmasis – kompiuterinis modeliavimas. Tai matematiniais modeliais imituojamas elektromobilio judėjimas įvairiomis važiavimo sąlygomis. Metodas yra veiksmingas ir ekonomišką, tačiau jis gali neviseškai atspindėti realaus pasaulio sąlygų sudėtingumą ir gali atsirasti daugiau paklaidų rezultatuose.
- Antrasis – bandymai kelyje. Elektromobilis išbandomas kelyje įvairiomis važiavimo sąlygomis ir režimais. Bandymai kelyje suteikia vertingų duomenų apie transporto priemonės veikimą realiomis sąlygomis, tačiau jie gali užimti daug laiko ir gali būti brangūs. Taip pat, atliekant bandymus reikia daug tikslumo, kad žmogiškojo faktoriaus klaidų būtų kiek įmanoma išvengta.
- Paskutinis – laboratoriniai bandymai. Elektromobilis bandomas kontroliuojamoje laboratorinėje aplinkoje, naudojant tik specialią įrangą. Taikant metodą galima gauti išsamios informacijos apie transporto priemonės judėjimą, veikimą ir efektyvumą, tačiau metodas gali neviseškai atspindėti realių sąlygų sudėtingumą.

Iš visų prieš tai paminėtų bandymų, magistro baigiamajam tyrimui, kaip pagrindinis, pasirenkamas eksperimentinis bandymas keliuose, realioms ir besikeičiančioms sąlygoms išbandyti. Analogiškai sudaromas ir matematinis modelis, tačiau tik lyginamajai analizei atlikti. Išsami tyrimo metodika, eksperimento aprašymas bei eiga pateikta 4.1 pav. Siekiant korektiškų duomenų, eksperimentiniam tyrimui pasirenkami keli skirtingi elektromobiliai, su kuriais būtų galima įvertinti skirtingų elektromobilių konstrukcijų įsibėgėjimo dinamikų specifikas.

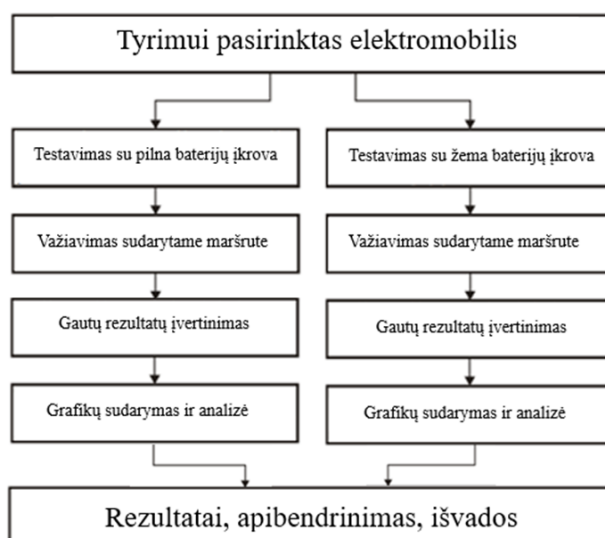
Pagrindinis matavimo prietaisas – „XL Meter“, su kuriuo matuojamas pagrindinis įsibėgėjimo parametras – išilginis pagreitis. Siekiant didesnio tikslumo ir didesnės duomenų aibės, kartu naudojama „Matlab“ aplikacija išmaniajame įrenginyje su akcelerometru, kurios duomenis patikrinus pirmuoju prietaisu „XL Meter“, būtų galima panaudoti kaip pagalbinius rezultatus. Plačiau apie išvardytus prietaisus informacija pateikiama kitame poskyryje.



4.1 pav. Sudaryti važiavimo režimai eksperimentui atlikti. I, II, III – važiavimo režimai, kur I – 0–100 km/h, II – 50–100 km/h ir III – 50 metrų įsibėgėjimas

Kaip pateikta 4.1 pav., pagrindinis eksperimentinės dalies tikslas – užfiksuoti transporto priemonių važiavimo duomenis, įsibėgėjimo pagreičius keičiant važiavimo režimus. Bandymai atliekami atsižvelgiant į darbe iškeltus darbo uždavinius.

Kaip atskiras darbo uždavinys – patikrinti baterijų įkrovos lygio įtaką įsibėgėjimo parametrų eksperimentiniu bandymu, 4.2 pav. pateikta šios tyrimo dalies eiga.



4.2 pav. Elektromobilių įsibėgėjimo parametrų nuo įkrovos lygio eksperimentinio tyrimo eiga

Atlikus bandymus, gauti rezultatai susisteminami, išvedami rezultatų vidurkiai, sudaromi grafikai, leidžiantys pateikti grafinę medžiagą ir įvertinti pagrindinius skirtumus tarp visų naudojamų

transporto priemonių, atlikti lyginamąją analizę bei išskirti elektromobilių įsibėgėjimo dinamikos specifiką ir jų pranašumą.

4.1. Tyrimo metodika

Iš tyrimo metodikos verta išskirti, kad bendram įsibėgėjimo dinamikos palyginimui reikalingi ne tik elektromobilių rezultatai ir jų įsibėgėjimo pagreičiai, tačiau, siekiant išskirti gautus rezultatus ir geriau perteikti esminius skirtumus, pateikiami ir hibridinio automobilio rezultatai su e-CVT pavara (angl. *electro Continuously Variable Transmission*). Atliekant lyginamąją analizę siekiama išskirti skirtingas įsibėgėjimo tendencijas tarp elektromobilių ir hibridinio automobilio, pateikti staigų elektromobilių sukimo momento perdavimą ir jo pajudėjimą iš vietos, pateikti pagreičio priklausomybes ir pagreičio kitimo tendencijas bei dėsninumus. Turint didesnę bandymų imtį, galima sudaryti tikslesnę važiavimų statistiką ir pateikti esminius įsibėgėjimo dinamikos skirtumus tarp šių konstrukcijų.

Išsamiai aprašant eksperimentinio tyrimo metodiką reikia išskirti:

1. Atliekami važiavimai transporto priemonėmis siekiant surinkti įsibėgėjimo pagreičių vertes.
2. Atliekami važiavimai trimis skirtingais elektromobiliais ir taip pateikti skirtumus tarp jų įsibėgėjimo parametrų priklausomai nuo konstrukcijos tipo.
3. Atliekamas papildomas važiavimas hibridine transporto priemone.
4. Atliekami važiavimai elektromobiliu skirtingomis baterijų įkrovomis siekiant patikrinti įkrovos lygio įtaką įsibėgėjimo parametrams. Atliekant eksperimentinį bandymą skirtingomis baterijų įkrovomis, atskaitos taškais laikomos įkrovos:
 - Visiškai įkrauta baterija – tai $>85\%$ elektromobilio likusio nuvažiuojamo atstumo, t. y., paėmus elektromobilį dalis įkrovos nuo 100% pakinta, kol pasiekiamas bandymų maršrutas.
 - Žema baterijų įkrova – tai $<25\%$ elektromobilio likusio nuvažiuojamo atstumo.

Baterijų įkrovos lygis kartu pateikiamas ir kilovatvalandėmis (kWh) skaičiuojant proporcingai nuo visiškos akumuliatorių baterijų įkrovos. Prieš pradėdant bandymą, baterijų įkrovos lygį fiksuoja elektromobilio skydelio rodmenys ir vidiniai sistemos nustatymai – tikslesniam nuskaitymui su diagnostiniu įrankiu nėra galimybių.

Pagal prieš tai pateiktą tyrimo grafiką (4.1 pav.), kiekvienas etapas atliekamas pagal iškeltus darbo uždavinius tokia tvarka:

- Važiavimas sudarytame maršrute – atliekami eksperimentinio tyrimo važiavimai. Siekiant įvertinti įsibėgėjimo dinamiką ne iš vienos važiavimo perspektyvos, važiavimo režimai

pajvairinami, kaip pateikta 4.2 pav. Kiekvienu važiavimo režimu renkami įsibėgėjimo pagreičių duomenys skirti visų transporto priemonių lyginamajai analizei atlikti.

- Važiavimo režimai – eksperimentiniam tyrimui atlikti sudaryti 3 skirtingi važiavimai. Tai režimai, kurie leis aiškiai išskirti įsibėgėjimo pagreičių reikšmes ir atlikti palyginimus. Pagal važiavimo režimus stebima, kaip eismo sąlygos leidžia efektyviai išnaudoti dideles elektromobilių įsibėgėjimo galimybes, koks eismo įvykio išvengimo kriterijus. I važiavimo režimas skirtas patikrinti transporto priemonės gebėjimą išlaikyti tolygų greitėjimą esant maksimaliam sukimo momentui. II važiavimo režimas skirtas imituoti įsibėgėjimą iš greitėjimo juostos esant maksimaliam sukimo momentui ir atliekamas atskirai nuo I važiavimo režimo, kad atskirai matytųsi pagreičio kitimo tendencija visiškai nuspaudus akceleratorių nuo pastovaus greičio. III važiavimo režimas skirtas imituoti staigų pajudėjimą iš vietos, tačiau nesiekama didelio greičio. Pagal sudarytus važiavimo režimus surenkami pagrindiniai tyrimo duomenys iškeltiems darbo tikslams.

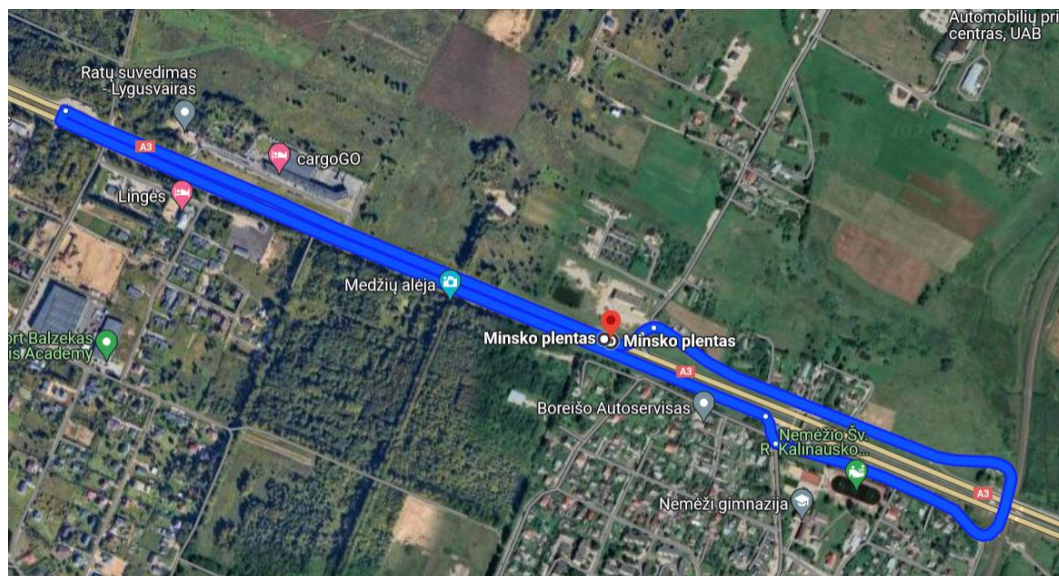
- Testavimas su visiška baterijų įkrova – pirmiausia atliekami važiavimai maršrute su visiška elektromobilių baterijų įkrova siekiant turėti pradinį realiuosius duomenis, kurie taptų atskaitos tašku tolesniems bandymams. Reikia pabrėžti, kad atvykimas iki bandymo maršruto pareikalauja dalies įkrovos, todėl visiška įkrova laikoma $>85\%$.

- Testavimas su žema baterijų įkrova – atlikus važiavimus maršrute su visiška įkrova, toliau naudojami tie patys elektromobilių modeliai tik su žema įkrova matavimams atlikti, kurių metu norima patikrinti ar kinta elektromobilio įsibėgėjimas ir maksimalus galios perdavimas, kai elektromobilio sistema indikuoja žemą įkrovą. Atliekama I ir II važiavimo režimu.

- Analogiškai atliktas važiavimas su hibridine transporto priemone visais važiavimo režimais, tačiau neatliekamas joks analogiškas bandymas žemai elektromobilio įkrovai. Hibridine transporto priemone siekiama tik išskirti esminius skirtumus nuo elektromobilių įsibėgėjimo, esant maksimaliam sukimo momentui.

- Gautų rezultatų įvertinimas – pirmiausia įvertinami naudojamų prietaisų duomenys tarpusavyje ir apskritai jų tinkamumas tolesniam tyrimui. Patikrinus duomenis, tyrimas tęsiamas toliau. Atlikus važiavimus su pasirinktais elektromobiliais sudarytais režimais, atlikus važiavimus esant skirtingai įkrovai ir surinkus visus duomenis, pradedama rezultatų analizė.

Atliekant eksperimentinius važiavimo bandymus, svarbiausia tinkamai suplanuoti važiavimų eigą, taip taupant laiką ir kitus resursus. Atsižvelgiant į visus svarbiausius darbo aspektus, iškeltus darbo uždavinius, sudarytas maršrutas, geriausiai leidžiantis įgyvendinti reikiamus bandymus.

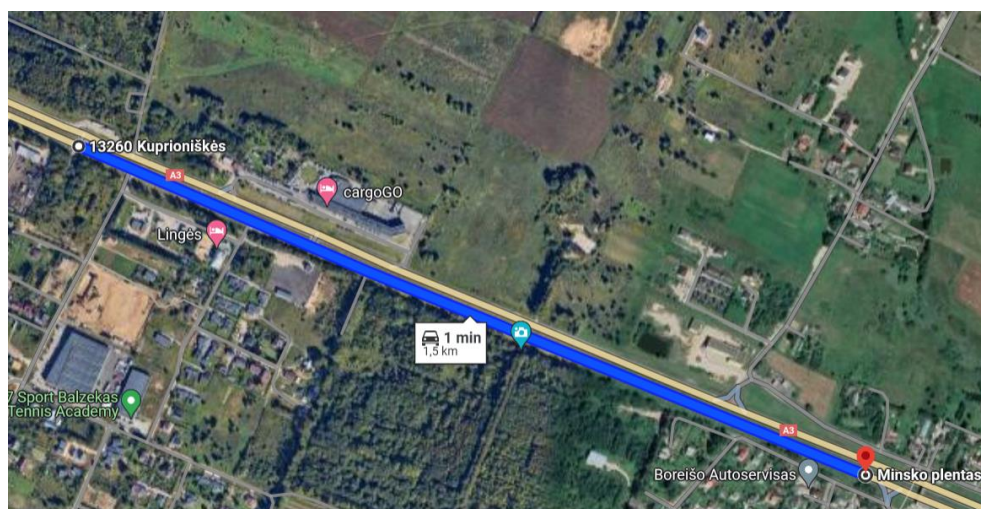


4.3 pav. Sudarytas važiavimo maršrutas visiems važiavimo režimams (Sudaryta pagal *Google Maps*)

Siekiant užtikrinti saugumą, pasirinkta A3/E28 kelio atkarpa ir tamsusis paros metas, kai eismo srautas mažas ir bandomas elektromobilis netampa kliūtimi eisme bei kitiems eismo dalyviams. Pagrindiniai pasirinkto ruožo aspektai: platus, dviejų juostų kelias, gera asfaltuota kelio danga, ilgas maršruto atstumas, greitėjimo juosta, galimybė tinkamai apsisukti. Maršrutas pasirinktas dėl to, kad galima atlikti visus reikalingus važiavimo režimus, imituojant važiavimą realiame kelyje, kaip pavyzdžiui, išvažiavimą iš greitėjimo juostos ir įsiliejęmą į bendrą eismo srautą.

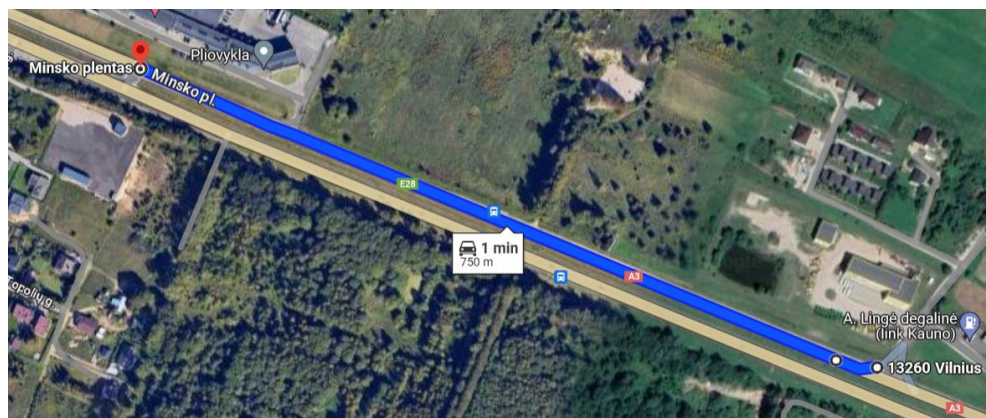
Iš prieš tai pateikto 4.3 pav. galima išskirti tokias pagrindines atkarpas su trumpu aprašymu.

Atkarpa, kurioje atliekamas I važiavimo režimas, pateikta 4.4 pav.

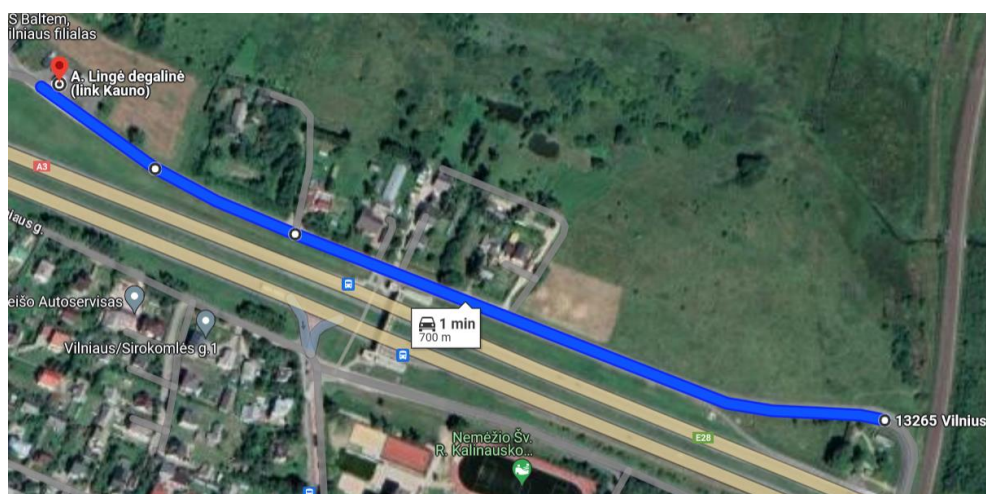


4.4 pav. Atkarpa, skirta I važiavimo režimui (Sudaryta pagal *Google Maps*)

Atkarpa, kurioje atliekamas II važiavimo režimas pasinaudojant A3/E28 kelio greitėjimo juosta, pateikta toliau esančiame 4.5 pav.



4.5 pav. Atkarpa, skirta II važiavimo režimui (Sudaryta pagal Google Maps)



4.6 pav. Atkarpa, skirta III važiavimo režimui (Sudaryta pagal Google Maps)

Prieš tai esančiame 4.6 pav. pateikta III važiavimo režimo atkarpa.

4.2. Elektromobilių techninės charakteristikos

Tyrimo eksperimentinėje dalyje naudojamų transporto priemonių techniniai parametrai pateikiami 4.1 lentelėje.

4.1 lentelė Elektromobilių tyrimo duomenys (Sudaryta pagal Auto-Data.net)

Elektromobilio modelis	„VW eUP“	„VW ID.4“	„Peugeot e-2008“
Svoris, kg	1235	1966	1623
Galia, kW	61	109	100
Svorio ir galios santykis	20,25 kg/kW	18,04 kg/kW	16,23 kg/kW
Sukimo momentas, Nm	210	220	260
Svorio ir suk. momento santykis	5,88 kg/Nm	8,6 kg/Nm	6,24 kg/Nm

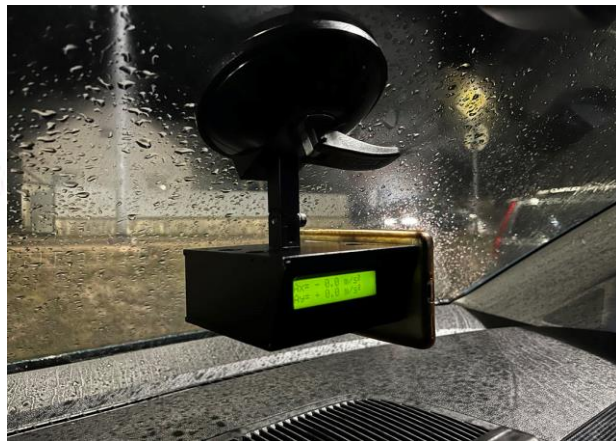
4.1 lentelės pabaiga

Variklių tipas	Nuolatinių magnetų sinchroninis (PMSM)	Nuolatinių magnetų sinchroninis (PMSM)	Nuolatinių magnetų sinchroninis (PMSM)
Variklių skaičius	1	1	1
Varančioji ašis	Priekinė	Galinė	Priekinė
Baterijų talpa, kWh	36,8 (panaudojama 32,3)	55,0 (panaudojama 52,0)	50,0 (panaudojama 46,3)
Deklaruojamas įsibėgėjimas 0– 100 km/h	11,9 s	10,9 s	9,6 s

Pateiktieji elektromobiliai aktualūs tuo, kad atsiranda galimybė sklandžiau palyginti konstrukcijos panašumus ir skirtumus bei pranašumus ir trūkumus ir taip išskirti įsibėgėjimo dinamikos specifikas. Pavyzdžiui, pirmasis elektromobilis „VW eUP“ – mažas miesto elektromobilis, su palyginti pakankamai galios. Antrasis elektromobilis „Peugeot e-2008“ – nedidelis padidinto pravažumo (angl. *Sport Utility Vehicle* – SUV) kategorijos elektromobilis, trečiasis elektromobilis „VW ID.4“ iš konstrukcinės perspektyvos panašus į antrąjį, skiriasi varančioji ašis.

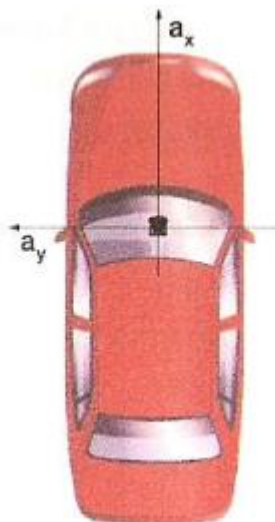
4.3. Eksperimentinio tyrimo matavimo prietaisai

Toliau pateikiamas išsamus, tyrimui naudojamo prietaiso aprašymas. Atliekant eksperimentinį tyrimą, reikalingi bandomų transporto priemonių įsibėgėjimo parametrai – išilginis pagreitis. Dėl prietaiso žinomumo, tikslumo bei paprasto naudojimo pasirinktas „XL Meter“.



4.7 pav. „XL Meter“ prietaisas kairėje (Šaltinis: Steffens GmbH) ir tvirtinimo vieta automobilyje bandomo metu dešinėje (Sudaryta darbo autoriaus)

4.7 pav. pateikiamas prietaiso tvirtinimas tyrimo metu ant priekinio transporto priemonės stiklo. Prietaisas tvirtinimas kuo tiksliau transporto priemonės a_x ašies atžvilgiu. 4.8 pav. pateikta prietaiso vieta transporto priemonėje.



4.8 pav. Prietaiso tvirtinimo vieta transporto priemonėje (Šaltinis: Steffens GmbH)

Kaip papildoma matavimo įranga, kitas kartu naudotas prietaisas eksperimentinio tyrimo metu – išmanusis įrenginys su „Matlab“ aplikacijos akcelerometru. Aplikacija suteikia galimybę matuoti visus reikalingus pagreičio parametrus. Papildomas prietaisas naudojamas dėl didesnio duomenų kiekio bei esant būtinybei patikrinti tikslumą, t. y. palyginti jų tarpusavio fiksuotus duomenis. Tam, kad neatsirastų pernelyg didelių matavimų skirtumų ir paklaidų, prietaisai tvirtinami tuose pačiuose transporto priemonės taškuose, kaip parodyta 4.8 pav.

Pagreitis	
100 Hz	
X m/s ²	-9,814
Y m/s ²	-0,057
Z m/s ²	-0,040

4.9 pav. „Matlab“ akcelerometro aplikacijos iškarpa (Sudaryta darbo autoriaus)

Prieš pradėdant eksperimentinį tyrimą patikrinama prietaisų kalibracija. Ar prietaisai rodo teisingus parametrus, įsitikinta juos pritvirtinus prie lygaus atskaitos taško. „XL Meter“ tuomet pasuktas 90° ir pakartotinai patikrinti parametrai – ekrane parodyta 9,8 m/s². „Matlab“

akcelerometras taip pat kalibracijos metu parodė $9,81 \text{ m/s}^2$ – laisvąjį kritimo pagreitį (4.9 pav.). Atlikus patikrinamąjį žingsnį, prietaisai parengti bandymui.

Bandymo metu prietaisai pritvirtinami taip, kad reikšmės norimomis matuoti ašimis rodytų reikšmes arti $0,0 \text{ m/s}^2$. Reikia išskirti ir tai, kad „Matlab“ akcelometro ašių reikšmės priklauso nuo to, kaip pritvirtinamas prietaisas, t. y. šiuo atveju, x reikšmė nurodo neigiamą $-9,81 \text{ m/s}^2$ veikiamą laisvojo kritimo pagreičio. Apsuktas prietaisas rodo teigiamą $9,81 \text{ m/s}^2$ reikšmę.

4.4. Bandymų rezultatai

Atlikti eksperimentiniai baigiamojo darbo bandymai, kurių metu gauti visi iškeltų darbo uždavinių rezultatai. Gauti duomenys eksportuoti iš matavimo prietaisų ir sudaryti grafikai „Excel“ programa. Siekiant geresnio tarpusavio rezultatų palyginimo, iš visos bandymų imties išvedami vidurkiai ir panaikinamas rezultatų kreivės svyravimas.

Eksperimentas atliktas asfaltuotame kelyje, visų bandymų metu oro temperatūra $\sim +15^\circ\text{C}$.

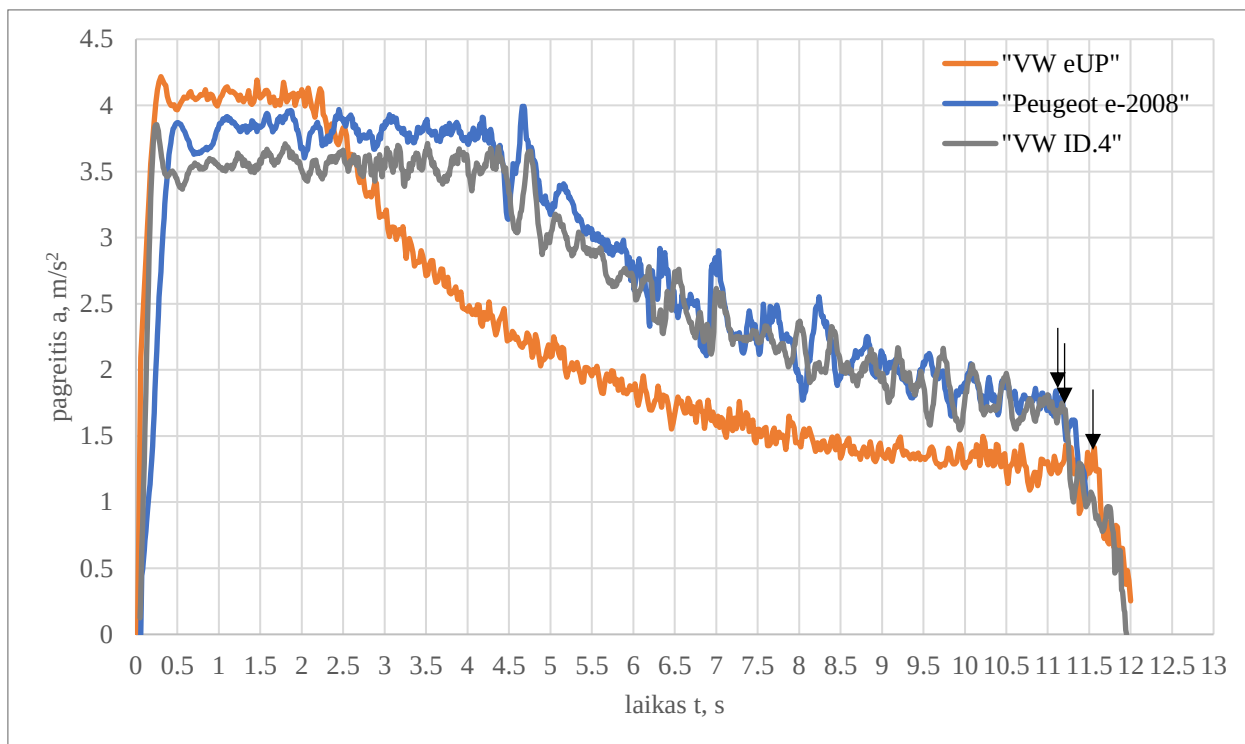
Eksperimentinės dalies duomenys nagrinėjami ir lyginamoji analizė atliekama pagal sudarytų baigiamojo darbo uždavinių eiliškumą:

- Pateikiami rezultatai apie elektromobilių įsibėgėjimo pagreičius ir kitus parametrus keičiant važiavimo režimus.
- Pateikiami ir analizuojami įsibėgėjimo pagreičių skirtumai tarp skirtingų elektromobilių konstrukcijų.
- Pateikiami ir analizuojami įsibėgėjimo pagreičių skirtumai tarp elektromobilių važiavimų skirtingomis baterijų įkrovomis taip išskiriant jų įtaką įsibėgėjimo parametrams, kartu palyginant ir matematinio modelio rezultatus.
- Įsibėgėjimo pagreičių priklausomybė nuo laiko ir kreivių kitimo tendencijų analizė.
- Elektromobilio galios ir svorio santykio įtaka – ar mažesnis elektromobilis gali būti pranašesnis?
- Elektromobilių įsibėgėjimo pranašumo palyginimas su hibridine transporto priemone.

Elektromobilių įsibėgėjimo grafikų ir pagreičių analizė susideda iš atskirų elektromobilių modelių rezultatų apibendrinimo ir visų elektromobilių rezultatų tarpusavyje palyginimo.

4.5. Elektromobilių įsibėgėjimo pagreičių kitimas

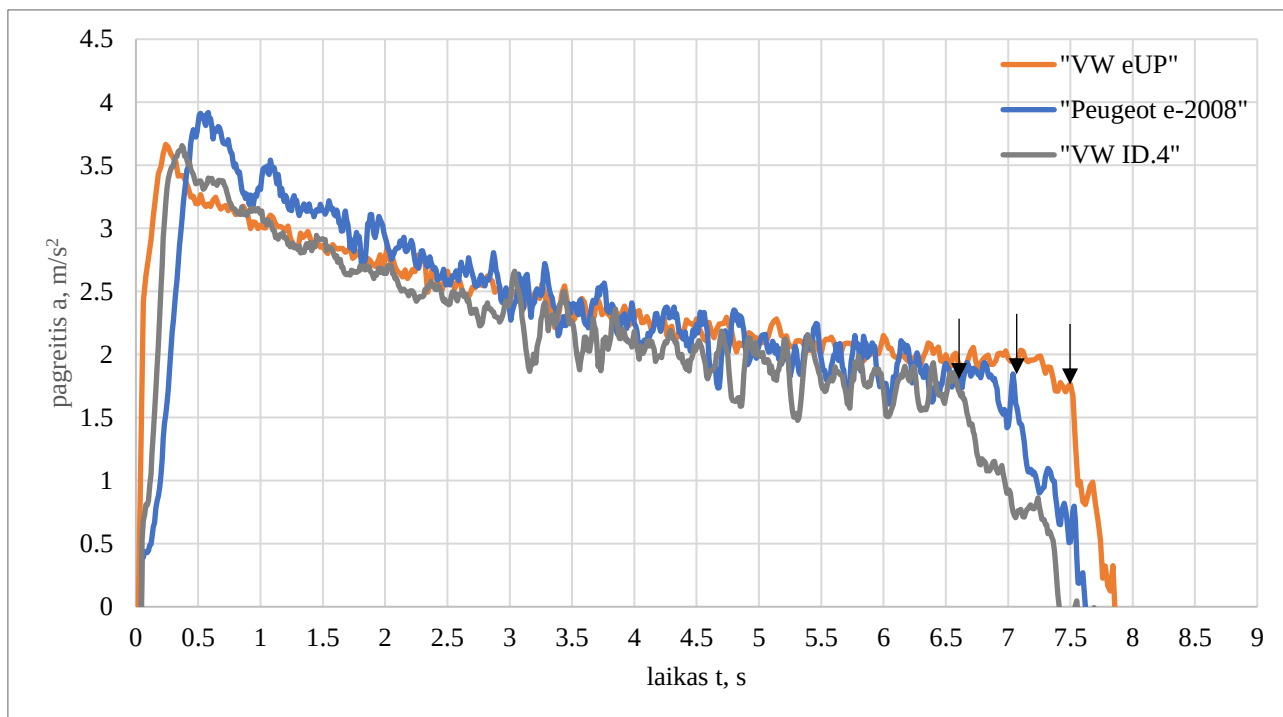
Iš sudarytų darbo uždavinių norima pateikti ir analizuoti išilginių įsibėgėjimo pagreičių skirtumus tarp skirtingų elektromobilių. Pateikiama po vieną bendrą grafiką kiekvienam važiavimo režimui. Grafikų duomenys nuodugniai aprašomi.



4.10 pav. 0–100 km/h elektromobilių įsibėgėjimo palyginimas

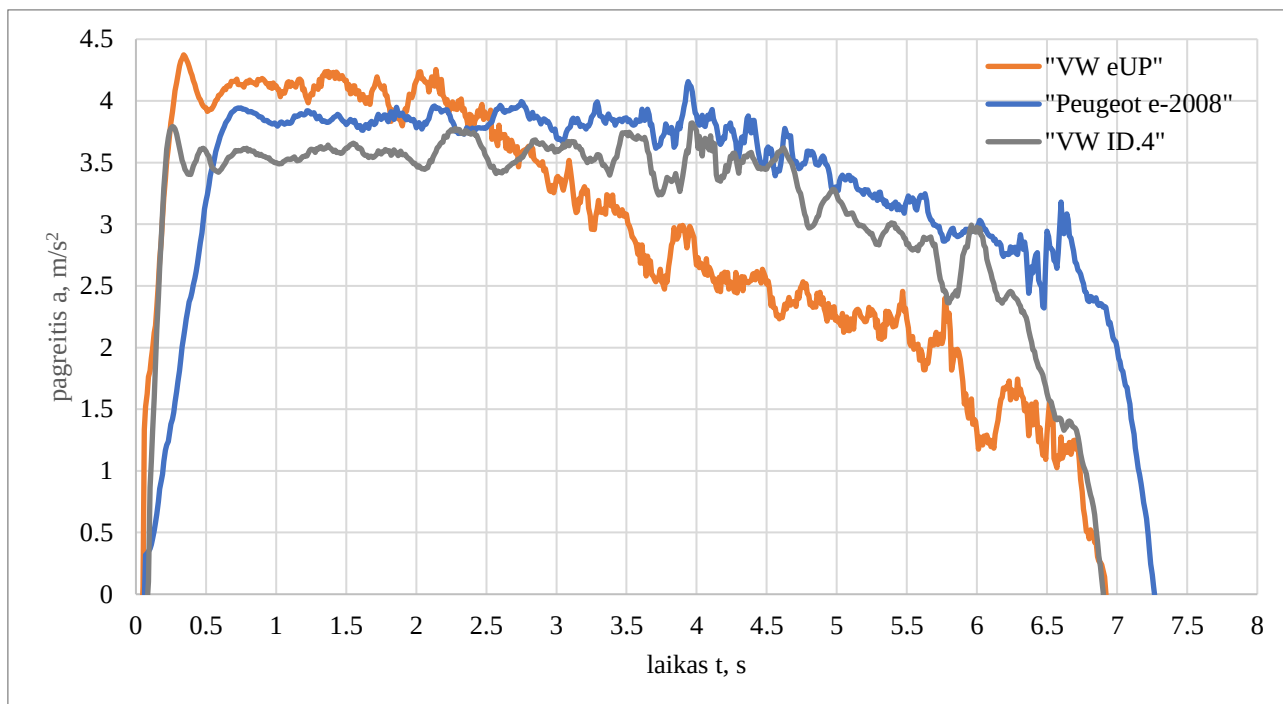
Prieš tai pateiktame lyginamajame grafike (4.10 pav.) sudarytas bendras visų elektromobilių įsibėgėjimo pagreičių grafikas 0–100 km/h važiavimo režimu. Pateikti visų bandymų duomenų vidurkiai. Bendromis grafiko kreivėmis siekiama aiškiau parodyti skirtumus tarp elektromobilių konstrukcijų. Iš sudaryto grafiko galima pastebėti: elektromobilis „VW eUP“ iš visų turi didžiausią pranašumą įsibėgėjimo pradžioje, tuomet „VW ID.4“ ir „Peugeot e-2008“. Iki 1 bandymo sekundės „VW eUP“ pasiekia apie $4,2 \text{ m/s}^2$ pagreitį, „VW ID.4“ pasiekia momentinį $3,9 \text{ m/s}^2$, o „Peugeot e-2008“ taip pat pasiekia $3,9 \text{ m/s}^2$, tačiau pagreičio kreivės kilimas ne toks staigus. Reikia pabrėžti, kad bandymo metu, visi elektromobiliai buvo perjungti į „Sport“ režimą. Nuo 1 s išsiskiria elektromobilių įsibėgėjimo pagreičių tendencijos: „VW eUP“ palaiko pastovų $4,2 \text{ m/s}^2$ pagreitį iki 2,5 bandymo sekundės, „VW ID.4“ apie $3,6 \text{ m/s}^2$ iki 4,5 sekundės, „Peugeot e-2008“ apie $3,8 \text{ m/s}^2$ iki 4,5 sekundės. Šiame intervale pastebima, kad nors ir „VW ID.4“ turėjo pranašumą iki 1 s, toliau didesnę pagreitį pasiekia „VW eUP“ ir „Peugeot e-2008“. Didėjant greičiui, visų elektromobilių pagreičio kitimo tendencijos panašios. „VW ID.4“ ir „Peugeot e-2008“ įsibėgėja per tokį patį laiko intervalą, „VW eUP“ atsilieka per 0,5 s. Juodas žymuo grafike nurodo kiekvieno elektromobilio pasiektą reikiamą bandymo važiavimo greitį.

Analizuojant elektromobilių parametrus ir juos prilyginus atliktų bandymų pagrečiams, pastebima priklausomybė – tiek nuo galios, tiek nuo sukimo momento.



4.11 pav. 50–100 km/h elektromobilių įsibėgėjimo palyginimas

Sudarytame grafike (4.11 pav.) pateiktas bendras visų elektromobilių įsibėgėjimo pagreičių kitimas 50–100 km/h režimu, kai elektromobiliai juda pastoviu 50 km/h greičiu. Pateikti visų bandymų duomenų vidurkiai. Iš sudaryto grafiko matyti: elektromobilis „VW eUP“ iš visų turi mažiausią pranašumą ir įsibėgėjimo pradžioje ir pabaigoje, „VW ID.4“ išsiveržia pradžioje, tačiau „Peugeot e-2008“ pasiekia didesnę pagreičio reikšmę. Iki 1 bandymo sekundės „VW eUP“ pasiekia apie $3,6 \text{ m/s}^2$ pagreitį, „VW ID.4“ pasiekia momentinį $3,6 \text{ m/s}^2$, o „Peugeot e-2008“ pasiekia $3,9 \text{ m/s}^2$, tačiau pagreičio kreivės kilimas ne toks staigus. Reikia pabrėžti, kad bandymo metu, visi elektromobiliai buvo perjungti į „Sport“ režimą. Iki 2 s išsiskiria kiekvieno iš elektromobilių įsibėgėjimo pagreičių tendencijos, tačiau nuo 2 s iki bandymo pabaigos kreivės kitimas panašus. „VW eUP“ bandymą įveikia vėliausiai, per 7,5 sekundės, „VW ID.4“ per 6,6 sekundes, „Peugeot e-2008“ per 7,1 sekundės. Šiame intervale pastebima, kad nors ir „VW eUP“ turėjo pranašumą iki 1 s, toliau didesnę pagreitį pasiekia „VW ID.4“ ir „Peugeot e-2008“. Didėjant greičiui, visų elektromobilių pagreičio kitimo tendencijos panašios. „VW ID.4“ įsibėgėja per 0,5 s greičiau nei „Peugeot e-2008“, „VW eUP“ atsilieka per 1 s nuo „Peugeot“ ir 1,3 s nuo „VW ID.4“. Analizuojant elektromobilių parametrus ir juos prilyginus atliktų bandymų pagreičiams, pastebima priklausomybė – tiek nuo galios, tiek nuo sukimo momento. Kartu bendromis pagreičio kitimo grafiko kreivėmis siekiama aiškiau parodyti skirtumus tarp elektromobilių konstrukcijų. Juodas žymuo grafike nurodo kiekvieno elektromobilio pasiektą reikiamą bandymo važiavimo greitį.



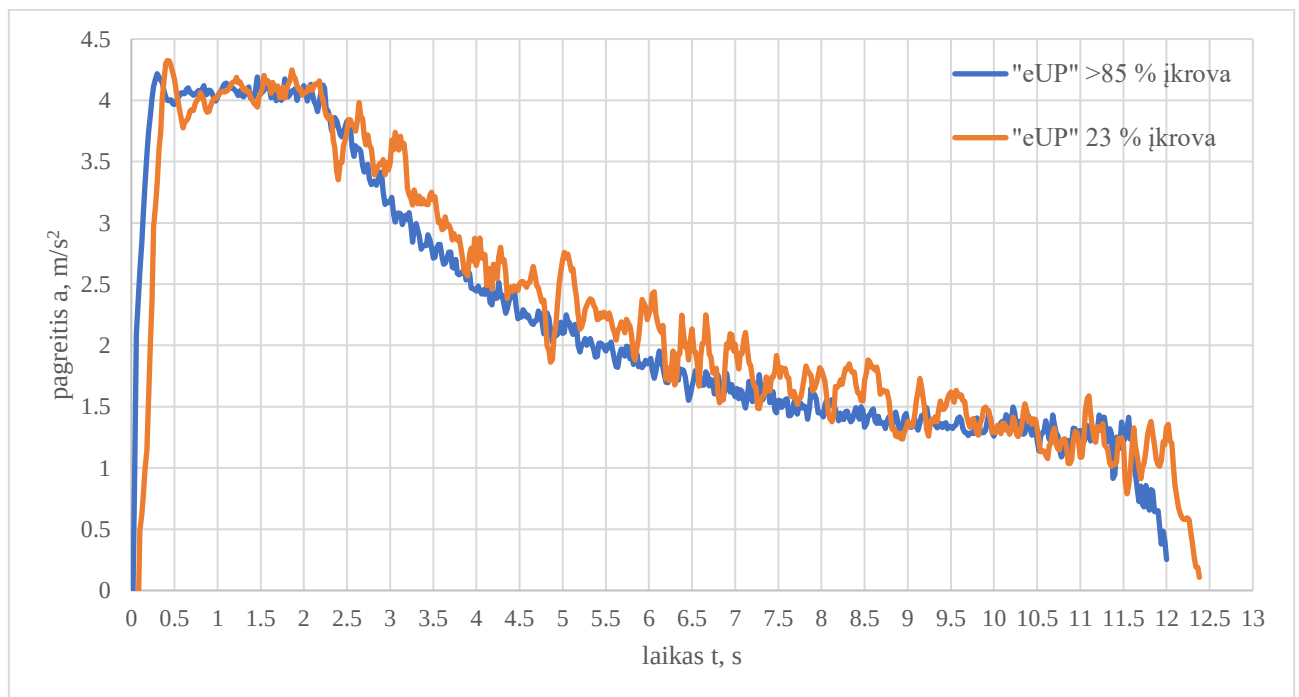
4.12 pav. Bandomų elektromobilių 50 metrų įsibėgėjimas, kai akceleratorius iki galo nuspaustas

Iš gautų įsibėgėjimų 50 metrų važiavimo režimu išvesti visų elektromobilių duomenų vidurkiai. Sudarytame grafike (4.12 pav.) pateikti visų elektromobilių 50 metrų įsibėgėjimo pagreičių priklausomybė nuo laiko. Matavimo tikslas – pateikti galimus įsibėgėjimo pagreičio rodiklius imituojant staigų pagreitėjimą iš vietos atitinkamam atstumui. Iš sudaryto grafiko matyti, kad iki galo spustelėjus akceleratoriaus pedalą tendencija ta pati, kaip ir I važiavimo režimu 0–100 km/h. Išsiskiria momentinis „VW eUP“ elektromobilio pagreičio kitimas, kol įveikiamas 50 metrų atstumas – atstumas įveikiamas per apytiksliai 6,8 sekundės, pasiekiamas maksimalus $4,3 \text{ m/s}^2$ ir mažiausias $1,5 \text{ m/s}^2$ įsibėgėjimo pagreitis. Pastebimas momentinis „Peugeot e-2008“ elektromobilio pagreičio kitimas, kol įveikiamas 50 metrų atstumas. Iš sudaryto grafiko matyti, kad iki galo spustelėjus „Peugeot e-2008“ akceleratoriaus pedalą tendencija ta pati, kaip ir I važiavimo režimu 0–100 km/h. 50 metrų atstumas įveikiamas per apytiksliai 6,5 sekundės, pasiekiamas maksimalus $3,9 \text{ m/s}^2$ ir mažiausias $2,5 \text{ m/s}^2$ įsibėgėjimo pagreitis. Ir paskutiniojo, „VW ID.4“ elektromobilio pagreičio priklausomybė, kol įveikiamas 50 metrų atstumas. Iš sudaryto grafiko matyti, kad iki galo spustelėjus akceleratoriaus pedalą tendencija ta pati, kaip ir I važiavimo režimu 0–100 km/h. 50 metrų atstumas įveikiamas per apytiksliai 6 sekundes, pasiekiamas maksimalus $3,9 \text{ m/s}^2$ ir mažiausias $2,5 \text{ m/s}^2$ įsibėgėjimo pagreitis, skirtumas tarp pradinės maksimalios ir galinės minimalios reikšmės siekia apie $1,4 \text{ m/s}^2$. Sudarytame bendrame pagreičių priklausomybės grafike 50 metrų važiavimo režimu, korektiškiau atliekamas palyginimas.

4.6. Elektromobilio „VW eUP“ įsibėgėjimo pagreičių kitimas esant žemai įkrovai

Pagal sudarytą eksperimentinio tyrimo metodiką analogiškai atliekami visi važiavimo režimai ir su žema „VW eUP“ elektromobilio įkrova. Papildomu bandymu siekiama išnagrinėti galimą tiesioginę žemos įkrovos įtaką įsibėgėjimo pagreičių pokyčiams, t. y. siekiama patikrinti, ar žema įkrova koreliuoja su mažesniais įsibėgėjimo pagrečiais, ar atsiranda staigesni pagreičių nuokryčiai. Konkrečios žemos akumuliatorių baterijų vertės nurodytos išsamioje tyrimo metodikos dalyje.

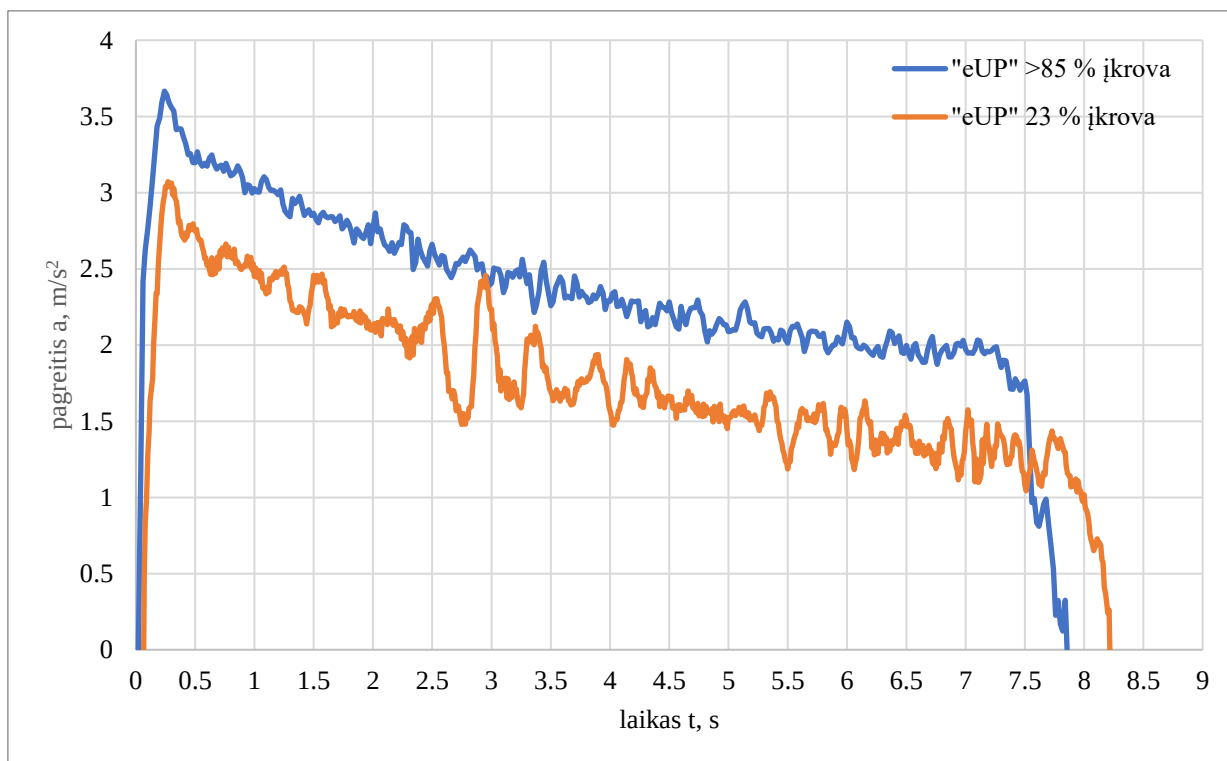
Bandymai atlikti, kai elektromobilio įkrova leido nuvažiuoti 60 km, t. y. pradėjus bandymus baterijos įkrovos likutis siekė apie 23 % arba apie 8,3 kWh iš 36 kWh. Tikslių elektromobilio baterijų parametrų nuskaityti su diagnostiniu įrankiu galimybės nebuvo.



4.13 pav. Elektromobilio „VW eUP“ 0–100 km/h lyginamasis įsibėgėjimas esant skirtingoms įkrovoms

Iš gautų įsibėgėjimų esant tiek visiškai, tiek žemai elektromobilio įkrovai 0–100 km/h važiavimo režimu pateikiami duomenų vidurkiai. Sudarytame grafike (4.13 pav.) pateiktas „VW eUP“ elektromobilio pagreičio kitimas su staigiais pokyčiais. Lyginant pagreičių kreives, matyti atsikartojanti tendencija. Žemos įkrovos pagreičio kreivėje matomas didesnis svyravimas, tačiau nepriklausomai nuo įkrovos, pagreitis įsibėgėjimo metu kinta tolygiai. Atlikus bandymą žema įkrova pastebėtas skirtumas pagreičio pokytis iki 0,5 s – žema įkrova nežymiai atsilieka. Tiek vienu, tiek kitu atveju pasiekiamas kiek didesnis, apie 4,3 m/s^2 pagreitis ir iki 2 važiavimo sekundės palaikomas

tolygiai, tuomet iki bandymo pabaigos, esant visiškai įkrovai, ties 11,5 s pagreitis krenta iki $1,4 \text{ m/s}^2$, o esant žemai įkrovai, ties 12 s pagreitis krenta iki $1,3 \text{ m/s}^2$. Ryškiausias skirtumas – atliekant bandymą žema įkrova, pagreitis iki 100 km/h įveikiamas per 12 s, t. y. per 0,5 s daugiau.



4.14 pav. Elektromobilio „VW eUP“ 50–100 km/h lyginamasis įsibėgėjimas esant skirtingoms įkrovoms

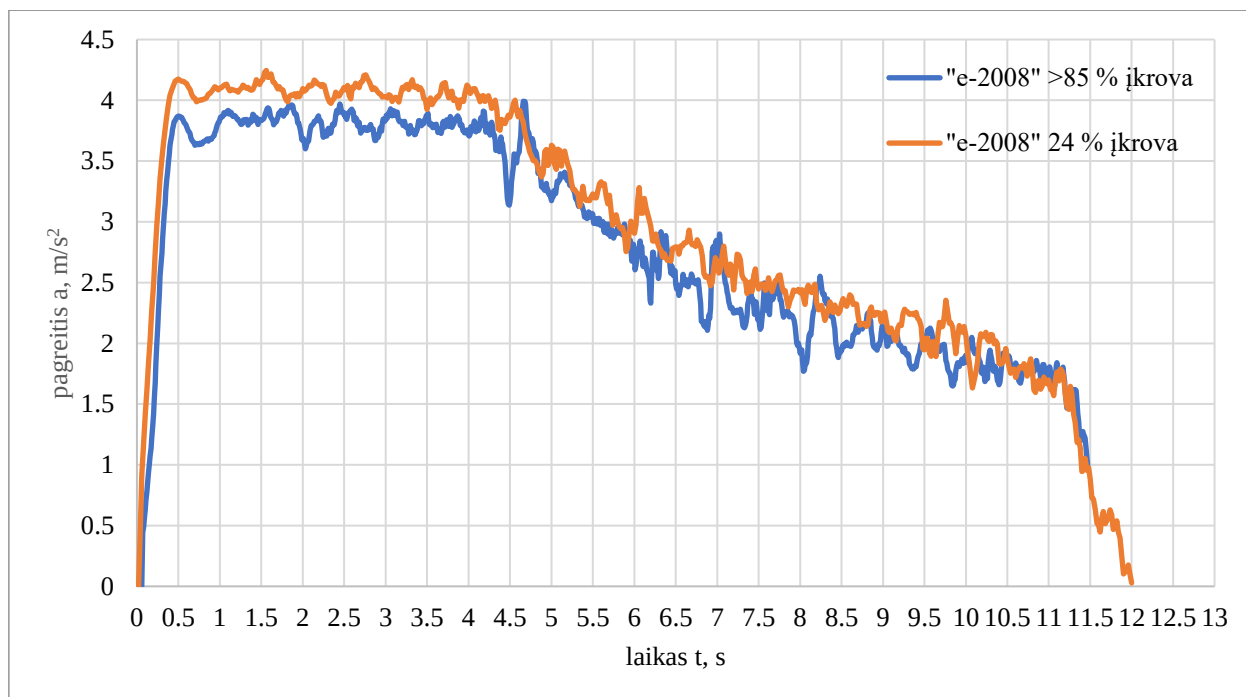
Iš gautų įsibėgėjimų esant tiek visiškai, tiek žemai įkrovai 50–100 km/h važiavimo režimu išvestas duomenų vidurkis. Sudarytame grafike (4.14 pav.) labai ryškiai išsiskiria momentinis „VW eUP“ elektromobilio pagreičio kitimas, kai matavimas pradedamas atlikti elektromobiliui judant pastoviu 50 km/h greičiu. Iš sudaryto grafiko matyti, kad esant visiškai įkrovai ir iki galo spustelėjus akceleratoriaus pedalą važiuojant pastoviu 50 km/h greičiu, ties 0,3 s pasiekiamas apie $3,7 \text{ m/s}^2$ pagreitis ir kreivė iš karto pradeda mažėti. Toliau didėjant elektromobilio greičiui, nuo 0,5 sekundės tolygiai pradeda mažėti iki 8 sekundės, kur pagreitis siekia apie $1,7 \text{ m/s}^2$. Staigus nuokrytis pagreičio kreivėje simbolizuoja bandymo pabaigą, kai pasiekus 100 km/h greitį, akceleratoriaus pedalas atleidžiamas. Esant žemai įkrovai ir iki galo spustelėjus akceleratoriaus pedalą važiuojant pastoviu 50 km/h greičiu, ties 0,3 s pasiekiamas apie $3,1 \text{ m/s}^2$ pagreitis ir kreivė iš karto pradeda mažėti, šiuo atveju ryškiausias pokytis – mažesnis pradinis maksimalus pasiektas pagreitis pajudėjus iš vietos važiuojant pastoviu 50 km/h greičiu ir ta pačia verte mažesnis pagreitis visame bandymo intervale, tačiau drastiško skirtumo nematyti, t. y., $0,6 \text{ m/s}^2$ mažiau nei atliekant bandymą visiška įkrova. Staigus pagreičio pokytis nuo 2,5 s iki 4 s indikuoja ratų praslydimą arba didesnius kelio nelygumus

bandymo metu. Toliau didėjant elektromobilio greičiui, nuo 0,5 sekundės tolygiai pradeda mažėti iki 8 sekundės, kur pagreitis taip pat siekia apie $1,7 \text{ m/s}^2$ kaip ir prieš tai atlikto bandymo metu. Atlikus važiavimą žema įkrova pastebimas ir dažnesnis pagreičio svyravimas ties 3 sekunde.

4.7. Elektromobilio „Peugeot e-2008“ įsibėgėjimo pagrečių kitimas esant žemai įkrovai

Pagal sudarytą eksperimentinio tyrimo metodiką analogiškai atliekami visi važiavimo režimai ir su žema „Peugeot e-2008“ elektromobilio įkrova. Papildomu bandymu siekiama išnagrinėti tiesioginę žemos įkrovos įtaką įsibėgėjimo pagrečių pokyčiams, t. y. siekiama patikrinti ar žema įkrova koreliuoja su mažesniais įsibėgėjimo pagrečiais, ar atsiranda staigesni pagrečių nuokryčiai. Konkrečios žemos akumuliatorių baterijų vertės nurodytos išsamioje tyrimo metodikos dalyje.

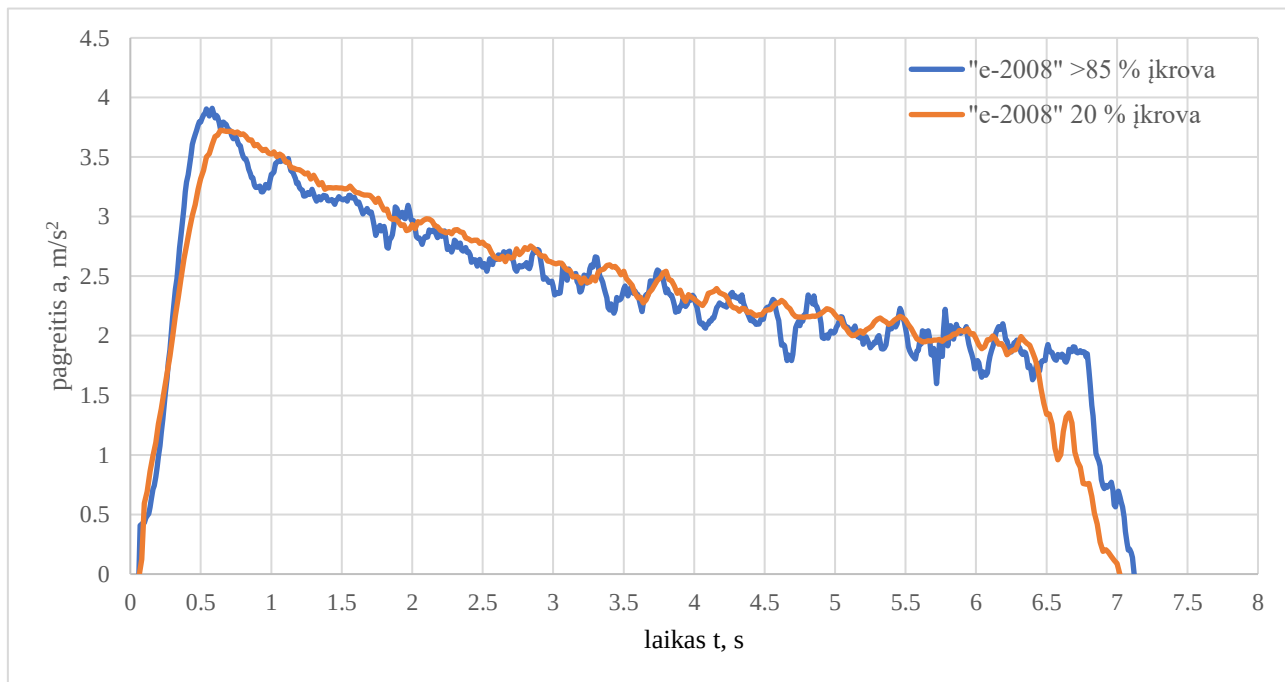
Bandymai atlikti, kai elektromobilio įkrova leido nuvažiuoti 58 km, t. y. pradėjus bandymus baterijos įkrovos likutis siekė apie 24 % arba apie 12 kWh iš 50 kWh. Tikslų elektromobilio baterijų parametrų nuskaityti su diagnostiniu įrankiu bandymo metu galimybės nebuvo.



4.15 pav. Elektromobilio „Peugeot e-2008“ 0–100 km/h lyginamasis įsibėgėjimas esant skirtingoms įkrovoms

Iš gautų įsibėgėjimų esant tiek visiškai, tiek žemai elektromobilio įkrovai 0–100 km/h važiavimo režimu išvestas duomenų vidurkis. Prieš tai pateiktame grafike (4.15 pav.) matomas „Peugeot e-2008“ elektromobilio pagreičio kitimas su svyravimais. Lyginant pagrečių kreives, matyti atsikartojanti tendencija. Žemos įkrovos pagreičio kreivėje matomas didesnis svyravimas, tačiau nepriklausomai nuo įkrovos, pagreitis įsibėgėjimo metu kinta tolygiai. Atlikus bandymą žema

įkrova pastebima, kad pagreitis siekia apie $4,1 \text{ m/s}^2$, o priešingai nei tikėtasi, esant visiškai baterijų įkrovai, pagreitis siekia apie $3,9 \text{ m/s}^2$. Abiem atvejais iki $4,5$ važiavimo sekundės palaikomas tolygus pagreitis, tuomet iki bandymo pabaigos, esant visiškai įkrovai, ties $11,2 \text{ s}$ pagreitis krenta iki $1,6 \text{ m/s}^2$, o esant žemai įkrovai, taip pat ties $11,2 \text{ s}$ pagreitis krenta iki $1,6 \text{ m/s}^2$. Ryškiausias skirtumas – atliekant bandymą žema įkrova, pradinis pagreitis geresnis, t. y. pasiekiamas $0,2 \text{ m/s}^2$ didesnis pagreitis. Bandymo laikas nepakito, elektromobilis įsibėgėjo iki 100 km/h per tokį patį laiko intervalą.



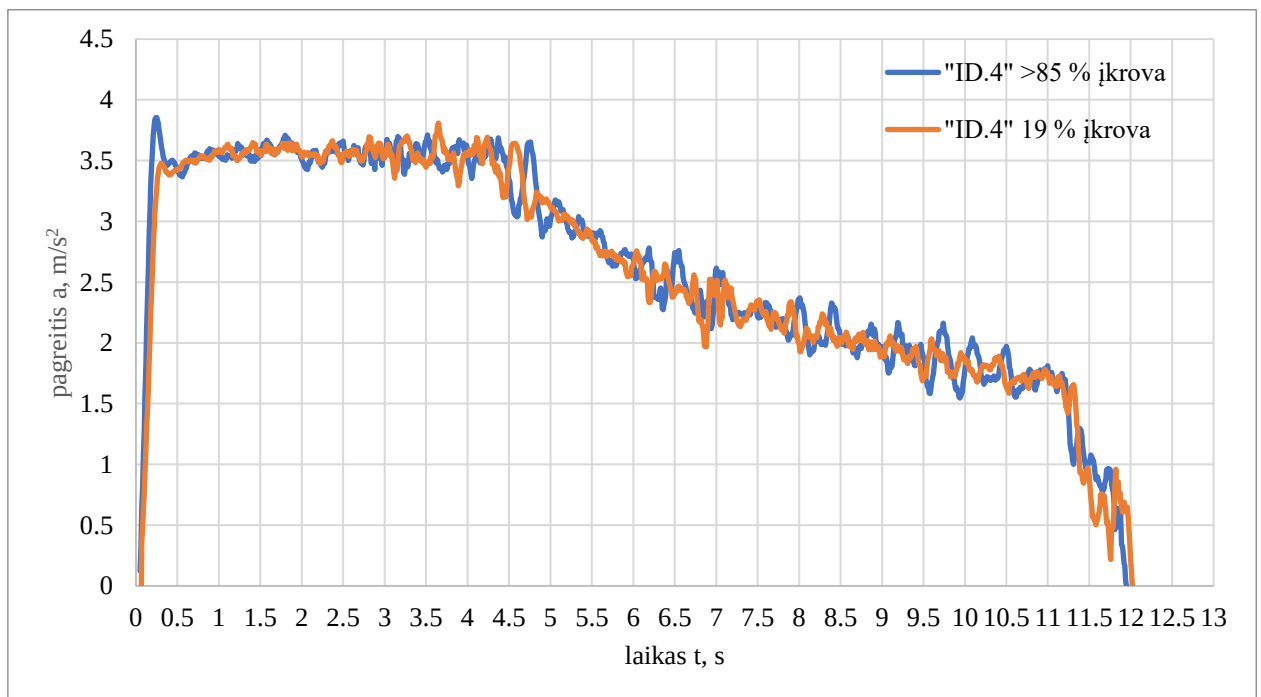
4.16 pav. Elektromobilio „Peugeot e-2008“ 50–100 km/h lyginamasis įsibėgėjimas esant skirtingoms įkrovoms

Iš gautų įsibėgėjimų esant tiek visiškai, tiek žemai įkrovai 50–100 km/h važiavimo režimu išvestas duomenų vidurkis. Sudarytame grafike (4.16 pav.) matomas pakartotinis „Peugeot e-2008“ elektromobilio pagreičio kitimas, kai matavimas pradedamas atlikti elektromobiliui judant pastoviu 50 km/h greičiu. Iš sudaryto grafiko esant visiškai įkrovai galima pastebėti, kad iki galo spustelėjus akceleratoriaus pedalą važiuojant pastoviu 50 km/h greičiu, ties $0,5 \text{ s}$ pasiekiamas apie $3,9 \text{ m/s}^2$ pagreitis ir kreivė iš karto pradeda mažėti. Toliau didėjant elektromobilio greičiui, nuo $0,5 \text{ s}$ tolygiai pradeda mažėti iki 7 sekundės , kur pagreitis siekia apie $1,8 \text{ m/s}^2$, pasiekiamas 100 km/h greitis ir bandymas baigiamas. Staigus nuokrytis pagreičio kreivėje simbolizuoja bandymo pabaigą, kai pasiekus 100 km/h greitį, akceleratoriaus pedalas atleidžiamas. Taip pat, iš sudaryto grafiko galima pastebėti, kad esant žemai įkrovai ir iki galo spustelėjus akceleratoriaus pedalą važiuojant pastoviu 50 km/h greičiu, ties $0,7 \text{ s}$ pasiekiamas apie $3,7 \text{ m/s}^2$ pagreitis ir kreivė iš karto pradeda mažėti. Toliau didėjant elektromobilio greičiui, nuo $0,8 \text{ sekundės}$ tolygiai pradeda mažėti iki $6,5 \text{ sekundės}$, kur pagreitis siekia apie $2,0 \text{ m/s}^2$, pasiekiamas 100 km/h greitis ir bandymas baigiamas.

4.8. Elektromobilio „VW ID.4“ įsibėgėjimo pagreičių kitimas esant žemai įkrovai

Pagal sudarytą eksperimentinio tyrimo metodiką analogiškai atliekami visi važiavimo režimai ir su žema „VW ID.4“ elektromobilio įkrova. Papildomu bandymu siekiama išnagrinėti tiesioginę žemos įkrovos įtaką šio elektromobilio įsibėgėjimo pagreičių pokyčiams, t. y. siekiama patikrinti ar žema įkrova koreliuoja su mažesniu įsibėgėjimo pagreičiu, ar atsiranda staigesni pagreičių nuokryčiai. Konkrečios žemos akumuliatorių baterijų vertės nurodytos išsamioje tyrimo metodikos dalyje.

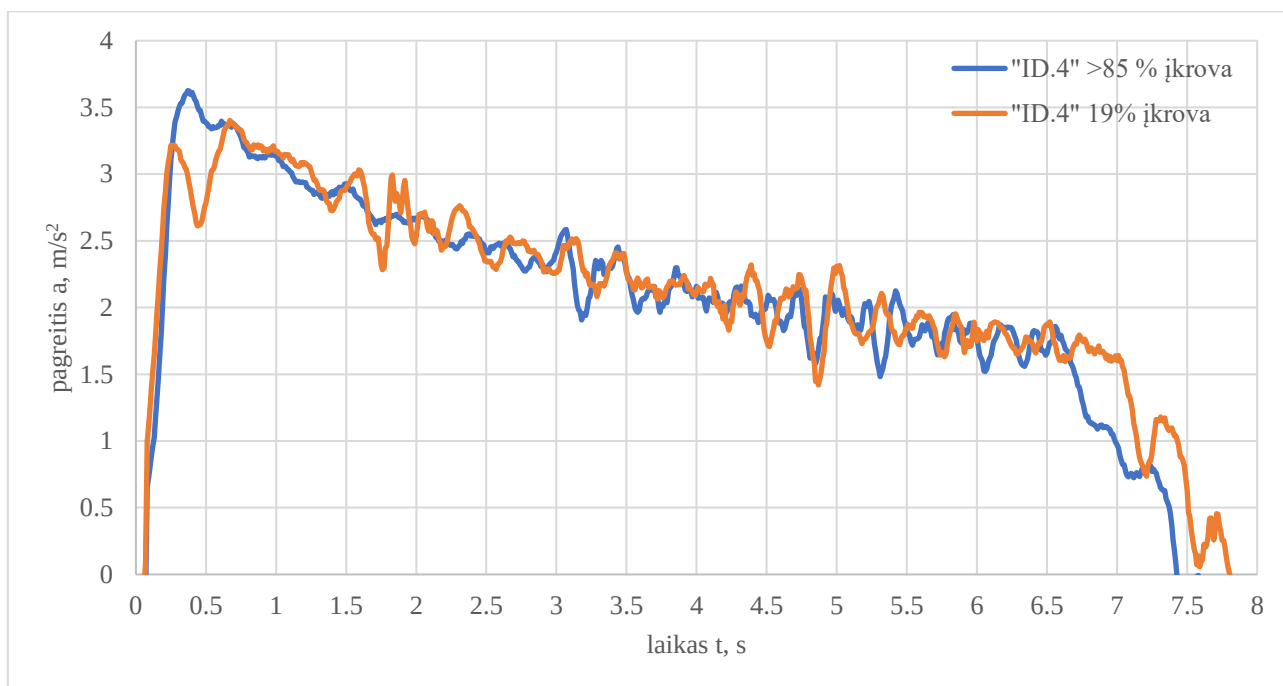
Bandymai atlikti, kai elektromobilio įkrova leido nuvažiuoti 72 km, t. y. pradėjus bandymus baterijos įkrovos likutis siekė apie 19 % arba apie 10,5 kWh iš 55 kWh. Tikslų elektromobilio baterijų parametrų nuskaityti su diagnostiniu įrankiu bandymo metu galimybės nebuvo.



4.17 pav. Elektromobilio „VW ID.4“ 0–100 km/h lyginamasis įsibėgėjimas esant skirtingoms įkrovoms

Iš gautų įsibėgėjimų esant tiek visiškai, tiek žemai elektromobilio įkrovai 0–100 km/h važiavimo režimu išvestas duomenų vidurkis. Prieš tai pateiktame grafike (4.17 pav.) pastebimas paskutiniojo elektromobilio „VW ID.4“ pagreičio kitimas. Lyginant pagreičių kreives, matyti atsikartojanti tendencija tarp skirtingų įkrovų bandymų. Tiek visiškos, tiek žemos įkrovos pagreičio kreivėje matomas didesnis svyravimas, tačiau nepriklausomai nuo įkrovos, pagreitis įsibėgėjimo metu kinta tolygiai. Atlikus bandymą žema įkrova pastebima, kad pagreitis siekia apie $3,5 \text{ m/s}^2$, o esant visiškai įkrovai, pagreitis siekia apie $3,9 \text{ m/s}^2$ iki 0,5 bandymo sekundės ir tada staigiau krenta.

Abiem atvejais iki 4,5 važiavimo sekundės palaikomas tolygus pagreitis, tuomet iki bandymo pabaigos, esant visiškai įkrovai, ties 11,3 s pagreitis krenta iki $1,7 \text{ m/s}^2$, o esant žemai įkrovai, taip pat ties 11,3 sekunde pagreitis krenta iki $1,7 \text{ m/s}^2$. Ryškiausias skirtumas – atliekant bandymą visiškai įkrova, pradinis pagreitėjimas geresnis, t. y. pasiekiamas $0,4 \text{ m/s}^2$ didesnis pagreitis. Bandymo laikas nepakito, elektromobilis identišškai įsibėgėjo iki 100 km/h per tokį patį laiko intervalą.



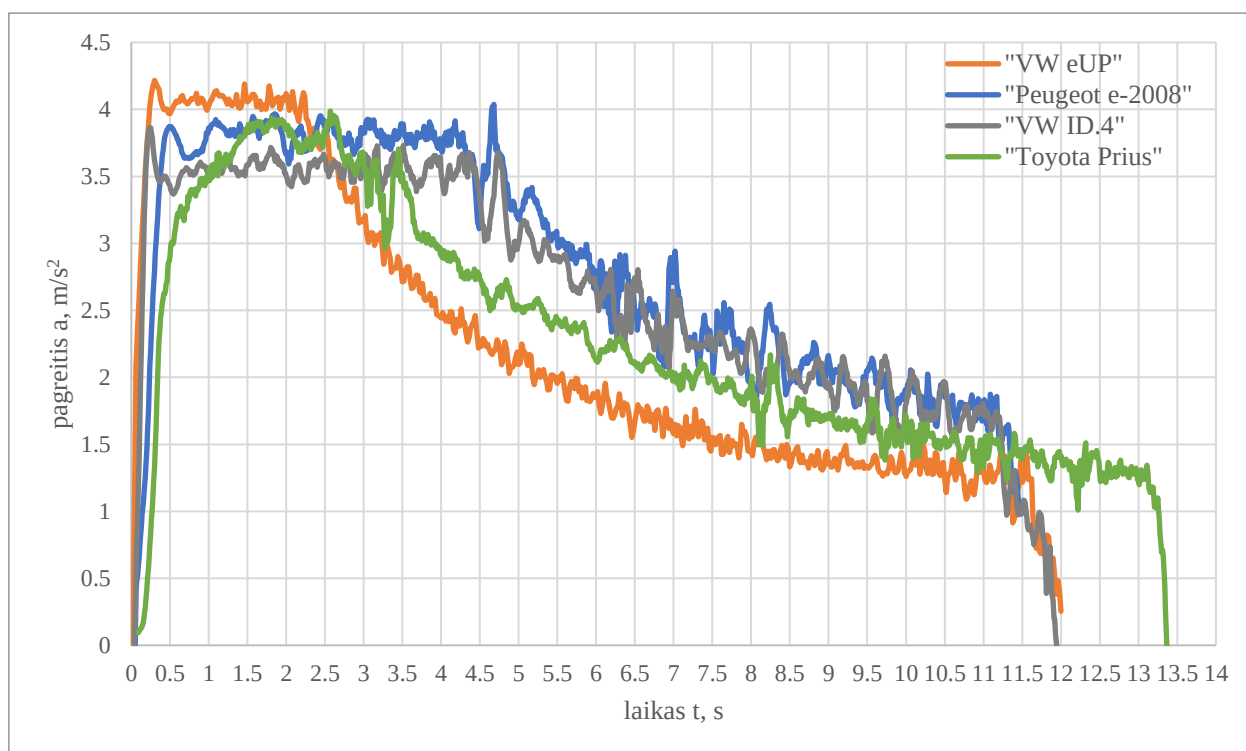
4.18 pav. Elektromobilio „VW ID.4“ 50–100 km/h lyginamasis įsibėgėjimas esant skirtingoms įkrovoms

Iš gautų įsibėgėjimų esant tiek visiškai, tiek žemai įkrovai 50–100 km/h važiavimo režimu išvestas duomenų vidurkis. Sudarytame grafike (4.18 pav.) matomas „VW ID.4“ elektromobilio pagreičio kitimas, kai matavimas pradedamas atlikti elektromobiliui judant pastoviu 50 km/h greičiu. Iš sudaryto grafiko esant visiškai įkrovai, matyti, kad iki galo spustelėjus akceleratoriaus pedalą pastebima įdomi tendencija net iš duomenų vidurkio. Važiuojant pastoviu 50 km/h greičiu, ties 0,3 s pasiekiamas apie $3,2 \text{ m/s}^2$ pagreitis ir kreivė iš karto pradeda mažėti iki $2,6 \text{ m/s}^2$. Po staigaus pagreičio nuokryčio matomas staigus padidėjimas iki $3,4 \text{ m/s}^2$. Toliau didėjant elektromobilio greičiui, nuo 0,8 sekundės tolygiai pradeda mažėti iki 7,1 sekundės, kur pagreitis siekia apie $1,7 \text{ m/s}^2$. Pasiekiamas 100 km/h greitis ir bandymas baigiamas. Atlikus pakartotinį bandymą žema įkrova, pastebimas pagreičio kitimo pokytis: staigus pagreičio svyravimas greitėjimo pradžioje ir bendras įsibėgėjimo laikas pailgėja 0,6 s. Iš sudaryto grafiko galima pastebėti, kad iki galo spustelėjus akceleratoriaus pedalą važiuojant pastoviu 50 km/h greičiu, ties 0,5 s pasiekiamas tik apie $3,6 \text{ m/s}^2$ pagreitis ir kreivė iš karto

pradedama mažėti. Toliau didėjant elektromobilio greičiui, nuo 0,5 sekundės tolygiai pradeda mažėti iki 6,5 sekundės, kur pagreitis siekia apie $1,8 \text{ m/s}^2$, pasiekiamas 100 km/h greitis ir bandymas baigiamas.

4.9. Elektromobilių įsibėgėjimo parametrų palyginimas su hibridiniu automobiliu

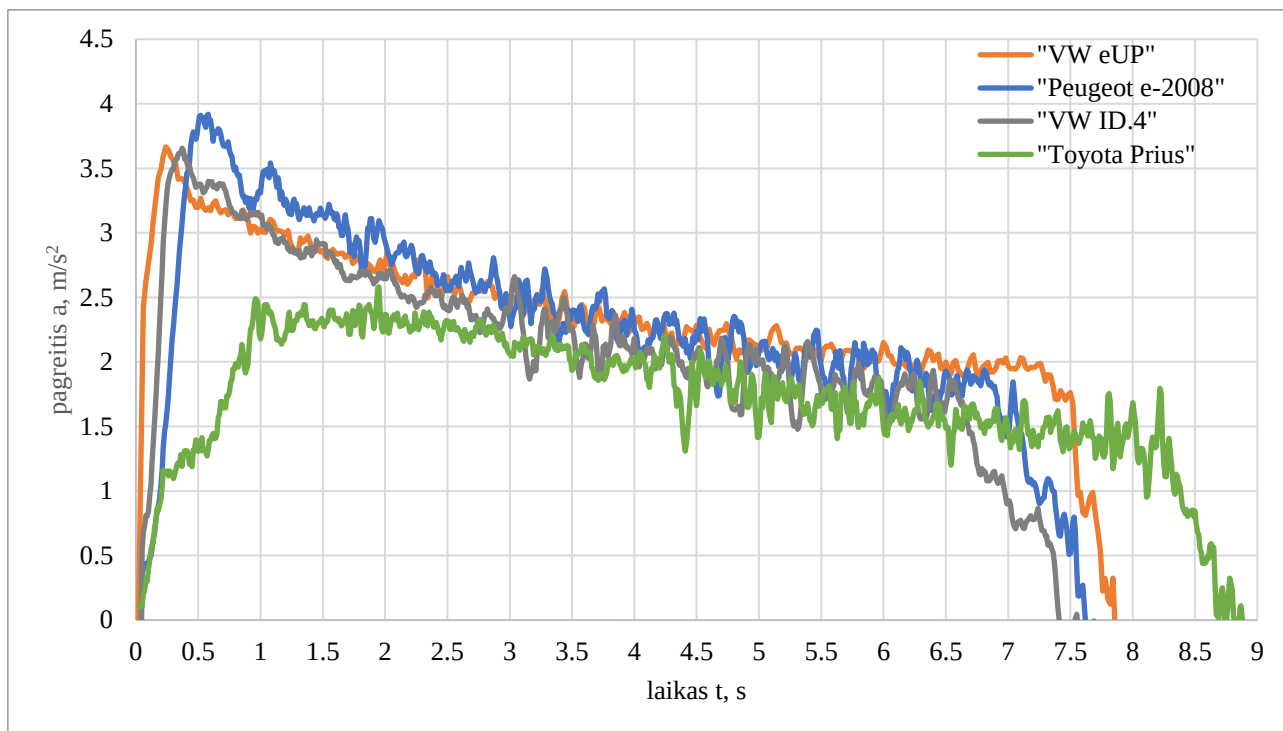
Papildomu bandymu su įprasta transporto priemone, šiuo atveju su hibridiniu automobiliu, siekiama išskirti elektromobilių pranašumus įsibėgėjant, o kreivė artima elektromobilių, nes papildomam bandymui naudotas hibridinis automobilis „Toyota Prius“, todėl matomas pavarų nepertraukiamas pagreičio kitimas.



4.19 pav. 0–100 km/h elektromobilių ir hibridinio automobilio įsibėgėjimo palyginimas

Iš papildomai atlikto bandymo ir sudaryto grafiko (4.19 pav.), kuriame pateikti bandymų duomenų vidurkiai, labai aiškiai išsiskiria skirtumas tarp transporto priemonių. Iki 0,5 bandymo sekundės elektromobiliai pasiekia maksimalias įsibėgėjimo pagreičių vertes, o hibridinis automobilis maksimalią vertę pasiekia tik apie 2 s. Galima išskirti elektromobilių momentinio sukimo momento pranašumą – maksimalus elektromobilių pagreitis staigus.

Priešingai nei tikėtasi, hibridinis automobilis pasiekia net 4 m/s^2 pagreitį, palaiko tolygią vertę apie 2 sekundes iki 4 bandymo sekundės ir tuomet analogiškai elektromobiliams, didėjant greičiui, su ta pačia kitimo tendencija iki pat bandymo pabaigos mažėja. Minimali pagreičio vertė – $1,6 \text{ m/s}^2$. Nors ir hibridinio automobilio galia parinkta artima elektromobiliams, bandymą įveikia lėčiausiai, per 13,4 s.



4.20 pav. 50–100 km/h elektromobilių ir hibridinio automobilio įsibėgėjimo palyginimas

Lyginant elektromobilių pranašumą prieš hibridinį automobilį, tai dar akivaizdžiau pastebima pateiktame grafike (4.20 pav.). Iš gautų įsibėgėjimų 50–100 km/h važiavimo režimu išvestas duomenų vidurkis. Būtent esant šiam važiavimo režimui ryškiausiai galima išskirti elektromobilių momentinio sukimo momento perdavimą į ratus. Važiuojant pastoviu 50 km/h greičiu ir iki galo nuspaudus akceleratorių, visų elektromobilių pagreičiai staigiai kinta, pagreičiai siekia 3,5–4,0 m/s², o hibridinis automobilis pasiekia tik 2,5 m/s². Tačiau „VW eUP“ bandymo laikas labai panašus į „Toyota Prius“. Bendras bandymo laikas svyruoja nuo 6,5 s iki 8,5 s „VW ID.4“ ir „Peugeot e-2008“ pasiekia 100 km/h per 7 s, „VW eUP“ per 8, o „Toyota Prius“ per 8,5 s. Bandymo pabaigoje transporto priemonių pagreičiai svyruoja tarp 1,4–1,9 m/s².

Išvados

Atlikus eksperimentinę įsibėgėjimo charakteristikų tyrimo dalį, išanalizavus gautus duomenis ir atlikus lyginamąją analizę, formuluojamos tokios tyrimo išvados:

1. Iš važiavimo režimų nustatyti momentiniai įsibėgėjimo pagreičiai – „VW eUP“ elektromobiliu $4,3 \text{ m/s}^2$, kitais abiem – $3,9 \text{ m/s}^2$. Greitai pasiekiamas elektromobilių maksimalus pagreitis gerina galimybes įsilieti į eismo srautą. Reikia išskirti, kad didėjant greičiui, pranašumą turi didesnės galios elektromobiliai. Suprastėjusio sukibimo dėl momentinių didelių įsibėgėjimo pagreičių nepastebėta.

2. Iš duomenų matyti, kad „VW eUP“ pasiekia didžiausią pradinį pagreitį – elektromobiliui tenka mažiausiai kg/Nm , todėl geba staigiausiai pagreitinėti, kiti elektromobiliai turėdami didesnę galios ir svorio santykį, bandymo metu išlaiko tolygų įsibėgėjimą ilgiau, iki 4,5 bandymo sekundės. Galine ašimi varomas „VW ID.4“ pranašumo neturėjo.

3. Atlikus simuliacijas matematiniu modeliu, įvertintas teorinis įsibėgėjimo rodiklių dinamiškumas, pagreičio kitimas laike ir greičio kitimo priklausomybė nuo įkrovos lygio. Simuliacijomis gautas teorinis pagreitis siekia $2,7 \text{ m/s}^2$.

4. Atlikus elektromobilių įsibėgėjimo pagreičių priklausomybių analizę, nustatyta, kad staigiai pasiekiamas elektromobilių maksimalus pagreitis suteikia jiems pranašumą. Nustatyta tendencija, kad nuo elektromobilio techninių parametų priklauso, kiek tolygiai palaikoma maksimali pagreičio reikšmė – „VW eUP“ apie 2,5 s, „VW ID.4“ ir „Peugeot e-2008“ apie 4,5 s. Galima matyti tendenciją, kad nuo atitinkamo bandymo laiko, visų elektromobilių pagreičiai palaipsniui tolygiai mažėja iki bandymo pabaigos.

5. Įkrovos pokytis intervale nuo 100 % iki 19 % tiesiogiai nekoreliavo su įsibėgėjimo pagreičiais. Gautas nežymus skirtumas 50–100 km/h važiavimo režimu – $0,6 \text{ m/s}^2$ mažiau visame intervale „VW eUP“ elektromobiliu. Atlikus simuliacijas modeliu 100 % ir 20 % įkrovos, nustatyta, kad įsibėgėjimo pagreičiai tiesiogiai nekoreliuoja, o esant 10 % ir mažesnei įkrovai, pastebimas skirtumas – 100 km/h greitis pasiekiamas 5 s lėčiau, atitinkamai pasikeičia regeneracijos pokytis. Eksperimentinis bandymas esant <10 % elektromobilių įkrovai nedarytas

6. Atlikus lyginamąją analizę su hibridiniu automobiliu pastebimas transporto priemonių įsibėgėjimo pagreičių skirtumas ir elektromobilių gebėjimas greitai perduoti sukimo momentą, ypač bandymų pradžioje – elektromobiliai pasiekia 4 m/s^2 per 0,5 s, o hibridinis automobilis tą pačią reikšmę pasiekia apie 2 bandymo sekundę.

Literatūros šaltiniai

- Berjoza, D., & Jurgena, I. (2017). Effects of change in the weight of electric vehicles on their performance characteristics. *Agron. Res*, 15(1), 952–963. https://agronomy.emu.ee/wp-content/uploads/2017/04/Vol15SP1_Berjoza.pdf
- Crolla, D. A., & Cao, D. (2012). The impact of hybrid and electric powertrains on vehicle dynamics, control systems and energy regeneration. *Vehicle System Dynamics*, 50:sup1, 95–109, <https://doi.org/10.1080/00423114.2012.676651>
- Dianati, B., Kahourzade, S., & Mahmoudi. A. (2019). Axial-Flux Induction Motors for Electric Vehicles. *2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/VPPC46532.2019.8952278>
- Dong, E., Li, Y., & Wang, Y. (2022). Study on Impact of Power Battery System Parameters on Electric Vehicle Dynamics Performance. *International Conference on Computer Network, Electronic and Automation (ICCNEA)*, 321–325. <https://doi.org/10.1109/ICCNEA57056.2022.00077>.
- Dongmin, K., HuiZhi, N., & Kitae, J. (2022). The Analysis of Traffic Variables for EV's Driving Efficiency in Urban Traffic Condition. In *2022 IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)* 1994–2000. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ITSC55140.2022.992191>
- Emanet, B., & Kiyak, I. (2021). Performance Effective Battery Management System(BMS) Design of Mini Electric Vehicles, *2021 5th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*, Ankara, Turkey, pp. 744–749. <https://doi.org/10.1109/ISMSIT52890.2021.9604678>.
- Europos Parlamento ir Tarybos direktyva (ES) 2019/1161. (2019). *Dėl skatinimo naudoti netaršias ir efektyviai energiją vartojančias kelių transporto priemones*. (L 188/116). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019L1161>
- Folgado, J., Valtchev, S. S., & F. Coito (2016). Electronic differential for electric vehicle with evenly split torque. *2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, Varna, Bulgaria, 1204–1209. <https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2016.7752167>.
- Gillespie T. D. (1992). *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. Warrendale, Society of Automotive Engineers. 470 p.

- He, H., Peng, J., Xiong, R., & Fan, H. (2014). An Acceleration Slip Regulation Strategy for Four-Wheel Drive Electric Vehicles Based on Sliding Mode Control. *Energies*, 7(6), 3748–3763. <https://doi.org/10.3390/en7063748>
- Hsu, H. T., Coker, C., & Huang, H. (2010). Optimization of an Electric Vehicle Suspension System Using CAE. *World Electric Vehicle Journal*, 4(1), 179–183. <https://doi.org/10.3390/wevj4010179>
- Hu, J. S., Yin, D., & Hori, Y. (2011). Fault-tolerant traction control of electric vehicles. *Control Engineering Practice*, 19(2), 204–213. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2010.11.012>
- Jazar N. R. (2008). *Vehicle dynamics: theory and application*. United States, 1022 p.
- Junwei, L., & Baojun, Q. (2009). Research on acceleration slip regulation system for two wheel drive electric vehicle. *2009 International Conference on Mechatronics and Automation*, 807–811. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2009.5246244>.
- Kang, L., Shen, H., & Sarker, A. (2017). Velocity Optimization of Pure Electric Vehicles with Traffic Dynamics Consideration. *2017 IEEE 37th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*, 2206–2211. <https://doi.org/10.1109/ICDCS.2017.220>.
- Landman, C., & Rix, A. J. (2019, January). Performance Prediction for an Electric Vehicle. *2019 Southern African Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa (SAUPEC/RobMech/PRASA)*, 538–543. <https://doi.org/10.1109/RoboMech.2019.8704770>
- Lenkauskas, R. (2011). *Matavimo priemonių, skirtų automobilių dinaminėms savybėms nustatyti, lyginamasis tyrimas*. [Baigiamasis magistro darbas, Vilniaus Gedimino technikos universitetas]. Nacionalinė Lietuvos akademinė elektroninė biblioteka. <https://www.lvb.lt/permalink/f/16nmo04/ELABAETD1740470>
- Li, L., & Liu, Q. (2019). Research on IPMSM Drive System Control Technology for Electric Vehicle Energy Consumption. *IEEE Access*, vol. 7, pp. 186201–186210. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2958944>.
- Liu, X., Chen, H., Zhao, J., & Belahcen, A. (2016). "Research on the Performances and Parameters of Interior PMSM Used for Electric Vehicles," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 6, pp. 3533–3545. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2524415>
- Nam, K., Oh, S., Fujimoto, H., & Hori, Y. (2012). Estimation of sideslip and roll angles of electric vehicles using lateral tire force sensors through RLS and Kalman filter approaches. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(3), 988–1000. <https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2188874>

- Nazarova, O. S., Osadchyy, V. V., & Brylysty, V. V. (2020). Computer simulation of electric vehicle acceleration processes with different positions of the mass center. *Applied Aspects of Information Technology*, 154–164. <https://doi.org/10.15276/aait.03.2020.4>.
- Nitsche, P., Aleksa, M., Winkelbauer, M., Harnisch, M., & Kammer, M. (2014). The impacts of electric cars on road safety: Insights from a real-world driving study. <https://doi.org/10.13140/2.1.2329.7284>.
- Peugeot e–2008 50 kWh. *Technical information*. (2023 m. sausio 5 d.). Wiki Automotive Catalog. <https://www.auto-data.net/en/peugeot-2008-ii-e-2008-50-kwh-136hp-38043>
- Rill, G. (2009). *Vehicle dynamics*. Lecture notes. Hochschule Regensburg. University of applied sciences, 106–176.
- Sepulchre, L., Fadel, M., Pietrzak-David, M., & Porte, G. (2018). MTPV Flux-Weakening Strategy for PMSM High Speed Drive, in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 6, pp. 6081–6089. <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2856841>
- Siddi, M. (2020). The European Green Deal: Asseasing its current state and future implementation. <https://hdl.handle.net/11584/313484>
- Sol, D., & Watanabe, S. F. (1992). Vehicle inertia and center of gravity estimator. US Patent, 8 p.
- Song, Z., Hofmann, H., Li, J., Wang, Y., Lu, D., Ouyang, M., & Du, J. (2020). Torque distribution strategy for multi-PMSM applications and optimal acceleration control for four-wheel-drive electric vehicles. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 142(2), 021001. <https://doi.org/142.10.1115/1.4045321>.
- Šližys, E. (2011). *Eksperimentinis automobilio masės centro padėties ir jo įtakos automobilio dinamikai tyrimas*. [Baigiamasis magistro darbas, Vilniaus Gedimino technikos universitetas]. Nacionalinė Lietuvos akademinė elektroninė biblioteka. <https://www.lvb.lt/permalink/f/16nmo04/ELABAETD1890728>
- Volkswagen e–UP! 36 kWh. *Technical information*. (2023 m. sausio 5 d.). Wiki Automotive Catalog. <https://www.auto-data.net/en/volkswagen-e-up-facelift-2019-36.8-kwh-83hp-38498>
- Wang, A., Gu, Z., & Sun, X. (2014). Dynamic simulation of acceleration for a foursprocket electric tracked vehicle under different pavement conditions. *IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ITEC-AP.2014.6941046>
- Wang, C., Yu, H., Zhang, L., Wang, Z., Wang, Q., & Cao, D. (2020). Post-Impact Stability Control for Four-Wheel- Independently-Actuated Electric Vehicles. *2020 Chinese Automation Congress (CAC)*, Shanghai, China, 2020, pp. 7197–7202. <https://doi.org/10.1109/CAC51589.2020.9326596>.

- Wangsupphaphol, A., Idris, N. R. N., Jusoh, A., Muhamad, N. D., & Yao, L. W. (2014). The energy management control strategy for electric vehicle applications, *2014 International Conference and Utility Exhibition on Green Energy for Sustainable Development (ICUE)*, Pattaya, Thailand, pp. 1–5. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6828980>
- Xiong, L. Yu, Z., Wang, Y., Yang, C., & Meng, Y. (2012). Vehicle dynamics control of four in-wheel motor drive electric vehicle using gain scheduling based on tyre cornering stiffness estimation. *Vehicle System Dynamics*. 50:6, 831–846. <https://doi.org/10.1080/00423114.2012.663921>
- XL meter data*. (2023 m. sausio 6d.). Steffens GmbH. <https://www.steffens-gmbh.de/XL-Meter-Pro-Gamma-Expert-Equipment-ohne-Kalibrierung>
- Zhang, N., Han, Z., Gao, C., & Sun, H. (2019). The slip ratio fault-tolerant control of electric vehicles based on sliding mode control. *2019 Chinese Automation Congress (CAC)*, Hangzhou, China, 2019, 4397–4401. <https://doi.org/10.1109/CAC48633.2019.8997435>.

PRIEDAI

Priedas A.

Atskirai šiame priede A pateikiami „Matlab Simulink“ naudoto elektromobilio matematinio modelio simuliacijų parametrai. Reikia pabrėžti, kad naudoti standartiniai simuliacijų parametrai, o visos toliau pateikiamos parametrų reikšmės, esant poreikiui, gali būti modifikuotos pagal individualius poreikius.

	Parametro pavadinimas	Aprašymas	Matavimo vienetas	Reikšmė
1	PIntVehMass	Visiškai sukomplektuotos transporto priemonės amortizuotoji masė	kg	1623
2	PIntVehDstCGFrntAxl	Išilginis atstumas iki svorio centro nuo priekinės ašies	m	1.09
3	PIntVehDstCGRearAxl	Išilginis atstumas iki svorio centro nuo galinės ašies	m	1.7
4	PIntVehCGHgtAxl	Vertikali svorio centro padėtis	m	0.3
5	PIntVehPitchMomentInertia	Inercijos momentas apie posvyrio ašį	kg*m ²	1922.7
6	PIntVehAeroFrntArea	Priekinis transporto priemonės plotas	m ²	2.27
7	PIntVehAeroDragCff	Aerodinaminis pasipriešinimo koeficientas	□	0.389
8	PIntVehAeroLiftCff	Aerodinaminis kėlimosios jėgos koeficientas	□	0.1

A.1 pav. Standartiniai elektromobilio techniniai parametrai simuliacijai

1	PIntEM1Spd	Variklio sukčių skaičiaus ribiniai taškai maksimaliam sukimo momentui	rad/s	[0 139.62634015954637 279.25268...
2	PIntEM1Trq	Maksimalios sukimo momento reikšmės	N*m	[450 450 450 450 450 377.7940461...
3	PIntEM1SpdEff	Variklio greičio ribiniai taškai efektyvumo lentelėje	rad/s	[0 139.62634015954637 279.25268...
4	PIntEM1TrqEff	Variklio sukimo momento ribiniai taškai efektyvumo lentelėje	N*m	[0 45 90 135 180 225 270 315 360 4...
5	PIntEM1EffTbl	Efektyvumo lentelė	%	[52 78 80 82 82 80 78 76 74 70,5...
6	PIntEM1SpdLoss	Variklio greičio ribiniai taškai nuostolių lentelėje	rad/s	[0 139.62634015954637 279.25268...
7	PIntEM1TrqLoss	Variklio sukimo momento ribiniai taškai nuostolių lentelėje	N*m	[0 45 90 135 180 225 270 315 360 4...
8	PIntEM1TrqLossTbl	Nuostolių lentelė	W	[0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ...

A.2 pav. Elektromobilio elektros variklio parametrai

1	PIntBattNumCellSer	Nuosekliai sujungtų elementų skaičius	□	96
2	PIntBattNumCellPar	Lygiagrečiai sujungtų elementų skaičius	□	47
3	PIntBattChrglMax	Projektinė talpa esant nominaliai temperatūrai	A*h	3.153
4	PIntBattTimeCnst	Baterijos įtampos išvesties laiko konstanta	s	0.001
5	PIntBattOpenCircVolt	Atviros grandinės įtampos vertės; kiekvieno elemento	V	[2.90003 2.90003 2.90003 2.90003 2.90...
6	PIntBattVoltSocBpt	Baterijos įkrovos būsenos ribinės vertės nuo įtampos	□	[0 0.01 0.02 0.03 0.04 0.05 0.06 0.07 0.0...
7	PIntBattTempBpt	Baterijos temperatūros ribinės vertės įtampos ir varžos lentelėse	C	[-10 0 25 40 60]
8	PIntBattIntrnRes	Vidinės varžos lentelė	Ohm	[0.54124 0.47218 0.1741 0.16472 0.130...
9	PIntBattSocBpt	Baterijos įkrovos būsenos ribinės vertės nuo varžos	□	[0 0.01 0.02 0.03 0.04 0.05 0.06 0.07 0.0...
10	PIntBattSocInit	Pradinė baterijos talpa	Ah	1.0

A.3 pav. Elektromobilio akumuliatorių baterijos parametrai

1	EnvAbsPrs	Aplinkos oro absoliutus slėgis	Pa	101325
2	EnvAirTemp	Aplinkos oro absoliuti temperatūra	K	293.15
3	EnvNomFrictionScaling	Nominalus kelio dangos sukibimo mastelio keitimo koeficientas	□	1
4	EnvWindVelX	Vėjo greitis X kryptimi	m/s	0

A.4 pav. Simuliacijos aplinkos parametrai