



Kauno technologijos universitetas
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

MAŽŲ HUMANOIDINIŲ ROBOTŲ PAVARŲ VALDYMO TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Giedrius Liaučys

Prof. Vytenis Sinkevičius

Panevėžys, 2018



Kauno technologijos universitetas
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

MAŽŲ HUMANOIDINIŲ ROBOTŲ PAVARŲ VALDYMO TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas
Valdymo technologijos (621H66001)

Giedrius Liaučys

Prof. Vytenis Sinkevičius
Vadovas

Recenzentas / Recenzentė

Panevėžys, 2018



Kauno technologijos universitetas
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas
Giedrius Liaučys

MAŽŲ HUMANOIDINIŲ ROBOTŲ PAVARŲ VALDYMO TYRIMAS

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Giedriaus Liaučio, baigiamasis projektas tema „Mažų humanoidinių roboto pavarų valdymo tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETO
PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETO
TECHNOLOGIJŲ IR VERSLUMO KOMPETENCIJŲ CENTRAS**

TVIRTINU
TVKC vadovė
Nida Kvedaraitė

BAIGIAMOJO PROJEKTO UŽDUOTIS

Diplomantui **Liaučiui Giedriui**

Baigiamojo projekto tema Mažų humanoidinių robotų pavarų valdymo tyrimas
(lietuvių kalba)

Baigiamojo projekto tema Research of Small Humanoid Robot Actuators Control
(anglų kalba)

Patvirtinta 2018 m. kovo mėn. 30 d. dekanu potvarkiu Nr. V25-13-12-1.

Irišto baigiamojo projekto pateikimo į TVKC terminas iki 2018 m. gegužės 31 d.

Duomenys, reikalavimai ir sąlygos baigiamajam projektui

Mažų humanoidinių robotų techninė dokumentacija. Eksperimentu patikrinti tiriamojo darbo rezultatus.

Baigiamojo projekto turinys / struktūra (išvardinti pagrindines BP dalis / uždavinius / klausimus, kurie turi būti atskleisti baigiamajame projekte)

1. Atlikti literatūros apžvalgą.
2. Sudaryti mažų humanoidinių robotų pavarų valdymo matematinį modelį.
3. Ištirti dinamines ir šilumines pavarų charakteristikas.
4. Parinkti metodą analoginiams signalams filtruoti.
5. Išbandyti tokio tipo pavarų reguliatorių parametrų derinimo metodus.
6. Sukurti pavaros reguliatoriaus parametrų automatinį nustatymo būdą.

Vadovas prof. Vytenis Sinkevičius

(parašas, pareigos, vardas, pavardė)

Užduotį gavau Giedrius Liaučys

(studento parašas, vardas, pavardė)

2018 m. balandžio 16 d.

Liaučys, Giedrius. Mažų humanoidinių robotų pavarų valdymo tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / prof. Vytenis Sinkevičius; Kauno technologijos universitetas, Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis: elektronikos ir elektros inžinerija, technologijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: humanoidas; kolaboratyvumas; servo; pavara; valdymas.

Panevėžys, 2018. 76 p.

SANTRAUKA

Šiame darbe nagrinėjamos humanoidinių robotų pavarų valdymo galimybės. Šio tipo robotai pagal paskirtį priskiriami prie kolaboratyvių įtaisų grupės. Siekiant sukurti kolaboratyvų darbą gebančią atlikti elektros pavaros modulį, reikalingi specifiniai sprendimai ir įranga. Darbo eigoje atliekama įrenginių analizė, duomenų surinkimo galimybių paieška, bei pavaros judesio proceso valdymo programos kūrimas.

Liaučys, Giedrius. Research of Small Humanoid Robot Actuators Control. Master's Final Degree Project / prof. Vytenis Sinkevičius; Panevėžys Faculty of Technologies and Business, Kaunas University of Technology.

Study field and area: Electronic and Electric Engineering, Technology Sciences.

Keywords: humanoid; collaboration; servo; motor, controlling

Panevėžys, 2018. 76 pages.

SUMMARY

In this paper, we are examining the possibilities of controlling humanoid robot actuators. The robots of this type are assigned to the group of collaborative devices according to their purpose. In order to create a collaborative work capable of performing an electric drive module, specific solutions and equipment are required. In the course of work process analysis of equipment, search of data capture possibilities, and development of actuator motion process control program are carried out.

TURINYS

1. Literatūros apžvalga ir analizė	10
1.1. Tiriamo elemento (pavaros) integralumas roboto sistemos atžvilgiu	10
1.2. Servo pavaros	14
2. TIRIAMOJI DALIS	21
2.1. Pasiruošimas tyrimui	21
2.2. „Maxon“ berėmis nuolatinės srovės variklis	21
2.3. Matematinio nuolatinės srovės variklio valdymo modelio sudarymas	24
3. PRAKTINĖ DALIS	38
3.1. Pasiruošimas tyrimui	38
3.2. Tyrimo įranga	39
3.3. Mikrovaldiklio galimybių tyrimas	45
3.4. Bandymų stendo elektrinės dalies jungimas	50
3.5. Duomenų valdymas	51
3.6. Poveikis aplinkai	63
3.7. Procesų valdymas	65
IŠVADOS	68
LITERATŪROS SĄRAŠAS	69

IŽANGA

Humanoidas, tai pagal žmogaus fizinę išvaizdą ir judesio modelį sukurta mechatroninė sistema. Šis biorobotų klasės įtaisas geba atlikti manipuliavimo objektais operacijas vietoj žmogaus, arba kartu su juo. Taip pat šis įtaisas priklauso mobilių robotų grupei. Humanoidinio roboto darbo vieta nėra apibrėžta – gali bet kur, bet ką pagal savo sugebėjimus nuveikti. Sparčiai vystantis technologijoms, taip pat auga tokių robotų galimybės. Nors robotų kūrimą ir gamybą reglamentuoja tarptautiniai standartai, tačiau apie įtaisas, gebančius dirbti kartu su žmogumi, pradėta kalbėti tik šio dešimtmečio pradžioje. Kolaboratyvumas – būseną, kai dvi ar daugiau savarankiškai sprendimus priimančių sistemų dirba kartu dėl bendro tikslo [1]. Prieš penkerius metus pseudo-kolaboratyvūs robotai buvo pradėti diegti pramonėje. Nelaimingų įvykių, kai robotas sužaloja žmogų yra buvę ir Lietuvoje. Saugų darbą kartu su pramoniniais robotais reglamentuoja ISO 10218 standartas. Jame aprašytos būtinos sąlygos ir priemonės ribojančios žmogaus patekimą į veikiančio roboto zoną. Žmogaus ir roboto darbą bendroje zonoje nusako ISO/TS 15066 (angl. Robots and robotic devices - Collaborative robots) [1] standartas. Šiame dokumente reglamentuojamos normos sertifikuotų kolaboratyvių robotų projektuotojams ir gamintojams. Humanoidas yra kolaboratyvus robotas, todėl projektuojant ir kuriant jo modulius privalu atsižvelgti į ISO/TS 15066 [1] standartą. Šis standartas reikalauja, kad įrenginys gebėtų: būti naviguojamas ranka, patikimai ir saugiai sustoti, stebėti padėties ir greičio pokytį, riboti galią ir jėgą. Roboto galūnių judesį įprastai kuria elektros pavaros moduliai. Norint užtikrinti atitinkantį minėtą standartą judesį, reikalingas naujos kartos pavarų valdymo konceptas. Pavaros modulis nebegali tiesiog vykdyti atsiųstas komandas, jis privalo suvokti darbo aplinką [2], savarankiškai priimti sprendimus, saugotis nuo avarinių situacijų prieš judesį ir jo metu.

Realizuojant sudėtingas robotizuotas sistemas, tokias, kaip biorobotai (Biorobotics), kurių daugelis turi net kelias dešimtis laisvės laipsnių (DOF), reikalingas sprendimas, įgalinantis nesudėtingą visų lanksčių jungčių judėjimo valdymą. Sprendimas galimas pasitelkiant modulines sistemas, kurios savarankiškai atlieka jai pavestą judesio funkciją – servo pavaras. Servo pavaros taikomos ganėtinai plačiai, nuo aviamodelių iki pramonėje veikiančių aplikacijų. Taip pat, nuo jų pritaikymo srities skiriasi servo pavaros konstrukcija, elementinė bazė ir valdymo ypatumai. Siekiant užtikrinti santykinai precizišką valdomo mechanizmo dinamiką, tenka naudoti tam tikro lygio servo pavaras, kurios ne tik masyvos, bet ir brangios. Iki šiol rinkoje siūlomos mažos galios servo pavaros negali palaikyti norimų funkcijų. Efektyviai perkėlus norimas funkcijas iš pramoninės servo pavaros į mini servo pavarą, pavyktų sukurti naują įrankį palengvinantį įvairių robotikos projektų vystymą.

Tyrimo objektas – Maža nuolatinės srovės pavarą.

Darbo tikslas – Parametrizuoti valdyti mažo nuolatinės srovės variklio dinamiką.

Darbo uždaviniai:

1. Atlikti literatūros apžvalgą.
2. Sudaryti mažų humanoidinių robotų pavarų valdymo matematinį modelį.
3. Ištirti dinamines ir šilumines pavarų charakteristikas.
4. Parinkti metodą analoginiams signalams filtruoti.
5. Išbandyti tokio tipo pavarų reguliatorių parametrų derinimo metodus.
6. Sukurti pavaros reguliatoriaus parametrų automatinį nustatymo būdą.

Tyrimo metodai – mokslinės literatūros analizė, modeliavimas MALAB Simulink programinių paketu, eksperimentas.

1. Literatūros apžvalga ir analizė

1.1. Tiriamo elemento (pavaros) integralumas roboto sistemos atžvilgiu

Šiame darbe nagrinėjamos humanoidinių robotų pavarų galimybės ir tolimesnis jų tobulinimas. Humanoidas – tai pagal žmogaus fizinę išvaizdą ir judesio modelį sukurta mechatroninė sistema. Esminė problema, su kuria susiduriama kuriant bet kokią robotizuotą sistemą, yra jos galūnių koordinuoto judesio valdymas. Dėl šios priežasties nagrinėjamoje mechatroninėje sistemoje daugiausia dėmesio skiriama elementui, kuris kuria judesį, – elektros pavaros moduliui. Humanoidai, kaip ir kiti biorobotikos šeimos nariai (žr. 1 pav.), sukurti ir valdomi pagal gyvo organizmo pavyzdį. Neišvengiamai daugelis techninių aspektų ir funkcijų bus siejama būtent su organinėmis sistemomis. Kuriant humanoidinio roboto sistemą ar jos dalį, vadovaujantis realiai egzistuojančiu pavyzdžiu, tikslinga idėjų semtis būtent iš jo – žmogaus. Nepaisant to, kad žmogus techniškai ir funkciškai yra pati sudėtingiausia žemėje žinoma gyvybės forma, tačiau vadovaujantis jau sukurtų biorobotų pavyzdžiais, gyvojo pasaulio stebėsenai ir asmeninei patirtimi galima numanyti pavaros modulio veikimo ypatumus ir funkcionalumą.

Biorobotų kūrimas ir taikymas jau kuris laikas labai domina pasaulio inžinierius, nes šios srities keliami tikslai yra šie [3]:

- Išvystyti labiau pažangias, praktiškai pritaikomas robotines ir mechatronines sistemas;
- Išplėsti biologinių sistemų suvokimą kuriant į jas panašias mechatronines sistemas (įskaitant žmones).

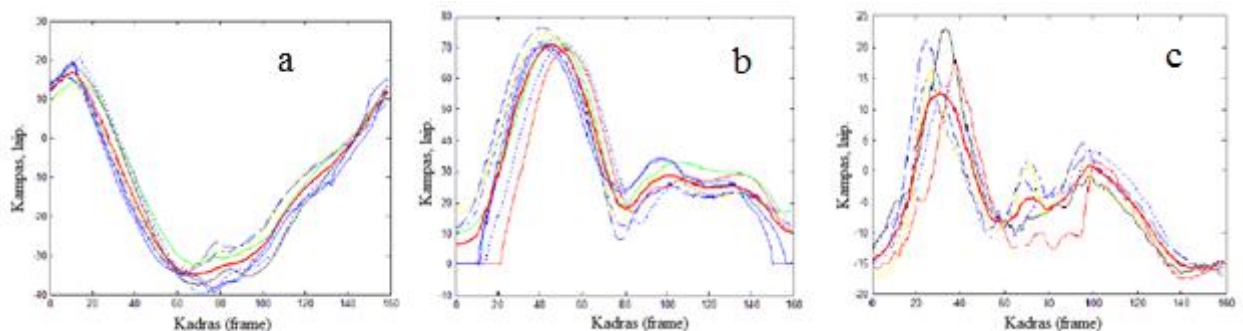
Šiuo metu egzistuoja keturios pagrindinės biorobotų šeimos grupės:

- Humanoidai (*Humanoid*);
- Bioreplikos (*Bioinspired*);
- Žmogaus-roboto sąveika (*Human-robot interaction*);
- Įtaisai ir priemonės, skirtos biomedicinai (*Biomedicine devices*);



1 pav. Biorobotų pavyzdžiai [3]

Kiekvienas gyvas sutvėrimas vos tik gimęs stengiasi nevaržomai ir dažnai nerangiai įvairiai judinti visas galūnes. Chaotiškas galūnių judinimas indikuoja ne tik apie organizmo gyvybines funkcijas, bet ir sudėtingo motorikos centro saviugdros proceso pradžią. Gebėjimas vaikščioti ant dviejų kojų, šliaužti, plaukti, skrieti yra sunkaus ir ilgai trunkančio ugdymosi proceso dalis. Kiekvienas atliekamas judesys yra neįprastai sudėtinga operacija, kurioje dalyvauja ne tik įvairios raumenų grupės, nervų sistemos elementai, bet ir jas valdyti išmokusios smegenys. Niekas negimsta mokėdami, tačiau geba mokytis. Bandymas, stebėseną ir blogiausių bandymų eliminavimas yra evoliucijos raktas [2]. Kūdikiui išmokti ropinėti prireikia metų, paukščiui skristi – mėnesio. Jautukas jau per pirmąsias valandas atsistoja ant keturių kojų ir tyrinėja tvartą. Nepriklausomai nuo rūšies ir galimybių visi sutvėrimai praleidžia daugybę laiko tiesiog mokydami geriausio įvykio principu valdyti savo kūną. Gyvo sutvėrimo motorikos kontrolės mechanizmas organizuoja vieną iš svarbiausių ir sudėtingiausių funkcijų, kuri užtikrina kokybišką individo funkcionavimą. Šio kontrolės mechanizmo pagrindinė užduotis yra nuolatos spręsti esamas motorikos užduotis, iš jų mokytis bei kurti naujus judesio modelius. Biorobotų judesio modelį kūrėjas aprašo kinematiniais ryšiais tarp gretimų sąnarių ar galūnių. Kai kuriais atvejais kompiuterinės sistemos turi įdiegtą gebėjimą mokytis. Norint, kad galūnė pajudėtų atliekant linijinę interpoliaciją, visi tos galūnės sąnariai privalo dirbti sinchroniškai [4] (2 pav.). Galima stebėti humanoido roboto trijų kojos sąnarių judesio diagramas, kurios sinchronizuotos pagal judesio kadrą tam tikru laiko momentu. Kiekvienoje diagramoje pastebime kreives, kurių nesutapimas nurodo, kad planuojamas atlikti ir įvykdytas judesys skiriasi atliekant keletą bandymų. Šių bandymų nesutapimui įtakos galėjo turėti įvairūs fiziniai ir su valdymu susiję trikdžiai. Siekiant užtikrinti pasikartojantį galūnės pozicionavimą, privaloma suvokti aplinką, užtikrinti duomenų surinkimo, interpretavimo ir informacijos paskirstymo mazgų kokybišką darbą. Išsamiau nagrinėjant ir tobulinant humanoido sistemą valdymo srityje, būtų teisinga vadovautis žmogaus modelio koncepcija, tačiau tai nėra lengva. Į šį uždavinį būtina žvelgti realistiškai – naudoti priemones ir metodus, kurie pasiekiami šiuo laikotarpiu.



2 pav. Humanoid'o kojos judesio diagrama: a, b ir c trijų sąnarių judesio planai [4]

Vykdiklių (raumenų) funkciją humanoido tipo robotuose daugeliu atvejų atlieka funkcinis blokas, vadinamas servo pavara. Vykdyto komandos (informacija) perduodama fiziniu komunikacijos tinklu (nervų sistema). Tačiau šios dvi sistemos neatliktų jokios prasmingos užduoties, jeigu niekas neformuotų teisingų valdymo komandų. Daugeliu atvejų tai atlieka išorinis valdymo įtaisas, kuris ne tik suvokia visą valdomos sistemos dinamiką, bet ir prognozuoja veiksmus, juos tikslingai paskirsto tarp daugybės įtaisų (variklių-raumenų). Tokia sistema stabili tol, kol naudojami primityvūs įtaisai ir valdymo algoritmai. Priešingu atveju reikalingi sudėtingesni technologiniai sprendimai. Darbe nagrinėjama problematika pastebima, kai siekiant tolydžiai valdyti judesį kuriančius mechanizmus, iškyla poreikis įsisavinti didelį kiekį informacijos ir ją laiku, tinkamai apdoroti. Elektros pavaros (mechaninę energiją kuriančio įtaiso) valdymas pagal pagrindinius pavarą charakterizuojančius parametrus: sukimosi greitį, kampinę padėtį ir sukuriamą sukimosi momentą reikalauja ne tik papildomos elektrotechninės įrangos, bet ir didelių skaičiavimo pajėgumų [5]. Judesio modelio sukūrimas ir įdiegimas į individualų pavaros mechanizmą eliminuotų poreikį nuolatinei komunikacijai. Valdymo įtaisui išreiškus poreikį atlikti nurodytą judesį, kiekvienas mechanizmas galėtų tai atlikti pagal numatytą scenarijų. Manau, kiekvienam iš mūsų yra tekę susimąstyti, kaip sugebame bėgti, ranka paimti daiktą vos panorėjus. Išties, visa tai daug sudėtingiau. Organizmui besivystant kuriami ir įsimenami judesio modeliai. Labai svarbus adaptavimasis ir gebėjimas prisitaikyti. Senstant, patiriant traumas, negaluoju ir pan. nuolatos keičiasi fizinės galimybės, kūnas privalo prisitaikyti. Todėl kiekvieną kartą atliekant judesį kuriamas naujas tobulesnis to judesio modelis. Štai dar viena funkcija, kuri praktiškai būtų labai naudinga – gebėjimas optimizuotis [6].

Galime prisiminti pirmuosius bandymus ranka nupiešti idealų apskritimą. Tikėtina, kad to padaryti iš pirmo karto nepavyko. Žvelgiant į rezultatą galima atlikti išvadas ir pastebėjimus, kokių priemonių ir metodų prireiktų norint pasiekti geresnį rezultatą. Tikėtina, kad šio proceso kartojimas ir analizavimas kito bandymo metu duos geresnį rezultatą [7]. Savarankiško mokymosi (*self-learning*) savybės įdiegimas galimai padėtų optimizuoti judesį. Planuojamo judesio trajektorija dėl aplinkos poveikio ar kitų nenumatytų aplinkybių daugeliu atvejų nesutampa su realia trajektorija. Pagal pastebėtą trajektorijos paklaidą galimas sistemą įtakančių parametrų koregavimas. Apibendrinant, norint sukonstruoti bet kokią adaptyvią robotinę sistemą, visas dėmesys privalo būti skiriamas judesį formuojantiems įrenginiams, siekiant įvertinti ir užtikrinti:

- Elektromechaninio įtaiso dinamiką, charakteristiką ir valdymo procese dalyvaujančios įrangos galimybes;
- Adaptyvaus valdymo galimybes ir metodus.

Mažo humanoido tipo roboto gabaritai nėra dideli – aukštis apie 1m, plotis apie 0,5m. Visi šios sistemos įrenginiai atitinkamai yra nedidelių gabaritų. Renkantis elektros pavarą humanoidinio roboto aplikacijai labiausiai tiktų servo pavaros modulis. Servo pavara tipiškai susideda iš elektros variklio, reduktoriaus ir įvairios elektronikos komponentų, tiesiogiai dalyvaujančių judesio valdyje.

Servo pavaros skirstomos į keletą pagrindinių grupių:

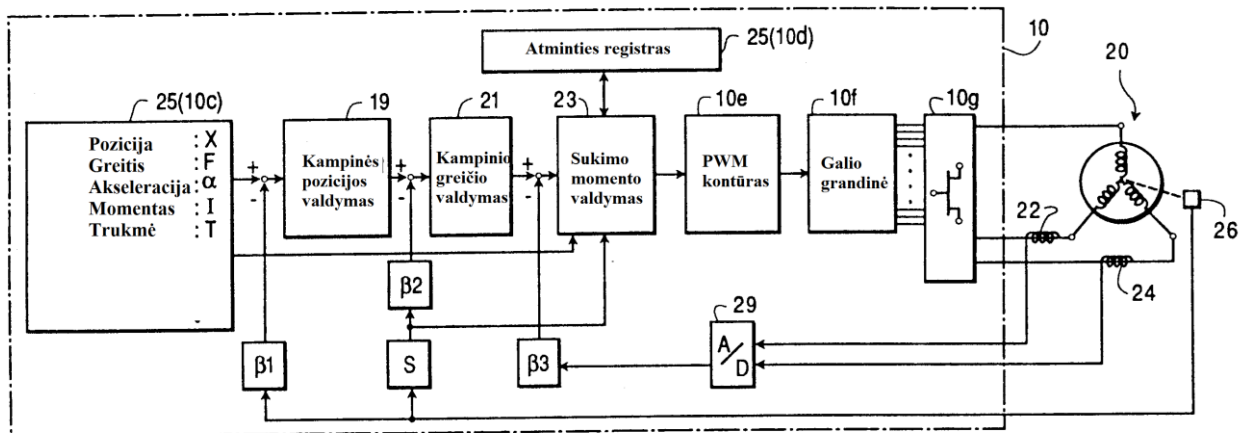
- Pramoninės servo pavaros;
 - AC servo pavaros;
 - DC servo pavaros;
 - ❖ Su šepetėliniu varikliu;
 - ❖ Su bešepetėliniu varikliu;
- Tyrimams ir hobiui;
- Klasikinės RC servo pavaros;
- Adresuojamos servo pavaros.

Vertinant galimybes, kainą ir gabaritus, labiausiai tinkamos šiai aplikacijai būtų adresuojamos servo pavaros. Adresuojamos servo pavaros šiuo metu jau turi įdiegtą galimybę jas parametrizuoti ir palaikyti norimą dinamiką, tačiau jų galimybės ženkliai atsilieka nuo servo pavarų, taikomų pramonėje. Pramoninių servo pavarų pritaikymas šiai aplikacijai negalimas dėl didelės jų rinkos kainos, kuri gali siekti net dešimt tūkstančių eurų. Darbo tikslas yra vadovaujantis tyrimų metu pasiektais rezultatais suprojektuoti ar sukurti mažų gabaritų, pigią servo pavarą, turinčią panašias funkcines galimybes, prilygstančias pramoninėje naudojamomis servo pavaromis.

1.2. Servo pavaros

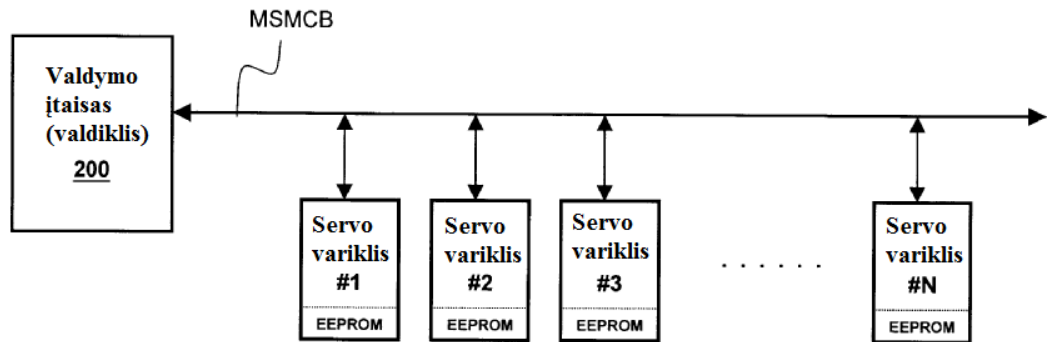
1.2.1. Pramoninės servo pavaros

Pramoninės servo pavaros plačiai naudojamos įvairiose gamybinėse automatizacijos aplikacijose, robotuose, matavimo prietaisuose ar kitą precizinį darbą atliekančiuose įrenginiuose. Jų platų pritaikomumą lemia galimybė preciziškai valdyti ne tik posūkio kampą, kampinį sukimosi greitį, bet ir kitus parametrus, tokius kaip sukimo momentą, akceleraciją, sukimosi laiką ir pan. [8]. Kuo servo pavaros turi daugiau valdymo parametrų, tuo visa įrenginio sistema tampa sudėtingesnė. Pažangių servo pavarų sistemos judesio valdymas vykdomas pagal tris pagrindinius valdymo kontūrus: kampinės padėties, kampinio greičio ir sukimo momento. Trečiame paveiksle (žr. 3 pav.) atvaizduotas minėtų valdymo kontūrų ryšys ir įtaka išėjimo signalui. Valdymo grandinė yra uždaro tipo grįžtamo ryšio (*loop feedback*) sistema, kai valdymo komanda lyginama su pasiektu rezultatu. Esant neatitikimui, atliekamas kompensavimas. Tokiam procesui valdyti ir parametrizuoti naudojamos skaitmeninės valdymo sistemos.



3 pav. Pramoninės servo pavaros struktūrinė valdymo schema [1]

Kalbant apie servo pavaras, labai svarbus aspektas yra jų integralumas – galimybė keletą įrenginių jungti tarpusavyje. Vienoks įrenginių jungimas gali palengvinti užduoties sprendimą, bet kai kuriais atvejais ir pasunkinti. Šiuolaikinėse mechatroninėse sistemose įprastai panaudojama daugiau nei viena servo pavara. Dėl išaugusio servo pavarų skaičiaus įrenginiuose didėja ir laidininkų kiekis, kuriais bus organizuojama komunikacija. Laidininkų skaičiaus padidėjimo problema sprendžiama keičiant komunikacijos principą – iš lygiagretaus į nuoseklų. Nuoseklus komunikacijos principas leidžia keliems įrenginiams dalytis informacija su valdymo įtaisu naudojant tą pačią komunikacijos magistralę. [9]. Šiuo atveju galimas ne tik duomenų siuntimas, bet ir jų gavimas naudojant abiem komunikacijos partneriams žinomą protokolą. Informacija pasiekia kiekvieną įrenginį pagal identifikacijos (ID) numerį (žr. 4 pav.).





4 pav. Nuoseklaus tipo komunikavimas su servo pavaromis [2]

1.2.2. Adresuojamos servo pavaros

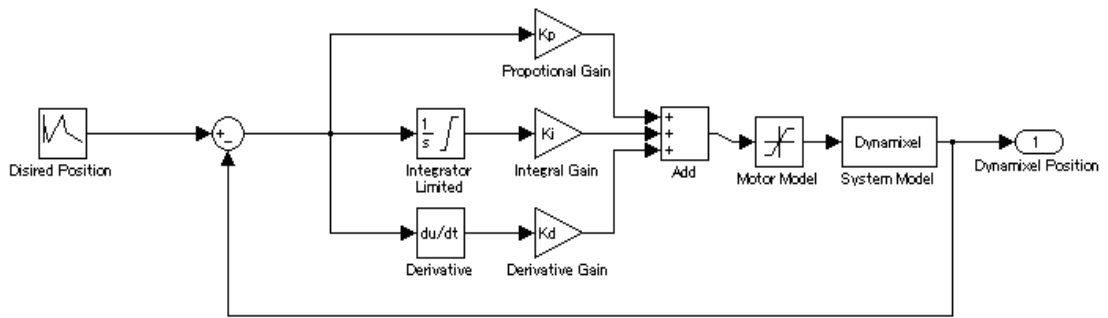
Adresuojamos servo pavaros, kaip AX-18A ir AX-12A [10] įprastai turi platesnį techninį aprašą ir yra funkciškai pranašesnės už klasikines RC servo pavaras. Palyginant pavaros sukimo momentą ir kainą, tai adresuojamos servo pavaros yra kelis kartus brangesnės. Vidutiniškai adresuojamų servo pavarų kainos svyruoja nuo 100 iki kelių tūkstančių eurų. Esminis klasikinių ir adresuojamų servo pavarų skirtumas – valdymo principas ir ypatumai, bei galimybė koreguoti valdymo parametrus.

„Dynamixel“ MX serijos adresuojamos servo [11] pavaros santykinai mažame korpuse talpina įvairias savybes ir funkcijas, kurios sukuria unikalias valdymo charakteristikas (1 lentelė). Naudojamas absoliutinis magnetinis (bekontaktis) enkoderis, kuriuo fiksuojamas išėjimo ašies kampinis posūkis. Toks sprendimas suteikia galimybę įvykdyti pilną ašies apsisukimą, ar net nuolatinį sukimąsi viena kryptimi. Ši funkcija, kai pasisukimo kampas nuo 180°. padidėjo iki daugiau kaip 360° įgalina servo pavaros pritaikymą naujose aplikacijose. Absoliutinis magnetinis enkoderis užtikrina nuolatinį padėties nuskaitymą bet kuriuo laiko momentu. Nagrinėjamoje servo pavaroje naudojamas 12 bitų diskretiškumo magnetinis enkoderis – 360° darbo laukas suskaidomas į 16384 vertes, todėl įtaisas geba atpažinti 0,022 laipsnio nuokrypį. Servo pavara turi ne tik padėties grįžtamą ryšį, bet ir variklio temperatūros, apkrovos, maitinimo įtampos ir srovės verčių. Visapusis sistemos stebėjimas suteikia galimybę ne tik prevenciškai vengti avarinių situacijų, bei minėtus parametrus įtraukti į valdymo algoritmą siekiant užtikrinti norimą įtaiso dinamiką. PID reguliatorius (žr. 3 pav.), kaip pagrindinis valdymo algoritmas atlieka pasisukimo valdymą.

Adresuojamų servo pavarų parametrų palyginimas [10]

		
Pavadinimas:	Dynamixel AX-18A	Dynamixel AX-12A
Redukcijos laip.:	254:1	254:1
Aps/min (12V):	97 aps/min.	59 aps/min.
Diskretiškumas (laip.):	0,1 laip.	0,2 laip.
Jungtis:	Trilaidė jungtis	Trilaidė jungtis
Sukimo momentas (12V):	18,4 kg-cm	15.3 kg-cm
Maitinimo įtampa (V):	9-12 V	9-12 V
Svoris (g) :	54,6 g	54,6 g
Matmenys (A, B, C):	50x32x40 mm.	50x32x40 mm.
Kaina (\$):	\$ 94,90	\$44,90
Platintojas:	„Bananarobotics“	„Bananarobotics“
Galimybė įsigyti:	Galima įsigyti	Galima įsigyti

Keičiant trijų valdymo parametrų P, I ir D koeficientus, keičiasi valdymo algoritmo elgsena. Šiuo atveju koeficientų vertės gali kisti nuo 0 iki 254. Gamintojas pateikia pastebėjimus, kad kuo mažesnis P koeficiento dydis, tuo didesnis valdymo komandos ir realiai pasisukusios pavaros kampų skirtumas (2 lentelė). Siekiant užtikrinti maksimaliai tikslų judesį, P koeficientas turi būti santykinai didelis. Antroje lentelėje pateikta valdymo signalo fronto nuolydžio priklausomybė nuo stiprinimo signalo. Nuožulnus valdymo signalo frontas (maža P koef. vertė) sukuria pasyvią regulatoriaus reakciją, dėl šios priežasties nebus užtikrinamas tikslus judesys.



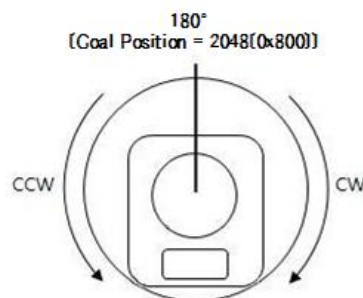
5 pav. PID regulatoriaus valdymo grandinė [11]

2 lentelė

Santykis tarp valdymo signalo fronto ir Proporcinio koeficiento [11]

Frontas (Slope)	Stiprinimas (P gain)
8	128
16	64
32	32
64	16
128	8

Servo pavaros judesį valdo ne tik pagrindinis valdymo algoritmas, bet ir šalutiniai, kurie atlieka kitų parametų stebėseną ir kelio korekciją pagal juos. Galima valdyti judėjimo greitį ir sukimo momentą. Judėjimas gali vykti pagal du skirtingus režimus: „Joint mode“, kai judama nuo pradžios taško iki pabaigos taško, „Wheel mode“, kai judama nurodyta kryptimi nesustojant. Judėjimo kryptis nurodoma kampo pozicija nuo 180° žymos (žr. 6 pav.). Jeigu užduotis yra intervale nuo 0 iki 1023 servo pavara juda prieš laikrodžio rodyklę. Valdant sukimo momentą, kai šio parametro vertė lygi 512, servo pavara sukuria 50% vardinio momento sukimo jėgą.



6 pav. Servo pavaros sukimosi kryptis, „Goal position“ – užduotis, CCW – prieš laikrodžio rodyklę, CW – laikrodžio rodyklės kryptimi [11]

Dynamixel servo pavaros suteikia galimybę realiu laiku stebėti esamos kampinės padėties vertę, esamą greitį, apkrovą, maitinimo įtampą ir temperatūrą. Apkrovos parametras nurodo ne tik apkrovos dydį, bet ir jos kryptį. Informacija pateikiama 16 bitų žodyje. Pirmieji 10 bitų nusako apkrovos dydį, 11 bitas – apkrovos kryptį (žr. 7 pav.).

BIT	15~11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Value	0	Load Direction	Data (Load Ratio)									

7 pav. Apkrovos parametro žodžio struktūra, „Value“ – dydis, „Load direction“ – apkrovos kryptis, „Data (load ratio)“ – duomenys (apkrovos dydis) [11]

Būsenos, tokios kaip „Moving“ ir „Lock“ nusako servo pavaros būvį. Jeigu „Moving“=“1“ – servo pavara juda link užduoties taško, kai „Moving“=“0“ – servo pavara yra pasiekusi užduoties tašką. Būsena „Lock“ nusako servo pavaros EEPROM atminties modifikavimo galimybę – kai vertė lygi „0“ – atmintis gali būti modifikuojama, kitu atveju („1“) atmintis negali būti modifikuojama (3 lentelė).

3 lentelė

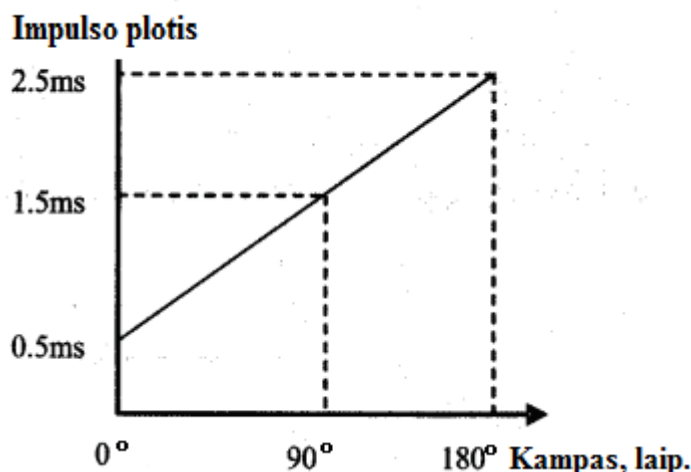
„Moving“ ir „Lock“ būsenų reikšmės [11]

Vertė	Reikšmė
„Moving“	
„0“	Judama link užduoties taško
„1“	Užduoties taškas pasiektas
„Lock“	
„0“	EEPROM gali būti modifikuojamas
„1“	EEPROM negali būti modifikuojamas

1.2.3. Klasikinės RC (radio control) servo pavaros




Plačiausiai naudojamos tarp modelių konstruotojų yra jų pamėgtos RC (*radio control*) servo pavaros. Šios pavaros yra santykinai pigios ir funkciškai pajėgios atlikti tokias užduotis, kaip judinti įvairias plokštumas keleto laipsnių diskretiškumu. Vidinę servo pavaros struktūrą sudaro nuolatinės srovės šepetėlinis variklis, reduktorius, potenciometras ir valdymo plokštė.

Valdymo signalui pasiekus valdymo plokštę, joje sužadinamas nuolatinės srovės variklis, kuris sukdamas reduktorių (grupę krumpliaračių, transformuojančių variklio sukimosi greitį ir momentą) sukuria išėjimo ašies sukamąjį judesį. Kadangi servo pavaros tikslas pasisukti užduotu posūkio kampu, tai pavaros išėjimo ašis tiesiogiai sujungta su potenciometru, kuris registruoja realų pasisukimo kampą. Valdymo plokštės reguliavimo grandinė potenciometro signalą lygina su valdymo signalų ir tik esant jų nesutapimui vykdomas išėjimo ašies pasukimas reikiama kryptimi. Kai signalų vertės sutampa, servo pavara sustoja. Klasikinė RC servo pavara jungiama trimis laidininkais: valdymo signalo, teigiamo ir neigiamo maitinimo šaltinio gnybtais. Valdymas vykdomas formuojant tam tikro pločio elektrinį signalą. Signalo plotis tiesiogiai nusako servo pavaros pasisukimo kampą. Daugelis RC servo pavarų geba pasisukti nuo 0° iki 180° laipsnių (žr. 8 pav.). Valdymo signalas kartojamas kas $20ms$, impulso plotis gali kisti nuo $0,5- 2,5ms$. Servo pavaros pasisukimas vykdomas tik nuolatos siunčiant valdymo signalą. Nutraukus valdymo signalą per anksti, galime tikėtis, kad išėjimo ašis nespėjo pasiekti numatytos kampinės padėties.



8 pav. Posūkio kampo priklausomybė nuo valdymo signalo [12]

Klasikinių RC servo pavarų parametrų palyginimas

			
Pavadinimas:	JR-DS8911	BMS-1715 HV	HK-15338
Sukimo momentas:	25 kg/cm - 4,8 V	23kg/cm - 6v, 28kg/cm - 7.4v	25 kg/cm - 6v 45 kg/cm - 12v
Kampinis greitis	0,19s / 60 laip.	0,18s/ 60 laip. - 6v 0,15 / 60 laip. - 7,4v	0,23 / 60 - laip. - 4,8v 0,20 / 60 - laip. - 6v
Valdymo signalo tipas:	Skaitmeninis; Impulso plotis - [1500:2000] μ s	Skaitmeninis; Impulso plotis - [1500:1900] μ s	Skaitmeninis; Impulso plotis - [1500:2000] μ s
Maksimalus pasisukimo kampas:	180 laipsnių	180 laipsnių	180 laipsnių
Įrenginio svoris:	70 g	65 g	175 g
Maitinimo įtampa:	~ 4,8V, DC	~ 7,4V, DC	~ 6V, DC
Geometriniai matmenys (A, B, C):	C/B/A) 38x21x40mm	(C/B/A) 38x40x43mm	(C/B/A) 60x66x66mm
Kaina:	102,88 eur.	46,05 eur.	13,34 eur.
Galimybė įsigyti:	Galima įsigyti	Galima įsigyti	Galima įsigyti

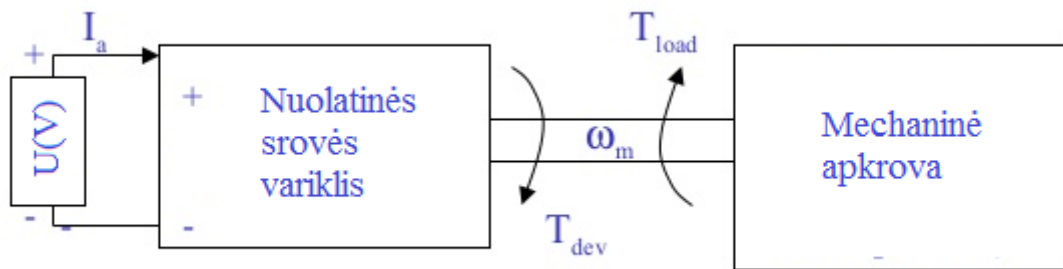
Pagrindinis kriterijus renkantis pavarą yra jos kaina ir sukimo momentas. Servo mechanizmas „HK15338“ turi didelį sukimo momentą, bei yra viena iš pigiausių nesudėtingai įsigyjamų servo pavarų. Pagal gamintojo aprašymą, ši servo pavara geba sukurti 4,5Nm sukimo momentą. Gamintojas nepateikia jokios valdymo savybes nusakančios informacijos. Moduluoto impulso pločio signalu valdomų servo pavarų posūkio kampo diskretiškumas nežinomas.

Klasikinės RC pavaros valdymo galimybės labai ribotos – pasisukimo kampas ne didesnis, nei 180 laipsnių. Kampinės padėties valdymo diskretiškumas siekia daugiau kaip keletą laipsnių. Adresuojamos servo pavaros dėl jose naudojamų aukštesnės klasės elementų ir valdymo metodų geba organizuoti judesį, kurio pasisukimo kampas didesnis, nei 360 laipsnių. Kampinės padėties valdymo diskretiškumas gali siekti net iki 0,1 laipsnio. Nors adresuojamos servo pavaros valdomos grįžtamo ryšio reguliatoriumi, tačiau valdomas tik vienas kontūras – padėties. Servo pavaros naudojamos pramonėje valdymas organizuojamas pagal tris valdymo kontūrus, tarp jų ir momento. Variklio inkarų tekančios srovės interpretavimas suteikia galimybę suvokti pavaros kuriamą sukimo jėgą. Reikalingesnis tolimesnis tyrimas nusakančios priemonės ir metodus kuriant pavaros modulį, kuris prilygtų savo savybėmis tarp adresuojamos ir pramonėje naudojamos servo pavaros.

2. TIRIAMOJI DALIS

2.1. Pasiruošimas tyrimui

Tiesiogiai elektros pavaros, įdiegtos mechanizme, sukuriama sukimo momento ir mechanizmo sukuriama jėga į paviršių dydžių susieti negalime, nes nežinome mechanizmo konstrukcijos ypatumų. Šiuo atveju galima nagrinėti tik elektros pavaros dinamiką. Įgreitinta roboto galūnė turi tam tikrą inerciją. Judančios galūnės staiga susidūrimo su kliūtimi metu, jai bus perduodama sukauta kinetinė energija. Perduotos energijos kiekis gali būti valdomas mažinant judėjimo greitį vos tik pastebėjus koliziją. Apie kolizijos pradžią indikuoja neplanuotai išaugusio sukimo momento vertė. Galime tik numanyti, kad darbinio greičiu įgreitintos galūnės kolizijos pradžios ir pabaigos laikų skirtumas yra labai mažas. Norint pažvelgti į šį pereinamąjį procesą iš arčiau, atliekamas mechaniškai susietos žinomų parametrų elektros pavaros ir apkrovos modeliavimas (žr. 9 pav.).



9 pav. Principinė nuolatinės srovės variklio modelio schema

2.2. „Maxon“ berėmis nuolatinės srovės variklis

Maxon yra lyderiaujantis aukštos klasės mažų variklių ir jų sistemų gamintojas ir tiekėjas pasaulyje. Šio gamintojo siūlomos sistemos yra unikalios dėl savo konstrukcijos, techninių savybių ir aukšto patikimumo. Pagrindinis sektorius, kuriame plačiausiai naudojamos šio gamintojo pavaros yra: nestandartiniuose automatikos, robotikos, optinės technikos, medicinos, bei kosmoso mechanizmų sprendimuose.

Pagrindiniai technologiniai „maxon“ variklio (žr. 10 pav.) ypatumai:

- Ypač aukštas sukimo momento ir galios santykis, lyginant įrenginio dydį ir masę;
- Visiškai tiesinė priklausomybė tarp apkrovos- greičio, srovės- sukimo momento, įtampos ir greičio;
- Labai mažas rotorius inertiškumas, kuris ženkliai pagerina pavaros startavimo ir stabdymo dinamiką;
- Dėl tolygiai kuriamo sukimo momento galimas sklandus greičio ir pozicijos valdymas.

Pagrindiniai techniniai „maxon“ variklio ypatumai:

- Grafitinis komutatorius;
- AlNiCo, SmCo ir NbFeB žiedo formos nuolatiniai magnetai;
- Berėmis inkaras;
- Darbo laikas iki sugedimo nuo 1000 iki 5000 valandų;
- Rekomenduojamas ne mažesnis, nei 20 kHz PWM dažnio valdymo signalas.



10 pav. Maxon DCX serijos variklių konstrukcija [13]

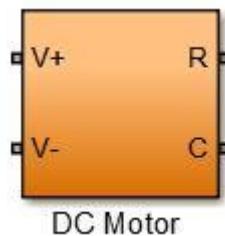
Visas pavaras, kurias platina „maxon“, lydi išsamios techninės specifikacijos. Gamintojas užtikrina, kad dokumentuose pateiktos vertės ir matavimai atitinką realų vartoją pasiekusį produktą. 4 lentelėje pateikti techniniai parametrai charakterizuojantys eksperimente naudojamą nuolatinės srovės pavarą. Ši informacija vertinga kuriant ir analizuojant pavaros dinamiką, organizuojant jos valdymą. Iš lentelėje pateiktų duomenų, apie 12 voltų modifikaciją, galime pastebėti, kad variklis turi labai žemą inkaro varžą, induktyvumą, aukštą naudingumo koeficientą ir žemą rotorius inerciją.

„Maxon“ DCX 35 L serijos, 12V pavaros techninė specifikacija [13]

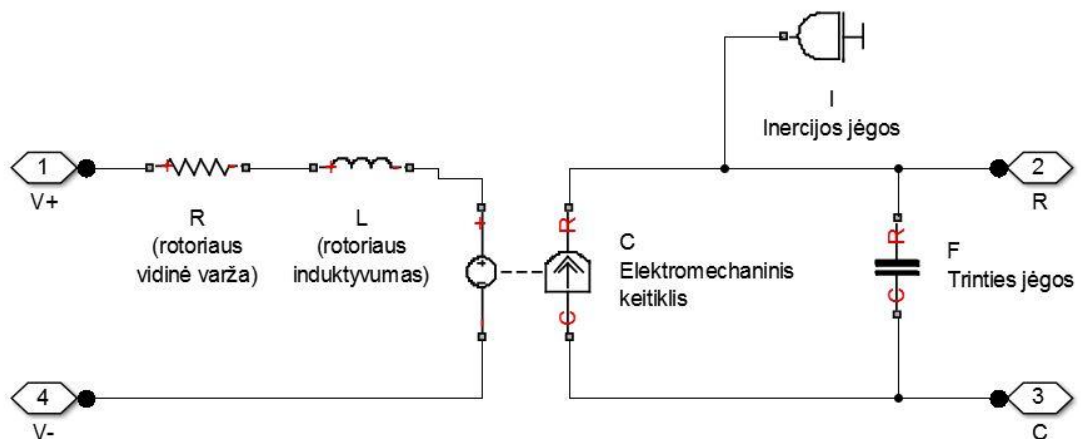
Vertės prie vardinės valdymo įtampos:		
	Vardinė įtampa	12 V
	Greitis be apkrovos	8130 rpm
	Srovė be apkrovos	320 mA
	Vardinis greitis	7610 rpm
	Vardinis sukimo momentas (maksimalus nuolatinis sukimo momentas)	77,7 mNm
	Vardinė srovė (maksimali nuolatinė srovė)	6 A
	Maksimalus sukimo momentas	2080 mNm
	Maksimali srovė	152 A
	Maksimalus naudingumas	0,86
Charakteristikos:		
	Inkaro varža	0,0788 Ω
	Inkaro induktyvumas	0,026 mH
	Sukimo momento konstanta	13.7 mNm/A
	Greičio konstanta	699 rpm/V
	Greičio/sukimo momento konstanta	4,04 rpm/mNm
	Mechaninė laiko konstanta	4,21 ms
	Rotoriaus inercija	99,5 gcm ²
Terminė informacija:		
	Terminė konstanta korpusas-aplinka	6,98 K/W
	Terminė konstanta apvija-korpusas	2,1 K/W
	Thermal time constant winding	44,3 s
	Terminė apvijos laiko konstanta	1030 s
	Aplinkos temperatūra	-40...+100 °C
	Maksimali apvijos temperatūra	+155 °C
Mechaninė informacija:		
	Guolių tipas	Rutuliniai
	Maksimalus greitis	12300 rpm
	Ašinė deviacija	0 - 0,1 mm
	Maksimali ašinė apkrova (dinaminė)	7 N
Kita informacija:		
	Polių porų skaičius	1
	Komutatoriaus segmentų skaičius	11
Gaminys		
	Svoris	380 g

2.3. Matematinio nuolatinės srovės variklio valdymo modelio sudarymas

Modeliuojant nuolatinės srovės variklį naudojame „*Matlab Simulink*“ darbo sistemoje esančius funkcinis blokus (žr. 11 pav.). Daugeliu atvejų funkciniai blokai turi informacijos įėjimo ir išėjimo kanalus. Funkcinis blokas, tai grafiškai supaprastinta sistemos dalis, kurios viduje veikia elementų struktūra. Elektrinė variklio modelio dalis sudaryta iš inkaro vidinės varžos ir induktyvumo elementų (žr. 12 pav.). Elektromechaninis keitiklis elektrinę energiją keičia mechanine. Kuriamo mechaninio judesio dinamiką tiesiogiai įtakoja rotoriaus inercija ir tarp visų mechaninių mazgų sudaranti trinties jėga – šie dydžiai įvertinti funkciniam bloke. Terminalai „+V“ ir „-V“ yra pavarą maitinančio elektros šaltinio prievadai. Terminalai „R“ ir „C“ yra sukurtos mechaninės energijos išvestys.



11 pav. Nuolatinės srovės variklio funkcinio bloko sistema. Terminalai „+V“ ir „-V“, yra elektrinės energijos įvestis, R ir C - mechaninės energijos išvestys



12 pav. „Sub“ sistemos „DC motor“ nuolatinės srovės variklio modelis

Visi aukščiau išvardinti funkciniai elementai yra parametrizuojami (žr. 5 lentelė). Tinkamas vertes surašome pagal modeliuojamo įrenginio charakteristikas (žr. 4 lentelė):

5 lentelė

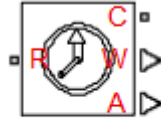
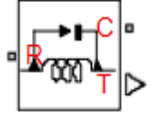
Nuolatinės srovės variklio modelio funkcinio bloko parametrų vertės ir jų įvedimas

Simbolis	Pavadinimas	Iliustracija	
R	Ritės vidinė varža	Resistance:	0.0788 Ohm
L	Ritės induktyvumas	Inductance:	0.026 mH
		Series resistance:	0 Ohm
		Parallel conductance:	1e-09 1/Ohm
C	Elektromechaninis keitiklis	Constant of proportionality K:	14e-4 V/rpm
I	Inercijos jėgos	Inertia:	99.5 g*cm ²
F	Trinties jėgos	Breakaway friction torque:	5e-3 N*m
		Coulomb friction torque:	5e-3 N*m
		Viscous friction coefficient:	0 N*m/(rad/s)
		Transition approximation coefficient:	10 s/rad
		Linear region velocity threshold:	0.1 rad/s

Mechaninių dydžių registravimui naudojami jutiklius imituojantys funkciniai blokai. Kampinis greitis matuojamas naudojant idealų sukamojo judesio jutiklio funkcinį bloką (angl. Ideal Rotation Motion Sensor), sukimo momentas – idealiu sukimo momento jutikliu (angl. Ideal Torque Sensor).

6 lentelė

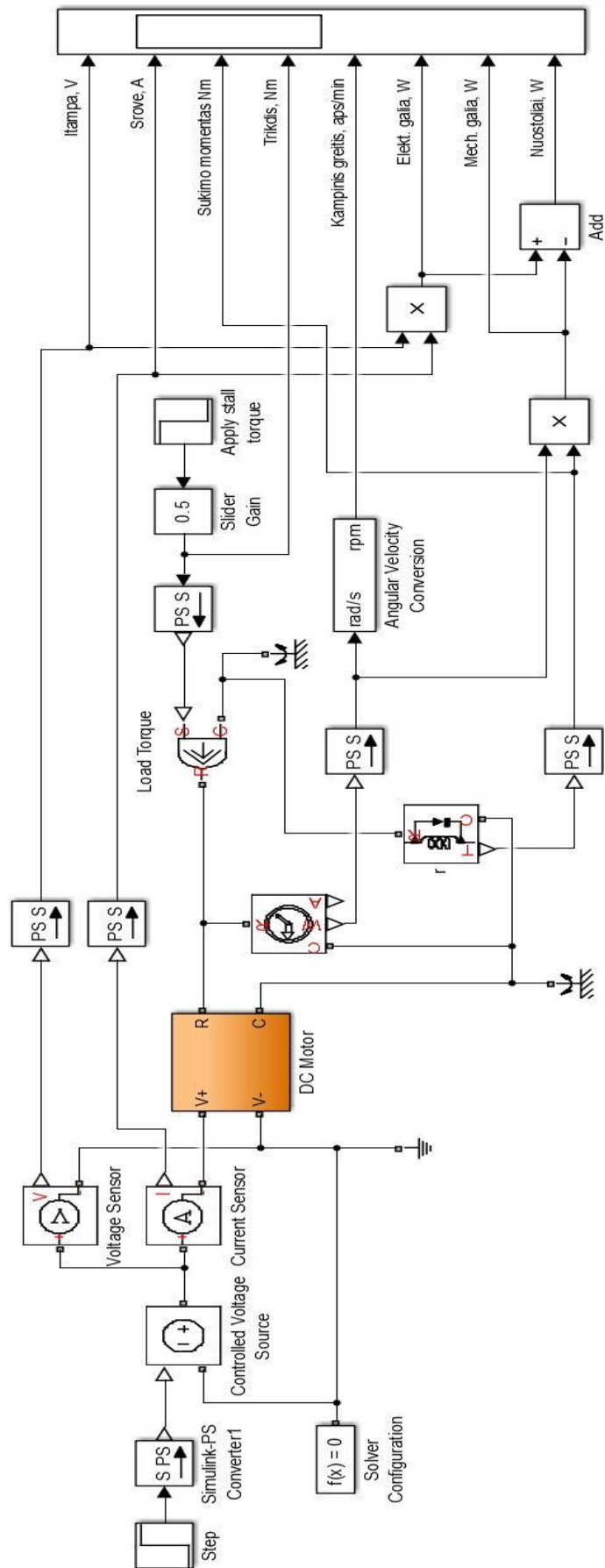
Mechaninius dydžius modelyje registruojančių funkcinio bloko aprašymas

Pavadinimas	Jungimas	Iliustracija
Idealus sukamojo judesio jutiklis	Elementas jungiamas lygiagrečiai matuojamai grandinei. R / C – modelio generuojamo sukamojo judesio terminalai. W – išmatuotas kampinis greitis (rad/s). A – išmatuota kampinė padėtis (deg.)	 Ideal Rotational Motion Sensor
Idealus sukimo momento jutiklis	Elementas jungiamas nuosekliai matuojamai grandinei. R / C – modelio generuojamo sukamojo judesio terminalai. T – išmatuotas sukimo momento dydis (N*m)	 Ideal Torque Sensor

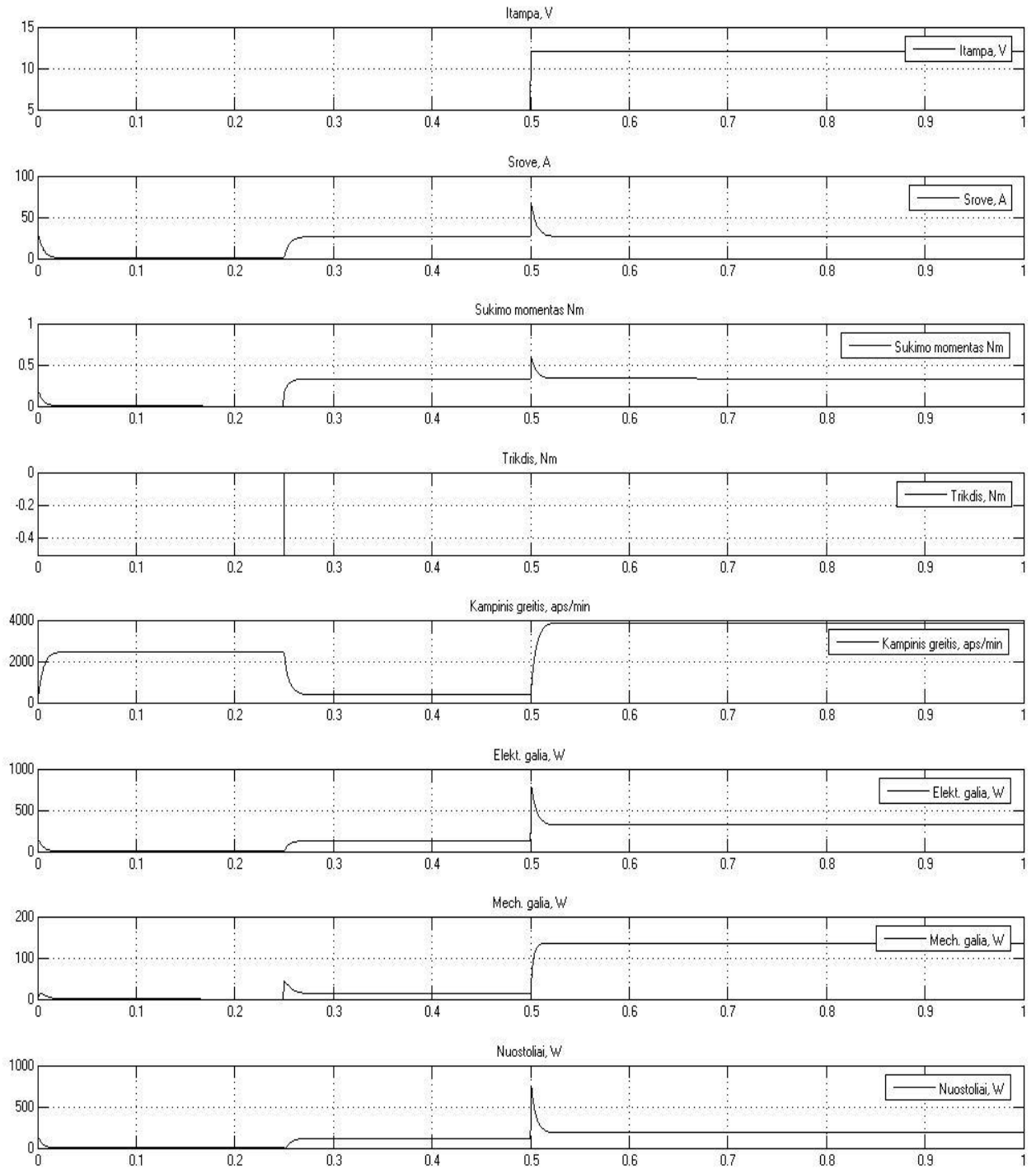
Pateiktame paveiksle (žr. 13 pav.) pavaizduotas nuolatinės srovės variklio matematinis modelis. Šiuo atveju variklis maitinamas iš reguliuojamo nuolatinės srovės šaltinio. Voltmetru ir ampermetru išmatuojami elektriniai dydžiai, bei apskaičiuojama bendra elektrinė galia tekanti per elementą. Funkcinio bloko „*DC motor*“ sukurta mechaninė energija menamai suka veleną, kurį stabdo funkcinio bloko „*Load Torque*“ sukurta priešingos krypties jėga. Šio proceso metu matuojamas kampinis greitis ir sukimo momentas. Iš jų apskaičiuojama mechaninė galia. Elektrinės ir mechaninės galios skirtumas vaizduoja bendruosius nuostolius ir sistemos naudingumą elektrinės galios atžvilgiu (žr. 14 pav).

Ties $0,25s$ aktyvuojamas mechaninis trikdys, kuris lygus $0,5Nm$. Ties $0,5s$ maitinimo įtampa padidėja nuo $5V$ iki $12V$. Reakciją į atsiradusį mechaninį stabdymą galime pastebėti srovės, sukimo momento ir kampinio greičio grafikuose. Esant $5V$ maitinimo įtampai ir $0,5Nm$ apkrovai variklis praktiškai sustoja ir srovė išauga virš $25A$. Maitinimo įtampai padidėjus iki $12V$ pastebime didėjančią kampinio greičio vertę, tačiau srovės ir sukimo momento vertės pakinta tik nežymiai. Esant $5V$ maitinimo įtampai varikliui sukantis tuščia eiga pasiekiamas apie 2500 aps/min greitis, bei esant $0,5Nm$ apkrovai srovė padidėja iki $25A$. Šie dydžiai atitinka nagrinėjamą nuolatinės srovės variklį charakterizuojančias priklausomybes.

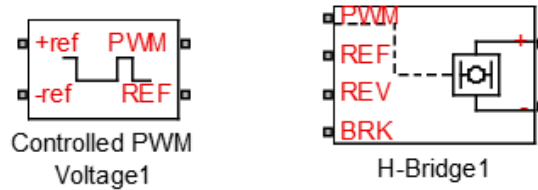
Įsitikinus, kad sukurtas nuolatinės srovės variklio modelis atitinka tyrinėjamą objektą, galime modelį papildyti skaitmeninio valdymo funkciniais blokais (žr. 15 pav.). Toliau tyrinėjant nuolatinės srovės variklio dinamiką, valdymą organizuosime skaitmeninėmis priemonėmis. Šis valdymo būdas pagrįstas moduliuto signalo impulso pločiu. Naudojantis matematiniu elektros pavaros modeliu ištirsime joje vykstančius pereinamuosius procesus. Atliekant išsamesnę pereinamųjų procesų stebėseną ir vertinimą, keičiant valdymo parametrus, (žr. 7 lentelė) susiesime valdymo parametrų įtaką variklio dinamikos, energetinio naudingumo ir poveikio aplinkai atžvilgiu.



13 pav. Nuolatinės srovės variklio modelis valdomas reguliuojamu nuolatinės srovės šaltiniu



14 pav. Nuolatinės srovės variklio modelio, maitinamo reguliuojamu šaliniu (5-12v), šulinė charakteristika



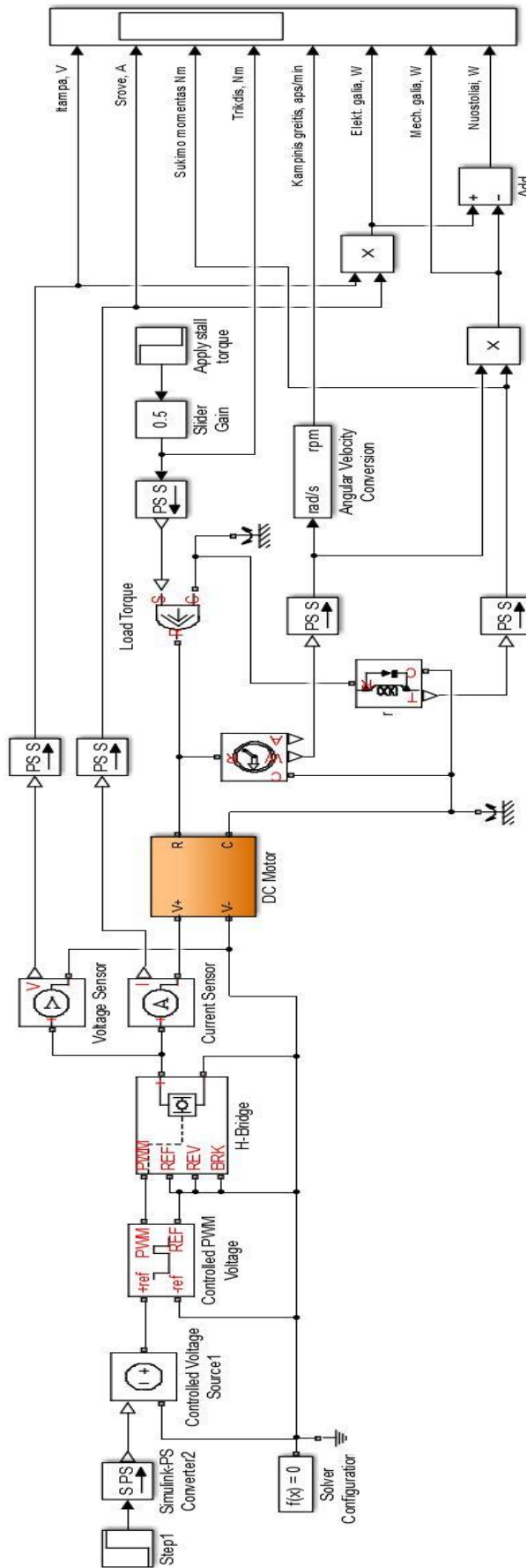
15 pav. Funkciniai blokai, kuriais realizuojamas skaitmeninis nuolatinės srovės variklio valdymas

7 lentelė

Skaitmeninio valdymo funkcinių blokų parametrų vertės ir jų įvedimas

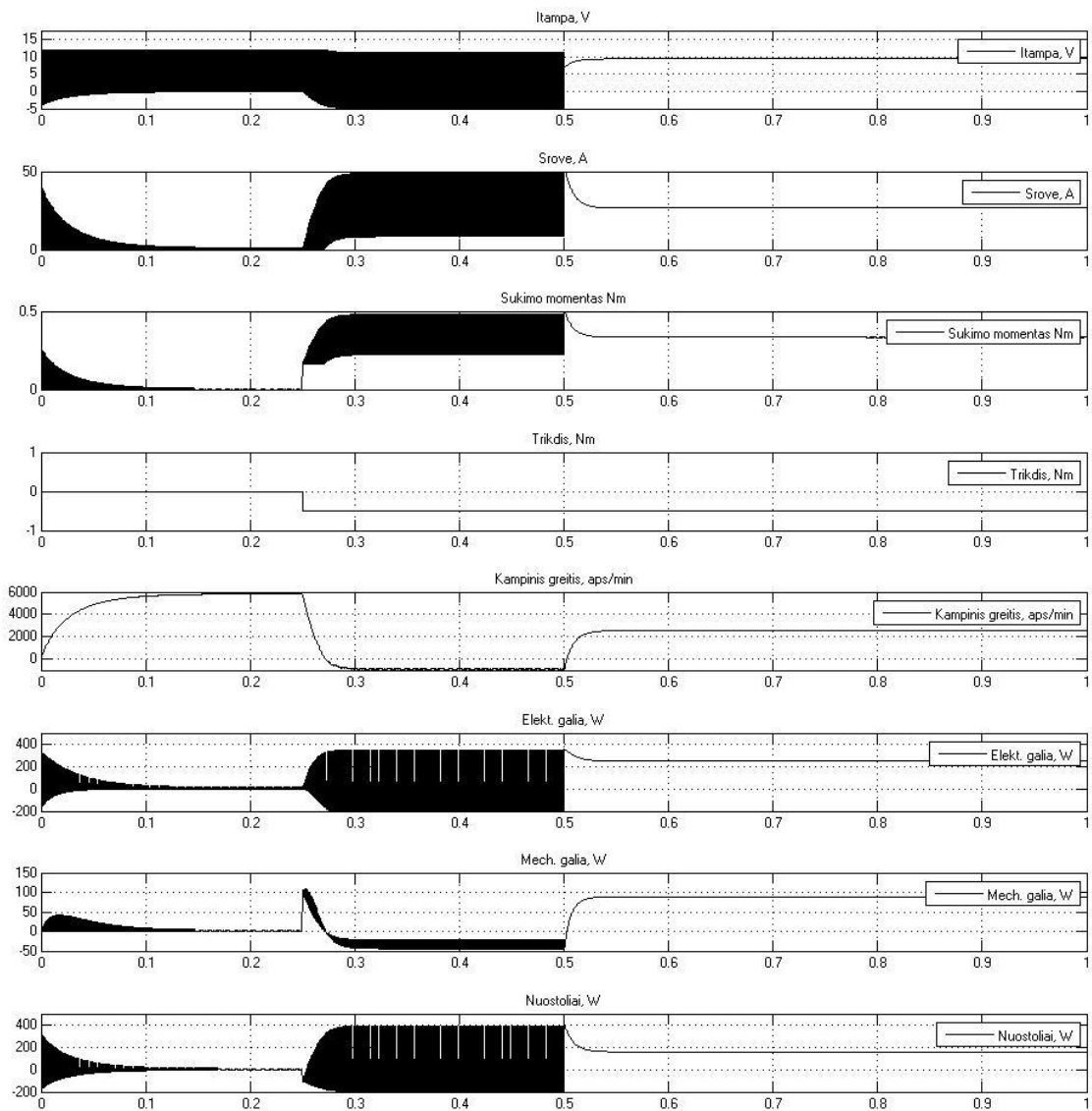
Simbolis	Pavadinimas	Iliustracija	
PWM	PWM generatorius	PWM frequency: <input type="text" value="1000"/> Hz Pulse delay time: <input type="text" value="0.00001"/> s Pulse width offset: <input type="text" value="0.00001"/> s Input value Vmin for 0% duty cycle: <input type="text" value="0"/> V Input value Vmax for 100% duty cycle: <input type="text" value="5"/> V Output voltage amplitude: <input type="text" value="5"/> V Simulation mode: <input type="text" value="PWM"/> Switching event type: <input type="text" value="Asynchronous - Best for variable-step solvers"/>	
H-Bridge	Galios komutatorius	Simulation mode: <input type="text" value="PWM"/> Freewheeling mode: <input type="text" value="Via one semiconductor switch and one freewheeling diode"/> Enable threshold voltage: <input type="text" value="2.5"/> V PWM signal amplitude: <input type="text" value="5.0"/> V Reverse threshold voltage: <input type="text" value="2.5"/> V Braking threshold voltage: <input type="text" value="2.5"/> V Output voltage amplitude: <input type="text" value="12"/> V Total bridge on resistance: <input type="text" value="0.1"/> Ohm Freewheeling diode on resistance: <input type="text" value="0.05"/> Ohm	

Pateiktame paveiksle (žr. 16 pav.) pavaizduotas papildytas nuolatinės srovės variklio matematinis modelis. Šiuo atveju nuolatinės srovės variklis valdomas moduliutu signalo impulsu (PWM). Šį signalą generuoja „control PWM voltage“ funkcinis blokas, kuris pagal terminalų „+ref“ ir „-ref“ potencialų skirtumą formuoja nuo 0% iki 100% moduliuotą valdymo signalą. Variklio komutavimo funkciją atlieka „H-Bridge“ funkcinis blokas. Jo paskirtis sustiprinti valdymo signalą, bei valdyti srovės tėkmės kryptį.



16 pav. Nuolatinės srovės variklio modelis valdomas PWM signalu

Ties $0,25s$ aktyvuojamas mechaninis trikdys, kurio dydis lygus $0,5Nm$. Ties $0,5s$ maitinimo impulso plotis padidėja nuo 40% iki 100% . Palyginus skaitmeninio ir analoginio valdymo tuščios eigos grafikus, pastebime, kad valdant skaitmeniniu būdu, 40% impulso plotis neužtikrina $2500aps/min$ greičio. Įtampos grafike pastebime kreivę kretančią neigiamą ketvirtį dėl saviindukcijos persijungimo metu. Konfigūruojant PWM signalo dažnį, pasirinkta $1kHz$ vertė. Dėl mažo elektros variklio inkaro induktyvumo, inkarų tekančios srovės grafikas praktiškai atkartoja PWM moduliaciją. Toks darbo režimas yra nuostolingas dėl aukštesnių harmonikų. Siekiant sumažinti nuostolių dydį, privalome kelti moduliacijos dažnį iki optimalios ribos, kol srovės pulsacijos taptų nežymios (iki 5% nuo amplitudinės vertės). Deviacija pastebima ir kituose grafikuose (sukimo momento) – gali numanyti, kad pavara dirba nestabiliai. Šis darbo režimas netinkamas.

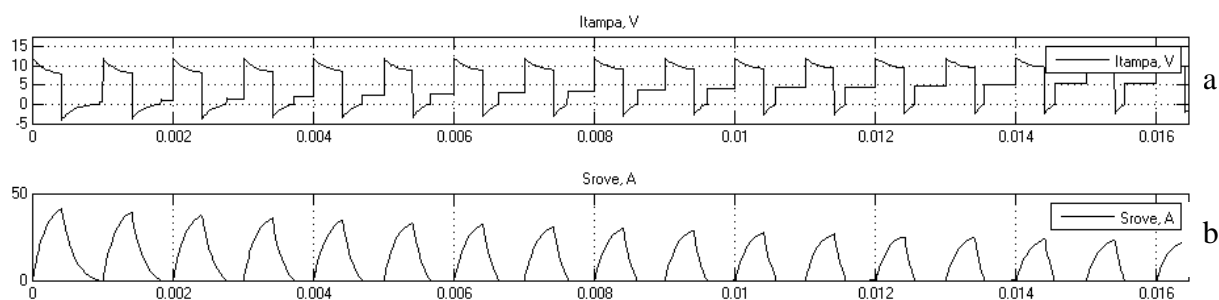


17 pav. Nuolatinės srovės variklio modelio valdomo PWM signalų šuolinė charakteristika

Dėl žemo valdymo signalo dažnio ir nagrinėjamo nuolatinės srovės variklio inkaro induktyvumo, pereinamieji procesai vyksta greičiau nei buvo galima tikėtis. Organizuojant valdymą $1kHz$ dažnio signalu, srovė impulsas, tekantis per inkarą, vieno periodo metu spėja pasiekti ne tik maksimumo vertę, bet įgauna ir neigiamą vertę. Šiuo atveju pavara pusę periodo dirba kaip variklis, o kitą pusę – kaip generatorius. Žvelgiant į įtampos grafiką, pastebime analogišką reiškinį, kai įtampa taip pat įgyja neigiamą vertę – sistema generuojama energiją. Visa tai patvirtina, kad valdymo signalo dažnis per mažas.

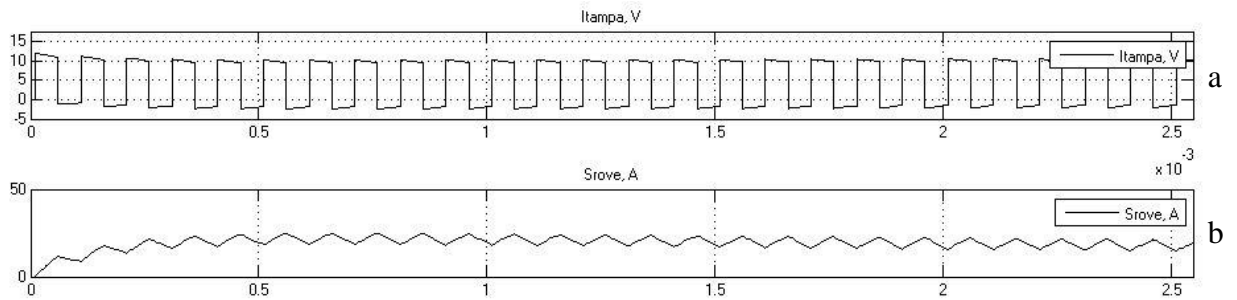
Prenkant pavaros valdymo parametrus, prasminga atsižvelgti į tokius faktorius, kaip: energetinis efektyvumas ir poveikis aplinkai. Nežinoma valdymo signalo dažnio įtaka bendriesiems energetiniams nuostoliams pavaroje. Reikalingas išsamesnis tyrimas, išaiškinantis kuriuo atveju nuostoliai didesni - kaip pavaros valdymo signalo dažnis didelis arba mažas. Taip pat svarbu įvertinti foninio triukšmo lygio priklausomybę nuo pavaros valdymo signalo dažnio. Galime tik nuspėti, kad dažniui viršijus žmogui girdimą ribą, triukšmo pavojingo žmogui vertinimas netenka prasmės.

Pavaros valdymo kokybę galime vertinti pagal inkaru tekančios srovės kreivės formą. Žemiau pateiktuose paveiksluose (žr. 18-20 pav.) pavaizduoti nuolatinės srovės variklio įtampos ir srovės grafikai, kaip valdymo signalo dažnis yra $1kHz$, $10kHz$ ir $20kHz$. Pastebime, kad naudojant aukštesnio dažnio valdymo signalą, srovės kreivė įgauna vis tiesesnę charakteristiką. Vertinant pavaros dinamiką, srovės pokytį galime tiesiogiai sieti su sukuriama sukimo momento verte – kuo inkaru tekančios srovės svyravimo amplitudė didesnė, tuo pavaros kuriamas judesys mažiau tolydus. Šiuo aspektu aukštesnis valdymo signalo dažnis užtikrina stabilesnį pavaros darbą.

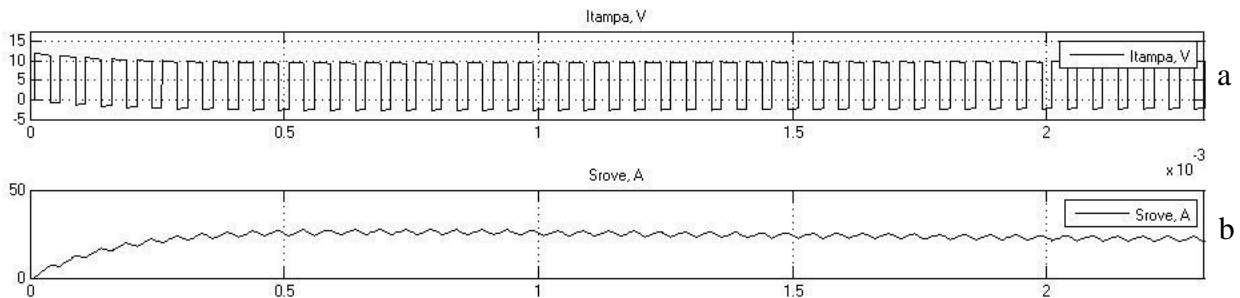


18 pav. Nuolatinės srovės variklio modelio valdomo PWM signalų šuolinė charakteristika,

$f=1kHz$:b) priartinta a) grafiko zona



19 pav. Nuolatinės srovės variklio modelio valdomo PWM signalų šuolinė charakteristika, $f=10kHz$: b) priartinta a) grafiko zona



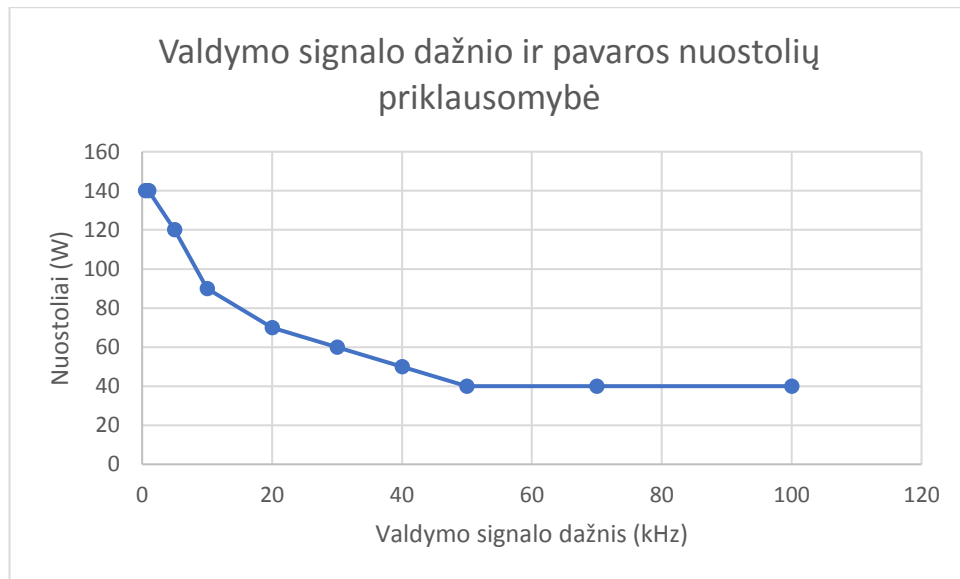
20 pav. Nuolatinės srovės variklio modelio valdomo PWM signalų šuolinė charakteristika, $f=20kHz$: b) priartinta a) grafiko zona

Atliekant valdymo signalo dažnio priklausomybės nuo bendrųjų nuostolių vertinimą, lyginame į sistemą įvestos elektrinės ir sukurtos mechaninės galių skirtumą. Matematinio modelio analizės metu pastebėta, kad skirtumas tarp elektrinės ir mechaninės galios yra mažiausias, kai valdymo signalo dažnis ne mažesnis nei $50kHz$. (žr. 17 pav.). Pateiktame paveiksle matomi matavimų rezultatai, kurių registravimas atliktas esant vienodoms eksperimento sąlygoms – impulso plotis lygus $d=50\%$ ir trikdžio sukimo momentas yra $M(t)=-0,15Nm$.

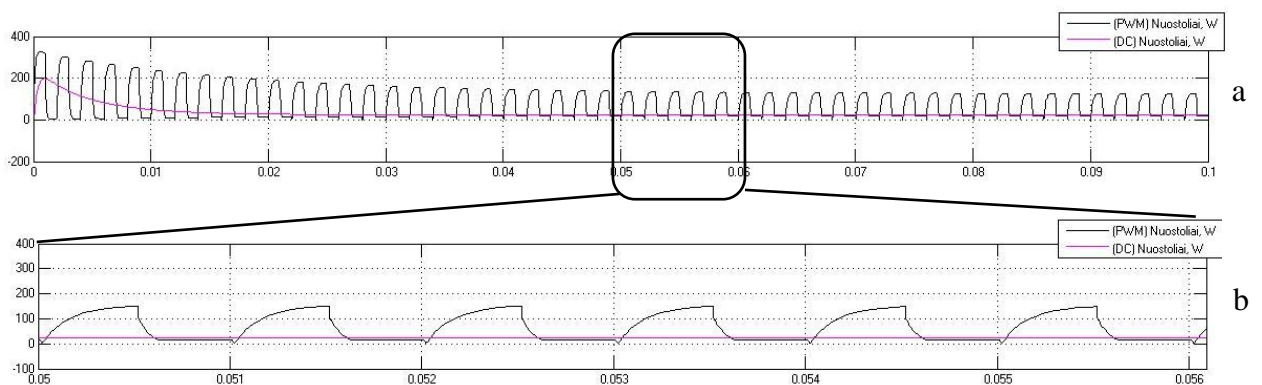
Energijos kiekis virstantis šilumine energija elektros pavaroje gali būti vertinamas:

$$\text{Vario nuostoliai (Copper loss)} = I^2 \times r \quad (1.1)$$

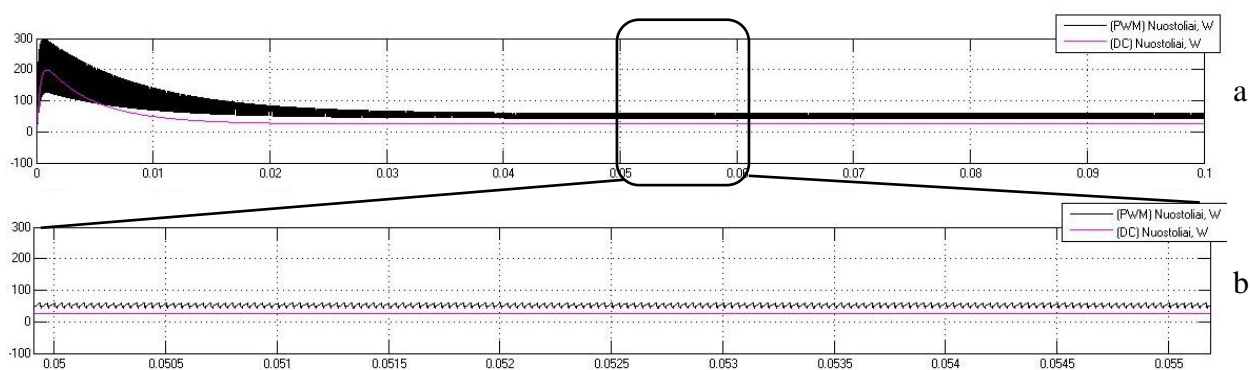
Vienas iš pagrindinių veiksnių, kurie nusako skirtumą tarp elektros pavaros valdymo metodų organizuojant elektros pavaros valdymą nuolatine srove (DC) ir moduliuoju valdymo signalu (PWM) yra nuostoliai. Siekiant sukurti tokio pačio dydžio mechaninę galią skaitmeninio valdymo metodu, pavaros inkaru tekančios srovės impulso amplitudinė vertė gali padidėti net kelis kartus. Dėl variklio berėmės inkaro konstrukcijos pavaroje dominuoja nuostoliai susidarę dėl laidininko varžos – vario nuostoliai. Iš ankstesniuose tyrimuose pateiktų rezultatų prisimename, kad srovės impulso amplitudinė vertė priklauso nuo valdymo signalo dažnio. Apibendrinti modelio tyrimo rezultatai (žr. 22-23 pav.) atvaizduoja esančią valdymo signalo dažnio ir nuostolių priklausomybės būvimą.



21 pav. Nuolatinės srovės variklio modelio valdomo PWM signalų nuostolių priklausomybė nuo valdymo signalo dažnio, kai $d=50\%$ ir $M(t)=-0,15Nm$

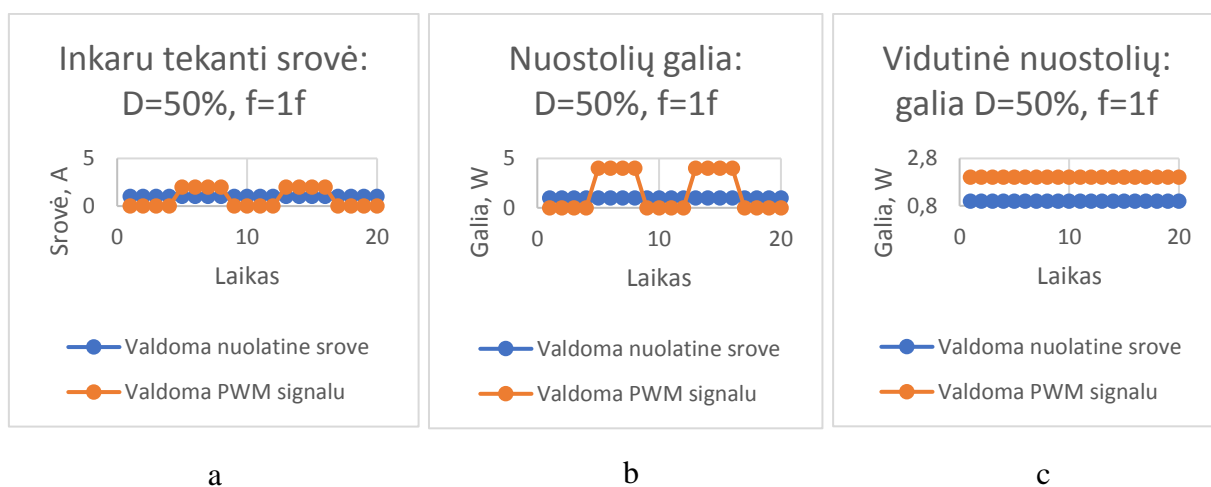


22 pav. Nuolatinės srovės variklio modelio valdomo nuolatine srove ir PWM signalų nuostolių priklausomybė, kai valdymo signalo dažnis, kai $f=1kHz$, $d=50\%$ ir $M(t)=-0,15Nm$

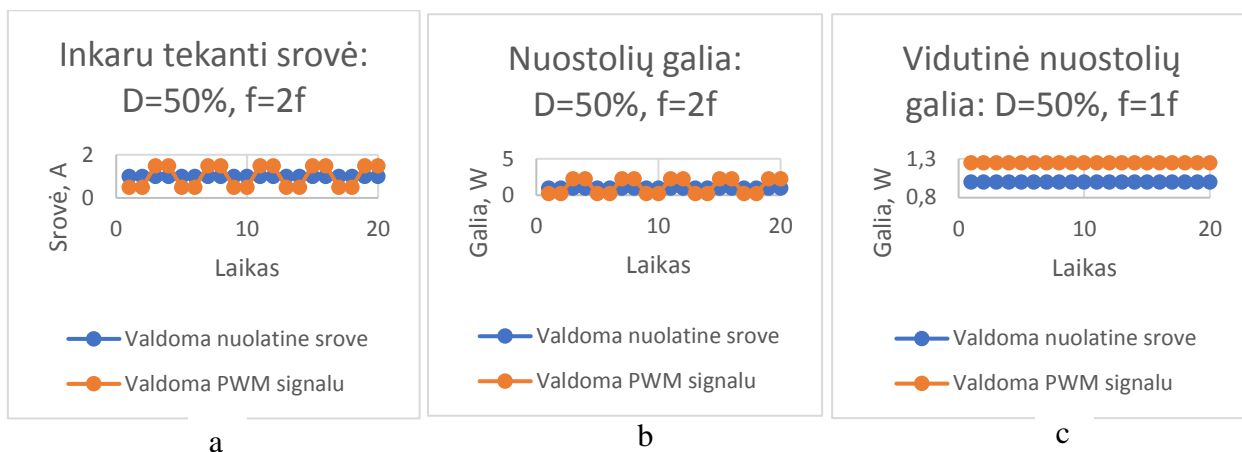


23 pav. Nuolatinės srovės variklio modelio valdomo nuolatinine srove ir PWM signalų nuostolių priklausomybė, kai valdymo signalo dažnis , kai $f=30kHz$, $d=50\%$ ir $M(t)=-0,15Nm$

Kiekybiškai vertinant valdymo metodą ir nuostolius nuolatinės srovės pavaroje susidarančius bendruosius nuostolius, galime teigti, kad naudojant valdymo metodą pagrįstą PWM signalo formavimu, nuostoliai mažėja didinant valdymo signalo dažnį. Žemiau pateiktuose paveiksluose (žr. 24-25 pav.) kiekybiškai pavaizduota vidutinės nuostolių galios palyginimas tarp „PWM“ ir „DC“ valdymo metodu, kai didinamas „PWM“ valdymo signalo dažnis. Siekiant sukurti norimą mechaninę galią „DC“ metodu į sistemą įvedas nekintantis „1A“, kai „PWM“ metodu bus reikalingas „2A“ kintančios energijos kiekis. Įvesta energija pavaroje virsta ne tik darbu, bet išsiskiria nuostoliai – „vario nuostoliai“. Vario nuostoliai lygūs sandaugai vidinės inkarų varžos ($I\Omega$) ir inkaru tekančios srovės kvadratui. Jeigu „PWM“ metodu pavara vartoja „2A“, tai šiuo atveju susidaro $4W$ nuostolingos šiluminės energijos. Nuostolius vertinant laiko atžvilgiu, kai impulso plotis yra 50%, vidutinė nuostolių galia yra $2W$ – 2 kartus daugiau, nei „DC“ valdymo metodu“. Analogiškai žvelgiant į 18 paveikslą, kai valdymo signalo dažnis lygus „ $2f$ “ vidutiniai nuostoliai „PWM“ valdymo metodu sumažėja iki $1,25W$ – 0,8 karto daugiau, nei „DC“ valdymo metodu.

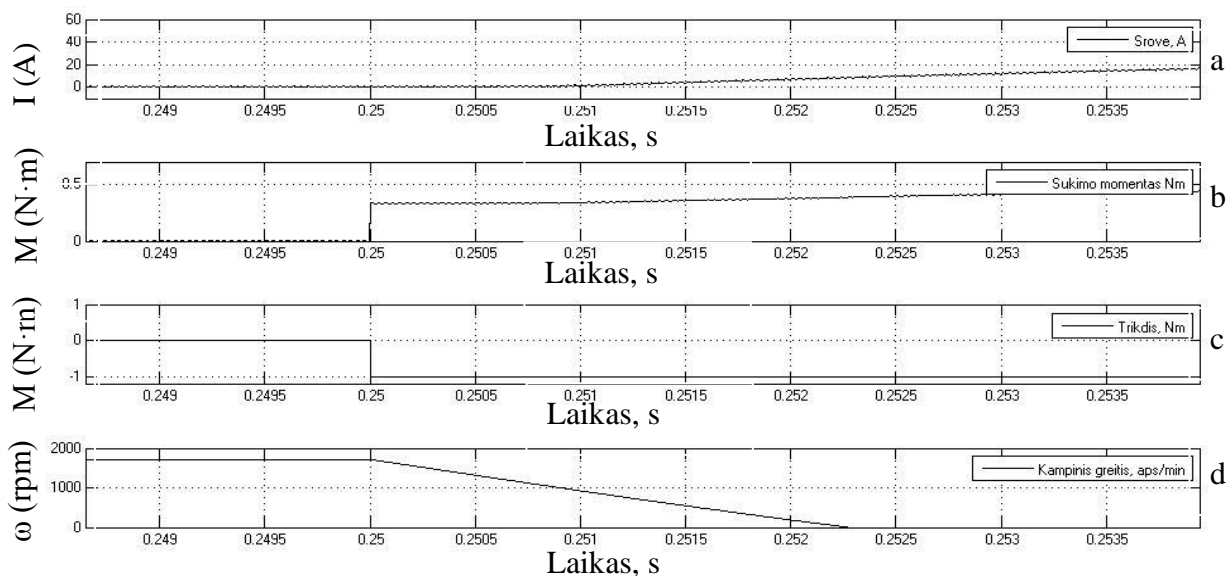


24 pav. Nuostolių vertinimas, kai $f=1f$: a) inkaru tekanti srovė, b) nuostolių galia, c) vidutinė nuostolių galia



25 pav. Nuostolių vertinimas, kai $f=2f$: a) inkaru tekanti srovė, b) nuostolių galia, c) vidutinė nuostolių galia

Pateiktuose modeliavimo rezultatuose (žr. 26 pav.) galima analizuoti elektros pavaros reakciją į mechaninio trikdžio (žr. 26 pav., c), aktyvuoto 0,25s laiko momentu, poveikį. Nuo to momento kampinis greitis (žr. 26 pav., d) mažėja, kol pasiekia nulinę vertę. Šis procesas trunka apie 2,3ms. Žvelgiant į variklio inkarų tekančios srovės (žr. 26 pav., a) grafiką, galime pastebėti reakcijos vėlinimą trikdžio atžvilgiu. Srovės vertė pradeda didėti po apie 1ms po trikdžio aktyvavimo. Norint suvaldyti šį pereinamąjį procesą siekiant išvengti kolizijos, kai sukimo momentas interpretuojamas pagal variklio inkarų tekančią srovę [5], privaloma atlikti matavimus ir reaguoti ne vėliau, kaip per vieną milisekundę.



26 pav. Modeliavimo rezultatai: a – variklio inkaro srovė, b – variklio sukimo momentas, c – išorinis trikdys, d – variklio kampinis greitis

Atsižvelgiant į technines galimybes, nuolatinės srovės pavaros valdymą paprasčiau organizuoti „PWM“ signalo valdymo metodu. Pagal atliktą nuolatinės srovės pavaros tyrimą, naudojant „Matlab Simulink“ aplinkoje sukurtu realios mechaniškai susietos su apkrova pavaros analize, rekomenduojama formuoti didesnio dažnio valdymo signalą. Šiuo atveju energetiškai naudingiausia pasirinkti, esant galimybėms, ne mažesnę, nei 50kHz valdymo signalo dažnį. Analizuojant pavaros dinamiką pastebėta, kad pavaros reakcija, ją priverstinai stabdant, gali trukti keletą milisekundžių. Parenkant pavaros valdymui reikalingą aparatūrą, rekomenduojama naudoti elementus, kurie gebėtų registruoti ir interpretuoti valdymo informacija greičiau nei per vieną milisekundę.

3. PRAKTINĖ DALIS

3.1. Pasiruošimas tyrimui

Tyrimo vienas iš tikslų yra priartėti prie realaus produkto sukūrimo vadovaujantis darbe nagrinėjamų problemų sprendimo metodais ir priemonėmis. Dėl šios priežasties daugiausia laiko ir pastangų bus sutelkiama į darbą su aparatūra ir jos funkcinių savybių tobulinimą. Tyrimo schema, darbų eiliškumas ir svarba pavaizduoti žemiau pateiktame paveiksle (žr. 27 pav.).

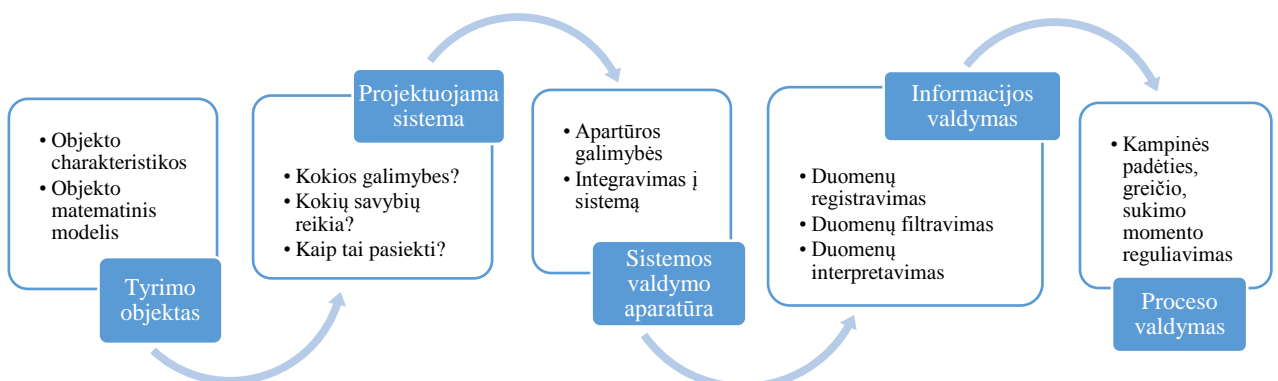
Pirmuoju etapu svarbu suvokti tyrimo objektą, jo savybes ir dinamiką. Procesai, kurių stebėseną, registravimą, analizę reikalauja specifinės įrangos, kitų kaštų yra modeliuojami kompiuterinėse sistemose. Šiuo atveju reikalingas nuolatinės srovės variklio modelis papildytas pasirinktu valdymo metodu. Kadangi žinome, kad tyrime naudosime žinomų parametrų elektros pavarą, todėl šiame darbe išsamesnis variklio charakteristikų tyrimas nebus atliekamas.

Antrajame etape reikalinga išsamesnė situacijos analizė, kuri pateiktų atsakymus ir tokius klausimus kaip: kokios tiriamo objekto galimybės, kokių funkcinių savybių reikia iš kuriamo prietaiso, kokiomis priemonėmis įmanoma įdiegti nusakytas funkcinės savybes.

Trečiame etape atliksime aparatūros, kurią naudosime tyrimo metu, parinkimą, analizę ir bandymus susijusius su jų galimybių paieška ir tinkamu šiai aplikacijai vertinimu. Minėti veiksmai privalo koreliuoti su ankstesniuose etapuose pateiktomis išvadomis ir rekomendacijomis.

Ketvirtame etape tikėtina neišvengsime nesklandumų susijusių su duomenų srauto nestabilumu. Reikalingi metodai ir priemonės užtikrinančios kokybišką duomenų registravimą.

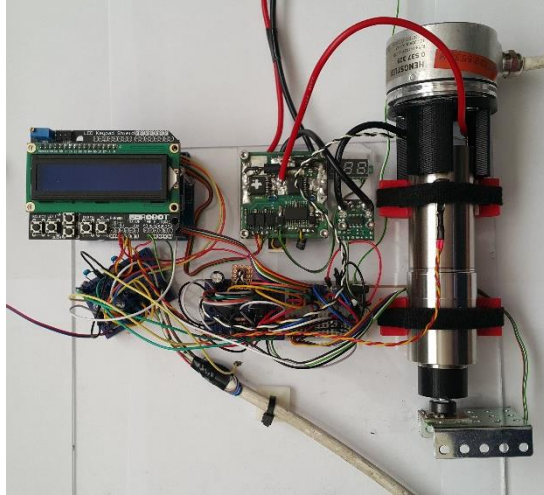
Penktame etape atliksime visų sistemoje naudojamų mazgų apjungimą bendram darbui. Derinimo, testavimo ir eksperimentavimo darbai pateiks galutines sistemos charakteristikas.



27 pav. Tyrimo schema, darbų eiliškumas ir svarba

3.2. Tyrimo įranga

Tyrimai atlikti su realiu bandymu stendu (žr. 28 pav.). Stendą sudaro: nuolatinės srovės šepetėlinis variklis, variklio galios stiprintuvas, srovės matavimo modulis, absoliutinis ir inkrementinis enkoderiai, temperatūros jutiklis, du analogas/kodas keitikliai, Atmega328 mikrovaldiklis ir skaitmeninis osciloskopas Rigol DS1052E.



28 pav. Tyrime naudojamas nuolatinės srovės variklio bandymų stendas

Nuolatinės srovės šepetėlinis variklis – pagrindinis tyrimo objektas. Naudojamas precizinis „Maxon“ berėmis šepetėlinis variklis su planetariniu reduktoriumi. Šis „DCX“ klasės variklis gamintojo įvardijamas, kai pažangiausias, turintis geriausias komponentus ir medžiagas produktas jų asortimente. „NASA“ sukurtame marsaeigyje įdiegtos 56 tokio tipo pavaros. Šia pavarą charakterizuojantys parametrai pateikti pirmoje lentelėje (žr. 8 lentelėje).

8 lentelė

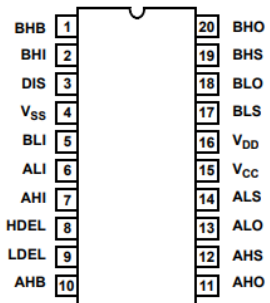
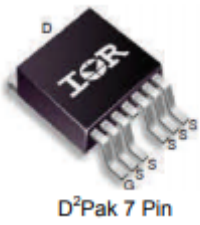
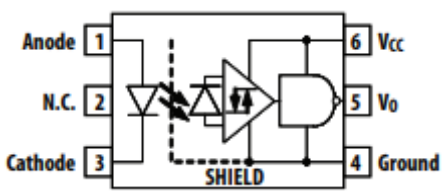
Maxon DCX pavaros charakteristikos [13]

<p>Ilustracija:</p> 	<p>Įrenginio pavadinimas: DCX 35 L</p> <p>Variklio skersmuo – 35mm;</p> <p>Vardinė maitinimo įtampa – iki 12 V;</p> <p>Maksimali srovė – 152 A;</p> <p>Maksimalus sukimo momentas – 2,08 Nm;</p> <p>Maksimalus naudingumas – 88%;</p> <p>Svoris – 385g.</p>
--	--

Variklio galios stiprintuvas (Full-Bridge) – įtaisas, kuris komutuoja pavarą sustiprindamas valdiklio siunčiamus signalus. Šiuo metu rinkoje nėra galimybės įsigyti kompaktiško „Full-bridge“ mazgo atitinkančio nagrinėjamos pavaros poreikius. Reikalingas valdymo blokas, galintis patikimai valdyti kelių šimtų amperų srovę. Šiam tikslui surenkama valdymo plokštė (žr. 29 pav.), kurią sudaro: raktų valdymo loginis elementas „HIP4081AIBZ“, keturi galios lauko tranzistoriai „FS3006-7P“ ir trys optronai galvaniškam išrišimui realizuoti. Naudojamas loginis elementas komutuoja keturis lauko tranzistorius pagal du valdiklio valdymo signalus – variklio greitį ir sukimosi kryptį. Dėl parinktų mažos vidinės varžos lauko tranzistorių egzistuoja minimalūs šiluminiai nuostoliai – nereikalingas aktyvus aušinimas. Siekiant galvaniškai išrišti valdymo įrenginį ir galios grandinę naudojami optronai su komporatoriumi. Šiuo atveju komporatorius mažina klaidingų signalų priėmimą. Šią valdymo plokštę ir joje esančius elementus charakterizuojantys parametrai pateikti antroje lentelėje (žr. 9 lentelėje).

9 lentelė

Pavaros galios stirprintuvo plokštės charakteristikos

<p>Iliustracija:</p> 	<p>Įrenginio pavadinimas: HIP4081AIBZ [14]</p> <p>Loginio elemento maitinimo įtampa: 9,5-15V;</p> <p>Komutuojama maksimali įtampa: 95V</p> <p>Komutuojama maksimali srovė: 3,6A</p> <p>Maksimalus komutavimo dažnis: 1MHz;</p> <p>Korpusas: SOIC;</p>
<p>Iliustracija:</p> 	<p>Įrenginio pavadinimas: FS3006-7P [15]</p> <p>Komutuojama maksimali įtampa: 60V;</p> <p>Komutuojama maksimali srovė: 293A;</p> <p>Maksimali srovė pulso metu: 1172A;</p> <p>Vidinė varža: 1,5mΩ;</p> <p>Korpusas: D2Pak;</p>
<p>Iliustracija:</p> 	<p>Įrenginio pavadinimas: ACPL-P481 [16]</p> <p>Maksimalus impulso plotis: 250ns;</p> <p>Maksimalus vėlinimas: 200ns;</p> <p>Logikos maitinimo įtampa: 4,5-20V;</p> <p>Atbulinės įtampos apsauga: 1000V;</p> <p>Korpusas: SO-6;</p>




29 pav. Pagaminta (Full-Bridge) pavaros valdymo plokštė.

Inkrementinis enkoderis – įtaisas fiksuojantis kampinę padėtį, generuojant tris impulsinius signalus sindikuojančius rotoriaus judėjimą. Naudojamas inkrementinis enkoderis generuoja „A“, „B“ ir „Z“ signalus. A ir B signalai indikuoja apie rotoriaus judėjimo kryptį ir padėties pokytį. „Z“ signalas indikuoja apie įvykusį vieną pilną apsisukimą. Pasirinktas įtaisas generuoja 1024 impulsus per apsisukimą. Šį enkoderį charakterizuojantys parametrai pateikti trečioje lentelėje (žr. 10 lentelėje).

10 lentelė

Inkrementinio enkoderio charakteristikos

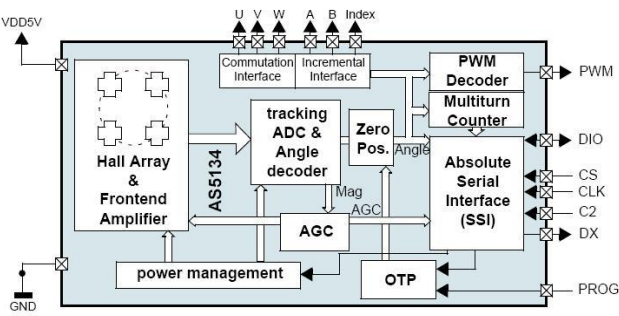
<p>Iliustracija:</p> 	<p>Įrenginio pavadinimas: HENGSTLER 537</p> <p>Impulsų kiekis per apsisukimą: 1024;</p> <p>Maitinimo įtampa: 10-30V;</p>
---	---

Absoliutinis magnetinis enkoderis – įtaisas, nusakantis absoliutinę kampinę padėtį bet kuriuo laiko momentu. Šio absoliutinio enkoderio veikimas pagrįstas bekontakte reakcija į magneto kuriamo magnetinio lauko orientaciją. Naudojamas įtaisas geba informaciją perduoti keturiais skirtingais formatais – SPI komunikacija realia kampo padėtimi, ABI inkrementine pulsacija, UVW fazių poslinkiu ir PWM signalu, kai kampo padėtis susieta su impulso pločiu. Kampo padėtis šifruojama 14 bitų žodyje – matuojama 0,02 laipsnio

diskretiškumu. Naudojant SPI informacijos perdavimo metodą galima 1mb/s duomenų sparta. Šių enkoderių charakterizuojantys parametrai pateikti ketvirtoje lentelėje (žr. 11 lentelėje).

11 lentelė

Absolutinio magnetinio enkoderio charakteristikos

Iliustracija:	Įrenginio pavadinimas: AS5147P [17]
	<p>Komunikacijos tipas – SPI; Diskretiškumas – 14 bitų žodis; Duomenų srautas – iki 1 megabito; Duomenų tipas – skaitmeninė kampo sąsaja / ABI / UVW / PWM; Maitinimo įtampa – 5V; Korpusas - SSOP-20 (SMD);</p>

Puslaidininkinis srovės matavimo modulis – holo efektu pagrįstas srovę matuojantis modulis. Modulis geba srovės vertę registruoti nuo -75 iki $+75$ amperų intervale, $0,018\text{V/A}$ raiška. Modulis jungiamas nuosekliai matuojamai grandinei – sistemos grandinės varža padidėja $1,1\text{m}\Omega$. Modulio galios grandinė ir išėjimo signalas yra galvaniskai atskirti. Šių srovės matavimo modulį charakterizuojantys parametrai pateikti penktoje lentelėje (žr. 12 lentelėje).

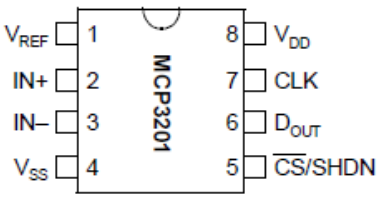
12 lentelė

Srovės matavimo modulio charakteristikos

Iliustracija:	Įrenginio pavadinimas: ACS709 [18]
	<p>Jautrumas: $0,018\text{V/A}$; Srovės matavimo ribos: $+75\text{A}$; Logikos maitinimo įtampa: $3\text{-}5,5\text{V}$; Izoliatorius tarp galio ir logikos: $2,1\text{kV}$; Vidinė varža: $1,1\text{m}\Omega$;</p>

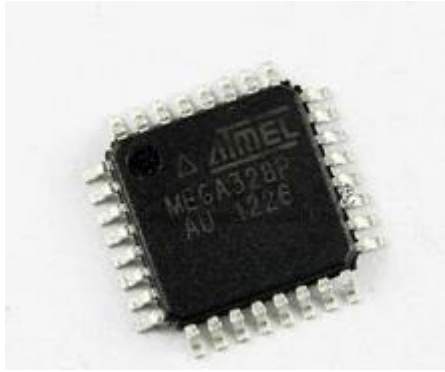
Analogas/kodas keitiklis – įrenginys analoginį elektrinį signalą keičiantis skaitmeniniu koduotu pranešimu. Analoginis signalas diskretizuojamas 12 bitų žodyje – $0,001\text{V}$ raiška. Informacija perduodama SPI komunikacijos kanalu, $1,6\text{mb/s}$. Šių analogas/kodas modulį charakterizuojantys parametrai pateikti šeštoje lentelėje (žr. 12 lentelėje).

Analogas/kodas keitiklio charakteristikos

Iliustracija: 	Įrenginio pavadinimas: MCP3201 [19] Diskretizavimo raiška: 12 bitų; Matavimų skaičius per sekundę: 100000; Komunikacija: SPI; Maksimalus duomenų srautas: 1,6 megabitų;
---	--

Mikrovaldiklis Atmega328 – Arduino UNO valdymo plokštėje integruotas mikrovaldiklis. Valdiklis dirba 16MHz darbinio dažniu, 8 bitų architektūros sistemoje. Valdiklis turi 32 kilobaitus programuojamos atminties ir 2 kilobaitus darbinės atminties. SPI komunikacijos kanalu galimas duomenų srauto užmezgimas iki 1mb/s. Šis valdiklis turi du greituosius įėjimus (interrupt) ir šešis „PWM“ signalą generuojančius išėjimus. Šį mikrovaldiklį charakterizuojantys parametrai pateikti septintoje lentelėje (žr. 7 lentelėje).

Mikrovaldiklio Atmega328 charakteristikos

Iliustracija: 	Įrenginio pavadinimas: atmega328 [20] Maitinimo įtampa – 1,8;5,5V; Darbinis dažnis – iki 16 MHz; 32 Kb / 1 Kb / 2 Kb – Flash / EEPROM / SRAM atmintys 1x16, 2x8 bitų taimeriai; 6x PWM kanalai; 2xINT greitieji įėjimai; Komunikacijos: SPI, USART, I2C, Korpusas - TQFP (SMD);
---	---

Skaitmeninis oksiloskopas – skaitmeninis įtaisas gebantis registruoti ir analizuoti elektrinius signalus. Šis įrenginys geba užregistruoti milijardą matavimų per sekundę, kai signalas kinta ne dažniau nei 50 milijonų kartų per sekundę. Naudojantis dviejų informacijos pateikimo kanalais galimas skirtingų signalų palyginimas realiu laiku. Ši ociloskopą charakterizuojantys parametrai pateikti aštuntoje lentelėje (žr. 15 lentelėje).

15 lentelė

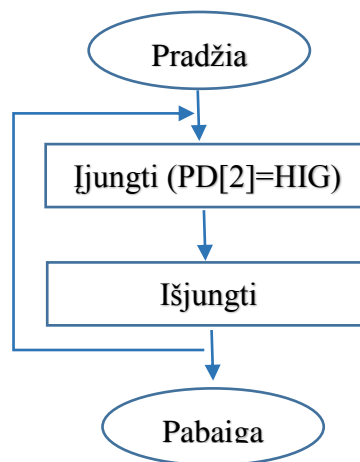
Skaitmeninio ociloskopo charakteristikos

Iliustracija:	Įrenginio pavadinimas: Rigol DC1052E
	Maitinimo įtampa – 220V; Matavimų kiekis per sekundę: 1GSa/s Darbinė dažnių juosta: 50MHz; Kanalų kiekis: 2 kanalai;

3.3. Mikrovaldiklio galimybių tyrimas

Šiame darbe nagrinėjamo proceso valdymui organizuoti pasirinktas Atmel šeimos mikrovaldiklis Atmega328. Šis valdiklis geriau žinomas, kaip Arduino UNO valdymo plokštės sudedamoji dalis. Arduino UNO valdymo plokštė yra labai plačiai žinoma, naudojama tarp konstruktorių ir tyrėjų, kuriems reikalingas vienos plokštės įterptinis mikrokompiuteris. Šio darbo šalutinis tikslas yra argumentuotai pagrįsti kitų tyrėjų pasirinkimą naudoti šį valdiklį, bei nubrėžti aiškias įrenginio techninių galimybių ribas. Sistemos, kuriose naudojamas mikrovaldiklis, kaip bebūtų keista, tyrėjai mažiausiai dėmesio skiria būtent jam. Dažniausiai tyrėjai dėl nepakankamo susipažinimo su valdiklio architektūra ir jo veikimo niuansais, patiria sunkiai suvokiamus darbo rezultatus, kai modeliuota sistema tinkamai neveikia jų kuriamoje realioje valdymo sistemoje. Dėl šios priežasties reikalingas išsamus mikrovaldiklio galimybių tyrimas. Mikrovaldiklio galimybių tyrime naudosime vieną, ar kelis identiškus mikrovaldiklius ir jų generuojamus signalus registruojantį osciloskopą.

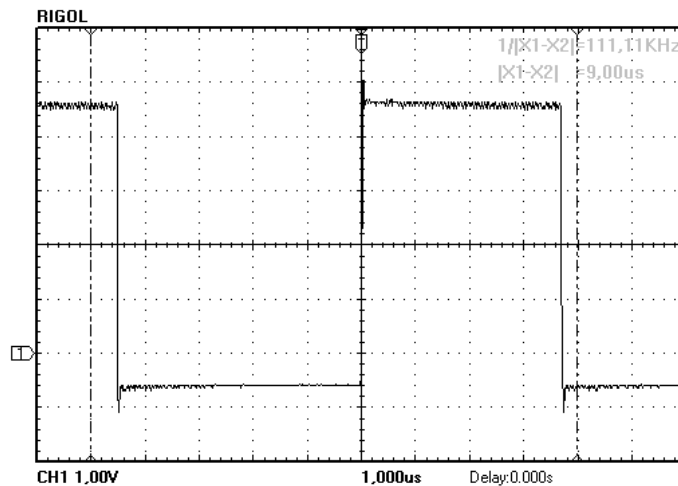
Pirmojo tyrimo metu svarbu sužinoti, kokia maksimalią greitaveiką tiriamas objektas geba perjungti išėjimo signalo lygį. Sukurta mikrovaldiklio programa, kurios struktūra pavaizduota žemiau pateiktame paveiksle (žr. 30 pav.)



30 pav. Valdiklio pirmo tyrimo programos struktūros schema

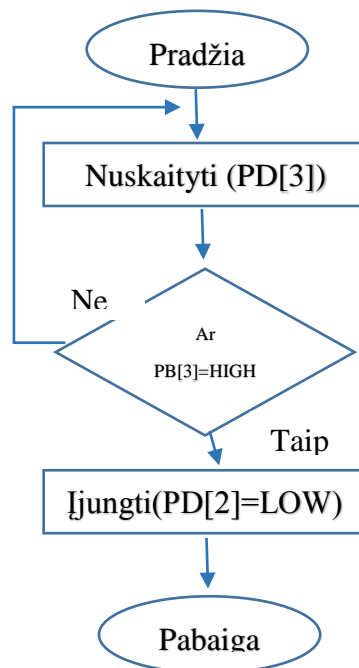
Atlikus programavimo darbus ir prijungus matavimo prietaisą, pavyko užregistruoti maksimalią išėjimo perjungimo/performavimo greitaveiką. Žemiau pateiktame paveiksle pateikti matavimų rezultatai (žr. 31 pav.). Iš grafike pateiktų duomenų, kai langelio aukštis 1 voltas, o plotis 1 mikrosekundė, matome, kad terminalo lygio performavimas trunka apie 3,4 mikrosekundes. Galime manyti, kad naudojant ne specifinę išėjimų grupę, programos

„prašymas“ ir valdiklio realizuotas veiksmas išėjimo performavimo atžvilgiu truks ilgiau nei $3,4\mu\text{s}$ laiko tarpą.



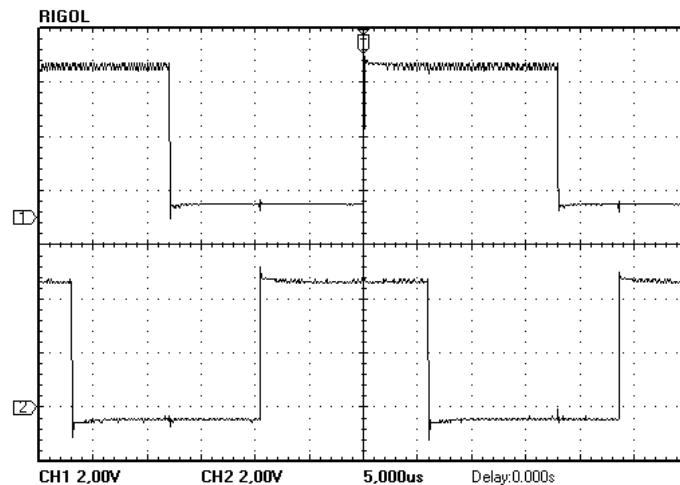
31 pav. Valdiklio pirmojo tyrimo matavimų rezultatai

Antrojo tyrimo metu iširsime, koks yra maksimalus reakcijos laikas į lygio pasikeitimą įėjime – įėjimo nuskaitymo, sąlygos įvykdymo ir išėjimo suformavimo laikas. Tyrime naudojami du valdikliai. Vienas iš jų generuoja $15\mu\text{s}$ impulsus. Antrasis valdiklis veikia pagal žemiau pateiktame paveiksle pavaizduotos programos struktūrą (žr. 32 pav.). Valdiklis nuolatos registruoja PB[3] terminalo būseną, jai pakitus formuojamas aukšto lygio signalas PB[2] terminale.



32 pav. Valdiklio antrojo tyrimo programos struktūros schema

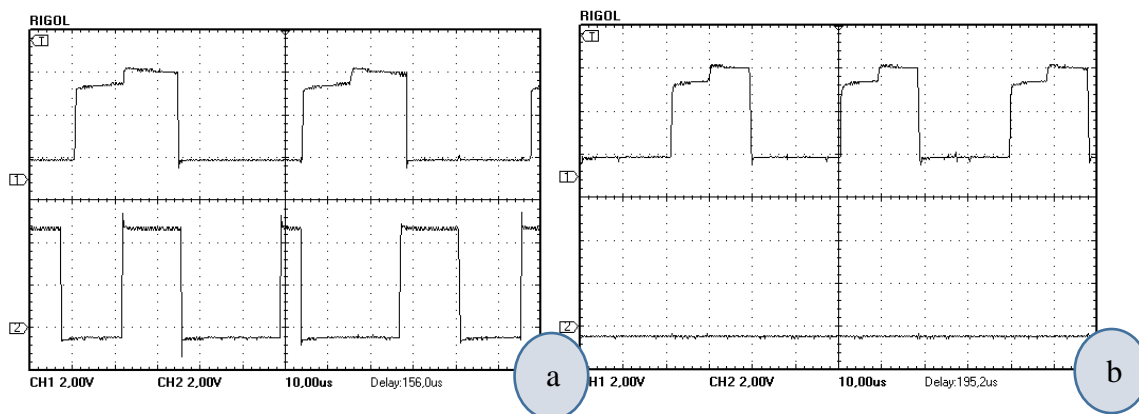
Atlikus programavimo darbus ir prijungus matavimo prietaisą, pavyko užregistruoti maksimalų reakcijos laiką. Žemiau pateiktame paveiksle pateikti matavimų rezultatai (žr. 33 pav.). Grafike matome dvi kreives: prie pirmojo kanalo prijungtas reaguojantis mikrovaldiklis, prie antrojo impulsą generuojantis kitas mikrovaldiklis. Laiko tarpas tarp signalų, kai langelio plotis lygus $5\mu s$, yra apie 6 mikrosekundės. Vadovaudamiesi pirmojo tyrimo išvadomis, kad signalo suformavimas trunka $3,6\mu s$. Skirtumas tarp $6\mu s$ ir $3,6\mu s$ yra lygus mikrovaldiklio reakcijos laikui į signalo lygio pasikeitimą įėjime – $2,4\mu s$.



33 pav. Valdiklio antrojo tyrimo matavimų rezultatai

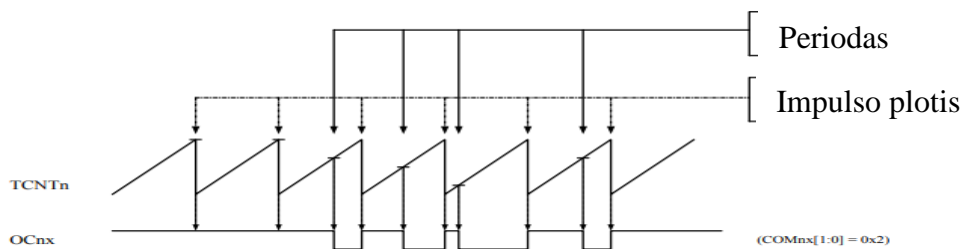
Trečiojo tyrimo metu sužinosime, koks galimas maksimalus specifinių greitųjų įėjimų („interrupt“) komutavimo dažnis. Naudojamo valdiklio sistema turi du greituosius įėjimus, kurių būsenos pokytis gali inicijuoti aukščiausios svarbos procedūras. Aktyvavus reakcijos į greituosius įėjimus funkciją ir per dažnai sužadinant greitąjį įėjimą, bus vykdomos tik tos procedūros, kurioms suteiktas aukščiausias lygis – kitos mažiau svarbios procedūros gali būti nevykdomos. Todėl svarbų sužinoti maksimalų „interrupt“ komutavimo dažnį. Eksperimento metu naudojami du mikrovaldikliai. Vienas iš jų generuoja potenciometru valdomo dažnio stačiakampį signalą. Kitas vykdo pirmame tyrime aprašytą programą (generuoja impulsą) ir vykdo aritmetinę sudėtį, kuri parašyta, kaip aukščiausios svarbos procedūra. Kai greitojo įėjimo („interrupt“) komutavimo dažnis pasieks maksimalia vertę, valdiklis vykdys tik aritmetinę sudėtį – nebevykdys impulso generavimo užduoties. Atlikus programavimo darbus ir prijungus matavimo prietaisą, pavyko užregistruoti maksimalų greitųjų įėjimų komutavimo dažnį. Žemiau pateiktame paveiksle pateikti matavimų rezultatai (žr. 34 pav.). Penkto paveikslo a dalyje pateikta laiko diagrama, kai greitojo įėjimo komutavimo dažnis apie 19kHz – antrajame osciloskopo kanale matome, kad mikrovaldikliui dar pakanka laiko performuoti išėjimo signalo lygį. Tačiau penkto paveikslo b dalyje

antrajame osciloskopo kanale matome tik ištisinę liniją. Tai reiškia, kad esant aukštesniam, kaip 25kHz greitojo įėjimo komutavimo dažniui, mikrovaldiklis spėja vykdyti tik aukščiausios svarbos procedūras. Vadovaudamiesi tyrimo išvadomis, galime manyti, kad komutuojant kurį nors vieną greitąjį įėjimą dažniau nei $40\mu\text{s}$ intervalu galimas valdymo sistemos sutrikimas – „pakibimas“. Naudojant abu valdiklyje esančius greituosius įėjimus maksimalus galimas komutavimo dažnis mažėja dvigubai.



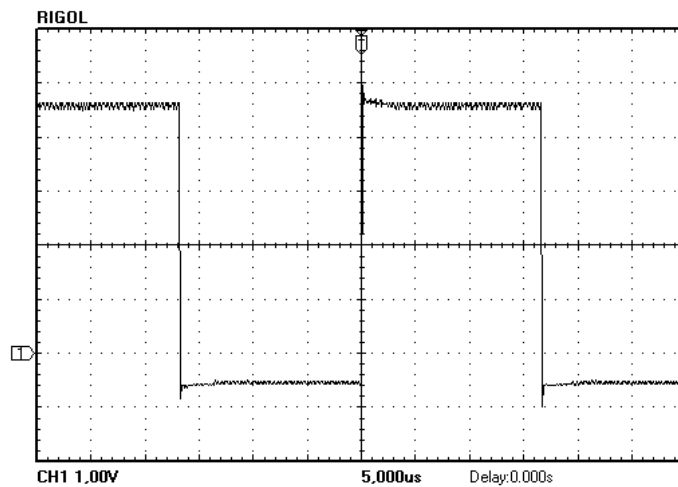
34 pav. Valdiklio trečio tyrimo matavimų rezultatai, a – greitojo įėjimo komutavimo dažnis yra 19kHz, b – greitojo įėjimo komutavimo dažnis yra 25kHz

Ketvirtojo tyrimo metu sužinosime, koks galimas maksimalus moduluoto signalo dažnis (PWM) ir kokia signalo formos kokybė esant tam tikram dažniui. Pagal nutylėjimą naudojantis Arduino gaminiais ir Arduino IDE kompiliatoriumi PWM galimas tik 490 ir 976 Hz signalo dažnis. Norint sugeneruoti kitokio dažnio PWM valdymo signalą reikalingas sistemos perkonfigūravimas. Atmega328 turi 3 vidinius laikmačius. Moduluoto signalo generavimas nėra tiesiogiai susietas su vartotojo kuriama programa – veikia nepriklausomai. Šis procesas yra susietas tik su vienu iš laikmačių. Sukonfigūravus ir susiejus laikmatį su pertraukimo funkcija turime norime dažnio PWM signalą generuojančią funkciją. Signalo periodas priklauso nuo parenkamo sistemos laikmačio daliklio vertės – valdiklio ciklų skaičiaus. TCNT yra mikrovaldiklio įvykusių ciklų skaičius (žr. 35 pav.). PWM signalo lygio pasikeitimas organizuojamas, jeigu OCnx yra daugiau nei TCNTn. OCnx yra impulso pločio vertė.

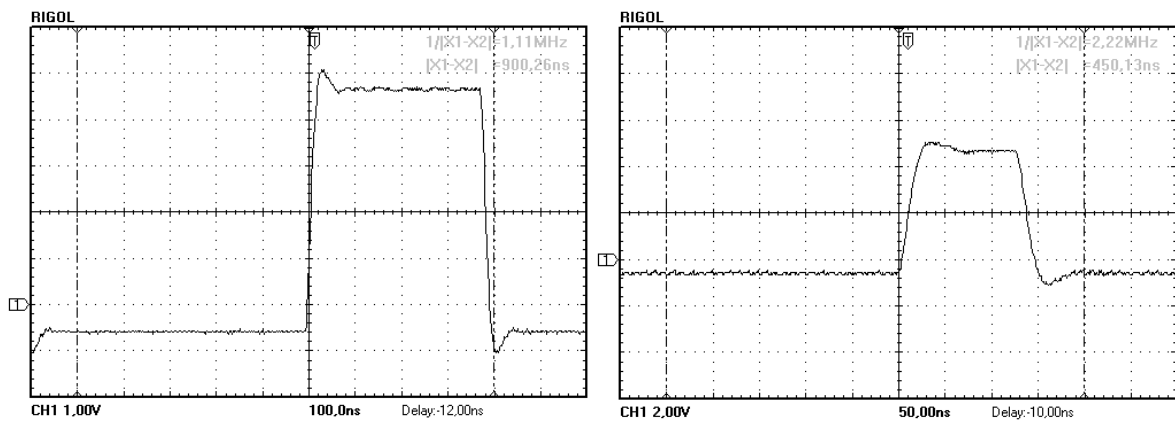


35 pav. Valdiklio PWM signalo formavimo principinė schema

Atlikus programavimo darbus ir prijungus matavimo prietaisą, pavyko pakeisti PWM signalo dažnį, bei eksperimentiškai surasti nagrinėjamo mikrovaldiklio maksimalią signalo dažnio vertę. Žemiau pateiktame paveiksle pateikti matavimų rezultatai (žr. 36-37 pav.). Septintame paveiksle matome moduliuotą stačiakampį signalą, kurio dažnis yra 30kHz . Akivaizdžiai pastebimų signalo formos nuokrypių neaptinkame. Trisdešimt septintame a (žr. 37.a pav.) paveiksle pavaizduotas moduluotas signalas, kurio dažnis apie 1MHz . Esant tokiam dažniui pastebimi signalo formos iškraipymai. Trisdešimt septintame b (žr. 37.b pav.) paveiksle pavaizduotas moduluotas signalas, kurios dažnis apie 2MHz . Pastebimi žymūs signalo formos iškraipymai. Bandant sugeneruoti didesnio, nei 2MHz moduliuotą signalą suveikia sistemos apsaugos grandinės ir dažnis dirbtinai sumažinamas iki $0,5\text{MHz}$.



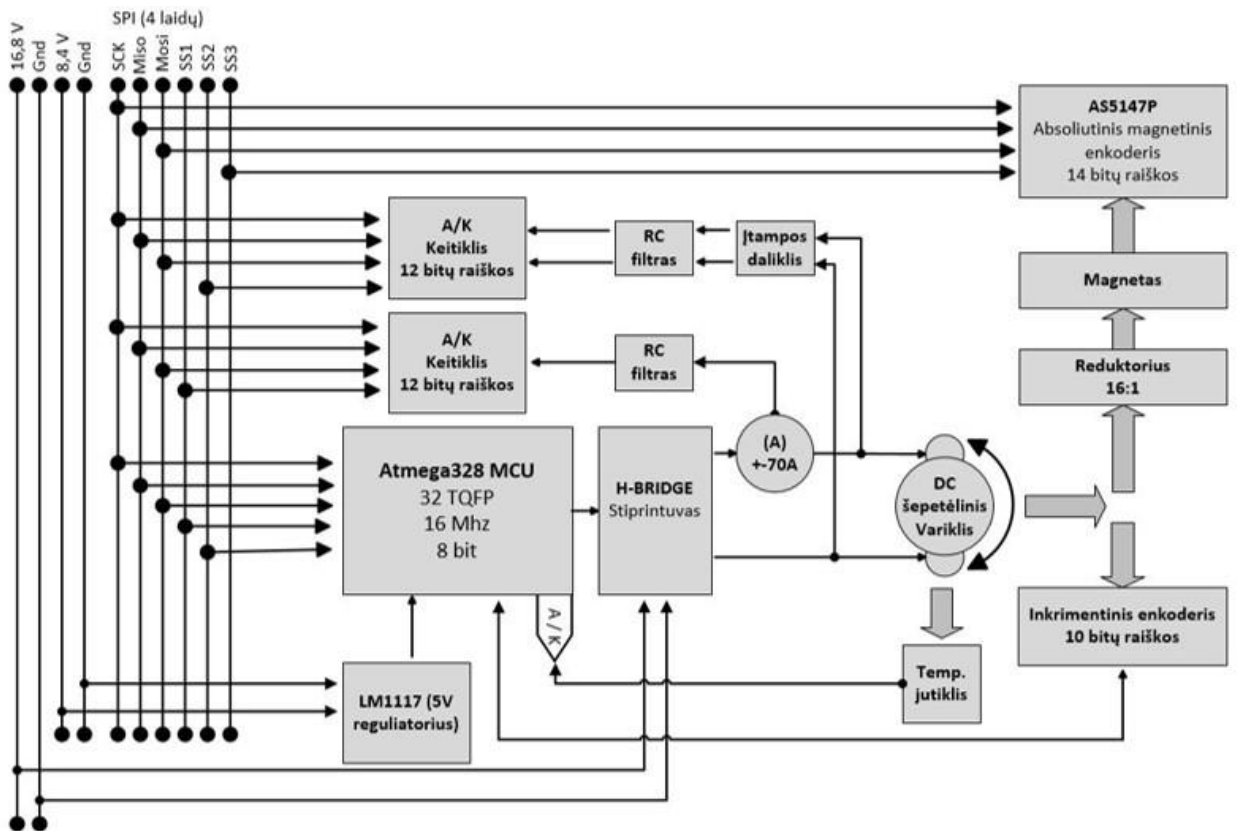
36 pav. Valdiklio ketvirtojo tyrimo matavimų rezultatai, kai $f=30\text{kHz}$



37 pav. Valdiklio ketvirtojo tyrimo matavimų rezultatai, a) PWM signalas, kai $f=1\text{MHz}$, b) PWM signalas, kai $f=2\text{MHz}$

3.4. Bandymų stendo elektrinės dalies jungimas

Bandymų stendo grandinę sudaro 11 kompleksinių mazgų, kurių tarpusavio ryšys pateiktas paveiksle (žr. 38 pav.). Stendo maitinimas organizuojamas dviem galvaniškai nesusijusiomis maitinimo atšakomis – 16,8 ir 8,4 voltų. Įrenginiai, kurie palaiko SPI komunikacijos protokolą, bendrauja tarpusavyje bendrąją komunikacijos magistrale. Analoginiai signalai (įtampa ir srovė) po schemotechninio filtravimo diskretizuojami analogas/ kodas keitikliais. Temperatūros jutiklis (termistorius) jaugiamas tiesiogiai į mikrovaldiklio A/K keitiklį. Projekte naudojami du kampinę padėtį nustatantys įrenginiai – enkoderiai. Vienas iš jų (inkrimentinis) jungiamas prie greitųjų įėjimų (interrupt) terminalų. Kitas enkoderis (absolutinis) matavimų rezultatus perduoda tiesiogiai per minėtą SPI magistralę.



38 pav. Bandymų stendo principinė schema

3.5. Duomenų valdymas

3.5.1. Variklio inkaru tekančios srovės ir ant jo esančios įtampos registravimas

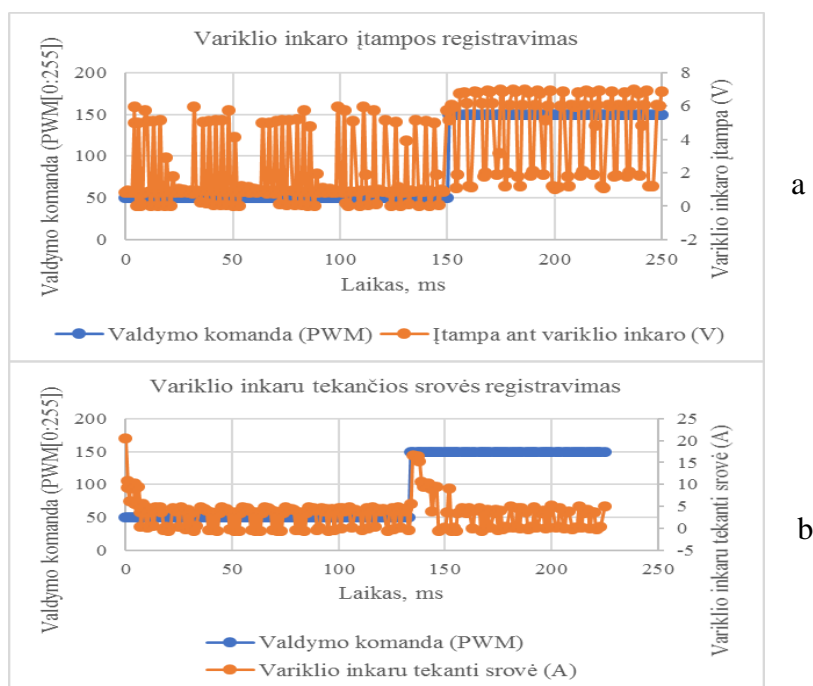
Šiame darbe nagrinėjama galimybę valdyti nuolatinės srovės variklį grįžtamuoju ryšiu pagal užregistruotus pavaros elektrinius dydžius. Siekiant įgyvendinti šį tikslą svarbu tinkamai ir laiku surinkti visą reikalingą informaciją. Šiuo atveju planuojama registruoti inkaru tekančią srovę, įtampą esančia ant inkaro, korpuso temperatūrą ir ašies kampinę padėtį. Manome, kad išmatavus srovės vertę, ją bus galima interpretuoti, kaip pavaros sukuriamą momentą. Transformacijos koeficientas pateiktas gamintojo. Įtampos ir srovės verčių santykis gali būti interpretuojamas, kaip inkaro vidinės varžos pokytis. Inkaro varža kinta dėl terminių procesų, tai taip pat galime susieti su laidininko išilimu. Kritinės ribos viršijimas indikuotų apie avarinę situaciją. Visi anksčiau minėti duomenys, kaip ir kampinė padėtis, turėtų būti stabilūs laiko atžvilgiu. Reikalingi metodai ir priemonės užtikrinantys duomenų registravimo patikimumą. Sėkmingai sujungus bandymų stende naudosis įrangą atlikti pavieniai bandymai su elementais arba jų grupėmis.

Pirmojo duomenų surinkimo bandymo metu atliktas eksperimentas ir apžvalga, kuri nusako duomenų surinkimo greitaveiką – kiek laiko gali užtrukti informacijos išgavimas iš kiekvienos ir visų mazgų kartu. Laiko matavimas atliekamas pagal mikrovaldiklio vidinį laikmatį. Laikas fiksuojamas procedūros pradžioje ir jos pabaigoje. Laikų skirtumas nusako procedūros trukmę. Laikas matuojamas mikrosekundės tikslumu. Žemiau pateiktoje lentelėje (žr. 16 lentelė) pateikti eksperimento rezultatus. Komunikacija su pagrindinius matavimus registruojančiais įrenginiais (srovės, įtampos ir kampinės padėties) SPI komunikacijos magistrale trunka apie $290\mu s$. Informacijos perdavimas iš analogas/kodas keitiklio trunka apie $15\mu s$, o šių duomenų aritmetinis konvertavimas (interpretavimas patogia forma) trunka kur kas ilgiau – apie $50\mu s$. Duomenų perdavimas ir interpretavimas iš absoliutinio enkoderio laiko atžvilgiu trunka ilgiau, nei lyginant su A/K keitiklio rezultatais. Prisimenant ankstesnių tyrimų rezultatus (modeliavimo), suformavome rekomendacijas, kad kuriama sistema turėtų reaguoti greičiau nei per vieną milisekundę. Šiuo atveju duomenų registravimo programos ciklas trunka tik $290\mu s$ - pasiekėme geresnį rezultatą, nei buvo rekomenduojama.

Duomenis registruojančios aparatūros greitaveika, duomenų registravimo vieno ciklo trukmė

Valdiklio operacija:	Įrenginys:	Operacijos trukmė:
Komunikacija su įrenginiais, jų matavimų interpretavimas	Srovės A/K keitiklis, Įtampos A/K keitiklis, Absoliutinis enkoderis	$\sim 290\mu s$
Komunikacija su Srovė/Įtampos A/K keitikliais	Srovės A/K keitiklis, Įtampos A/K keitiklis	$\sim 15\mu s$
Aritmetika susijusi su Srovės/Įtampos A/K keitikliais	Srovės A/K keitiklis, Įtampos A/K keitiklis	$\sim 50\mu s$
Komunikacija su absoliutiniu enkoderiu	Absoliutinis enkoderis	$\sim 90\mu s$
Aritmetika susijusi su absoliutiniu enkoderiu	Absoliutinis enkoderis	$\sim 50\mu s$
Duomenų registravimo programos ciklas = $2 \cdot 75\mu s + 90\mu s + 50\mu s = 290\mu s$		

Antrojo duomenų surinkimo bandymo metu atlikti pirmieji informacijos registravimo bandymai. Žemiau pateiktame paveiksle (žr. 39 pav.) matome variklio inkaru tekančios srovės ir įtampos priklausomybės nuo valdymo signalo šuolio. Grafikuose matomi signalai nėra stabilūs, nes juos įtakoja PWM valdymo signalo dedamoji. Reikalingos priemonės ir sprendimai išmatuoti arba apskaičiuoti vidutines srovės ir įtampos vertes.



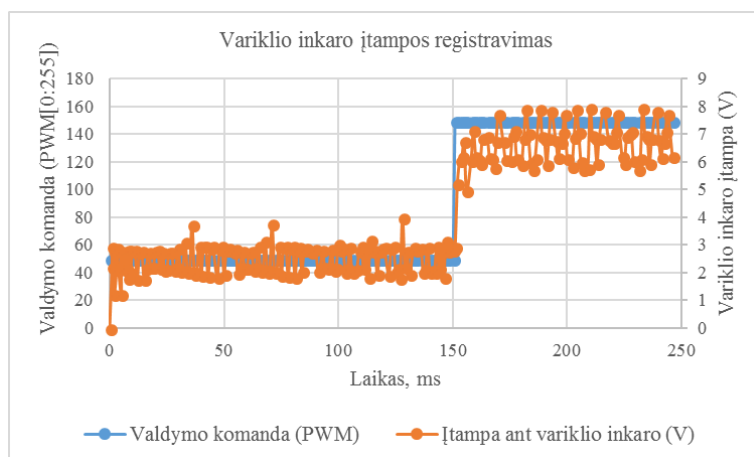
39 pav. Variklio a) inkaro srovės ir b) įtampos registravimas nenaudojant papildomų schemotechninių ir programinių signalo apdorojimo priemonių

Atliekant tolimesnius bandymu registruojant informaciją, numatyti tokie sprendimai, siekiant pašalinti signalų nestabilumą, arba apskaičiuoti vidutines jų vertes:

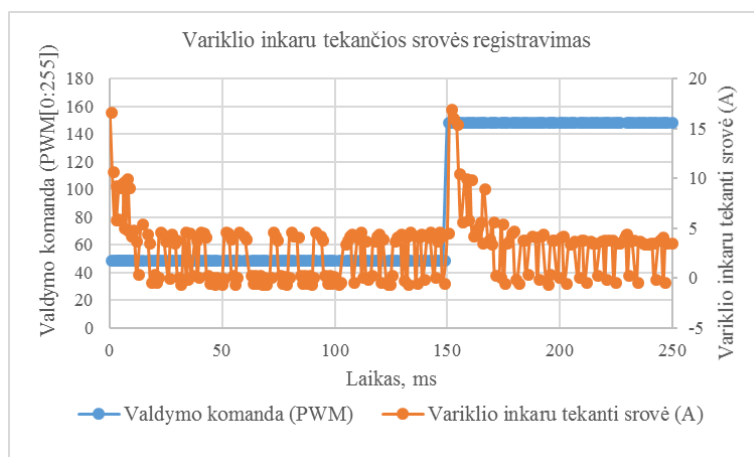
- RC schemotechninis filtras;
- Kalman programinis filtras;
- Matavimų sinchronizavimas su PWM signalą generuojančia grandine;

Trečiojo duomenų surinkimo bandymo metu parinktos RC schemotechninio filtro elementų vertės (1.2), bei atlikti pakartotiniai informacijos registravimo bandymai. Pasirinkus kondensatoriaus vertę $1,5\mu F$ apskaičiuota varžos vertė, kuri lygi $3,8k\Omega$. Žemiau pateiktame paveiksle (žr. 40 pav.) matome variklio inkaru tekančios srovės ir įtampos priklausomybės nuo valdymo signalo šuolio. Pritaikius schemotechninį RC filtrą, grafikuose pastebime mažesnę signalo iškraipymą, tačiau šiai aplikacijai toks signalo stabilumas netinkamas. Galimas tolimesnis tyrimas parenkantis kitus filtro elementus – didinant kondensatoriaus talpą, tačiau tuo pačiu didėja ir signalo vėlinimas. Reikalingas tolimesnis kitų filtravimo metodų tyrimas.

$$RC = \frac{1}{2\pi f}; \text{ kai } f = 30\text{kHz}, C = 1,5 * 10^{-9} R = \frac{1}{2 * 3,14 * 30 * 10^3} - 1,5 * 10^{-9} = 3,8 * 10^3 \quad (1.2)$$



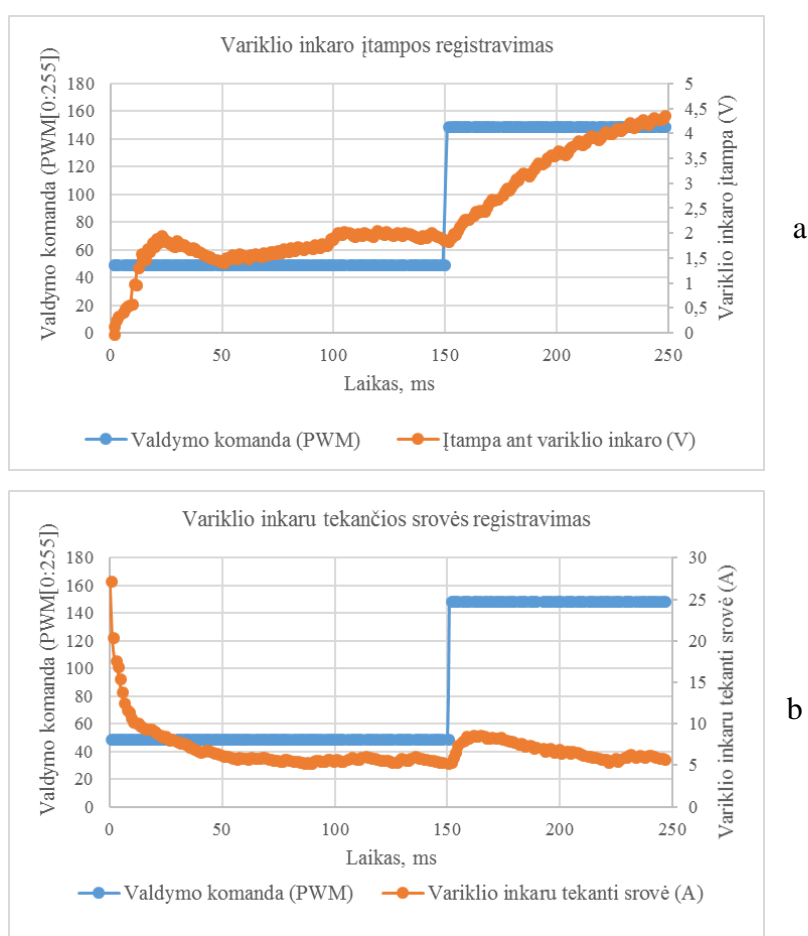
a



b

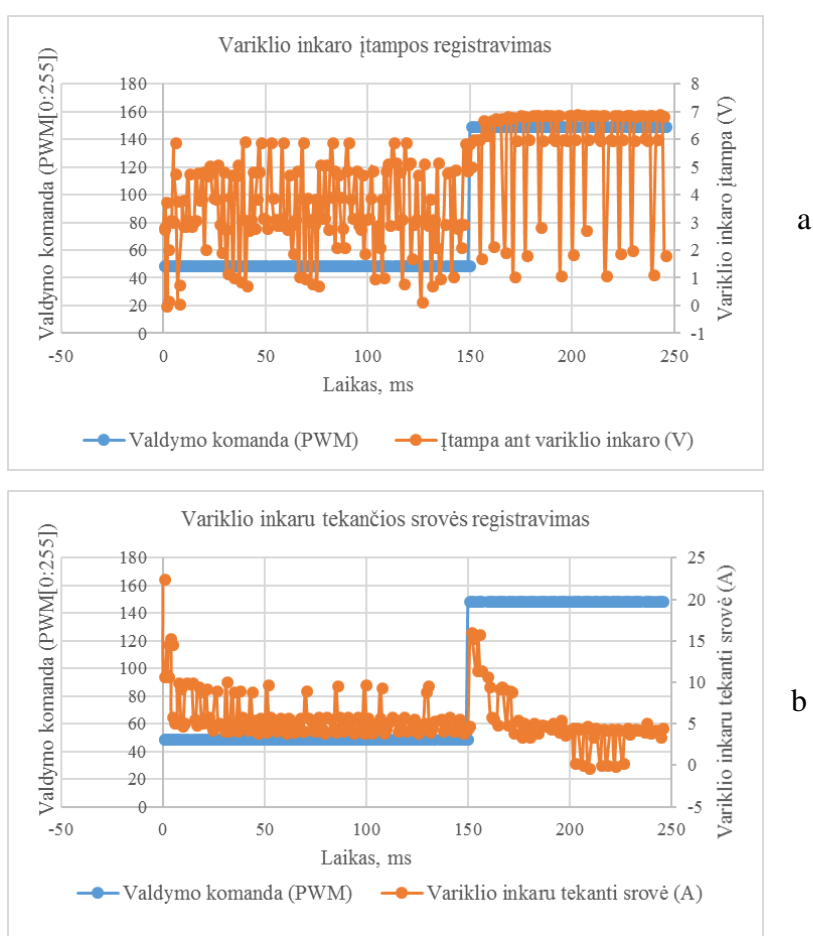
40 pav. Variklio a) inkaro srovės ir b) įtampos registravimas naudojant RC filtrą.

Ketvirtojo duomenų surinkimo bandymo metu taikomas skaitmeninis Kalmano filtras [21], kurio veikimas pagrįstas matematinės integracijos metodu, kai matematinis modelis analizuodamas praeities duomenis bando nuspėti ateities matavimo vertę. Atlikus eksperimentinius bandymus ir derinimo darbus, pavyko užregistruoti Kalmano filtro įtaką analoginių signalų filtravimui. Žemiau pateiktame paveiksle (žr. 41 pav.) matome variklio inkaru tekančios srovės ir įtampos priklausomybės nuo valdymo signalo šuolio. Suderinus Kalmano filtrą galimas beveik visišką signalo iškrypimų panaikinimas, tačiau šiam filtrui pateikiant labai didelėje amplitudėje kintančius signalus negalime būti tikri kokią vidutinę vertę jis apskaičiuoja. Šis metodas geresnis nei ankstesnysis.



41 pav. Variklio a) inkaro srovės ir b) įtampos registravimas naudojant Kalman filtrą.

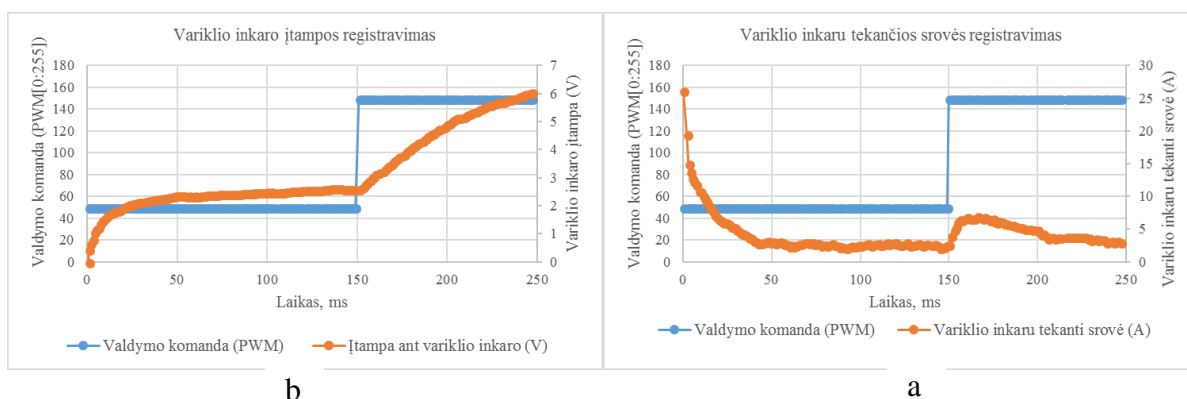
Penktojo duomenų surinkimo bandymo metu taikomas matavimų sinchronizavimas su moduluota signalą kuriančia mikrovaldiklio struktūra. Matavimų atlikimas reikiamu laiko momentu eliminuotų klaidingų matavimų kiekį. Mikrovaldiklio generuojamo PWM signalo organizavimas yra susietas su vienu iš vidinių laikrodžių. Šio įrenginio parametrų derinimas ir veiklos stebėseną, naudojant registruose saugomą informaciją, suteikia įrankį įgalinantį numanyti laiko momentą, kai PWM signalo lygis aukštas. Kai PWM signalo periodas $33\mu\text{s}$ ir impulso plotis lygus 1% , aukšto signalo lygį galime fiksuoti tik 330ns laiko intervale. Žemiau pateiktame paveiksle (žr. 42 pav.) matome variklio inkaru tekančios srovės ir įtampos priklausomybės nuo valdymo signalo šuolio.



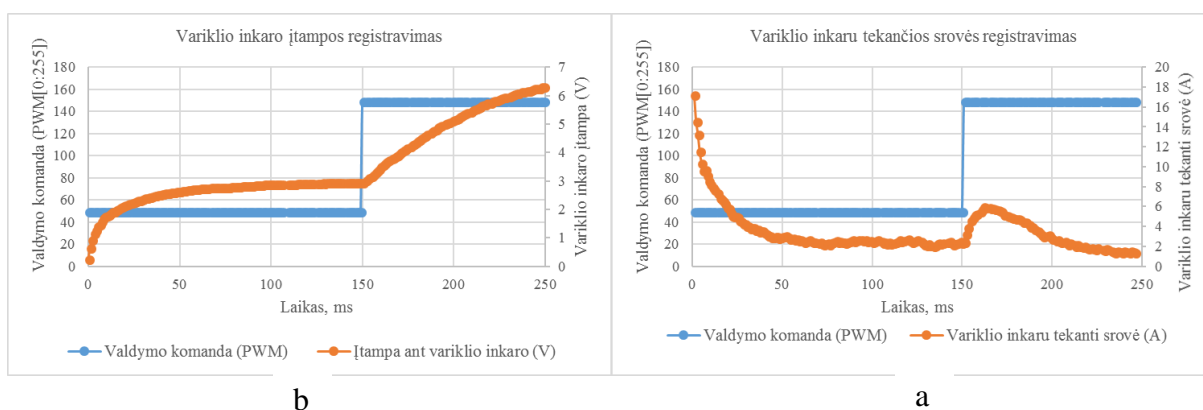
42 pav. Variklio a) inkaru srovės ir b) įtampos registravimas naudojant matavimų sinchronizavimą su moduluotu signalu.

Šeštojo duomenų surinkimo bandymo metu atlikti bandymai jungiant tarpusavyje anksčiau išbandytus signalų filtravimo metodus. Išbandytos tokios kombinacijos: „RC+Kalman“, „RC+Kalman+Sinchronizavimas“. Žemiau pateiktuose paveiksluose (žr. 43-44 pav.) matome variklio inkaru tekančios srovės ir įtampos priklausomybės nuo valdymo signalo šuolio. Lyginant abi filtrų konfigūracijas, pastebime, kad naudojant visų trijų nagrinėtų filtrų kombinaciją kreivės

aproksimavimas yra tolydesnis, bei reakcija į signalo pokytį labiau išryškinta. Tolimesniuose tyrimuose bus naudojama „RC+Kalman+Sinchronizavimas“ filtrų kombinacija.



43 pav. Variklio a) inkaru srovės ir b) įtampos registravimas naudojant RC ir Kalman filtrus.



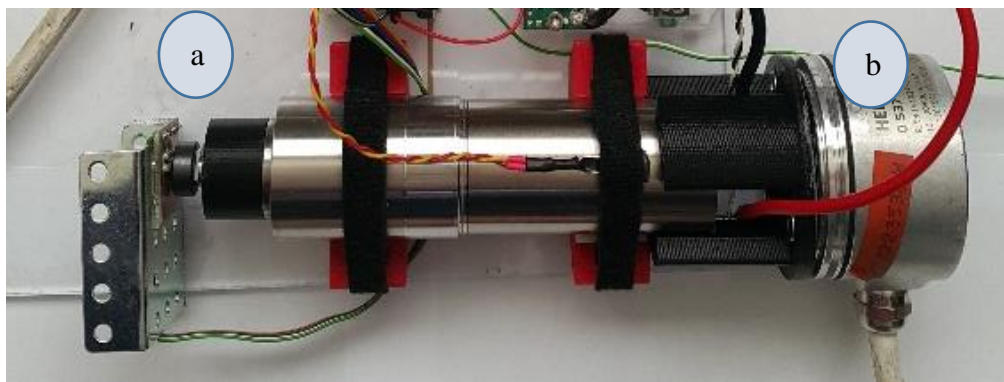
44 pav. Variklio a) inkaru srovės ir b) įtampos registravimas naudojant RC, Kalman ir Sinchronizavimo filtrus

Siekiant nustatyti pritaikytų filtrų efektyvumą, atliktas kiekybinis vertinimas tarp matavimų metu užregistruotų gretimų verčių. Skirtumas tarp matavimo vertės laiko momentu t_1 ir t_2 santykinai nusako signalo švytavinimą. Vertinant duomenų registravimo rezultatus nenaudojant jokių filtravimo priemonių (žr. 39pav.), srovės grafiko gretimų verčių skirtumo vidurkis yra apie 0,09A, įtampos – 0,003V. Tačiau vertinant maksimalų ir minimalų gretimų verčių nuokrypį pastebime, kad srovė vertė staiga pakinta per 21,4A, o įtampa per 12,6V. Vertinant duomenų registravimo rezultatus pritaikius „RC+Kalman+Sinchronizavimas“ filtrą (žr. 44 pav.), srovės grafiko gretimų verčių skirtumo vidurkis yra apie 0,08A, įtampos – 0,001V. Maksimalus gretimų verčių pokytis srovės grafike yra 2,48A, įtampos 0,42V. Apibendrinant, schemotechninių ir skaitmeninių filtrų kombinacijos naudojimas sumažino užregistruotų verčių švytavinimą matavimų metu. Gretimų verčių vidurkis sumažėjo 1,125 karto srovės grafike ir 3 kartus įtampos grafike. Maksimalios gretimos vertės pokytis srovės grafike sumažėjo 8,6 karto ir įtampos grafike apie 30 kartų.

3.5.2. Kampinės padėties registravimas

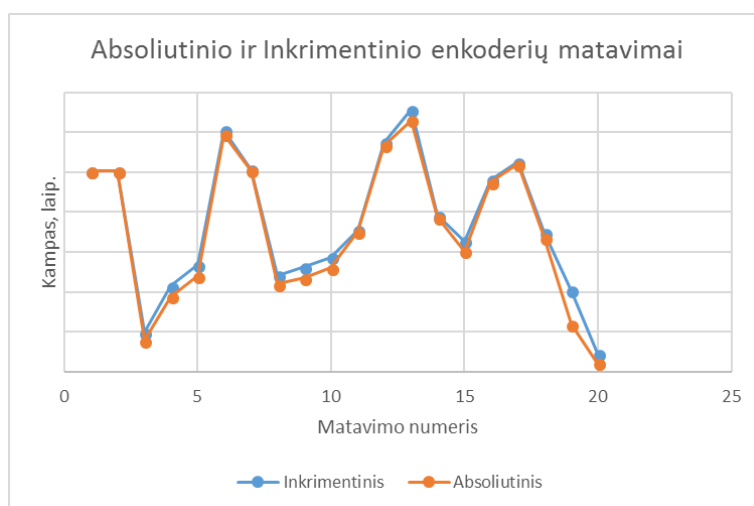
Norint koordinuotai valdyti pavaros judesį, reikalingas kampinės padėties suvokimas. Šiame poskyryje nagrinėsime priemones ir metodus leidžiančius užtikrinti patikimesnę ir tikslesnę kampinės padėties registravimą. Šiam tikslui naudojami du skirtingų tipų enkoderiai – magnetinis absoliutinis ir inkrementinis. Inkrementinis enkoderis dviem kanalais generuoja impulsus, kurių persidengimas nusako rotoriaus sukimosi kryptį. Norint sužinoti absoliutų posūkio kampą naudojantis inkrementiniu enkoderiumi, privalome skaičiuoti visus įvykusius impulsinius pasikeitimus. Pagal interpretuotą sukimosi kryptį, absoliutinę padėties vertę didiname arba mažiname. Jeigu manoma, kad duomenų surinkimo procedūra geba tinkamai skaičiuoti ir interpretuoti impulsinius signalus, tai galime manyti, kad šio tipo enkoderis neturi paklaidos. Tai pat eksperimente naudojamas absoliutinis magnetinis enkoderis. Šis prietaisas geba nusakyti rotoriaus/magneto padėtį bet kuriuo laiko momentu – nereikalingas nuolatinis proceso stebėjimas. Tačiau, dėl savybės atlikti matavimą bekontakčiu būdu egzistuoja veiksniai, kurie gali tiesiogiai įtakoti absoliutinio magnetinio enkoderio matavimų rezultatus. Šio prietaiso jautrioji zona reaguoja į prie jo prinešto magneto magnetinio lauko ir polių orientaciją jo atžvilgiu. Taip pat labai svarbus magneto išcentravimas ties jautriąja enkoderio zona. Galime manyti, kad tokie faktoriai, kaip magneto nuotolis nuo jautriosios zonos, neišcentravimas, lygiagretumo nebuvimas gali tiesiogiai įtakoti matavimų rezultatus. Reikalingas išsamesnis tyrimas nagrinėjant minėtų faktorių įtaką, bei magnetinio absoliutinio enkoderio tinkamumą šiai aplikacijai.

Pirmojo kampinės padėties tyrimo metu pritvirtinsime absoliutinį magnetinį enkoderį ant reduktoriaus ašies, o inkrementinį – ant variklio ašies (žr. 45 pav.). Kadangi reduktorius mažinimo koeficientas yra 16:1, tai inkrementinis enkoderis apsisuks 16 kartų, kol tuo metu absoliutinis magnetinis tik vieną kartą. Kai inkrementinis enkoderis sugeneruoja 1024 pulsų per vieną apsisukimą – sugeneruos 16384 pulsų per vieną reduktoriaus ašies apsisukimą. Tuo atveju pasieksime 0,02 laipsnio per vieną impulsą padėties nustatymo raišką. Magnetinis absoliutinis enkoderis pateiks išmatuotą reikšmę 14 bitų žodyje, kuriame kampinė padėtis bus užšifruota taip pat 16384 vertėje – raiška bus tokia pati, kaip inkrementinio enkoderio.



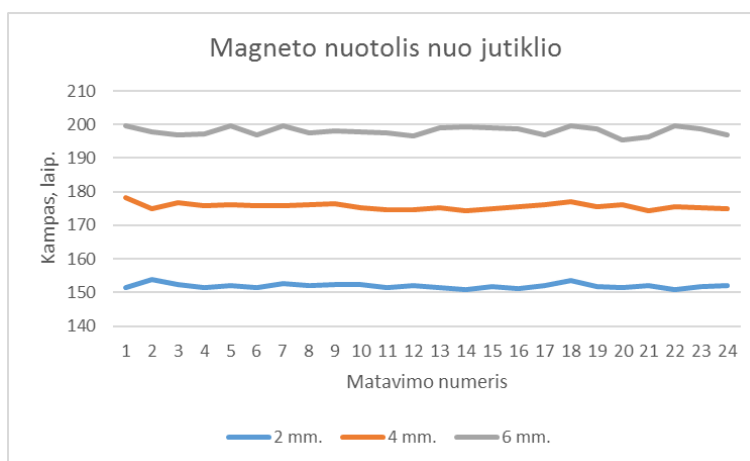
45 pav. Kampinės padėties tyrimo nr. 1 įrangos sujungimo schema: a) absoliutinis magnetinis enkoderis, b) inkrementinis enkoderis.

Atlikus programavimo darbus ir prijungus matavimo prietaisus prie valdiklio, pavyko užregistruoti abiejų naudojamų enkoderių kampines padėtis. Pavara atsitiktinai pasukama ir užregistruojami abiejų prietaisų rodmenys. Žemiau pateiktame paveiksle (žr. 46 pav.) matome bandymo rezultatus. Šiuo atveju norėjome įsitikinti, ar abiejų matavimo prietaisų rodmenys sutampa, tačiau iš grafike pateiktos informacijos matome, kad ne visais atvejais vertės sutampa. Reikalingas išsamesnis susidariusios situacijos tyrimas.

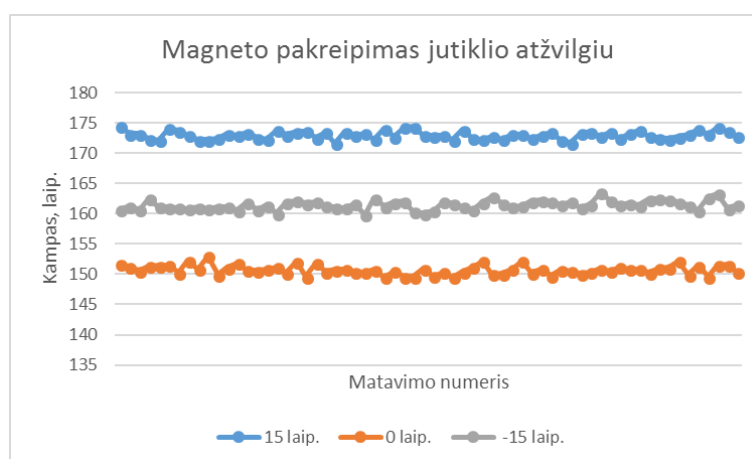


46 pav. Kampinės padėties duomenų registravimas ir mechaniškai susietų enkoderių parodymų palyginimas

Atliekant tolimesnius tyrimus susijusius su enkoderių rodmenų nesutapimo priežasčių paieška, atlikti magneto nuotolio nuo jautriosios zonos, magneto pokrypio enkoderio atžvilgiu padėties matavimų rezultatui vertinimai. Toliau pateiktuose paveiksluose (žr. 47-48 pav.) matome eksperimentų rezultatus. Magneto nuotolis nuo jautriosios zonos, pagal gamintojo rekomendacijas, yra apie 2mm. Eksperimento metu nuotolis didinamas kas 2 milimetrus. Iš magneto nuotolio nuo jutiklio grafike pateiktos informacijos matome, kad didinant atstumą, keičiasi jutiklio kampinės padėties suvokimas – 1mm/10laip. Analogišką situaciją matome ir magneto pakreipimo jutiklio atžvilgiu tyrime. Magnetą pakreipiamas 15 laipsnių abiem kryptimis nuo lygiagrečios pozicijos. Nuo šio pokrypio taip pat keičiasi enkoderio kampinės padėties suvokimas.

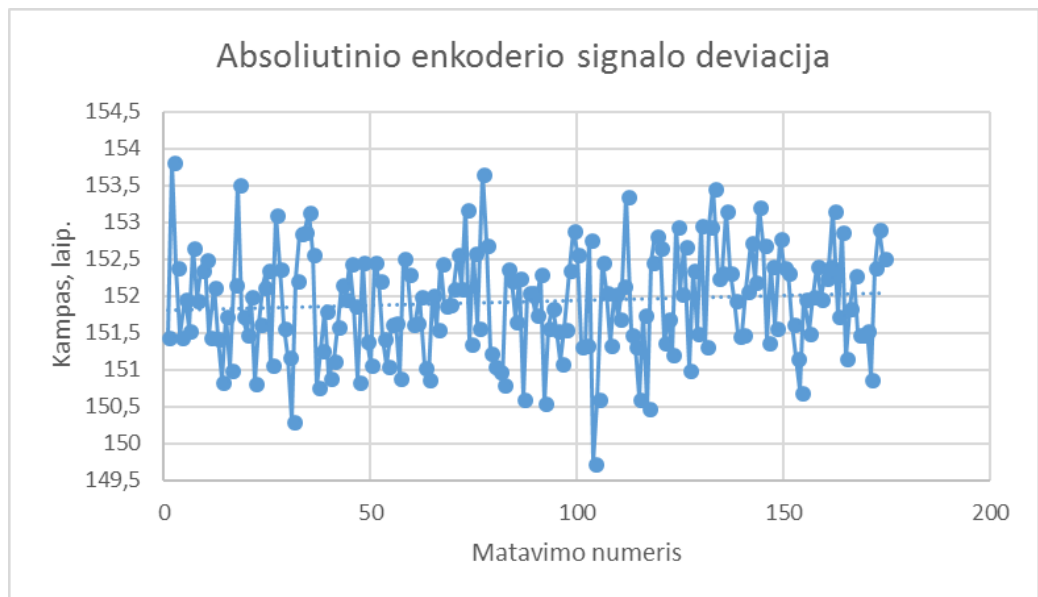


47 pav. Kampinės padėties duomenų registravimas, kai keičiamas magneto nuotolis nuo jautriosios jutiklio zonos



48 pav. Kampinės padėties duomenų registravimas, kai keičiamas magneto posvyris jautriosios jutiklio zonos atžvilgiu

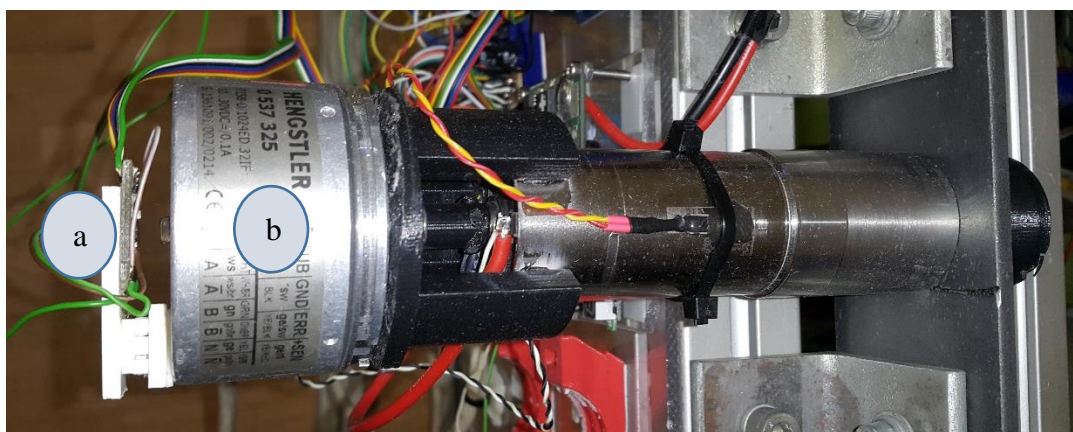
Aukščiau pateiktuose absoliutinio enkoderio kampinės padėties registravimo eksperimentuose pastebime signalo kreivės netiesiškumą – signalas/ matavimas nėra stabilus net stacionarioje ašies pozicijoje. Reikalingas išsamesnis tyrimas nusakantis rodmenų deviaciją stabilioje pozicijoje. Atlikus daugiau, nei šimto matavimų seką, kai buvo registruojama absoliutinio magnetinio enkoderio magneto kampinė padėtis, eksperimentą pastebėta didelė signalo deviacija. Toliau pateiktame paveiksle (žr. 49 pav.) matome užregistruotas kampinės padėties vertes laike. Vertė kinta nuo 153,83 iki 149,74 laipsnio padalos – skirtumas tarp maksimumo ir minimumo yra apie 4,09 laipsnio. Įvertinus realias sąlygas, kai magneto įtvirtinimui ant reduktoriaus ašies nenaudojamos spec. priemonės, negalime būti užtikrinti, kad magnetas yra centruotas ir statmenas jutiklio jautriosios zonos atžvilgiu. Eksperimentuose minėtų veiksnių įtaka yra reali. Neatliekant papildomų projektavimo darbų, kuriant magneto įtvaro ir jautriosios zonos centravimo magneto atžvilgiu konstrukcijos kūrimo, toks absoliutinio magnetinio enkoderio panaudojimas nėra tinkamas šiai aplikacijai.



49 pav. Absoliutinio enkoderio matavimų deviacija stacionarioje padėtyje

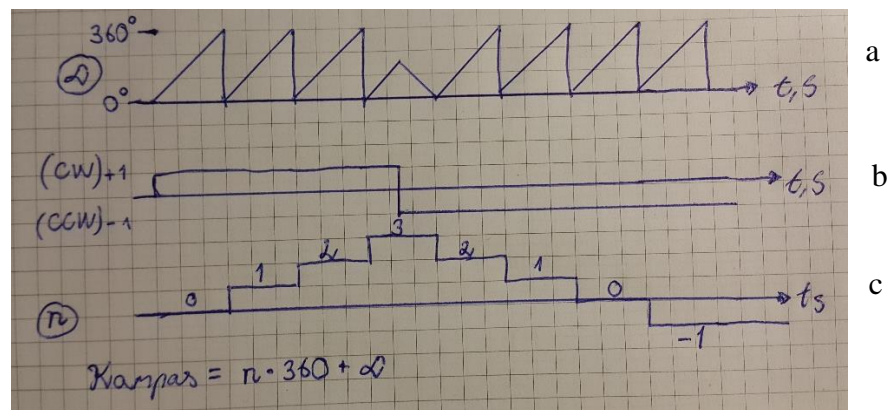
Antrojo kampinės padėties tyrimo metu įvertinsime mikrovaldiklio ir inkrementinio enkoderio pajėgumus, fiksuojant kampinę padėtį dideliu sukimosi greičiu (< 10000 aps/min). Šis enkoderis yra prijungtas prie dviejų mikrovaldiklio greitųjų įėjimų. Prisiminus tyrimo rezultatus apie valdiklio galimybes, kuriame atlikome išvadas, kad negalima nors vieno greitojo įėjimo kanalo komutuoti didesnių, nei 25kHz dažniu. Kai pavaros kampinis greitis, esant apkrovai, yra apie 6000 aps/min, arba 100 aps/s, inkrementinis enkoderis generuos 100kHz kintantį stačiakampį impulsą. Prijungus abu enkoderio išėjimus prie mikrovaldiklio, greitieji įėjimai bus komutuojami 200kHz dažnio signalu. Pagal anksčiau atliktus tyrimus galime teigti, kad naudojamas mikrovaldiklis nėra pajėgus fiksuoti ir interpretuoti taip greitai kintančio signalo.

Ties šuo etapu patekome į aklavietę, kai abu naudojami enkoderiai, turėję fiksuoti kampinę padėtį, nėra tinkami. Reikalingas inovatyvus sprendimas, įgalinantis fiksuoti kampinę padėtį bet kuriuos laiko momentu su didesne, kaip $0,5^\circ$ raiška. Po kurio laiko kilo idėja tyrimuose naudojamą absoliutinį enkoderį perkelti nuo reduktoriaus ašies, prie variklio ašies (žr. 50 pav.). Tuo atveju šio įtaiso deviacija reduktoriaus ašies atžvilgiu sumažėtų 16 kartų (redukcijos koef. 16:1). Tačiau šio sprendimo realizavimas išlieka iššūkiu, nes reikalingas programinis sprendimas, gebantis transformuoti daugybę kartų apsisukusio magneto kampinį pokytį į absoliučią reduktoriaus ašies padėtį.

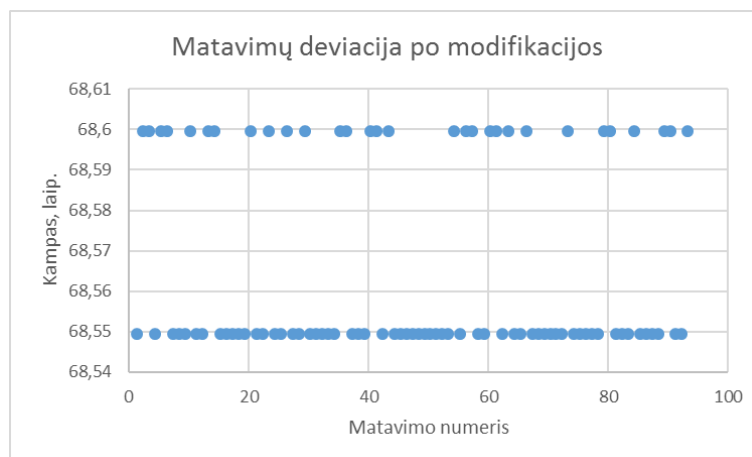


50 pav. Absoliutinio enkoderio tvirtinimo modifikacija: a) magnetinis absoliutinis enkoderis, b) inkrementinis encoderis

Sukurtas programinis sprendimas, leisiantis transformuoti variklio fiksuojamą kampinę padėtį į reduktoriaus absoliučią kampinę padėtį. Toliau pateiktame paveiksle pavaizduota šio sprendimo valdymo algoritmo koncepcija (žr. 51 pav.). Transformacija pagrįsta trimis kintamaisiais: kampine padėtimi variklio ašies atžvilgiu, ašies sukimosi kryptimi ir įvykusių magneto apsisukimų skaičiumi. Analizuojant magneto padėties pokytį nustatome variklio sukimosi kryptį. Analizuojant magneto kampo pokyčio virsmą iš 0 į 360 laipsnių, ar priešingai, skaičiuojame įvykusių pilnus apsisukimus. Turint šią informaciją galimas kampinės padėties transformavimas. Reduktoriaus ašies kampas lygus įvykusių apsisukimų ($n \cdot 360$) ir esamos magneto pozicijos (α) sumai. Sėkmingai atlikus programavimo darbus pakartotas eksperimentas, registruojant transformuotą padėties informaciją. Grafike „matavimų deviacija po modifikacijos“ matome verčių išsibarstymą ties 68,6 ir 68,55 laipsnio riba (žr. 52 pav.). Padėties vertė kinta tik 0,05 laipsnio – šis skaičius taip pat nusako naujos matavimo sistemos raišką. Šis rezultatas yra geresnis, nei tikėtasi. Tolimesniuose tyrimuose ir darbuose bus naudojama ši kampinės padėties matavimo koncepcija.



51 pav. Absolutinio enkoderio tvirtinimo ant variklio ašies valdymo koncepcija: a- magneto pozicija; b – magneto sukimosi kryptis; c – įvykusių pilnų apsisukimų

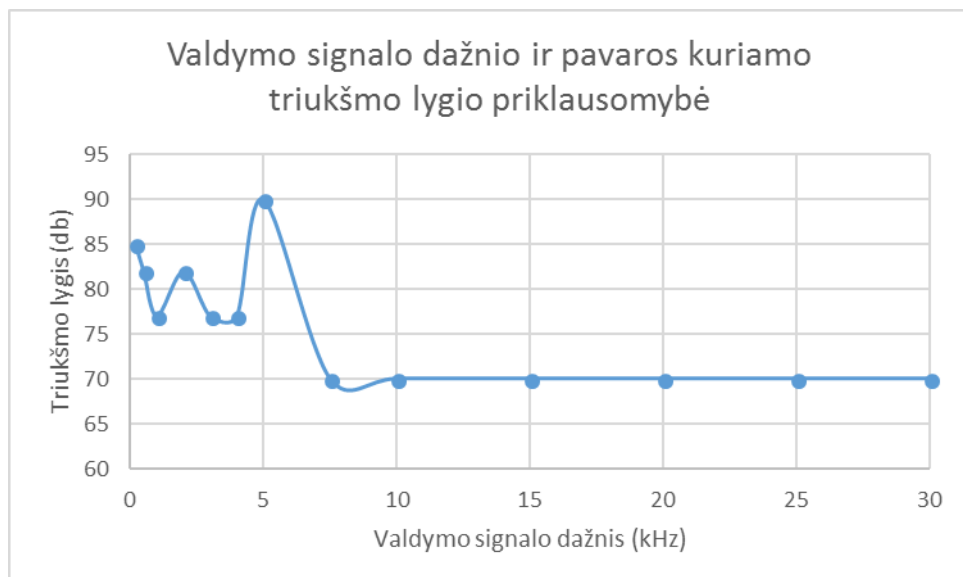


52 pav. Absolutinio enkoderio matavimų deviacija po modifikacijos

3.6. Poveikis aplinkai

3.6.1. Valdymo signalo dažnio ir triukšmo lygio priklausomybės tyrimas

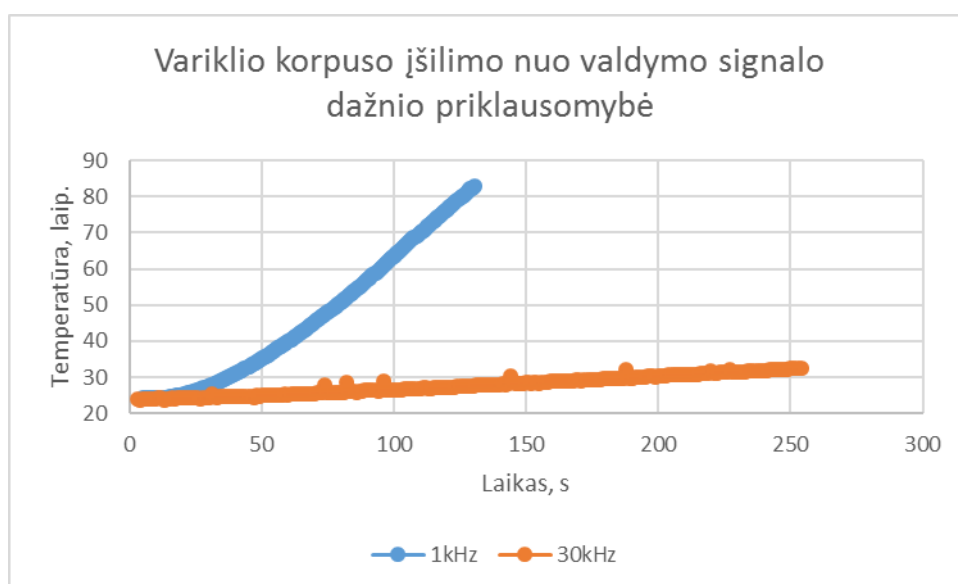
Kuriant prietaisą, svarbu į užduotį pažvelgti iš saugos, poveikio aplinkai ir kliento lūkesčių perspektyvų. Humanoido tipo roboto sudėtyje gali būti kelios dešimtys pavarų. Galime tik įsivaizduoti, kad tokia gausa pavienių įrenginių gali generuoti didelį foninį triukšmą. Prisimenant humanoido koncepciją, jo darbo zona yra greta žmonių. Triukšmas, kuris viršija *70db* ribą yra vertinamas, kaip garsas esantis virš komforto ribos. Toliau pateiktame paveiksle (žr. 53 pav.) matomas triukšmo lygio tyrimas, kai keičiamas pavaros valdymo signalo dažnis. Matavimas registruojamas kompiuteryje ir telefone esančiais mikrofonais metro nuotoliu nuo objekto naudojant „TrueRTA“ programinį paketą. Žmogus geba suvokti garsus, kurių dažnis iki *22kHz*. Didžiausią triukšmo lygį sukuriama, kai pavara valdoma žemesniu valdymo signalo dažniu. Eksperimento metu patirta, kad „ausiai nemaloniausias“ garsas yra nuo 4 iki 8kHz. Nors grafike matome, kad ties 10kHz riba triukšmo lygis nekinta, tačiau didinant valdymo signalo dažnį girdima vis aukštesnio dažnio triukšmas, kuris taip pat nesukelia malonių pojūčių. Rekomenduočiau rinkti aukštesnio dažnio, nei 22kHz valdymo signalo dažnį, siekiant pašalinti variklio inkaro pavijos vibracijų sukeltus garsus.



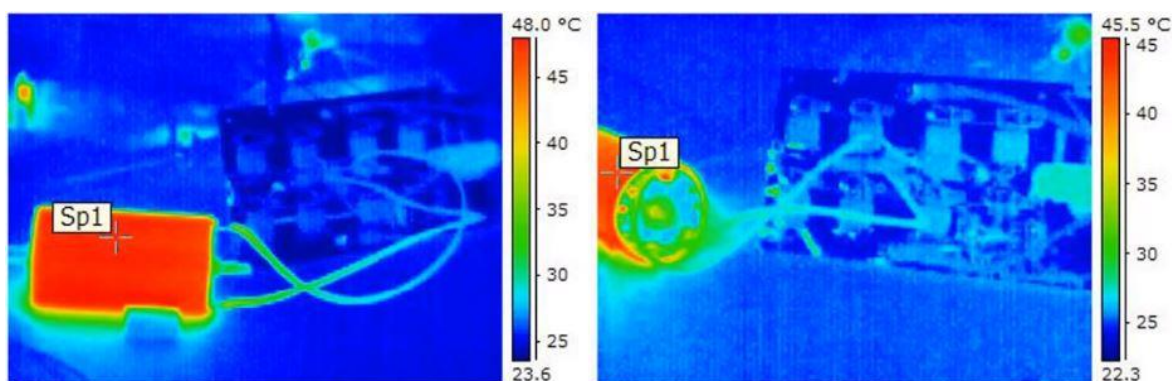
53 pav. Valdymo signalo dažnio ir triukšmo lygio tyrimas

3.6.2. Variklio korpuso įšilimo ir valdymo signalo dažnio priklausomybės tyrimas

Ankstesnių tyrimų rezultatuose matėme, kad variklio valdymo signalo dažnio įtaka nuostoliams egzistuoja. Šie nuostoliai virsta šilumine energija, kuri perduodama iš apvijos į orą ir iš oro į korpusą gali būti išmatuota ir įvertinta. Reikalingas praktinis tyrimas, pagrindžiantis teiginį, kad aukštesnis valdymo signalo dažnis gali sumažinti pavaros įšilimą. Termistoriumi, kuris pritvirtintas ant pavaros korpuso, pavarai veikiant matuojame korpuso temperatūrą. Žemiau pateiktame paveiksle (žr. 55 pav.) pavaizduoti eksperimento rezultatai. Iš grafike pateiktų rezultatų matome, kad naudojant žemesnio dažnio valdymo signalą pavara įšyla beveik du kartus greičiau. Siekiant išsiaiškinti, kuri konkreti pavaros vieta šyla labiausiai, buvo padaryta termonuotrauka su „Fluke TI200“ termokamera (žr. 56 pav.). Eksperimento metu pavara buvo valdoma 30kHz PWM signalu. Nuotraukoje matome darbinę pavaros temperatūrą. Labiau nei kitos zonos šyla visas cilindro paviršius.



55 pav. Variklio korpuso įšilimo ir valdymo signalo dažnio priklausomybė

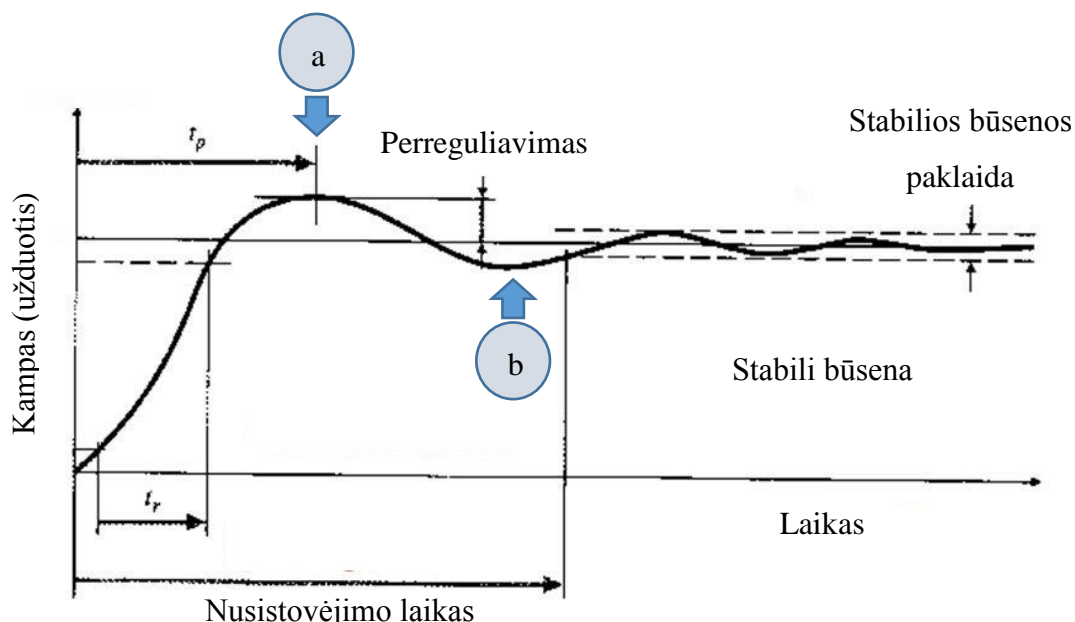


56 pav. Pavaros valdomos 30kHz dažnio valdymu signalu darbinė temperatūra

3.7. Proceso valdymas

3.7.1. Automatinio pavaros reguliatoriaus derinimas

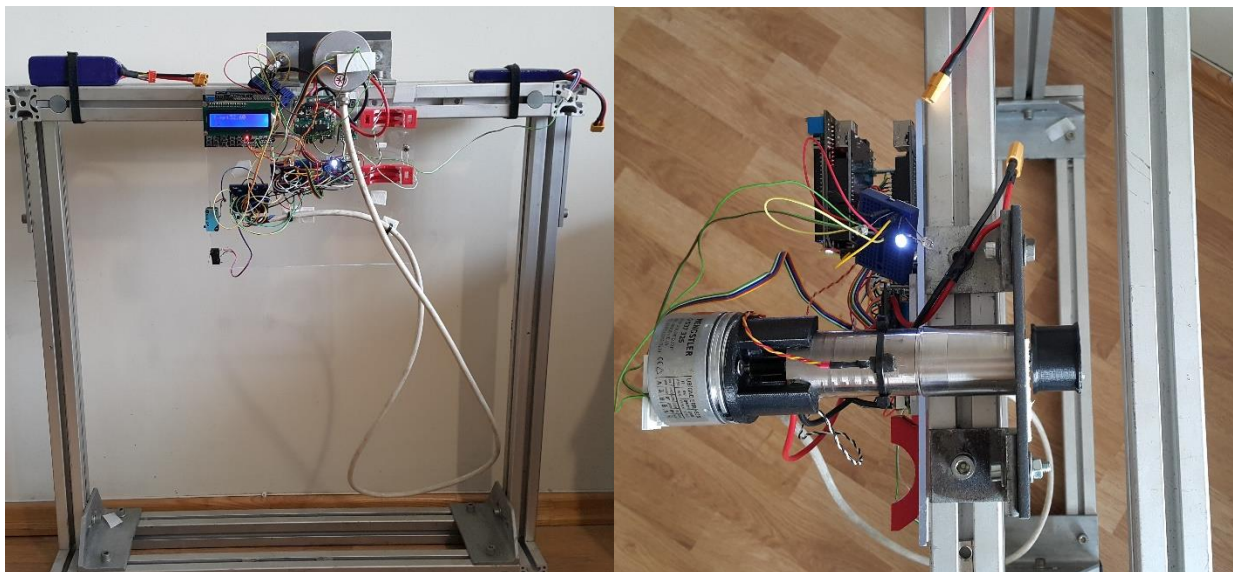
Literatūros apžvalgos dalyje buvo kalbama apie poreikį suteikti galimybę įrenginiams mokytis pagal jų pačių suvokimą. Daugeliu atvejų idealaus modelio analizės išvados nesutampa su realiai kuriama sistema. Tai nulemia įvairūs išoriniai ir vidiniai veiksniai, kurie nebuvo numatyti matematiniam modelyje. Praktiškesnis sistemos derinimo būdas yra tai atlikti jos pačios (realios sistemos) matavimų ir suvokimo ribose. Tuo atveju galimas rankinis derinimo būdas, kai sistemos parametrai keičiami palaipsniui ir stebimas reakcijos pokytis. Tokia derinimo procedūra reikalauja nemažai laiko ir pastangų. Vartotojas būtų mažiau apsunkinamas, jeigu sistema šį krūvį perimtų pati – gebėtų atlikti derinimo darbus savarankiškai. Tokios procedūros sukūrimas yra realus, tačiau taikymas gali būti ribotas. Toliau pateiktame paveiksle (žr. 57 pav.) pateikta automatinio reguliatoriaus derinimo procedūros koncepcija. Pavarai vykdant judesį su sistemos pradiniais parametrais, pavaros judesiui artėjant prie nusakymo tikslo pradedamas duomenų registravimas į masyvą per užduotą laiką. Analizuojant masyvo informaciją, surandamas pirmasis maksimumas ir minimumas po atskaitos taško kirtimo. Šių verčių skirtumas indikuoja apie sistemos perreguliavimo lygį. Pagal šį parametą priimami sprendimai keičiantys valdymo sistemos parametrus. Eksperimentas tęsiamas tol, kol pasiekiamas norimas stabilios būsenos paklaidos dydis, arba vartotojui nutraukus automatinio derinimo procedūrą.



57 pav. Pavaros reguliatoriaus automatinio derinimo procedūros koncepcija: a) pirmasis maksimumas po atskaitos taško kirtimo, b) pirmasis minimumas po atskaitos taško kirtimo

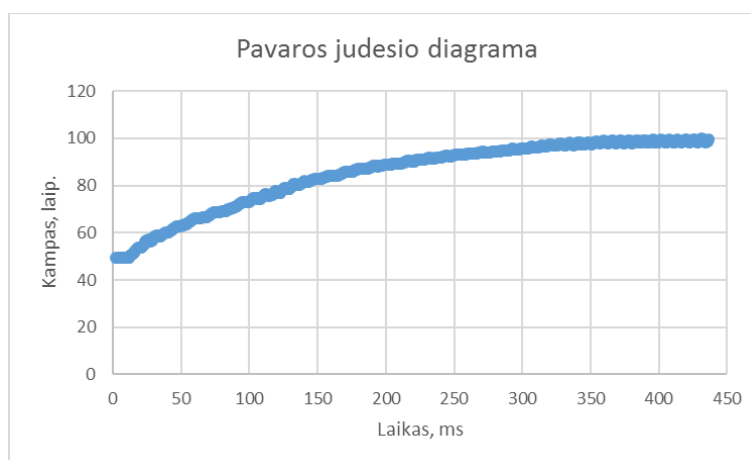
3.7.2. Regulatoriaus derinimo ir bandymo darbai

Prieš atliekant jėgos bandymus, pakeista bandymo stendo konstrukcija (žr. 58 pav.) Sukonstruotas rėmas iš aliuminio profilių, prie jo pritvirtinta elektros pavara ir valdymo plokštė. Pagamintas perėjimo elementas tarp reduktoriaus ašies ir eksperimente naudojamų įtvarų: ritinio, sverto. Šiuo stendu patikimai galime vykdyti svarmens pakėlimo operaciją, arba sverto su papildoma mase judinimo aplink ašį veiksmą.



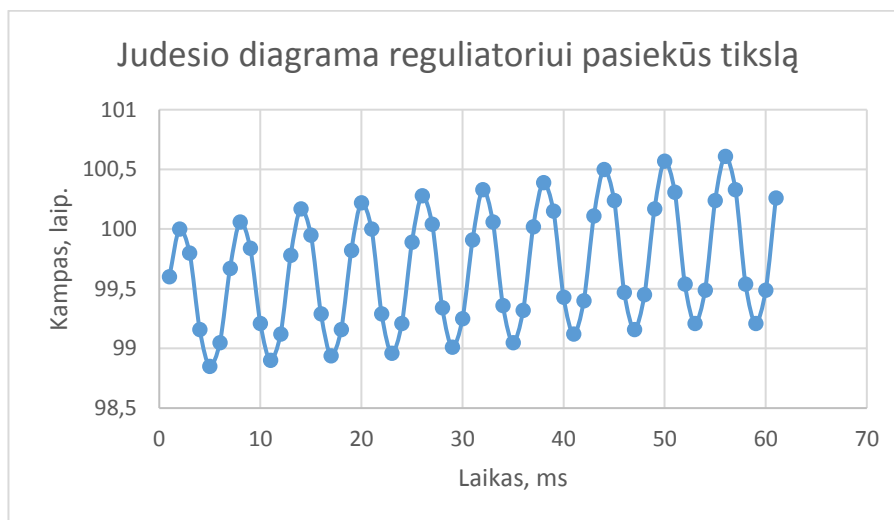
58 pav. Bandymų stendo konstrukcija

Atlikus regulatoriaus programavimo ir derinimo darbus, užregistruota pavaros judesio diagrama (žr. 59 pav.). Analizuojant šia kreivę galime įvertinti regulatoriaus darbą. Grafike nepastebime aiškių perreguliuavimo požymių.



59 pav. Pavaros reakcijos diagrama

Atidžiau nagrinėjant judesio diagramos kreivę, jai pasiekus stabilia būseną, pastebime laipsnio eigos (+0,5 laip.) švytavimus (žr. 60 pav.). Pavaros, kuri kuriama humanoido tipo robotui, toks sistemos stabilumas yra pakankamas. Grafikuose matoma judesio diagrama buvo gauta naudojant reguliatorių, kurį suderino automatinio reguliatoriaus derinimo funkcija (žr. 61 pav.).



60 pav. Pavaros reakcijos kreivės sritis ties nusistovėjusia būseną (laiko mastelis padidintas),

```
#include <PID_v1.h>
//-----
//#1 PID'as
double Setpoint1, Input1, Output1;
double Kp1 = 4.8, Ki1 = 2.9, Kd1 = 0.3;
PID myPID1(&Input1, &Output1, &Setpoint1, Kp1, Ki1, Kd1, REVERSE);
//-----
//#2 PID'as
double Setpoint2, Input2, Output2;
double Kp2 = 1.0, Ki2 = 0.5, Kd2 = 0.08;
PID myPID2(&Input2, &Output2, &Setpoint2, Kp2, Ki2, Kd2, REVERSE);
//-----
```

61 pav. Automatinės derinimo funkcijos pateiktos vertės suvestos į sistemą

Nagrinėjamos sistemos proceso (judesio) valdymas tampa labai sudėtingu, tinkamai neatlikus kitų veiksmų ir procedūrų valdymo atžvilgiu. Svarbu įvertinti realias sistemos galimybes ir derinti tolimesnius darbus neperžengiant leistinos ribos. Tinkamai registruojant pojūčius galimas sistemos reguliavimas atsižvelgiant į juos. Kuriant realią sistemą, nevalia pasikliauti vien tik proceso valdymo algoritmais – jų praktinis neveikimas gali būti įtakotas kitų vidinių ir išorinių aplinkos veiksnių. Integracinio pobūdžio projekto (kai apjungiami įvairūs sprendimai ir priemonės), rengimas ir vystymas pirmiausia privalėtų prasidėti nuo praktinių bandymų, įsitikinant pačių paprasčiausių metodų veiksmingumu. Tokio projekto tolimesnis vystymas galimas, kaip esamų metodų ir priemonių tobulinimas.

IŠVADOS

1. Atlikus literatūros analizę nustatyta, kad rinkoje egzistuojančių pavarų modulių pritaikomumas humanoido tipo robotų aplikacijai yra ribotas. Ši aplikacija reikalauja specifinių techninių ir funkcinių sprendimų pavaros modulyje, suteikiančių pojūtį apie pavaros darbą ir santykį su aplinka. Vertinant rinkoje siūlomų pavarų modulių technines ir funkcines savybes pastebėta, kad tai galima tiesiogiai susieti su modulyje naudojamų specifinių komponentų kiekiu ir kokybe. Tik tinkamos aparatūros integravimas į pavaros modulį gali suteikti galimybę realizuoti norimas valdymo ypatybes.
2. Sudarytas nuolatinės srovės variklio ir mechaniškai susietos apkrovos matematinis valdymo modelis Matlab Simulink terpėje, įvertinantis elektros variklio H-tilto, moduluoto valdymo signalo (PWM), jo nešančio signalo dažnio statines ir dinamines savybes pavaros valdyme.
3. Atlikti tyrimai naudojantis matematiniu modeliu ir eksperimentai su bandymu stendu:
 - Matematinio modelio tyrimo metu išmatuotas pavaros stabdymo laikas, kuris yra apie $2,3ms$. Nustatyta, kad srovės pokytis į mechaninį trikdį pastebimas tik po $1ms$.
 - Vertinant nuostolių dydžio priklausomybę nuo nešančio valdymo signalo dažnio, nustatyta, kad šiuo atveju naudojant didesnę, nei $50kHz$ dažnio PWM signalą, nuostoliai yra mažiausi. Parinktas $30kHz$ valdymo signalo dažnis atsižvelgiant į naudojamos aparatūros galimybes.
 - Matuojant pavaros generuojamą foninį triukšmą, jis yra didžiausias, kai pavara valdoma nuo $4-8kHz$ dažnio PWM valdymo signalu.
 - Parinkus ir išbandžius schemotechninio ir programinio filtrų kombinaciją, pavyko sumažinti 8,6 karto srovės ir 30 kartų įtampos registruojamų duomenų švytavimą.
 - Patobulinus kampinės padėties matavimo metodiką pasiekta 0,05 laipsnių diskretiškumas.
 - Vertinant naudojamo mikrovaldiklio galimybes, nustatyta, kad jos tam tikrais aspektais ribotos, tačiau pakankamos nagrinėjamai aplikacijai.
4. Sukurtas ir išbandytas pavaros valdymo algoritmas. Pritaikytas PID reguliatorius su grįžtamoju ryšiu. Tokio tipo valdymo struktūra geba užtikrinti sklandų pavaros valdymą. Suderinus reguliatoriaus parametrus nepastebimas sistemos perreguliavimas.
5. Sukurtas automatinis pavaros reguliatoriaus parametrų nustatymo metodas. Išbandžius šią procedūrą ir atliktus eksperimentinius bandymus nustatyta, kad automatinio reguliatoriaus parametrų nustatymo procedūra geba suderinti kontūrą. Pritaikius procedūros parinktus parametrus, pavaros reakcijos kreivėje nepastebimas perreguliavimas. Stabilioje reguliatoriaus būsenoje pastebimas 0,5 laipsnio švytavimas.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

- [1] DGUV-Information, „Collaborative robot systems“, 2017. Prieiga per internetą: http://www.dguv.de/medien/fb-holzundmetall/publikationen-dokumente/infoblaetter/infobl_englisch/080_collaborativerobotsystems.pdf.
žiūrėta [2018-05-15]
- [2] J. González-Quijano, M. Abderrahim, F. Fernández, ir C. Bensalah, „A kinodynamic planning-learning algorithm for complex robot motor control“, *2012 IEEE Conf. Evol. Adapt. Intell. Syst. EAIS 2012 - Proc.*, p. 80–83, 2012.
- [3] I. Transactions ir O. N. Biomedical, „Guest Editorial: Special Issue on“, *Inf. Forensics Secur. IEEE Trans.*, t. 1, nr. 1998, p. 970121, 2014.
- [4] D. Gong, J. Shao, Y. Li, ir G. Zuo, „Study of human-like locomotion for humanoid robot based on Human Motion Capture Data *“, p. 933–938, 2016.
- [5] M. Gautier, a. Jubien, ir a. Janot, „New iterative learning identification and model based control of robots using only actual motor torque data“, *2013 IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intell. Mechatronics*, p. 1436–1441, 2013.
- [6] Q. R. Dog, „BIONIC MECHANISM AND KINETIC CHARACTERISTIC“, 2008.
- [7] B. An, H. Kang, ir F. C. Park, „Grasp motion learning with Gaussian Process Dynamic Models“, *IEEE Int. Conf. Autom. Sci. Eng.*, p. 1114–1119, 2012.
- [8] Kawabata Yasutomo, M. Ryoji, ir S. Hirosumi, „Servo motor control apparatus“, 1991.
- [9] C. Mao-Hsin ir L. Ting-Ping, „SYSTEM AND METHOD FOR CONTROLLING MULTIPLE SERVO MOTORS“, 2009.
- [10] ROBOTIS, „AX SERIES SMART SERVO MOTORS“. Prieiga per internetą: <http://www.robotis.us/>.
žiūrėta [2018-05-15]
- [11] ROBOTIS, „DYNAMIXEL MX-106 smart actuator“. Prieiga per internetą: <http://www.robotis.us/dynamixel-mx-106r/>.
žiūrėta [2018-05-15]
- [12] H. Guo, Z. Zhang, ir J. Li, „Manipulator system design based on DC reduction servo motor“, *2011 Int. Conf. Electron. Commun. Control. ICECC 2011 - Proc.*, p. 887–889, 2011.
- [13] F. 3863 series D. Motor, Prieiga per internetą: https://www.faulhaber.com/fileadmin/Import/Media/EN_3863_CR_DFF.pdf.
žiūrėta [2018-05-15]

- [14] HIP4081A - High Frequency Full Bridge FET Driver. Prieiga per internetą: <https://www.intersil.com/content/dam/intersil/documents/hip4/hip4081a.pdf>
žiūrėta [2018-05-15]
- [15] AUIRFS3006-7P - HEXFET Power MOSFET. Prieiga per internetą: <https://www.infineon.com/dgdl/auirfs3006-7p.pdf?fileId=5546d462533600a4015355b6571e14b0>
žiūrėta [2018-05-15]
- [16] ACPL-P481 - High-speed ACPL-P481/W481 optocoupler. Prieiga per internetą: <https://www.mouser.com/ds/2/678/V02-2122EN-DS-ACPL-P481-21Dec20120-909205.pdf>
žiūrėta [2018-05-15]
- [17] AS5147P – Magnetic encoder. Prieiga per internetą: https://www.mouser.com/ds/2/588/AS5147P-TS_EK_AB_Operation-Manual_Rev.1.0-948139.pdf
žiūrėta [2018-05-15]
- [18] ACS709 Current Sensor Carrier -75A to +75A. Prieiga per internetą: <https://www.pololu.com/product/2199>
žiūrėta [2018-05-15]
- [19] MCP3201 - 12-Bit A/D Converter with SPI Serial Interface. Prieiga per internetą: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21290D.pdf>
žiūrėta [2018-05-15]
- [20] ATmega328 - 8-bit microcontroller based on the AVR® enhanced RISC architecture. Prieiga per internetą: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P_Datasheet.pdf
žiūrėta [2018-05-15]
- [21] E. R. C. S, E. H. Binugroho, M. A. Rosyidi, R. S. Dewanto, ir D. Pramadihanto, „Kalman Filter for Angle Estimation using Dual Inertial Measurement Units on Unicycle Robot“, p. 256–261, 2016.

PRIEDAI

Pavaros valdymo programos kodas:

```

#include <SPI.h>
#include <PWM.h>
int32_t frequency = 30000;
#include <PID_v1.h>
//-----
//#1 PID'as
double Setpoint1, Input1, Output1;
double Kp1 = 4.8, Ki1 = 2.9, Kd1 = 0.3;
PID myPID1(&Input1, &Output1, &Setpoint1, Kp1, Ki1, Kd1, REVERSE);
//-----
//#2 PID'as
double Setpoint2, Input2, Output2;
double Kp2 = 1.0, Ki2 = 0.5, Kd2 = 0.08;
PID myPID2(&Input2, &Output2, &Setpoint2, Kp2, Ki2, Kd2, REVERSE);
//-----
#include <KalmanFilter.h>
KalmanFilter kalmanADC1(0.01, 0.01, 0.01);
KalmanFilter kalmanADC2(0.01, 0.01, 0.01);
KalmanFilter kalmanPOS(0.01, 0.01, 0.01);

#define SIZE 26
#define BAR_SIZE 40
int R1 = 38300;
int R2 = 9900;
float daliklis = (float)R2 / (R1 + R2);

const int SS1 = 7;
const int SS2 = 6;
const int SS3 = 5;

unsigned int result1 = 0;
unsigned int result2 = 0;
byte inByte1 = 0;
byte inByte2 = 0;

float voltage;
float current;
float position;
//-----
int uzduotis1 = 100;

```



```

int uzduotis2 = 13000;
float greitis = 50;
float srove = 3;
unsigned long laikas1;
unsigned long laikas2;
int pad_laik[4] = {0, 0, 0, 0};
//-----
float currPoss;
int rev;
byte dir;
int angle;
float absPulse;
float absAngle;
long pulse;
//-----

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  SPI.setBitOrder(MSBFIRST);
  SPI.begin();
  //-----
  myPID1.SetOutputLimits(-abs((int)Output2), abs((int)Output2));
  myPID1.SetSampleTime(1);
  myPID1.SetMode(AUTOMATIC);
  //-----
  myPID2.SetOutputLimits(-255, 255);
  myPID2.SetSampleTime(1);
  myPID2.SetMode(AUTOMATIC);
  //-----
  pinMode(SS1, OUTPUT);
  pinMode(SS2, OUTPUT);
  pinMode(SS3, OUTPUT);
  digitalWrite(SS1, HIGH);
  digitalWrite(SS2, HIGH);
  digitalWrite(SS3, HIGH);
  //-----
  pinMode(2, INPUT);
  pinMode(3, INPUT);
  pinMode(4, INPUT);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), blink, FALLING);
  //-----
  InitTimersSafe();
  SetPinFrequencySafe(9, frequency);
  pinMode(10, OUTPUT);
}

```

```

pinMode(9, OUTPUT);
pinMode(8, OUTPUT);
pinMode(A5, INPUT_PULLUP);
pinMode(A4, INPUT_PULLUP);
digitalWrite(8, HIGH);

//-----
laikas2 = millis();
myPID1.SetOutputLimits(-abs((int)greitis), abs((int)greitis));
//myPID2.SetOutputLimits(-abs((int)srove), abs((int)srove));
drive(0);
}

//*****
void loop() {
  if (digitalRead(A5) == 0) Setpoint1 = 100;
  if (digitalRead(A4) == 0) Setpoint1 = 50;
  Atnaujinti();
  Input1 = currPoss;
  myPID1.Compute();
  drive(Output1);
  Plotter();
}

//*****

void Atnaujinti()
{
  //-----Itampa (V 0:25)-----
  digitalWrite(SS1, LOW);
  result1 = SPI.transfer(0x00);
  result1 = result1 << 8;
  inByte1 = SPI.transfer(0x00);
  result1 = result1 | inByte1;
  digitalWrite(SS1, HIGH);
  result1 = result1 >> 1;
  result1 = result1 & 0b0000111111111111;
  voltage = (float)result1 / 4096.0 * 5.10 / 0.16;
  //-----Srove (I -70:+70)-----
  digitalWrite(SS2, LOW);
  result2 = SPI.transfer(0x00);
  result2 = result2 << 8;
  inByte2 = SPI.transfer(0x00);
  result2 = result2 | inByte2;
  digitalWrite(SS2, HIGH);
}

```

```

result2 = result2 >> 1;
result2 = result2 & 0b0000111111111111;
float outputValue = (float)result2 / 4096.0 * 5.0;
current = (float)((outputValue - 2.5125) / 0.028);
//-----Kampas (I 0:+360)-----
SPI.beginTransaction(SPISettings(10000000, MSBFIRST, SPI_MODE1));
digitalWrite(SS3, LOW);
delayMicroseconds(1);
SPI.transfer16(0xFFFF);
digitalWrite(SS3, HIGH);
digitalWrite(SS3, LOW);
delayMicroseconds(1);
int angle = SPI.transfer16(0xC000);
digitalWrite(SS3, HIGH);
SPI.endTransaction();
angle = (angle & (0x3FFF));
//float pos1 = float(angle * 360.000 / 16384.000);
position = (float)angle * 360UL / 16384UL;

//-----
voltage = kalmanADC1.update(voltage, voltage);
current = kalmanADC2.update(current, current);
position = kalmanPOS.update(position, position);
//-----
absAngle = (float)(360 / 16 * rev) + (position / 16);
absPulse = (int) (16384 / 16 * rev) + (angle / 16);
currPoss = (float)absPulse * 360UL / 16384UL;
//-----
}
void Greitis() {
  if (millis() - laikas2 >= 20) {
    pad_laik[1] = currPoss;
    pad_laik[3] = micros();
    greitis = abs((pad_laik[1] - pad_laik[0]) / float(pad_laik[3] - pad_laik[2])) * 10E5;
    pad_laik[0] = pad_laik[1];
    pad_laik[2] = pad_laik[3];
    laikas2 = millis();
  }
  Input2 = greitis / 10;
  myPID2.Compute();
}
void drive(int b)
{
  if (b < 0)
  {

```

```

digitalWrite(10, HIGH);
//analogWrite(6, 255 - abs(b));
pwmWrite(9, 255 - abs(b));
}
if (b > 0)
{
digitalWrite(10, LOW);
//analogWrite(6, abs(b));
pwmWrite(9, abs(b));
}

if (b == 0)
{
digitalWrite(10, LOW);
digitalWrite(9, LOW);
}
}
void Plotter()
{
Serial.print(" ");
Serial.print(currPoss);
Serial.print(" ");
Serial.print(Output1);
Serial.print(" ");
Serial.println(Output2);
}
void blink()
{

bool temp = digitalRead(3);
if (temp==LOW)
{
dir=1;
rev=rev+1;
}
if (temp==HIGH)
{
dir=-1;
rev=rev-1;
}
}

```