



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Saulius Aleksandravičius

PRECIZINĖ KAMPINIO POZICIONAVIMO SISTEMA

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas :
Prof. dr. Darius Gailius

KAUNAS, 2018

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

ELEKTRONIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

PRECIZINĖ KAMPINIO POZICIONAVIMO SISTEMA

Baigiamasis magistro projektas
Elektronikos inžinerija (kodas 621H61002)

Vadovas

(parašas) Prof. dr. Darius Gailius

(data)

Recenzentas

(parašas) Doc. dr. Marius Saunoris

(data)

Projektą atliko

(parašas) Saulius Aleksandravičius

(data)

KAUNAS, 2018



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Saulius Aleksandravičius

(Studento vardas, pavardė)

Elektronikos inžinerija 621H61002

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Precizinė kampinio pozicionavimo sistema“

AKADEMINIO SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

20 18 m. gegužės 22 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Sauliaus Aleksandravičiaus** baigiamasis projektas tema „Precizinė kampinio pozicionavimo sistema“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Aleksandravičius, Saulius. „Precizinė kampinio pozicionavimo sistema“. Magistro Elektronikos inžinerijos baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Darius Gailius; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektronikos inžinerijos katedra.

Mokslo kryptis ir sritis: Elektros ir elektronikos inžinerija, Technologiniai mokslai

Reikšminiai žodžiai: *kampinis pozicionavimas, PID, segmentinis kampinis variklis, kampo jutiklis.*

Kaunas, 2018. 47 p.

SANTRAUKA

Šio darbo tikslas – ištirti skirtingų kampo jutiklių ir PID valdymo algoritmo atskirų koeficientų įtaką kampinio pozicionavimo sistemos valdymo parametrams. Apžvelgtos precizinio pozicionavimo sistemos ir galimi kampo matavimo jutikliai iš kurių pasirinkti trys: magnetinis kampo jutiklis A1335, kartu naudojant 12 polių magnetą, inkrementinis optinis enkoderis A58F ir lazerio spindulio projektavimas ant optinės liniuotės TSL1402R. Atliktas kampo matavimo jutiklių tyrimas parodė, kad pats tiksliausias jutiklis yra optinis inkrementinis enkoderis, kurį naudojant kampinio pozicionavimo sistema valdė pasisukimo kampą $0,00168^\circ$ tikslumu. Mažiausia tikslumas pasiektas naudojant magnetinį kampo jutiklį A1335 kartu su 12 polių magnetu. Absoliutinė kampo pozicionavimo paklaidos vidurkis šiuo atveju yra $0,0561^\circ$. Taip pat atliktas PID valdymo koeficientų įtakos kampinio pozicionavimo sistemos valdymo charakteristikoms tyrimas. Tyrimas patvirtino iškeltas hipotezes:

1. Didelę įtaką kampinio pozicionavimo tikslumui turi jutiklio rezoliucija.
2. PID valdymo algoritme didžiausia įtaką valdymo tikslumui turi integralinė dalis.
3. Kampo pervaldymui didžiausią įtaką daro proporcinė ir integralinė dalys.
4. PID integralinė dalis prailgina sistemos kampo nusistovėjimo laiką.

Aleksandravičius, Saulius. Precision Angular Positioning System: Master's thesis in Electronics Engineering / supervisor assoc. prof. Darius Gailius. Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Electronic engineering

Research area and field: Electrical and Electronics Engineering, Technological Sciences

Key words: angular positioning, PID, voice coil motor, angle sensor.

Kaunas, 2018. 47 p.

SUMMARY

The aim of this paper is to investigate the influence of different angle sensors and individual PID control algorithm on the control parameters of the angular positioning system. An overview of precision positioning systems and possible angular measurement sensors, of which three are chosen: magnetic angle sensor A1335, combined with a 12-pole magnet, an incremental optical encoder A58F and laser beam aimed on the TSL1402R linear sensor array. An analysis of angle sensors has shown that the most accurate sensor is an optical encoder, with which an angular positioning system to control a turning point with an accuracy of 0.00168° . The minimum accuracy is achieved using the magnetic angle sensor A1335 along with the 12-pole magnets. The absolute angular positioning error in this case is 0.0561° . A study of the influence of PID control coefficients on the control characteristics of the angular positioning system was also performed. The research confirmed the hypothesis:

1. Sensor resolution has a great influence on the accuracy of angular positioning.
2. In the PID control algorithm integral part has greatest influence on the accuracy of angular positioning.
3. The proportional and integral parts make the greatest impact on the angle overshooting.
4. The integral part of the PID extends the system settling time.

TURINYS

IVADAS.....	7
1. APŽVALGINĖ DALIS.....	8
1.1. Kampinio pozicionavimo sistemos	8
1.2. Ašies pasisukimo kampo matavimo jutikliai	10
1.2.1. Rezistyvnis kampo jutiklis	10
1.2.2. Talpinis kampo jutiklis.....	10
1.2.3. Inkrementinis enkoderis	12
1.2.4. Absoliutinis optinis enkoderis.....	13
1.2.5. Resolveris.....	14
1.2.6. Magnetiniai Holo jutikliai	15
1.2.7. Optinis metodas naudojant lazerį	16
2. MATAVIMO METODŲ PASIRINKIMAS IR ANALIZĖ	18
2.1. Kampo jutiklių analizė.....	18
2.2. Kampinio pozicionavimo sistemos modelis	22
2.2.1. PID valdiklio modelis	22
2.2.2. Segmentinio kampinio variklio ir PID valdiklio matematinis modelis.....	24
2.2.3. Modeliavimo rezultatai	25
2.3. Kampinio pozicionavimo sistemos tyrimo maketas	27
2.4. Kampinio pozicionavimo sistemos tyrimo metodika	29
3. TYRIMO REZULTATAI	32
3.1. Kampinio pozicionavimo sistemos tyrimo rezultatų apibendrinimas.....	42
IŠVADOS IR PASIŪLYMAI.....	44
INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS	45
PRIEDAI.....	48
Priedas 1 Kampinio pozicionavimo sistemos pereinamosios charakteristikos, esant skirtingiems PID koeficientams.....	48

IVADAS

Pramoninių robotų poreikis pasaulyje kiekvienais metais didėja, taip pat robotai pritaikomi vis naujose pramonės ir buities srityse. Pramoninių robotų pardavimai 2016 metais padidėjo 16% ir pasiekė 294312 vienetų parduotų robotų per metus. Iki 2020 metų prognozuojamas vidutinis 15% pardavimų augimas kiekvienais metais [32]. Todėl įvairiose pramonės ir mokslo srityse yra vis didesnis poreikis tiksliai pasukti sistemą pritvirtintą prie ašies. Tam reikalingos tikslios kampinio pozicionavimo sistemos. Kampinio pozicionavimo sistemos gali būti įvairių konstrukcijų, tačiau dažniausiai ją sudaro: pavara, jos valdiklis ir grįžtamasis ryšys, nusakantis ašies poziciją.

Priklausomai nuo spendžiamos užduoties ir pasirinkto pavaros tipo, grįžtamojo ryšio tikslumas gali turėti didžiausią įtaką, sistemos kampinio pozicionavimo tikslumui. Todėl labai svarbu pasirinkti tinkamiausią pagal konstrukciją ir tiksliausią ašies pasisukimo kampo jutiklį.

Dar vienas labai svarbus faktorius pozicionavimo sistemose yra valdymo algoritmas. Priklausomai nuo valdymo metodo jis gali daryti didelę įtaką pozicijos paklaidai ir kitoms sistemos valdymo charakteristikoms. Todėl svarbu pasirinkti tinkamą valdymo algoritmą spendžiamam uždaviniui.

Šio darbo tikslas – ištirti skirtingų kampo jutiklių ir PID valdymo algoritmo atskirų koeficientų įtaką kampinio pozicionavimo sistemos parametrams.

Darbo uždaviniai:

1. Apžvelgti galimus ašies pasisukimo kampo matavimo metodus
2. Suprojektuoti precizinės kampinio pozicionavimo sistemos maketą
3. Ištirti sistemos kampinio pozicionavimo paklaidą priklausomai nuo kampo jutiklio
4. Ištirti PID koeficientų įtaką kampinio pozicionavimo sistemos valdymui

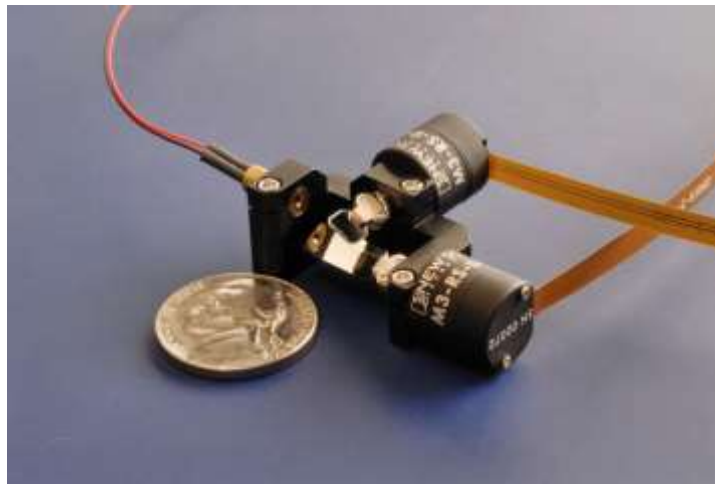
Kitos galimos kampinio pozicionavimo sistemos panaudojimo sritys:

- Antžeminių antenų pozicionavimas, taip kad antenos spinduliavimo maksimumas visada būtų nukreiptas į palydovą esantį ne geostacionarioje orbitoje.
- Astronomijoje tiksliam teleskopo pozicionavimui, jei matomas dangaus objektas yra pakankamai ryškus.
- Metrologijos matavimuose ar kitose srityse, kur reikalingas tikslus kampinis pozicionavimas.

1. APŽVALGINĖ DALIS

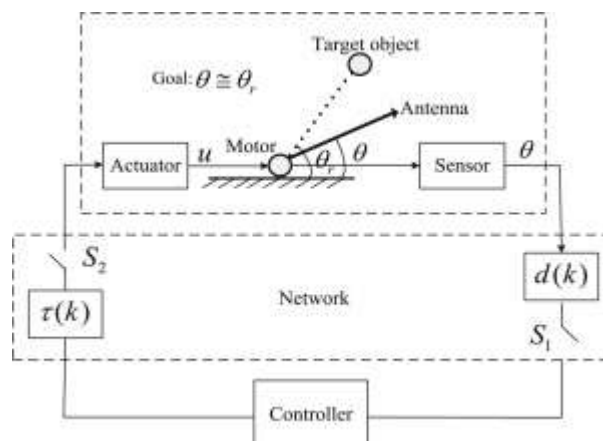
1.1. Kampinio pozicionavimo sistemos

Kampinio pozicionavimo sistemos gali būti naudojamos įvairiose srityse. Viena iš jų yra lazerio spindulio pozicionavimas, naudojant du veidrodžius, kuriuos pasuka kampinio pozicionavimo sistema. Tiksliam pozicionavimui naudojamas absoliutinio kampo jutiklis, kuris užtikrina tikslų grįžtamąjį ryšį variklio valdikliui. Sistema „DK-M3-RS-U-2M-20-L“ turi įmontuotą absoliutinio kampo jutiklį, kurio kampo matavimo rezoliucija yra 0.025° .



1.1 pav. Dviejų ašių lazerio spindulio pozicionavimo sistema „DK-M3-RS-U-2M-20-L“ [26]

Tinklinės valdymo sistemos (angl. *Networked control systems (NCSs)*) yra kita sritis, kur naudojamos kampinio pozicionavimo sistemos. Tokios sistemos dažnai naudojamos: gamybinėje įrangoje, bepiločiuose lėktuvuose ir automobiliuose, kosminėje įrangoje ir nuotoliniu būdu atliekamose operacijose. Tokios sistemos išskirtinumas yra, tai kad kampo jutiklis ir variklis prie valdikio prijungti naudojant tinklą. Todėl yra galimybė sistemą valdyti nuotoliniu būdu[27]. Tinklinės valdymo sistemos struktūrinė schema pavaizduota 1.2 pav.



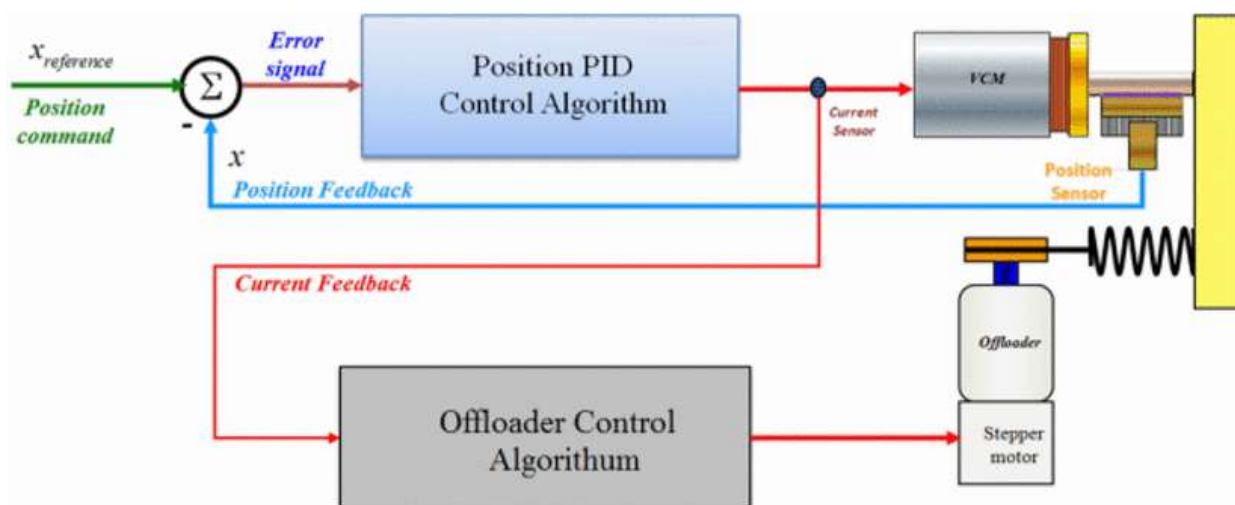
1.2 pav. Tinklinės kampinio pozicionavimo sistemos struktūrinė schema [27]

Kampinio pozicionavimo stalai yra dar viena sritis kur naudojamos kampinio pozicionavimo sistemos. Tokie stalai gali būti naudojami gamyboje, tiksliam detalių pasukimui jas frezuojant CNC staklėmis. Pavyzdžiui, kampinio pozicionavimo sistema „DMT 200N-IMS“, kuri pavaizduota 1.3 pav. Gali pasisukti $0,001^\circ$ rezoliucija.



1.3 pav. Kampinio pozicionavimo stalas „DMT 200N-IMS“ [28]

Straipsnyje „*Precision controller for segmented mirror telescope actuator: Control and tuning*“ atspausdintame 2016 metais žurnale: „*Indian Control Conference (ICC)*“ nagrinėjama precizinė teleskopo veidrodžio pozicionavimo sistema. Sistemoje naudojamas garsiakalbio ritės tipo variklis, kuris turėtų užtikrinti judesį kelių nanometrų tikslumu. Pozicijos nuskaitymui naudojamas enkoderis, kuris prijungtas prie valdiklio. Valdiklyje realizuotas PID valdymo algoritmas. Struktūrinė sistemos schema pavaizduota 1.4 pav. Straipsnyje taip pat aprašomas PID valdymo algoritmas ir jo koeficientų derinimas.



1.4 pav. Veidrodžio pozicionavimo sistema [29]

1.2. Ašies pasisukimo kampo matavimo jutikliai

Kampinio pozicionavimo sistemoje svarbu žinoti tikslų ašies pasisukimo kampą, tam tikro taško atžvilgiu. Todėl reikalingas tikslus kampo jutiklis, toliau apžvelgiami galimi kampo jutiklių variantai.

1.2.1. Rezistyvnis kampo jutiklis

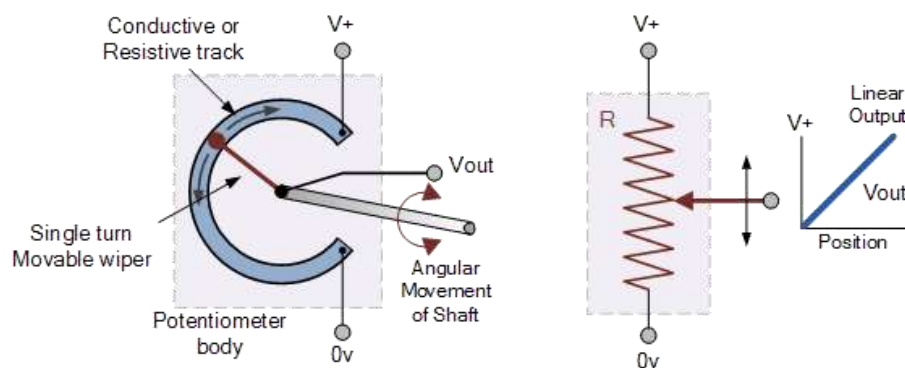
Vienas iš paprasčiausių ir dažniausiai naudojamų kampo jutiklių yra potenciometras. Jis sudarytas iš šliaužiklio pritvirtinto prie ašies ir rezistyvinės medžiagos, konstrukcija pavaizduota 1.5 pav. Šliaužiklis padalija rezistyvinės medžiagos takelį į dvi dalis, taip suformuojamas varžų daliklis. Daliklio išėjimo įtampa tiesiškai priklauso nuo šliaužiklio pozicijos ir maitinimo įtampos.

Potenciometro naudojimas, kaip kampo jutiklio, turi nemažai privalumų.

Maža kaina, paprasta naudoti, tiesinė priklausomybė $<0.1\%$, tikslumas priklauso nuo įtampos matavimo tikslumo ir triukšmų lygio, absoliutinis kampo matavimas, dingus maitinimui nedingsta kampo reikšmė.

Tačiau yra ir trūkumų.

Ribotas ciklų skaičius, dėl šliaužiklio nusidėvėjimo iki 5 mln. ciklų, ribotas pasisukimo kampas, dėl potenciometro konstrukcijos $<320^\circ$, daugiasūkio potenciometro atveju $10 \times 360^\circ$ [2].



1.5 pav. Rezistyvnis kampo jutiklis [1]

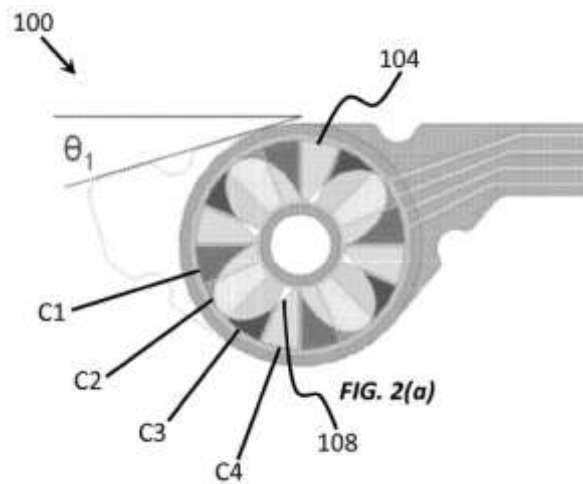
1.2.2. Talpinis kampo jutiklis

Kitas galimas kampo matavimo metodas yra talpinis. Jutiklyje naudojami du arba daugiau elektrodų, viena dalis yra pritvirtinta prie sukimosi ašies ir sukasi atžvilgiu kitos dalies su elektrodais. Sukantis ašiai keičiasi elektrodų persidengimo plotas, iš 1.1 formulės matyti, kad plotas yra tiesiogiai proporcingas talpai. Todėl jeigu persidengimo plotas kinta tiesiškai nuo kampo, tai ir talpa C tiesiškai kinta priklausomai nuo kampo [3].

$$C = \frac{\varepsilon \cdot A}{d} \quad (1.1)$$

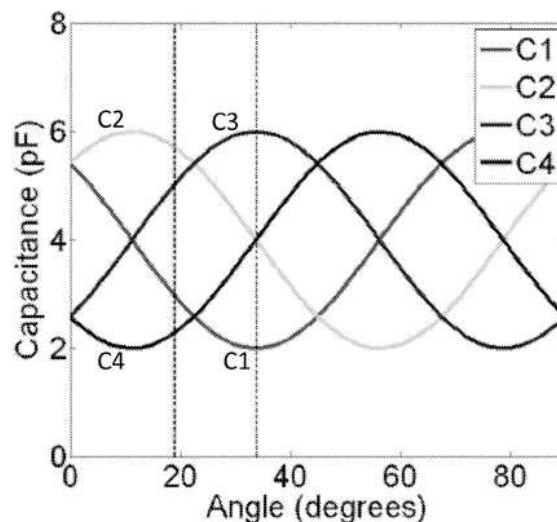
čia: ε – dielektrinė skvarba, F/m; A – plokštelių persidengimo plotas, m²; d – atstumas tarp elektrodų, m. [3]

Vienas iš galimų talpinio kampo jutiklio realizavimo variantų yra užpatentuotas 2013 m. patento numeris: US 2013/0093439 A1. Patente pateikta konstrukcija pavaizduota 1.6 pav. padalija apskritimą (104 detalė) į keturis sektorius po 90°, o sektoriai dar padalijami į keturias dalis. Rotorius (108 detalė) taip pat padalintas į keturias dalis, lapelių forma parinkta taip, kad persidengimo plotas tarp elektrodų C ir rotoriaus kistų sinuso dėsnio [4].



1.6 pav. Talpinio diferencinio kvadratinio kampo jutiklio konstrukcija [4]

Viename 90° sektoriuje tarp elektrodų ir rotoriaus gaunamos keturios talpos: C1, C2, C3, C4, kurios kinta sinuso dėsnio ir yra perstumtos per 90° atžvilgiu viena kitos. Talpos kitimo priklausomybė nuo kampo pavaizduota 1.7 pav.



1.7 pav. Talpos priklausomybės nuo pasisukimo kampo [4]

Absoliutinis pasisukimo kampas θ , 90° diapazone apskaičiuojamas pagal 1.2 formulę:

$$\theta = \frac{1}{4} a \tan 2 \left(\frac{C_1 - C_3}{C_2 - C_4} \right) + \theta_{offset} \quad (1.2)$$

čia: C – talpa tarp elektrodo ir rotoriaus, F; θ_{offset} – kampas, ° [4]

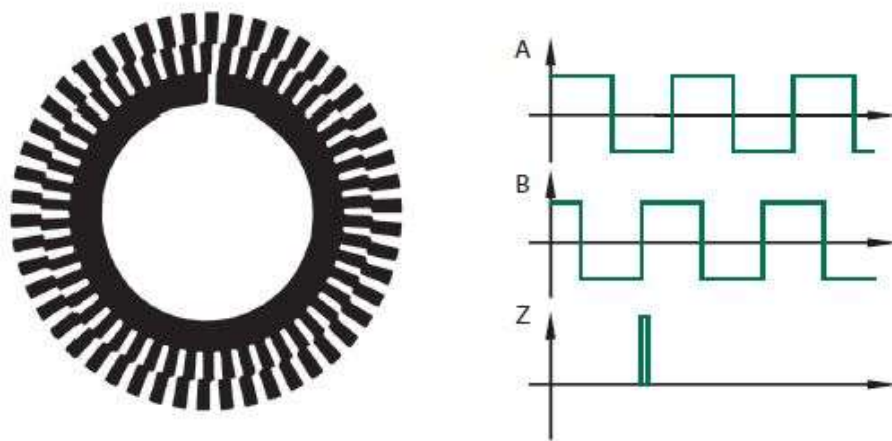
Tokio tipo jutiklis matuoja absoliutinį kampą 90° diapazone, toliau charakteristika kartojasi, todėl norint išmatuoti didesnes kampų vertes reikia pridėti keik kartų buvo pasukta po 90°. Šio tipo sensoriai yra tikslūs, 25,4 mm diametro jutiklio tikslumas gali siekti 60000 – 120000 atskaitų per apsisukimą, t.y. 0,003°. Taip pat jie yra ploni apie 0,55 mm storio, neturi besiliešančių detalių todėl nesukelia papildomos trinties ir nesidėvi [4].

1.2.3. Inkrementinis enkoderis

Inkrementinis enkoderis yra dar vienas dažnai naudojamas metodas matuoti pasisukimo kampui. Enkoderiai gali būti įvairių konstrukcijų (diskas su išpjautomis skylėmis, dantračiai, stikliniai diskai su linijomis) ir signalų nuėmimo būdų (optinio atspindžio jutikliai, šviesos srauto nutraukimo jutikliai, magnetiniai jutikliai). Skaidrūs diskai su šviesai nelaidžiomis linijomis yra dažnai naudojami, tokio disko konstrukcija pavaizduota 1.8 pav. Signalui nuimti nuo tokio disko naudojamos trys opto-poros, kurias sudaro šviesos šaltinis ir fototranzistorius. Ant disko esantys juodi brūkšniai pertraukia šviesos srautą ir taip formuojami signalai. Du signalai A ir B yra vienodo dažnio, tačiau jų fazė yra perstumta 90°. Fazės skirtumas naudojamas nustatyti ašies sukimosi kryptį, o trečiasis signalas Z yra naudojamas pradinei pozicijai nustatyti, taip pat galima patikrinti ar suskaičiuojami visi impulsai ir nėra daroma paklaida [6]. Norint žinoti ašies pasisukimo kampą reikia suskaičiuoti impulsų skaičių kiekvienai pasisukimo krypti ir vieną impulsą atitinkantį kampo žingsnį. Pasisukimo kampas θ apskaičiuojamas pagal 1.3 formulę:

$$\theta = \theta_p \left(\sum_i^{CCW} N_i - \sum_j^{CW} N_j \right) = \theta_p N \quad (1.3)$$

čia: θ_p – vieno impulso kampo žingsnis, °; N – impulsų skaičius [6].



1.8 pav. Inkrementinio enkoderio diskas(kairėje) ir signalai (dešinėje) [5]

Sukimosi kryptis nustatoma pagal A ir B signalų kylančius frontus. Pavyzdžiui, jeigu ties A signalo kylančio fronto momentu B signalas yra aukšto lygio būsenos ašis sukasi į vieną pusę, o jeigu žemo lygio būsenos tada sukasi į priešingą pusę.

Inkrementinio enkoderio pagrindiniai privalumai yra:

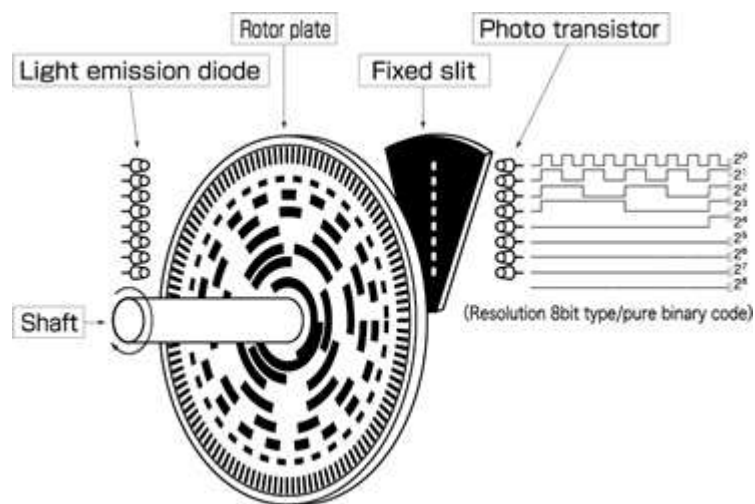
Didelė skiriamoji geba >100000 impulsų per apsisukimą. Gali dirbti didelės drėgmės, vibracijų aplinkoje Puikiai tinka momentinio ir vidutinio greičio matavimui. Bekontaktis matavimas, nėra mechaninio nusidėvėjimo.

Tačiau yra ir trūkumų:

Prarandama pozicijos informacija jeigu nutrūksta maitinimas. Reikia pakankamai švarios aplinkos.

1.2.4. Absoliutinis optinis enkoderis

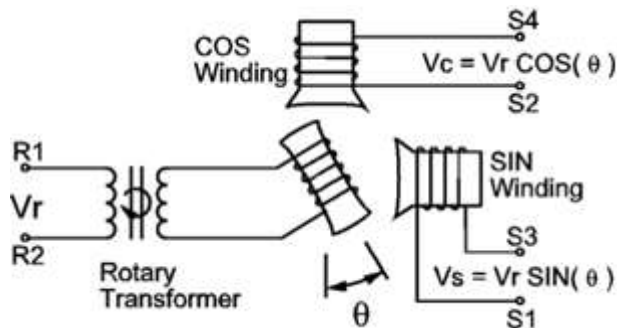
Inkrementinio enkoderio atmaina yra absoliutinis optinis enkoderis. Šio tipo enkoderiuose dažniausiai naudojami du diskų tipai: dvejetainio ir Grėjaus kodo. Diskas pritvirtinamas prie besisukančios ašies, o signalai nuskaitomi naudojant šviesos diodus ir fototranzistorius. Optinių imtuvų skaičius priklauso nuo ant disko esančių bitų skaičiaus, kuo tiksliau norima nustatyti pasisukimo kampą tuo daugiau bitų reikia, didėjant bitų skaičiui didėja ir disko skersmuo. Grėjaus kodas nuo dvejetainio skiriasi tuo, kad Grėjaus kodo atveju sukantis diskui, keičiasi tik vieno bito reikšmė, o dvejetainio gali pasikeisti visų bitų reikšmės vienu kartu. Didžiausias absoliutinio optinio enkoderio privalumas lyginant su inkrementiniu yra absoliutinis pozicijos matavimas, net kai ir buvo dingusi maitinimo įtampa. Duomenis nuskaičius iš naujo bus žinoma tiksli prieš tai buvusi kampo reikšmė [7].



1.9 pav. Absoliutinio optinio enkoderio konstrukcija [7]

1.2.5. Resolveris

Resolveris yra elektromechaninis kampo jutiklis, sudarytas iš rotoriaus, ant kurio suvyniota ritė ir iš statoriaus ričių perstumtų per 90° viena kitos atžvilgiu. Resolverio konstrukcija, pavaizduota 1.10 pav. Resolveris veikia, kaip kintamas transformatorius, pirminė apvija yra ant ašies, o dvi antrinės nesisuka [10].



1.10 pav. Resolverio konstrukcija [8]

Priklausomai nuo ašies pasisukimo kampo θ priklauso ir antrinėse apvijose indukuojamos kintamos srovės amplitudė. Indukuojama įtampa gali būti išreikšta formulėmis:

$$S3 - S1 = T \cdot E_0 \cdot \sin(\omega t) \cdot \sin(\theta) \quad (1.4)$$

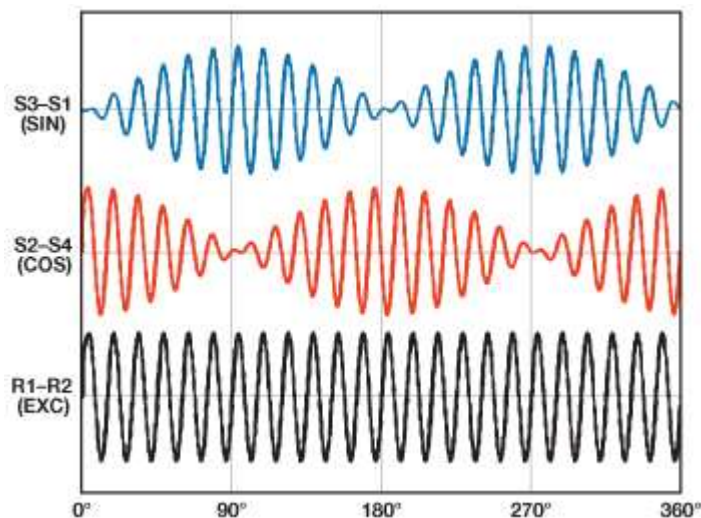
$$S2 - S4 = T \cdot E_0 \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos(\theta) \quad (1.5)$$

čia: T – transformacijos koeficientas; E_0 – pirminės apvijos signalo amplitudė, V; ω – kampinis dažnis, rad/s; θ – ašies pasisukimo kampas, $^\circ$ [9].

Ašies pasisukimo kampas gali būti apskaičiuotas, jeigu žinome momentines antrinių apvijų reikšmes S3-S1 ir S2-S4. Tada ašies pasisukimo kampas θ yra apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{S3-S1}{S2-S4} \quad (1.6)$$

Antrinių apvijų signalų priklausomybė nuo ašies pasisukimo kampo pavaizduota 1.11 pav.



1.11 pav. Resolverio įėjimo ir išėjimų priklausomybė nuo ašies pasisukimo kampo [9]

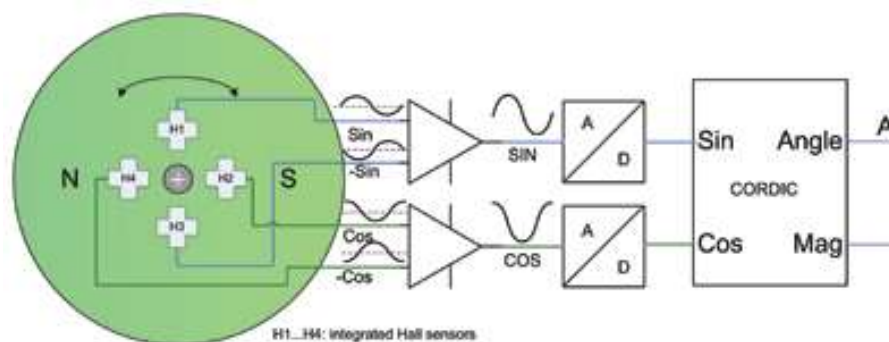
Pagrindiniai šio tipo kampo jutiklių privalumai:

Didelis tikslumas (riboja analogas kodas bitų skaičius ir triukšmai). Gali veikti sudėtingose sąlygose, tinka karinei technikai. Neribojamas pasisukimo kampas ir apsisukimų skaičius.

Trūkumai: reikalingas harmoninio signalo generatorius ir tikslus įtampo matavimas.

1.2.6. Magnetiniai Holo jutikliai

Vienas iš galimų magnetinių kampo jutiklių yra Holo efektą naudojantys jutikliai. Jį sudaro dvi dalys: dviejų polių magnetas ir Holo daviklių masyvas sudarytas iš keturių dalių, konstrukcija pavaizduota 1.12 pav. Magnetą turi būti pritvirtintas tiksliai centre ant sukimosi ašies. Holo jutiklis taip pat turi būti tiksliai pastatytas, kad daviklių centras būtų virš ašies centro. Norint tiksliai išmatuoti pasisukimo kampą reikalingas tikslus daviklio pastatymas ašies atžvilgiu. Magneto magnetinis laukas nuskaitymas naudojant Holo jutiklį, diferencinis signalas gaunamas naudojant du jutiklius. Kita jutiklių pora pasukama 90° kampu atžvilgiu pirmosios poros jutiklių. Atėmus daviklių porų signalus gaunami du signalai kurių amplitudė kinta sinuso ir kosinuso dėsniais. Momentinė amplitudė priklauso nuo magneto pasisukimo kampo θ [14]. Absoliuti kampo reikšmė apskaičiuojama analogiškai kaip 1.6 formulėje. Magnetiniai kampo jutikliai gali būti montuojami ant ašies, bet taip pat ir šalia jos.



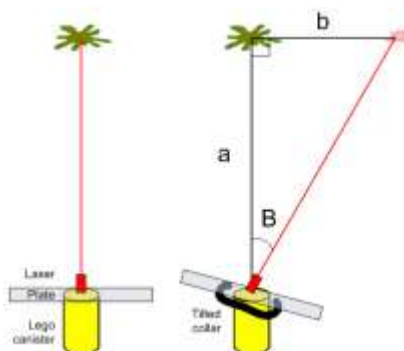
1.12 pav. Holo daviklių masyvas [12]

Privalumai: Didelė skiriamoji geba iki 14 bitų, tikslumas $0,06^\circ$. Maža kaina, patikimas, gali dirbti sudėtingose sąlygose.

Trūkumai: Reikalingas tikslus jutiklio pastatymas ašies atžvilgiu, temperatūrinis dreifas.

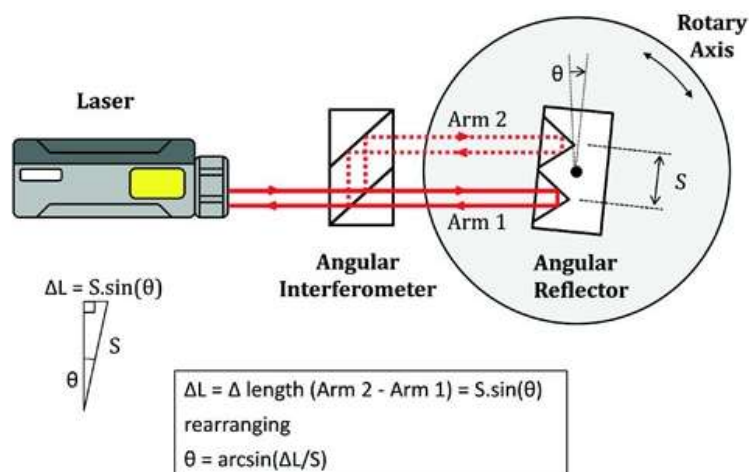
1.2.7. Optinis metodas naudojant lazerį

Mažas kampų reikšmės galima išmatuoti naudojant optinį metodą: ant ašies primontavus lazerį ir projektuojant jo spindulį ant plokštumos nutolusios žinomu atstumu nuo sukimosi ašies. Matavimo principas pavaizduotas 1.13 pav. Tada išmatuojamas atstumas nuo atskaitos taško iki lazerio spindulio. Taip gaunamas statusis trikampis, kurio dvi kraštinės žinomos. Žinant kraštinės ilgį prie kampo ir prieš kampą, galima apskaičiuoti kampo reikšmę panaudojant tangentą. Kuo didesnis atstumas nuo sukimosi ašies iki plokštumos, ant kurios projektuojamas lazerio spindulys, tuo tiksliau galima išmatuoti kampą. Lazerio vietos matavimui galima naudoti optinį foto-diodų masyvą.



1.13 pav. Kampo matavimas projektuojant lazerio spindulį ant plokštumos [17]

Kitas ašies pasisukimo kampo matavimo metodas, naudojant lazerį – kampinis interferometras, kurio konstrukcija pavaizduota 1.14 pav. Jis sudarytas iš lazerio spindulio daliklio, kampinio reflektoriaus, lazerio ir interferencijos juostelių skaitiklio.



1.14 pav. Kampinio inteferometro konstrukcija [18]

Matuojamas dviejų lazerio kelių ilgių skirtumas, jeigu reflektorius nepasisukęs lazerio spindulio daliklio atžvilgiu tada lazerio spindulio kelių skirtumo nėra. Pagal kelių skirtumą apskaičiuojamas pasisukimo kampas. Naudojant šį metodą galima labai tiksliai išmatuoti mažas kampų reikšmes, diapazone $\pm 10^\circ$, paklaida neviršija 0,5 arcsec [18].

1.1 lentelė. Kampo matavimo metodų palyginimas

Kampo matavimo metodas	Privalumai	Trūkumai
Rezistyvnis	Tiesinė išėjimo priklausomybė, absoliutinis kampo matavimas	Ribotas pasukimo kampas, pasisukimo ciklų skaičius iki 5 mln.
Talpinis	Didelė skiriamoji geba, gali būti žemo profilio	Judantis elektrodas reikalauja elektrinio kontakto su matavimo prietaisu
Inkrementinis enkoderis	Didelė skiriamoji geba, bekontaktis matavimas	Prarandama informacija nutrūkus maitinimui
Absoliutinis optinis enkoderis	Absoliutinis kampo matavimas	Didėjant rezoliucijai didėja disko matmenys
Resolveris	Didelis tikslumas, bekontaktis matavimas	Reikalingas harmoninio signalo generatorius
Magnetiniai Holo jutikliai	Didelė skiriamoji geba, iki 14 bitų, bekontaktis matavimas	Reikalingas tikslus jutiklio pastatymas magneto atžvilgiu
Optiniai metodai naudojantys lazerį	Didžiausia skiriamoji geba,	Būtinai tikslus lazerio ir imtuvo suderinimas

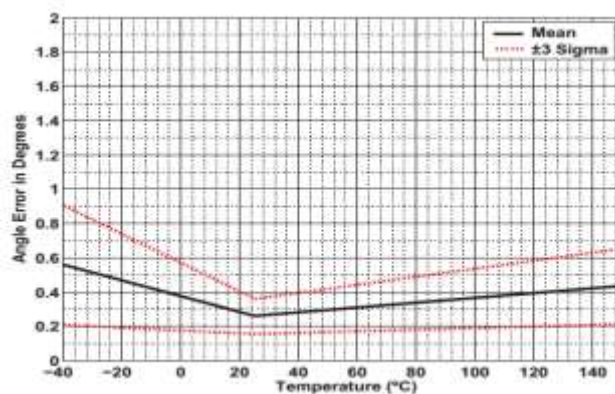
Apibendrinant kampo matavimo jutiklių analizę palyginti skirtingi metodai, palyginimas pateiktas 1.1 lentelėje. Didžiausią kampo matavimo skiriamąją gebą galima pasiekti naudojant kampinį interferometrą, kurio kampo matavimo paklaida neviršija 0,5 arcsec. Bekontaktis ašies pasisukimo kampo matavimas galimas naudojant magnetinius kampo jutiklius.

2. MATAVIMO METODŲ PASIRINKIMAS IR ANALIZĖ

2.1. Kampo jutiklių analizė

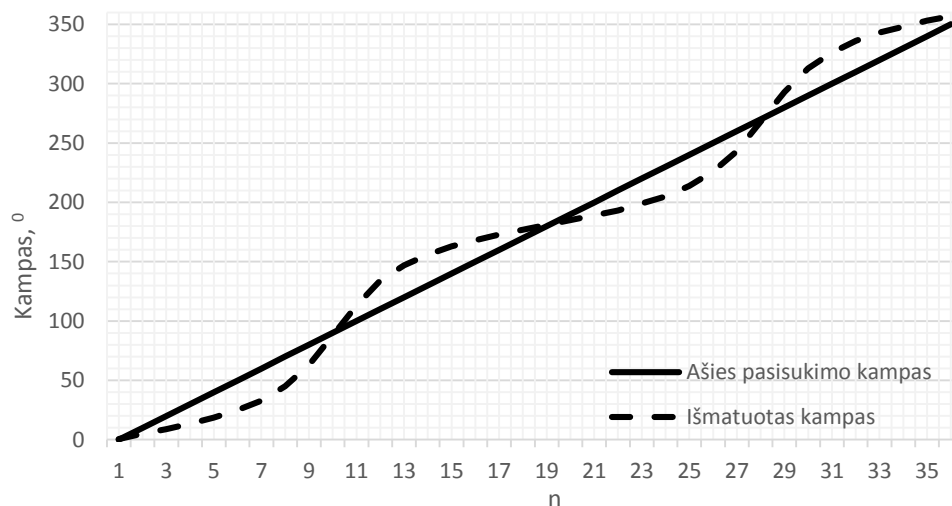
Iš anksčiau apžvelgtų ašies pasisukimo kampo matavimo metodų pasirenkami: magnetinis matavimo metodas, naudojant Holo efektą, inkrementinis enkoderis ir lazerio spindulio projektavimas ant plokštumos. Šių pasirinktų matavimo metodų įtaka kampinio pozicionavimo sistemos parametrams bus nagrinėjami toliau.

Kampo matavimui naudojant magnetinį jutiklį realizuoti pasirinktas integrinis grandynas A1335. Jutiklio skiriamoji geba yra 12 bitų, o matavimo paklaida esant normalioms aplinkos sąlygoms neviršija $\pm 0,5^\circ$ [19]



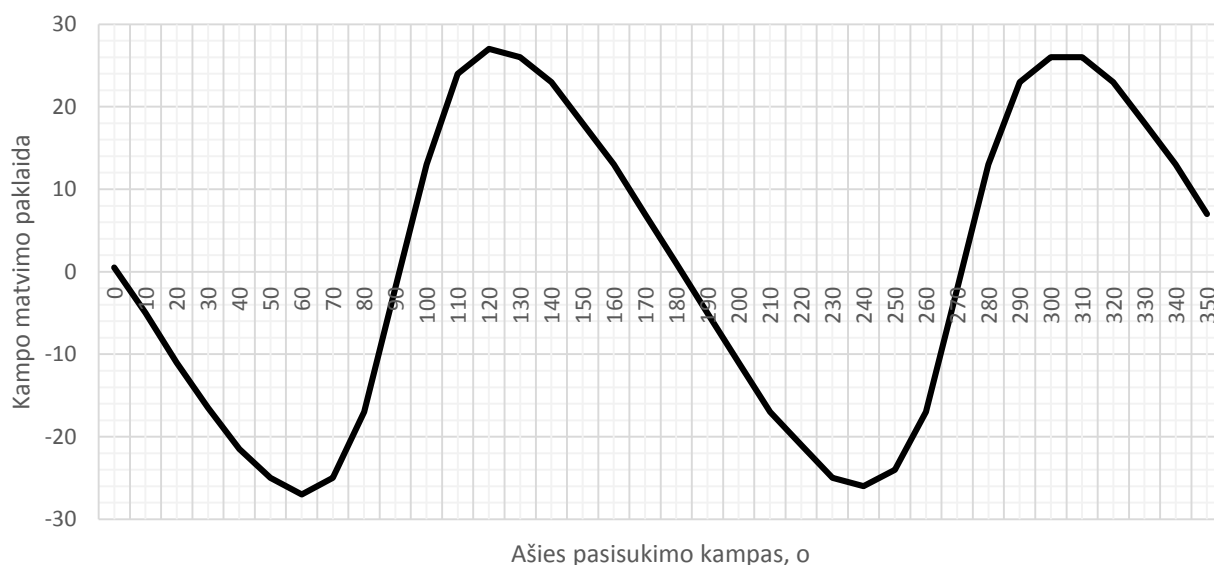
2.1 pav. Kampo matavimo paklaidos priklausomybė nuo aplinkos temperatūros [19]

Išmatavus magnetinio kampo jutiklio išėjimo charakteristiką, esant 22°C aplinkos temperatūrai ir nenaudojant charakteristikos tiesinimo, gauti duomenys pavaizduoti 2.2 pav. Iš gautų duomenų matyti, kad jutiklio išėjimo charakteristika nėra tiesinė. Taip gali būti dėl jutiklio pastatymo magneto atžvilgiu nukrypimų, taip pat dėl magneto magnetinio lauko netolygumo.



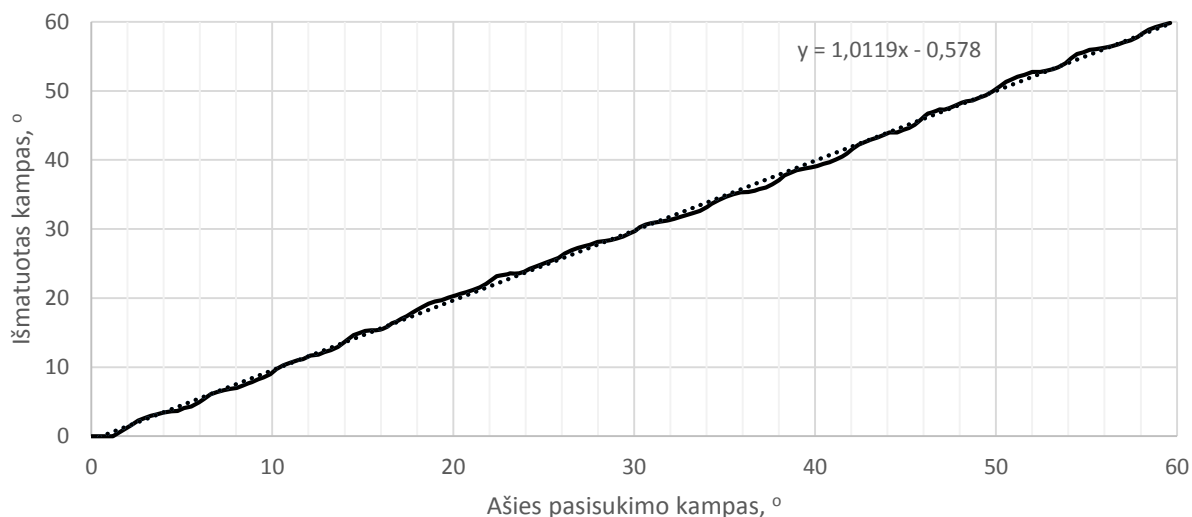
2.2 pav. A1335 Kampo jutiklio duomenys

Pagal gautus duomenis apskaičiuota kampo matavimo paklaida, pavaizduota 2.3 pav. Kampo matavimo paklaida viršija $\pm 25^\circ$, todėl norint naudoti šį jutiklį tiksliam pozicionavimui yra būtinas charakteristikos tiesinimas.

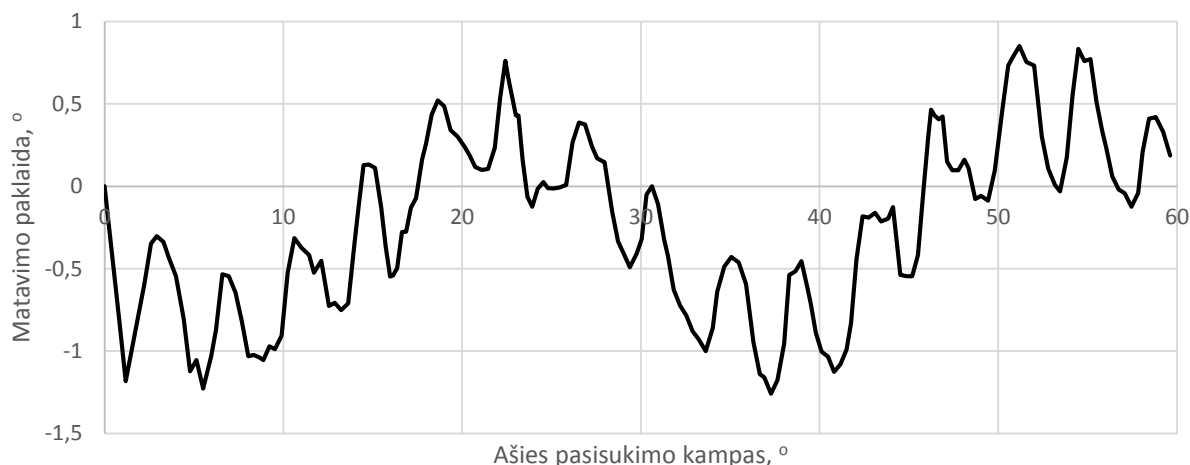


2.3 pav. A1335 matavimo paklaida

Sumažinus matuojamo kampo diapazoną galima padidinti matavimo tikslumą. Tai galima įgyvendinti panaudojant 12 polių magnetą vietoje dviejų polių, taip matavimo diapazonas sumažinamas 6 kartus, tuo pačiu sumažėja ir kampo matavimo paklaida. Kampo matavimo paklaida sumažėja taip pat 6 kartus, nuo $\pm 0,5^\circ$ sumažėja iki $\pm 0,0833^\circ$.



2.4 pav. Magnetinio kampo jutiklio A1335 duomenys, naudojant 12 polių magnetą



2.5 pav. Magnetinio kampo jutiklio A1335 absoliutinė matavimo paklaida, naudojant 12 polių magnetą

Atlikus magnetinio kampo jutiklio A1335, kampo matavimo paklaidos matavimą, naudojant 12 polių magnetą. Gauti duomenys pavaizduoti 2.4 ir 2.5 pav. Matyti, kad matavimo diapazono sumažinimas naudojantis 12 polių magnetu padidina kampo matavimo tikslumą ir charakteristika yra tiesiškesnė nes magnetinis laukas yra tolygesnis mažesniame kampo kitimo diapazone. Gautą charakteristiką dar galima tiesinti aproksimuojant polinomu.

Matavimui, naudojant optinę inkrementinę enkoderį realizuoti pasirinktas „Precizika Metrology“ optinis inkrementinis enkoderis A58F, kuris pavaizduotas 2.6 pav.. Enkoderį sudaro diskas su 10800 žyme per apsisukimą ir 10 interpoliatorius su skaitmeniniu išėjimu. Per vieną apsisukimą gaunamas 108000 impulsas. Naudojantis 1.3 formule apskaičiuojama enkoderio rezoliucija yra $0,00333^\circ$ [20]. Šia rezoliuciją galima dar padidinti 4 kartus, naudojant enkoderio A ir B signalų kylančius ir krentančius frontus, kaip kampo atskaitas. Tada gaunama rezoliucija yra $0,00083^\circ$.

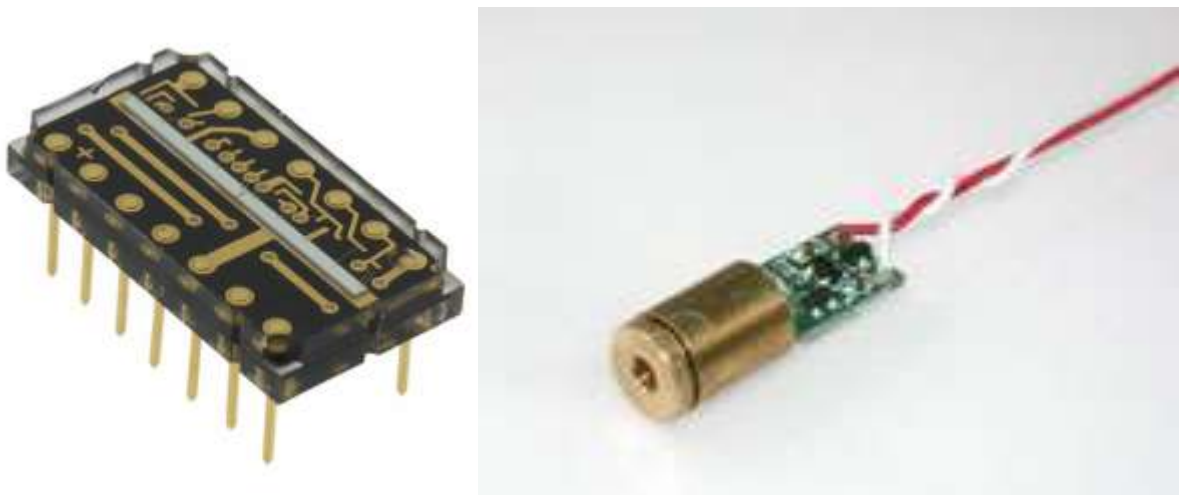


2.6 pav. Inkrementinis enkoderis A58F [20]

Dar vienas pasirinktas matavimo metodas – projektuojant lazerio spindulį ant plokštumos, realizuojamas panaudojant optinę liniuotę TSL1402R ir lazerio modulį U-MD-650A. Pasisukimo kampas gali būti apskaičiuotas, žinant dvi trikampio kraštines. Skaičiavimų supaprastinimui priimame, kad lazerio spindulys visada yra statmenas optinio masyvo plokštumai. Tada gaunamas statusis trikampis, statinis prie kampo b yra atstumas nuo lazerio iki optinio masyvo, šis atstumas yra žinomas, statinis. Statinis prieš kampą a yra išmatuotas atstumas tarp lazerio centro kraštinių nusistovėjimo vietų. Atstumo matavimui naudojama optinė liniuotė TSL1402R. Naudojant tangento atvirkštinę funkciją arktangentą apskaičiuojamas išmatuotas mažiausias kampinio pozicionavimo tikslumas. Matavimo schema pavaizduota 1.13 pav. Kampinio pozicionavimo paklaida α apskaičiuojama pagal formulę:

$$\alpha = \arctg \frac{a}{b} \quad (2.1)$$

čia: a – statinis prieš kampą, m; b – statinis prie kampo, m.



2.7 pav. Optinis masyvas TSL1402R ir lazerio modulis U-MD-650A

Pasirenkant atstumą tarp sukimosi ašies, prie kurios pritvirtintas lazeris iki optinio imtuvo b , galima keisti kampo matavimo tikslumą. Kadangi masyvas turi 256 elementus, didinant atstumą b didėja matavimo tikslumas, tačiau dėl riboto masyvo narių skaičiaus atitinkamai mažėja kampo matavimo diapazonas. Tyrimo makete atstumas b bus 130 mm. Todėl skaičiuojant panaudojus 2.1 formulę gaunama kampo matavimo paklaida $0,0279^\circ$, o kampo matavimo diapazonas $3,57^\circ$. Skirtingų kampo matavimo jutiklių planuojamų naudoti kampinio pozicionavimo sistemos charakteristikų tyrime, teorinių parametų apibendrinimas pateiktas 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Kampo matavimo jutiklių apibendrinimas

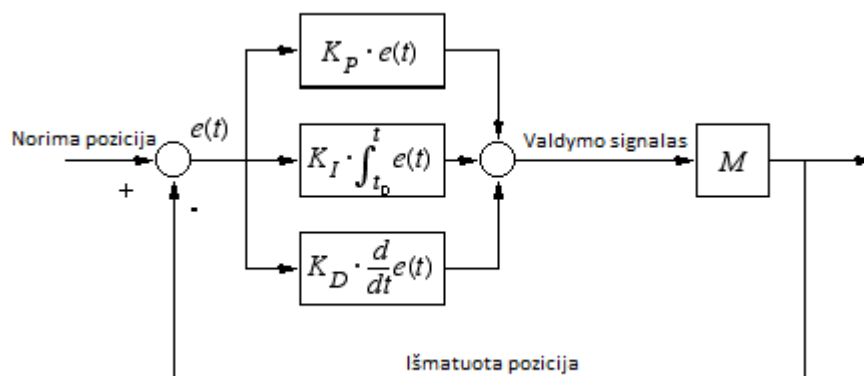
Jutiklis	Teorinė kampo matavimo paklaida	Kampo matavimo diapazonas
A1335 + 12 polių magnetas	$0,0833^\circ$	60°
A58F	$0,00083^\circ$	360°
TSL1402R + lazeris	0,0279	$3,57^\circ$

2.2. Kampinio pozicionavimo sistemos modelis

Kampinio pozicionavimo sistemos modelį galima išskirstyti į dvi stambesnes dalis: PID valdiklį ir segmentinį kampinį variklį su mechanine sistema.

2.2.1. PID valdiklio modelis

Valdiklio modelis susideda iš trijų pagrindinių dalių: stiprinimo elemento, integratoriaus ir diferenciatoriaus. Taip pat reikalingas paklaidos signalas ir sumatorius. PID valdiklio struktūra pavaizduota 2.8 pav.



2.8 pav. PID valdiklio struktūra

Paprasčiausias valdymo variantas yra proporcinis valdymas. Iš nustatytos reikšmės atėmus išmatuotą valdomo dydžio reikšmę, gaunamas paklaidos signalas $e(t)$. Paklaidos signalas padauginamas iš koeficiento K_p , taip gaunamas valdymo signalas. Jis paduodamas į galios stiprintuvą valdantį variklį [22]. Tačiau proporcinis valdymas neužtikrina tikslaus valdymo, esant mažiems išmatuotos reikšmės nuokrypiams nuo norimos pozicijos. Dėl trinties, kai n paklaidos signalas $e(t)$ yra mažas, tai ir valdymo signalas yra per mažas, kad nugalėtų mechaninės sistemos trintį. Pozicionavimo tikslumą galima padidinti, didinant koeficientą K_p , tačiau esant per didelėms

jo reikšmėms sistema gali tapti nestabili ir pradėti generuoti. Todėl koeficiento K_p daug didinti negalima, ir išlieka ta pati problema, kad sistema negali pasiekti nustatytos pozicijos.

Pažangesnis valdymo variantas yra prie proporcinės dalies dar pridėti integralinę dalį, taip gaunamas proporcinis integralinis valdymas. Šis valdymo metodas panaikina trinties įtaką, esant mažoms paklaidos signalo $e(t)$ vertėms. Integralinė dalis integruoja nustatytų ir išmatuotų reikšmių skirtumą $e(t)$ per laiką ir padaugina iš integralinės dalies koeficiento K_i [21].

Integruojant skirtumą tarp nustatytos ir išmatuotos pozicijos per laiką, valdymo įtampa $u(t)$ didėja arba mažėja ir pasiekia tokią reikšmę, kai trintis yra nugalima. Taip pasiekiamas tikslus pozicionavimas, kai integralinė dalis valdo tiksliai esant mažiems pozicijos nuokrypiams nuo nustatytos pozicijos. Galimas realizavimo variantas naudojant vien tik integralinį valdymą, tačiau pridėjus proporcinę dalį gaunamas greitesnis pozicionavimas esant dideliems pozicijos nuokrypiams nuo nustatytos reikšmės. Dėl integralinės dalies inertiškumo gaunamas pozicijos pervaldymas ir nusistovėjimas ties nustatyta pozicija. Integralo reikšmei artėjant link nustatytos pozicijos didėja ir tik, kai pozicija yra pervaldyta, pradeda mažėti, todėl gaunamas pervaldymas prieš nusistovint norimai pozicijai.

Norint eliminuoti pervaldymą, sukeliama dėl integralo inertiškumo, galima prie proporcinio integralinio valdymo pridėti dar vieną dalį – diferencialinę. Taip gaunamas PID valdymo algoritmas. Matematinė PID valdiklio išėjimo signalo $u(t)$ lygtis gali būti aprašoma formule:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(t) dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt}, \quad (2.2)$$

čia: K_p – proporcinės dalies koeficientas, K_i – integralinės dalies koeficientas, K_d – diferencialinės dalies koeficientas; $e(t)$ – nustatytų ir išmatuotų reikšmių skirtumas [21].

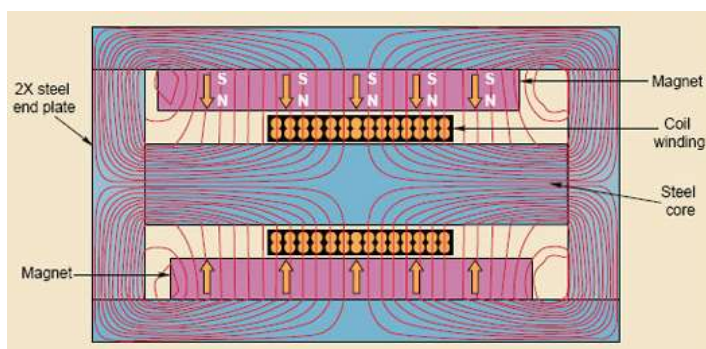
Diferencialinė dalis sumažina pervaldymo amplitudę arba ją visai panaikina. Matuojamas pozicijos nuokrypio nuo nustatyto taško pokytis per laiką. Jeigu valdymo signalo amplitudė kyla, reiškia, kad nuokrypis nuo nustatytos pozicijos yra neigiamas. Taip yra, nes prieš tai buvusi reikšmė buvo mažesnė dabartinę reikšmę, taigi, skirtumas gaunamas neigiamas. Todėl artėjant link nustatytos pozicijos diferencialinė dalis yra neigiama, kuo greičiau kinta nuokrypio signalas tuo didesnė ji yra. Taigi pridėję neigiamą diferencialinę dalį prie teigiamos integralinės ir proporcinės dalių gaunama mažesnė valdymo įtampa, todėl sumažinamas arba panaikinamas pervaldymas. Tačiau diferencialinė dalis į sistemą gali įnešti nestabilumo, taip pat ši dalis yra jautri nuskaitytos pozicijos triukšmui, nes triukšmingas signalas turi staigius amplitudės pakitimus, kurie sukelia diferencialinės dalies staigų kitimą. Toks staigus kitimas gali sukelti sistemos nestabilumą [22]. PID stiprinimo koeficientų įtaka sistemos valdymui pavaizduota 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. PID koeficientų įtaka sistemos valdymui [23]

Sistemos atsakas į vienetinį šuolį	Kitimo greitis	Pozicijos pervaldymas	Nusistovėjimo laikas	Nusistovėjusios pozicijos paklaida	Stabilumas
Didinamas K_p	Mažėja	Didėja	Nežymus didėjimas	Truputį mažėja	Mažėja
Didinamas K_i	Nežymiai mažėja	Didėja	Didėja	Didelis sumažėjimas	Mažėja
Didinamas K_d	Nežymiai mažėja	Mažėja	Mažėja	Minimalus pokytis	Didėja, jeigu K_d reikšmė yra maža

2.2.2. Segmentinio kampinio variklio ir PID valdiklio matematinis modelis

Segmentinis kampinis variklis (angl. *voice coil motor*) yra sudarytas iš: magnetolaidžio (dažniausiai pagaminto iš grynos geležies), magneto ir ritės. Variklio sandara pavaizduota 2.9 pav. Ritė laisvai juda tarp magnetų ir variklio šerdies [24]. Variklio korpusas yra apskritimo lanko formos, kad ritė galėtų sukis apie ašį.



2.9 pav. Variklio sandara [24]

Variklio elektrinės dalies modelį sudaro: variklio ritės varža, ritės induktyvumas, atbulinės įtampos generatorius. Mechaninė dalis susideda iš variklio ir mechaninės sistemos inercijos momento ir nuostolių dėl trinties sistemos mazguose. Kampinio pozicionavimo sistemos modelis pavaizduotas 2.10 pav.

Variklio ekvivalentinės schemos dinaminė lygtis išreiškiama formule:

$$U(t) = i(t) \cdot R + L \frac{d}{dt} i(t) + K \cdot \omega(t) \quad (2.3)$$

čia: $U(t)$ – įėjimo įtampa, V; $i(t)$ – srovė tekanti per variklio ritę, A; R – ritės varža, Ω ; L – ritės induktyvumas, H; K – atbulinės įtampos konstanta; $\omega(t)$ – kampinis greitis, rad/s [25].

Mechaninės sistemos dalies dinaminė lygtis užrašoma formule:

$$K \cdot i(t) = J \cdot \frac{d}{dt} \omega(t) + b \cdot \omega(t) \quad (2.4)$$

čia: J – sistemos inercijos momentas, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; b – nuostolių konstanta [25].

Atlikus 2.3 ir 2.4 formulių Laplaso transformacija ir sujungus jas, galima išreikšti sistemos perdavimo funkciją:

$$H_s(s) = \frac{K}{(J \cdot L) \cdot s^2 + (J \cdot R + L \cdot b) \cdot s + (R \cdot b + K^2)} \quad (2.5)$$

PID valdiklio perdavimo funkcija po Laplaso transformacijos:

$$H_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \cdot s \quad (2.6)$$

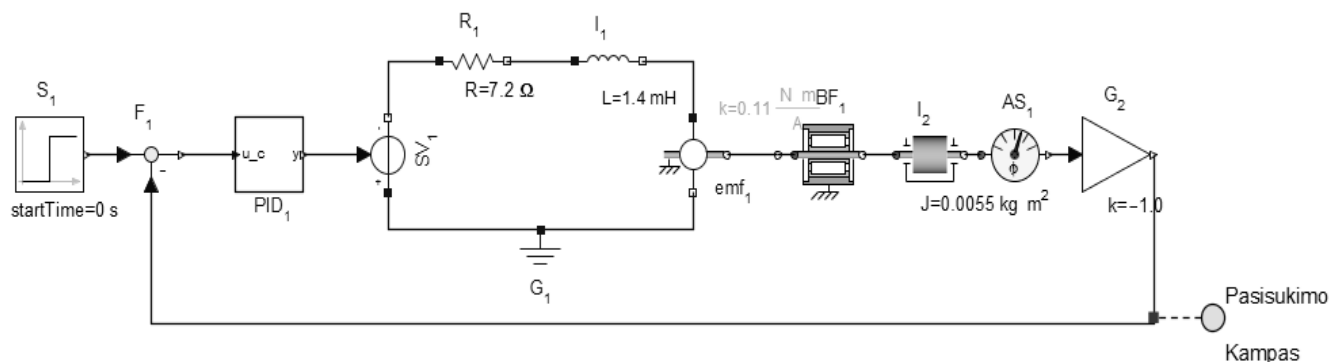
Perdavimo funkcija sistemą valdant PID valdikliu su grįžtamojo ryšiu išreiškiama formule:

$$H(s) = \frac{H_s(s) \cdot H_{PID}(s)}{1 + H_s(s) \cdot H_{PID}(s)} \quad (2.7)$$

čia: s – kompleksinis dažnio parametras.

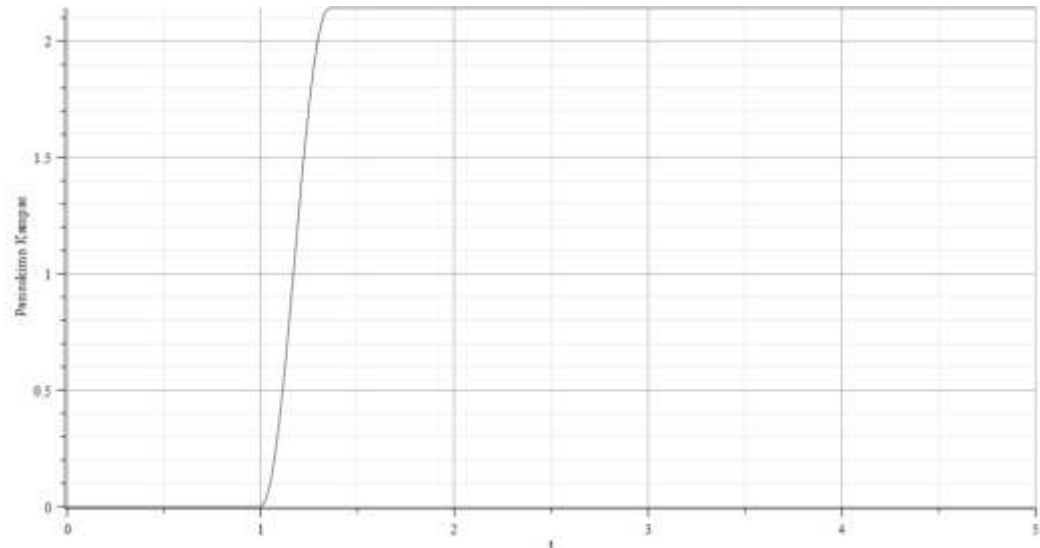
2.2.3. Modeliavimo rezultatai

Kampinio pozicionavimo sistemos modeliavimas atliekamas, naudojant „MapleSim“ programinę įrangą. Kampinio pozicionavimo sistemos modelis pavaizduotas 2.10 pav.



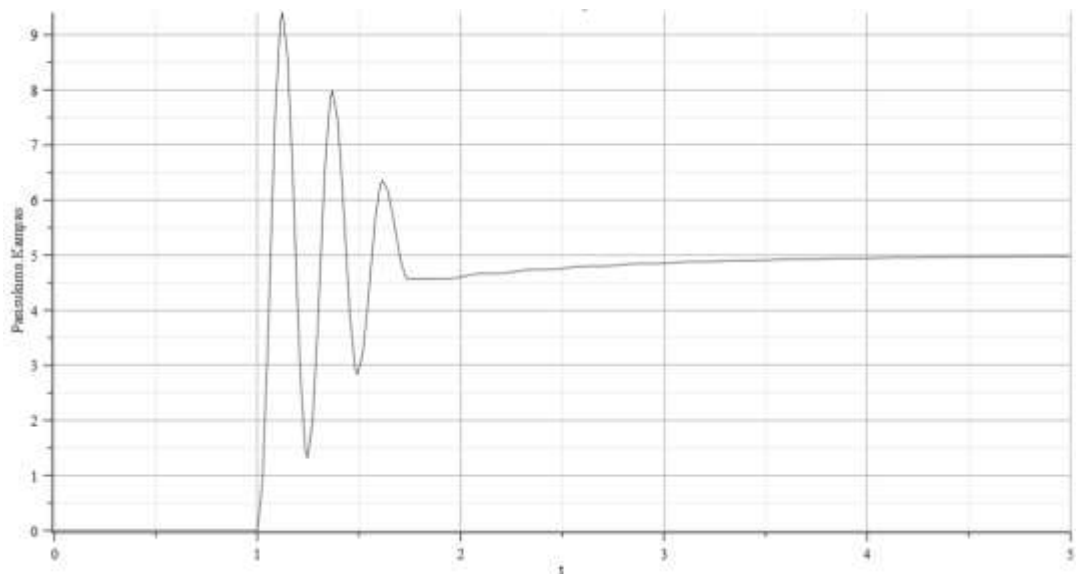
2.10 pav. Sistemos modelis su parametrais

Sumodeliuojama situacija, kai valdymas yra tik proporcinis, kurio stiprinimo koeficientas yra penki. Pereinamoji sistemos charakteristika pavaizduota 2.11 pav. Nustatyta kampo pozicija yra 5 laipsniai. Iš pereinamosios charakteristikos matyti, kad esant per mažam nuokrypiui nuo nustatytos reikšmės, nepakanta valdymo signalo nugalėti trinčiai sistemoje, todėl nepasiekama norima pozicija.



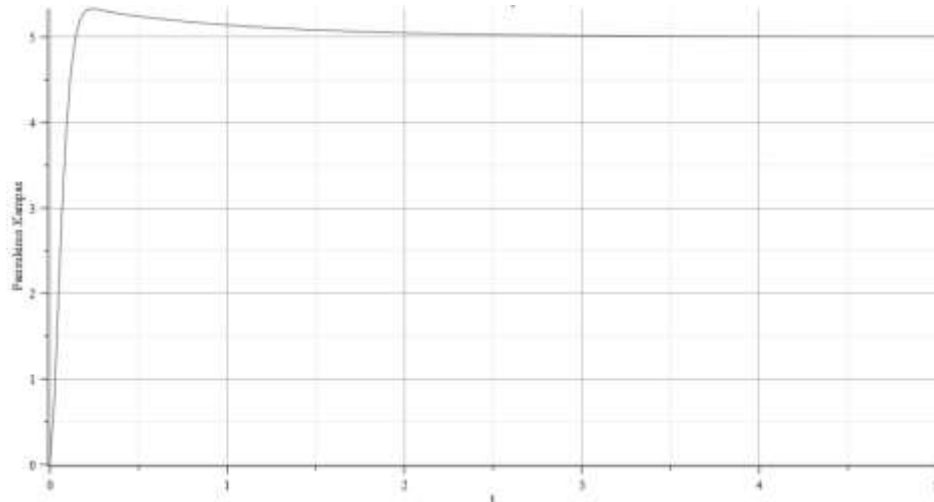
2.11 Sistemos pereinamoji charakteristika, kai $K_p=5$, $K_i=0$, $K_d=0$

Toliau sumodeliuojama situacija, kai naudojamas PI valdiklis, su stiprinimo koeficientais: $K_p=45$, $K_i=45$. Iš 2.12pav. pateiktos sistemos pereinamosios charakteristikos matyti, kad sistema yra pervaldoma ir svyruoja apie nustatytą poziciją, kol nusistovi. Pervaldymo panaikinimui pridedama diferencialinė valdymo dalis.



2.12 pav. Sistemos pereinamoji charakteristika, kai $K_p=45$, $K_i=45$, $K_d=0$

Kai sistemą valdo PID valdiklis, gaunama greitai nustatytą poziciją pasiekianti pereinamoji charakteristika, kuri pavaizduota 2.13 pav.



2.13 pav. Sistemos pereinamoji charakteristika, kai $K_p=45$, $K_i=45$, $K_d=3$

2.3. Kampinio pozicionavimo sistemos tyrimo maketas

Tyrimui atlikti suprojektuotas ir pagamintas kampinio pozicionavimo sistemos maketas, kuris pavaizduotas 2.14 pav.

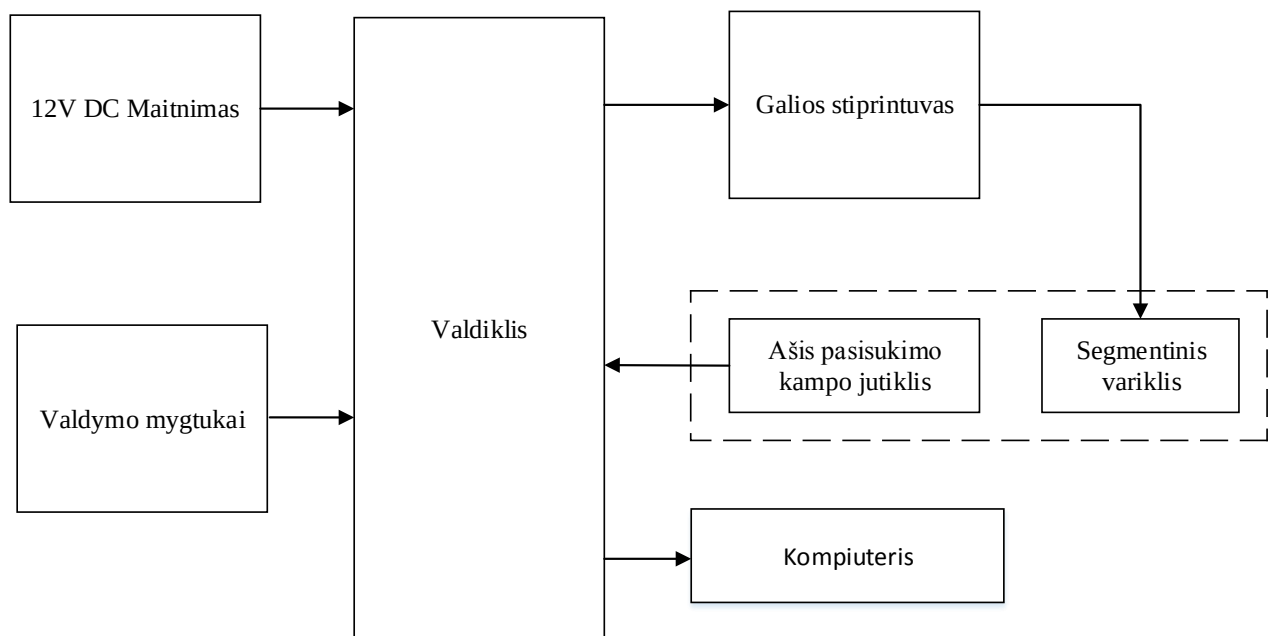


2.14 pav. Kampinio pozicionavimo sistemos maketas

Tyrimo maketas sudarytas iš keturių pagrindinių dalių:

1. Riboto pasisukimo kampo variklio pritvirtinto prie laisvai besisukančios ašies
2. PID valdiklio ir galios stiprintuvo reikalingo valdyti variklį
3. Jutiklio matuojančio ašies pasisukimo kampą jutiklio atžvilgiu
4. Duomenų išvedimo į kompiuterį dalies

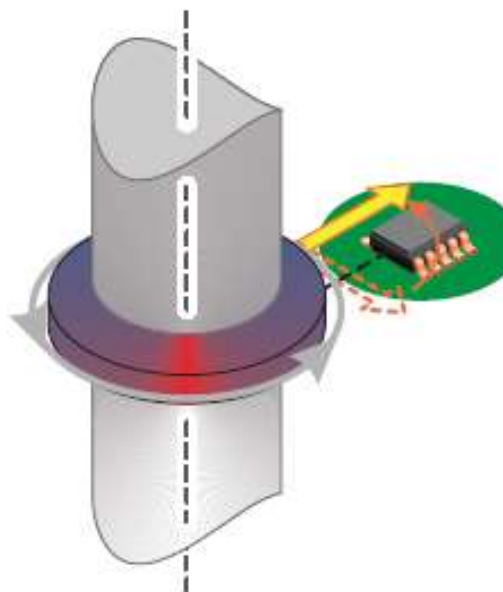
Variklis naudojamas makete - segmentinis kampinis variklis (angl. *voice coil motor*), kuris pritvirtintas prie laisvai besisukančios ašies. Ašis sukais naudojant riedėjimo guolį. Tai suteikia sistemai galimybę pasisukti bet koku kampu variklio veikimo ribose, neturint žingsnių, kaip pavyzdžiui, naudojant žingsninį variklį. Variklis valdomas naudojant du tiltu sujungtus galios operacinius stiprintuvus. Tai leidžia iš vienpolio maitinimo pasukti variklį dviem kryptimis. Valdymo algoritmai realizuoti mikrovaldiklyje STM32F051, valdymo signalas operaciniams stiprintuvams išvedamas naudojant 12 bitų kodas – analogas keitiklį. Kampo jutiklių duomenys nuskaitomi naudojant tą patį mikrovaldiklį. Pagal gautus duomenis ir naudojamą valdymo algoritmą atliekamas sistemos valdymas. Duomenys su sistemos parametrais nuskaitomi tiesiogiai iš mikrovaldiklio atminties kur yra kintamieji naudojant SWD sąsają ir programatorių. Surinkti duomenys naudojami tolimesniuose skaičiavimuose. Apibendrinta maketo struktūrinė schema pateikta 2.15 pav.



2.15 pav. Tyrimo maketo struktūrinė schema

Tyrimui naudojami trys ašies pasisukimo kampo jutikliai užmontuoti ant varikio sukimosi ašies skirtingais būdais, pagal skirtingų jutiklių reikalavimus. Magnetinis kampo jutiklis A1335

montuojamas šalia sukimosi ašies (angl. *off axis*), o 12 polių magnetas pritvirtinamas prie ašies, kaip pavaizduota 2.16 pav.



2.16 pav. Ašies pasisukimo kampo jutiklio montavimas makete[13]

Kitas jutiklis – optinis inkrementinis enkoderis montuojamas tiesiai ant ašies sujungimui naudojant lanksčią jungtį (angl. *coupling*).

Dar vienas ašies pasisukimo kampo jutiklis: lazeris montuojamas ant variklio, taip kad lazerio spindulys kirstų sukimosi ašį. Optinė liniuotė pastatoma 130 mm atstumu nuo sukimosi ašies centro.

2.4. Kampinio pozicionavimo sistemos tyrimo metodika

Prieš pradedant tyrimą suformuluojamos hipotezės, kurias norima patikrinti atliekant tyrimą.

Hipotezės:

1. Didelę įtaką kampinio pozicionavimo tikslumui turi jutiklio rezoliucija.
2. PID valdymo algoritme didžiausia įtaką valdymo tikslumui turi integralinė dalis.
3. Kampo pervaldymui didžiausią įtaką daro proporcinė ir integralinė dalys.
4. PID integralinė dalis prailgina sistemos kampo nusistovėjimo laiką.

Hipotezių statistiniam patvirtinimui arba paneigimui atliekamas tyrimas, naudojant faktorinį eksperimentą. Faktorinis eksperimentas pasižymi gebėjimu įvertinti kintamųjų tarpusavio sąsajas tarp visų proceso kintamųjų. Tai sumažina pirmojo ir antrojo tipo klaidų tikimybę [30]. Tyrimo

objektas yra kampinio pozicionavimo sistema ir jos pozicionavimo tikslumas, kampo pozicijos pervaldymas ir pozicijos nusistovėjimo laikas. Tyrime naudojami trys skirtingi kampo matavimo jutikliai ir PID valdymo algoritmas su trimis skirtingais kiekvieno parametro lygiais. Iš skirtingų PID koeficientų kombinacijų gaunama dar skirtingų valdymo algoritmų variantų: P, PI, PD ir PID.

Valdymo koeficientų įtakos tyrimas atliekamas naudojant 3^3 faktorinį eksperimentą. Faktorius A – sistemos valdymo algoritmo proporcinės dalies stiprinimo koeficientas K_p . Faktorius B - sistemos valdymo algoritmo integralinės dalies stiprinimo koeficientas K_i . Faktorius C - sistemos valdymo algoritmo diferencialinės dalies stiprinimo koeficientas K_d . Matavimai vykdomi pagal 2.2 lentelėje pateiktus variantus. Kadangi vykdomas 3 faktorių su 3 lygiais faktorinis eksperimentas gaunami $27=3^3$ skirtingi matavimo variantai. Bandymas bus kartojamas po tris kartus, todėl išviso atliekami $81=27*3$ matavimas. Visi matavimai atliekami atsitiktine tvarka, kad išvengti aplinkos faktorių įtakos.

2.2 lentelė. PID valdymo koeficientų tyrimo lentelė

Bandymo varianto Nr.	Faktoriai		
	A(P)	B(I)	C(D)
1	1	-1	1
2	1	-1	0
3	1	-1	-1
4	0	0	-1
5	0	0	0
6	0	0	1
7	-1	0	-1
8	-1	0	0
9	-1	0	1
10	0	-1	1
11	0	-1	0
12	0	-1	-1
13	1	1	1
14	1	1	-1
15	1	1	0
16	-1	-1	1
17	-1	-1	0
18	-1	-1	-1
19	0	1	1
20	0	1	0
21	0	1	-1
22	1	0	-1
23	1	0	1
24	1	0	0
25	-1	1	0
26	-1	1	-1
27	-1	1	1

Kiekvienam bandymo variantui išmatuojami sistemos valdymo parametrai:

- Absoliutinė nusistovėjusio kampo paklaida, laipsniais (angl. *error*)
- Kampinės pozicionavimo sistemos pervaldymas, laipsniais (angl. *overshoot*)
- Kampinės pozicionavimo sistemos nusistovėjimo laikas (angl. *settling time*)

Norint sumažinti matavimų kiekį, matavimai bus atlikti naudojant tik magnetinį kampo jutiklį A1335 ir 12 polių magnetą. Absoliutinė nusistovėjusio kampo paklaidos priklausomybė nuo kampo jutiklio tipo ir rezoliucijos tirama atskirai. PID valdymo koeficientų lygiai naudojami tyrimo metu pateikti 2.3 lentelėje.

2.3 lentelė. PID koeficientų lygiai

Lygis	P (K_p)	I (K_i)	D (K_d)
-1	5	0	0
0	10	10	1
1	15	20	2

Pirmosios hipotezės patikrinimui naudojamas vieno faktoriaus faktorinis eksperimentas su trimis lygiais, kurie bus skirtingi ašies pasisukimo kampo jutikliai. Atlikus kampo jutiklių analizę pasirenkami trys skirtingu principu veikiantys jutikliai:

- Magnetinis kampo jutiklis A1335, naudojant 12 polių magnetą, pritvirtintą prie sukimosi ašies.
- Inkrementinis optinis enkoderis A58F.
- Lazerio spindulio projektavimas ant optinės liniuotės TSL1402R.

Kampinio pozicionavimo palaida matuojama išderinant sistemą į abi puses iš nustatytos kampo pozicijos ir palaukus, kol ašies kampas atsistatys į nustatytą poziciją. Skirtumas tarp nusistovėjusių kampo reikšmių yra kampo pozicionavimo paklaida. Su kiekvienu kampo jutikliu atliekami po 15 matavimų. Magnetinio ir lazerinio jutiklio paklaida matuota naudojantis optinį inkrementinį enkoderį A58F kurio rezoliucija yra $0,00083^\circ$. Optinio inkrementinio enkoderio atveju sistemos pozicionavimo absoliutinė paklaida matuojama naudojant optinį metodą projektuojant lazerio spindulį ant plokštumos, gaunamas trikampis ir apskaičiuojamas jo smailus kampas. Esant 4 metrų atstumui ir 0,05mm lazerio pozicijos matavimo tikslumui, kampo matavimo tikslumas yra $0,0007^\circ$. Sistemos valdymui naudojamas pilnas PID valdymo algoritmas su proporcingais koeficientais visiems kampo jutikliams. Gauti duomenys analizuojami naudojant statistinės analizės įrankius.

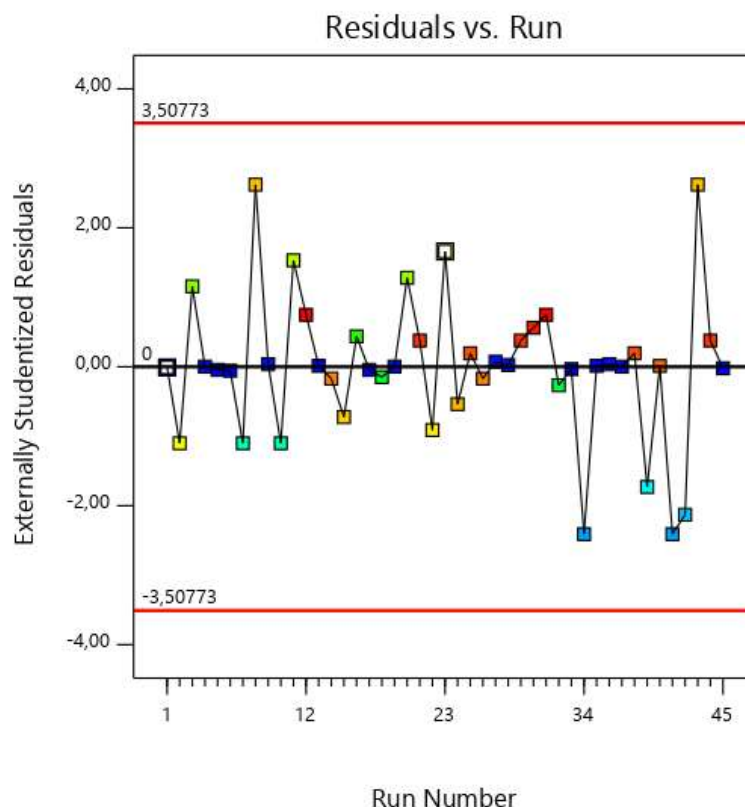
3. TYRIMO REZULTATAI

Atliekant tyrimą gauti duomenys, toliau analizuojami naudojant „Design Expert“ programinę įrangą. Pirmosios hipotezės patikrinimui panaudoto vieno faktoriaus su 3 lygiais eksperimento gauti duomenys pavaizduoti 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Ašies pasisukimo kampo jutiklių tyrimo lentelė

Bandymo Nr.	Kampo paklaida, °				
	Magnetinis	Bandymo Nr.	Lazerinis	Bandymo Nr.	Enkoderis
2	0,0468	3	0,040	1	0,0016
12	0,0624	7	0,021	4	0,0017
14	0,0546	8	0,051	5	0,0013
15	0,0500	10	0,021	6	0,0012
21	0,0593	11	0,043	9	0,0020
22	0,0484	16	0,034	13	0,0018
24	0,0515	18	0,029	17	0,0013
25	0,0578	20	0,041	19	0,0017
26	0,0546	23	0,024	27	0,0023
29	0,0593	32	0,028	28	0,0019
30	0,0609	34	0,011	33	0,0014
31	0,0624	39	0,016	35	0,0018
38	0,0578	41	0,011	36	0,0020
40	0,0562	42	0,013	37	0,0017
44	0,0593	43	0,051	45	0,0015

Reikia įsitikinti, kad matavimų atlikimo metu nepradėjo veikti neįvertintas aplinkos faktorius, kintantis laike. Pavyzdžiui, tai galėtų būti temperatūros ar drėgmės pokytis laike matavimų atlikimo metu. Tai galima įvertinti analizuojant matavimo rezultatų reziduumus pagal matavimų atlikimo eiliškumą laike, rezultatai pateikti 3.1 pav. Grafike pavaizduoti duomenys turi būti išsidėstę atsitiktine tvarka, jeigu taip nėra tai gali reikšti, kad tyrimas yra paveiktas nekontroliuojamo faktoriaus priklausančio nuo laiko [31].



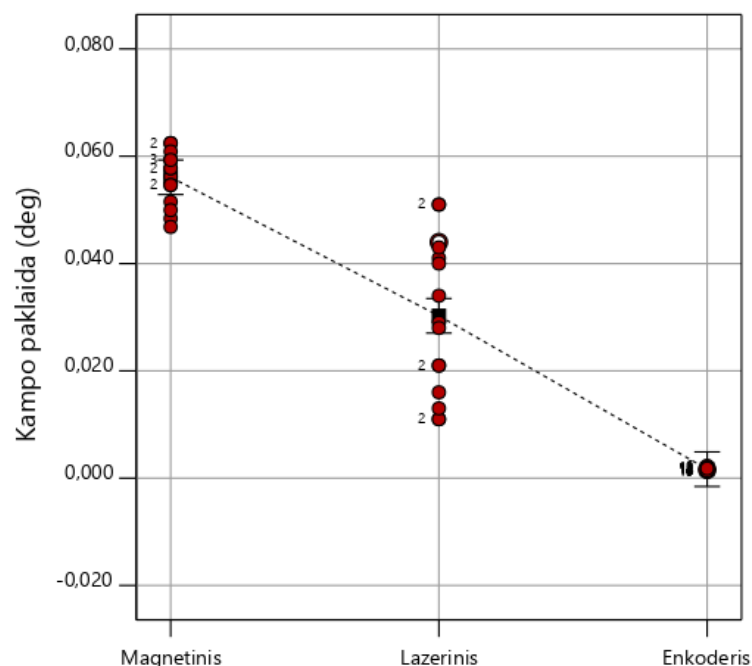
3.1 pav. Rezidijų priklausomybė nuo matavimų atlikimo eiliškumo

Gautame grafike duomenys atrodo išsidėstę atsitiktine tvarka tai reiškia, kad tyrimo rezultatai nebuvo paveikti nekontroliuojamo faktoriaus. Horizontalios raudonos linijos parodo 95% pasiklioavimo lygmens ribą, kad duomenys nėra išsibarstę daugiau, nei tai sukelia matavimų imties deviacija.

Jutiklių tipo įtakos kampinio pozicionavimo sistemos paklaidai tyrimo metu gauti duomenys pavaizduoti 3.2 pav. Iš gauto grafiko matyti, kad skirtingi jutikliai turi pastebimą įtaką kampo pozicionavimo paklaidai. Apskaičiavus statistinius įverčius, kurie pateikti 3.2 lentelėje, galima pastebėti, kad didžiausias kampo paklaidos vidurkis yra magnetinio jutiklio A1335 $0,0561 > 0,0289 > 0,00168$, didžiausias standartinis nuokrypis yra lazerinio jutiklio $s=0,01337$. Mažiausias vidurkis ir standartinis nuokrypis yra optinio inkrementinio enkoderio.

3.2 lentelė. Statistiniai įverčiai

Jutiklio tipas	Imties vidurkis	Standartinis nuokrypis, s	Deviacija, s^2
Magnetinis	0,0561	0,00482	2,48839E-05
Lazerinis	0,0289	0,01337	0,000191495
Enkoderis	0,00168	0,000295	9,31429E-08



3.2 pav. Jutiklių paklaidos tyrimo rezultatai

Gautos trys imtys statistiškai palyginamos naudojant t testą. Hipotezė $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$; $H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$. Duomenys pateikti 3.3 lentelėje.

3.3 lentelė. t-testo duomenys

Palyginimas	Vidurkio skirtumas	t, H ₀	p
Magnetinis su lazeriniu	0,0258	8,096	4,11E-10
Magnetinis su enkoderiu	0,0544	17,056	0
Lazerinis su enkoderiu	0,0286	8,960	2,68E-11

Tikimybė, kad hipotezė H_0 bus atmesta klaidingai yra lygi p reikšmei. Pasiklovimo lygmuo p šiuo atveju yra labai mažas, todėl galima teigti, kad visos imtys yra statistiškai skirtingos. Didžiausias skirtumas yra tarp magnetinio jutiklio ir inkrementinio optinio enkoderio kampinio pozicionavimo paklaidų, nes t reikšmė yra didžiausia. Tai patvirtina pirmąją hipotezę, kad kampo jutiklio rezoliucija turi didelę įtaką kampo pozicionavimo tikslumui.

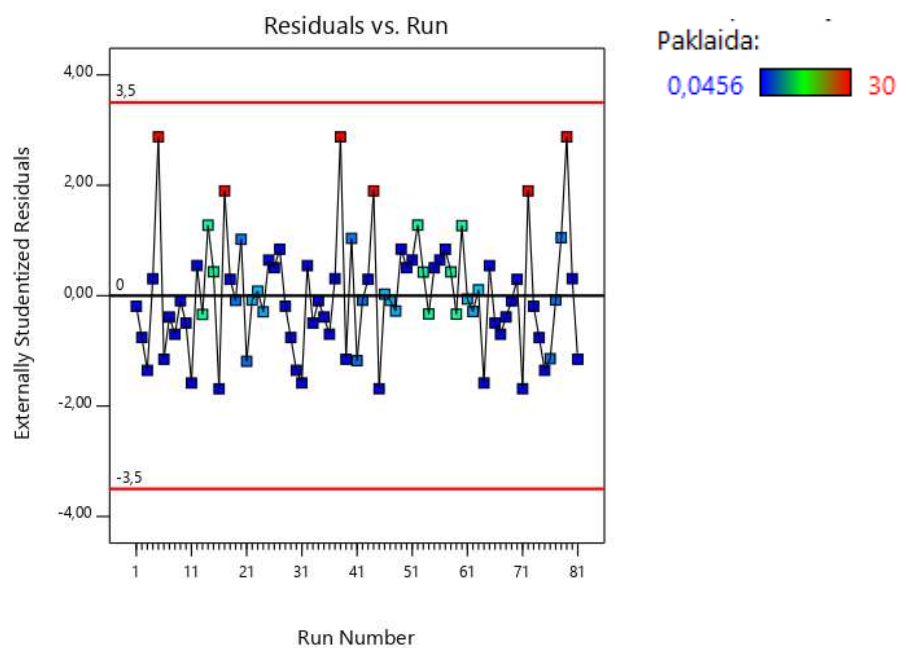
Toliau atliekamas PID koeficientų įtakos kampinio pozicionavimo sistemos valdymui tyrimas. Išmatuoti trys kampinio pozicionavimo sistemos pereinamosios charakteristikos parametrai (absoliutinė nusistovėjusio kampo paklaida, kampinės pozicionavimo sistemos pervaldymas, kampinės pozicionavimo sistemos nusistovėjimo laikas).

Pilno 3^3 faktorinio eksperimento sugrupuoti duomenys pateikti 3.4 lentelėje. Kiekviena PID kombinacija išmatuota po tris kartus, stengiantis išvengti atsitiktinių rezultatų.

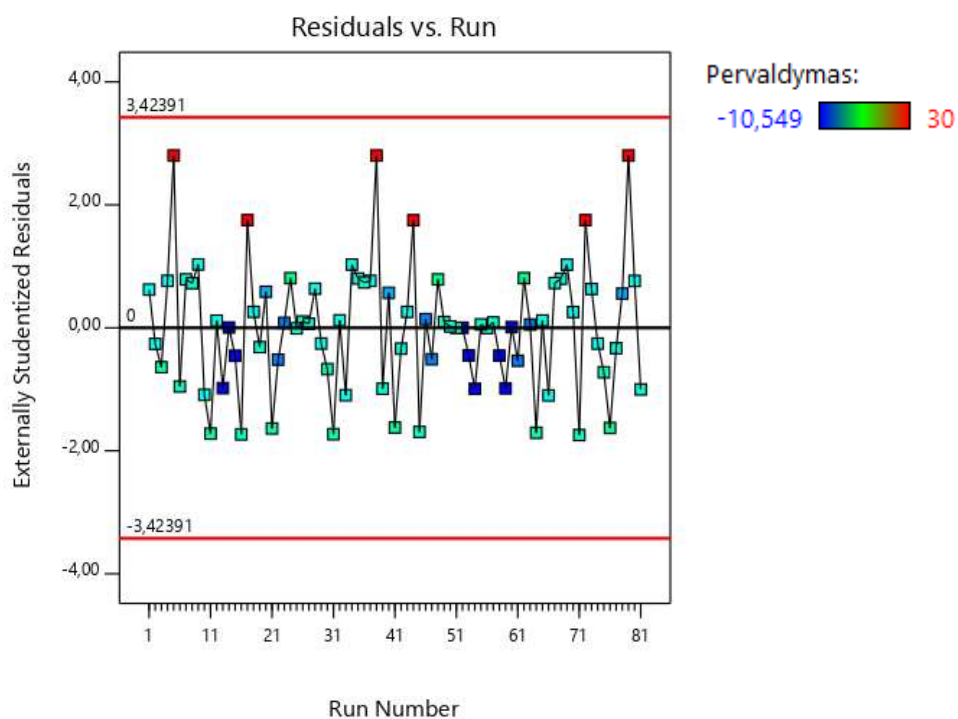
3.4 lentelė. Sugrupuoti PID koeficientų tyrimo duomenys

P	I	D	Paklaida, °			Pervaldymas, °			Nusistovėjimo laikas, ms		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	-1	1	3,62	3,707	3,765	-3,62	-3,707	-3,765	690	622	647
1	-1	0	3,371	3,385	3,411	0,921	0,795	0,822	573	696	649
1	-1	-1	3,209	3,267	3,458	3,678	3,751	3,722	2001	1966	1919
0	0	-1	0,0456	0,054	0,577	2,695	2,534	2,27	3403	3820	4026
0	0	0	0,062	0,059	0,0515	0,116	0,146	0,139	15210	14052	13024
0	0	1	0,046	0,062	0,054	0,16	0,234	0,214	12230	9982	10678
-1	0	-1	0,049	0,059	0,048	0,556	0,545	0,534	7054	8953	8501
-1	0	0	0,051	0,057	0,054	0,6	0,673	0,65	10230	9524	10125
-1	0	1	0,061	0,065	0,059	1,34	1,402	1,358	20010	19528	21025
0	-1	1	5,714	5,408	5,851	-5,714	-5,408	-5,851	452	512	504
0	-1	0	5,5	5,47	5,6	-5,5	-5,47	-5,6	568	498	537
0	-1	-1	5,02	5,1	5,05	4,5	4,4	4,5	706	687	724
1	1	1	0,056	0,059	0,057	0,146	0,143	0,134	6000	5894	6026
1	1	-1	30	30	30	30	30	30	1000000	1000000	1000000
1	1	0	0,057	0,062	0,061	1,743	1,931	1,689	4026	3978	3993
-1	-1	1	10,5	10,549	10,52	-10,5	-10,549	-10,52	3506	3498	3597
-1	-1	0	10,461	10,432	10,447	-10,461	-10,432	-10,447	3745	3627	3502
-1	-1	-1	10,535	10,549	10,497	-10,535	-10,549	-10,497	1679	1735	1654
0	1	1	0,059	0,054	0,057	0,629	0,659	0,643	4568	4895	4754
0	1	0	0,051	0,048	0,056	0,207	0,175	0,161	3324	3852	4301
0	1	-1	0,049	0,054	0,051	3,032	2,989	3,1	967	956	941
1	0	-1	30	30	30	30	30	30	1000000	1000000	1000000
1	0	1	0,049	0,055	0,053	0,058	0,061	0,048	10258	11065	10985
1	0	0	0,05	0,052	0,54	1,508	1,325	1,268	7023	6057	7230
-1	1	0	0,049	0,057	0,056	1,232	1,264	1,252	15230	16035	15603
-1	1	-1	0,06	0,058	0,052	1,854	1,465	1,628	5564	5230	5159
-1	1	1	0,055	0,061	0,051	1,523	1,652	1,62	13250	14002	13892

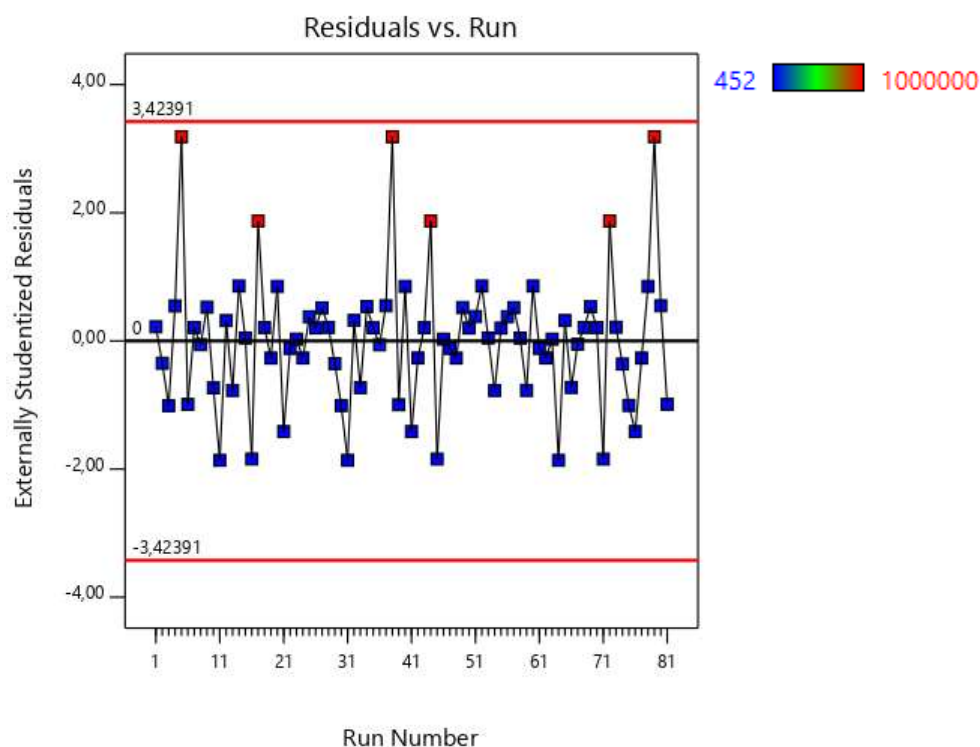
Prieš atliekant detalesnę duomenų statistinę analizę įsitikinama ar kampinio pozicionavimo sistemos tyrimo metu surinkti duomenys, nėra paveikti laike kintančių neįvertintų faktorių. Kiekvienam išmatuotam parametrai, nubraižomi matavimo rezultatų reziduumai pagal matavimų atlikimo tvarką laike. Grafikai pateikti 3.3, 3.4 ir 3.5 pav.



3.3 pav. Kampo palaidos rezidijų priklausomybė nuo matavimų atlikimo eiliškumo



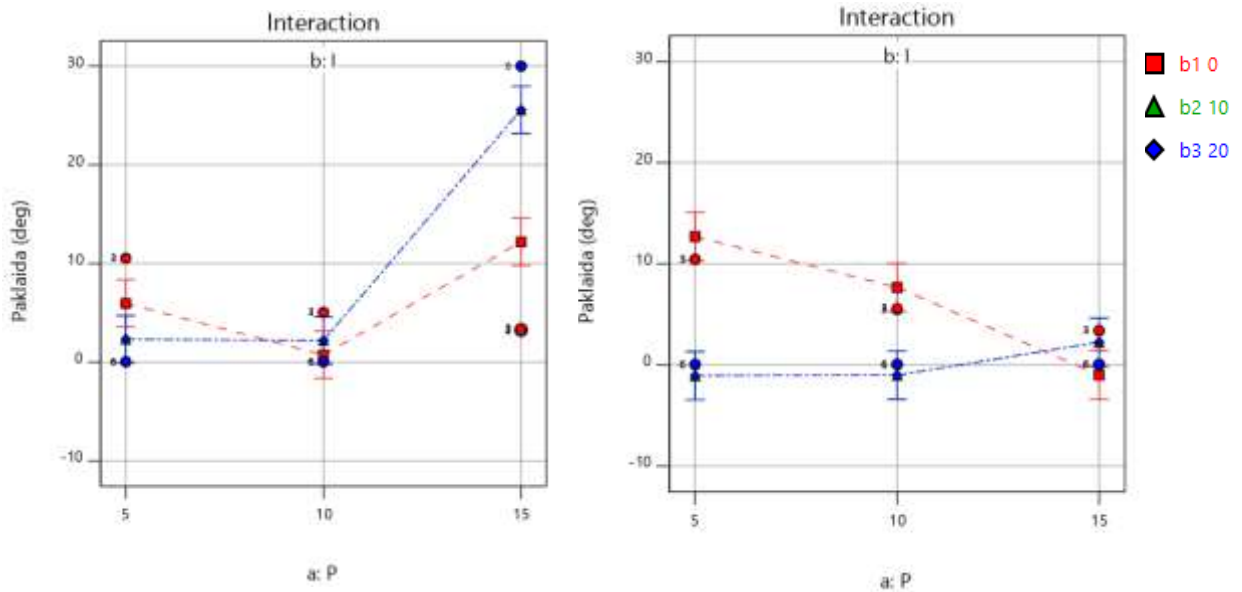
3.4 pav. Kampo pervaldymo rezidijų priklausomybė nuo matavimų atlikimo eiliškumo



3.5 pav. Kampo nusistovėjimo laiko rezidijų priklausomybė nuo matavimų atlikimo eiliškumo

Pagal aukščiau pateiktus tris grafikus matyti, kad rezidijai išsidėstę atsitiktine tvarka. Tai reiškia, kad tyrimas buvo paveiktas neįvertinto faktoriaus kintančio laike. Taip pat rezidijų reikšmės neviršija raudonomis linijomis pažymėtų ribų. Tai parodo 95% pasiklovimo lygmens ribą, kad duomenys nėra išsibarstę daugiau, nei tai sukelia matavimų imties deviacija. Raudonai pažymėti taškai yra labiausiai nutolę nuo vidurkio. Tai yra todėl, kad sistema tuo metu pradeda generuoti, ir smarkiai išauga matuojami sistemos parametrai.

Pradžioje atliekama absoliutinės nusistovėjusio kampo paklaidos priklausomybės nuo PID koeficientų analizė. Nubraižomi faktorių tarpusavio sąveikos, nusistovėjusio kampo absoliutinei paklaidai grafikai, kurie pavaizduoti 3.6 pav. Iš grafikų matyti, kad egzistuoja faktorių A(P) ir B(I) sąveika. Tai parodo susikertančios linijos esant skirtingoms P ir I reikšmėms. Kai K_p yra lygi 15 pastebimos didesnės nusistovėjusio kampo paklaidos, taip yra dėl didelio sistemos pervaldymo, o pridėjus ir integralinę dalį K_i kampinio pozicionavimo sistema pradeda generuoti. Tai matosi sistemos pereinamosiose charakteristikose. Charakteristikos pateiktos P-1 priede. Pridėjus integralinę dalį prie proporcinės dalies, kai ji yra mažesnė už 15 gaunamas tiksliausias pozicionavimas t.y. kampinio pozicionavimo absoliutinė paklaida yra mažiausia.



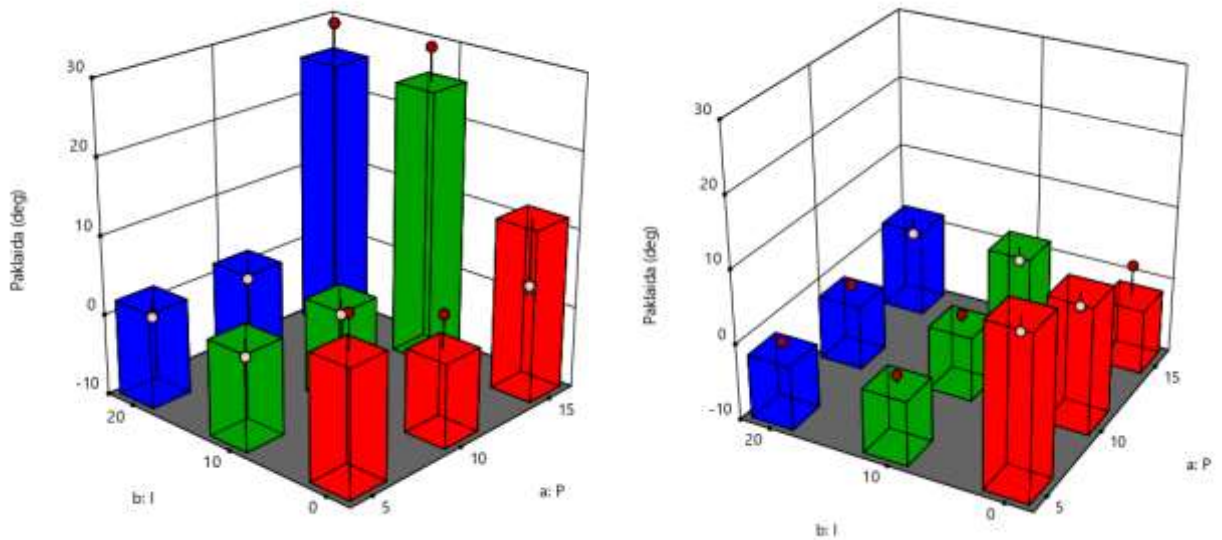
3.6 pav. K_p ir K_i sąveikos įtaka paklaidai, kai $K_d = 0$ kairėje; kai $K_d = 1$ dešinėje

Panaudojus tyrime surinktus duomenis apskaičiuojami regresijos koeficientai, kurie parodo prognozuojamą y ašies reikšmę x ašies reikšmei pakitus vienetu. Regresijos koeficientai pateikti 3.5 lentelėje. Pagal pateiktus duomenis matyti, kad A faktorius (K_p) turi neigiamą įtaką kampo paklaidai, t.y. ją mažina didinant proporcinės dalies stiprinimo koeficientą. Didžiausią neigiamą įtaką turi B faktorius (K_i) tai reiškia, kad didinant integralinės dalies stiprinimo koeficientą kampo paklaida sumažės daugiausiai. Tai patvirtina antrąją hipotezę, kad PID valdymo algoritme didžiausia įtaką valdymo tikslumui turi integralinė dalis. Faktorius C (K_d) turi nežymią teigiamą įtaką. Tačiau A ir B tarpusavio sąveika sukelia nemažą teigiamą įtaką kampo paklaidai. Kas ir yra matyti 3.6 pav. , kad esant didelėms P ir I reikšmėms žymiai išauga paklaida ir sistema pradeda generuoti.

3.5 lentelė. Koeficientų įtaka nusistovėjusio kampo paklaidai

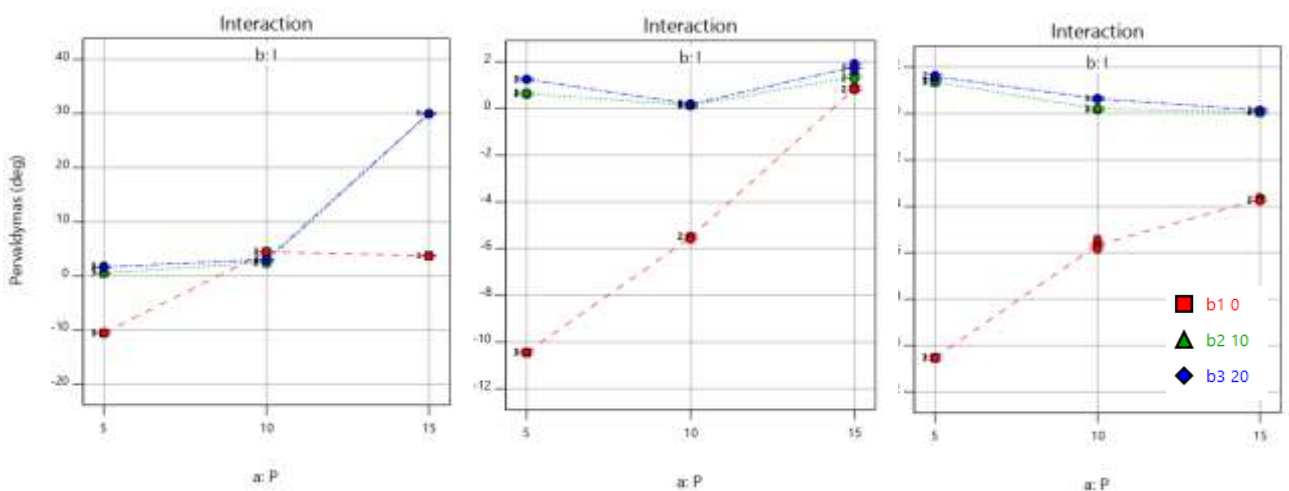
Koeficientai	
A	-1,186
B	-3,206
C	0,069
AB	1,753
AC	0,053
BC	-0,076

Žemiau esančiame 3.7 pav. pateikta išmatuotos ir prognozuojamos kampinio pozicionavimo absoliutinės paklaidos. Raudoni ir balti taškai atspindi išmatuotą reikšmę, o stulpeliai apskaičiuotą naudojant modelį. Modelis sudarytas naudojant regresijos metodą.



3.7 pav. Proporcinės ir integralinės dalių įtaka nustovėjusiai absoliutiniai kampo paklaidai, kai $K_d=0$ kairėje; kai $K_d=1$ dešinėje

Analogiškai, kaip ir nusistovėjusio kampo absoliutinės paklaidos duomenys, analizuojami kampo pervaldymo duomenys. Nubraižyti faktorių sąveikos, darančios įtaką kampinio pozicionavimo sistemos kampo pervaldymui grafikai pateikti 3.8 pav.



3.8 pav. K_p ir K_i sąveikos įtaka pervaldymui, kai $K_d=0$ kairėje, kai $K_d=1$ centre, kai $K_d=2$ dešinėje

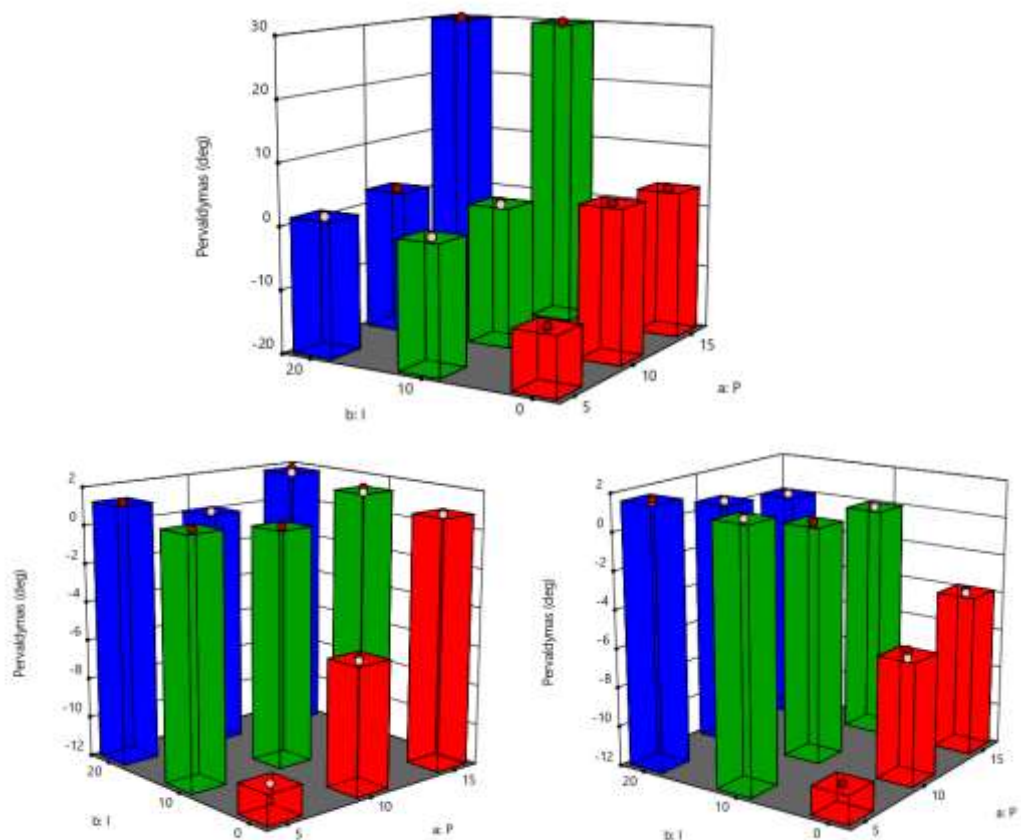
Iš gautų duomenų apie sistemos kampo pervaldymą, apskaičiuoti regresijos koeficientai pateikti 3.6 lentelėje. Pagal gautas koeficientų reikšmes galime matyti, kad A faktorius (K_p) ir B

faktorius (K_i) turi panašią teigiamą įtaką kampo pervaldymui. Didinant šių faktorių reikšmes kampo pervaldymo reikšmė didėja. Faktorius C (K_d) daro neigiamą įtaką kampo pervaldymui. Tai patvirtina trečiąją hipotezę. Tačiau dar yra sąveikos tarp faktorių, todėl didinti vieną ar kitą faktorių neatsižvelgiant į tarpusavio sąveiką galime gauti priešingą rezultatą, nei tikėtasi. Pavyzdžiui, daug didinant diferencialinę dalį tikimės sumažinti kampo pervaldymą, bet prie didelių K_d reikšmių gali pradėti generuoti sistema.

3.6 lentelė. Koeficientų įtaka kampo pervaldymui

Koeficientai	
A	2,132
B	2,891
C	-1,721
AB	-2,544
AC	-1,475
BC	0,903

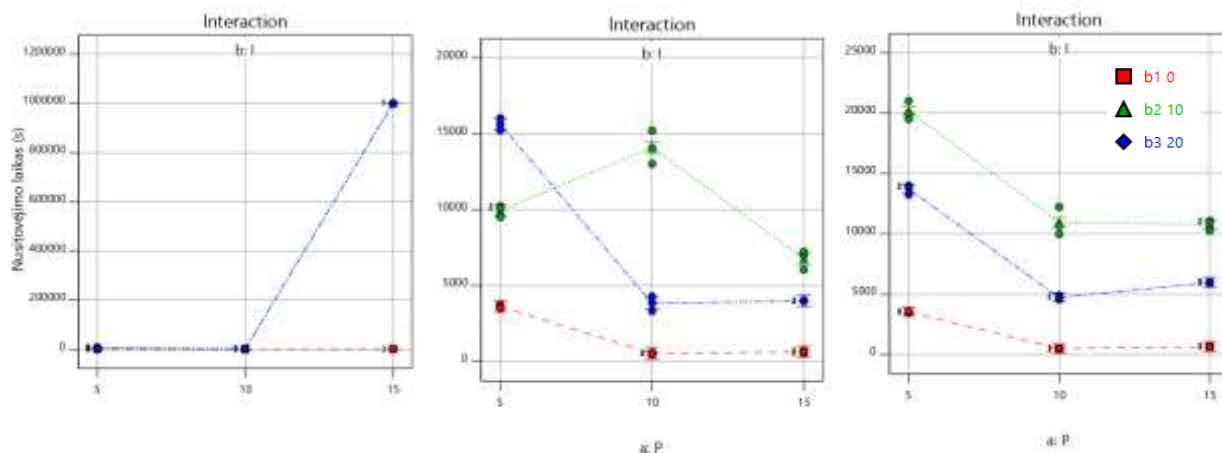
Žemiau esančiame 3.9 pav. pateikta išmatuotos ir prognozuojamos kampo pervaldymo reikšmės.



3.9 pav Proporcinės ir integralinės dalių įtaka kampo pervaldymui, kai $K_d = 0$ viršuje; kai $K_d = 1$ kairėje; kai $K_d = 2$ dešinėje

Kaip ir prieš tai atliekama kampo nusistovėjimo laiko analizė priklausomai nuo PID

valdymo koeficientų. Sąveikos grafikai pateikti 3.10 pav.



3.10 pav. K_p ir K_i sąveikos įtaka kampo nusistovėjimo laikui, kai $K_d=0$ kairėje, kai $K_d=1$ centre, kai $K_d=2$ dešinėje

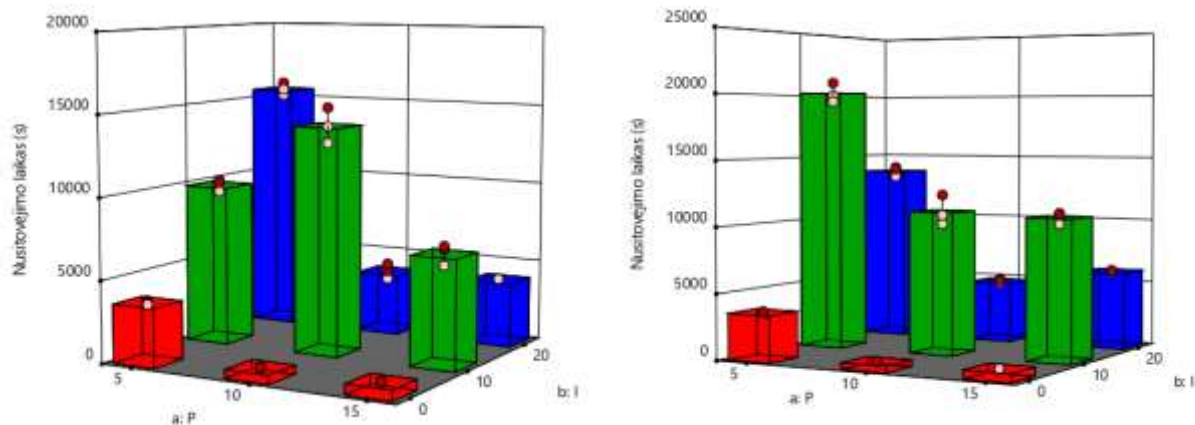
Iš gautų duomenų apskaičiuoti regresijos koeficientai, pateikti 3.7 lentelėje.

3.7 lentelė. Koeficientų įtaka kampo nusistovėjimo laikui

Koeficientai	
A	-2429,4
B	2319,0
C	2286,2
AB	-1471,9
AC	-1179,1
BC	1367,4

Matyti, kad A faktorius turi neigiamą įtaką, o B ir C daro teigiamą įtaką kampo nusistovėjimo laikui. Taip pat yra žymios sąveikos tarp faktorių. Ketvirtąją hipotezę: PID integralinė dalis prailgina sistemos kampo nusistovėjimo laiką. Pagrindžia faktoriaus B – integralinės dalies koeficiento didžiausia teigiama reikšmė. Todėl integralinės dalies koeficientas daugiausiai prailgina sistemos kampo nusistovėjimo laiką.

Žemiau esančiame 3.11 pav. pateikta išmatuotos ir prognozuojamos kampo nusistovėjimo laiko reikšmės esant skirtingiems diferencialinės dalies stiprinimo koeficientams.



3.11 pav. Proporcinės ir integralinės dalių įtaka kampo nusistovėjimo trukmei, kai $K_d = 1$ kairėje; kai $K_d = 2$ dešinėje

3.1. Kampinio pozicionavimo sistemos tyrimo rezultatų apibendrinimas

Apibendrinant tyrimo rezultatus, galima pastebėti, kad rezultatai gauti matuojant realios kampinio pozicionavimo sistemos absoliutinę kampo valdymo paklaidą yra panaši į apskaičiuotą teoriškai. Absoliutinės kampinio pozicionavimo paklaidos valdymo rezultatų ir apskaičiuotos teoriškai palyginimas pateiktas 3.8 lentelėje.

3.8 lentelė. Kampo valdymo paklaidos rezultatų palyginimas

Kampo jutiklis	Absoliutinė kampo valdymo paklaida	
	Teoriškai apskaičiuota	Išmatuotos imties vidurkis
Magnetinis jutiklis A1335 + 12 polių magnetas	$0,0833^\circ$	$0,0561^\circ$
Inkrementinis enkoderis A58F	$0,00083^\circ$	$0,00168^\circ$
Optinis metodas TSL1402R + lazeris	$0,0279^\circ$	$0,0289^\circ$

Skirtumas tarp teoriškai apskaičiuotos ir 15 išmatuotų reikšmių vidurkio, magnetinio jutiklio A1335 atveju yra $0,0272^\circ$. Kai jutiklis yra optinis inkrementinis enkoderis A58F skirtumas yra lygus $-0,00085^\circ$, o esant optiniam matavimo metodui, naudojant lazerį ir optinę liniuotę TSL1402 skirtumas yra $-0,001^\circ$. Naudojant magnetinį kampo jutiklį gautas tikslesnis kampo valdymas, nei apskaičiuotas teoriškai. Taip gali būti dėl didesnio magnetinio lauko stiprio prie jutiklio. Kai magnetinio laukos stipris $B=300$ G kampo matavimo paklaida yra $\pm 0,5^\circ$, padidinus magnetinio

lauko stiprį iki 900 G gaunamas tikslesnis kampo matavimas, tada valdymo paklaida sumažėja iki $\pm 0,2^\circ$ [19].

Pirmosios hipotezės (Didelę įtaką kampinio pozicionavimo tikslumui turi jutiklio rezoliucija) patikrinimas atliktas naudojantis trijų lygių vieno faktoriaus eksperimentą. Tyrimo metu duomenys palyginti, naudojant t – testą.

Kitos trys hipotezės patikrinamos, naudojant 3^3 faktoriinį eksperimentą. Panaudojus gautus duomenis apskaičiuojami kiekvienos išmatuotos charakteristikos regresijos koeficientai, kurie parodo koeficientų įtaką išėjimo funkcijai. Regresijos koeficientai pavaizduoti žemiau esančioje 3.9 lentelėje.

3.9 lentelė. Regresijos koeficientų įtaką sistemos valdymo charakteristikoms

Regresijos koeficientai			
Faktorius	Paklaidai	Pervaldymui	Nusistovėjimo laikui
A(K_p)	-1,186	2,132	-2429,4
B(K_i)	-3,206	2,891	2319,0
C(K_d)	0,069	-1,721	2286,2
AB	1,753	-2,544	-1471,9
AC	0,053	-1,475	-1179,1
BC	-0,076	0,903	1367,4

Absoliutinei nusistovėjusio kampo paklaidai didžiausią neigiamą įtaką daro B faktorius, tačiau dėl A ir B tarpusavio sąveikos esant didesnėms A reikšmėms sistemas gali pradėti generuoti, ir todėl išaugs paklaida.

Kampinio pozicionavimo sistemos kampo pervaldymui didžiausią teigiamą įtaką daro B ir A faktoriai. Tačiau pervaldymą mažina C faktorius.

Sistemos kampo nusistovėjimo laiką labiausiai ilgina B faktorius, o A faktorius trumpina kampo nusistovėjimo kampą. Faktorių sąveikos AB ir AC sutrumpina nusistovėjimo laiką, o BC prailgina.

IŠVADOS IR PASIŪLYMAI

Atlikus literatūros analizę, apžvelgti įvairūs kampinio pozicionavimo sistemų realizavimo variantai. Taip pat atlikta ašies pasisukimo kampo jutiklių analizė ir pasirinkti trys jutikliai, kurie panaudoti tyrime. Pirmasis - Magnetinis kampo jutiklis A1335, naudojant 12 polių magnetą, pritvirtintą prie sukimosi ašies, tokios jutiklio ir magneto konfigūracijos teoriškai pasiekiamas matavimo tikslumas yra $0,0833^{\circ}$. Kitas jutiklis – optinė liniuotė TSL1402R ir lazeris pritvirtintas prie sukimosi ašies, esant 130 mm atstumui tarp ašies ir jutiklio teoriškai pasiekiamas $0,0279^{\circ}$ matavimo tikslumas. Pats tiksliausias tyrime naudotas kampo jutiklis - Inkrementinis optinis enkoderis A58F, kurio teoriškai apskaičiuotas matavimo tikslumas yra $0,00083^{\circ}$.

Kampinio pozicionavimo sistemos, nusistovėjusio kampo absoliutinės paklaidos, priklausomybės nuo kampo jutiklio tipo tyrimo metu gauti duomenys yra panašūs į teoriškai apskaičiuotus. Duomenų palyginimas pateiktas 3.8 lentelėje. Pats tiksliausias jutiklis yra optinis inkrementinis enkoderis, kurį naudojant kampinio pozicionavimo sistema valdė pasisukimo kampą $0,00168^{\circ}$ tikslumu. Mažiausias tikslumas pasiektas naudojant magnetinį kampo jutiklį. Absoliutinis kampo pozicionavimo paklaidos vidurkis šiuo atveju yra $0,0561^{\circ}$. Didžiausias kampo paklaidos išsibarstymas gautas naudojant lazerį ir optinę liniuotę TSL1402R, matavimų imties vidurkis gautas $0,0289^{\circ}$, o standartinis nuokrypis yra $0,01337^{\circ}$.

PID valdymo algoritmo stiprinimo koeficientų įtakos kampinio pozicionavimo sistemos valdymo parametrų tyrimas vykdytas naudojant 3^3 faktoriinį eksperimentą. Tyrimo metu išmatuotų charakteristikų (sistemos nusistovėjusio kampo absoliutinė paklaida, kampo pervaldymas ir kampo nusistovėjimo laikas) gauti duomenys panaudoti sudarant sistemos modelius kiekvienai charakteristikai. Panaudojus regresijos metodą gauti koeficientai, parodantys kiekvieno faktoriaus įtaką procesui, koeficientai pavaizduoti 3.9 lentelėje. Naudojantis šiais duomenimis patikrintos ir patvirtintos hipotezės:

1. Didelę įtaką kampinio pozicionavimo tikslumui turi jutiklio rezoliucija.
2. PID valdymo algoritme didžiausia įtaką valdymo tikslumui turi integralinė dalis.
3. Kampo pervaldymui didžiausią įtaką daro proporcinė ir integralinė dalys.
4. PID integralinė dalis prailgina sistemos kampo nusistovėjimo laiką.

Gauti tyrimo rezultatai sutampa su pateiktais straipsnyje: „*PID Control System Analysis, Design, and Technology*“ atpausdintame „*IEEE Transactions on Control Systems Technology*“.

Projektuojant precizinę kampinio pozicionavimo sistemą svarbu pasirinkti didžiausios skiriamosios gebos kampo jutiklį. Taip pat naudoti PI ar PID valdymo algoritmą norint pasiekti geriausius kampinio pozicionavimo rezultatus su esama sistema. Nemažiau svarbu yra ir pavaros gebėjimas pasisukti kuo mažesniu žingsniu ar apskritai gebėti suktis tolygiai.

INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

1. Position Sensors [žiūrėta 2016-11-15]. Prieiga per internetą: http://www.electronics-tutorials.ws/io/io_2.html
2. Potentiometers: A Proven Position Sensing Solution that Every Engineer Needs to Consider in Modern Designs, October 1, 2011 By: Brian Rosengrant, Betatronix LLC, Bill Kostik, Betatronix LLC, Sensors, [žiūrėta 2016-11-15]. Prieiga per internetą: <http://www.sensorsmag.com/sensors/position-presence-proximity/potentiometers-a-proven-position-sensing-solution-every-engi-9038>
3. Digital capacitive angular-position sensor, E.B. Mohammed and M.Rehman, IEE Proc.-Sci. Meas. Technol., Vol. 150, No. I, Juniwry 2003 , [žiūrėta 2016-11-16]. Prieiga per internetą: <https://pdfs.semanticscholar.org/6407/a02096618110377b3e3298567ec4d9f90fbc.pdf>
4. US Patent, CAPACITIVE DIFFERENTIAL QUADRATURE ROTARY POSITION SENSOR, John V. Ulmen, Barrett E. Heyneman, Apr. 18, 2013, [žiūrėta 2016-11-16]. Prieiga per internetą: <https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US20130093439.pdf>
5. Angular Position Sensors (Shaft Angle Transducer), Professor Dr. Jean Pollefliet, 2013, [žiūrėta 2016-11-17]. Prieiga per internetą: <http://www.powerguru.org/angular-position-sensors-shaft-angle-transducer/>
6. Incremental Encoder Based Position and Speed Identification: Modeling and Simulation, Ioan Iov INCZE, Alin NEGREA, Maria IMECS, Csaba SZABÓ, Department of Electrical Drives and Robots, Faculty of Electrical Engineering, Technical University of Cluj-Napoca, 2010, [žiūrėta 2016-11-17]. Prieiga per internetą: <http://www.acta.sapientia.ro/acta-emeng/C2/emeng2-3.pdf>
7. ROTARY ENCODERS FA-CODER®, [žiūrėta 2016-11-17]. Prieiga per internetą: <http://www.tamagawa-seiki.com/english/encoder/>
8. What is a Resolver? , Advanced Micro Controls, Inc. [žiūrėta 2016-11-18]. Prieiga per internetą: <https://www.amci.com/industrial-automation-resources/plc-automation-tutorials/what-resolver/>
9. Precision Resolver-to-Digital Converter Measures Angular Position and Velocity, Jakub Szymczak, Shane O'Meara, Johnny Gealon and Christopher Nelson De La Rama , Analog Dialogue, MAR 2014, VOL48, [žiūrėta 2016-11-18]. Prieiga per internetą: <http://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/precision-rtdc-measures-angular-position-and-velocity.html>
10. SYNCHRO/RESOLVER CONVERSION HANDBOOK, Data device cormoraron, žiūrėta [2016-11-18]. Prieiga per internetą: <http://www.ddc-web.com/Documents/synhdbk.pdf>
11. žiūrėta [2016-11-19]. Prieiga per internetą: http://www.efunda.com/designstandards/sensors/lvdt/rvdt_intro.cfm
12. Position-sensing applications benefit from advances in Hall sensor technology, BY MARCEL URBAN, Austriamicrosystems, AG, žiūrėta [2016-11-19]. Prieiga per internetą:

- http://www.electronicproducts.com/Sensors_and_Transducers/Sensors/What_s_trending_with_Hall_sensors.aspx
13. Advanced On-Chip Linearization in the A1332 Angle Sensor IC, By Alihusain Sirohiwala and Wade Bussing, Allegro MicroSystems, LLC, žiūrėta [2016-11-19]. Prieiga per internetą: <http://www.allegromicro.com/en/Design-Center/Technical-Documents/Hall-Effect-Sensor-IC-Publications/Advanced-On-Chip-Linearization-A1332-Angle-Sensor-IC.aspx>
 14. Angle measurement using a miniature hall effect position sensor, Karol Bienczyk Electrodynamic and Mechatronics, 2009. SCE 11 '09. 2nd International Students Conference on, 19-21 May 2009, žiūrėta [2016-11-19]. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5156096/>
 15. NXP Magneto-Resistive Angular Sensors, žiūrėta [2016-11-22]. Prieiga per internetą: <http://eu.mouser.com/new/NXP-Semiconductors/NXP-KMZ60/>
 16. New Magnetoresistive Sensor Developments for Angle, Position and Speed Measurement in small-and micro-sized Actuators, Rolf Slatter, IKMT 2015; 10. ETG/GMM-Symposium Innovative small Drives and Micro-Motor Systems; Proceedings of žiūrėta [2016-11-22]. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7348491>
 17. žiūrėta [2016-11-22]. Prieiga per internetą: <http://www.robotroom.com/StreamHawk-Wireless-Explorer-Robot5.html>
 18. Interferometric angle measurement and the hardware options available from Renishaw, by M.A.V. Chapman, R. Fergusson-Kelly, A. Holloway, D. Lock, W. Lee, žiūrėta [2016-12-02]. Prieiga per internetą: https://www.google.lt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjJq7-1wubQAhVDXBQKHSHDBhoQFggmMAE&url=http%3A%2F%2Fresources.renishaw.com%2Fen%2Fdownload%2Fwhite-paper-interferometric-calibration-of-rotary-axes--48155&usg=AFQjCNFdtEhQBotNb8Q_LODckeDpRgevw&sig2=ojDmSDgUtjnZrM15s4wsZA
 19. A1335 Datasheet. žiūrėta [2017-05-22]. Prieiga per internetą:
 20. A58F DataSheet, žiūrėta [2017-05-22]. Prieiga per internetą: <http://metrology.precizika.lt/Product/A58.html>
 21. Sellers, David . „*An Overview of Proportional plus Integral plus Derivative Control and Suggestions for Its Successful Application and Implementation*“. Senior Engineer. Portland Energy Conservation Inc, Portland, Oregon. [žiūrėta 2017-04-25]. Prieiga per internetą: http://web.archive.org/web/20070307161741/http://www.peci.org/library/PECI_Control_Overview1_1002.pdf
 22. Shaw, John A. „*The PID Control Algorithm. How it works, how to tune it, and how to use it 2 nd Edition*“, 2003. [žiūrėta 2017-04-25]. Prieiga per internetą: <http://www.picvietnam.com/download/PIDcontrolbook2.pdf>

23. Heong Ang, Kiam, Chong ,Gregory. „*PID Control System Analysis, Design, and Technology*“ .Student Member, IEEE and Yun LiMember, IEEE, IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY, VOL. 13, NO. 4, JULY 2005. [žiūrėta 2017-04-28]. Prieiga per internetą: <http://eprints.gla.ac.uk/3817/1/IEEE3.pdf>
24. Morcos, Anthony. „*Motion System Design*“ of BEI Sensors & Systems Co. of Kimco Magnetics Div. , 2000. [žiūrėta 2017-04-05]. Prieiga per internetą: <http://machinedesign.com/linear-motion/latest-developments-voice-coil-actuators>
25. G.F. Franklin et al. "Feedback Control of Dynamic Systems", 5th Edition. Upper Saddle River, NJ, 2006, Pearson Education, Inc.
26. M3-RS Rotary Smart Stage with embedded controller [žiūrėta 2017-12-15]. Prieiga per internetą: <https://www.newscaletech.com/micro-motion-modules/m3-rs-rotary-smart-stages/#>
27. Journal of the Franklin Institute, Volume 350, Issue 7, September 2013, Pages 1886-1907, Stability and stabilization of networked control systems with random time delays and packet dropouts, Author Li Qiuab Qin Luo Feng Gong Shanbin Lib Bugong Xub. [žiūrėta 2017-12-15]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016003213001920>
28. Rotary Measuring Stages with angular measuring system DMT 200N-IMS [žiūrėta 2017-12-15]. Prieiga per internetą: <https://www.owis.eu/en/products/motorized-positioning-systems/produktgruppe/drehtische-1/produkt/477/productview/Main/>
29. Precision controller for segmented mirror telescope actuator: Control and tuning, Prasanna Deshmukh, Padmakar Parihar, Indian Institute of Astrophysics, Bangalore 560034, India. 2016 Indian Control Conference (ICC), Indian Institute of Technology Hyderabad, January 4-6, 2016. Hyderabad, India. [žiūrėta 2017-12-15]. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7441135>
30. DESIGNING EXPERIMENTS –An Overview, Gregory F. Gruska, Maureen S. Heaphy, ASQ STATISTICS DIVISION NEWSLETTER, VOL. 19, NO. 2 [žiūrėta 2017-12-20]. Prieiga per internetą: <http://asq.org/statistics/2000/04/design-of-experiments/designing-experiments-an-overview.pdf>
31. Lesson 11: Influential Points, 11.3 - Identifying Outliers (Unusual y Values) [žiūrėta 2018-03-10]. Prieiga per internetą: <https://onlinecourses.science.psu.edu/stat501/node/339>
32. Executive Summary World Robotics 2017 Industrial Robots [žiūrėta 2018-03-10]. Prieiga per internetą: https://ifr.org/downloads/press/Executive_Summary_WR_2017_Industrial_Robots.pdf

PRIEDAI

Priedas 1 Kampinio pozicionavimo sistemos pereinamosios charakteristikos, esant skirtingiems PID koeficientams.

