



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Elektrinio motociklo valdymo sistemos sukūrimas ir jos derinimo tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Aidas Gaška

Projekto autorius

Prof. dr. Renaldas Urniežius

Vadovas

Kaunas, 2021



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Elektrinio motociklo valdymo sistemos sukūrimas ir jos derinimo tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Valdymo technologijos 6211EX014

Aidas Gaška

Projekto autorius

Prof. dr. Renaldas Urniežius

Vadovas

Doc. dr. Gintaras Dervinis

Recenzentas

Kaunas, 2021



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Aidas Gaška

Elektrinio motociklo valdymo sistemos sukūrimas ir jos derinimo tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

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

Aidas Gaška

Patvirtinta elektroniniu būdu

Gaška Aidas. Elektrinio motociklo valdymo sistemos sukūrimas ir jos derinimo tyrimas. Magistro baigiamasis projektas, vadovas prof. dr. Renaldas Urniežius; Kauno Technologijos Universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų kryptių grupė): elektronikos inžinerija, inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: elektrinis motociklas, greičio valdiklis, srovės reguliatorius, FOC.

Kaunas, 2021. 78 p.

Santrauka

Šiame darbe aprašomas elektrinio motociklo sistemos sukūrimas ir jos derinimo tyrimas.

Įvade aptariamos transporto priemonių problemos. Iškeliamas darbo tikslas, apžvelgiami uždaviniai, kurie bus atliekami magistrinio darbo metu.

Magistrinis darbas suskirstytas į šias dalis: literatūros apžvalgą, projektinę dalį ir eksperimentinį tyrimą. Literatūros apžvalgoje aprašomi gamintojų elektriniai motociklai, išnagrinėjami jų parametrai, specifikacijos. Apžvelgiami greičio valdikliai bei baterijų tipai naudojami elektrinių motociklų surinkime.

Teorinėje tyrimo dalyje skaičiuojama mechaninė galia tenkanti elektrinio motociklo ratui. Pagal šiuos skaičiavimus parenkamas elektrinio motociklo greičio valdiklis, elektrinis variklis, baterijų specifikacijos.

Projektinėje dalyje aprašomas elektrinio motociklo surinkimo procesas. Atliekami baterijos celių talpos įkrovimo ir iškrovimo bandymai. Remiantis eksperimentiniais bandymais, parenkamos celės galutiniam baterijos surinkimui.

Eksperimentinėje tyrimo dalyje atliekamas variklio holo jutiklių derinimas, sukuriamas matematinis FOC valdymo modelis. Pasirinktu metodu atliekamas srovės ir greičio valdiklių derinimas.

Gaška, Aidas. Development of electric motorcycle control system and research of its tuning. Master's Final Degree Project , supervisor prof. dr. Renaldas Urniežius; Faculty of Electrical and Electronics engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): electronics engineering, engineering science.

Keywords: electric motorcycle, speed controller, current regulator, FOC.

Kaunas, 2021. 78 p.

Summary

This work describes the development of an electric motorcycle system and the study of its adjustment.

The introduction discusses vehicle issues. The aim of the work is also set, the tasks that will be performed during the master`s thesis are reviewed.

The master`s thesis is divided into the following parts: literature review, design part and experimental research. The literature review describes the manufacturers of electric motorcycles, examines their parameters and specifications. The speed controllers and battery types used in the assembly of electric motorcycles are reviewed.

In the theoretical part of the study, the mechanical power per electric motorcycle wheel is calculated. Based on these calculations, the electric motorcycle speed controller, electric engine and battery specifications are selected.

The design part describes the assembly process of an electric motorcycle. Battery cell capacity charging and discharging tests are performed. Based on these experimental studies, cells are selected for final assembly.

In the experimental part of the research, the tuning of the electrical motor hall sensors is performed, a mathematical model of FOC control is created. Speed and currents controllers adjustment are performed by selected tuning method.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų ir terminų sąrašas	11
Įvadas.....	12
Problemos formulavimas	12
Darbo aktualumas	12
Tyrimų objektas.....	12
Darbo tikslas	12
Darbo uždaviniai.....	12
Tyrimų metodika	13
Darbo mokslinis naujumas	13
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	13
1. Literatūros apžvalga	14
1.1. Elektrinių motociklų rinkos analizė.....	14
1.2. Elektrinio motociklo pavaros konstrukcija ir veikimo principas	17
1.3. BLDC variklio veikimo principas	20
1.4. Bešepetėlinių nuolatinės srovės variklių valdiklių tipai	22
1.5. Elektrinės transporto priemonės baterijų tipai.....	23
2. Elektrinio motociklo pavaros konstrukcijos skaičiavimai.....	24
3. Projektinė dalis	30
3.1. Pasirinktų komponentų sąrašas.....	30
3.2. Elektrinio motociklo valdiklis	31
3.3. Elektrinio motociklo variklis	32
3.4. Elektrinio motociklo baterijos konstrukcija	33
3.5. Elektrinio motociklo valdymo sistema	42
3.6. Elektrinio motociklo konstrukcijos surinkimas.....	45
4. Tiriamoji dalis.....	47
4.1. Elektrinio variklio holo jutiklių kalibravimo tyrimas.....	47
4.2. Valdymo sistemos matematinio modelio sukūrimas	55
4.3. Matematinio modelio derinimo tyrimas pagal realaus valdiklio parametrus	59
4.4. Elektrinio motociklo valdiklio derinimo tyrimas	68
Išvados ir rezultatai	74
Informaciniai šaltiniai	75
5. Priedai.....	79
1 priedas. Motociklo elektrinio variklio laikiklis	79
2 priedas. Motociklo elektrinio variklio veleno priekinės žvaigždės laikiklis	80
3 priedas. Reader.py programos kodas.....	81

Lentelių sąrašas

1.1 lentelė. Baterijų specifikacijų lentelė pagal baterijos cheminę sudėtį	23
2.1 lentelė. Kuriamo elektrinio motociklo techninės specifikacijos parametrai.....	27
2.2 lentelė. 10 kW vardinės variklio galios skaičiavimai	28
2.3 lentelė. 3 kW vardinės variklio galios skaičiavimai	28
3.1 lentelė. Elektrinio motociklo komponentų su išlaidomis sąrašas	30
3.2 lentelė. HPM3000B variklio techninės specifikacijos parametrai.....	32
4.1 lentelė. Zieglerio-Nicholso KP ir KI koeficientų skaičiavimo lentelė	68
4.2 lentelė. Zieglerio-Nicholso KP ir KI koeficientų lentelė, gauta srovės regulatoriaus derinimo metu	70
4.3 lentelė. Zieglerio-Nicholso KP ir KI koeficientų lentelė, gauta srovės ir greičio regulatorių derinimo metu.....	72

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. City Slicer elektrinis motociklas [1].	14
1.2 pav. City Slicer elektrinio motociklo prietaisų skydelis [1].	14
1.3 pav. CR6 elektrinis motociklas [2].	15
1.4 pav. „Super Soco“ gamintojo TC serijos elektrinis motociklas [4].	15
1.5 pav. Harley Davidson gamintojo LiveWire serijos elektrinis motociklas [7].	16
1.6 pav. Zero gamintojo SR-F serijos elektrinis motociklas [10].	16
1.7 pav. Bešepetėlinis nuolatinės srovės variklis skirtas tiesioginei pavaros sistemai.	17
1.8 pav. Mid-drive pavaros tipas [12].	18
1.7 pav. Inrunner (a) ir outrunner (b) bešepetėlinio variklio konstrukcija [18].	20
1.8 pav. Bešepetėlinio nuolatinės srovės variklio grandinės schema [19].	20
1.9 pav. Bešepetėlinio nuolatinės srovės variklio signalų formos [21].	22
2.1 pav. Įkalnės kampas.	24
2.2 pav. Menamas vėjo greitis ir kampas [27].	25
3.1 pav. Gen4 BLDC variklio greičio valdiklis.	31
3.2 pav. HPM3000B BLDC / PMSM variklis [33].	32
3.3 pav. Variklio konstrukcija atsukus galinį variklio dangtį.	33
3.4 pav. Variklio konstrukcija atsukus priekinį variklio dangtį.	33
3.5 pav. „Sony / Murata“ gamintojo VTC6 celė.	38
3.6 pav. „Litokala“ gamintojo HG2 modelio celė.	38
3.7 pav. VTC6 celės testas su apkrova.	38
3.8 pav. HG2 celės testas su apkrova.	39
3.9 pav. Principinė celės su apkrovos varža jungimo schema [34].	39
3.10 pav. BMS valdiklis.	41
3.11 pav. Principinė baterijos celių su BMS jungimo schema.	41
3.12 pav. 18650 celių tipo rėmeliai.	42
3.13 pav. Principinė valdiklio jungimo schema į bendrą motociklo valdymo sistemą.	42
3.14 pav. AEV6505A rėlė.	43
3.15 pav. Jungiklių montavimo vieta.	43
3.16 pav. DB9 į RS232 perėjimas	44
3.17 pav. Programoje pasirenkamas kontaktorius.	44
3.18 pav. Priskiriami skaitmeniniai signalai.	44
3.19 pav. Priskiriamas analoginis signalas greičio rankenai.	44
3.20 pav. Motociklo rėmas prieš restauraciją.	45
3.21 pav. Motociklo rėmas po restauracijos.	45
3.22 pav. Pirminis variklio laikiklio eskizas.	45
3.23 pav. Elektrinio motociklo variklio laikiklis.	45
3.24 pav. Elektrinio motociklo priekinės žvaigždės laikiklis.	46
3.25 pav. Suderintas grandinės aukštis.	46
3.26 pav. Motociklo bendras vaizdas surinkus mechaninius komponentus.	46
3.27 pav. Elektrinis motociklas paruoštas tiriamajai darbo daliai.	46
4.1 pav. Holo jutiklių bendriniai parametrai.	47
4.2 pav. Įvedami variklio parametrai.	47
4.3 pav. „Control motor on test bench“ funkcijos darbo langas.	48

4.5 pav. Parametrų vertės atstatomos į pradines (a) ir paleidžiamas duomenų įrašymas į CSV formato failą (b).	48
4.6 pav. Duomenys iš valdiklio atvaizduojami realiu laiku.	49
4.7 pav. Pasirenkamas CSV tipo failas.	49
4.8 pav. Klaidos kodas.	49
4.9 pav. Netinkamai suformatuoto CSV failo fragmentas.	50
4.10 pav. Tinkamai suformatuoto CSV failo fragmentas.	50
4.11 pav. Greičio režimas, U_q nuo U_d grafikas, holo jutiklių nuokrypis -52° , K_e vertė – 0,0212 V/(rad/s).	51
4.12 pav. Greičio režimas, U_q nuo U_d grafikas, holo jutiklių nuokrypis -58° , K_e vertė – 0,0212 V/(rad/s).	51
4.13 pav. Greičio režimas, U_q nuo U_d grafikas, holo jutiklių nuokrypis -58° , K_e vertė – 0,0214 V/(rad/s).	52
4.14 pav. Sukimo momento režimas, U_q nuo U_d grafikas, holo jutiklių nuokrypis -52° , K_e vertė – 0,0212 V/(rad/s).	52
4.15 pav. Sukimo momento režimas, U_q nuo U_d grafikas, holo jutiklių nuokrypis $-58,688^\circ$, K_e vertė – 0,0209 V/(rad/s).	53
4.16 pav. Sukimo momento režimas, U_q nuo U_d grafikas, holo jutiklių nuokrypis $-58,688^\circ$, K_e vertė – 0,0211 V/(rad/s).	53
4.17 pav. Sukimo momento režimas, U_q nuo U_d grafikas, holo jutiklių nuokrypis $-53,875^\circ$, K_e vertė – 0,0216 V/(rad/s).	54
4.18 pav. Sukimo momento režimas, U_q nuo U_d grafikas, holo jutiklių nuokrypis -58° , K_e vertė – 0,0214 V/(rad/s).	54
4.19 pav. Holo jutiklių kalibravimo ir testo atlikimo loginė schema.	55
4.21 pav. Valdymo sistemos Matlab Simulink modelis.	57
4.22 pav. PMSM FOC blokas.	58
4.23 pav. Valdymo režimo pasirinkimas.	58
4.24 pav. Pilnavidurio ritinio ar disko inercija x ir y ašimis.	59
4.25 pav. Elektrinio motociklo siektinų I_{d_ref} , I_{q_ref} ir realių I_d , I_q srovių (a) bei variklio veleno greičio (b) pereinamieji vyksmai, kai srovės kontūro $K_P = 4,00$, $K_I = 0,01$, sukimo momento konstanta $K_T = 0,0833 \text{ N}\cdot\text{m} / \text{A}$	60
4.26 pav. Elektrinio motociklo T_e ir siektinos T_{ref} sukimo momento (a) bei baterijos įtampos ir srovės (b) pereinamieji vyksmai, kai srovės kontūro $K_P = 4,00$, $K_I = 0,01$, sukimo momento konstanta $K_T = 0,0833 \text{ N}\cdot\text{m} / \text{A}$	61
4.27 pav. Matematinio modelio siektinų I_{d_ref} , I_{q_ref} ir realių I_d , I_q srovių (a) bei variklio veleno greičio (b) pereinamieji vyksmai, kai srovės kontūro $K_P = 4,00$, $K_I = 0,01$, sukimo momento konstanta $K_T = 0,0833 \text{ N}\cdot\text{m} / \text{A}$	62
4.28 pav. Matematinio modelio valdiklio T_e ir siektinos T_{ref} sukimo momento (a) bei baterijos srovės (b) pereinamieji vyksmai, kai srovės kontūro $K_P = 4,00$, $K_I = 0,01$, sukimo momento konstanta $K_T = 0,0833 \text{ N}\cdot\text{m} / \text{A}$	63
4.29 pav. Elektrinio motociklo siektinų I_{d_ref} , I_{q_ref} ir I_d , I_q srovių (a) bei variklio veleno greičio (b) pereinamieji vyksmai, kai greičio kontūro $K_P = 0,25$, $K_I = 0,005$, srovės kontūro $K_P = 4,00$, $K_I = 0,01$, sukimo momento konstanta $K_T = 0,0833 \text{ N}\cdot\text{m} / \text{A}$	64
4.30 pav. Elektrinio motociklo T_e ir siektinos T_{ref} sukimo momento (a) bei baterijos įtampos ir srovės (b) pereinamieji vyksmai, kai greičio kontūro $K_P = 0,25$, $K_I = 0,005$, srovės kontūro $K_P = 4,00$, $K_I = 0,01$, sukimo momento konstanta $K_T = 0,0833 \text{ N}\cdot\text{m} / \text{A}$	65

4.31 pav. Matematinio modelio siektinų I_{d_ref} , I_{q_ref} ir realių I_d , I_q srovių (a) bei variklio veleno greičio (b) pereinamieji vyksmai, kai greičio kontūro $K_P = 0,25$, $K_I = 0,005$, srovės kontūro $K_P = 4,00$, $K_I = 0,01$, sukimo momento konstanta $K_T = 0,0833 \text{ N}\cdot\text{m} / \text{A}$	66
4.32 pav. Matematinio modelio valdiklio T_e ir siektinos T_{ref} sukimo momento (a) bei baterijos srovės (b) pereinamieji vyksmai, kai greičio kontūro $K_P = 0,25$, $K_I = 0,005$, srovės kontūro $K_P = 4$, $K_I = 0,01$, sukimo momento konstanta $K_T = 0,0833 \text{ N}\cdot\text{m} / \text{A}$	67
4.33 pav. Zieglerio-Nicholso derinimo būdu gauti elektrinio motociklo siektinų I_{d_ref} , I_{q_ref} ir I_d , I_q srovių (a) bei T_e ir T_{ref} (b) pereinamieji vyksmai.....	69
4.34 pav. Zieglerio-Nicholso derinimo būdu gauti elektrinio motociklo variklio veleno greičio (a) bei baterijos srovės ir įtampos (b) pereinamieji vyksmai.....	70
4.35 pav. Zieglerio-Nicholso derinimo būdu gauti elektrinio motociklo siektinų I_{d_ref} , I_{q_ref} ir I_d , I_q srovių (a) bei T_e ir T_{ref} (b) pereinamieji vyksmai.....	71
4.36 pav. Zieglerio-Nicholso derinimo būdu gauti elektrinio motociklo variklio veleno greičio (a) bei baterijos srovės ir įtampos (b) pereinamieji vyksmai.....	72

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

Terminai:

BLDC (angl., brushless DC electric motor) – bešepetėlinis nuolatinės srovės variklis.

PMAC (angl., permanent magnet AC motor) – nuolatinių magnetų kintamos srovės variklis.

PMSM (angl., permanent magnet synchronous machine) – nuolatinių magnetų sinchroninis įrenginys

FOC (angl., field – oriented control) – magnetino lauko valdymas.

HPM (angl., high power motor) – didelės galios variklis.

RPM (angl., rotations per minute) – apsisukimai per minutę.

BMS (angl., battery management system) – baterijos valdymo sistema.

CSV (angl., comma seperated values) – kableliais atskirtos reikšmės.

CMD (angl., command prompt) – operacinių sistemų komandų eilutės vertėjas.

Įvadas

Problemos formulavimas

Paskutiniu metu aktualios išmetamųjų dujų sukeliančios šiltnamio efektą, tankiai apgyvendintų miestų, užmiesčių oro kokybės problemos, kurios eikvoja iškastinį kurą. Šios problemos skatina ieškoti alternatyvių sprendimo būdų kaip to išvengti, vienas tokių sprendimo būdas pasiūlyti elektrinius motociklus šalyse, kuriose yra didelis gyventojų skaičius, ar šalyse, kurių miestų centruose draudžiamas lengvųjų, sunkiasvorių automobilių eismas. Siūlant konkurencingą produktą rinkoje, privaloma išmanyti motociklo elementų surinkimą bei elektrinės sistemos valdymą, siekti šios sistemos energetinio efektyvumo

Vis labiau populiarėjanti transporto priemonė Europoje, tuo pačiu ir Lietuvoje – elektrinis motociklas. Įprastiniu, benzininiu, motociklu patogų įveikti 300 – 500 km atstumus su pilnu baku kuro, tačiau nuvažiuojamas atstumas yra pagrindinė elektrinio motociklo problema. Siekiant, jog elektrinė transporto priemonė galėtų dalyvauti miesto eisme bei įveikti didesnius atstumus reikia sukurti sistemą, kuri leistų efektyviai valdyti bešepetėlinio variklio pavarą. Elektrinio motociklo valdymo sistema turi užtikrinti, jog žmogus važiuojantis šia transporto priemone sugebės ją suvaldyti pajudėdamas iš vietos, važiuodamas skirtingomis kelio dangomis, o taip pat valdymo sistema turi užtikrinti tinkamą srovės valdymą siekiant įvažiuoti į skirtingų laipsnio statumų įkalnes.

Darbo aktualumas

Šiuo metu pasaulyje griežtėja ekologiniai reikalavimai transporto priemonių gamintojams. Todėl siekiant išnaudoti jau turimus resursus ketinama siūlyti benzininių motociklų konversijos paslaugą į elektrinius, panaudojant seno motociklo mechaninius komponentus bei įdiegiant elektrinę valdymo sistemą.

Bešepetėliniai nuolatinės srovės bei asinchroniniai varikliai plačiai naudojami transporto, karinėje, robotikos pramonėse. Šių variklių paklausa yra auganti tiek automobilių, tiek motociklų pramonės sektoriuose, dėl pastebėtų privalumų. Siekiant suprasti, kaip tinkamai valdyti elektrinės transporto priemonės variklio ir valdiklio pereinamuosius procesus, naudojamas FOC valdymo modeliavimas. Šio modeliavimo pagalba būtų lengvesnis skirtingų gamintojų variklių ir valdiklių tarpusavio derinimas.

Tyrimų objektas

Tyrimų objektas – elektrinio motociklo BLDC / PMSM variklio valdymas, pereinamieji procesai esant skirtingoms srovės ir greičio valdiklių KP ir KI dedamosioms, kai variklio veleną veikia numatytoji apkrova.

Darbo tikslas

Atlikti skaičiavimus elektrinio motociklo komponentų parinkimui, surinkti elektrinio motociklo valdymo sistemą iš parinktų komponentų, atlikti valdymo sistemos derinimo tyrimą.

Darbo uždaviniai

Žemiau pateikiami pagrindiniai darbo uždaviniai:

1. konkurentų ir gamintojų gaminių rinkos apžvalga. Šis uždavinys išskaidomas į šiuos punktus:
 - atlikti elektrinių motociklų rinkos apžvalgą;
 - apžvelgti greičio valdiklius ir baterijas, kurios naudojamos elektrinėse transporto priemonėse.
2. elektrinio motociklo valdymo sistemos komponentų parinkimas. Šis uždavinys išskaidomas į šiuos darbus:
 - atlikti mechaninius elektrinio motociklo skaičiavimus, pagal tai parinkti variklio ir valdiklio komponentus;
 - atlikti baterijos celių iškrovimo testus, pagal testų rezultatus parinkti komponentus baterijos surinkimui.
3. paruošti elektrinio motociklo valdymo sistemą derinimui. Šis uždavinys išskaidomas į šiuos punktus:
 - sujungti elektronikos komponentus į bendrą valdymo sistemą;
 - parašyti duomenų tvarkyklės programą holo jutiklių kalibravimui;
 - atlikti holo jutiklių kalibravimo tyrimą.
4. atlikti elektrinio motociklo greičio valdiklio derinimo tyrimą. Šis uždavinys išskaidomas į šiuos darbus:
 - išnagrinėti FOC valdymo veikimo principą ir sukurti matematinį modelį;
 - suderinti elektrinio motociklo valdiklio srovės ir greičio reguliatorių KP ir KI dedamąsias pagal pasirinktą derinimo metodą.

Tyrimų metodika

Šiame darbe naudojami eksperimentinio tyrimo metodai, objektinis FOC valdymo kompiuterinis modelio sudarymas Matlab / Simulink aplinkoje.

Darbo mokslinis naujumas

Atliekant darbo uždavinius yra gautas šio darbo mokslinio naujumo rezultatas:

- bešepetėlinio variklio elektrinės pavaros derinimas elektrifikuojant motociklą.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Elektrifikuojant motociklą sukurta praktinė valdymo sistema. Sukurtas objektinis FOC matematinis modelis, eksperimentiniu būdu suderinta antros eilės netiesinė sistema. Sukonstruotas ir suderintas elektrinis motociklas, po atliktos transporto priemonės ekspertizės ir techninės apžiūros bus naudojamas viešajame eisme.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Elektrinių motociklų rinkos analizė

Elektrinių motociklų kaina rinkoje šiuo metu svyruoja nuo 2 200 € iki 20 000 €. Didelę elektrinio motociklo kainą nulemia techninės specifikacijos, važiavimo pobūdžio pasirinkimas. Pagal žemiausią kainą ir specifikacijas rinkoje dalis elektrinių motociklų gali pasiekti 3 kW – 5 kW momentinę galią, turėti 48 V – 72 V įtampos valdymo sistemą, nuvažiuoti 60 km – 100 km atstumą, pavyzdžiui kaip: JAV gamintojo „CSC“ elektrinis motociklas City Slicker [1], „Horwin“ gamintojo CR6 elektrinis motociklas [2], „Super Soco“ gamintojo TC elektrinis motociklas [3].

„CSC“ gamintojo City Slicker elektrinis motociklas sveria 98 kg, maksimali apkrova 150 kg. Naudojamas 1.5 kW vardinės galios variklis, maksimali galia 3.2 kW. Šioje transporto priemonėje integruota 72 V, 30 Ah ličio jonų baterija. Baterija kraunama 120 VAC įtampa, įkrovimo laikas 6 – 8 valandos. Variklio galia ir sukimo momentas į ratą perduodamas diržine pavara. Maksimalus greitis – 75 km/h, nuvažiuojamas atstumas 60 km važiuojant 60 km/h greičiu, arba nuvažiuojamas maksimalus 100 km atstumas važiuojant 32 km/h greičiu (žr. 1.1 pav.)[1].



1.1 pav. City Slicer elektrinis motociklas [1].

Šio gamintojo elektrinė transporto priemonė turi atbulinės eigos funkciją, padedančią vairuotojui išsistumti motociklą iš sunkių parkavimo vietų. Žemiau pateikiamas motociklo prietaiso skydelio vaizdas (1.2 pav)[1].



1.2 pav. City Slicer elektrinio motociklo prietaisų skydelis [1].

Prietaisų skydelyje gaunami šie pagrindiniai parametrai iš greičio valdiklio: nuvažiuotas atstumas kilometrais, greičio valdiklio temperatūra laipsniais, akumuliatoriaus lygis procentais, motociklo važiavimo greitis kilometrais per valandą. Šio motociklo kaina su mokesčiais – 2 200 €.

Austrijos „Horwin“ gamintojo elektrinis motociklas CR6 (žr. 1.3 pav.) sveria 134 kg, maksimali apkrova 174 kg. Naudojamas bešepetėlinis nuolatinės srovės variklis, kuris maksimaliai gali išvystyti

6.2 kW galią. Motociklo galinio rato sukimo momentas – 260 N · m. Elektrinis variklis valdomas orientuoto lauko valdymo (angl. FOC) režimu.



1.3 pav. CR6 elektrinis motociklas [2].

CR6 elektrinis motociklas nuo 0 – 60 km/h išibėgėja per 6 sekundes. Maksimalus greitis 92 km/h. Maksimali įvažiuojama įkalnė – 17 laipsnių statumo. Šioje transporto priemonėje naudojama ličio jonų baterija pagaminta iš „Panasonic“ gamintojo 18650 tipo celių. Baterijos įtampa yra 72 V, talpa 55 Ah, kraunama 220 VAC įtampos pakrovėju, 15 A srove. Nuo 0 – 80 % baterija įkraunama per 3 valandas. Maksimalus nuvažiuojamas atstumas 150 km važiuojant 45 km/h greičiu. Šio motociklo kaina su mokesčiais – 6 290 € [2].

Jungtinės Karalystės „Super Soco“ gamintojo TC serijos elektrinis motociklas (žr. 1.4 pav.) [3] sveria 84 kg, maksimali apkrova – 115 kg. Šioje transporto priemonėje naudojamas „Bosch“ gamintojo bešepetėlinis 1.5 kW vardinės galios ir 3.5 kW maksimalios galios nuolatinės srovės variklis, kuris įmontuotas galiniame rate. Motociklo galinio rato sukimo momentas – 150 N · m. Maksimalus sukimo momentas pasiekiamas ties 450 rpm riba. Elektrinis variklis valdomas orientuoto lauko valdymo (angl. FOC) režimu paremtas dinaminio vektoriaus valdymo algoritmu, skirtu greičio ir sukimo momento valdymui [4].



1.4 pav. „Super Soco“ gamintojo TC serijos elektrinis motociklas [4].

TC serijos motociklo maksimalus greitis 70 km/h. Šioje transporto priemonėje naudojama ličio jonų baterija sudaryta iš „Panasonic“ gamintojo 18650 tipo celių. Baterijos įtampa – 60 V, talpa 30 Ah. Baterija turi integruotą BMS valdiklį, kuris maksimaliai gali išduoti 85 A srovę. Baterijai įkrauti naudojamas 120 V kintamos įtampos įkroviklis, kurio išėjime išduodama 60 V nuolatinė įtampa ir 5 A srovė. Sistemoje yra įmontuotas DC / DC, iš 60 V į 12 V, 10 A srovės įtampos keitiklis, skirtas šviesų užmaitinimui. Naudojant vieną bateriją TC serijos elektriniu motociklu važiuojant eko režimu, 45 km/h greičiu įveikiamas maksimalus 80 km atstumas, važiuojant 62 km/h greičiu įveikiamas 60 km atstumas, o pasirinkus sportinį režimą važiuojant 70 km/h greičiu įveikiamas 50 km atstumas. Maksimali įkalnė į kuria motociklininkas, sveriantis iki 120 kg, kartu su motociklu gali įvažiuoti yra 10 laipsnių statumo [5]. Šio motociklo kaina su mokesčiais – 3 466 €.

Aptartų elektrinių motociklų kaina rinkoje svyruoja nuo 2 200 € iki 6 290 €, o pagal technines specifikacijas šie motociklai nepriklauso didelės galios motociklų klasei. Pagal technines

specifikacijas tokių gamintojų, kaip „Zero“ ar „Harley Davidson“ elektriniai motociklai priklauso didelės galios klasei. Šių motociklų savikainą sudaro didelės galios nuolatinės srovės bešepetėliniai varikliai, greičio valdikliai ir talpios baterijos.

„Harley Davidson“ gamintojo Live Wire serijos elektrinis motociklas (žr. 1.5 pav.) sveria 249 kg, maksimali apkrova 181 kg. Šioje transporto priemonėje naudojamas 78 kW nuolatinės srovės sinchroninis bešepetėlinis, aušinamas vandeniu, elektrinis variklis. Variklio sukimo momentas $116 N \cdot m$, maksimalūs variklio sūčiai per minutę – 15 000 rpm. Elektriniame motocikle naudojama diržinė pavara, kurios redukcijos santykis – 9,706 [6].



1.5 pav. Harley Davidson gamintojo LiveWire serijos elektrinis motociklas [7].

„Harley Davidson“ motocikle integruota iš Samsung gamintojo celių pagaminta 225 V ličio jonų baterija, kurios talpa 15,50 kWh. Ši baterija pilnai pakraunama per 60 minučių [7]. LiveWire motociklo nuvažiuojamas atstumas mieste – 225 kilometrai, tačiau važiuojant tiek greitkeliu, tiek mieste nuvažiuojamas atstumas siekia 142 kilometrus. Motociklas nuo 0 – 97 km/h greitį pasiekia per 3 sekundes. Maksimalus greitis – 180 km/h [8]. Šio motociklo kaina Europos rinkoje – 33 000 € [7].

Lietuvių gamintojo „Zero“ SR-F serijos elektriniame motocikle (žr. 1.6 pav.) įmontuotas 3 fazių bešepetėlinis, apibūdinamas kaip nuolatinio magneto kintamos srovės sinchroninis (angl. PMAC) variklis [9]. Šis variklis gali išvystyti 82 kW maksimalią galią, o nuolatinė vardinė 30 minučių galia – 40 kW. SR-F elektrinis motociklas gali pasiekti maksimalų $190 N \cdot m$ sukimo momentą. Naudojama diržinė pavara, redukcijos santykis – 4,5. Motociklo svoris – 220 kg, o maksimali apkrova 234 kg [10].



1.6 pav. Zero gamintojo SR-F serijos elektrinis motociklas [10].

Šis motociklas turi įmontuotą 12,6 kWh vardinės talpos ličio jonų bateriją. Baterijai įkrauti naudojamas IEC 62196 Type 2 įkroviklis. Motociklas kraunamas 100 – 240 V kintama elektros

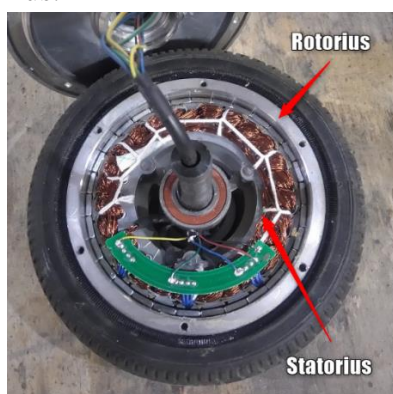
įtampa namuose arba viešojoje įkrovimo stotelėje. Baterija iki 100 % įkraunama per 4,5 valandas [10]. SR-F serijos motociklas gali pasiekti maksimalų 200 km/h greitį, o nuvažiuojamas atstumas mieste – 259 km, greitkelyje važiuojant 89 km/h – 159 km [10]. Ši elektrinė, standartinės komplektacijos motociklą, skirtą Europos rinkai, galima įsigyti už 21 700 €.

Didelės galios klasės elektrinėmis transporto priemonėmis įmanoma įveikti 142 – 259 km atstumą. Šių elektrinių motociklų variklio vardinė galia siekia nuo 40 – 78 kW. Remiantis techninėmis specifikacijomis šių transporto priemonių kaina svyruoja nuo 21 700 – 33 000 €.

1.2. Elektrinio motociklo pavaros konstrukcija ir veikimo principas

Elektriniuose motocikluose naudojamos mechaninės galios perdavimo sistemos. Perdavimo sistema elektrinę galią gaunamą iš elektrinio variklio paverčia mechanine energija, o ši energija perduodama į transporto priemonės ratą tiesiogiai arba per papildomus elementus. Yra keli šių sistemų konstrukcijos tipai: tiesioginės pavaros sistema, kai elektrinis variklis įmontuotas pačiame rate (angl., direct-drive) arba vidurinės pavaros sistema, kuomet elektrinė variklio galia perduodama per diržinę ar grandininę pavarą į besisukantį ratą (angl., mid-drive).

Tiesioginės pavaros sistemą sudaro besisukantis variklis, kuris turi tiesioginį sąlytį su apkrova be jokių mechaninių transmisijos elementų, tokių kaip pavarų dėžė ar diržinė, grandininė, skriemulių sistemos [11]. Tiesinėje pavaros sistemoje dažniausiai naudojamas bešepetėlinis nuolatinės srovės variklis, kuris kaip statorius įtvirtintas į transporto priemonės rėmą, o rotorius sudaro ratlankis su padanga (angl. Hub motor). Žemiau esančiame paveiksle (žr. 1.7 pav.) pateiktas stebulės variklio vaizdas, nurodytas statorius ir rotorius.



1.7 pav. Bešepetėlinis nuolatinės srovės variklis skirtas tiesioginei pavaros sistemai.

Vidurinės pavaros sistemą sudaro bešepetėlinis nuolatinės srovės variklis, transmisija bei ratlankis su padanga. Elektriniame motocikle transmisiją gali sudaryti: dantytas diržas su skriemuliais ant elektrinio variklio veleno ir galinio rato bei grandinė su žvaigždėmis ant elektrinio variklio veleno ir galinio rato. Žemiau esančiame paveiksle (žr. 1.8 pav.) pateikiamas vidurinės pavaros sistemos vaizdas, kuriame matomas variklis, dantytas diržas ir skriemuliai.



1.8 pav. Mid-drive pavaros tipas [12].

Grandininės sistemos privalumai [13]:

- patogus komponentų montavimas ir pakeitimas;
- lengvas redukcijos santykio keitimas;
- rinkoje didesnis grandinių ir žvaigždžių pasirinkimas negu dantyto diržo su skriemuliais, todėl grandininės sistemos elementai yra pigesni.

Grandininės sistemos trūkumai [13]:

- intensyvesnė komponentų priežiūra negu diržinės sistemos;
- grandinė turi būti valoma ir sutepama kas 400 km;
- trumpas tarnavimo laikas, greitesnis komponentų nusidėvėjimas lyginant su diržine sistema.

Diržinės pavaros privalumai [13]:

- lengva komponentų priežiūra;
- diržas kelia mažai triukšmo lyginant su grandinine sistema;
- diržas neišmeta tepalo ant motociklo ar vairuotojo rūbų;
- ilgas tarnavimo laikas.

Diržinės pavaros trūkumai [13]:

- sudėtinga diržo pakeitimo procedūra kelionėje;
- norint keisti redukciją, reikia pakeisti ir diržą, jo kaip grandinės sutrumpinti neįmanoma;
- diržinės pavaros komponentai rinkoje yra brangesni;
- naudojant motociklą su diržine pavara nerekomenduojama transporto priemonės eksploatuoti bekele, kadangi žvyras ir smėlis kenkia diržinės pavaros komponentams, didelė tikimybė, jog skriemulių grioveliai apsineš purvu ir diržas nuo skriemulių nukris.

Remiantis laboratorinio testo diržinės ir grandininės pavaros lyginimo rezultatais, grandininės pavaros sistema yra efektyvesnė nuo 0,3 % iki 1,0 % prie mažos galios, kuomet variklio galia mažesnė negu 212 W, tačiau diržės pavaros sistema yra efektyvesnė esant didesnei variklio galiai, kuomet galia didesnė negu 212 W[14].

Dviejų žvaigždžių grandinės sistemos efektyvumas pagrįstas trinties nuostoliais grandinėje. Grandinės efektyvumas apskaičiuojamas darant prielaidą, kad energijos poreikis varomajai žvaigždei yra žinomas. Efektyvumas apskaičiuojamas pagal 1.1 formulę [15][16]:

$$\eta = \frac{P_o}{P_o + n_s \omega_s \Sigma W'} \quad (1.1)$$

čia P_o – variklio galia (W), n_s – motociklo žvaigždės dantų skaičius, ω_s – motociklo žvaigždės kampinis greitis (rad/s), W – atliktas darbas (J).

Apibendrinant elektrinio motociklo pavarų perdavimo sistemas tiek tiesinės, tiek vidurinės pavaros sistemos turi privalumų ir trūkumų. Tiesinės pavaros sistemos privalumai [17]:

- sistema nereikalaujanti ypatingos priežiūros, dėl nedidelio dylančių komponentų kiekio;
- stbuliniai varikliai yra pigesnis už vidurinės pavaros variklius;
- stbulinis variklis be papildomų komponentų gali būti įmontuojamas elektrinio motociklo priekyje ir gale;

Tiesinės pavaros sistemos trūkumai [17]:

- tiesinės pavaros varikliuose nėra galimybės keisti pavarų perdavimo santykio;
- stbuliniai varikliai yra sunkesni už įprastinius vidurinės pavaros variklius;
- stbulinių variklių komponentų, tokių kaip: ratlankiai, padangos rinkoje pasirinkimas yra ribotas;
- sudėtingas padangos pakeitimas, kadangi norint ją pakeisti reikia atjungti variklio laidus.

Vidurinės pavaros sistemos privalumai [17]:

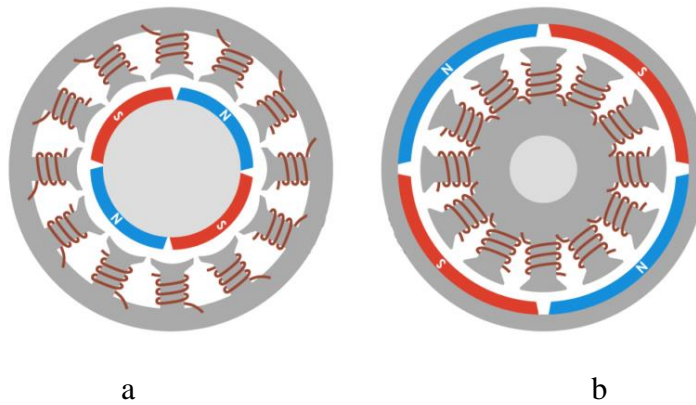
- galimybė keisti pavarų perdavimo santykį;
- prie mažų variklio greičių, vidurinę pavarą turintis elektrinis motociklas gali įvažiuoti į statesnę įkalnę, lyginant su tokios pat galios stbuliniu varikliu;
- mažesnė perkaitimo rizika negu stbulinio variklio;
- lengviau pakeisti galinę padangą negu tiesinės pavaros perdavimo sistemoje;
- didesnis padangų ir ratlankių pasirinkimas;
- geresnės variklio aušinimo galimybės negu tiesinės pavaros perdavimo sistemoje.

Vidurinės pavaros sistemos trūkumai [17]:

- trumpas grandinės ir žvaigždžių tarnavimo laikas;
- reguliariai reikia atlikti grandinės valymo ir sutepimo darbus;
- grandinės arba diržo integravimas pavaros perdavimo sistemoje nulemia ir apriboja važiavimo galimybes įvairiomis kelio dangomis.

1.3. BLDC variklio veikimo principas

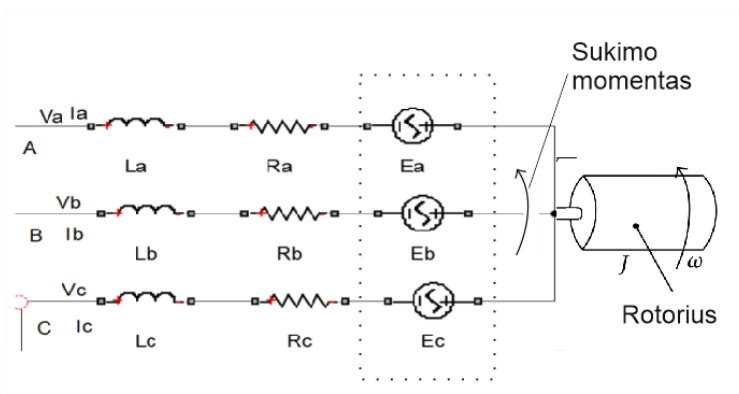
Bešepetėliniai nuolatinės srovės varikliai (angl. BLDC) skirstomi į variklius, kurių nuolatiniai magnetai yra elektromagnetų viduje (angl. inrunner) ir variklius, kurių nuolatiniai magnetai yra už elektromagnetų (angl. outrunner) [18].



1.7 pav. Inrunner (a) ir outrunner (b) bešepetėlinio variklio konstrukcija [18].

BLDC variklio veikimo principas aiškinamas kaip srovės tekėjimas per ritę, kuri sukuria magnetinį lauką, o magnetinio lauko linijos ir poliai priklauso nuo srovės krypties. Ritę kurianti magnetinį lauką pritraukia rotoriaus nuolatinį magnetą, o aktyvinant vieną ritę po kitos, rotorius pradeda sukis dėl jėgos sąveikų tarp elektromagneto ir nuolatinųjų magnetų [18]. Norint padidinti tokios konstrukcijos variklio efektyvumą, suvyniojamos dvi priešingos ritės kaip viena ritė, tokiu būdu sukuriama priešingi poliai rotoriaus poliems ir gaunama dviguba traukos jėga. Remiantis 7 paveikslu a variklio konstrukcija sudaromi 12 polių su trimis ritėmis arba trimis fazėmis [18].

Elektrinėje transporto priemonėje nuvažiuojamam atstumui didelę svarbą turi regeneracinis stabdymas. Regeneracinis stabdymas, tai toks stabdymas, kuris stabdymo momentą konvertuoja į energiją, t.y. kinetinė energija paverčiama elektros energija ir elektrinės transporto priemonės akumuliatorius tokiu būdu yra įkraunamas [19].



1.8 pav. Bešepetėlinio nuolatinės srovės variklio grandinės schema [19].

Bendrosios BLDC variklio lygtys skirtingiems terminalams [19]:

$$V_a = I_a R_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E_a, \quad (1.2)$$

$$V_b = I_b R_b + L_b \frac{dI_b}{dt} - E_b, \quad (1.3)$$

$$V_c = I_c R_c + L_c \frac{dI_c}{dt} - E_c, \quad (1.4)$$

Dėl paprastumo pateikiama tik a fazės stacionarios būsenos išraiška [19]:

$$V_a = I_a R_a + E_a, \quad (1.5)$$

$$I_a = \frac{V_a + E_a}{R_a}, \quad (1.6)$$

Atgalinė EMF įtampa (back EMF, angl. back electromotive force) yra proporcinga rotoriaus greičiui, o variklio sukuriama sukimo momento funkcija proporcinga magnetinio lauko ir statoriaus fazinei srovei [19] [31].

$$E_a = K_e \varphi \omega_m, \quad (1.7)$$

$$T_m = K_t \varphi I_a, \quad (1.8)$$

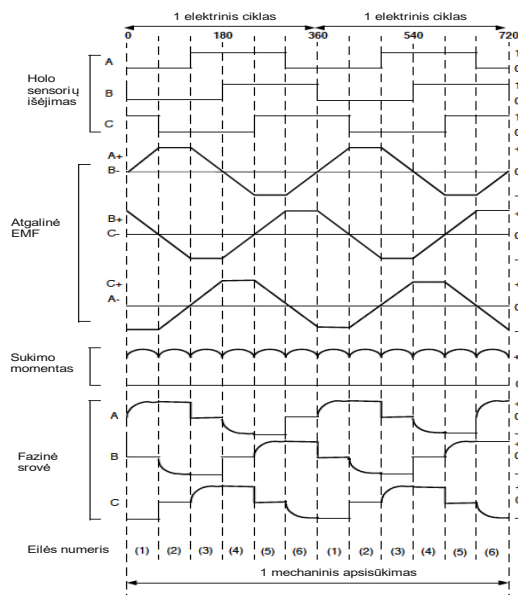
Kuomet sukimo momentas išoriškai nėra taikomas ir atsižvelgiama tik į pastovią inercinę apkrovą, elektromagnetinis variklio sukimo momentas išreiškiamas (1.9) formule [31].

$$T_m = K_f \omega + J \frac{d\omega_m}{dt}. \quad (1.9)$$

čia $R_a = R_b = R_c$ Kiekvienos fazės statoriaus varža omais, $L_a = L_b = L_c$ kiekvienos fazės statoriaus induktyvumas, henriais, I_a, I_b, I_c – kiekvienos fazės statoriaus fazės srovė amperais, V_a, V_b, V_c – kiekvienos fazės statoriaus fazės įtampa voltais, E_a, E_b, E_c – kiekvienos fazės atgalinė EMF įtampa voltais, K_e – atgalinės įtampos EMF konstanta, $V/(\text{rad/s})$, T_m = variklio sukuriamas sukimo momentas, išreikštas $N \cdot m$, K_T = sukimo momento konstanta, K_t = slopinimo koeficientas, J = variklio apkrovos inercija, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$, ω_m = variklio rotoriaus mechaninis greitis, rad/s , φ – lauko srautas viename poliuje, Wb .

Elektrinis variklis sukuria atgalinę EMF įtampą E . Šio veikimo metu variklio statorius maitinamas iš baterijos V_t įtampa, kur $V_t < E$. Remiantis (1.6) lygtimi $I_a < 0$, tai reiškia, kad variklis dirba kaip generatorius ir įkrauna akumuliatorių, kol variklis pasiekia greitį N_f , o $E_f = V_t$. Remiantis (1.6) ir (1.8) formulėmis, jei $T < 0$, tai variklis regeneracinio režimo metu patirs stabdymo momentą. Ši papildoma sukimosi ar kinetinė energija yra paverčiama į elektros energiją, kuri grįžta į akumuliatorių.

BLDC varikliai pagal apvijų tipą gali būti trapeciniai ir sukurti trapecinės formos signalus. Žemiau esančiame paveiksle (žr. 1.9 pav.) pateikiamas BLDC variklio holo jutiklių, atgalinės EMF, sukimo momento ir fazinių srovių signalų formos. Signalų formos pateikiamos idealiu atveju [21].



1.9 pav. Bešepetėlinio nuolatinės srovės variklio signalų formos [21].

Trapecijos komutacijos neigiamoji pusė yra ta, kad dėl to kiekviename komutavimo žingsnyje atsiranda (kas 60 laipsnių) sukimo momentas. Teoriškai atgalinė EMF bangos forma yra trapecijos formos, tačiau iš tikrųjų ji nėra vien tik trapecijos formos, nes variklio induktyvumas išlygina ją labiau į sinusoidinę formą. Norint tiksliai sekti rotorius padėtį, reikia įdiegti kodavimo įrenginį, o tai išbrangina sistemą. Kitas variantas naudoti orientuoto lauko valdymo (FOC, angl. field-oriented control) metodą, kurio metu srovės vektorius nustatomas atsižvelgiant į rotorius, o ne į sinuso bangas. Sinusoidinis komutavimas mažiau efektyvus prie didelių greičių, tačiau FOC užtikrinta aukštą efektyvumą plačiame greičių diapazone, o taip pat sklandesnį judėjimą [21].

1.4. Bešepetėlinių nuolatinės srovės variklių valdiklių tipai

BLDC variklių valdikliai išskiriami į kelias klases:

- žemos galios;
- vidutinės galios;
- didelės galios.

Valdiklių gamintojas Roboteq siūlo šiuos valdiklius bešepetėliniams nuolatinės srovės varikliams [22]:

- SBL1xxxx – BLDC variklių valdikliai skirti iki 30 A ir 60 V, palaikantys trapecinį komutavimą;
- SBL2xxxx – BLDC variklių valdikliai skirti iki 30 A ir 60 V, palaikantys sinusinį FOC valdymą;
- KBL – serijos valdikliai skirti iki 120 A ir 60 V, palaikantys trapecinį ir sinusinį FOC variklio valdymus;
- FBL – serijos valdikliai pritaikyti atlaikyti iki 300 A srovę ir 96 V įtampą, palaikantys tiek trapecinį, tiek sinusinį FOC variklio valdymus;

- HBL – serijos aukštos galios valdikliai, galintys valdyti 2 BLDC variklius iki 2 x 75 A arba 1 variklį iki 150 A srovės ir iki 96 V įtampos. Supaprastinta versija palaiko tik trapecinį valdymą, tačiau galima įsigyti valdiklius ir su sinusiniu FOC valdymu;
- GBL – serijos aukštos galios valdikliai, galintys valdyti 2 BLDC variklius iki 2 x 180 A arba 1 x 360 A srovės ir 96 V įtampos. Palaiko trapecinį ir sinusinį FOC variklių valdymus.

Kelly gamintojas taip pat siūlo valdiklių gamą skirtą BLDC varikliams [23]:

- KHB/HP – didelės galios optinio atskyrimo valdikliai skirti iki 500 A nuolatinei srovei, galintys atlaikyti iki 1000 A srovę 1 minutę ir skirti iki 144 V nuolatinei įtampai;
- KSL – valdikliai skirti BLDC varikliams be jutiklių (angl. sensorless). Šie valdikliai gali atlaikyti iki 250 A nuolatinės srovės, iki 500 A maksimalios srovės 10 sekundžių bei iki 72 V nuolatinės įtampos. Šios serijos valdikliai neturi regeneracinio stabdymo funkcijos;
- KLS – serijos sinusinio signalo formos valdikliai. Šie valdikliai gali atlaikyti iki 280 A nuolatinę srovę, iki 10 sekundžių 500 A srovę ir pagal modelį kai kurie valdikliai gali atlaikyti iki 700 A srovę 1 minutei. Pagal modelį šios serijos valdikliai pritaikyti iki 144 V nuolatinei įtampai.

1.5. Elektrinės transporto priemonės baterijų tipai

Elektrinėms transporto priemonėms gali būti naudojamos šios cheminės sudėties baterijos [24]:

- ličio kobalto oksido baterijos (LiCoO_2) – LCO;
- ličio mangano oksido baterijos (LiMn_2O_4) – LMO;
- ličio mangano kobalto oksido baterijos (LiNiMnCoO_2) – NMC;
- ličio geležies fosfato baterijos (LiFePO_4) – LFP;
- ličio nikelio kobalto aliuminio oksido baterijos (LiNiCoAlO_2) – NCA;
- ličio titano oksido baterijos (Li_2TiO_3) – LTO.

Žemiau esančioje lentelėje (1.1) pateikiamos baterijų specifikacijos pagal cheminę sudėtį [24].

1.1 lentelė. Baterijų specifikacijų lentelė pagal baterijos cheminę sudėtį

Specifikacija	LCO	LMO	NMC	LFP	NCA	LTO
Baterijos celės žymėjimas	(ICR)	(IMR)	(INR)	(IFR)	–	–
Specifinė energija (Wh/kg)	150 – 200	100 – 150	150 – 220	90 – 130	200 – 240	50 – 90
Minimali įtampa (V)	2.5	2.5	2.5	2.5	3	1.8
Nominali įtampa (V)	3.6	3.7	3.7	3.2	3.2	2.4
Maksimali įtampa (V)	4.2	4.2	4.2	3.65	4.2	2.85
Įkrovos rodiklis (C)	1	0.7 – 1	0.7 – 1	1	0.7	5 – 10
Iškrovos rodiklis (C)	1	1 – 10	2 – 3	1 – 25	1 – 3	5 – 10
Darbinė temperatūra °C	-10 – 45 °C	-20 – 60 °C	-20 – 60 °C	-20 – 60 °C	-20 – 60 °C	-20 – 60 °C
Įkrovimo ciklų skaičius kartais	500 – 1000	300 – 700	3000	3600	500	3000 – 7000
Kaina per kWh, \$	-	-	420	580	350	1005

2. Elektrinio motociklo pavaros konstrukcijos skaičiavimai

Siekiant parinkti tinkamus komponentus elektrinio motociklo valdymo sistemai reikia atlikti matematinius skaičiavimus. Norint parinkti tam tikros galios variklį reikia žinoti pasipriešinimo trauką jėgą, kurią sudaro: traukos jėga, kopimo į kalną jėga, pasipriešinimo riedėjimui jėga ir aerodinaminė pasipriešinimo jėga. Paveiksle (žr. 2.1 pav.) pateiktos motociklą veikiančios jėgos. Teorinė jėga apskaičiuojama pagal jėgos pusiausvyros lygtį [25] [26] [30]:

$$F = F_a + F_h + F_r + F_d, \quad (2.1)$$

Remiantis pusiausvyros lygtimi traukos jėga (angl. traction force) (N) apskaičiuojama pagal (2.2) lygtį:

$$F_a = c_i m a, \quad (2.2)$$

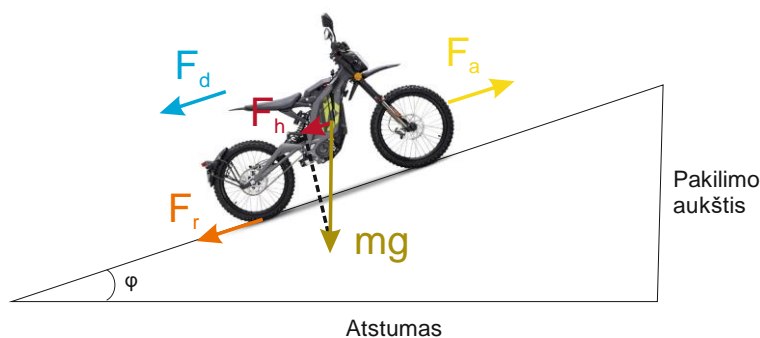
čia c_i – masės konstanta, m – motociklo masė su vairuotoju (kg), a – pagreitis (m/s^2);

C_i masės koeficientas parodo transporto priemonės besisukančių dalių inerciją. Elektrinėms transporto priemonėms taikomas dydis nuo 1.06 iki 1.2.

Pagal (2.3) lygtį apskaičiuojama kopimui į kalną (angl. hill climbing force) reikalinga jėga (N):

$$F_h = m g \sin \varphi, \quad (2.3)$$

čia m – motociklo masė su vairuotoju (kg), φ – įkalnės kampas ($^\circ$), kuris parodytas žemiau esančiame paveiksle (žr. 2.1 pav.).



2.1 pav. Įkalnės kampas

Įkalnės laipsnis apskaičiuojamas pagal (2.4) formulę:

$$\varphi = \arctan \frac{\text{Pakilimo aukštis}}{\text{Atstumas}}, \quad (2.4)$$

Pasipriešinimo riedėjimui jėga (angl. rolling resistance force) (N) apskaičiuojama (2.5) lygtimi:

$$F_r = c_r m g \cos \varphi. \quad (2.5)$$

čia c_r – pasipriešinimo riedėjimui jėgos koeficientas, m – motociklo masė su vairuotoju (kg), φ – įkalnės kampas ($^\circ$), kuris parodytas paveiksle (žr. 2.1 pav.). Atliekant elektrinės transporto priemonės skaičiavimus c_r vertė būna:

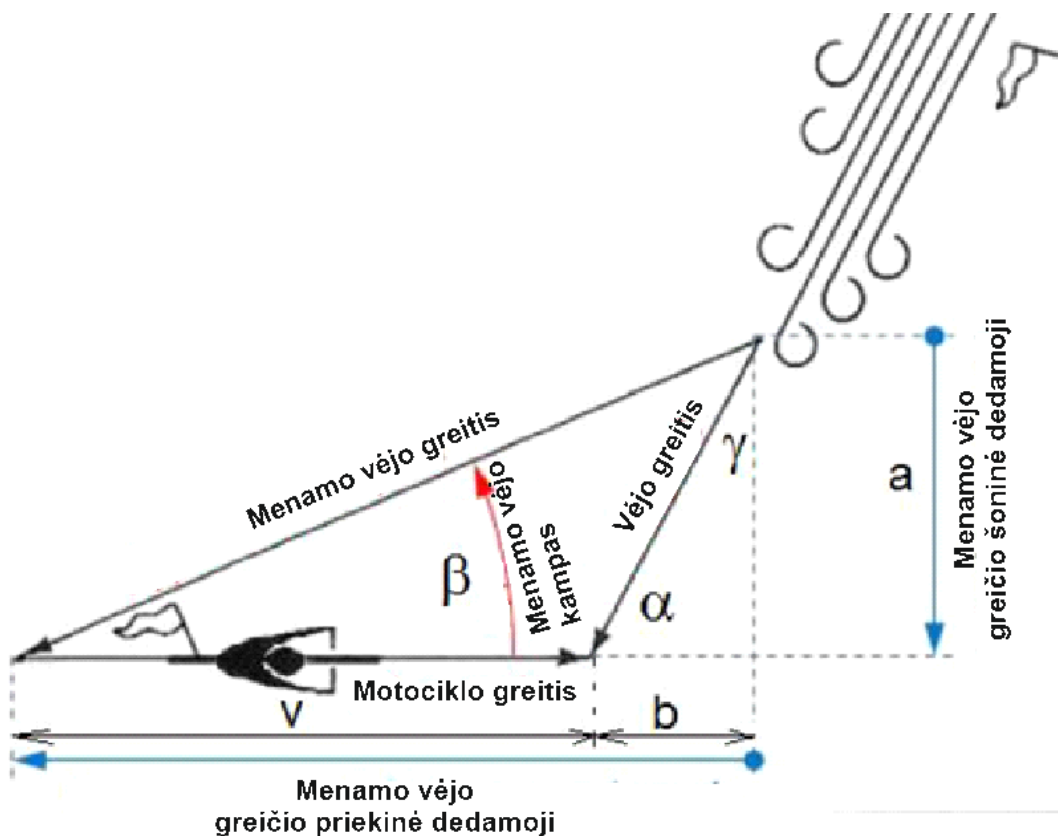
- 0,006-0,01 ant betono ar asfalto dangos;
- 0,02 ant žvyro kelio dangos;
- 0,30 ant smėlio dangos.

Pagal jėgos pusiausvyros lygtį aerodinaminė pasipriešinimo jėga (angl. aerodynamic drag force) (N) apskaičiuojama (2.6) lygtimi [26] [27] [28].

$$F_d = 0.5\rho v_a^2 c_d s \cos\beta, \quad (2.6)$$

čia ρ – oro tankis (kg/m^3), v_a – menamas vėjo greitis (m/s^2), β – menamas vėjo kampas ($^\circ$), c_d – pasipriešinimo koeficientas, s – pasipriešinimo paviršiaus plotas (angl. drag surface) (m^2). c_d pasipriešinimo koeficientas – 1.00 taikomas dideliame sportiniame motociklui kartu įvertinant motociklininko aerodinaminį pasipriešinimą ir važiavimo padėtį [26].

Žemiau esančiame paveiksle (žr. 2.2 pav.) vaizduojamos motociklininką veikiančios vėjo pasipriešinimo jėgos. Remiantis 2.2 paveikslu ir (2.12) lygtimi išskaičiuojamas β laipsnis:



2.2 pav. Menamas vėjo greitis ir kampas [27].

$$\gamma = 90 - \alpha, \quad (2.7)$$

$$a = v_w \cos\gamma, \quad (2.8)$$

$$b = v_w \sin\gamma, \quad (2.9)$$

$$bb = b + v, \quad (2.10)$$

$$v_a = (a^2 + bb^2)^{1/2}, \quad (2.11)$$

$$\beta = 90 - \arctan\left(\frac{bb}{a}\right). \quad (2.12)$$

Motociklo varančiojo rato galia (W) apskaičiuojama pagal (2.13) formulę:

$$P_w = Fv, \quad (2.13)$$

čia v – motociklo greitis (m/s).

Elektrinio motociklo variklio galia (W) apskaičiuojama pagal (2.14) formulę:

$$P_m = \frac{P_w}{\eta}, \quad (2.14)$$

čia η – motociklo naudingumo koeficientas.

Motociklo varančiojo rato sukimo momentas ($N \cdot m$) apskaičiuojamas pagal (2.15) formulę:

$$T_w = Fr, \quad (2.15)$$

čia r – rato spindulys (m).

Elektrinio variklio sukimo momentas ($N \cdot m$) apskaičiuojamas pagal (2.16) formulę:

$$T_m = \frac{T_w}{k}, \quad (2.16)$$

čia k – redukcijos santykis ir apskaičiuojamas pagal formulę – $k=n_1/n_2$, n_1 rato žvaigždės dantų skaičius, n_2 ant variklio veleno esančios žvaigždės dantų skaičius.

Motociklo varančiojo rato kampinis greitis apskaičiuojamas pagal (2.17) formulę:

$$\omega_w = \frac{v}{r}, \quad (2.17)$$

Elektrinio motociklo elektrinio variklio kampinis greitis apskaičiuojamas pagal (2.18) formulę:

$$\omega_m = \omega_w k, \quad (2.18)$$

Motociklo varančiojo rato apsisukimai per minutę apskaičiuojami pagal (2.19) formulę:

$$n_w = \frac{60\omega_w}{2\pi}, \quad (2.19)$$

Elektrinio motociklo elektrinio variklio apsisukimai per minutę apskaičiuojami pagal (2.20) formulę:

$$n_m = \frac{60\omega_m}{2\pi} = n_w k. \quad (2.20)$$

Žemiau esančioje 2.1 lentelėje pateikiamos kuriamo elektrinio motociklo techninės specifikacijos [29].

2.1 lentelė. Kuriamo elektrinio motociklo techninės specifikacijos parametrai

Parametras	Reikšmė	Matavimo vienetai
Motociklo modelis [29]	Suzuki GS500E, (GM51B)	-
Galinės padangos išmatavimai	130/70-17 62H	-
Galinio rato diametras D	60,452	(cm)
Galinio rato spindulys, r	0,30226	(m)
Motociklo svoris pagal techninės apžiūros duomenis	176	(kg)
Numatomas bendras motociklo svoris su baterijomis m1	190	(kg)
Vairuotojo svoris m2	100	(kg)
Bendras motociklo svoris su vairuotoju, $m=m1+m2$	290	(kg)
Pavaros tipas	Grandinė	-
Galinės žvaigždės dantų skaičius, n1	39	-
Priekinės žvaigždės dantų skaičius, n2	12	-
Motociklo pavaros santykis $k=n1/n2$, 1:	3,25	-
Masės koeficientas, Ci	1,2	-
Pasipriešinimo riedėjimui koeficientas, Cr	0,01	-
Oro tankis, ρ	1,293	(kg/m ³)
Menamas vėjo greitis, V_a	10	(m/s)
Menamas vėjo kampas, β	0	(°)
Paviršiaus pasipriešinimo plotas, s	0,78	(m ²)
Paviršiaus pasipriešinimo koeficientas, Cd	1	-
Motociklo naudingumo koeficientas	0,65	-

Kuriamai transporto priemonei priskiriant elektrinį variklį ir valdiklį reikia įsivertinti maksimalią jėgą, kurią elektrinis variklis turės įveikti. Atliekami skaičiavimai, remiantis važiuoimu į skirtingo statumo įkalnes.

2.2 lentelėje pateikiami skaičiavimai 10 kW vardinės galios varikliui, kuomet ketinama pasiekti 100 km/h greitį per 30 s važiuojant į 1 % įkalnę, 100 km/h greitį per 30 s važiuojant į 5 % įkalnę ir 70 km/h greitį, per 30 s važiuojant į 11 % įkalnę.

2.2 lentelė. 10 kW vardinės variklio galios skaičiavimai

Skaičiavimai 10 kW vardinės galios varikliui			
Parametras	Vertės		
Įsibėgėjimo laikas iki maksimalaus greičio, t (s)	30	30	30
Maksimalus greitis, v (km/h)	100	100	70
Įkalnės statumas, %	1	5	11
Įkalnės kampas φ , °	0,57	2,86	6,28
Pagreitis, a (m/s ²)	0,93	0,93	0,65
Traukos jėga, Fa (N)	322,22	322,22	225,56
Kopimo į kalną jėga, Fh, (N)	28,45	142,07	311,06
Pasipriešinimo riedėjimui jėga, Fr (N)	28,28	28,28	28,28
Aerodinaminė pasipriešinimo jėga, Fd, (N)	50,43	50,43	50,43
Bendra jėga, F (N)	429,38	543,00	615,32
Galinio rato mechaninė galia, Pw (W)	11927,09	15083,20	11964,63
Elektrinio variklio galia, Pm, (W)	18349,37	23204,92	18407,12
Galinio rato sukimo momentas, Tw (N · m)	128,81	162,90	184,60
Elektrinio variklio sukimo momentas, Tm (N · m)	39,63	50,12	56,80
Galinio rato kampinis greitis, ω_w (rad/s)	30,00	30,00	21,00
Elektrinio variklio kampinis greitis, ω_m (rad/s)	97,50	97,50	68,25
Galinio rato greitis, Nw (rpm)	286,62	286,62	200,64
Variklio veleno greitis, Nm (rpm)	931,53	931,53	652,07

2.3 lentelėje pateikiami skaičiavimai 3 kW vardinės galios varikliui, kai ketinama pasiekti 50 km/h greitį per 30 s važiuojant į 1 % įkalnę, 50 km/h greitį per 60 s važiuojant į 5 % įkalnę ir 50 km/h greitį per 300 s važiuojant į 11 % įkalnę.

2.3 lentelė. 3 kW vardinės variklio galios skaičiavimai

Skaičiavimai 3 kW vardinės galios varikliui			
Parametras	Vertės		
Įsibėgėjimo laikas iki maksimalaus greičio, t (s)	30	60	300
Maksimalus greitis, v (km/h)	50	50	50
Įkalnės statumas, %	1	5	11
Įkalnės kampas φ , °	0,57	2,86	6,28
Pagreitis, a (m/s ²)	0,46	0,23	0,05
Traukos jėga, Fa (N)	161,11	80,56	16,11
Kopimo į kalną jėga, Fh, (N)	28,45	142,07	311,06
Pasipriešinimo riedėjimui jėga, Fr (N)	28,28	28,28	28,28
Aerodinaminė pasipriešinimo jėga, Fd, (N)	50,43	50,43	50,43

Bendra jėga, F (N)	268,26	301,33	405,88
Galinio rato mechaninė galia, Pw (W)	3725,89	4185,12	5637,21
Elektrinio variklio galia, Pm, (W)	5732,14	6438,64	8672,63
Galinio rato sukimo momentas, Tw (N·m)	80,48	90,40	121,76
Elektrinio variklio sukimo momentas, Tm (N·m)	24,76	27,81	37,47
Galinio rato kampinis greitis, ωw (rad/s)	15,00	15,00	15,00
Elektrinio variklio kampinis greitis, ωm (rad/s)	48,75	48,75	48,75
Galinio rato greitis, Nw (aps/min)	143,31	143,31	143,31
Variklio veleno greitis, Nm (aps/min)	465,76	465,76	465,76

Iš pateiktų skaičiavimų matoma, kad 10 kW vardinės galios variklis pasieks 23 204 W galią įvertinus galimus motociklo pavaros, elektrinio variklio greičio valdiklio nuostolius, o 3 kW vardinės galios variklis pasieks maksimalią 8 672 W galią. Siekiant nustatyti maksimalią srovę tenkančiam greičio valdikliui reikia, ją apskaičiuoti galima pagal (2.21) formulę.

$$I = \frac{P_m}{U}. \quad (2.21)$$

čia U – sistemos įtampa, V.

Atlikus skaičiavimus, matoma, kad naudojant 10 kW nominalios galios variklį ir norint pasiekti 100 km/h greitį per 30 s bei įvažiuoti į 5 % statumo įkalnę elektrinio motociklo variklis turi būti parinktas ir modifikuotas atlaikyti 23 210 W maksimalią galią, o valdiklis 314 A srovę, kuomet valdymo sistemos nominali įtampa 74 V.

Naudojant 3 kW nominalios galios variklį ir norint pasiekti 50 km/h greitį bei įveikti 11 % statumo įkalnę tai truks 300 s ir reikės 8672 W maksimalios galios iš variklio, 117 A srovės iš valdiklio, kuomet valdymo sistemos nominali įtampa 74 V.

3. Projektinė dalis

3.1. Pasirinktų komponentų sąrašas

Žemiau esančioje 3.1 lentelėje pateikiamas išlaidų ir komponentų sąrašas surenkant elektrinį motociklą. Šio projekto savikaina – 2858,01 €.

3.1 lentelė. Elektrinio motociklo komponentų su išlaidomis sąrašas

Pavadinimas	Kiekis, vnt	Kaina 1 vnt su PVM, €	Bendra suma su PVM, €
Mechanika			
Motociklo rėmas GS500	1	300,00	300,00
Priekinė žvaigždė 13T	1	8,17	8,17
Įvorė 918012128	2	11,64	23,28
Įvorė 6268401D00	1	4,85	14,85
Galinė įvorė 6268440A10	1	9,70	9,70
Įvorė rr swgar 6128201D00	1	12,20	12,20
Įvorė rr swing 6125145001	2	13,25	26,50
Guoliai rėmo trikampiui	4	21,75	87,00
Guolis galinei šakei HMK 2230	2	8,00	16,00
Guolis galinei šakei 7E-HMK1725	2	8,00	16,00
Stabdžių galinio suporto remontinis komplektas	1	6,50	6,50
Elektronika			
BLDC / PMSM HPM3000B variklis	1	381,15	381,15
Valdiklis Sevcon Gen4 Size4 80V 350A SinCos PMAC	1	719,64	719,64
Jungčių rinkinys valdikliui 35W	1	46,25	46,25
IXXAT USB to CAN Compact V2	1	356,41	356,41
Greičio rankena Z6	1	72,00	72,00
Perėjimas DB9 RS232 lizdas į kontaktines kaladėles	1	3,39	3,39
Relė AEV6501A	1	26,93	26,93
Sony VTC6 18650 celės, 3000mAh	120	1,85	221,76
Baterijos valdymo sistema (BMS) 8S - 20S, 300A	1	63,03	63,03
18650 celių laikikliai, 5P13S	2	10,32	20,64
18650 celių izoliavimo juosta, 1m, 120mm	1	2,06	2,06
Lion baterijos įkroviklis 84V, 5A, EU, Anderson	1	47,00	47,00
Anderson jungtis 50A, 600V, 10 vnt	1	13,27	13,27
Anderson jungties apsauga nuo dulkių	2	0,50	1,00
Įrankiai / Medžiagos			
Taškinis 18650 tipo celių suvirinimo aparatas, 3 kW	1	84,00	84,00
Lydmetalis su flisu CYNEL Sn60Pb40 SW26 1.00mm 100g	1	6,90	6,90
Izoliacinis termovamzdelis 12.0 / 6.0 raudonas	3	0,40	1,20
Laidas su silikonine izoliacija -60+180°C 0.75mm ² 500V 1m juodas	3	0,73	2,19
Laidas su silikonine izoliacija -60+180°C 0.75mm ² 500V 1m mėlynas	3	0,73	2,19
Laidas su silikonine izoliacija -60+180°C 0.75mm ² 500V 1m raudonas	3	0,73	2,19
Laidas su silikonine izoliacija -60+180°C 0.75mm ² 500V 1m žalias	3	0,73	2,19
Laidas su silikonine izoliacija -60+180°C 0.75mm ² 500V 1m geltonas	3	0,73	2,19
Paslaugos			
Rėmo smėliavimas	1	130,00	130,00
3D spausdinimas	-	-	-
Siuntimo išlaidos			
Valdiklis, jungčių rinkinys, USB to CAN, DHL	1	44,05	44,05
Stabdžių galinio suporto remontinis komplektas, DPD	1	2,98	2,98

Papildomos išlaidos			
Galinė žvaigždė, 12T	1	12,00	12,00
VEESC 4.20v 50A valdiklis	1	71,20	71,20

3.2. Elektrinio motociklo valdiklis

Kuriant elektrinio motociklo valdymo sistemą buvo pasirinktas Didžiosios Britanijos „Sevcon“ gamintojo Gen4 80V 350A greičio valdiklis (žr. 3.1 pav.).



3.1 pav. Gen4 BLDC variklio greičio valdiklis.

Valdiklis parinktas pagal 2.1 – 2.2 lentelėse pateiktą informaciją. Atsižvelgus į ateityje numatomą variklio atnaujinimą iš 3 kW į 10 kW nominalios galios variklį valdiklis buvo parinktas pagal didesnės galios variklį ir sunaudojamą teorinę maksimalią 314 A srovę.

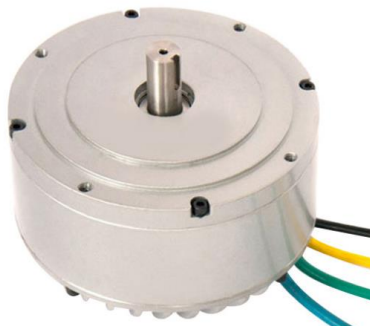
„Sevcon“ gamintojo Gen 4 valdiklio pagrindinės specifikacijos ir funkcijos [32]:

1. minimali įtampa – 39,1 V;
2. nominali įtampa – 72 – 80 V;
3. maksimali įtampa – 116 V;
4. maksimali 10 s nuolatinė srovė – 420 A;
5. maksimali 2 min nuolatinė srovė – 350 A;
6. 60 min nuolatinė srovė – 140 A;
7. nuolatinė galia – 10,6 kW;
8. 2 min maksimali galia – 26,6 kW;
9. 10 s maksimali galia – 31,9 kW;
10. 8 skaitmeniniai įėjimai;
11. 2 analoginiai įėjimai, kurie gali būti sukonfigūruoti kaip skaitmeniniai;
12. 3 kontaktoriaus arba solenoido išėjimai;
13. 1 programuojama 5 V arba 10 V enkoderio maitinimo išvestis;
14. palaikomas variklio temperatūros jutiklis;
15. valdiklis palaiko Sin / Cos enkoderio jutiklius, UVW holo jutiklius bei inkrementinius AB enkoderio jutiklius;
16. FOC variklio valdymo režimas;
17. CAN – BUS sąsaja, leidžianti valdiklį sujungti su papildomais įrenginiais, tokiais kaip: ekranu, baterijos valdymo sistema;
18. automatinė sistemos diagnostika;

- 19. IP66 apsauga;
- 20. valdiklio matmenys – 227 x 168 x 78 mm.

3.3. Elektrinio motociklo variklis

Elektriniame motocikle naudojamas Kinijos „Golden Motors“ gamintojo HPM3000B BLDC / PMSM tipo elektrinis variklis (žr. 3.2 pav.) [33].



3.2 pav. HPM3000B BLDC / PMSM variklis [33].

Variklio techninės specifikacijos pateiktos 3.2 lentelėje [33]:

3.2 lentelė. HPM3000B variklio techninės specifikacijos parametrai

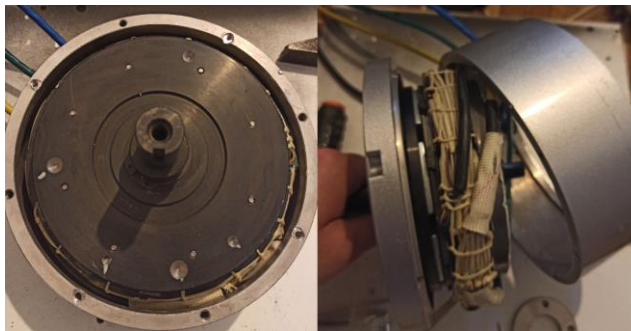
Nominali galia, W	3000
Nominali srovė, A	75
Maksimali fazinė srovė, A	240
Maksimalios srovės veikimo trukmė, s	10
Nominalus greitis, rpm	3600
Nominalus sukimo momentas, N·m	8
Maksimalus sukimo momentas, N·m	25
Varža tarp fazių, mΩ	13,8
Induktyvumas, μH	118
Holo jutiklių kampas, °	120
Polių porų skaičius	4
Veleno inercija, kg·m ²	0,0059
Apsaugos lygis	IP54
Variklio vėsinimo tipas	Ventiliatorius
Variklio svoris, kg	7.6
Temperatūros jutiklis	KTY-84/130
Magnetų tipas	NdFeB

3.3 paveiksle pateikiama HPM3000B variklio konstrukcija atsukus variklio galinį apsauginį dangtį.



3.3 pav. Variklio konstrukcija atsukus galinį variklio dangtį.

3.4 paveiksle pateikiama HPM3000B variklio konstrukcija atsukus variklio priekinį apsauginį dangtį.



3.4 pav. Variklio konstrukcija atsukus priekinį variklio dangtį.

3.4. Elektrinio motociklo baterijos konstrukcija

Pagal valdiklio nominalią veikimo įtampą, t. y. 72 – 80 V, elektriniame motocikle numatyta naudoti ličio jonų bateriją, kurios minimali įtampa būtų 50 V, nominali 72 V, o maksimali 84 V. Elektrinio motociklo baterija turi gebėti atiduoti reikiamą srovę valdikliui ir pati nesugesti. Dėl to baterija turi būti sudaryta iš atitinkamų komponentų. Bateriją sudaro baterijos valdiklis (angl. BMS – battery management system) ir baterijos celės, kurios sujungtos nuosekliai į eilę, o eilės lygiagrečiai. Baterijos surinkimui ir celių parinkimui reikia atlikti teorinius skaičiavimus pagal planuojamas minimalias, nominalias, maksimalias įtampų vertes, kuomet variklio nuolatinė galia yra 5732 W bei maksimali variklio galia 8673 W. Skaičiavimai pateikiami 3.1 lentelėje.

Baterijos minimali, nominali arba maksimali įtampa apskaičiuojama pagal 3.1 formulę:

$$U_{Bmin} = n_s U_{Cmin}, \quad (3.1)$$

čia U_{Bmin} , U_{Bnom} , U_{Bmax} – baterijos minimali, nominali bei maksimali įtampa, V, n_s – celių kiekis vienetais sujungtas nuosekliai į eilę, U_{Cmin} – celės minimali įtampa, V.

Baterijos įtampos rezervas apskaičiuojamas pagal 3.2 formulę. Šis skaičiavimas aktualus priimant galutines išvadas, ar parinkta baterijos įtampa neviršija valdiklio 116 V maksimalios įtampos:

$$U_R = 116 - U_{Bmax}, \quad (3.2)$$

čia U_R – baterijos įtampos rezervas, V.

Baterijos maksimali atiduodama srovė pagal vienos celės trumpalaikę iškrovos srovę apskaičiuojama pagal 3.3 formulę:

$$I_{max} = n_p I_{celes}, \quad (3.3)$$

čia I_{max} – baterijos maksimali atiduodamas srovė, A, n_p – celių kiekis sujungtas lygiagrečiai, I_{celes} – vienos celės trumpalaikė iškrovos srovė, A.

Baterijos talpa apskaičiuojama pagal 3.4 formulę:

$$Q_{bat} = n_p Q_{celes}, \quad (3.4)$$

čia Q_{bat} – baterijos talpa, n_p – nuosekliai jungtų celių eilių skaičius jungiamas lygiagrečiai, Q_{celes} – celės talpa, Ah.

Bendra baterijos vidinė varža R apskaičiuojama pagal 3.5 formulę:

$$R = \frac{R_c n_s}{1000} \cdot \frac{1}{n_p}, \quad (3.5)$$

čia R – nuosekliai sujungtų celių vienos eilės vidinė varža, Ω , R_c – vidinė celės varža, m Ω .

Baterijos nominali iškrovos srovė prie nominalios variklio galios, kai baterijos įtampa pasirenkama minimali, nominali arba maksimali, apskaičiuojama pagal 3.6 formulę:

$$I_{bmin} = \frac{P_{nom}}{U_{Bmin}}, \quad (3.6)$$

čia I_{bmin} , I_{bnom} , I_{bmax} - baterijos iškrovos srovė prie nominalios variklio galios, kai baterijos įtampa minimali, nominali bei maksimali, A, P_{nom} – variklio nominali galia, W.

Baterijos trumpalaikė iškrova prie maksimalios trumpalaikės variklio galios, kai baterijos įtampa pasirenkama minimali, nominali arba maksimali, apskaičiuojama pagal 3.7 formulę:

$$I_{btmin} = \frac{P_{max}}{U_{Btmin}}, \quad (3.7)$$

čia I_{btmin} , I_{btnom} , I_{btmax} - baterijos iškrovos srovė prie nominalios variklio galios, kai baterijos įtampa minimali, nominali bei maksimali, A, P_{max} – variklio maksimali trumpalaikė galia, W.

Baterijos šiluminiai nuostoliai prie nominalios variklio galios, kai iškrovos srovė pasirenkama minimali, nominali arba maksimali, apskaičiuojami pagal 3.8 formulę:

$$P_{bmin} = RI_{bmin}^2, \quad (3.8)$$

čia $P_{bmin}, P_{bnom}, P_{bmax}$ – baterijos nuostoliai prie nominalios variklio galios, W.

Baterijos šiluminiai nuostoliai prie maksimalios variklio galios, kai iškrovos srovė pasirenkama minimali, nominali arba maksimali, apskaičiuojami pagal 3.9 formulę:

$$P_{btmin} = RI_{btmin}^2, \quad (3.9)$$

čia $P_{btmin}, P_{btnom}, P_{btmax}$ – baterijos nuostoliai prie maksimalios trumpalaikės variklio galios, W.

Baterijos šiluminiai nuostoliai įvertinami procentine 3.10 formulės išraiška prie nominalios variklio galios, kai iškrovos srovė pasirenkama minimali, nominali arba maksimali:

$$\eta = 100 - \left(\frac{P_{nom} - P_{bmin}}{P_{bmin}} \right) \cdot 100 \%, \quad (3.10)$$

Baterijos šiluminiai nuostoliai įvertinami procentine 3.11 formulės išraiška prie maksimalios variklio galios, kai baterijos iškrovos srovė pasirenkama minimali, nominali arba maksimali:

$$\eta = 100 - \left(\frac{P_{max} - P_{btmin}}{P_{btmin}} \right) \cdot 100 \%, \quad (3.11)$$

Teorinis baterijos veikimo laikas, kai variklio galia yra nominali, o baterijos iškrovos srovė pasirenkama minimali, nominali arba maksimali, apskaičiuojama pagal 3.12 formulę, kurioje įvertinami baterijos nuostoliai:

$$t_{bmin} = \left(\frac{Q_{bat}}{I_{bmin} \cdot 60} \right) - \left(\frac{Q_{bat}}{I_{bmin} \cdot 60} \right) \left(\frac{\eta}{100} \right), \quad (3.12)$$

čia t_{bmin} – teorinis baterijos veikimo laikas, kai variklio galia yra nominali, o baterijos iškrovos srovė minimali, s.

Teorinis baterijos veikimo laikas, kai variklio galia yra maksimali, o baterijos iškrovos srovė parenkama minimali, nominali arba maksimali, apskaičiuojama pagal 3.13 formulę, kurioje įvertinami baterijos nuostoliai:

$$t_{btmin} = \left(\frac{Q_{bat}}{I_{btmin} \cdot 60} \right) - \left(\frac{Q_{bat}}{I_{btmin} \cdot 60} \right) \left(\frac{\eta}{100} \right). \quad (3.13)$$

čia t_{btmin} – teorinis baterijos veikimo laikas, kai variklio galia yra maksimali, o baterijos iškrovos srovė minimali, s.

3.3 lentelėje pateikiami 4 skirtingų gamintojų iškrovos celių teoriniai skaičiavimai.

Baterijos modelis	ANR26650	VTC6	VTC5	HG2
Nominali variklio galia P_{nom} , W	5732			
Maksimali variklio galia P_{max} , W	8673			
Gamintojas	„Werks“	„Sony / Murata“	„Sony / Murata“	„Litokala“
Baterijos cheminė sudėtis	LIFEPO4	Li-ion	Li-ion	Li-ion
Baterijos tipas	26650	18650	18650	18650
Celių kiekis nuosekliai n_s , vnt	24	20	20	20
Celių kiekis lygiagrečiai n_p , vnt	5	5	5	5
1 celės maksimali trumpalaikė iškrovos srovė $I_{celės}$, A	40	30	20	20
1 celės talpa $Q_{celės}$, Ah	2,6	3	2,5	3
Minimali celės įtampa U_{Cmin} , V	2	2,5	2,5	2,5
Nominali celės įtampa U_{Cnom} , V	3,2	3,6	3,6	3,6
Maksimali celės įtampa U_{Cmax} , V	3,4	4,2	4,2	4,2
1 celės vidinė varža R_c , mΩ	6	13	13	20
1 celės svoris, g	72	46,6	44,3	47
1 celės kaina, €	4,29	3,57	2,45	2,36
Baterijos minimali įtampa U_{bmin} , V	48	50	50	50
Baterijos nominali įtampa U_{bnom} , V	76,8	72	72	72
Baterijos maksimali įtampa U_{bmax} , V	81,6	84	84	84
Įtampos rezervas nuo valdiklio maksimalios 116 V įtampos U_R , V	34,40	32,00	32,00	32,00
Baterijos maksimali iškrovos srovė pagal celės trumpalaikę iškrovos srovę I_{max} , A	200,00	150,00	100,00	100,00
Baterijos talpa Q_{bat} , Ah	13	15	13	15
Baterijos vidinė varža R , Ω	0,03	0,05	0,05	0,08
Baterijos iškrovos srovė prie nominalios variklio galios, kai baterijos įtampa minimali I_{bmin} , A	119,42	114,64	114,64	114,64
Baterijos nuostoliai P_{bmin} , kai I_{bmin} , W	410,70	683,40	683,40	1051,39
Nuostoliai, %	7,16	11,92	11,92	18,34
Baterijos veikimo laikas t_{bmin} , min	6,06	6,91	5,76	6,41
Baterijos iškrovos srovė prie nominalios variklio galios, kai baterijos įtampa nominali I_{bnom} , A	74,64	79,61	79,61	79,61
Baterijos nuostoliai P_{bnom} , kai I_{bnom} , W	160,43	329,57	329,57	507,03
Nuostoliai, %	2,80	5,75	5,75	8,85
Baterijos veikimo laikas t_{bnom} , min	10,16	10,65	8,88	10,30
Baterijos iškrovos srovė prie nominalios variklio galios, kai baterijos įtampa maksimali I_{bmax} , A	70,25	68,24	68,24	68,24
Baterijos nuostoliai P_{bmax} , kai I_{bmax} , W	142,11	242,13	242,13	372,52
Nuostoliai, %	2,48	4,22	4,22	6,50

Baterijos veikimo laikas t_{bmax} , min	10,83	12,63	10,53	12,33
Baterijos trumpalaikė iškrova prie maksimalios variklio galios, kai baterijos įtampa minimali I_{btmin} , A	180,69	173,46	173,46	173,46
Baterijos nuostoliai P_{btmin} , kai I_{btmin} , W	940,26	1564,60	1564,60	2407,07
Nuostoliai, %	10,84	18,04	18,04	27,75
Baterijos veikimo laikas t_{btmin} , min	3,85	4,25	3,54	3,75
Baterijos trumpalaikė iškrova prie maksimalios variklio galios, kai baterijos įtampa nominali I_{btnom} , A	112,93	120,46	120,46	120,46
Baterijos nuostoliai P_{btnom} , kai I_{btnom} , W	367,29	754,53	754,53	1160,82
Nuostoliai, %	4,23	8,70	8,70	13,38
Baterijos veikimo laikas t_{btnom} , min	6,61	6,82	5,68	6,47
Baterijos trumpalaikė iškrova prie maksimalios variklio galios, kai baterijos įtampa maksimali I_{btmax} , A	106,29	103,25	103,25	103,25
Baterijos nuostoliai P_{btmax} , kai I_{btmax} , W	325,35	554,35	554,35	852,85
Nuostoliai, %	3,75	6,39	6,39	9,83
Baterijos veikimo laikas t_{btmax} , min	7,06	8,16	6,80	7,86
Bendras celių kiekis, vnt	120	100	100	100
Bendras celių svoris, kg	8,64	4,66	4,43	4,70
Celių kaina su PVM, €	514,80	357,00	245,00	236,00

Iš skaičiavimų matoma, jog norint palaikyti numatytą variklio nominalią arba maksimalią galią baterijos didžiausia iškrovos srovė pasiekama prie minimalios baterijos įtampos.

Baterijos, sudarytos iš ANR26650 tipo celių, iškrovos srovė prie minimalios baterijos įtampos, kuomet variklis veikia nominalia galia, yra 119,42 A, baterijos vienos eilės celių vidinė varža – 0,14 Ω , todėl šiluminiai nuostoliai siekia 7,16 %, o baterijos veikimo laikas – 6 min. Kai ši baterija veikia esant maksimaliai variklio galiai ir esant minimaliai baterijos įtampai, pasiekama didžiausia baterijos iškrovos srovė – 180,69 A, baterijos šiluminiai nuostoliai siekia 10,84 %, o veikimo laikas – 3,85 min. Baterijos 180,69 A iškrovos srovė nesiekia baterijos maksimalios 200 A trumpalaikės iškrovos srovės. Baterijos celių kaina yra didžiausia iš visų 4 nagrinėtų baterijos celių modelių ir kaina už 120 vnt. celių siekia 514,80 €.

Baterijos, sudarytos iš VTC5, VTC6, ar HG2 modelio celių, iškrovos srovė esant minimaliai baterijos įtampai, kai variklis veikia nominalia galia yra 114,64 A, o iškrovos srovė esant minimaliai baterijos įtampai, kai variklis veikia maksimalia galia yra 173,46 A. HG2 modelio celių vienos eilės varža – 0,40 Ω , dėl to baterijos šiluminiai nuostoliai esant nominaliai variklio galiai – 18,34 %, o esant maksimaliai variklio galiai – 27,75 %. Tuo tarpu VTC5 ir VTC6 modelio celių vienos eilės vidinė varža – 0,26 Ω . Kadangi VTC5 celės talpa yra 2,5 Ah, o VTC6 celės talpa 3 Ah, todėl baterijos pagamintos iš VTC5 celių veikimo laikas, kai variklis veikia nominalia galia – 5,76 min ir 3,54 min, kai variklis veikia maksimalia galia, o baterijos, pagamintos iš VTC6 celių, veikimo laikas, kai variklis veikia nominalia galia – 6,91 min ir 4,25 min kai variklis veikia maksimalia galia. „Litokala“ gamintojo HG2 100 vnt. celių kaina – 236,00 €, o „Sony / Murata“ gamintojo originaliųjų VTC5 modelio celių 100 vnt. kaina – 245,00 €, o VTC6 modelio 100 vnt. celių kaina – 357,00 €.

Renkantis galutines celes buvo nutarta išbandyti VTC6 (žr. 3.5 pav.) ir HG2 (žr. 3.6 pav.) modelių celes su apkrova tikrinant baterijos temperatūrą, dėl to, jog baterijai su VTC6 celėmis būdingas ilgesnis baterijos veikimo laikas, negu baterijos pagamintos iš VTC5, HG2 ar ANR26650 modelio celių, o HG2 modelio celės pasižymi priimtinesne projektui kaina. Baterijų pagamintų tiek iš VTC5, tiek iš VTC6, tiek iš ANR26650 celių suvartojama maksimali iškrovos srovė – 173,46 A, kai variklis veikia maksimalia apkrova, o baterijos įtampa yra minimali, viršija baterijos maksimalią trumpalaikę 100 A iškrovą naudojant VT5 ir HG2 celes bei 150 A trumpalaikę iškrovą naudojant VTC6 celes. Konstruojant bateriją, ANR26650 celių nuspręsta atsisakyti dėl per didelės celių kainos.

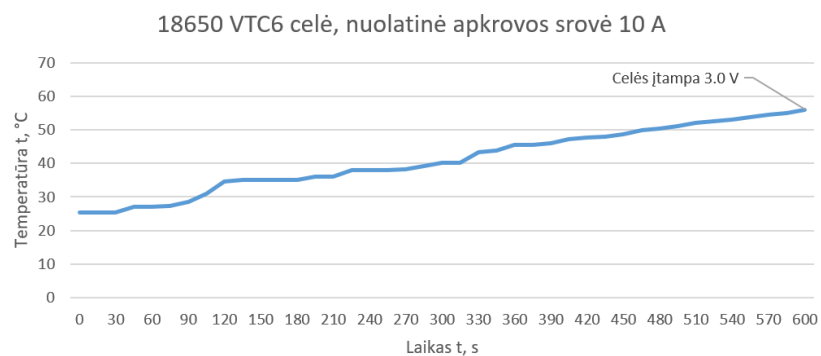


3.5 pav. „Sony / Murata“ gamintojo VTC6 celė.



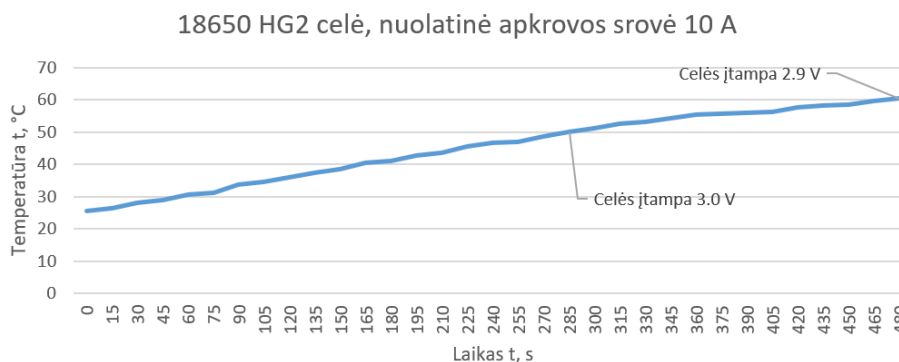
3.6 pav. „Litokala“ gamintojo HG2 modelio celė.

Toliau esančiame paveiksle (žr. 3.7 pav.) pateiktas „Sony / Murata“ gamintojo VTC6 modelio celės iškrovos testas, kai naudojama 10 A srovės apkrova ir stebima baterijos temperatūra. Testas atliktas kambario temperatūroje su iki galo įkrauta cele iki 4,2 V įtampos.



3.7 pav. VTC6 celės testas su apkrova.

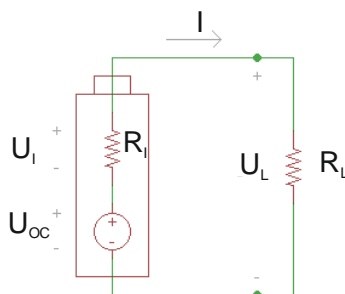
Testas pakartotinai atliktas su „Litokala“ gamintojo HG2 modelio cele (žr. 3.8 pav.). Testas atliktas kambario temperatūroje su iki galo įkrauta cele iki 4,2 V įtampos.



3.8 pav. HG2 celės testas su apkrova.

Iš atliktų testų su 10 A nuolatinės srovės apkrova matyti, jog VTC6 celės įtampa nuo pilnai įkrautos 4,2 V nukrito iki 2,9 V per 600 sekundžių, o celės temperatūra nuo kambario temperatūros pakilo iki 56 °C laipsnių, o HG2 celės įtampa nuo 4,2 V nukrito iki 3 V per 285 sekundes, iki 2,9 V per 480 sekundžių nuo testo pradžios, o celės temperatūra nuo kambario temperatūros pakilo iki 60,4 °C laipsnių temperatūros. Taigi, elektrinio motociklo baterijos konstrukcijai buvo pasirinktos „Sony / Murata“ gamintojo VTC6 modelio 3 Ah ir 30 A trumpalaikės iškvos srovės celės. Šių celių galutinė kaina iš Kinijos tiekėjo siekė 1,85 € / vnt., todėl bendra suma už elektrinio motociklo baterijos 100 vnt. celes – 185 €.

3.1 lentelėje pateikiami skaičiavimai idealiomis sąlygomis, kai visų celių vidinė varža yra identiška. Tačiau praktikoje celių vidinė varža nėra identiška dėl celių gamybos metu atsirandančių netikslumų, todėl surenkant bateriją iš 100 vnt. celių jas reikia surūšiuoti pagal celių vidinę varžą. Nuosekliai jungiamų celių eilių vidinės varžos turi būti parenkamos kaip įmanoma vienodesnės dėl to, kad esant nominaliai arba maksimaliai variklio apkrovai iš kiekvienos eilės būtų imama kuo vienodesnė srovė, kitu atveju esant skirtingoms celių eilių vidinėms varžoms bus imama didžiausia srovė tos eilės, kurios varža yra mažiausia, o tai įtakos turės celių gyvavimo trukmei. Norint sužinoti vienos celės vidinę varžą prie celės lygiagrečiai reikia prijungti R_L varžą pagal 3.9 paveiksle pateiktą principinę jungimo schemą [34].



3.9 pav. Principinė celės su apkrovos varža jungimo schema [34].

Vidinė celės varža apskaičiuojama imant atviros grandinės įtampos ir celės su apkrova įtampos rodmenis. Į O_{mo} dėsnį įsistatome R_L ir U_L vertes tam, jog sužinotume grandinės srovę [34]:

$$U = I \cdot R, \quad (3.14)$$

$$U_L = I \cdot R_L, \quad (3.15)$$

$$I = \frac{U_L}{R_L}, \quad (3.16)$$

Pagal Kirchofo įtampos dėsnį sužinoma vidinė celės varžos įtampa. Supaprastinus šią schemą matoma, jog įtampos kritimas abejuose varžos galuose turi sudaryti idealaus įtampos šaltinio įtampą.

$$U_{OC} = U_I + U_L, \quad (3.17)$$

$$U_I = U_{OC} - U_L, \quad (3.18)$$

Kai yra žinoma vidinės celės varžos įtampos kitimą ir srovę tekančią per ją galima pasinaudoti Omo dėsniumi. Celės vidinė varža apskaičiuojama pagal pateiktas formules:

$$U_I = I \cdot R_I, \quad (3.19)$$

$$R_I = \frac{U_I}{I}, \quad (3.20)$$

Bendroji celės vidinė varža apskaičiuojama pagal 3.21 formulę:

$$R_I = \frac{U_{OC} - U_L}{\frac{U_L}{R_L}} = \frac{(U_{OC} - U_L)R_L}{U_L}, \quad (3.21)$$

Baterijos nuosekliai sujungtų celių į vieną eilę vidinė varža išreiškiama pagal 3.22 formulę:

$$R_S = R_{I1} + R_{I2} + R_{I3} + \dots + R_{I20} \quad (3.22)$$

Baterijos bendra vidinė varžą gaunama pagal 3.23 formulę:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{S1}} + \frac{1}{R_{S2}} + \frac{1}{R_{S3}} + \frac{1}{R_{S4}} + \frac{1}{R_{S5}} \quad (3.23)$$

Elektrinio motociklo baterijoje naudojama baterijų valdymo sistemos (BMS) plokštė, kuri stebi ir valdo baterijos celių įkrovimą ir iškrovimą, baterijos įtampą, temperatūrą, įkrovimo būseną, energijos suvartojimo, likusio veikimo laiką, įkrovimo ciklų skaičių. BMS sistemos pagrindinė užduotis užtikrinti optimalų baterijoje esančios energijos panaudojimą, tam kad būtų išvengta baterijos celių perkrovimo ar gilaus iškrovimo dėl didelės įtampos, kuri gali atsirasti dėl greito įkrovimo ir didelės iškrovos srovės. Daugelio baterijų atvejų BMS sistema turi celių balansavimo funkciją, kuri atsakinga už skirtingų celių vienodus įkrovimo ir iškrovimo reikalavimus [35]. Elektrinio motociklo baterijoje naudojama „Olive Leaf“ gamintojo 8S – 20S 300 A BMS plokštė (žr. 3.10 pav.).

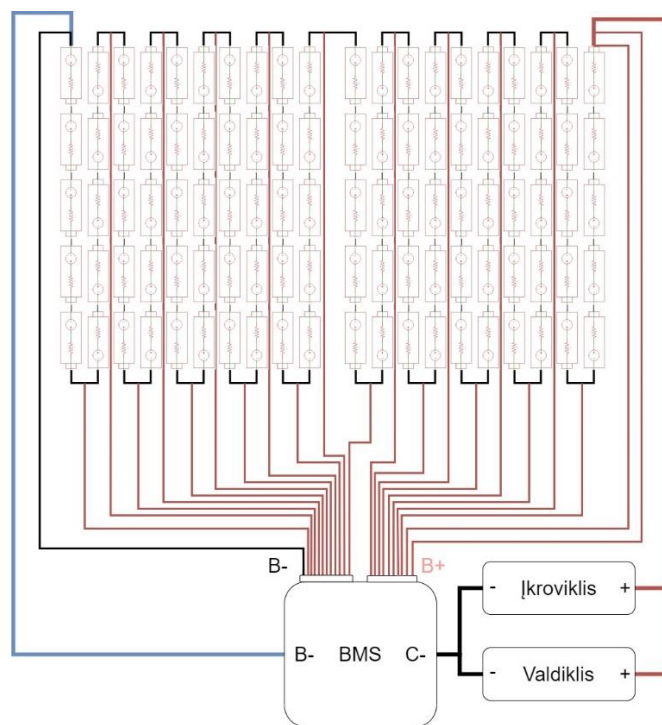


3.10 pav. BMS valdiklis.

BMS specifikacijos ir funkcijos [36]:

1. trumpalaikė iškrovimo srovė – 400 A;
2. nominali iškrovimo srovė – 300 A;
3. įkrovimo maksimali įtampa – 85 V;
4. celės perkrovos apsauga – $4,25 \pm 0,025$ V;
5. celės krovimo nutraukimo įtampa – $4,19 \pm 0,05$ V;
6. celės balansavimo aptikimo įtampa – 4,18 V;
7. celės balansavimo nutraukimo įtampa – 4,18 V;
8. celės balansavimo srovė – $35 \pm 0,05$ mA;
9. celės iškrovimo apsaugos įtampa – $2,8 \pm 0,05$ V;
10. temperatūrinė apsauga – 65 – 75 °C;
11. bluetooth modulis;
12. išmaniajam telefonui skirta aplikacija baterijos parametrų stebėsenai.

Apačioje esančiame 3.11 paveiksle pateikta baterijos celių ir BMS principinė jungimo schema:



3.11 pav. Principinė baterijos celių su BMS jungimo schema.

Baterijos surinkimui ir celių išdėstymui naudojami 18650 celių tipo laikiklių rėmeliai (žr. 3.12 pav.).



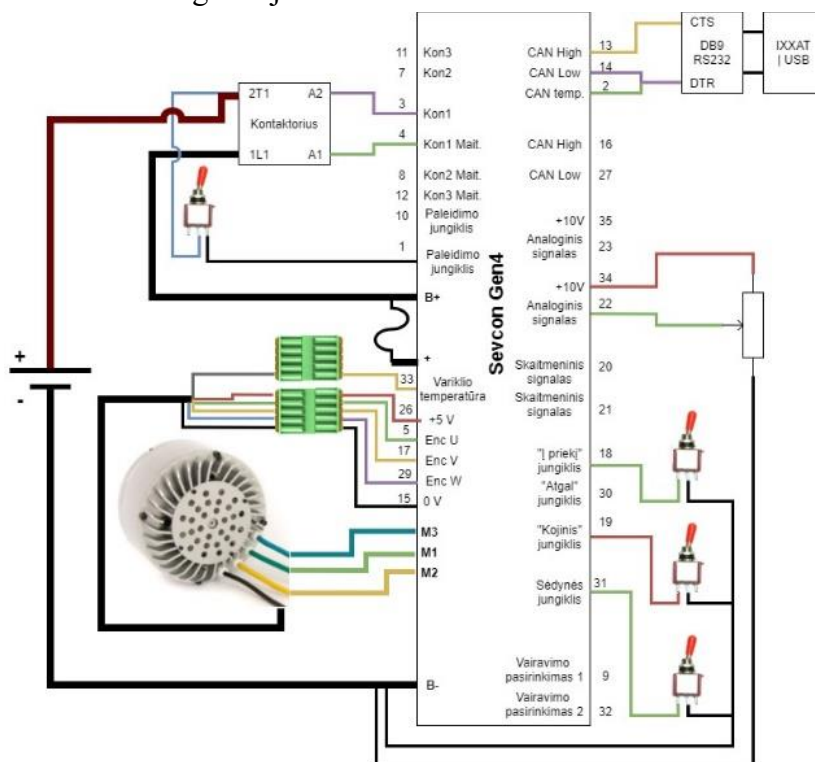
3.12 pav. 18650 celių tipo rėmeliai.

Elektrinio motociklo bateriją sudaro „Sony / Murata“ gamintojo VTC6 modelio 100 vnt. celių, t. y. 20 vnt. celių sujungtų nuosekliai į eilę ir 5 tokios eilės sujungtos lygiagrečiai. Prie baterijos celių prijungtas BMS valdiklis. Bendra baterijos kaina – 354,49 €.

3.5. Elektrinio motociklo valdymo sistema

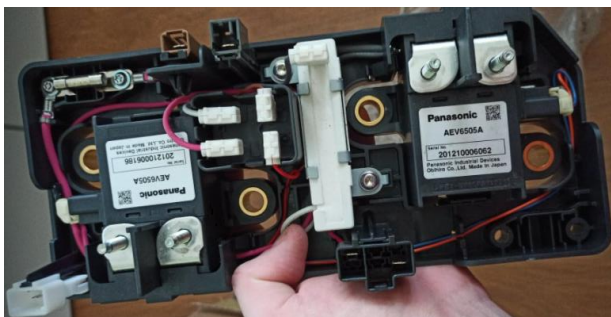
Elektrinio motociklo elektrinę valdymo sistemą sudaro: elektrinis HPM3000B variklis, „Sevcon“ gamintojo Gen 4 greičio valdiklis, greičio rankena, relė, baterija.

3.3 paveiksle pateikta elektrinio motociklo valdymo sistemos principinė komponentų sujungimo schema. Vienas iš būtinų valdiklio komponentų, jog valdiklis įsijungtų – relė, kuris prijungtas prie valdiklio 3 ir 4 išėjimo kontaktų. Prie valdiklio 7 ir 8 bei 11 ir 12 išėjimo kontaktų taip pat galima prijungti papildomus kontaktorius ar reles. Visi 6 išėjimai užtikrina žemą įtampą arba srovę priklausomai nuo valdiklio konfigūracijos.



3.13 pav. Principinė valdiklio jungimo schema į bendrą motociklo valdymo sistemą.

Šiuo metu vietoje kontaktoriaus yra naudojama 2012 metų Nissan Leaf AEV6505A relė (žr. 3.14 pav).



3.14 pav. AEV6505A relė.

Relės techninės specifikacijos [37]:

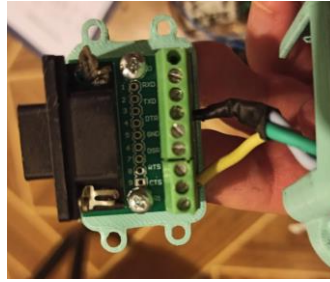
1. Ritės įtampa – 12 VDC;
2. Ritės srovė – 0,4 A;
3. Maksimali srovė – 400 A;
4. Maksimali relės įtampa – 500 VDC;

Siekiant paleisti valdiklio sukonfigūruotą programą privaloma įdiegti „Į priekį“, „Kojinį“, „Sėdynės“ jungiklius, kurie yra prijungti prie 18, 19, 31 valdiklio išėjimo kontaktų. Be šių jungiklių valdiklio loginė dalis neveikia. Tik sujungus tinkama seka – „Sėdynės“, „Kojinis“ ir „Į priekį“ jungiklius variklis pradeda veikti nuo greičio rankenos. „Sėdynės“ ir „Kojinis“ jungikliai yra įdiegti saugumo sumetimais tam, jog žmogus būtų aktyvavęs šiuos jungiklius savo svoriu tik užsėdęs ant transporto priemonės, kitu atveju atjungus nors vieną iš šių jungiklių suveikia valdiklio apsauga ir yra atjungiamas greičio valdymo algoritmas. Taip pat, yra galimybė prijungti jungiklį „Atgal“ prie 30 valdiklio išėjimo kontakto, kuris atsakingas už variklio sukimosi krypties pakeitimą. Variklio su valdikliu testavimo sumetimais visi jungikliai šiuo metu yra sumontuoti ant vientisos plokštės (žr. 3.15 pav.).



3.15 pav. Jungiklių montavimo vieta.

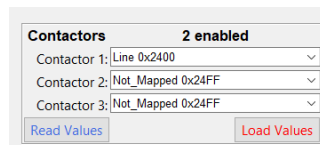
Elektrinio motociklo greičio rankena prijungiama prie 22 ir 34 valdiklio išėjimo kontaktų. Taip pat, papildoma stabdymo rankena gali būti prijungta prie 23 ir 25 valdiklio išėjimo kontaktų. Prie 2, 13, 14 valdiklio išėjimo kontaktų prijungiamas perėjimas iš DB9 į RS232 (žr. 3.16 pav.). Prie šio perėjimo prijungiamas CAN į USB keitiklis.



3.16 pav. DB9 į RS232 perėjimas

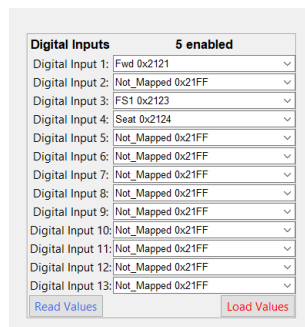
Prie 16, 27 valdiklio išėjimo kontaktų įmanoma prijungti papildomus įrenginius, kurie komunikuoja CAN Bus sąsaja valdiklio parametrų vizualiniam stebėjimui. 9 ir 32 valdiklio išėjimo kontaktai skirti prijungti papildomus jungiklius pasirinktam greičio profiliui aktyvuoti, kuris sukonfigūruojamas per valdiklio programą.

„Sevcon“ Gen 4 valdiklis konfigūruojamas DVT Customer 2020.10 programine įranga ¹. Programoje pasirenkamas kontaktorius (žr. 3.17 pav.).



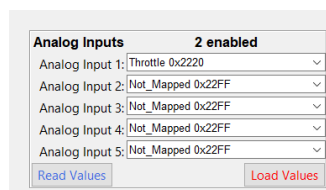
3.17 pav. Programoje pasirenkamas kontaktorius.

Programoje priskiriami skaitmeniniai išėjimo signalai „Į priekį“, „Kojiniam“ ir sėdynės jungikliams (žr. 3.18 pav.).



3.18 pav. Priskiriami skaitmeniniai signalai.

Programoje priskiriamas analoginis greičio rankenos signalas (žr. 3.19 pav.).



3.19 pav. Priskiriamas analoginis signalas greičio rankenai.

¹ DVT Customer. DVT Customer 2020.10 [programinė įranga]. 2020 [žiūrėta 2021-03-28]. Prieiga per: <https://www.voltsport.co.uk/sevcon-dvt>

3.6. Elektrinio motociklo konstrukcijos surinkimas

Elektrinio motociklo surinkimas prasidėjo nuo Suzuki GS500 rėmo restauracijos (žr. 3.20 pav.).



3.20 pav. Motociklo rėmas prieš restauraciją.

Visi motociklo komponentai buvo išrinkti, o pats rėmas paruoštas smėliavimui ir milteliniam dažymui. 3.21 paveiksle pateikiamas motociklo vaizdas po rėmo restauracijos. Šiuo etapu pakeisti visi guoliai ir įvorės į naujus komponentus.



3.21 pav. Motociklo rėmas po restauracijos.

Prieš rėmo restauravimą buvo pradėtas kurti elektrinio variklio laikiklis pagal motociklo rėme esančius montavimo taškus. Kadangi motociklo rėmas yra 1992 metų jo brėžinių ar 3D surinkimo modelio gauti nepavyko, todėl pirminis eskizas buvo nusibraižytas ant kartono lapo (žr. 3.22 pav.), vėliau pradėta kurti detalė SolidWorks 2019 projektavimo programoje.



3.22 pav. Pirminis variklio laikiklio eskizas.

Suprojektuotas laikiklis ir įmontuotas elektrinis variklis į motociklą (žr. 3.23 pav.). Elektrinio variklio laikiklio brėžiniai pateikiami pirmame priede. Pirminis variklio laikiklis pagamintas iš 12 mm storio beržo faneros, tolimesniame surinkimo etape dėl tvirtumo numatoma laikiklį pagaminti iš plieno medžiagos lakšto, kurio storis – 5 mm.



3.23 pav. Elektrinio motociklo variklio laikiklis.

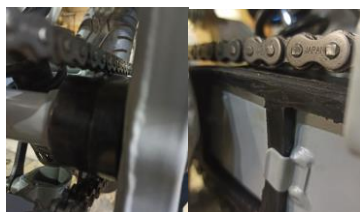
Suprojektuotas su SolidWorks 2019 projektavimo programa ir atspausdintas FDM (angl. fused deposition modeling) tipo 3D spausdintuvu variklio priekinės žvaigždės laikiklis, kuris montuojasi ant variklio veleno (žr. 3.24 pav.).



3.24 pav. Elektrinio motociklo priekinės žvaigždės laikiklis.

Pirminiais testavimo bandymais priekinės žvaigždės laikiklis neatlaikė apkrovos, todėl buvo atspausdintas antras laikiklis, kurio sluoksnių užpildymas buvo padidintas nuo 25 % iki 100 %. Priekinės žvaigždės laikiklio brėžiniai pateikiami antrame priede.

Įmontavus elektrinį variklį į variklio laikiklį, užmontavus žvaigždę su laikikliu ant elektrinio variklio veleno ir uždėjus motociklo grandinę gaunamas 1 cm tarpas nuo grandinės apačios iki šliaužiklio viršaus (žr. 3.25 pav.).



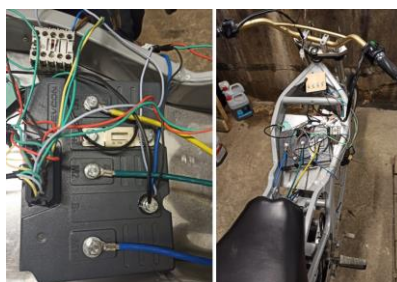
3.25 pav. Suderintas grandinės aukštis.

3.26 paveiksle matomas iš mechaninės pusės surinktas motociklo vaizdas.



3.26 pav. Motociklo bendras vaizdas surinkus mechaninius komponentus.

Įdiegta elektronika pagal 3.13 paveiksle nurodyta jungimo schemą į motociklo surinkimą. Elektrinis motociklas paruoštas tiriamajai magistrinio baigiamojo darbo daliai (žr. 3.27 pav.).



3.27 pav. Elektrinis motociklas paruoštas tiriamajai darbo daliai.

4. Tiriamoji dalis

4.1. Elektrinio variklio holo jutiklių kalibravimo tyrimas

Prieš valdiklio KP ir KI dedamųjų derinimą reikia atlikti variklio holo jutiklių kalibravimą ir nustatyti tinkamą holo jutiklių nuokrypį nuo nulinės pozicijos vertės. DVT programoje šis parametras apibūdinamas kaip „Encoder Offset“.

Holo jutiklių kalibravimas pradamas holo jutiklių bendrinių parametų apibrėžimu programoje. Veleno jutiklių konfigūravimo (angl., Encoder Configuration) lange pasirenkame holo jutiklių 5 V maitinimo įtampą ir „UVW“ holo jutiklių tipą (žr. 4.1 pav.).

Encoder Configuration [0x4630]		
Encoder Pull Up for AB	Enabled	▼
Encoder Supply	5V	▼
Encoder Type	UVW only	▼
Encoder Offset	0.0	Degrees
Sin input minimum (trough) voltage	0.0	V
Sin input maximum (peak) voltage	4.999267399267415	V
Cos input minimum (trough) voltage	0.0	V
Cos input maximum (peak) voltage	4.999267399267415	V
Actual sin minimum (trough) voltage	0.0	V
Actual sin maximum (peak) voltage	0.0	V
Actual cos minimum (trough) voltage	0.0	V
Actual cos maximum (peak) voltage	0.0	V
Multipole Sin-cos / Resolver waves per mechanical rotation	2.0	
Encoder offset	0	Degrees
Sin-cos / U/VW latency select	UVW using fine adjust	▼
Sin-cos / U/VW latency fine adjust	0.0	us
Sin-cos min warning voltage	0.0	V
Sin-cos max warning voltage	0.0	V

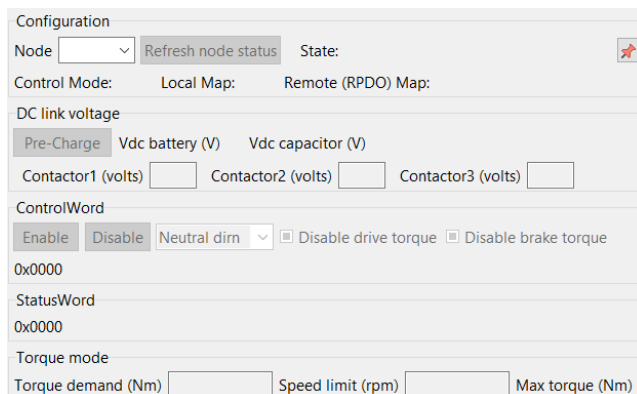
4.1 pav. Holo jutiklių bendriniai parametrai.

Sekančiame „PMAC motor parameters“ lange reikia parinkti elektrinio variklio parametrus (žr. 4.2 pav.). Šiame lange įvedami tokie parametrai: variklio statoriaus srovė, minimali įmagnetinimo srovė, polių porų skaičius, statoriaus induktyvumas. Šių parametų vertės įvedamos remiantis 3.3 poskyryje pateikta informacija.

PMAC motor parameters		
Maximum Stator Current (Is max)	240.0	A(RMS)
Minimum Magnetizing Current (Im min)	-240.0	A(RMS)
Number of Pole Pairs (np)	4.0	
Stator Inductance PMAC (Ls)	117.95759201049799	uH
Voltage Constant (Ke)	0.021270751953125	V/rads
Max drive mod index	89.990234375	%
Max brake mod index	98.9990234375	%
Percentage minimum allowed saturation of Ls	39.9993896484375	%
Current control proportional gain (Kp)	2.0	
Current control integral gain (Ki)	0.019989013671875	
D-axis current controller proportional gain	0.0	
D-axis current controller integral gain	0.0	
Frequency/Mod index control Kp	0.0	
Frequency/Mod index control Ki	0.0	

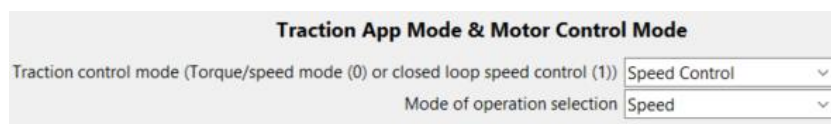
4.2 pav. Įvedami variklio parametrai.

Kalibravimo tyrimas atliekamas „Control motor on test bench“ funkcija, kurioje galima nustatyti sukimo momento N·m arba variklio greičio RPM vertes, todėl holo jutiklių kalibravimo tyrimas bus atliekamas greičio arba sukimo momentu režimu (žr. 4.3 pav.).

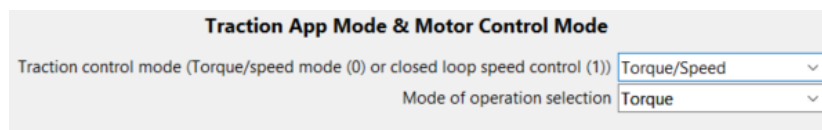


4.3 pav. „Control motor on test bench“ funkcijos darbo langas.

„Traction App Mode & Motor Control Mode“ lange yra aktyvinami greičio arba sukimo momento režimai (žr. 4.4 pav.).



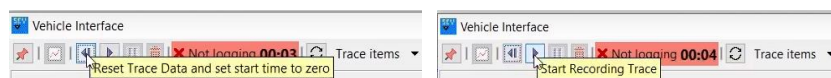
a)



b)

4.4 pav. Pasirenkamas greičio (a) arba sukimo momento (b) valdiklio veikimo režimas.

Naudojant „Control motor on test bench“ funkciją ir siekiant nustatyti holo jutiklių nuokrypį testo metu, kuomet variklis paleidžiamas sukimo momento ar greičio režimu, duomenys turi būti įrašomi į CSV (angl. comma – separated values) formato failą. Testo duomenys paleidžiami įrašinėti „Vehicle Interface“ lange. Prieš testo pradžią įrašomų parametrų vertės yra atstatomos į pradines vertes, o tuomet nuspaudžiamas duomenų įrašymo starto mygtukas (žr. 4.5 pav.).

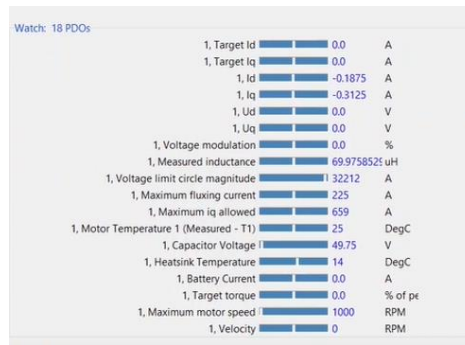


a)

b)

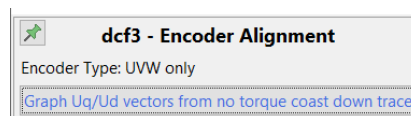
4.5 pav. Parametrų vertės atstatomos į pradines (a) ir paleidžiamas duomenų įrašymas į CSV formato failą (b).

„Vehicle Interface“ lange galima stebėti realiu laiku kintančius parametrus (žr. 4.6 pav.).



4.6 pav. Duomenys iš valdiklio atvaizduojami realiu laiku.

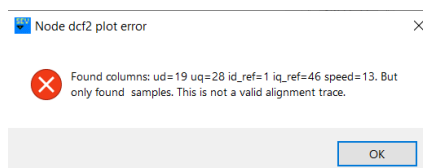
Atlikus testą „Graph Uq/Ud vectors from no torque coast down trace“ lange yra parenkamas naujai sugeneruotas CSV failas (žr. 4.7 pav.).



4.7 pav. Pasirenkamas CSV tipo failas.

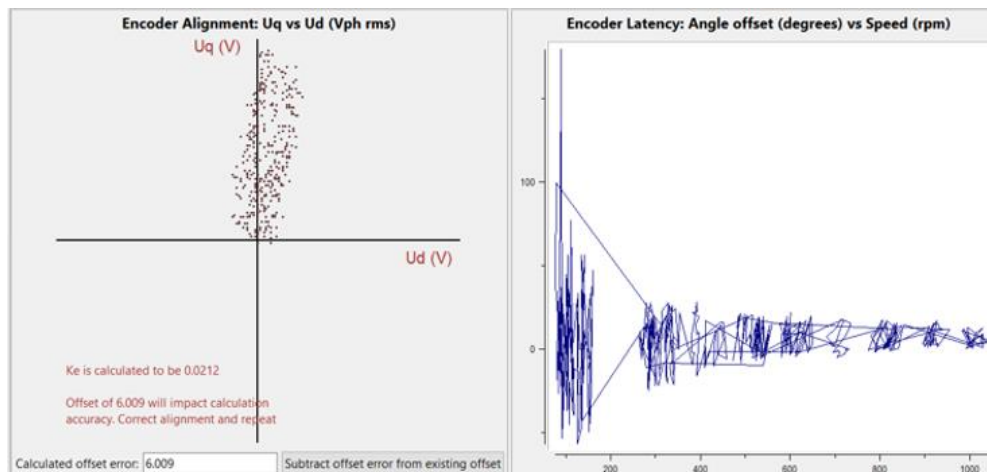
Pasirinkus failą DVT programoje iš testo rezultatų yra sukuriamas Uq nuo Ud taškų grafikas, o šalia nubrėžiamas jutiklio vėlavimo laiko grafikas bei nurodoma naujai sugeneruotos įtampos konstanta Ke ir holo jutiklio nuokrypio vertės, kurios sekančio testavimo metu turi būti pakeistos į naujai gautąsias. Tyrimo metu siekiama, jog Ud įtampos vertė būtų lygios nuliui, kuomet pasiekama ši vertė testavimas baigiamas ir holo jutiklių nuokrypis laikomas sukalibruotu.

Prieš pradėdant testą paaiškėjo, jog gamintojo DVT Customer 2020.10 programinė įranga neveikė tinkamai įrašydama valdiklio realius parametrus į CSV formato failą. Įrašius duomenis į failą ir šį bandant atidaryti „Graph Uq/Ud vectors from no torque coast down trace“ funkcija gaunamas klaidos kodas (žr. 4.8 pav.).



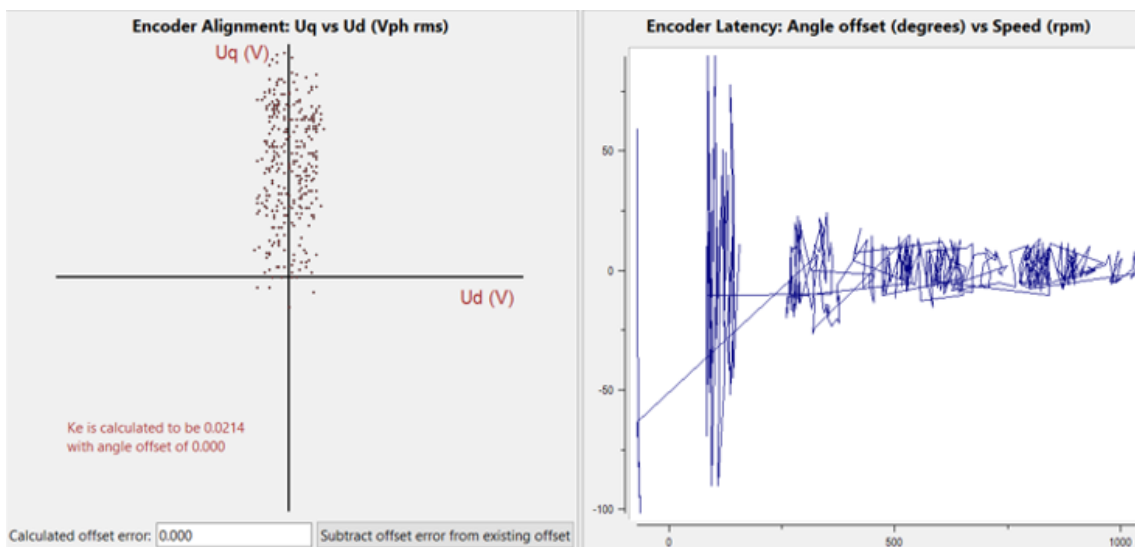
4.8 pav. Klaidos kodas.

Išnagrinėjus CSV formato failą Microsoft Excel programa paaiškėjo, jog duomenys nėra tinkamai atskiriami į stulpelius ir eilutes, dėl to, jog programai įrašinėjant duomenis buvo praleistas naujos eilutės „\n“ simbolis (žr. 4.9 pav.).



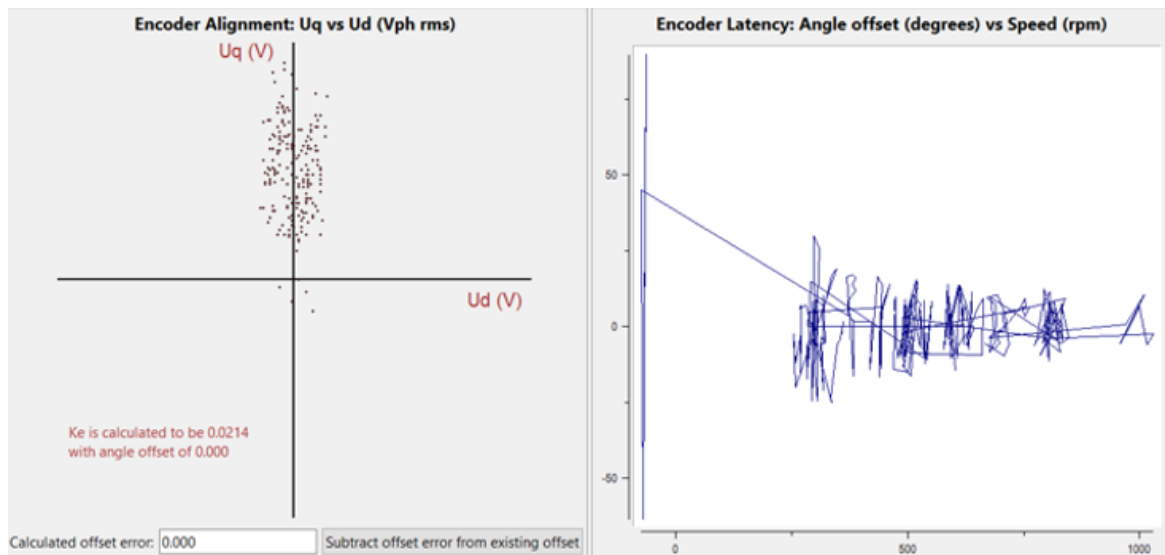
4.11 pav. Greičio režimas, U_q nuo U_d grafikas, holo jutiklių nuokrypis -52° , K_e vertė – $0,0212 \text{ V}/(\text{rad/s})$.

Iš grafiko matoma, jog U_d įtampa nėra lygi nuliui. Programos algoritmo siūlymas padidinti kampą $6,009^\circ$, o įtampos konstantos K_e vertę palikti tokią pačią, t. y. $0,0212 \text{ V}/(\text{rad/s})$. Nustatomas holo jutiklių nuokrypio kampas į -58° ir pakartojamas testas su naujai gautomis reikšmėmis (žr. 4.12 pav.).



4.12 pav. Greičio režimas, U_q nuo U_d grafikas, holo jutiklių nuokrypis -58° , K_e vertė – $0,0212 \text{ V}/(\text{rad/s})$.

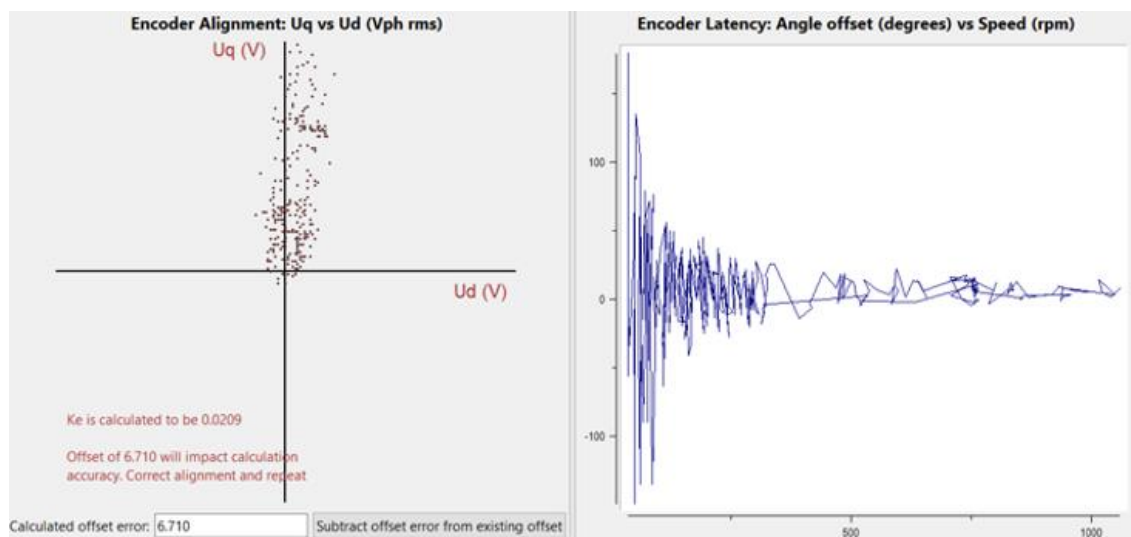
Iš grafiko matoma, jog U_d įtampa lygi nuliui, holo jutiklių nuokrypio vertė yra 0, tačiau matoma, jog reikia keisti įtampos konstantos vertę. Kartojamas bandymas paliekant holo jutiklių nuokrypio kampą -58° , o K_e reikšmė pakeičiama į $0,0214 \text{ V}/(\text{rad/s})$ (žr. 4.13 pav.).



4.13 pav. Greičio režimas, U_q nuo U_d grafikas, holo jutiklių nuokrypis -58° , K_e vertė – $0,0214 \text{ V}/(\text{rad/s})$.

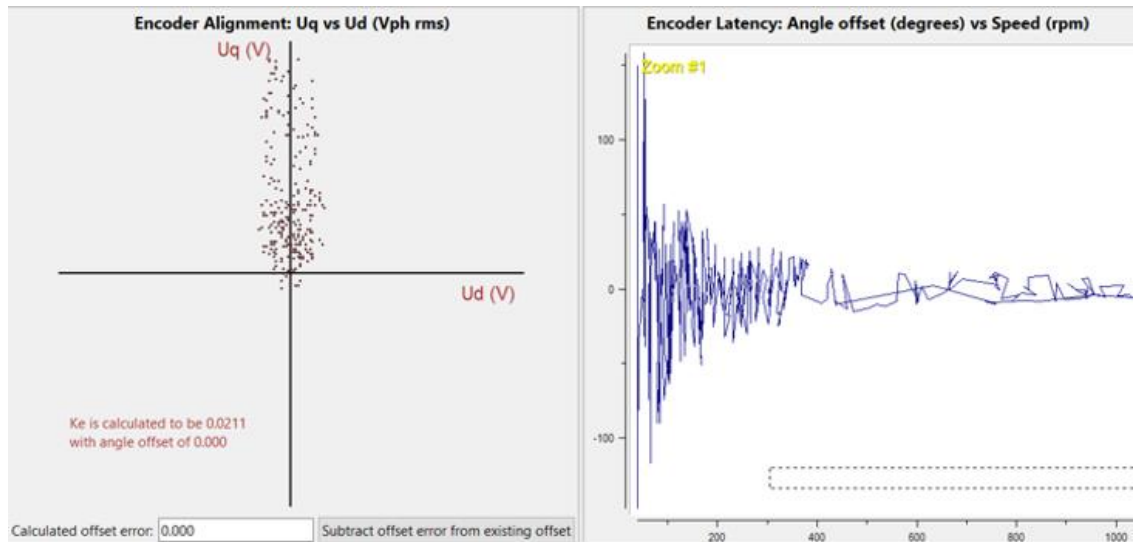
Iš grafiko matoma, jog U_d įtampa lygi nuliui, holo jutiklių nuokrypio parametras yra 0, įtampos konstantos K_e siūloma vertė atitinka nustatytąją – $0,0214 \text{ V}/(\text{rad/s})$. Holo jutikliai pasirinktame greičio režime yra suderinti, holo jutiklių nuokrypis -58° , K_e vertė $0,0214 \text{ V}/(\text{rad/s})$.

Testas kartojamas pasirinkus sukimo momento režimą (žr. 4.4 pav., b). Pradinis holo jutiklių nuokrypio kampas nustatomas į -52° , parenkamos $2 \text{ N}\cdot\text{m}$ sukimo momento ir pradinė K_e $0,0212 \text{ V}/(\text{rad/s})$ vertės. Įrašius duomenis CSV formatu, šį failą suformatavus Reader.py programa ir įkėlus į DVT programą gaunamas U_q nuo U_d grafikas (žr. 4.14 pav.).



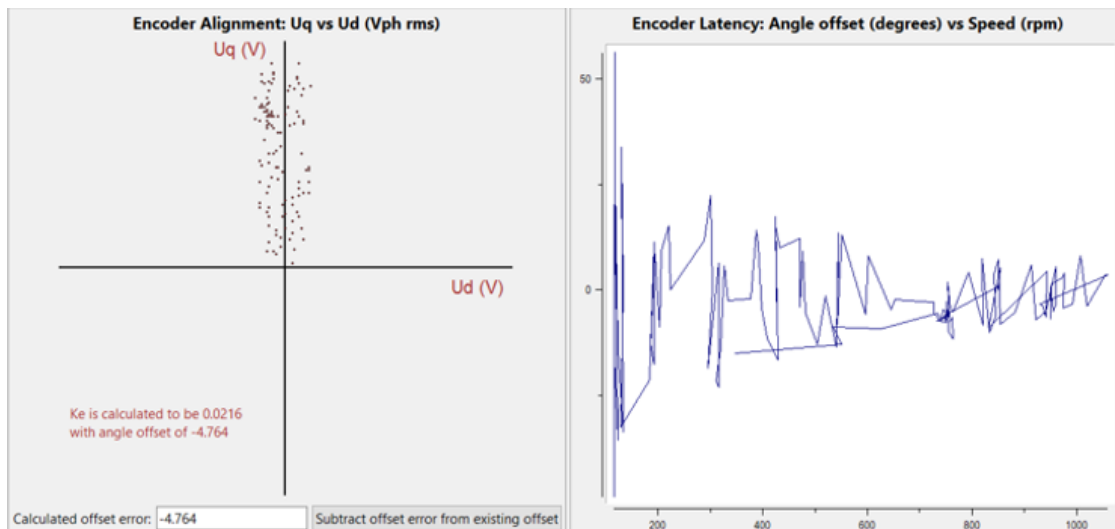
4.14 pav. Sukimo momento režimas, U_q nuo U_d grafikas, holo jutiklių nuokrypis -52° , K_e vertė – $0,0212 \text{ V}/(\text{rad/s})$.

Iš grafiko matoma, jog U_d įtampa nėra lygi nuliui. Iš grafiko matoma, jog reikia padidinti holo jutiklių nuokrypio kampą į $6,710^\circ$, o K_e vertę pakeisti į $0,0209 \text{ V}/(\text{rad/s})$. Nustatomas holo jutiklių nuokrypio kampas į $-58,688^\circ$ ir pakartojamas testas (žr. 4.15 pav.).



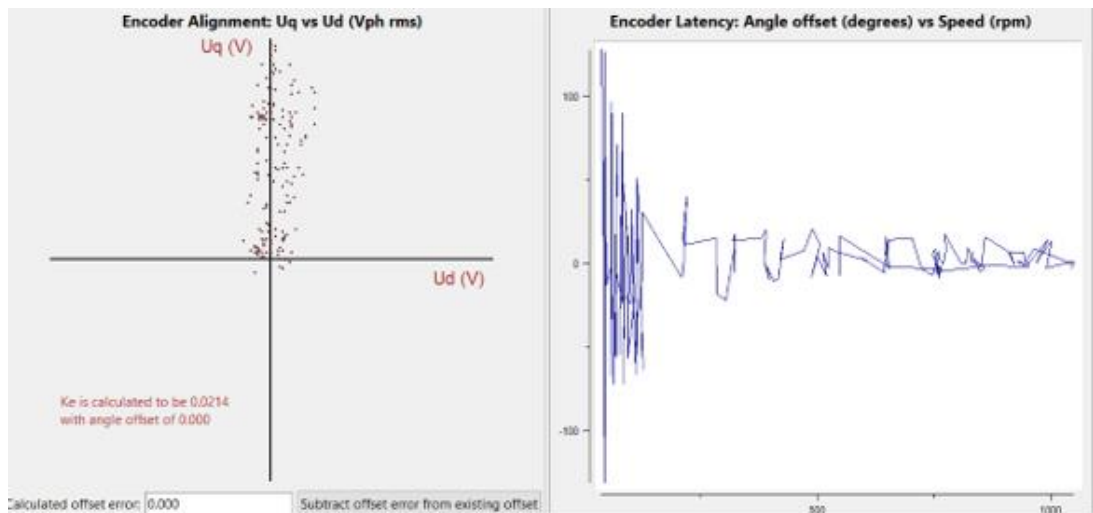
4.15 pav. Sukimo momento režimas, U_q nuo U_d grafikas, holo jutiklių nuokrypis $-58,688^\circ$, K_e vertė – $0,0209 \text{ V}/(\text{rad/s})$.

Iš grafiko matoma, jog U_d įtampa lygi nuliui, holo jutiklių nuokrypio vertė yra 0, tačiau įtampos konstantos vertę reikia padidinti. Pakartojamas bandymas paliekant holo jutiklių nuokrypio kampą $-58,688^\circ$, o K_e reikšmę pakeičiant į $0,0211 \text{ V}/(\text{rad/s})$ (žr. 4.16 pav.).



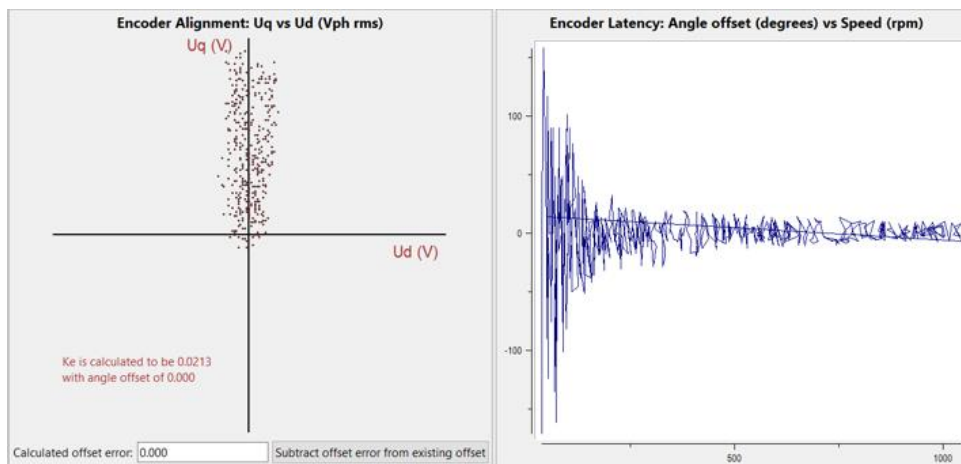
4.16 pav. Sukimo momento režimas, U_q nuo U_d grafikas, holo jutiklių nuokrypis $-58,688^\circ$, K_e vertė – $0,0211 \text{ V}/(\text{rad/s})$.

Iš grafiko matoma, jog U_d įtampa nėra lygi nuliui, dėl to reikia sumažinti holo jutiklių nuokrypio vertę į $-4,764^\circ$, o K_e reikšmę pakeisti į $0,0216 \text{ V}/(\text{rad/s})$. Nustatomas holo jutiklių nuokrypio kampas į $-53,875^\circ$ ir pakartojamas testas (žr. 4.17 pav.).



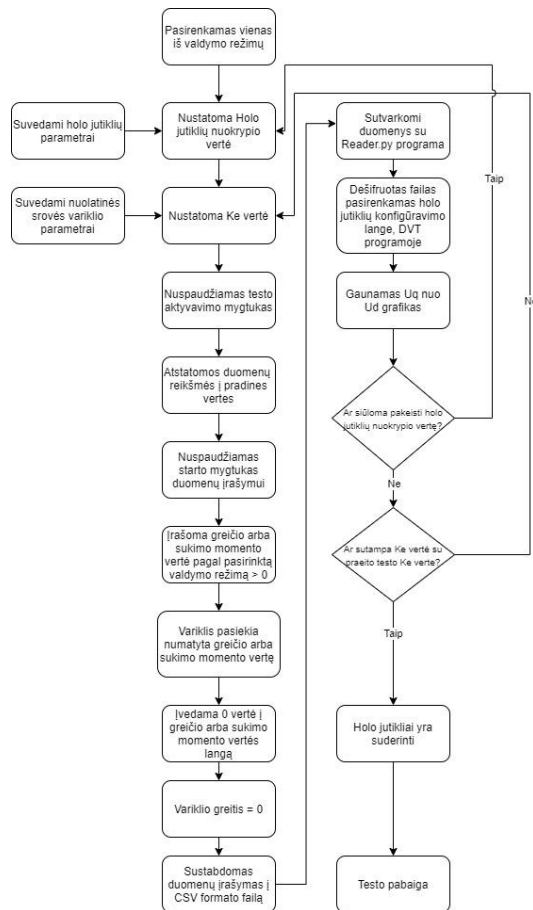
4.17 pav. Sukimo momento režimas, U_q nuo U_d grafikas, holo jutiklių nuokrypis $-53,875^\circ$, K_e vertė – $0,0216 \text{ V}/(\text{rad/s})$.

Iš grafiko matome, jog U_d įtampa lygi nuliui, tačiau K_e vertę siūloma pakeisti į $0,0214 \text{ V}/(\text{rad/s})$. Pastebėjus bendrą panašumą – K_e vertę – $0,0214 \text{ V}/(\text{rad/s})$, tiek derinamo sukimo momento, tiek suderinto greičio režimo metu iškeliami hipotezė, jog pasirinktas valdymo režimas neturi įtakos holo jutiklių nuokrypio derinimui, todėl nutarta pakeisti holo jutiklių nuokrypio vertę į -58° . Pakartojamas testas su atnaujintomis vertėmis (žr. 4.18 pav.).



4.18 pav. Sukimo momento režimas, U_q nuo U_d grafikas, holo jutiklių nuokrypis -58° , K_e vertė – $0,0214 \text{ V}/(\text{rad/s})$.

Iš grafiko matoma, jog U_d įtampa lygi nuliui, K_e vertė – $0,0213 \text{ V}/(\text{rad/s})$. Taigi, valdymo režimas jutiklių kalibravimui įtakos neturi. Greičio ir momento sukimo valdymo režimais holo jutiklių nuokrypio kampas yra -58° , K_e vertė svyruoja nuo $0,0213 - 0,0214 \text{ V}/(\text{rad/s})$. K_e vertės nuokrypis $\pm 0,001 \text{ V}/(\text{rad/s})$ atsiranda dėl skirtingų testo atlikimo laikų, o taip pat dėl mechaninių komponentų, tokių kaip galinio rato stabdžių kaladėlių trinties į stabdžių diską ar grandinės trinties. Atsižvelgus į holo jutiklių kalibravimo tyrimo eigą buvo sudaryta holo jutiklių kalibravimo loginė schema (žr. 4.19 pav.).



4.19 pav. Holo jutiklių kalibravimo ir testo atlikimo loginė schema.

4.2. Valdymo sistemos matematinio modelio sukūrimas

Elektrinio motociklo valdiklyje naudojamas PMSM FOC variklio valdymo algoritmas. Siekiant suderinti elektrinio motociklo greičio ir srovės PI valdiklius reikia sudaryti Simulink modelį Matlab aplinkoje, kuris atitiktų supaprastintą elektrinio motociklo valdiklio valdymą.

FOC algoritmo idėja imituoti nepriklausomo žadinimo nuolatinės srovės variklį išlaikant rotoriaus magnetinį srautą statmeną statoriaus magnetiniam laukui tam, kad būtų optimalus sukimo momentas ir galimybė tą sukimo momentą bei magnetinį srautą valdyti atskirai. Tačiau naudojant PMSM variklį šios charakteristikos variklis neturi, nes sukimo momentas ir magnetinis srautas priklauso vienas nuo kito. Todėl šiuos kintamuosius būtina atskirti Park ir Clarke transformacijomis [38], [39], [40].

Matematinis PMSM modelis d – q plokštumose apibūdinamas įtampos, magnetinio srauto, sukimo momento ir sukimo momento matematinėmis lygtimis išraiškomis. PMSM modelio d – q plokštumų įtampa išreiškiama 4.1 ir 4.2 lygtimis [38], [39], [40], [41]:

$$V_d = Ri_d + \frac{d}{dt} \psi_d - \omega \psi_q, \quad (4.1)$$

$$V_q = Ri_q + \frac{d}{dt} \psi_q - \omega \psi_d, \quad (4.2)$$

Magnetinis srautas išreiškiamas 4.3 ir 4.4 lygtimis:

$$\psi_d = L_d i_d + \psi_f, \quad (4.3)$$

$$\psi_q = L_q i_q, \quad (4.4)$$

Elektromagnetinis sukimo momentas išreiškiamas 4.5 lygtimi:

$$T_e = 1.5n_p (\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) = K_e i_q, \quad (4.5)$$

Jeigu $L_d = L_q$ tuomet sukimo momentas yra tiesiogiai proporcingas q ašies srovei, dėl to 4.5 formulė gali būti supaprastina:

$$T_e = 1.5n_p \psi_f i_q, \quad (4.6)$$

Variklio įtampos konstanta, kai $i_d = 0$ išreiškiama 4.7 formule:

$$K_e = 1.5n_p \psi_f. \quad (4.7)$$

čia R – statoriaus apvijų varža, ohm, i_d ir i_q yra d ir q ašių statoriaus srovių išraiškos, A, ψ_d ir ψ_q yra d ir q ašių statoriaus magnetinio srauto išraiškos, Wb, L_d ir L_q yra d ir q ašių statoriaus induktyvumo išraiškos, H, ψ_f – PMSM variklio magnetinio srauto išraiška, Wb, ω – rotoriaus kampinis greitis, rad/s, n_p – variklio polių porų skaičius.

Judesio išraiška:

$$T_e = J \frac{d}{dt} \left(\frac{\omega}{n_p} \right) + R_\Omega \frac{\omega}{n_p} + T_L. \quad (4.8)$$

čia J – variklio veleno inercija, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$, R_Ω slopinimo koeficientas, T_L – apkrovos sukimo momentas, N·m.

FOC valdymo algoritmas gali būti apibūdintas šiais žingsniais [39]:

- išmatuojamos statoriaus i_α ir i_β srovių vertės;
- transformuojama srovė į rotoriaus koordinačių plokštumą. Fazinių srovių transformavimas į rotoriaus koordinačių plokštumą vadinamas Park transformacija ir šis veiksmas gali būti atliekamas matricų daugyba, kur sukimosi matrica projektuoja i_α ir i_β srovių išraiškas į $d - q$ plokštumas [39], [40];

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}, \quad (4.9)$$

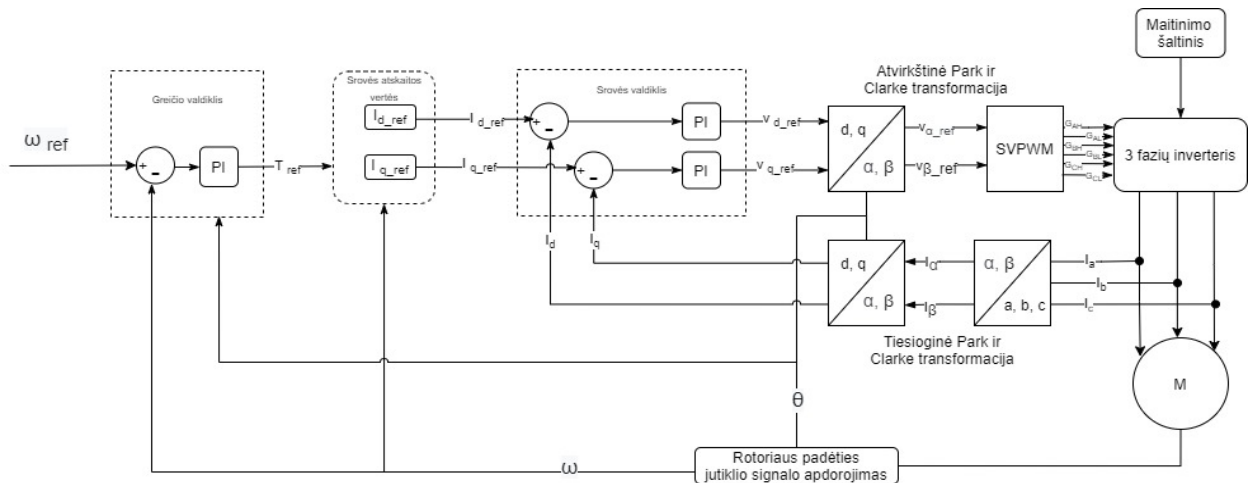
- taikomas srovės valdymo algoritmas, kai $i_d = 0$ ir $i_q = \frac{T_e}{K_T}$, čia K_T sukimo momento konstanta, N·m / A. Srovės valdymui naudojamas PI reguliatorius;
- atliekama atvirkštinė valdiklio išėjimo signalų transformacija į statoriaus koordinačių plokštumą. PI reguliatoriaus išėjime gaunamos dviejų įtampų v_d ir v_q vertės, kurios yra pritaikomos norint pasiekti srovės nustatytus taškus. Kadangi valdymo signalą galima naudoti

tik statoriaus koordinatų plokštumoje dėl šios priežasties reikia atlikti atvirkštinę transformaciją [39], [40];

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix}. \quad (4.10)$$

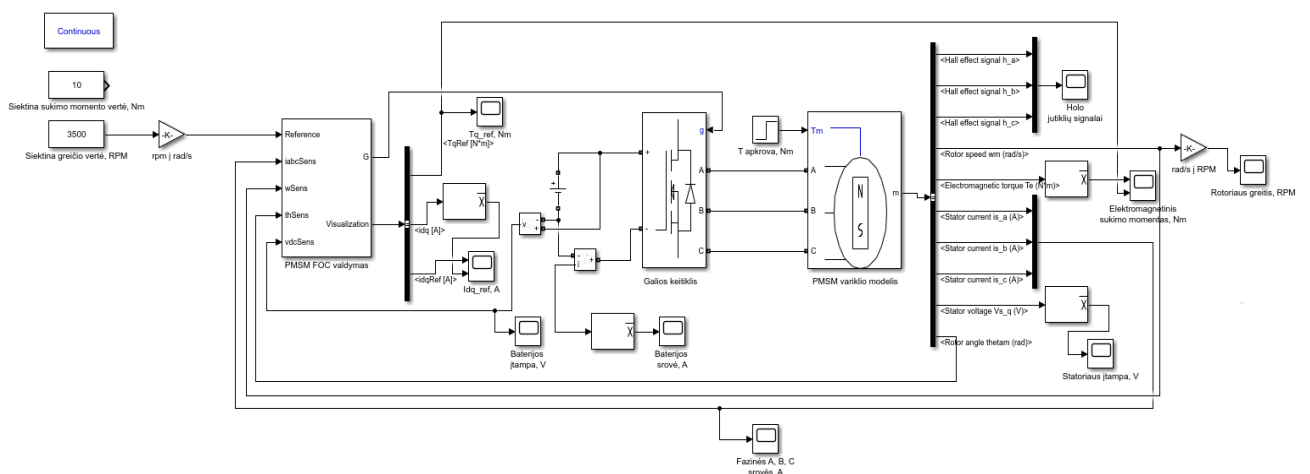
- taikoma erdvės vektorių impulso pločio moduliacijos technologija (angl., SVPWM), kurios metu statoriaus v_α ir v_β įtampų vektoriai yra transformuojami į skirtingų įtampų pločio impulsų seką siekiant sukurti trijų fazių įtampas variklio valdymui.

Žemiau esančiame paveiksle pateikta preliminari FOC valdymo schema (žr. 4.20 pav.) [40], [41], [42].



4.20 pav. PMSM variklio FOC valdymo schema.

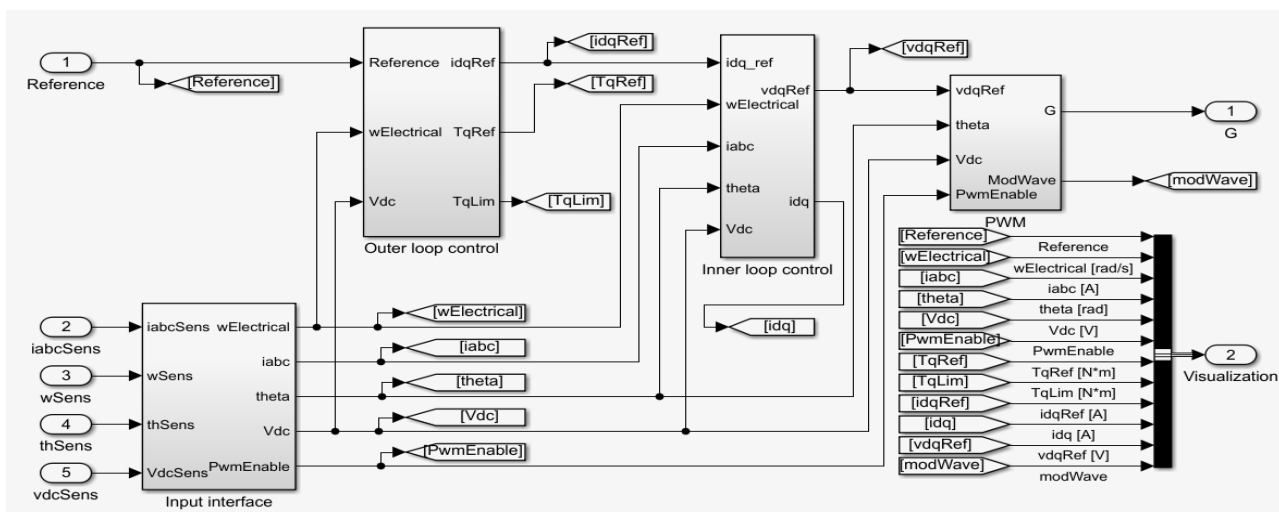
Valdymo sistemą sudaro: fizinė sistema ir valdymo algoritmas. Fizinė sistema susideda iš maitinimo šaltinio, galios keitiklio, variklio bei rotoriaus padėties jutiklio komponentų, o valdymo algoritmą sudaro išorinis greičio ir vidinis srovės kontūrai. 4.21 paveiksle pateiktas valdymo sistemos Matlab Simulink modelis.



4.21 pav. Valdymo sistemos Matlab Simulink modelis.

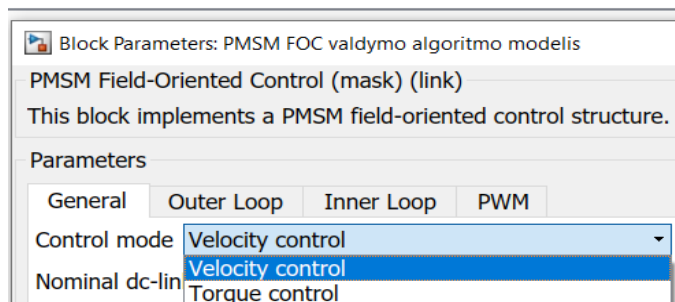
Modelyje naudojami PMSM FOC valdymo, nuolatinės srovės maitinimo šaltinio, universalus trijų fazių galios keitiklio ir PMSM variklio modelio blokai, kurie paimti iš Matlab Simulink blokų

bibliotekos. PMSM FOC valdymo modelio blokas sudarytas iš vidinio srovės valdymo kontūro ir išorinio greičio valdymo kontūro (žr. 4.22 pav.).



4.22 pav. PMSM FOC blokas.

Priklausomai nuo pasirinkamo valdymo būdo PMSM FOC valdymo bloko viduje nustatomas greičio arba sukimo momento režimas (žr. 4.23 pav.), o prie bloko siektinos įėjimo vertės yra prijungiamas siektina sukimo momento N·m arba greičio rad/s vertė.



4.23 pav. Valdymo režimo pasirinkimas.

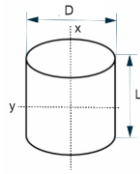
PMSM variklio modelyje suvedami varžos tarp fazių, induktyvumo, veleno inercijos, variklio polių porų skaičiaus parametrai pagal 3.2 lentelę. Sukimo momento konstanta apskaičiuojama pagal 4.11 formulę [43]:

$$K_T = \frac{2}{3} \left(\frac{T}{I_{a,pk}} \right), \quad (4.11)$$

$$K_T = \frac{2}{3} \left(\frac{25}{200} \right) \approx 0.0833 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{A}}. \quad (4.12)$$

čia $I_{a,pk}$ – maksimali a fazės srovė, A, T – maksimalus variklio sukimo momentas, N·m.

Mechaninių komponentų inercija gali būti apskaičiuojama x arba y ašimis (žr. 4.24 pav.) [44].



4.24 pav. Pilnavidurio ritinio ar disko inercija x ir y ašimis.

Ritinio inercija x ašimi apskaičiuojama pagal 4.13 formulę:

$$J_x = \frac{1}{8}mD^2 = \frac{\pi}{32}\rho LD^4, \quad (4.13)$$

čia m – objekto masė, kg, D – išorinis cilindro ar disko diametras, m, ρ – objekto masės tankis, kg/m³, L – ritinio ar disko ilgis, m.

Sistemos, kai variklio velenas per grandinę sujungtas su galiniu ratu, inercija apskaičiuojama pagal 4.14 formulę:

$$J = J_v + J_{vz} + J_g + J_{gz}, \quad (4.14)$$

$$J_g = m \left(\frac{\pi D}{2\pi} \right)^2, \quad (4.15)$$

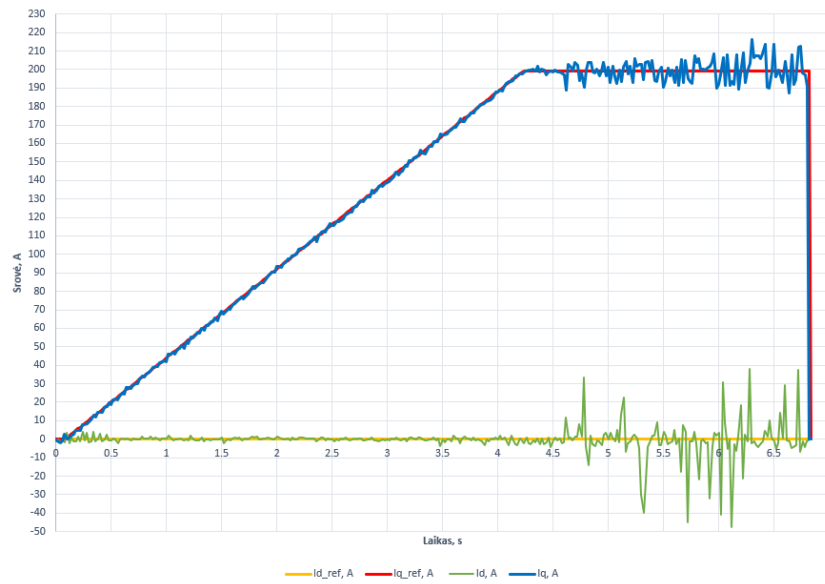
$$J_{gz} = \frac{1}{8}m \left(\frac{D}{k} \right)^2, \quad (4.16)$$

$$J = 0,059 + \left(\frac{1}{8} \cdot 0,098 \cdot 0,0665^2 \right) + \left(1,67 \cdot \left(\frac{0,0665}{2} \right)^2 \right) + \left(\frac{1}{8} \cdot 15 \cdot \left(\frac{0,216}{3,25} \right)^2 \right) = 1,5994 \cdot 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^2. \quad (4.17)$$

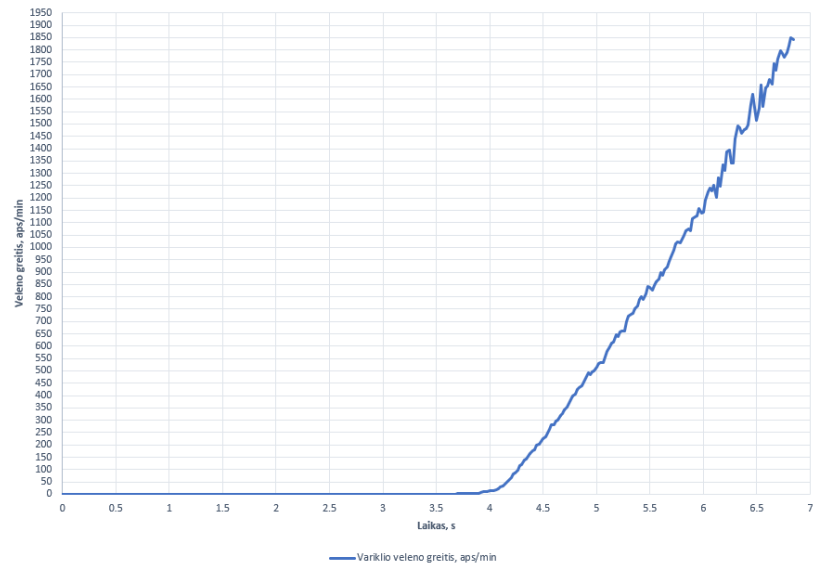
čia J_v – variklio veleno inercija, kg·m², $J_x = J_{vz}$ – žvaigždės ant variklio veleno inercija, kg·m², J_g – grandinės inercija, kg·m², J_{gz} – rato su galine žvaigžde inercija, kg·m².

4.3. Matematinio modelio derinimo tyrimas pagal realaus valdiklio parametrus

Siekiant suderinti elektrinio motociklo greičio ir srovės valdiklius sumodeliuotu matematiniu modeliu reikia įsitikinti, jog šis modelis su vienodais sistemos parametrais bei siektinomis maksimaliomis sukimo momento ir greičio vertėmis geba atkartoti realaus valdiklio dinaminis vyksmus. Prieš simuliacijos pradžią yra paleidžiamas elektrinio motociklo stendo testas ir nuskaitomi Sevcon Gen 4 valdiklio duomenys, kai siektina sukimo momento vertė yra 25 N·m, variklio veleną veikia 15 N·m apkrova, baterijos įtampa – 76 V. Valdiklyje naudojamas greičio ir srovės kontūro valdymas, todėl bandymo metu greičio kontūro regulatoriaus KP ir KI vertės prilyginamos nuliui, nustatomos pirminės srovės kontūro KP – 4,00, KI – 0,01 vertės. Žemiau yra pateikiami bandymo metu gauti I_d , I_q bei I_{d_ref} , I_{q_ref} srovių, variklio veleno greičio, siektino T_{ref} ir T_e realaus sukimo momento bei baterijos srovės ir įtampos pereinamieji vyksmai.

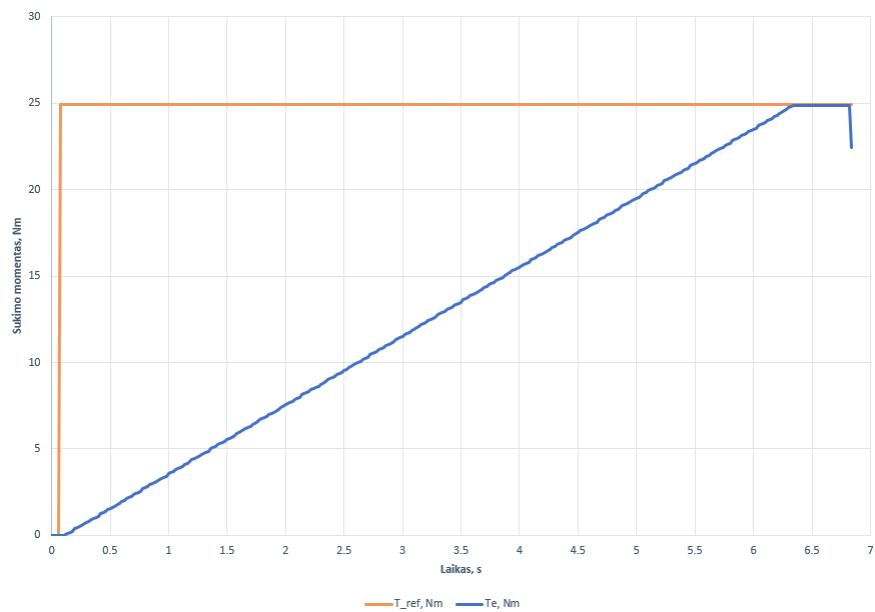


a)

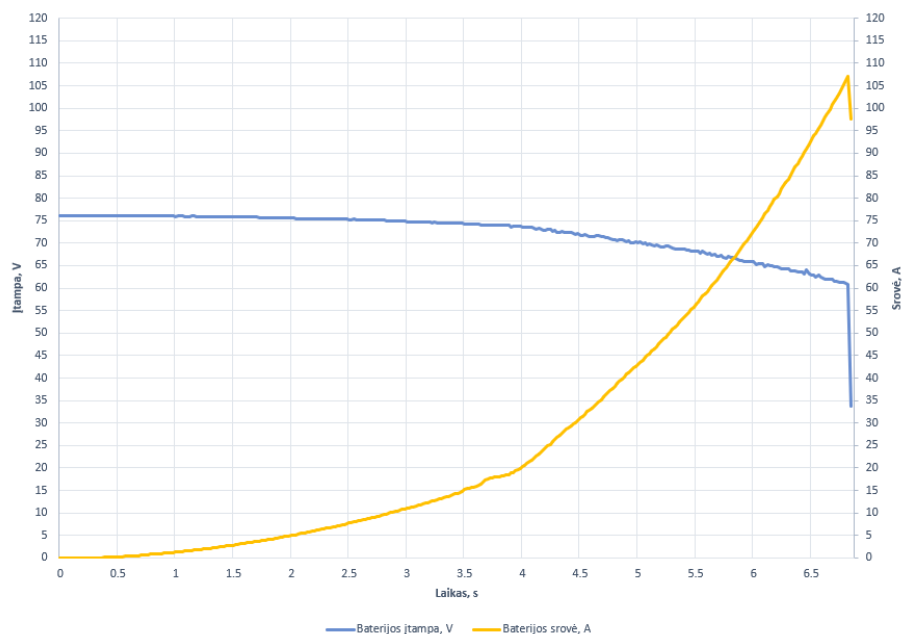


b)

4.25 pav. Elektrinio motociklo siektinų I_{d_ref} , I_{q_ref} ir realių I_d , I_q srovių (a) bei variklio veleno greičio (b) pereinamieji vyksmai, kai srovės kontūro $K_P = 4,00$, $K_I = 0,01$, sukimo momento konstanta $K_T = 0,0833 \text{ N}\cdot\text{m} / \text{A}$.



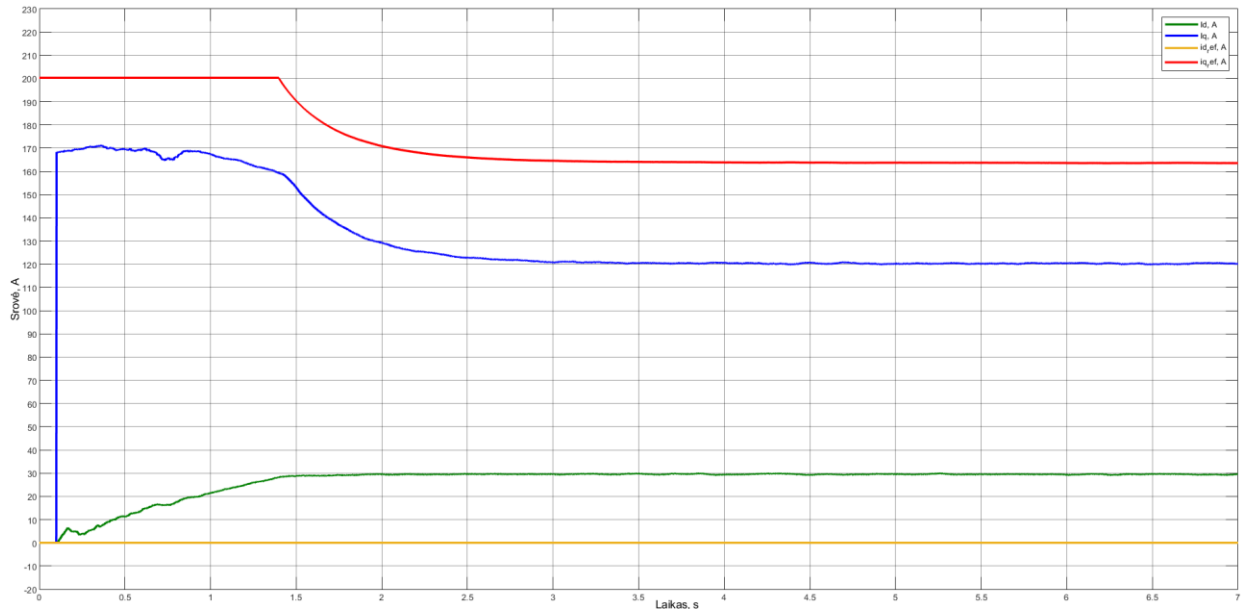
a)



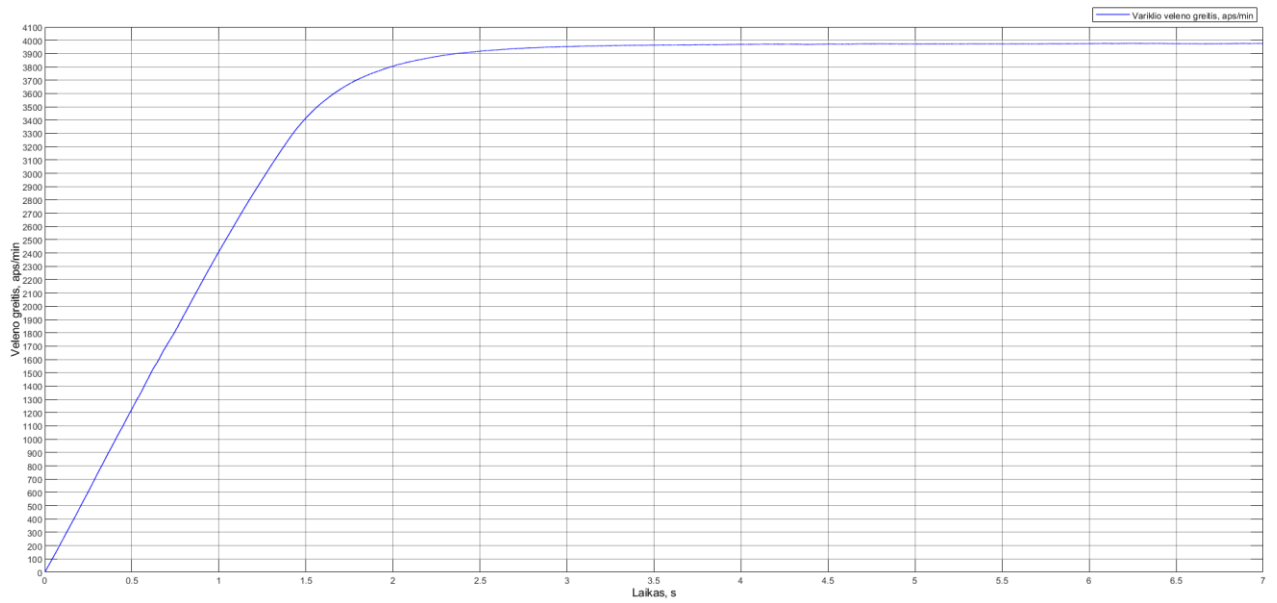
b)

4.26 pav. Elektrinio motociklo T_e ir siektinos T_{ref} sukimo momento (a) bei baterijos įtampos ir srovės (b) pereinamieji vyksmai, kai srovės kontūro $K_P = 4,00$, $K_I = 0,01$, sukimo momento konstanta $K_T = 0,0833 \text{ N}\cdot\text{m} / \text{A}$.

Atliekama simuliacija Matlab / Simulink programoje. Simuliacijos metu pasirenkamas srovės kontūro valdymas, kur $K_P = 4,00$, $K_I = 0,01$, sukimo momento konstanta $K_T = 0,0833 \text{ N}\cdot\text{m} / \text{A}$, magnetinio srauto $\psi = 0,0208 \text{ Wb}$, variklio velenas apkraunamas $15 \text{ N}\cdot\text{m}$ apkrova, nuolatinė idealaus maitinimo šaltinio įtampa – 76 V . Žemiau yra pateikiami bandymo metu gauti I_d ir I_q srovių, variklio veleno greičio, siektino T_{ref} ir T_e realaus sukimo momento bei baterijos srovės pereinamieji vyksmai.

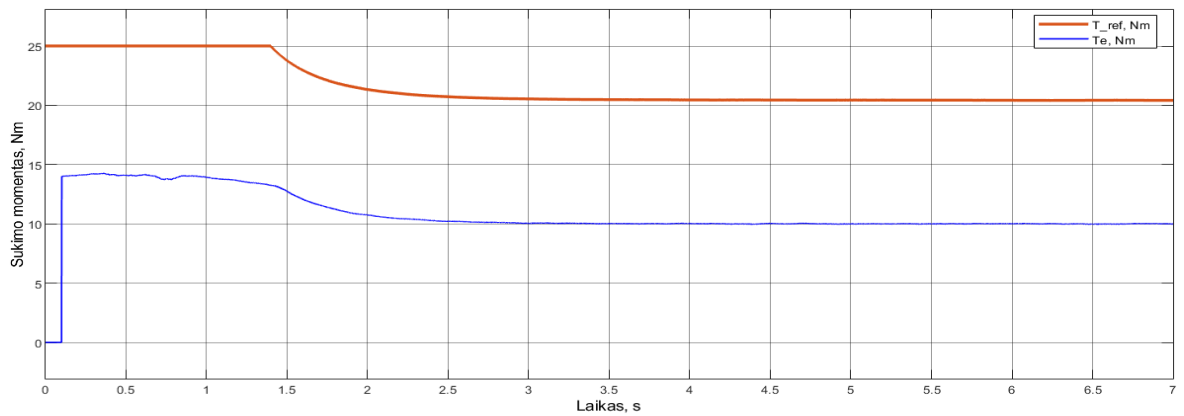


a)

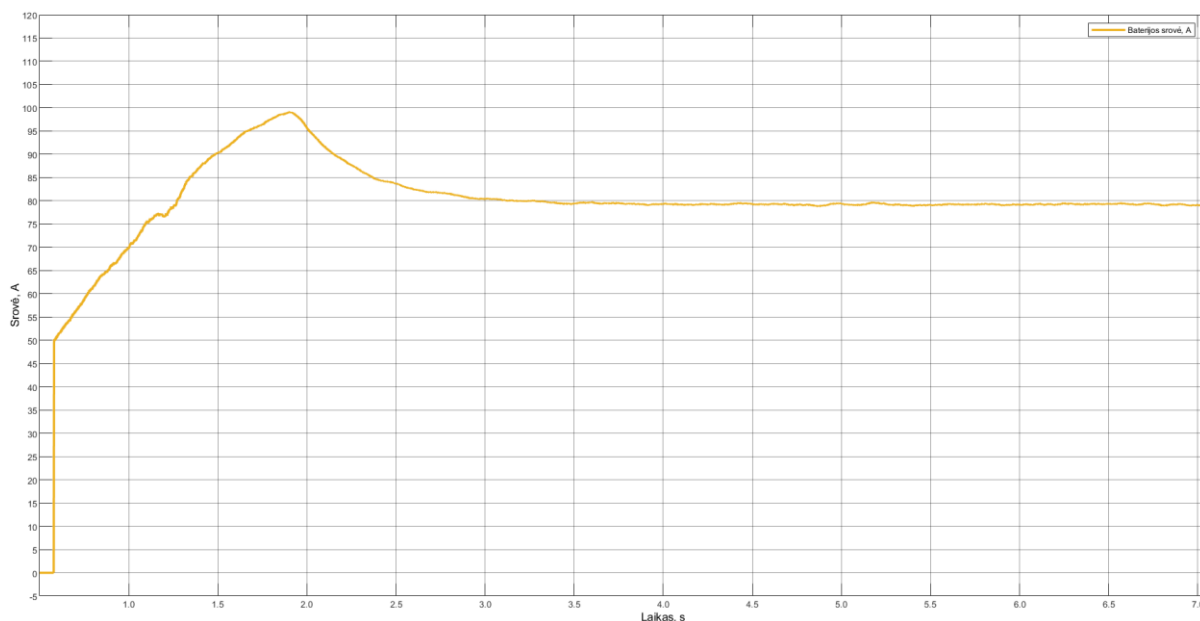


b)

4.27 pav. Matematinio modelio siektinų I_{d_ref} , I_{q_ref} ir realių I_d , I_q srovių (a) bei variklio veleno greičio (b) pereinamieji vyksmai, kai srovės kontūro $K_P = 4,00$, $K_I = 0,01$, sukimo momento konstanta $K_T = 0,0833 \text{ N} \cdot \text{m} / \text{A}$.



a)

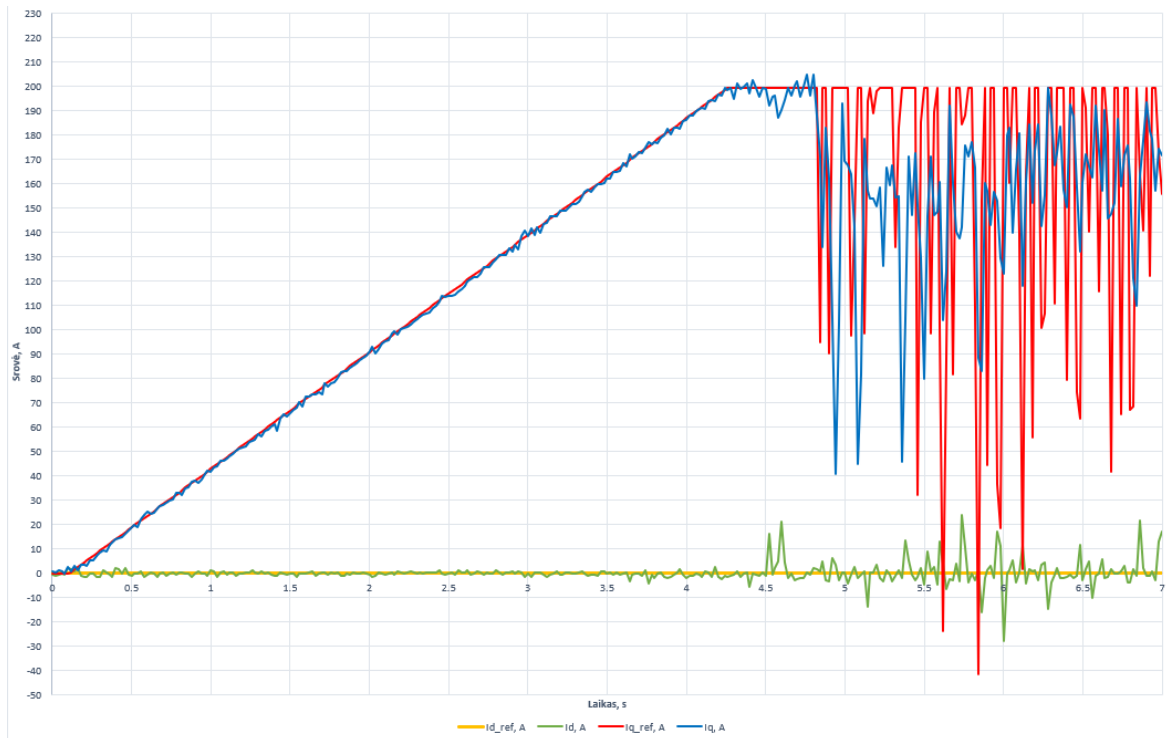


b)

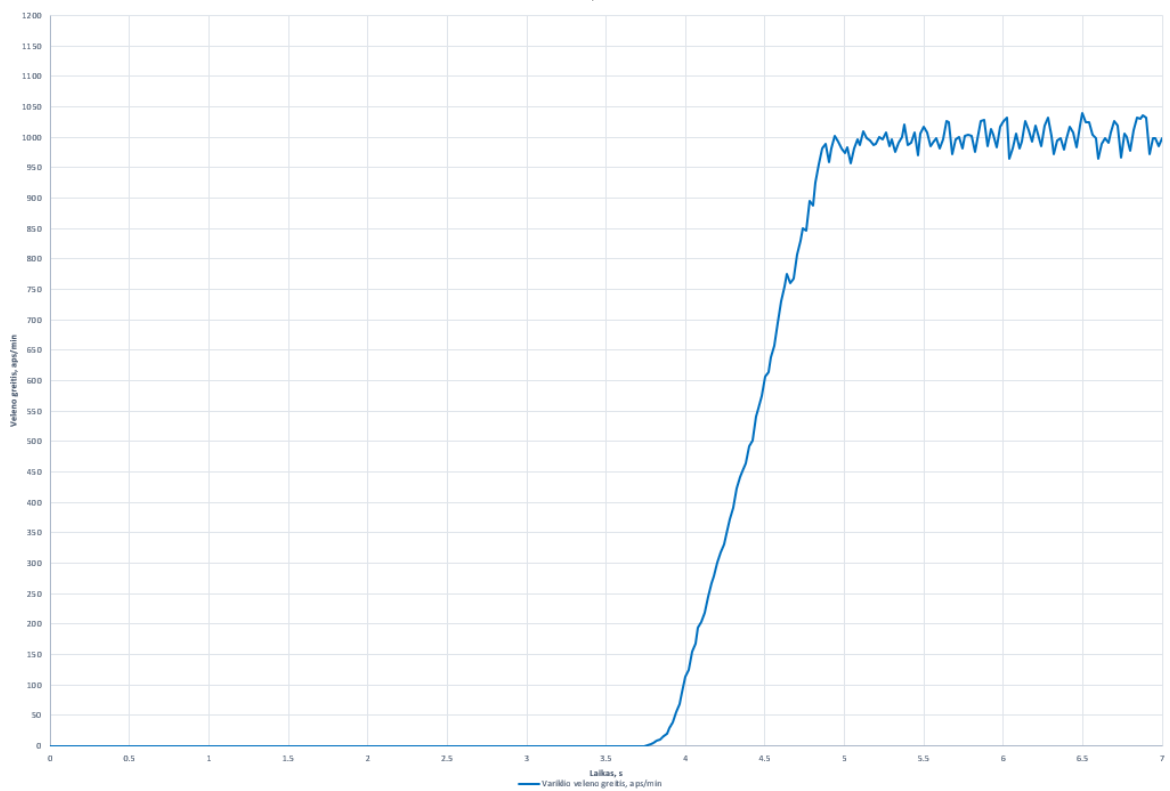
4.28 pav. Matematinio modelio valdiklio T_e ir siektinos T_{ref} sukimo momento (a) bei baterijos srovės (b) pereinamieji vyksmai, kai srovės kontūro $K_P = 4,00$, $K_I = 0,01$, sukimo momento konstanta $K_T = 0,0833 \text{ N}\cdot\text{m} / \text{A}$.

Iš rezultatų matyti, jog matematiniam modelyje, kai yra naudojami identiški realios sistemos ir srovės regulatoriaus parametrai, sumodeliuota sistema nesugeba pasiekti numatytosios $I_{q\text{ref}} = 200 \text{ A}$ vertės, o I_d srovė pradeda kilti ir nukrypsta nuo siektinos $I_{d\text{ref}} = 0 \text{ A}$ srovės (žr. 4.27 pav., a)). Realioje valdymo sistemoje pasiekiamą numatytą $I_{q\text{ref}} = 200 \text{ A}$ (žr. 4.25 pav., a)) bei $25 \text{ N}\cdot\text{m}$ norimą apkrovą (žr. 4.26 pav., a)), tačiau matematiniam modelyje sukimo momento T_e vertė nepasiekia norimos T_{ref} vertės (žr. 4.28 pav., b)). Realioje valdymo sistemoje, kai variklio velenas apkrautas $15 \text{ N}\cdot\text{m}$ apkrova, baterijos srovės sunaudojimas išauga iki 107 A , įtampa nuo 3 sekundės pradeda kristi (žr. 4.26 pav., b)), o matematiniam modelyje maitinimo šaltinio įtampa nuo sistemą veikiančios apkrovos nekinta, nes naudojamas idealusis nuolatinės srovės šaltinis, o baterijos srovė pakyla iki 98 A per 1.8 s nuo simuliacijos pradžios ir nusistovi ties 80 A srove (žr. 4.28 pav., b)). Matematiniam modelyje variklio velenas pasiekia 4000 aps/min greitį (žr. 4.27 pav., b)), o realioje sistemoje 1850 aps/min greitį (žr. 4.25 pav., a)).

Siekiant apriboti matematinio modelio veleno greitį bei sulygtinti greičio ir srovės valdiklių dinaminį realios ir sumodeliuotos sistemos procesus į sistemą įvedamas greičio kontūras. Testas pirmiausia atliekamas elektrinio motociklo stendo funkcija, kai siektinas veleno greitis – 1000 aps/min , greičio regulatoriaus $K_P = 0,25$, $K_I = 0,005$, srovės regulatoriaus $K_P = 4,00$, $K_I = 0,01$.

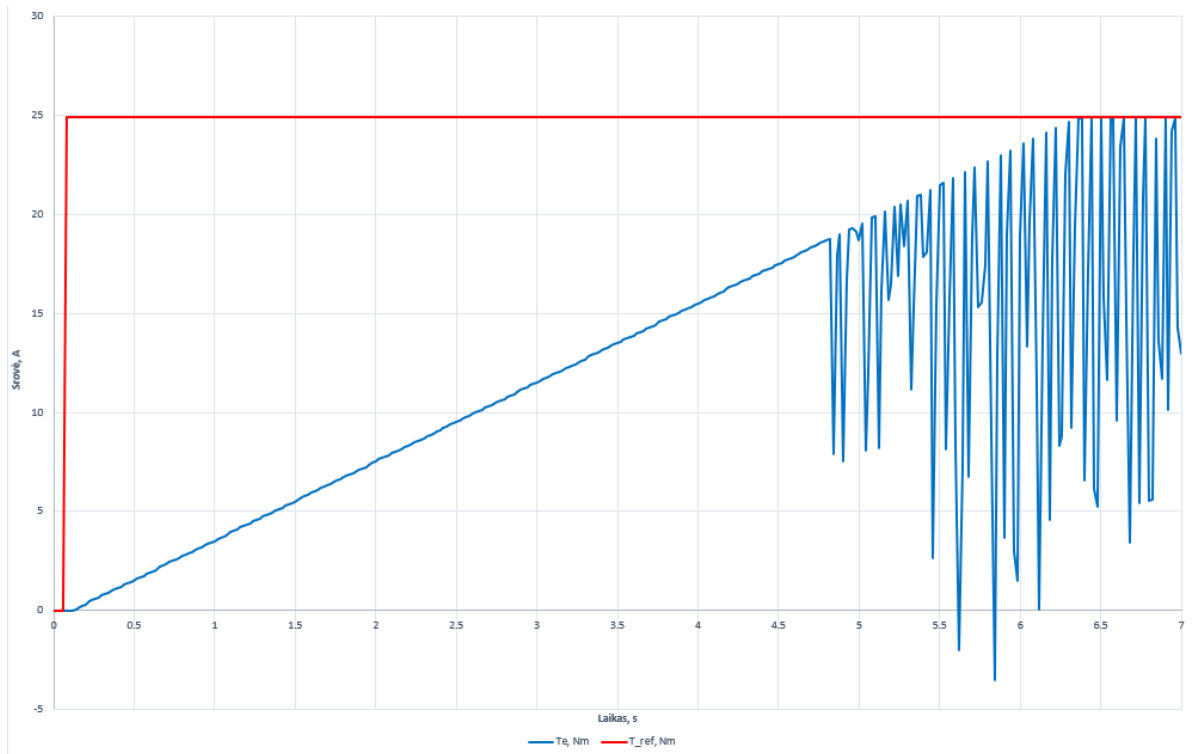


a)

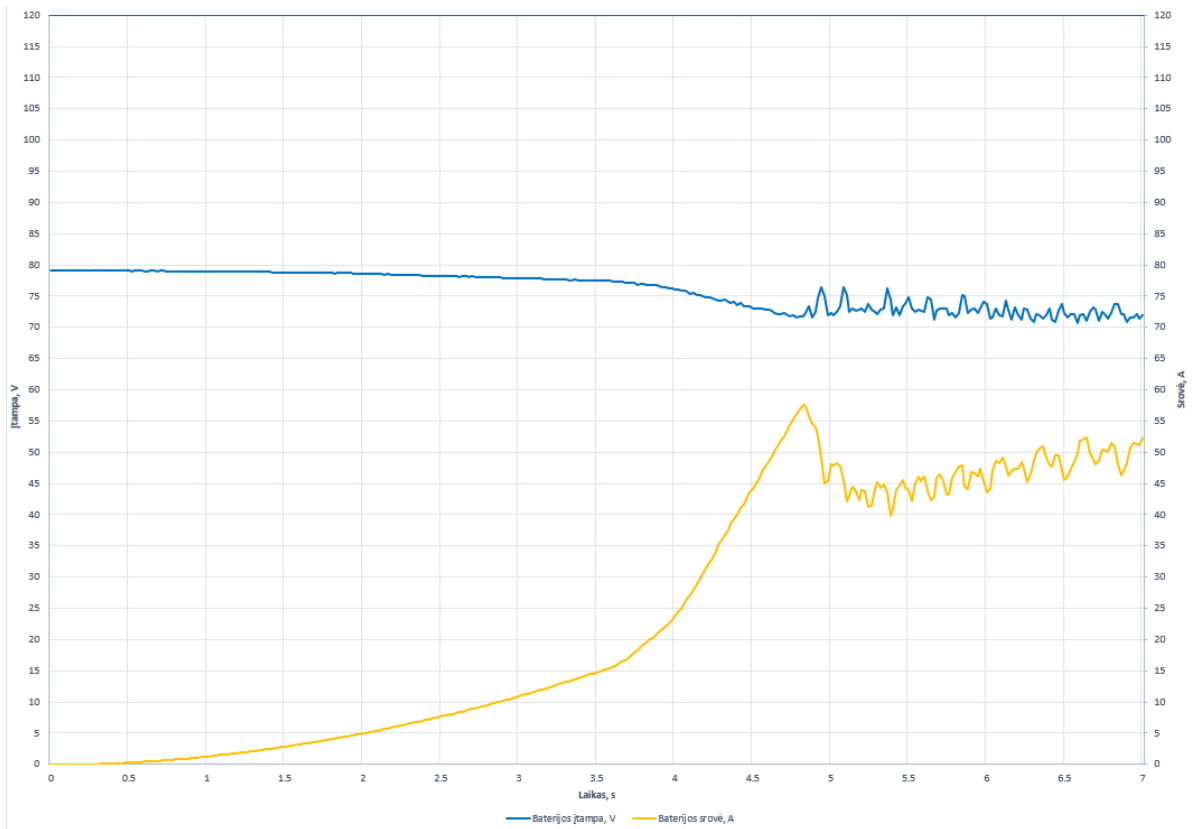


b)

4.29 pav. Elektrinio motociklo siektinų I_{d_ref} , I_{q_ref} ir I_d , I_q srovių (a) bei variklio veleno greičio (b) pereinamieji vyksmai, kai greičio kontūro $K_P = 0,25$, $K_I = 0,005$, srovės kontūro $K_P = 4,00$, $K_I = 0,01$, sukimo momento konstanta $K_T = 0,0833 \text{ N} \cdot \text{m} / \text{A}$.



a)

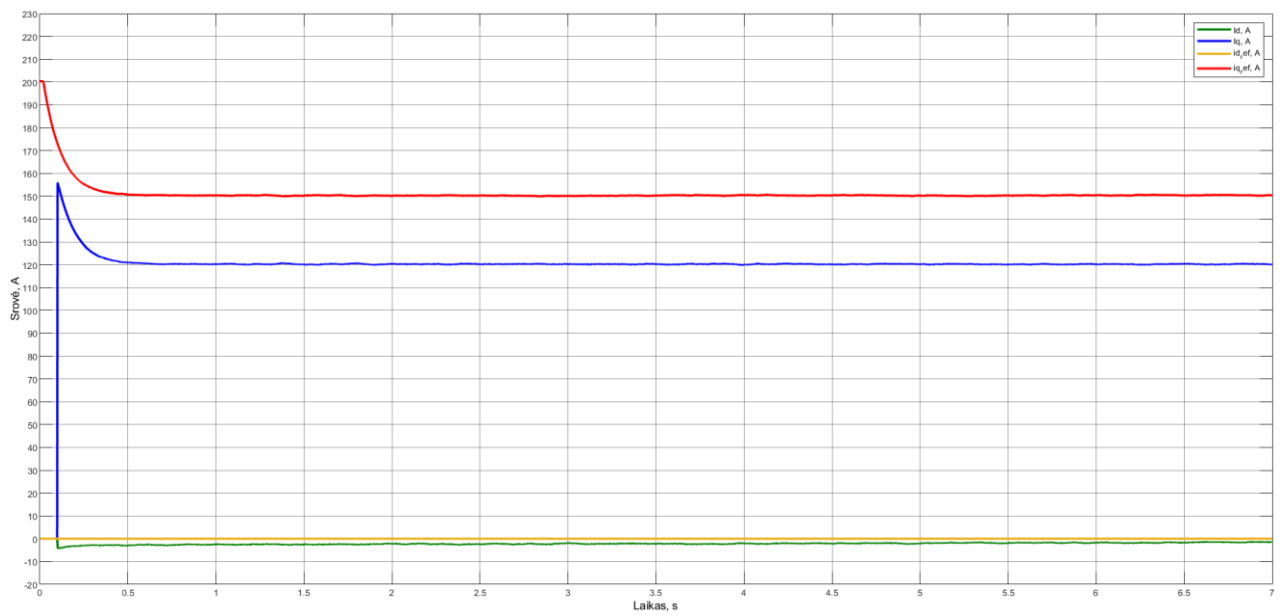


b)

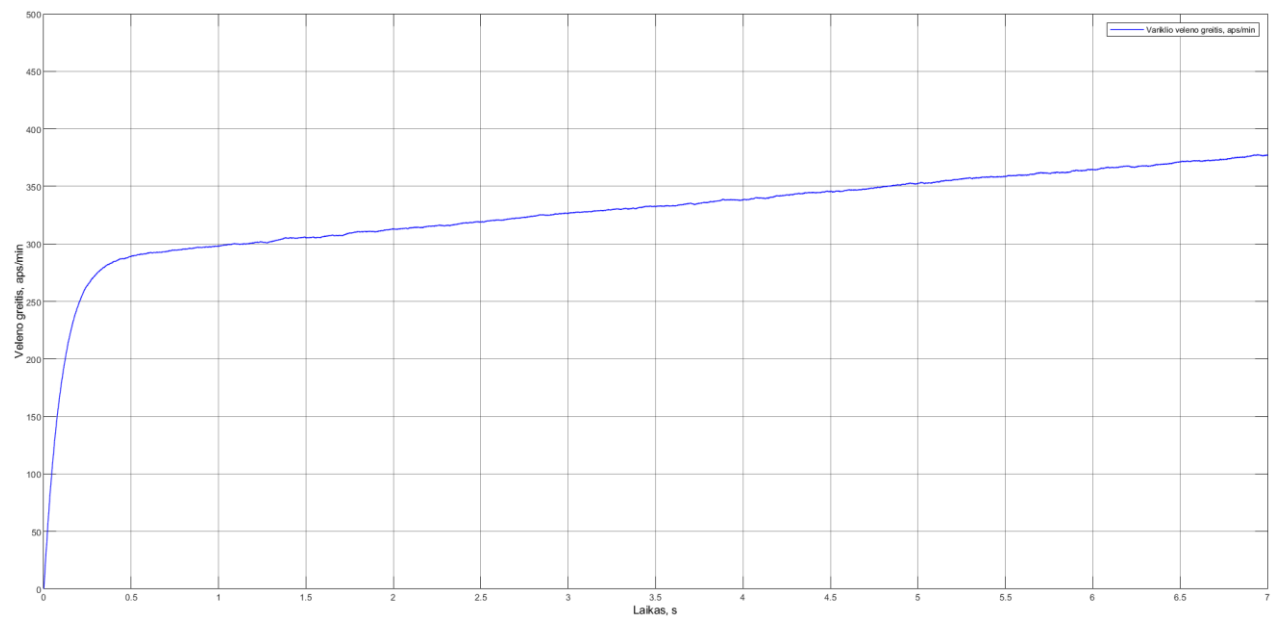
4.30 pav. Elektrinio motociklo T_e ir siektinos T_{ref} sukimo momento (a) bei baterijos įtampos ir srovės (b) pereinamieji vyksmai, kai greičio kontūro $K_P = 0,25$, $K_I = 0,005$, srovės kontūro $K_P = 4,00$, $K_I = 0,01$, sukimo momento konstanta $K_T = 0,0833 \text{ N}\cdot\text{m} / \text{A}$.

Paleidžiama matematinio modelio simuliacija, kai greičio siektina vertė yra 1000 aps/min, variklio veleną veikia $15 \text{ N}\cdot\text{m}$ apkrova, srovės regulatoriaus $K_P = 0,25$, $K_I = 0,01$, greičio regulatoriaus K_P

– 0,20, KI – 0,005, magnetinio srauto ψ – 0,0208 Wb, o nuolatinė maitinimo šaltinio įtampa – 79 V. Žemiau yra pateikiami simuliacijos metu gauti pereinamieji vyksmai.

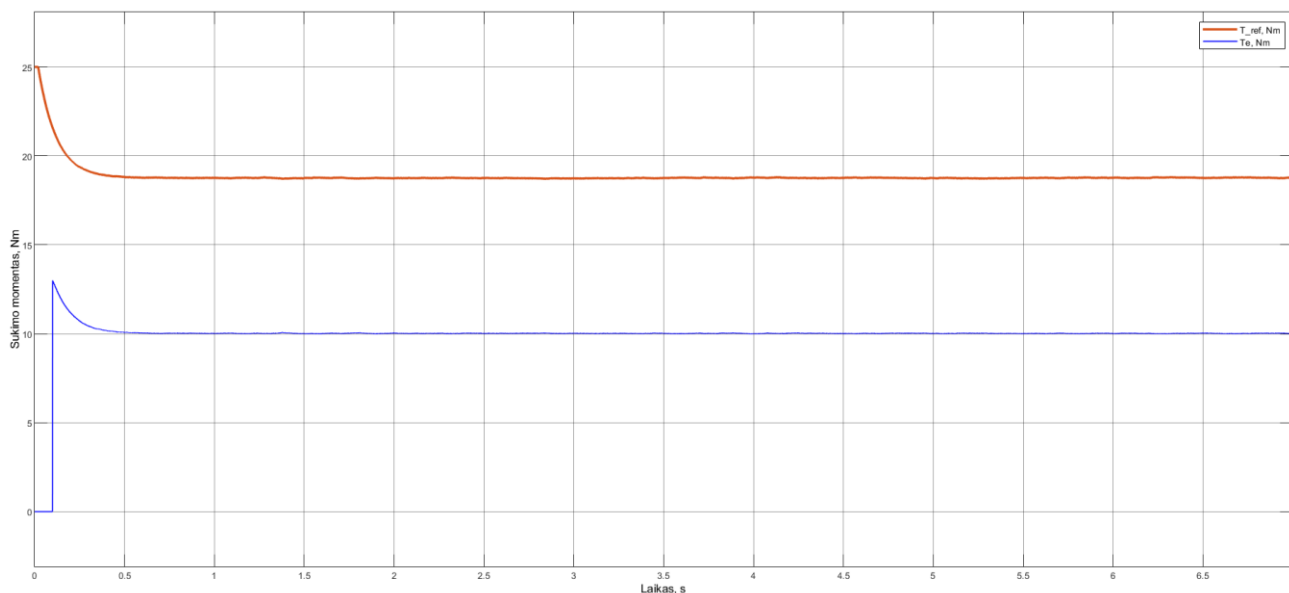


a)

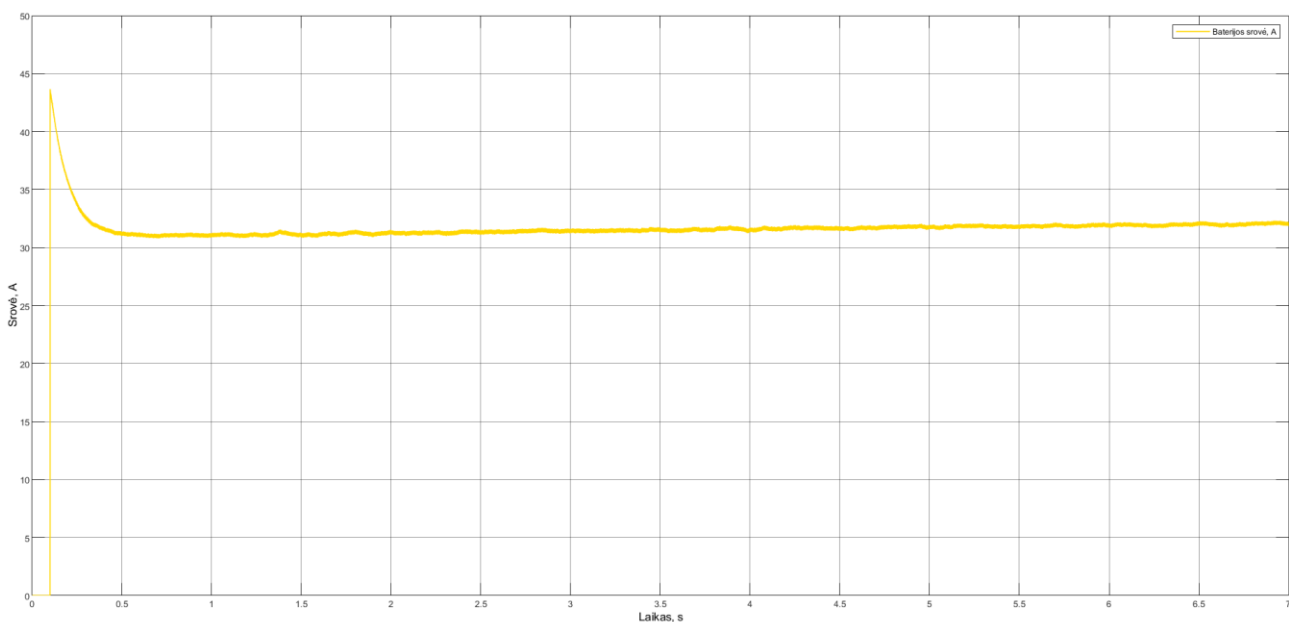


b)

4.31 pav. Matematinio modelio siektinų I_{d_ref} , I_{q_ref} ir realių I_d , I_q srovių (a) bei variklio veleno greičio (b) pereinamieji vyksmai, kai greičio kontūro KP = 0,25, KI = 0,005, srovės kontūro KP = 4,00, KI = 0,01, sukimo momento konstanta $K_T = 0,0833 \text{ N}\cdot\text{m} / \text{A}$.



a)



b)

4.32 pav. Matematinio modelio valdiklio T_e ir siektinos T_{ref} sukimo momento (a) bei baterijos srovės (b) pereinamieji vyksmai, kai greičio kontūro $K_P = 0,25$, $K_I = 0,005$, srovės kontūro $K_P = 4$, $K_I = 0,01$, sukimo momento konstanta $K_T = 0,0833 \text{ N}\cdot\text{m} / \text{A}$.

Iš 4.29 paveikslo galima matyti, jog realioje sistemoje yra pasiekama numatyta 200 A fazinė srovė, 1000 aps/min greitis, o iš 4.30 paveikslo matoma, jog sistema su apkrova, pasiekia numatytąją 25 N·m sukimo momento vertę, tačiau atlikus simuliaciją Matlab / Simulink aplinkoje su identiškais greičio ir srovės reguliatorių dedamosiomis, pastebima, jog sumodeliuotoje valdymo sistemoje nėra palaikoma pastovi norima 200 A srovė (žr. 4.31 pav., a)), greičio valdymo režime nepasiekama 1000 aps/min vertė (žr. 4.31 pav., b)). Sistema su apkrova nepasiekia norimos 25 N·m sukimo momento vertės (žr. 4.32 pav., a)), o baterijos iškvos srovė nusistovi ties 31 A, kai realioje sistemoje baterijos iškvos kinta nuo 40 – 57 A (žr. 4.30 pav., b)).

Iš pateiktų elektrinio motociklo stendo ir matematinio modelio simuliacijos pereinamųjų vyksmų matoma, jog simuliacijoje nepavyko atkartoti valdiklyje naudojamos antros eilės netiesinės FOC valdymo sistemos, dėl to srovės ir greičio reguliatorių KP ir KI derinimas simuliacijos pagalba negali būti naudojama galutinio valdiklio derinimui.

4.4. Elektrinio motociklo valdiklio derinimo tyrimas

Atmetus realaus valdiklio KP ir KI dedamųjų derinimą simuliacijoje, sistemos greičio ir srovės kontūro PI reguliatoriai derinami pagal pramonėje dažniausiai naudojamą Zieglerio – Nicholso derinimo metodą. Šis derinimas atliekamas tokia eiga [45]:

1. reguliatoriaus integralinė dedamoji prilyginama 0;
2. pasirenkama didelė proporcinės dedamosios vertė, stebimas pereinamasis valdiklio procesas;
3. proporcinė dedamoji vertė mažinama, kol gaunami neslopstantys svyravimai su nekintančia amplitude;
4. išmatuojamos K_u stiprinimo ir T_u svyravimo periodo vertės;
5. po truputį yra didinama proporcinė reguliatoriaus vertė, prie kurios pereinamojo proceso svyravimai pradeda gesti;
6. remiantis 4.1 lentele randamos KP ir KI dedamųjų vertės;
7. gautos KP ir KI vertės įrašomos į valdiklį, paleidžiamas testas ir tikrinamas valdiklio pereinamasis procesas.

4.1 lentelė. Zieglerio-Nicholso KP ir KI koeficientų skaičiavimo lentelė

Regulatoriaus tipas	KP	KI
PI	$0,45 \cdot K_u$	$1,2/T_u$

Šio derinimo metodo privalumai:

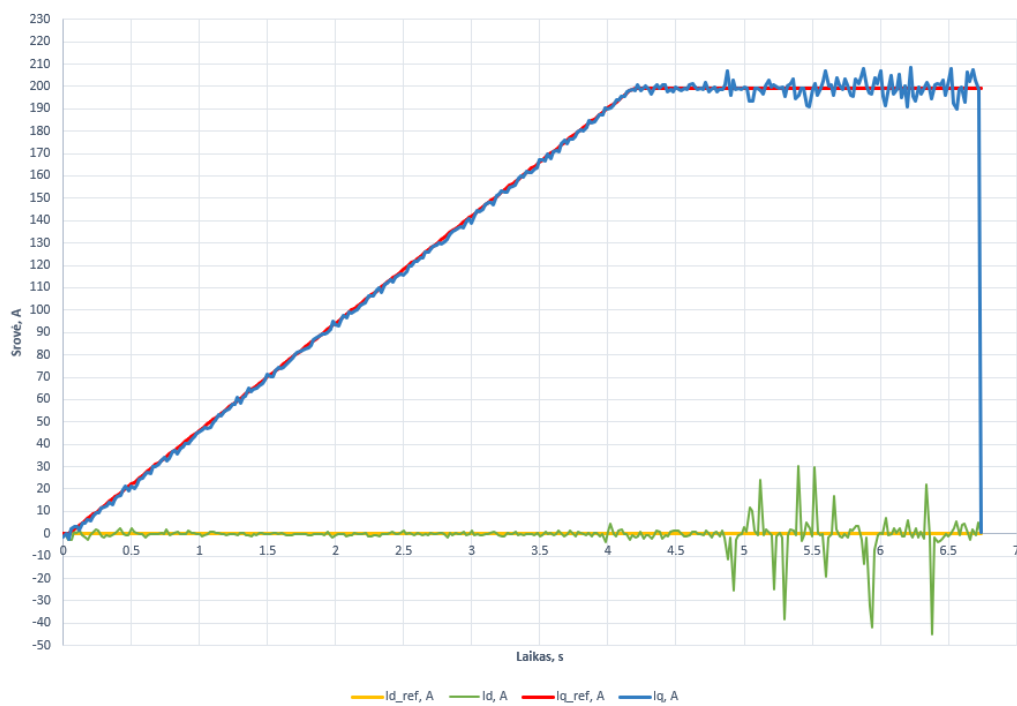
- lengvai derinama sistema, kur keičiamas reguliatoriaus stiprinimas;
- derinant šiuo metodu atsižvelgiama į visos sistemos dinaminį procesą, kurie suteikia tikslesnę sistemos elgsenos vaizdą.

Šio derinimo metodo minusai:

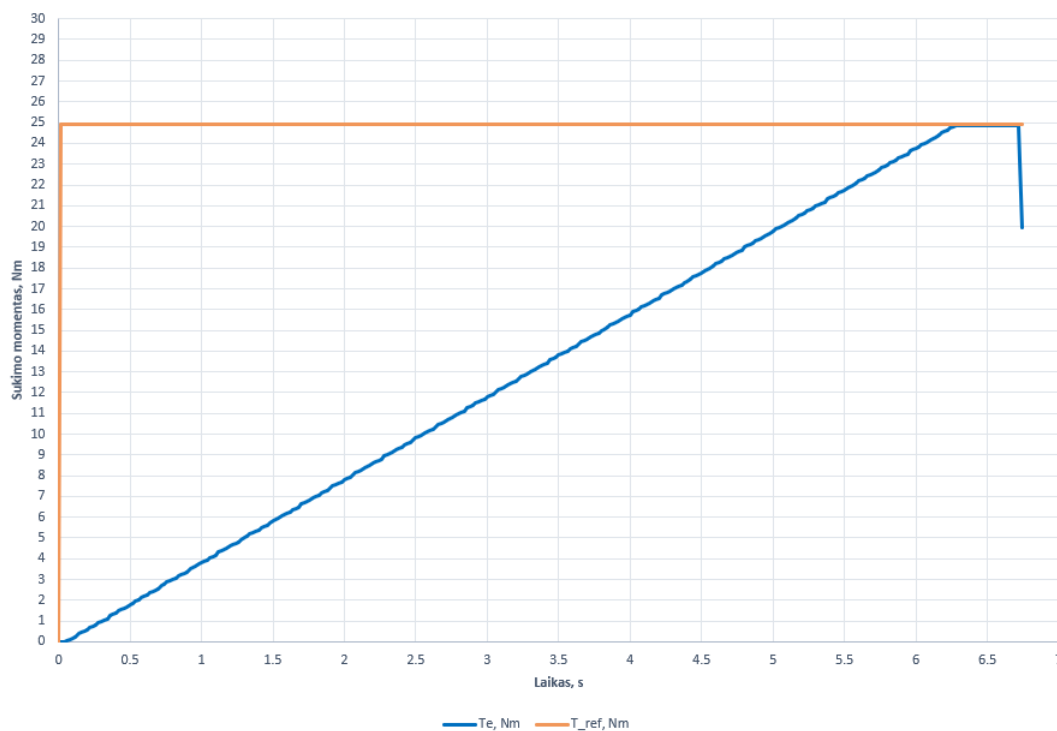
- derinimas užima daug laiko;
- derinimo būdas yra „agresyvus“, nes sistemą reikia išvesti iš pusiausvyros padėties, o testuojant valdiklį tokiu būdu valdymo sistema gali tapti nestabili ir galimi sistemos mechaninių komponentų sugadinimo atvejai.

Elektrinio motociklo „Sevcon“ gamintojo Gen 4 valdiklio derinimas pradedamas nuo srovės kontūro reguliatoriaus KP ir KI dedamųjų derinimo pagal Zieglerio-Nicholso metodą. Valdiklio derinimas atliekamas su 15 N·m apkrova tenkančia variklio velenui, valdiklyje yra pasirenkama siektina 25 N·m momento sukimo vertė, kur I_q srovės siektina vertė lygi 200 A, baterijos įtampa prieš bandymo pradžią – 76 V, sukimo momento konstanta K_T – 0,0833 N·m / A. 4.33 paveiksle pavaizduoti elektrinio motociklo srovės reguliatoriaus siektinų I_{d_ref} , I_{q_ref} ir I_d , I_q srovių (a) bei T_e ir T_{ref} sukimo momento (b) pereinamieji veiksmi, 4.34 paveiksle pavaizduoti veleno greičio (a) bei baterijos srovės ir įtampos (b) pereinamieji vyksmai. Gauti pereinamieji veiksmi valdant srovės

kontūro PI valdiklį, kuris yra suderintas Zieglerio-Nicholso metodu, o 4.2 lentelėje pateikiami derinimo metu gautų KP ir KI dedamųjų vertės.

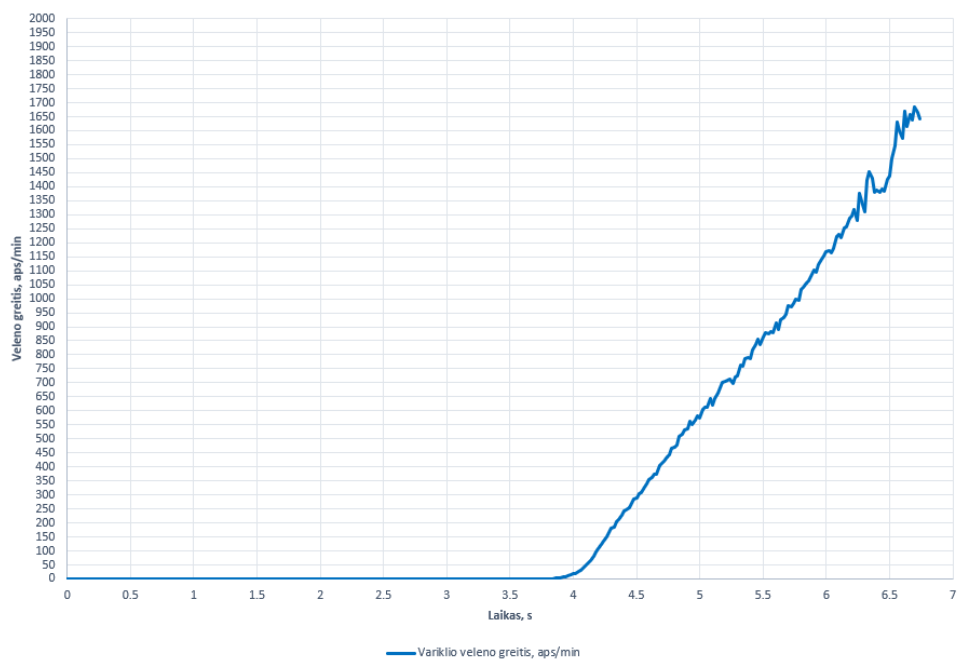


a)

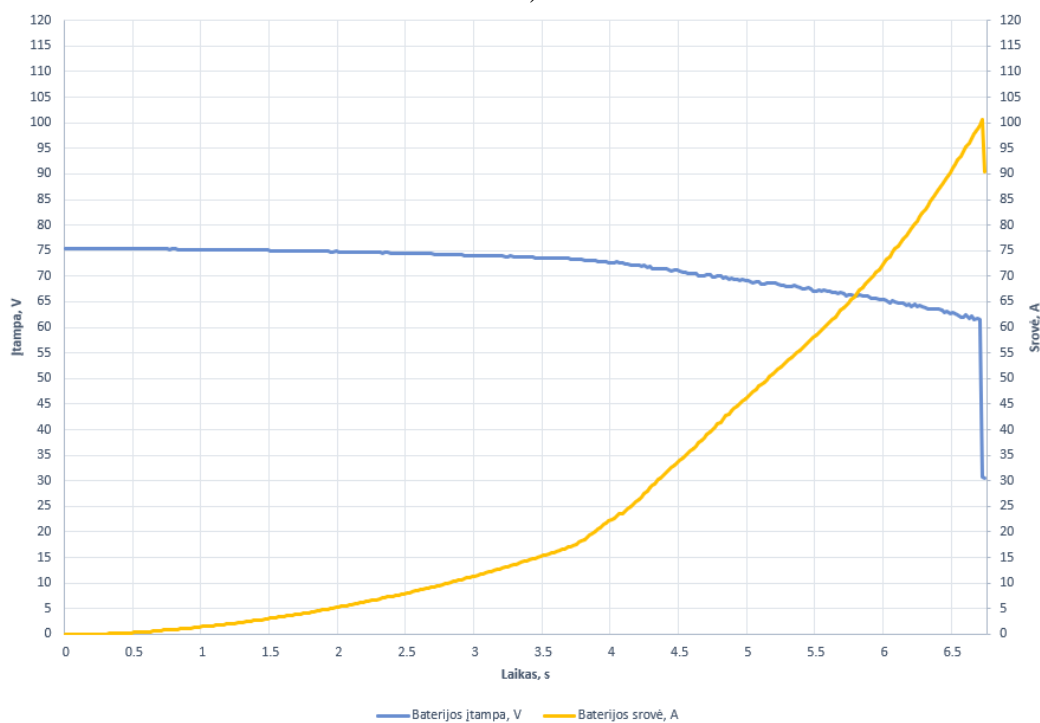


b)

4.33 pav. Zieglerio-Nicholso derinimo būdu gauti elektrinio motociklo siektinų I_{d_ref} , I_{q_ref} ir I_d , I_q srovių (a) bei T_e ir T_{ref} (b) pereinamieji vyksmai.



a)



b)

4.34 pav. Zieglerio-Nicholso derinimo būdu gauti elektrinio motociklo variklio veleno greičio (a) bei baterijos srovės ir įtamos (b) pereinamieji vyksmai.

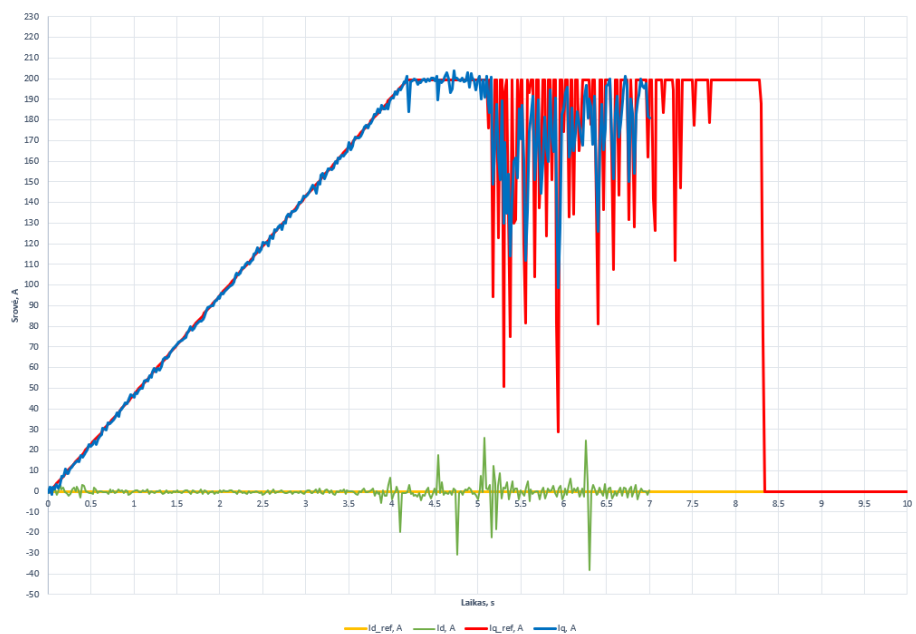
4.2 lentelė. Zieglerio-Nicholso KP ir KI koeficientų lentelė, gauta srovės regulatoriaus derinimo metu

Regulatoriaus tipas	KP	KI
Srovės PI	6,50	0,015

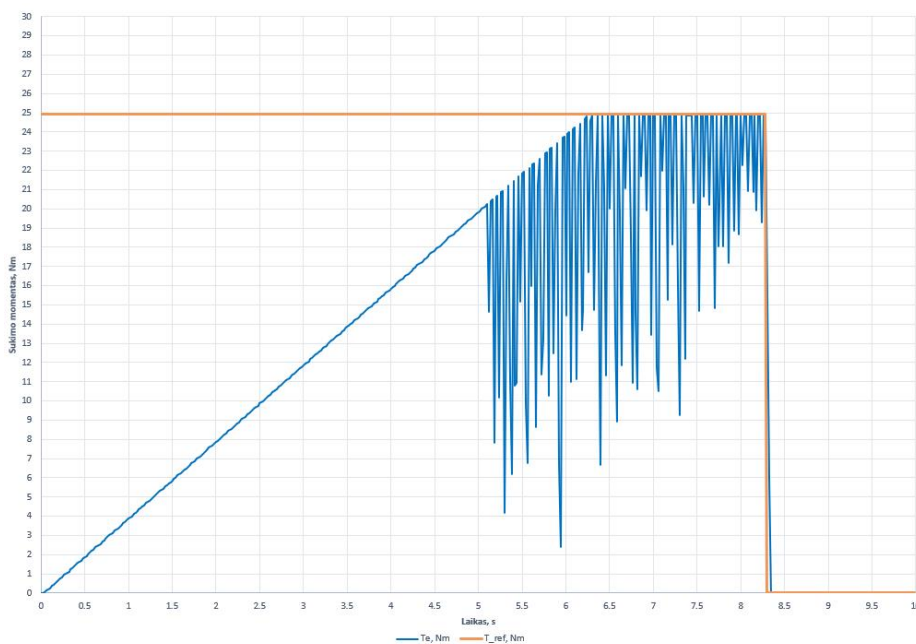
Iš 4.33 a) paveikslų matyti, jog I_q pasiekia numatytąją I_{q_ref} vertę, taip pat pasiekiami norima T_{ref} vertė (žr. 4.33 pav., b)). Srovės regulatoriaus perreguliavimas siekia – 5 %. Taigi, galima teigti, jog

srovės reguliatorius yra suderintas naudojant Zieglerio-Nicholso metodą, tačiau naudojant tik srovės valdiklį iš 3.34 a) paveikslu matyti, jog variklio veleno greitis kyla į begalybę, baterijos srovės sunaudojimas išauga, o baterijos celių įtampa krenta iki 3,00 V per celę, dėl to ties 6,75 sekunde, suveikus BMS valdiklio apsaugai, eksperimento tyrimas nutrūksta (žr. 4.34 pav., b)).

Į valdymo sistemą įvedamas greičio ribojimas ir valdiklyje nustatoma norima 1000 aps/min veleno greičio vertė. Testas atliekamas dar kartą, o apačioje esančiuose 4.35 ir 4.36 paveiksluose pateikiami valdymo sistemos pereinamieji procesai bei 4.3 lentelėje srovės ir greičio valdiklių KP ir KI dedamųjų galutinės išraiškos naudojant Zieglerio-Nicholso derinimo metodą.

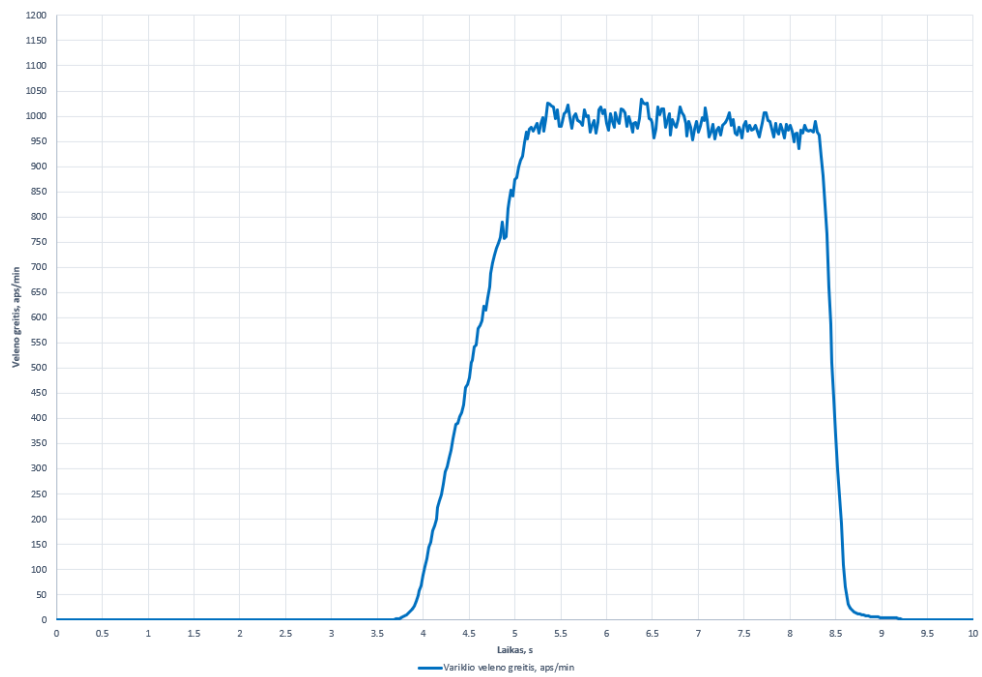


a)

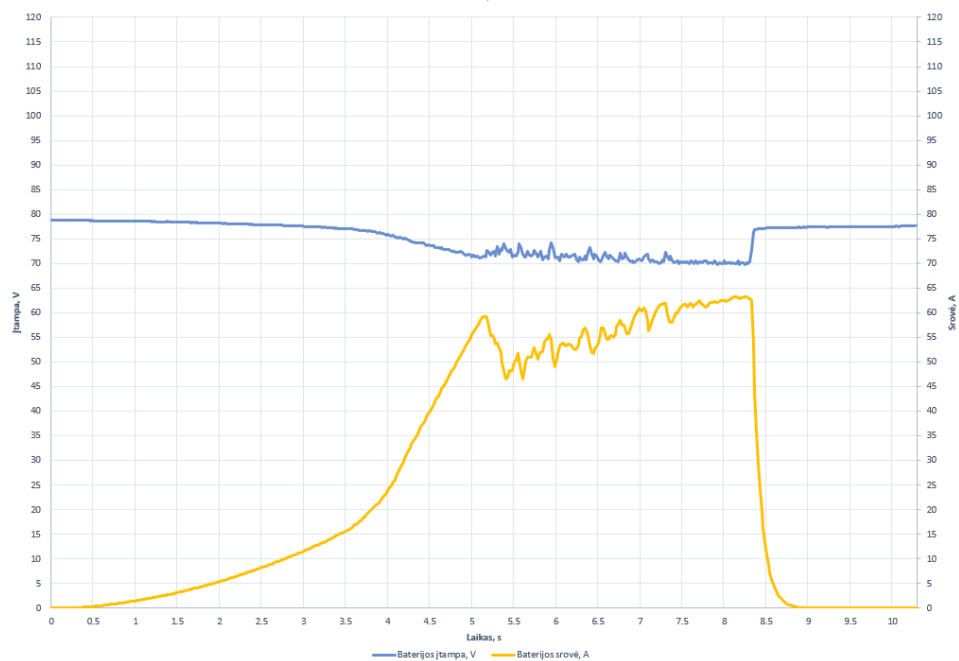


b)

4.35 pav. Zieglerio-Nicholso derinimo būdu gauti elektrinio motociklo siektinų I_{d_ref} , I_{q_ref} ir I_d , I_q srovių (a) bei T_e ir T_{ref} (b) pereinamieji vyksmai.



a)



b)

4.36 pav. Zieglerio-Nicholso derinimo būdu gauti elektrinio motociklo variklio veleno greičio (a) bei baterijos srovės ir įtampos (b) pereinamieji vyksmai.

4.3 lentelė. Zieglerio-Nicholso KP ir KI koeficientų lentelė, gauta srovės ir greičio reguliatorių derinimo metu

Regulatoriaus tipas	KP	KI
Srovės PI	6,50	0,015
Greičio PI	0,225	0,005

Atlikus bandymą matyti, jog greičio reguliatorius pasiekia numatytą 1000 aps/min vertę (žr. 4.36 pav. a)). Greičio reguliatoriaus perreguliavimas siekia – 4,4 %, tačiau iš 4.35 a) paveikslo matyti, jog

greičio reguliatorius, kai yra pasiekama 1000 aps/min vertė, sukelia papildomus svyravimus srovės kontūre, kurie matomi, kai srovės reguliatorius bando pasiekti numatytą 25 N·m sukimo momento vertę (žr. 4.35 pav., b)). Iš 4.36 b) paveikslo matyti, jog apribojant veleno greitį yra apribojama ir baterijos srovė.

Remiantis 2.3 lentele, variklio veleno greitis neturėtų viršyti 466 aps/min, kuomet norima važiuoti maksimaliu 50 km/h greičiu, todėl valdymo sistemos galima neapriboti greičio kontūru, kuris į srovės kontūrą įneša papildomus svyravimus. Taigi, elektriniame motocikle pasirinktas srovės kontūro valdymo režimas, kuris buvo sureguliuotas Zieglerio-Nicholso metodu, kai srovės perreguliavimas siekia 5 %.

Išvados ir rezultatai

1. Pagal atliktą rinkos analizę, kurioje apžvelgiamos mažos ir didelės galios elektrinių motociklų klasės, nuspręsta elektrifikuoti benzininį Suzuki GS500 motociklą, kuris atitiktų mažos galios klasės elektrinį motociklą, kai elektrinio variklio vardinė galia siekia 3 kW.
2. Remiantis elektrinio motociklo pavaros konstrukcijos skaičiavimais, buvo pasirinktas „Sevcon“ gamintojo Gen 4 80 V nominalios įtampos ir 350 A maksimalios srovės valdiklis. Šis valdiklis naudojamas kartu su „Golden Motors“ gamintojo HPM3000B 3 kW vardinės galios elektriniu varikliu.
3. Atlikus teorinius elektrinio motociklo baterijos konstrukcijos skaičiavimus, kur įvertinami 4 skirtingų gamintojų celių parametrai, matoma, jog pagrindiniai kriterijai renkantis baterijos celes yra: iškrovos srovė esant minimaliai baterijos įtampai ir nominaliai variklio galiai bei maksimali iškrovos srovė esant maksimaliai variklio galiai ir minimaliai baterijos įtampai. Atsižvelgiant į valdiklio nominalią 80V įtampą bei atliktus 2 gamintojų celių iškrovos testus elektriniame motocikle naudojama 20S5P ličio jonų bateriją, kurią sudaro 100 vnt. „Sony / Murata“ gamintojo VTC6 tipo celės.
4. Holo jutiklių derinimo metu pastebėta, jog holo jutiklių nuokrypio vertės radimui, pasirinktas skirtingas greičio arba sukimo momento valdymo režimas įtakos neturi ir gaunama nuokrypio vertė abiejuose režimuose yra tokia pati -58° . Derinant holo jutiklių nuokrypio vertę, gauta įtampos konstantos $K_e 0,0214 \text{ V}/(\text{rad/s})$ vertė.
5. FOC valdymą sudaro greičio ir srovės valdymo kontūrai. Sudarytas blokinis FOC valdymo matematinis modelis Matlab / Simulink aplinkoje neatitinka realaus „Sevcon“ gamintojo Gen 4 valdiklio valdymo. Atlikus sumodeliuotos ir realios sistemos bandymus su tomis pačiomis srovės ir greičio KP ir KI dedamosiomis, gaunama, jog matematinis modelis nepasiekia numatytų srovės ir greičio reikšmių. Galutiniam realaus valdiklio srovės ir greičio kontūro derinimui matematinis modelis nėra tinkamas.
6. Zieglerio-Nicholso metodu suderinta reali antros eilės netiesinė valdymo sistema. Galutinis srovės kontūro valdiklio perreguliavimas siekia 5 %, o greičio kontūro valdiklio perreguliavimas – 4,4 %. Greičio valdymo kontūras įneša papildomus svyravimus į srovės valdymo kontūrą, todėl galutiniam elektrifikuoto motociklo valdymo sistemoje yra naudojamas srovės kontūras, kuriame programiškai nėra apribojamas veleno sukimosi greitis.

Informaciniai šaltiniai

- [1] CSCMOTORCYCLES: City Slicer Owner`s service manual. *cscmotorcycles.com* [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-06-04]. Prieiga per: https://cscmotorcycles.com/content/user_manuals/city_slicker.pdf
- [2] HORWIN CR6 E-motorcycles: Vehicle Category L3e, Electric Motorcycles for sale-HORWIN GLOBAL. *Horwinglobal.com* [interaktyvus]. 2019. [žiūrėta 2020-06-04]. Prieiga per: <https://www.horwin.eu/cr6/>
- [3] SUPER SOCO TC. *www.supersoco.co.uk* [interaktyvus]. n.d. [žiūrėta 2020-06-04]. Prieiga per: <https://supersoco.co.uk/super-soco-tc-electric-motorcycle/>
- [4] MOTORINO motorcycles: Super Soco TC. *www.motorino.ca* [interaktyvus]. n.d. [žiūrėta 2020-06-04]. Prieiga per: <https://motorino.ca/super-soco-tc>
- [5] SUPERSOCO, user instructions. *www.supersoco.com/* [interaktyvus]. n.d. [žiūrėta 2020-06-04]. Prieiga per: <http://www.supersoco.com/second-phase/en/down/TS/Britain.pdf>
- [6] HARLEY-DAVIDSON. *serviceinfo.harley-davidson.com* [interaktyvus]. n.d. [žiūrėta 2020-06-04]. Prieiga per: <https://serviceinfo.harleydavidson.com/sip/content/document/view?id=1366120954772990172#1308050!!0!4866>
- [7] MOTOSTOP moto: Harley Davidson LiveWire 2020 Street. *www.motostop.eu* [interaktyvus]. 2020. [žiūrėta 2020-06-04]. Prieiga per: https://www.motostop.eu/moto/HARLEY_DAVIDSON_LIVEWIRE_2020_STREET/20923
- [8] TOLL, Micah. *Harley-Davidson updates LiveWire electric motorcycle specs, boosts range* [interaktyvus]. 2020 kovo 6 [žiūrėta 2020-06-04]. Prieiga per: <https://electrek.co/2019/03/06/harley-davidson-updates-livewire-specs/>
- [9] ZERO MANUAL: Z-Force motor. *zeromanual.com* [interaktyvus]. n.d. [žiūrėta 2020-06-07]. Prieiga per: https://zeromanual.com/wiki/Z-Force_Motor
- [10] ZEROMOTORCYCLES: resources category, owners manuals, 2020, Zero Owners Manual. [interaktyvus]. 2020. [žiūrėta 2020-06-07]. Prieiga per: <http://media.zeromotorcycles.com/resources/owners-manuals/2020/2020-Zero-Owners-Manual-SRF.pdf>
- [11] EXPLAINTHATSTUFF. *www.explainthatstuff.com* [interaktyvus]. n.d. [žiūrėta 2020-06-07]. Prieiga per: <https://www.explainthatstuff.com/hubmotors.html>
- [12] AUTOEVOLUTION: News, Moto How-to. *autoevolution.com* [interaktyvus]. 2013. [žiūrėta 2020-06-09]. Prieiga per: <https://www.autoevolution.com/news/how-to-take-care-of-your-bike-s-chain-part-1-69738.html>
- [13] BIKESREPUBLIK, Home, Year, 2018, Final Drive: Chain, Belto or shaft. *bikesrepublic.com* [interaktyvus]. 2018. [žiūrėta 2020-06-09]. Prieiga per: <https://www.bikesrepublic.com/featured/final-drive-chained-belted-or-shafted/>
- [14] CYCLINGABOUT, artical directory, experiments and testing: Are belt drivetrains more efficient than chain drivetrains? *cyclingabout.com* [interaktyvus]. 2019. [žiūrėta 2020-06-09]. Prieiga per: <https://www.cyclingabout.com/belt-drivetrain-efficiency-lab-testing/>

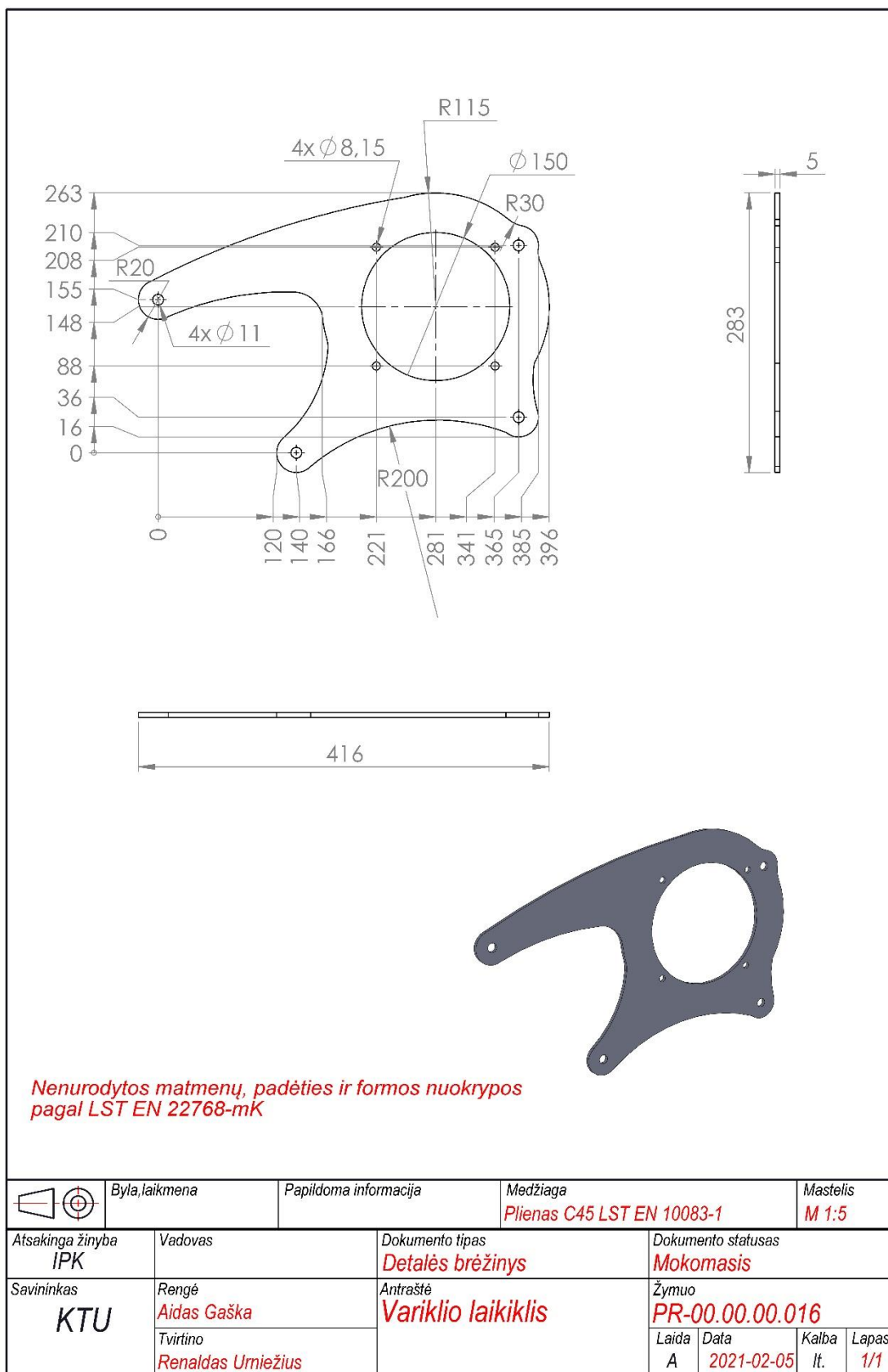
- [15] BURGESS S., C. J. LODGE, Optimisation of the chain drive system on sports motorcycles. *Sports Engineering*. *springer.com* [interaktyvus]. 2004. Vol. 7, no. 2, p. 65–73. [žiūrėta 2020-06-09]. Prieiga per: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BF02915918.pdf>
- [16] LODGE C. J., S.C. BURGESS, A model of the tension and transmission efficiency of a bush roller chain. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* [interaktyvus]. 2001. Vol. 216, no. 4, p. 385–394. [žiūrėta 2020-06-09]. Prieiga per: <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1243/0954406021525179>
- [17] ELECTREK, Electric bicycle hub motors vs mid-drive motors: Which should be on your next e-bike? *electrek.co* [interaktyvus]. 2018. [žiūrėta 2020-06-09]. Prieiga per: <https://electrek.co/2018/06/07/electric-bicycle-hub-motors-vs-mid-drive/>
- [18] DEJAN, How Brushless Motor and ESC Work. *HowToMechatronics* [interaktyvus]. n.d. [žiūrėta 2020-06-13]. Prieiga per: <https://howtomechatronics.com/how-it-works/how-brushless-motor-and-esc-work/>
- [19] BILLAH S. M. B., et al. A Novel Regenerative Braking System of BLDC Motor for Lightweight Electric Vehicles: An Analysis of Braking Characteristics. *2017 2nd International Conference on Electrical & Electronic Engineering (ICEEE)* [interaktyvus]. 2017. [žiūrėta 2020-06-13]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/326702135_A_Novel_Regenerative_Braking_System_of_BLDC_Motor_for_Lightweight_Electric_Vehicles_An_Analysis_of_Braking_Characteristics
- [20] MOHAMMAD A., Md. Z. R. KHAN, BLDC motor controller for Regenerative Braking. *2015 International Conference on Electrical Engineering and Information Communication Technology (ICEEICT)* [interaktyvus]. 2015. [žiūrėta 2020-06-13]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/308862636_BLDC_motor_controller_for_Regenerative_Braking
- [21] MOTIONCONTROLTIPS, What is trapezoidal back emf? *motioncontroltips.com* [interaktyvus]. 2016. [žiūrėta 2020-06-13]. Prieiga per: <https://www.motioncontroltips.com/faq-trapezoidal-back-emf/>
- [22] ROBOTEQ, all products, Brushless DC motor controllers. *roboteq.com* [interaktyvus]. n.d. [žiūrėta 2020-06-13]. Prieiga per: <https://www.roboteq.com/all-products/brushless-dc-motor-controllers>
- [23] KELLYCONTROLLERS, Controllers, Kelly Controllers. *kellycontrollers.eu* [interaktyvus]. n.d. [žiūrėta 2020-06-13]. Prieiga per: <https://www.kellycontrollers.eu/motor-vezerlok/kelly>
- [24] BATTERY UNIVERSITY, Types of Lithium-ion Batteries. *Batteryuniversity.com* [interaktyvus]. 2019. [žiūrėta 2020-06-14]. Prieiga per: https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion
- [25] VOGEL C., Build Your Own Electric Motorcycle. *eavto.si* [interaktyvus]. 2015. [žiūrėta 2020-06-13]. Prieiga per: <http://eavto.si/wp-content/uploads/2015/12/Build-your-own-electric-motorcycle.pdf>
- [26] MARINOV M. et al., An Approach to the Electrical Sizing of The Electric Motorcycle Drive. *IEEE Xplore* [interaktyvus]. 2018. [žiūrėta 2020-06-14]. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8447065>

- [27] ISVAN O., Wind speed, wind yaw and the aerodynamic drag acting on a bicycle and rider. *Journal of Science and Cycling* [interaktyvus]. 2015, pp.42-50. [žiūrėta 2020-06-14]. Prieiga per: <https://www.jsc-journal.com/index.php/JSC/article/download/168/250>
- [28] MICELI R., F.VIOLA, Designing a Sustainable University Recharge Area for Electric Vehicles: Technical and Economic Analysis. *Energies* [interaktyvus]. 2017, vol. 10, no. 10, p. 1604. [žiūrėta 2020-06-14]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/320388143_Designing_a_Sustainable_University_Recharge_Area_for_Electric_Vehicles_Technical_and_Economic_Analysis
- [29] MOTORCYCLE SPECIFICATIONS, Suzuki GS500E. *Motorcyclespecs.co.za* [interaktyvus]. 2005. [žiūrėta 2020-06-14]. Prieiga per: https://www.motorcyclespecs.co.za/model/suzu/suzuki_gs500e%2095.htm
- [30] VAROCKY B. J., et al., Benchmarking of regenerative braking for a fully electric car. *research.tue.nl* [interaktyvus]. 2011. [žiūrėta 2020-06-14]. Prieiga per: <http://www.mate.tue.nl/mate/pdfs/12673.pdf>
- [31] XIANG C., et al., Practical Modeling and Comprehensive System Identification of a BLDC Motor. *Mathematical Problems in Engineering* [interaktyvus]. 2015, vol. 2015, p. 1–11. [žiūrėta 2020-06-14]. Prieiga per: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2015/879581/?fbclid=IwAR25SKsoI6o775ty7-GXR8cRNiz4y9WL7SuIUvOXlw486CeOODtu3rgwEqE>
- [32] SEVCON, products, low voltage controllers, Gen4. *sevcon.com* [interaktyvus]. n.d. [žiūrėta 2020-12-29]. Prieiga per: <http://www.sevcon.com/products/low-voltage-controllers/gen4/>
- [33] KELLYCONTROLLERS, HPM3000. *kellycontrollers.eu* [interaktyvus]. n.d. [žiūrėta 2020-12-29]. Prieiga per: <https://www.kellycontrollers.eu/hpm3000l-3kw-72v-vizhuteses>
- [34] SPARKFUN, Home, Tutorials, Measuring Internal Resistance of Batteries. *learn.sparkfun.com* [interaktyvus]. n.d. [žiūrėta 2021-01-02]. Prieiga per: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/measuring-internal-resistance-of-batteries/internal-resistance?fbclid=IwAR3ij6GVRHpXriig89TpZyVNCZDgvIuLICRhglIEuyj6ZUx47z89La5Tup8>
- [35] INFINEON Technologies, Home, Applications, Solutions, Battery Management System (BMS). *www.infineon.com* [interaktyvus]. 2021. [žiūrėta 2021-01-02]. Prieiga per: <https://www.infineon.com/cms/en/applications/solutions/battery-management-system/>
- [36] SMBAHIAV. *smbahiv.com* [interaktyvus]. n.d. [žiūrėta 2021-01-02]. Prieiga per: https://www.smbahiv.com/index.php?main_page=product_info&products_id=722346
- [37] LITHIUM POWER, Accessories, Panasonic Automotive Relay 12V 400A. *lithium-power.com.au* [interaktyvus]. 2020. [žiūrėta 2021-01-02]. Prieiga per: <https://www.lithium-power.com.au/product/panasonic-automotive-relay-12v-400a-/43>
- [38] LI, X. et al., Permanent magnet synchronous motor vector control based on MATLAB/Simulink. *IEEE Xplore* [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2021-04-16]. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8298737>
- [39] MADHU R.K., A. MATHEW, Matlab/Simulink Model of Field Oriented Control of Pmsm Drive Using Space Vectors [interaktyvus]. 2013 [žiūrėta 2021-04-16]. Prieiga per: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.384.5449>

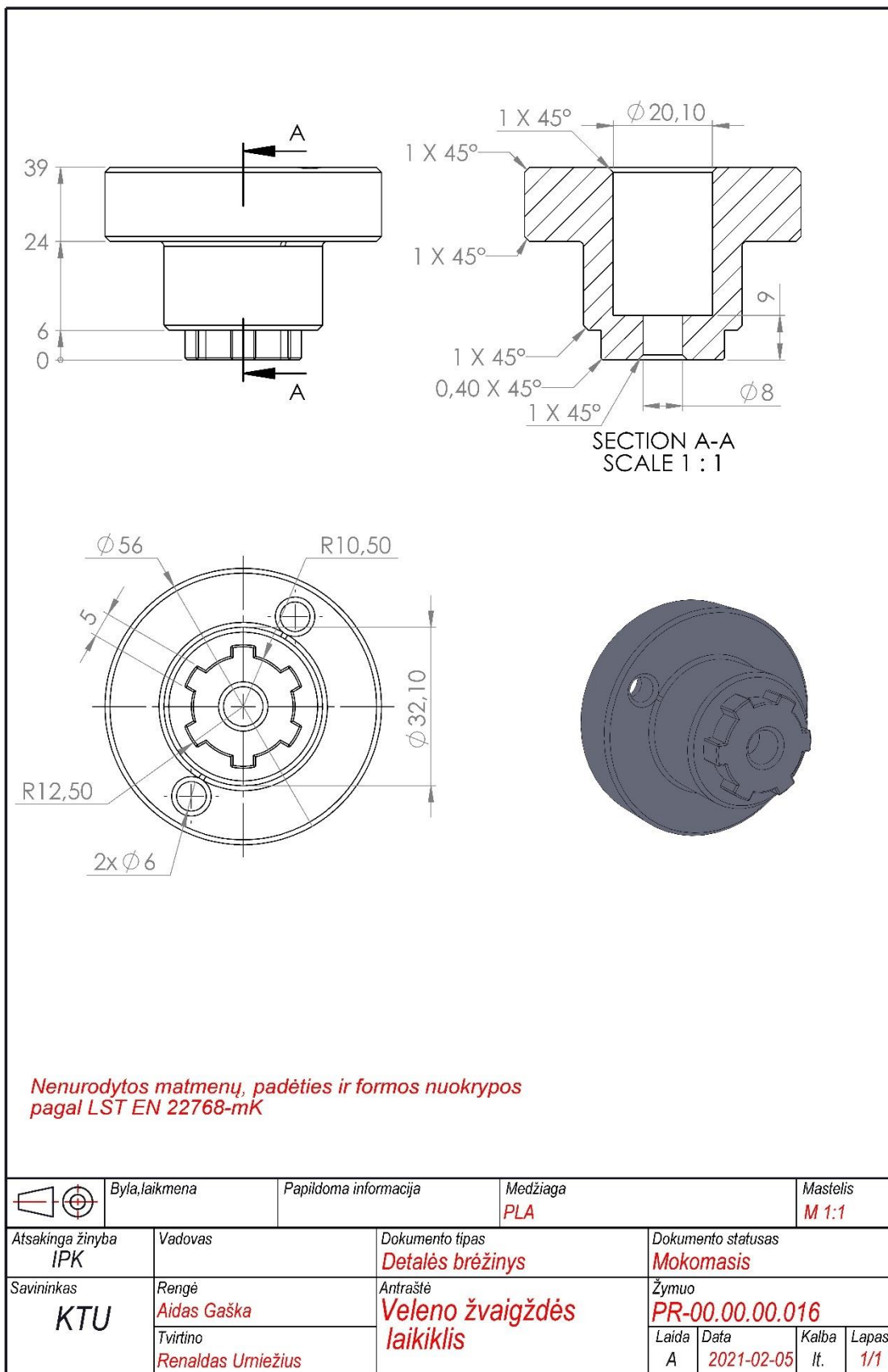
- [40] MORALES D. A., K. FINDLATER and V. CHANDRAN, A motor controller using field oriented control and Hall effect rotor position sensors: Simulation and implementation. *2014 6th European Embedded Design in Education and Research Conference (EDERC)* [interaktyvus]. 2014, pp. 235-239. [žiūrėta 2021-04-16]. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6924395>
- [41] KIVANC, O. C., S. B OZTURK, MATLAB Function Based Approach to FOC of PMSM Drive. *IEEE Xplore* [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2021-04-16]. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7579812>
- [42] Field Oriented Control. *uk.mathworks.com* [interaktyvus]. n.d. [žiūrėta 2021-04-16]. Prieiga per: https://uk.mathworks.com/solutions/power-electronics-control/field-oriented-control.html?s_eid=PSM_15028
- [43] PARAMETERIZE A PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR. *uk.mathworks.com* [interaktyvus]. n.d. [žiūrėta 2021-04-29]. Prieiga per: <https://uk.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/parameterize-a-permanent-magnet-synchronous-motor.html>
- [44] MOTOR SIZING BACICS PART 2: LOAD INERTIA. *orientalmotor.com* [interaktyvus]. n.d. [žiūrėta 2021-04-29]. Prieiga per: <https://blog.orientalmotor.com/motor-sizing-basics-part-2-load-inertia>
- [45] MOKHATAB S., POE W. A., Process Control Fundamentals. *Handbook of Natural Gas Transmission and Processing* [interaktyvus] . 2012. p. 473–509. [žiūrėta 2021-04-29]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123869142000145>

5. Priedai

1 priedas. Motociklo elektrinio variklio laikiklis



2 priedas. Motociklo elektrinio variklio veleno priekinės žvaigždės laikiklis



3 priedas. Reader.py programos kodas

```
#Surenka visus csv failus ir sutvarko stulpelius
#Naujas sutvarkytas failas bus su _Fixed galune

import glob
import os

#Path_to_files = 'kur padeti logai'
#Dabartine direktorija

Path_to_files = ""

Delimiter = ','
Column_Count = 18

def main():

    Del_files = glob.glob(Path_to_files + '*_fixed.csv')
    for i in Del_files:
        os.remove(i)

    Get_files = glob.glob(Path_to_files + '*.csv')
    print('Processing files:')
    for i in Get_files:
        print(i)
    for File_Path in Get_files:
        File_Name = [i.split('/')[-1] for i in File_Path]
        Name = ""
        Name = Name.join(File_Name)
        DVT_Log = open(Name, "r")

        Columns = 0
        New_Line = ""
        data = 0
        Lines = DVT_Log.readlines()
        for Line in Lines:
            Pos = Line.find(Delimiter)

            if(Pos != (-1)):
                while(Pos != (-1)):
                    data = 1
                    New_Line += Line[:Pos + len(Delimiter)]
                    Columns += 1
                    Line = Line[(Pos + len(Delimiter)):]
                    if Columns == Column_Count:
```

```

        Pos = New_Line.rfind("Delimiter")
        New_Line = New_Line[:Pos - len(Delimiter)]
        New_Line += '\n'
        Columns = 0
    Pos = Line.find(Delimiter)
else:
    if data == 1:
        Pos = New_Line.rfind("\n")
        New_Line = New_Line[:Pos - 2]
        Pos = New_Line.rfind("\n")
        New_Line = New_Line[:Pos - 2]
        data = 0
    New_Line += Line
DVT_Log.close()
Pos = Name.find('.csv')
Name = Name[:Pos] + '_Fixed' + '.csv'
DVT_Fixed = open(Name, "w")
DVT_Fixed.write(New_Line)
DVT_Fixed.close()
print("New Info written to: %s" % Name)
main()

```