VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
TRANSPORTO INŽINERIJOS FAKULTETAS
TRANSPORTO TECHNOLOGINIŲ ĮRENGINIŲ KATEDRA

Linas Mališauskas

ELEKTRINIO IR MECHANINIO MANIPULIATORIAUS DINAMINIŲ PROCESŲ TYRIMAS
INVESTIGATION OF DYNAMIC PROCESSES IN ELECTROMECHANICAL MANIPULATOR

Baigiamasis magistro darbas

Transporto inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas ***621E20003***

Transporto technologinių sistemų inžinerijos specializacija

Sausumos transporto inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2014

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
TRANSPORTO INŽINERIJOS FAKULTETAS
TRANSPORTO TECHNOLOGINIŲ ĮRENGINIŲ KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

_____
(Parašas)
prof. Marijonas Bogdevičius
(Vardas, pavardė)

_____
(Data)

Linas Mališauskas

ELEKTRINIO IR MECHANINIO MANIPULIATORIAUS DINAMINIŲ PROCESŲ TYRIMAS
INVESTIGATION OF DYNAMIC PROCESSES IN ELECTROMECHANICAL MANIPULATOR

Baigiamasis magistro darbas

Transporto inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas ***621E20003***

Transporto technologinių sistemų inžinerijos specializacija

Sausumos transporto inžinerijos studijų kryptis

Vadovas	dr. doc. Vaclovas Jonevičius (Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)	_____ (Parašas)	_____ (Data)
Konsultantas	habil. dr. prof. Marijonas Bogdevičius (Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)	_____ (Parašas)	_____ (Data)
Lietuvių kalbos konsultantas	lekt. Angelika Petrėtienė (Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)	_____ (Parašas)	_____ (Data)

Vilnius, 2014

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
TRANSPORTO INŽINERIJOS FAKULTETAS
TRANSPORTO TECHNOLOGINIŲ ĮRENGINIŲ KATEDRA

Sausumos transporto inžinerija studijų kryptis

Transporto inžinerija studijų programa, valstybinis kodas ***621E20003***

Transporto technologinių sistemų inžinerijos specializacija

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)
prof. Marijonas Bogdevičius
(Vardas, pavardė)

(Data)

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO UŽDUOTIS

.....Nr. .....

Vilnius

Studentui (ei) Linui Maliauskui

(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: Elektrinio ir mechaninio variatorių dinaminių procesų tyrimas

patvirtinta 2013 m. sausio mėn. 31 d. dekano potvarkiu Nr. 67ti

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas ***2014-06-02.***

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS: Atlikti šiuolaikinių darbų apžvalgą nagrinėjama tematika. Sudaryti integruotų ir hidrauminių variatorių eksploatacinių modelių, naudojant elektrinę pavarų grandį. Atlikus tyrimus palyginti gautus rezultatus ir padaryti išvadas pagrįstas išvadas.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

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

Vadovas (Paraša) dr. Vaclovas Jonaitis
(Moksl. laipsnis/pedag.vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

(Parašas)
Linas Maliauskas
(Vardas, pavardė)

(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Transporto inžinerijos fakultetas
Transporto technologinių įrenginių katedra

ISBN ISSN
Egz. sk. .....
Data .....-.....-.....

Antrosios pakopos studijų **Transporto inžinerijos** programos magistro baigiamasis darbas

Pavadinimas **Elektrinio ir mechaninio manipuliatoriaus dinaminių procesų tyrimas**

Autorius **Linas Mališauskas**

Vadovas **dr. Vaclovas Jonevičius**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjama elektromechaninio manipuliatoriaus, sumontuoto ant mobiliojo roboto, dinaminiai procesai vykstantys judėjimo metu. Darbe atlikta mokslinių darbų apžvalga apie mobiliuosius robotus, turinčius manipuliatorius. Išnagrinėtos manipuliatorių konstrukcijos bei veikimo principai. Buvo sudaryti nagrinėjamo manipuliatoriaus kinematinis ir dinaminis modeliai bei servo–mechanizmo dinaminis modelis. Manipuliatoriaus judėjimas simuliuotas su programine įranga, taip pat atlikti praktiniai realaus manipuliatoriaus dinaminiai tyrimai, gauti rezultatai kiekvienu atveju pateikiami grafikų pavidalu. Pateiktos darbo išvados ir pasiūlymai. Darbo apimtis – 84 p., 45 iliustr., 26 bibliografiniai šaltiniai.

Prasminiai žodžiai: elektromechaninis manipuliatorius, dinaminis modelis, kinematinis modelis, servo–mechanizmas, mobilusis robotas.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Transport Engineering
Department of Transport Technological Equipment

ISBN ISSN
Copies No. .....
Date .....-.....-.....

Master Degree Studies **Transport Engineering** study programme Master Graduation Thesis

Title **Investigation of dynamic processes in elektromechanical manipulator**

Author **Linas Mališauskas**

Academic supervisor **Dr Vaclovas Jonevičius**

Thesis language:
Lithuanian

Annotation

In master thesis reviewed dynamic processes during movement of electromechanical manipulator mounted on mobile robot. In this work was overviewed research articles about mobile robots with manipulator on them. Also was discussed construction and operating principles of manipulator. The kinematic and dynamic model of the manipulator including servomechanism dynamic model was made. Manipulator movement was simulated with computer-based software, as well as a real manipulator dynamics were observed during experiment. All results are presented in the form of graphs. In the end of thesis conclusions and recommendations presented. Thesis consist of 84 p., 45 illustrations, 26 bibliographical entries.

Keywords: electromechanical manipulator, dynamic model, kinematic model, servomechanism, mobile robot.

Vilniaus Gedimino technikos universiteto egzaminų, sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo bei gynimo organizavimo tvarkos aprašo 2011-2012 m. m.

1 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Linas Mališauskas, 20085099

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Transporto inžinerijos fakultetas

(Fakultetas)

Transporto inžinerija, TTSfm-12

(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO) SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2014 m. birželio 1 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Elektrinio ir mechaninio manipuliatoriaus dinaminių procesų tyrimas“ patvirtintas 2013 m. sausio 31 d. dekano potvarkiu Nr. 67ti, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Parenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: prof. habil. dr. Marijonas Bogdevičius. Mano darbo vadovas dr. Vaclovas Jonevičius.

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

(Parašas) Linas Mališauskas (Vardas ir pavardė)

Turinys

Įvadas. ... 11
1. Mokslo darbų apžvalga. ... 13
1.1 Manipuliatorių savybės. ... 13
1.2 Manipuliatorių konstrukcija. ... 14
1.2.1 Nuosekliųjų grandžių manipuliatoriai ... 16
1.2.2 Lygiagrečiųjų grandžių manipuliatoriai ... 16
1.3 Manipuliatoriai mobiliuosiuose robotuose. ... 17
1.3.1 „DS1-MA“ manipuliatorius. ... 19
1.3.2 „Talon 2 DOF“ manipuliatorius ... 20
1.3.3 „iRobot Manipulator 1.0“. ... 21
1.3.4 „HDT MK2“ manipuliatoriaus sistema ... 22
1.3.5 Tiriamasis manipuliatorius ant mobiliojo roboto ... 23
1.4 Manipuliatorių ant mobiliosios bazės tyrimų apžvalga. ... 23
2. Teorinis pagrindimas. ... 25
2.1 Tiesioginis manipuliatoriaus padėčių uždavinys. ... 25
2.2 Tiriamojo manipuliatoriaus kinematinio modelio sudarymas. ... 28
2.3 Servomechanizmo dinaminis modelis. ... 32
2.3.1 Servomechanizmo sandara ... 32
2.3.2 Elektros variklio charakteristikos ... 34
2.3.3 Valdiklio veikimo principas ... 37
2.3.4 Dinaminio modelio sudarymas. ... 38
2.4 Manipuliatoriaus dinaminio modelio sudarymas ... 40
2.4.1 Manipuliatoriaus parametrų aprašymas. ... 40
2.4.2 Sunkio jėgos sukuriamas momentas. ... 42
2.4.3 Dinaminių lygčių užrašymas ... 43
2.4.4 Modeliavimo rezultatai. ... 44
2.5 Dinaminis modeliavimas „SIM-20“ programa ... 47
2.5.1 Servomechanizmo modelis. ... 47
2.5.2 Kinematinio modelio sudarymas ... 48
2.5.3 Dinaminio modelio sudarymas. ... 48

2.5.4 Modeliavimo rezultatai ... 49
3. Eksperimentiniai tyrimai ... 55
3.1 Matavimo įrangos aprašymas ... 55
3.1.1 „DL1“ duomenų kaupiklis ... 55
3.1.2 „IMU-06“ jutiklis ... 56
3.1.3 Kiti matavimams atlikti reikalingi prietaisai ... 56
3.2 Bandymo eiga ir rezultatai ... 57
3.2.1 Bandymo aplinka ... 57
3.2.2 Pasiruošimas bandymui ... 57
3.2.3 Bandymas sukant ketvirtąją grandį pirmu atveju ... 58
3.2.4 Bandymas sukant ketvirtą grandį antru atveju ... 60
3.2.5 Bandymas sukant trečiąją grandį ... 61
3.2.6 Bandymas sukant antrąją grandį ... 63
3.2.7 Penktojo tyrimo sąlyga ... 64
Išvados ... 69
Literatūros sąrašas ... 71
Priedai ... 73

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Šešios pagrindinės elementariosios sąnaros 15
1.2 pav. Kinematinės jungiamosios grandies savybės 15
1.3 pav. Nuoseklios grandinės robotas „Scara“ 16
1.4 pav. Šešių grandžių lygiagretusis manipuliatorius 17
1.5 pav. iRobot “PackBot” mobilusis robotas 18
1.6 pav. „RE2 Inc. DS1-MA“ manipuliatorius 19
1.7 pav. „Talon“ 2 DOF” manipuliatorius 20
1.8 pav. „iRobot Manipulator 1.0“ 21
1.9 pav. „HDT MK2“ manipuliatorius 22
1.10 pav. Tiriamasis manipuliatorius ant mobiliojo roboto 23
2.1 pav. Koordinačių sistemų suteikimas jungtims 27
2.2 pav. Tiriamasis elektromechaninis manipuliatorius 29
2.3 pav. Tiriamojo manipuliatoriaus kinematinis modelis 29
2.4 pav. Servomechanizmo sandara 33
2.5 pav. Elektros variklio sūkių dažnio priklausomybė nuo momento 35
2.6 pav. Elektros variklio paleidimo charakteristika 36
2.7 pav. Servomechanizmo valdiklio principinė schema 37
2.8 pav. Servomechanizmo analoginio valdiklio elektrinė schema 38
2.9 pav. Servomechanizmo dinaminio modelio principinė schema. 38
2.10 pav. Veleno kampo kitimas laike pirmu atveju 45
2.11 pav. Veleno kampo kitimas laike antru atveju 45
2.12 pav. Momentų kitimas laike antru atveju 46
2.13 pav. Kampo kitimas laike kai keičiamas nurodomas kampas 46
2.14 pav. Servomechanizmo modelio principinė schema 48
2.15 pav. Grandį apibūdinantys parametrai 49
2.16 pav. Pirmosios moduliacijos rezultatai 50
2.17 pav. Antrosios moduliacijos rezultatai 50
2.18 pav. Trečiosios moduliacijos pirmi rezultatai 51
2.19 pav. Trečiosios moduliacijos antri rezultatai 52
2.20 pav. Ketvirtosios moduliacijos pirmi rezultatai 52

2.21 pav. Ketvirtosios moduliacijos antri rezultatai 53
2.22 pav. Manipuliatoriaus modelis trimatėje erdvėje. 54
3.1 pav. DL1 duomenų kaupiklis 55
3.2 pav. „IMU-06“ jutiklis 56
3.3 pav. Manipuliatoriaus grandis su pritvirtintu jutikliu. 58
3.4 pav. Pirmojo tyrimo sukimo aukštyn grafikas 59
3.5 pav. Pirmojo tyrimo sukimo žemyn grafikas. 60
3.6 pav. Antrojo tyrimo sukimo aukštyn grafikas. 61
3.7 pav. Trečiojo tyrimo sukimo žemyn grafikas. 62
3.8 pav. Ketvirtojo tyrimo sukimo žemyn grafikas 63
3.9 pav. Penktojo tyrimo pirmojo važiavimo rezultatai 65
3.10 pav. Penktojo tyrimo antrojo važiavimo rezultatai. 66
3.11 pav. Kliūčių ruožo principinė schema. 67
3.12 pav. Penktojo tyrimo trečiojo važiavimo rezultatai. 67
3.13 pav. Penktojo tyrimo ketvirtojo važiavimo rezultatai. 68

Įvadas

Tiriamoji problema

Šiais laikais vis dažniau žmogaus atliekamą darbą keičia mašinos. Mašinos atlieka nuo pačių paprasčiausių joms užduotų užduočių iki labai sudėtingų procesų. Vis dažniau mūsų gyvenime galima pamatyti robotus, kurie mus pakeičia tiek atliekant kasdieninio gyvenimo užduotis, tokias kaip dulkių siurbimas, iki tokių užduočių, kaip sprogmenų išminavimas.

Robotas – tai mechanizmas, kuris sugeba atlikti fizines užduotis, kurios užprogramuotos iš anksto arba valdomos žmonių. Robotai naudojami užduotims, kurios yra pavojingos žmonėms, ar aplinkose, kuriose žmogus negali dirbti. Taip pat robotai plačiai naudojami pramonėje, kur yra atliekamos nuolat besikartojančios užduotys, taip pakeisdami gerokai brangesnį žmogaus darbą.

Robotų yra įvairiausių formų – nuo žmogaus kūną primenančių ir žmogaus judesius atkartojančių humanoidų iki miniatiūrinių nanorobotų. Šiuo metu eilinio žmogaus buityje robotą galima aptikti nedažnai, tačiau gana sparčiai populiarėja robotai siurbliai ar robotai žoliapjovės, kurie autonomiškai važinėja po jiems nurodytą plotą.

Nors robotų yra įvairiausių formų ir paskirčių, nemaža dalis jų yra manipuliatoriai arba viena (keletas) iš jų dalių yra manipuliatoriai.

Manipuliatorius – tai prietaisas, skirtas valdyti objektus, juos pernešti, atlikti tam tikras funkcijas per atstumą, tai yra nesant tiesioginiam žmogaus kontaktui su objektu. Manipuliatoriai yra sudaryti iš grupės segmentų, sujungtų tam tikrais mazgais, dėl kurių jie gali slinkti ar suktis vienas kito atžvilgiu. Taip yra gaunama „ranka“, kuri gali atlikti judesius, panašius į atliekamus žmogaus. Galiausiai gaunamas mechanizmas, kuris gali suimti ir kilnoti objektą tam tikrą judesio laipsnių kiekį.

Šie įrenginiai pirmiausia buvo pradėti naudoti žmogui pavojingose aplinkose, šiuo metu jų panaudojimo sfera yra labai plati. Manipuliatoriai yra plačiai naudojami pramonėje, kariuomenėje, kosmoso srityje ar netgi medicinoje.

Kadangi robotai vis dažniau yra panaudojami pavojingose vietose atliekant pavojingas užduotis, yra būtina užtikrinti jų veikimo tolygumą bei stabilumą.

Darbo tikslas

Darbo tikslas yra ištirti dinaminius procesus, veikiančius roboto manipuliatorių, bei sudaryti kinematinį bei dinaminį modelį.

Darbo uždaviniai

- Ištirti roboto manipuliatoriaus, sukurto Generolo Jono Žemaičio Lietuvos karo akademijoje, dinaminius procesus, vykstančius veikimo metu bei važiavimo metu visam robotui judant.
- Sudaryti naudojamo manipuliatoriaus kinematinį bei dinaminį modelį.
- Palyginti gautus teorinius ir praktinius darbo rezultatus.

Darbo praktinė vertė

Pagal gautus bandymų duomenis galima vertinti naudojamo roboto manipuliatoriaus tinkamumą numatytajai jo paskirčiai bei stabilumą atliekant judesius, o tai yra labai svarbu dirbant su potencialiai pavojingais objektais.

Taip pat pagal sudarytus kinematinį ir dinaminį modelius galima modeliuoti manipuliatoriaus judėjimo procesus esant įvairioms sąlygoms.

1. Mokslo darbų apžvalga

1.1 Manipuliatorių savybės

Manipuliacinė sistema – tai keleto grandžių erdvinis mechanizmas, kurio kinematinė grandinė yra atvira. Ji skirta darbo įtaisui ar manipuliavimo objektui perkelti ir jam orientuoti tam tikrame darbo zonos taške.

Kinematinių porų ir darbo įtaiso pavaros transformuoja judesio šaltinio energiją į manipuliatoriaus mechaninį judesį pagal valdymo sistemos komandos signalus. Pavarą sudaro judesio šaltinis, perdavimo mechanizmas, pavaros valdymo įrenginys (Bakšys, Fedaravičius 2004).

Pagal judesio šaltinį manipuliatoriai būna 3 tipų:

1) hidrauliniai;
2) pneumatiniai;
3) elektromechaniniai.

Manipuliatorių konstrukciją ir technines galimybes apibūdina keli svarbiausi parametrai:

1) keliamoji galia;
2) judrumo laipsnių skaičius;
3) mobilumas;
4) greitaveika;
5) pozicionavimo tikslumas;
6) manipuliatoriaus darbinė zona.

Keliamoji galia – tai didžiausia objekto masė, su kuria manipuliatorius gali dirbti be sutrikimų savo darbo zonoje. Priklausomai nuo manipuliatoriaus konstrukcijos jo keliamoji galia gali kisti pagal tai, kokioje padėtyje yra manipuliatorius. Dažniausiai mažiausia keliamoji galia yra pasiekiama tolimiausiame darbo zonos krašte ir atitinkamai didėja, kai griebtuvas yra arčiau manipuliatoriaus pagrindo.

Judrumo laipsnių skaičius (angl. *degrees of freedom* – DOF) yra lygus manipuliatoriaus nepriklausomų koordinačių, kurios reikalingos jo padėčiai erdvėje aprašyti, skaičiui, neįtraukiant griebtuvo suėmimo judesių. Kitaip tariant, manipuliatoriaus judrumo laipsnių skaičių lemia manipuliatoriaus jungiamųjų dalių skaičius, jungiamųjų mazgų skaičiaus ir tų mazgų tipo (Tsai 1999). Dažnai pagal manipuliatoriaus judrumo laipsnių skaičių galima spręsti apie jo

universalumą. Tai yra kuo didesnis manipuliatoriaus judrumo laipsnių skaičius, tuo jis yra universalesnis, tačiau kuo didesnis judrumo laipsnių skaičius, tuo yra sudėtingesnė manipuliatoriaus konstrukcija ir labiau komplikuotas valdymas, tai gali lemti sumažėjusį patikimumą.

Roboto mobilumas yra nusakomas jo atliekamais judesiais. Kalbant konkrečiai apie manipuliatorius, jų mobilumas priklauso sumontavimo tipo. Stacionarūs manipuliatoriai gali atlikti veiksmus tik savo pasiekiamoje darbo zonoje, o sumontuoti mobiliai gali būti perkelti į kitą darbo vietą. Taip pat manipuliatorių mobilumas priklauso nuo galimybių orientuoti griebtuvą savo darbo zonoje.

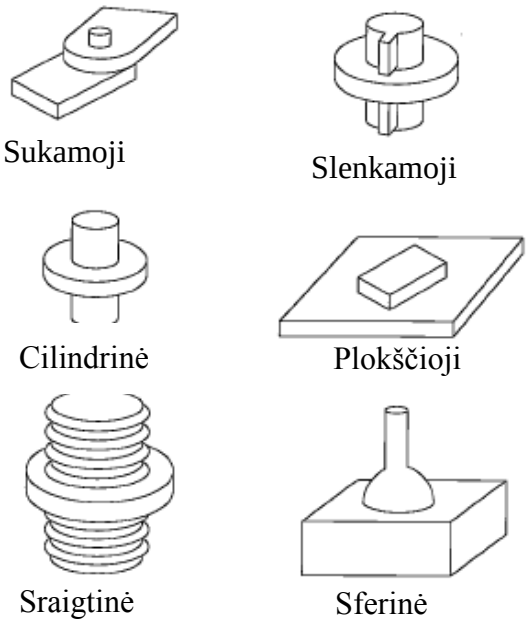
Manipuliatoriaus greitaveika apibūdinama griebtuvo didžiausiais linijiniais ir kampiniais greičiais darbo metu.

Pozicionavimo tikslumas – tai roboto griebtuvo nustatymo tikslumas reikiamame darbo zonos taške ir griebtuvo judesio trajektorijos sutikimas su užprogramuotąja (Bakšys ir Federavičius 2004). Šį tikslumą labiausiai lemia manipuliatoriaus konstrukcijos ypatumai bei judesį suteikiančių dalių tikslumas.

1.2 Manipuliatorių konstrukcija

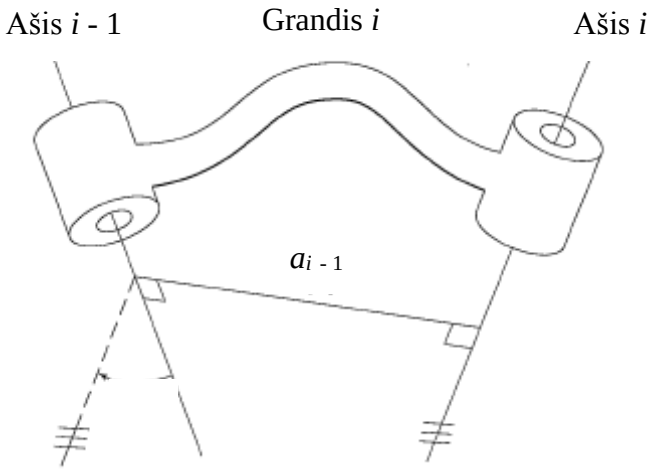
Supaprastintai manipuliatoriaus konstrukciją galima suprasti kaip standžių grandžių ir lanksčių jungčių – sąnarų nuosekliai sujungtą grandinę. Elementariosios grandys – tai tokios grandys, kurios aprašomos dviejų plokštumų judėjimu viena kitos atžvilgiu. Dažniausiai aptinkamos šešios elementariosios sąnaros: sukamoji, slenkamoji, cilindrinė, sferinė, sraigtinė ir plokščioji (1.1 pav.).

Dažniausiai praktikoje manipuliatoriuose naudojamos sąnaros, turinčios tik vieną judrumo laipsnį. Dažniausiai yra naudojama sukamoji ir slenkamoji jungtys. Retais atvejais manipuliatoriuose yra panaudojama jungtis, turinti daugiau nei vieną laisvės laipsnį, bet tokias jungtis galima vertinti kaip sujungtas kelias vieno laipsnio jungtis, sujungtas 0 atstumu viena nuo kitos (Craig 2005).



1.1 pav. Šešios pagrindinės elementariosios sąnaros (Craig 2005)

Nagrinėjant manipuliatorių kinematiškai grandys tarp sąnarų yra laikomos standžiomis ir apibūdinamos tik atstumu tarp sąnarų ašių a ir pasisukimo kampu α tarp šių ašių (1.2 pav.)



1.2 pav. Kinematinės jungiamosios grandies savybės (Craig 2005)

Tačiau projektuojant manipuliatorių jungiamosios grandys turi gerokai daugiau savybių, kurios turi būti įvertintos. Tai tokios savybės, kaip medžiaga, iš kurios pagaminta jungiamoji grandis, jos svoris, deformacija, forma, sąnaros įtvirtinimas, inercija ir kita.

1.2.1 Nuosekliųjų grandžių manipuliatoriai

Nuoseklieji manipuliatoriai – tai nuosekliai sujungtų grandžių sistema, dar kitaip vadinami atviros kinematinės grandinės. Šie manipuliatoriai yra įtvirtinti standžiai 1 grandimi ir kiekviena kita grandis eina nuosekliai viena po kitos iki griebtuvo (1.3 pav).



1.3 pav. Nuoseklios grandinės robotas „Scara“ (Equipment details 2013)

Šie manipuliatoriai pasižymi šiais privalumais:

- dideliu darbinės zonos tūriu;
- mažais matmenimis pagal darbinės zonos dydį;
- mažu reikalingu plotu įtvirtinimui.

Šių manipuliatorių trūkumai yra:

- nedidelis standumas dėl atviros kinematinės grandinės struktūros;
- gana nemažais netikslumais, atsirandančiais dėl kiekvienos jungties paklaidos;
- santykinai maža mase, su kuria gali dirbti manipuliatorius.

1.2.2 Lygiagrečiųjų grandžių manipuliatoriai

Lygiagretieji manipuliatoriai – tai mechaninės sistemos, kuriose naudojama keletas lygiagrečiai sujungtų grandžių valdyti vienai plokštumai. Šiuose manipuliatoriuose paprastai yra naudojamos trys arba šešios lygiagrečiai sujungtos grandys valdyti vienai plokštumai. Šie manipuliatoriai taip pat dar yra vadinami uždarosios grandinės. 1.4 paveiksle yra pavaizduotas 6 grandžių lygiagretusis manipuliatorius, dar vadinamas „Stewart Platform“.



1.4 pav. Šešių grandžių lygiagretusis manipuliatorius (H-840... 2014)

Lygiagrečiųjų manipuliatorių privalumai:

- didelis standumas dėl uždarosios kinematinės grandinės struktūros;
- pasiekiamas didelis pozicionavimo tikslumas.

Trūkumai:

- maža darbinė zona;
- dideli manipuliatoriaus matmenys;
- manipuliatoriaus judrumo laipsnių skaičius labai sumažėja esant prie darbinės zonos kraštų.

1.3 Manipuliatoriai mobiliuosiuose robotuose

Daugiausia manipuliatorių yra naudojama pramonėje, jie kitaip yra žinomi kaip pramoniniai robotai. Tačiau manipuliatoriai yra naudojami ir kitose srityse, viena iš jų yra specialiosios paskirties mobiliuosiuose robotuose. Šie robotai vis plačiau yra naudojami policijoje bei kariuomenėje. Jie yra pritaikomi pavojingų vietovių žvalgybai, pastatų apžiūrėjimui, minų nukenksminimui, įrangos transportavimui ar netgi šaudymui iš ant roboto sumontuotų ginklų.

Vieni pirmųjų mobiliuosius robotus primenančių aparatų „Goliath tracked mine“ kariuomenėje buvo naudojami Vokiečių armijos II pasauliniame kare. Ši nuotoliniu būdu valdoma

vikšrinė transporto priemonė ginkluota sprogmenimis ir būdavo susprogdinama kai pasiekdavo taikinį.

Šiai dienai vieni dažniausiai naudojamų mobiliųjų robotų yra „Foster-Miller“ kompanijos gaminamas „TALON“ ir „iRobtot“ firmos „PackBot“ (1.5 pav.). Yra žinoma, kad virš 3000 firmos „iRobot“ mobiliųjų robotų „PacBot“ yra naudojama Jungtinių Amerikos Valstijų kariuomenės Irake ir Afganistane (Robotics Trends Staff, 2010).



1.5 pav. iRobot “PackBot” mobilusis robotas (The U.S.... 2009)

Kadangi mobilieji robotai yra naudojami specialiosiose misijose, tokiose kaip sprogmenų nukenksminime, vienas pagrindinių elementų yra manipuliatorius. Šių manipuliatorių savybės ženkliai skiriasi lyginant su manipuliatoriais naudojamais pramonėje. Manipuliatoriai sumontuoti ant nedidelio mobilaus pagrindo turi pasižymėti lengvu svoriu, nedideliais matmenimis, kompaktiška forma nedarbo rėžime, neturėti ženkliai išsikišusių, galinčių kliūti elementų, bei turėti funkcionalų griebtuvą. Mobiliųjų robotų manipuliatoriai dažniausiai būna elektromechaniniai, tam kad galėtų veikti nuo akumuliatorių, kurie dažniausiai naudojami šiuose robotuose. Taip pat būtina savybė yra pakankamai didelis pozicionavimo tikslumas rankiniame manipuliatoriaus valdyme, kadangi šiuos manipuliatorius dažniausiai valdo operatorius per tam tikrą atstumą. Nors mobiliųjų robotų manipuliatorių keliamoji galia būna pakankamai nedidelė, bet dažnai manipuliatoriaus pagalba yra atverčiamas robotas tuo atveju, jeigu jis apsiverčia.

1.3.1 „DS1-MA“ manipuliatorius

„RE2“ firmos manipuliatorius „DS1-MA“ (1.6 pav.) skirtas mobiliesiems robotams yra paprastos konstrukcijos skirtas elementarioms operacijoms atlikti. Šis manipuliatorius turi valdomą tik 1 laisvės laipsnį ir griebtuvo suspaudimo atleidimo judesį.



1.6 pav. „RE2 Inc. DS1-MA“ manipuliatorius (DS1-MA... 2012)

Nors šis manipuliatorius yra pasukamas tik vienos ašies atžvilgiu, tačiau jo galimybės yra praplėstos mechaniškai rankiniu būdu galimomis pakeisti savybėmis. Pavyzdžiui manipuliatoriaus griebtuvą galima sumontuoti tiek vertikaliai tiek horizontaliai, taip pat ir pareguliuoti ilgę tarp ašies ir griebtuvo. Tiesa visa tai reikia padaryti prieš naudojantis manipuliatoriumi. Iš esmės šio įrenginio paskirtis yra suimti objektą ir temti ar pasikelti virš mobiliojo roboto. Šio manipuliatoriaus pozicionavimas pagrinde atliekamas mobiliojo roboto judesių pagalba.

„DS1-MA“ specifikacijos (RE2, INC. 2012):

- valdomi laisvės laipsniai: 1;
- maksimali keliamoji jėga: 3,18 kg;
- maksimali griebtuvo suspaudimo jėga: 11,36 kg;
- maksimalus pasiekiamas atstumas: 23,5 cm;
- svoris: 1,64 kg.

1.3.2 „Talon 2 DOF“ manipuliatorius

„Foster – Miller“ firmos priklausančios Qinetiq grupei gaminamas mobilusis robotas „Talon“ yra vienas daugiausiai naudojamų kariuomenėje bei policijos specialiosiose pajėgose. Ši firma kartu su robotu gamina ir 2 skirtingus manipuliatorius pritaikytus „Talon“. Dažniausiai ant „Talon“ mobiliojo roboto yra sutinkamas paprastesnis „Standart 2 DOF“ (1.7 pav.) manipuliatorius, kuris yra 2 laisvės laipsnių.



1.7 pav. „Talon“ 2 DOF” manipuliatorius (Talon – Qinetiq... 2012)

Šis manipuliatorius sudarytas iš dviejų grandžių ir dviejų sukamųjų sąnarų bei griebtuvo. Griebtuvas prie manipuliatoriaus yra pritvirtintas per rutulinį šarnyrą, kuris leidžia griebtuvą įtvirtinti norimoje padėtyje. Lyginant su „DS1-MA“ manipuliatoriumi (1.6 pav.) „Talon 2 DOF“ manipuliatorius yra ženkliai pranašesnis dėl didesnės manipuliatoriaus darbo zonos, galimybės griebtuvą orientuoti ne tik priešais objektą bet ir virš jo, gebėjimo naudoti manipuliatorių gerokai aukščiau virš pačio mobiliojo roboto bei iš karto už griebtuvo įmontuota kamera. Tačiau dėl negalėjimo manipuliatoriaus pasukti aplink pagrindo vertikalią ašį manipuliatoriaus griebtuvui pilnai orientuoti reikalingas ir pačio mobiliojo roboto pasukimas.

„Talon 2 DOF“ specifikacijos (Talon – QinetiQ... 2012):

- valdomi laisvės laipsniai: 2;
- maksimali keliamoji jėga: 9,07 kg;
- keliamoji jėga ištiestu manipuliatoriumi: 4,5 kg;
- maksimali griebtuvo suspaudimo jėga: 13,6 kg;
- maksimalus pasiekiamas atstumas: 130 cm;

- maksimalus pasiekiamas aukštis: 103 cm.

1.3.3 „iRobot Manipulator 1.0“

Šis manipuliatorius skirtas taip pat plačiai naudojamam „iRobot“ firmos mobiliajam robotui „PackBot“. Tai vienas daugiausiai galimybių turinčių manipuliatorių sumontuotų ant su kuprine galimo nešioti mobiliojo roboto. Tai itin didelio siekio manipuliatorius tuo pačiu turintis itin kompaktiškus matmenis transportavimo padėtyje.



1.8 pav. „iRobot Manipulator 1.0“ (iRobot 510... 2012)

”iRobot Manipulator“ (1.8 pav.) turi net 7 laisvės laipsnius. Manipuliatorius susideda iš trijų grandžių, pastebėtina tas, kad griebtuvas yra sumontuotas tarp antros ir trečios grandies, o manipuliatoriaus pačiam gale yra sumontuota vaizdo stebėjimo įranga. Dėl didelio kiekio manipuliatoriaus turimų valdomų sąnarų jam reikalinga sudėtinga valdymo sistema. Norint supaprastinti manipuliatoriaus valdymą operatoriui yra naudojama iš anksto numatytų funkcijų rinkinys, tai yra pagal situaciją pasirenkama iš anksto numatyta programa.

„iRobot Manipulator 1.0“ specifikacijos (iRobot 510... 2012):

- valdomi laisvės laipsniai: 7;
- maksimali keliamoji jėga: 13,6 kg;
- keliamoji jėga ištiestu manipuliatoriumi: 4,5 kg;

- maksimalus pasiekiamas atstumas/aukštis: 187 cm;
- svoris: 9,32 kg.

1.3.4 „HDT MK2“ manipuliatoriaus sistema

„HDT Robotics“ firmos „MK2“ (1.9 pav.) manipuliatoriai yra vieni iš pažangiausių šiuo metu mobiliesiems robotams skirtų tokio tipo įrenginių. Šie manipuliatoriai yra sudaryti iš atskirų, tarpusavyje įvairiomis konfigūracijomis galimų sujungti elementų. Tai leidžia manipuliatoriaus laisvės laipsnių skaičių pakeisti nuo 10 iki 25. Sudėtingiausioje konfigūracijoje „MK2“ sistema susideda iš 2 manipuliatorių turinčių labai artimas judėjimo galimybes abejoms žmogaus rankoms.



1.9 pav. „HDT MK2“ manipuliatorius (MK2 robotic... 2012)

Šio manipuliatoriaus griebtuvas taip pat nėra įprastas lyginant su kitų firmų manipuliatoriais. Galūnė yra sudaryta iš tris žmogaus pirštus primenančių elementų. Šie manipuliatoriaus pirštai atkartoja žmogaus pirštų judesius ir turi atitinkamai tiek pat lanksčių sąnarų kiek ir žmogaus pirštas. Visi šio manipuliatoriaus judesiai kiek galima labiau atkartoja žmogaus judesius, tam kad operatorius atliekantis užduotį galėtų kuo labiau jausti atliekamus veiksmus tarsi tai jis darytų pats. Šiam manipuliatoriui sukurtas ir specialus valdymo pultas, kuris fiksuoja valdančiojo žmogaus rankų judesius ir perduoda informaciją manipuliatoriui. Tai reiškia kad iš esmės manipuliatorius stengiasi kuo tiksliau atkartoti operatoriaus rankos atliekamus veiksmus, kas leidžia išmokti pakankamai tiksliai valdyti manipuliatorių per labai trumpą laiką.

„HDT MK2“ manipuliatoriaus specifikacijos (MK2 robotic... 2012):

- valdomi laisvės laipsniai: 10 - 25;
- maksimali keliamoji jėga (11 laisv. laip./25 laisv. laip.): 27 / 50 kg;
- keliamoji jėga ištiestu manipuliatoriumi (11 laisv. laip./25 laisv. laip.): 14 / 23 kg;
- maksimali griebtuvo suspaudimo jėga: 178 N;
- maksimalus pasiekiamas atstumas: 127 cm.

1.3.5 Tiriamasis manipuliatorius ant mobiliojo roboto

Šiame darbe tiriamasis manipuliatorius yra modelio „AL5D Robotic Arm“, pagaminto firmos „Lynxmotion, a RobotShop Distribution Inc“. Šis manipuliatorius yra sumontuotas ant Generolo Jono Žemaičio Lietuvos karo akademijoje sukurto mobiliojo roboto prototipo (1.10 pav.).



1.10 pav. Tiriamasis manipuliatorius ant mobiliojo roboto

Manipuliatorius turi valdomus keturis laisvės laipsnius (neskaitant griebtuvo suspaudimo, paleidimo judesių), maksimalus siekis yra apie 260 mm, o deklaruojamas keliamas svoris – 360 gramų. Kiti šio manipuliatoriaus parametrai nėra žinomi.

1.4 Manipuliatorių ant mobiliosios bazės tyrimų apžvalga

Kadangi tiriamasis manipuliatorius yra sumontuotas ant mobiliosios bazės, jos judėjimas ir virpesiai tiesiogiai paveiks elektromechaninio manipuliatoriaus konstrukciją, o svarbiausia ir jo galinį tašką – griebtuvą. Tai reiškia, kad objektas esantis manipuliatoriaus griebtuve bus paveiktas

virpesių priklausančių nuo manipuliatoriaus veikimo bei transporto priemonės virpesių ant kurios jis sumontuotas. Šie virpesiai griebtuve turėtų būti kiek įmanoma mažesni, kadangi nagrinėjamo objekto paskirtis – darbas su pavojingais ir sprogiais objektais.

Mokslo darbų atliktų šiomis temomis nėra daug. Viename iš darbų „High-Precision Impedance Control Method for Flexible BaseMoving Manipulators“ (Salehi and Vossoughi 2009) buvo atliktas dinaminis manipuliatoriaus ant judančios bazės modeliavimas važiuojant link sienos kol galiausiai manipuliatoriaus galinis taškas atsitrenkia į ją. Šiame darbe buvo gauti jėgų, pagreičių grafikai sąveikos su siena metu. Modeliavimas atliktas esant dviem skirtingiems manipuliatoriaus konfigūracijos modeliams.

Kitame darbe „Comparison of control techniques for a robotic manipulator with base disturbances“ (Dunnigan and Wronka 2010) sudaromas dinaminis manipuliatoriaus modelis kai pats manipuliatorius yra sumontuotas ant laisvai erdvėje su didele inercija judančios platformos. Toks modelis taikytas į kosmoso srityje naudojamų manipuliatorių modelio sudarymą. Šio modelio pagalba buvo lyginamos kelios valdymo programos manipuliatoriui siekiant išlaikyti galinį tašką pradinėje pozicijoje keičiantis platformos trajektorijai. Teoriškai tokį griebtuvo stabilizavimo metodą galima būtų pritaikyti ir siekiant sumažinti svyravimus važiuojant bazei nelygiu paviršiumi, tačiau lyginant su minėtame darbe nagrinėjamais svyravimais kosmose, svyravimai sukeliami judant paviršiumi yra ženkliai didesnio dažnio nei objekto esančio kosmose, todėl dėl mechaninių charakteristikų manipuliatoriaus greitis būtų per mažas kompensuoti didelio dažnio virpesius.

Dar viename darbe „Low-cost teleoperable robotic arm“ (Rogers 2009) nagrinėjamas elektromechaninis manipuliatorius, skirtas mobiliosioms transporto priemonėms, savo konstrukcija panašus į šiame darbe nagrinėjamą manipuliatorių. Tačiau minėtame darbe buvo koncentruotasi į manipuliatoriaus konstrukcinius sprendimus ir neatlikti jokie modeliavimo procesai.

Korayem et al. (2005) darbe „Dynamic load-carrying capacity of mobile-base flexible joint manipulators“ nagrinėjamas matematinis modelis skirtas nustatyti maksimalų galimą svorį, kurį manipuliatorius gali orientuoti erdvėje. Šis modelis įvertina ir judančio pagrindo įtaką manipuliatoriaus veikimui, bet tik esant judesiui viena ašimi, kai manipuliatoriaus bazė sumontuota ant bėgių. Pagal gautus rezultatus šiame darbe matyti, kad didžiausią įtaką manipuliatoriaus veikimui daro sukimo momentą sukuriantys varikliai ir manipuliatoriaus padėtis pagrindo atžvilgiu.

2. Teorinis pagrindimas

2.1 Tiesioginis manipuliatoriaus padėčių uždavinys

Kinematika tyrinėja kūnų judėjimą nevertinant jėgų bei momentų kurie sukuria judėjimą. Robotų kinematika tai analitinis roboto manipuliatoriaus tyrinėjimas. Suformuoti teisingą kinematinį roboto manipuliatoriaus modelį yra būtina norint analizuoti manipuliatoriaus judesius (Kucuk, Bingul 2006).

Priimdami, kad kiekviena iš manipuliatoriaus sąnarų gali turėti tik vieną laisvės laipsnį supaprastiname manipuliatoriaus kinematinės schemos sudarymą. Sąnara turėdama tik vieną laisvės laipsnį įgalina aprašyti ją tik vienu kintamuoju parametru, priklausomai nuo kokio tipo yra sąnara. Atitinkamai sukamoji sąnara turės kintamąjį kuris nusakys tos sąnaros pasisukimo kampą, o slenkamoji sąnara turės kintamąjį kuris nusakys pasislinkimą ašimi.

Nagrinėjant manipuliatorių kaip kinematinę grandinę yra įvedama sąlyga, kad manipuliatorius turintis n sąnarų skaičių turės $n + 1$ grandžių skaičių, kadangi kiekviena sąnara jungia dvi grandis. Sąnaroms suteikiame numerius nuo 1 iki n, o grandims nuo 0 iki n pradedant nuo manipuliatoriaus pagrindo. Pagal šį žymėjimą gauname, kad i sąnara jungia $i - 1$ grandį su grandimi i. Priimame, kad sąnara i yra standžiai sujungta su grandimi $i - 1$, o judant sąnarai i juda ir grandis numeriu i. Taip pat yra priimama, kad grandis numeriu 0 yra standžiai įtvirtinta ir nejuda.

Kiekviena i – toji sąnara turi savo kintamąjį, kurį pažymime q_i. Atitinkamai nuo sąnaros kintamasis gali būti:

$$q_i = \begin{cases} \theta_i : & \text{kai i sąnara sukamoji} \\ d_i : & \text{kai i sąnara slenkamoji} \end{cases}. \tag{2.1}$$

Sudarydami kinematinį manipuliatoriaus modelį kiekvienai sąnarai priskiriame koordinačių sistemą. Tai yra kiekviena sąnara turi sau priskirtą $o_i x_i y_i z_i$ koordinačių sistemą.

Jacques Denavit ir Richard Hartenberg 1955 metais pateikė pagrindinius metodus kuriais vadovaujantis galima supaprastinus padaryti kinematinį manipuliatoriaus modelį. Šiai dienai šios taisyklės tapo plačiausiai naudojamos pasaulyje sudarant kinematinius manipuliatorių modelius (Corke 2011).

Kinematinio modelio sudarymas naudojantis Denavito ir Hartenbergo taisyklėmis pateikiamas toliau.

Kiekviena grandis turi 2 ją nusakančius parametrus: grandies ilgį – a_i ir grandies pasisukimą – α_i (1.2 pav.). Kiekviena sąnara turi taip pat 2 parametrus: sąnaros pasislinkimu nuo grandies – d_i ir grandžių pasisukimo kampu sąnaros sujungime – θ_i. Šie 4 parametrai dar yra vadinami DH (Denavito ir Hartenbergo) parametrais.

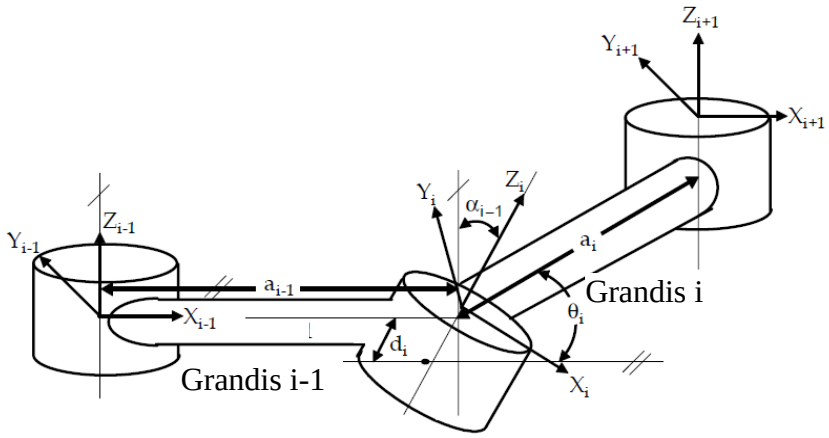
Kiekvienai sąnarai yra priskiriama koordinačių sistema, pagal kurią yra nustatomi DH parametrai. Koordinačių sistema turi būti priskiriama vadovaujantis šiomis taisyklėmis:

1. Z_i ašis sutampa su i+1 sąnaros pasisukimo ašimi, jeigu sąnara yra sukamoji arba sutampa su pasislinkimo ašimi jeigu sąnara yra slenkamoji;
2. X_i ašis yra apibrėžiama kaip bendras statmuo ašims Z_{i-1} ir Z_i ir yra nukreipta nuo statmens ir susikirtimo taško su ašimi Z_{i-1} į tašką, kuriame ji kerta Z_i arba bet kurioje plokštumos, sudarytos Z_{i-1} ir Z_i ašių, statmens pusėje, jei šios ašys kertasi. X_i gali būti parinkta laisvai, jei Z_{i-1} ir Z_i sutampa;
3. Y_i ašis yra parenkama pagal dešinės rankos taisyklę.
4. 0 – nės koordinačių sistemos pradžia gali būti parinkta bet kuriame poros (0, 1) ašies taške, o ašis X_0 kryptis yra pasirenkama laisvai.

Toks koordinačių sistemų aprašymo pritaikymas yra pavaizduotas 2.1 paveiksle.

Panaudojus šį koordinačių aprašymą sistema jungtis i gali būti transformuota į jungtį i-1 panaudojant vieną pasukimą, du paslinkimus ir dar vieną pasukimą tokiu eiliškumu:

1. koordinačių sistema $O_{i-1}X_{i-1}Y_{i-1}Z_{i-1}$ pasukama apie ašį Z_{i-1} kampu θ_i tol, kol ašis X_{i-1} taps lygiagreti X_i ašiai;
2. pasukta koordinačių sistema $O_{i-1}X_{i-1}Y_{i-1}Z_{i-1}$ pastumiama išilgai Z_{i-1} ašiai atstumu d_i tol, kol ašys X_{i-1} ir X_i atsidurs vienoje linijoje;
3. koordinačių sistema $O_{i-1}X_{i-1}Y_{i-1}Z_{i-1}$ yra pastumiama išilgai ašies X_i atstumu a_i tol, kol koordinačių sistemos $O_{i-1}X_{i-1}Y_{i-1}Z_{i-1}$ ir $O_iX_iY_iZ_i$ pradžios sutaps;
4. koordinačių sistema $O_{i-1}X_{i-1}Y_{i-1}Z_{i-1}$ pasukama apie ašį kamupu α_i tol, kol ašys z_{i-1} ir z_i sutaps.



2.1 pav. Koordinačių sistemų suteikimas jungtims (Corke 2011)

Šie elementarieji perstūmimai ir pasukimai gali būti atliekami atitinkamomis matricomis:

1. Pasukimas apie ašį Z_{i-1} kampu θ_i aprašomas matrica $R_{Z,\theta i}$, kuri yra lygi:

$$R_{Z,\theta i} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \tag{2.2}$$

2. Poslinkis išilgai ašies Z_{i-1} atstumu d_i aprašomas matrica $T_{Z,di}$:

$$T_{Z,di} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \tag{2.3}$$

3. Poslinkis išilgai ašies X_i atstumu a_i aprašomas matrica $T_{X,ai}$:

$$T_{X,ai} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \tag{2.4}$$

4. Pasukimas apie X_i ašį kampu α_i yra aprašomas matrica $R_{X,\alpha i}$:

$$R_{X,\alpha i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & 0 \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{2.5}$$

Homogeninė transformacijos matrica $A_{i-1,i}$ tarp jungčių i-1 ir i yra gaunama sudauginus pasukimų ir perstūmimų matricas:

$$A_{i-1,i} = R_{Z,\theta i} \cdot T_{Z,di} \cdot T_{X,ai} \cdot R_{X,\alpha i} =$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & 0 \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i\cos\alpha_i & \sin\theta_i\sin\alpha_i & a_i\cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i\cos\alpha_i & -\cos\theta_i\sin\alpha_i & a_i\sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{2.6}$$

Kaip matyti, gautoje transformacijos matricoje $A_{i-1,i}$ yra keturi kintamieji parametrai: θ_i, d_i, a_i, α_i. Kiekvienoje kinematinėje poroje trys iš šių parametrų yra nekintantys (konstantos) ir tik vienas parametras yra kintamasis. Kai jungtyje būna sukamoji sąnara, tuomet transformacijos matricoje kintamasis yra pasisukimo kampas θ_i, o kai jungtyje būna slenkamoji jungtis – kintamasis yra poslinkis d_i.

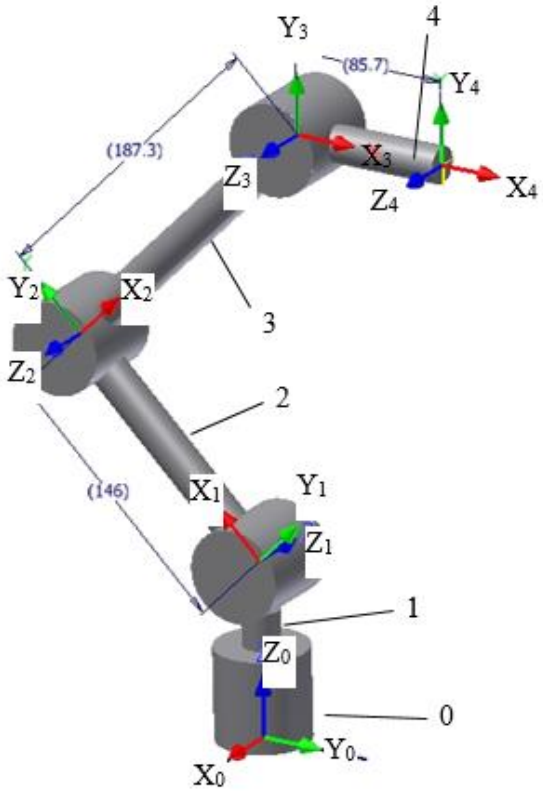
2.2 Tiriamojo manipuliatoriaus kinematinio modelio sudarymas

Tiriamasis manipuliatorius yra elektromechaninis, 4 laisvės laipsnių. Šio manipuliatoriaus gamintojas yra „Lynxmotion, a RobotShop Distribution Inc“, o modelis (2.2 pav.) – „AL5D Robotic Arm“.



2.2 pav. Tiriamasis elektromechaninis manipuliatorius (AL5D Robotic... 2014)

Šio manipuliatoriaus kinematinė schema yra pavaizduota 2.3 paveiksle. Manipuliatoriaus kinematinę sistemą sudaro penkios grandys ir keturios kinematinės poros. Priskirtos koordinačių sistemos yra sudarytos naudojant anksčiau aprašytas Denavito – Hartenbergo taisykles. Vadovaujantis sudarytomis koordinačių sistemomis yra nustatomi θ_i, d_i, a_i, α_i parametrai. Sudarytų parametrų reikšmės yra pateiktos 2.1 lentelėje.



2.3 pav. Tiriamojo manipuliatoriaus kinematinis modelis

2.1 lentelė. Manipuliatoriaus parametrų lentelė

Kinematinė pora	Kinematinės poros tipas	Grandies numeris	Parametrai			
			θ, mm	d, mm	a, mm	α, °
0, 1	Posūkio	1	θ_1	0	0	90
1, 2	Posūkio	2	θ_2	0	146	0
2, 3	Posūkio	3	θ_3	0	187,3	0
3, 4	Posūkio	4	θ_4	0	85,7	0

Pagal duomenų lentelę surašome transformavimo matricas kiekvienai jungčiai:

$$A_{0,1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & \sin\theta_1 & 0 \\ \sin\theta_1 & 0 & -\cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \tag{2.7}$$

$$A_{1,2} = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & 146\cdot\cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & 146\cdot\sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \tag{2.8}$$

$$A_{2,3} = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & 187,3\cdot\cos\theta_3 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & 187,3\cdot\sin\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \tag{2.9}$$

$$A_{3,4} = \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & -\sin\theta_4 & 0 & 85,7\cdot\cos\theta_4 \\ \sin\theta_4 & \cos\theta_4 & 0 & 85,7\cdot\sin\theta_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{2.10}$$

Gautos kiekviena iš transformavimo matricų aprašo, kaip susiejamos gretimų grandžių koordinačių sistemos. Sudauginę šias transformavimo matricas tarpusavyje, gausime bendrą transformavimo matricą, pagal kurią galima sužinoti kaip manipuliatoriaus galinis taškas (griebtuvo galas) yra susietas su pradine koordinačių sistema:

$$A = A_{0,1} \cdot A_{1,2} \cdot A_{2,3} \cdot A_{3,4} \tag{2.11}$$

Susistatę transformavimo matricas gauname (skaičiavimai atliekami MATLAB programiniu paketu):

$$A = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & \sin\theta_1 & 0 \\ \sin\theta_1 & 0 & -\cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & 146\cdot\cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & 146\cdot\sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} . \tag{2.12}$$

$$. \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & 187,3\cdot\cos\theta_3 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & 187,3\cdot\sin\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & -\sin\theta_4 & 0 & 85,7\cdot\cos\theta_4 \\ \sin\theta_4 & \cos\theta_4 & 0 & 85,7\cdot\sin\theta_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} -c\theta_4\cdot(c\theta_1\cdot s\theta_2\cdot s\theta_3 - c\theta_1\cdot c\theta_2\cdot c\theta_3) - s\theta_4\cdot(c\theta_1\cdot c\theta_2\cdot s\theta_3 + c\theta_1\cdot c\theta_3\cdot s\theta_2); \\ -c\theta_4\cdot(s\theta_1\cdot s\theta_2\cdot s\theta_3 - c\theta_2\cdot c\theta_3\cdot s\theta_1) - s\theta_4\cdot(c\theta_2\cdot s\theta_1\cdot s\theta_3 + c\theta_3\cdot s\theta_1\cdot s\theta_2); \\ c\theta_4\cdot(c\theta_2\cdot s\theta_3 + c\theta_3\cdot s\theta_2) + s\theta_4\cdot(c\theta_2\cdot c\theta_3 - s\theta_2\cdot s\theta_3); \\ 0; \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} s\theta_4\cdot(c\theta_1\cdot s\theta_2\cdot s\theta_3 - c\theta_1\cdot c\theta_2\cdot c\theta_3) - c\theta_4\cdot(c\theta_1\cdot c\theta_2\cdot s\theta_3 + c\theta_1\cdot c\theta_3\cdot s\theta_2); \\ s\theta_4\cdot(s\theta_1\cdot s\theta_2\cdot s\theta_3 - c\theta_2\cdot c\theta_3\cdot s\theta_1) - c\theta_4\cdot(c\theta_2\cdot s\theta_1\cdot s\theta_3 + c\theta_3\cdot s\theta_1\cdot s\theta_2); \\ c\theta_4\cdot(c\theta_2\cdot c\theta_3 + s\theta_2\cdot s\theta_3) - s\theta_4\cdot(c\theta_2\cdot s\theta_3 + c\theta_3\cdot s\theta_2); \\ 0; \\ s\theta_1; \\ -c\theta_1; \\ 0; \\ 0; \\ 146\cdot c\theta_1\cdot c\theta_2 - 85,7\cdot c\theta_4\cdot(c\theta_1\cdot s\theta_2\cdot s\theta_3 - c\theta_1\cdot c\theta_2\cdot c\theta_3) - 85,7\cdot s\theta_4\cdot(c\theta_1\cdot c\theta_2\cdot s\theta_3 + c\theta_1\cdot c\theta_3\cdot s\theta_2) - 187,3\cdot c\theta_1\cdot s\theta_2\cdot s\theta_3 + 187,3\cdot c\theta_1\cdot c\theta_2\cdot c\theta_3 \\ 146\cdot c\theta_2\cdot s\theta_1 - 85,7\cdot c\theta_4\cdot(s\theta_1\cdot s\theta_2\cdot s\theta_3 - c\theta_2\cdot c\theta_3\cdot s\theta_1) - 85,7\cdot s\theta_4\cdot(c\theta_2\cdot s\theta_1\cdot s\theta_3 + c\theta_3\cdot s\theta_1\cdot s\theta_2) - 187,3\cdot s\theta_1\cdot s\theta_2\cdot s\theta_3 + 187,3\cdot c\theta_2\cdot c\theta_3\cdot s\theta_1 \\ 146\cdot s\theta_2 + 187,3\cdot c\theta_2\cdot s\theta_3 + 187,3\cdot c\theta_3\cdot s\theta_2 + 85,7\cdot c\theta_4\cdot(c\theta_2\cdot s\theta_3 + c\theta_3\cdot s\theta_2) + 85,7\cdot s\theta_4\cdot(c\theta_2\cdot c\theta_3 - s\theta_2\cdot s\theta_3) \\ 1 \end{bmatrix}$$

čia: s = sin; c = cos.

Užrašome paskutiniajame stulpelyje esančius pirmuosius tris elementus:

$$x = 146 \cdot c\theta_1 \cdot c\theta_2 - 85,7 \cdot c\theta_4 \cdot (c\theta_1 \cdot s\theta_2 \cdot s\theta_3 - c\theta_1 \cdot c\theta_2 \cdot c\theta_3) - 85,7 \cdot s\theta_4 \cdot (c\theta_1 \cdot c\theta_2 \cdot s\theta_3 + c\theta_1 \cdot c\theta_3 \cdot s\theta_2) - \\ -187,3 \cdot c\theta_1 \cdot s\theta_2 \cdot s\theta_3 + 187,3 \cdot c\theta_1 \cdot c\theta_2 \cdot c\theta_3$$

$$y = 146 \cdot c\theta_2 \cdot s\theta_1 - 85,7 \cdot c\theta_4 \cdot (s\theta_1 \cdot s\theta_2 \cdot s\theta_3 - c\theta_2 \cdot c\theta_3 \cdot s\theta_1) - 85,7 \cdot s\theta_4 \cdot (c\theta_2 \cdot s\theta_1 \cdot s\theta_3 + c\theta_3 \cdot s\theta_1 \cdot s\theta_2) - \\ -187,3 \cdot s\theta_1 \cdot s\theta_2 \cdot s\theta_3 + 187,3 \cdot c\theta_2 \cdot c\theta_3 \cdot s\theta_1$$

$$z = 146 \cdot s\theta_2 + 187,3 \cdot c\theta_2 \cdot s\theta_3 + 187,3 \cdot c\theta_3 \cdot s\theta_2 + 85,7 \cdot c\theta_4 \cdot (c\theta_2 \cdot s\theta_3 + c\theta_3 \cdot s\theta_2) + 85,7 \cdot s\theta_4 \cdot (c\theta_2 \cdot c\theta_3 - s\theta_2 \cdot s\theta_3)$$

Šie transformavimo matricos paskutiniajame stulpelyje pirmieji trys elementai nusako manipuliatoriaus galinio taško koordinates bazinėje koordinačių sistemoje.

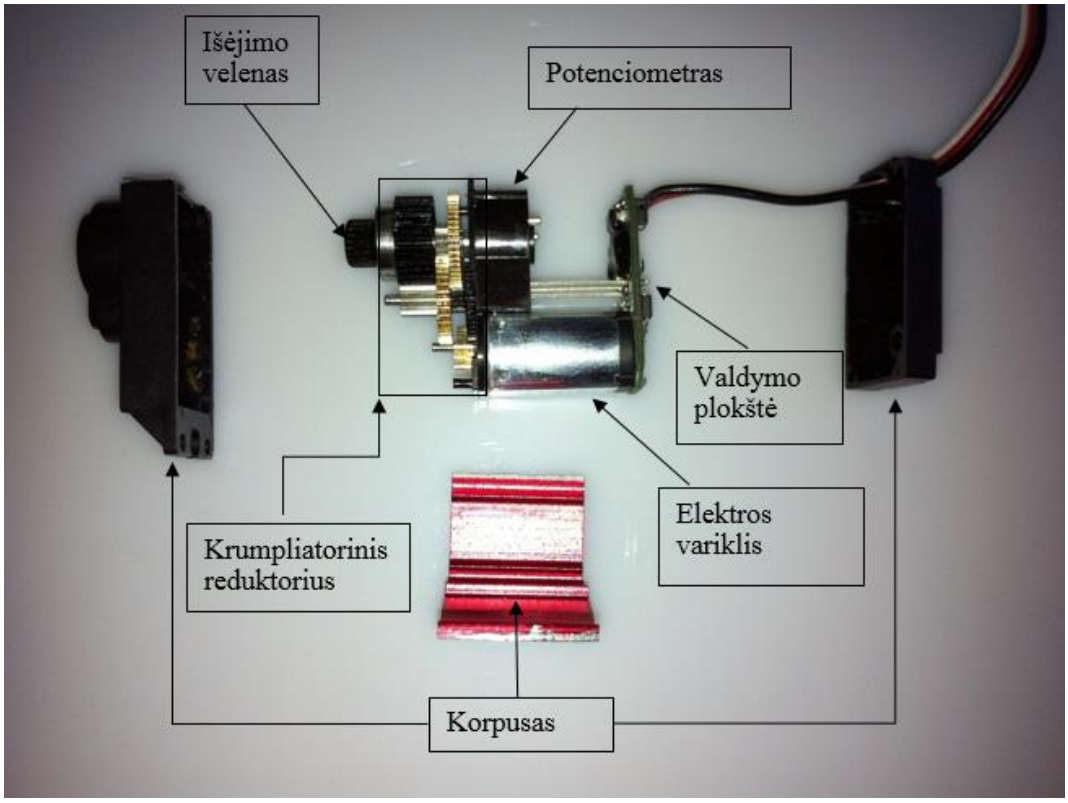
2.3 Servomechanizmo dinaminis modelis

Servomechanizmas tai prietaisas, elektros energiją paverčiantis į tiksliai valdomą mechaninį judesį. Šiuo atveju servomechanizmo sukuriamas judesys yra kontroliuojamas išėjimo veleno pasisukimo kampas. Servomechanizmai išvysto gana didelį sukimo momentą kartu su galimybe tiksliai reguliuoti pasisukimo kampą nedideliame korpuse ir už prieinamą kainą (Ross 2014). Norint sudaryti servomechanizmo dinaminį modelį pirmiausia reikia išnagrinėti jo sandarą.

2.3.1 Servomechanizmo sandara

Servomechanizme (2.4 pav.) elektros energiją į mechaninį judesį paverčia elektros variklis. Tačiau servomechanizmų dydis yra palyginti nedidelis, o sukuriamas sukimo momentas ant išėjimo veleno yra gana nemažas. Natūralu, kad mažame korpuse netilps didelės galios elektros variklis, taip pat elektros variklio veleno pasisukimo kampą tiksliai valdyti būtų praktiškai neįmanoma.

Siekiant iš mažo elektros variklio gauti pakankamą sukimo momentą yra panaudojama redukcinė pavara. Servomechanizme yra naudojamos daugiakrumplės redukcinės pavaros, kurias gali sudaryti net 6 krumplių poros. Priklausomai nuo servomechanizmo reduktoriaus perdavimo skaičius svyruoja nuo 1:100 iki 1:500.



2.4 pav. Servomechanizmo sandara

Kaip buvo minėta, servomechanizmo išėjimo veleno kampas yra tiksliai kontroliuojamas, o tai reiškia, kad šis kampas turi būti nuolatos matuojamas. Tai yra atliekama elektroniniu elementu – potenciometru. Potenciometras – tai prietaisas, keičiantis varžą tarp savo kontaktų priklausomai nuo reguliuojamo veleno pasukimo kampo. Todėl reduktoriaus išėjimo velenas būna tiesiogiai sujungtas su potenciometro velenu ir taip priklausomai nuo veleno pasisukimo pasikeičia potenciometro varža.

Servomechanizmo elektros varikliui valdyti bei potenciometro rodmenims apdoroti yra naudojama valdymo plokštė. Valdymo plokštė apdoroja gaunamą signalą iš valdančiojo įrenginio, lygina jį su potenciometro rodmenimis ir pagal tai valdo elektros variklio sukimąsi.

Valdymo signalas servomechanizmuose yra impulso pločio moduliacija (angl. *Pulse Width Modulation* – PWM). Ši moduliacija vyksta 50 Hz dažniu, o impulso pločiai, priklausomai nuo nustatyto kampo, svyruoja nuo 1 iki 2 ms. laiko tarpo. Standartiškai neutrali servomechanizmo padėtis atitinka 1,5 ms impulso laiką (Ross 2014).

Servomechanizmo valdymo plokštės skirstomos į dvi grupes: analogines ir skaitmenines. Analoginės valdymo plokštės yra sudarytos iš pirminių elektronikos elementų – rezistorių,

kondensatorių, tranzistorių, stiprintuvų ir gaunamą signalą verčia į analoginį. Skaitmeninių servomechanizmų valdiklio pagrindinis elementas yra mikroprocesorius, kuris apdoroja visą gaunamą informaciją ir valdo variklį. Servomechanizmai su skaitmeniniu valdikliu turi pranašumą, kadangi duomenų apdorojimą bei variklio valdymą gali atlikti greičiau ir tiksliau nei analoginiai valdikliai, tačiau servomechanizmai su analoginiais valdikliais šiuo metu yra pigesni ir plačiau paplitę.

2.3.2 Elektros variklio charakteristikos

Servomechanizmuose yra naudojami nuolatinės įtampos fiksuotų magnetų šepetėliniai elektros varikliai. Bendrai tokio elektros variklio galios lygtis yra užrašoma (Braun 2012):

$$P_{el} = P_{mech} + P_J \tag{2.13}$$

čia: P_{el} – elektrinė galia; P_{mech} – sukuriama mechaninė galia; P_j – galios nuostoliai.

Elektrinė galia gali būti užrašoma kaip srovės (I) ir įtampos (U) sandauga:

$$P_{el} = U \cdot I \tag{2.14}$$

Taip pat galios nuostoliai elektros variklio apvijose atsiranda dėl apvijų varžos, šiuos nuostolius galima įvertinti:

$$P_j = R \cdot I^2 \tag{2.15}$$

čia R – apvijų varža.

Sukuriama mechaninė galia ant variklio veleno:

$$P_{mech} = \frac{\pi}{30} \cdot M \cdot n \tag{2.16}$$

čia: M – sukuriamas sukimo momentas ant veleno, n – variklio sukimosi dažnis.

Surašius viską į pirminę galios lygtį gaunama:

$$U \cdot I = \frac{\pi}{30} \cdot n \cdot M + R \cdot I^2 \quad (2.17)$$

Elektros variklio apsisukimų dažnį galima susieti su varikliui tiekiama įtampa per variklio greičio konstantą k_n:

$$n = k_n \cdot U \quad (2.18)$$

Analogiškai variklio sukuriamo sukimo momento ant veleno dydį su variklio srove I sieja variklio momento konstanta k_M:

$$M = k_M \cdot I \quad (2.19)$$

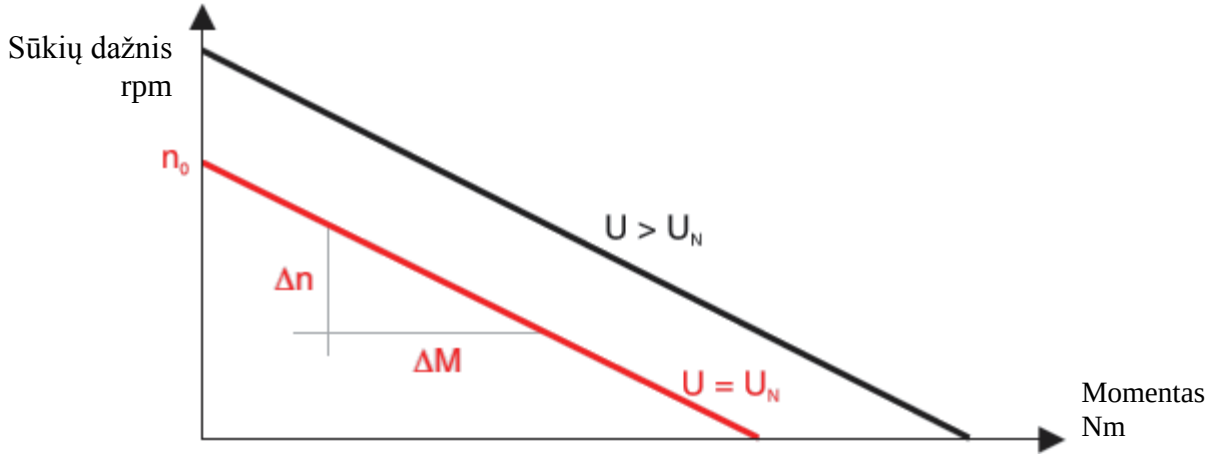
Šios dvi konstantos tarpusavyje yra glaudžiai susietos santykiu:

$$k_n \cdot k_M = \frac{30000}{\pi} \quad (2.20)$$

Iš čia gaunama, kad variklio sūkių dažnį galima apskaičiuoti taip (Brushed DC Motor Theory 2011):

$$n = k_n(U - \frac{R}{k_M} \cdot M) \quad (2.21)$$

Iš šios lygties galima gauti variklio sūkių dažnio priklausomybę nuo variklio sukimo momento:



2.5 pav. Elektros variklio sūkių dažnio priklausomybė nuo momento (Braun 2012)

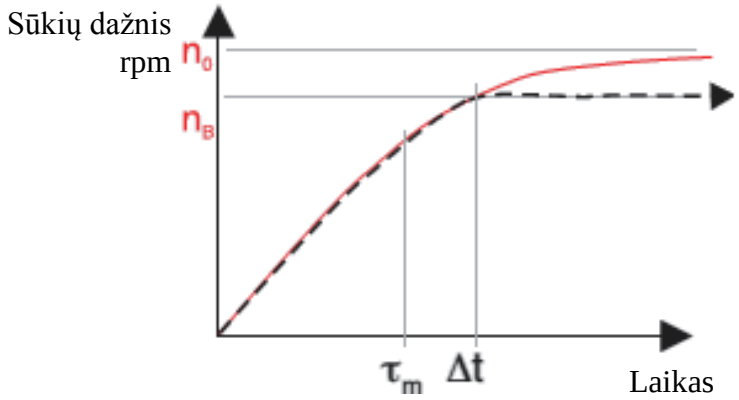
Iš 2.5 paveikslo matyti, kad variklio sūkių dažnį su momentu sieja atvirkštinė tiesinė priklausomybė, variklio maksimalus sūkių dažnis gali būti pasiektas, kai sukimosi momentas artėja link 0 ir atvirkščiai, maksimalus sukimosi momentas pasiekiamas tuomet, kada sūkiai yra lygūs 0, tai reiškia variklio velenas yra sustabdomas (Movellan 2010).

Taip pat svarbus variklio rodiklis yra apsisukimų dažnio kitimo greitis paleidžiant variklį. Ši charakteristika priklauso nuo variklio sukuriamo momento ir ant variklio esančios inercijos santykio. Variklio apsisukimų dažnio pagreitis yra užrašomas (Braun, 2012):

$$\alpha = M/J \qquad (2.22)$$

čia: α – veleno apsisukimų pagreitis, J – inercijos momentas ant veleno.

Suintegravę šią priklausomybę pagal laiką, kai variklis yra paleidžiamas iš ramybės būsenos iki maksimalių apsisukimų, gautume tokį grafiką (2.6 pav.):



2.6 pav. Elektros variklio paleidimo charakteristika (Braun 2012)

Kaip matoma didžiausias elektros variklio sukimosi dažnio pagreitis pasiekiamas pačioje sukimosi pradžioje, o vėliau palaipsniui mažėja, kol pasiekiamas maksimalus sukimosi dažnis.

2.3.3 Valdiklio veikimo principas

Labai svarbų vaidmenį veikiant servomechanizmui atlieka valdiklis. Valdiklis priima gaunamą nustatytą signalą priklausantį nuo norimo kampo, lygina su potenciometro reikšme, kuri priklauso nuo esamo išėjimo veleno kampo ir pagal tai atitinkamai tiekia įtampą į variklio kontaktus taip aktyvuodama jį.

Servomechanizmo valdiklio veikimo principas pavaizduotas 2.7 pav. Šioje schemoje pavaizduotas principas tinka tiek analoginiams valdikliams, tiek ir skaitmeniniams valdikliams.

Valdiklio loginis atitikmuo gali būti užrašomas taip:

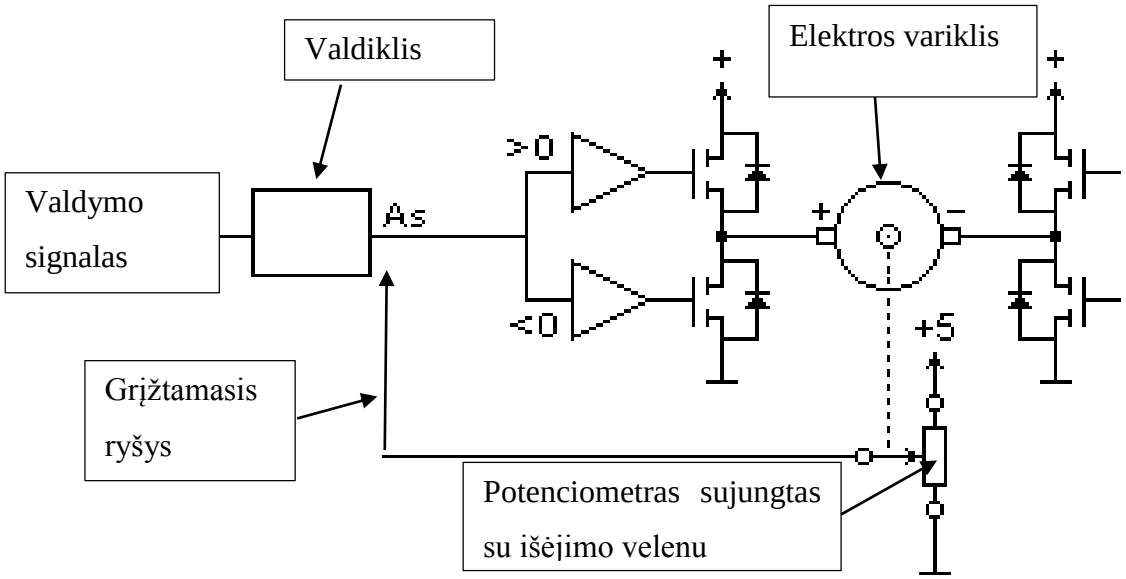
jei Esamas kampas > Nustatytas kampas, tuomet pasukti variklį kairėn;

jei Esamas kampas < Nustatytas kampas, tuomet pasukti variklį dešinėn;

jei Esamas kampas = Nustatytas kampas, tuomet variklio nesukti.

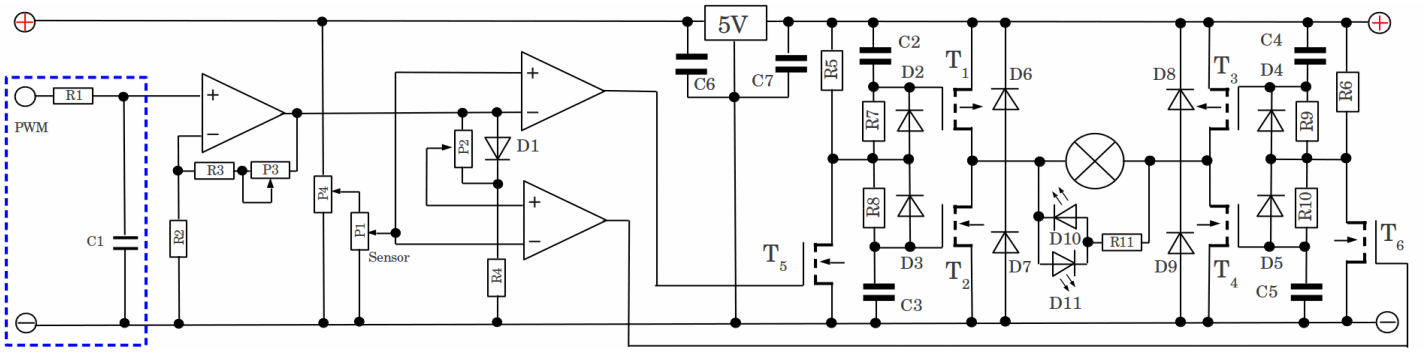
Žinoma, esamas kampas ir nustatytas kampas tik teoriškai gali būti visiškai lygūs, tad realybėje 3 sąlyga būtų užrašoma taip:

Jei Esamas kampas - Nustatytas kampas < leistina klaida, tuomet variklio nesukti.



2.7 pav. Servomechanizmo valdiklio principinė schema

Analoginio servomechanizmo galima elektrinė schema pateikta 2.8 pav. (Motor control 2013).

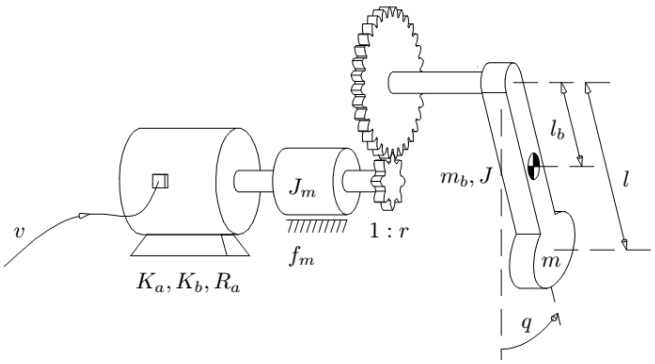


2.8 pav. Servomechanizmo analoginio valdiklio elektrinė schema (Motor control 2013)

Analoginis valdiklis gaunamą impulso pločio moduliacinį signalą filtre paverčia į analoginį nuolatinės įtampos signalą, o stiprintuvas suvienodina jo diapazoną su potenciometro. Grįžtamuoju ryšiu iš potenciometro valdiklis gauna taip pat jau analoginį nuolatinės įtampos signalą. Toliau komparatoriais yra nustatoma, ar gaunamas nustatytas signalas atitinka esamą veleno kampą ir atitinkamai išvedamas signalas, pagal kurį elektros variklis gali būti išjungtas arba sukamas atitinkama linkme. Kadangi loginiu signalu variklio pasukti negalima, tai jis perduodamas į „H“ tiltelį, kurio paskirtis – tiekti į variklio kontaktus reikiamos krypties elektros energiją.

2.3.4 Dinaminio modelio sudarymas

Servomechanizmo dinaminio modelio su viena grandimi principinė schema pateikta 2.9 pav.



2.9 pav. Servomechanizmo dinaminio modelio principinė schema: v – varikliui tiekiama įtampa; K_a, K_b, R_a – variklio parametrų koeficientai; J_m – rotoriaus inercijos jėga; f_m – trinties jėga; r – reduktoriaus perdavimo skaičius; m_b – grandies masė; l_b – atstumas iki masės centro; l – grandies ilgis.

Iš 2.3.2 temos sūkių dažnio lygties išsireiškiame sukimo momentą ant variklio veleno:

$$M = \frac{k_M}{R} \cdot \frac{k_n \cdot U - n}{k_n} \tag{2.23}$$

Pasižymime santykį $\frac{k_M}{R} = k_{MR}$ ir diferencijuojame lygtį pagal laiką t gauname:

$$\dot{M} = k_{MR} \cdot \left(\dot{U} - \frac{\dot{n}}{k_n}\right) \tag{2.24}$$

Šiuo atveju $\dot{n}$ yra kampinis pagreitis, tad jis gali būti randamas:

$$\dot{n} = \frac{M - M_p - M_{tr}}{J} \tag{2.25}$$

čia M_p – pasipriešinimo momentas; M_{tr} – trinties momentas.

Įtampos kitimo greitį $\dot{U}$ žinodami esamu laiku t_i ir laiku t_{i+1} galime apskaičiuoti:

$$\dot{U} = \frac{U_{t+\Delta t} - U_t}{\Delta t} \tag{2.26}$$

Kadangi įtampą varikliui *U* valdo servomechanizmo valdiklis, ją nusako tokia sąlyga:

$$U = \begin{cases} U, & jei\ \Delta U_{esama} > \frac{\Delta U_{leistina}}{2} \\ 0, & jei\ \Delta U_{esama} < \frac{\Delta U_{leistina}}{2}\ ir\ \Delta U_{esama} > \frac{-\Delta U_{leistina}}{2} \\ -U, & jei\ \Delta U_{esama} < \frac{-\Delta U_{leistina}}{2} \end{cases} \tag{2.27}$$

čia: $\Delta U_{leistina}$ – leistina veleno kampo paklaida prilyginta valdiklio įtampai $\Delta U_{esama} = U_{signalo} - U_{potenciometro}$; $U_{signalo}$ – valdikliui nurodomo kampo įtampa; $U_{potenciometro}$ – potenciometro įtampa priklausanti nuo esamo veleno kampo.

2.4 Manipuliatoriaus dinaminio modelio sudarymas

Manipuliatoriaus dinaminis modelis sudaromas Lagranžo - Oilerio lygčių metodu. Sudarant modelį šiuo metodu reikia žinoti sistemos kinetinę ir potencinę energijas, o tai reiškia ir manipuliatoriaus grandžių greičius.

Bendruoju atveju ši lygtis užrašoma taip:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i, i = 1,2, \dots n \tag{2.28}$$

čia: L – Lagranžo funkcija; q_i – apibendrintosios manipuliatoriaus koordinatės; $\dot{q}_i$ – apibendrintųjų koordinačių laiko išvestinė; Q_i – apibendrintieji momentai.

Lagranžo funkcija yra aprašoma sistemos kinetinės ir potencinės energijų skirtumu.

2.4.1 Manipuliatoriaus parametrų aprašymas

Kiekvienam manipuliatoriaus svarbiausiųjų taškų koordinatės aprašomos vektoriumi R_i. Bendrąja forma šio vektoriaus išraiška atrodo taip:

$$\{R_i\} = \begin{Bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{Bmatrix}. \tag{2.29}$$

Pirmasis manipuliatoriaus grandies taškas yra jo pagrindo taškas. Šio taško koordinatės globalinėje koordinačių sistemoje aprašomas vektoriumi R_{O1}. Toliau nuo pirmojo manipuliatoriaus grandies taško iki antrojo grandies taško žymime vektoriumi R_{O1O2}. Kiekvienam manipuliatoriaus sąnaros taškui įsivedame lokalinę koordinačių sistemą, kur pirmoje grandyje sukimosi judesys vyksta apie Z_1 ašį, o X_1 ir Y_1 ašys sutampa su globaliosiomis X ir Y ašimis.

Toliau, antrai, trečiai ir ketvirtai grandims priskiriame lokalias koordinačių sistemas, kurių sukamasis judesys vyksta apie X_2, X_3, X_4 ašis, o Z_2, Z_3 ir Z_4 ašys sutampa su manipuliatoriaus grandies išilgine ašimi. Įsivesdami tokias lokalines koordinates, galime aprašyti, kad vektoriai nuo vienos sąnaros iki kitos aprašomi z_i koordinatei esant lygiai atstumui tarp sąnarų. Tokiu atveju minėtasis R_{O1O2} vektorius įgauna tokią formą:

$$\{R_{O1O2}\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ z_{o1o2} \end{Bmatrix}; \tag{2.30}$$

čia: z_{o1o2} – atstumas nuo pirmosios sąnaros iki antrosios Z_1 ašimi(kitaip tariant pirmosios grandies ilgis)

Analogiškai aprašomi vektoriai R_{O2O3} ir R_{O3O4}.

Taip pat, vieni iš svarbiausių manipuliatoriaus grandžių taškų yra kiekvienos grandies masės centro taškas. Kiekvienos grandies masės centro taškas aprašomas vektoriais R_{O1C1}, R_{O2C2}, R_{O3C3} *ir* R_{O4C4}. Šių vektorių formos aprašomos analogiškai kaip ir vektorių tarp sąnarų atveju, tik dabar Z_i ašimi užrašomas atstumas nuo grandies pirmosios sąnaros iki grandies masės centro. Kitaip galima sakyti, kad priimama, jog i – tosios grandies masės centras yra nutolęs tam tikru atstumu per Z_i ašį ir yra tiesiai ant šios ašies. Vektorius R_{O1C1} atrodys taip:

$$\{R_{O1C1}\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ z_{o1c1} \end{Bmatrix}; \tag{2.31}$$

čia: z_{o1c2} – atstumas nuo pirmosios sąnaros iki pirmosios grandies masės centro Z_1 ašimi.

Analogiškai aprašomi vektoriai R_{O2C2}, R_{O3C3} ir R_{O4C4}.

Norint susieti minėtąsias koordinačių sistemas įvestas kiekvienai iš manipuliatoriaus grandžių yra užrašomos homogeninės transformavimo matricos A_i.:

$$[A_1] = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_1) & -\sin(\varphi_1) & 0 \\ \sin(\varphi_1) & \cos(\varphi_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \tag{2.32}$$

$$[A_2] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\varphi_2) & -\sin(\varphi_2) \\ 0 & \sin(\varphi_2) & \cos(\varphi_2) \end{bmatrix}; \tag{2.33}$$

$$[A_3] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\varphi_3) & -\sin(\varphi_3) \\ 0 & \sin(\varphi_3) & \cos(\varphi_3) \end{bmatrix}; \tag{2.34}$$

$$[A_4] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\varphi_4) & -\sin(\varphi_4) \\ 0 & \sin(\varphi_4) & \cos(\varphi_4) \end{bmatrix}. \quad (2.35)$$

čia: φ_1, φ_2, φ_3, φ_4 – atitinkamų manipuliatoriaus grandžių pasisukimo kampai.

Turint transformavimo matricas ir svarbiausius grandžių vektorius, kurie nusako jų poziciją lokalinės koordinačių sistemos atžvilgiu, galime gauti:

$$\{R_{C1}\} = \{R_{O1}\} + [A_1]\{R_{O1C1}\}; \quad (2.36)$$

$$\{R_{C2}\} = \{R_{O1}\} + [A_1](\{R_{O1O2}\} + [A_2]\{R_{O2C2}\}); \quad (2.37)$$

$$\{R_{C3}\} = \{R_{O1}\} + [A_1]\big(\{R_{O1O2}\} + [A_2](\{R_{O2O3}\} + [A_3]\{R_{O3C3}\})\big); \quad (2.38)$$

$$\{R_{C4}\} = \{R_{O1}\} + [A_1]\Big(\{R_{O1O2}\} + [A_2]\big(\{R_{O2O3}\} + [A_3](\{R_{O3O4}\} + [A_4]\{R_{O4C4}\})\big)\Big). \quad (2.39)$$

Šie vektoriai nusako kiekvienos grandies masių centro koordinates globaliosios koordinačių sistemos atžvilgiu.

2.4.2 Sunkio jėgos sukuriamas momentas

Manipuliatoriaus potencinė energija priklauso nuo jo svorio. Kiekvienos grandies masė sudaro sunkio jėgą, o šios jėgos veikimo vieta yra ties manipuliatoriaus kiekvienos grandies masių centru. Kadangi masės centras yra nutolęs nuo grandies pirmosios sąnaros per atstumą R_{OiCi}, todėl grandies sąnaroje yra sukuriamas sukimo momentas kuris nori palenkti sąnarą žemyn. Kiekvienos grandies sunkio jėgos yra surašomos vektorine forma:

$$\{F_1\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -9{,}81 \cdot m_1 \end{Bmatrix}; \quad (2.40)$$

$$\{F_2\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -9{,}81 \cdot m_2 \end{Bmatrix}; \quad (2.41)$$

$$\{F_3\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -9{,}81 \cdot m_3 \end{Bmatrix}; \quad (2.42)$$

$$\{F_4\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -9{,}81 \cdot m_4 \end{Bmatrix}; \quad (2.43)$$

čia: $m_1,\ m_2,\ m_3,\ m_4$ – atitinkamų grandžių masės.

Tuomet sukimo momentai Mp_i sukuriami manipuliatoriaus sąnarose nuo sunkio jėgos bus lygūs:

$$\{Mp_1\} = \left[A_1\right]^T\left(\widetilde{[R_{C1}]}\{F_1\} + \widetilde{[R_{C2}]} \cdot \{F_2\} + \widetilde{[R_{C3}]} \cdot \{F_3\} + \widetilde{[R_{C4}]} \cdot \{F_4\}\right); \quad (2.44)$$

$$\{Mp_2\} = \left[A_1\right]^T\left[A_2\right]^T\left([R_{C2}\widetilde{-R_{O2}}]\{F_2\} + [R_{C3}\widetilde{-R_{O2}}]\{F_3\} + [R_{C4}\widetilde{-R_{O2}}]\{F_4\}\right. \quad (2.45)$$

$$\{Mp_3\} = \left[A_1\right]^T\left[A_2\right]^T\left[A_3\right]^T\left([R_{C3}\widetilde{-R_{O3}}]\{F_3\} + [R_{C4}\widetilde{-R_{O3}}]\{F_4\}\right); \quad (2.46)$$

$$\{Mp_4\} = \left[A_1\right]^T\left[A_2\right]^T\left[A_3\right]^T\left[A_4\right]^T([R_{C4}\widetilde{-R_{O4}}]\{F_4\}); \quad (2.47)$$

čia: R_{O2}, R_{O3}, R_{O4} – vektoriai nusakantys kiekvienos grandies pirmąją sąnarą globalioje koordinačių sistemoje.

2.4.3 Dinaminių lygčių užrašymas

Diferencijuodami gautųjų vektorių, nusakančių grandžių masės centrus reikšmes pagal laiką gauname šių vektorių greičių išraiškas:

$$\frac{dRCi}{dt} = V_{ci} \quad (2.44)$$

Išdiferencijavę vektorius gauname:

$$\{V_{C1}\} = \{V_{O1}\} + \dot{\varphi}_1[A_1]\{R_{O1C1}\} \tag{2.45}$$

$$\{V_{C2}\} = \{V_{O1}\} + \dot{\varphi}_1[A_1](\{R_{O1O2}\} + [A_2]\{R_{O2C2}\}) + [A_1](\dot{\varphi}_2[A_1]\{R_{O2C2}\}) \tag{2.46}$$

$$\begin{aligned}\{V_{C3}\} = \{V_{O1}\} + \dot{\varphi}_1[A_1](\{R_{O1O2}\} + [A_2]\{R_{O2C2}\}) \\ + [A_1](\dot{\varphi}_2[A_2](\{R_{O2O3}\} + [A_3]\{R_{O3C3}\}) + [A_2]) \cdot (\dot{\varphi}_3[A_3]\{R_{O3C3}\})\end{aligned} \tag{2.47}$$

$$\begin{aligned}\{V_{C4}\} = \{V_{O1}\} + \dot{\varphi}_1[A_1](\{R_{O1O2}\} + [A_2]\{R_{O2C2}\}) + [A_1](\dot{\varphi}_2[A_2](\{R_{O2O3}\} + [A_3]\{R_{O3C3}\}) \\ + [A_2]) \cdot (\dot{\varphi}_3[A_3](\{R_{O3O4}\} + [A_4]\{R_{O4C4}\}) + \dot{\varphi}_4[A_4]\{R_{O4C4}\})\end{aligned} \tag{2.48}$$

Kinetinė i – tosios manipuliatoriaus grandies energija yra užrašoma šia lygtimi:

$$EK_i = \frac{1}{2} \cdot m_i \cdot \vec{v_i}^2 + \frac{1}{2} \cdot I_i \cdot \dot{q}_i^2 \tag{2.49}$$

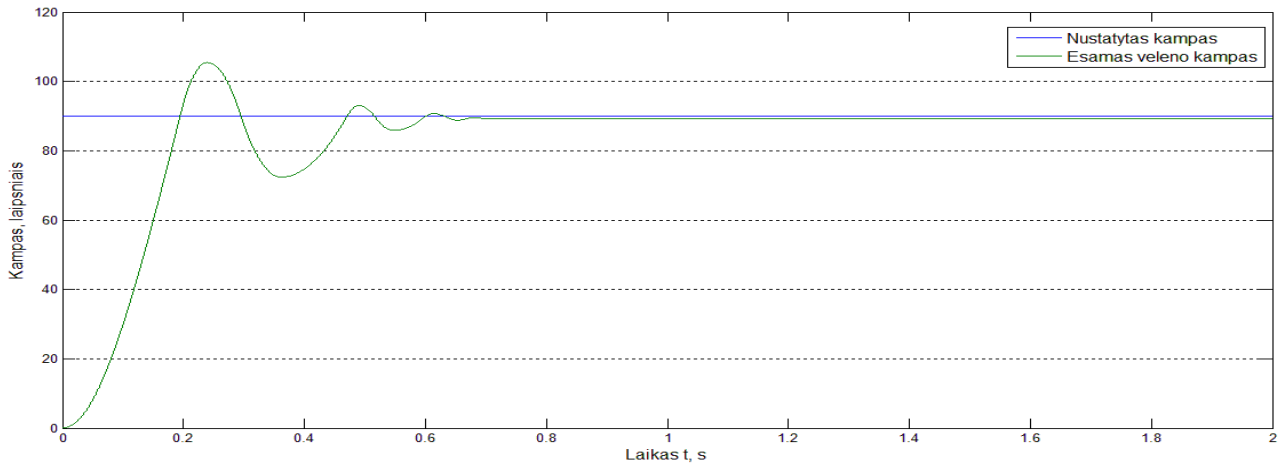
čia: m_i – grandies masė; I_i – grandies inercijos momentas.

Gautosios kinetinės energijos diferencijuojamos ir sustatomos į Lagranžo lygtį. Gautieji momentai tiesiogiai paveikia manipuliatoriaus servomechanizmų velenus. Šios jėgos įtraukiamos kaip pasipriešinimas servomechanizmų dinaminiame modelyje.

Visi matematiniai veiksmai ir lygčių sudarymai buvo atliekami „Maple“ programiniame pakete. Modeliavimas su konkrečiomis reikšmėmis buvo atliekamas „Fortran“ programavimo kalba ir gautieji duomenys įrašomi į duomenų failą.

2.4.4 Modeliavimo rezultatai

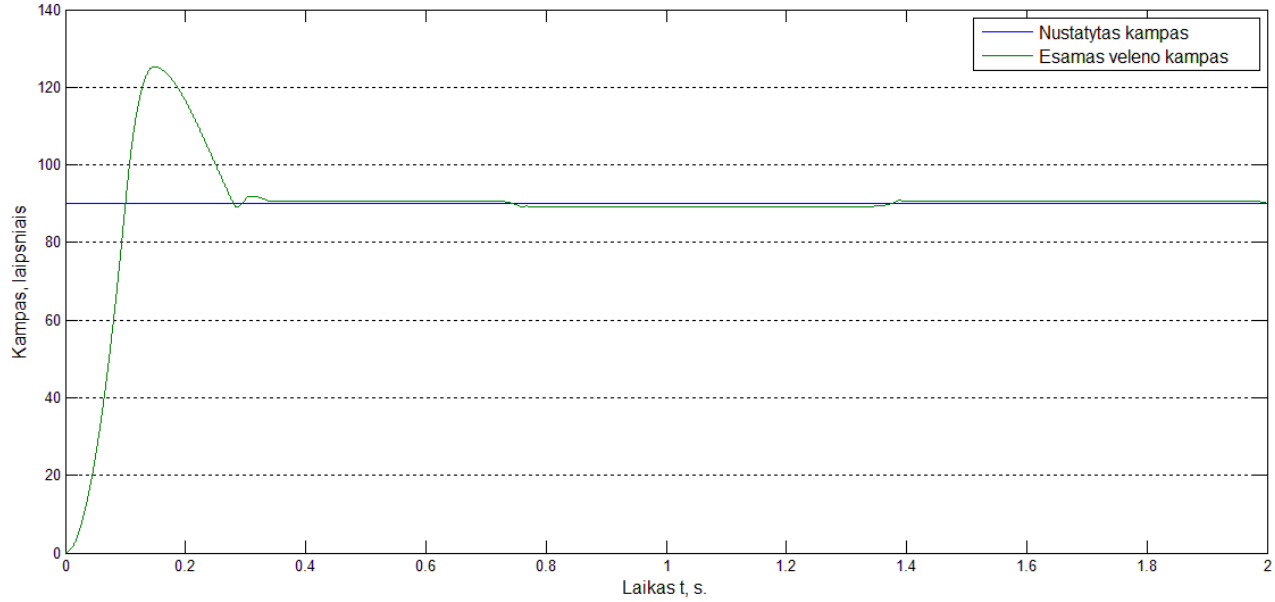
Sudaryto dinaminio modelio pagalba buvo modeliuojama paskutiniosios grandies – griebtuvo dinaminiai procesai keičiant šios grandies kampą. Pirmoji moduliacija atlikta ketvirtąją grandį pasukant 90 laipsnių kampu ir užfiksuojant tokioje pozicijoje. Rezultatai pateikti 2.10 pav.



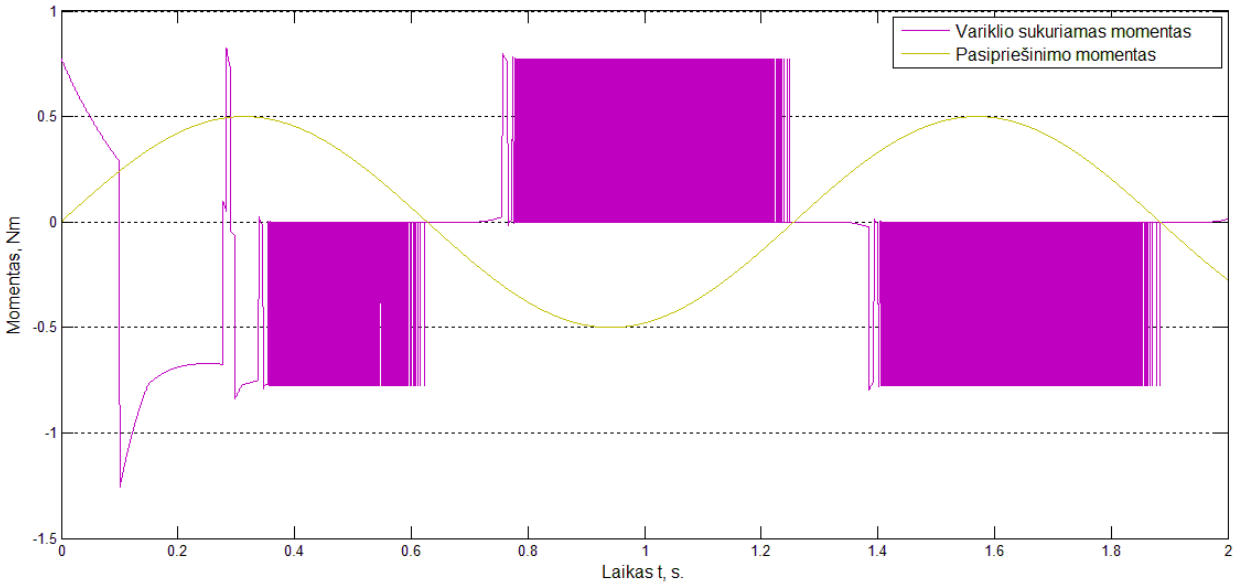
2.10 pav. Veleno kampo kitimas laike pirmu atveju

Antruoju atveju atliekame modeliavimą kai pagal sinusoidę keičiasi apkrova ant manipuliatoriaus griebtuvo galo. Kampo pokytis per laiką šiuo atveju pateiktas 2.11 pav., o momentų keitimosi grafikas 2.12 pav.

Momentų grafike matome, kaip variklio velenas išlaikomas užduotoje padėtyje labai trumpais impulsais įjungiant variklį, kad jis tuo laiko momentu sukurtų sukimo momentą priešingą pasipriešinimo jėgai.

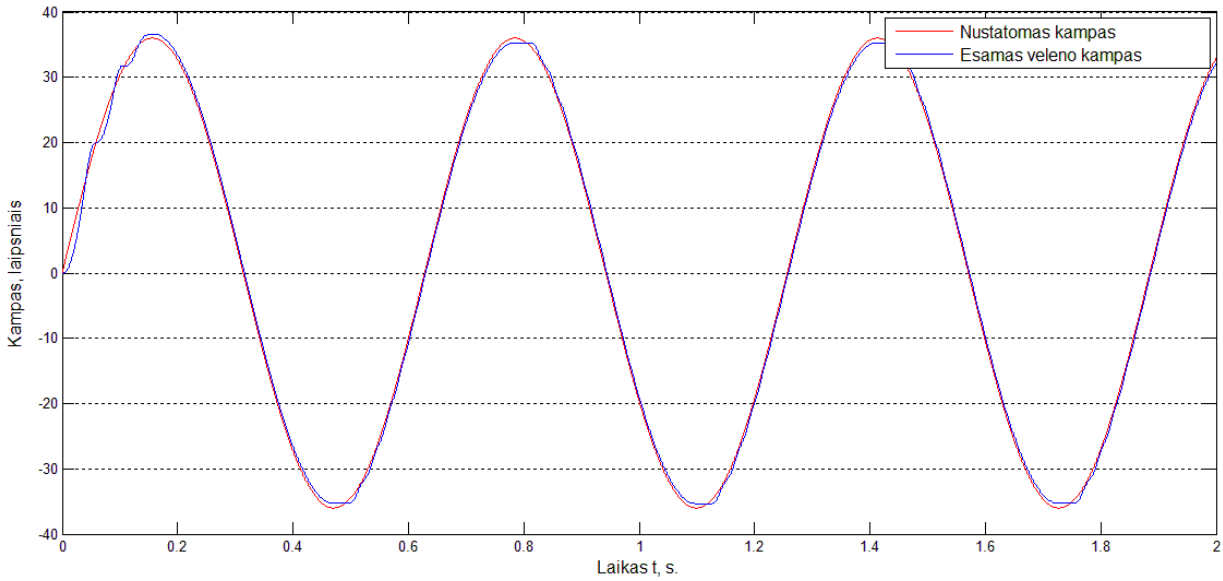


2.11 pav. Veleno kampo kitimas laike antru atveju



2.12 pav. Momentų kitimas laike antru atveju

Trečiuoju atveju modeliuojama situacija, kai pagal sinusoidę yra keičiamas nustatomas kampas ir stebima kaip nustatytą kampą sugeba išlaikyti servomechanizmo velenas (2.13 pav.).



2.13 pav. Kampo kitimas laike kai keičiamas nurodomas kampas

Šis modeliavimas buvo atliekamas nevertinant žemesniųjų grandžių įtakos griebtuvui. Visi duomenys apdoroti ir pateikti grafiškai naudojantis „Matlab“ programa.

2.5 Dinaminis modeliavimas „SIM-20“ programa

Dinaminis manipuliatoriaus modelis taip pat pasirenkamas sudaryti gamintojo Controllab Products B.V. programine įranga „SIM-20 4.4“. Ši programa skirta mechatroninių sistemų sudarymui bei jų simuliavimui. Programa rezultatus gali pateikti grafikų pavidalu bei atliktą simuliaciją atvaizduoti vizualiai kūnų judėjimu trimatėje erdvėje.

Kaip ir ankstesniuose skyriuose aptartame modelio sudaryme, taip ir sudarant modelį „SIM-20“ programinėje įrangoje yra sudaromi atskiri modeliai kurie yra apjungiami į vieną bendrą. Pirmiausia yra sukuriamas kiekvieno servomechanizmo apjungtas elektrinės ir mechaninės dalies modeliai, tuomet sudaromas kinematinis viso manipuliatoriaus modelis su geometriniais parametrais ir galiausiai į kinematinį modelį yra įtraukiami grandžių dinaminiai parametrai (masės, inercijos momentai) bei sudaryti servomechanizmo elektromechaniniai modeliai.

2.5.1 Servomechanizmo modelis

Servomechanizmo modelis sudaromas vadovaujantis 2.3 skyriuje aptartais principais. Servomechanizmas susideda iš trijų pagrindinių grupių:

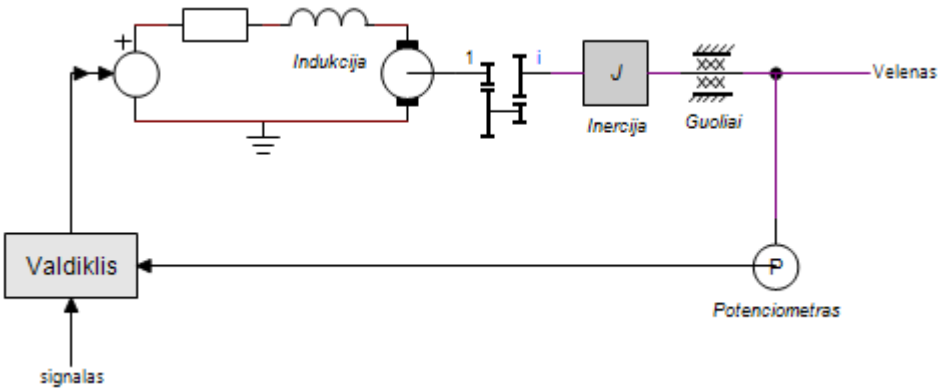
- Elektrinė;
- Elektromechaninė;
- Mechaninė.

Elektrinei daliai priklauso loginis valdiklis, kuris pagal gaunamą signalą bei esamą veleno kampą valdo variklio sukimosi kryptį, elektros stiprintuvas, kuris maitina variklį ir kiti elektros komponentai.

Elektromechaninei grupei priklauso pats elektros variklis, kurio parametrai susideda iš apvijų varžos, indukcijos ir variklio konstantos. Taip pat šiai grupei priklauso potenciometras, kurio velenas būna tiesiogiai sujungtas su servomechanizmo išėjimo velenu. Potenciometro paskirtis suteikti grįžtamąjį ryšį valdikliui apie esamą išėjimo veleno kampą.

Mechaninė dalis susideda iš reduktoriaus ,kuris sudarytas iš daugiakrumplės pavaros, guolių bei velenų.

Apjungiant visus kiekvienos grupės elementus į bendrą modelį yra sudaromi ryšiai tarp kiekvieno elemento. Sudaryto servomechanizmo modelio principinė schema programoje „SIM-20“ pateikiama 2.14 paveikslėlyje.



2.14 pav. Servomechanizmo modelio principinė schema

Kadangi manipuliatorius yra sudarytas iš 4 servomechanizmų (neskaitant griebtuvo suėmimo – paleidimo servomechanizmo), tai sudaromi keturi tokie modeliai, kurių kiekvienas turi skirtingus parametrus atsižvelgiant į servomechanizmo charakteristikas. Kiekvienas servomechanizmo modelis yra apibendrinamas į bloką, kuris turi vieną įvestį – signalą, kuris reiškia norimą pasiekti servomechanizmo veleno kampo reikšmę ir vieną išvestį – apibendrintą sukamąjį judesį.

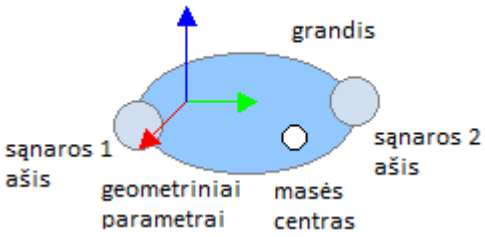
2.5.2 Kinematinio modelio sudarymas

Kinematinis modelis „SIM-20“ programoje sudaromas sukuriant grandis kaip geometrinius kūnus, kurie turi x, y ir z ašių parametrus. Tarpusavyje kūnai sujungiami sąnaromis, per kurias kūnai tarpusavyje turi tam tikrą judesio galimybę. Sąnarų tipai yra apžvelgti 1.2 skyriuje. Be sąnaros tipo taip pat yra parenkamas ar sąnara yra nekontroliuojama ar kontroliuojama, tai yra ar toje sąnaroje veikia išorinis sukuriamas sukimo momentas. Kadangi visos nagrinėjamo manipuliatoriaus sąnaros yra sukamos servomechanizmų, modelyje yra taip pat pasirenkama kontroliuojamos sąnaros sukuriančios sukamąjį judesį.

2.5.3 Dinaminio modelio sudarymas

Dinaminis manipuliatoriaus modelis sudaromas į jau sukurtas grandis įvedant masės parametrus bei inercijos momentų parametrus. Šie parametrai kiekvienai iš grandžių yra įvedami atskirai, o inercijos parametrai yra dar išskirstyti papildomai į parametrus x, y ir z ašims atskirai. Ketvirtosios grandies – griebtuvo masė yra įvedama kartu su tyrimuose naudojamo jutiklio mase (175 gramai), ir tai galima prilyginti griebtuvui su tokios masės objektu modeliavimui.

Kiekvienos iš grandžių parametrus atvaizduoti galima schema pateikta 2.15 paveiksle. Taip pat modelyje priimama, kad grandys yra idealiai kietas kūnas ir nesideformuoja.



2.15 pav. Grandį apibūdinantys parametrai (Controllab Products 2014)

Modelio užbaigimui reikia sujungti manipuliatoriaus sąnaras su servomechanizmų modeliais abipusiu ryšiu, tai yra kad tiek elektros variklio sukuriamas momentas paveiktų manipuliatoriaus sąnaras, tiek ir grandys veikiančias sąnaras dėl sunkio bei inercijos jėgų veiktų ir servomechanizmo veleną.

2.5.4 Modeliavimo rezultatai

Sukurtas dinaminis manipuliatoriaus modelis yra naudojamas įvairių situacijų simuliavimui. Situacijos pasirenkamos kuo panašesnės į atliekamus realaus manipuliatoriaus tyrimus tam, kad būtų galima palyginti abejais atvejais gautus rezultatus. Simuliacijai pasirenkami tokie atvejai, kai yra pasukamos atskirai kiekviena grandis (ketvirtoji, trečioji ir antroji), tam kad būtų galima įsitikinti, kokie dinaminiai procesai vyksta kiekvienu judesio atveju.

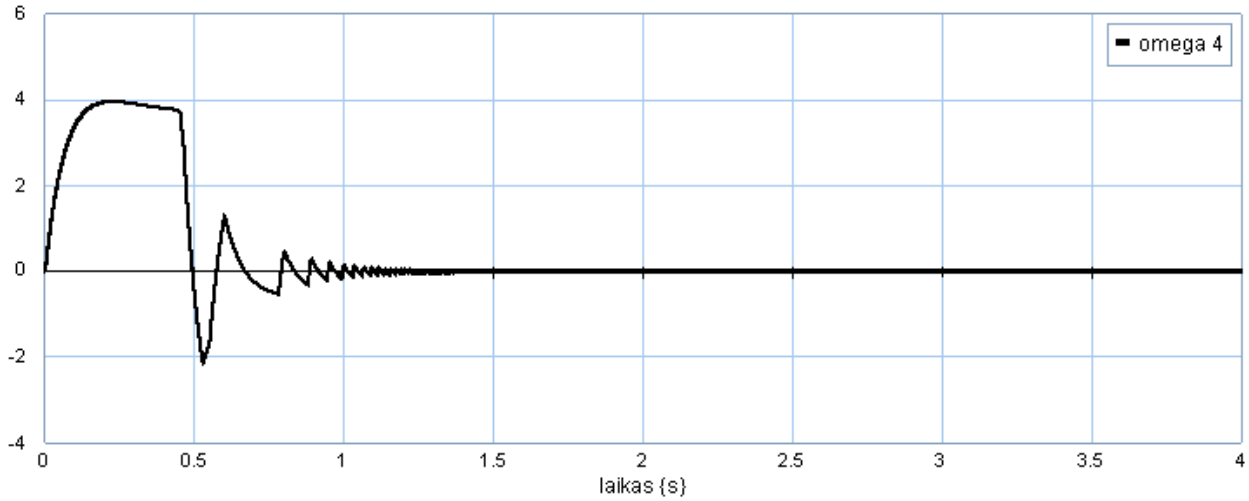
Grandys yra pasukamos 90 laipsnių kampu žemyn ir 90 laipsnių kampu aukštyn. Tuomet yra fiksuojami kampinio greičio, pasisukimo kampo ir sukimo momentų parametrai.

Rezultatai yra pateikiami grafikais kampinio greičio priklausomybė nuo laiko. Visais atvejais kampinis greitis yra matuojamas ant ketvirtosios grandies.

1) Moduliacija su standžiai įtvirtinta 3 grandimi, keliant griebtuvą aukštyn 90 laipsnių kampu.

Pirmoji simuliacija atliekama griebtuvą sukant 90 laipsnių aukštyn, kai trečioji grandis yra standžiai įtvirtinama. Šiuo bandymu yra siekiama patikrinti tik vienos grandies su servomechanizmu veikimą.

Iš pateikto grafiko (pav. 2.16) matome, kad maksimalus kampinis greitis pasiekia beveik 4 *rad/s*, o procesas nusistovi maždaug per 1,1 sekundės.

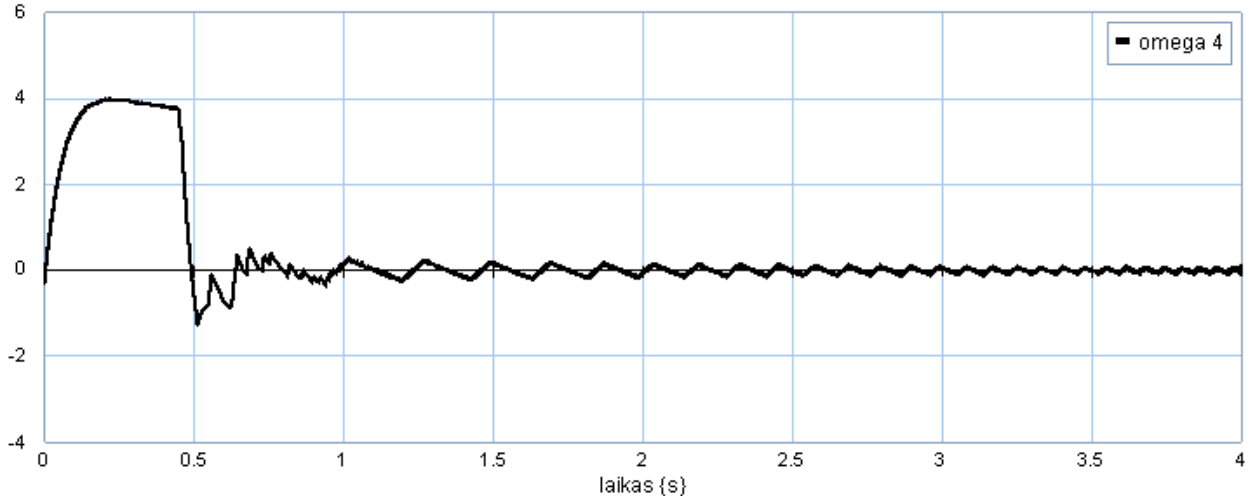


2.16 pav. Pirmosios moduliacijos rezultatai

Per proceso nusistovėjimą yra matyti staigūs, greitai mažėjančios amplitudės bei didėjančio dažnio svyravimai, kurie ilgainiui pereina į nusistovėjusią būseną. Pusė proceso laiko yra sugaištama užduotajam kampui pasiekti (apie 0,5 sekundes) ir maždaug dar per tiek pat laiko procesas stabilizuojasi. Virpesiai atsiranda dėl dviejų dalykų, pirmiausia dėl inercijos momento, kuris priešinasi pasukimo krypčiai ir servomechanizmo veikimo savybių stabdant išėjimo veleną ties nustatytu kampu. Kiti rezultatai pateikti A priede.

2) Moduliacija manipuliatoriaus griebtuvą keliant 90 laipsnių aukštyn.

Prieš tai buvusioje simuliacijoje trečiojoje grandyje įvestas standus įtvirtinimas yra panaikinamas, taip gaunant ne tik griebtuvo su prie jo prijunkto servomechanizmo dinaminius procesus, bet visos sistemos dinaminius procesus.



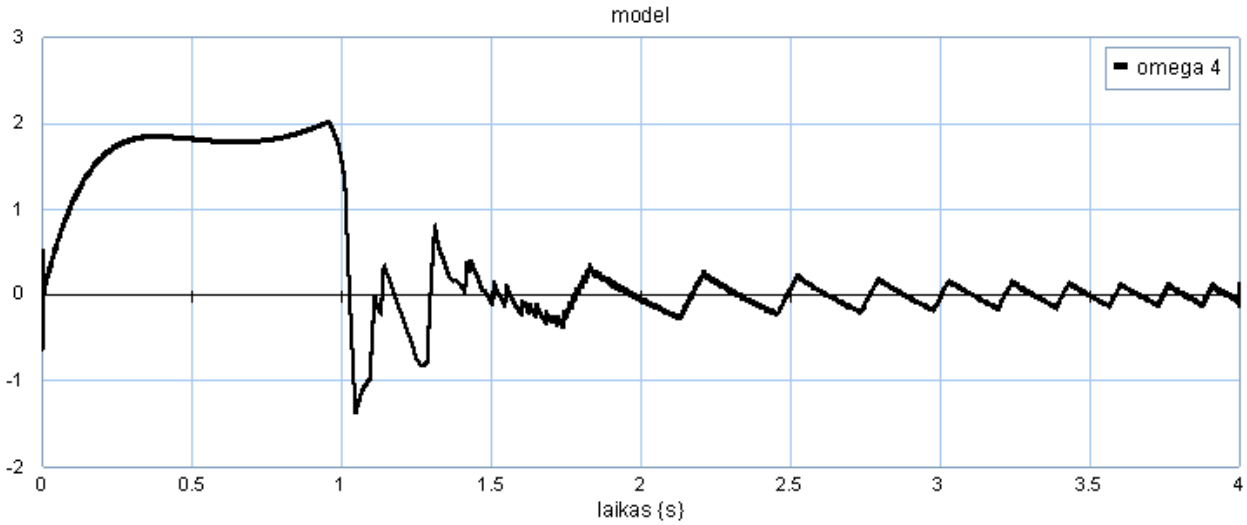
2.17 pav. Antrosios moduliacijos rezultatai

Modeliuojant manipuliatoriaus judesius, kai yra įtvirtintas tik prie pagrindo, kaip ir yra realybėje kai naudojamas įprastai, iš gauto grafiko (pav. 2.17) matome pasiektą panašų kampinį greitį kaip ir atliekant moduliaciją pirmu kartu. Didžiausią skirtumą lyginant su judėjimu, kai 3 grandis buvo įtvirtinta, galime pamatyti iš judesio nusistovėjimo. Šiuo atveju griebtuvo pasukimui pasibaigus, visoje sistemoje prasidėjo nedideli svyravimai, kurie tęsiasi nedidele amplitude gana ilgą laiko tarpą. Svyravimai atsiranda dėl kitas grandis paveikusio judesio, kuris sukelia papildomas jėgas kiekvienoje sistemos dalyje. Taip pat šio moduliavimo išsamesni rezultatai pateikti B priede.

3) Moduliacija sukant trečiąją grandį.

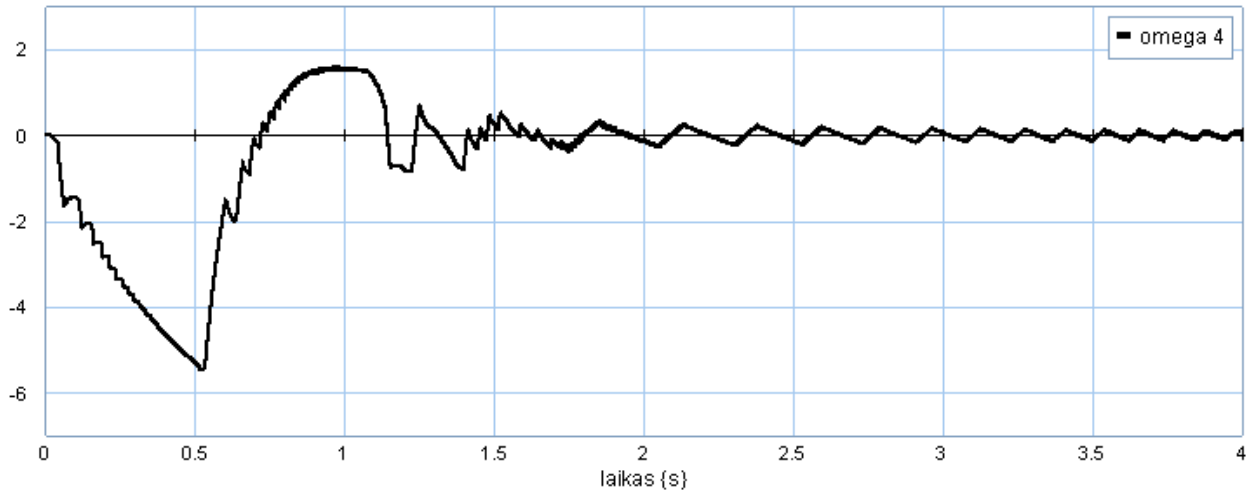
Trečiąją moduliaciją pasirinkta atlikti tuomet, kai trečioji ir ketvirtoji grandys nustatytos lygiagrečiai. Pradinė trečiosios grandies padėtis yra 45 laipsniais pasukta žemyn nuo horizontalios linijos. Tuomet ši grandis sukama 90 laipsnių aukštyn.

Atlikus šia simuliaciją gauti rezultatai yra pateikti 2.18 paveiksle. Galime pastebėti, kad trečioji grandis yra sukama beveik dvigubai ilgiau lyginant su manipuliatoriaus griebtuvo pasukimu 90 laipsnių kampu. Ta patvirtini ir maksimalus pasiektas kampinis greitis, kuris šiuo atveju pasiekia 2 *rad/s* maksimalią reikšmę. Kaip ir antruoju modeliavimo atveju atlikus šį judesy visoje sistemoje yra sukeliami svyravimai. Daugiau rezultatų pateikta C priede.



2.18 pav. Trečiosios moduliacijos pirmi rezultatai

Taip pat yra pasirenkama atlikti tos pačios grandies pasukimą iš aukščiausios padėties žemyn 90 laipsnių kampu, kad šioji grandis atsidurtų horizontalioje pozicijoje.

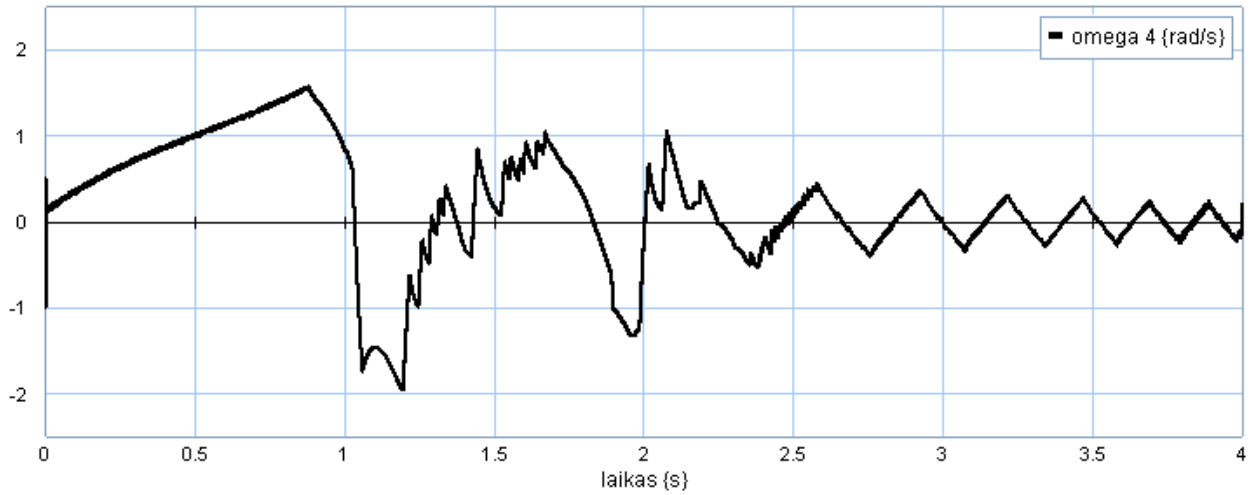


2.19 pav. Trečiosios moduliacijos antri rezultatai

Kaip ir buvo galima tikėtis, manipuliatoriaus grandims leidžiantis žemės trauka didina jų kampinį greitį ir šiuo atveju buvo pasiektas apie 5,2 rad/s praėjus pusei sekundės laiko (2.19 pav.). Daugiau rezultatų pateikta D priede.

4) Moduliacija sukant antrą grandį.

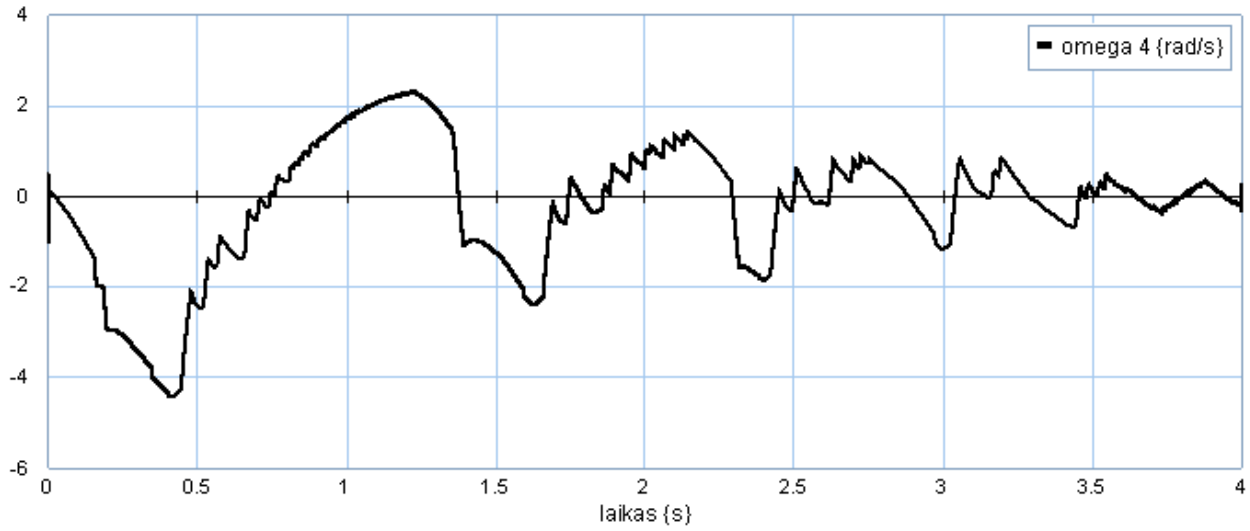
Šiame etape modeliuojame per visą griebtuvo ilgį ištiestas grandis lygiagrečiai, taip yra gaunama didžiausia petis tenkanti antrajam servomechanizmui. Pirmoji tokios padėties simuliacija atliekama manipuliatoriaus ranką iš horizontalios padėties keliant 45 laipsnių kampu į viršų ir fiksuojant toje padėtyje. Gauti rezultatai pateikiami paveiksle 2.20.



2.20 pav. Ketvirtosios moduliacijos pirmi rezultatai

Šiame judesyje galime matyti labai didelius svyravimus, iš ko galima būtų daryti prielaidą, jog servomechanizmas jau veikė ant savo galimybių ribos. Rezultatai taip pat pateikti E priede.

Paskutiniuoju manipuliatoriaus veikimo simuliavimu buvo sukama nuo horizonto antroji grandis žemyn 45 laipsnių kampu, rezultatai pateikti 2.21 paveiksle.

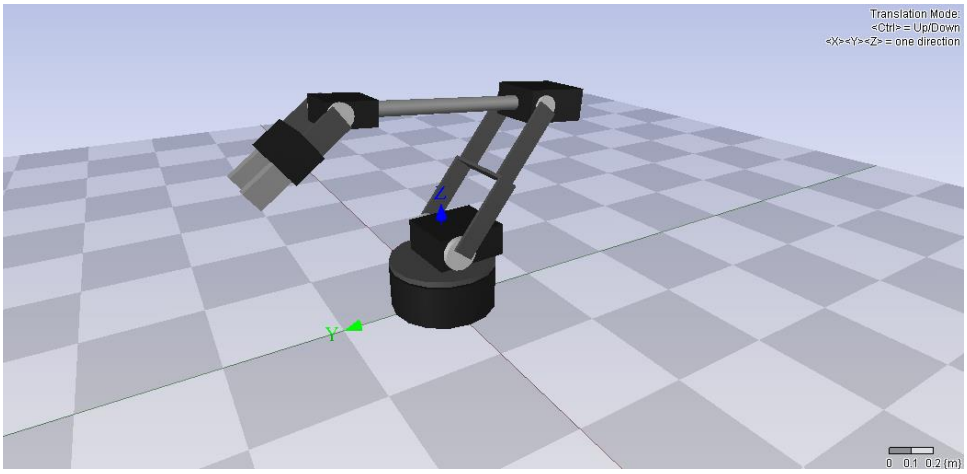


2.21 pav. Ketvirtosios moduliacijos antri rezultatai

Lyginant šiuos rezultatus su grandies kėlimo aukštyn rezultatais, galime pamatyti ženkliai išaugusią kampinių greičių amplitudę bei pailgėjusį svyravimo laiką. Plačiau rezultatai pateikti F priede.

Pagal programos „SIM-20“ gautus modeliavimo rezultatus, galima pastebėti antrojo ir trečiojo servomechanizmų gana didelius svyravimus veikimo metu. Mažiausi svyravimai pasireiškia sukant ketvirtą, griebtuvo grandį. Iš šių rezultatų galima nuspėti, jog servomechanizmų sukuriamas momentas yra kiek per mažas manipuliatoriaus su 175 gramų svorio objektu (realių tyrimų metu naudojamo jutiklio) tinkamam veikimui, nors gamintojo deklaruojamas svoris, su kuriuo manipuliatorius gali dirbti yra 360 gramų.

Sukurtas dinaminis modelis taip pat panaudojamas vizualiniam manipuliatoriaus simuliacijos pristatymui vaizdine medžiaga. Bendras manipuliatoriaus vaizdas trimatėje erdvėje simuliacijoje pateiktas 2.22 paveiksle.



2.22 pav. Manipuliatoriaus modelis trimatėje erdvėje.

Išsamesni atlikto moduliavimo su programa „SIM-20“ rezultatai grafikų pavidale yra pateikti baigiamojo darbo A-F prieduose.

3. Eksperimentiniai tyrimai

Norint patikrinti sudaryto matematinio modelio tikslumą, yra tikslinga išmatuoti realaus manipuliatoriaus dinaminius procesus. Norint tai atlikti, būtina pasirinkti tinkamą matavimo įrangą, sudaryti tinkamas bandymui sąlygas bei tiksliai aprašyti bandymo metodiką.

3.1 Matavimo įrangos aprašymas

Norint užfiksuoti manipuliatoriaus judesius yra reikalingi du pagrindiniai prietaisai: jutiklis, kuris matuotų judesio dydį, bei duomenų kaupiklis, kuris fiksuotų išmatuotus duomenis tam tikra forma vėlesniam duomenų apdorojimui.

3.1.1 „DL1“ duomenų kaupiklis

Duomenų kaupiklis DL (3.1 pav.) yra skirtas gaunamiems duomenims užfiksuoti ir įrašyti į atminties kortelę. Įrašomus duomenis šis prietaisas gauna iš prie jo prijungtų išorinių jutiklių per serijinę jungtį bei GPS (angl. *Global Positioning System* – Visuotinė padėties nustatymo sistema) antenos.



3.1 pav. DL1 duomenų kaupiklis (Race technology 2014)

Duomenų kaupiklis duomenis fiksuoja 100 Hz dažniu, tai reiškia, kad atnaujinti duomenys atminties kortelėje yra fiksuojami kas 10 ms laiko tarpu. Kartu su fiksuojamais duomenimis iš daviklių šis prietaisas įrašo informaciją apie praėjusį laiką nuo matavimo pradžios.

Įrašyti į kortelę duomenys yra išsaugomi specialiu formatu „RUN“, kuriuo galima peržiūrėti bei apdoroti gamintojo pateikiama nemokama programine įranga „Analysis V8.5“.

3.1.2 „IMU-06“ jutiklis

Šis jutiklis sudarytas iš dviejų skirtingų tipų integruotų jutiklių grupių viename korpuse. Pirmas integruotų jutiklių tipas yra akcelerometrai – tai jutikliai, fiksuojantys judesio pagreitį. Tokie integruoti jutikliai yra 3, kad fiksuotų judesio pagreitį kiekviena iš trijų ašių.

Kita iš integruotų jutiklių grupių yra gyrometrai – fiksuojantys posūkio greitį aplink kiekvieną iš matuojamų ašių. Taigi iš viso „IMU-06“ (3.2 pav.) jutiklis fiksuoja šešių laisvės laipsnių parametrus.



3.2 pav. „IMU-06“ jutiklis (Race technology 2014)

Kaip ir „DL1“ duomenų kaupiklis šis daviklis per serijinę jungtį siunčia duomenis 100 Hz dažniu. Akcelerometrai gali matuoti pagreitį iki didžiausios 10 g (~100 m/s^2) reikšmės 2,5 mg tikslumu. O gyrometrai gali fiksuoti iki didžiausio 300 laipsnių/s kampinį greitį 0,073 laipsnių/s tikslumu. Šie jutiklio parametrai yra visiškai pakankami patikimam manipuliatoriaus judesių matavimui. Dar vienas svarbus šio jutiklio parametras – svoris, kadangi tai tiesiogiai paveiks matuojamus parametrus. Jutiklio svoris yra 175 g ir šį svorį būtina įtraukti atliekant manipuliatoriaus dinaminių procesų modeliavimą.

3.1.3 Kiti matavimams atlikti reikalingi prietaisai

Be pagrindinės bandymams atlikti reikalingos įrangos reikalingi ir kiti prietaisai, kad būtų galima užfiksuoti bandymo parametrus. Ilgio matavimo įrankiai – skaitmeninis slankmatis

(0,01 mm tikslumas), liniuotė (0,5 mm tikslumas). Masės matavimo įrankiai – svarstyklės (1 g tikslumas).

3.2 Bandymo eiga ir rezultatai

3.2.1 Bandymo aplinka

Patikimiems duomenims užtikrinti yra būtina pasirinkti tinkamą bandymo aplinką. Bandymo aplinka turi būti stabili – tai yra bandymo metu tiriamą objektą – manipuliatorių ir matavimo įrangą turi veikti kuo mažiau išorinių veiksnių, kurie galėtų paveikti fiksuojamus parametrus. Išoriniai veiksniai galintys neigiamai paveikti bandymo rezultatus yra tokie kaip vėjas, kuris gali sukelti svyravimus manipuliatoriuje, ar staigūs aplinkos arba matavimo įrangos temperatūros svyravimai. Taip pat pagrindas ant kurio yra atliekami matavimai turi būti tvirtas ir stabilus. Fiksuojant duomenis jokiu būdu negalima liesti, judinti ar kitaip paveikti patį manipuliatorių ar transporto priemonę ant kurios jis yra sumontuotas.

Įvertinant šias sąlygas bandymo aplinkai, buvo pasirinkta bandymą atlikinėti uždaroje patalpoje, kurioje nėra didelių judančių oro masių, bei pagrindas yra tvirtas.

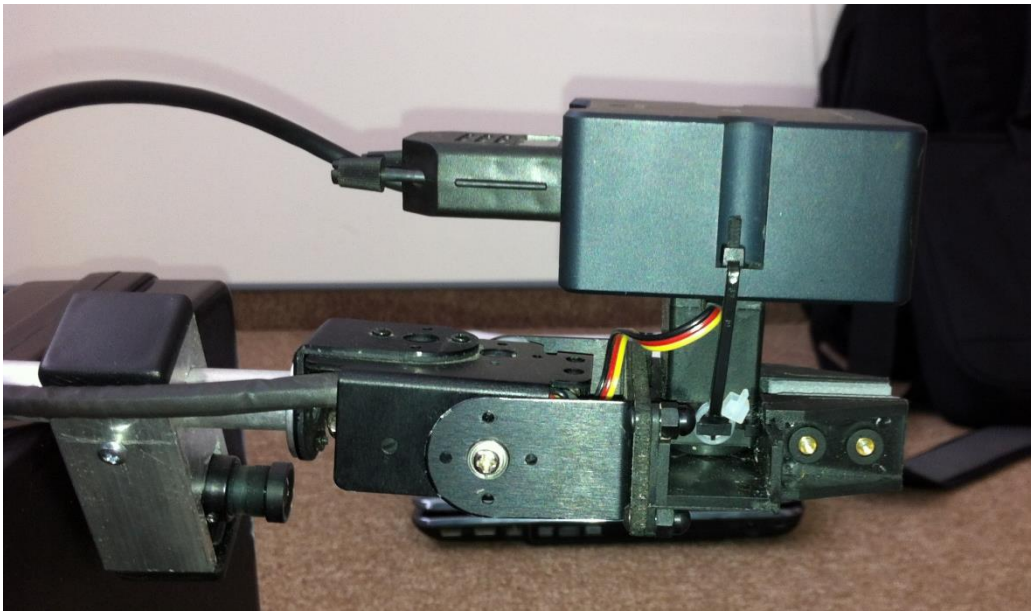
3.2.2 Pasiruošimas bandymui

Pirmiausia, prieš pradedant atlikti bandymą reikia išsimatuoti svarbiausius manipuliatoriaus parametrus – kiekvienos grandies ilgius. Šie ilgiai yra matuojami nuo pirmosios grandies sąnaros ašies iki galinės tos pačios grandies sąnaros ašies. Šis atstumas yra matuojamas milimetrų tikslumu. Taip pat yra užfiksuojamos manipuliatoriaus grandžių masės bei jų svorio centrai.

Tuomet, ant manipuliatoriaus paskutinės grandies – griebtuvo standžiai pritvirtinamas jutiklis „IMU-06“ (3.3 pav.). Jutiklis yra tvirtinamas ant griebtuvo masės centro. Duomenų kaupiklis „DL1“ yra pritvirtinamas ant roboto korpuso, taip, kad jo svoris niekaip neįtakotų manipuliatoriaus veikimo. Jutiklis ir duomenų kaupiklis sujungiami laidu. Laidas yra tvirtinamas prie kiekvienos grandies taip, kad pasisukant sąnaroms laidas netrukdytų judesiui ir kuo mažiau jį įtakotų. Taip pat įsitikinama, kad esant kiekvienai iš sąnarų judesių nebūtų pažeisti prietaisai bei juos jungiantis laidas.

Įvykdžius visas prieš tai aprašytas sąlygas yra įjungiama matavimo įranga bei pats robotas. Kadangi nagrinėjamas robotas bei ant jo sumontuotas manipuliatorius yra valdomi nuotoliniu būdu

reikia įsitikinti, kad po įjungimo pilnai užsikrauna programinė įranga tiek pačiame robote, tiek ir nuotolinio valdymo pulte.



3.3 pav. Manipuliatoriaus grandis su pritvirtintu jutikliu.

Pradėjus pilnai funkcionuoti visai įrangai manipuliatorius yra nustatomas į pradinę padėtį ir paruošiamas bandymo eigai.

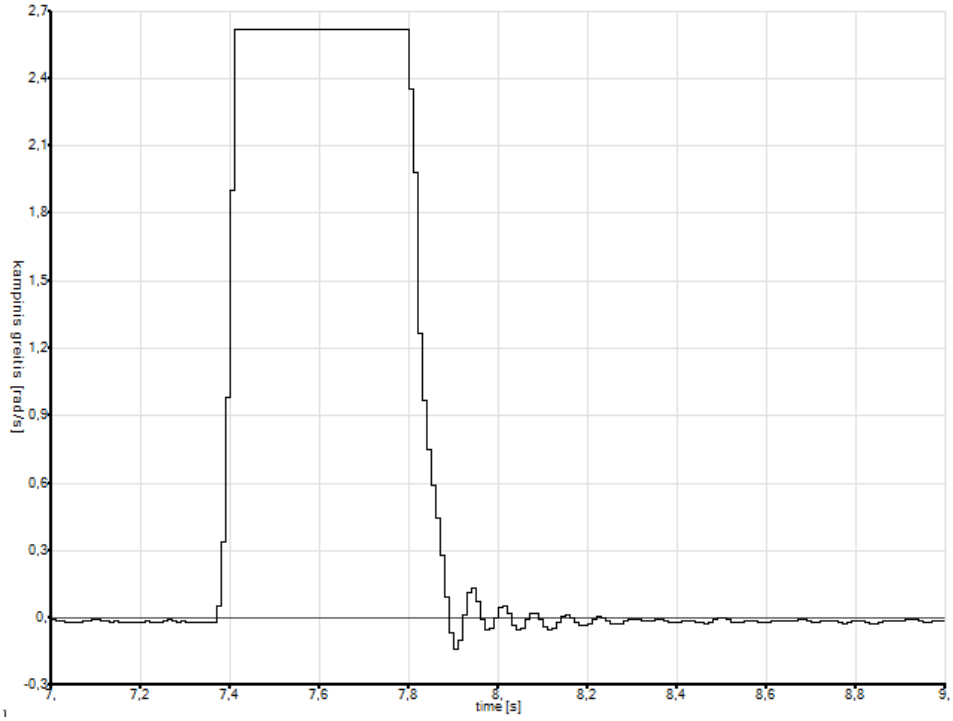
3.2.3 Bandymas sukant ketvirtąją grandį pirmu atveju

Pirmuoju bandymo etapu yra siekiama išmatuoti galinės manipuliatoriaus grandies – griebtuvo judėjimo parametrus, kai priešpaskutinė grandis yra standžiai įtvirtinama. Šio bandymo tikslas yra užfiksuoti pasisukimo greitį bei virpesius, kai paskutiniosios grandies bei ją sukančio servomechanizmo neveikia kitų grandžių įtaka.

Bandymas pradedamas nustatant manipuliatorių į padėtį, kai antroji grandis yra vertikalioje padėtyje ir lygiagreti pirmajai grandžiai. Trečioji grandis pasukama, taip, kad sudarytų 90 laipsnių kampą su antrąja grandimi – tai yra būtų nustatyta horizontaliai. Tokioje padėtyje trečioji grandis yra standžiai ir nejudamai įtvirtinama pagrindo – žemės atžvilgiu. Paskutinioji – ketvirtoji grandis yra nuleidžiama žemyn 90 laipsnių kampu trečiosios grandies atžvilgiu, taip, kad griebtuvo galas būtų nukreiptas į grindis.

Tuomet valdiklio programoje nustatomas maksimalus veikimo greitis. Tai daroma tam, kad vos tik gavęs signalą robotas, servomechanizmui nurodytų norimą pasiekti padėtį iš karto ir

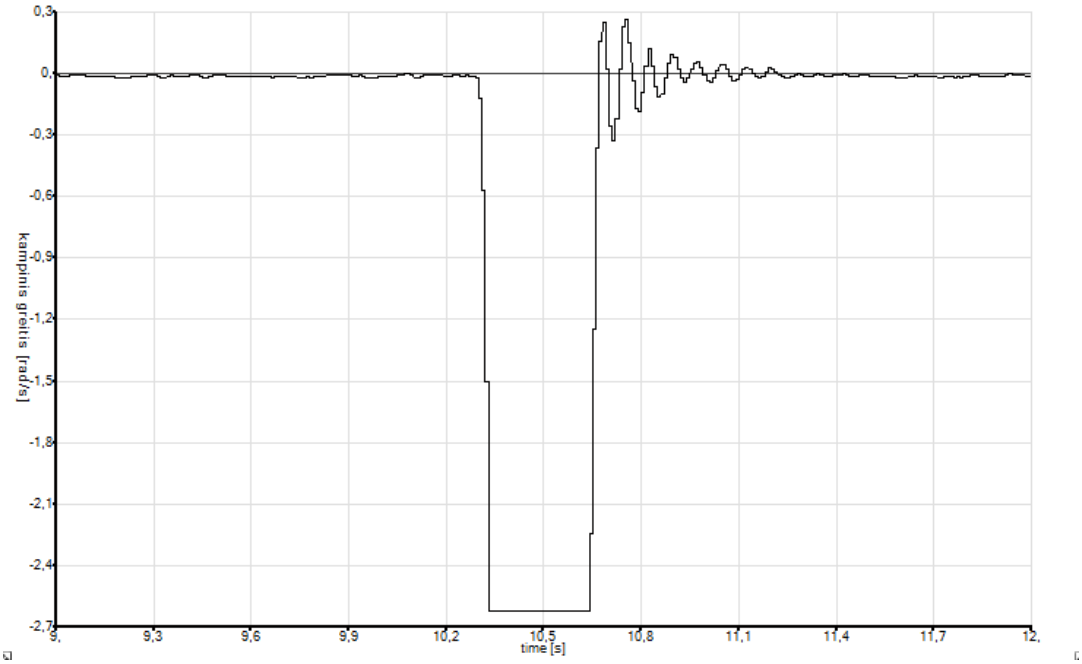
servomechanizmas maksimaliu savo greičiu suktų grandį į nurodytą padėtį. Tuomet, ant duomenų kaupiklio paspaudžiamas pradžios mygtukas, tam kad įrenginys pradėtų įrašinėti duomenis į atminties kortelę, o valdymo pulte nurodoma paskutiniam servomechanizmui pasisukti 90 laipsnių aukštyn, kad griebtuvas atsidurtų horizontalioje padėtyje. Po judesio, kai svyravimai sustoja duomenų kaupiklio mygtukas vėl nuspaudžiamas, tam kad sustabdytų tolimesnį duomenų registravimą ir tinkamai įrašytų duomenis į atmintinės kortelę.



3.4 pav. Pirmojo tyrimo sukimo aukštyn grafikas

Pirmojo bandymo rezultatai pateikiami grafiškai 3.4 pav. Šiame grafike vertikalioje ašyje pateiktas sukimosi greitis apie bandymo metu sukamą ašį. Servomechanizmo sukimosi pradžia prasidėjo praėjus 7,37 *s* nuo duomenų fiksavimo pradžios, o judesio veikimas nusistovėjo praėjus 0,93 *s*. Galime pastebėti, kad apie paskutiniąsias 0,41 *s* vyko svyravimai, kurių amplitudė laikui bėgant sumažėjo ir procesas nusistovėjo. Taip pat atkreiptinas dėmesys, jog judesio metu buvo pasiektas 2,6 *rad/s* kampinis greitis.

Tokio pat principo bandymas buvo kartojamas antrą kartą, tik šiuo atveju manipuliatoriaus griebtuvas buvo pastatomas į pradinę horizontalią padėtį ir nuleidžiamas pilnu greičiu žemyn 90 laipsnių kampu. Gauta priklausomybė kampinio greičio nuo laiko pateikta 3.5 pav.



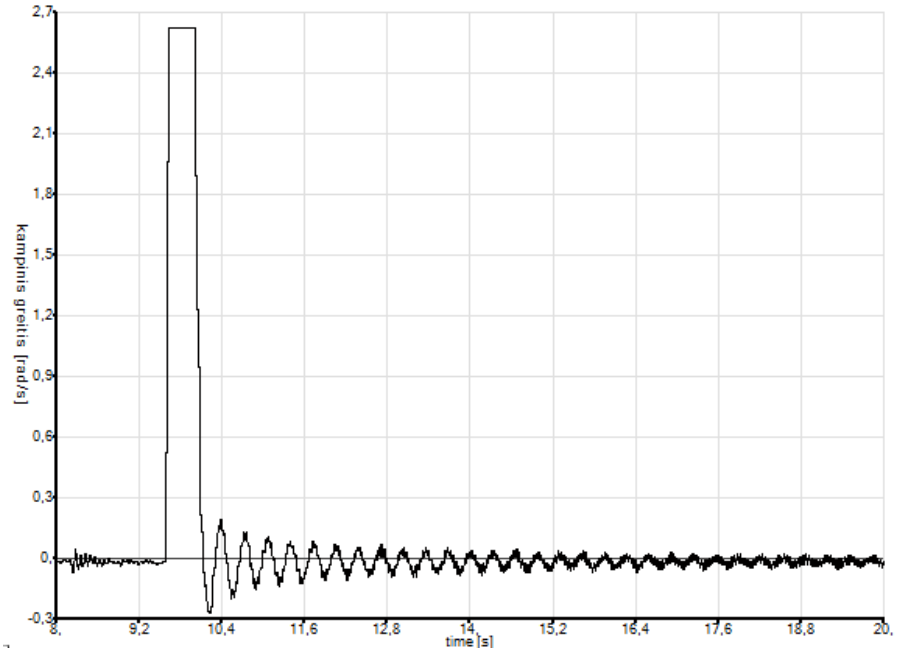
3.5 pav. Pirmojo tyrimo sukimo žemyn grafikas.

Leidžiant manipuliatoriaus griebtuvą žemyn, galima pastebėti vieną ryškesnį skirtumą – manipuliatoriaus paskutinioji grandis stabdymo momentu patyrė didesnės amplitudės ir ilgiau trunkančius svyravimus. Galima daryti prielaidą, kad taip vyko dėl to, jog leisdamasi grandis žemyn, žemės traukos pagalba įgavo didesnį greitį ir stabdymo metu buvo stipriau viršytas numatytas pasukimo kampas.

3.2.4 Bandymas sukant ketvirtą grandį antru atveju

Antrojo bandymo sąlygomis norima nustatyti manipuliatoriaus dinaminius procesus, kai yra sukama ketvirtosios grandis. Šio bandymo skirtumas nuo pirmojo yra tas, kad manipuliatoriaus kitos grandys nėra standžiai įtvirtinamos. Tai reiškia, kad sukant galinę manipuliatoriaus grandį, jos judėjimą veiks ne vien šios grandies judesys, bet ir grįžtamieji procesai susidarę pirmojoje, antrojoje bei trečiojoje manipuliatoriaus grandyse.

Bandymo eiga yra atliekama analogiškai pirmojo bandymo sąlygų seka, tik kaip buvo minėta prieš tai, trečioji manipuliatoriaus grandis nėra įtvirtinama standžiai. Pirmuoju atveju duomenys yra fiksuojami manipuliatoriaus griebtuvą nuleidžiant iš horizontalios padėties žemyn 90 laipsnių kampu. Šio bandymo rezultatai pateikiami 3.6 paveiksle.



3.6 pav. Antrojo tyrimo sukimo aukštyn grafikas.

Iš šio bandymo metu gautų rezultatų galime matyti gana didelį pokytį manipuliatoriaus griebtuve vykstančių dinaminių procesų atžvilgiu. Nors pagrindinis judesys buvo atliekamas lygiai toks pats kaip ir pirmojo bandymo atveju, bet kitų grandžių sukeliami grįžtamieji veiksniai gana ženkliai padidino sustojimo metu vykstančių svyravimų amplitudę, o ypač proceso nusistovėjimo trukmę. Šiuo atveju griebtuvo svyravimai nuo judesio pradžios truko net 9 sekundes, kol nusistovėjo į ramybės būseną.

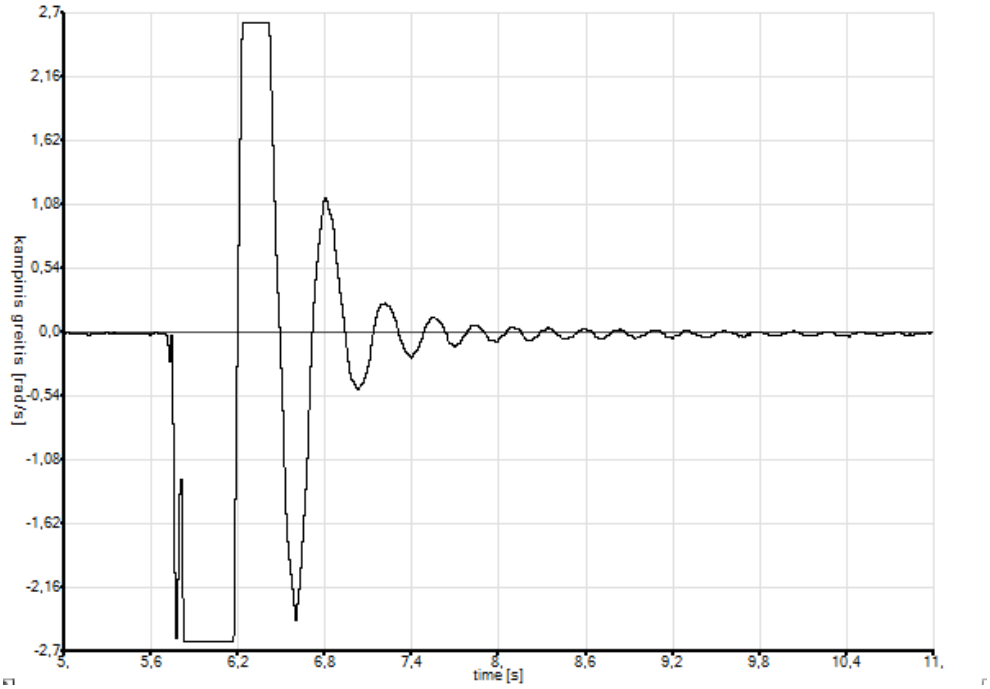
Kaip ir pirmojo bandymo sąlygomis, taip ir antrosiomis sąlygomis bandymas buvo pakartotas manipuliatoriaus ketvirtąją grandį leidžiant iš horizontaliosios padėties žemyn 90 laipsnių kampu. Gauti rezultatai analogiškai atspindėjo dinaminių procesų manipuliatoriaus griebtuve pokytį lyginant su pirmojo bandymo sąlygomis. Analogiškai nusistovėjimo metu svyravimų amplitudė išaugo, o nusistovėjimo laikas taip pat truko gerokai ilgiau – apie 8 sekundes.

3.2.5 Bandymas sukant trečiąją grandį

Šiuo tyrimų atlikimo atveju yra keičiama manipuliatoriaus valdomoji sąnara, kurioje vykdomas sukamasis judesys. Valdomasis servomechanizmas yra nustatomas trečiasis. Šis yra tarp ketvirtosios ir trečiosios manipuliatoriaus grandžių. Pirmiausia yra nustatoma antroji grandis, kad būtų lygiagreti vertikaliajai pirmajai grandžiai. Ketvirtoji manipuliatoriaus grandis – griebtuvas, ant kurio įtvirtintas daviklis, taip pat nustatomas į lygiagrečią padėtį trečiajai grandžiai. Trečioji

grandis antrosios grandies atžvilgiu taip pat pasukama, kad sudarytų lygiagretę, taip manipuliatorius nustatomas į maksimaliai aukštyn iškeltą padėtį.

Esant užfiksuotai šiai padėčiai duomenų kaupiklis – „DL1“ paleidžiamas informacijos įrašinėjimui, ir trečiajai manipuliatoriaus sąnarai nurodoma pasisukti maksimaliu greičiu 90 laipsnių nuo esamos padėties žemyn. Nusistovėjus judesiui po atlikto veiksmo yra sustabdomas duomenų kaupiklis. Šio bandymo rezultatai pateikiami 3.7 pav.



3.7 pav. Trečiojo tyrimo sukimo žemyn grafikas.

Iš šio grafiko galime matyti gana didelį manipuliatoriaus grandies dinaminių parametrų pokytį. Po sukamos grandies nusileidimo žemyn (neigiamas kampinis greitis grafiko pradžioje) seka grandies pasukimas vėl aukštyn visu greičiu. Tai rodo, kad nusileidimo metu buvo viršytas stipriai numatytas pasukimo kampas, dėl to manipuliatoriaus grandį teko sukti atgal į viršų. Tai lėmė itin didelius manipuliatoriaus svyravimus didelėje amplitudėje. Iš šių procesų galima spręsti, jog manipuliatoriaus servomechanizmų sukuriama jėga buvo viršyta kinetinei energijai, pasiektai judesio metu.

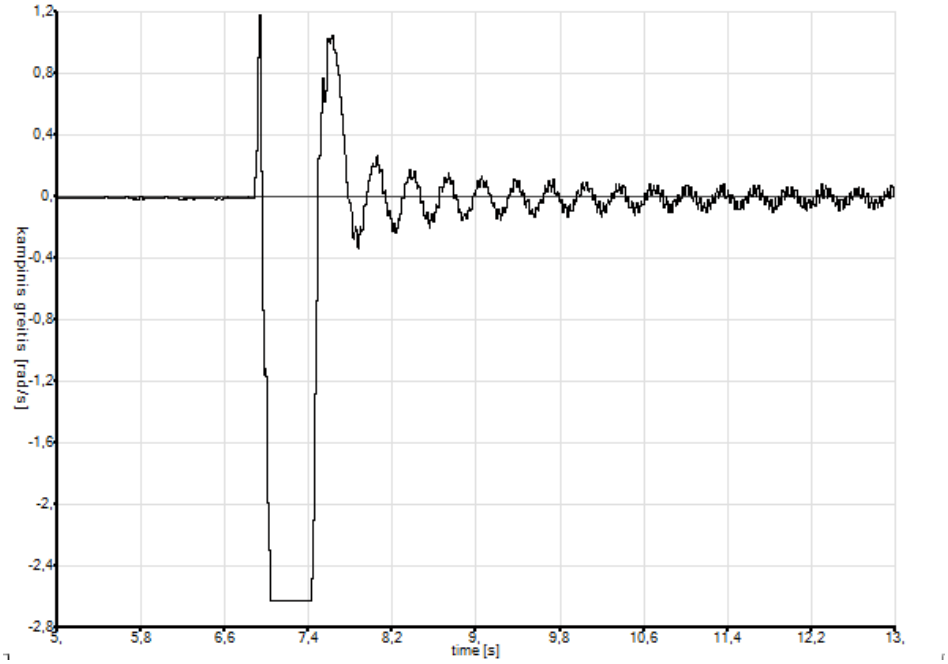
Esant toms pačioms sąlygoms manipuliatoriaus trečiasis servomechanizmas iš žemutinės pozicijos buvo nustatytas pakilti maksimaliu greičiu aukštyn. Šio bandymo metu buvo pasiektos manipuliatoriaus galimybės – grandis buvo pasukta tik dalį numatyto kelio ir sustojo.

3.2.6 Bandymas sukant antrąją grandį

Ketvirtojo bandymo sąlygos buvo numatytos prieš tai buvusių bandymų aprašymais, tačiau pasiekus manipuliatoriaus veikimo ribas trečiojo bandymo sukimo aukštyn metu, buvo priimtas sprendimas ketvirtojo bandymo sąlygas pakoreguoti.

Antroji, trečioji ir ketvirtoji grandys nustatomos į lygiagrečią poziciją, kad sudarytų tiesę. Antrasis šarnyras sukamas aukštyn į kiek galima horizontalią padėtį tol, kol užtenka servomechanizmų sukuriamo momento jėgos nugalėti sunkio jėgai.

Iš šios pozicijos antroji manipuliatoriaus sąnara nurodoma suktis žemyn 45 laipsnius ir sustoti toje pozicijoje. Šio judesio metu, kaip ir per prieš tai atliktus bandymus, fiksuojamas ant manipuliatoriaus griebtuvo esančio daviklio kampinis greitis. Gautas rezultatas pateiktas 3.8 pav.



3.8 pav. Ketvirtojo tyrimo sukimo žemyn grafikas

Bandymo metu manipuliatorius išlaikė nustatytą grandies kampą. Bet tiek bandymo metu, tiek ir iš pateikto grafiko, pastebėtina, kad manipuliatoriaus grandis įvykdžius judesį liko nedidelės amplitudės svyravimų stadijoje. Bandymo dalis, kurios metu analogiškai būtų keliama grandis aukštyn nebuvo atliekama, kadangi, kaip jau buvo minėta, manipuliatoriaus galimybės neleido atlikti tokio bandymo dėl bendro visos sistemos svorio.

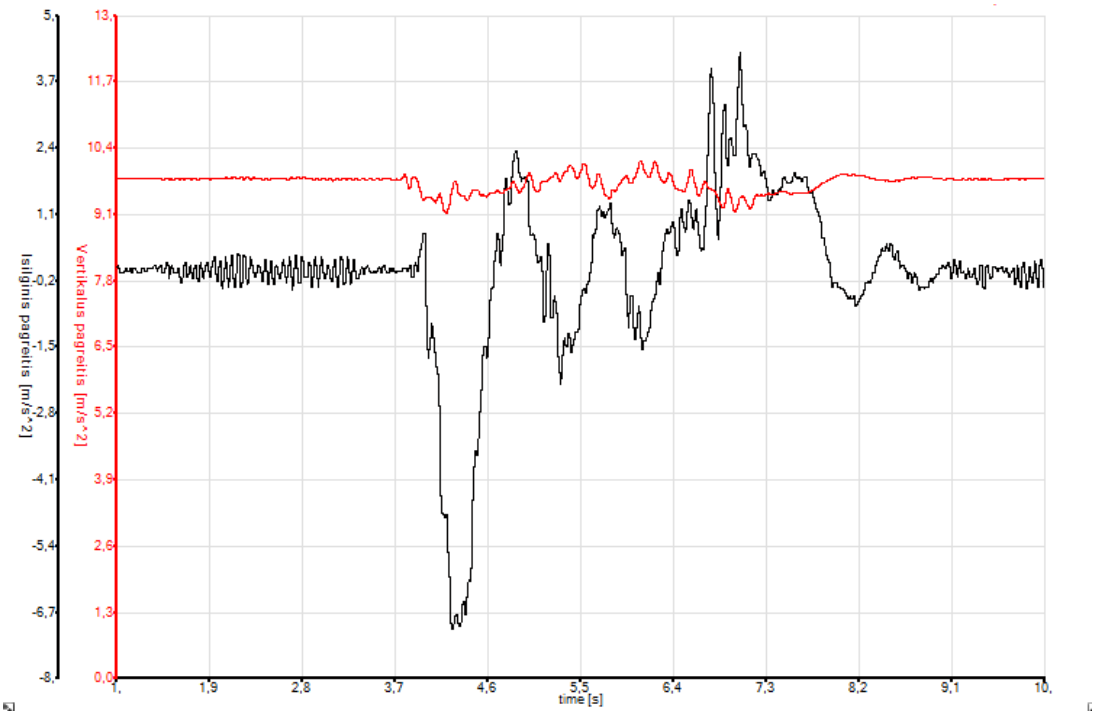
3.2.7 Penktojo tyrimo sąlyga

Penktasis bandymų etapas yra skirtas manipuliatoriaus judėjimo tyrimui tuo atveju, kai juda ne kažkuri viena iš manipuliatoriaus grandžių, o juda visas pagrindas, ant kurio yra pritvirtintas manipuliatorius. Kadangi yra nagrinėjamas manipuliatorius, pritvirtintas ant mobiliosios bazės – roboto, kuris gali važiuoti paviršiumi, tyrimai yra atliekami robotui važiuojant žemės paviršiumi.

Kaip ir prieš tai atliktus bandymus, jutiklio vieta nėra keičiama – jis paliekamas pritvirtintas ant paskutiniosios manipuliatoriaus grandies – griebtuvo. Pačiai transporto priemonei yra numatomos dvi atkarpos, kuriomis bus važiuojama. Pirmoji atkarpa yra tiesi, su lygiu paviršiumi. Antroji atkarpa parenkama su žinomų geometrinių parametrų kliūtimis, kurias turės įveikti važiuodamas robotas.

Kiekvienam važiavimui pasirinktomis atkarpomis yra parenkama po dvi skirtingas manipuliatoriaus padėtis. Pirmoji padėtis, kai manipuliatoriaus visos grandys yra nustatomos lygiagrečiai viena kitai ir tokia tiesė pastatoma vertikaliai aukštyn. Antroji važiavimų metu nustatoma manipuliatoriaus pozicija yra tokia: antroji grandis pasukama lygiagrečiai pirmajai grandžiai ir yra vertikali. Trečioji grandis pasukama antrosios grandies atžvilgiu 90 laipsnių kampu į priekį, taip nustatant trečiąją grandį į horizontalią padėtį. Paskutinioji, ketvirtoji grandis, taip pat nustatoma į padėtį, lygiagrečią horizontui bei trečiajai grandžiai.

Pirmasis bandymo važiavimas atliekamas pirmąja – lygia atkarpa bei esant manipuliatoriaus padėčiai visiškai vertikalioje padėtyje. Duomenys fiksuojami jutikliu ir įrašomi į duomenų kaupiklį nuo pajudėjimo iš atkarpos pradžioje iki visiško sustojimo atkarpos pabaigoje. Atliekant tyrimus pagal penktojo bandymo sąlygas yra tikslinga išvesti rezultatus ne pagal sukimosi greičio priklausomybę nuo laiko, bet pagal linijinio pagreičio vertikaliąja bei išilgine važiavimo krypčiai ašimis priklausomybe nuo laiko t. Tokį pasirinkimą lemia tai, kad pats važiavimas globaliniu erdvės atžvilgiu yra nebe sukamasis judesys, kaip buvo ankstesniuose bandymuose, bet slenkamasis judesys išilgine ašimi. Šio tyrimo rezultatai pateikiami grafiškai 3.9 pav.



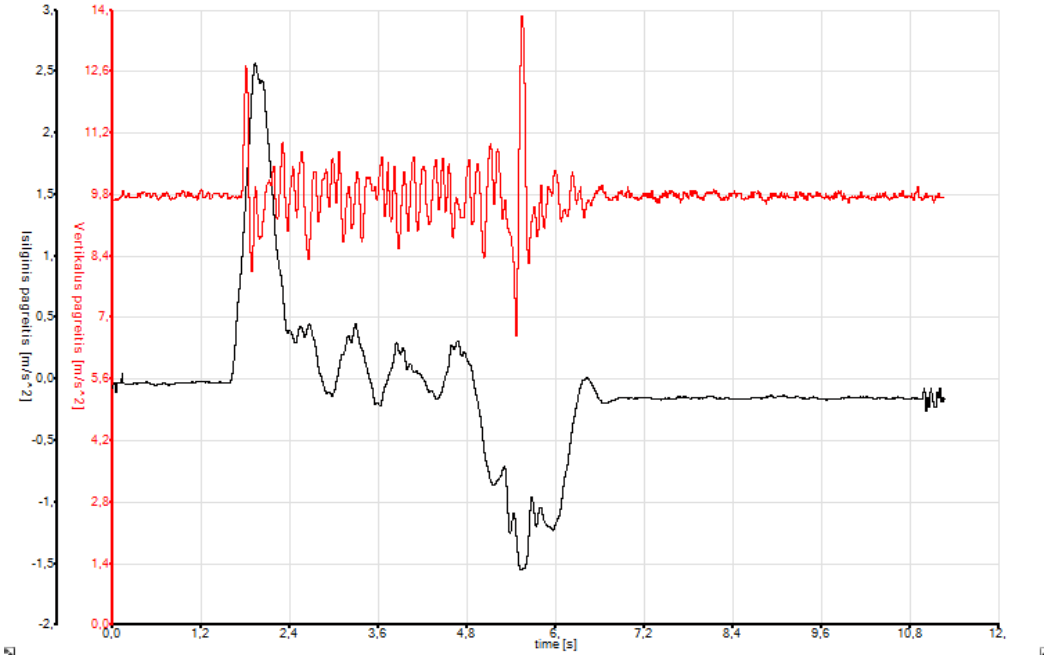
3.9 pav. Penktojo tyrimo pirmojo važiavimo rezultatai

Kaip matoma iš gautų duomenų, vertikaliąja ašimi važiuojant lygiu keliu pagreitis svyruoja neženkliai, nuo 9,13 m/s^2 iki 10,15 m/s^2, o tai tesudaro maksimalų 1,02 m/s^2 pagreičio skirtumą. Vertinant šiuos duomenis reikia nepamiršti, jog vertikalioji ašis yra nuolat veikiama žemės traukos pagreičio, kuris lygus 9,81 m/s^2. Tuo tarpu išilgine ašimi matuotas pagreitis svyruoja gana didelėse ribose, nuo mažiausio -6,97 m/s^2, kuris buvo pasiektas tuomet, kai transporto priemonė pradėjo važiuoti iki didžiausio 4,29 m/s^2 teigiamo pagreičio, pasiekto lėtinant.

Antrasis bandymas penktojo tyrimo metu buvo atliekamas taip pat pirmojoje lygioje atkarpoje, tik šį kartą manipuliatorius nustatytas į antrąją padėtį – kai trečioji ir ketvirtoji grandys statmenos pirmajai ir antrajai grandims. Duomenys fiksuojami analogiškai kaip ir prieš tai atliktame bandyme, nuo pajudėjimo iš vietos iki visiško roboto sustojimo.

Iš šio bandymo rezultatų (3.10 pav.) matoma, jog gerokai išaugo vertikaliąja ašimi esantys pagreičiai. Šiuo atveju pagreičiai svyravo nuo mažiausios 6,9 m/s^2 reikšmės iki didžiausios 13,8 m/s^2 pagreičio vertės, tai sudaro didžiausią 6,9 m/s^2 skirtumą. Tačiau lyginant antrąjį važiavimą su pirmuoju važiavimu išilgine ašimi manipuliatoriaus griebtuvą veikusių pagreičių atžvilgiu galima pastebėti ženklų šių pagreičių sumažėjimą. Tai yra pagreičiai svyruoja nuo mažiausios – -1,55 m/s^2 reikšmės iki didžiausios 2,56 m/s^2 reikšmės. Remiantis šiais rezultatais,

galima daryti prielaidą, jog antroji manipuliatoriaus padėtis suvienodina išilginį bei vertikalų judėjimą, taip sumažinant vienai ašiai tenkančius didelius pagreičių pokyčius.

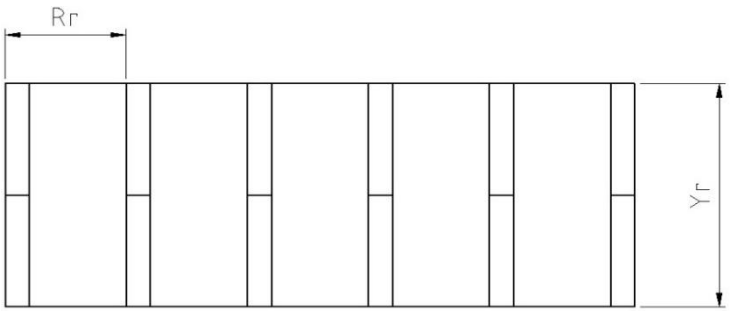


3.10 pav. Penktojo tyrimo antrojo važiavimo rezultatai.

Trečiajam tyrimo važiavimui buvo sudarytas ruožas su kliūtimis, kurias transporto priemonė turėjo įveikti pervažiuodama per viršų. Kliūtys ruože buvo išdėliotos skersai važiavimo krypčiai, o atstumas tarp jų parinktas lygus roboto priekinės ratų ašies atstumui iki galinės ratų ašies. Tokie kliūčių ruožo parametrai buvo pasirinkti tam tikslui, jog per jas važiuodamas robotas judėtų vertikalia ašimi aukštyn žemyn, tuo pačiu metu kuo labiau išlaikydamas savo korpusą, o tai reiškia ir manipuliatoriaus pagrindą horizontaliai. Kliūties ruožo principinė schema vaizdu iš viršaus pateikiama 3.11 paveiksle.

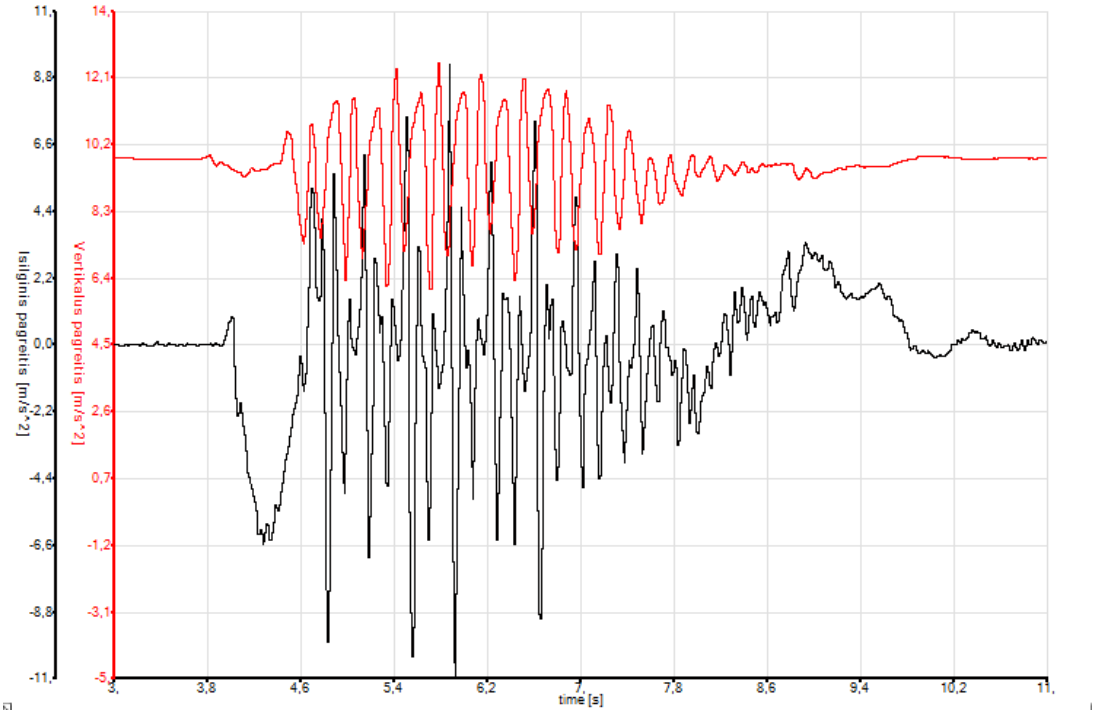
Prieš pradedant atlikinėti trečiąjį važiavimą, transporto priemonė padedama priešais ruožą su kliūtimis. Yra būtina užtikrinti, kad roboto išilginė ašis kuo labiau sutaptų su kliūčių ruožo išilgine ašimi. Tai yra būtina padaryti todėl, kad važiavimo metu roboto trajektorija nenukryptų nuo kliūčių ruožo ploto ir nebūtų iškraipyti duomenys. Jeigu tokia situacija atsitinka, reikia sustabdyti matavimus ir bandymą pradėti iš naujo.

Mobilųjį robotą tinkamai pastačius priešais kliūčių ruožą yra nustatoma pirmoji šiame poskyryje aprašyta manipuliatoriaus padėtis – kai visos grandys yra lygiagrečios viena kitai ir vertikaliajai ašiai.



3.11 pav. Kliūčių ruožo principinė schema: Rr – atstumas tarp suformuotų kliūčių lygus atstumui tarp roboto ratų ašių; Yr – kliūčių ruožo plotis didesnis už roboto plotį.

Kaip ir anksčiau aprašytuose važiavimuose matavimai pradedami prieš robotui pajudant iš vietos ir baigiami kai robotas visiškai sustoja pravažiavęs numatytą ruožą.

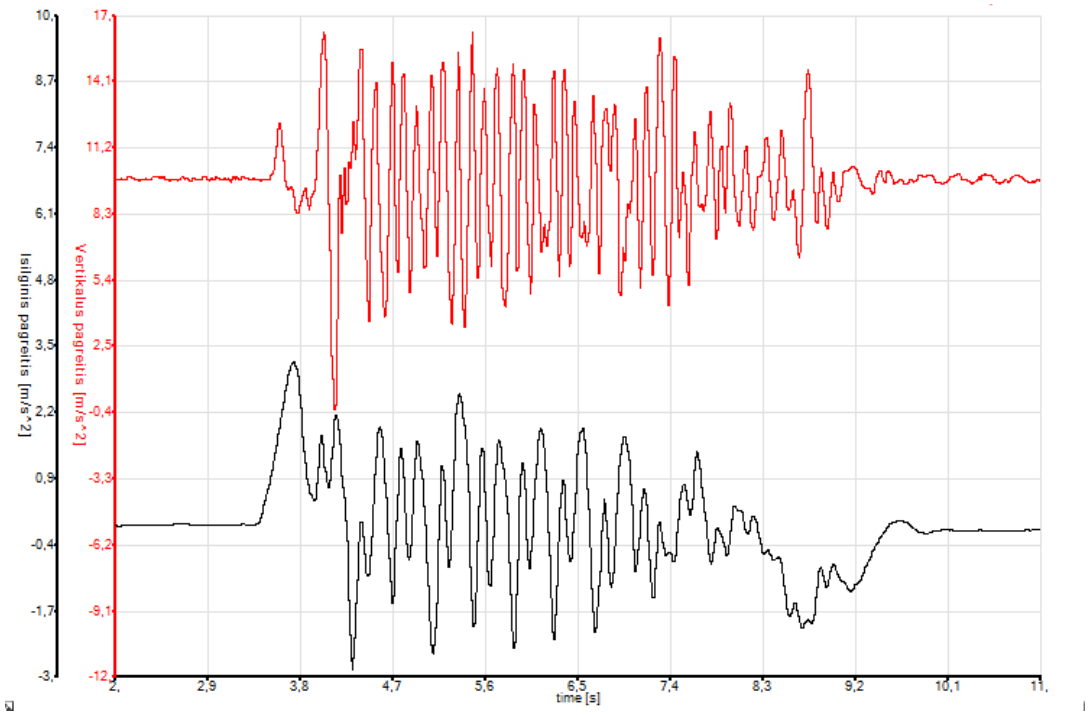


3.12 pav. Penktojo tyrimo trečiojo važiavimo rezultatai.

Vertindami šio bandymo rezultatus, kai robotas važiuoja per kliūtis galime matyti stipriai išaugusius pagreičius manipuliatoriaus griebtuve tiek išilgine tiek ir vertikalia ašimis. Iš susidarančių didelių svyravimų išilgine kryptimi, galime spręsti, kad nors ir mobilioji transporto priemonė važiuoja per kliūtis, kurios pagrinde sukuria tik vertikalų judesį, pats manipuliatorius pereina į svyravimo padėtį ne tik aukštyn – žemyn kryptimi, bet ir išilgine pirmyn – atgal.

Vertikalia kryptimi mažiausias pasiekiamas pagreitis yra 6,1 m/s^2, o didžiausias 12,52 m/s^2. Didžiausias pagreitis išilgine kryptimi yra 7,36 m/s^2, o mažiausias -10,45 m/s^2.

Paskutinysis bandymas yra atliekamas per tą pačią atkarpą su kliūtimis, tik manipuliatoriaus padėtis nustatoma į antrąją poziciją aprašytą šio poskyrio pradžioje, tai yra kai manipuliatoriaus grandys sudaro 90 laipsnių statųjį kampą. Toliau visa bandymo eiga atliekama analogiškai prieš tai aprašytai bandymo eigai.



3.13 pav. Penktojo tyrimo ketvirtojo važiavimo rezultatai.

Atlikus paskutiniojo bandymo važiavimą iš gautų rezultatų matome, kad važiuojant tuo pačiu kliūčių ruožu išilginiai manipuliatoriaus ketvirtosios grandies pagreičiai ženkliai sumažėjo, tai yra nuo didžiausio pasiektos reikšmės kuri siekė -10,45 m/s^2 praeito bandymo metu, šio bandymo metu tesiekė 3,18 m/s^2, tai yra beveik apie 3 kartus sumažėjęs pagreitis išilgine ašimi. Vis dėl to, lyginant rezultatus vertikaliąja ašimi matome priešingą rezultatą. Manipuliatoriaus grandims nustatytoms 90 laipsnių kampu matomas padidėjęs pagreitis matuojant vertikaliąja ašimi. Vertikaliąja ašimi didžiausias pasiekiamas pagreitis yra 16,31 m/s^2, o mažiausias – net -0,24 m/s^2.

Išvados

Pagal užsibrėžtus uždavinius baigiamajame magistro darbe buvo išanalizuoti mobilieji robotai su manipuliatoriais, kurie šiuo metu dažniausiai naudojami kariniais bei civilinio saugumo tikslais. Yra aiškiai pastebima pagrindiniai tokių manipuliatorių parametrai – tai gana didelė keliamoji galia pagal manipuliatoriaus dydį, bei gana didelis jų siekis aplink mobiliąją bazę. Taip pat išnagrinėti moksliniai straipsniai, susiję su tiriamuoju objektu padėjo įvertinti pagrindinius dinaminius procesus, vykstančius mobiliuosiuose manipuliatoriuose.

Sudarant dinaminį manipuliatoriaus modelį, buvo atskirai išnagrinėti kinematinis manipuliatoriaus grandžių modelis, dinaminis vieno judesio aktyvatoriaus – servomechanizmo dinaminis modelis bei dinaminis viso manipuliatoriaus modelis. Teoriškai išnagrinėto modelio dalis buvo sudaryta pasitelkiant „Maple“ ir „Microsoft Visual Studio“ su „Fortran“ paketu programines įrangas. Iš paskutiniosios manipuliatoriaus grandies (griebtuvo) modeliavimo rezultatų pagal minėtuosius modeliu galima daryti išvadą, kad griebtuvo judėjimo greičiai yra gana dideli, dėl to grandžiai sukantis į nustatytą padėtį yra sukuriami nemaži svyravimai stabdymo metu. Taip pat sumodeliuoti variklio veleno momento grafikai parodė, kad nustatytas manipuliatoriaus kampas yra išlaikomas trumpais, bet didelės jėgos sukimo momento impulsais, dėl to esant dideliam manipuliatoriaus apkrovimui, kuris siekė 48 % maksimalaus leidžiamo apkrovimo svorio, gali atsirasti papildomų nepageidaujamų virpesių.

Taip pat visas manipuliatorius buvo sumodeliuotas pasitelkiant „SIM-20“ programinę įrangą, su kurios pagalba buvo simuliuojami manipuliatoriaus judesiai užduodant įvairias sąlygas, atsižvelgiant į praktinio bandymo sąlygas. Iš gautų rezultatų, pateiktų grafikuose, galime pastebėti, jog manipuliatoriaus grandys mažiausią stabilumą turi kurios yra arčiausiai manipuliatoriaus pagrindo. Sukant tik manipuliatoriaus griebtuvą su papildomu svoriu (jutiklio svoriu) matome gana stabilų veikimą. Tačiau sukant antrąją ir trečiąją grandį galime aiškiai matyti didelius svyravimus, kurie atskleidžia, kad prie tokių parametrų manipuliatoriaus darbas yra nestabilus – svyravimai yra dideli bei trunka didelį laiko tarpą.

Atlikus realaus manipuliatoriaus dinaminius tyrimus, su jutikliu „IMU-06“ ir duomenų kaupikliu „DL1“, kiekvienai iš matuojamų ašių, gauti manipuliatoriaus kampinių greičių bei tiesinių pagreičių parametrai, kurie pateikiami grafiškai priklausomybe nuo laiko. Iš šių grafikų matomi, gana dideli kampinių greičių svyravimai, susidarantys tiriamo manipuliatoriaus griebtuve. Šie svyravimai, kaip ir modeliavimo metu, didėja, jeigu yra sukama grandis esanti arčiau pagrindo.

Kai kurių bandymu metu netgi neužteko manipuliatoriaus keliamosios jėgos tinkamam tyrimo įvykdymui, todėl kai kurie tyrimų etapai buvo koreguojami pagal manipuliatoriaus galimybes.

Taip pat užfiksuoti duomenys bandymų metu, kai manipuliatorius buvo nustatytas į iš anksto numatytą padėtį ir visu robotu važiuojant per numatytą atkarpą atskleisti dideli pagreičiai, susidarantys manipuliatoriaus paskutinėje grandyje. Šių pagreičių dydis tiesiogiai priklauso nuo manipuliatoriaus padėties važiavimo metu.

Tiek iš modeliavimo metu, tiek ir iš praktinių bandymų gautų rezultatų galime daryti išvadą, jog manipuliatorius su papildomu 175 gramų svoriu stabiliai veikia tik jei sukama yra paskutinioji grandis. Dėl susidarančio didesnio peties tolimesniems servomechanizmams nepakanka galios tinkamai dirbti su tokiomis apkrovomis.

Lyginant gautus tiriamojo manipuliatoriaus parametrus su apžvalgoje pateiktais manipuliatoriais, kurių paskirtis yra analogiška, galime daryti prielaidą, kad šio manipuliatoriaus keliamoji galia yra ženkliai per maža. Taip pat maksimalus šio manipuliatoriaus siekis yra ženkliai mažesnis už potencialių konkurentų naudojamus manipuliatorius.

Tačiau, tiriamasis manipuliatorius, sumontuotas ant Generolo Jono Žemaičio Lietuvos karo akademijoje sukurtos mobiliosios bazės, yra tik prototipas, skirtas visai koncepcijai apjungti į veikiantį viso mobiliojo roboto prototipą, kuris bus tobulinamas toliau.

Literatūros sąrašas

AL5D Robotic Arm Combo Kit [interaktyvus]. 2014. Žiūrėta 2014 m. gegužės 15 d. Prieiga per internetą: <http://www.lynxmotion.com/p-816-al5d-robotic-arm-combo-kit-no-software.aspx>.

Bakšys, B.; Fedaravičius A. 2004. *Robotų technika*. Kaunas: Technologija. 494 p.

Braun, J. 2012. *Formulae Handbook.* Sachseln: Maxon academy. 60 p.

Brushed DC Motor Theory [interaktyvus]. 2011. Žiūrėta 2014 m. balandžio 30 d. Prieiga per internetą: < http://hades.mech.northwestern.edu/index.php/Brushed_DC_Motor_Theory>.

Controllab Products [interaktyvus]. 2014. Žiūrėta 2014 m. gegužės 20 d. Prieiga per internetą <http://www.20sim.com/home/whatis20sim.html>.

Corke, P. 2011. *Robotics, Vision and Control*. Berlin: Springer-Verlag. 558 p.

Craig, J. J. 2005. *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall. 408 p.

Dunnigan, M. W.; Wronka, C. M. 2010. *Comparison of control techniques for a robotic manipulator with base disturbances*. IET Control Theory Appl., 2011, Vol. 5, Iss. 8, pp. 999–1012 p.

DS1-MA specifications – RE2 Inc. [interaktyvus]. 2012. Žiūrėta 2013 m. vasario 09 d. Prieiga per internetą: <http://www.resquared.com/products/manipulators/ds1-ma/ds1-ma-specs/>.

Equipment details [interaktyvus]. 2013. Žiūrėta 2013 m. sausio 30 d. Prieiga per internetą: <http://www.toshiba-machine.com/CSProductDetails.aspx?dept=4&machine_id=111>.

H-840 6-Axis Hexapod [interaktyvus]. 2014. Žiūrėta 2014 m. gegužės 01 d. Prieiga per internetą: <http://www.physikinstrumente.com/en/products/primages.php?sortnr=700811&picview=1#gallery>.

iRobot 510 PackBot – specifications [interaktyvus]. 2012. Žiūrėta 2013 m. vasario 10 d. Prieiga per internetą: <http://www.irobot.com/us/robots/defense/packbot/Specifications.aspx>.

Korayem, M. H.; Ghariblu, H.; Basu, A. 2005. *Dynamic load-carrying capacity of mobile-base flexible joint manipulators.* Int J Adv Manuf Technol (2005) 25: 62–70 p.

Kucuk, S.; Bingul, Z. 2006. Robot Kinematics: Forward and Inverse Kinematics, Industrial Robotics: Theory, Modelling and Control. InTech.

MK2 robotic arm, HDT global [interaktyvus]. 2012. Žiūrėta 2013 m. vasario 11 d. Prieiga per internetą: <http://www.hdtglobal.com/products/robotics/mk2-robotic-arm/>.

Motor control [interaktyvus]. 2013. Žiūrėta 2014 m. balandžio 30 d. Prieiga per internetą: <http://www.homofaciens.de/bilder/technik/servos_009g.gif>.

Movellan, J. R. 2010. *DC Motors*. 17 p.

Parallel manipulator [interaktyvus]. 2012. Žiūrėta 2013 m. sausio 30 d. Prieiga per internetą: <http://en.wikipedia.org/wiki/Parallel_manipulator>.

Race technology [interaktyvus]. 2014. Žiūrėta 2014 m. gegužės 01 d. Prieiga per internetą <http://www.race-technology.com/home_2.html>.

Rogers, J. R. 2009. *Low-cost teleoperable robotic arm*. Mechatronics 19 (2009) 774–779 p.

Ross, R. 2014. Investigation into soft-start techniques for driving servos. Mechatronics 24 (2014) 79–86 p.

Salehi, M.; Vossoughi, G. R. 2009. High-Precision Impedance Control Method for Flexible Base *Moving Manipulators.* Advanced Robotics 23 (2009): 65–87 p.

Serial Manipulator [interaktyvus]. 2012. Žiūrėta 2013 m. sausio 30 d. Prieiga per internetą: <http://en.wikipedia.org/wiki/Serial_manipulator>.

Talon – Qinetiq North America [interaktyvus]. 2012. Žiūrėta 2013 m. vasario 09 d. Prieiga per internetą: <http://www.qintetiq-na.com/talon>.

The U.S. Army - iRobot PackBot [interaktyvus]. 2009. Žiūrėta 2013 m. sausio 30 d. Prieiga per internetą: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Flickr_-_The_U.S._Army_-_iRobot_PackBot.jpg>.

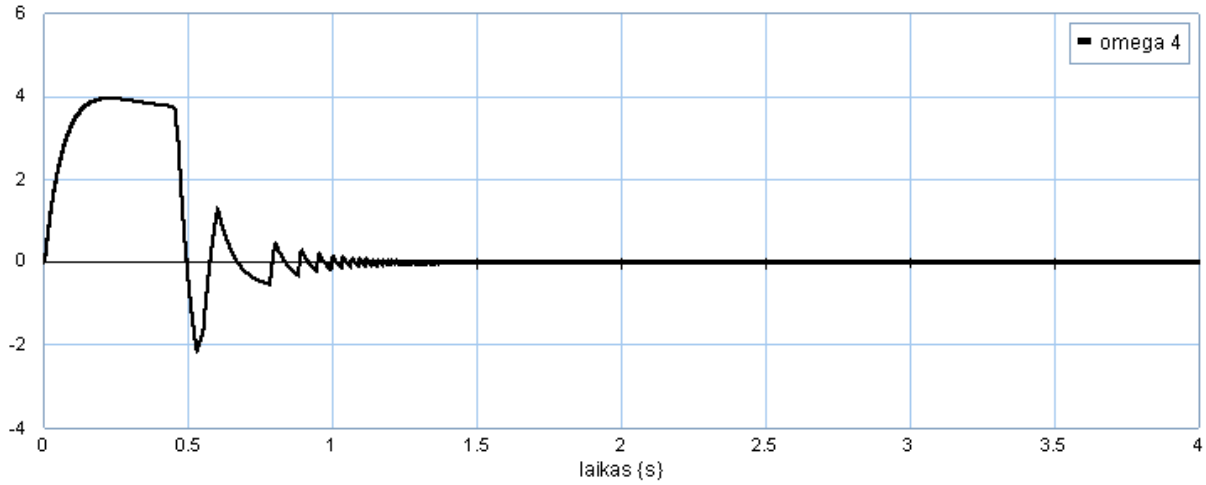
Tsai, L. W. 1999. Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators. New York: John Wiley & Sons, inc. 520 p.

Priedai

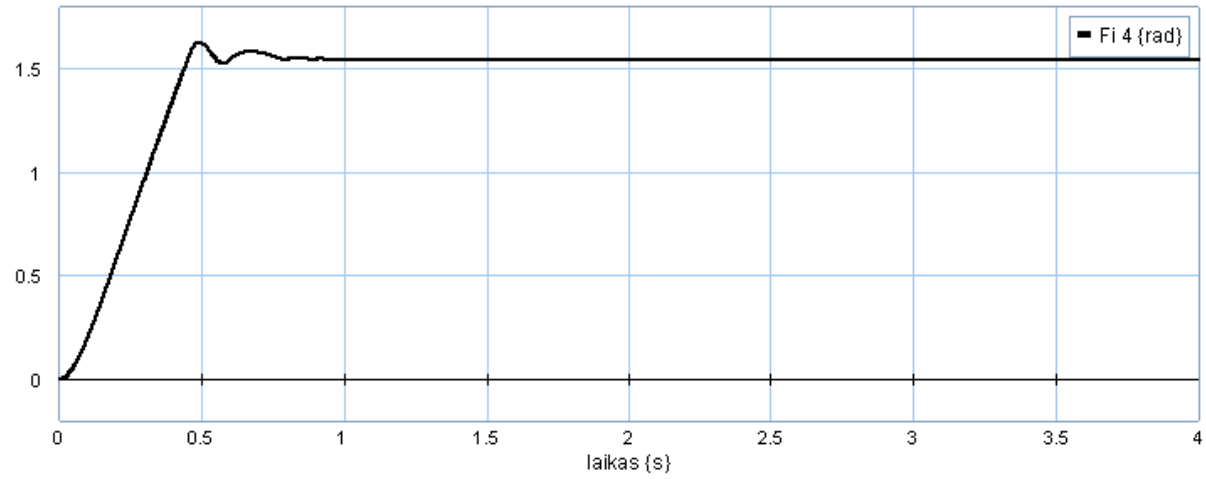
A priedas

Dinaminio modelio simuliacijos rezultatai gauti su programa „SIM-20“, kai sukamas griebtuvas 90 laipsnių kampu į viršų, su trečiosios grandies standžiu įtvirtinimu.

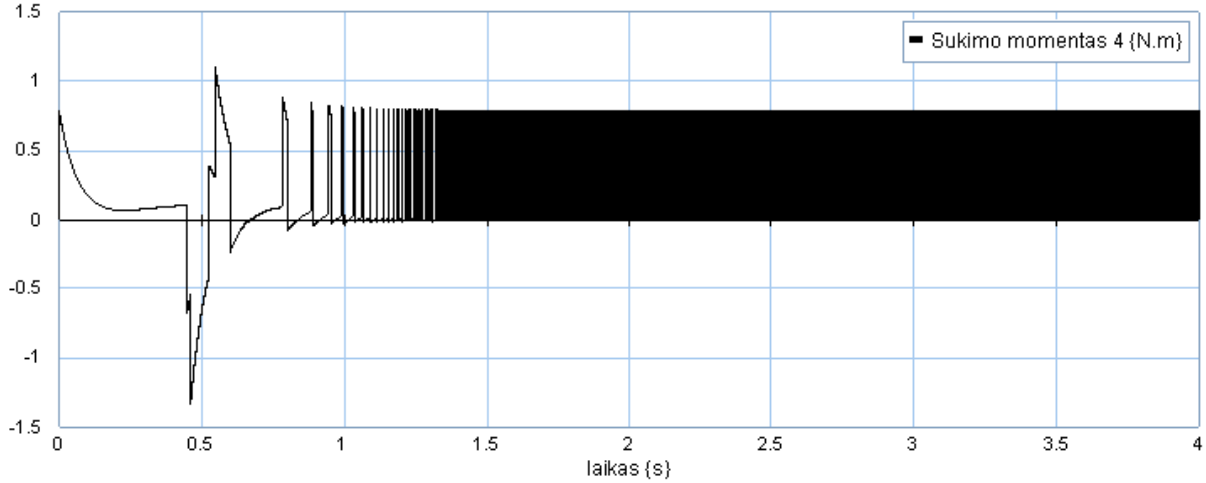
Griebtuvo absoliutus kampinis greitis (rad/s):



Griebtuvo absoliutus kampas (rad):



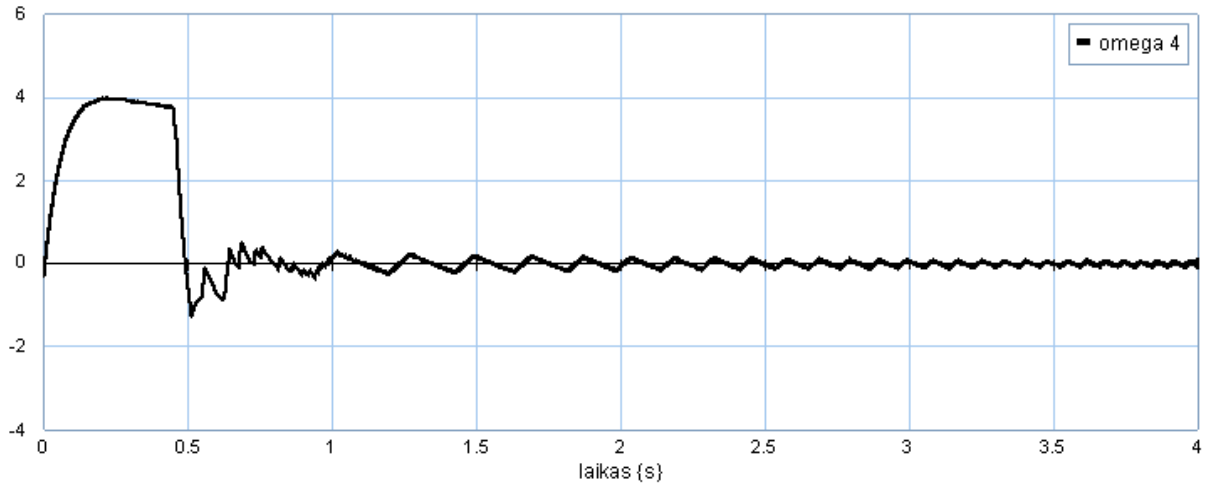
Kiekvieno servo–mechanizmo sukimo momentai (Nm):



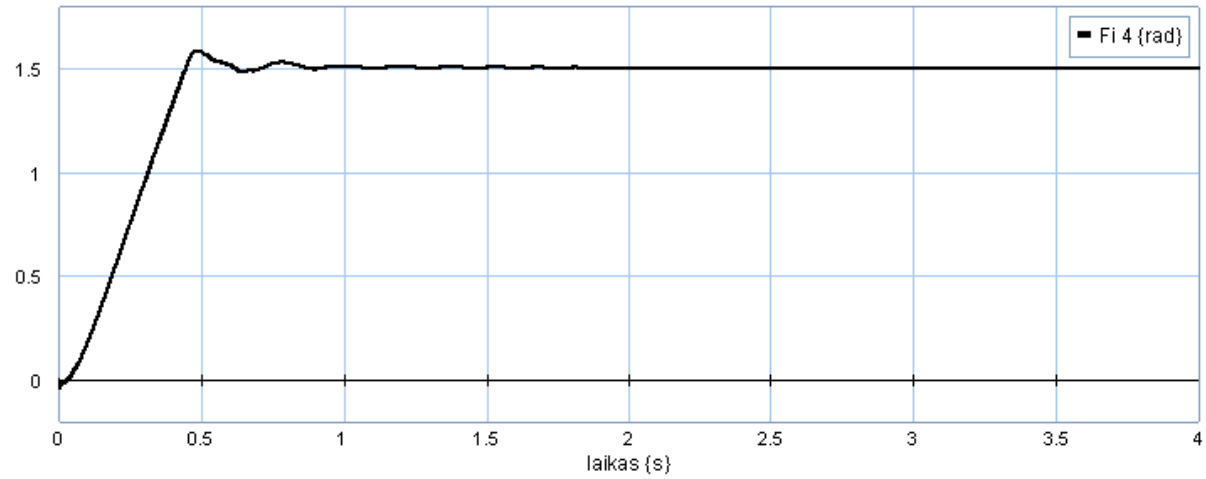
B priedas

Dinaminio modelio simuliacijos rezultatai gauti su programa „SIM-20“, kai sukamas griebtuvas 90 laipsnių kampu į viršų, be standaus įtvirtinimo.

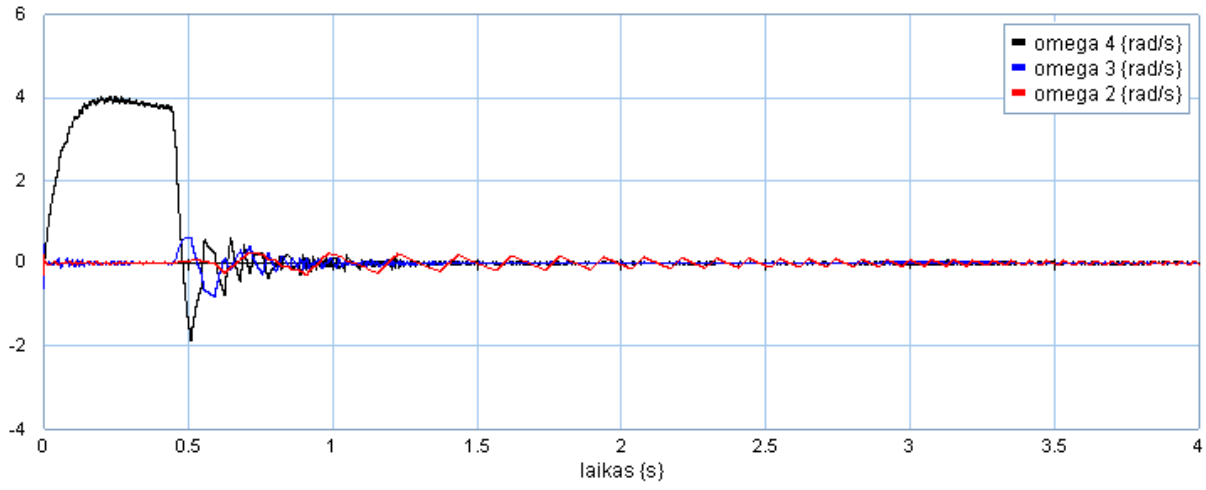
Griebtuvo absoliutus kampinis greitis (rad/s):



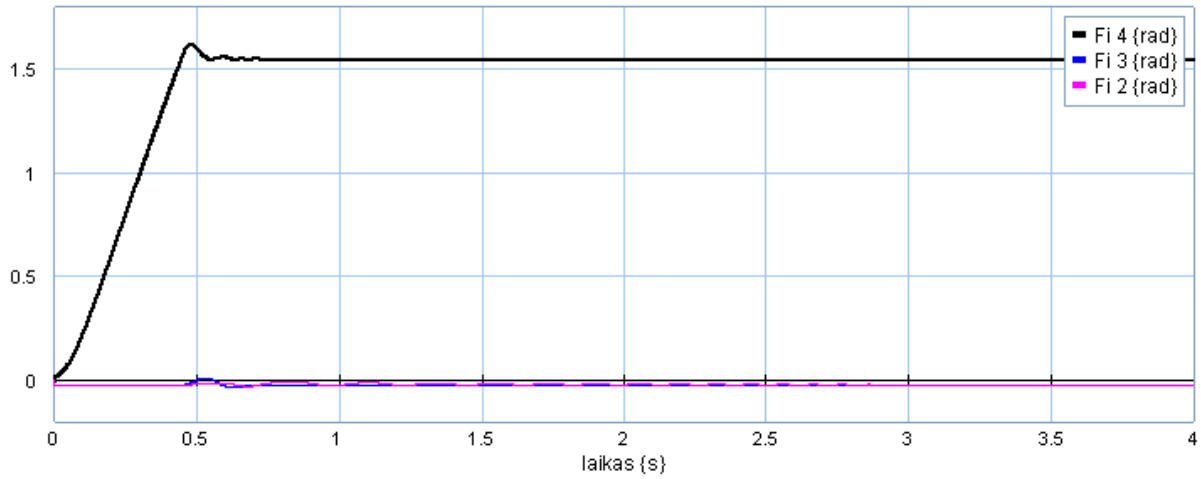
Griebtuvo absoliutus kampas (rad):



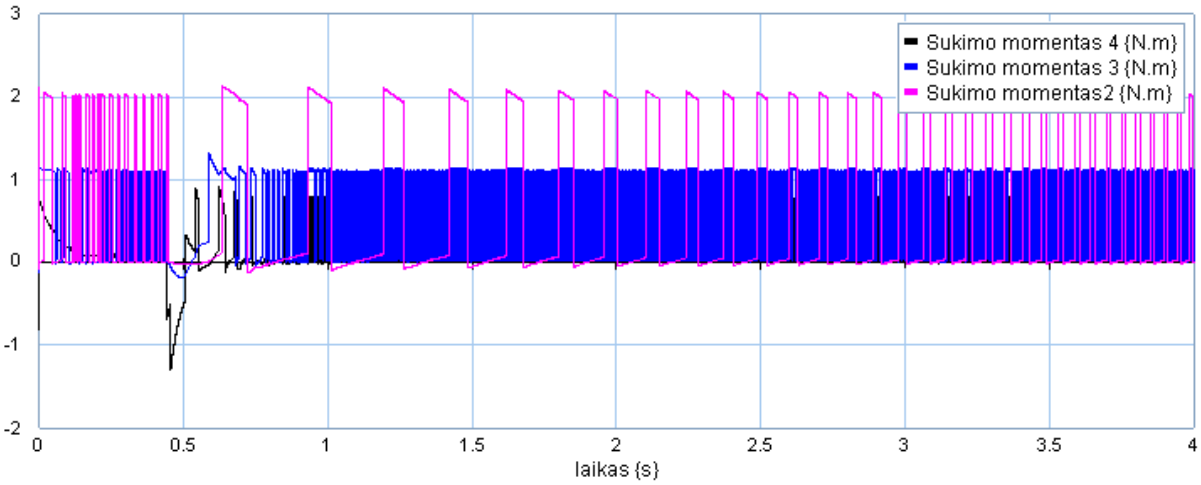
Kiekvienos grandies kampiniai greičiai atskirai (rad/s):



Kiekvienos grandies pasisukimo kampas atskirai (rad):



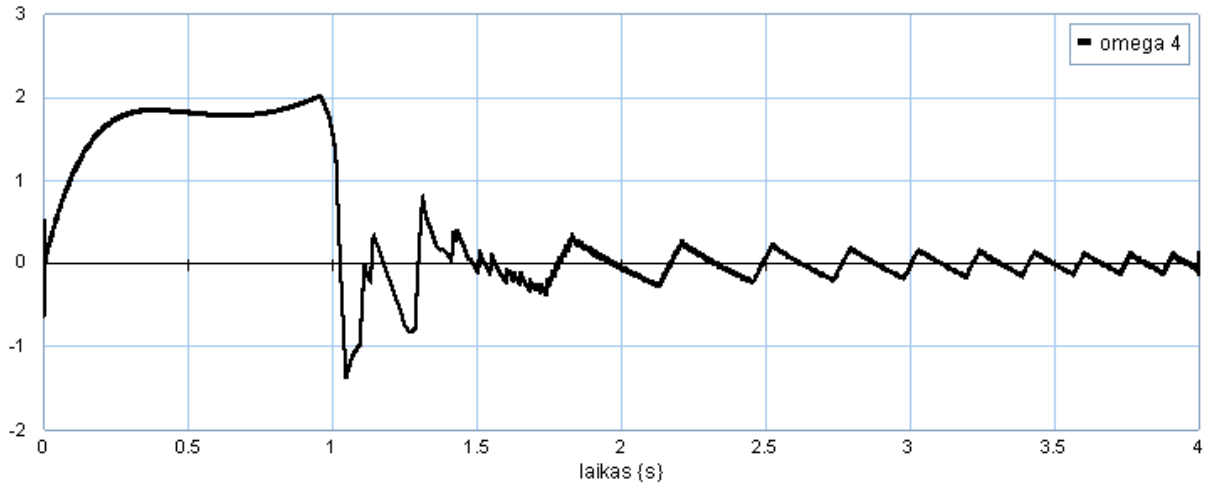
Kiekvieno servo–mechanizmo sukimo momentai (Nm):



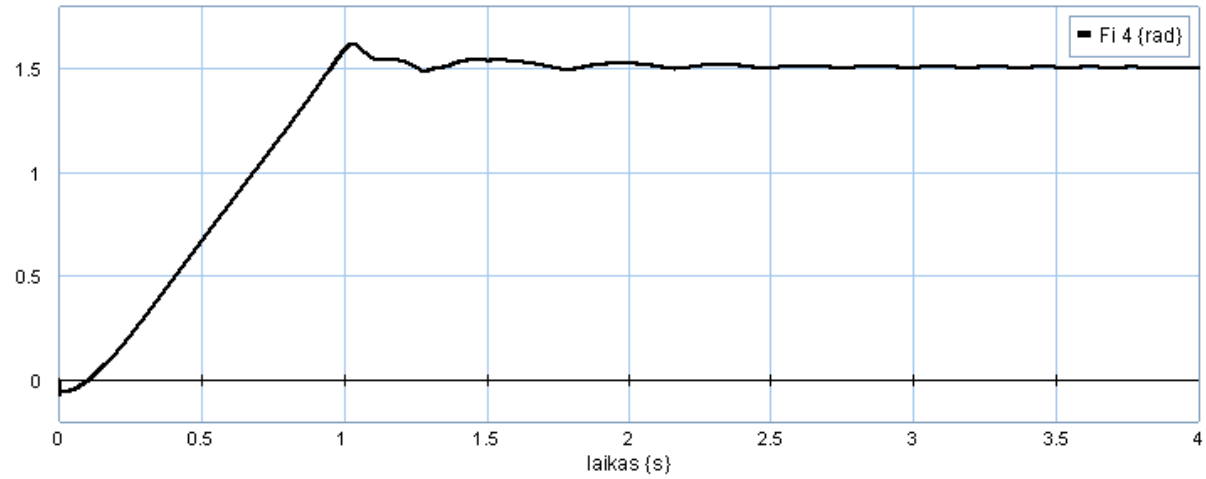
C priedas

Dinaminio modelio simuliacijos rezultatai gauti su programa „SIM-20“, kai sukama trečioji grandis 90 laipsnių kampu aukštyn.

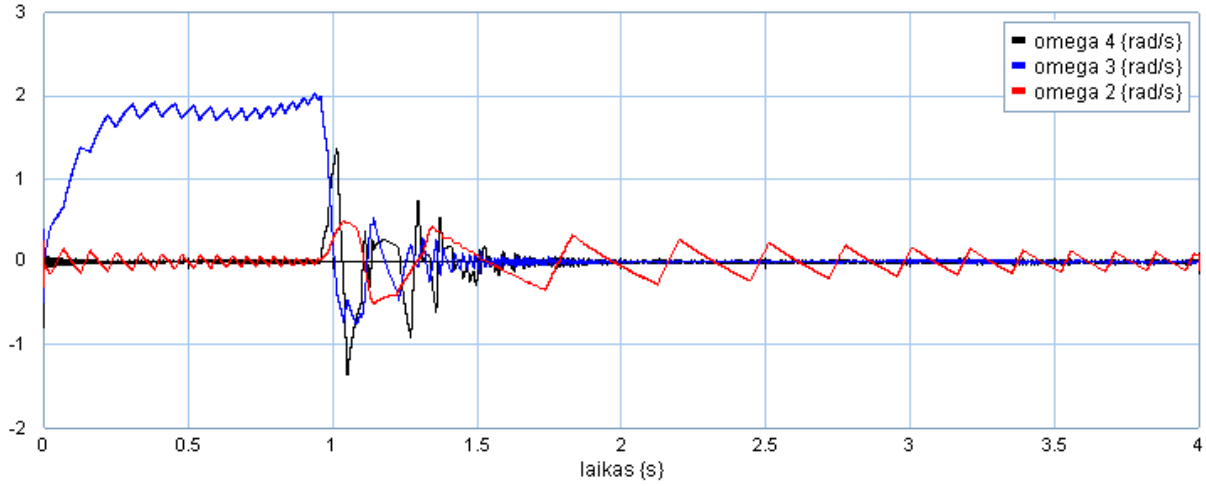
Griebtuvo absoliutus kampinis greitis (rad/s):



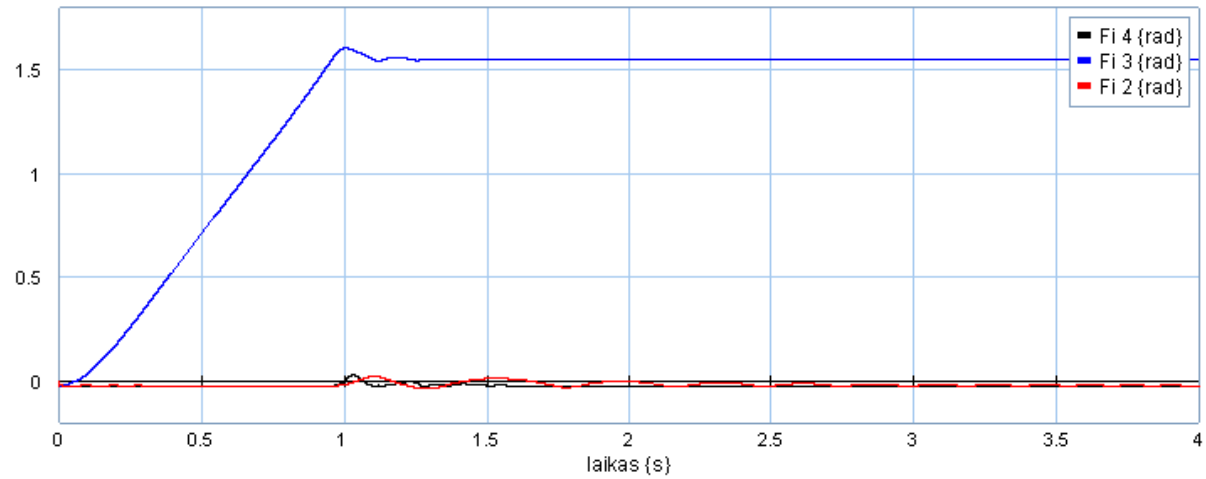
Griebtuvo absoliutus kampas (rad):



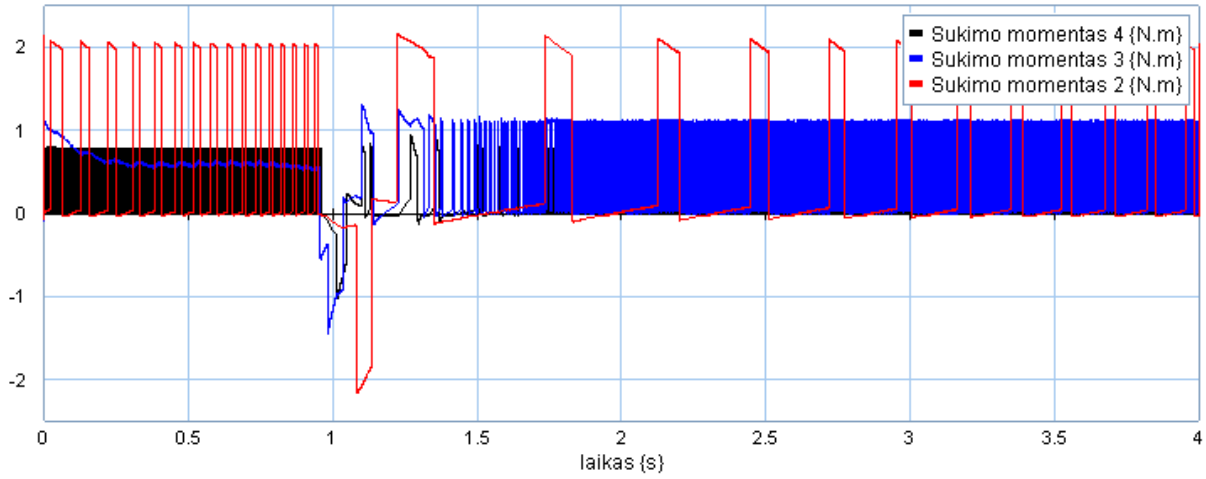
Kiekvienos grandies kampiniai greičiai atskirai (rad/s):



Kiekvienos grandies pasisukimo kampas atskirai (rad):



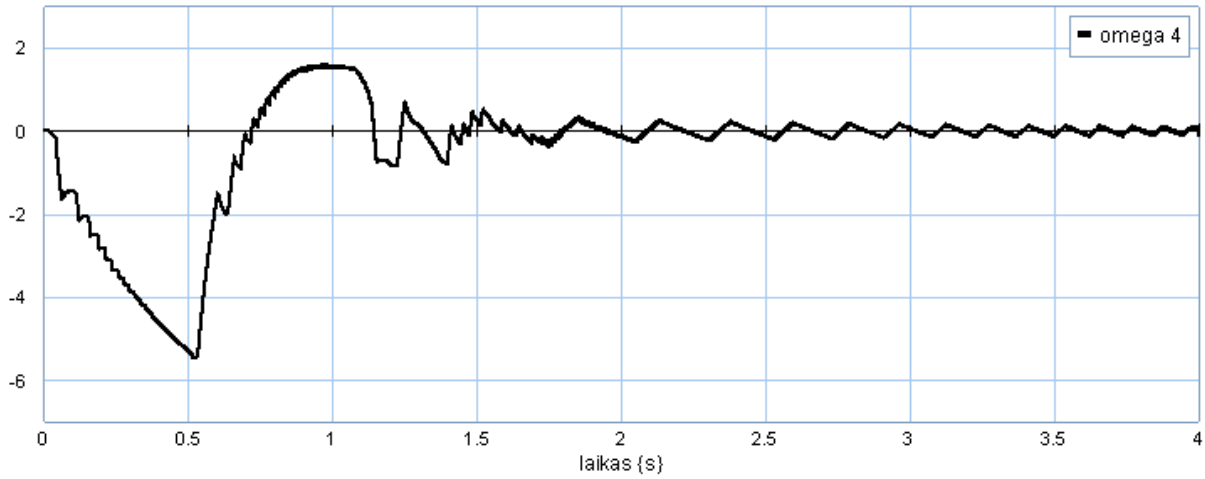
Kiekvieno servo–mechanizmo sukimo momentai (Nm):



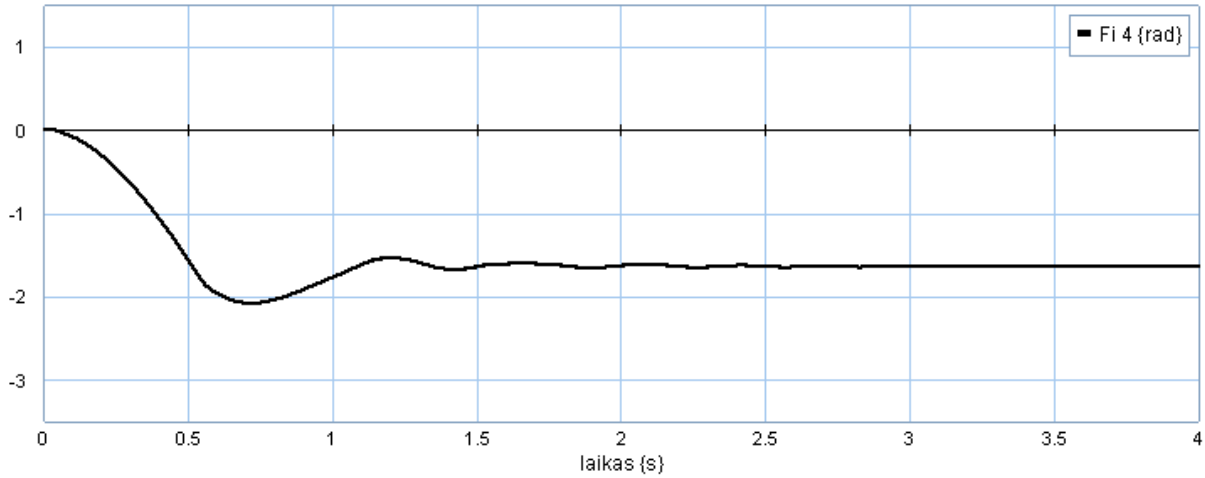
D priedas

Dinaminio modelio simuliacijos rezultatai gauti su programa „SIM-20“, kai sukama trečioji grandis 90 laipsnių kampu žemyn iš vertikalios padėties į horizontalią.

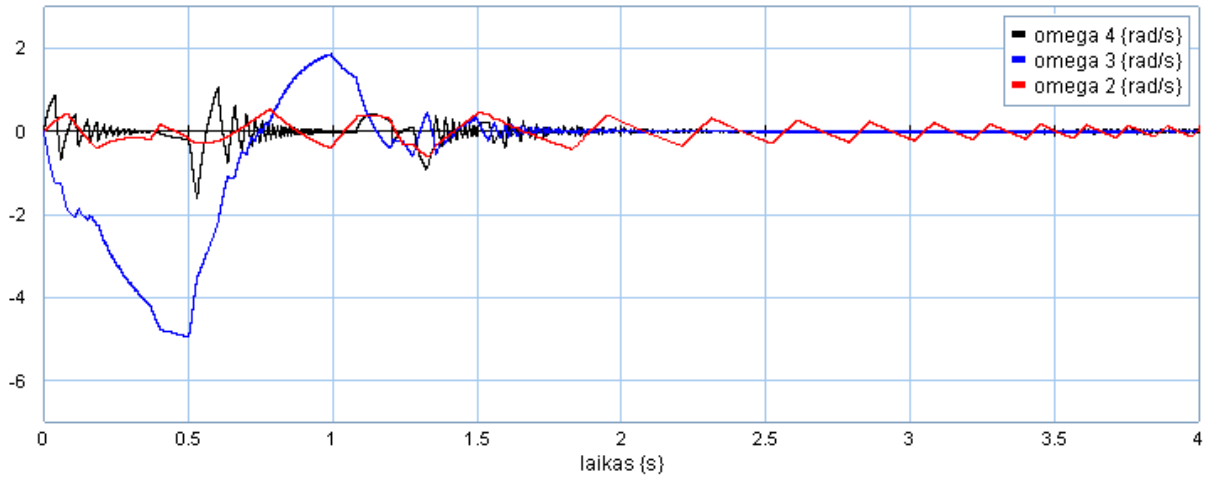
Griebtuvo absoliutus kampinis greitis (rad/s):



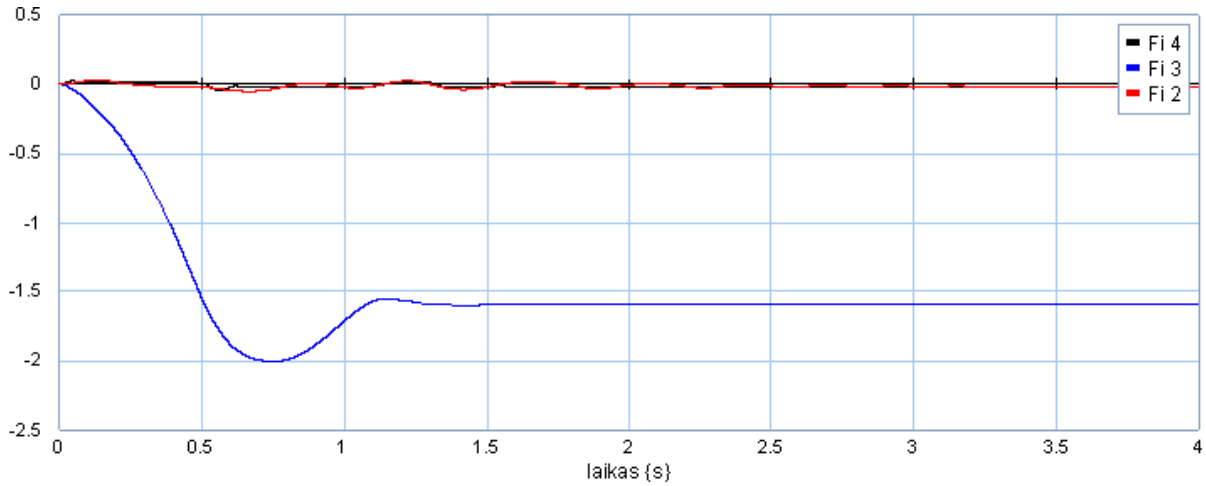
Griebtuvo absoliutus kampas (rad):



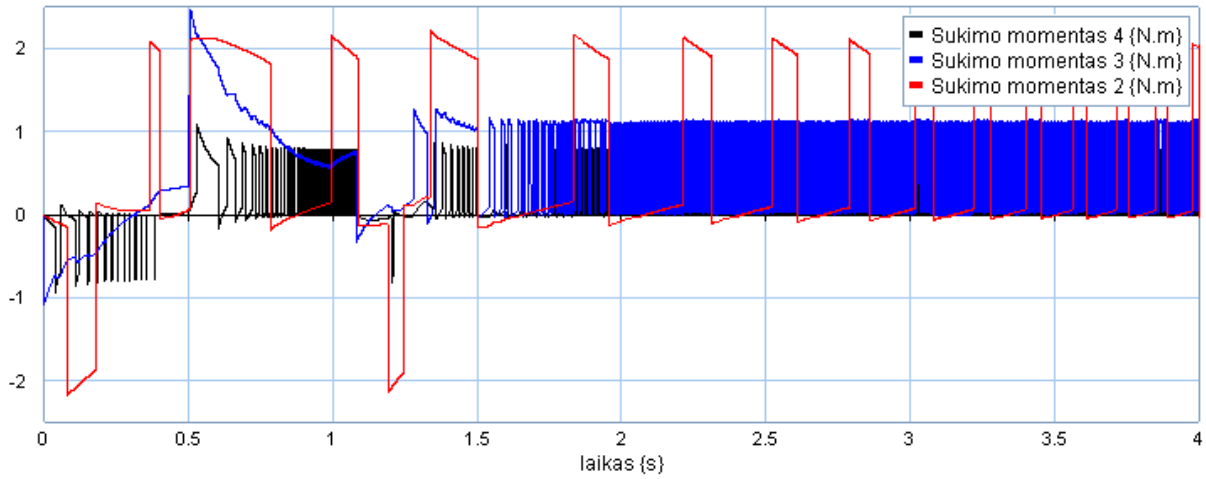
Kiekvienos grandies kampiniai greičiai atskirai (rad/s):



Kiekvienos grandies pasisukimo kampas atskirai (rad):



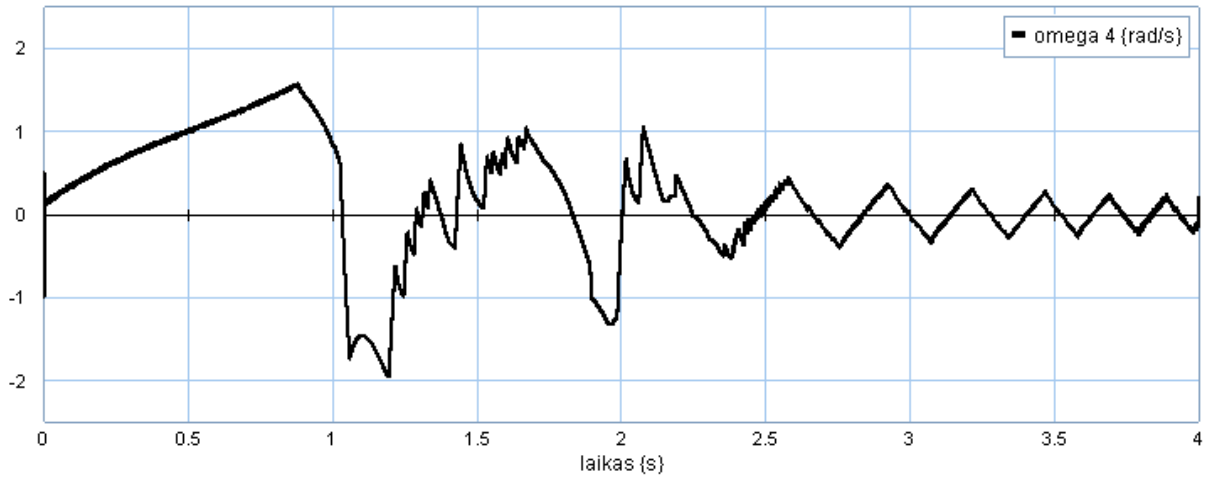
Kiekvieno servo–mechanizmo sukimo momentai (Nm):



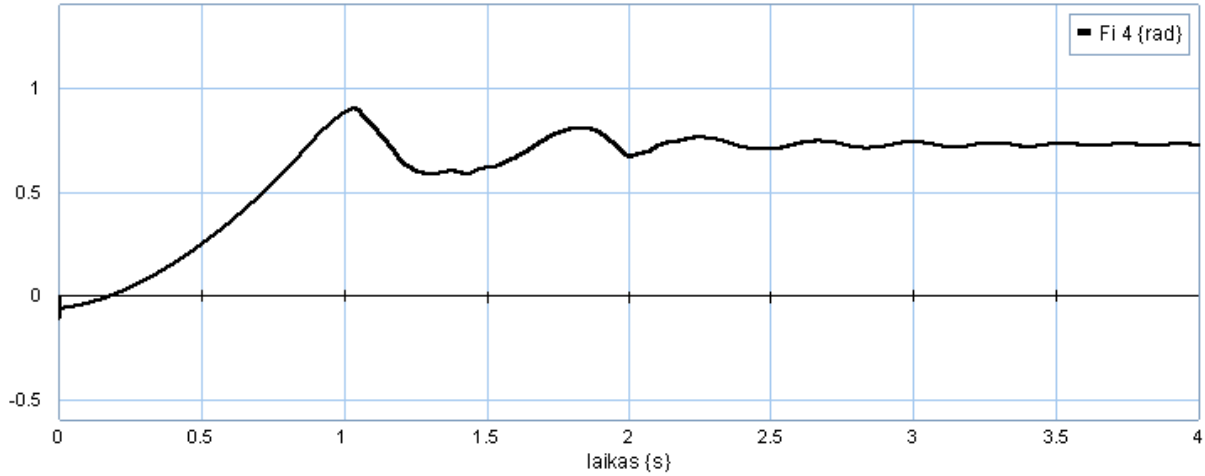
E priedas

Dinaminio modelio simuliacijos rezultatai gauti su programa „SIM-20“, kai sukama antroji grandis 45 laipsnių kampu aukštyn iš horizontalios padėties.

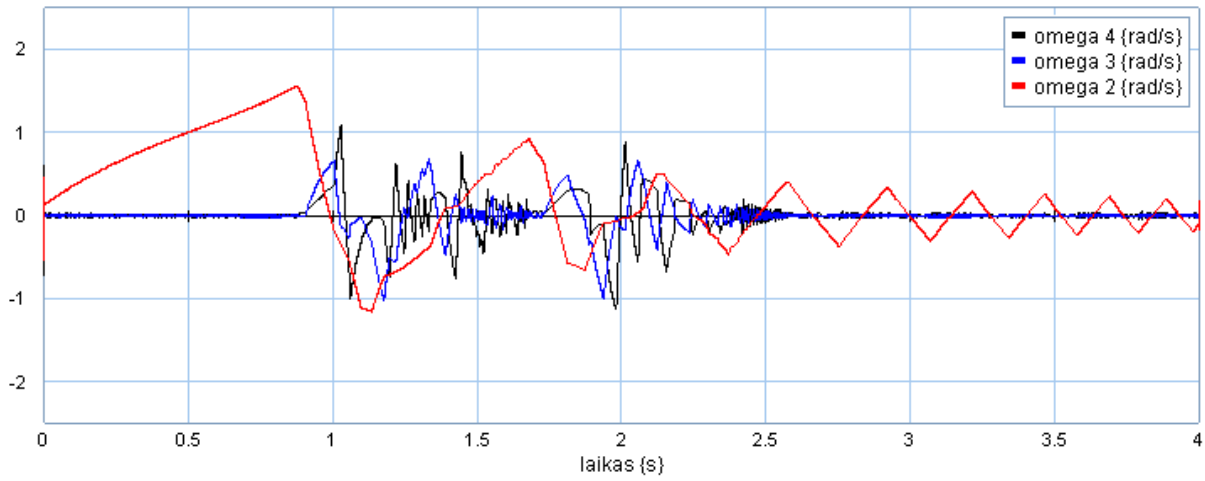
Griebtuvo absoliutus kampinis greitis (rad/s):



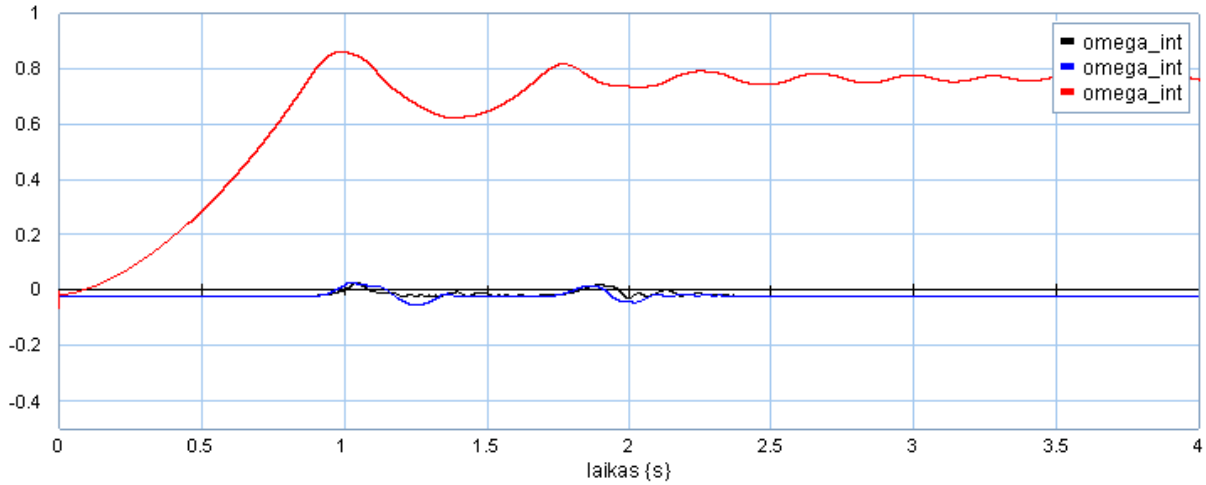
Griebtuvo absoliutus kampas (rad):



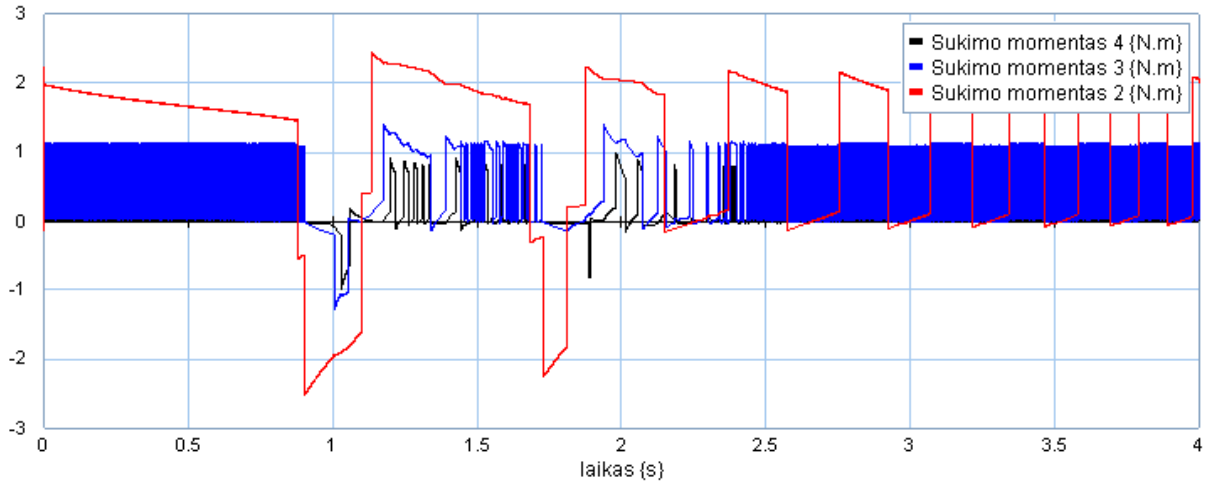
Kiekvienos grandies kampiniai greičiai atskirai (rad/s):



Kiekvienos grandies pasisukimo kampas atskirai (rad):



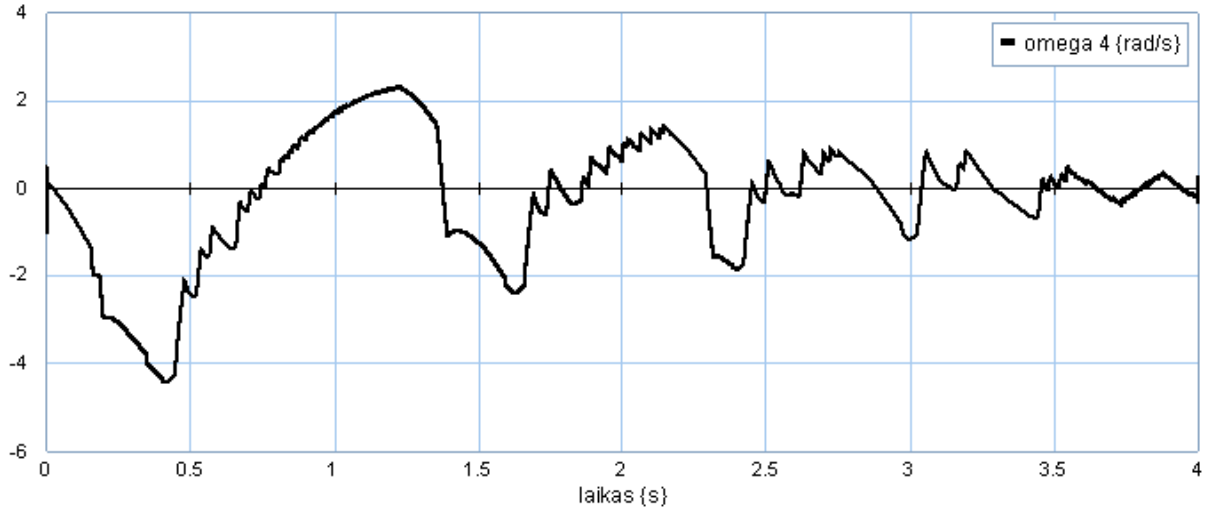
Kiekvieno servo–mechanizmo sukimo momentai (Nm):



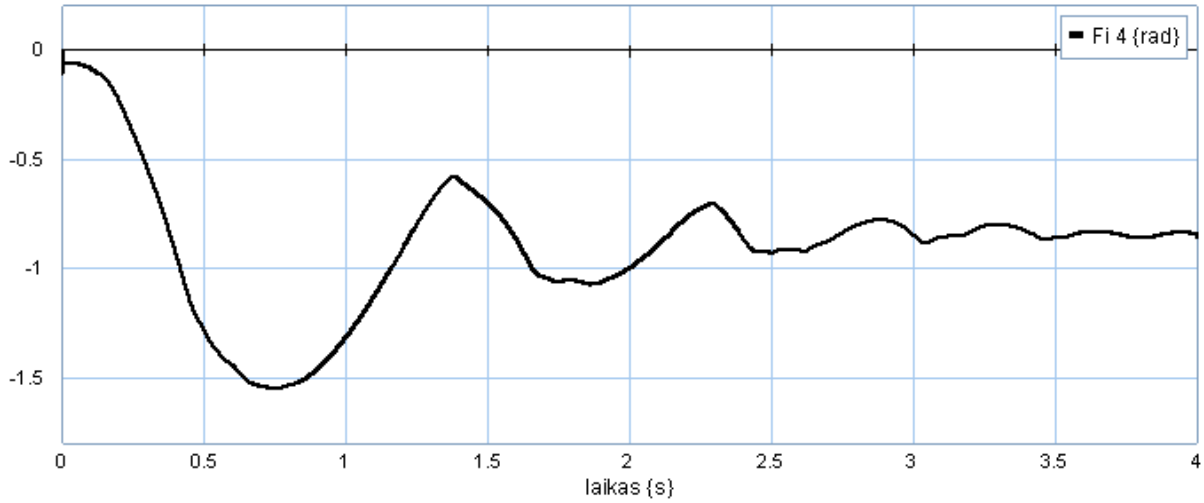
F priedas

Dinaminio modelio simuliacijos rezultatai gauti su programa „SIM-20“, kai sukama antroji grandis 45 laipsnių kampu žemyn iš horizontalios padėties.

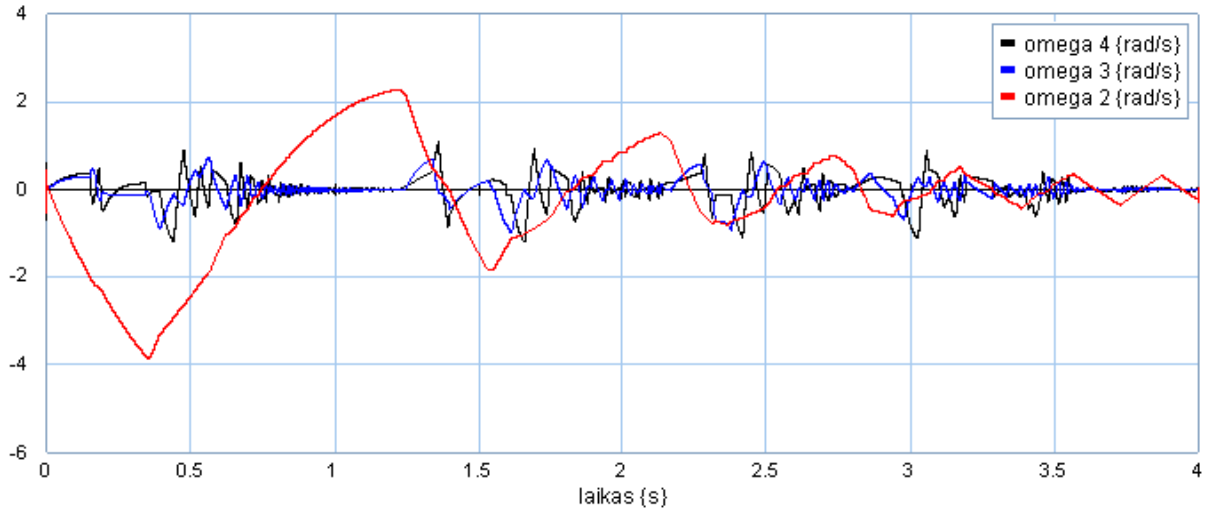
Griebtuvo absoliutus kampinis greitis (rad/s):



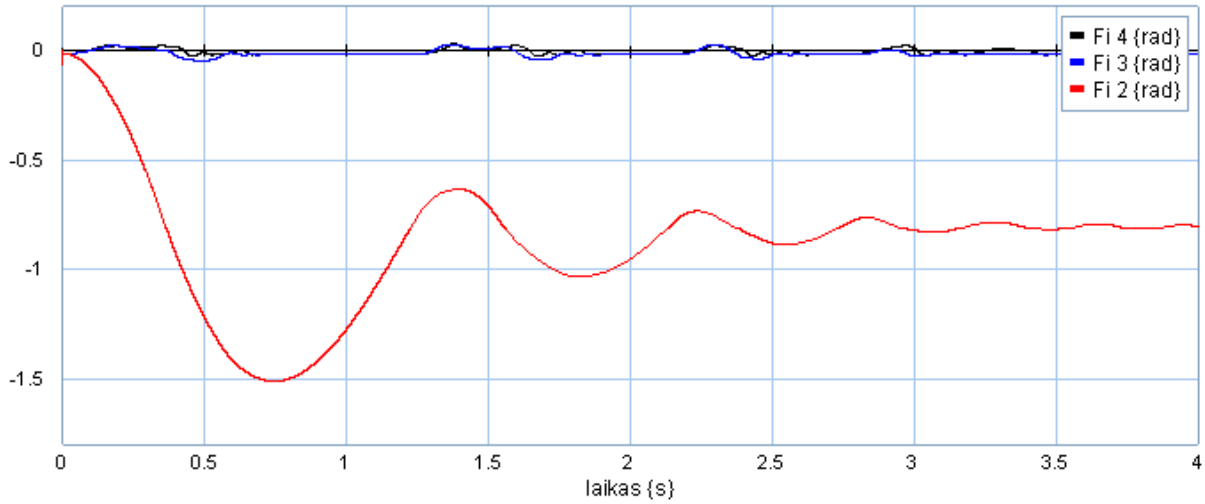
Griebtuvo absoliutus kampas (rad):



Kiekvienos grandies kampiniai greičiai atskirai (rad/s):



Kiekvienos grandies pasisukimo kampas atskirai (rad):



Kiekvieno servo–mechanizmo sukimo momentai (Nm):

