



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Pažangios sistemos, skirtos sportui ir reabilitacijai, kūrimas ir tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Deividas Zelickas

Projekto autorius

Dr. Valdas Grigaliūnas

Vadovas

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Pažangios sistemos, skirtos sportui ir reabilitacijai, kūrimas ir tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Valdymo technologijos (6211EX014)

Deividas Zelickas

Projekto autorius

Dr. Valdas Grigaliūnas

Vadovas

Doc. dr. Gytis Petrauskas

Konsultantas

Doc. dr. Tomas Tekorius

Recenzentas

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Deividas Zelickas

Pažangios sistemos, skirtos sportui ir rehabilitacijai, kūrimas ir tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

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

Deividas Zelickas

Patvirtinta elektroniniu būdu

Zelickas, Deividas. Pažangios sistemos, skirtos sportui ir reabilitacijai, kūrimas ir tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas dr. Valdas Grigaliūnas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: mechatronika, prototipas, treniravimas, reabilitacija, servo pavara.

Kaunas, 2022. 53 p.

Santrauka

Baigiamojo projekto metu sukurtas mechatroninės treniravimo sistemos prototipas, skirtas aukšto meistriškumo trumpojo nuotolio bėgikų greičio bei jėgos treniruotėms ir reabilitacijai po traumų. Darbo metu apžvelgiamos panašios jau egzistuojančios sistemos, sporto moksle naudojamos bėgimo parametrų matavimo technologijos bei teoriniai trumpo nuotolio bėgimo modeliavimo energetiniu bei biomechaniniu pagrindais metodai. Projekto eigoje kuriamam prototipui parinkta ir eksperimentiškai ištirta servo pavara, tyrimų metu nustatant tinkamiausią jos valdymo režimą sąsajoje su žmogumi. Taip pat suprojektuota ir visa valdymo sistema – parinktas bei pagal sukurtus algoritmus suprogramuotas PLV, realizuota komunikacija duomenų apsikeitimui tarp pagrindinio valdiklio bei mikrokompiuterio su vartotojo sąsaja. Darbo prieduose pateikiama dalis valdiklio programinio kodo bei sistemos elektrinė schema. Iškeltiems tikslams išpildyti reikalingam bėgimo duomenų nuskaitymo dažniui nustatyti atlikti eksperimentiniai tyrimai, remiantis šių bandymų rezultatais pagrįstas formuojamų Modbus TCP protokolo užklausų dažnumas. Sukurtas prototipas išbandytas atlikus palyginamuosius bandymus su kitomis sertifikuotomis sistemomis – laboratorijoje su sistema Qualisys ir realiomis sąlygomis su sistema Optojump Witty. Ištirtas sukurto prototipo tikslumas, funkcionalumas, taikymo galimybės. Sistema ištestuota atletų treniruočių metu, surinkti duomenys apdoroti literatūros apžvalgoje pateikiamo biomechaninio sprinto modeliavimo metodo pagalba, pateikiami šios analizės rezultatai. Darbo pabaigoje pagal analizės rezultatus sumodeliuojamas sistemos išėjimo parametras – optimalus individualizuotas krūvis, kurį nustačius sportininko treniruotės su sistema teoriškai leistų pasiekti geriausius rezultatus treniruojant raumenų jėgą.

Zelickas, Deividas. Development and research of an advanced system for sport and rehabilitation. Master's Final Degree Project / supervisor Dr. Valdas Grigaliūnas; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: automation, mechatronics, prototype, training, rehabilitation.

Kaunas, 2022. 53 pages.

Summary

During the final project, a prototype of a mechatronic training system was developed for high-speed short-distance runner speed and strength training and rehabilitation after injuries. During the work, similar existing systems, running parameters measurement technologies used in sports science and theoretical sprint modeling methods are reviewed. In the course of the project, a servo drive was selected and experimentally investigated for the prototype to be developed, determining the most suitable control mode in its interface with humans. The entire control system has also been designed - the PLC has been selected and programmed according to the developed algorithms, communication for data exchange between the main controller and the microcomputer with the user interface has been implemented. The appendixes contain part of the controller program code and the electrical diagram of the system. Experimental studies were performed to determine the sampling frequency of the running data required to meet the objectives, Modbus TCP protocol queries were programmed to be generated based on the results of these tests. The developed prototype was tested in comparative tests with other certified systems - in the laboratory with the Qualisys system and under real conditions with the Optojump Witty system. The accuracy, functionality and application possibilities of the developed prototype have been investigated. The system was tested during the training of athletes, the collected data were processed with the help of the biomechanical sprint modeling method presented in the literature review, and the results of this analysis are presented. At the end of the work, the output parameter of the system is modeled according to the results of the analysis - the optimal individualized load, after which the athlete's training with the system would theoretically allow to achieve the best results in the field of strength.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Santrumpų ir terminų sąrašas	11
Įvadas.....	12
1. Literatūros apžvalga	13
1.1. Panašios treniravimo sistemos.....	13
1.1.1. 1080 Sprint	13
1.1.2. h/p cosmos comet 3p	14
1.2. Bėgimo parametrų matavimo technologijos.....	15
1.2.1. Greičio matavimas.....	15
1.2.2. Jėgos matavimas.....	18
1.3. Sprinto matematinis modeliavimas	21
1.3.1. Energijos balanso modelis.....	21
1.3.2. Biomechaninis modelis	22
2. Prototipo projektavimas	25
2.1. Komponentų sąrašas	25
2.2. Servo variklis ir enkoderis.....	26
2.3. Servo stiprintuvas	26
2.4. Programuojamas loginis valdiklis ir keitikliai.....	27
2.5. Mikrokompiuteris	28
2.6. Elektrinių komponentų instaliavimas treniruoklyje	28
3. Sistemos valdymui reikalingų parametrų nustatymas.....	29
3.1. Servo pavaros valdymo metodo nustatymo tyrimai	29
3.1.1. Valdymas <i>point table</i> metodu.....	29
3.1.2. Valdymas <i>positioning</i> metodu.....	30
3.1.3. Valdymas <i>speed control</i> ir <i>torque control</i> metodais	34
3.2. Sistemos prototipo dažninės charakteristikos nustatymas ir rezonanso slopinimas.....	35
3.3. Reikiamo duomenų nuskaitymo dažnio nustatymas	37
3.4. Duomenų apsikeitimo protokolai	38
4. PLV programinis kodas	41
4.1. Saugaus sistemos perėjimo tarp atliekamų funkcijų ir rimties išpildymas.....	41
5. Palyginamieji bandymai su kitomis sistemomis	43
5.1. Witty ir Alex7.....	43
5.2. Qualisys ir Alex7.....	44
6. Duomenų analizė ir bėgimų modeliavimas	47
6.1. Išvystomo greičio ir pagreičio analizė.....	47
6.2. Išvystomos jėgos ir galios analizė	48
6.3. Išvestinės priklausomybės ir optimalaus krūvio parinkimas.....	50
Išvados	52
Literatūros sąrašas	53
Priedai.....	54
1 priedas. EPLAN Elektrinė schema	54

2	priedas. Bėgimų duomenys, gauti duomenis nuskaitant skirtingais laiko intervalais (nuo viršaus): 200 ms, 100 ms, 50 ms, 25 ms, 10 ms, 5 ms ir 1 ms	64
3	priedas. Treniruočių veikimo schemas	67
4	priedas. PLV programinio kodo dalis ST ir FBF kalbomis	69
5	priedas. Matlab duomenų analizės programinis kodas	71

Lentelių sąrašas

- 1 lentelė. Elektrinių ir automatikos komponentų sąrašas
- 2 lentelė. Parinktos servo pavaros techniniai parametrai
- 3 lentelė. Trijų nagrinėjamų greičio kreivės sudarymo atvejų parametrai
- 4 lentelė. Komunikacijai Modbus/TCP protokolu naudojamų PLV kintamųjų sąrašas, jų adresai ir tipai
- 5 lentelė. Bandymų su OptoJump Witty ir kuriama sistema Alex7 rezultatai

Paveikslų sąrašas

- 1 pav. Sistema 1080 Sprint
- 2 pav. 1080 Sprint sistemos vartotojo sąsaja ir pateikiami grafikai
- 3 pav. Sistema h/p cosmos comet 3p
- 4 pav. Modifikuotas bėgtakis, skirtas atletų jėgos ir greičio matavimams
- 5 pav. Qualisys sistema atliekamų matavimų pavyzdys
- 6 pav. Inerciniai greičio matavimo prietaisai. Iš kairės: montuojamas ties masės centru, montuojamas 12 taškų bei apyrankės tipo
- 7 pav. Microgate Optojump Next sistema
- 8 pav. Microgate Witty sistema
- 9 pav. Modifikuotu bėgtakiu išmatuotos išvystomos jėgos dedamosios
- 10 pav. Jėgos plokštės. Iš kairės: integravimas manieže, integravimas į starto bloką bei pati plokštė
- 11 pav. Slėgio jutikliai vidpadyje
- 12 pav. Bėgimo metu išvystomai jėgai matuoti sukurtas sportinis batelis
- 13 pav. Sportiniu bateliu išmatuotos jėgos kreivės prieš ir po kalibracijos
- 14 pav. Energijos balanso lygtimi paremto modelio palyginimas su eksperimentiniais duomenimis
- 15 pav. Atleto išvystomos jėgos išskaidymas į dedamąsias
- 16 pav. Optimalios treniruočių apkrovos nustatymo grafinis metodas
- 17 pav. HG-SR152 Servo pavara, momento-greičio priklausomybė ir MR-J4-200A-RJ servo stiprintuvas
- 18 pav. FX5UC-32MT-DSS-TS programuojamas loginis valdiklis bei analogas-kodas ir kodas-analogas keitikliai
- 19 pav. Sistemos elektrinių komponentų sujungimo vaizdas
- 20 pav. Galutinis prototipo vaizdas
- 21 pav. Point table metodo aprašas
- 22 pav. Greičio (mėlyna linija) ir sukimo momento (raudona linija) grįžtamasis ryšys Point Table metodu
- 23 pav. Naudotas Pulse Control funkcinis blokas
- 24 pav. Sumodeliuoti polinomial, realizuojami panaudojant impulsų pločio moduliaciją (angl. PWM)
- 25 pav. Bandymų rezultatai su pirmuoju polinomu

- 26 pav. Bandymų rezultatai su antruoju polinomu
- 27 pav. Bandymų rezultatai su trečiuoju polinomu (grafikas kairėje be signalo filtravimo)
- 28 pav. Bandymų rezultatai atliekant treniruotę su palengvinimu, valdant speed control metodu
- 29 pav. Naudoto enkoderio impulsų detektavimo ir enkoderio signalo išėjimo į optoporą schemas
- 30 pav. Bandymų rezultatai atliekant treniruotę su palengvinimu, valdant torque control metodu
- 31 pav. Sistemos prototipo Bode diagrama
- 32 pav. Valdymo signalo perdavimo servo pavarai schema
- 33 pav. Nustatyti juostinių filtrų parametrai MR Configurator2 paketo lange
- 34 pav. Greičio kitimo kreivė, gauta duomenis nuskaitant 5 ms intervalais
- 35 pav. Duomenų apsikeitimo tarp valdiklių schema
- 36 pav. 5 bėgimų intervalų tarp duomenų laiko atskaitų histograma
- 37 pav. PLV programos struktūra ir programos vykdymo laikai
- 38 pav. Servo pavaros elgesys priklausomai nuo valdymo signalo įtampos ir nurodytos krypties
- 39 pav. Saugaus sistemos perėjimo tarp sukimosi, stabdymo ir rimties fazių programinis išpildymas
- 40 pav. Testų su OptoJump Next, Witty ir kuriama sistema schema
- 41 pav. Qualisys sistema KTU Biomechanikos laboratorijoje
- 42 pav. Pirmojo bėgimo abiejų sistemų fiksuoto greičio rezultatai
- 43 pav. Antrojo bėgimo abiejų sistemų fiksuoto greičio rezultatai
- 44 pav. Greičio iš eksperimentinių duomenų ir aproksimuoto pagal modelį greičio kreivės
- 45 pav. Pagreičio iš eksperimentinių duomenų ir aproksimuoto pagal modelį pagreičio kreivės
- 46 pav. Iš eksperimentinių duomenų apskaičiuotos jėgos ir aproksimuotos pagal modelį jėgos kreivės
- 47 pav. Iš eksperimentinių duomenų apskaičiuotos ir iš aproksimuotų duomenų apskaičiuoto jėgų santykio kitimo kreivės
- 48 pav. Iš eksperimentinių duomenų apskaičiuotos galios ir aproksimuotos pagal modelį galios kreivės
- 49 pav. Jėgos – greičio ir galios – greičio priklausomybės
- 50 pav. Optimalaus krūvio nustatymo grafikas

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

EBM – energijos balanso modelis;

PLV – programuojamas loginis valdiklis;

ST – struktūruotas tekstas;

FBD – funkcinių blokų diagrama;

Terminai:

Sprintas - trumpo nuotolio bėgimas, kurio metu reikia visą distanciją nubėgti kaip įmanoma greičiau.

Sprinteris - trumpo nuotolio bėgimo varžybų dalyvis.

Prototipas - pirmasis, ankstyviausias ko nors pavyzdys, pagal kurį daromi kiti tos rūšies serijiniai daiktai.

Rezonansas - virpesių amplitudės padidėjimas virpesių sistemoje, kai ją veikiančios išorinės žadinančiosios jėgos dažnis lygus sistemos savųjų virpesių dažniui;

Įvadas

Kaip žinia, naujos technologijos, skirtos sveikatingumui ir fiziniam aktyvumui, yra viena populiariausių ir perspektyviausių inovacijų sričių. Tiek sporto moksle, tiek ir kineziterapijoje siekiama kurti ir naudoti įrankius, leidžiančius kiekybiškai įvertinti žmogaus fizines galimybes. Didžioji dalis esamų sistemų yra skirtos arba parametru įvertinimui fiksuotoje statinėje padėtyje, pvz. dinamometro suspaudimas arba kojos ištiesimas su pasipriešinimu, arba išvystomų absoliutinių dydžių įvertinimui, pvz. maksimalus šolis į aukštį, didžiausias siekiamas atstumas. Judėjimo parametru dinamikos (t.y. kitimo judant) įvertinimas yra sudėtingas uždavinys naudojant tradicines matavimo priemones. Be to, absoliuti mažuma sporto sistemų geba vienu metu ir treniruoti, ir atlikti analitinius matavimus. Žvelgiant giliau, kol kas nėra sukurta sistema, kuri gebėtų surinkti analitinius duomenis apdoroti ir čia pat panaudoti treniravimo programai sudaryti. Būtent tokią inovaciją sprinterių treniravimui ir siekiama sukurti šiuo projektu. Projekto ašis – moderni mechatroninė sistema, kuri per ant būgno suvyniotą trosą ir variklį tiek matuotų atleto išvystomą greitį bei iš greičio kitimo apskaičiuotų kitus išvestinius kinematinis parametrus, tiek ir gebėtų realizuoti atleto treniruotes bėgant su tam tikru pasipriešinimu (angl. resistive training) arba su tam tikru įgreitinimu (angl. overspeed training). Sistemos konstrukcija ir veikimo principas leistų be jokių pakeitimų nuosekliai realizuoti abu veikimo būdus. Matavimų metu su ta pačia sistema surinkti duomenys būtų panaudojami atleto matematinio modelio kūrimui, kurio pagrindu ir būtų sudaromos treniruočių programos pagal tam tikrus treniruočių tikslus modifikuojant esamą modelį siektinam tikslui nustatyti. Tokiu būdu sistemos taikymas būtų tinkamas tiek sveikiems atletams, siekiantiems identifikuoti ir tobulinti savo rezultatus, tiek ir atsistatymui po traumų, matavimų metu identifikuojant atsiradusį disbalansą raumenyse arba prarastus jėgos rodiklius ir taip sudarant programą šių problemų sprendimui.

Projekto tikslas – sukurti mechatroninės sistemos, skirtos sprinterių treniravimui ir reabilitacijai, prototipą bei iširti jos tikslumo ir pritaikymo galimybes.

Projekto uždaviniai:

1. Atlikti panašių treniravimosi sistemų ir mokslinės literatūros kinematinų bėgimo parametru nustatymo tema apžvalgą;
2. Papildyti esamą mechaninę bazę elektriniais komponentais bei realizuoti prototipo valdymo dalį;
3. Eksperimentiškai identifikuoti tinkamiausius sukurtos prototipo valdymo ir duomenų surinkimo nustatymus;
4. Iširti sukurtos sistemos prototipo tikslumą ir tinkamumą eksperimentiškai palyginant gautus rezultatus su kalibruotų sistemų rezultatais;
5. Išanalizuoti surinktus realių bėgimų duomenis ir modeliavimo pagalba parinkti optimalius treniruočių krūvius;

1. Literatūros apžvalga

Pasirinkta projekto tema yra praktinio pobūdžio, be to, išsikelti uždaviniai apima kelias skirtingas valdymo technologijų mokslo šakas, tad literatūros apžvalgą sudaro į atskirus segmentus tematiškai suskirstytų šaltinių analizė. Visų pirma apžvelgiamos kelios panašios jau sukurtos treniravimo sistemos. Antra, apžvelgiami tradiciniai sporto moksle taikomi bėgimo parametrų – greičio, jėgos, galios, žingsnių – matavimo būdai ir naudojamos technologijos. Trečia, kadangi projekto eigoje planuojama matavimų duomenis apjungti į vieną matematinį modelį, apžvelgiami keli skirtingi sprinto matematinio modeliavimo metodai. Galiausiai, visas sistemos funkcijas suplanuota apjungti moderniu modeliu paremtu valdymo algoritmu, tad apžvegiama bendra numatyto metodo teorija bei panašaus pritaikymo pavyzdžiai.

1.1. Panašios treniravimo sistemos

Tokios treniravimo sistemos rinkoje yra pakankamai naujas reiškinys, tad pilnai išvystytų ir komercializuotų pavyzdžių yra vos 2. Pirmasis – 1080 Sprint, sukurtas Švedijoje, antrasis – h/p cosmos comet 3p, sukurtas Vokietijoje.

1.1.1. 1080 Sprint

Tai 2015 metais Švedijos inžinierių pristatyta treniravimo sistema, skirta sprinterių arba komandinio sporto, tokio kaip futbolas ar amerikietiškas futbolas, atletų treniravimui. Sistemą sudaro Omron 1,5 kW servo pavara, sujungta su vyniojimo būgnu, ant būgno suvyniotas valas, bei valdymo elektronika. Visa tai patalpinta į sandarų transportavimui paruoštą korpusą. Pagal techninę specifikaciją, sistema gali pasiekti 14 m/s valo vyniojimo greitį, valo ilgis 90 m, didžiausias leistinas pastovus pasipriešinimas siekia 15 kg, 10 sekundžių galima išvystyti 30 kg jėgą, tris sekundes – 45 kg. Pati sistema sveria 29 kilogramus, bendras ilgis 1004 mm, plotis 330 mm, aukštis 216 mm. Jėgos, greičio ir galios duomenys nuskaitomi 333 Hz dažniu, prie sistemos prisijungiama planšetės ar nešiojamo kompiuterio pagalba. Informacijos apie valdymo algoritmus nėra pateikiama.



1 pav. Sistema 1080 Sprint

Vertinant sistemos svorį, sukurta sistema yra ganėtinai sunki transportuoti (atsižvelgiant į tai, kad vienas tokių sistemų privalumų yra mobilumas). Kita vertus, treniruotės metu sistemai suteikia stabilumo veikiant išorinėms jėgoms, atsirandančioms atleto bėgimo metu. Vertinant kritiškai, abejonių kelia poreikis bėgimo duomenis nuskaityti tokiu aukštu dažniu, kadangi sistema yra pakankamai inertiška, o žmogaus išvystomas greitis ar jėga taip greitai (3 ms intervalais) nekinta (pavyzdžiui, reakcijos laikas laikomas geru, jei reaguojama per 0,1 sekundės). Pagal kūrėjų išleistą pristatomąjį leidinį[1], sistema gali veikti tiek treniruojantis su pasipriešinimu, tiek su įgreitinimu. Dirbant su pasipriešinimu, pasipriešinimo jėga gali būti tiek pastovi, tiek ir kintama pagal planą. Be to, pats pasipriešinimas gali būti realizuotas trimis skirtingais metodais: įprastu, t.y. imituojant inercijos pasireiškimą, izotoniniu, kuomet inercija sumažinama iki minimumo, bei spyruokliniu, kuris

imituoja inerciją, tačiau valą laiko visad įtemptą. Bėgimo duomenys pateikiame ekrane, išvedant greičio (jėgos, galios, pagreičio) grafikus, x ašyje atidedant distanciją arba laiką. Taip pat nustatoma pasipriešinimo jėgos ir išvystomo greičio tarpusavio priklausomybė.



2 pav. 1080 Sprint sistemos vartotojo sąsaja ir pateikiami grafikai

Sistema yra sėkmingai paleista į rinką, naudojama tiek sporto komandų bei atletų, tiek ir mokslininkų sporto srityje. Apibendrinimui galima teigti, jog šis įrenginys yra aukšto techninio išvystymo lygio, populiarus, tačiau treniruoklio naudojimas vis dar reikalauja gilių trenerio duomenų analizės žinių bei laiko. Sistemos atliekami matavimai neturi sąsajos su sistemos treniravimo funkcijomis, duomenys pateikiami be palyginimų bei išvadų. Be to, pakankamai aukšta treniruoklio kaina (17 500\$).

1.1.2. h/p cosmos comet 3p

Antroji sistema, sukurta vokiečių įmonės „h/p cosmos“. Prieš apžvelgiant sistemos parametrus ir funkcionalumą, galima drąsiai teigti, jog ši sistema savo gebėjimais kardinaliai skiriasi nuo 1080 Sprint sistemos. Pradedant nuo panašių dalykų, sistemą sudaro 2 kW servo variklis, galima atlikti treniruotes tiek su įgreitinimu, tiek su pasipriešinimu, maksimalus sistemos greitis lygus 14,72 m/s, o didžiausia pasipriešinimo jėga lygi 30 kg. Vienintelis šio treniruoklio privalumas yra tas, kad bendras valo ilgis yra 160 m, o tai leidžia atlikti treniruotes, kurių bėgimo distancija iki 100 m ilgio. Pagrindiniai ir ženklūs šios sistemos trūkumai yra keli. Visų pirma, ši sistema valdoma dviem potenciometais (greičio ir jėgos nustatymas nuo 0 iki 100 % pagal žinomas ribas) bei mygtukais ant paties treniruoklio, nėra jokios sąsajos su kompiuteriu. Tokiu būdu sistema negali atlikti jokių matavimų bei pateikti grįžtamojo ryšio, kitaip tariant, nėra jokių duomenų. Antrasis trūkumas yra maitinimo šaltinis – reikalingas trifazis 400 voltų kintamos įtampos šaltinis. Kadangi prietaisas turi būti mobilus, ganėtinai keblu rasti jungtį prie tokio tinklo konkrečioje treniruotės vietoje manieže ar stadione. Trečias trūkumas yra prietaiso svoris. Anot techninės specifikacijos, grynas prietaiso svoris be transportavimo dėžės siekia 184 kilogramus. Toks svoris yra ženkliai per didelis lyginant tiek su švedų sistema, tiek ir apskritai mobilumo prasme. Ši sistema yra trumpesnė, tačiau platesnė bei aukštesnė: bendras ilgis – 750 mm, plotis – 1080 mm, aukštis 840 mm.



3 pav. Sistema h/p cosmos comet 3p

Apibendrinimui galima daryti išvadą, jog ši sistema yra neišmani, technologiškai ženkliai paprastesnė nei tiek prieš tai apžvelgta sistema, tiek kuriama šio projekto metu. Nors treniruotes iš sportininko pusės abi sistemos gali realizuoti panašiai, šiai sistemai trūksta grįžtamojo ryšio, vartotojo sąsaja ir valdymas primityvūs, išvaizda primena pramoninį prietaisą, o ne sportui skirtą modernų įrenginį.

1.2. Bėgimo parametrų matavimo technologijos

Siekis kiekybiškai išmatuoti bėgimo parametrus, tokius kaip maksimalus išvystomas greitis arba pagreitis, didžiausia jėga bei galia, arba žingsnio ilgis ir dažnis, sporto moksle egzistuoja seniai, ir tokiems matavimams atlikti inžinerija turi ką pasiūlyti. Tiesa, skirtingai nei kuriama sistema šio projekto rėmuose, tokios matavimų technologijos dažniausiai yra skirtos tik matavimams ir neturi nieko bendro su treniruotėmis, tačiau būtina į jas atsižvelgti tam, kad sukurta sistema gebėtų atlikti matavimus ne prasčiau nei minėti matavimo prietaisai. Plačiąja prasme, visus matavimo metodus galima skirti į dvi dideles grupes – matavimai, gebantys išmatuoti greitį, bei matavimai, skirti nustatyti išvystomą jėgą.

1.2.1. Greičio matavimas

Bėgimo greitis gali būti nustatomas mažiausiai trimis skirtingais būdais – tiesiogiai, iš pagreičio duomenų bei iš žingsnių ilgio (ir laiko) duomenų. Tiesiogiai greitis gali būti matuojamas arba bėgant ant bėgtakio, arba naudojant vaizdo kameras ir sekant žymenų, priklijuotų charakteringuose kūno taškuose, judėjimą. Galima rasti kelis komercinius dideliems greičiams pritaikytus bėgtakius, pvz. EOS Medical arba jau minėtas h/p cosmos, tačiau išsamiausiai toks bėgtakio pritaikymas ir mokslinis eksperimentas aprašytas J.B. Morin, P. Samozino ir kt. 2010 metų straipsnyje[2]. Mokslininkai siekė sukurti sistemą, kuri vieno bėgimo metu galėtų įvertinti tiek išvystomą jėgą, tiek greitį (kitais tariant, apskaičiuoti sportininko galią). Jėgos matavimo principas išsamiau aprašytas jėgos matavimo skiltyje. Tyrėjai pasirinko 2.53 m naudingo ilgio ir 0.54 m pločio bėgtakį su 4 kW bešepetėliu varikliu, greičio tikslumas $\pm 1\%$. Greitis matuojamas pagal tai, kiek bėgtakį nuo 0 m/s bėgdamas įgreitina bėgikas. Eksperimento metu sportininkas valų iš nugaros pritvirtintas prie atramos, kad visa išvystoma jėga būtų naudojama bėgimo juostai judinti. Prieš eksperimentą bėgimo takeliui suteikiamas pastovus minimalus sukimo momentas taip, kad ant juostos stovint atletui per 5 s juostos

poslinkis būtų 2 cm. Tokiu būdu pats variklis įveikia trintį, ir sportininko jėga naudojama tik įgreitinimui. Starto momentas fiksuojamas nuo 0,2 m/s juostos judėjimo greičio.



4 pav. Modifikuotas bėgtakis, skirtas atletų jėgos ir greičio matavimams

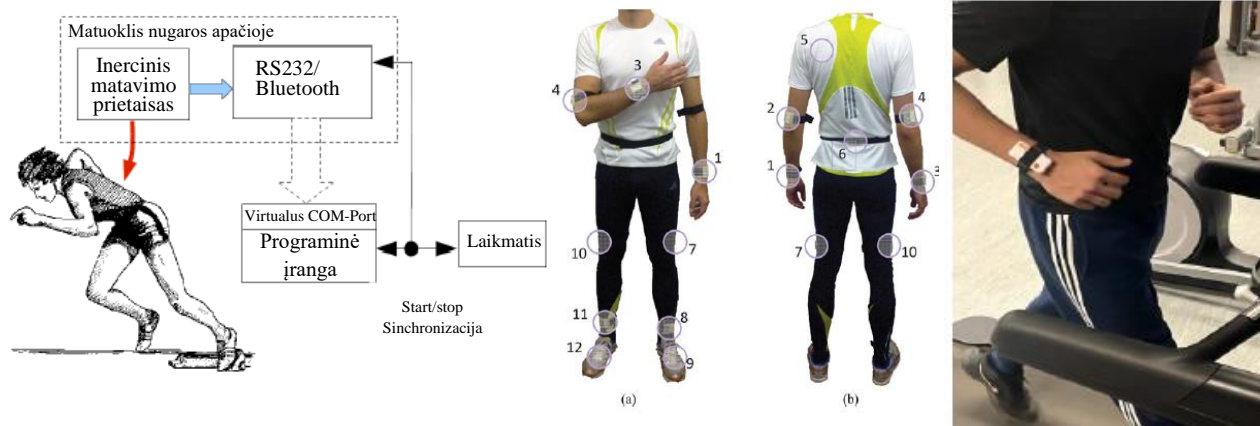
Antrasis tiesioginis būdas – vaizdo kameros su žymenimis. Tokiu matavimo metodu yra paremta švedų sukurta sistema Qualisys. Šią sistemą galima naudoti tiek bėgimams ant bėgtakio, tiek ir bėgant realiomis sąlygomis. Naudojamos stroboskopinės infraraudonųjų spindulių kameros ir sferiniai skirtingų dydžių šviesą atspindintys žymikliai. Priklausomai nuo vaizdo kameros tipo ir žymiklių skersmens, galima fiksuoti judesius iki 40 m atstumu nuo kameros. Kamerų skaičius praktiškai nėra ribojamas. Nors laboratorinėmis sąlygomis bėgant ant bėgtakio gali pakakti ir 5 kamerų visiems žymikliams apimti, realiomis sąlygomis kamerų skaičius gali viršyti ir 100, priklausomai nuo bėgimo atstumo. Kamerų vaizdai apdorojami programine įranga, fiksuojamos žymenų koordinatės, vizualizacijoje pateikiamos kiekvieno žymiklio judėjimo trajektorijos, išsami informacija apie jų poslinkius, greičius ir panašiai[3]. Aukšto dažnio režimu kameros gali fiksuoti iki 1040 kadrų per sekundę. Nors tokia sistema labiau skirta pačiai bėgimo technikai vertinti, lygiagrečiai galima įvertinti ir išvystomus greičio bei pagreičio parametrus.



5 pav. Qualisys sistema atliekamų matavimų pavyzdys

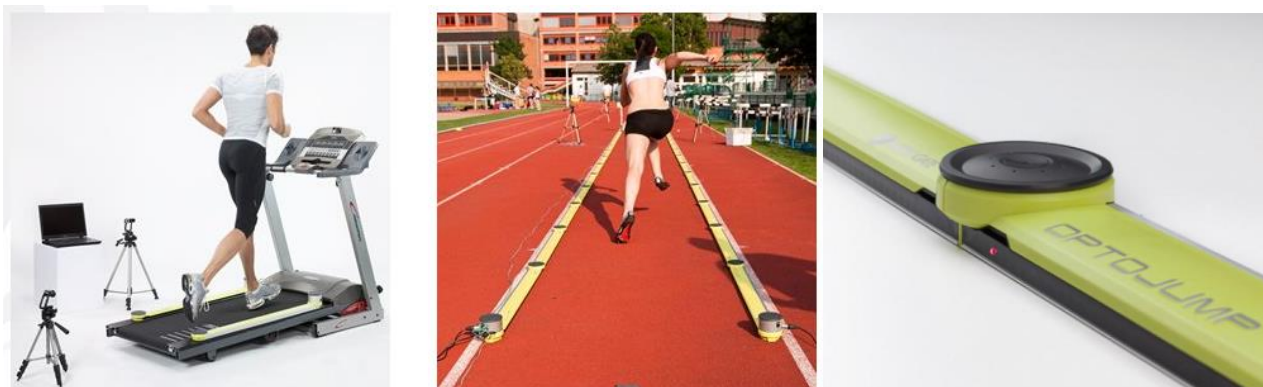
Trečiasis metodas naudoja sukauptus pagreičio kitimo duomenis momentiniam greičiui apskaičiuoti. Pagreičio duomenys dažniausiai kaupiami naudojant inercinius jutiklius, dėvimus skirtingose kūno vietose. Dažniausiai jutikliai montuojami arba apyrankių pavidalu ant riešo, arba diržo pavidalu ties kūno masės centru (juosmeniu), arba ant sportbačių (fiksuojant pėdos judesį). Inercinį jutiklį sudaro MEMS akselerometras, giroskopas ir magnetometras. Fiksuojamas pagreitis x, y bei z ašyse, pagreičio vektoriaus modulis randamas geometriškai susumavus šias dedamąsias. Greitis iš šio pagreičio vektoriaus gali būti randamas keliais skirtingais metodais: įprastiniu, kuomet pagreitis integruojamas laiko atžvilgiu[4], išvestiniu, kuomet iš pagreičio duomenų taip pat išskaičiuojamas

žingsnio ilgis, dažnis ir panašūs parametrai[5], bei moderniais metodais, pvz. pritaikius specialiai apmokytus neuroninius tinklus[6]. Vertinant tokių matavimo metodų tinkamumą svarbu atkreipti dėmesį į jų tikslumą. Kadangi inerciniais prietaisais matuojamas ne greitis, o pagreitis, ir greitis yra išskaičiuojamas, atsiranda paklaidos. Be to, labai svarbu, kur montuojami jutikliai ir kokį tiksliai greitį jie matuoja. Rinkoje galima rasti technologiškai pažangių inercinių matavimo sistemų, tačiau atsižvelgiant į atletų išvystomus greičius ir siekį tiksliai išmatuoti jų bėgimo parametrus, tokios sistemos turi trūkumų lyginant su tiesioginiais matavimo būdais.



6 pav. Inerciniai greičio matavimo prietaisai. Iš kairės: montuojamas ties masės centru, montuojamas 12 taškų bei apyrankės tipo

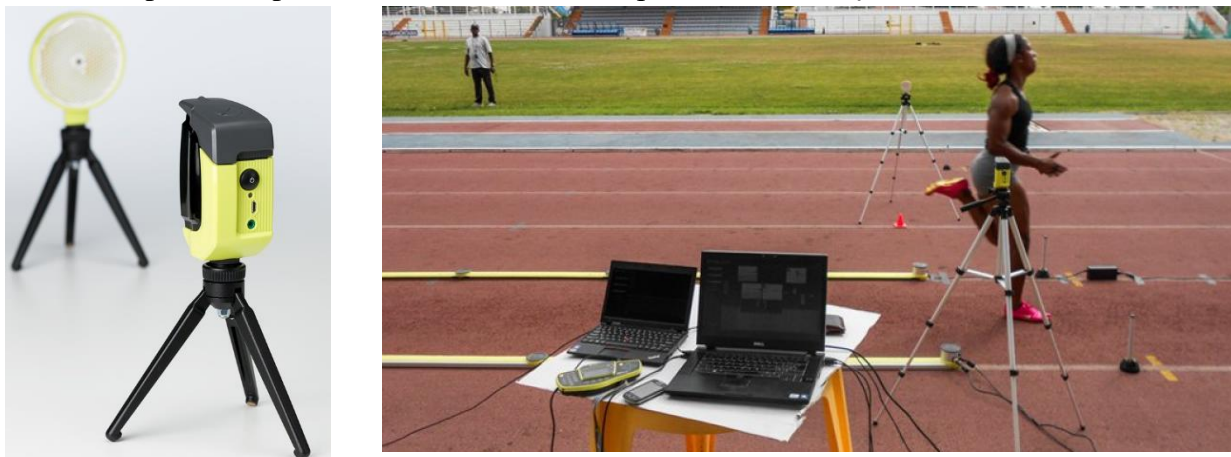
Paskutinis metodas yra optiniai jutikliai, fiksuojantys laiko atskaitas, tačiau greitis tokiu atveju yra tik išvestinis dydis. Žingsnių fiksavimu paremtos sistemos naudoja siūstuvo ir imtuvo tipo optinius jutiklius, veikia 2D erdvėje ir yra montuojamos lygiagrečiai bėgimo trajektorijai. Žymiausia tokio tipo sistema yra OptoJump Next, sukurta kompanijos Microgate.



7 pav. Microgate OptoJump Next sistema

Sistemą sudaro moduliniai matavimo blokai, kurie gali būti montuojami tiek ant bėgimo takelio, tiek ir stadione ar manieže. Veikimo principas ganėtinai paprastas – kontakto su žeme metu atleta pėda sutrikdo optinio signalo perdavimą tarp siūstuvo ir imtuvo, taip fiksuojant žingsnio momentą. Sistema veikia 1000 Hz dažniu, tikslumas 1,0416 cm (96 LED viename metre). Maksimalus tokios sistemos ilgis 100 m, kuris yra pakankamas sprinto matavimams. Tokios sistemos trūkumas yra jos kaina – 1 metro kaina siekia 3 tūkst. dolerių. Sistemos pagalba gali būti nustatoma visa tiksli informacija apie žingsnius ir atsispyrimą (ilgis, dažnis, kontakto trukmė ir t.t.), taip pat iš laiko tarp žingsnių ir distancijos išskaičiuojamas ir bėgimo greitis.

Kartu su Microgate OptoJump Next sistema viename komplekte dažnai naudojama ir Microgate Witty sistema, susidedanti iš optinių siūstuvų bei atšvaitų, sumontuotų ant trikojų stovų skersai bėgimo takelio, taip tam tikrais atstumais vienas nuo kito sukuriant optinius vartus. Atletui kertant vartus signalas pertraukiamas ir fiksuojama laiko atskaita. Tokia sistema fiksuoja starto ir finišo laikus bei atkarpų tarp optinių vartų įveikimo laikus. Witty sistema veikia bevieliu būdu 150 metrų atstumu nuo specialaus pulto, fiksavimo vėlinimas apie 1 milisekundę.

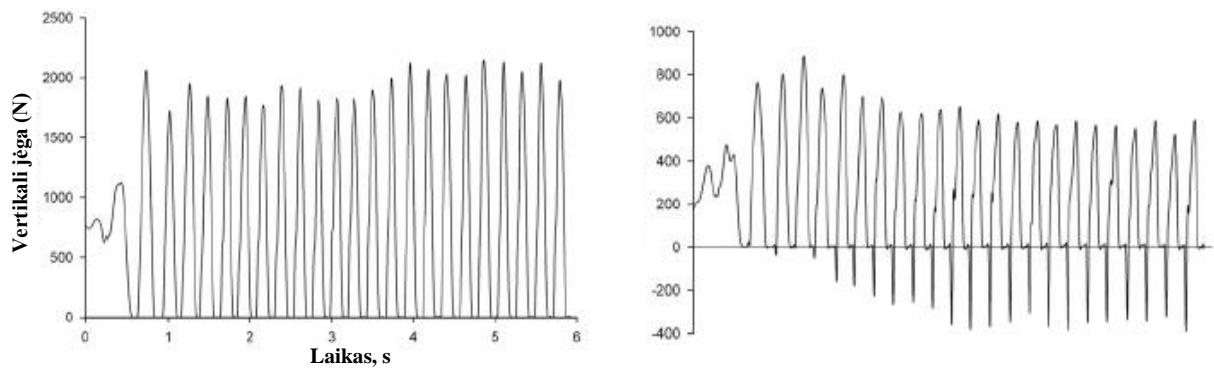


8 pav. Microgate Witty sistema

Apibendrinant galima teigti, jog šių sistemų pagrindinis privalumas yra tikslios laiko ir kiekvieno žingsnio ilgio atskaitos, ir nors tokia sistema puikiai tinka žingsninėms charakteristikoms nustatyti, skaičiavimo metu nustatomas greitis yra vidutinis, be to, nėra tikslių pagreičio duomenų, kurie gali būti panaudoti kitiems išvestiniams dydžiams skaičiuoti. Projekto metu kuriama sistema greičio kreivės svyravimų pavidalu taip pat leis identifikuoti dalį žingsninių charakteristikų, tokių kaip žingsnių dažnumas, žingsnio ilgis bei laikas tarp žingsnių.

1.2.2. Jėgos matavimas

Bėgimo metu išvystoma jėga gali būti nustatoma tiek panaudojant išorinius, tiek ir ant charakteringų kūno vietų pritaissomus jutiklius. Tiesioginiai matavimai gali būti atlikti tiek bėgant ant bėgtakio, tiek ir realiomis sąlygomis, be to, gali būti sumontuoti tiek ant bėgimo atramos, tiek ir dėvimi pačio sportininko. Kalbant apie matavimus bėgant ant bėgtakio, tinka jau minėtas greičio matavimo dalyje mokslinis tyrimas[2]. Tyrimo metu bėgtakis sumontuotas ant vientiso metalinio rėmo, o pastarasis pritvirtintas prie grindų panaudojant 4 Kistler KI9077b pjezoelektrinius jėgos keitiklius. Svarbus akcentas tyrimo metu buvo ir specialiai išlietos betoninės grindys, kurios maksimaliai padidino grindų, kaip jutiklių atramos, standumą ir tvirtumą. Panaudojant minėtus jutiklius, buvo matuojamos jėgos visose trijose ašyse – x ir y ašyse iki 10 kN, z ašyje iki 60 kN. Jutiklių duomenys buvo nuskaitomi 1000 Hz dažniu, kuomet vertikali jėga viršydavo 30 N kontakto ribą, ir fiksuojami 6 s po starto (kuomet greitis viršydavo 0,2 m/s).



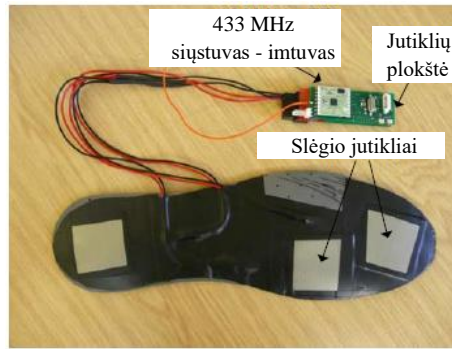
9 pav. Modifikuotu bėgtakiu išmatuotos išsvystomos jėgos dedamosios

Antrasis tiesioginis metodas, kuomet matavimai atliekami realiomis sąlygomis lengvosios atletikos manieže arba stadione, realizuojamas panaudojant specialias jėgos matavimo plokštes. Tokių plokščių panaudojimas išsamiai aprašomas keliuose P. Samozino, J. B Morin ir kt. straipsniuose[7], [8]. Tyrimuose naudotos to paties gamintojo Kistler jėgos matavimo plokštės KI 9067 su įmontuotais pjezoelektriniais jėgos keitikliais, plokštės ilgis 1,2 m, plotis 0,6 m. Iš šešių tokių plokščių suformuota vientisa 6,6 m ilgio platforma, montavimo metu įleista po maniežo grindimis ir padengta įprasta danga. Tyrimo metu analizuota atletų išsvystoma jėga žingsnio metu įgreitėjimo po starto etape. Jutiklių duomenys nuskaitomi 1000 Hz dažniu. Plokščių gamintojo Kistler naujausiame leidinyje galima rasti kelių skirtingų dydžių bei maksimalių matuojamų jėgų (nuo 2,5/5 kN iki 10/20 kN horizontalioje/vertikalioje plokštumose) plokščių. Taip galima tokiu principu matuoti ne tik žingsnių bėgimo metu jėgą, bet ir atsispyrimo nuo starto bloko jėgą. Tokie specialiai modifikuoti blokai randami tiek Kistler leidinyje, tiek ir aprašyti P. Iyer bei R. W. Brennan 2017 metų straipsnyje[9]. Kanados mokslininkų aprašomas starto blokas papildytas Arduino Uno mikrovaldikliu ir taip pat pjezoelektriniais jutikliais. Apibendrinant galima daryti išvadą, jog dėl tiesioginio į atramą perduodamos jėgos matavimo šis matavimo būdas turėtų būti pats tiksliausias, nes matavimas geriausiai atliepia siekiamą įvertinti parametą - atsispyrimo nuo atramos jėgą.



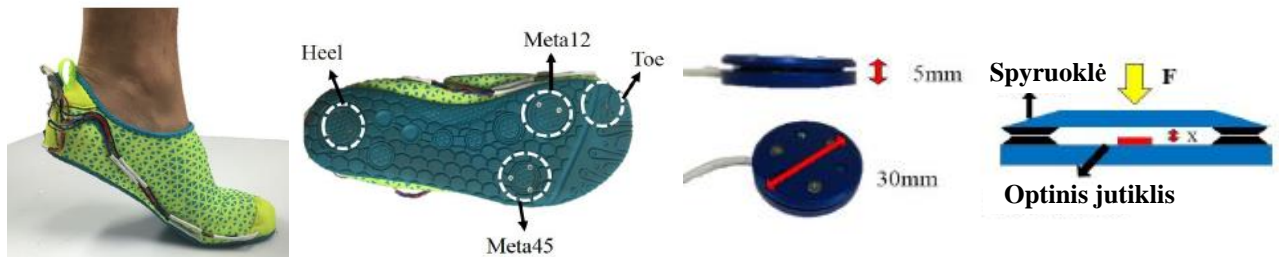
10 pav. Jėgos plokštės. Iš kairės: integravimas manieže, integravimas į starto bloką bei pati plokštė

Analogiški matavimai atliekami naudojant ne išorinius, o paties atleto dėvimus jutiklius. Tokiu atveju slėgio jutikliai dažniausiai integruojami į sportinių batelių vidpadžius arba padus. L. Cheng, K. Roskilly ir kitų aprašytame tyrime[10] du Interlink 406 tenzorezistoriai priklijuoti prie sportbačio vidpadžio. Visa elektronika tokiu atveju tvirtinama prie blauzdos, ją sudaro operacinis stiprintuvas, duomenų apdorojimo mazgas (MSP430) bei radijo ryšio modulis. Duomenys apdorojami 300 Hz dažniu ir įrašomi į microSD atminties kortelę. Radijo ryšio modulis reikalingas sinchronizacijos impulsams tarp abiejų pėdų įrenginių siūsti. Tiesa, tokia sistema tyrime naudota ne pačiai jėgai vertinti – jėgos duomenys naudoti žingsnių ilgiams ir dažnumui išmatuoti remiantis jėgos jutiklių duomenimis.



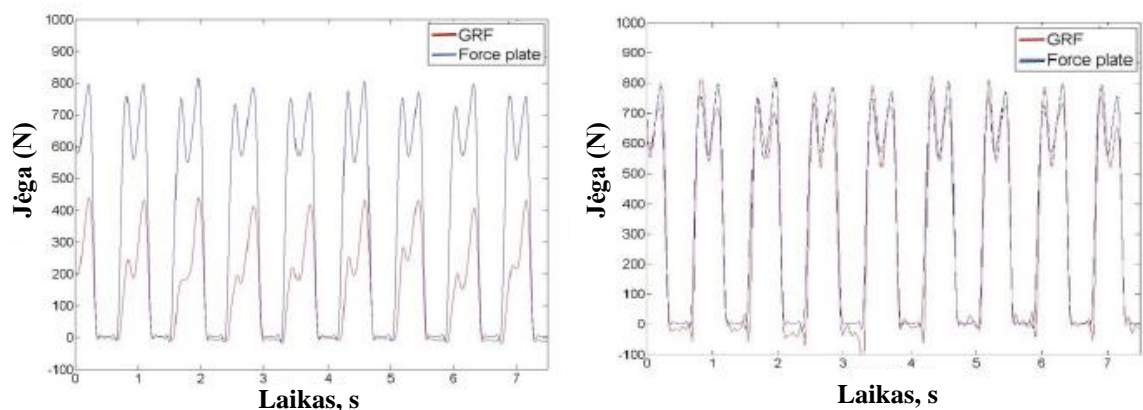
11 pav. Slėgio jutikliai vidpadyje

Jėga matuojama J. Park, Y. Na ir kitų straipsnyje, kuriame aprašoma atramos reakcijos jėgos bėgant iš šokant į aukštį matavimui skirtų sportbačių kūrimas. Į sportinio batelio padą įmontuoti keturi optoelektroniniai jėgos jutikliai (1D60, I2Asystems Co. Ltd.), galintys matuoti vertikalią jėgą iki 900 niutonų[11].



12 pav. Bėgimo metu išvystomai jėgai matuoti sukurtas sportinis batelis

Jutiklis sudarytas iš LED diodo, skleidžiančio šviesą, jutiklio korpuso ir diskinių spyruoklių, padidinančių jutiklio matuojamą jėgą. Atstumas tarp viršutinės ir apatinės korpuso dalių pamatuojamas pagal atsispindėjusios LED skleidžiamos šviesos kiekį. Tokiam jutikliui nereikalingas išorinis stiprintuvas, tad duomenys nuskaitomi tiesiog panaudojus analogas-kodas keitiklį. Jutiklių duomenys tyrimo metu kalibruoti kaip atraminius duomenis panaudojant jėgos plokščių matavimo metodą.



13 pav. Sportiniu bateliu išmatuotos jėgos kreivės prieš ir po kalibracijos

1.3. Sprinto matematinis modeliavimas

Tiek bėgimas kaip judėjimo forma apskritai, tiek sprintas konkrečiai gali būti modeliuojamas remiantis mažiausiai dviem skirtingais požiūriais – energiniu ir biomechaniniu.

1.3.1. Energijos balanso modelis

Vienas fundamentinių straipsnių, kuris cituojamas daugelio vėlesnių energijos balansą modeliavime nagrinėjančių straipsnių, yra 2002 m. L. M. Arsac ir E. Locatelli „*Modeling the energetics of 100-m running by using speed curves of world champions*“ [12]. Pagrindinė autorių pateikiama energijos balanso lygtis:

$$P_{aer_t} + P_{ana_t} = C \cdot V_t + C_{aero_t} \cdot V_t + \Delta E_{kin} \cdot \Delta t^{-1} \quad (1)$$

čia P_{aer_t} – momentinė aerobinė galia (W/kg), P_{ana_t} – momentinė anaerobinė galia (W/kg), C – jėga, reikalinga judėjimui į priekį (N/kg), C_{aero_t} – momentinė jėga, sunaudojama oro pasipriešinimui įveikti (N/kg), $\Delta E_{kin,t}$ – kinetinės energijos pokytis (J/kg), V_t – momentinis bėgimo greitis (m/s). Kalbant apie kairiąją lygybės pusę, autoriai, remdamiesi anksčiau atliktais tyrimais, siūlo tokias dedamųjų apskaičiavimų formules:

$$P_{aer_t} = MAP \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) \quad (2)$$

čia MAP – maksimali aerobinė atleto išvystoma galia, τ_1 – laikas, per kurį ta galia pasiekama. Naudojant šį modelį, autoriai pateikia šias vertes kaip konstantas vidutinio meistriškumo sportininkams (remiantis daugelio tyrimu rezultatais): $MAP = 18.4$ W/kg, $\tau_1 = 26$ s. Tuo tarpu P_{ana_t} galima apskaičiuoti:

$$P_{ana_t} = P_{max} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (3)$$

čia P_{max} yra maksimali anaerobinė atleto išvystoma galia, τ_2 – laikas, per kurį panaudojama sukaupta anaerobinė energija. Šie parametrai nustatomi eksperimentiškai iš išmatuotų greičio kreivių eksperimentų metu.

Dešinioji lygties pusė apskaičiuojama kaip trijų dedamųjų suma. Jėga C , reikalinga kūnui judėti į priekį, daugelio tyrimų rezultatais yra ganėtinai pastovi kintant greičiui ir laikoma lygia 4 J/(kg·m). Jėga C_{aero} , reikalinga įveikti oro pasipriešinimą, apskaičiuojama kaip trinties koeficiento k ir greičio bei vėjo greičio skirtumo kvadrato sandauga:

$$C_{aero_t} = k \cdot (V_t - w)^2 \quad (4)$$

Oro trinties koeficientas k modeliuojamas kaip oro tankio ρ , bėgiko frontalinės dalies ploto A_f bei pasipriešinimo konstantos C_d , lygios 0.9 , sandauga:

$$k = 0,5 \cdot \rho \cdot C_d \cdot A_f \quad (5)$$

čia $A_f = 0.2025 \cdot h^{0.725} \cdot m^{0.425} \cdot 0.266$, čia h – bėgiko ūgis, m – bėgiko masė.

Kinetinės energijos pokytis ΔE_{kin} apskaičiuojamas kaip pusė greičio pokyčio kvadrato:

$$\Delta E_{kin} = 0,5(V_{t+1} - V_t)^2 \quad (6)$$

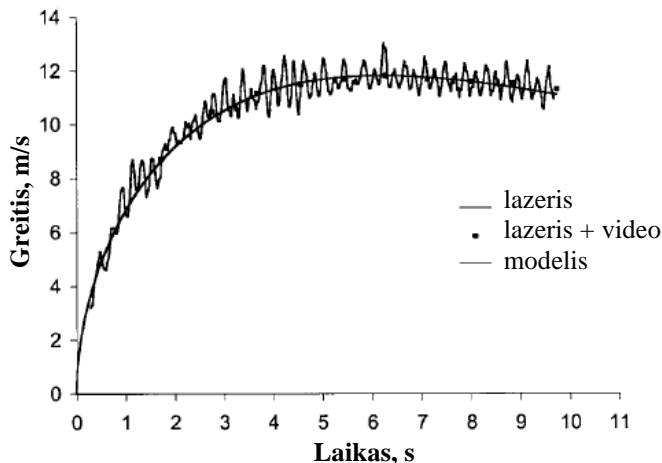
Kadangi analizuojamas energijos balansu paremtas modelis, svarbu į modelį įtraukti ir metabolinės energijos panaudojimo darbui naudingumo koeficientą η . Ankstesnių tyrimų duomenimis, įgreitėjimo fazėje η yra apytiksliai lygus $0,25$, o maksimalaus greičio fazėje η apytiksliai lygus $0,5$. Toks koeficiento kitimas aprašomas sekančiais:

$$\eta_t = 0,25 + (0,25 \cdot V_{max}^{-1}) \cdot V_t \quad (7)$$

Apjungus visas šias dedamąsias į vieną modelį, gaunama tokia netiesinė dif. lygtis:

$$MAP \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) + P_{max} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}} = C \cdot V_t + \eta_t^{-1} \cdot k \cdot (V_t - w)^2 \cdot V_t + \eta_t^{-1} \cdot 0,5(V_{t+1} - V_t)^2 \cdot \Delta t^{-1} \quad (8)$$

Matyti, jog toks modelis turi 5 fiksuotus žinomus dydžius, 2 nuspėjamus dydžius iš eksperimentinių duomenų (P_{max} ir τ_2) bei 1 matuojamą dydį – v_t . Du dydžiai yra nuspėjami atlikus eksperimentus, kadangi jie yra labai individualūs kiekvienam atletui ir priklauso nuo daugelio sunkiai apibrėžtų biocheminių veiksnių. Pateiktas modelis buvo testuojamas su 1997 pasaulio čempionų eksperimentiniais duomenimis, gautais matuojant greitį lazerine sistema, žemiau pateikiami modeliavimo rezultatai.



14 pav. Energijos balanso lygtimi paremto modelio palyginimas su eksperimentiniais duomenimis

Apibendrinant galima teigti, jog toks modelis tinkamas fundamentaliems bėgimo tyrimams, tačiau modelis neanalizuoja atleto pagreičio kitimo ar išvystomų jėgų bėgant. EBM labiau apjungia makroskopines dedamąsias, tačiau siekiant atlikti detalą bėgimo analizę, kurti į detales orientuotas treniravimo programas bei sekti sportininko mikroskopinį progresą toks modelis nėra tinkamas.

1.3.2. Biomechaninis modelis

Antrasis modeliavimo metodas paremtas bėgiko dinamikos analize. Pagrindiniai šio metodo atstovai ir tyrėjai yra jau minėti P. Samazino, J.B. Morin su kolegomis. Modelį autoriai aprašė 2016 metų Skandinavijos Medicinos ir Sporto mokslo žurnale[7]. Kaip teigiama, remiantis daugelio tyrimų rezultatais matyti, jog aukšto meistriškumo sportininkų greičio kreivę galima aproksimuoti monoeksponentine funkcija:

$$v_H(t) = v_{Hmax} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (9)$$

čia v_H – horizontalus greitis, τ – įgreitėjimo laiko konstanta. Kadangi sprintas yra judėjimo tipas, vykstantis 3D erdvėje, visi parametrai skaidomi į x, y ir z dedamąsias (15 pav.). Trumpų nuotolių bėgimas turi vieną išreikštą kryptį, prilyginamą x ašiai, o vertikalią komponentę (y ašis) ir svyravimus į šonus (z ašis) siekiama minimizuoti. X ašies duomenys, t.y. horizontaliosios dedamosios (pagal 15 pav.) ir yra reikalingos analizei. Turint horizontalaus greičio duomenis ir pritaikius matematinės priklausomybes, horizontalus pagreitis laike apskaičiuojamas:

$$a_H = \frac{dv_H(t)}{dt} = \left(\frac{v_{Hmax}}{\tau}\right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (10)$$

Kadangi analizuojama biomechanika, modeliuojant bėgimą svarbios dedamosios yra ir jėgos, kurias išvysto bėgikas. Jėgos taip pat išskaidomos į dvi projekcijas x ir y ašyse pagal 15 paveikslėlio schemą. Horizontalioji dedamoji tokiu atveju skaičiuojama kaip jėga, panaudojama kūno greičiui keisti ir oro pasipriešinimui įveikti:

$$F_H(t) = m \cdot a_H + F_{aero}(t) \quad (11)$$

čia F_{aero} yra jėga, reikalinga oro pasipriešinimui įveikti, ir apskaičiuojama pagal prieš tai energijos balanso modelyje pateiktas (4) ir (5) lygtis:

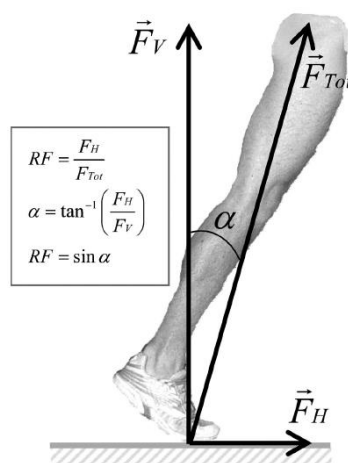
$$F_{aero}(t) = k \cdot (v_H(t) - v_w)^2 = 0.5 \cdot \rho \cdot Af \cdot Cd \cdot (v_H(t) - v_w)^2 \quad (12)$$

Apskaičiavus išvystomą horizontalią jėgą, sportininko parengtumas kiekybiškai gali būti įvertinamas apskaičiavus galią:

$$P_H = F_H \cdot v_H \quad (13)$$

Kaip minėta, pagreitis vertikaloje ašyje yra minimizuojamas ir gali būti prilygintas nuliui, tuomet vertikaloje jėgos dedamoji yra tiesiog lygi atramos reakcijai į kūno svorį:

$$F_V(t) = m \cdot g \quad (14)$$



15 pav. Atleto išvystomos jėgos išskaidymas į dedamąsias

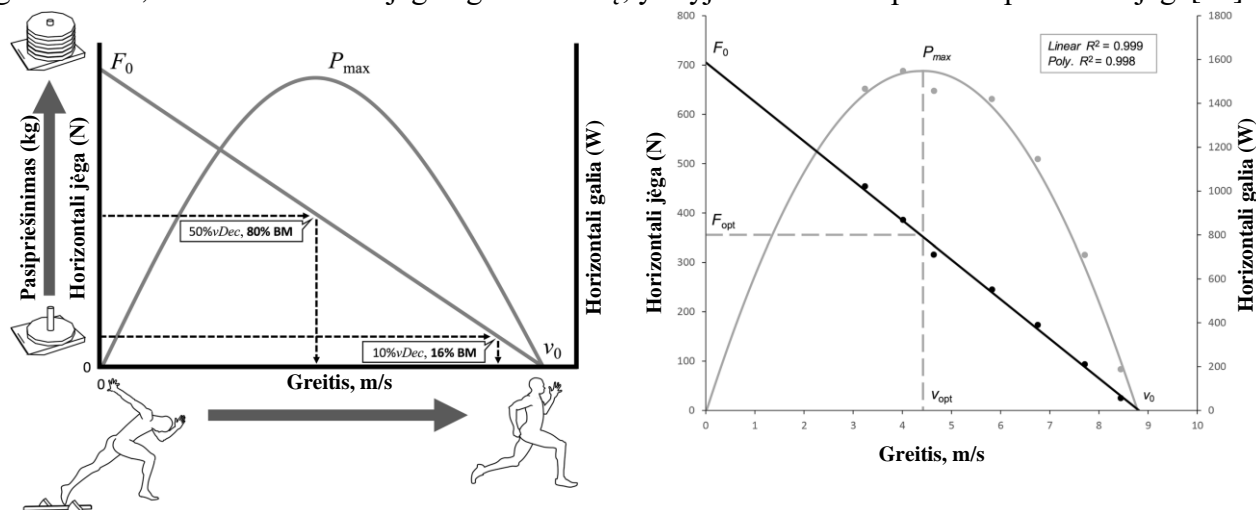
Apskaičiavus šias dedamąsias, autoriai referuoja į savo pačių 2011 metų straipsnį „*Technical Ability of Force Application as a Determinant Factor of Sprint Performance*“ [13], kuriame pristatomas ir tiriamas santykinis dydis RF (angl. ratio of force), nusakantis, kaip efektyviai visa išvystoma jėga yra panaudojama kūno judėjimo greičiui keisti viso bėgimo metu:

$$RF = \frac{F_H}{F_{tot}} \cdot 100\% = \frac{F_H}{\sqrt{(F_H^2 + F_V^2)}} \quad (15)$$

Didžiausias RF koeficientas yra starto metu, kuomet atletas startuoja pasviręs žemyn ir didžioji išvystomos jėgos dalis panaudojama naudingai, t.y. horizontalia kryptimi. Bėgant atletas atsitiesia, ir vis daugiau išvystomos jėgos panaudojama neefektyviai. Išmatavus viso bėgimo RF koeficientus ir nubrėžus RF- $v_H(t)$ priklausomybę galima išsidėsčiusius RF taškus aproksimuoti tiese ir nustatyti tiesės krypties koeficientą. Kuo krypties koeficientas yra arčiau nulio, tuo daugiau jėgos didėjant greičiui sportininkas panaudoja efektyviai.

Apskaičiavus jėgas ir galias, taip pat brėžiamos ir jėgos-greičio bei galios-greičio priklausomybės. Optimalių treniruočių apkrovų parinkimo metodologija remiantis šiomis kreivėmis aprašoma tos pačios prancūzų mokslinės grupės 2018 metų straipsnyje. Atskirai abi šios priklausomybės indikuoja, kaip kinta atleto išvystomi parametrai ne laike, o priklausomai nuo pasiekto greičio. Taip galima nustatyti, kokia išvystomos jėgos ir pasiekto greičio kombinacija generuoja didžiausią galią. Pagal autorių pristatomą metodą, norint pasiekti didžiausią jėgos treniravimo efektyvumą būtina treniruotis maksimalios galios sąlygomis. Tam tikslui pasiekti, būtina apkrauti sportininką papildomu pasipriešinimu. Į kiekybinį klausimą kiek reikia apkrauti atletą, kad būtų treniruojamasi maksimalios

galios sąlygomis, atsako mokslininkų pasiūlytas metodas. Abi priklausomybės apjungiamos į vieną grafiką, tuomet iš galios kreivės maksimumo į x ašį išvedamas statmuo. Taip randamas optimalus greitis. Ten, kur statmuo kerta jėgos-greičio tiesę, y ašyje atidedama optimali apkrovimo jėga[14].



16 pav. Optimalios treniruočių apkrovos nustatymo grafinis metodas

Šis modeliavimo metodas yra labiau tinkamas realizuoti kuriamoje sistemoje, kadangi naudojama horizontalioje greičio dedamoji (kuri ir bus matuojama kuriamos sistemos pagalba), taip pat analizuojamos atleto išvystomos jėgos bei galia. Būtent šie mechaniniai parametrai ir yra tiksliniai kiekybiniai sportininko bėgimo įvertinimo parametrai bei treniravimo tikslai. Tiesa, svarbu tai, jog kuriama sistema leis analizuojant naudoti ne tik aproksimuotą greitį, bet ir tikslų momentinį greitį, taip analizuojant kiekvieno žingsnio metu išvystytą jėgą bei galią. Minėtais mechaniniais parametrais įvertintas bėgimas atlikus duomenų apdorojimą leis automatiškai treneriui pasiūlyti optimalų atleto treniravimo krūvį arba sumodeliuoti kelis įmanomus bėgimo laiko scenarijus esant skirtingiems krūviams.

2. Prototipo projektavimas

Pagal išsikeltus projekto uždavinius, ant esamos atskiro projekto metu surinktos mechaninės prietaiso bazės toliau sukurtas sistemos prototipas. Pagal išsikeltus techninius reikalavimus parinkti komponentai, EPLAN programiniu paketu suprojektuota tokios sistemos valdymo sistema (elektrinė schema pateikiama Priede nr. 1).

2.1. Komponentų sąrašas

Žemiau pateikiami komponentai, kurie sudaro veikiančią bei ištestuotą prototipą ir yra pakankami išsikeltiems prototipo kūrimo projekto tikslams pasiekti.

1 lentelė. Elektrinių ir automatikos komponentų sąrašas

Nr.	Komponentas	Gamintojas	Detalės numeris
1.	FX5UC programuojamas loginis valdiklis (PLV)	Mitsubishi	FX5UC-32MT-DSS-TS
2.	4 terminalų analogas-kodas keitiklis	Mitsubishi	FX5-4AD-ADP
3.	4 terminalų kodas-analogas keitiklis	Mitsubishi	FX5-4DA-ADP
4.	Servo pavaros stiprintuvas	Mitsubishi	MR-J4-200A-RJ
5.	Jungčių blokas valdymui	Mitsubishi	TB-50-EG
6.	Servo pavara	Mitsubishi	HG-SR152
7.	Stabdymo varža 13, 600W	Mitsubishi	MR-RFH400-13
8.	Raspberry Pi 4B mikrokompiuteris	Raspberry	PI4 Model B
9.	Srovės nuotėkio relė su automatu	ETI	KZS-1M 1P+N A C16
10.	Avarinio stabdymo jungiklis	-	-
11.	Kompiuterinio tinklo komutatorius	D-Link	DES-1005C
12.	5V 10W maitinimo šaltinis	IDEC	PS5R-VB05
13.	24V 30W maitinimo šaltinis	IDEC	PS5R-VC24
14.	2x Optoporos 35V 50mA	-	EL817

Pagrindiniai komponentai išsamiau aprašomi žemiau esančiuose atskiruose poskyriuose. Lentelės 5 punkte minimas jungčių blokas turi 50 kontaktų ir skirtas PLV bei servo stiprintuvo komunikacijai analoginiais bei skaitmeniniais signalais.

Stabdymo varža naudojama tuomet, kai variklis ne naudoja, o pats generuoja energiją. Įprastai taip nutinka stabdymo metu, tačiau dėl šios sistemos treniruočių su pasipriešinimu variklio valdymo ypatumų visa energija, sugeneruojama treniruotės metu, šios varžos pagalba saugiai paverčiama į šilumą.

Kompiuterinio tinklo komutatorius reikalingas tam, kad apjungti PLV, Raspberry Pi ir inžinerinę programinę įrangą (kompiuterį) į vieną tinklą. Ateityje į šį komutatorių naudojant CC-Link tinklą Ethernet jungtimi galėtų jungtis ir servo stiprintuvas.

24 V maitinimo šaltinis skirtas PLV, kodas-analogas keitikliui ir visai pramoninei valdymo logikai. 5 V maitinimo šaltinis skirtas konkrečiai tinklo komutatoriui ir Raspberry mikrokompiuteriui maitinti.

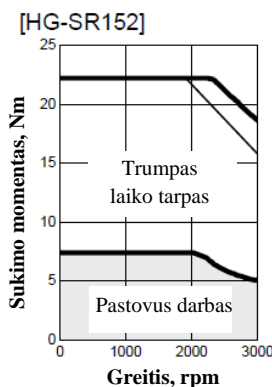
Dvi vienodos optoporos skirtos A ir B signalų lygio keitimui iš 5 V į 24 V, t.y. tinkamos PLV skaitmeniniam įėjimui. Optoporų elektrinio jungimo schema pateikiama prieduose esančioje projekto elektrinėje schemoje (1 priede).

2.2. Servo variklis ir enkoderis

Parinktas Mitsubishi HG-SR152 servo variklis (200V AC, 3 fazių). Pavara parinkta pagal išvystomą maksimalų greitį ir sukimo momentą.

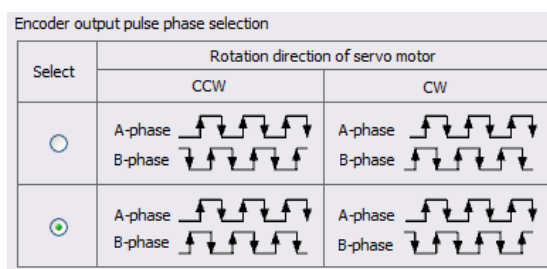
2 lentelė. Parinktos servo pavaros techniniai parametrai

Parametras	Vertė
Nominali galia	1,5 kW
Nominalus sukimo momentas	7,2 Nm
Nominalus greitis	2000 rpm
Maksimalus sukimo momentas	21,5 Nm
Maksimalus greitis	3000 rpm
Inercijos momentas	$16 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Svoris	7,3 kg



17 pav. HG-SR152 Servo pavana, momento-greičio priklausomybė ir MR-J4-200A-RJ servo stiprintuvas

Naudojamas 22-bitų enkoderis, kurio skiriamoji geba – 4194304 impulsų per vieną apsisukimą. Servo stiprintuvo apdorotas išduodamas enkoderio signalas yra diferencinis, t.y. A ir B kanalai. Priklausomai nuo sukimosi krypties, A ir B signalų fazės skiriasi per $\pi/2$, o vienas apsisukimas atitinka 256 impulsus.



17 pav. Enkoderio impulsų konfigūracija

2.3. Servo stiprintuvas

Pagal parinktą servo variklį atitinkamai parinktas ir tinkamas servo stiprintuvas. Šiam varikliui tinkami MELSEC MR-J4 serijos stiprintuvai. Tinkamas stiprintuvas parenkamas pagal reikiamą maitinimo šaltinio tipą, galią, palaikomas komunikacijas bei galimus servo variklio valdymo būdus. Pagal šiuos kriterijus parinktas stiprintuvas MR-J4-200A-RJ. Skaičius 200 žymi 2 kW galią, raidė A

– bendros paskirties, o -RJ trumpinys gale simbolizuoja naudojamą visiškai uždarą valdymo kontūrą su 4 laidų diferenciniu enkoderiu. Kalbant apie komunikacijas, PLV su šiuo stiprintuvu gali komunikuoti universaliai: per analoginius/skaitmeninius signalus, RS422/RS485 bei impulsus (PWM). Šio projekto rėmuose svarbus dažnas išsamios informacijos apsisikeitimas tarp PLV ir stiprintuvo, tą leidžia atlikti per RS485 standartą realizuotas MODBUS/RTU protokolas. Stiprintuvas palaiko tris pagrindinius variklio valdymo būdus: pagal norimą poziciją (angl. position control), greitį (angl. speed control) bei sukimo momentą (angl. torque control). Servo stiprintuvas konfigūruojamas per MR Configurator2 programinį paketą arba MODBUS/RTU. *One-touch-tuning* funkcija padeda automatiškai surasti optimalius valdymo kontūro parametrus.

2.4. Programuojamas loginis valdiklis ir keitikliai

Projektui įgyvendinti pasirinktas to paties kaip ir servo pavara gamintojo Mitsubishi programuojamas loginis valdiklis. Pagrindiniai parametrai, kuriais buvo vadovautasi renkantis valdiklį yra palaikomos komunikacijos, greitis, išplėtimo galimybės, dydis. Pasirinktas naujos iQ kartos F serijos valdiklis FX5UC-32MT-DSS-TS. C raidė simbolizuoja *Compact* dydį, 32 yra bendras skaitmeninių įėjimų/išėjimų skaičius, T žymi reikalingą 24 V DC maitinimo šaltinį. Kadangi valdiklis yra *Compact* tipo, jo dydis puikiai tinka jį naudoti pakankamai mažoje treniruoklyje automatikai skirtoje erdvėje: 48.1 mm pločio, 90 mm aukščio ir 93.7 mm gylio. Valdiklis turi jau instaliuotą didelio greičio įėjimų/išėjimų funkciją. Didelio greičio įėjimus galima sukongūruoti kaip skaitliukus, impulsų pločio matavimo ar specialių impulsų detektavimo funkcijoms atlikti ir pan. Didelio greičio išėjimai skirti veikti impulsų pločio moduliacijos (angl. PWM) arba pozicionavimo (specifinė funkcija) režimais. Aukščiausias skaitliuko fiksuojamų impulsų dažnis siekia 200 kHz, o išėjimo impulsų mažiausias plotis – 2 μ s. Tokie greičiai yra pakankami grįžtamojo ryšio iš servo stiprintuvo (enkoderio) bei servo pavaros valdymo pozicionavimo būdu užduotims realizuoti. Vertinant paties valdiklio programos vykdymo greitį, pagal technines specifikacijas, kontaktų plano (angl. ladder) instrukcija yra įvykdoma per 34 ns. Valdiklis turi įmontuotus Ethernet (100/10 Mbps) ir RS485 prievadus. Per RS485 prievadą valdiklis gali realizuoti MODBUS/RTU tinklą, o Ethernet prievadas ir valdiklyje įdiegtos funkcijos leidžia naudoti CC-Link IE Field Basic tinklą bei įprastas Ethernet komunikacijas, pvz. MODBUS/TCP. Taip pat panaudoti du analoginiai keitikliai: FX5-4AD-ADP analogas-kodas keitiklis bei FX5-4DA-ADP kodas-analogas keitiklis, turintys po 4 analoginius kanalus. Analogas-kodas keitiklio konversija trunka 450 μ s, o kodas-analogas keitiklio konversija užima 950 μ s. Kadangi toks laikas yra trumpesnis nei PLV programos skenavimo laikas, duomenys PLV yra atnaujinami kiekvieno skenavimo metu. Tokia savybė yra labai svarbi sprendžiant atleto bėgimo duomenų nuskaitymo ir įrašymo uždavinius.



18 pav. FX5UC-32MT-DSS-TS programuojamas loginis valdiklis bei analogas-kodas ir kodas-analogas keitikliai

2.5. Mikrokompiuteris

Grįžtamojo ryšio duomenų nuskaitymui nuo PLV ir įrašymui į duomenų bazę realizuoti, taip pat vartotojo sąsajos sukūrimui įgyvendinti parinktas Raspberry Pi Model 4B mikrokompiuteris su specialiai parašytu programiniu kodu, Ethernet kabeliu sujungtas su PLV ir veikiantis kaip MODBUS/TCP klientas. Taip pat prie Raspberry mikrokompiuterio be papildomos įrangos galima prisijungti bevieliu Wifi ryšiu, tad jame taip pat patalpintas interneto puslapis, kuriame realizuota vartotojo sąsaja, serveris. *Mikrokompiuterio programos kūrimas nėra šio magistrinio darbo uždavinys, parinkus tokį sprendimą duomenų nuskaitymui programavimo darbus mikrokompiuteryje atlieka kitas komandos narys.*

2.6. Elektrinių komponentų instaliavimas treniruoklyje

Visi paminėti komponentai sumontuoti ant vieno DIN bėgelio galinėje prietaiso pusėje, atskirti nuo pagrindinės būgno dalies ir uždengti plastikinėmis korpusinėmis plokštėmis.

Komponentų jungimo elektrinė schema pateikiama 1 priede.



19 pav. Sistemos elektrinių komponentų sujungimo vaizdas

Surinkto prototipo vaizdas pateiktas 20 paveikslėlyje.



20 pav. Galutinis prototipo vaizdas

3. Sistemos valdymui reikalingų parametru nustatymas

3.1. Servo pavaros valdymo metodo nustatymo tyrimai

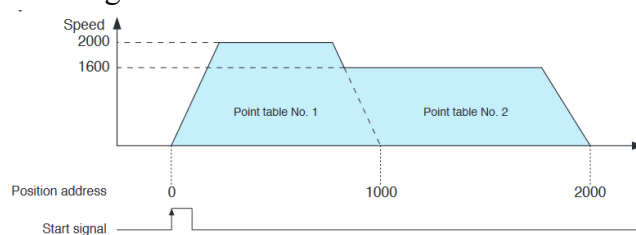
Siekiant sukurti sportininkui komfortišką ir saugų treniruoklį viena pagrindinių to užtikrinimo užduočių yra teisingas servo pavaros valdymo metodas. Patį treniruotės uždavinį, pvz. treniruojantis su įgreitinimu, iš treniruoklio pusės būtų supaprastintai galima įvardinti kaip teisingą valo vynyjimą. Tam labai svarbūs keli aspektai – vynyjimo greitis, jėga, su kuria valas yra vynyjamas, ir vynyjimo atstumas. Teisinga šių parametru kombinacija užtikrina tiek kokybišką treniruotę, tiek ir teisingus grįžtamojo ryšio duomenis.

Kadangi pasaulyje tokių prietaisų yra vos keli, juos sukūrusios kompanijos savo valdymo algoritmus ir metodus laiko paslapyje, tad kuriant šį prietaisą nebuvo turėta duomenų, koks servo pavaros valdymo būdas tokiam neįprastam uždaviniui (sąsajai su žmogumi) yra tinkamiausias. Taigi, valdymo metodas nustatytas eksperimentiškai patyrinėjus skirtingų valdymo būdų tinkamumą tiek iš duomenų, tiek iš sportininko komforto pusės.

3.1.1. Valdymas *point table* metodu

Visų pirma iškelta prielaida, jog pagal reikiamus valdyti parametrus tai galėtų būti gana įprastas variklio pozicionavimo metodas (angl. *point table*). Šis metodas Mitsubishi dokumentacijoje aprašomas gana griežtai, kiekvienas parametras turi būti iš anksto nurodytas ir sudaryta duomenų lentelė. 21 paveikslėlyje parodytas ir principinis veikimo grafikas.

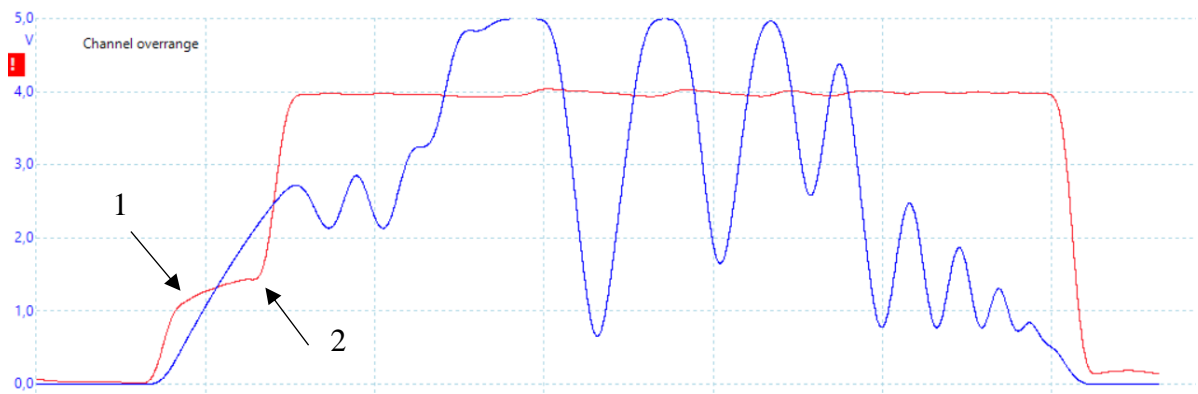
Item	Main description
Position data	Set the position data for movement.
Servo motor speed	Set the command speed of the servo motor for execution of positioning.
Acceleration time constant	Set the acceleration time constant.
Deceleration time constant	Set the deceleration time constant.
Dwell	Set the waiting time when performing automatic continuous operation.
Auxiliary function	Set when performing automatic continuous operation.
M code	Outputs the first digit and the second digit of the M code in 4-bit binary respectively.



21 pav. Point table metodo aprašas

Pagal aprašą, pozicija gali būti nurodoma arba milimetrais (jei naudojama linijinė pavara), arba laipsniais, arba impulsais. Kadangi šiuo atveju naudojama ne linijinė pavara, o per vieną bėgimą būgnas apsisuka daug kartų (nepatogu skaičiuoti laipsniais), nuspręsta susiekti būgno apskritimo ilgį ir impulsų skaičių vienam apsisukimui su bėgimo distancija ir taip nurodyti norimą pozicionavimo atstumą. Variklio greitis taip pat konvertuojamas iš norimo bėgimo greičio į apsisukimus per minutę, o įsibėgėjimo ir sulėtėjimo konstantos milisekundėmis parenkamos eksperimentiškai taip, kad starto ir stabdymo metu nesukelti per didelių apkrovų mechaninei būgno perdavai.

Parašius valdiklio programos kodą ir sukonfigūravus šiam metodui servo pavaros stiprintuvą, atlikti eksperimentiniai bėgimai siekiant patikrinti metodo tinkamumą praktikoje. Oscilografu fiksuotas greičio (mėlyna linija) ir sukimo momento (raudona linija) grįžtamasis ryšys laiko atžvilgiu (22 pav.). Šiuo atveju svarbios ne absoliutinės vertės, o kreivių kitimas. Matyti, jog mėlyna linija aiškiai svyruoja, o šis svyravimas indikuoja bėgiko žingsnius – kuomet bėgikas atsispiria ir yra ore tarp žingsnių, greitis auga, kuomet bėgikas atremia koją į žemę atsispyrimui, greitis mažėja.



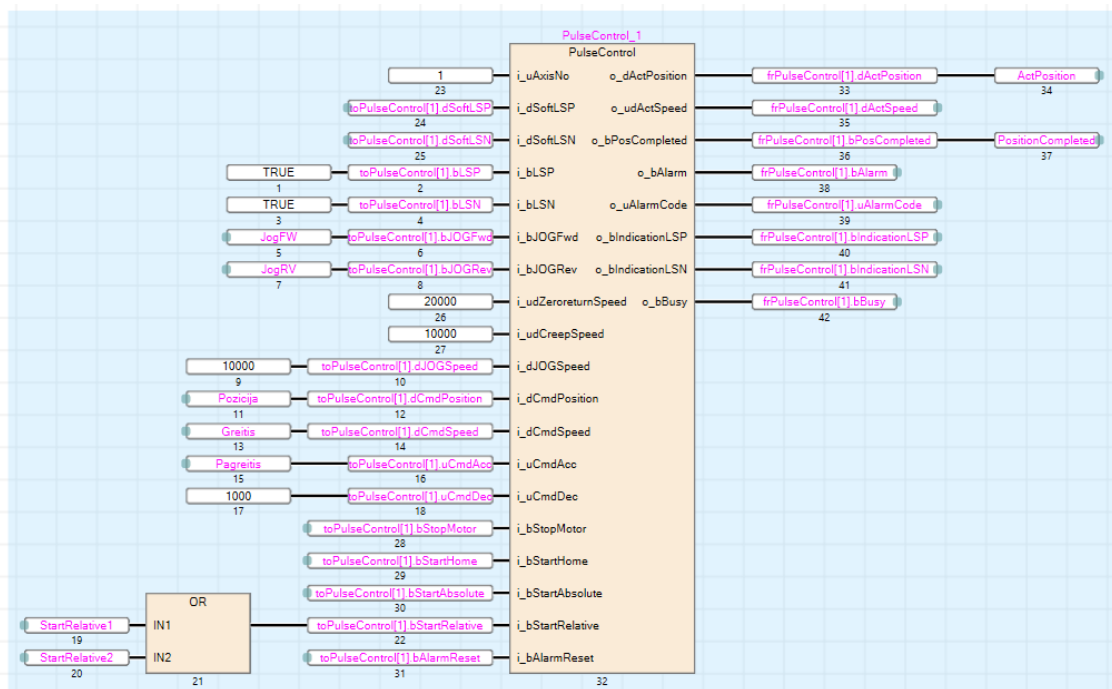
22 pav. Greičio (mėlyna linija) ir sukimo momento (raudona linija) grįžtamasis ryšys Point Table metodu

Atlikus eksperimentinius bandymus fiksuojant jėgos ir greičio priklausomybes nuo laiko ir gavus grįžtamąjį ryšį iš dalyvavusių sportininkų nustatyta, kad starto momentu pajuntamas valo truktelėjimas, tuomet atsispyrus kurį laiką įgreitinimo tarsi nėra, ir tam tikru momentu į žingsnio pabaigą pajuntamas nekomfortiškas stiprus truktelėjimas į priekį. Be to, nors kreivėsi tai ir neatsispindi, bet įgreitėjus taip pat juntamas neaiškus pojūtis, tarsi treniruoklis sulėtėjo. Įvertinus kreives ir bėgikų atsiliepimus matyti jų paminėtų momentų priežastys. Abu atvejai iš esmės gali būti susieti su griežtu bandyto metodo greičio, laiko ir pozicijos sąryšiu. Starto momentu variklis truktelė sportininką, bet šis galingai atsispirdamas ir išvystydamas didelį greitį pralenkia treniruoklį. Tai matyti raudonoje kreivėje, kuomet jos kilimo kampas tam tikru momentu krenta (pažymėta 1). Tai indikuoja, jog varikliui nebereikia traukti apkrovos ir jis laisvai vynioja valą. Tačiau kadangi įsibėgėjimo konstanta yra nedidelė, treniruoklis pasiveja ir nori pralenkti sportininką (momentas pažymėtas 2). Tuo metu ir įvyksta juntamas truktelėjimas. Panašiai vyksta ir įvardintu juntamu sulėtėjimu, tai galima išvelgti iš 22 paveikslėlio. Teoriškai variklis įgreitėja iki nurodyto greičio per nurodytą įgreitėjimo konstantą, praktiškai tai trunka kiek ilgiau, kol sportininkas, t.y. apkrova, išvysto tokį bėgimo greitį. Tačiau pasiekus tą greitį treniruoklis momentiškaiai variklis apsiriboja savo greitį ir palaiko nurodytą. Iš sportininko požiūrio taško pradžioje juntamas greitas įsibėgėjimas, o pasiekus greitį staiga visas tempimas išnyksta ir sportininko turima inercija nesutampa su variklio staigiu greičio apribojimu ir palaikymu.

Be to, kadangi naudojant šį metodą griežtai prisirišama prie pozicijos, toks metodas yra netinkamas treniruotėms su pasipriešinimu įgyvendinti. Treniruojantis šiuo metodu pats sportininkas turėtų jėga keisti būgno poziciją, o tai šiuo būdu yra neįmanoma, nes variklis stengiasi išlaikyti programiškai nurodytą poziciją ir sportininkui sustojus bando grįžti į nulinę poziciją. Taigi, toks griežtai apibrėžtas ir į apkrovą nereaguojantis pozicionavimo metodas nėra tinkamas treniruotėms realizuoti.

3.1.2. Valdymas *positioning* metodu

Įvertinus pirmojo metodo trūkumus, nuspręsta realizuoti pavaros valdymą ją pozicionuojant ne iš anksto aprašyta pozicijų lentelė, o valdant ją impulsais. Tokiu atveju įvesta norima bėgimo distancija valdiklyje perskaičiuojama į impulsus (pagal nustatytą impulsų skaičių vienam apsisukimui konfigūruojant servo stiprintuvą) ir pavaros pozicija valdoma naudojant impulsų pločio moduliaciją (angl. pulse width modulation, PWM). Šiam tikslui įgyvendinti naudojamas Mitsubishi FX5UC valdiklis turi 4 (Y0-Y3) išėjimus, kurie gali veikti kaip didelio greičio išėjimai su maksimaliu dažniu iki 200 kHz. Taip pat panaudotas specialus Mitsubishi Pulse Control funkcinis blokas, supaprastinantis signalo generavimą.



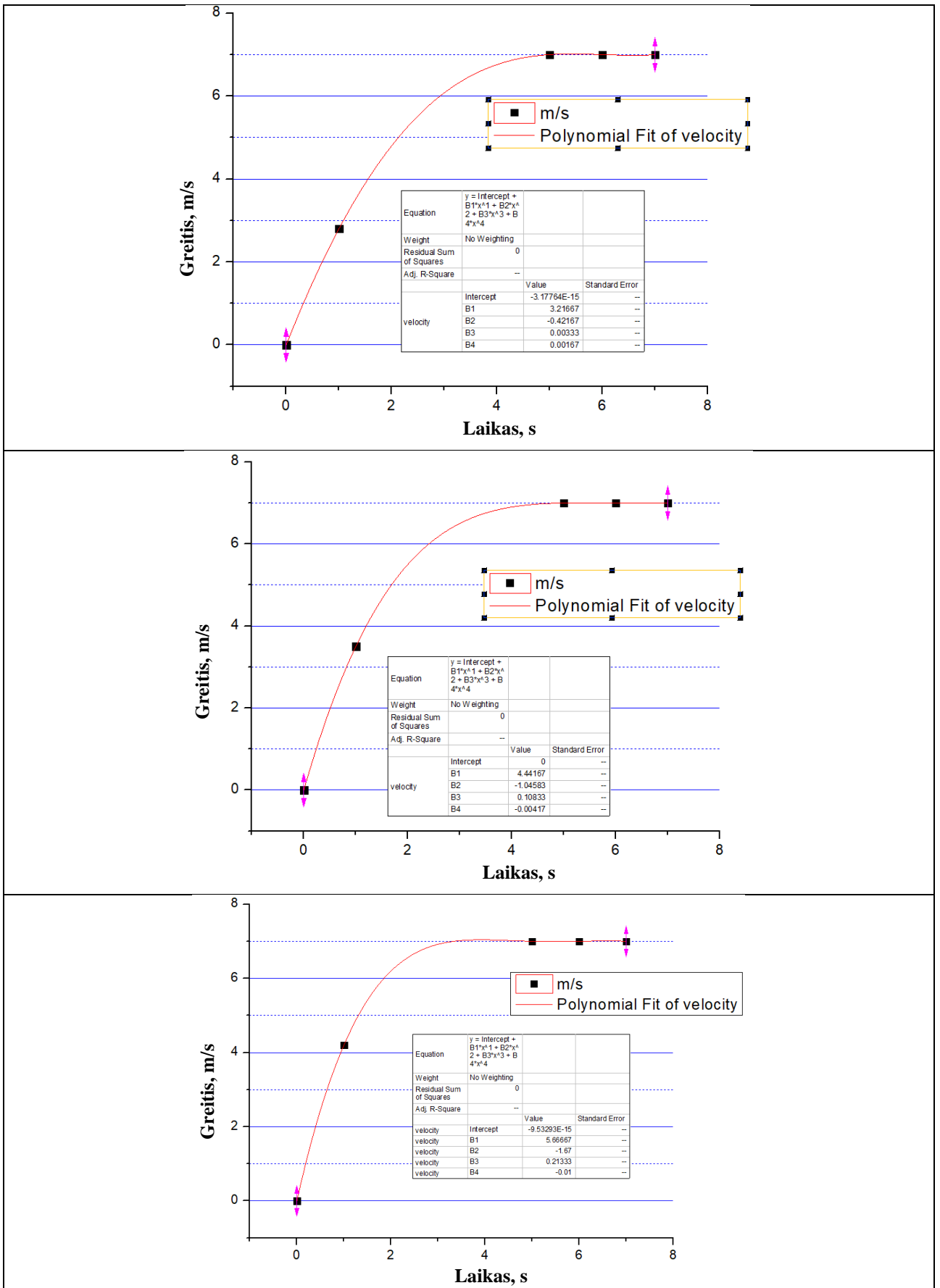
23 pav. Naudotas Pulse Control funkcinis blokas

Į funkcinį bloką įrašoma pozicija, greičio ir pagreičio reikšmės ir paspaudus startą pradedamas pozicionavimas. Įrašoma pozicija yra norimas bėgimo atstumas, pagreitis šiuo atveju yra lygus 0, o bėgimo greitis perskaičiuojamas kiekvieno valdiklio ciklo metu pagal iš anksto aprašytą kreivės lygtį kaip funkcija nuo laiko. Tam starto metu valdiklyje paleidžiamas laikmatis, kurio einamoji reikšmė ir naudojama kiekvieno ciklo metu. Sudarant kreivių lygtis remtasi įžvalgomis iš pirmojo metodo bandymų ir literatūroje pateikiamų bėgimo greičio aproksimavimo pavyzdžių. Nuspręsta remtis dviem kriterijais – išvystytu greičiu po pirmos sekundės (koeficientas nuo maksimalaus siekiamo greičio) ir maksimalaus greičio pasiekimo laiku. Metodo bandymams pagal atletą parinktas maksimalus greitis 7 m/s, maksimalus greitis pasiekiamas per 5 sekundes, o reikiamam statumo koeficientui parinkti nagrinėti trys atvejai – 0.4, 0.5 ir 0.6 dalys maksimalaus greičio vertės po 1 sekundės nuo starto.

3 lentelė. Trijų nagrinėjamų greičio kreivės sudarymo atvejų parametrai

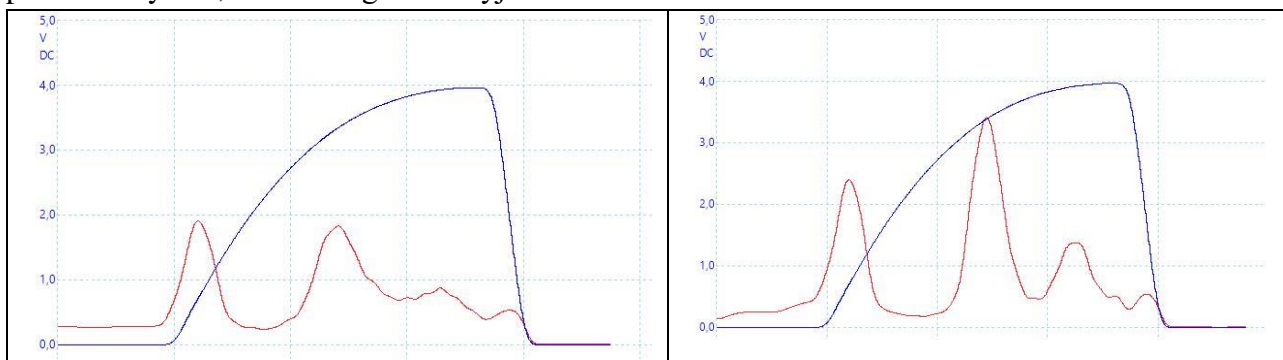
Bėgimo numeris	Maksimalus greitis, m/s	Maksimalaus greičio pasiekimo laikas, s	Statumo koeficientas	Greitis po pirmos sekundės, m/s
1.	7	5	0.4	2.8
2.	7	5	0.5	3.5
3.	7	5	0.6	4.2

Gautos trys kreivės ir jų aproksimuotos lygtys.

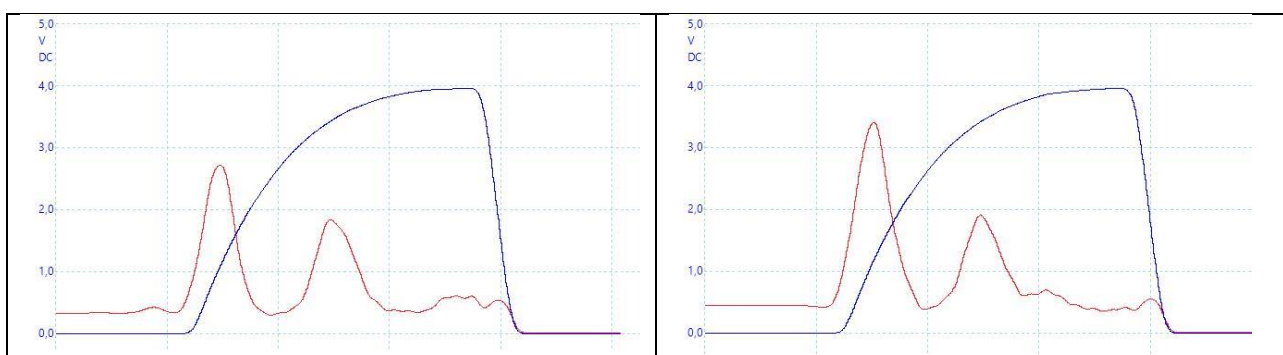


24 pav. Sumodeliuoti polinomiali, realizuojami panaudojant impulsų pločio moduliaciją (angl. PWM)

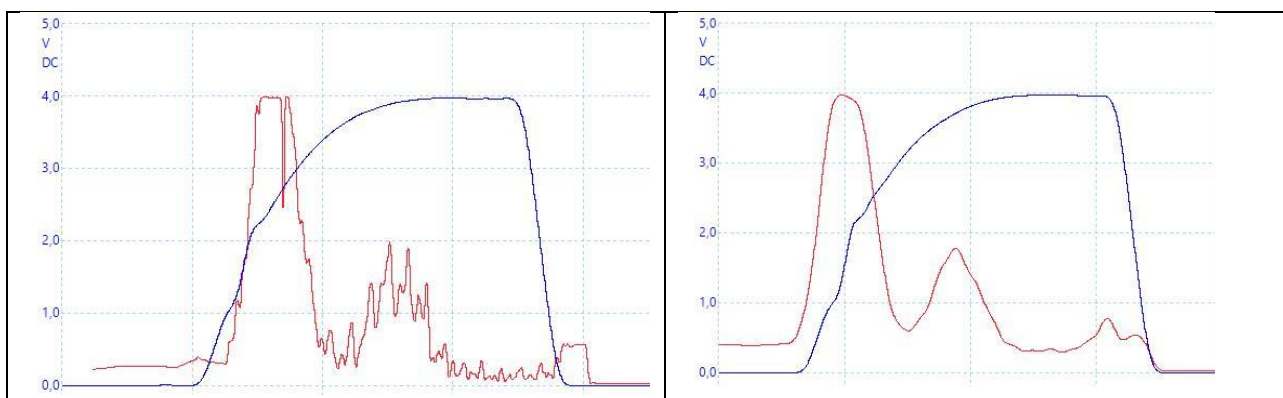
Visos trys greičio lygtys perkeltos į programuojamą loginį valdiklį ir išbandytos bandymų metu lengvosios atletikos manieže. Grįžtamasis ryšys apie variklio sukimosi greitį (mėlyna linija) ir sukimo momentą (raudona linija) užfiksuotas oscilografu (25, 26 ir 27 paveikslėliai). Kiekvienu atveju atlikta po du bandymus, vienas langelis x ašyje atitinka 2 sekundes.



25 pav. Bandymų rezultatai su pirmuoju polinomu



26 pav. Bandymų rezultatai su antruoju polinomu



27 pav. Bandymų rezultatai su trečiuoju polinomu (grafikas kairėje be signalo filtravimo)

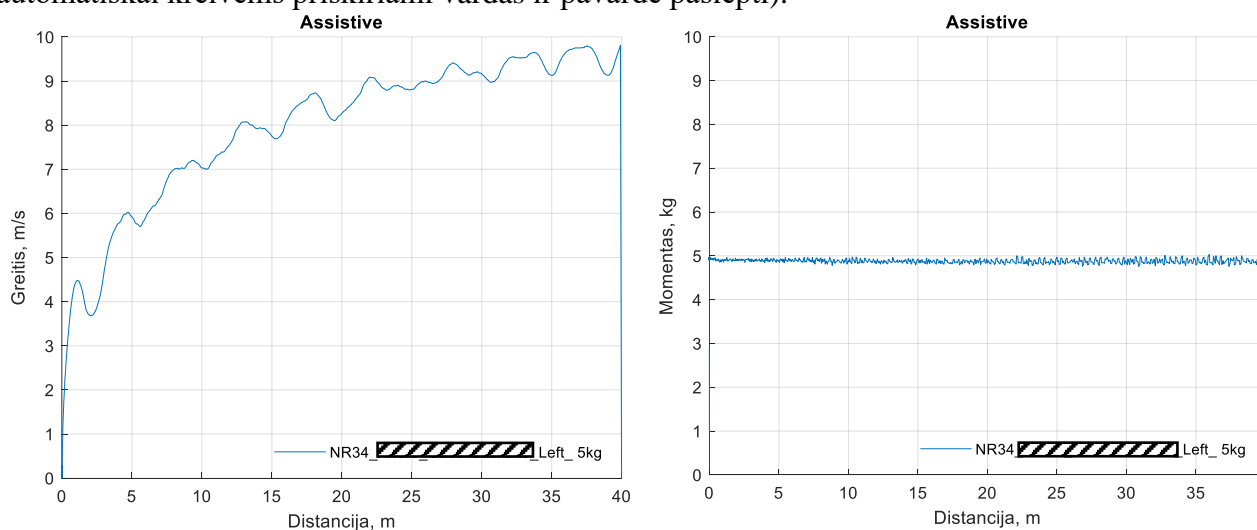
Įvertinus gautas kreives ir sistemos veikimą išbandžiusio atleto atsiliepimus galima daryti išvadą, jog nors šiuo būdu ir gaunamas sklandus perėjimas į maksimalaus greičio etapą, valdymas pagal aproksimuotą kreivę nėra tinkamas sistemos valdymui realaus bėgimo metu. Kitaip tariant, bėgimo aproksimavimas pagal realius duomenis yra galimas, o bėgimo valdymas pagal aproksimuotą kreivę – ne. Tai matyti iš raudonos kreivės – startiniu momentu sistema tempia sportininką, tuomet antroje pirmojo žingsnio stadijoje sportininkas aplenkia sistemą ir sukimo momentas krenta iki reikšmės, artimos nuliui, tuomet antrojo atsispyrimo metu sportininkas vėl pajaučia truktelėjimą į priekį (momentas išauga), vėl pralenkia sistemą ir toliau jau palaiko išvystytą greitį ir yra ant sistemos pralenkimo ribos (sukimo momentas mažas, svyravimai žingsnio metu nedideli). Supaprastintai

galima sakyti, jog sportininkas nėra tempiamas pastoviu momentu, o jo žingsniai atsispindi sukimo momento kreivėje, nors turėtų atsispindėti sistemos sukimo greityje. Toks greičio valdymas pagal iš anksto užduotą kreivę nėra prisitaikantis prie sportininko, o greičio aproksimacija neatitinka realių bėgimo sąlygų.

Be to, kaip ir pirmuoju atveju, griežtai prisirišama prie būgno pozicijos, todėl šis metodas yra netinkamas treniruotėms su pasipriešinimu įgyvendinti. Valdikliui nesiunčiant impulsų pavara stengiasi išlaikyti paskutinę nurodytą poziciją apribotu sukimo momentu, tad sportininkui sustojus po bėgimo sistema nesaugiai bandytų grįžti į nulinę poziciją. Po šių bandymų nuspręsta išbandyti kitokį valdymo metodą.

3.1.3. Valdymas *speed control* ir *torque control* metodais

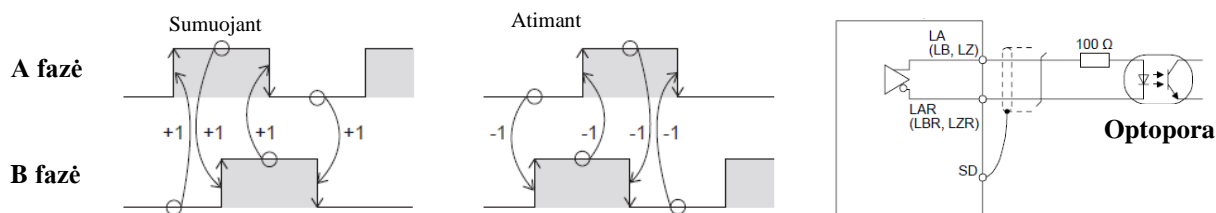
Trečiasis tirtas servo pavaros valdymo metodas – valdymas pagal sukimo momentą. Toks metodas, kaip ir ankstesniais atvejais, vertintas treniruojantis su palengvinimu. Servo stiprintuvas sukonfigūruojamas *torque control* režimui, valdomas analoginiu signalu iš PLV (per kodas – analogas keitiklį), kur tam tikra 0-10 V įtampos reikšmė atitinka sukimo momentą, o kitas 0-10 V analoginis signalas atitinka sukimosi greitį nuo 0 iki 3000 rpm (~14 m/s). Taigi, sistema pastoviu nurodytu sukimo momentu bando įveikti pasipriešinimą ir išukti pavara (iki greičio ribos). Teorinė prielaida prieš pradedant bandymus – esant atleto svorio pasipriešinimui variklis pastoviu per vartotojo sąsają įvestu sukimo momentu (kilogramais, valdiklyje konvertuojama i niutonmetrus) turėtų veikti atletą ir išukti pavara iki nurodyto greičio, o jei ribinis greitis yra kiek didesnis nei maksimalus sportininko išvystomas (pvz. siektinas greitis), tai sportininkas visą distanciją priešinsis sistemai ir bėgs jusdamas sistemos traukimą. Sistemos bandymo rezultatai pateikti 28 paveikslėlyje panaudojus eksportuotus sistemos surinktus duomenis (apsaugant atleto duomenis čia ir kitur darbe automatiškai kreivėms priskiriami vardas ir pavardė paslėpti).



28 pav. Bandymų rezultatai atliekant treniruotę su palengvinimu, valdant *torque control* metodu

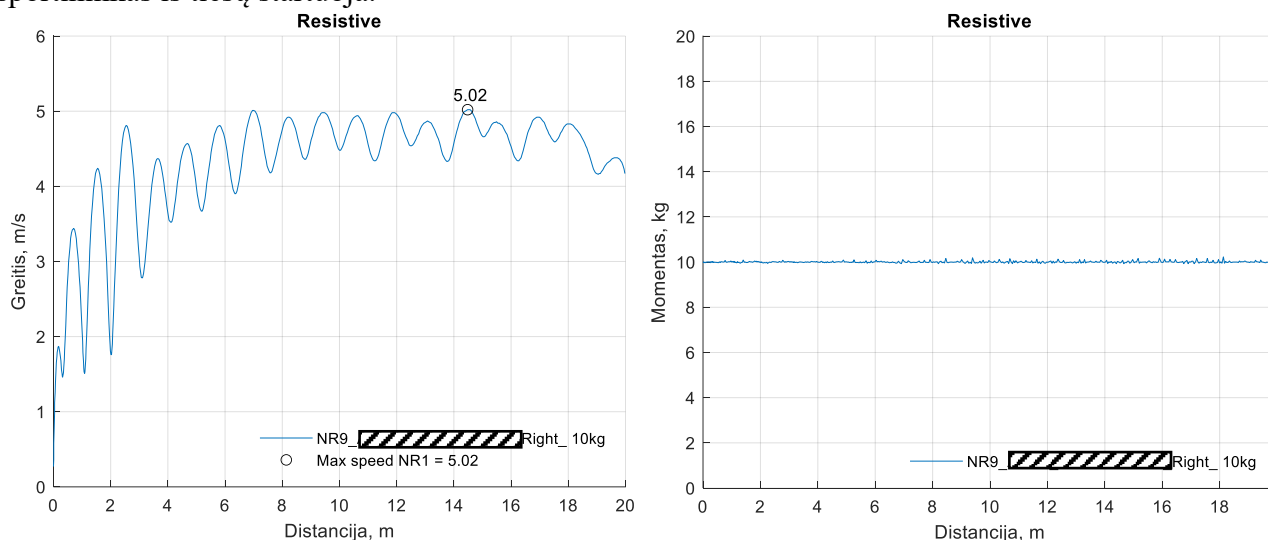
Matyti, jog ankstesnių bandymų metu sukauptų žinių pagrindu iškelta prielaida pasitvirtino – valo įtempimas visą laiką vienodas, o sportininko žingsniai, t.y. bėgimo greičio svyravimai, matomi pavaros greičio kreivėje. Be to, duomenys į sistemą pradedami įrašyti tik tada, kai greitis viršija 0.2 m/s, kitaip tariant, kuomet sportininkas iš tiesų startuoja ir pavara gali pasukti būgną, o ne nuo starto mygtuko paspaudimo. Taip pat iš sukimo momento kreivės matyti, jog nebėra sukimo momento šuolių, taigi sportininkai nepatiria staigių patempimų į priekį. Tą patį pastebėjimą pateikė ir sistemą bandę sportininkai. Taip pat visiškai neprisirišama prie pozicijos – enkoderio duomenys

apdorjami ir nubėgta distancija išskaičiuojama nebe servo stiprintuve, o valdiklyje. Tam enkoderio A ir B fazių signalai per optoporą signalo lygiui pastiprinti paduodami į PLV X0 ir X1 skaitmeninius įėjimus, kurie valdiklyje sukonfigūruoti kaip aukšto dažnio skaitliuko įėjimai (29 pav.). Vieną būgną apsisukimą atitinka 4000 impulsų.



29 pav. Naudoto enkoderio impulsų detektavimo ir enkoderio signalo išėjimo į optopora schemas

Realizavus treniruotės su palengvinimu valdymo būdą, taip pat realizuota ir treniruotė su pasunkinimu. Šiuo atveju *torque control* metodas nebetinka, kadangi į servo stiprintuvą padavus 0 V signalą greičiui sistema gali tapti nestabili. Taip yra todėl, kad jau pradinėje būsenoje pasiekiamas greičio limitas, o reikiamas sukimo momentas tuo metu lygus praktiškai nuliui, tad, anot gamintojo, tokių situacijų būtina vengti. Treniruotės su pasunkinimu uždavinys išspręstas panaudojus *speed control* metodą – servo pavarai paduodamas 0 V analoginis signalas, nurodantis 0 apsisukimų per minutę greitį, arba paprasčiausiai ramybės būseną. Taip pat nurodomas ir ribinis sukimo momentas. Tokiu būdu nurodytas sukimo momentas išnaudojamas nuliniam greičiui palaikyti, kuomet sportininkas suka būgną ir nuvynioja valą. Taip sukuriamas pastovus pasipriešinimas, o bėgimo greičio ir sukimo momento grafikai atrodo taip pat, kaip ir naudojant *torque control* metodą. Be to, duomenys į duombazę pradedami įrašyti tik tuomet, kai viršijamas 0.2 kg sukimo momentas, t.y. kai sportininkas iš tiesų startuoja.

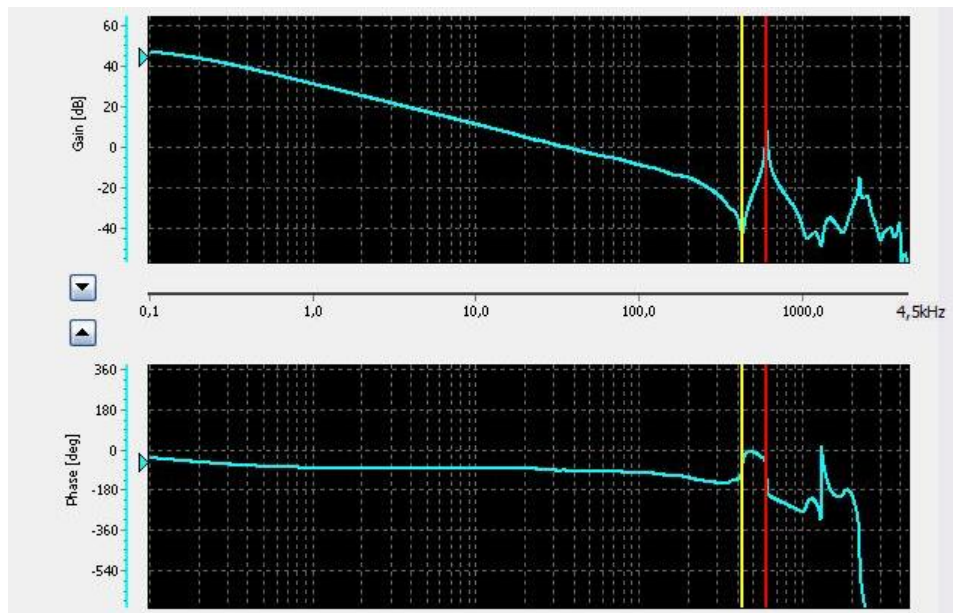


30 pav. Bandymų rezultatai atliekant treniruotę su pasunkinimu, valdant *speed control* metodu

3.2. Sistemos prototipo dažninės charakteristikos nustatymas ir rezonanso slopinimas

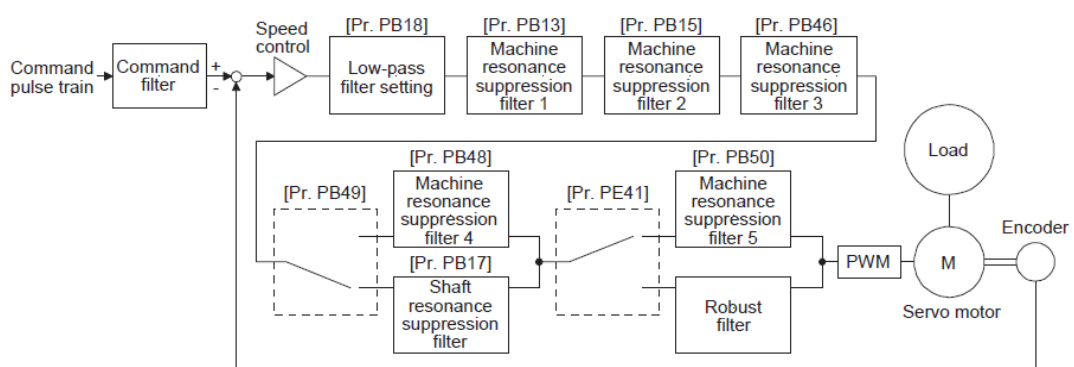
Eksperimentiškai nustacius tinkamiausius servo pavaros valdymo būdus skirtingiems treniruočių tipams ir MR Configurator2 paketo įrankiu Auto-tune suderinus servo stiprintuvo valdymo kontūro stiprinimo koeficientus ramybės būsenoje (greitis lygus nuliui) neįprastu garsu pasireiškė rezonanso reiškinys. Servo pavarų sistemose savojo svyravimų dažnio sustiprinimas (rezonansas) galimas dėl skirtingų priežasčių – tiek dėl surinkimo metu naudotuose komponentuose esančio laisvumo ar

pasireiškiančio sujungimų tamprumo, tiek dėl to, kad grįžtamojo ryšio signalas, sustiprinamas valdymo kontūre, turi sistemos savojo svyravimo dažnio komponentių. Sprendžiant šią problemą to paties paketo įrankiu Machine Analyzer atlikta prototipo analizė ir gauta Bode diagrama (31 pav.).



31 pav. Sistemos prototipo Bode diagrama

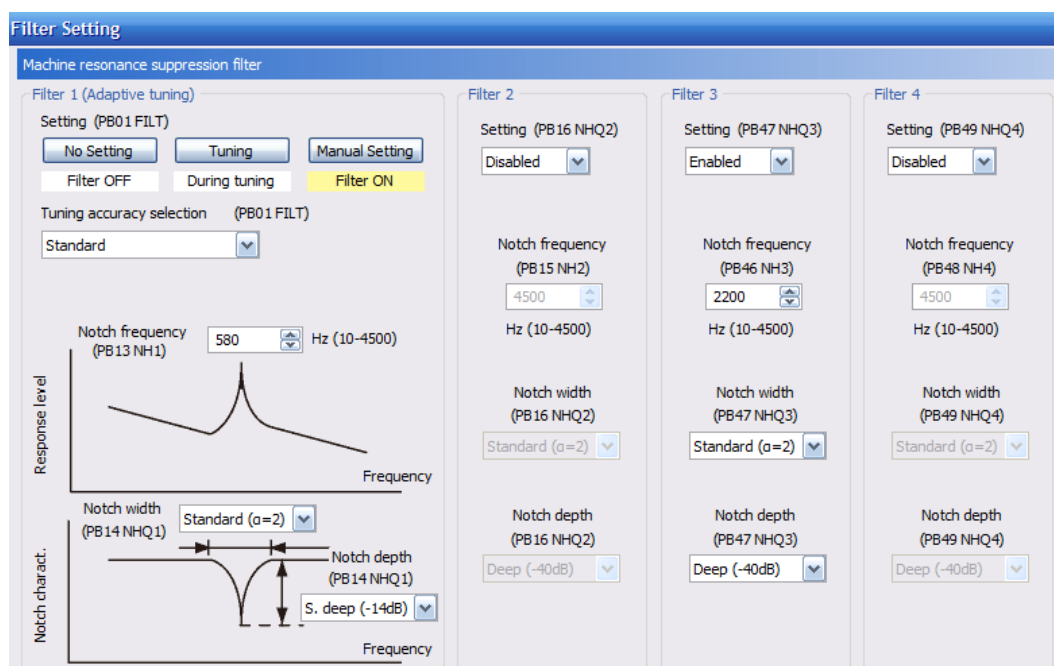
Matyti, jog sistema turi po du rezonansinius ir du antirezonansinius dažnius. Rezonanso slopinimo būdai servo sistemose gali būti įvairūs – tiek atliekant mechaninius pakeitimus, pvz. suteikiant sistemai daugiau standumo arba pakeičiant apkrovos-variklio inercijos momentų santykį, tiek ir rezonansinius dažnius slopinant elektriškai, pvz. sumažinant valdymo kontūro stiprinimo koeficientus arba pridėdant filtrus[15]. Šiuo atveju pasirinktas filtravimo būdas, kadangi naudojamas MR-J4-200A-RJ servo stiprintuvas valdymo kontūre turi 5 konfigūruojamus užtvarinius rezonanso slopinimo filtrus (32 pav). Uztvariniai filtrai susilpnina konkretų siaurą dažnių diapazoną aplink centrinę dažnį, o dažniai, viršijantys arba mažesni už nurodytą diapazoną, perduodami nepakitę. Signalai, esantys šalia centrinio dažnio, yra silpninami labiau, o artėjant link diapazono ribų slopinimas mažėja[16].



32 pav. Valdymo signalo perdavimo servo pavarai schema

Kadangi nėra žinoma, kuris tiksliai dažnis ramybės būsenoje sukelia girdimą rezonansą, nuspręsta užtvarinius filtrus į valdymo kontūrą įtraukti laipsniškai. Visų pirma sukonfigūruoti du filtrai su

centriniais dažniais ties 580 Hz ir 2200 Hz, antirezonansinius dažnius paliekant neslopinamus. Filtrų parametrai pateikiami 33 paveikslėlyje.

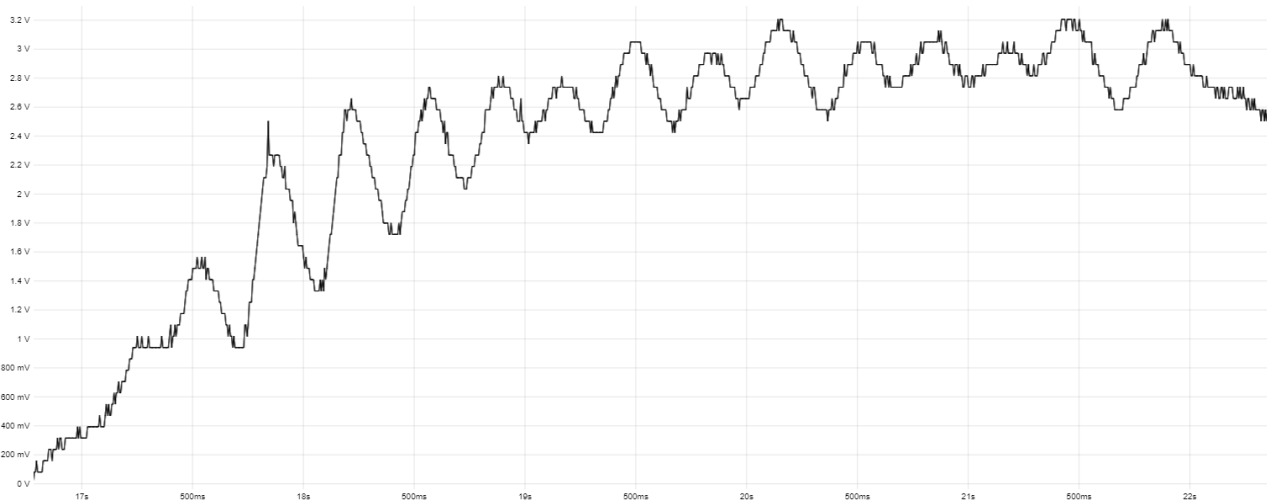


33 pav. Nustatyti juostinių filtrų parametrai MR Configurator2 paketo lango

Integravus šiuos filtrus ir išbandžius sistemą girdimas rezonansas išnyko, tai reiškia, jog rezonansinius dažnius pavyko nuslopinti teisingai.

3.3. Reikiamo duomenų nuskaitymo dažnio nustatymas

Skirtingos literatūros apžvalgoje paminėtos panašios bėgime naudojamos sistemos ir prietaisai naudoja skirtingus duomenų nuskaitymo dažnius. Kadangi sprintas (ir jo parametrai) yra labai greitai laike kintantis procesas (rezultatai fiksuojami šimtųjų sekundės dalių tikslumu), būtų galima daryti prielaidą, jog kuo nuskaitymo dažnis aukštesnis, tuo geriau. Iš dalies tai yra tiesa, tačiau tokiu būdu nuskaitytą duomenis šimtų hercų dažniu vieno bėgimo metu būtų sukauptas labai didelis kiekis duomenų, taip pat reikėtų specialios įrangos tokiems matavimams atlikti. Tam, jog išsiaiškinti, koks nuskaitymo dažnis būtų pakankamas šio treniruoklio funkcionalumui užtikrinti, atlikti eksperimentiniai bandymai. Atlikti septyni 20 metrų ilgio bėgimai su 2 kilogramų pasipriešinimu, duomenys nuskaityti 7 skirtingais laiko intervalais: kas 200 ms, 100 ms, 50 ms, 25 ms, 10 ms, 5 ms ir 1 ms. Visos gautos charakteringos bėgimų kreivės pateiktos 2 priede (34 pav. pateikta optimaliausiu variantu išrinkta kreivė, kuomet duomenys nuskaityti 5 ms intervalu). Analoginis greičio grįžtamojo ryšio signalas nuskaitytas oscilografu, y ašyje atidėtos įtampos reikšmės (kitimo intervalas 0 – 10V).

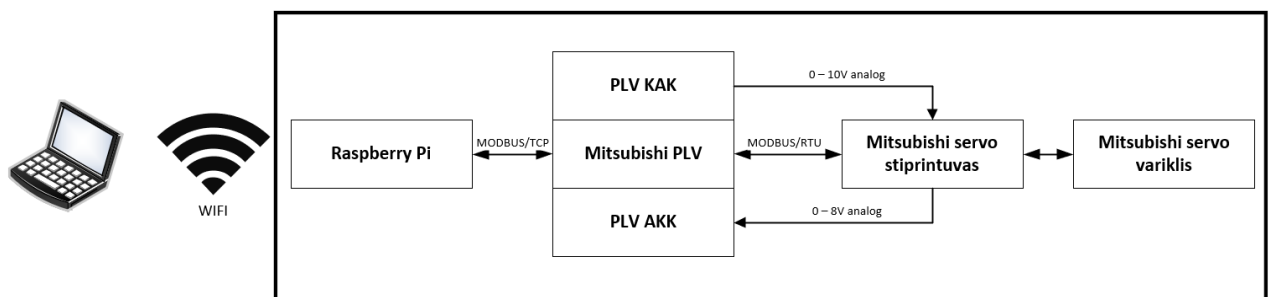


34 pav. Greičio kitimo kreivė, gauta duomenis nuskaitant 5 ms intervalais

Pirmieji du intervalai patenka į pramoninių sprendimų, tokių kaip HMI, duomenų nuskaitymo iš PLV galimybių ribas. Matyti, jog toks nuskaitymo periodas yra per mažas ir gautos kreivės nėra informatyvios. 50 ms ir 25 ms nuskaitymo intervalai taip pat nėra pakankami kokybiškai informacijai apie atskirus žingsnius gauti. 10 ms yra ribinis laikas, kuriuo nuskaitymo bėgimo greitį jau galima išskirti atskirų žingsnių ekstremumus. 1 ms, kaip ir tikėtasi, leidžia gauti glotniausią grafiką, tačiau tuo pačiu fiksuojama ir daug minimalių greičio verčių susvyravimų, kurie papildomos informacijos nebesuteikia. 5 ms, arba 200Hz, šio tyrimo ribose galėtų būti įvardintas kaip optimaliausias nuskaitymo dažnis. Tokiam dažniui pasiekti nuspręsta naudoti Raspberry Pi mikrokompiuterį ir Modbus/TCP duomenų apsikeitimo protokolą.

3.4. Duomenų apsikeitimo protokolai

Kadangi treniruoklį sudaro trys valdymo įrenginiai – Raspberry Pi, PLV ir servo pavaros stiprintuvas, ir visos trys dedamosios arba apdoroja, arba generuoja, arba atlieka abu veiksmus su duomenimis, sėkmingam treniruoklio funkcionavimui pasiekti būtina keistis informacija tarp visų įrenginių.



35 pav. Duomenų apsikeitimo tarp valdiklių schema

35 paveikslėlyje pateikta komunikacijos schema ir naudojami protokolai. Pagrindinis PLV valdiklis servo stiprintuvo palaikomu MODBUS RTU protokolu perduoda servo pavaros valdymo metodo (*torque* arba *speed control*) konfigūracijos informaciją. Tokiu būdu į stiprintuvo H6060 registrą (*Modes of operation*) įrašoma atitinkama skaitinė reikšmė iš lentelės: -21 *speed control* metodui ir -22 *torque control* metodui. Servo stiprintuvas sukonfigūruotas kaip 1 adreso įrenginys tinkle. Greičio ir sukimo momento ribinės reikšmės užduodamos panaudojant analoginius signalus ir kodas-analogas keitiklį. Naudojamas Mitsubishi kodas-analogas keitiklis konvertavimą atlieka per 450 μs,

tad realiai vertė servo stiprintuvui perduodama iškart vos tik PLV ciklo metu atnaujinama kodas-analogas keitiklio laikoma vertė. Taip pat gaunamos ir greičio bei sukimo momento grįžtamojo ryšio vertės. Analoginiai signalai pasirinkti todėl, kad šiuo atveju tai yra greičiausias įmanomas būdas apsikeisti duomenimis tarp valdiklio ir servo stiprintuvo. Standartiniai komunikaciniai protokolai užtrunka ilgiau. Programuojamame loginiame valdiklyje analoginės vertės yra skaitmenizuojamos ir pagal žinomas priklausomybes atliekami perskaičiavimai į realius fizikinius dydžius. Valo išvyniojimo ilgis išskaičiuojamas iš enkoderio impulsų signalo, gaunamo tiesiai į PLV skaitmeninį įėjimą, sukonfigūruotą kaip didelio greičio skaitliukas, pagal žinomus būgno geometrinius matmenis. Komunikacijai tarp Raspberry Pi ir PLV naudojamas abiejų pusių palaikomas Modbus TCP protokolas. Kadangi Raspberry mikrokompiuteryje yra realizuota tiek vartotojo sąsaja, tiek ir duomenų bazė, tai šiuo protokolu keliauja tiek valdymo komandos iš mikrokompiuterio į PLV, tiek grįžtamojo ryšio duomenys (atlikus konversiją atitinkamai į metrus, metrus per sekundę ir kilogramus) iš PLV į mikrokompiuterį. Šiuo atveju PLV yra sukonfigūruotas kaip serverio tipo įrenginys, o Raspberry Pi yra klientas. 4 lentelėje nurodyti PLV adresai ir priskirti kintamieji, su duomenimis atliekamas veiksmas ir keliaujančių duomenų tipas.

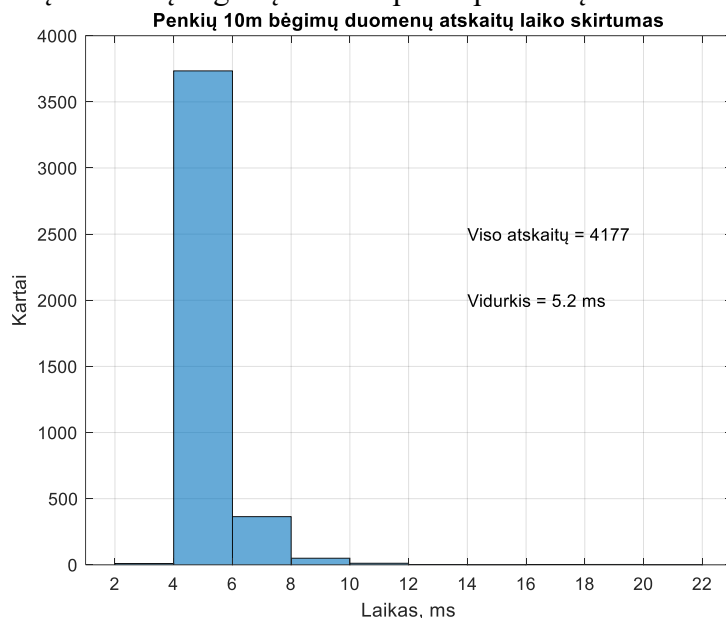
4 lentelė. Komunikacijai Modbus/TCP protokolu naudojamų PLV kintamųjų sąrašas, jų adresai ir tipai

Adresas	Kintamasis	Veiksmas	Duomenų tipas
SM400 ¹	PLC ON	Nuskaitymas	<i>Bool</i>
M212	RopeRelease	Įrašymas	<i>Bool</i>
M213	StartTraining	Įrašymas	<i>Bool</i>
M214	ZeroWrap	Įrašymas	<i>Bool</i>
M220	JogFW	Įrašymas	<i>Bool</i>
M238	EncoderReset	Įrašymas	<i>Bool</i>
M239	StopGUI	Įrašymas	<i>Bool</i>
M240	ReleaseAxis	Įrašymas	<i>Bool</i>
M241	FixAxis	Įrašymas	<i>Bool</i>
M243	NewRun	Įrašymas	<i>Bool</i>
M244	AssistiveTraining	Įrašymas	<i>Bool</i>
M245	ResistiveTraining	Įrašymas	<i>Bool</i>
M247	ZeroWrapCompleted	Nuskaitymas	<i>Bool</i>
M248	RopeReleaseCompleted	Nuskaitymas	<i>Bool</i>
D222-D223	Distance	Įrašymas	<i>Double Word</i> ²
D226-D227	RealDistance ³	Nuskaitymas	<i>Float</i>
D242-D243	SpeedGUI	Įrašymas	<i>Float</i>
D262-D263	TorqueGUI	Įrašymas	<i>Float</i>
D248-D249	SpeedFeedbackMS	Nuskaitymas	<i>Float</i>
D250-D251	DistanceCompleted	Nuskaitymas	<i>Float</i>
D252-D253	TorqueKG	Nuskaitymas	<i>Float</i>
D254-D255	StopBit	Nuskaitymas	<i>Float</i> ⁴

1 numeriu pažymėtas specialusis Mitsubishi valdiklio registras, kurio dvejetainė reikšmė visuomet lygi 1 kuomet valdiklis veikia. Šis registras periodiškai nuskaitymas ir vartotojo sąsajoje žalia ikona

indikuojama, jog ryšys su sistema (tarp Raspberry ir PLV) yra nenutrūkęs. 2 numeriu pažymėto kintamojo duomenis tipas pasirinktas double word todėl, kad sistema pasirinktinai yra apribojama dirbti su sveikais norimos bėgti distancijos skaičiais. 3 numeriu pažymėtas kintamasis nuolat perskaičiuoja enkoderio impulsus į valo ilgį, esamuoju momentu nulytą nuo būgno. Raspberry Pi periodiškai nuskaityti šį kintamąjį ir naršyklės puslapio kampe pateikia vartotojui. 4 skaičiumi pažymėtas kintamasis yra float tipo, nors realiai į jį įrašomas tik 0 arba 1. Taip išspręsta problema, jog dėl aukšto duomenų nuskaitymo dažnio (nuskaityti D248-D249, D252-D253 ir D254-D255 registrus) skirtingos Modbus TCP užklausos (nuskaityti kelis registrus ir nuskaityti vieną dvejetainį kintamąjį) nesukeltų delsos ir neiškreiptų laiko tarpų tarp duomenų nuskaitymo atskaitų. Šis kintamasis indikuoja apie bėgimo pabaigą ir duomenys išsaugomi duombazėje bei fiksuojama bėgimo pabaiga vartotojo ekrane.

Minėtasis aukštas nuskaitymo dažnis parinktas ir nustatytas pagal 3.3 skyriuje padarytas išvalgas. Tam, kad sistemos veikimas būtų stabilus, parinktas eksperimentiškai išbandytas saugus 5 ms duomenų nuskaitymo periodas. Deja, kadangi Raspberry Pi yra mikrokompiuteris, kuris nėra sukurtas veikti cikliška ir turi tam tikrą vartotojui nepasiekiamą fone atliekamų operacijų, šis skaičius nėra idealiai pasiekiamas kiekvienu laiko tarpu tarp atskaitų. Žemiau pateiktoje histogramoje matyti, kaip pasiskirsto penkių atliktų 10 metrų bėgimų laiko tarpai tarp minėtų Modbus TCP atskaitų.

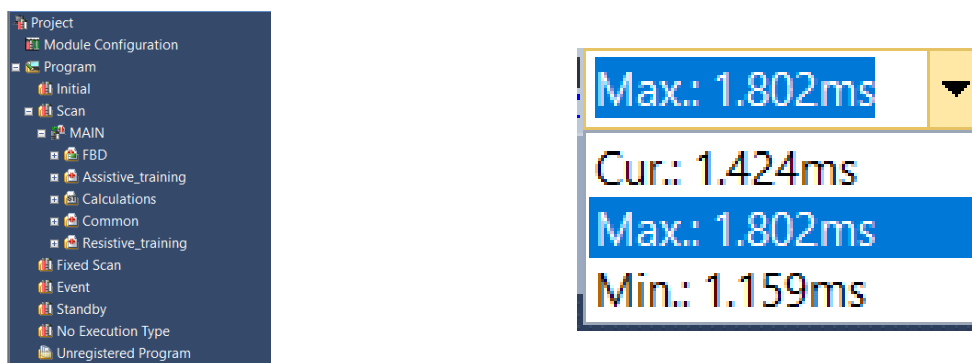


36 pav. 5 bėgimų intervalų tarp duomenų laiko atskaitų histograma

Matyti, jog aritmetinis visų laiko tarpų vidurkis lygus 5.2 ms, o absoliuti dauguma atskaitų yra tarp 4 ir 6 ms, tad galima daryti išvadą, jog duomenų nuskaitymo dažnio reikalavimas yra pasiekiamas ir išpildomas.

4. PLV programinis kodas

Realizavus komunikaciją tarp vartotojo sąsajos (t.y. Raspberry Pi mikrokompiuterio) ir programuojamo loginio valdiklio bei tarp PLV ir servo stiprintuvo, sukurti valdiklio treniruočių su palengvinimu ir treniruočių su pasunkinimu programiniai kodai. Dėl patogumo skirtingos funkcijos realizuotos išskaidžius valdiklio programą į dalis ir panaudojus skirtingas programavimo kalbas. Pagrindinės valdymo logikos suformavimui, t.y. abiem treniruočių algoritmams realizuoti, ir papildomų funkcijų, pavyzdžiui, ašies atpalaidavimo ar fiksavimo (vartotojo sąsajoje pateikiamų mygtukų forma), įgalinimui panaudota kontaktų plano (Ladder) programavimo kalba. Kaip parodyta 34 paveiksle, Ladder kalba parašytos trys paprogramės – *Assistive_training*, *Resistive_training* ir *Common*. Dydžių skaitinei konversijai iš impulsų lygmens (ADC ir DAC) į fizinių dydžių lygmenį (metrai, metrai per sekundę, kilogramai) naudojama struktūruoto teksto (ST) kalbos programos dalis, o įvairių kintamųjų palyginimui ir esamos fazės pagal enkoderio duomenis nustatymui naudojami funkciniai blokai FBD programos dalyje. Dalis programinio kodo pateikiama 3 priede. Informacijos mainų atvaizdavimui ir atliekamų funkcijų išskyrimui nubraižytos abiejų treniruočių programų veikimo schemas, pagal kurias ir realizuotos *Assistive_training* ir *Resistive_training* programos dalys, pateikiamos 2 priede. Jose visos funkcijos spalviškai atskirtos į tris dalis: a) mygtukus ir duomenų atvaizdavimą vartotojo sąsajoje, b) logiką valdiklyje ir c) duomenis bei konfigūraciją servo stiprintuvo dalyje. 37 paveikslėlyje parodytas programinio kodo medis ir programos vieno ciklo įvykdymo laikas.



37 pav. PLV programos struktūra ir programos vykdymo laikai

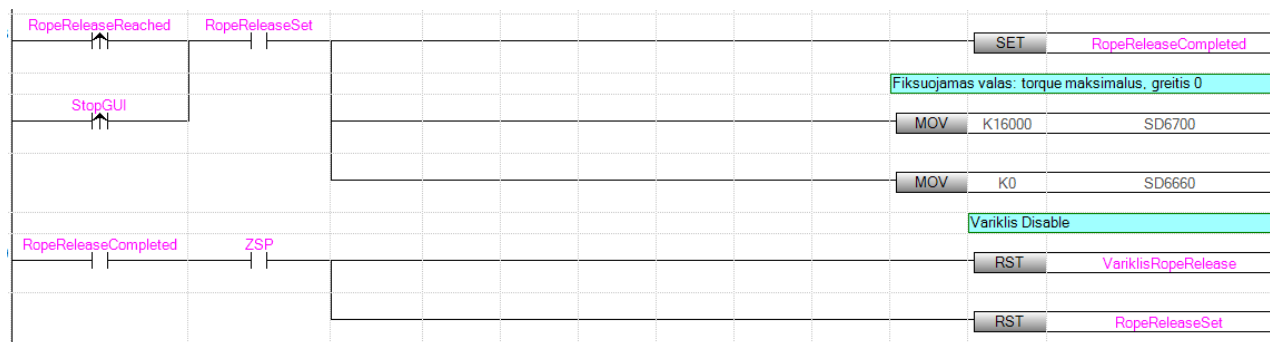
4.1. Saugaus sistemos perėjimo tarp atliekamų funkcijų ir rimties išpildymas

Nors tiksli pavaros pozicija valdant servo variklį tiek *speed control*, tiek *torque control* metodais negalima, tačiau atkreiptinas dėmesys į saugos aspektą. Pradinė sukonfigūruota servo stiprintuvo būseną yra *speed control* metodas. Šiuo metodu veikia valo suvyniojimo (angl. *jog*), ašies atpalaidavimo, valo išvyniojimo treniruotei su palengvinimu arba valo suvyniojimo po treniruotės su pasunkinimu funkcijos, be to, realizuojama ir pati treniruotė su pasunkinimu. *Torque control* tuo tarpu naudojamas tik treniruotei su palengvinimu išpildyti ir toliau aprašomos situacijos neturi. Kuomet naudojamas valdymas pagal greitį ir variklis nėra įgalintas, t.y. į skaitmeninį stiprintuvo įėjimą ST1 (forward rotation start) arba ST2 (reverse rotation start) nėra paduodamas signalas, servo pavara yra servo-lock režime (38 pav.). Tai reiškia, jog su tuo metu maksimaliu sukimo momentu (jei šis yra apribotas) siekiama išlaikyti esamą fiksuotą poziciją. Jei variklio ašis yra išvedama iš šios fiksuotos pozicijos, tai padidinus sukimo momento ribą variklis viršys iš pozicijos išvedusį pasipriešinimą ir grįš į pradinę padėtį.

(Note 1) Input device		(Note 2) Rotation direction			
ST2	ST1	VC (Analog speed command)			Internal speed command
		Polarity: +	0 V	Polarity: -	
0	0	Stop (servo-lock)	Stop (servo-lock)	Stop (servo-lock)	Stop (servo-lock)
0	1	CCW	Stop (no servo-lock)	CW	CCW
1	0	CW		CCW	CW
1	1	Stop (servo-lock)	Stop (servo-lock)	Stop (servo-lock)	Stop (servo-lock)

38 pav. Servo pavaros elgesys priklausomai nuo valdymo signalo įtampos ir nurodytos krypties

Toks aspektas yra svarbus siekiant saugiai pereiti iš pavaros darbo režimo realizuojant kurią nors funkciją į rimties režimą. Jei perėjimo metu variklis persijungtų į servo-lock režimą, o atletas dar galėtų kiek pasukti būgną ir maksimalus momentas būtų padidintas tik po to, grįždama į nulinę poziciją sistema staigiai truktelėjusi per valą galėtų smarkiai sužaloti atletą. Taigi, svarbu, jog ST1 arba ST2 išjungimo metu variklio sūkliai būtų lygūs 0, o laikantysis sukimo momentas būtų lygus maksimaliam variklio momentui. Šie elementai turi būti įtraukti į programinį kodą, o tokio sprendimo pavyzdys vienoje iš funkcijų pateiktas 39 paveikslėlyje žemiau. Treniruotės su palengvinimu pradžioje atletas, toldamas nuo treniruoklio, t.y. eidamas link starto linijos, išvynioja valą (kintamasis *RopeReleaseSet*). Tai realizuojama servo pavaros greitį prilyginant nuliui bei apribojant palaikantįjį sukimo momentą iki minimalaus. Pasiekus reikiamą bėgimo atstumą, valo išvyniojimas stabdomas – greitis išlaikomas lygus nuliui, o momentas didinamas iki maksimalaus ir įgalinamas tarpinis kintamasis *RopeReleaseCompleted*. Pastarasis, veikdamas kartu su skaitmeniniu valdiklio įėjimu X2, susietu su kintamuoju *ZSP* (angl. zero speed), pasiekus nulinį greitį (sukonfigūruotas išėjimas servo stiprintuve, paduodamas tiesiai į PLV) atstato kintamąjį, susietą su PLV išėjimu į ST1 arba ST2 stiprintuvo įėjimą, į nulinę būseną ir taip saugiai išjungia variklį. Tokiu būdu garantuojama, jog servo pavarai užrakinant poziciją atletas nebeišvynioja valo ir nėra galimybės netikėtai traumuoti atleto.

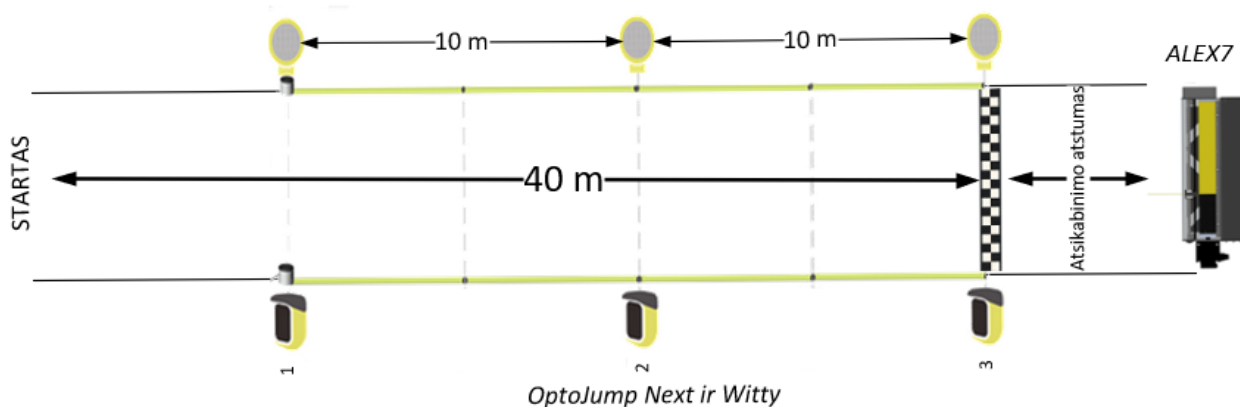


39 pav. Saugaus sistemos perėjimo tarp sukimosi, stabdymo ir rimties fazių programinis išpildymas

5. Palyginamieji bandymai su kitomis sistemomis

5.1. Witty ir Alex7

Sukūrus sistemas, dar vadinamos Alex7 (*pagal idėjos autoriaus vardą*), valdymo programinį kodą tiek PLV, tiek Raspberry Pi ir ištestavus sistemas funkcinių tinkamumą paprastų treniruočių su atletais metu, sistemas tikslumui įvertinti atlikti testai su dviem literatūros apžvalgoje paminėtomis sistemomis – OptoJump Next, kartu su Witty, bei Qualisys. Pirmoji sistema plačiai naudojama bėgikų atkarpų įveikimo laikui matuoti (Witty), taip pat matuojami žingsnio ilgiai ir kontakto su žeme laikas (OptoJump Next). Žingsnių parametrų išskaičiavimas yra tolimesnė sistemos vystymo kryptis, tačiau šiuo atveju aktualus atkarpų įveikimo laiko skirtumas tarp komerciškai naudojamos optinės sistemos ir projekto metu kuriamos sistemos. 40 paveikslėlyje pavaizduota tyrimo schema. Bandymai atlikti atletams bėgant su palengvinimu, t.y. sistema yra už finišo linijos ir traukia sportininką link savęs. Iš viso bėgama 40 metrų (tarp starto ir finišo) bei paliktas tam tikras atstumas sportininko atsikabinimui nuo sistemos. Witty sistemą šiuo atveju sudaro trys optiniai reflektoriniai jutikliai, kurių vienas yra ant finišo linijos, o kiti du – 10 metrų intervalais nuo finišo. Tokiu būdu matuojamas paskutinių 20 metrų, tai yra greičiausios atleto atkarpos, įveikimo laikas.



40 pav. Testų su OptoJump Next, Witty ir kuriama sistema schema

Bandymų metu Witty sistemos užfiksuoti 10 m atkarpų įveikimo laikai ir Alex7 sistemos paskutinių 2x10 m atkarpų įveikimo laikai pateikti 5 lentelėje. Bandymai atlikti su LSU mokslininkų pagalba, iš viso bandymai daryti su trimis skirtingais atletais, kiekvienam atliekant po 2 bėgimus lengvosios atletikos manieže.

5 lentelė. Bandymų su OptoJump Witty ir kuriama sistema Alex7 rezultatai

Sportininkas nr. 1				Sportininkas nr. 2				Sportininkas nr. 3			
Su palengvinimu, 9m/s, 6kg				Su palengvinimu, 9m/s, 6kg				Su palengvinimu, 10m/s, 6kg			
Nr.	Sistema	Laikas	Laikas	Nr.	Sistema	Laikas	Laikas	Nr.	Sistema	Laikas	Laikas
1.	Witty	1,05	1,04	1.	Witty	1,16	1,16	1.	Witty	1,01	1
	Alex7	1,119	1,11		Alex7	1,207	1,179		Alex7	1,048	1,025
	Skirtumas	0,069	0,070		Skirtumas	0,047	0,019		Skirtumas	0,038	0,025
2.	Witty	1,06	1,06	2.	Witty	1,17	1,14	2.	Witty	1,01	0,97
	Alex7	1,116	1,119		Alex7	1,217	1,182		Alex7	1,048	0,999
	Skirtumas	0,056	0,059		Skirtumas	0,047	0,042		Skirtumas	0,038	0,029

Iš gautų rezultatų matyti, didžiausias skirtumas tarp dviejų sistemų atkarpose po 10 metrų neviršija 0,1 sekundės. Atsižvelgiant į tai, jog šios sistemos veikia skirtingose laiko atskaitose ir naudoja skirtingus principus – Witty sistema skaičiuoja laiką tarp pirmojo ir antrojo jutiklių suveikimo, o Alex7 skaičiuoja laiką nuo bėgimo pradžios ir laiko atskaitas susieja su nubėgtu atstumu, ir 10 m segmentų laikus vėliau atskaičiuoja iš šių duomenų, galima teigti, jog prototipo tikslumas atitinka rinkoje esančios ir profesionalų naudojamos sistemos tikslumą. Be to, kuriamas treniruoklis nėra matavimo prietaisas, tad pasiekti rezultatai yra geras konkurencinis pranašumas.

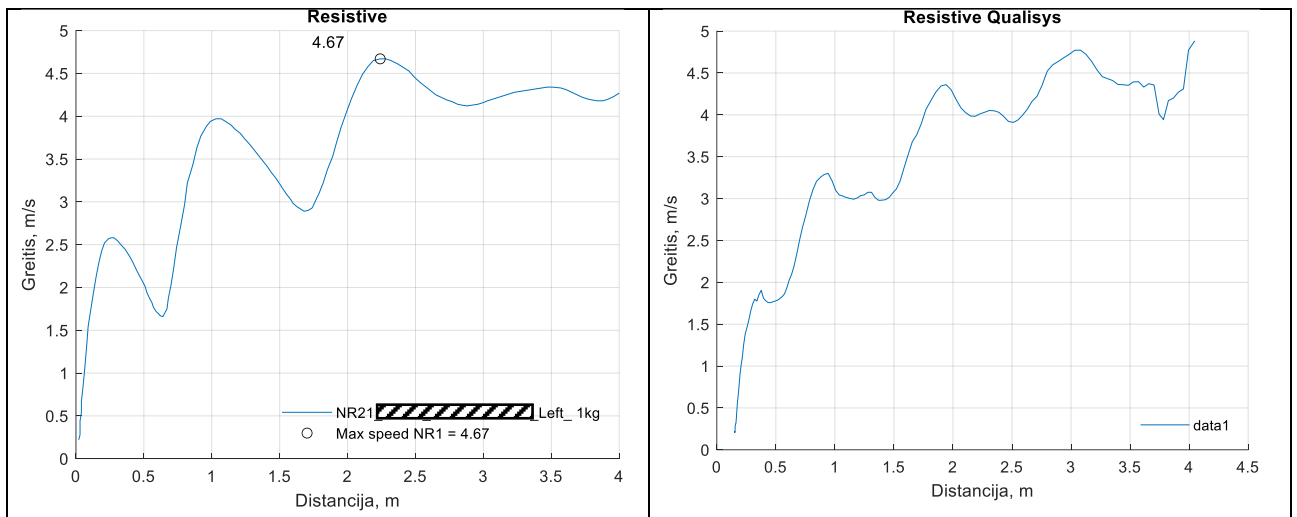
5.2. Qualisys ir Alex7

Antruoju atveju palyginamieji sistemų bandymai buvo atlikti su švediška Qualisys Oqus7+ sistema. Ši sistema yra kitokia, netaikoma tiesiogiai sprinterių maksimalaus greičio bėgimų matavimui ir įvertinimui. Tai daugiau laboratorinė sistema, įvertinanti atletų judesius, sąnarių darbą, pirmųjų žingsnių startuojant kinematiką ir panašiai. Naudojami atšvaitai, klijuojami prie atleto stuburo, galūnių ir sąnarių. Šių atšvaitų judėjimas erdvėje (o kartu ir greičiai, pagreičiai ir t.t.) fiksuojami 10 kamerų pagalba 100 Hz dažniu, patalpoje išdėstyty taip, kad bet koku atšvaitas būtų matomas bent dviems kameroms. Bandymai atlikti KTU Biomechanikos laboratorijoje, bandymuose dalyvavo tas pats ankstesniame tyrime kaip „Sportininkas Nr. 1“ įvardintas atletas. Atlikti du 4 metrų bėgimai su 1 kilogramo pasipriešinimu, abu bėgimus atsispiriant ta pačia kaire koja. Tam, kad abiejų sistemų matavimai būtų kuo artimesni viena kitai, atšvaitas sportininkui priklijuotas ties T12 stuburo slanksteliu – Alex7 prisikabinimo diržo viršuje. Kadangi sprintas yra labai aiškiai išreikštas judėjimas tiesia trajektorija, ir Alex7 sistema fiksuoja greičio dedamąją būtent bėgimo kryptimi, buvo padaryta prielaida, jog T12 atšvaito judėjimas sistemos kryptimi, užfiksuotas Qualisys sistema, turėtų duoti panašius greičio rezultatus, kaip ir Alex7 sistema. Žemiau pateiktame paveikslėlyje kaip pavyzdys parodyta dalis Qualisys Oqus7+ sistemos KTU Biomechanikos laboratorijoje.

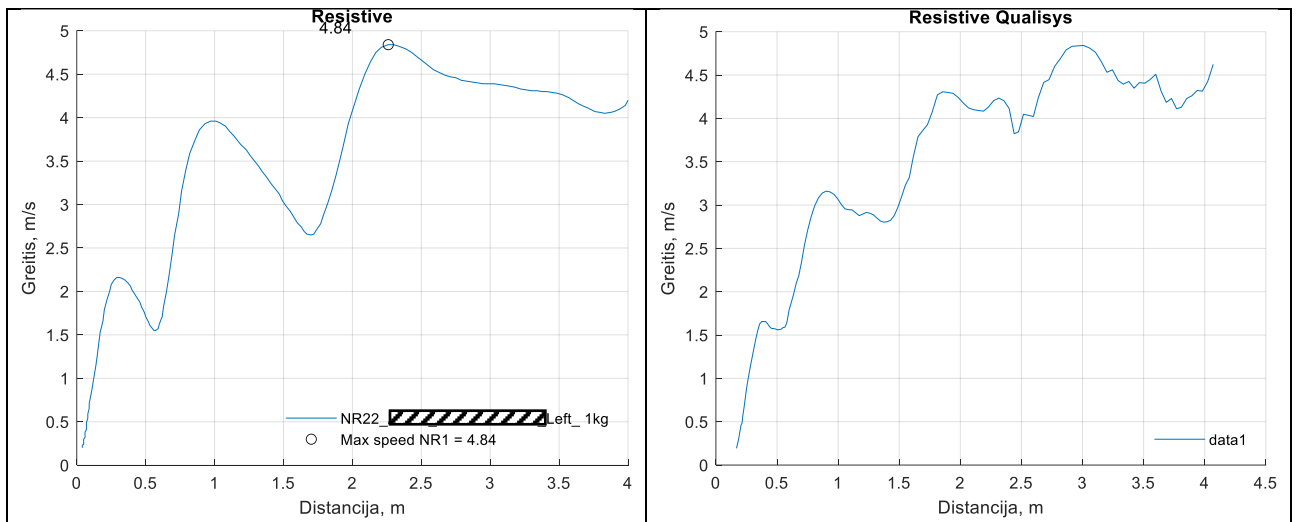


41 pav. Qualisys sistema KTU Biomechanikos laboratorijoje

Žemiau pateiktuose grafikuose (42 pav. ir 43 pav.) sugretinti Alex7 ir Qualisys sistemų surinktais duomenimis nubrėžti grafikai. Qualisys duomenys, kaip ir Alex7 sistemoje, atskaityti nuo 0.2m/s greičio (todėl atskaita ne nuo 0).



42 pav. Pirmojo bėgimo abiejų sistemų fiksuoto greičio rezultatai



43 pav. Antrojo bėgimo abiejų sistemų fiksuoto greičio rezultatai

Iš gautų kreivių galima daryti kelias išvadas. Visų pirma, matyti, jog tiek kairėje, tiek dešinėje pusėje esančios kreivės kryptingai auga, o augimas susideda iš atskirų etapų, t.y. žingsnių. Taip pat maksimalūs abiejų sistemų fiksuoti greičiai yra panašūs abiem atvejais. Kita vertus, vertinant atskirus žingsnius, jų metu nukeliamus atstumus ir išsvystytus greičius matyti, jog reikšmės smarkiai skiriasi. Taip nutiko dėl kelių priežasčių. Visų pirma, kuriama Alex7 sistema bėgimo greitį ir poslinkį įvertina iš būgno sukimosi duomenų, kuriems tiesioginę įtaką daro valo dalis tarp būgno ir valo įtempimo mazgo. Tai reiškia, jog atleto masės centro judėjimo greitis ir poslinkis tiek bėgimo kryptimi, tiek vertikalia išsitiesimo kryptimi, tiek ir svyravimas į šonus takelio plotyje valo įtempimo mechanizme suvedamas į vieną dimensiją. Tuo tarpu Qualisys sistema yra 3D sistema, kuri tą patį žingsnį geba išskirti į 3 dedamasias. Taigi, greičio vektoriaus projekcija į finišą orientuotoje ašyje yra tik dalis viso greičio, tai matyti grafike - lyginant su Alex7 sistema, Qualisys sistemos fiksuotos greičio vertės kone kiekvieno žingsnio metu yra bent kiek mažesnės. Antroji priežastis, glaudžiai susijusi su pirmąja – dėl laboratorijos takelio ilgio apribojimų vertinti būtent pirmieji žingsniai po starto, kurių metu labiausiai ir pasireiškia minėto masės centro judėjimo ne viena kryptimi, o visomis trimis įtaka. Galiausiai, negalima atmesti ir inercijos pasireiškimo treniruoklyje – pirmųjų žingsnių metu pasireiškia didžiausia atleto sprogtamoji jėga, sukurianti didelį pagreitį, tačiau žingsnių galinėje

fazėje greitis panašiu pagreičiu ir slopsta. Tuo tarpu dėl mažos būgno stabdymo jėgos, šiuo atveju ~10 niutonų, mechaninė sistema negali idealiai sekti atleto greičio mažėjimo vos tik pasiekiamas žingsnio maksimumas, taip įnešant tam tikrą svyravimų slopinimą. Optinė sistema Qualisys inercijos neturi, todėl visus pokyčius gali fiksuoti tiksliau ir atvaizduoti smulkesnius svyravimus. Galima daryti išvadą, jog abi šios sistemos yra tinkamos, tačiau, kaip ir tikėtasi, turi skirtingas paskirtis – kuriama Alex7 sistema visų pirma yra treniruoklis, kuris geba atlikti ir matavimus. Tuo tarpu Qualisys sistema yra aukšto lygio judesių kinematikos fiksavimo ir įvertinimo sistema, gebanti generuoti didelius kiekius duomenų ir atvaizduoti atleto kinematinių grandžių judėjimą bėgimo metu, tačiau yra per sudėtinga taikymui įprastose treniruotėse.

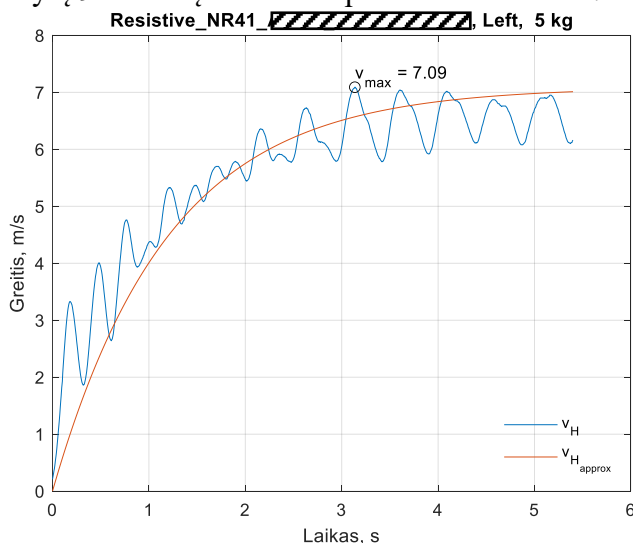
6. Duomenų analizė ir bėgimų modeliavimas

Padarius išvadą, jog sistemos fiksuojami duomenys yra pakankamai tikslūs, ir galėtų būti naudojami sportininkų galimybės ir pasirodymams vertinti, pradėtas kurti matematinis įrankis surinktiems duomenims apdoroti. Kuriama sistema duomenis iš vartotojo sąsajos leidžia eksportuoti .csv formatu. Eksportuotame faile pateikiami segmentiniai 5 m ir 10 m atkarpų įvertinimai (maksimalaus ir vidutinio greičio bei atkarpos įveikimo laiko) bei neapdoroti greičio, sukimo momento ir nubėgtos distancijos duomenys, susieti su laiko atskaitomis. Duomenų analizei pasirinktas MATLAB programinis paketas. Surinktus duomenis galima analizuoti tiek tiesiogiai, tiek išskaičiuojant 1.3.2 skyrelyje paminėtus išvestinius dydžius, pvz. pagreitį, jėgą, galią ir pan. Taip pat galima kombinuoti kelis parametrus ir daryti išvestinius grafikus (priklausomybes), lyginti skirtingus to paties sportininko bėgimus arba skirtingų sportininkų bėgimus. Taip pat galima atlikti ir įvairius matematinius modeliavimus. Nors sporto mokslo terminologijoje matematinis modeliavimas kiek skiriasi nuo valdymo moksle įprastai naudojamo matematinio modeliavimo, tačiau sporte ši sritis sparčiai skinasi kelią. Matematinis modeliavimas sporto moksle apima sportininko rezultatų nuspėjimą esant tam tikroms sąlygoms, taip pat optimalaus krūvio parinkimą pagal teorines prielaidas prognozuojant atleto reakciją į skirtingo dydžio krūvius.

Šio projekto apimtyje parašytas universalus MATLAB programinis kodas (4 priedas), kuris pats nuskaityto kompiuterio aplanke esančius iš sistemos eksportuotus .csv failus, pagal treniruotės tipą faile esančius duomenis priskiria atitinkamus masyvus ir juos apdoroja pagal toliau aprašytą seką. Vėliau šis kodas gali būti perkeltas tiesiai į vartotojo sąsają. Tolimesniuose poskyriuose pateikiami vieno 30 metrų bėgimo su 5kg pasipriešinimu analizės rezultatai.

6.1. Išvystomo greičio ir pagreičio analizė

Pamatinė bėgimo analizės priklausomybė yra greičio priklausomybė nuo laiko. 44 paveikslėlyje matyti, jog mėlyną greičio grafiką galima būtų atskirti į dvi dalis – pereinamąją įgreitėjimo dalį ir pastovaus greičio dalį. Svyravimai kreivėje indikuoja atleto žingsnius – kontakto su žeme metu greitis krenta, atsispiriant – kyla. Šis greičio grafikas nubrėžtas palei eksperimentinius duomenis, toje pačioje koordinatinių sistemoje nubrėžtas ir aproksimuotas greičio grafikas (raudona spalva). Visų pirma nustatytas maksimalus pasiektas bėgimo greitis, apytiksliai nustatytas įsibėgėjimo laikas τ , ir pagal 1.3.2 poskyryje aprašytą 9 formulę nubrėžta aproksimuota kreivė.



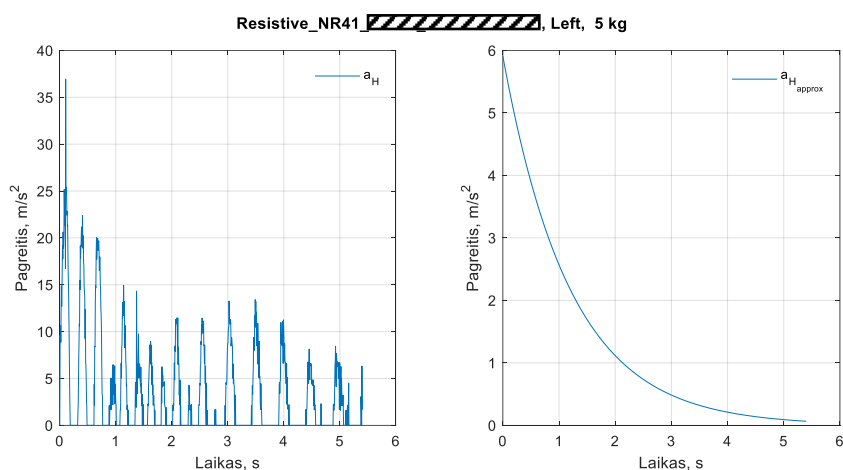
44 pav. Greičio iš eksperimentinių duomenų ir aproksimuoto pagal modelį greičio kreivės

Matyti, jog moksliniuose straipsniuose pateikiama sprinto aproksimacija tik dalinai atitinka eksperimentinius duomenis – sutampa greičio kitimo pobūdis (eksponentinė funkcija) ir vidutinės greičio vertės išibėgėjimo fazės pabaigoje, tačiau pradinėje išibėgėjimo fazėje ir pastovaus greičio fazėje duomenys aproksimuojami neteisingai (sutampa su ekstremumais, o ne su vidutinėmis vertėmis. Kuriamos sistemos teikiami duomenys yra informatyvesni nei modeliavimas pagal maksimalų greitį ir išibėgėjimo laiką.

Toliau iš greičio ir laiko atskaitų duomenų apskaičiuojamas ir pagreitis. Pagreičiui skaičiuoti naudojama paprasta pagreičio tarp dviejų taškų formulė:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

Skaičiavimuose pagreitis skaičiuojamas tarp dviejų viena po kitos einančių atskaitų. Dėl tikslumo, nors pagal apibrėžimą Δt turėtų būti lygu 5ms, imamas tikslus laiko skirtumas pagal realius duomenis. 45 paveikslėlyje taip pat pateikiama ir pagal 1.3.2 poskyryje pateiktą 10 formulę aproksimuota pagreičio kreivė.

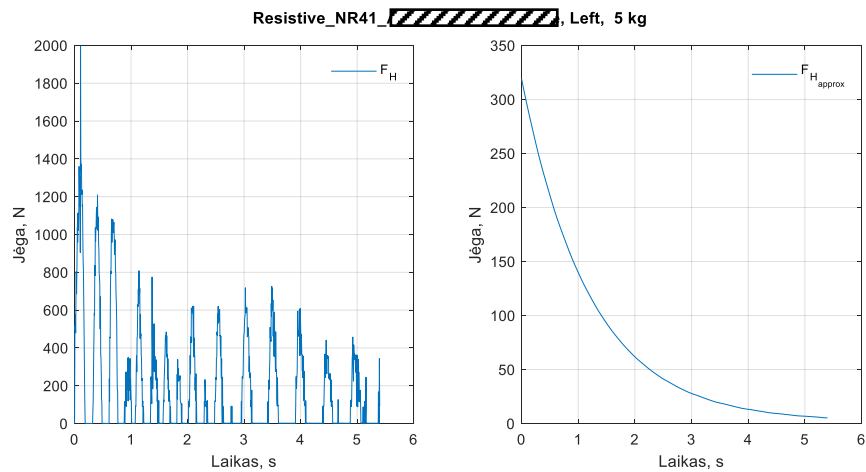


45 pav. Pagreičio iš eksperimentinių duomenų ir aproksimuoto pagal modelį pagreičio kreivės

Kaip ir greičio atveju, aproksimuota kreivė atitinka pagreičio kitimo tendenciją, tačiau neatliepia kiekvieno žingsnio metu išvystomo momentinio pagreičio. Nors pats pagreitis nėra informatyvus duomuo sporto treneriui, tačiau yra būtinas tolimesnei analizei.

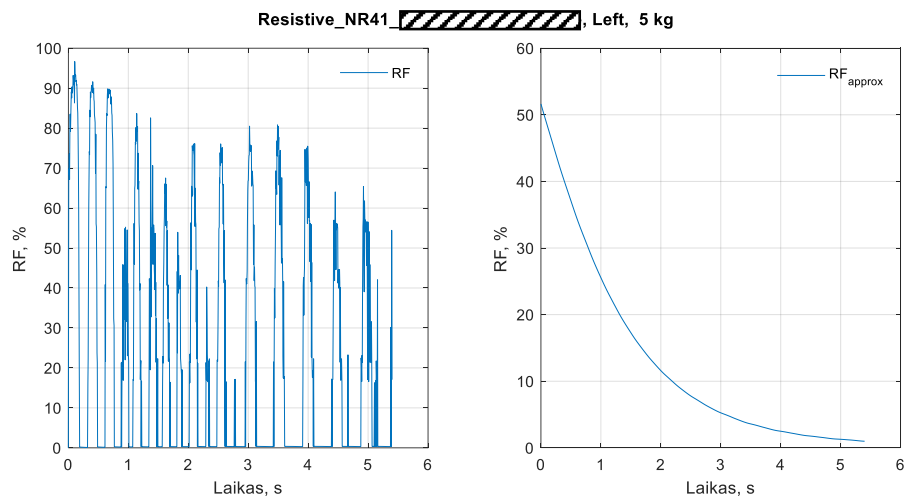
6.2. Išvystomos jėgos ir galios analizė

Turint kinematinčius bėgimo parametrus toliau apskaičiuojami atleto išvystomi dinaminiai parametrai. Visų pirma apskaičiuojama išvystoma jėgos dedamoji horizontalioje (t.y. bėgimo krypties) ašyje. Naudojama [7] straipsnyje nurodyta ir 1.3.2 skyrelyje pateikta 11 formulė, šiuo atveju taikoma abiem atvejais – tiek naudojant eksperimentinius pagreičio kitimo duomenis, tiek aproksimuotas vertes. Iš rezultatų 45 paveikslėlyje matyti, jog momentinės jėgos reikšmės atsispyrimo metu yra ženkliai didesnės, nei aproksimuotos vertės tais pačiais laiko momentais. Tačiau, skirtingai nei greičio ir pagreičio atveju, jėgos aproksimacija jau turi savo prasmę. Tai atsispindi 46 paveikslėlyje.



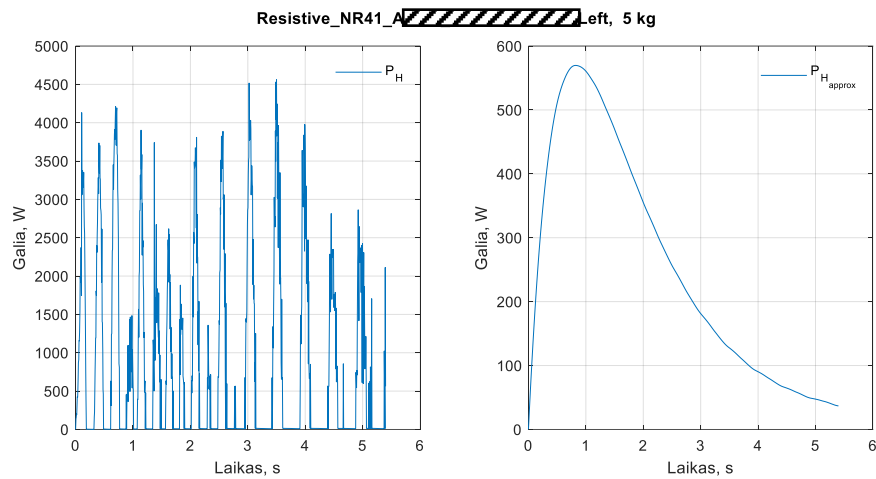
46 pav. Iš eksperimentinių duomenų apskaičiuotos jėgos ir aproksimuotos pagal modelį jėgos kreivės

Iš pagreičio duomenų ir atleto kūno parametrų (ūgio ir svorio) išskaičiavus išvystomą horizontalią jėgą, analizuojant bėgimą, kaip paminėta 1.3.2 skyrelyje, svarbus palyginamasis dydis yra jėgos santykis (angl. ratio of force, žymima RF). Tai santykinis dydis, nurodantis horizontalios jėgos procentą lyginant su visa išvystoma jėga. Iš 46 paveikslėlio matyti, jog naudojant iš eksperimentinių duomenų apskaičiuotą horizontalią dedamąją nėra įmanoma išskirti jėgos santykio kitimo tendencijos. Kadangi RF įvertis skirtas ne kiekvieno žingsnio, bet viso bėgimo tendencijai apibrėžti, 47 pav. antrasis grafikas, gautas naudojant aproksimuotus jėgos įverčius, yra aiškesnis. Tokiu būdu siekiant maksimaliai informatyvių rezultatų analizėje naudojami tiek eksperimentiniai duomenys, tiek ir pagal matematinį modelį aproksimuoti duomenys.



47 pav. Iš eksperimentinių duomenų apskaičiuotos ir iš aproksimuotų duomenų apskaičiuoto jėgų santykio kitimo kreivės

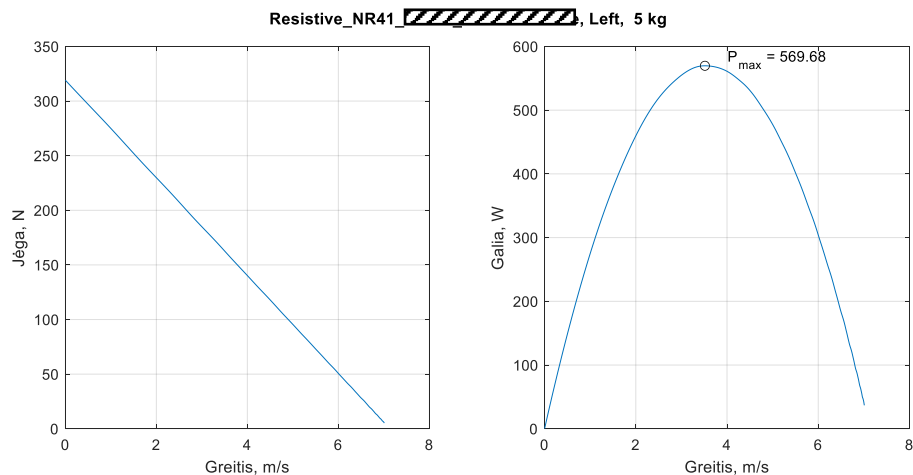
Išanalizavus išvystomą horizontalią jėgą tiek kiekybiškai, tiek santykinai, pagal 1.3.2 skyrelyje pateiktą 13 formulę įvertinama atleto išvystoma galia. Grafiniai rezultatai pateikti 48 paveikslėlyje. Matyti, jog šiuo atveju, kaip ir jėgos santykio atveju, eksperimentinių duomenų pagrindu nubrėžta kreivė nėra informatyvi, nes sunku išskirti galios kitimo tendenciją. Aproksimuota kreivė, net ir su aproksimavimo paklaidomis, geriau charakterizuoja išvystomos galios dydį ir pasiskirstymą bėgimo metu.



48 pav. Iš eksperimentinių duomenų apskaičiuotos galios ir aproksimuotos pagal modelį galios kreivės

6.3. Išvestinės priklausomybės ir optimalaus krūvio parinkimas

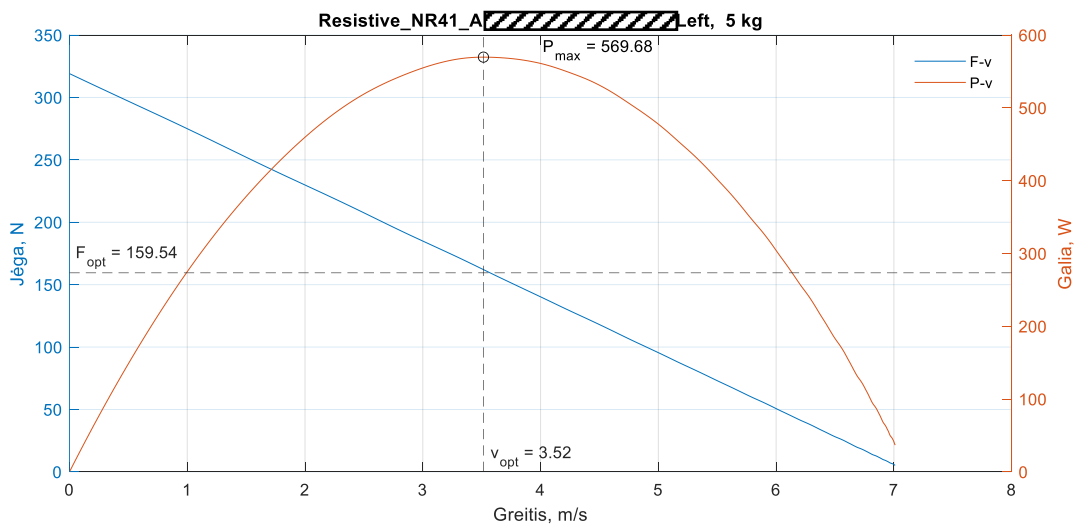
Ankstesniuose 7.1 ir 7.2 poskyriuose atliktas bėgimas analizuotas per tiesiogiai išskaičiuojamus parametrus, t.y. visos priklausomybės brėžtos kaip tam tikro parametro (išskaičiuojamo tiesiai iš eksperimentinių duomenų ar panaudojant jau apskaičiuotą dydį) kitimas laike. Atlikus tokią analizę galima išvesti priklausomybes, kaip tie dydžiai kinta ne laike, bet priklauso vienas nuo kito. Sporto moksle labai svarbios yra jėgos-greičio ir galios-greičio priklausomybės, atvaizduojančios, kaip išvystoma jėga ir galia priklauso nuo pasiekto bėgimo greičio. Analizuojamo bėgimo priklausomybės pateiktos 49 paveikslėlyje. Kaip taisyklė, jėgos-greičio priklausomybė visada yra tiesė, o galios-greičio – parabolė.



49 pav. Jėgos – greičio ir galios – greičio priklausomybės

Kaip ir tikėtasi pagal sprinto teoriją, didžiausia jėga išvystoma starto metu, o didžiausia galia – pasiekus pusę maksimalaus greičio. Parabolės viršūnėje nustatoma maksimali galios reikšmė.

Gavus šias priklausomybes galima pereiti prie bėgimų modeliavimo dalies. Pagrindinė sprinto modeliavimo priemonė yra jungtinis šių dviejų priklausomybių grafikas, pateiktas 50 paveikslėlyje. X ašyje atidedamos greičio atskaitos, o Y ašys atskiriamos į dvi, iš kurių vienoje – jėgos reikšmės, kitoje – galios reikšmės.



50 pav. Optimalaus krūvio nustatymo grafikas

Toks grafikas leidžia atlikti kelis svarbius veiksmus, nukreiptus ne į įvykusio bėgimo analizę, bet į ateities bėgimų modeliavimą ir prognozes. Visų pirma, kadangi kuriamas treniruoklis leidžia atlikti treniruotes su pasipriešinimu, nustatomas optimalus pasipriešinimo krūvis. Optimalus pasipriešinimo krūvis reiškia, jog parenkamas toks kilogramų skaičius, prie kurio atletas viso bėgimo metu dirbs maksimalios galios fazėje arba bent arti jos [14]. Pagal šią teoriją iš nustatyto maksimalios išvystytos galios taško išvedamas statmuo į x ašį. Ten, kur statmuo kerta jėgos-greičio kreivę (mėlyna spalva), išvedama projekcija į jėgos Y ašį. Projektuota reikšmė ir yra optimali jėga (šiuo atveju, lygi 159,54 N). Kitaip tariant, tai yra pasipriešinimo reikšmė, prie kurios sportininko raumenys dirba optimalaus apkrovimo režime ir išvysto didžiausią galią, taip vystant jėgos rodiklius. Antra, pagal šį grafiką galima modeliuoti kelis skirtingus treniruočių planus ir prognozuoti, kaip tai gali veikti pasiekiamus rezultatus. Pavyzdžiui, kai kurios treniruočių strategijos apkrovas bėgimui su pasipriešinimu siūlo parinkti pagal atleto kūno svorį, tokiu atveju atskaitos taškas atidedamas ant jėgos-greičio kreivės ir statmuo keliamas į galios-greičio parabolę. Taip pat galima prognozuoti ir išvystomą greitį, ties kuriuo sportininkas bus apribotas papildomos apkrovos.

Taigi, galimybė išvesti 49 pav. parodytą jungtinį grafiką leidžia tiek objektyviai įvertinti optimalią servo pavaros kuriamą apkrovą pagal galios kriterijų, tiek ir pagal trenerių metodikas kurti įvairius treniruočių planus arba atsistatymo planus (pvz. realizuojant apkrovos įtakos galiai ir greičiui nustatymą slenkamo taško grafike pagalba vartotojo sąsajoje).

Išvados


1. Baigiamojo projekto metu buvo išanalizuota panaši į kuriamą sistemą jau egzistuojanti įranga, apžvelgti alternatyvūs tokioms sistemoms bėgimo kinematinėms parametrų – greičio ir jėgos – matavimo būdai, bei kokybinio duomenų apdorojimo ir bėgimų modeliavimo būdai. Nustatytos dvi panašios sistemos, t.y. 1080 Sprint ir h/p cosmos, bei du pagrindiniai analizės metodai – energetinis bei biomechaninis modeliai. Greičio matavimui dažniausiai naudojami optiniai arba inerciniai matavimo metodai, jėgos matavimui – batelių paduose arba bėgimo takelyje įmontuoti pjezoelektriniai slėgio jutikliai.
2. Vystant baigiamąjį projektą turimai mechaninei bazei parinkta elektromechaninė ir valdymo įranga: servo pavaras, programuojamas loginis valdiklis su analoginių signalų keitikliais, Raspberry Pi mikrokompiuteris. Sujungus komponentus į sistemą sukurti valdymo algoritmai, realizuotas PLV programinis kodas bei komunikacija su Raspberry Pi mikrokompiuteriu. Sukurtas prototipas gali pasiekti didžiausią 14 m/s greitį bei sukurti 16 kg siekiančią apkrovą.
3. Atlikti sistemos eksperimentiniai bandymai. Siekiant nustatyti tinkamiausią servo pavaros valdymo būdą išbandyti keturi skirtingi pavaros darbo režimai. Nustatyta, jog tinkamiausias režimas treniruotei su palengvinimu - valdymas pagal sukimo momentą (angl. torque control), treniruotei su pasunkinimu – valdymas pagal greitį (angl. speed control). Taip pat atlikus eksperimentus nuskaitant bėgimo duomenis skirtingais laiko intervalais - 200 ms, 100 ms, 50 ms, 25 ms, 10 ms, 5 ms ir 1 ms, nustatyta, jog nuskaitymo periodas charakteringai kreivei gauti yra ne ilgesnis nei 5 ms. Šiam reikalavimui išpildyti komunikacijai tarp PLV ir mikrokompiuterio pasirinktas ir realizuotas Modbus/TCP duomenų apsikeitimo protokolas.
4. Atlikti sukurtos sistemos palyginamieji bandymai su kitomis sertifikuotomis sistemomis – Optojump Next+Witty bei Qualisys. Bandymai su optine Witty sistema vykdyti realiomis sąlygomis lengvosios atletikos manieže atliekant 40 metrų bėgimus. Gauti rezultatai rodo, jog didžiausias 10 metrų atkarpos įveikimo laiko skirtumas neviršija 0,1 sekundės. Toks prototipo tikslumas yra pakankamas. Taip pat atlikti eksperimentai su Qualisys sistema, gauti rezultatai leidžia daryti išvadą, jog nors bendros bėgimo kreivių tendencijos sutampa, visgi sistemų taikymo sričių skirtumas neleidžia kokybiškai palyginti surinktų duomenų.
5. Sukurtas sistemos prototipas buvo išbandytas realiomis sąlygomis sprinterių treniruočių metu, o surinkti duomenys apdoroti pagal vieno iš literatūros apžvalgoje aprašytų – biomechaninio modelio – metodiką. Pagal apdorotus duomenis nubrėžtos charakteringos jėgos – greičio bei galios – greičio priklausomybės. Remiantis šiomis kreivėmis sumodeliuotas optimalaus krūvio įvertis (jėgos treniruotėms su pasunkinimu), kaip treniruotės rezultatas konkrečiam sportininkui.

Literatūros sąrašas

- [1] 1080sprint, “Force Meets Adaptation,” [Online]. Available: <https://1080motion.com/wp-content/uploads/2019/11/1080-White-Paper-Download-Email-1.pdf>.
- [2] J. B. Morin, P. Samozino, R. Bonnefoy, P. Edouard, and A. Belli, “Direct measurement of power during one single sprint on treadmill,” *J. Biomech.*, vol. 43, no. 10, pp. 1970–1975, 2010, doi: 10.1016/j.jbiomech.2010.03.012.
- [3] A. Qualisys, “Full body 3D running analysis,” 2011, [Online]. Available: https://cdn-content.qualisys.com/2019/10/PI_Running_Module.pdf.
- [4] D. K. Chew, D. Gouwanda, and A. A. Gopalai, “Investigating running gait using a shoe-integrated wireless inertial sensor,” *IEEE Reg. 10 Annu. Int. Conf. Proceedings/TENCON*, vol. 2016-Janua, pp. 5–10, 2016, doi: 10.1109/TENCON.2015.7373054.
- [5] A. Kuznietsov, “Inertial measurement system for performance evaluation of track and field sprinters,” *2012 IEEE I2MTC - Int. Instrum. Meas. Technol. Conf. Proc.*, pp. 1681–1686, 2012, doi: 10.1109/I2MTC.2012.6229661.
- [6] V. D. R. Seethi and P. Bharti, “CNN-based Speed Detection Algorithm for Walking and Running using Wrist-worn Wearable Sensors,” *Proc. - 2020 IEEE Int. Conf. Smart Comput. SMARTCOMP 2020*, pp. 278–283, 2020, doi: 10.1109/SMARTCOMP50058.2020.00064.
- [7] P. Samozino *et al.*, “A simple method for measuring power, force, velocity properties, and mechanical effectiveness in sprint running,” *Scand. J. Med. Sci. Sport.*, vol. 26, no. 6, pp. 648–658, 2016, doi: 10.1111/sms.12490.
- [8] G. Rabita *et al.*, “Sprint mechanics in world-class athletes: A new insight into the limits of human locomotion,” *Scand. J. Med. Sci. Sport.*, vol. 25, no. 5, pp. 583–594, 2015, doi: 10.1111/sms.12389.
- [9] P. Iyer and R. W. Brennan, “Design of a real-time performance feedback system for sprinter starts,” *2017 IEEE Int. Conf. Syst. Man, Cybern. SMC 2017*, vol. 2017-Janua, pp. 1116–1121, 2017, doi: 10.1109/SMC.2017.8122761.
- [10] L. Cheng *et al.*, “Stride information monitoring and sensing in sports,” *2010 IEEE 7th Int. Conf. Mob. Adhoc Sens. Syst. MASS 2010*, pp. 205–213, 2010, doi: 10.1109/MASS.2010.5663992.
- [11] J. Park, Y. Na, G. Gu, and J. Kim, “Flexible insole ground reaction force measurement shoes for jumping and running,” *Proc. IEEE RAS EMBS Int. Conf. Biomed. Robot. Biomechanics*, vol. 2016-July, pp. 1062–1067, 2016, doi: 10.1109/BIOROB.2016.7523772.
- [12] L. M. Arzac and E. Locatelli, “Modeling the energetics of 100-m running by using speed curves of world champions,” *J. Appl. Physiol.*, vol. 92, no. 5, pp. 1781–1788, 2002, doi: 10.1152/jappphysiol.00754.2001.
- [13] J. B. Morin, P. Edouard, and P. Samozino, “Technical ability of force application as a determinant factor of sprint performance,” *Med. Sci. Sports Exerc.*, vol. 43, no. 9, pp. 1680–1688, 2011, doi: 10.1249/mss.0b013e318216ea37.
- [14] M. R. Cross, P. Samozino, S. R. Brown, and J. B. Morin, “A comparison between the force–velocity relationships of unloaded and sled-resisted sprinting: single vs. multiple trial methods,” *Eur. J. Appl. Physiol.*, vol. 118, no. 3, pp. 563–571, 2018, doi: 10.1007/s00421-017-3796-5.
- [15] D. Collins, “Notch filters and low-pass filters for servo system resonance.” https://www.motioncontroltips.com/notch-filters-low-pass-filters-reduce-resonance-servo-systems/?fbclid=IwAR3VJvR19CiIgeEvLzVtSNr_TxaWuVBEjThoz3wFveMKM7-RbWZ0VfISbmkM (accessed May 28, 2022).
- [16] “Skaitmeniniai signalai ir grandynai | KTU e-knygos internetu. Elektroninės knygos.” <https://www.ebooks.ktu.lt/eb/1316/skaitmeniniai-signalai-ir-grandynai/> (accessed May 28, 2022).

Priedai

1 priedas. EPLAN Elektrinė schema

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
InosportTitle									
		MB InoSport K. Barsausko g. 59 LT-51423 Kaunas, Lietuva Phone +37061631358							
Gamintojas Project description Projekto nr.		MB InoSport Alex1 treniruoklis 1.0							
Project name Responsible for project		Alex1 Deividas Zelickas							
Created on Edit date		2021-04-13 2022-03-04		by (short name) Deividas				Number of pages 10	
2									
		Date 2021-04-13 Ed. User Appr.		MB InoSport Alex1 treniruoklis		Titulinis		= 0 +	
Modification Date Name Original		Replacement of Replaced by				1.0		Page 1 Page 1 / 10	

Komponentų sąrašas

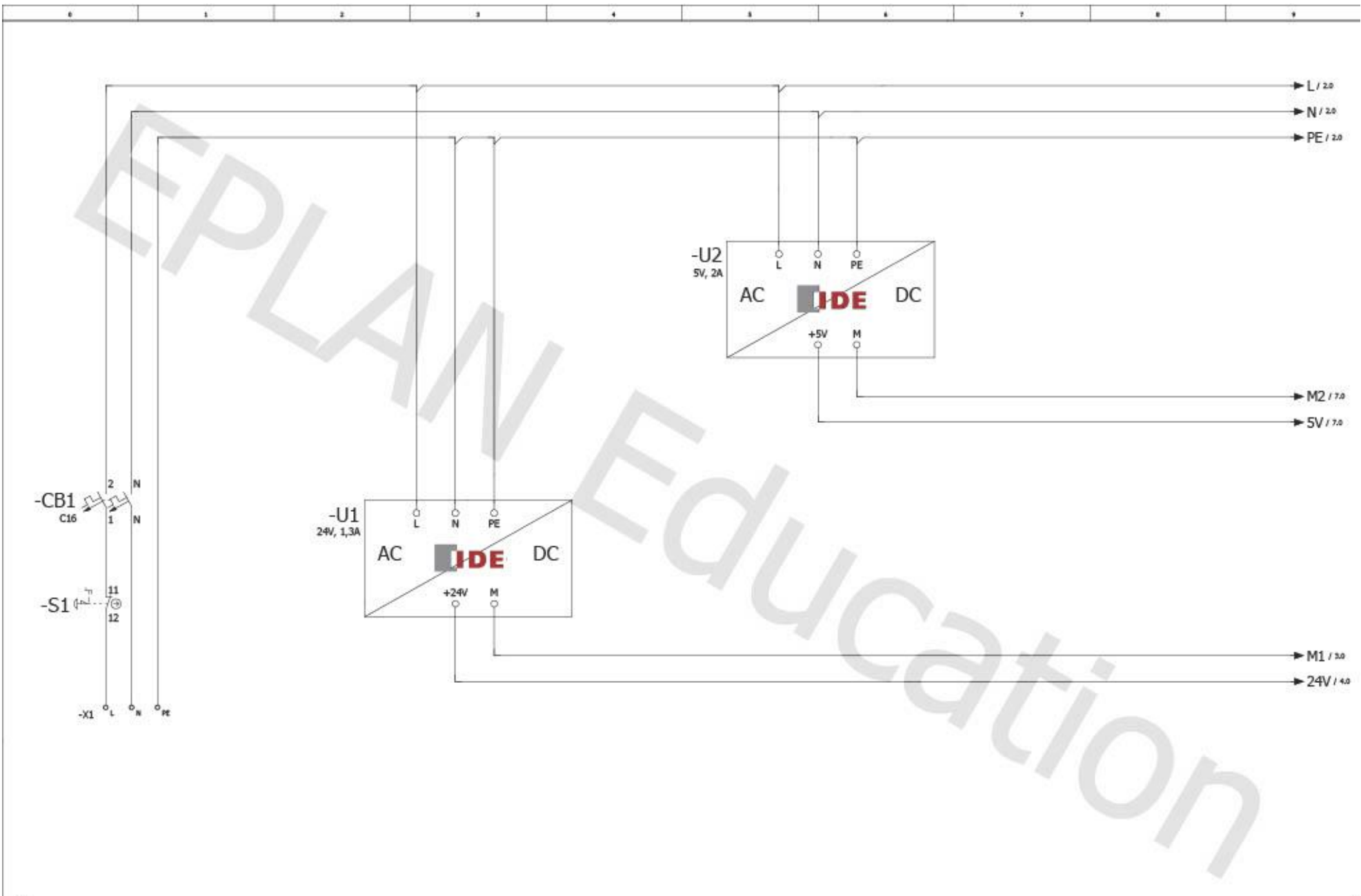
InosportPartlist

Žymėjimas plane	Kiekis, vnt.	Aprašymas	Gamintojo žymėjimas	Tiekėjas	Detalės numeris
	0				
=1-A1	1	CPU module	FXSUC-32MT-DSS	MIT	MIT.FXSUC-32MT-DSS
=1-A2	1	CPU module	FXS-4DA-ADP	MIT	MIT.FXS-4DA-ADP
=1-A3	1	CPU module	FXS-4AD-ADP	MIT	MIT.FXS-4AD-ADP
=1-CB1	1	RCBO, KZS-1M 1p+N A C16/0.03 6kA	KZS-1M 1p+N A C16/0.03 6kA	ETI	ETI.002175224
=1-DR1	1	General-purpose interface servo amplifier	MR-34-200A-RJ	MIT	MIT.MR-34-200A-RJ
=1-DR1.1	1	Terminal Block	TB-50-EG	MIT	TB-50-EG
=1-M1	1	Medium capacity,Medium inertia Rotary Servo Motor	HG-SR152	MIT	MIT.HG-SR152
=1-R1	1	Brake resistor 13Ohm/600W for MR-32S-200A/B,-350A/B,-500A/B	MR-RFH400-13	MIT	MIT.137277
=1-RP1	1	Raspberry Pi 4 Computer Model B	PI4 4GB BULK	Raspberry	PI4 4GB BULK
=1-S1	1	Emergency stop, NC contact, turn to reset			-
=1-SW1	1	D-Link Ethernet Switch, 5 ports, 10/100Mbps	DES-1005C	D-Link	DES-1005C
=1-U1	1	AC/DC Power Supply Single-OUT 24V 1.3A 30W	PSSR-VC24	IDEC	PSSR-VC24
=1-U2	1	Power Supply - Din Rail Mount - 10W - 2A - 5VDC - Universal Input 85-264VAC	PSSR-VB05	IDEC	PSSR-VB05
=1-V1	1	Optocoupler, 5KV 35V 50mA DIP4	EL817		EL817
=1-V2	1	Optocoupler, 5KV 35V 50mA DIP4	EL817		EL817

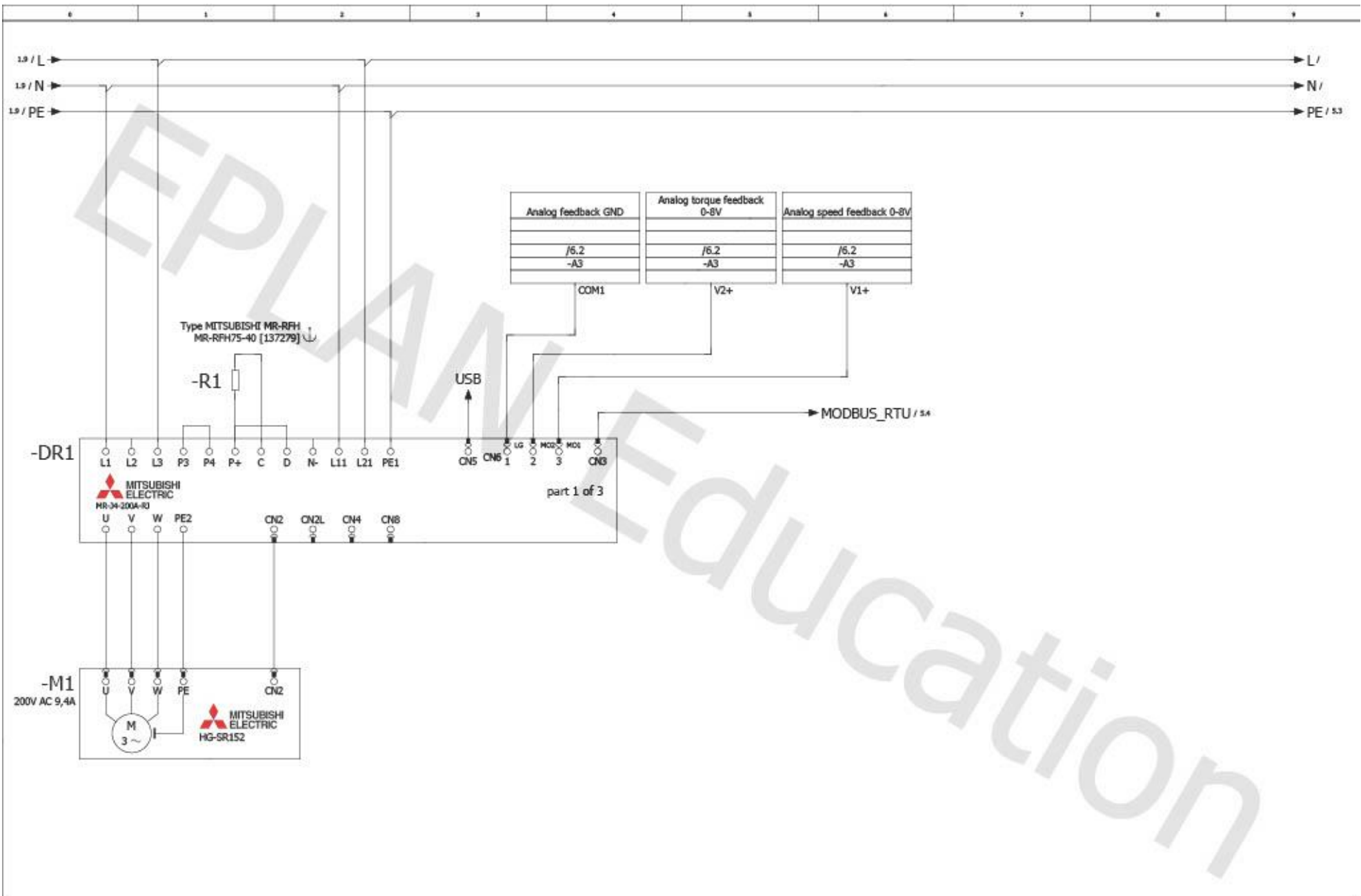
2

=1/1

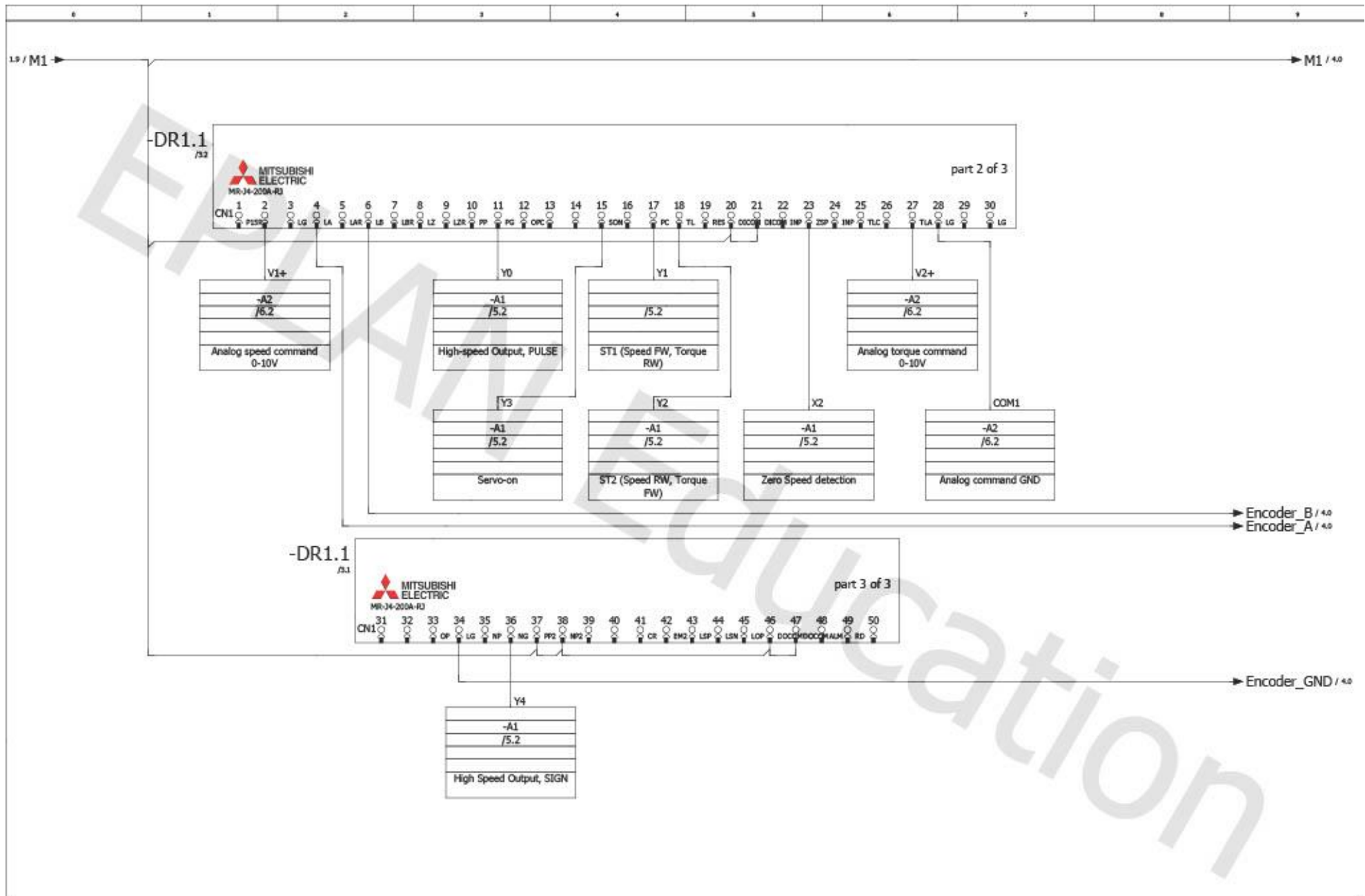
Date	2022-03-04	EPLAN	MB InoSport	Komponentų sąrašas	= 0
Ed.	Deividas	Alex1 treniuoklis			+
Appr.		Replacement of	Replaced by		
Modification	Date	Name	Original		Page 3 / 10



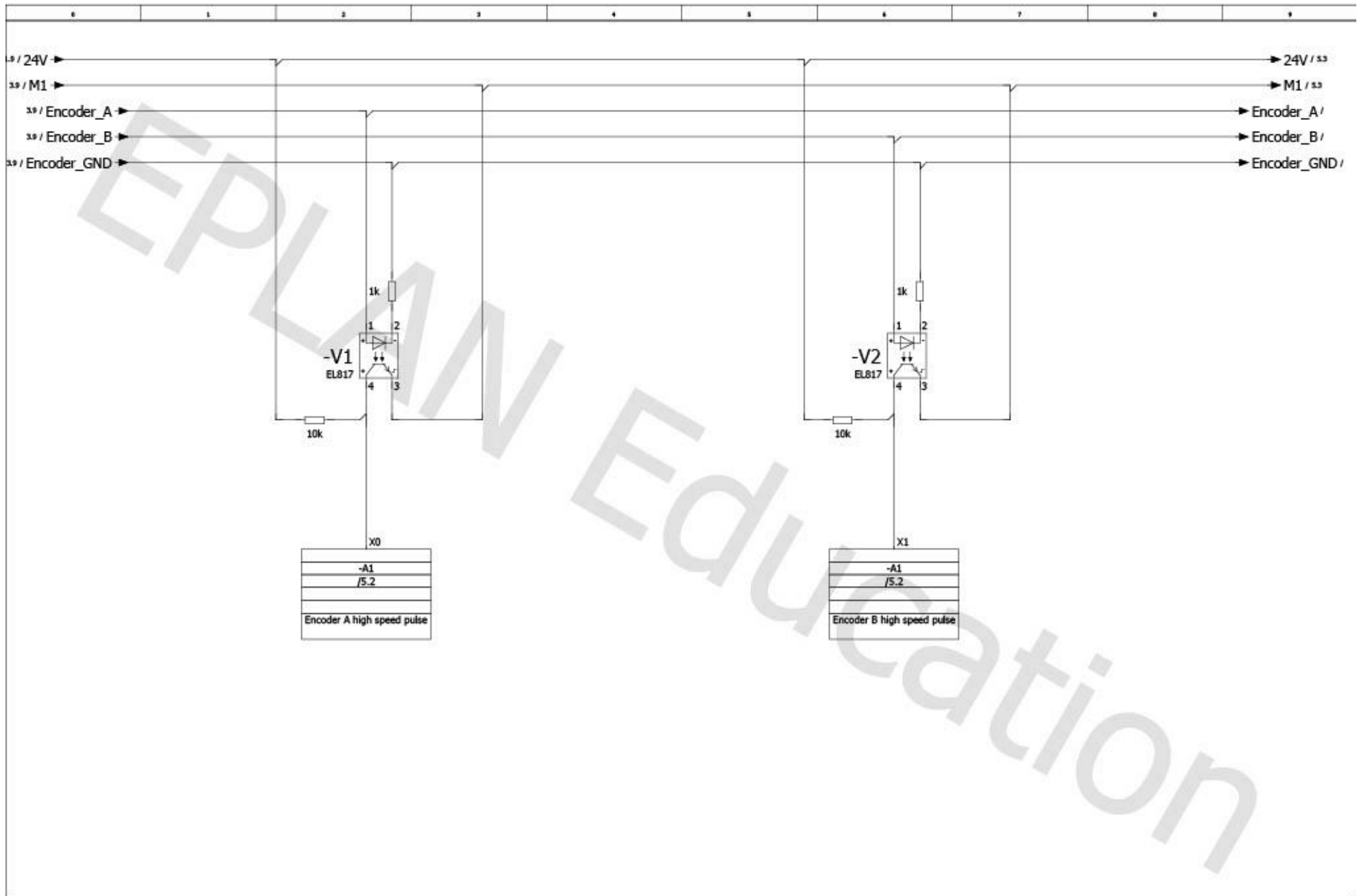
=0/3				Date	2022-02-14	MB InoSport	El. įvadas	= 1		2
				Ed.	Devidas			+		
				Appr.	Alex1 treneruoklis					
Modification	Date	Name	Original	Replacement of	Replaced by			L0	Page	1
									Page	4 / 10



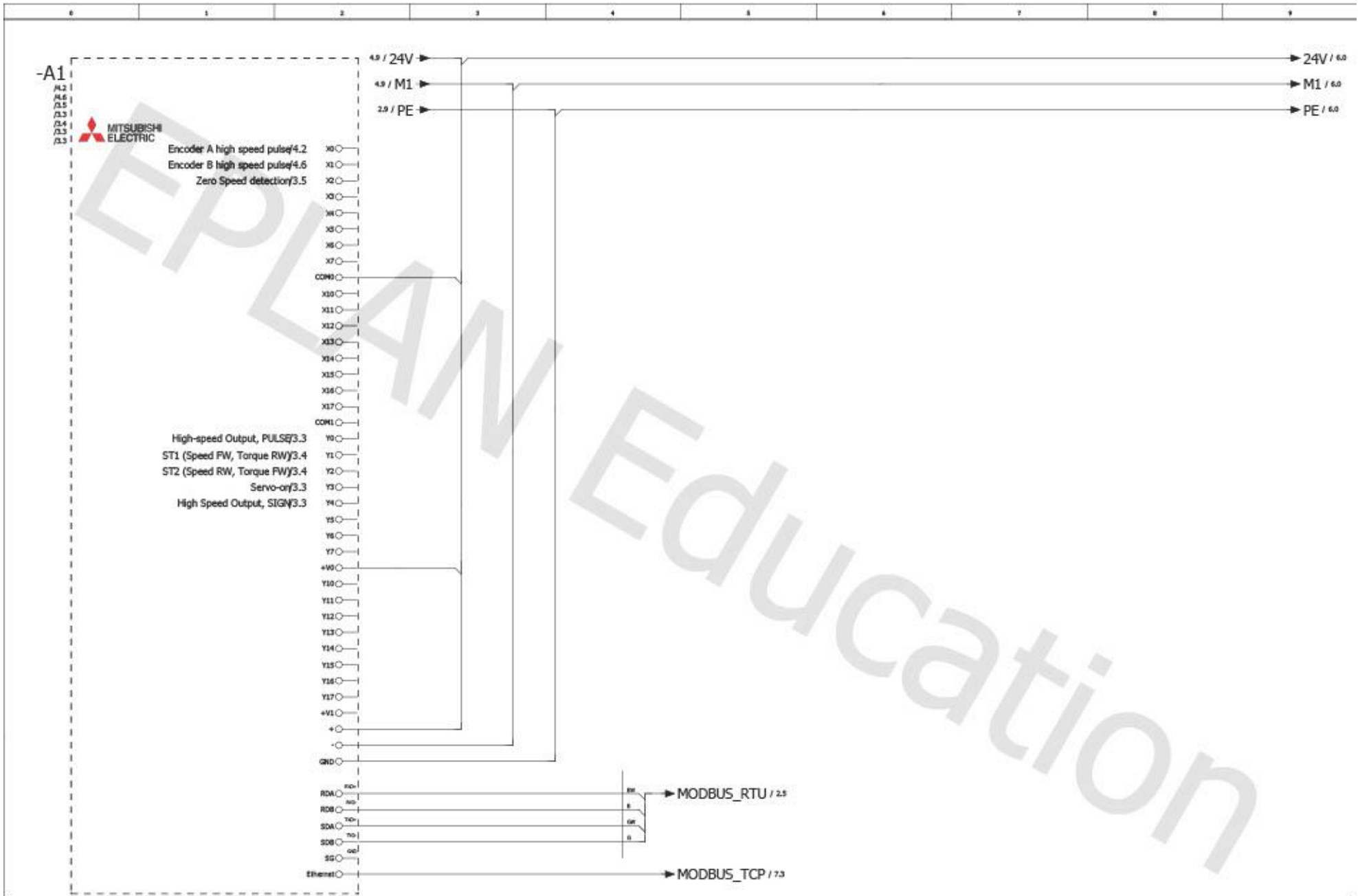
		Date	2022-02-14	MB InoSport		Variklis		= 1	
		Ed.	Devidas	Alex1 treniruoklis				+	
		Appr.		Replacement of		Replaced by		L0	
Modification	Date	Name	Original					Page	2
								Page	5 / 10



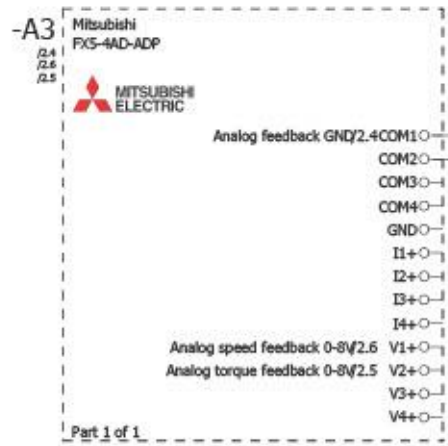
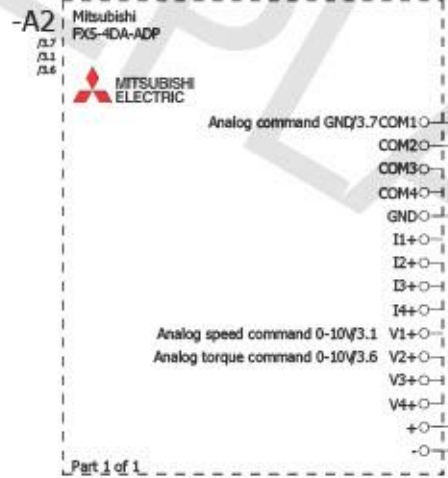
2		Date: 2022-03-04		MB InoSport		Kontaktų blokas		= 1		4	
		Ed. Delvidas		Alex1 treniruoklis				+			
Modification		Date		Name		Original		Replacement of		Replaced by	
								1.0		Page 3	
										Page 6 / 10	



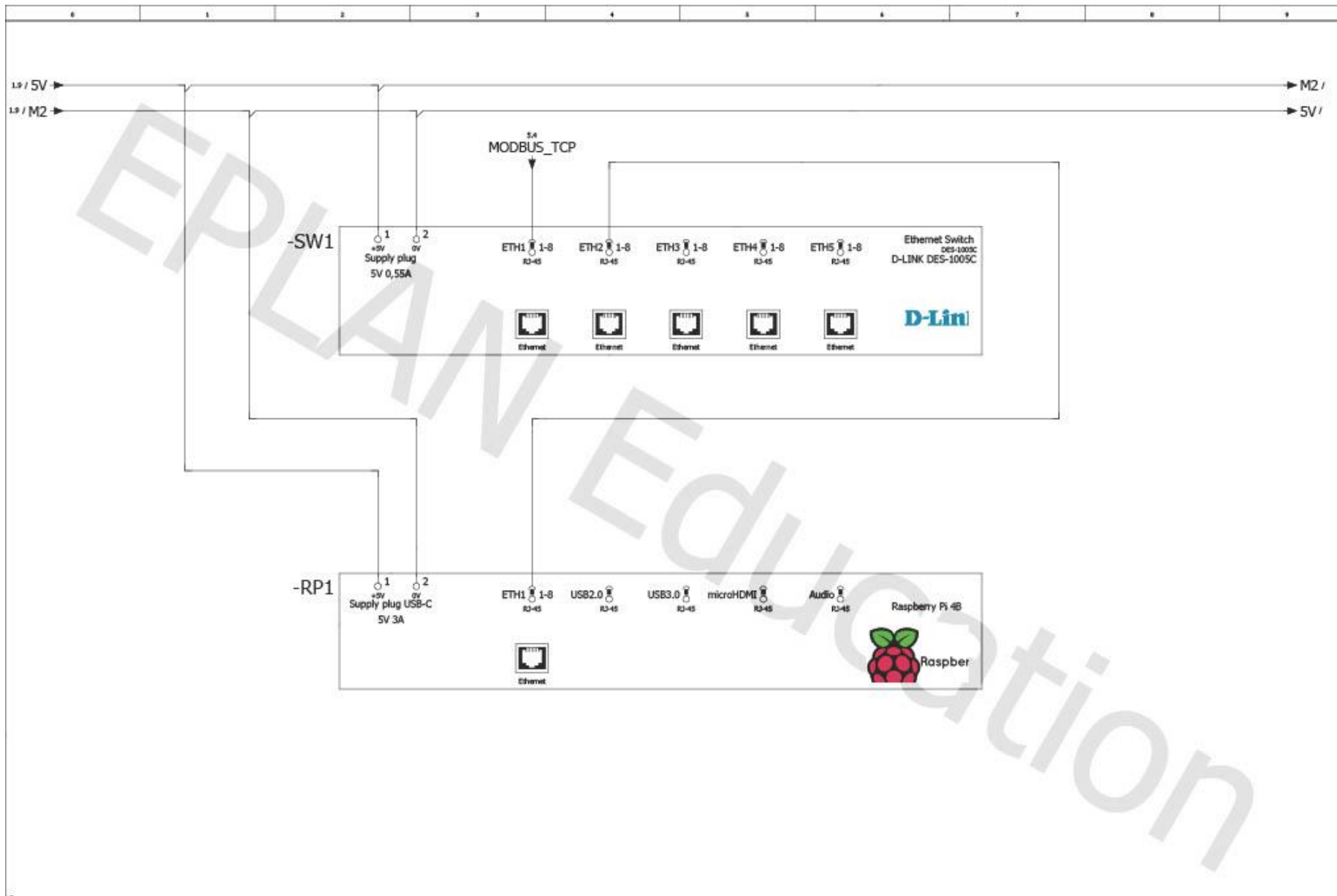
			Date	2022-03-04	MB InoSport	Optoporos			5
			Ed.	Devidas					
			Appr.		Alex1 treniruoklis				
Modification	Date	Name	Original		Replacement of	Replaced by		1.0	Page 7 / 10



				Date	2022-09-04	MB InoSport	PLC	= 1	
				Ed.	Devidas			+	
				Appr.					
				Original					
Modification	Date	Name	Original	Replacement of	Replaced by			1.0	Page 5 / 10

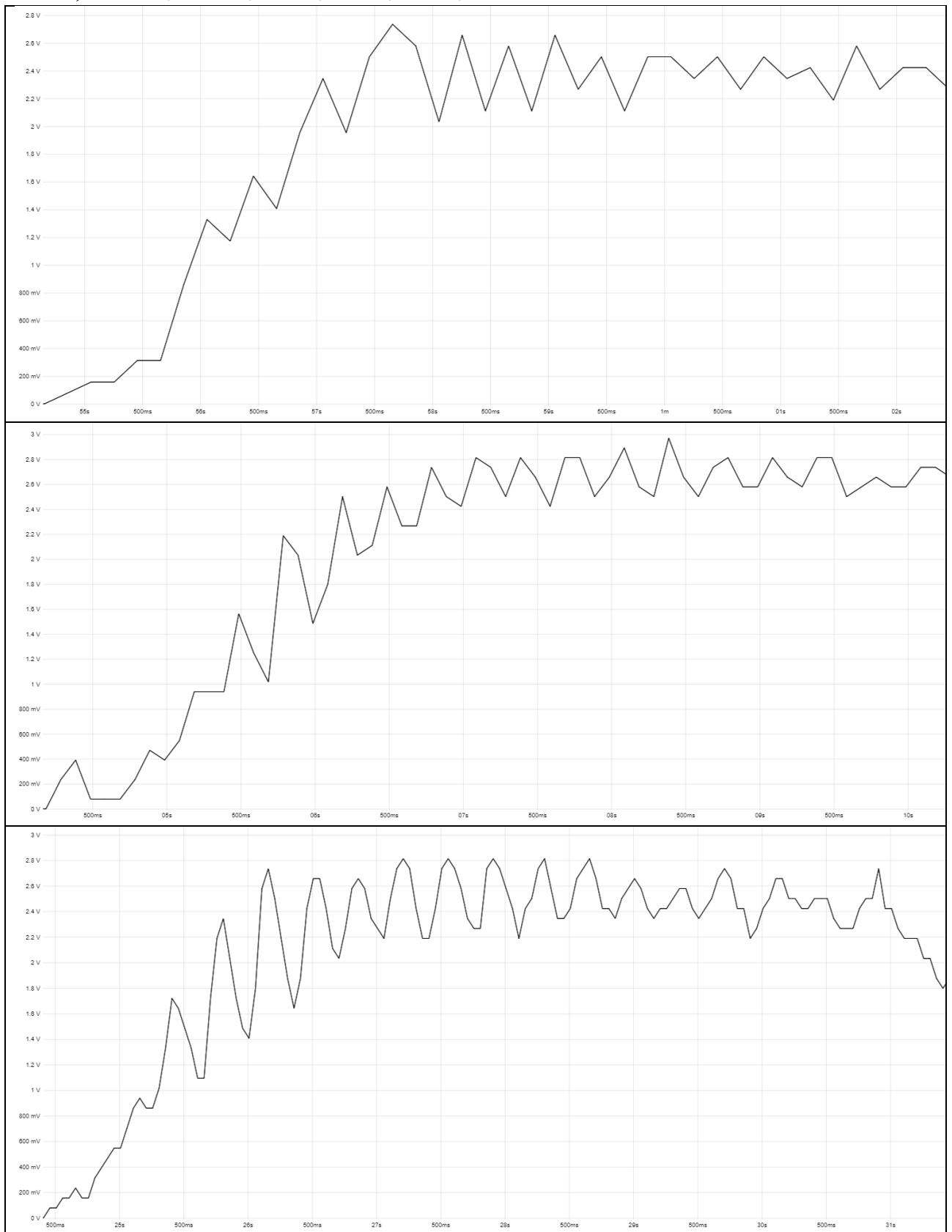


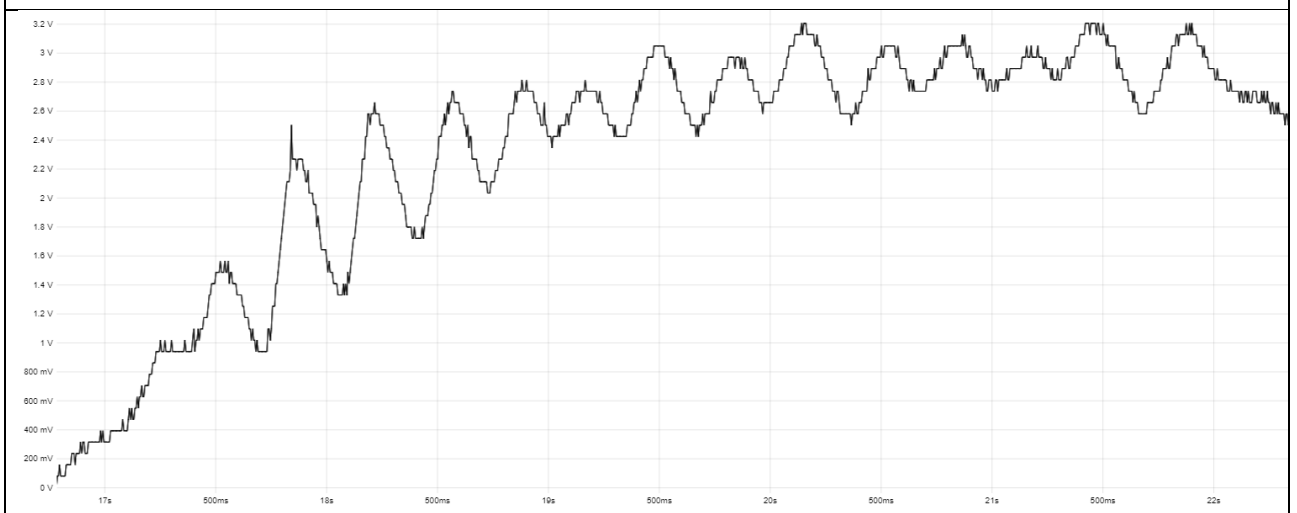
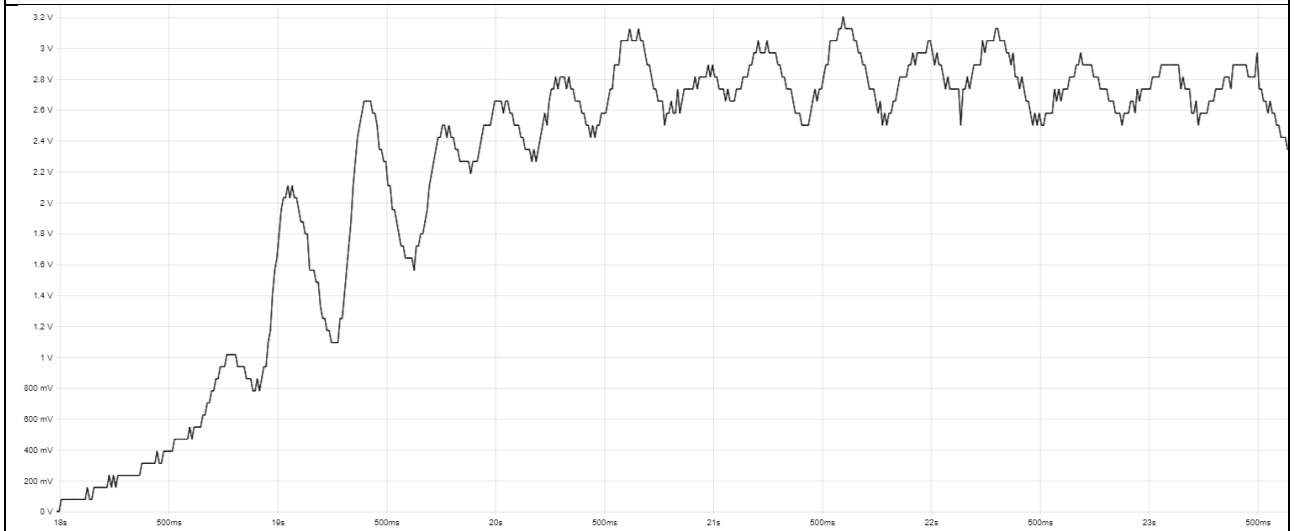
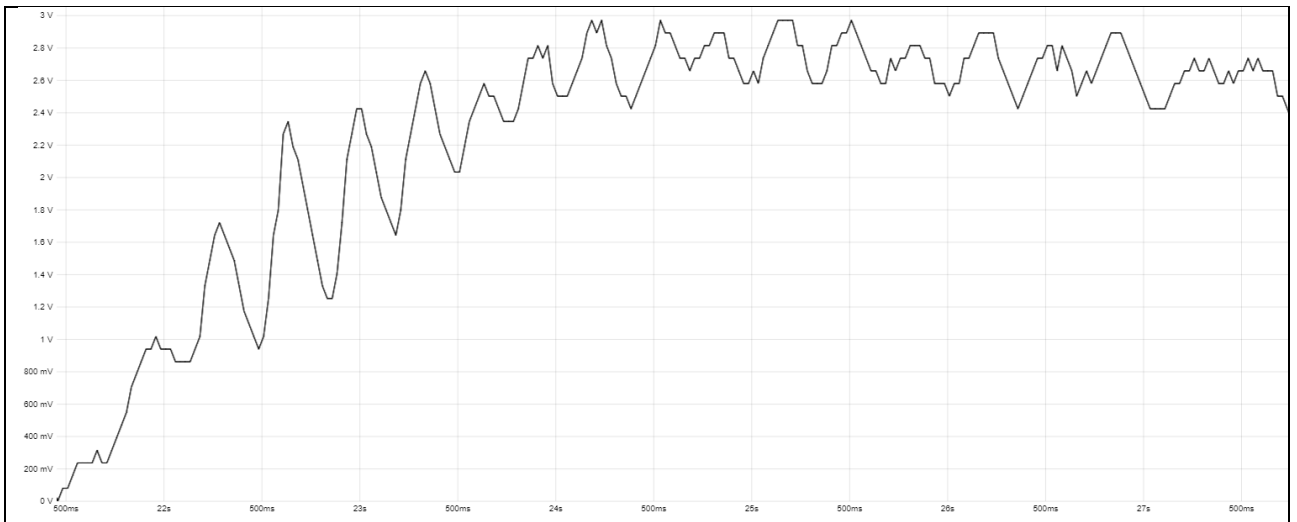
5				7			
		Date	2022-09-04	MB InoSport	ADC ir DAC	= 1	
		Ed.	Devidas			+	
		Appr.		Alex1 treniruoklis			
Modification	Date	Name	Original	Replacement of	Replaced by	L0	Page 6 Page 9/10

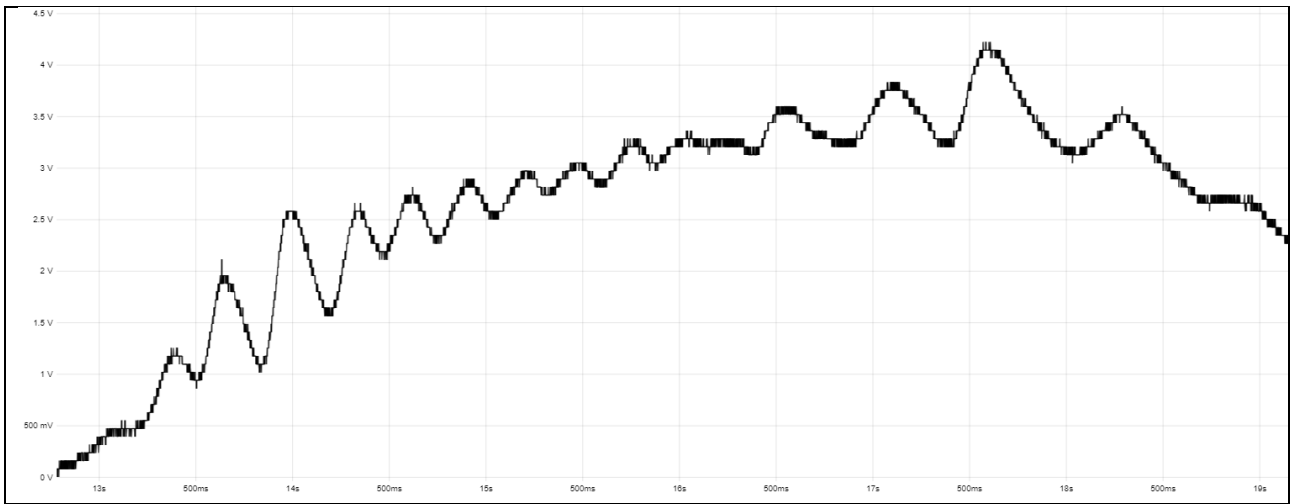


		Date	2021-04-15						
		Ed.	User						
		Appr.							
Modifikation	Date	Name	Original	Replacement of	Replaced by				
				Alex1 treniruoklis		MB InoSport	Raspberry		
								1.0	Page 7
									Page 10/10

2 priedas. Bėgimų duomenys, gauti duomenis nuskaitant skirtingais laiko intervalais (nuo viršaus): 200 ms, 100 ms, 50 ms, 25 ms, 10 ms, 5 ms ir 1 ms

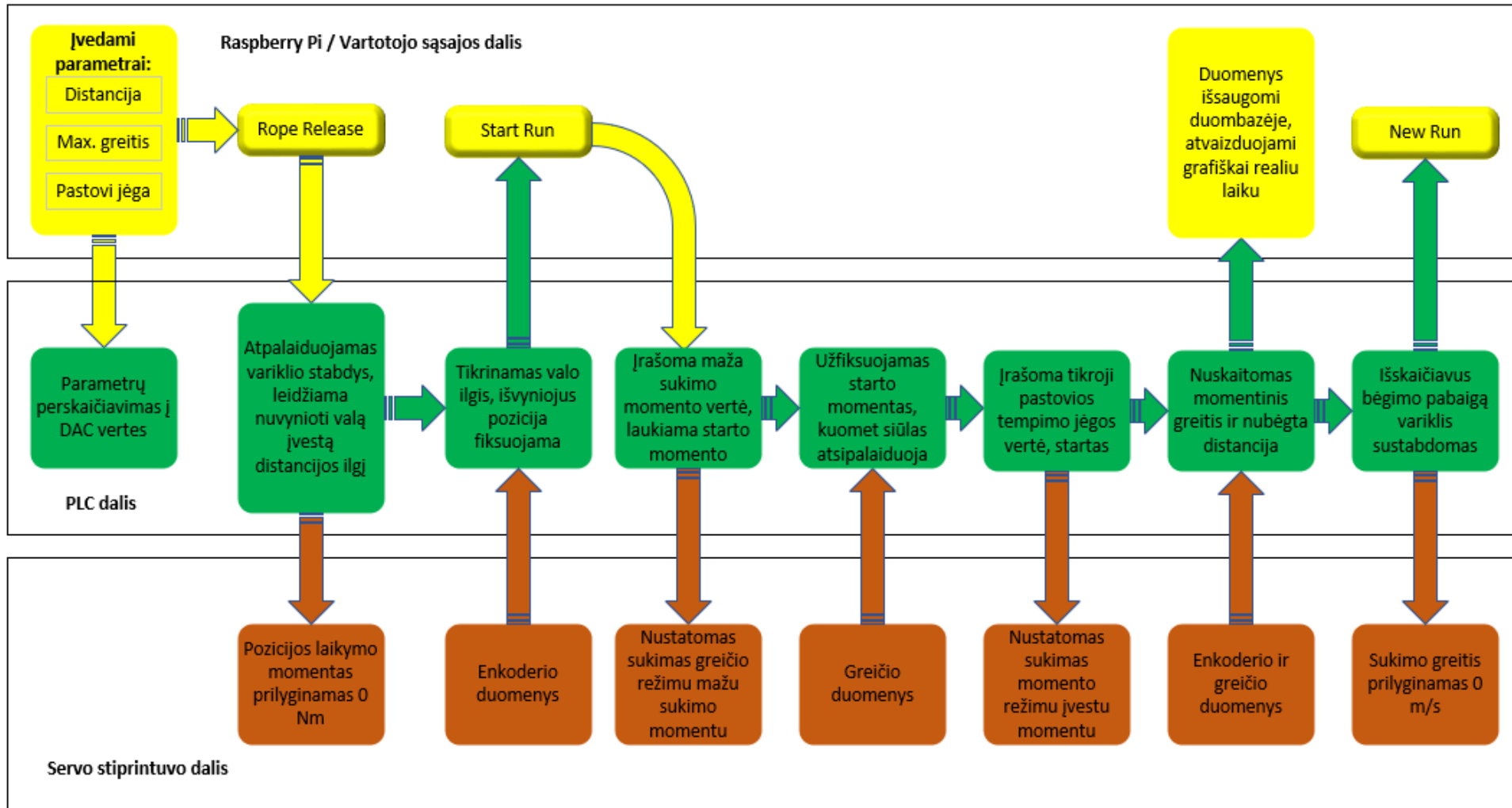




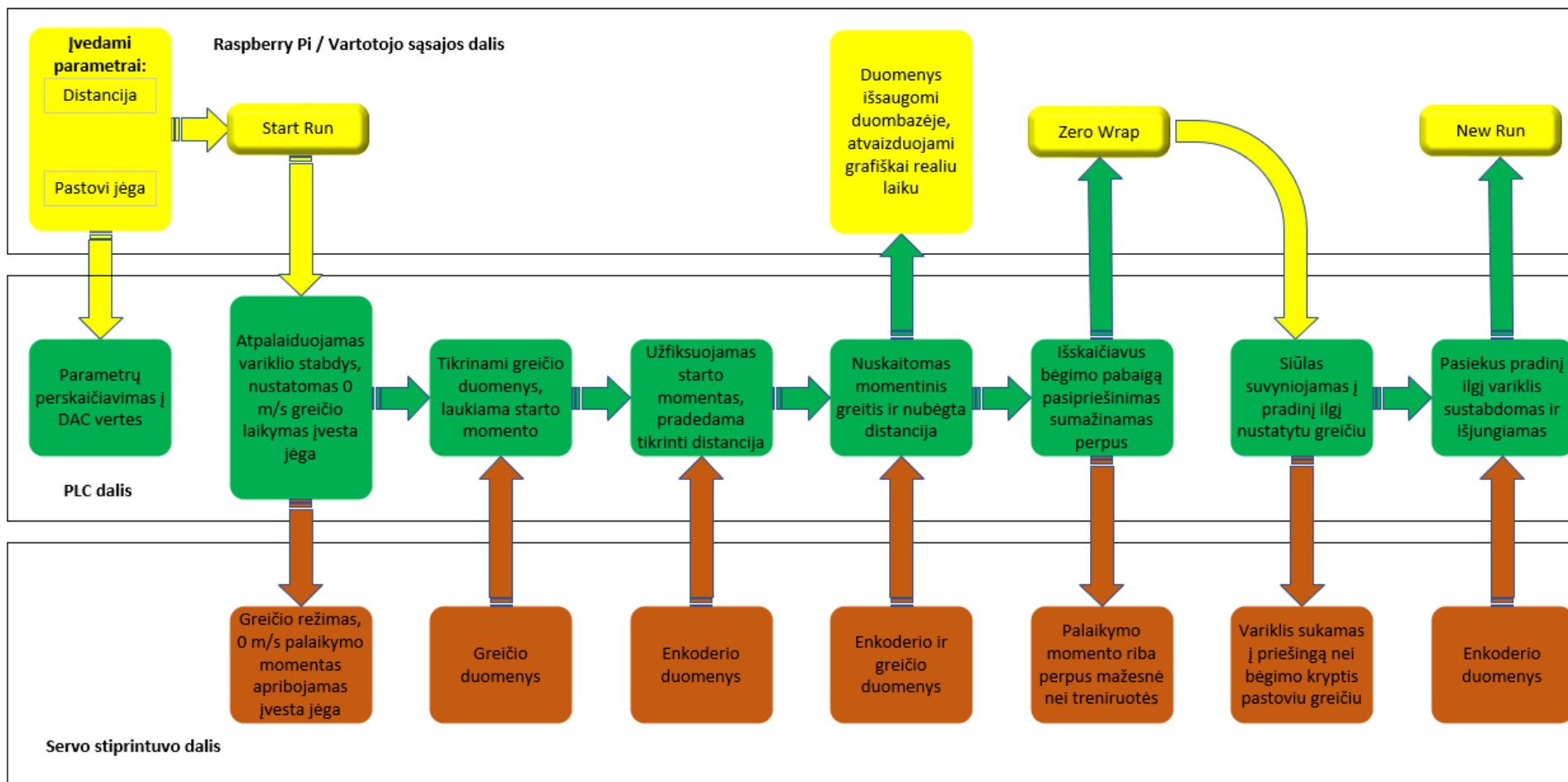


3 priedas. Treniruočių veikimo schemos

Treniruotės su įgreitinimu veikimo schema



Treniruotės su pasipriešinimu veikimo schema



4 priedas. PLV programinio kodo dalis ST ir FBF kalbomis

```
//BEGIMO DISTANCIJOS KONVERSIJA I IMPULSUS (256 p/rev, C = 280mm)
TreniruotesIlgisEnkoder :=Distance*256000/280;

//TRENIRUOTES EIGOS PARAMETRAI
IF AssistiveSet THEN
    SpeedDAC:=REAL_TO_INT(SpeedGUI*212.31*16.0/3.0);
    TorqueDAC:=REAL_TO_INT(TorqueGUI*9.81*0.045*12800.0/21.5);
    DistanceCompleted:=(DINT_TO_REAL(NubegtasKeliasAssistiveEncoder))*280.0/256000.0;//Nubegta
    distancija metrais
    IsvyniojimoIlgis:=(DINT_TO_REAL(RopeReleaseDistanceTarpinis))*280.0/256000.0;//Isvyniojamas
    ilgis metrais
END_IF;

IF ResistiveSet THEN
    SpeedDAC:=REAL_TO_INT(SpeedGUI*212.31*16.0/3.0);
    TorqueDAC:=REAL_TO_INT(TorqueGUI*9.81*0.045*16000.0/21.5);
    DistanceCompleted:=(DINT_TO_REAL(NubegtasKeliasResistiveEncoder))*280.0/256000.0;//Nubegta
    distancija metrais
    HalfTorqueDAC:=REAL_TO_INT(0.5*TorqueDAC);
END_IF;

//APSAUGA NUO PER DIDELIO TRENIRUOTES ATSTUMO
IF RopeReleaseCompleted AND NOT StartTrainingSet THEN
    IF (Skaitliukas-SkaitliukasFixed) < TreniruotesIlgisEnkoder THEN
        TreniruotesApsauga:=TRUE;
    END_IF;
    ELSE TreniruotesApsauga:=FALSE;
END_IF;

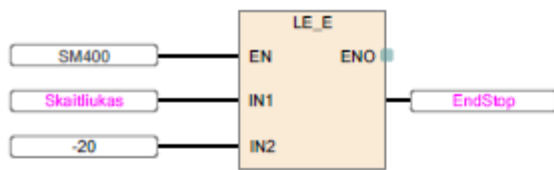
//SIULO ATPALDAVIMO SKAICIAVIMAS TRENIRUOTES STARTUI IR ASSISTIVE TRENIRUOTE
IF RopeReleaseCompleted AND StartTrainingSet AND NOT AssistiveCompleted THEN
    IF SpeedFeedbackMS >0.2 THEN
        AssistiveStart:=TRUE;
    END_IF;
    ELSE AssistiveStart:=FALSE;
END_IF;

//FEEDBACKAS
//SPEED (0-10.0V ADC, 16k, servo output 0-8.0V, max V = 3000RPM, r = 0,045m, v = w*R)
//SD6300*(10.0/16000.0)*(3000/8.0)*(0.045*6.28/60) ==SD6300*0,000625*375.0*0.00471
IF AssistiveCompleted = FALSE AND ResistiveCompleted = FALSE THEN
    SpeedFeedbackMS:=SD6300*0.000625*375.0*0.00471;
ELSE SpeedFeedbackMS := 0;
END_IF;

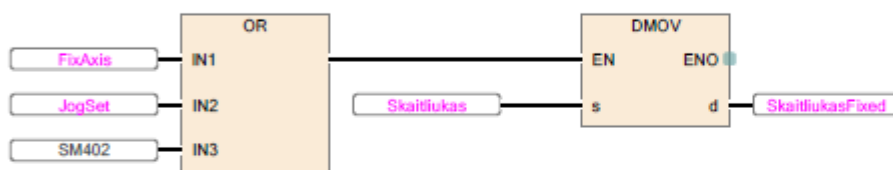
//TORQUE (0-10.0V ADC, 16k, servo output 0-8.0V, max M = 21,5Nm, g = 9.81, r = 0,045m)
//SD6340*(10.0/16000.0)*(21.5/8.0)/(9.81*0.045) ==SD6340*0,000625*2,6875/0,44145
IF AssistiveCompleted = FALSE AND ResistiveCompleted = FALSE THEN
    TorqueKG :=SD6340*0.000625*2.6875/0.44145;
ELSE TorqueKG :=0.0;
END_IF;

//Enkoderio feedbackas
RealDistance:=DINT_TO_REAL(Skaitliukas)*280.0/256000.0;
```

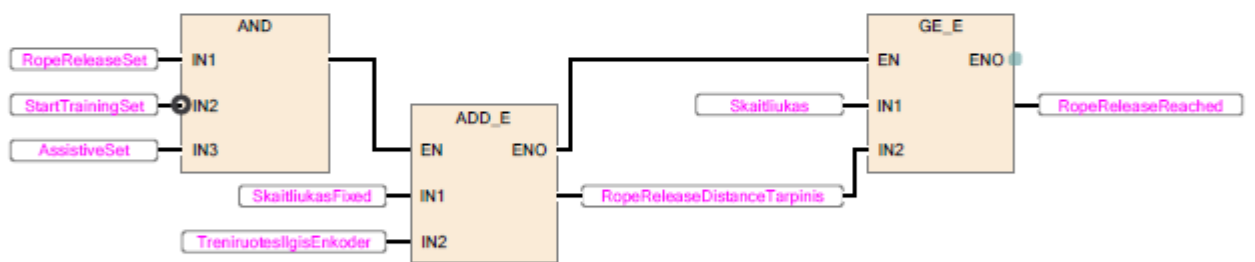
Skaitliuko nuresetinimas ir endstop tikrinimas



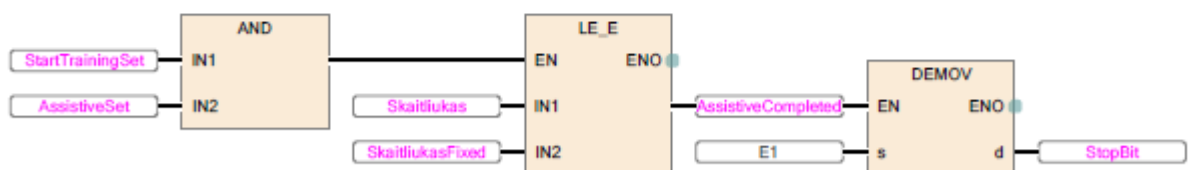
Assistive nulinės pozicijos enkoderio vertės fiksavimas



Siūlo išvyniojimo realių duomenų lyginimas su teoriniu atstumu

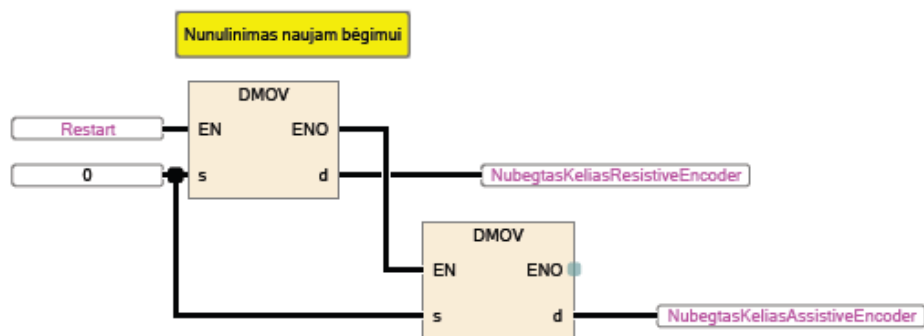
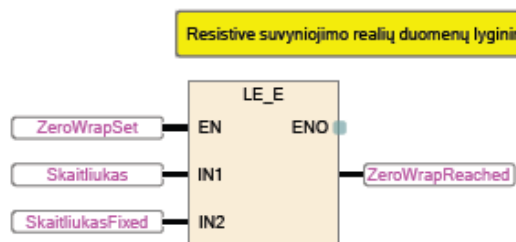
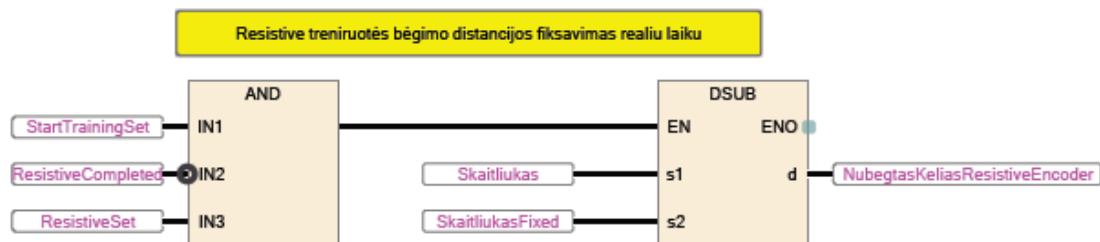
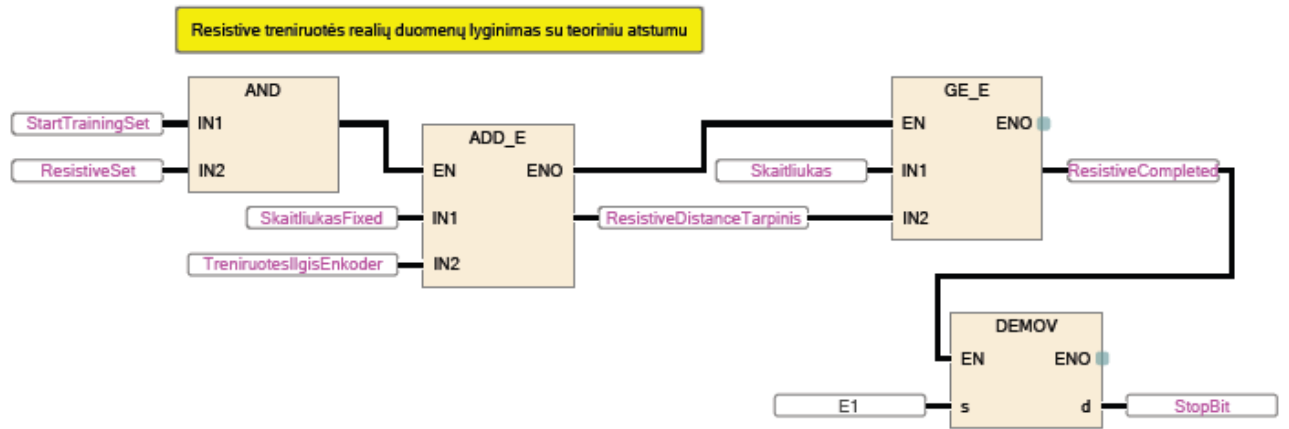


Assistive treniruotės realių duomenų lyginimas su teoriniu atstumu



Assistive treniruotės bėgimo distancijos fiksavimas realiu laiku





5 priedas. Matlab duomenų analizės programinis kodas

```
% Kodas nuskaityto visus *.csv failus aplankale
% Failo vardas turėtų atrodyti taip: "Resistive_NR1_Andre_Ozechauskaite.csv"
clear all;
clc
dinfo = dir('*.csv');

Ass=0;
Res=0;
x=[];
y=[];

for K = 1 : length(dinfo)
    fid = fopen(dinfo(K).name);
    % Iškirstymas i Assistive ir Resistive
    if strcmp (dinfo(K).name(1:9), 'Assistive')
        Ass=Ass+1;
        y(end+1)=K;
    end
end
```

```

elseif strcmp (dinfo(K).name(1:9), 'Resistive')
    Res=Res+1;
    x(end+1)=K;
end
end

%Stulpeliu reikšmes .csv faile
timestamp = 1;
speed = 2;
force = 3;
distance = 4;

%Resistive .csv failu nuskaitymas
for iR = 1:Res
    %Nuskaitoma .csv failo Raw data
    [~,~,m{iR}] = xlsread(dinfo(x{iR}).name);
    RFootString{iR} = char(m{iR}(9,1));
    RFoot{iR} = RFootString{iR}(16:end);
    RForceString{iR} = char(m{iR}(6,1));
    RForce{iR} = RForceString{iR}(8:end);
    %Surandama, kur prasideda stulpelių headeriai, šiuo atveju timestamp
    ResDataStart(iR) = find(strcmp(m{iR}(:,1),'timestamp'),1);
    %Nuskaitomos skaitines reikšmes nuo pries tai surasto headerio zemyn
    TableR{iR}= readtable(dinfo(x{iR}).name,'HeaderLines',(ResDataStart(iR)-1));
    %Is bendros lenteles i atskirus vektorius isskiriamas greitis ir atstumas
    ResV{iR} = table2array((TableR{iR}(1:height(TableR{iR}),speed)));
    ResS{iR} = table2array((TableR{iR}(1:height(TableR{iR}),distance)));
    ResT{iR} = table2array((TableR{iR}(1:height(TableR{iR}),timestamp)));
    ResM{iR} = table2array((TableR{iR}(1:height(TableR{iR}),force)));
    %-----
    %Surandamas max greitis vektoriuje
    [vmax_x{iR},vmax_y{iR}]=max(ResV{iR});
    %---Konstantos modeliavime-----
    mass = 54; %Bėgiko masė
    h = 1.58; %Bėgiko ūgis
    g = 9.8; %Laisvojo kritimo pagreitis
    ro = 1.5; %Oro tankis
    Af = 0.2025*(h^(0.725))*(mass^0.425)*0.266; %Frontalinis kūno plotas
    Cd = 0.9; %Pasipriešinimo konstanta
    tau = 1.2; %Igreitėjimo laiko konstanta
    %---Skaičiavimai-----
    vh{iR} = vmax_x{iR}.*(1-exp(1).^(-(ResT{iR}/1000)/tau)); %Greičio aproksimacija

    acc{iR} = diff(ResV{iR})./diff(ResT{iR}/1000);%Pagreičio apskaičiavimas
    acc{iR} = [0; acc{iR}];
    accPos{iR}=max(acc{iR},0);
    accnorm{iR} = (vmax_x{iR}/tau).*exp(1).^(-(ResT{iR}/1000)/tau); %Pagreičio aproksimacija

    Faero{iR} = 0.5*ro*Af*Cd*ResV{iR}; %Oro pasipriešinimo jėga
    Fv = mass*g; %Vertikali jėga
    Fh{iR} = mass*accPos{iR} +Faero{iR}; %Horizontali jėga
    Fhnorm{iR} = mass*accnorm{iR} +Faero{iR};
    Ph{iR} = Fh{iR}.*ResV{iR}; %Galia horizontalioje plokštumoje
    Phnorm{iR} = Fhnorm{iR}.*vh{iR};
    [Phmax_P{iR},Phmax_num{iR}]=max(Phnorm{iR});
    RF{iR} = (Fh{iR})./(sqrt((Fh{iR}.^2)+(Fv^2)))*100; %Jėgos faktorius
    RFnorm{iR} = (Fhnorm{iR})./(sqrt((Fhnorm{iR}.^2)+(Fv^2)))*100; %Jėgos faktorius
    %---Grafikai-----
    %Atvaizduojamas greicio kitimas, y asis greitis, x asis kelias
    figure(1);
    %I antraštę nuskaitomas failo pavadinimas, koja ir jėga
    Rname{iR} = sprintf('%s, %s, %s kg',(dinfo(x{iR}).name(1:(length(dinfo(x{iR}).name)-
4))),RFoot{iR},RForce{iR});
    plot(ResT{iR}/1000,ResV{iR},'DisplayName',sprintf('v_{H}'))
    grid on;
    legend('Location','southeast');
    legend('boxoff');
    hold on;
    plot(ResT{iR}/1000,vh{iR},'DisplayName',sprintf('v_{H}{approx}'))
    hold on;
    max1 = plot((ResT{iR}(vmax_y{iR}))/1000,(ResV{iR}(vmax_y{iR})), 'ok','DisplayName',sprintf('Max
speed %s = %.2f', strcat(dinfo(x{iR}).name(11:14)), vmax_x{iR}))
    max1.Annotation.LegendInformation.IconDisplayStyle = 'off';
    title(Rname{iR},'Interpreter','none');
    xlabel('Laikas, s');
    ylabel('Greitis, m/s');
    text((ResT{iR}(vmax_y{iR}))/1000,(ResV{iR}(vmax_y{iR}))+0.2,sprintf('v_{max} = %.2f',
vmax_x{iR}),'FontSize', 10);
    %Atvaizduojamas pagreicio kitimas, y asis pagreitis, x asis laikas
    figure(2);

```



```

sgtitle(Rname{iR}, 'Interpreter', 'none', 'FontSize', 11, 'FontWeight', 'bold');
subplot(1,2,1);
plot((ResT{iR}/1000), accPos{iR}, 'DisplayName', sprintf('a_{H}'));
grid on;
legend ('Location', 'northeast');
legend('boxoff');
xlabel('Laikas, s');
ylabel('Pagreitis, m/s^2');
hold on;
subplot(1,2,2);
plot((ResT{iR}/1000), accnorm{iR}, 'DisplayName', sprintf('a_{H_{approx}}'));
grid on;
legend ('Location', 'northeast');
legend('boxoff');
xlabel('Laikas, s');
ylabel('Pagreitis, m/s^2');
hold on;
%Atvaizduojamas jegos kitimas, y asis jega, x asis laikas
figure(3);
sgtitle(Rname{iR}, 'Interpreter', 'none', 'FontSize', 11, 'FontWeight', 'bold');
subplot(1,2,1);
plot((ResT{iR}/1000), Fh{iR}, 'DisplayName', sprintf('F_{H}'));
grid on;
legend ('Location', 'northeast');
legend('boxoff');
xlabel('Laikas, s');
ylabel('Jėga, N');
hold on;
subplot(1,2,2);
plot((ResT{iR}/1000), Fhnorm{iR}, 'DisplayName', sprintf('F_{H_{approx}}'));
grid on;
legend ('Location', 'northeast');
legend('boxoff');
xlabel('Laikas, s');
ylabel('Jėga, N');
hold on;
%Atvaizduojamas aproksimuotas Ph kitimas, y asis Ph, x asis laikas
figure(4);
sgtitle(Rname{iR}, 'Interpreter', 'none', 'FontSize', 11, 'FontWeight', 'bold');
subplot(1,2,1);
plot((ResT{iR}/1000), Ph{iR}, 'DisplayName', sprintf('P_{H}'));
grid on;
legend ('Location', 'northeast');
legend('boxoff');
xlabel('Laikas, s');
ylabel('Galia, W');
hold on;
subplot(1,2,2);
plot((ResT{iR}/1000), Phnorm{iR}, 'DisplayName', sprintf('P_{H_{approx}}'));
grid on;
legend ('Location', 'northeast');
legend('boxoff');
xlabel('Laikas, s');
ylabel('Galia, W');
hold on;
%Atvaizduojamas RF kitimas, y asis RF, x asis laikas
figure(5);
sgtitle(Rname{iR}, 'Interpreter', 'none', 'FontSize', 11, 'FontWeight', 'bold');
subplot(1,2,1);
plot((ResT{iR}/1000), RF{iR}, 'DisplayName', 'RF');
grid on;
legend ('Location', 'northeast');
legend('boxoff');
xlabel('Laikas, s');
ylabel('RF, %');
hold on;
subplot(1,2,2);
plot((ResT{iR}/1000), RFnorm{iR}, 'DisplayName', sprintf('RF_{approx}'));
grid on;
legend ('Location', 'northeast');
legend('boxoff');
xlabel('Laikas, s');
ylabel('RF, %');
hold on;
%Atvaizduojamos F-v ir P-v kreivės
figure(6);
sgtitle(Rname{iR}, 'Interpreter', 'none', 'FontSize', 11, 'FontWeight', 'bold');
subplot(1,2,1);
plot(vh{iR}, Fhnorm{iR});
grid on;

```

```

xlabel('Greitis, m/s');
ylabel('Jėga, N');
hold on;
subplot(1,2,2);
plot(vh{iR},Phnorm{iR});
grid on;
xlabel('Greitis, m/s');
ylabel('Galia, W');
hold on;
max2 = plot((vh{iR}(Phmax_num{iR})),(Phnorm{iR}(Phmax_num{iR})), 'ok', 'DisplayName', sprintf('Max
power %s = %.2f', strcat(dinfo(x{iR}).name(11:14)), Phmax_P{iR}))
max2.Annotation.LegendInformation.IconDisplayStyle = 'off';
text((vh{iR}(Phmax_num{iR}))+0.5, (Phnorm{iR}(Phmax_num{iR}))+10, sprintf('P_{max} = %.2f',
Phmax_P{iR}), 'FontSize', 10)
hold on;
%Atvaizduojamos P-v ir F-v kreivės optimaliems parametrms nustatyti
figure(7);
grid on;
legend('Interpreter', 'none', 'Location', 'northeast');
legend('boxoff');
yyaxis left;
plot(vh{iR},Fhnorm{iR}, 'DisplayName', 'F-v');
title(Rname{iR}, 'Interpreter', 'none');
xlabel('Greitis, m/s');
ylabel('Jėga, N');
hold on;
yl = yline(max(Fhnorm{iR})/2, '--', sprintf('F_{opt} = %.2f', max(Fhnorm{iR})/2), 'FontSize',
10, 'LabelHorizontalAlignment', 'left');
yl.Annotation.LegendInformation.IconDisplayStyle = 'off';
hold on;
yyaxis right;
plot(vh{iR},Phnorm{iR}, 'DisplayName', 'P-v');
ylabel('Galia, W');
hold on;
max2 = plot((vh{iR}(Phmax_num{iR})),(Phnorm{iR}(Phmax_num{iR})), 'ok', 'DisplayName', sprintf('Max
power %s = %.2f', strcat(dinfo(x{iR}).name(11:14)), Phmax_P{iR}));
max2.Annotation.LegendInformation.IconDisplayStyle = 'off';
text((vh{iR}(Phmax_num{iR}))+0.5, (Phnorm{iR}(Phmax_num{iR}))+10, sprintf('P_{max} = %.2f',
Phmax_P{iR}), 'FontSize', 10)
xl = xline(vh{iR}(Phmax_num{iR}), '--', sprintf('v_{opt} = %.2f', vh{iR}(Phmax_num{iR})), 'FontSize',
10, 'LabelVerticalAlignment', 'bottom', 'LabelOrientation', 'horizontal');
xl.Annotation.LegendInformation.IconDisplayStyle = 'off';
end

```