



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA

Gytis Vyšniauskas

Elektromobilio pavaros valdymo sistemos tyrimas

Research on Engine Control System for Electric Vehicle

Baigiamasis magistro darbas

Automatikos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX048

Automatinių sistemų specializacija

Elektros inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2021

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėja

(parašas)

Sonata Tolvaišienė
(vardas, pavardė)

2021 m. _____ mėn. _____ d.
(data)

Gytis Vyšniauskas

Elektromobilio pavaros valdymo sistemos tyrimas

Research on Engine Control System for Electric Vehicle

Baigiamasis magistro darbas

Automatikos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX048

Automatinių sistemų specializacija

Elektros inžinerijos studijų kryptis

Vadovas doc. dr. Dainius Udris

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

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantė dr. Anželika Gaidienė

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

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2021

**VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA**

TVIRTINU
Katedros vedėjas

Elektros inžinerijos studijų kryptis

Automatikos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX048

Automatinių sistemų specializacija

(parašas)

Sonata Tolvaišienė
(vardas, pavardė)

2021 m. _____ mėn. _____ d.
(data)

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS**

Nr. 6

Vilnius

Studentui Gyčiui Vyšniauskui

Baigiamojo darbo tema: Elektromobilio pavaros valdymo sistemos tyrimas

Research on Engine Control System for Electric Vehicle

Patvirtinta 2019 m. spalio 29 d. dekanų potvarkiu Nr. 232 el.

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2021 m. birželio 8 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Aiškinamasis raštas: Įvadas. 1 Analitinė dalis. 1.1. Elektromobilių rūšys ir jų privalumai. 1.2. Elektriniai hibridiniai automobiliai ir jų veikimo principai. 1.3. Elektros pavaros elementai. 1.4. PMSM variklio veikimas ir darbo režimai. 1.5. Elektromobilio PMSM pavaros valdymo metodai. 2. Metodinė dalis. 2.1. Elektromobilio pavaros valdymo sistemos modelis. 2.2. PMSM variklio lygčių transformacijos. 2.3. Srovių ir greičio PID reguliatoriai. 2.4. Elektromobilio išilginė dinamika. 2.5. Greičio įėjimo signalo valdymas. 3. Tiriamoji dalis. 3.1. Elektromobilio pavaros modelio veikimas be išorinės apkrovos. 3.2. Elektromobilio pavaros sistemos veikimas lygiu keliu. 3.3. Modelio greičio įėjimo signalo valdymas. 3.4. Vėjo ir kelio statumo įtaka elektromobilio pavaros valdymui. 3.5. Rato sukibimo su paviršiumi ir riedėjimo pasipriešinimo koeficientų įtaka elektromobilio pavarai. Išvados ir siūlymai. Literatūra.

Vadovas.....
(parašas)

doc. dr. Dainius Udris
(mokslinis laipsnis ir vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

.....
(parašas)

Gytis Vyšniauskas
(Studento vardas, pavardė)

2019 m. lapkričio 11 d.
(data)

Anotacija

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Elektronikos fakultetas

Elektros inžinerijos katedra

ISBN

ISSN

Egz. sk. 1

Data 2021-05-22

Automatikos studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas **Elektromobilio pavaros valdymo sistemos tyrimas**

Autorius **Gytis Vyšniauskas**

Vadovas doc. dr. **Dainius Udris**

Kalba

☒ X

lietuvių

☐

užsienio

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe modeliuojama ir testuojama elektromobilio pavaros valdymo sistema bei įvertinama automobilio išilginė dinamika. Tiriama, kokią įtaką valdymo procesams ir elektros varikliui daro skirtingi aplinkos veiksniai: kaip kelio danga, vėjo greitis ir kryptis, kelio nelygumai. Analitinėje darbo dalyje analizuojami skirtingi elektromobilių tipai ir jų veikimo principai, elektros pavaros sandara bei plačiausiai naudojami varikliai. Metodinėje dalyje aprašomas „Simulink“ paketu sudarytas sistemos modelis, elektromobilį veikiančios išorinės jėgos ir sistemos parametrų skaičiavimo metodika. Tiriamojoje dalyje išbandomas elektros variklio modelis be apkrovos, pateikiami elektromobilio mechaniniai parametrai, pagal kuriuos įvertinama automobilio išilginė dinamika. Tiriama, kokią įtaką elektromobilio modeliui turi nuo judėjimo greičio priklausantis oro srautas, kokias įkalnes gali įveikti pasirinktas variklis, kaip keičiasi elektromobilio pagreitis ir maksimalus greitis važiuojant skirtingomis kelio dangomis. Išvadose ir pasiūlymuose aptariami gauti modeliavimo ir tyrimo rezultatai ir pateikiami pasiūlymai elektromobilio pavaros valdymo sistemai tobulinti.

Darbo apimtis – 63 p. teksto be priedų, 47 iliustr., 8 lent., 49 bibliografiniai šaltiniai.

Prasminiai žodžiai: elektromobilio pavara, PMSM, išilginė automobilio dinamika, FOC, elektroniškai komutuojami varikliai, koordinačių transformacija.

Annotation

Vilnius Gediminas Technical University

Electronics Faculty

Electrical Engineering Department

ISBN

ISSN

Copies No. 1

Date 2021-05-22

Electric power engineering/Automation study program master thesis

Title: **Research on Engine Control System for Electric Vehicle**

Author **Gytis Vyšniauskas**

Academic supervisor **doc. dr. Dainius Udris**

Thesis language

☐

Lithuanian

☒

Foreign
(English)

Annotation

The current Master thesis models and tests the electric vehicle's drive control system and evaluates the vehicle's longitudinal dynamics. The paper investigates the impact of different environmental factors (road surface, wind speed and direction) on control processes and the electric motor. The analysis section focuses on different types of electric vehicles and their operating principle, electric engine control system and the most widely used motors. The theoretical part of the paper describes the model created with “Simulink” package, also the methodology of calculation of external forces acting on the electric vehicle and system parameters. The testing of the electric motor without load model is presented in the research section. In this section mechanical parameters of the electric vehicle, according to which the longitudinal dynamics of the vehicle is evaluated, are presented. The paper investigates the air velocity-dependent air flow impact on the electric vehicle model, also what hills the selected engine can overcome, how the acceleration and maximum speed of the electric vehicle changes when driving on different road surfaces. The conclusion and suggestions sections focus on the results of the current research and the ways the engine control system can be improved.

The thesis consists of: 63 pages research without appendixes, 47 pictures, 8 tables, 49 literature sources.

Keywords: Electric vehicle drive, PMSM, longitudinal vehicle dynamics, FOC, BLDC, coordinate transformation.

Vilniaus Gedimino technikos universiteto
egzaminų sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo bei
gynimo organizavimo tvarkos aprašo 2011–2012 m.
2 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Gytis Vyšniauskas 20152378

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Automatikos studijų programa, AUSfm-19

(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)

SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2020 m. gruodžio 1 d.
(Data)

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas (projektas) tema Elektromobilio pavaros valdymo sistemos tyrimas patvirtintas 2019 m. spalio 29 d. dekanų potvarkiu Nr. 232 el. yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe (projekte) pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Prenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą (projektą), mane konsultavo mokslininkai ir specialistai:

Mano darbo (projekto) vadovas doc. dr. Dainius Udris

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą (projektą) nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).

(Parašas)

GYTIS VYŠNIAUSKAS
(Vardas ir pavardė)

Turinys

Įvadas.....	11
1. Analitinė dalis.....	13
1.1. Elektromobilių rūšys ir jų privalumai.....	13
1.2. Elektriniai hibridiniai automobiliai ir jų veikimo principai.....	16
1.3. Elektros pavaros elementai	18
1.4. PMSM variklio veikimas ir darbo režimai	23
1.5. Elektromobilio PMSM pavaros valdymo metodai	27
2. Metodinė dalis	30
2.1. Elektromobilio pavaros valdymo sistemos modelis	30
2.2. PMSM variklio lygčių transformacijos.....	31
2.3. Srovių PI ir greičio PID reguliatoriai.....	33
2.4. Elektromobilio išilginė dinamika.....	35
2.5. Greičio jėgimo signalo valdymas	37
3. Tiriamoji dalis	39
3.1. Elektromobilio pavaros modelio veikimas be išorinės apkrovos	39
3.2. Elektromobilio pavaros sistemos veikimas lygiu keliu	42
3.3. Modelio greičio jėgimo signalo valdymas.....	46
3.4. Vėjo ir kelio statumo įtaka elektromobilio pavaros valdymui.....	48
3.5. Rato sukibimo su paviršiumi ir riedėjimo pasipriešinimo koeficientų įtaka elektromobilio pavarai	54
Išvados ir siūlymai.....	59
Literatūra	61

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Pagrindiniai automobilių tipai ir jų skirtumai pagal energijos šaltinius [1]	13
1.2 pav. Hibridinių automobilių pavarų konfigūracijos (A – lygiagrečiai sujungta; B – nuosekliai sujungta; C – mišriai sujungta) [8]	16
1.3 pav. Audi e-tron S elektrinės pavaros sandara [11].....	18
1.4 pav. 120 kW elektromobilio inverteris (300 A, 400 V) [18]	20
1.5 pav. Elektros ir vidaus degimo variklių principinė sukimo momentų priklausomybė nuo greičio [22]	21
1.6 pav. BLDC variklio sandara [24]	22
1.7 pav. PMM sukimo momento priklausomybė nuo apkrovos kampo	23
1.8 pav. Sinchroninio variklio su nuolatinais magnetais veikimo principas.....	24
1.9 pav. PMSM variklio optimalaus valdymo trajektorijos ir darbo režimai.....	26
1.10 pav. Sinchroninio variklio valdymo metodai	27
2.1 pav. Modelyje naudojamas EMRAX 188 PMSM variklis [37].....	30
2.2 pav. Elektromobilio pavaros valdymo sistemos modelis „Simulink“ programiniame pakete....	31
2.3 pav. Skirtingos PMSM variklio kintamųjų koordinačių plokštumos.....	32
2.4 pav. i_q srovės kontūras su vienetiniu grįžtamuju ryšiu.....	34
2.5 pav. q srovės atviros sistemos perdavimo funkcijos šaknų hodografas [41]	34
2.6 pav. Automobilį veikiančios jėgos [47]	36
2.7 pav. Elektromobilio išilginės dinamikos modelis	37
2.8 pav. Greičio kitimo valdymo modelis šuolinei greičio įėjimo signalo funkcijai	38
2.9 pav. Greičio kitimo valdymo modelis WLTP važiavimo ciklo funkcijai	38
3.1 pav. Elektromobilio pavaros modelio be išorinės apkrovos reakcija į šuolinę funkciją.....	39
3.2 pav. Elektromobilio pavaros modelio be išorinės apkrovos reakcija į WLTP važiavimo ciklą	40
3.3 pav. Pavaros modelio be išorinės apkrovos sukimo momento generavimas WLTP važiavimo ciklu	40
3.4 pav. Pavaros modelio be išorinės apkrovos i_q ir i_d srovės WLTP važiavimo ciklu.....	41
3.5 pav. Elektromobilio pavaros modelio reakcija į šuolinę funkciją važiuojant lygiu keliu	43
3.6 pav. Pavaros ir apkrovos kuriami sukimo momentai esant šuolinei įėjimo funkcijai.....	43
3.7 pav. PMSM variklio statoriaus apvijų srovės esant šuolinei įėjimo funkcijai	44
3.8 pav. Elektromobilio pavaros modelio su išorine apkrova reakcija į EUDC (kairėje) ir WLTP (dešinėje) važiavimo ciklus	45
3.9 pav. Pavaros modelio su išorine apkrova sukimo momento generavimas EUDC (kairėje) ir WLTP (dešinėje) važiavimo ciklu metu.....	45

3.10 pav. Elektros pavaros modelio reakcija į šuolinę funkciją esant išorinei apkrovai ir perskaičiavus greičio signalą.....	46
3.11 pav. Pavaros ir apkrovos kuriami sukimo momentai esant šuolinei įėjimo funkcijai ir greičio signalo perskaičiavimui	47
3.12 pav. PMSM variklio statoriaus apvijų srovės esant šuolinei įėjimo funkcijai ir greičio signalo perskaičiavimui.....	47
3.13 pav. Elektromobilio pavaros modelio su išorine apkrova ir greičio signalo perskaičiavimu reakcija į WLTP važiavimo ciklą	48
3.14 pav. Oro pasipriešinimo jėga įsibėgėjant bagiui esant skirtingiems vėjo greičiams.....	49
3.15 pav. Suminis apkrovos sukimo momentas įsibėgėjant bagiui, esant skirtingiems vėjo greičiams	50
3.16 pav. Elektros pavaros ir apkrovos kuriami sukimo momentai įsibėgėjant bagiui, esant skirtingiems vėjo greičiams.....	50
3.17 pav. Elektromobilio įsibėgėjimas iki maksimalaus greičio lygiu keliu, esant skirtingiems vėjo greičiams.....	51
3.18 pav. Pavaros modelio reakcija į vėjo gūsius ir stabilaus sukimosi greičio išlaikymas	51
3.19 pav. Apkrovos sukimo momentas įsibėgėjant bagiui, esant skirtingiems kelio statumams	52
3.20 pav. Elektros pavaros ir apkrovos kuriami sukimo momentai įsibėgėjant bagiui, esant skirtingiems kelio statumams	53
3.21 pav. Elektromobilio įsibėgėjimas iki maksimalaus greičio lygiu keliu esant skirtingiems kelio statumams	53
3.22 pav. Bagio maksimalus perskaičiuotas pagreitis ant skirtingų kelio dangų.....	54
3.23 pav. Elektromobilio įsibėgėjimas iki maksimalaus greičio lygiu paviršiumi ant skirtingų kelio dangų	55
3.24 pav. PMSM variklio statoriaus apvijų įtampos įsibėgėjant skirtingomis kelio dangomis	55
3.25 pav. Elektros pavaros ir apkrovos kuriami sukimo momentai, esant skirtingoms kelio dangoms	56
3.26 pav. Bagio varomosios ašies normalinė apkrova esant skirtingiems riedėjimo pasipriešinimo koeficientams.....	57
3.27 pav. Elektros pavaros ir apkrovos kuriami sukimo momentai, esant skirtingiems riedėjimo pasipriešinimo koeficientams	57
3.28 pav. Elektromobilio įsibėgėjimas iki maksimalaus greičio, esant skirtingiems riedėjimo pasipriešinimo koeficientams	58

Lentelių sąrašas

1.1 lentelė. Įkrovimo stotelių tipai ir parametrai [3]	14
1.2 lentelė. Pirmą kartą įregistruotų Lietuvoje M1 klasės transporto priemonių skaičius pagal degalų rūšį 2021 m. sausio-balandžio mėn. [5].....	15
1.3 lentelė. Automobilio elektrinės sistemos, veikiančios su 12 V arba 48 V nuolatine įtampa [12]	19
2.1 lentelė. PMSM variklio parametrai, naudojami modelyje	30
3.2 lentelė. Bandymuose naudojami skirtingi vėjo tipai	49
3.3 lentelė. Bandymuose naudojami skirtingi kelio nelygumai	52
3.4 lentelė. Rato sukibimo koeficientas su skirtingomis kelio dangomis	54
3.5 lentelė. Riedėjimo pasipriešinimo koeficientas esant skirtingoms kelio dangoms	56

Ivadas

Jau daugiau nei šimtmetį vidaus degimo variklių (angl. *Internal combustion engine*; toliau – ICEVs) vystymasis analizuojamas įvairiais aspektais: gilinamasi į gamybos technologijas, medžiagų parinkimą, variklio charakteristikas, transporto priemonės valdymą bei vairuotojų patogumą ir saugumą. Šiuolaikinės transporto priemonės, turinčios vidaus degimo variklius, siejamos su komfortu, aukštos kokybės saugumu bei patvarumu. Tačiau vienas iš tipo variklių trūkumų yra tai, kad nepanaudota energija tenka varikliui ir išmetamosioms dujoms šildyti. Išmetamosios dujos neatsiejamos nuo šiandien didiesiems miestams ypač aktualios oro taršos problemos, sukeliančios ne tik kvėpavimo takų ligas, bet ir plaučių vėžį. Pastarieji veiksniai yra ypač aktualūs šiomis dienomis, todėl, aptarus vidaus degimo variklių trūkumus, vertėtų pažvelgti iš arčiau į kitas aplinkai ir žmogui draugiškesnes alternatyvas, pavyzdžiui, elektros variklius (angl. *electric vehicles*; toliau – EV).

Šiandien transporto priemonių industrija, ypač elektrinių transporto priemonių industrija, išgyvena kardinalius pokyčius. Daugybė kompanijų pradėjo kreipti dėmesį į naujus automobilių modelius, varomus elektros energija. Emisijos nebuvimas, aukštas galios efektyvumas ir žemi garso bei taršos rodikliai transporto priemonę daro draugišką aplinkai. Tokiu būdu skatinamas elektros pavarų dominavimas transporto priemonių rinkoje. Apskritai, elektros pavaros yra sudėtinga elektromechaninė struktūra, sudaryta iš elektros kaupimo sistemos, elektros variklio ir elektroninių įtaisų, kurių galią galima visiškai valdyti. Pastarieji yra sureguliuoti siekiant užtikrinti greitą ir sklandų darbą, paremtą: 1) vairuotojo sprendimais, pagrįstais kelio ir vairavimo būkle ir 2) automatinio reguliavimu siekiant kuo geriau įkrauti / iškrauti baterijas ir efektyviau valdyti elektromobilį kelionės metu. Automatinis reguliavimas ypač aktualus siekiant užtikrinti sklandų, vienodą ir malonų važiavimą besikeičiant išoriniams veiksniams.

Pramonėje plačiai paplitę asinchroniniai elektros varikliai yra taikomi ir elektromobilių pavarose, tačiau elektros mašinos su nuolatiniais magnetais dėl savo didelio efektyvumo, galios tankio ir kuriamo sukimo momento naudojamos kur kas dažniau. Varikliai su nuolatiniais magnetais, priklausomai nuo maitinimo šaltinio įtampos kreivės formos, skirstomi į dvi pagrindines rūšis. Elektroniškai komutuojami nuolatinės srovės varikliai (angl. *brushless dc*; toliau – BLDC) valdomi trapecijos formos įtampos signalais, o sinchroniniai varikliai su nuolatiniais magnetais (angl. *permanent magnet synchronous motor*; toliau – PMSM) maitinami sinusinės formos įtampos signalais. PMSM varikliai plačiausiai naudojami automobilių pramonėje dėl mažesnio triukšmo, nuostolių, sukimo momento pulsacijų ir didesnio maksimalaus greičio.

Darbo tikslas: sudaryti elektromobilio su PMSM varikliu valdymo modelį artimą realiam bagiui ir įvertinti išilginės dinamikos veiksnius.

Darbo uždaviniai:

1. PMSM variklio parinkimas ir aprašymas.
2. Realios bagio parametrų įvertinimas.
3. Bagį veikiančios išilginės dinamikos aprašymas.
4. Elektromobilio pavaros valdymo tipo parinkimas.
5. Modelio sudarymas.
6. Sistemos testavimas esant skirtingiems darbo režimams.
7. Gautų modeliavimo duomenų ir skirtingų parametrų daromos įtakos sistemai analizavimas.

1. Analitinė dalis

1.1. Elektromobilių rūšys ir jų privalumai

Iš viso išskiriami trys pagrindiniai elektrinių transporto priemonių tipai, klasifikuojami pagal elektros, kaip energijos šaltinio, kiekį (žr. 1.1 pav.): akumuliatorinės elektrinės transporto priemonės (angl. *battery electric vehicles*; toliau – BEV), prijungiamos hibridinės elektrinės transporto priemonės (angl. *plug-in hybrid electric vehicles*; toliau – PHEV) ir hibridinės elektrinės transporto priemonės (angl. *hybrid electric vehicles*; toliau – HEV). Tik akumuliatorinės elektrinės transporto priemonės gali būti įkraunamos 3 lygio įkrovimo stotelėmis – nuolatinės srovės greitu įkrovimu.

					
	Standartinis	Hibridinis	Įkraun. Hibridas	Elektrinis	
Energijos šaltinis					
Sąnaudos					
Emisija					

1.1 pav. Pagrindiniai automobilių tipai ir jų skirtumai pagal energijos šaltinius [1]

Akumuliatorinės elektrinės transporto priemonės (BEV) yra visapusiškai elektrinės transporto priemonės su įkraunamomis baterijomis, neturinčios dyzelinio variklio. Elektra varomos akumuliatorinės transporto priemonės talpina energiją didelės talpos akumuliatoriuose, pritvirtintuose prie pačios transporto priemonės, ir įkraunamos iš išorinių elektros šaltinių.

Baterijų energija yra naudojama elektros variklio ir visos elektrinės įrangos, esančios transporto priemonėje, darbui. Skirtingai nei dyzeliniai varikliai, akumuliatorinės elektrinės transporto priemonės neišskiria jokios aplinkai žalingos emisijos.

Šių transporto priemonių įkrovikliai kategorizuojami skirtingai, priklausomai nuo baterijų įkrovimo greičio. Įkrovikliai skirstomi į tris lygius. 1 lygio įkrovikliais elektrinę transporto priemonę galima įkrauti namų sąlygomis ar darbe. Siekiant, kad automobilis nuvažiuotų apie 75–80 mylių, elektromobilis prijungiamas prie vienfazio kintamosios įtampos tinklo standartiniu kištuku, ir įkrovimas užtrunka apie 8 valandas. Įprastai pirmo lygio įkrovimą galima atlikti namuose ar darbe.

Antrajam baterijų įkrovimo lygiui reikalingos specializuotos stotelės, kurios teikia 240 V įtampą. Pastarosios stotelės dažniausiai įrengiamos prie darbo vietų ar veikia kaip viešos elektros baterijų įkrovimo vietos. Kad automobilis nuvažiuotų apie 75–80 mylių, įkrovimas gali užtrukti apie 4 valandas.

3 įkrovimo lygis – tai nuolatinės srovės greitas įkrovimas, kuris šiandien yra sparčiausias įkrovimo lygis elektrinių automobilių rinkoje (žr. 1.1 lentelę) Toks įkrovimo būdas paprastai naudojamas greito įkrovimo stotelėse, kurių prie gyvenamųjų namų, dėl didelės galios suvartojimo, nebūna. Nuolatinės srovės greitieji įkrovikliai aptinkami specializuotose įkrovimo stotelėse. Elektromobilių baterijų įkrovimo laikas priklauso nuo lauko temperatūros, baterijos ir jos elementų (angl. *cell*) temperatūros, įkrovimo stotelės, laidų skerspjūvio ploto ir elektros instaliacijos iki įkrovimo stotelės būklės, baterijos talpos ir esamo įkrovimo lygio (angl. *State of charge*). Idealiomis sąlygomis greitojo įkrovimo stotelėse elektromobilio bateriją nuo 0 % iki 80 % galima įkrauti per pusę valandos ir nuvažiuoti apie 90 mylių [2].

1.1 lentelė Įkrovimo stotelių tipai ir parametrai [3]

	1 įkrovimo lygis (AC)	2 įkrovimo lygis (AC)	3 įkrovimo lygis/Greitas įkrovimas (DC)	Ypač greitas įkrovimas (DC)
Įkrovimo galia	2,4–3,7 kW	7–22 kW	50 kW	150–300 kW
Vidutinis baterijos įkrovimo laikas	5–16 h	1–5 h	20–60 min	10–40 min
Nuvažiuojamas atstumas po 1 valandos įkrovimo	10–20 km	30–120 km	250–500 km	1000 km

Keletas akumuliatorinių elektrinių transporto priemonių, kurias galima įkrauti greituoju krovimo būdu, yra: *Tesla Model 3*, *BMW i3*, *Chevy Bolt*, *Chevy Spark*, *Nissan LEAF*, *Ford Focus Electric*, *Hyundai Ioniq*, *Karma Revera*, *Kia Soul*, *Mitsubishi i-MiEV*, *Tesla Model S*, *Tesla X*, *Toyota Rav4*, *Volkswagen e-Golf*.

Prijungiamos hibridinės elektrinės transporto priemonės gali būti įkraunamos tiek regeneratyviuoju būdu, stabdant transporto priemonę, tiek prijungiant jas prie išorinio elektros tiekimo šaltinio. Kai įprasti hibridai, esant mažam greičiui, nuvažiuoja apie 1–2 mylias, kol įsijungia dyzelinis variklis, prijungiamos hibridinės elektrinės transporto priemonės iki vidaus degimo variklio įsijungimo gali nuvažiuoti apie 10–40 mylių.

Tokių prijungiamų hibridinių automobilių pavyzdžiai: *Chevy Volt, Chrysler Pacifica, Ford C-Max Energi, Ford Fusion Energi, Mercedes C350e, Mercedes S550e, Mercedes GLE550e, Mini Cooper SE Countryman, Audi A3 E-Tron, BMW 330e, BMW i8, BMW X5 xdrive40e, Fiat 500e, Hyundai Sonata, Kia Optima, Porsche Cayenne S E-Hybrid, Porsche Panamera S E-hybrid, Toyota Prius, Volvo XC90 T8.*

Hibridiniai elektriniai automobiliai yra varomi tiek dyzeliu (arba benzinu), tiek elektra. Norint įkrauti akumuliatorius, elektros energijai generuoti pasitelkiama pačios transporto priemonės stabdžių sistema. Toks procesas, kurio metu elektrinis variklis padeda pristabdyti transporto priemonę panaudodamas dalį energijos, kurią sukuria stabdžių išskiriama šiluma, vadinamas regeneraciniu stabdymu (angl. *regenerative braking*). Hibridiniai elektros varikliai pradeda naudoti elektrinį variklį, kai dyzelinio variklio apkrova arba greitis padidėja. Abu varikliai valdomi vidinio kompiuterio, kuris užtikrina ekonomiškumą priklausomai nuo vairavimo sąlygų. Hibridinių elektromobilių pavyzdžiai: *Toyota Prius Hybrid, Honda Civic Hybrid, Toyota Camry Hybrid.*

Šiandien elektrinės automobilių pavaros sistemos yra laikomos automobilių ateitimi, o vidaus degimo varikliai išliks esminiu faktoriumi tol, kol bus įgyvendinta ilgaamžio ir tvaraus judumo vizija (žr. 1.2 lentelę). Jos tikslas yra visiškai išnaudoti likusias galimybes sumažinti išmetamą anglies dioksido kiekį. Elektrinės vairavimo sistemos skatina ir įgalina aplinkai nekenksmingą vairavimą miestuose bei, prireikus, gali būti naudojamos ilgesnėms distancijoms pasitelkiant įvairias hibridines technologijas [4]. Žemiau pateiktoje lentelėje matyti, kad Lietuvoje tarp pirmą kartą įregistruotų naudotų transporto priemonių absoliučią daugumą sudaro automobiliai su vidaus degimo varikliais, tačiau tarp naujų M1 klasės transporto priemonių elektrinių/hibridinių automobilių skaičius sparčiai vejas automobilių su vidaus degimo varikliais skaičių.

1.2 lentelė Pirmą kartą įregistruotų Lietuvoje M1 klasės transporto priemonių skaičius pagal degalų rūšį 2021 m. sausio-balandžio mėn. [5]

SAVYBĖ	DEGALŲ RŪŠIS	MĖNUO				IŠ VISO
		1	2	3	4	
Naudota	Dyzelinas	5167	5790	7801	9821	28579
	Elektra	99	25	29	62	215
	Benzinas	1730	2004	2826	3325	9885
	Benzinas / Dujos	131	148	177	208	664
	Dyzelinas / Elektra	27	24	33	57	141
	Benzinas / Elektra	259	304	387	529	1479
Naudota viso		7448	8333	11304	14064	41149
Nauja	Dyzelinas	295	278	377	479	1429
	Elektra	36	12	17	75	140
	Benzinas	1257	690	1201	1537	4685
	Benzinas / Dujos	17	16	13	23	69
	Dyzelinas / Elektra	62	75	74	81	292
	Benzinas / Elektra	635	1162	1383	1408	4588
Nauja viso		2302	2233	3065	3603	11203
IŠ VISO		9750	10566	14369	17667	52352

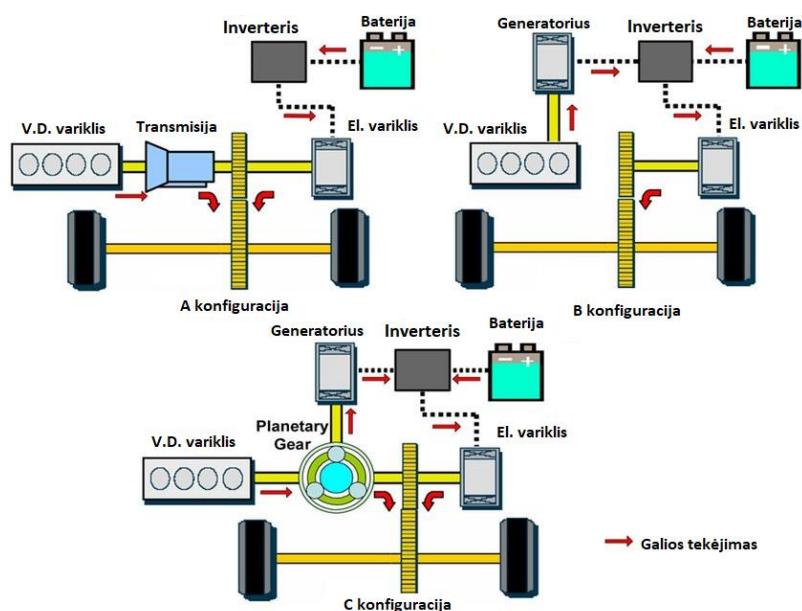
1.2. Elektriniai hibridiniai automobiliai ir jų veikimo principai

Hibridiniai elektriniai automobiliai ir juose naudojamos hibridinės pavaros kelia 3 pagrindinius tikslus: ekonomiško degalų sunaudojimo, sumažėjusio kenksmingų išmetamųjų dujų kiekio ir padidinto sukimo momento bei galios. Priklausomai nuo keliamų tikslų ir galimybės važiuoti vien elektros energija, hibridiniai automobiliai naudoja skirtingas koncepcijas. Šie automobiliai skirstomi į silpnus hibridus ir visiškus hibridus. Pirmuosiuose elektrinis variklis padeda vidaus degimo varikliui vykdant skirtingus veiklos režimus, pavyzdžiui, stabdymo metu arba suteikiant papildomos galios varikliui.

Visiškai hibridiniai automobiliai turi kompleksines sistemas, kuriose vidaus degimo variklis sujungtas su vienu ar keliais elektros varikliais. Elektros variklių naudojimas kartu su vidaus degimo varikliais turi įvairių pranašumų, lyginant su įprastais automobiliais:

- Elektros varikliai duoda pastovų didelį sukimo momentą esant mažam sukimosi greičiui, todėl idealiai papildo vidaus degimo (angl. *internal combustion*; toliau – IC) variklius, kurių sukimo momentas pradeda didėti pasiekus vidutinį variklio sukimosi greitį. Taip pat šie varikliai suteikia aukštą dinaminį atsaką kiekvienoje važiavimo situacijoje.
- Elektros varikliai leidžia išnaudoti ir valdyti IC variklius efektyviausiu darbo arba mažiausiai aplinką teršiančiais režimais (optimizuojamas variklio veikimas) [6, 7].

Du skirtingi galios įrenginiai (varikliai) pagal galios srauto perdavimą gali būti sujungti nuosekliai, lygiagrečiai arba mišriai (žr. 1.2 pav.). Tai vadinama hibridinių automobilių konfigūracijomis.



1.2 pav. Hibridinių automobilių pavarų konfigūracijos (A – lygiagrečiai sujungta; B – nuosekliai sujungta; C – mišriai sujungta) [8]

Antrame paveiksle, B dalyje, pavaizduota nuoseklaus hibridinio elektrinio automobilio (HEV) konfigūracija. Čia IC variklis yra pagrindinis galios keitiklis, kuris pakeičia originalią kuro energiją į mechaninę galią. Šią galią generatorius pakeičia į elektros energiją. Elektros variklis yra sujungtas su galine pavara ir ją veikia naudodamas elektros energiją, gautą iš generatoriaus arba akumulatoriaus. Variklis reikalingą energiją gali gauti tiesiogiai iš generatoriaus, akumulatoriaus arba abiejų vienu metu. Kadangi IC variklis atskirtas nuo ratų, jo sukimosi greitis gali būti valdomas nepriklausomai nuo automobilio judėjimo greičio.

Ši technologija ne tik supaprastina IC variklio valdymą, bet, svarbiausia, suteikia galimybę dirbti mažiausią kuro sąnaudų režimu. Variklio atskyrimas nuo ratų suteikia papildomą galimybę keisti jo montavimo vietą. Priklausomai nuo automobilio veikimo sąlygų, varomosios jėgos komponentai, esant nuosekliai konfigūracijai, gali veikti skirtingomis kombinacijomis:

- Veikiant tik akumulatoriui: kai akumulatorius turi pakankamai energijos ir automobilio galios reikalavimai yra žemi, tada IC variklis išjungiamas kartu su generatoriumi, o automobiliui energiją tiekia tik akumulatorius.
- Kombinuota galia: esant aukšties galios reikalavimams, elektros varikliui energiją perduoda ir akumulatorius, ir generatorius (dirba IC variklis).
- Veikiant tik vidaus degimo varikliui: važiuojant greitkelio ir esant pakankamai dideliems galios reikalavimams, įjungiamas IC variklis kartu su generatoriumi, o akumulatorius nėra nei įkraunamas, nei iškraunamas.
- Galios paskirstymas: kai įjungtas IC variklis, o automobilio galios reikalavimai žemesni nei vidaus degimo variklio optimali galia, tada dalis variklio galios panaudojama akumulatoriui įkrauti.
- Regeneracinis stabdymas: elektros variklis veikia kaip generatorius, keičiantis automobilio kinetinę energiją į elektrinę ir įkrauna akumuliatorių.

A dalyje (žr. 1.2 pav.) pavaizduota lygiagreči konfigūracija, kurioje IC variklis ir elektrinis variklis gali kartu (vienu metu arba atskirai po vieną) lygiagrečiai perduoti galią ratams. Abu varikliai sujungti kartu įvairiais mechanizmais, pavyzdžiui: sankabomis, diržais, krumpliaračiais. Taip pat elektrinis variklis gali veikti kaip generatorius stabdymo metu. Lygiagrečiam hibridui reikia tik 2 varymo įrenginių (IC variklio ir elektrinio variklio), kurie gali veikti šiais režimais:

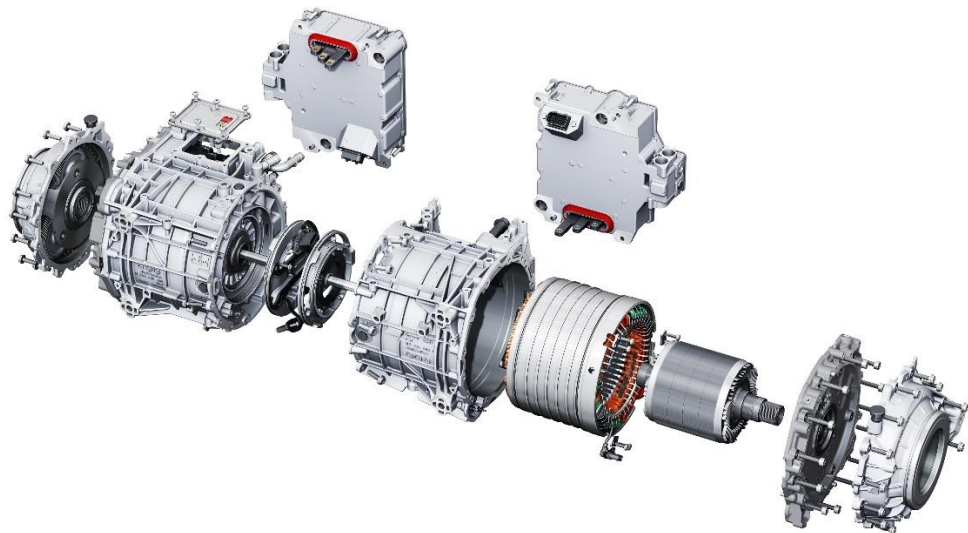
- veikiant tik akumulatoriui;
- kombinuota galia;
- veikiant tik vidaus degimo varikliui;
- esant galios paskirstymui;

- regeneraciniu stabdymu;
- stacionariu krovimo režimu, kai automobilis nejuda, bet vidaus degimo variklis sukasi, o elektrinis variklis, veikdamas kaip generatorius, krauna akumuliatorių.

C dalyje pavaizduota mišri konfigūracija, kuri sujungia nuoseklaus ir lygiagretaus hibrido savybes, be to, ši konfigūracija, jei to reikia, leidžia automobiliui veikti tik kaip nuosekliam arba lygiagrečiam hibridui. Mišri konfigūracija, lyginant su nuoseklia, turi papildomą mechaninę jungtį tarp vidaus degimo variklio ir pavaros, kuri leidžia tiesiogiai perduoti galią ratams. Lyginant su lygiagrečia konfigūracija, mišrioji turi papildomą elektrinį variklį, kuris veikia kaip generatorius. Dėl savo mišraus veikimo automobilio kuro panaudojimo efektyvumas ir važiavimo kokybė geriau optimizuojama esant skirtingoms sąlygoms. Didesnė automobilio sistemos valdymo laisvė išpopuliarino mišrios konfigūracijos hibridus, tačiau dėl didesnio komponentų skaičiaus ir sudėtingumo šie automobiliai yra brangesni [9, 10].

1.3. Elektros pavaros elementai

Elektrinę variklio pavarą sudaro elektros variklis, reduktoriai, elektroninis galios keitiklis ir su juo susijęs valdiklis (žr. 1.3 pav.). Elektroninis galios keitiklis yra pagamintas iš kietojo kūno įtaisų ir kontroliuoja didį energijos srautą nuo šaltinio iki variklio įvesties gnybtų. Valdiklį sudaro mikrovaldiklis ir su juo susijusi žemų signalų elektronika. Valdiklio funkcija – apdoroti informaciją ir generuoti perjungimo signalus energijos keitiklio puslaidininkių jungikliams.



1.3 pav. Audi e-tron S elektrinės pavaros sandara [11]

Automobiliuose su vidaus degimo varikliu 12 voltų pagalbinė baterija aprūpina energija visus papildomus įrenginius kaip šviesos, radijas, elektriniai langai ir t.t. Šią pagalbinę bateriją įkrauna generatorius, kuris yra sujungtas su automobilio varikliu. Elektromobilių įrenginių veikimo įtampa gali skirtis dėl trijų priežasčių: pirmoji – elektromobiliai dažnai neturi atskiro generatoriaus, kuris palaikytų papildomą baterijos įkrovą; antroji – naujesni ir galingesni įrenginiai gali veikti esant kitai įtampai, pvz.: 24 V, 48 V, 120 V ir t.t. (žr. 1.3 lentelę); trečioji – tobulėjant pažangiems traukos varikliams, tiek kintamosios srovės, tiek nuolatinės srovės varikliai gali dirbti tuo pačiu metu, o pagrindinė baterija tiekia tik nuolatinės srovės elektros energiją.

1.3 lentelė Automobilio elektrinės sistemos, veikiančios su 12 V arba 48 V nuolatine įtampa [12]

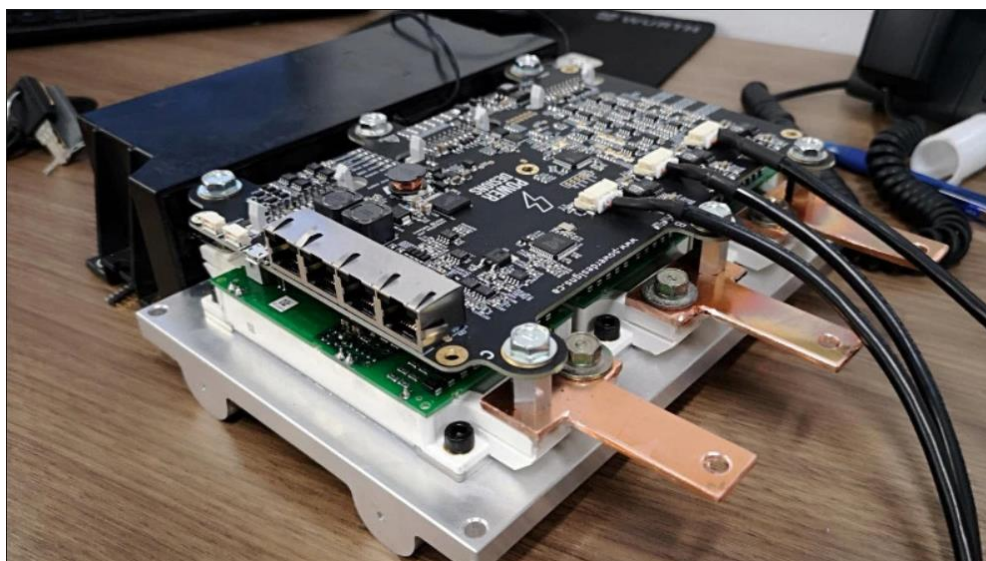
12 V sistemos	48 V sistemos
Keleivių saugumo sistema	Oro kondicionierius
Variklio valdiklis	Vandens siurblys
Vairuotojo pagalbinė sistema	Kuro siurblys
Transmisijos valdiklis	Aušinimo ventiliatorius
Stabdžių sistema	Elektrinis vairo stiprintuvas
Informacijos ir pramogų sistema	Elektrinis šildymas

Siekiant išvengti maitinimo problemų, akumuliatoriniai elektros varikliai naudoja galios elektroninius keitiklius, kad aprūpintų visas papildomas apkrovas automobilyje. Šie keitikliai kontroliuoja galios srautus tarp jos šaltinių, apkrovų ir galios tinklo. Pavyzdžiui, dvikryptis kintamosios/nuolatinės srovės keitiklis (AC/DC) gali valdyti elektros mašiną reaguodamas į valdymo signalą ir keisti jos darbo režimą į variklinį arba generatorinį. Naudojant elektrinę mašiną kaip variklį, kintamosios srovės/nuolatinės srovės keitiklis keičia nuolatinės srovės įtampą į kintančią trifazę įtampą. Kitaip tariant, pagrindinė galios elektroninių keitiklių funkcija yra efektyviai konvertuoti energijos šaltinio nuolatinę įtampą į skirtingus išėjimo įtampos lygius. Be to, jie paskirsto elektros energiją pagalbiniais prietaisais ir užtikrina tinkamą energijos valdymą tarp skirtingų energijos šaltinių ir akumuliatorių, o tai yra būtina funkcija. Įprastai galios elektroninius keitiklius sudaro nuolatinės srovės keitikliai ir nuolatinės / srovės keitikliai, dar vadinami inverteriais. Pagrindinės elektrinių transporto priemonių keitiklių specifikacijos yra: kompaktiškas dydis, lengvas svoris, patikimumas ir didelis efektyvumas.

DC/DC keitiklis tiekia reikalingą galią automobilio apkrovoms, veikiančioms skirtingais įtampų lygiais bei visiškai įkrauna papildomą akumuliatorių (jis veikia kaip srovės generatorius įprastame automobilyje su vidaus degimo varikliu). Elektriniame automobilyje DC/DC keitiklis taip pat gali funkcionuoti kaip energijos tiekiklis nuolatinės srovės variklio pavarai.

Šie automobiliai naudoja tiek vienkrypčius, tiek dvikrypčius nuolatinės srovės keitiklius. Vienkrypčiai nuolatinės srovės keitikliai tiekia energiją papildomoms automobilio apkrovoms, pavyzdžiui: jutikliams, pagalbinėms vairavimo valdymo sistemoms, elektra valdomiems langams, saugumo prietaisams, kur dvikrypčiai DC/DC keitikliai gali veikti kaip regeneracinis stabdymas, akumuliatoriaus įkrovimas ir atsarginė galia.

DC/AC keitiklis priima DC galią iš baterijos ir keičia į kintamąją srovę tam, kad aprūpintų energija aukštos įtampos elektros variklį (žr. 1.4 pav.). Kita vertus, nuolatinės / srovės lygintuvas gali veikti elektros variklyje, keičiant kintamąją srovę į nuolatinę regeneracinio stabdymo metu arba įkraunant bateriją papildomu varikliu [16, 17].



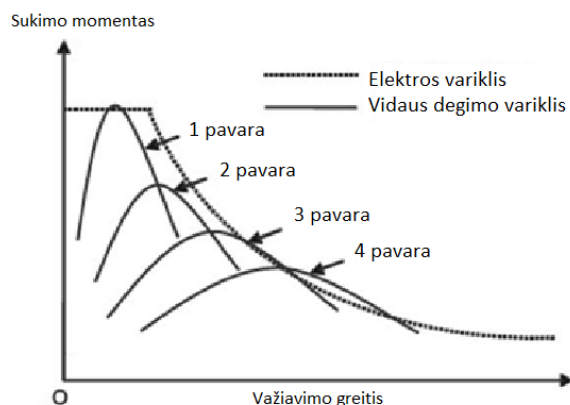
1.4 pav. 120 kW elektromobilio inverteris (300 A, 400 V) [18]

Galios keitiklio įtaisai variklio pavaros elektroninėje grandinėje veikia kaip įjungti ir išjungti elektroniniai jungikliai, paverčiantys fiksuotą maitinimo įtampą į kintamąją įtampą ir kintantį dažnį. Visi šie įrenginiai turi valdymo įvesties užtūrą (angl. *Gate*), per kuriuos prietaisai įjungiami ir išjungiami pagal valdiklio sugeneruotą komandą. Milžiniškas galingų puslaidininkių technologijos progresas, įvykęs per pastaruosius du dešimtmečius, leido sukurti kompaktiškus, efektyvius ir patikimus nuolatinės ir kintamosios srovės elektros variklių įtaisus. Elektrinėse ir hibridinėse transporto priemonėse dažniausiai naudojamas elektroninis raktas yra IGBT. Yra sukurta nemažai IGBT modelių, kurių įtampa ir srovės stipris bei jų perjungimo dažnis yra diapazone, kurio reikia elektrinei varomajai pavaros sistemai [19].

Pavaros valdiklis valdo ir apdoroja sistemos informaciją, kad galėtų valdyti elektrinės pavaros energijos srautą. Valdiklis, vykdydamas variklio valdymo algoritmą, veikia naudodamas vartotojo įvestą komandą.

Per pastaruosius dešimtmečius buvo sukurta daugybė variklio valdymo algoritmų, skirtų įvairių tipų elektrinėms mašinoms. Kai kurie iš šių valdymo algoritmų skirti didelio našumo pavaroms, kiti – mažiau reikloms reguliuojamo greičio pavaroms. Šie variklio pavaros valdymo algoritmai yra intensyviai skaičiuojami ir reikalauja greitesnių procesorių bei sąsajos su santykinai didesniu grįžtamojo ryšio signalų skaičiumi. Šiuolaikiniai valdikliai yra skaitmeniniai, o ne analoginiai. Tai padeda sumažinti deviaciją ir klaidas bei pagerina našumą, nes jie gali sudaryti sudėtingus algoritmus per trumpą laiką. Kitaip sakant, valdikliai yra įterptoji sistema, kurioje signalui apdoroti naudojami mikroprocesoriai ir skaitmeniniai signalo procesoriai kartu su periferiniais ir sąsajos elektroniniais moduliais. Sąsajos grandinės, susidedančios iš AC/DC ir DC/AC keitiklių, reikalingos ryšiui tarp procesoriaus ir kitų sistemos komponentų palaikyti. Skaitmeninė įvesties / išvesties grandinė įveda skaitmeninius įvesties signalus ir valdo užtūros puslaidininkių įtaisų signalus. Nors nuolatinės srovės mašinos yra sudėtingos konstrukcijos, nuolatinės srovės pavaros yra daug paprastesnės nei srovės pavaros. Srovės pavaros naudoja standartinę šešių elektroninių jungiklių inverterio topologiją ir PWM strategiją, kad mašinose būtų generuojamos sinusoidės ar trapecijos formos signalai [20].

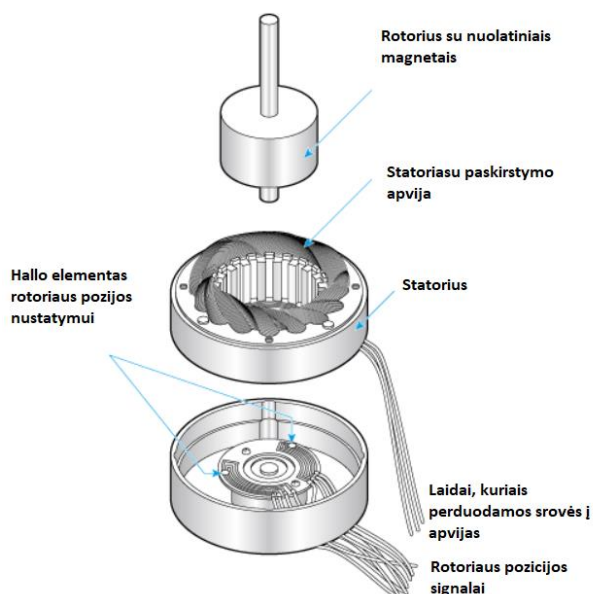
Vienas iš pagrindinių elektros pavarų privalumų lyginant su vidaus degimo varikliais yra didelis ir pastovus sukimo momentas mažų greičių diapazone (žr. 1.5 pav.). Dėl pastovaus sukiamo sukimo momento, elektros varikliui nereikia sudėtingos pavarų dėžės, užtenka vienos arba dviejų padėčių reduktoriaus, kuris elektros variklio sukimo momentą perduoda į varomuosius ratus [21].



1.5 pav. Elektros ir vidaus degimo variklių principinė sukimo momentų priklausomybė nuo greičio [22]

Elektrinio automobilio varikliui reikia didelio galios tankio, didelės trumpalaikės perkrovos išlaikymo, plataus nuolatinio greičio diapazono, didelio efektyvumo, patvarumo ir t.t. Iš visų reikalavimų svarbiausi yra didelis efektyvumas ir didelis galios tankis. Gebėjimas trumpą laiką išlaikyti didelį sukimo momentą reikalingas užvedant automobilį, važiuojant įkalne ar greitėjant. Maksimalus sukimo momentas dažniausiai yra du kartus didesnis už nominalų sukimo momentą ir variklis turi būti pagamintas taip, kad išlaikytų jį apie 20-40 sekundžių. Išlaikymo laiką apriboja apvijų temperatūra.

Asinchroniniai elektros varikliai, patvarūs ir efektyvūs, atitinka didžiąją dalį elektromobilių reikalavimų, tačiau jų efektyvumas mažesnis nei sinchroninių variklių su nuolatiniais magnetais (PMSM). Asinchroniniai varikliai plačiai pradėti naudoti *Tesla* elektromobiliuose, siekiant sumažinti Kinijos poveikį automobilių pramonei skirtiems elektros varikliams [23]. Dažniausiai elektromobiliuose naudojami varikliai su nuolatiniais magnetais ir yra skirstomi į elektronškai komutuojamus (BLDC) variklius (žr. 1.6 pav.) ir sinchroninius variklius su nuolatiniais magnetais (PMSM).



1.6 pav. BLDC variklio sandara [24]

Elektroniškai komutuojami varikliai yra sinchroninių variklių tipo, o tai reiškia, kad magnetinis laukas, generuojamas statoriaus, ir magnetinis laukas, generuojamas rotoriaus, sukasi vienodu dažniu. Šiame variklyje nėra praslydimo, kuris įprastai pasitaiko asinchroniniuose varikliuose. Kaip pavadinimas parodo, elektroniškai komutuojami varikliai neturi komutavimo šepetėlių. Ši savybė suteikia nemažai pranašumų prieš nuolatinės srovės šepetėlinius ir asinchroninius variklius, pavyzdžiui:

- geresnės greičio ir sukimo momento palyginimo charakteristikos;
- didelis dinaminis atsakas;
- didelis efektyvumas;
- ilgaamžis veikimas;
- betriukšmis veikimas;
- didesni greičio diapazonai.

Be to, didesnis sukimo momento perdavimas, esant mažesniai varikliui, puikiai tinka įrenginiuose, kuriuose svoris ir erdvė yra kritiniai faktoriai.

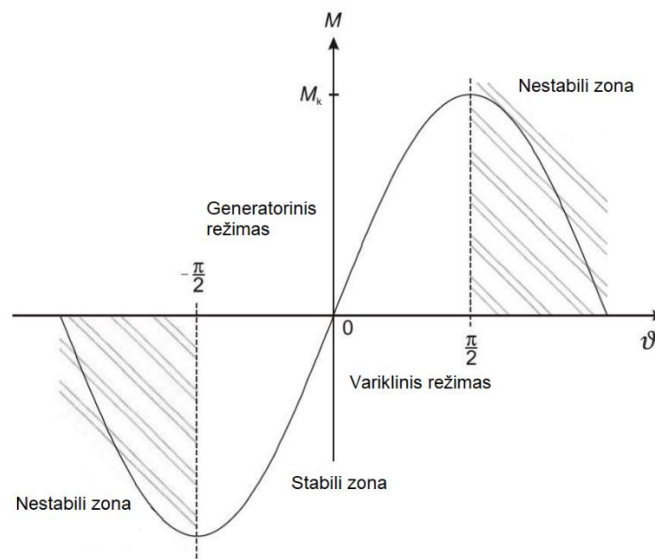
1.4. PMSM variklio veikimas ir darbo režimai

PMSM variklis savo sandara ir veikimo principu labai panašus į BLDC variklį. Jų rotoriai gali būti identiški, turintys nuolatinius magnetus, sąveikaujančius su statoriaus kuriamu magnetiniu lauku. Tačiau skiriasi šių variklių priešinės elektrovaros jėgos (angl. *back electromotive force*). BLDC varikliuose elektrovara yra trapecijos formos, nes statoriaus fazių apvijos suklotos vienodai, o PMSM – sinusoidės formos dėl sinusinių statoriaus apvijų [25]. Dėl mažesnio veikimo triukšmo ir sukimo momento šuolių, didesnio naudingumo koeficiento bei patikimumo ir maksimalaus sukimo momento elektromobilių pavarose dažniausiai naudojami PMSM varikliai.

1.4.1. Sinchroninio variklio su nuolatiniais magnetais veikimo principas

Trifazėms apvijoms statoriuje, panašioms į esančias asinchroniniuose varikliuose, tiekama arba trapecijos formos srovė, arba sinusoidinė srovė (sinchroninė kintamoji srovė). Šios srovės sukuria magnetinį lauką, kuris sukasi tokiu pat greičiu, kaip ir rotorius, arba sinchroniniu greičiu. Rotoriaus sukimosi greitis arba sinchroninis greitis gali būti reguliuojamas keičiant statoriaus srovės dažnį [26].

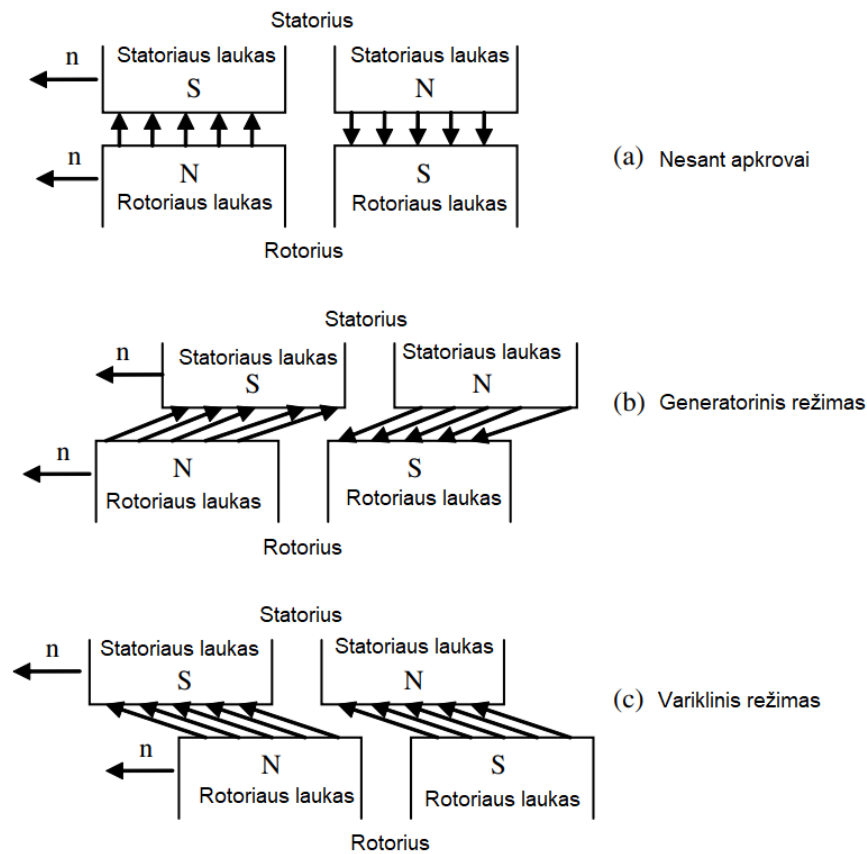
Apkrovos kampas apibūdina kampą tarp rotoriaus ir statoriaus magnetinių laukų. 1.7 paveiksle pavaizduota sinusinė sukimo momento priklausomybė nuo apkrovos kampo ϑ . Ši priklausomybė galioja tik tol, kol visos įtampos išlieka pastovios. Sinchroninio variklio maksimalaus sukimo momentą (amplitudė M_k) galima keisti reguliuojant sužadinimo srovę (kai yra sužadinimo apvija rotoriuje). Jei sužadinimo srovė pastovi, tuomet tik apkrovos sukimo momentas nulemia apkrovos kampą. Kai statoriaus ir rotoriaus magnetiniai laukai yra statmeni vienas kitam ($\vartheta = \pm 90^\circ$), tada PMSM variklis išvysto didžiausią sukimo momentą [27].



1.7 pav. PMM sukimo momento priklausomybė nuo apkrovos kampo

Statoriaus apvija sukuria besisukantį lauką, kuris pritraukia rotoriaus magnetus (žr. 1.8 pav.). Jei abu laukai išsilygina, trauka tarp dviejų magnetinių laukų eina radialine kryptimi, tačiau nesusidaro elektromagnetinis sukimo momentas. Kai statoriaus laukas veda rotoriaus lauką, statorius pritraukia rotoriaus magnetus – mechanizmas veikia kaip variklis (c dalis). Kitu atveju, kai statoriaus laukas atsilieka nuo rotoriaus lauko, mechanizmas tampa generatoriumi (a dalis) [26].

Realiam variklyje, dėl įvairių nuostolių ir trinčių, net pasiekus nominalų sukimosi greitį, išlieka nedidelis apkrovos sukimo momentas. Iš 1.7 paveikslo matyti, kad apkrovos kampui, esant didesniai nei $\pm 90^\circ$, variklis atsiduria nestabilioje veikimo zonoje ir artėja prie polių praslydimo. Tokiu atveju mechanizmas, jei dirba varikliniu režimu, sustoja, o generatoriniu režimu – viršija maksimalų rotoriaus sukimosi greitį [27].



1.8 pav. Sinchroninio variklio su nuolatiniais magnetais veikimo principas

1.4.2. PMSM variklio matematinis modelis

PMSM variklio su įterptaisiais magnetais įtampų lygtys rotoriaus sinchroninėje sistemoje pateiktos (1.1) ir (1.2). Šiose lygtyse neįvertinti magnetinio lauko įsisotinimo ir magnetinės histerezės rodikliai:

$$v_d = R_s i_d - \omega_e L_q i_q, \quad (1.1)$$

$$v_q = R_s i_q + \omega_e (L_d i_d + \lambda_m), \quad (1.2)$$

čia v_d (v_q), i_d (i_q), L_d (L_q) yra d-ašies (q-ašies) įtampa, srovė ir induktyvumas; λ_m yra fazės magnetinis srautas visoje apvijoje sužadintas nuolatinių magnetų; R_s – inkaro apvijos varža; ω_e yra variklio elektrinis kampinis dažnis. Žinant anksčiau paminėtas IPMSM variklio formules, galima suskaičiuoti sugeneruotą elektromagnetinį sukimo momentą:

$$T_e = 1.5P\lambda_m i_q + 1.5P(L_d - L_q)i_d i_q, \quad (1.3)$$

čia T_e yra generuojamas elektromagnetinis sukimo momentas; P – polių porų skaičius. Kaip parodyta (1.3) formulėje, elektromagnetinis sukimo momentas gali būti išskaidytas į dvi dedamąsias: pirmoji – magnetinis sukimo momentas, kurį sukelia rotoriaus nuolatinių magnetų magnetinis srautas, o antroji – magnetinės varžos sukimo momentas, sužadintas dėl variklio gnybtų induktyvumo priklausomybės (kitimo) nuo rotoriaus padėties. Pagal Niutono antrąjį dėsnį, judėjimo lygtis gali būti aprašyta taip:

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_m}{dt}. \quad (1.4)$$

čia T_L yra apkrovos sukimo momentas; J – rotoriaus inercija; ω_m rotoriaus mechaninis kampinis greitis, kuris lygus:

$$\omega_m = \frac{\omega_e}{P}. \quad (1.5)$$

Pavaros, naudojančios inverterius, turi srovės ir įtampos ribas. Maksimali fazinės įtampos amplitudė (maksimali trumpalaikė įtampa) pavarų inverteriuose žymima V_{SM} , o maksimali linijinės srovės amplitudė (maksimali trumpalaikė srovė) I_{SM} . Šios ribos išreiškiamos tokiomis formulėmis:

$$i_d^2 + i_q^2 \leq I_{SM}^2, \quad (1.6)$$

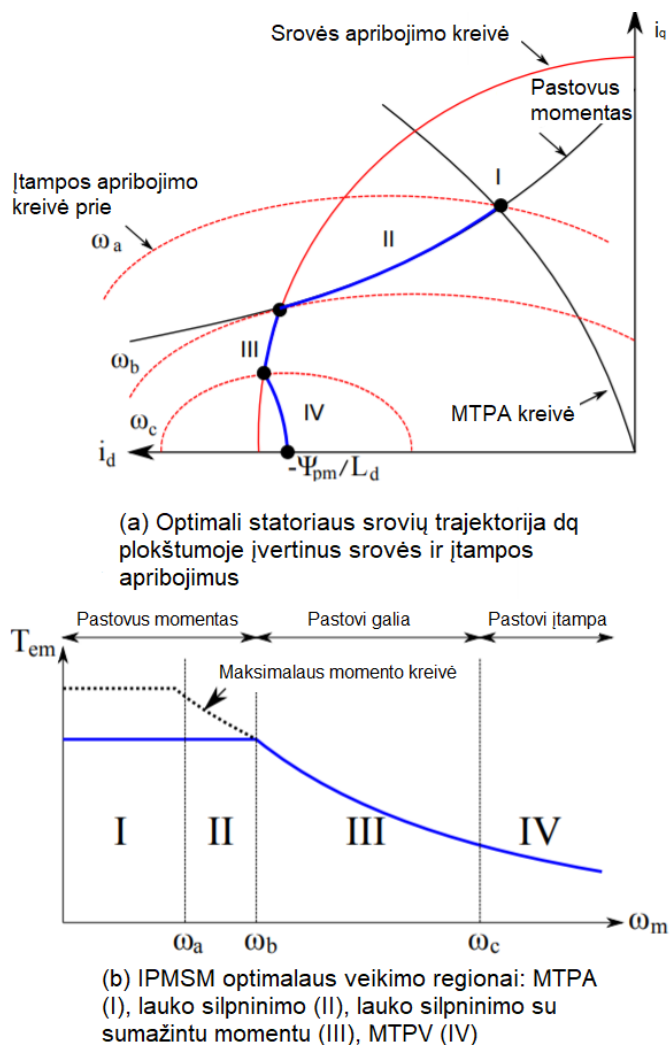
$$v_d^2 + v_q^2 \leq V_{SM}^2. \quad (1.7)$$

Pritaikius PWM erdvės vektorių inverteriui su trimis pilnais tilteliais, maksimali įtampą V_{SM} yra lygi $\frac{V_{dc}}{\sqrt{3}}$, o maksimali srovė I_{SM} nustatoma pagal vardinę inverterio srovę. V_{DC} yra inverterio įėjimo įtampa. Įstatę (1.1) ir (1.2) lygtis į (1.7) gauname įtampos ribos išraišką [28]:

$$(R_s i_d - \omega_e L_q i_q)^2 + (R_s i_q + \omega_e (L_d i_d + \lambda_m))^2 \leq V_{SM}^2. \quad (1.8)$$

1.4.3. PMSM variklio darbo režimai

Elektriniam automobiliui svarbus didesnis sukimo momentas esant mažam variklio sukimosi greičiui ir plataus reguliuojamo greičio diapazono. Įgyvendinus šias sąlygas, elektromobilis tampa dinamiškas, nesunkiai įveikiantis įkalnes, ir greitas. Tai galima pasiekti naudojant IPMSM variklius, kurie privalo veikti pastovaus sukimo momento režimu, esant mažam variklio sukimosi greičiui, ir magnetinio lauko slopinimo režimu didelių sukimosi greičių diapazone. IPMSM mašina turi būti valdoma taip, kad srovės vektorius dq plokštumoje tuo pačiu metu būtų srovės apribojimo perimetre ir įtampos apribojimo elipsėje. Pagal šiuos apribojimus ir atsižvelgiant į sukimo momentą, mažesnę už maksimalų, galima atskirti keturis IPMSM veikimo regionus (žr. 1.9 pav.).



1.9 pav. PMSM variklio optimalaus valdymo trajektorijos ir darbo režimai

I maksimalaus sukimo momento per amperą (MTPA) regionas:

MTPA kreivė yra statoriaus srovės dq atskaitos sistemoje, kuri užtikrina maksimalų sukimo momentą, tenkantį esančiam srovės moduliui (žr. 1.9 pav., I regioną). Šis regionas užtikrina mažiausius varžos nuostolius.

II magnetinį lauką slopinantis regionas be sukimo momento sumažėjimo:

Siekiant išplėsti IPMSM variklio sukimosi greičio diapazoną, naudojama i_d srovės slopinimo strategija. Šiame regione tai įgyvendinama nemažinant sukimo momento, nes i_q^* (nustatoma srovė) gali būti perskaičiuojama taip, kad išlaikytų nustatytą sukimo momentą (žr. 1.9 pav., II regioną). Variklio greičio diapazonas gali būti išplėstas iki tokio taško, kur susikerta srovės apribojimo ir sukimosi greičio ω_b kreivės.

III magnetinį lauką slopinantis regionas su sukimo momento sumažėjimu:

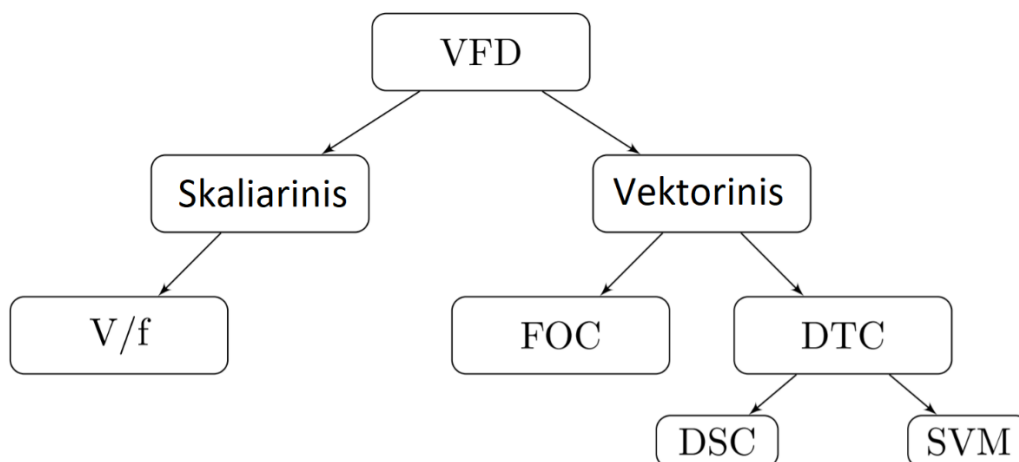
Pasiekus srovės apribojimo ir sukimosi greičio ω_b susikirtimo tašką, sukimo momentas mažinamas silpninant magnetinį lauką (siekiama didinti variklio sukimosi greitį). Norint išgauti maksimalų sukimo momentą šiame diapazone, srovės nustatyto taško vektorius turi būti išdėstytas įtampos ir srovės apribojimo kreivių sankirtoje.

IV giliai slopinamo magnetinio lauko regionas:

Šiame regione, dar vadinamame maksimaliu sukimo momentu vienam voltui (MTPV), maksimalus sukimo momentas gaunamas esant pastoviai statoriaus įtampos vertei (žr. 1.9 pav., IV regioną) [29,30].

1.5. Elektromobilio PMSM pavaros valdymo metodai

Siekiant, kad sinchroniniai varikliai galėtų keisti sukimosi greitį, jie turi būti valdomi dažnio keitikliu (angl. *Variable Frequency Drive*; toliau – VFD). Elektros variklio valdymo metodai, priklausomai nuo valdomų parametrų, skirstomi į dvi pagrindines kategorijas: skaliarinį ir vektorinį valdymą. Skaliarinis valdymas keičia tik parametrų amplitudes, o vektorinis valdymas – amplitudes ir kampus. Šie du metodai gali būti išskaidyti į konkretesnius metodus, priklausomai nuo jų funkcionalumo. Detalesnis valdymo metodų išskaidymas pateiktas 1.10 paveiksle.



1.10 pav. Sinchroninio variklio valdymo metodai

1.5.1. Skaliarinis valdymas

Paprasčiausias būdas valdyti PMSM variklį yra skaliariniu metodu, kai įtampos arba srovės ir dažnio santykis išlaikomas pastovus visame variklio sukimosi greičių diapazone. Dažnis parenkamas pagal norimą sinchroninį greitį, o įtampos ar srovės amplitudė perskaiciuojama, kad išlaikytų pastovų santykį. Šiam valdymo metodui nereikia variklio parametrų ar pozicijos grįžtamojo ryšio signalų. Toks valdymo būdas yra lengvai pritaikomas įvairioms sistemoms, nereikalauja didelių skaičiavimo resursų ir sąlyginai nesudėtingas, tačiau jo paprastumas turi keletą minusų. Vienas iš jų – pavaros sistemos nestabilumas viršijus nustatytą dažnį. Siekiant to išvengti, PMSM variklio rotorius privalo turėti slopinimo apviją, kuri užtikrintų jo sinchronizaciją, o tai smarkiai riboja skirtingų rotoriaus konstrukcijų pasirinkimą. Dauguma šio tipo variklių slopinimo apvijos rotoriuje neturi, todėl nėra tinkami skaliariniam valdymui. Kitas šio valdymo minusas – nenaudodama grįžtamojo ryšio signalų, sistema turi prastą dinaminį atsaką į aplinkos pokyčius, todėl toks valdymas sunkiai pritaikomas ventiliatoriams, siurbliams ir automobilių traukos pavaroms. [31].

1.5.2. Į magnetinį lauką orientuotas valdymas FOC

Į magnetinį lauką orientuoto valdymo (angl. *Field Oriented Control*; toliau – FOC) metodo tikslas yra valdyti tiesioginės ir kvadrantinės ašių srovės, siekiant sugeneruoti norimą variklio sukimo momentą. Nepriklausomai valdant i_d ir i_q srovės, galima pasiekti maksimalaus sukimo momento per amperą (MTPA) santykį ir minimizuoti srovės dydį, reikalingą konkrečiam sukimo momentui bei padidinti variklio efektyvumą.

Neryškiapolių PMSM variklių valdymas yra paprastesnis. Tokių variklių induktyvumai L_d ir L_q yra lygūs, todėl nesukuria magnetinės varžos sukimo momento. Šiuo atveju i_d srovė neturi poveikio variklio sukimo momento kūrimui ir turi būti visą laiką lygi 0, kad variklis dirbtų MTPA režimu. Sukimo momento kreivė yra tiesinė dq plokštumoje, o MTPA kreivės trajektorija yra išilgai kvadrantinės ašies.

Ryškiapolių variklių, kurių induktyvumai L_d ir L_q nėra lygūs, valdymas sudėtingesnis, nes variklis kuria abu (elektromechaninį ir magnetinės varžos) sukimo momentus. Todėl sukimo momento funkcija dq plokštumoje nebėra tiesinė.

Vienas iš svarbiausių FOC metodo parametrų yra tikslios rotoriaus padėties informacijos poreikis. Rotoriaus pozicijos stebėjimui dažniausiai naudojamas netiesioginis FOC (angl. *indirect FOC*) metodas, kai prie variklio veleno prijungtas mechaninis jutiklis. Kitas būdas – tiesioginis FOC (angl. *direct FOC*) metodas [32].

Tiesioginis FOC metodas dar vadinamas be jutiklio metodu (angl. *sensorless*, kurio metu rotoriaus padėtis vertinama pagal magnetinio srauto arba priešinės elektrovaros jėgos vektorius. Šis metodo pagrindinis privalumas – galimybė sutaupyti enkoderio ar kito padėties jutiklio išlaidas. Be jutiklių algoritmai yra mažiau patikimi, kai naudojama fazinė įtampa arba išmatuota srovė yra netiksli, pavyzdžiui, veikiant mažu greičiu diapazone [33, 34].

1.5.3. Tiesioginis sukimo momento valdymas DTC

Skirtingai nei FOC metodui, tiesioginio sukimo momento valdymo metodui (angl. *Direct Torque Control*; toliau – DTC) nereikia išorinių jutiklių rotoriaus padėčiai stebėti. Vis dėl to, siekiant užtikrinti teisingą PMSM variklio sukimosi kryptį, prieš pradedant darbą, būtina žinoti rotoriaus poziciją. DTC metodas paprastesnis dėl šių priežasčių: nereikalingas srovės reguliatorius, nereikia atlikti transformacijų į besisukančią atskaitos plokštumą ir nereikia PWM generatoriaus.

Tačiau dėl supaprastinimų, sistemoje atsiranda trūkumų: sunku valdyti sukimo momentą, esant mažiems variklio greičiams, didesnės srovės ir sukimo momento pulsacijos, dideli triukšmų lygiai, esant mažiems variklio greičiams, ir prastas tiesioginės srovės valdymas.

DTC veikimo principą sudaro įtampos vektoriaus parinkimas pagal paklaidas tarp nustatytų ir tikrų sukimo momento bei magnetinio srauto verčių. Šis metodas taip pat naudoja preliminarų rotoriaus pozicijos nustatymą pagal 1 elektrinio apsisukimo padalinimą į 6 sektorius ir magnetinio srauto kampą [35].

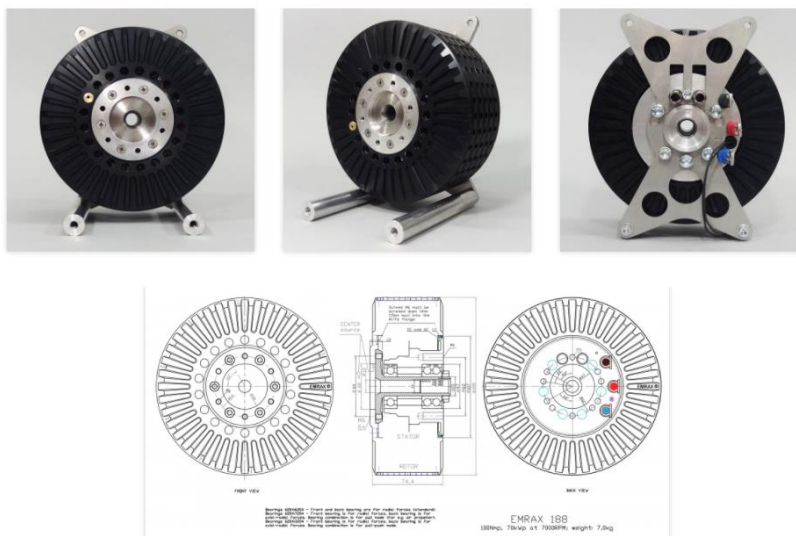
Tiesioginis sukimo momento valdymas su erdvės vektoriaus moduliacija (angl. *Space Vector Modulation*; toliau – SVM) iš dalies panaikina DTC valdymo trūkumus. Erdvės vektoriaus moduliacija įtampos generavimui pasitelkia PWM metodą. Praktikoje naudojami keli SVM elektros grandinių variantai, kurie ženkliai pagerina DTC sistemos efektyvumą, sumažina variklio sukimo momento ir magnetinio srauto pulsacijas. PMSM variklio valdymas ir veikimas mažų greičių diapazone tampa sklandesnis bei stabilesnis. Tačiau, esant didelei dinamikai, DTC su SVM valdymo metodo tikslumas neprilygsta FOC valdymui [36].

2. Metodinė dalis

2.1. Elektromobilio pavaros valdymo sistemos modelis

Prieš pradedant sudarinėti elektromobilio pavaros valdymo sistemos modelį, pirmiausia reikia pasirinkti elektros variklį ir nustatyti jo parametrus. Tyrimui pasirinktas „EMRAX 188“ 52 kW (maksimalios) galios PMSM variklis, išvystantis iki 90 Nm ribinį sukimo momentą (žr. 2.1 pav.). Gamintojas EMRAX pasirinktas dėl vardo patikimumo ir pavarų pritaikymo elektromobiliuose, o variklio modelis pasirinktas kaip pavyzdys.

EMRAX 188

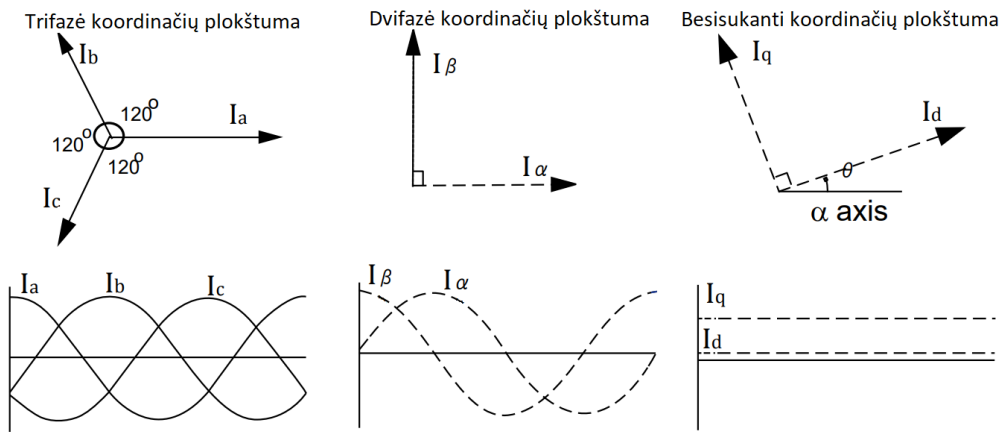


2.1 pav. Modelyje naudojamas EMRAX 188 PMSM variklis [37]

Pagrindiniai pasirinkto variklio parametrai, naudojami modelyje, pateikti 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė PMSM variklio parametrai, naudojami modelyje

Naudojamas dydis	Žymėjimas	Vertė	Matavimo vienetai
Statoriaus apvijos varža	R_s	0,005	Ω
Induktyvumas L_d	L_d	0,00004	H
Induktyvumas L_q	L_q	0,000044	H
Rotoriaus magnetinio srauto konstanta	ψ	0,025	V/rad/s
Inercijos momentas	J	0,0134	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
Trinties koeficientas	B	0,00039	Nm/rad/s
Polių skaičius	P	10	-



2.3 pav. Skirtingos PMSM variklio kintamųjų koordinacių plokštumos

Šiame tyrime su PMSM varikliu naudojamas į magnetinį lauką orientuotas FOC valdymo metodas, o jo supaprastinimui ir valdymo skaičiavimams paspartinti atliekamos tiesioginės bei atvirkštinės Clarke'o ir Park'o transformacijos. Clarke'o transformacija skirta trifazę sistemą nejudančioje koordinacių plokštumoje pakeisti į ekvivalentę dvifazę (stačiakampę) nejudančiąją koordinacių sistemą, orientuotą pagal statoriaus apvijos a fazės ašį. Park'o transformacija skirta naujai gautą koordinacių sistemą pakeisti į sinchroniniu (rotoriaus magnetinio srauto) greičiu besisukančią koordinacių sistemą [40].

Clarke'o transformacijos būdu apskaičiuotos statoriaus srovės dedamosios i_α , ir i_β yra nejudančioje, susietoje su statoriumi, koordinacių sistemoje. Pastaroji sistema netinka vektoriniam valdymui, nes srovės vektoriaus dedamosios priklauso nuo laiko ir greičio. Todėl galima transformuoti šias nejudančios koordinacių sistemos dedamąsias į besisukančią koordinacių sistemą, susietą su rotoriaus magnetinio srauto sukimosi greičiu. Šioje sistemoje gautos srovės dedamosios i_q , ir i_d nepriklauso nuo laiko ar rotoriaus greičio. Sutapatinę koordinacių sistemos d ašį su rotoriaus kuriu srautu, gauname Park'o transformacijos vektorinę diagramą [39].

Tiesioginės Clarke'o transformacijos lygtys:

$$i_\alpha = i_a, \quad (2.1)$$

$$i_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_a + 2i_b), \quad (2.2)$$

čia: i_α – statoriaus srovės projekcija į α ašį; i_β – statoriaus srovės projekcija į β ašį.

Atvirkštinės Clarke'o transformacijos lygtys:

$$i_a = i_\alpha, \quad (2.3)$$

$$i_b = \frac{-i_\alpha + \sqrt{3} \cdot i_\beta}{2}, \quad (2.4)$$

$$i_c = \frac{-i_\alpha - \sqrt{3} \cdot i_\beta}{2}. \quad (2.5)$$

Tiesioginės Park'o transformacijos lygtys:

$$i_d = i_\alpha \cdot \cos(\theta) + i_\beta \cdot \sin(\theta), \quad (2.6)$$

$$i_q = i_\beta \cdot \cos(\theta) - i_\alpha \cdot \sin(\theta). \quad (2.7)$$

čia: i_d – statoriaus srovės projekcija į d ašį; i_q – statoriaus srovės projekcija į q ašį.

Atvirkštinės Park'o transformacijos lygtys:

$$i_\alpha = i_d \cdot \cos(\theta) - i_q \cdot \sin(\theta), \quad (2.8)$$

$$i_\beta = i_q \cdot \cos(\theta) + i_d \cdot \sin(\theta). \quad (2.9)$$

2.3. Srovių PI ir greičio PID reguliatoriai

Vidiniai srovių kontūrai (i_q ir i_d) yra daug greitesni nei greičio kontūras sistemos modelyje, todėl pirmiau reikia suderinti srovių PI reguliatorius. Pastarųjų reguliatorių išėjimai yra V_d ir V_q . PMSM variklio d ir q srovių kontūrų perdavimo funkcijos gali būti užrašytos taip:

$$P_d(s) = \frac{1}{s \cdot L_d + R_s} = \frac{1}{R_s(s \cdot T_{sd} + 1)}, \quad (2.9)$$

$$P_q(s) = \frac{1}{s \cdot L_q + R_s} = \frac{1}{R_s(s \cdot T_{sq} + 1)}. \quad (2.10)$$

čia: $T_{sd} = L_d/R_s$ – d elektrinė konstanta; $T_{sq} = L_q/R_s$ – q elektrinė konstanta.

Srovės i_q PI reguliatoriaus perdavimo funkcijos išraiška:

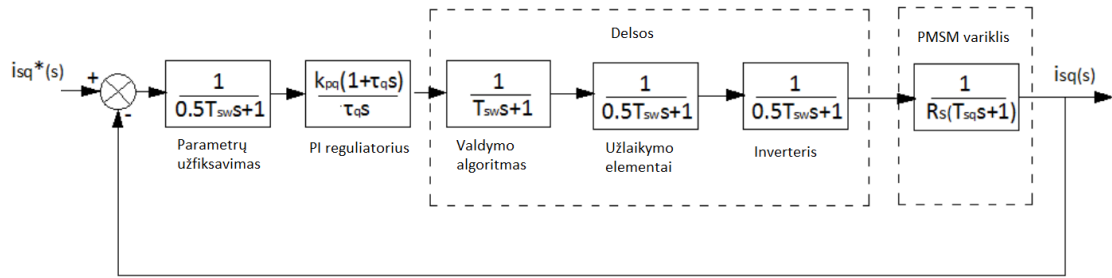
$$PI_q(s) = k_{pq} \frac{1 + \tau_q \cdot s}{\tau_q \cdot s}. \quad (2.11)$$

čia: k_{pq} – reguliatoriaus stiprinimo koeficientas; τ_q – reguliatoriaus integralinė laiko pastovioji.

Vertinant srovių kontūrus realioje sistemoje, reikia atsižvelgti į dėl diskretinių sistemų atsirandančias papildomas delsas. Tokios delsos realioje sistemoje būna:

- delsa dėl skaitmeninio skaičiavimo (valdymo algoritmo); šią delsą galima aprašyti pirmos eilės perdavimo funkcija, turinčia laiko konstantą $T_{sw} = 1/f_{sw} = 0,125$ ms (realiame PMSM variklio valdiklyje f_{sw} tranzistorių perjungimo dažnis būna apie 8 kHz);
- delsa dėl parametrų verčių užlaikymo elementų; šią delsą galima aprašyti pirmos eilės perdavimo funkcija, turinčia laiko konstantą $0,5T_{sw} = 0,0625$ ms;
- delsa dėl moduliacijos technikos ir inverterio; šią delsą galima aprašyti pirmos eilės perdavimo funkcija, turinčia laiko konstantą $0,5T_{sw} = 0,0625$ ms.

Įvertinus delsų ir PI regulatoriaus perdavimo funkcijas, i_q srovės kontūrą su vienetiniu grįžtamuju ryšiu galima išreikšti taip:



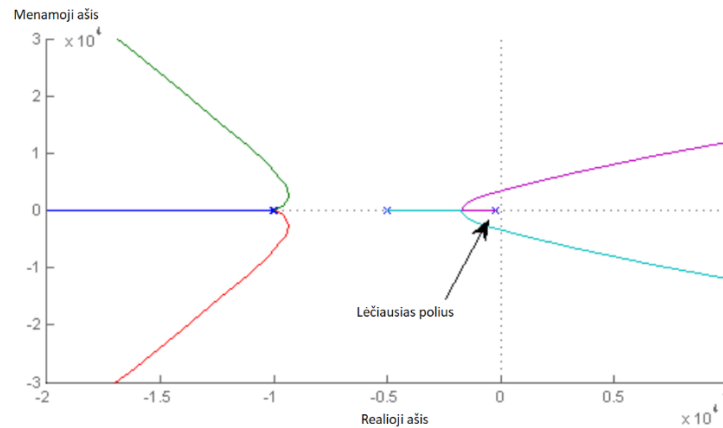
2.4 pav. i_q srovės kontūras su vienetiniu grįžtamuju ryšiu

i_q srovės kontūro atviros sistemos perdavimo funkcija išreiškiama:

$$G_{atv.q}(s) = k_{pq} \frac{1+\tau_q \cdot s}{\tau_q \cdot s} \cdot \frac{1}{0,5T_{sw}+1} \cdot \frac{1}{T_{sw}+1} \cdot \frac{1}{0,5T_{sw}+1} \cdot \frac{1}{0,5T_{sw}+1} \cdot \frac{1}{R_s(s \cdot T_{sq}+1)}. \quad (2.12)$$

Šios perdavimo funkcijos šaknų hodografas pateiktas 2.5 paveiksle. PMSM variklio perdavimo funkcijos polių yra lėčiausias, todėl PI regulatoriaus perdavimo funkcijos nulis atitinkamai nustatomas šiam poliui panaikinti. Tai įvertinę gauname:

$$\tau_q = \frac{L_q}{R_s} = T_{sq} = 0,0088. \quad (2.13)$$



2.5 pav. q srovės atviros sistemos perdavimo funkcijos šaknų hodografas [41]

Norint surasti PI regulatoriaus stiprinimo koeficientą, visos delsos pirmos eilės perdavimo funkcijos perrašomos į vieną bendrą perdavimo funkciją, kurios laiko konstanta yra:

$$T_{si} = 3 \cdot 0,5T_{sw} + T_{sw} = 0,3125 \text{ ms}. \quad (2.14)$$

Įvertinus PMSM variklio poliaus panaikinimą ir delsos perdavimo funkcijų supaprastinimą, q srovės atviros sistemos perdavimo funkciją galima perrašyti:

$$G_{atv.q}(s) = \frac{k_{pq}}{\tau_q \cdot s} \cdot \frac{1}{R_s(s \cdot T_{si} + 1)}. \quad (2.15)$$

Optimalaus modulio projektavimo kriterijus naudojamas siekiant suskaičiuoti PI reguliatoriaus stiprinimo koeficientą. Pagal šį kriterijų antro laipsnio atviros sistemos perdavimo funkciją galima užrašyti taip [42]:

$$G = \frac{1}{2\varepsilon s(1+\varepsilon s)}. \quad (2.16)$$

Palyginus 2.15 ir 2.16 lygtis, galima PI reguliatoriaus stiprinimo koeficientą apskaičiuoti taip:

$$k_{pq} = R_s \cdot \frac{\tau_q}{2T_{si}} = 0,07. \quad (2.17)$$

PI reguliatoriaus perdavimo funkcijos išraiška yra:

$$PI_q(s) = \frac{0,07(1+0,0088 \cdot s)}{0,0088 \cdot s} = 0,07 + \frac{8}{s}. \quad (2.18)$$

Gautas vertes reikia įrašyti „Simulink“ pakete į PI reguliatoriaus bloką. Toliau analogiškai apskaičiuojami i_d srovės PI reguliatoriaus parametrai [43]. Kai kurios šiuolaikinės sistemos, vietoj tradicinių PI reguliatorių, naudoja neraiškiuosius PI reguliatorius ir tokiu būdu pagreitinamas sistemos reakcijos laikas. Mokslinių tyrimų rezultatai parodė, kad neraiškusis PI modelis gali greitai ir tiksliai sekti rotoriaus sukimosi greitį bei posūkio kampą.

Varikliui pradėdant veikti, neraiškusis PI reguliatorius turi nedidelį perreguliavimą, lyginant su tradiciniu PI reguliatoriumi, mažas sukimo momento pulsacijas, gerą atsparumą trikdžiams, aukštą valdymo tikslumą bei dinamišką veikimą. Taip pat neraiškųjį PI modelį nesunku įterpti į esamas realias sistemas [44, 45].

Greičio PID reguliatoriaus parametrai nėra labai svarbūs, nes greičio įėjimo signalas būna iš anksto perskaičiuotas jo valdymo modelyje. Svarbu, kad reguliatorius pakankamai greitai reaguotų į signalų pasikeitimus ir turėtų pakankamą stiprinimo koeficientą. Šio reguliatoriaus parametrai nustatyti pasitelkus automatinį PID derinimą ir atlikus keletą bandymų.

2.4. Elektromobilio išilginė dinamika

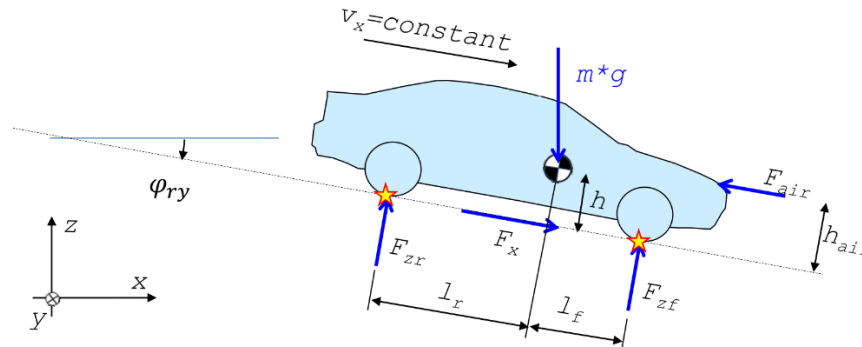
Norint patikrinti elektromobilio pavarą ir jos veikimą, būtina įvertinti automobilį veikiančias apkrovos jėgas. Šiame tyrime įvertintos šios apkrovos jėgos ir šie parametrai (žr. 2.6 pav.): oro srauto pasipriešinimo jėga F_D ; riedėjimo varžos koeficientas f ; įkalnės varža F_C ; normalinė jėga, veikianti priekinę varomąją ašį F_{zf} .

Oro srauto pasipriešinimo jėga, veikianti automobilį, išreiškiama tokia formule:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_d A (v + v_{oro})^2. \quad (2.19)$$

čia: ρ – oro tankis; C_d – oro pasipriešinimo koeficientas; A – automobilio priekio skerspjūvio plotas; v – automobilio judėjimo greitis; v_{oro} – vėjo greitis.

Oro srauto pasipriešinimo jėga tiesiogiai proporcinga automobilio skerspjūvio plotui, todėl automobilius stengiamasi daryti žemesnius ir aptakių formų. Taip pat ši jėga didėja arba mažėja priklausomai nuo automobilio judėjimo ir pučiančio vėjo kryptį. Važiuojant pavėjui, pasipriešinimo jėga mažesnė, o prieš vėją – priešingai. Oro tankis gali gana stipriai pasikeisti nuo atmosferos slėgio ir temperatūros. Pavyzdžiui, esant -40°C ir standartiniam atmosferos slėgiui, oro tankis sumažėja iki $1,127 \text{ kg/m}^3$, o esant $+40^\circ\text{C}$ – padidėja iki $1,514 \text{ kg/m}^3$. Oro pasipriešinimo koeficientas priklauso nuo automobilio formos ir išsikišusių dalių, tokių kaip veidrodėliai ar antena [46].



2.6 pav. Automobilį veikiančios jėgos [47]

Riedėjimo varžos koeficientas f realioje sistemoje nėra pastovus dydis ir priklauso nuo ratų sukimosi greičio, oro slėgio padangose ir šoninio slydimo kampo. Taip pat priklauso ir nuo aplinkos veiksnių, tokių kaip temperatūra, mašinos apkrova, išibėgėjimo ir stabdymo jėgos bei kelio dangos būklė. Visus šiuos parametrus sistemoje būtų sudėtinga įvertinti, todėl pirminiams bandymams galima panaudoti riedėjimo varžos koeficientus, apskaičiuotus pagal kelio dangą, pavyzdžiui, ant asfalto – 0,015, ant puraus sniego – 0,037, ant žvyrkelio – 0,02, ant suploto smėlio – 0,06 [48].

Pagal 2.6 paveikslą galime sudaryti formulę, kuri aprašo priekinės ašies apkrovą F_{zf} :

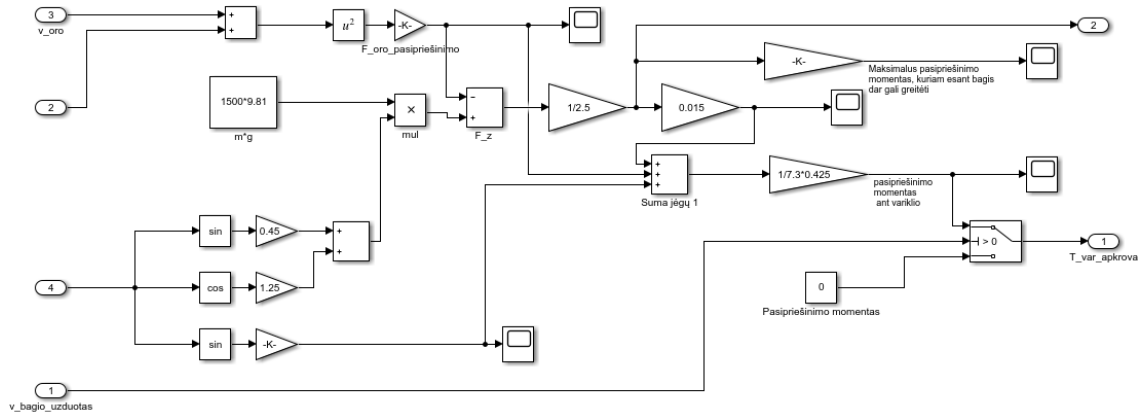
$$F_{zf} = m g \cdot \frac{l_r \cos(\varphi_{ry}) + h \sin(\varphi_{ry})}{l_r + l_f} - F_{air} \cdot \frac{h_{air}}{l_r + l_f}. \quad (2.20)$$

čia: m – automobilio masė; g – laisvojo kritimo pagreitis; l_r – atstumas nuo masės centro iki galinės ašies; l_f – atstumas nuo masės centro iki priekinės ašies; h – aukštis nuo žemės iki masės centro; φ_{ry} – kelio nuolydžio kampas; F_{air} – oro srauto pasipriešinimo jėga F_D [47].

Įkalnės varža F_C aprašoma tokia formule:

$$F_C = mg \cdot \sin(\varphi_{ry}). \quad (2.21)$$

Įvertinus ir apskaičiavus visus reikiamus apkrovos parametrus bei jėgas, gautas vertes reikia įrašyti į „Simulink“ pakete sudarytą dinamikos modelį (žr. 2.7 pav.).



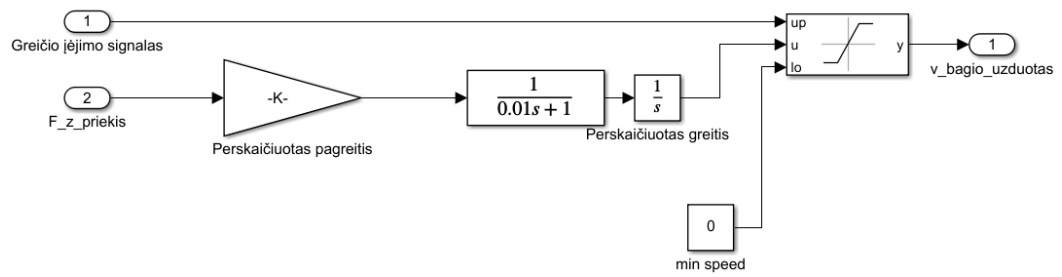
2.7 pav. Elektromobilio išilginės dinamikos modelis

2.5. Greičio įėjimo signalo valdymas

Elektromobilio pavara gali išvystyti sąlyginai didelį sukimo momentą, vos pradėjusi sukis. Didelis sukimo momentas įsibėgėjant gali lemti ratų praslydimą ir automobilio stabilumo praradimą. Siekiant išvengti nestabilumo, galima apriboti maksimalų variklio sukimo momentą, esant skirtingoms darbo sąlygoms, arba apriboti greičio įėjimo signalą. Būtent šis sprendimas naudojamas tyrime. „Simulink“ pakete į PMSM variklio valdymo sistemos modelį įterptas greičio kitimo valdymo modelis (žr. 2.8 pav.). Pastarasis modelis perskaičiuoja šuolinę funkciją, kuri naudojama kaip greičio įėjimo signalas, įvertinus rato sukibimo su keliu dangą koeficientą ir rato slydimo koeficientą.

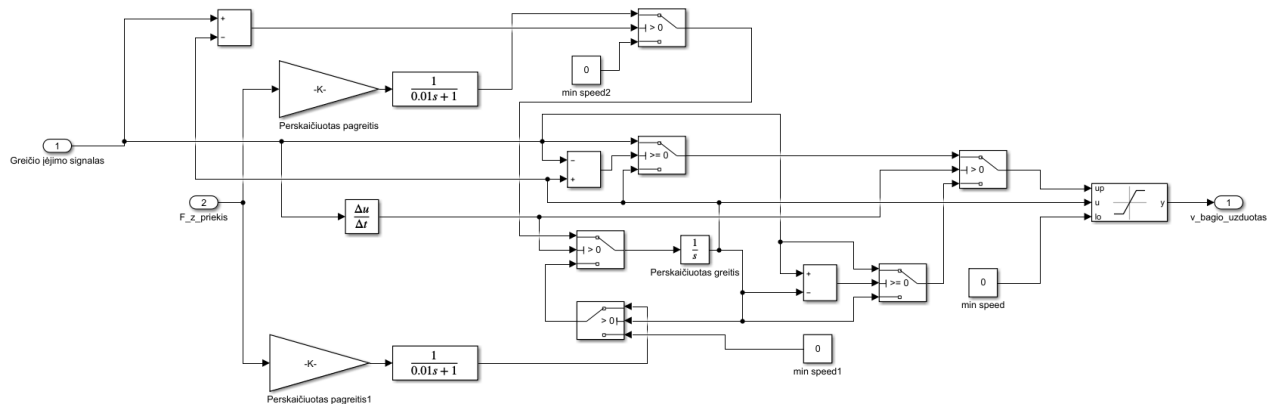
Tyrime naudojami kelių tipų įėjimo signalai: šuolinė funkcija, kuri iš karto skiria varikliui maksimalų sukimosi greitį, ir važiavimo ciklai. Pagrindinis darbe naudojamas ciklas – 2017 metų rugsėjo 1 dieną įsigaliojusi naujoji pasaulinė darnioji mažos galios transporto priemonių bandymų procedūra (WLTP), kuri laipsniškai pakeis naująjį Europos važiavimo ciklo (NEDS) protokolą.

Naujuoju WLTP protokolu siekiama vartotojams suteikti realesnius duomenis, tiksliau nusakančius kasdienį transporto priemonės naudojimą. Naująją WLTP procedūrą apibūdina dinamiškesnės važiavimo charakteristikos ir didesni pagreičiai. Maksimalus greitis padidintas iki 131,3 km/h, vidutinis greitis – 46,5 km/h, suminė ciklo trukmė yra 30 minučių. Padidintas nuvažiuojamas atstumas iki 23 kilometrų. Priklausomai nuo maksimalaus greičio, WLTP bandymą sudaro keturios dalys: mažo greičio (iki 56,5 km/h), vidutinio greičio (iki 76,6 km/h), didelio greičio (iki 97,4 km/h) ir itin didelio greičio (iki 131,3 km/h). Šiomis ciklo dalimis imituojamas važiavimas mieste ir priemiestyje bei užmiesčio keliais ir greitkeliais [49].



2.8 pav. Greičio kitimo valdymo modelis šuolinei greičio įėjimo signalo funkcijai

Bandymų metu kaip įėjimo signalą naudojant WLTP važiavimo ciklus, greičio kitimo valdymo modelis patobulinamas įvertinus ne tik įėjimo signalo didėjimą, bet ir kritimą (žr. 2.9 pav.).

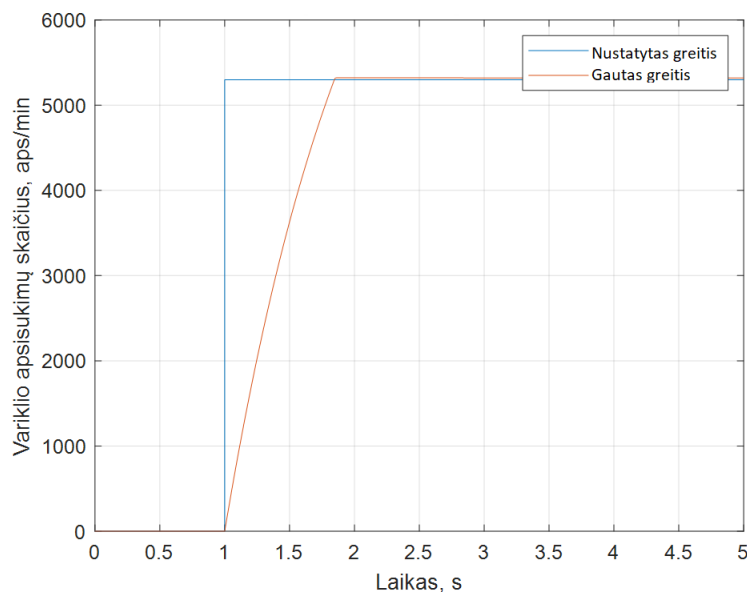


2.9 pav. Greičio kitimo valdymo modelis WLTP važiavimo ciklo funkcijai

3. Tiriamoji dalis

3.1. Elektromobilio pavaros modelio veikimas be išorinės apkrovos

Daugiausia įtakos elektromobilio (bagio) pavarai valdyti turi greičio ir srovių reguliatoriai, kurie realioje sistemoje būna įterpti ir sukonfigūruoti elektros variklio inverteryje. Sudarytame modelyje pats inverteris neatvaizduotas, o išskirta tik jo įvesties ir išvesties parametrų perskaičiavimo sistema. Suregulius greičio ir srovės valdiklius, reikia patikrinti, kaip modelis reaguoja į skirtingas nustatomo greičio funkcijas (žr. 3.1 ir 3.2 pav.). Šio bandymo metu nebuvo įvertintos išorinės pavarą veikiančios jėgos.



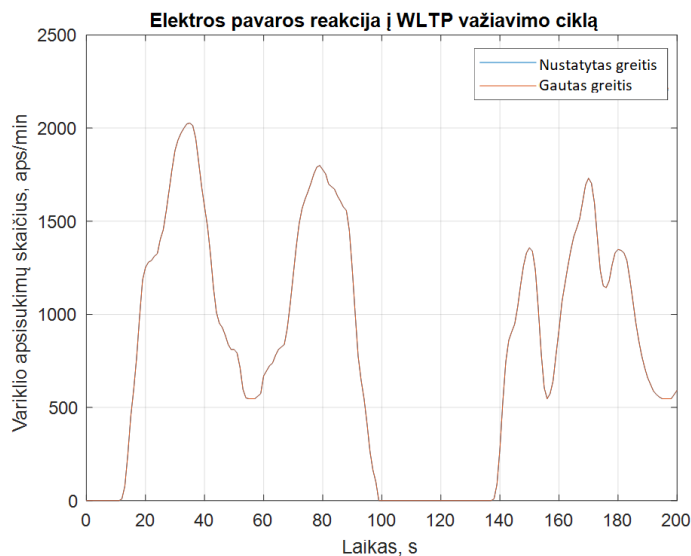
3.1 pav. Elektromobilio pavaros modelio be išorinės apkrovos reakcija į šuolinę funkciją

Iš 3.1 paveiksle pateikto grafiko matyti, kad sistemos atsako į šuolinę funkciją charakteristikos yra tokios:

- kilimo laikas $t = 0,5$ s;
- nusistovėjimo laikas $t = 0,85$ s;
- maksimalus perreguliavimas $M_p = 0,4$ %.

PMSM 52 kW variklis, neveikiamas išorinių apkrovų momentų, galėtų kur kas greičiau iš stacionarios padėties pasiekti maksimalų sukimosi greitį. Tačiau greičio ir srovių reguliatorių parametrai ir apribojimai įvertinti numačius įvairius elektromobilio važiavimo ciklus. Nustačius valdiklių parametrus be išorinių apkrovų, juos reikėtų iš naujo perskaičiuoti sistemos darbo režimuose, kai apkrovos momentas yra artimas maksimaliam variklio sukimo momentui. Be to, nusistovėjimo ir kilimo laikai yra pakankamai geri, nes elektromobilis dėl sukibimo su kelio danga fiziškai negalėtų taip greitai pasiekti maksimalų (116 km/h) greitį, o tai reiškia, kad modelis pakankamai sparčiai ir patikimai reaguoja į greičio įėjimo signalą.

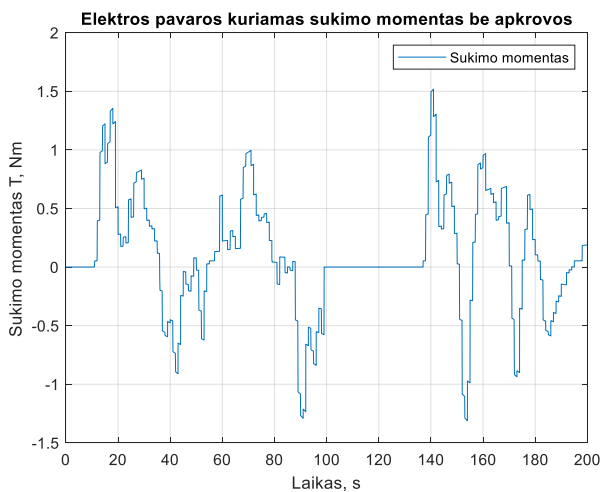
Nustačius sistemai WLTP važiavimo ciklą, galima pastebėti, kad elektromobilio pavaros modelis, neveikiamas išorinių apkrovų, sparčiai ir nenukrypstamai reaguoja į nustatomas greičio vertes (žr. 3.2 pav.).



3.2 pav. Elektromobilio pavaros modelio be išorinės apkrovos reakcija į WLTP važiavimo ciklą

Bandymui atlikti paimtas pradinis 200 s WLTP važiavimo ciklas, kurio metu elektromobilis maksimaliai turi pasiekti apie 43 km/h greitį. Iš 3.2 paveiksle pateiktos charakteristikos matyti, kad realaus važiavimo ciklo metu modeliui nustatoma greičio vertė nekinta taip sparčiai, kaip 3.1 paveikslo grafike, todėl sistema nesunkiai prisitaiko prie įėjimo signalo. Taigi elektromobilio pavaros greičio ir srovių reguliatoriai turi tinkamai nustatytus parametrus.

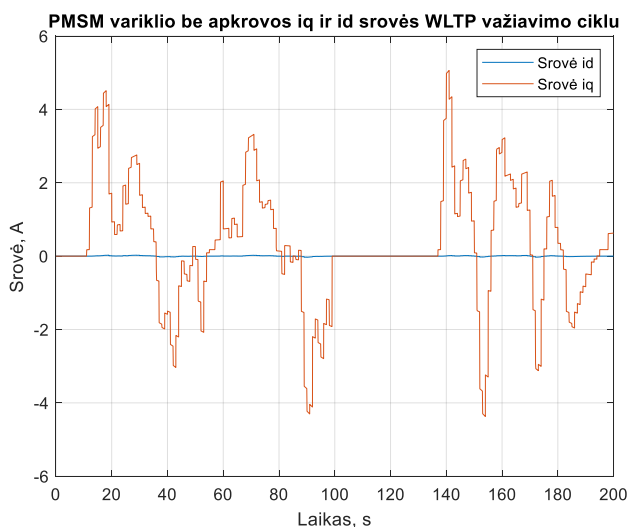
Kol pavara nėra veikiamas išorinių apkrovų, variklio kuriamo sukimo momento dydį daugiausia lemia rotorius inercija ir trintis (žr. 3.3 pav.).



3.3 pav. Pavaros modelio be išorinės apkrovos sukimo momento generavimas WLTP važiavimo ciklu

Lyginant 3.2 ir 3.3 paveikslus matyti, kad juose pavaizduotų charakteristikų kitimo tendencijos nesutampa, nes varikliui greitėjant kuriamas teigiamas sukimosi momentas, o lėtėjant – neigiamas. Kuo staigesnis ir statesnis greičio kitimas, tuo didesnis elektros variklio sukimo momentas. Šio bandymo metu išvystomas iki 1,5 Nm sukimo momentas, kai važiavimo ciklo metu transporto priemonė turėtų startuoti iš stovimos padėties maždaug 138 sekundę.

Variklio sukimo momentas yra tiesiogiai proporcingas i_q srovei, kuri šio bandymo metu yra gana nedidelė, o srovė i_d , kuri silpnina pavaros magnetinį lauką ir išplečia variklio maksimalaus greičio diapazoną, artima 0, nes modelyje stengiamasi išlaikyti maksimalų sukimosi momentą visame greičių diapazone (žr. 3.4 pav.).



3.4 pav. Pavaros modelio be išorinės apkrovos i_q ir i_d srovės WLTP važiavimo ciklu

Iš 3.3 ir 3.4 paveikslų matyti, kad neigiama i_q srovė verčia elektros variklį generuoti neigiamą sukimo momentą, o atsiradus pastarajam, elektros variklis galėtų pereiti į generatorinį režimą ir mechaninę energiją, kuri suka variklio rotorių, keisti į elektros energiją ir krauti elektromobilio bateriją. Kitaip sakant, variklis galėtų veikti regeneraciniu režimu. Tačiau nesant išorinės apkrovos ir varikliui generuojant santykinai mažą neigiamą sukimo momentą (iki $-1,4$ Nm), realioje sistemoje (pavyzdžiui, bagyje), regeneracinio režimo metu gali nepavykti gauti reikiamos baterijų krovimo srovės. Be to, šis trumpas pradinis WLTP važiavimo ciklas yra mažų greičių diapazone, kuriame transporto priemonė ilgą laiką judėtų lėčiau nei 15 km/h, o realiose sistemose regeneracinis režimas nevyksta dėl per mažo variklio sukimosi greičio ir mažos statoriaus apvijų fazinės įtampos.

3.2. Elektromobilio pavaros sistemos veikimas lygiu keliu

Elektromobilio pavaros valdymo sistemos modelis sudarytas taip, kad bent dalinai būtų įvertintos automobilį, šiuo atveju bagį, pagrindinės veikiančios jėgos ir dinamika. Modeliui sudaryti reikia įvertinti įvairius kintančius parametrus ir konstantas (žr. 3.1 lentelę).

3.1 lentelė Pradiniai elektromobilio modelio dinamikos parametrai

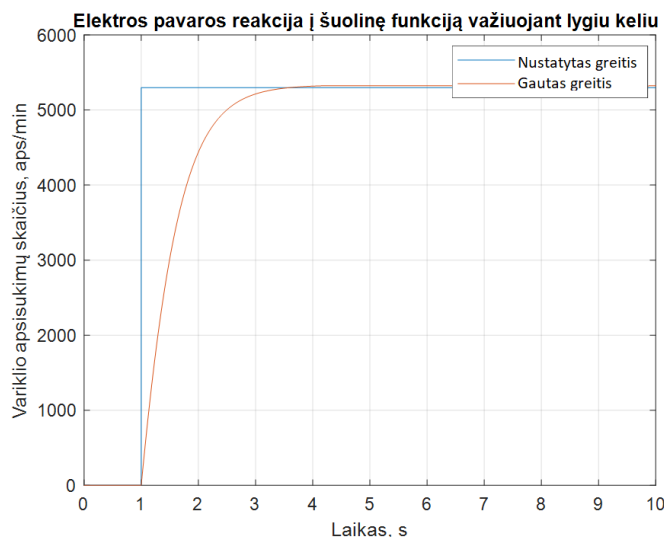
Parametras	Žymėjimas	Standartinė vertė modelyje	Matavimo vienetai
Oro pasipriešinimo koeficientas	c_d	0,3	-
Automobilio (bagio) skerspjūvio plotas	S_{skersp}	1,5	m ²
Oro tankis	ρ	1,225	kg/m ³
Riedėjimo pasipriešinimo koeficientas	f	0,015	-
Automobilio (bagio) masė	m	1500	kg
Kelio statumas	α	0	rad
Oro aukštis iki vėjo jėgos atstojamosios	h_{oro}	1	m
Aukštis nuo masės centro iki žemės	h	0,45	m
Priekinės automobilio (bagio) dalies ilgis	L_f	1,25	m
Galinės automobilio (bagio) dalies ilgis	L_r	1,25	m
Laisvojo kritimo pagreitis	g	9,81	m/s ²
Rato su paviršiumi trinties koeficientas	μ	0,85	-
Rato slydimo koeficientas	s	0,15	-
Reduktoriaus perdavimo koeficientas	i	7,3	-

Turint šiuos parametrus galima apskaičiuoti elektromobilį veikiančias jėgas ir sukimo momentus:

- Oro pasipriešinimo jėgą F_{oro} ;
- Priekinės ašies normalinę jėgą F_{zf} ;
- Kilimo pasipriešinimo jėgą F_c ;
- Priekinės ašies apkrovos momentą T_f ;
- Elektros variklio apkrovos momentą T_m .

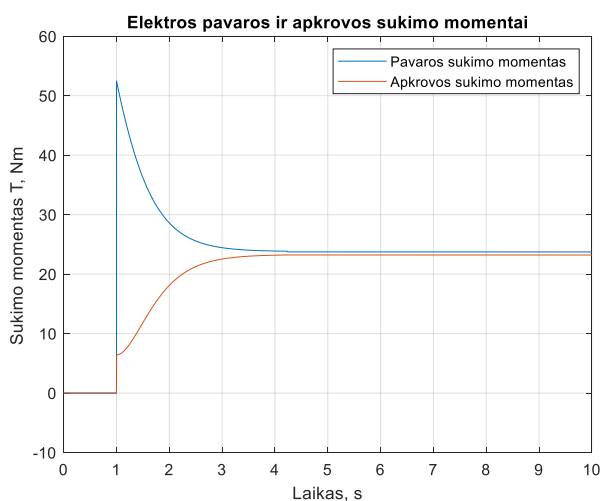
Svarbiausias iš visų anksčiau apskaičiuotų parametru yra elektros variklio apkrovos momentas T_m , kuris tiesiogiai daro įtaką elektros pavaros valdymo sistemos veikimui (pavyzdžiui, sukimosi greičiui, suvartojamai energijai, variklio sukimosi kryptiai ir t. t.).

Modelio įėjime vėl nustačius šuolinę funkciją, galima palyginti, kiek pailgėja elektros variklio įsibėgėjimo laikas nuo 0 aps./min iki numatyto maksimalaus apsisukimų skaičiaus (5300 aps./min) (žr. 3.5 pav.). Bandymo metu modeliuojamas elektromobilis juda lygiu keliu be statumo ar nuolydžio, o vėjo greitis lygus 0 m/s.



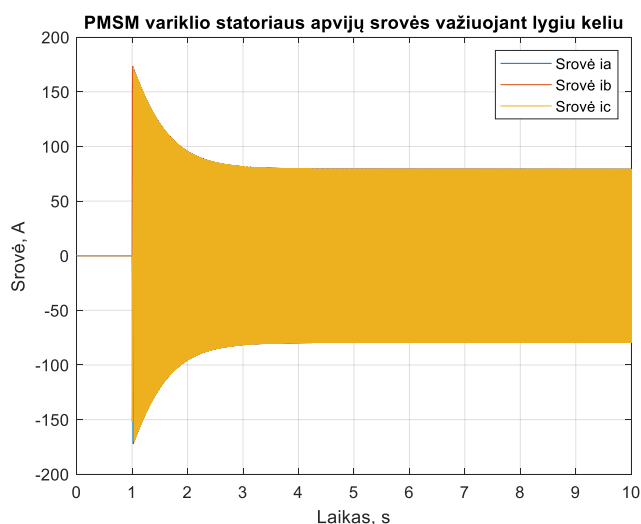
3.5 pav. Elektromobilio pavaros modelio reakcija į šuolinę funkciją važiuojant lygiu keliu

Palyginus 3.1 ir 3.5 paveikslus matyti, kad važiuojant lygiu keliu be vėjo, elektros pavaros įsibėgėjimo (nusistovėjimo) laikas pailgėjo beveik 3 kartus: nuo 0,85 s 3.1 paveiksle iki 2,5 s 3.5 paveiksle. Nors nusistovėjimo laikas pailgėja, tačiau modeliuojamas PMSM variklis pasiekia nurodytą maksimalų sukimosi greitį, o tai reiškia, kad pavaros kuriamas sukimo momentas yra pakankamai didesnis už apkrovos momentą (T_m) (žr. 3.6 pav.). Be to, grafike matyti, kad modelio greičio nukrypimas nuo nurodytos vertės yra gana mažas – apie 0,5 %, o perreguliavimo beveik nėra ir tai parodo, kad valdymo sistemos greičio ir srovių reguliatoriai veikia tinkamai net ir esant variklio apkrovai.



3.6 pav. Pavaros ir apkrovos kuriami sukimo momentai esant šuolinei įėjimo funkcijai

Mažėjant pavaros kampiniam pagreičiui (variklio sukimosi greičio kitimui), kuriamas naudingo sukimo momentas mažėja (žr. 3.6 pav., mėlyna kreivė) ir, pasiekus nurodytą sukimosi greitį, beveik išsilygina su apkrovos momentu. Pavaros kuriamas momentas yra apie 0,5 Nm didesnis, nes pavara dar turi kompensuoti vidinius nuostolius (rotoriaus inerciją, trintį). Iš apkrovos momento kreivės matyti, kad pastarasis taip pat nėra pastovus. Didėjant automobilio (bagio) važiavimo greičiui, smarkiai padidėja pasipriešinimo jėga, kurią sukelia ore esančios dalelės. Ši oro pasipriešinimo jėga modelyje sąlyginai didelė todėl, kad sistema sudaryta atsižvelgiant į realaus bagio išmatavimus, kurio priekinės dalies skerspjūvio plotas yra apie 1,5 m² ir ši transporto priemonė nėra aerodinamiška.



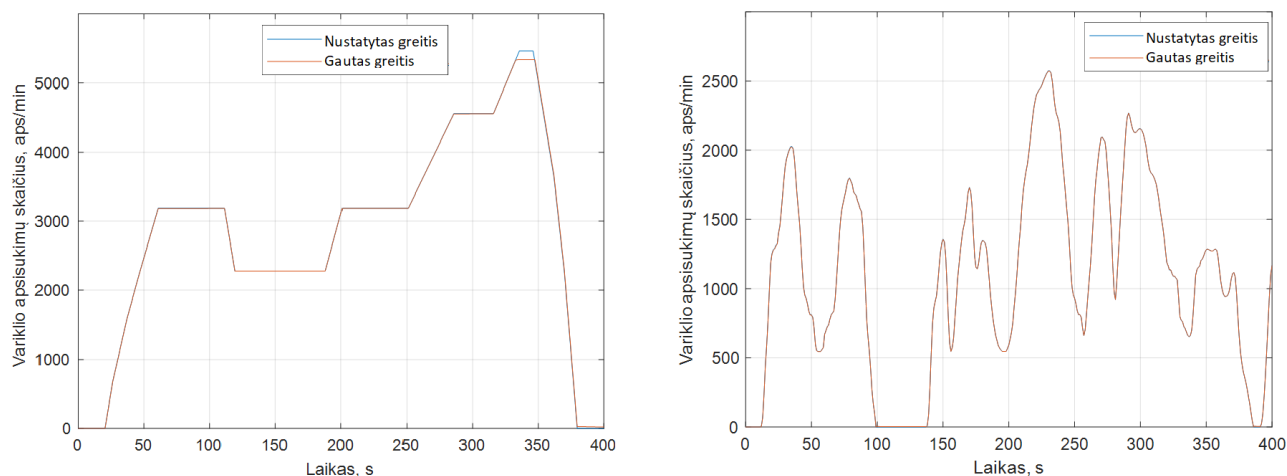
3.7 pav. PMSM variklio statoriaus apvijų srovės esant šuolinei įėjimo funkcijai

Anksčiau pateiktame grafike matyti, kad statoriaus apvijų srovės išauga iki 175 A. 52 kW PMSM variklyje, pagal kurio parametrus sukonfigūruotas pavaros modelis. Normaliomis darbo sąlygomis statoriaus apvijomis gali tekėti iki 150 A srovė. Esant pastarajai srovei, pavara gali patikimai dirbti. Bandymo metu pasiekta statoriaus apvijų srovė nebūtų pavojinga realiai pavarai, jei ši būtų aušinama pagal nurodytą instrukciją. Atsiradus tinkamam aušinimui, trumpalaikę (iki 2 min) srovę galima padidinti iki 300 A.

Elektros pavaros modelis greitai reaguoja į šuolinę funkciją, bet reikia patikrinti, kaip sistema veiks esant skirtingiems važiavimo ciklams (žr. 3.8 pav.). Bandymo metu taikyti 2 važiavimo ciklai:

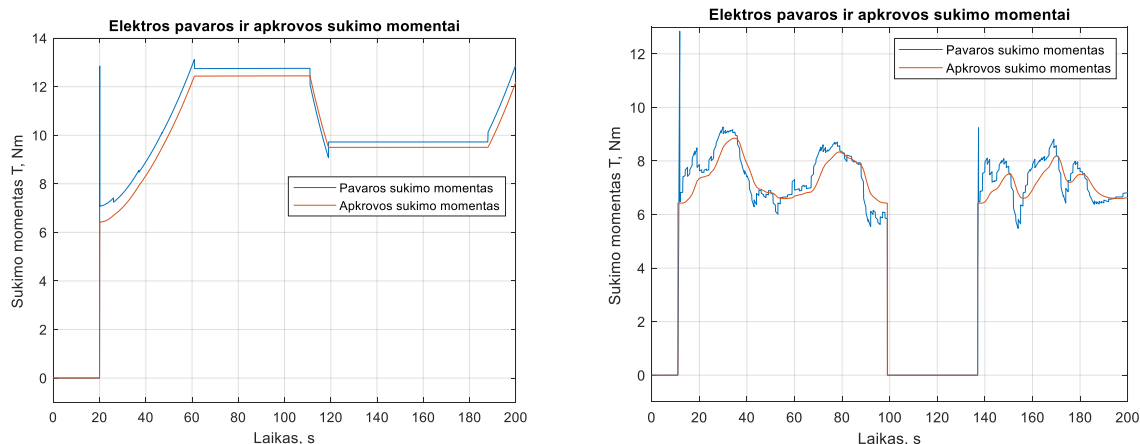
- naujojo Europos važiavimo ciklo (NEDC) bandymo etapas „važiavimo užmiestyje ciklas“ (EUDC);
- pasaulinės suderintos lengvųjų transporto priemonių bandymo procedūros (WLTP) ciklo etapas mažų greičių zonoje (nuo 0 iki 400 s).

Pirmasis važiavimo ciklas (EUDC) praktikoje jau nebenaudojamas, bet šio ciklo metu modeliui nurodomas važiavimo greitis kinta lėčiau ir yra etapų, kurių metu išlaikomas pastovus judėjimo greitis.



3.8 pav. Elektromobilio pavaros modelio su išorine apkrova reakcija į EUDC (kairėje) ir WLTP (dešinėje) važiavimo ciklus

Iš anksčiau pateiktų grafikų matyti, kad elektromobilio pavara, važiuojant lygiu keliu, turėtų tiksliai ir greitai reaguoti į nurodomo greičio pasikeitimus. Kairėje pusėje esančiame grafike yra etapas (nuo 340 sekundės iki 350 sekundės), kai nurodytas greičio signalas yra šiek tiek didesnis nei gautas. Taip yra todėl, kad, dėl įvestų įtampos ir srovės apribojimų modelyje, pavara pasiekia ribinį 5300 aps/min sukimosi greitį ir greičiau suktis nebegali.



3.9 pav. Pavaros modelio su išorine apkrova sukimo momento generavimas EUDC (kairėje) ir WLTP (dešinėje) važiavimo ciklų metu

3.9 paveiksle pavaizduota, kaip keičiasi elektros variklio ir išorinės apkrovos sukimo momentai. Dešinėje pusėje esantis grafikas yra labiau atitinkantis realų važiavimo ciklą, kai transporto priemonė dažnai atlieka išibėgėjimą ir stabdymą. Tiek variklio kuriamų, tiek apkrovų momentai abiejuose grafikuose nesutampa dėl skirtingo nurodomo važiavimo greičio. Kairėje pusėje greitis didesnis, todėl ir sukimo momentai didesni.

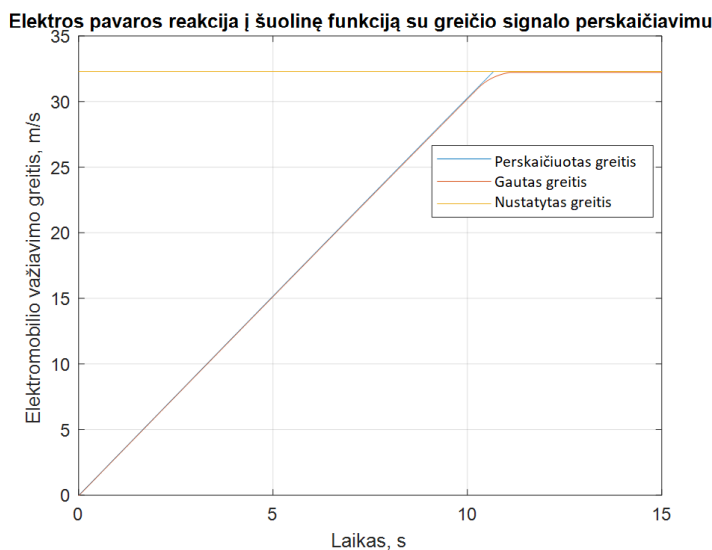
Abiejuose grafikuose galima pastebėti, kad atsiranda laiko tarpų, kai apkrovos momentas yra didesnis nei elektros variklio kuriamas sukimo momentas. Tais laiko tarpais transporto priemonė atlieka stabdymą ir sumažina variklio kuriamą sukimo momentą, tad dėl didesnio apkrovos momento automobilis lėtėja.

3.3. Modelio greičio įėjimo signalo valdymas

Važiavimo ciklai, nustatomi šio tyrimo bandymams, yra sudaryti pasinaudojus realių automobilių važiavimo duomenimis, tačiau kiekvienos transporto priemonės įsibėgėjimo ir stabdymo laikai skiriasi. Iš 3.5 grafiko matyti, kad, esant išorinei apkrovai, elektrinis bagis, kurio masė 1500 kg nuo 0 iki maksimalaus greičio (116 km/h) turėtų įsibėgėti per 2,5 s. Tokie rezultatai pralenktų net sportinių automobilių rezultatus ir realiam bagiui, su numatytais parametrais ir galimybėmis, būtų nepasiekiami.

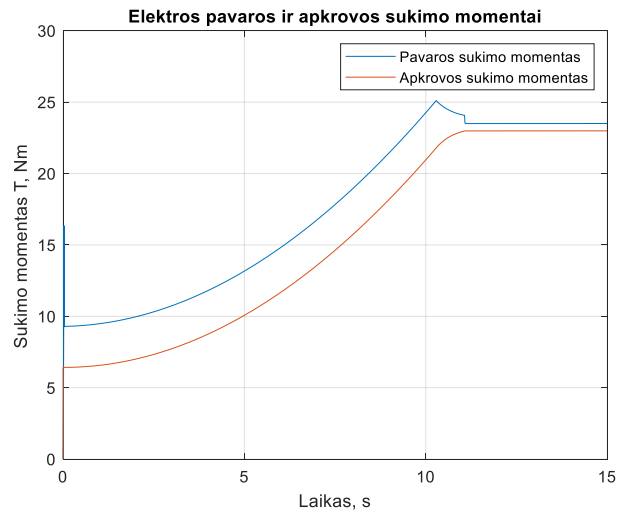
Norint, kad sistema būtų realesnė, nurodomą greičio signalą reikia perskaičiuoti pasinaudojus sistemoje įterptu greičio kitimo valdymo modeliu (žr. 3.10 pav.). Šio bandymo metu modelyje įvertinta, kad elektromobilis važiuoja sausu asfaltu ir jo ratų su paviršiumi sukibimo koeficientas (μ) yra 0,85. Nemažiau svarbus ir ratų slydimo koeficientas. Pastarasis parametras yra dinamiškas ir gali labai kisti priklausomai nuo darbo sąlygų (veikiamų jėgų, kelio dangos, ratų sukibimo ir t.t.), tačiau bandymams parinktas pastovus, realus ratų slydimo koeficientas $s = 0,1$.

Tam, kad automobilis galėtų įsibėgėti ir stabdyti, ratų slydimo koeficientas turi būti gana nedidelis – maždaug iki 0,3. Jei koeficientas pasidaro per didelis, ratai praranda sukibimą su kelio danga ir pradeda slysti, automobilis tampa nebevaldomas. Tokiu atveju reikia mažinti ratams perduodamą jėgą (stabdymo arba greitėjimo). Kitaip tariant, ratų slydimo koeficientas riboja variklio kuriamą sukimo momentą ir automobilio įsibėgėjimą.



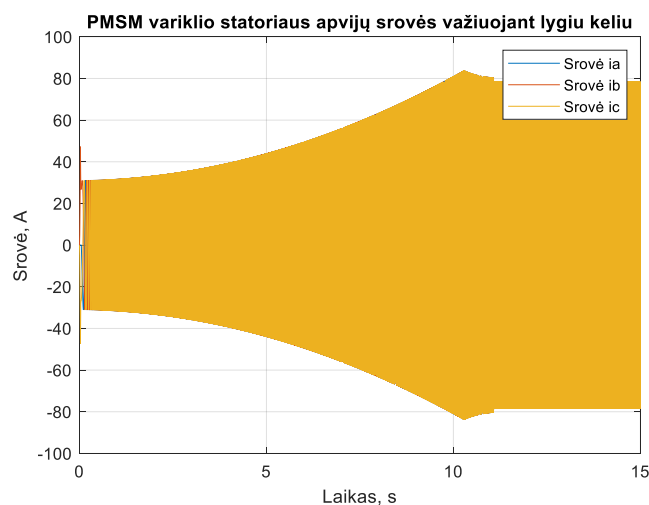
3.10 pav. Elektros pavaros modelio reakcija į šuolinę funkciją esant išorinei apkrovai ir perskaičiavus greičio signalą

Palyginus 3.5 ir 3.10 grafikus, nesunku pastebėti, kad perskaičiavus greičio signalą (žr. 3.10 pav.) bagio įsibėgėjimo laikas išaugo beveik 4,5 karto (nuo 2,5 s iki 11 s). Nors minėtų grafikų matuojami parametrai skiriasi, juos nesunku susieti. 3.10 paveiksle variklio sukimosi greitis perskaičiuotas į bagio judėjimo greitį m/s pagal reduktoriaus perdavimo koeficientą (7,3) ir naudojamų ratų spindulį (0,425 m).



3.11 pav. Pavaros ir apkrovos kuriami sukimo momentai esant šuolinei įėjimo funkcijai ir greičio signalo perskaičiavimui

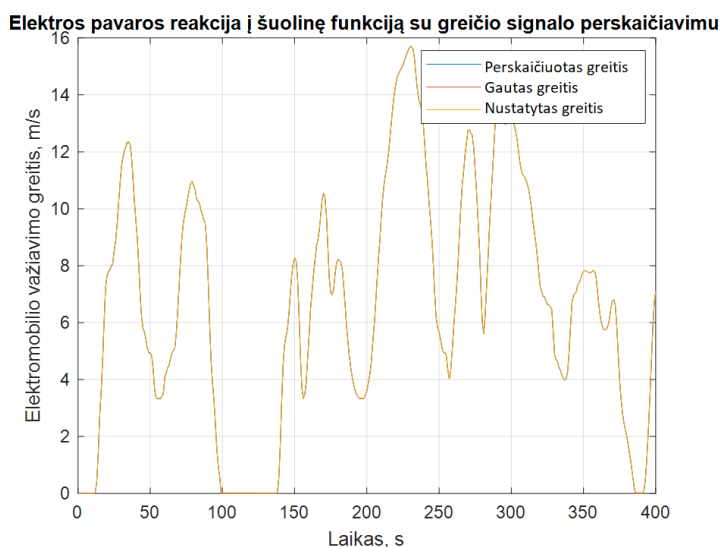
Anksčiau pateiktame grafike matyti, kad perskaičiavus greičio įėjimo signalą, PMSM variklio kuriamas sukimo momentas pradinio laiko tarpu yra sumažėjęs beveik 4 kartus, lyginant su 3.6 paveikslu. Abiejuose bandymuose buvo naudojama šuolinė įėjimo funkcija. Jei apkrovos sukimo momentas nekistų transporto priemonei greitėjant, pavara išlaikytų beveik pastovų apie 9 Nm sukimo momentą visą greitėjimo laikotarpį (11 s), nes elektromobilis įsibėgėtų pastoviu pagreičiu, tačiau dėl oro srauto pasipriešinimo apkrova išauga 4 kartus.



3.12 pav. PMSM variklio statoriaus apvijų srovės esant šuolinei įėjimo funkcijai ir greičio signalo perskaičiavimui

Iš PMSM variklio statoriaus srovių grafiko 3.12 paveiksle galima matyti, kad pradiniam etape, kai važiavimo greitis nėra didelis, vienos apvijos srovės amplitudė išauga iki 30 A. Palyginus gautas sroves su bandymu be greičio signalo valdymo modulio (žr. 3.7 pav.) matyti, kad variklio statoriaus apvijomis per pirmą sekundę teka beveik 5 kartus mažesnės srovės. Nors įsibėgėjimo trukmė išauga ir nuvažiuotas atstumas per tą patį laiką sumažėja, tačiau nebelieka staigių srovių šuolių, sumažėja elektromobilių šiluminiai nuostoliai, mažiau apkraunamos baterijos ir inverteriai, taip pat pailgėja efektyvus elektromobilių naudojimo laikas.

Naudojant greičio kitimo valdymo modelį su važiavimo ciklais, kai nėra vėjo ir kelio statumo, o kelio danga laikoma asfaltu, praktiškai niekas nepasikeičia, nes važiavimo ciklams nurodomas lėtai kintantis greitis.



3.13 pav. Elektromobilio pavaros modelio su išorine apkrova ir greičio signalo perskaičiavimu reakcija į WLTP važiavimo ciklą

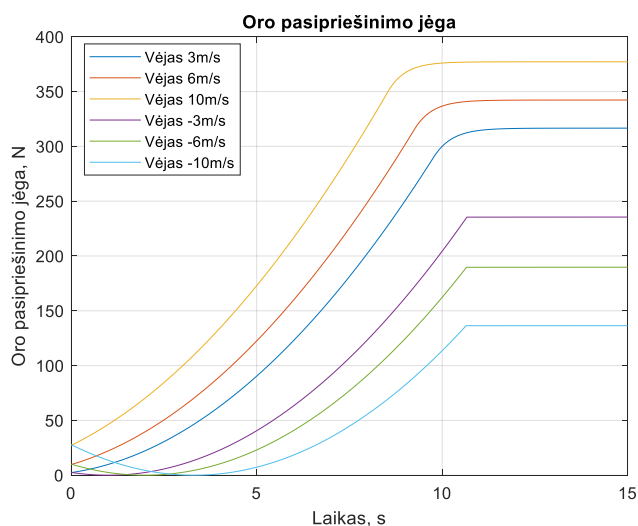
3.4. Vėjo ir kelio statumo įtaka elektromobilio pavaros valdymui

Elektromobiliu ar kita transporto priemone važiuojant mieste, vėjo kuriamos jėgos galima nepaisyti, nes tarp aukštų pastatų vėjas neturi kur įsibėgėti ir praktiškai neveikia automobilio. Visai kitokia situacija užmiestyje, kur keliai atviri ir leidžiamas didelis važiavimo greitis, pavyzdžiui, autostradose ar magistralėse. Atliktuose bandymuose, keičiant vėjo stiprumą (greitį), laikomasi nuostatos, kad vėjas pučia prieš transporto priemonės judėjimo kryptį arba judėjimo kryptimi (važiavimas pavėjui). Visą bandymo laikotarpį išlaikoma pastovi vėjo kryptis ir aukštis $h_{oro} = 1$ m. Simuliacijos atliekamos su 3 skirtingais vėjo stiprumais (žr. 3.2 lentelę).

3.1 lentelė Bandymuose naudojami skirtingi vėjo tipai

Vėjo tipas	Greitis, m/s	Poveikis aplinkai
Lengvas vėjelis	3	Šlama medžių lapai, vėjarodis pasisuka vėjo kryptimi
Vidutinis vėjas	6	Nuo gatvių pasikelia dulės, šlama mažos medžių šakos
Stiprus vėjas	10	Juda didelės medžių šakos, telekomunikacijų laidai, sunku išlaikyti skėtį

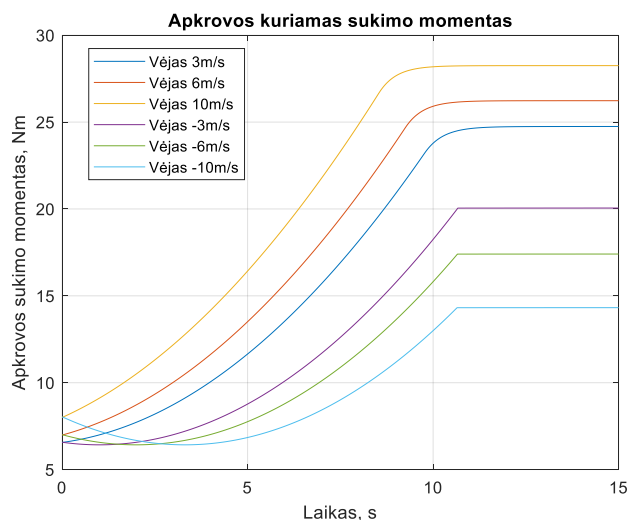
Važiuojant elektromobiliui, jį veikia oro pasipriešinimo kuriama jėga. Kuo judėjimo greitis didesnis, tuo stipriau veikia šis pasipriešinimas. Pučiantis vėjas, priklausomai nuo krypties, padidina arba sumažina oro pasipriešinimo jėgą (žr. 3.14 pav.).



3.14 pav. Oro pasipriešinimo jėga išsibėgėjant bagiui esant skirtingiems vėjo greičiams

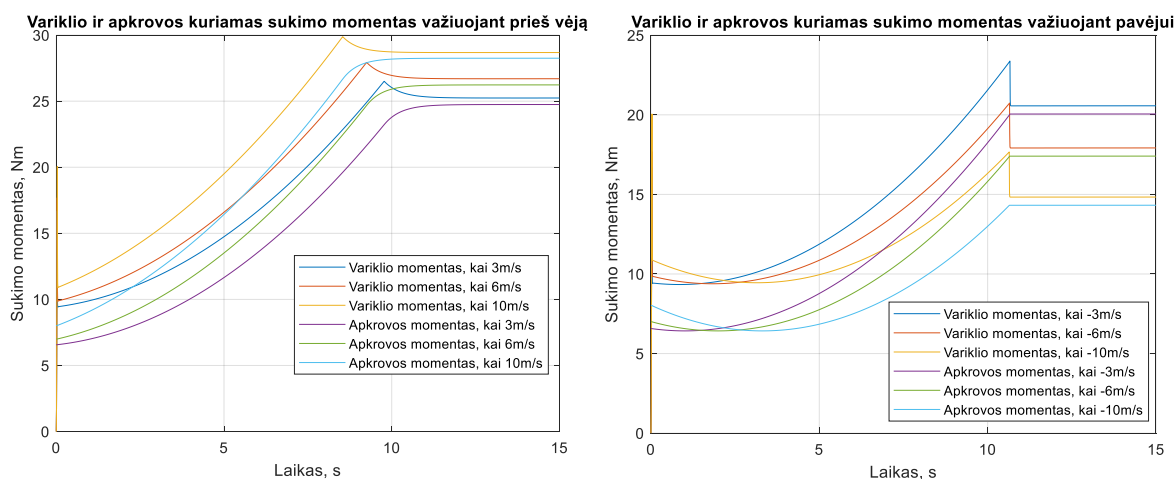
Iš anksčiau pateikto grafiko matyti, kad važiuojant prieš vėją, oro pasipriešinimo jėga proporcingai didėja stiprėjant vėjo greičiui. Esant stipriam vėjui (10 m/s), jėga išauga iki 380 N važiuojant maksimaliu galimu greičiu. Kai vėjo kryptis atitinka automobilio judėjimo kryptį, jėga gerokai sumažėja. Kol automobilis juda mažesniu nei pučiamo vėjo greičiu, tol oro pasipriešinimo jėga neigiama.

3.15 paveiksle pavaizduota suminė pasipriešinimo jėga, perskaičiuota kaip elektromobilio priekinės pavaros apkrovos momentas. Palyginus 3.14 ir 3.15 grafikus nesunku pastebėti, kad jų kitimas praktiškai identiškas.



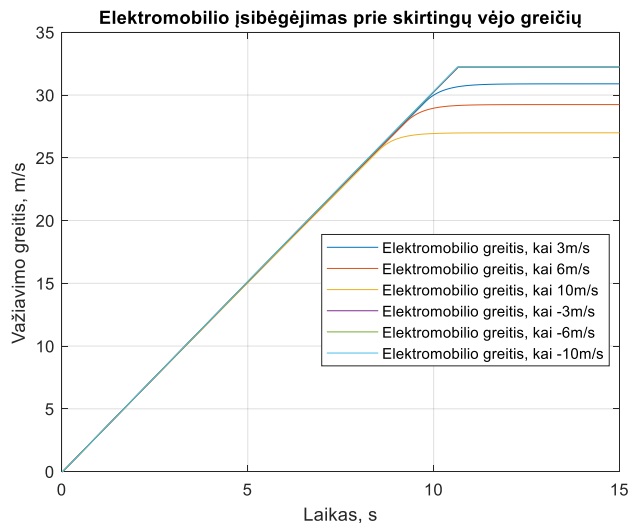
3.15 pav. Suminis apkrovos sukimo momentas įsibėgėjant bagiui, esant skirtingiems vėjo greičiams

Kai elektromobilis juda tiesiu keliu, didžiąją apkrovos momento dalį sudaro oro pasipriešinimas, todėl grafikai panašūs. 3.15 paveiksle pateiktame grafike matyti, kad važiuojant pavėjui, vėjo greitis per mažas, kad bagis pajudėtų iš vietos be papildomo pavaros kuriamo sukimo momento, nes apkrovos momentas visais bandymo variantais nėra neigiamas.



3.16 pav. Elektros pavaros ir apkrovos kuriami sukimo momentai įsibėgėjant bagiui, esant skirtingiems vėjo greičiams

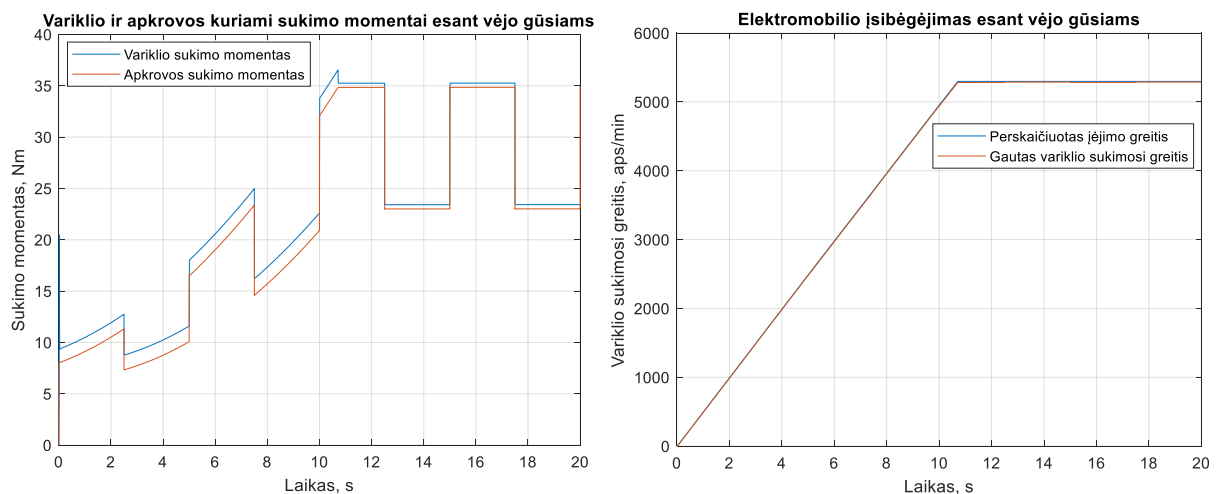
Anksčiau pateiktuose grafikuose pavaizduota, kaip elektros pavara reaguoja į šuolinę funkciją, esant skirtingiems vėjo greičiams ir kryptims. Kairėje pusėje esančioje lentelėje pateikti rezultatai automobiliui judant prieš vėjo kryptį, o dešinėje pavėjui. Bagiui judant prieš vėją, elektros pavara generuoja didesnę sukimo momentą (iki 30 Nm), kai vėjo greitis 10 m/s. Kuo didesnis oro pasipriešinimas, tuo greičiau nusistovi maksimalus bagio judėjimo greitis, tačiau tai nereiškia, kad jis visais atvejais vienodas (žr. 3.17 pav.).



3.17 pav. Elektromobilio įsibėgėjimas iki maksimalaus greičio lygiu keliu, esant skirtingiems vėjo greičiams

Bandymų metu nurodyta šuolinė įėjimo funkcija nuo 0 iki 32,4 m/s. Iš grafiko matyti, kad važiuojant pavėjui, bagis visada ir beveik vienodu laiku pasiekia nustatytą greitį. Važiuojant prieš vėją ir padidėjus apkrovos momentui, elektros pavara, pagal PMSM variklio sukimo momento priklausomybės nuo variklio sukimosi greičio grafiką, negali pasiekti nustatyto greičio.

Važiuojant dideliu greičiu, pavara kuria mažėjantį sukimo momentą. Esant vidutinio stiprumo vėjui (apie 6 m/s), bagis nebepasiekia 30 m/s greičio, o esant 10 m/s vėjo stiprumui išvysto iki 26,5 m/s greitį.



3.18 pav. Pavaros modelio reakcija į vėjo gūsius ir stabilaus sukimosi greičio išlaikymas

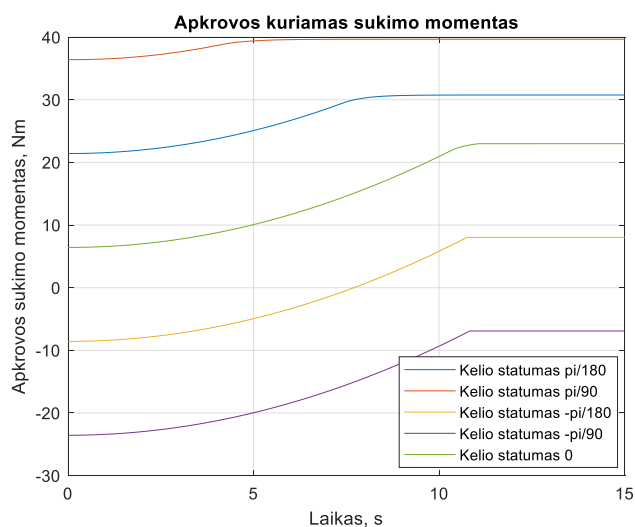
3.18 paveiksle pavaizduota, kaip keičiasi elektromobilio variklio kuriamas sukimo momentas veikiant vienodiems vėjo gūsiams kas 5 s. Kairėje pusėje matyti, kad atsiradus vėjo gūsiams, apkrova padidėja, nes automobilio judėjimo kryptis priešinga vėjui. Elektromobilio varikliui pasiekus maksimalų sukimosi greitį, apkrova padidėja daugiau nei 10 Nm, tačiau srovių PI reguliatoriai sugeba suvaldyti ir išlaikyti pastovų PMSM variklio sukimosi greitį.

Oro pasipriešinimas turi didelę įtaką elektros pavaros darbui ir galimybėms, tačiau dar didesnę apkrovos momentą kuria kelio nelygumai. Siekiant įvertinti, kaip elektromobilio pavaros valdymo sistemą veikia įkalnės ir nuokalnės, atlikti bandymai su skirtingais kelio nelygumo laipsniais (žr. 3.3 lentelę).

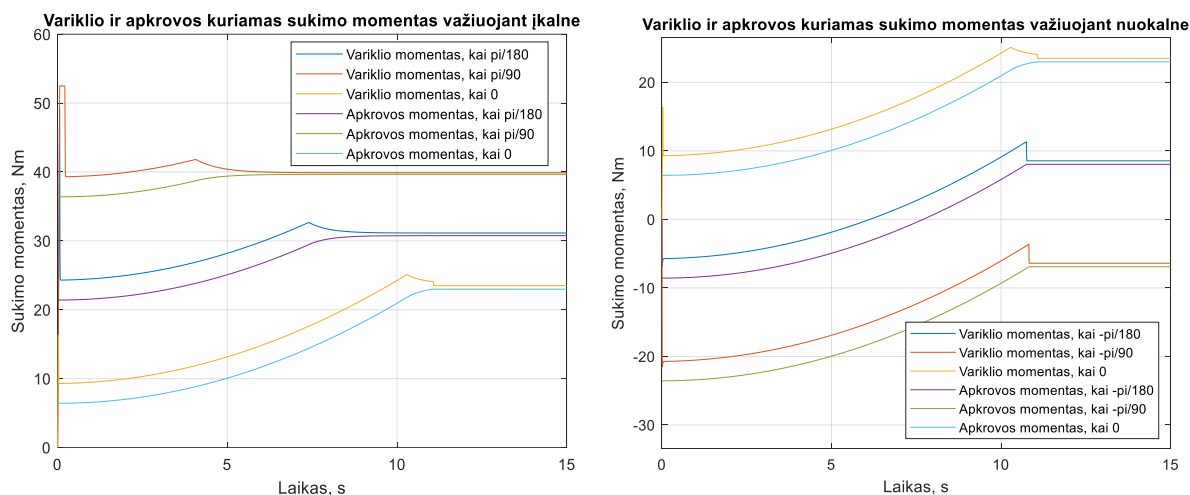
3.2 lentelė Bandymuose naudojami skirtingi kelio nelygumai

Kelio tipas	Kampas radianais	Kampas laipsniais
Įkalnė	$\pi/180$	1°
Įkalnė	$\pi/90$	2°
Nuokalnė	$-\pi/180$	-1°
Nuokalnė	$-\pi/90$	-2°
Lygus kelias	0	0°

3.19 paveiksle pavaizduota, kaip veikia bagį skirtingas kelio statumas ir kokią apkrovos momentą tai kuria. Iš grafiko matyti, kad net 2 laipsnių įkalnė padidina apkrovos momentą iki 40 Nm, kai elektros variklio, naudojamo sistemoje, maksimalus sukimo momentas 52 Nm.

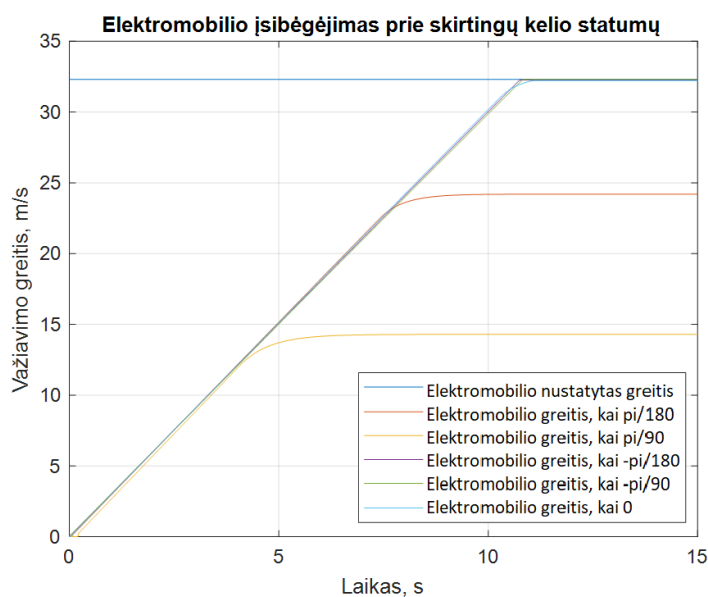


3.19 pav. Apkrovos sukimo momentas įsibėgėjant bagiui, esant skirtingiems kelio statumams



3.20 pav. Elektros pavaros ir apkrovos kuriami sukimo momentai įsibėgėjant bagiui, esant skirtingiems kelio statumams

Važiuojant 2 laipsnių nuokalne, apkrovos momentas visą laiko tarpą iki pasiekto maksimalaus greičio išlieka neigiamas (žr. 3.20 pav. dešinėje). Tokiu atveju elektros pavara visą laiką galėtų veikti regeneraciniu režimu ir generuoti elektros energiją.



3.21 pav. Elektromobilio įsibėgėjimas iki maksimalaus greičio lygiu keliu esant skirtingiems kelio statumams

Anksčiau pateiktame paveiksle matyti, kaip elektromobilis reaguoja į šuolinę funkciją, esant skirtingiems kelio statumams. Grafikas parodo, kad net nedidelės įkalnės labai apriboja maksimalų važiavimo greitį. Palyginus duomenis su 3.17 grafiku, net 10 m/s stiprumo vėjas neprilygsta 1 laipsnio įkalnei, kuri apriboja maksimalų važiavimo greitį iki 24,5 m/s. 2 laipsnių įkalnė sumažina greitį iki 14,5 m/s.

3.5. Rato sukibimo su paviršiumi ir riedėjimo pasipriešinimo koeficientų įtaka elektromobilio pavarai

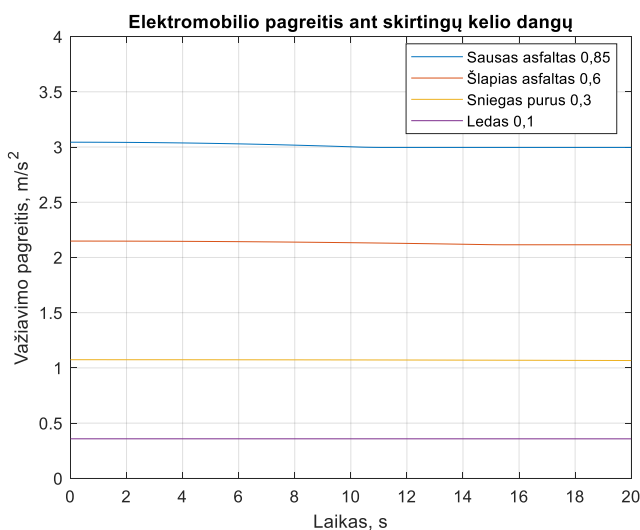
Važiuojant automobiliu ar kita transporto priemone, ratai sąveikauja su važiuojamosios dalies paviršiumi, todėl judėjimui ir elektros pavaros valdymui daug įtakos turi su kelio danga susiję parametrai. Svarbiausi iš pastarųjų parametru yra rato sukibimo su paviršiumi koeficientas (μ) ir riedėjimo pasipriešinimo koeficientas (f).

Norint, kad elektromobilis pajudėtų iš vietos ir pasiektų nurodytą greitį, vien pavaros kuriamo sukimo momento neužtenka. Ratai turi pakankamai gerai sukibti su kelio danga, kad nepraslystų ir nesisuktų vietoje. Elektromobilio pavaros valdymo sistemos modelis išbandytas taikant skirtingus rato sukibimo koeficientus, atitinkančius įvairias kelio dangas (žr. 3.4 lentelę).

3.3 lentelė Rato sukibimo koeficientas su skirtingomis kelio dangomis

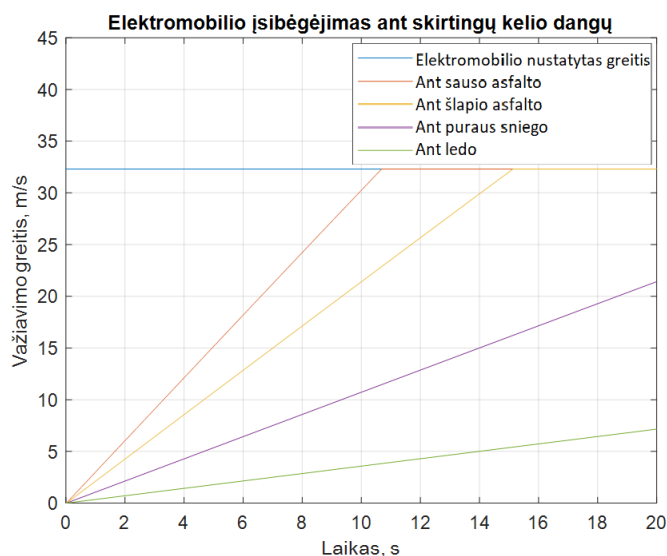
Kelio danga	Rato sukibimo su kelio danga koeficientas
Sausas asfaltas	0,85
Šlapias asfaltas	0,6
Purus sniegas	0,3
Ledas	0,1

Rato sukibimo su kelio danga koeficientas riboja transporto priemonės įsibėgėjimą. Kai šis koeficientas artimas 1, maksimalus bagio įsibėgėjimo pagreitis yra apie 3 m/s^2 , kuris dar tiesiogiai proporcingas praslydimo koeficientui s (0,1), reduktoriaus perdavimo koeficientui i (7,3) ir atvirkščiai proporcingas bagio masei m (1500 kg) (žr. 3.22 pav.).



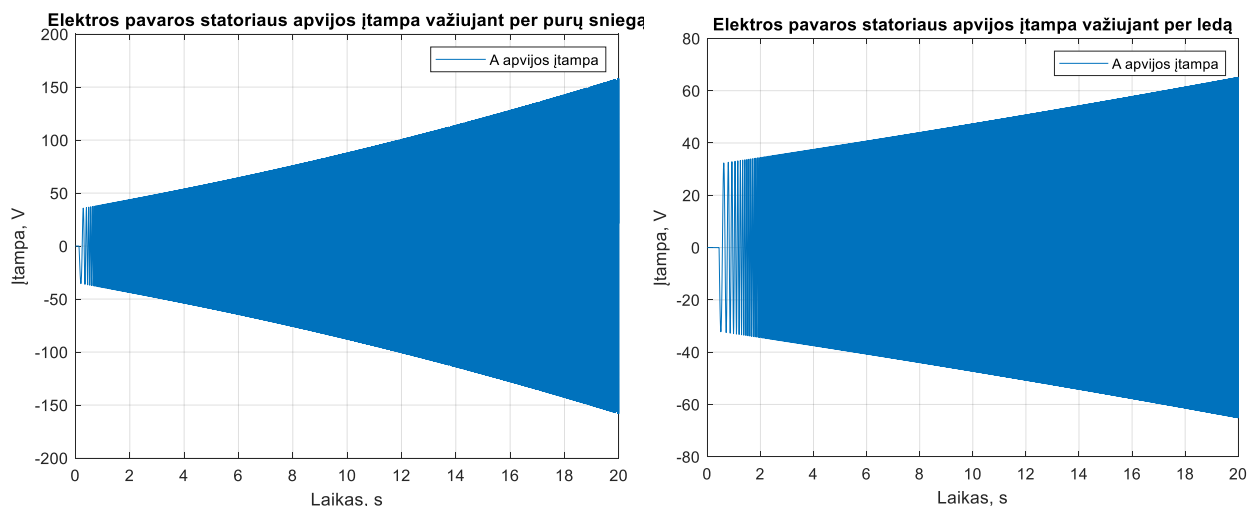
3.22 pav. Bagio maksimalus perskaičiuotas pagreitis ant skirtingų kelio dangų

Sukibimo koeficientui mažėjant, maksimalus pagreitis irgi proporcingai mažėja. Ant šlapio asfalto modelio pagreitis siekia $2,1 \text{ m/s}^2$, ant puraus sniego – $1,05 \text{ m/s}^2$, o ant ledo – $0,35 \text{ m/s}^2$.



3.23 pav. Elektromobilio įsibėgėjimas iki maksimalaus greičio lygiu paviršiumi ant skirtingų kelio dangų

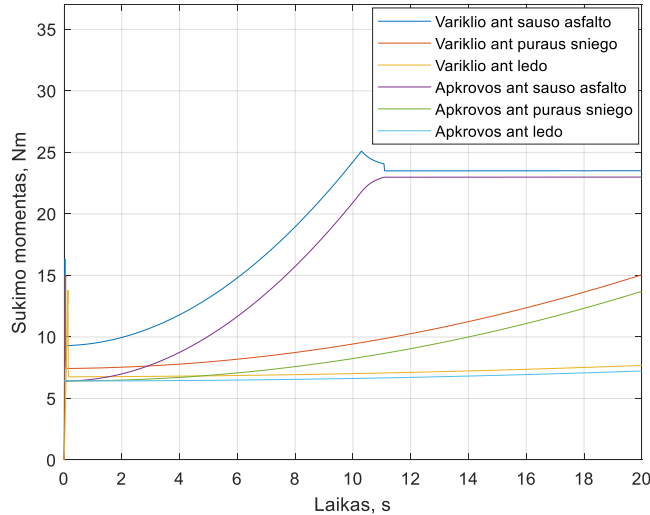
Anksčiau pateiktame grafike matyti, kaip pagal skirtingas kelio dangas pasikeičia perskaičiuotas greičio jėgimo signalas ir kiek laiko užtrunka elektromobiliui įsibėgėti iki maksimalaus leistino greičio. Ant šlapio asfalto bagis maksimalų greitį pasiektų 4,5 s lėčiau nei ant sauso asfalto. Važiuojant puriu sniegu, tai užtruktų apie 30 s, o ledu – apie 85 s.



3.24 pav. PMSM variklio statoriaus apvijų įtamos įsibėgėjant skirtingomis kelio dangomis

3.24 paveiksle pavaizduota PMSM variklio statoriaus apvijų įtampa, įsibėgėjant per purų sniegą (kairėje) ir ledą (dešinėje). Iš grafiko matyti, kad važiuojant ledu pradinio laiko momentu statoriaus apvijų įtampa yra mažesnė ir amplitudė siekia apie 30 V. Taip pat važiuojant ledu įtampa auga lėčiau – per 20 s išaugo tik dvigubai, o esant puriam sniegui – daugiau nei 4 kartus (nuo 40 V iki 160 V). Esant mažesnei statoriaus apvijų įtampai, PMSM variklis suvartoja nedaug energijos, bet atliekamas ir mažesnis darbas – per tą patį laiką įveikiama trumpesnė distancija.

Variklio ir apkrovos kuriamas sukimo momentas važiuojant skirtinga kelio dang



3.25 pav. Elektros pavaros ir apkrovos kuriami sukimo momentai, esant skirtingoms kelio dangoms

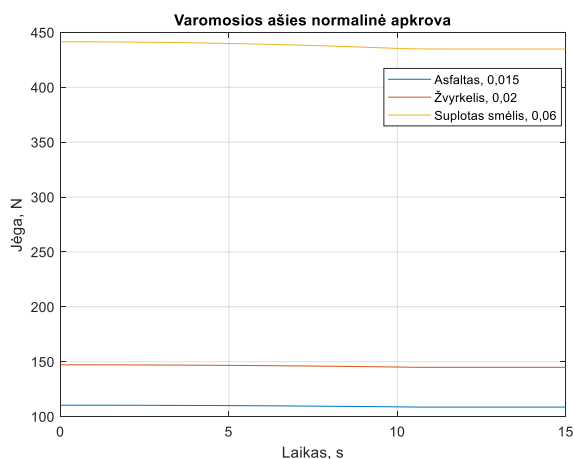
Sumažėjus statoriaus apvijų įtampai, sumažėja ir srovė, o dėl jos ir pavaros kuriamas sukimo momentas (žr. 3.25 pav.). Iš grafiko matyti, kad kuo greičiau elektromobilis pasiekia maksimalų greitį, tuo didesnis skirtumas tarp pavaros ir apkrovos momentų išibėgėjimo etapu. Pradedant judėti, apkrovos momentai yra lygūs, bet, laikui bėgant, dėl nevienodo greičio ir veikiančio oro pasipriešinimo grafikai išsiskiria.

Kitas reikšmingas su kelio danga susijęs parametras – riedėjimo pasipriešinimo koeficientas. Šis koeficientas išreiškia kelio dangos pasipriešinimą ratų judėjimui. Kuo didesnis koeficientas, tuo sunkiau transporto priemonei judėti, išauga apkrovos momentas ir taip pat reikalavimai elektros pavarai. Bandymų metu ištirta, kaip modelį veikia 3 skirtingi riedėjimo pasipriešinimo koeficientai. (žr. 3.5 lentelę).

3.4 lentelė Riedėjimo pasipriešinimo koeficientas esant skirtingoms kelio dangoms

Kelio danga	Riedėjimo pasipriešinimo koeficientas
Sausas asfaltas	0,015
Žvyrkelis	0,02
Suplotas smėlis	0,06

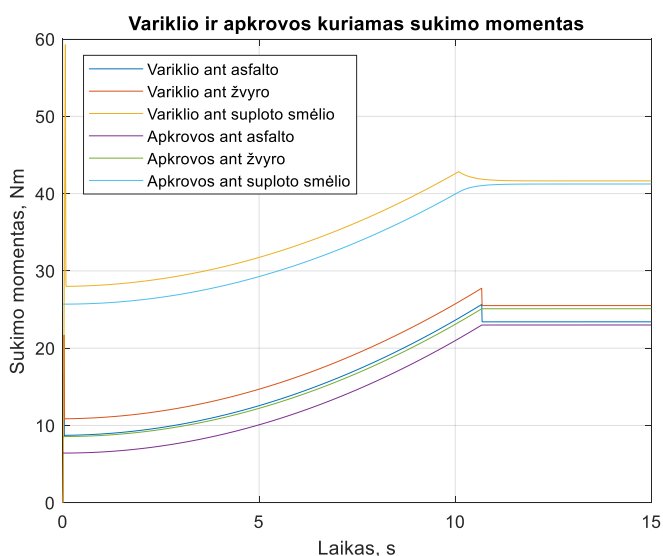
Riedėjimo pasipriešinimas veikia rato ir kelio dangos sąlyčio vietoje. Šioje vietoje veikia ir normalinė jėga F_z . Šių parametrų sandauga sudaro varomosios ašies normalinę apkrovą – vieną iš pavarą veikiančio apkrovos sukimo momento dedamųjų (žr. 3.26 pav.).



3.26 pav. Bagio varomosios ašies normalinė apkrova esant skirtingiems riedėjimo pasipriešinimo koeficientams

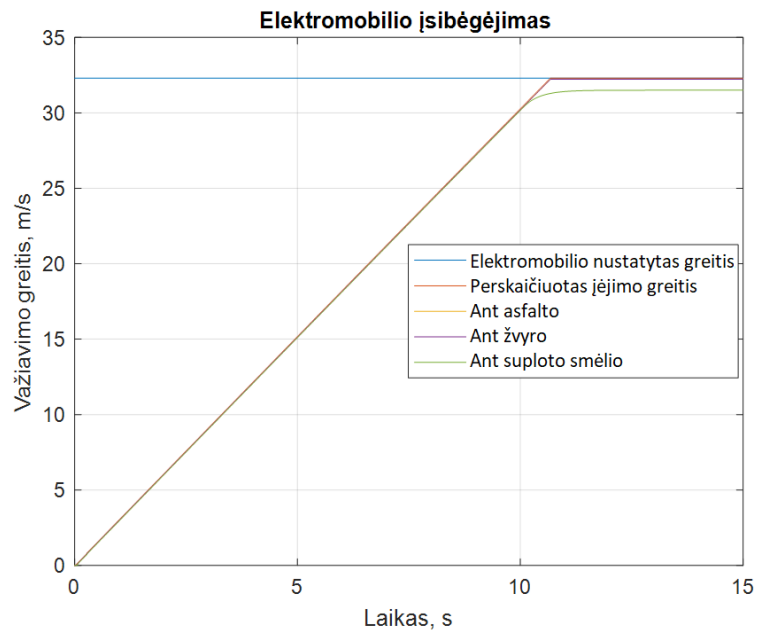
Iš grafiko matome, kad šių bandymų metu, didžiausia apkrovos jėga susidaro važiuojant suplotu smėliu – iki 445 N. Asfalto riedėjimo pasipriešinimo koeficientas trečdaliu mažesnis už žvyrkelio, todėl ir normalinė apkrova trečdaliu mažesnė. Tačiau pastaroji apkrova nėra pastovi. Greitėjant bagiui, didėja oro pasipriešinimas, elektromobilis stumiamas atgal ir dėl spyruoklių masės centras truputį pasistumia link automobilio galo, o sistemos modelyje įvertinta, kad yra viena varomoji ašis – priekinė. Pasislinkus masės centrui ir padidėjus atstumui nuo jo iki priekinės ašies, normalinė jėga sąlyčio vietoje nedaug sumažėja.

3.27 paveiksle pavaizduotas grafikas, kaip pasikeičia apkrovos kuriamas sukimo momentas ir kaip į ją reaguoja elektros pavarai. Kadangi normalinė apkrova yra viena iš apkrovos sukimo momento dedamųjų, tai važiavimas suplotu smėliu elektros pavarai yra sunkiausias (didžiausias apkrovos sukimo momentas). Normalinė apkrova greitėjant elektromobiliui nedaug kinta, o kitos apkrovos momento dedamosios šių bandymų metu yra vienodos, todėl grafikų kitimo greitis vienodas.



3.27 pav. Elektros pavaros ir apkrovos kuriami sukimo momentai, esant skirtingiems riedėjimo pasipriešinimo koeficientams

Atliekant bandymus įvesta šuolinė greičio įėjimo funkcija nuo 0 iki 32,4 m/s (žr. 3.28 pav.). Iš grafiko matyti, kad riedėjimo pasipriešinimo koeficientas neturi įtakos greičio kitimo valdymo modeliui ir nekeičia maksimalaus elektromobilio pagreičio. Bagiui greitėjant suploto smėlio kelio danga, nepasiekiamas maksimalus siekiamas greitis ir nusistovi anksčiau – ties 31,5 m/s greičiu. Norimas greitis nepasiekiamas dėl to, kad nebužtenka PMSM variklio galios rotorui sukis dideliu greičiu, esant 42 Nm sukimo momentui.



3.28 pav. Elektromobilio įsibėgėjimas iki maksimalaus greičio, esant skirtingiems riedėjimo pasipriešinimo koeficientams

Išvados ir siūlymai

Išvados

1. Įvertinus elektromobilio pavaros valdymo sistemą pastebėta, kad srovių PID reguliatoriai ir jų parametrai turi didesnės įtakos elektromobilio veikimui nei greičio PID reguliatorius, nes greičio įėjimo signalas yra perskaičiuojamas ir apribojamas papildomame greičio valdymo modelyje.
2. Pasirinktas elektros variklis be apkrovos su apskaičiuotais greičio ir srovių PID parametrais pakankamai sparčiai reaguoja į įėjimo signalo pokyčius, nes nuo 0 iki 5300 aps./min įsibėgėja per 0,85 s, o realioje sistemoje nustatomas greitis taip sparčiai nekinta.
3. Elektromobiliui važiuojant lygiu keliu ir neįvertinus kelio sukibimo koeficiento, dėl išorinės apkrovos sukimo momento PMSM variklio įsibėgėjimo laikas pailgėja beveik 3 kartus – iki 2,5 s, o toks laikas yra nepasiekiamas realiam analogiškam bagiui.
4. Įvertinus rato sukibimo su kelio danga koeficientą ir ratų praslydimą, variklio modelis maksimalų greitį važiuojant asfaltu pasiekia per 11 s, t. y. beveik 4,5 kartų lėčiau.
5. Įsibėgėjant elektromobiliui, dėl oro srauto pasipriešinimo apkrovos sukimo momentas pailgėja iki 4 kartų.
6. Modeliuojant važiavimą prieš vėją, elektros pavaros kuriamas sukimo momentas pailgėja iki 30 Nm esant 10 m/s vėjo greičiui, o važiuojant pavėjui sukimo momentas sumažėja iki 14,5 Nm esant 10 m/s vėjo greičiui.
7. Važiuojant prieš vėją, elektromobiliui nebeužtenka galios pasiekti maksimalaus važiavimo greičio ir esant 10 m/s vėjo pasipriešinimui, maksimalus greitis sumažėja iki 26,5 m/s.
8. Didžiausią įtaką apkrovos sukimo momentui turi kelio nelygumai – įkalnės ir nuokalnės.
9. Testuojant sistemos veikimą esant 2° įkalnei, elektromobilio maksimalus greitis sumažėja daugiau nei 2 kartus, t. y. iki 14,5 m/s. Atliekant bandymus pastebėta, kad tyrimui pasirinktas PMSM variklis būtų per silpnas realiai sistemai.
10. Važiuojant 2° nuokalne, PMSM variklis visą laiką kuria neigiamą sukimo momentą ir galėtų veikti regeneraciniu režimu.
11. Pasikeitus kelio dangai ir sumažėjus ratų sukibimo koeficientui, sumažėja maksimalus elektromobilio pagreitis, kuris ant sauso asfalto siekia 3 m/s², ant šlapio asfalto – 2,1 m/s², ant puraus sniego – 1,05 m/s², o ant ledo – 0,35 m/s².
12. Elektromobiliui įsibėgėjant ant ledo, maksimalus greitis pasiekiamas per 85 s, t. y. beveik 8 kartus lėčiau.

13. Kelio paviršius taip pat turi įtakos ir išorinės apkrovos sukimo momentui. Imituojant važiavimą ant suploto smėlio, apkrovos sukimo momentas pailgėja beveik 2 kartus lyginant su važiavimu ant asfalto.

Siūlymai

1. Parinkti galingesnę PMSM variklį ir palyginti elektromobilio pavaros valdymo sistemos modelio rezultatus su realia sistema.
2. Modelyje pakeisti atvirkštinės Clarke'o transformacijos bloką į erdvės vektoriaus PWM (angl. *Space Vector PWM*) bloką, kuris naudojamas PMSM pavarų valdikliuose, ir palyginti gautus rezultatus.
3. Įvertinti automobilio ratų dinamiką ir rato slydimo koeficiento skaičiavimą, kuris tiesiogiai turi įtakos automobilio pagreičiui.
4. Įtraukti elektromobilio baterijas į modeliuojamą sistemą ir išbandyti regeneracinį elektros variklio stabdymą.

Literatūra

1. De Lucena, S. (2011). *A Survey on Electric and Hybrid Electric Vehicle Technology*. Prieiga per internetą: <https://www.intechopen.com/books/electric-vehicles-the-benefits-and-barriers/a-survey-on-electric-and-hybrid-electric-vehicle-technology>.
2. *Elektromobilių įkrovimo stotelės*. Prieiga per internetą: <https://energija24.lt/elektromobiliu-ikrovimo-stoteles/>.
3. Paveikslo prieiga per internetą: <http://goevie.com.au/electric-car-charging/>.
4. *Types of electric vehicles: BEV, PHEV and HEV*. (2019). Prieiga per internetą: <https://www.evgo.com/why-evs/types-of-electric-vehicles/>.
5. Pirmą kartą įregistruotų Lietuvoje M1 klasės transporto priemonių skaičius pagal degalų rūšį 2021 m. sausio-balandžio mėn. Prieiga per internetą: <https://www.regitra.lt/lt/atviri-duomenys/>.
6. Reif, K. (2014). *Fundamentals of Automotive and Engine Technology*. Springer Vieweg, 277 p.
7. Halshaw, E. (2021). *The Difference Between Full Hybrid, Mild Hybrid and Plug-in Hybrid Cars*. Prieiga per internetą: <https://www.evanshalshaw.com/blog/difference-between-full-mild-and-plug-in-hybrid/>.
8. Paveikslo prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/figure/Hybrid-vehicle-configurations-A-parallel-B-series-and-C-power-split_fig3_224309401.
9. Mi, C., Masrur, A., Gao, D. W. (2011). *Hybrid Electric Vehicles*. West Sussex (UK): John Wiley and Sons. 448 p.
10. Riswick, J. (2019). *What is a Hybrid Car and How Do They Work*. Prieiga per internetą: <https://www.caranddriver.com/features/a26390899/what-is-hybrid-car/>.
11. Paveikslo prieiga per internetą: <https://insideevs.com/photo/4019820/audi-e-tron-electric-motor-explored-video/>.
12. Paveikslo prieiga per internetą: <http://www.ti.com/lit/ug/tiducs2b/tiducs2b.pdf>.
13. Zhao, J., Yu, Y. (2011). *Brushless DC Motor Fundamentals*. Prieiga per internetą: https://www.monolithicpower.com/pub/media/document/Brushless_DC_Motor_Fundamentals.pdf.
14. Paveikslo prieiga per internetą: https://www.monolithicpower.com/pub/media/document/Brushless_DC_Motor_Fundamentals.pdf.
16. Husain, I. (2011). *Electric and Hybrid Vehicles*. Taylor and Francis Group. 501 p.
17. Sakka, M., Mierlo, J., Gualous, H. (2010). *DC/DC Converters for Electric Vehicles*. Prieiga per internetą: <https://www.intechopen.com/books/electric-vehicles-modelling-and-simulations/dc-dc-converters-for-electric-vehicles>.
18. Paveikslo prieiga per internetą: <https://hackaday.com/2019/11/04/axiom-a-100kw-motor-controller-fo-making-big-motors-move/>.

19. Chang, H. R. (2014). *Reliable IGBTs for hybrid/electrical (H)EV*. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7049541>.
20. Khajepour, A., Fallah, S., Goodarzi, A. (2014). *Electric and Hybrid Vehicles*. West Sussex (UK): John Wiley and Sons. 415p.
21. Fernie, M. (2016). *How Do Electric Vehicles Produce Instant Torque?* Prieiga per internetą: <https://www.carthrottle.com/post/how-do-electric-vehicles-produce-instant-torque/>.
22. Paveikslo prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/figure/Torque-speed-characteristics-of-electric-motors-and-internal-combustion-engines_fig4_317051708.
23. Kwang Hee Nam. (2019). *AC Motor Control and Electrical Vehicle Applications*. Taylor and Francis Group. 556 p.
24. Paveikslo prieiga per internetą: <https://www.nidec.com/en/technology/motor/basic/00018/>.
25. Bello, A., Kilishi, I. M., Bari, M. M., Abubakar, U. (2014). *Comparative Review Of PMSM And BLDCM Based On Direct Torque Control Method*. Prieiga per internetą: <https://www.ijstr.org/final-print/mar2014/Comparative-Review-Of-Pmsm-And-Bldcm-Based-On-Direct-Torque-Control-Method-.pdf>.
26. Wilamowski, B. M., Irwin, J. D. (2017). *Power Electronics and Motor Drives*. CRC Press.
27. Mi, C., Masrur, M. A. (2017). *Hybrid Electric Vehicles Principles and Applications with Practical Perspectives*. Wiley. 693 p.
28. Hee, N. K. (2020). *AC Motor Control and Electrical Vehicle Applications*. CRC Press. 574 p.
29. Yang, N., Luo, G., Liu, W., Wang, K. (2012). *Interior permanent magnet synchronous motor control for electric vehicle using look-up table*.
30. Tranco, E., Ibarra, E., Arias, A., Salazar, C., Lopez, I., de Guerenú, A. D., Pena, A. (2016). *IPMSM torque control strategies based on LUTs and VCT feedback for robust control under machine parameter variations*.
31. P.D. Chandana Perera, F. Blaabjerg, J.K. Pedersen, and P. Thogersen. (2003). *A sensorless, stable v/f control method for permanent-magnet synchronous motor drives*. IEEE Transaction on industry applications.
32. R.D. Doncker, D.W.J. Pulle, A. Veltman. (2011). *Advanced Electrical Drives: Analysis, Modeling, Control*. Power Systems. Springer.
Prieiga per internetą: http://books.google.se/books?id=_sEDx2lAKboC.
33. Saadaoui, O., Khlaief, A., Abassi, M., Chaari, A., Boussak, M. (2015). *Position sensorless vector control of PMSM drives based on SMO*.
34. Asri, A., Ishak, D., Iqbal, S., Kamarol, M. (2011). *A speed sensorless field oriented control of parallel- connected dual PMSM*.

35. Abassi, M., Khlaief, A., Saadaoui, O., Chaari, A., Bousak, M. (2015). *Performance Analysis of FOC and DTC for PMSM Drives using SVPWM Technique*. IEEE.
36. Bida, V. M., Samokhvalov, D. V., Al-Mahturi F. Sh. (2018). *Vector Control Techniques – a Survey*. IEEE.
37. Paveikslo prieiga per internetą: <https://emrax.com/e-motors/emrax-188/>.
38. Lisauskas, S. (2012). *Šiuolaikinės elektros pavaros: mokomoji knyga*. Kaunas. 100p.
39. Daunys, K. (2016). *Šešiafazio variklio vektorinio valdymo sistemos tyrimas*. Baigiamasis magistro darbas. Vilnius.
40. Microsemi Corporation. (2013). *Park, Inverse Park and Clarke, Inverse Clarke Transformations MSS Software Implementation*. Prieiga per internetą: https://www.microsemi.com/document-portal/doc_view/132799-park-inverse-park-and-clarke-inverse-clarke-transformations-mss-software-implementation-user-guide.
41. Paveikslo prieiga per internetą:
https://projekter.aau.dk/projekter/files/17643253/PED4_1038C.pdf.
42. Group PED-9. (2007). *Control of a variable speed variable pitch wind turbine with full scale power converter*. Aalborg University.
43. Group PED-4. (2009). *Torque Control in Field Weakening Mode*. Aalborg University.
44. Liu, X., Zhou, Z., Wu, Q., Yang, Y., Zhu, X. (2020). *Research on Vector Control of PMSM Based on „fuzzy“ PI*. Shanghai.
45. Oussama, G., Douik, A. (2017). *Comparison between PI and „fuzzy“ controllers in speed control of PMSM*. GECS.
46. Hayes, J. G., Goodarzi, G. A. Elec. (2018). *Tric powertrain*. John Wiley and Sons. 557 p.
47. Jacobson, B. (2016). *Vehicle Dynamics Compendium for course MMF062*. Chalmers University of Technology. 281 p.
48. Jazar, N. R. (2008). *Vehicle Dynamics Theory and Application*. Springer Science + Business Media. 1022 p.
49. WLTP ir RDE. Prieiga per internetą: <https://www.fiat.lt/wltp-ir-rde/>.