



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

AUTOMATIKOS KATEDRA

Simas Armonas

GEODEZINIŲ PRIETAISŲ POZICIONAVIMO PAVAROS TYRIMAS
ANALYSIS OF STEPPER GEAR IN GEODESIC EQUIPMENT

Baigiamasis magistro darbas

Automatikos studijų programa, 62401T104

Mechatroninių sistemų automatikos specializacija

Technologijos mokslų sritis, elektros inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2009

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTRETAS

AUTOMATIKOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėja

(parašas)

doc. dr. Zita Savickienė

(Mokslinis laipsnis, vardas pavardė)

2009_____

Simas Armonas

GEODEZINIŲ PRIETAISŲ POZICIONAVIMO SISTEMOS TYRIMAS

ANALYSIS OF STEPPER GEAR IN GEODESIC EQUIPMENT

Baigiamasis magistro darbas

Automatikos studijų programa, 62401T104

Mechatroninių sistemų automatikos specializacija

Technologijos mokslų sritis, elektros inžinerijos studijų kryptis

Vadovas doc. dr. Dainius Udris _____
(Parašas) (Data)

Konsultantas doc. dr. Angelė Kaulakienė _____
(Parašas) (Data)

Konsultantas doc. dr. Lionginas Radzevičius _____
(Parašas) (Data)

Vilnius, 2009

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Elektronikos fakultetas

Automatikos katedra

ISBN ISSN

Egz. sk. 3

Data **2009-05-25**

Automatikos studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas: **Geodezinių prietaisų pozicionavimo pavaros tyrimas**

Autorius: **Simas Armonas**

Kalba

☒ X lietuvių

☐ anglų

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjama ir modernizuojama Geodezijos institute naudojamo įtaiso, skirto geodezijos prietaisams kalibruoti, žingsninė pvara. Stende naudojama pvara nebeatitinka reikalaujamo tikslumo, ir neišvysto reikiamo greičio. Darbo tikslas – modernizuoti pozicionavimo pavarą (padidinti jos greitį ir tikslumą). Teorinėje dalyje aptariamas geodezijos prietaisų kalibravimo stendo veikimo principas, naudojama kalibravimo metodika, atliekamas žingsninio variklio dinaminų charakteristikų skaičiavimas. Eksperimentinėje dalyje pateikiamos principinė ir funkcinė modernizuotos pavaros valdiklio schemos. Taip pat nagrinėjamas pavaros valdymo algoritmas, pateikiamos esminės mikrovaldiklio programos dalys. Čia atliekama pavaros darbo režimų analizė, nagrinėjama mikrožingsnio svarba pavaros greičiui bei tikslumui. Modernizuotoje pavaroje naudojami moderniausi žingsninių pavarų valdymo metodai, pavaros tikslumas padidėjo 30 kartų.

Darbą sudaro: 8 dalys: įvadas, literatūros apie žingsnines pvaras analizė, tyrimo tikslas ir uždaviniai, teorinė dalis, eksperimentinė dalis, išvados ir rekomendacijos, literatūra.

Darbo apimtis – 60p. teksto be priedų, 15 iliustracijų, 8 lentelės, 38 bibliografiniai šaltiniai.

Reikšminiai žodžiai: žingsninė pvara, mikrožingsnis, valdiklis, žingsninis variklis, pavaros darbo režimai, būsenų analizė.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Electronics
Department of Automation

ISBN ISSN

Copies No. 3

Master Degree Studies **Automation** study programme Master's thesis.

Title: **Analysis of Stepper Gear Used in Geodesic Equipment**

Author Simas Armonas Academic supervisor Assoc Prof Dr Dainius Udrys

Thesis language

☒

Lithuanian

☐

English (English)

Annotation

This postgraduate thesis is about analysis and modernization of positioning gear, used in geodesic equipment. Old gear used in the rig is very slow and not accurate. Mission of this work is to make gear faster and more accurate. The theoretical path consists of geodesic equipment calibration methods, principles of rig operation, analysis of stepper motor dynamic characteristics. Experimental path consists of: principal and function diagrams of stepper gear driver, program algorithms, and parameters investigation of all working modes of the gear. The most modern methods is used in renewed gear, the precision increased 30 times.

Structure: introduction, analysis of literature about stepper gear, intentions and tasks of analysis, theoretical path, experimental path, conclusions and suggestions, references.

Thesis consist of: 60 p. text without appendixes, 15 pictures, 8 tables, 37 bibliographical entries.

Appendixes included.

Keywords: stepper gear, microstep, driver, stepper motor, gear processing modes, analysis of stepping characteristics.

Turinys

Įvadas.....	1
1. Literatūros apie žingsnines pavaras analizė	2
1.1. Žingsninio variklio privalumai ir trūkumai	2
1.2. Darbas atviroje sistemoje	3
1.3. Žingsninių variklių tipai	3
1.4. Dydis ir galia	7
1.5. Žingsninio variklio darbo režimai	7
1.5.1. Viso žingsnio režimas	7
1.5.2. Pusės žingsnio režimas.....	8
1.5.3. Bangos režimas	9
1.5.4. Mikrožingsnio režimas	10
2. Tyrimo tikslas	13
3. Teorinė dalis	14
3.1. Geodezijos prietaiso kalibravimui keliami reikalavimai	14
3.2. Geodezijos prietaisų kalibravimo metodas ir priemonės.....	16
3.3. Žingsninio variklio dinaminų charakteristikų skaičiavimas	19
4. Eksperimentinė dalis	29
4.1. Pozicionavimo sistemos schemos modernizacija	29
4.1.1. Valdymo schemos veikimo aprašymas	32
4.2. Valdymo metodo aprašymas	33
4.3. Valdiklio algoritmų ir programų sudarymas	37
4.4. Geodezijos prietaisų kalibravimo stendo parametrų tyrimas	45
6. Išvados ir pasiūlymai	61
7. Literatūra	62

Įvadas

Modernėjant ir tikslėjant naujai elektromechaninei įrangai vis dažniau naudojamos sinchroninės pozicionavimo mašinos, kurios yra tikslios, patvarios ir ilgaamžiškos. Anksčiau buvusi žingsninės pavaros valdymo sistemos problema, dabar išnyko, sumažėjus skaitmeninės programuojamos technikos kainai.

Žingsninio variklio privalumas – jo valdymas tiesiog sustiprintų skaitmeninių impulsų seka. Variklio rotorius sukasi diskrečiais posūkiais, kurių kampas priklauso nuo paties variklio konstrukcijos. Dažnai tokio pasisukimo kampo neužtenka, kad pavara būtų pakankamai tiksli. Šią problemą galima išspręsti naudojant kombinuotus variklio valdymo būdus, kaip pusės žingsnio režimas arba mikrožingsnio režimas. Tokie variklio valdymo būdai nesunkiai realizuojami naudojant programuojamus universalius mikrovaldiklius.

Tokios pavaros tikslumas labiausiai priklauso nuo paties variklio mechaninės konstrukcijos ir mikrovaldiklio programos.

Taip pat žingsninės pavaros privalumas – darbas atviroje sistemoje, nes nereikia grįžtamojo ryšio. Pavaros padėtį ir greitį galima nustatyti skaičiuojant jos valdymo impulsus.

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjama ir modernizuojama Geodezijos institute naudojamo įtaiso, skirto geodezijos prietaisams kalibruoti, žingsninė pavara. Stende naudojama pavara nebeatitinka reikalaujamo tikslumo ir neišvysto reikiamo greičio.

Darbo tikslas – modernizuoti pozicionavimo pavara (padidinti jos greitį ir tikslumą). Teorinėje dalyje aptariamas geodezijos prietaisų kalibravimo stendo veikimo principas, naudojama kalibravimo metodika. Eksperimentinėje dalyje pateikiama principinė ir funkcinė modernizuotos pavaros schemas. Taip pat nagrinėjamas pavaros valdymo algoritmas, pateikiamos esminės mikrovaldiklio programos dalys. Čia nagrinėjama mikrožingsnio svarba pavaros greičiui bei tikslumui.

Modernizuotoje pavaroje naudojami moderniausi žingsninių pavarų valdymo metodai, variklio žingsnis gali būti padalintas net į 32 dalis. Naudojant mikrožingsnio režimą nutolo variklio rezonanso reiškiny ir padidėjo jo greitis. Todėl pasiektas norimas tikslumo ir greičio efektas.

1. Literatūros apie žingsnines pavaras analizė

Žingsninis variklis – tai elektromechaninė specialios konstrukcijos ryškiapolė sinchroninė mašina, kuri verčia elektrinius impulsus į diskrečius mechaninius postūmius. Visų žingsninių variklių esminis skirtumas – rotoriaus konstrukcija. Žingsninio variklio rotorius gavęs atitinkamų elektrinių komandų (impulsų) sekas sukasi diskrečiais žingsniais. Impulsų seka yra tiesiogiai susieta su rotoriaus sukimosi kryptimi. Sukimosi greitis tiesiogiai susietas su įėjimo impulsų dažniu. Sukimosi trukmė tiesiogiai susieta su įėjimo impulsų skaičiumi [1, 6, 9].

1.1. Žingsninio variklio privalumai ir trūkumai

Privalumai:

1. Rotoriaus posūkio kampas yra proporcingas įėjimo impulsui.
2. Variklis turi visą sukimo momentą ramybės būsenoje, jeigu apvijoms tiekama energija.
3. Pozicionavimo ir kartotinumų tikslumas. Žingsninio variklio žingsnio paklaida 3–5 %. Ši paklaida nedidėja kintant žingsniams.
4. Puikus valdomumas (paklusnumas) paleidžiant, stabdant, reversuojant.
5. Labai didelis patikimumas, nes nėra šepečių. Variklio naudojimo trukmė priklauso nuo mechaninės konstrukcijos patvarumo.
6. Variklis reaguoja į skaitmeninius įėjimo impulsus atviroje valdymo sistemoje. Tai padaro valdymo sistemą paprastesnę ir pigesnę.
7. Galima pasiekti labai mažą sinchroniško sukimosi greitį su apkrova, kuri prijungta tiesiogiai prie rotoriaus.
8. Labai platus sukimosi greičio diapazonas. Jis proporcingas įėjimo impulsų dažniui [6, 9].

Trūkumai:

1. Netinkamai valdant arba esant per dideliu valdymo impulsų dažniui variklis gali praleisti žingsnius arba prarasti sinchronizmą.
2. Nelengva pasiekti didelį greitį (atsiranda rezonanso reiškinys).
3. Varikliai linkę į mechaninius svyravimus, momentinis judesys kartais gali būti nestabilus [1, 6, 9].

1.2. Darbas atviroje sistemoje

Viena iš pagrindinių žingsninio variklio savybių yra galimybė stabiliai dirbti atviroje automatinėje sistemoje. Tai reiškia, kad nereikalingas grįžtamasis ryšys, informuojantis apie variklio rotorius padėtį. Esant paprastam valdymo būdai nereikia brangių jutiklių, kaip optinių šifratorių. Rotoriaus pozicija sužinoma iš įėjimo impulsų sekimo ir skaičiavimo [6, 9].

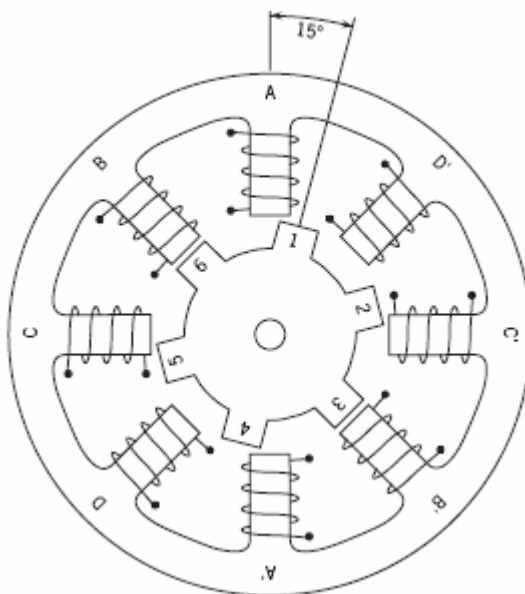
1.3. Žingsninių variklių tipai

Yra trys pagrindiniai žingsninių variklių tipai:

- Ø Reaktyvieji žingsniniai varikliai;
- Ø Žingsniniai varikliai su nuolatiniais magnetais;
- Ø Hibridiniai žingsniniai varikliai [1, 6, 9].

Reaktyvieji žingsniniai varikliai

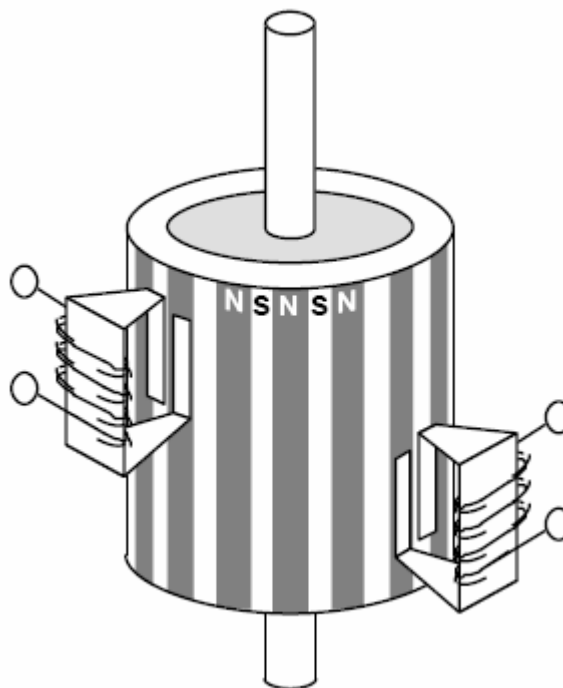
Šio tipo variklis yra naudojamas labai seniai. Pagal jį lengviausia suprasti, kaip veikia žingsninis variklis. 1.3.1 paveikslėlyje pavaizduotas reaktyviojo žingsninio variklio skersinis pjūvis. Šio tipo variklis susideda iš dantyto rotorius, kurio dantų magnetinis laidis yra didelis, o tarp dantų – mažas, ir statoriaus su apvijomis kurių skaičius negali būti mažesnis nei 3. Kai į apvijas tiekama nuolatinė srovė, poliai įsimagnetina, rotorius pasisuka į mažiausios magnetinės varžos padėtį [1, 6, 9].



1.3.1 pav. Reaktyviojo žingsninio variklio skerspjūvis [6, 9]

Žingsniniai varikliai su nuolatiniais magnetais

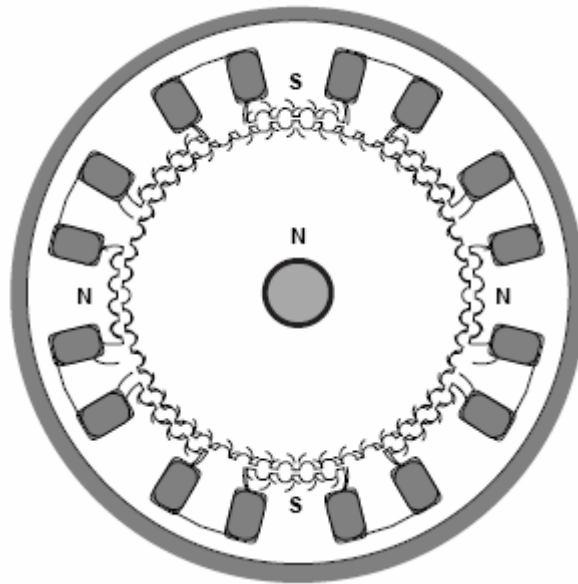
Dažniausiai vadinamas (angl. *tin can* arba *canstock*) varikliu. Šie varikliai yra pigūs, o jų charakteristikos truputį geresnės už reaktyviųjų variklių. Tipiniai žingsnio kampai nuo 7,5 iki 15 laipsnių (48–24 žingsniai/aps). Žingsninių variklių su nuolatiniais magnetais rotorius nėra dantytas kaip reaktyviuosiuose varikliuose. Vietoje to rotorius yra įmagnetintas alternatyviais šiauriniais ir pietiniais poliais, esančiais aplink visą rotorį (1.3.2 pav.). Šie įmagnetinti rotoriaus poliai tiekia padidintą magnetinio srauto intensyvumą ir todėl varikliai su nuolatiniais magnetais turi pagerintą sukimo momentą ir geresnes savybes palyginti su reaktyviaisiais varikliais [6, 9].



1.3.2 pav. variklio su nuolatiniais magnetais sandara [6, 9]

Hibridiniai žingsniniai varikliai

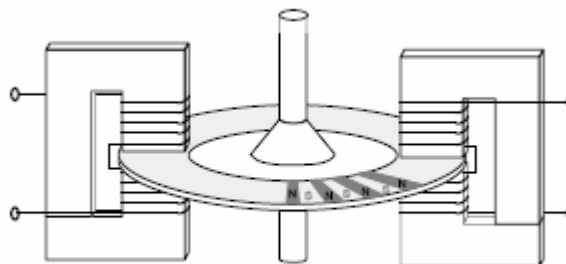
Hibridinis variklis yra gerokai brangesnis už variklį su nuolatiniais magnetais, tačiau jo geresnės žingsniavimo, sukimo momento ir greičio charakteristikos. Dažniausiai šių variklių žingsnis yra nuo 0,9 iki 3,6 laipsnių (100–400 žingsnių/aps). Hibridinis variklis turi visus reaktyviųjų ir su nuolatiniais magnetais variklių privalumus. Rotorius ir statorius yra daugiadantis kaip reaktyviajame variklyje. Taip pat rotorius sudarytas iš ašine kryptimi įmagnetinto nuolatinio magneto ir dviejų dantytų minkštamagnetės medžiagos dalių. Dantukai ant rotoriaus suteikia geresnį magnetinio srauto kelią per oro tarpą. Tai užtikrina geresnį pastovų ir dinaminį sukimo momentą palyginti su reaktyviaisiais žingsniniais varikliais ir varikliais su nuolatiniais magnetais. Tokio variklio skerspjūvis pavaizduotas 1.3.3 paveiksle. Dviejų šio tipo variklių tikslumas tiriamas šiame darbe ir vienas iš jų (tikslėnis) bus panaudotas modernizuotoje pavaroje [1, 6, 9].



1.3.3 pav. Hibridinio žingsninio variklio skerspjūvis [6, 9]

Kiti variklių tipai

Yra ir kitų specifinių žingsninių variklių tipų. Vienas iš jų – diskinis žingsninis variklis (1.3.4 pav.). Jo rotorius suprojektuotas kaip diskas ir padalytas į magnetinius polius kaip variklio su nuolatiniais magnetais rotorius. Tokio tipo variklio privalumai: labai maža inercija ir optimizuota magnetinė sklaida. Šios savybės dažnai būna labai svarbios [1, 6, 9].



1.3.4 pav. Diskinio žingsninio variklio sandara [6, 9]

1.4. Dydis ir galia

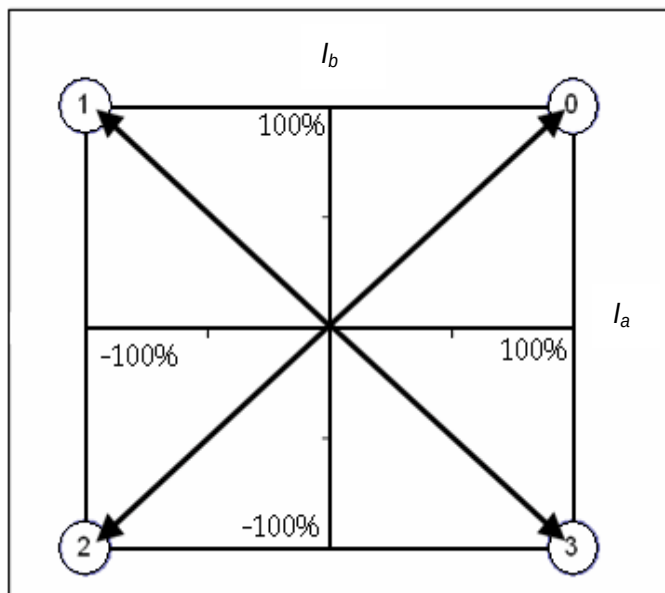
Žingsniniai varikliai skirstomi ne tik pagal konstrukciją, žingsnio dydį, bet ir pagal jų korpuso dydį. Paprastai 11 dydžio žingsninis variklis turi 1,1 colio (1.57,5 mm) skersmens korpusą, o 23 dydžio variklio skersmuo 2,3 colio (58 mm). Korpuso ilgis taip pat suteikia didesnę variklių pasirinkimą, nors jų skersmuo vienodas. Dažniausiai pasiekiamas sukimo momentas didėja proporcingai korpuso ilgiui, esant to paties skersmens variklių klasei. Žingsninių variklių galia gali būti apie vatą – labai mažiems varikliams, ir 10–20 vatų didesniems varikliams. Didžiausia sklaidomoji galia arba terminės charakteristikos būna kruopščiai pateiktos gamintojo variklio apraše [6, 9].

1.5. Žingsninio variklio darbo režimai

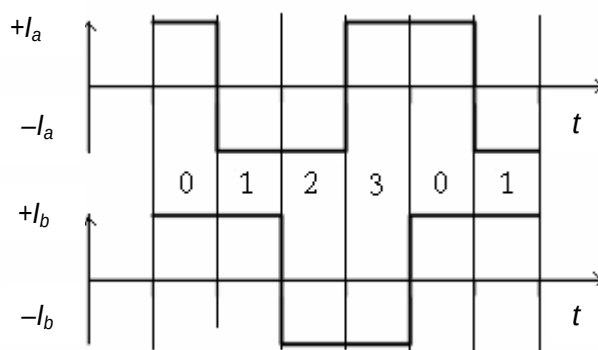
Patogiausia nagrinėti dvipolį žingsninį variklį. Toks variklis turi dvi apvijas. Žingsninio variklio rotorius suksis jei bus keičiama srovė statoriaus apvijoje. Atsižvelgiant į žingsninės pavaros sudėtį, jos darbui pavaizduoti patogi fazinė diagrama. Srovė, tekanti per vieną apviją pažymima I_a , ir brėžiama statmenai srovei I_b , kuri teka per kitą apviją. Darbo režimai kaip viso žingsnio, pusės žingsnio, mikrožingsnio ar kitokie įvairių srovių režimai gali būti pavaizduoti vektorine diagrama dvimatėje koordinačių sistemoje. Be to, įmanoma pavaizduoti galios suvartojimo pokyčius ir sukimo momentą kampine funkcija. Paprasti žingsninių variklių valdikliai apvijoje kuria tik didžiausią teigiamą srovę, didžiausią neigiamą srovę ir nulinę srovę (apvija srovė neteka). Toks valdiklis gali variklį sukti viso žingsnio, pusės žingsnio ir bangos režimu [6, 9].

1.5.1. Viso žingsnio režimas

Esant viso žingsnio režimui reikia, kad apvijų srovė būtų $-I_{max}$ arba $+I_{max}$. Žingsnių ciklas susideda iš 4 žingsnių. Šio darbo režimo vektorinė diagrama pavaizduota 1.5.1.1 pav., o valdymo impulsų seka 1.5.1.2 pav. Vektorinėje diagramoje brėžiamas tik suminis srovės I_a ir I_b vektorius. Šis vektorius vadinamas fazoriumi. Kampas θ – tai kampas, kurį fazorius nueina iš vienos pozicijos į kitą. θ lygus vieno žingsnio kampui. Vektoriaus ilgis apskaičiuojamas pagal 1.5.1.1 formulę. Variklio žingsnis apskaičiuojamas pagal 1.5.1.2 formulę. Šio režimo metu abejomis apvijomis visada teka srovė. Žingsniuojama, kai paeiliui keičiama srovės kryptis apvijoje [3].



1.5.1.1 pav. Viso žingsnio režimo vektorių diagrama [3]



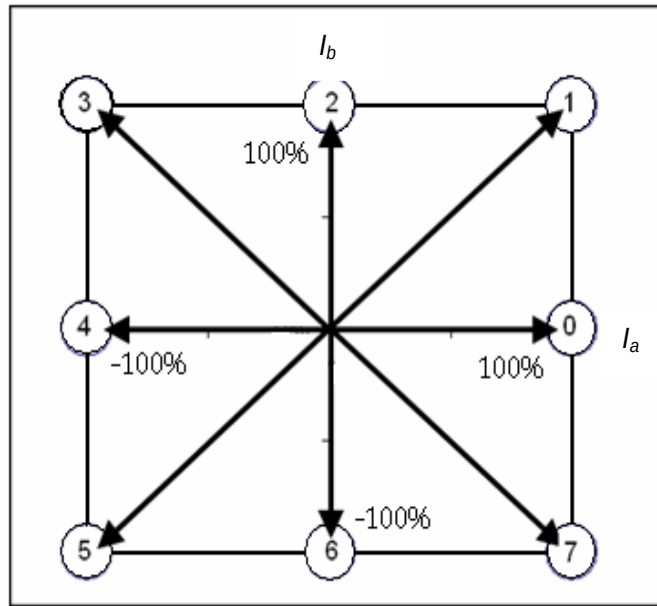
1.5.1.2 pav. Viso žingsnio režimo apvijų komutavimo laikinė diagrama [3]

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_b^2}; \quad (1.5.1.1)$$

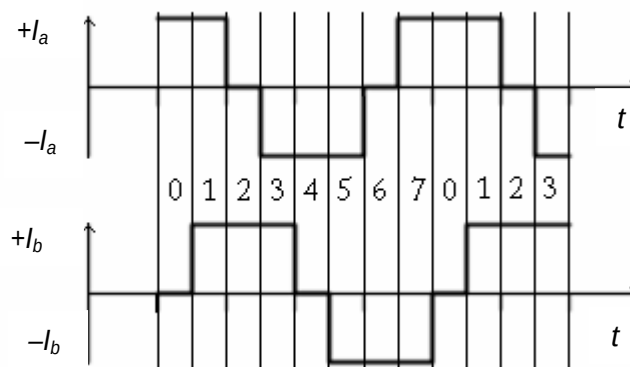
$$\theta = \arctg\left(\frac{I_b}{I_a}\right) \quad (1.5.1.2)$$

1.5.2 Pusės žingsnio režimas

Pusės žingsnio režimo metu apvijose tekančios srovės vertės gali būti $-I_{max}$, $+I_{max}$, 0. Skirtingai nuo viso žingsnio režimo, pusės žingsnio režimo apvijų komutavimo metu yra momentas, kai srovė teka tik viena apvija. Iš to išplaukia labai svarbus niuansas: kas antro žingsnio metu sukimo momentas per $\sqrt{2}$ yra mažesnis. Todėl parenkant variklį, kuris veikia pusės žingsnio režimu, reikia atkreipti į tai dėmesį. Šio režimo vektorių diagrama pateikta 1.5.2.1 pav., o apvijų komutavimo diagrama 1.5.2.2 pav.



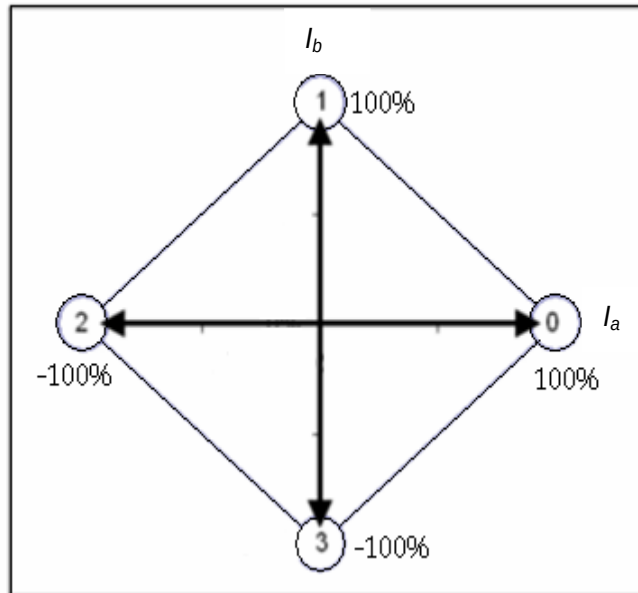
1.5.2.1 pav. Pusės žingsnio vektorių diagrama [2].



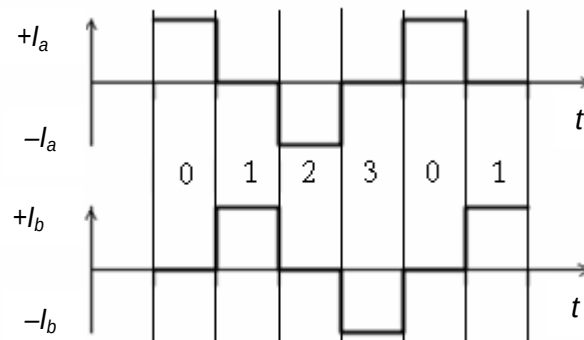
1.5.2.2 pav. Pusės žingsnio režimo apvijų komutavimo laikinė diagrama [2].

1.5.3 Bangos režimas

Bangos režimo metu žingsninio variklio apvijose gali tekėti $-I_{\max}$, $+I_{\max}$, 0. Šis režimas ypatingas tuo, kad tuo pačiu laiko momentu srovė teka tik per vieną variklio apviją. Variklis veikia viso žingsnio režimu, tik jo sukimo momentas yra mažesnis per $\sqrt{2}$. Šio režimo vektorių diagrama pateikta 1.5.3.1 pav., o apvijų komutavimo diagrama 1.5.3.2 pav. [2].



1.5.3.1 pav. Bangos režimo vektorių diagrama [2]

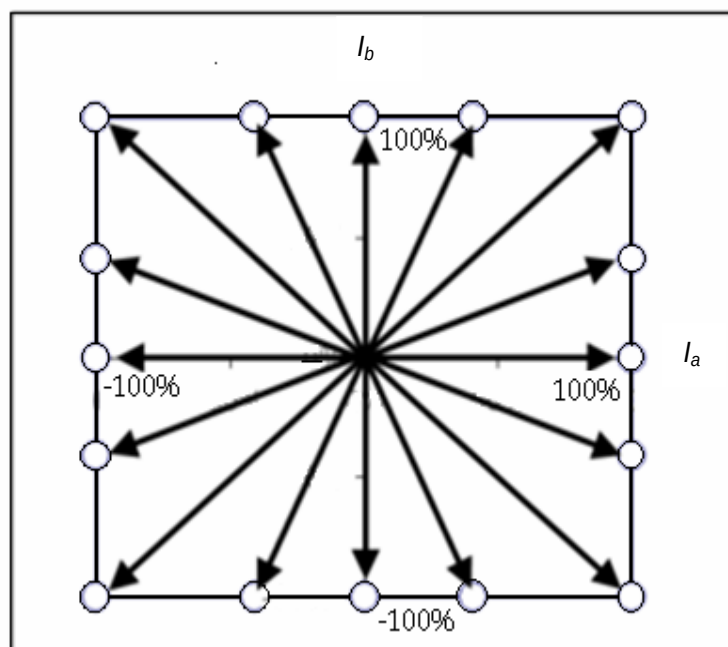


1.5.3.2 pav. Bangos režimo apvijų komutavimo laikinė diagrama [2]

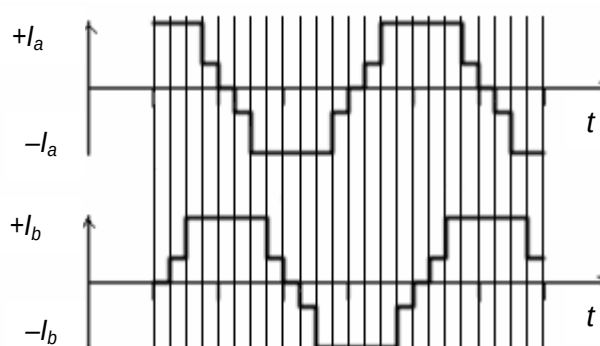
1.5.4 Mikrožingsnio režimas

Mikrožingsnio režimas – tai sudėtingiausias žingsninio variklio darbo režimas. Kaip ir kitus darbo režimus, šį režimą lengviausia paaiškinti ir įsivaizduoti pagal supaprastintą dvifazį žingsninio variklio modelį. Norint gauti mikrožingsnio režimą variklio apvijas reikia komutuoti ne stačiakampiais impulsais, kaip buvo daroma kitais režimais, bet stengtis suformuoti apvijose srovę kuo artimesnę sinusinei srovei. Vienoje apvijoje srovė turi būti perstumta per 90° nei kitoje. Iš to išplaukia, kad vienoje apvijoje srovė teka pagal sinusą, o kitoje pagal kosinusą. Naudojant dabartinę skaitmeninę techniką, taikant LC filtrus nėra jokių problemų suformuoti apvijoje srovę, labai artimą sinusinei srovei. Esant tokioms sąlygoms variklio rotorius ne žingsniuoja, o tolygiai sukasi. Taip galima gauti didesnę rotoriaus sukimosi greitį (nutolinamas rezonanso reiškinys). Praktikoje dažniausiai nėra reikalinga, kad srovės forma būtų sinusinė. Įvertinant tai, kad rotoriaus žingsnis gali būti $1,8^\circ$, tai turimoje sistemoje gali pakakti srovės impulsą padalyti į 4 laiptelius. Toks

mikrožingsnio režimas gali būti pavadintas „mikrožingsnis kvadratine trajektorija“. Šis pavadinimas išplaukia iš vektorių diagramos vaizdo (1.5.4.1 pav.). Tokio metodo variklio apvijų komutavimo laikinė diagrama pateikta 1.5.4.2 pav.



1.5.4.1 pav. Mikrožingsnis – kvadratinė trajektorija. Vektorių diagrama [2]

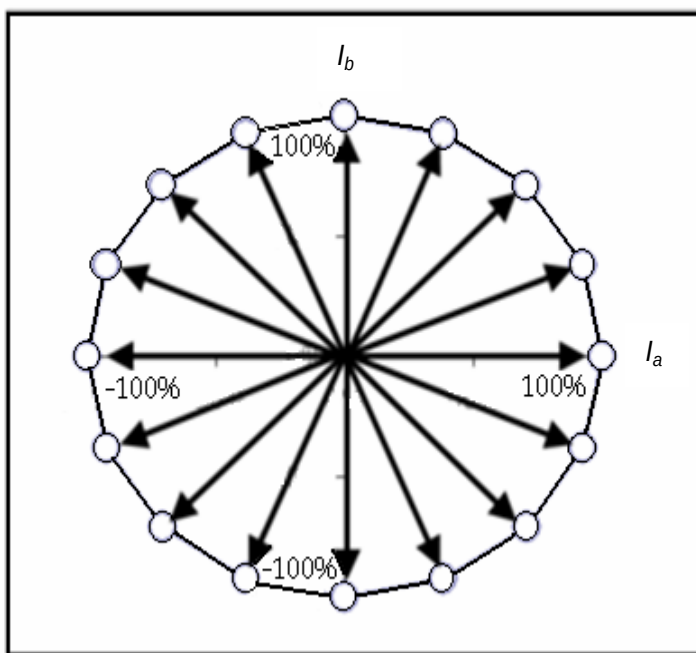


1.5.4.2 pav. Apvijų komutavimo laikinė diagrama [2]

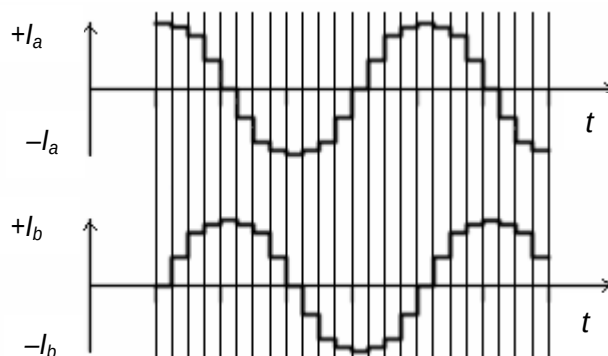
Mikrožingsnio – kvadrato trajektorijos režimo metu, kaip ir pusės žingsnio režimo metu, atskirų žingsnių sukimo momentas nėra pastovus. Kaip jau buvo minėta, tai labai svarbu parenkant variklį.

Pastovus sukimo momentas gaunamas mikrožingsnio – apskritimo trajektorija darbo režimo metu. Šiuo atveju galima pastebėti, kad variklio sukimo momentas yra visada per $\sqrt{2}$ mažesnis nei

viso žingsnio režimu. Šio režimo vektorių diagrama pavaizduota 1.5.4.3 pav., o apvijų komutavimo laikinė diagrama 1.5.4.4 pav.



1.5.4.3 pav. Mikrožingsnio – apskritimo trajektorija darbo režimo vektorių diagrama [2]



1.5.4.4 pav. Apvijų komutavimo laikinė diagrama [2]

Be anksčiau aptartų, gali būti ir kitokių žingsninio variklio valdymo metodų. Pagrindinė esmė yra ta, kad variklio rotorius suksis visada, jei tik apvijos bus komutuojamos mažesniu už rezonansinį dažniu, ir jų komutavimo impulsai bus perstumti laiko atžvilgiu. Šiame darbe aptartas žingsninio variklio veikimo principas ir jo darbo režimai remiantis idealizuotu dvifaziu variklio modeliu.

2 Tyrimo tikslas

Žingsninės pavaros tyrimo tikslas – išnagrinėti geodezinių prietaisų kalibravimo metodą ir padidinti geodezinių prietaisų patikros stendo žingsninės pavaros tikslumą bei greitaeigiškumą.

Patikros stendo pagrindinį diską suka žingsninis variklis ШД-5Д1МУ3. Norint kalibruoti dabartinius tikslius prietaisus stendo tikslumo nepakanka nes žingsninis variklis sukasi netiksliai ir lėtai. Tobulinant bus įdiegta nauja variklio valdymo sistema ir naujas žingsninis variklis Vexta PK266-02B. Naujojoje valdymo sistemoje naudojamas mikrožingsnio režimas, todėl padidės pavaros tikslumas ir greitaeigiškumas.

Valdymo sistemos aprašymas ir variklių tikslumo tyrimas pateiktas 4 skyriuje.

3. Teorinė dalis

Skyriuje aptariamos populiariausios priemonės ir metodai naudojami plokščiojo kampo matavimui geodeziniuose prietaisuose ir jų derinimo įrenginiuose. Daug dėmesio skiriama tikslumui, autoamtizavimui ir derinimo metodams. Skaičiuojamos žingsninio variklio dinaminės charakteristikos ir analizuojamos būsenos.

3.1. Geodezijos prietaiso kalibravimui keliami reikalavimai

Pagrindinis geodezinio prietaiso bandymo principas realizuotas kelių fiksuotų taškų kolimacija, ir bandymo rezultatų tikslumo skaičiavimais. Tokiu metodu negalima nustatyti atsitiktinių ir sisteminių klaidų viso horizontalaus rato matavimuose mažais poslinkiais. Norint nustatyti geodezinio prietaiso netikslumus viso horizontalaus rato matavimuose, reikalingi papildomi prietaisai, geodezinio įtaiso įvykdytų kampinių matavimų palyginimui su reikiamu etalonu. Akivaizdu, kad tokio prietaiso besisukanti etaloningė lentelė turi būti pozicionuojama su didesniu tikslumu nei derinamojo prietaiso tikslumas. Todėl pirma reikia nustatyti norimo kalibruoti, prietaiso tikslumą. Kai kurių modernių geodezinių kampo matavimo prietaisų standartiniai nuokrypiai pateikti 3.1.1 lentelėje [36].

3.1.1 lentelė. Kai kurių geodezinių plokščiojo kampo matavimo prietaisų tikslumo specifikacija[36]

Prietaiso modelis	Standartinė kampo matavimo nuokrypa
Leica	
Leica TPS403/5/7	3", 5", 7"
Leica TPS702/3/5	2", 3", 5"
Leica TPS802/3/5	2", 3", 5"
Leica TPS1201/2/3/5	1", 2", 3", 5"
Leica TPS5000	0.5"
Leica TCA1800	1"
Leica TCA2003	0.5"
Trimble	
Trimble M3	3", 5"
Trimble 3601/2/3/5	1,5", 2", 3", 5"
Prietaiso modelis	Standartinė kampo matavimo nuokrypa
Trimble	
Trimble 5603/5	3", 5"
Trimble S6 DR3000+	2", 3", 5"

Trimble S6 “High precision”	1"
Sokkia	
Sokkia SRX1/2/3/5	1", 2", 3", 5"
Sokkia 030R SET1/2/3	1", 2", 3"
Sokkia 130R SET1/2/3/4	1", 2", 3", 5"
Sokkia 30RK SET2/3/5	2", 3", 5"
Sokkia 30R SET2/3/5/6	2", 3", 5", 6"
Sokkia 10K SET2/3/5/6	2", 3", 5", 6"
Sokkia 10 SET2/3/5/6	2", 3", 5", 6"
Sokkia 200 NET1	1"
Sokkia 100M NET1	1"
Topcon	
Topcon DT202/5/7/9	2", 5", 7", 9"
Topcon GTS233/5/6/9N	3", 5", 6", 9"
Topcon GPT3002/3/5/7(L)N	2", 3", 5", 7"
Topcon GPT7001/2/3/5	1", 2", 3", 5"
Topcon GPT8201/2/3/5A	1", 3", 2", 5"
Topcon GPT9001/3/5A	1", 3", 5"
Hewlett – Packard	
HP 3820A Elect. Total St.	2"

Yra kelios plokščiojo kampo matavimo principų grupės:

1. Kieto kampinio dydžio metodas:

- poligonai (daugiakampės prizmės);
- kampinės prizmės;
- kampiniai dydžiai ir t.t. [36].

2. Trigonometrinis metodas (kampo radimas pagal linijinius matavimus).

3. Goniometrinis metodas (plokščiojo kampo radimas pagal žiedinės skalės vertes):

- viso žiedo (limbo, žiedinio kodo skalės ir kt.),
- neviso žiedo (sektorinės skalės) [36].

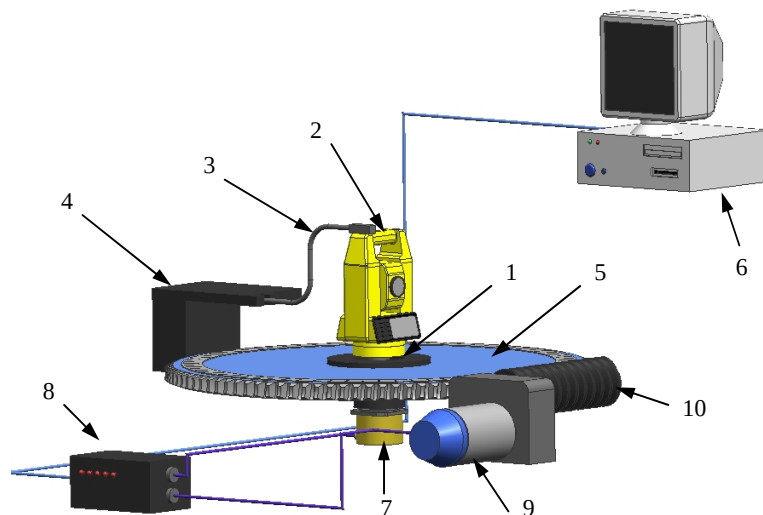
Keletas techninių sprendimų, dėl tikslaus kampo nustatymo gali būti realizuoti, kad atlikti anksčiau minėtų geodezinių prietaisų testavimą/kalibravimą. Labiausiai paplitusios priemonės, naudojamos šiam tikslui yra:

- 1) poligonas/autokolimatorius;
- 2) Muro (angl. *Moore*) tikslumo indeksas;
- 3) vizualinė skalė/mikroskopai;
- 4) kampiniai enkoderiai;
- 5) žiedinis lazeris (angl. *laser gyro*) [36].

Kelios minėtos kampo nustatymo priemonės, įskaitant geodezinių prietaisų kalibravimo įrangą, analizuojamos toliau tiriamojoje dalyje.

3.2 Geodezijos prietaisų kalibravimo metodas ir priemonės

Komparatoriaus veikimo principas buvo taikomas kuriant testavimo žiedą, geodezijos prietaisų testavimo/kalibravimo stendui, esančiam Vilniaus Gedimino technikos universitete, Geodezijos institute. Tai stendas prietaisų (tacheometrų, teodolitų) matavimams palyginti su etaloniniu dydžiu (šiuo atveju – horizontaliuoju kampu) [36].



3.2.1 pav. Testavimo stendo veikimo principas: 1– testuojamojo prietaiso tribrachis, 2– testuojamas prietaisas (teodolitas, tacheometras, kt.), 3– laikiklis, 4– stacionarioji stendo dalis 5– besisukantis diskas su skale, 6– kompiuteris 7–kampinis enkoderis, 8– enkoderio/variklio elektroninis valdymo įtaisas, 9– žingsninis variklis, 10– sliekinė pavara [36]

Testavimo stendo veikimo principas yra tipinis – testuojamojo prietaiso tribrachis (1, 3.2.1 pav.) pritašomas prie besisukančio stendo disko (5), tuo metu testuojamasis prietaisas pritvirtinamas prie stacionariosios stendo dalies (4) su specialiu laikikliu (3). Testavimo/kalibravimo proceso metu diskas sukasi su prie jo pritašytu tribrachiu į nustatytą poziciją (tam tikru etaloniniu kampu), tuo metu testuojamas įrenginys pritvirtintas prie nejudamosios dalies – nejuda. Tokiu būdu testuojamas prietaisas veikia atvirkščiai normaliam veikimui, atliekant geodezinius matavimus, kai tribrachis yra stabilus, o prietaisas yra sukamas į reikiamą poziciją. Testavimo/kalibravimo metu po disko pasukimo geodezinio prietaiso matavimai palyginami su pasisukusio disko pozicijos informacija (etaloniniu kampu). Turint matavimų skirtumus galima aptikti geodezinio prietaiso paklaidas ir nukrypimus.

Vienas iš disko mechaninių bruožų, kuris gali lemti matavimų tikslumą, tai skalės nelygiagretumas ir nestatumas sukimosi ašiai. Naudojant mikrometrą, buvo nustatyta, kad linijinis disko nelygiagretumas neviršija $20\mu\text{m}$ [36].

Turint šiuos duomenis, galima paskaičiuoti linijinio disko nelygiagretumo įtaką kampiniams matavimams (atliekamiems skalės mikroskopų):

$$\delta\varphi_{\max} = \frac{a^2}{2 \cdot R^2}, \quad (3.2.1)$$

čia a - linijinis nelygiagretumas (mm), R – disko spindulys (šiuo atveju $R = 480\text{ mm}$).

Apskaičiuota didžiausia nelygiagretumo įtaka yra $1,79 \cdot 10^{-4} \text{ arc sec}$. Kaip matyti, matavimų paklaida, priklausanti nuo nelygiagretumo, yra labai mažas dydis ir daugeliu atvejų į ją galima nekreipti dėmesio.

Dar vienas svarbus mechaninis bruožas yra trumpas disko radialusis ekscentriciteto periodas (mažiau nei 2π) dėl skalės sukimosi ašies. Linijinė tokio ekscentriciteto vertė nustatyta naudojant precizišką stiklinę sferą ir mikrometrą [36].

Nustatyta, kad disko didžiausias trumpo periodo radialinis ekscentricitetas nesiekia $1\mu\text{m}$. Naudojant formulę (4.2.2) galima apskaičiuoti didžiausią kampo radimo paklaidą esant nenustatytam ekscentricitetui:

$$\delta\varphi_{\max} = \arcsin \frac{e}{R}, \quad (3.2.2)$$

čia: e – ekscentricitetas (mm), R – disko spindulys (šiuo atveju $R = 480\text{ mm}$).

Didžiausia paklaida esant trumpo periodo ekscentricitetui yra $0,429 \text{ arc sec}$. Galima pastebėti, kad ši paklaida yra gerokai didesnė, todėl kai kuriais atvejais turi būti kompensuojama kalibracijos metu [36].

3.3. Žingsninio variklio dinaminų charakteristikų skaičiavimas

Žingsninis variklis (toliau ŽV) yra m fazių elektros mašina su dviejų pusių danteliais. ŽV fazės yra valdomos impulsais, kurių pobūdį nusako komutacijos algoritmas. ŽV su aktyviu rotoriumi, kurį sudaro pastovusis elektromagnetas, gali būti laikomi elektrinėmis mašinomis su fiktyvia $m + 1$ nuolatinės srovės ir nulinės varžos faze. Paneigus magnetolaidžio sotinimą, ŽV apvijų susietieji srautai tiesiškai priklauso nuo apvijų srovių i_j [5, 29]:

$$\psi_k = \sum_{j=1}^{m+1} L_{kj}(\theta) i_j, \quad (3.3.1)$$

čia $L_{kj}(\theta)$ – k ir j apvijų abipusis induktyvumas, priklausantis nuo rotoriaus pasisukimo kampo θ ,

$k = 1, 2, \dots, m+1$ – fazės eilės numeris.

ŽV dinaminę pusiausvyrą nusako tokios elektrovaros bei variklio momento lygtys:

$$\begin{cases} i_k r_k + \frac{d\psi_k}{dt} = u_k; \\ J \frac{d^2\theta}{dt^2} + M_a = M; \end{cases} \quad (3.3.2)$$

čia:

r_k – k fazės apvijos aktyvioji varža,

u_k – k fazės įtampa,

J – rotoriaus inercijos momentas,

M_a – apkrovos momentas,

M – elektromagnetinis momentas.

Daugiapolėje elektros mašinoje stabilių elektrinių būsenų skaičius yra proporcingas polių porų skaičiui p . Synchronizuojantį ŽV momentą $M = M(\theta)$ galima rasti, kaip elektromagnetinės energijos išvestinę pagal rotoriaus pasisukimo nuo stabilios būsenos kampą θ [5, 29]:

$$M(\theta) = p \frac{dW_m}{d\theta}; \quad (3.3.3)$$

Įvertinus (3.3.1) išraišką, galima užrašyti:

$$M(\theta) = M = \frac{p}{2} \sum_{k=1}^{m+1} i_k \frac{d\psi_k}{d\theta} = \frac{p}{2} \sum_{j,k}^{m+1} i_j i_k \frac{dL_{kj}(\theta)}{d\theta}. \quad (3.3.4)$$

Į (3.3.2) įrašius (3.3.1) ir (3.3.4) išraiškas ir pastebėjus, kad $i_{m+1} = \text{const}$, sudaromos tokios netiesinės diferencialinės su periodiškai kintančiais koeficientais lygtys [5, 29]:

$$\begin{cases} r_k i_k + \sum_{j=1}^m L_{kj} \frac{di_j}{dt} + \frac{d\theta}{dt} \sum_{j=1}^{m+1} i_j \frac{dL_{kj}}{d\theta} = u_k; \\ \frac{J}{P} \frac{d^2\theta}{dt^2} + M_a = \frac{p}{2} \sum_{j,k=1}^{m+1} i_j i_k \frac{dL_{kj}}{d\theta}. \end{cases} \quad (3.3.5)$$

Lygtys (3.3.5) leidžia ištirti ŽV elektromagnetinius procesus ir jo veikimo pobūdį, esant bet kokiam ŽV valdymo algoritmui [5, 29].

ŽV švytavimų apibrėžimas

Rotorius be apkrovos yra linkęs švytuoti savuoju virpesių dažniu ω_0 apie savo stabilaus darbo būseną. Šį dažnį galima rasti iš tokio rotoriaus ($M_a = 0$) diferencialinės judesio lygties [5, 29]:

$$J \ddot{\theta}_m + M_{\max} \sin p\theta_m = 0, \quad (3.3.6)$$

čia M_{max} – statinio sinchronizuojančio momento amplitudė.

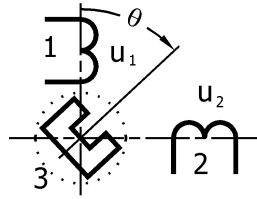
Mažiems q_m pokyčiams imdami $\sin p\theta_m \approx p\theta_m$, apytikslis diferencialinės lygties $\ddot{\theta}_m + \frac{M_{max}}{J}\theta \cong 0$ charakteringojo polinomo šaknų $\omega_{0,1,2} = \pm j\sqrt{\frac{M_{max}p}{J}}$ modulis ir bus rotoriaus švytavimo apie stabilią būseną kampinis dažnis [5, 29]:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{M_{max}p}{J}}; \quad (3.3.7)$$

Šį dydį būtina žinoti nustatant valdymo impulsų dažnį ω_{rez} , kuriam esant ŽV praras sinchronizmą [5, 29].

Dinaminės pusiausvyros lygčių išvedimas

Sudarykime įtampos ir momento lygtis dvifaziam ($m = 2$) hibridiniam varikliui. Posūkio kampo atskaitą pradėkime, kai rotoriaus poliaus ašis sutampa su pirmos fazės ašimi (3.3.1 pav.) [5, 29].



3.3.1 pav. Maksimaliai supaprastinta dvifazio ŽV struktūrinė schema tolesniam švytavimų tyrimui [5, 29]

Tegul:

$$L_{11} = L_{22} = L_s = \text{const},$$

$$L_{33} = L_p = \text{const},$$

$$L_{12} = L_{21} = L_{32} = L_{23} = M_m \cos q ,$$

$$L_{31} = L_{13} = M_m \sin q , r_1 = r_2 = r,$$

$$i_3 = \text{const};$$

čia M_m – savitarpio induktyvumo amplitudė.

Dinaminės pusiausvyros lygtis išvedama iš (3.3.5) lygčių.

1. Pirmosios fazės atžvilgiu iš EVJ lygties (3.3.5–1) gaunama [5, 29]:

$$r_1 i_1 + \sum_{j=1}^2 L_{1j} \frac{di_j}{dt} + \frac{d\theta}{dt} \sum_{j=1}^{2+1} i_j \frac{dL_{1j}}{d\theta} = u_1, \quad (3.3.8)$$

kadangi išraiškoje

$$r_1 i_1 + L_{11} \frac{di_1}{dt} + L_{12} \frac{di_2}{dt} + \frac{d\theta}{dt} \left(i_1 \frac{dL_{11}}{d\theta} + i_2 \frac{dL_{12}}{d\theta} + i_3 \frac{dL_{13}}{d\theta} \right) = u_1$$

nariai $L_{12} \frac{di_2}{dt} = 0$, $i_1 \frac{dL_{11}}{d\theta} = 0$, $i_2 \frac{dL_{12}}{d\theta} = 0$, tai

$$r_1 i_1 + L_s \frac{di_1}{dt} + i_3 M_m \cos \theta \frac{d\theta}{dt} = u_1. \quad (3.3.9)$$

2. Antrosios fazės atžvilgiu iš tos pačios (3.3.5–1) lygties gaunama analogiškai [5, 29]:

$$r_2 i_2 + \sum_{j=1}^2 L_{2j} \frac{di_j}{dt} + \frac{d\theta}{dt} \sum_{j=1}^{2+1} i_j \frac{dL_{2j}}{d\theta} = u_2, \quad (3.3.10)$$

kadangi išraiškoje

$$r_2 i_2 + L_{21} \frac{di_1}{dt} + L_{22} \frac{di_2}{dt} + \frac{d\theta}{dt} \left(i_1 \frac{dL_{21}}{d\theta} + i_2 \frac{dL_{22}}{d\theta} + i_3 \frac{dL_{23}}{d\theta} \right) = u_2$$

nariai $L_{21} \frac{di_1}{dt} = 0$, $i_1 \frac{dL_{21}}{d\theta} = 0$, $i_2 \frac{dL_{22}}{d\theta} = 0$, tai

$$r_2 i_2 + L_s \frac{di_2}{dt} + \frac{d\theta}{dt} (-i_3 M_m \sin \theta) = u_2 \quad (3.3.11)$$

Iš momentų lygties (3.3.5–2) gaunama [5, 29]:

$$\begin{aligned}
\frac{J}{p} \frac{d^2 \theta}{dt^2} + M_a &= \frac{p}{2} \sum_{j,k=1}^3 i_j i_k \frac{dL_{kj}}{d\theta} = \\
&= \frac{p}{2} (i_1 i_1 \frac{dL_{11}}{d\theta} + i_2 i_1 \frac{dL_{12}}{d\theta} + i_3 i_1 \frac{dL_{13}}{d\theta} + i_1 i_2 \frac{dL_{21}}{d\theta} + i_2 i_2 \frac{dL_{22}}{d\theta} + \\
&+ i_3 i_2 \frac{dL_{23}}{d\theta} + i_1 i_3 \frac{dL_{31}}{d\theta} + i_2 i_3 \frac{dL_{32}}{d\theta} + i_3 i_3 \frac{dL_{33}}{d\theta}) = \\
&= \frac{p}{2} (i_3 i_1 \frac{dL_{13}}{d\theta} + i_3 i_2 \frac{dL_{23}}{d\theta} + i_1 i_3 \frac{dL_{31}}{d\theta} + i_2 i_3 \frac{dL_{32}}{d\theta}) = \\
&= \frac{p}{2} (i_1 i_3 M_m \cos \theta - i_2 i_3 M_m \sin \theta + i_1 i_3 M_m \cos \theta - i_1 i_3 M_m \sin \theta) = \\
&= p i_3 M_m (i_1 \cos \theta - i_2 \sin \theta).
\end{aligned} \tag{3.3.12}$$

$$\text{Išraiškos (3.3.12) nariai } i_1 i_1 \frac{dL_{11}}{d\theta} = i_2 i_1 \frac{dL_{12}}{d\theta} = i_1 i_2 \frac{dL_{21}}{d\theta} = i_2 i_2 \frac{dL_{22}}{d\theta} = i_3 i_3 \frac{dL_{33}}{d\theta} = 0.$$

Sutvarkius (3.3.9), (3.3.11), (3.3.12) lygtis, gaunama [5, 29]:

$$\begin{cases} r i_1 + L_s \frac{di_1}{dt} + \psi_m \cos \theta \frac{d\theta}{dt} = u_1; \\ r i_2 + L_s \frac{di_2}{dt} - \psi_m \sin \theta \frac{d\theta}{dt} = u_2; \\ \frac{J}{p} \frac{d^2 \theta}{dt^2} + M_a = p \psi_m (i_1 \cos \theta - i_2 \sin \theta); \end{cases} \tag{3.3.13}$$

čia $\psi_m = i_3 M_m$ – didžiausias sužadinto rotoriaus ir vienos statoriaus fazės susietasis srautas [5, 29].

Gautoji netiesinių diferencialinių lygčių sistema tiesinama keičiant kintamuosius. Šiuo atveju pavartojama kampo funkcija θ_1 [5, 29].

$$\theta_1 = \frac{d\theta}{dt}. \tag{3.3.14}$$

Įstatę naują kintamąjį ir atlikus veiksmus, gautume naują lygčių sistemą [5, 29]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\theta}{dt} = \theta_1; \\ \frac{d\theta_1}{dt} = \frac{1}{J} [\psi_m (i_1 \cos \theta - i_2 \sin \theta) - pM_a]; \\ \frac{di_1}{dt} = \frac{1}{L_s} (u_1 - ri_1 - \psi_m \cos \theta \theta_1); \\ \frac{di_2}{dt} = \frac{1}{L_s} (u_2 - ri_2 - \psi_m \sin \theta \theta_1). \end{array} \right. \quad (3.3.15)$$

Sistemos, kurioje stebima kintamųjų $q(t)$, $i_1(t)$, $i_2(t)$ elgsena, pusiausvyros būsenos įmanomos, kai 1-osios išvestinės narys lygus nuliui. Tuo atveju iš (3.3.15–3,4) lygčių galima išreikšti [5, 29]

$$ri_1 = u_1, i_1 = u_1/r,$$

$$ri_2 = u_2, i_2 = u_2/r.$$

Gautąsias išraiškas įrašius į (3.3.15–2) lygtį, gauta [5, 29]:

$$\frac{1}{r} p \psi_m (u_1 \cos \theta - u_2 \sin \theta) = M_a; \quad (3.3.16)$$

arba:

$$(u_1 \cos \theta - u_2 \sin \theta) = \frac{rM_a}{p\psi_m} = C. \quad (3.3.17)$$

Dabar galima išskirti 2 atvejus:

1. Dešinėje pusėje esantis narys $C = 0$. Tai gali atsitikti tada, kai apkrovos momentas $M_a = 0$, kadangi kitų parametų vertės, galinčios reikšinių prilyginti nuliui, kaip antai $r = 0$, $p = \infty$, $\psi_m = \infty$ yra praktiškai neįmanomos. Lygtis (3.3.17) taps [5, 29]

$$(u_1 \cos \theta - u_2 \sin \theta) = 0, \quad (3.3.18)$$

$$\text{su sprendiniu } \theta = \arctan \frac{u_1}{u_2}. \quad (3.3.19)$$

2. Dešinėje pusėje esantis narys $C \neq 0$. Šiuo atveju sprendimo būdas (komplikuotesnis, todėl naudojamosi programa „**Scientific Notebook**“, ver. 3. Užrašius (3.3.17) išraišką [5, 29]

$$(u_1 \cos \theta - u_2 \sin \theta) = C \quad (3.3.20)$$

gaunama sprendinių sistema:

$$\theta = \arctan \left\{ \begin{array}{l} -c + \frac{u_1}{u_1^2 + u_2^2} \left(Cu_1 \pm \sqrt{u_1^2 u_2^2 - u_2^2 C^2 + u_2^4} \right) \\ u_2 \\ \frac{1}{u_1^2 + u_2^2} \left(Cu_1 \pm \sqrt{u_1^2 u_2^2 - u_2^2 C^2 + u_2^4} \right). \end{array} \right.; \quad (3.3.21)$$

Pirmuoju atveju (3.3.19), posūkis q turi fiksuotas vertes taškuose $-\frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{4}, 0, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}$, nes funkcijos vienetiniai argumentai u_1 ir u_2 gali įgyti teigiamą, neigiamą arba lygią nuliui vertę visomis įmanomomis kombinacijomis [5, 29].

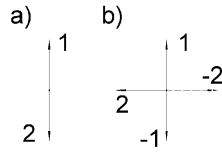
Antruoju atveju (1.6.21) turimas sprendinių laukas, kuriame apskaičiuota posūkio δ vertė priklauso ne vien tik nuo u_1 ir u_2 verčių, bet ir nuo tiriamojo ŽV apvijų varžos, polių porų skaičiaus, susietojo srauto vertės ir apkrovos momento dydžio, įvertinant juos apibendrintu (vienetiniu) parametru C [5, 29].

ŽV būsenų analizė

Galima panagrinėti dvipolio ŽV leidžiamąsias komutacijas, esant fazių skaičiui $m = 2$ [3, 4]. Kai yra vieno poliškumo komutacija ir simetrinis valdymas (pav. 3.3.2, a), yra galimos tik dvi stabilios elektrinės būsenos. ŽV valdant simetriškai, įjungus nuolatinę įtampą u_1 į fazę 1, statoriaus magnetovaros jėga MVJ sutampa su fazės 1 ašimi [5, 29].

Statoriaus MVJ ir rotoriaus nuolatinio magneto lauko sąveikoje atsiranda sinchronizavimo momentas [5, 29]:

$$M_s = M_{\max} \sin \theta. \quad (3.3.22)$$



3.3.2 pav. Valdymo kryptys

Be stabdymo momento ($M_a = 0$), rotorius užims padėtį, kurioje jo ašis sutaps su fazės 1 ašimi. Išjungus 1 fazę ir įjungus 2 fazę, rotorius pasisuks 90° kampui. Išjungus 2 fazę ir prie 1 fazės prijungus $-u_1$, rotorius pasisuks toliau 90° kampui. Vėl išjungus 1 fazę ir prie 2 fazės prijungus $-u_2$, rotorius pasisuks dar 90° (pav. 3.3.2, b). Todėl, esant dvipolei komutacijai, kai $|u_1| = |u_2|$, komutavimo algoritmą galima užrašyti taip [5, 29]:

$+1, +2, -1, -2$.

Atstojamasis ŽV judesys bus $90^\circ \cdot 4 = 360^\circ$. Tuos pačius žingsnius bei $\sqrt{2}$ karto didesnę MVJ ir sinchronizavimo momentą galima gauti vienu metu komutuojuant abi apvijas tokia seka [5, 29]:

$(+1, +2), (-1, +2), (-1, -2), (+1, -2)$.

Šiuo atveju rotorius stabilios būsenos bus pasuktas 45° kampui, palyginti su būsenomis paveiksle 8, b. ŽV žingsnį galima du kartus sumažinti, komutuojuant apvijas nesimetrinio ŽV apvijų valdymo algoritmu [5, 29]:

$+1, (+1, +2), +2, (+2, -1), -1, (-1, -2), -2, (-2, +1)$.

Jei variklio rotorių veikia apkrovos momentas M_a , tai perjungiant fazes, rotorius atsiliks nuo MVJ vektoriaus apkrovos kampui [5, 29]:

$$\theta_a = \arcsin\left(\frac{M_a}{M_{\max}}\right) \quad (3.3.23)$$

Dėl mažo slopinimo rotorius švytuoja kampiniu dažniu w_0 apie stabilią būseną (1.6.7 išraiška). Perjungiant apvijas, rotoriumi perduodama ne tik naudingą darbą atliekanti energija, bet ir papildoma perteklinė kinetinė rotorius energija. Perteklinė energija priklauso nuo rotorius kampinės padėties naujos stabilios būsenos atžvilgiu po apvijų perjungimo. Patys didžiausi rotorius svyravimai gali atsirasti, kai apvijų komutacijos dažnis sutampa su savuoju rotorius svyravimo dažniu. Esant mažai

mechaninei apkrovai ir mažam vidiniam slopinimui, mažiausias rotoriaus žingsnio laikas apytiksliai lygus $\frac{1}{4}$ savųjų švytavimų periodui [5, 29]:

$$t_a \approx \frac{1}{4}T_0 = \frac{\pi}{2\omega_0} = \frac{1}{4f_0}. \quad (1.6.24)$$

Dėl rotoriaus švytavimų ši trukmė yra gerokai ilgesnė. Kas būtų, jei tolesnis valdymo signalas atsirastų dar vykstant švytavimui. Rotoriui perduodama energija bus *mažiausia*, jei kitas valdymo impulsas bus nusiųtas laiko momentu $t_1 = 2t_a$. Galima išskirti tokius valdymo impulsų dažnius [5, 29]:

Aukštesniuosis, kai $f > \frac{1}{t_a} = 4f_0$;

Optimalų, kai $f = \frac{1}{2t_a} = 2f_0$;

Rezonansinį, kai $f \approx \frac{1}{4t_a} = f_0$;

Pavienių komandų, kai $f < \frac{1}{t_{per}}$,

čia t_{per} – švytavimų proceso pabaigos trukmė.

Aukštesniųjų dažnių srityje ŽV rotorius paleidimo pradžioje vėluoja statoriaus lauko atžvilgiu. Kiekvienu naujo takto impulsu į sistemą papildomai tiekama energija ir rotoriaus greitis toliau didėja. Jei didžiausias magnetinis ašių išderinimas neviršija polių padalos, tai rotorius įeis į sinchronizuotą būseną [5, 29].

Kai $f = 2f_0$, kiekviena kita komanda papildomos energijos sistemai netiekia, nes tos komandos pasirodymo momentu $t_1 = 2t_a$, ŽV rotorius yra stabilios pusiausvyros būsenoje. Šis režimas įgalina minimizuoti dinaminę pavaros paklaidą ir yra optimalaus dažnio valdymo režimas [5, 29].

Esant rezonansiniam valdymo impulsų dažniui į rotorį perduodama didžiausia energija. Tai sukelia greitų švytavimų amplitudės didėjimą ir ŽV praranda sinchronizmą. Tokiam įvykiui pašalinti ŽV rotorius turi būti priverstinai stabdomas, pavyzdžiui, sausosios trinties momentu [5, 29].

Kai $f < 1/t_{per}$, rotorius judesys prasideda esant nulinėms pradinėms sąlygoms, procesas gali būti tiek gėstantis, tiek aperiodinis [5, 29].

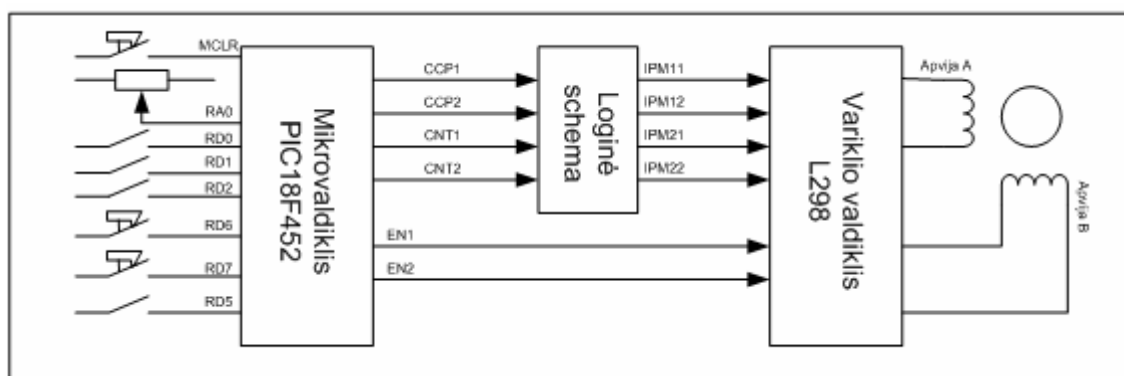
Matematiškai išanalizavus žingsninį variklį bei įsigilinus į geodezinių prietaisų kalibravimo stendo veikimo principą, galima nuspėti būsimus netikslumus ir paklaidas. Šios analizės pagrindu skaičiuojamos žingsninio variklio būsenos, į kurias atsižvelgiama rašant valdymo programos algoritmą.

4. Eksperimentinė dalis

Šioje dalyje pateikiama funkcinė ir principinė valdymo schemas su jų aprašymu, nagrinėjamas valdymo metodas, pateikiamas programos fragmentas, aptariama modernizacija bei pakeitimai. Pateikiami variklių Densitron DSM5750H–18075 ir Vexta PK266–02B dirbant su suprojektuota valdymo schema tikslumo matavimų rezultatai.

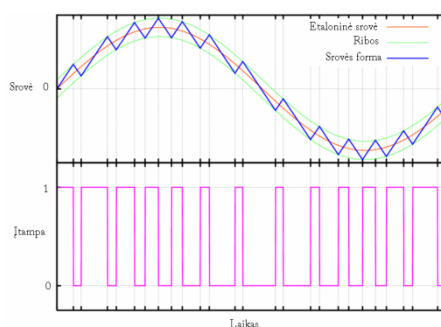
4.1. Pozicionavimo sistemos schemas modernizacija

Norint žingsninį variklį valdyti mikrožingsnio režimu, būtina mikroprocesorinė valdymo schema. Tokios sistemos funkcinė schema pavaizduota 4.1.1 pav. Mikrožingsnio režimas įgyvendinamas moduliuojant impulso plotį. Srovės apvijose kinta pagal sinusą ir kosinusą (laiko atžvilgiu vienoje apvijoje srovė per 90° atsilieka nuo srovės kitoje apvijoje). Nuo moduliavimo dažnio priklauso variklio sukimosi greitis, o sukimosi kryptis priklauso nuo to, kurios apvijos srovė atsilieka. Dėl apvijos induktyvumo variklio apvijoje gaunama praktiškai sinusinė srovės forma. Impulso pločio moduliavimas pavaizduotas 4.1.2 pav.

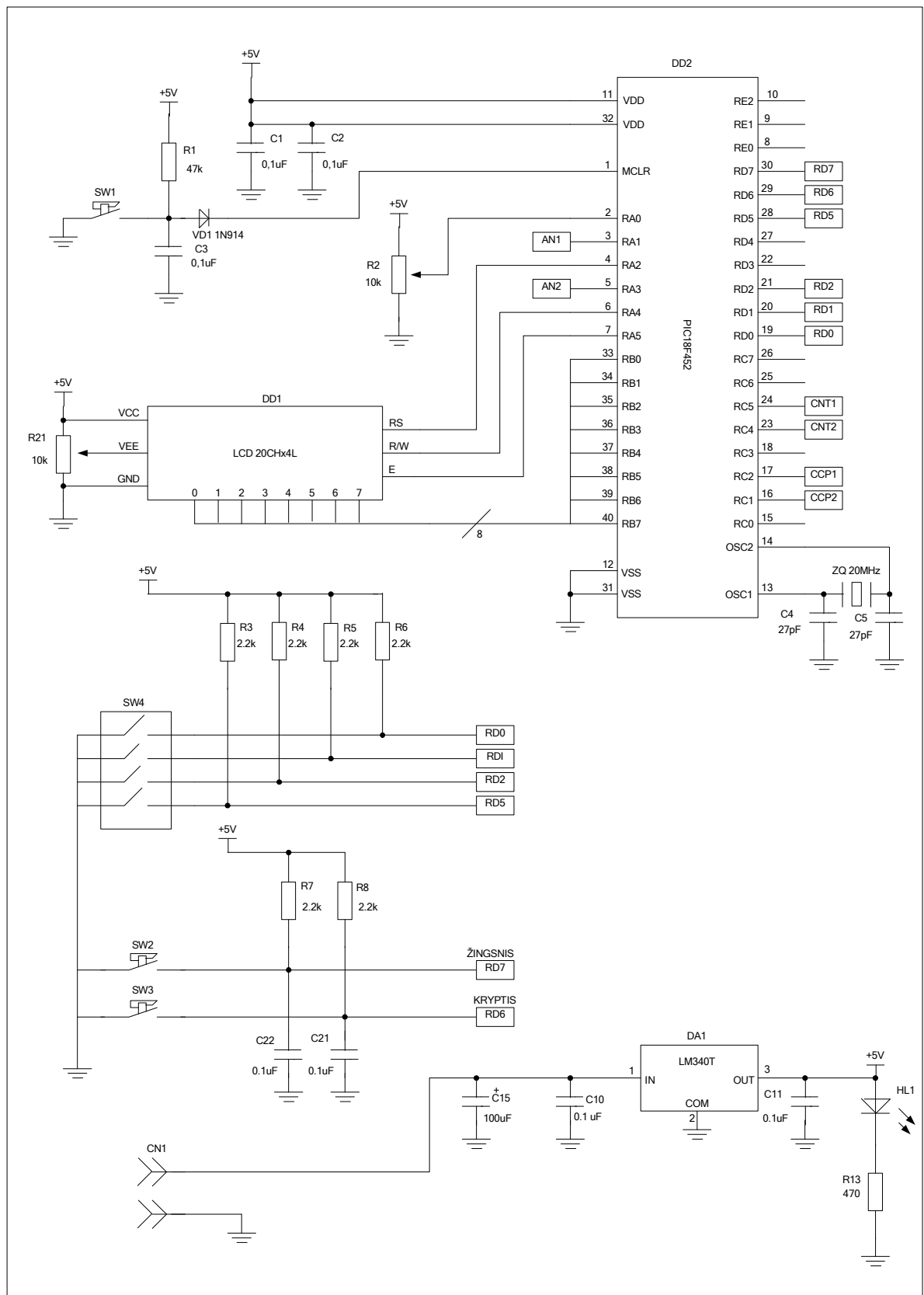


4.1.1 pav. Valdymo sistemos funkcinė schema [4]

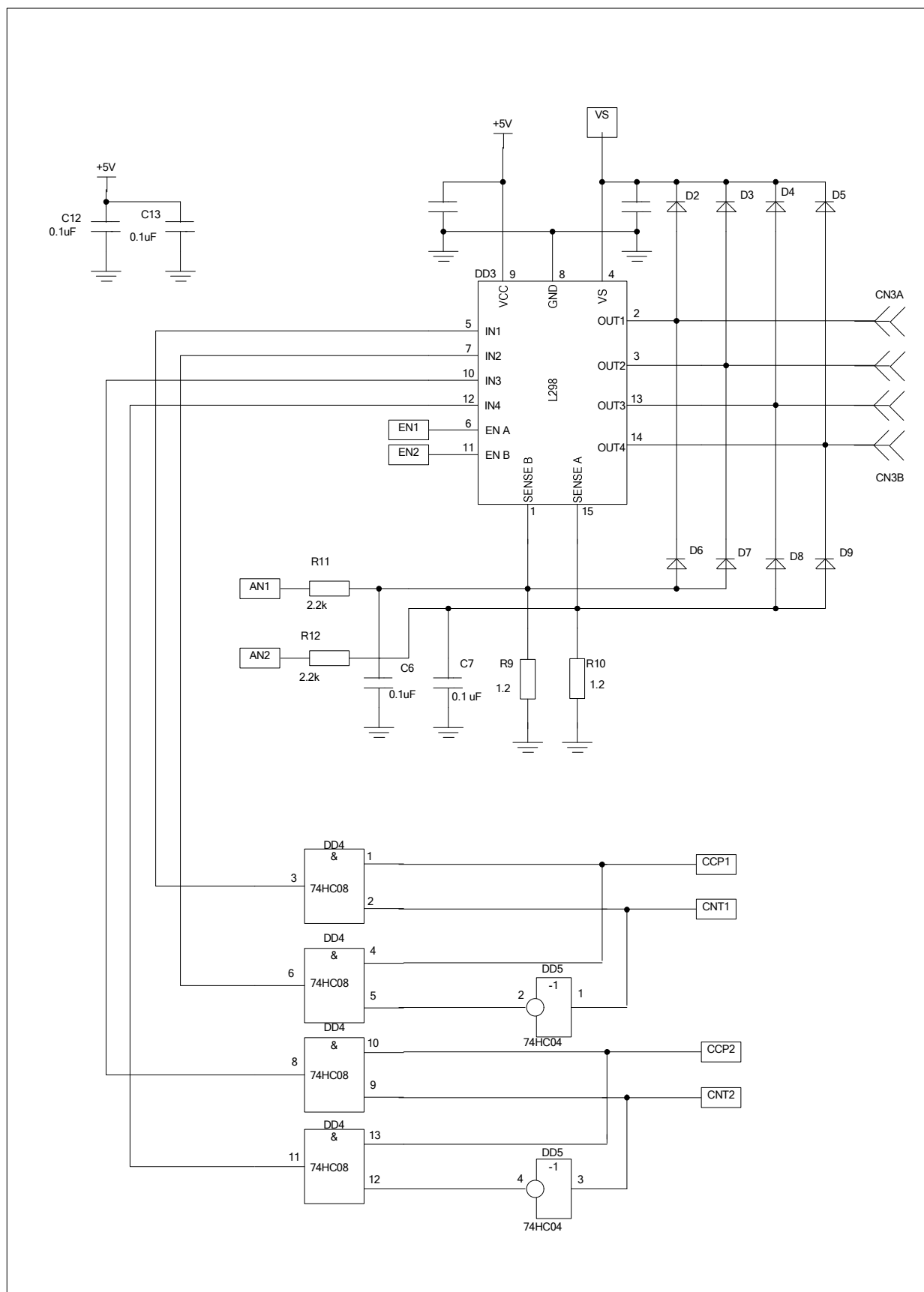
Sistemos valdymui naudojamas PIC18F452 mikrovaldiklis, galios grandinės L928 mikroschema. Užprogramavus mikrovaldiklį schema dirba savarankiškai ir yra valdoma integruotų mygtukų. Schemas logikai maitinti naudojamas 5 V maitinimo blokas, galios grandinę maitina 24V maitinimo šaltinis. Principinė sistemos schema pateikta 4.1.3 ir 4.1.4 pav.



4.1.2 pav. Impulso pločio moduliavimas [5]



4.1.3 pav. Principinė valdymo sistemos schema



4.1.4 pav. Principinė valdymo sistemos schema

4.1.1. Valdymo schemos veikimo aprašymas

Valdymo įrenginio principinė schema pateikta 4.4.1. darbo punkte 4.1.3 ir 4.1.4 pav.

Valdymo scheme naudojamas PIC18C452 mikrovaldiklis ir valdiklis L298, turintis du H tiltus varikliui valdyti.

Reikalingos keturios IPM (impulso pločio moduliacijos) sekos. Jos gaunamos iš dviejų IPM (CCP1 ir CCP2) išėjimų, dirbančių IPM režimu. Valdymo signalai CNT1 ir CNT2 per logine scheme junginėja CPP1 ir CPP2 prie atitinkamo L298 valdiklio IPM įėjimo. CNT1 ir CNT2 yra atitinkamai prijungti prie mikrovaldiklio RB3 (36 išvadas) ir RB2 (35 išvadas) išvadų.

EN1 ir EN2 signalai aktyvuoja tranzistorinius tiltus L298 mikroschemoje. Atitinkamai prijungti prie RB4 (37 išvadas) ir RB5 (38 išvadas) PIC18C452 išvadų.

Srovės grįžtamieji ryšiai iš variklio apvijų paverčiami į įtampas per šuntus R9 ir R10. Grįžtamieji ryšiai prijungti prie AN1 (3 išvadas) ir AN3 (5 išvadas) mikrovaldiklio PIC18C452 išvadų, bei 1 ir 15 L298 valdiklio išvadų („Sense A“ ir „Sense B“).

I/O išvadas RD5 (28 išvadas) prijungtas prie SPST jungiklio pavarai aktyvavuoti.

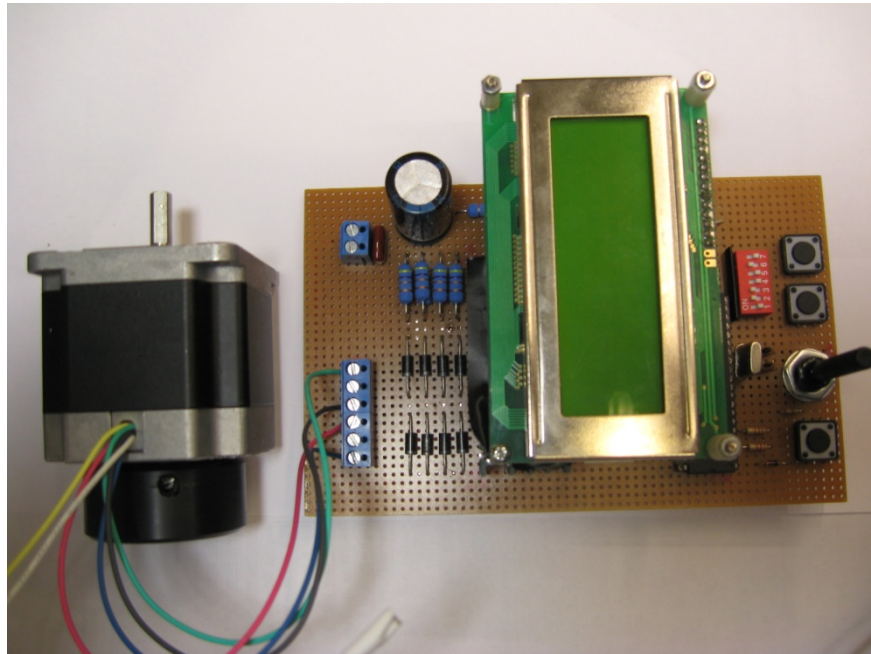
I/O išvadas RD6 (29 išvadas) prijungtas prie mygtuko, nustatančio variklio sukimosi kryptį. Kiekvienas mygtuko nuspaudimas keičia sukimosi kryptį.

I/O išvadas RD7 (30 išvadas) yra prijungtas prie mygtuko „žingsnis“. Nuspaudus šį mygtuką, variklis pasisuka programoje nustatytą žingsnių skaičių nuo 1 iki 999.

DIP jungikliais prijungtais prie RD0 RD1 RD2 išvadų nustatomas žingsnio dydis – nuo viso žingsnio iki 1/32 žingsnio.

20 MHz kvarcinis rezonatorius naudojamas kaip pagrindinis taktų impulsų generatorius (angl. *main oscillator*).

Sumontuotos valdymo schemos vaizdas pateiktas 4.1.5 pav.



4.1.5 pav. Sumontuota valdymo schema

4.2. Valdymo metodo aprašymas

Žingsninio variklio rotoriaus stabilios pozicijos yra sinchronizacijoje su statoriaus magnetiniu srautu. Kai apvijomis teka srovė, kiekviena iš jų kuria magnetinį srautą oro tarpe. Srauto tankis priklauso nuo srovės stiprio toje apvijoje. Taigi srautas oro tarpe yra tiesiogiai proporcingas apvijų srovių vektorinei sumai arba suminio vektoriaus kryptčiai. Pilno žingsnio ir pusės žingsnio režime srovė apvijose kuria srautą, kurio sukimosi žingsnis yra 90 ir 45 elektrinių laipsnių. Mikrožingsnio režime srovė apvijose keičiama dalimis, taigi srauto kryptis taip pat keičiasi dalimis (sukimosi žingsnis mažesnis už 45 ar 90 elektrinių laipsnių. Paprastai pilnas žingsnis yra dalinamas į 4, 8, 16 ar 32 žingsnelius. (Žingsnelis mažesnis už 1/32 žingsnio paprastai neturi tolimesnės vertės variklio dinamikai.)

Norint sužinoti sukamąjį srautą esamu momentu, žinant apvijų sroves, galima pritaikyti tokią išraišką:

$$I_a = I_{\max} \cdot \sin \theta, \quad (4.2.1)$$

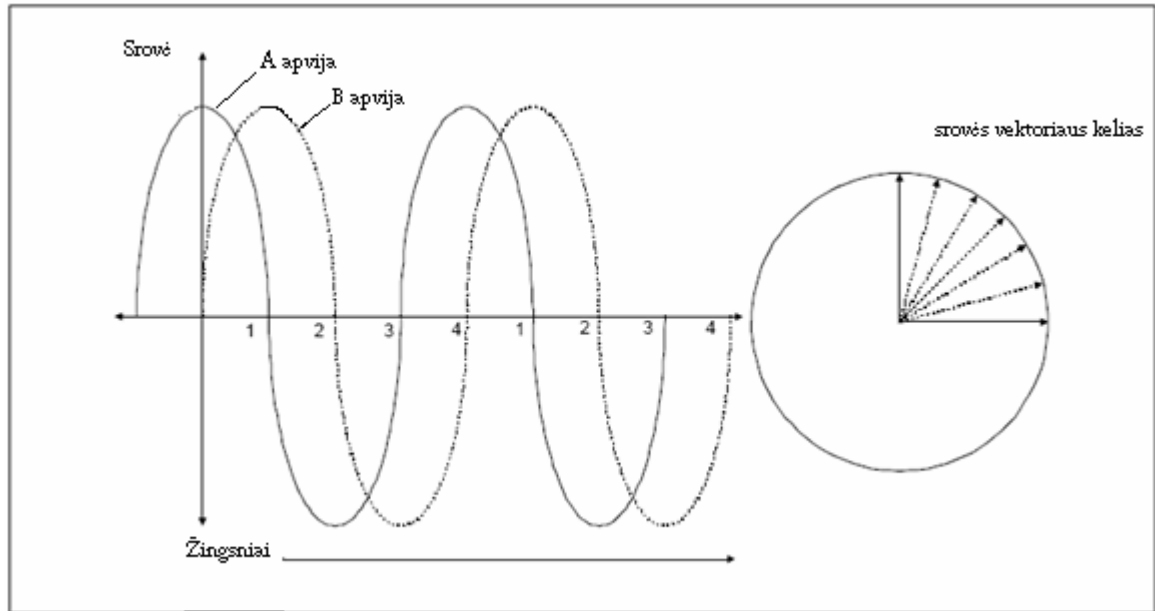
$$I_b = I_{\max} \cdot \cos \theta, \quad (4.2.2)$$

čia I_a – momentinė A apvijos srovė, I_b – momentinė B apvijos srovė, $I_{\max}$ – apvijos didžiausia srovė, θ – žingsnio kampas elektriniais laipsniais.

Statoriaus bendra srovė yra vektorinė abiejų apvijų srovių suma:

$$I_{\text{stator}} = \sqrt{(I_{\max} \cdot \sin \theta)^2 + (I_{\max} \cos \theta)^2} = I_{\max} \cdot \sqrt{\sin^2 \theta + \cos^2 \theta}. \quad (4.2.3)$$

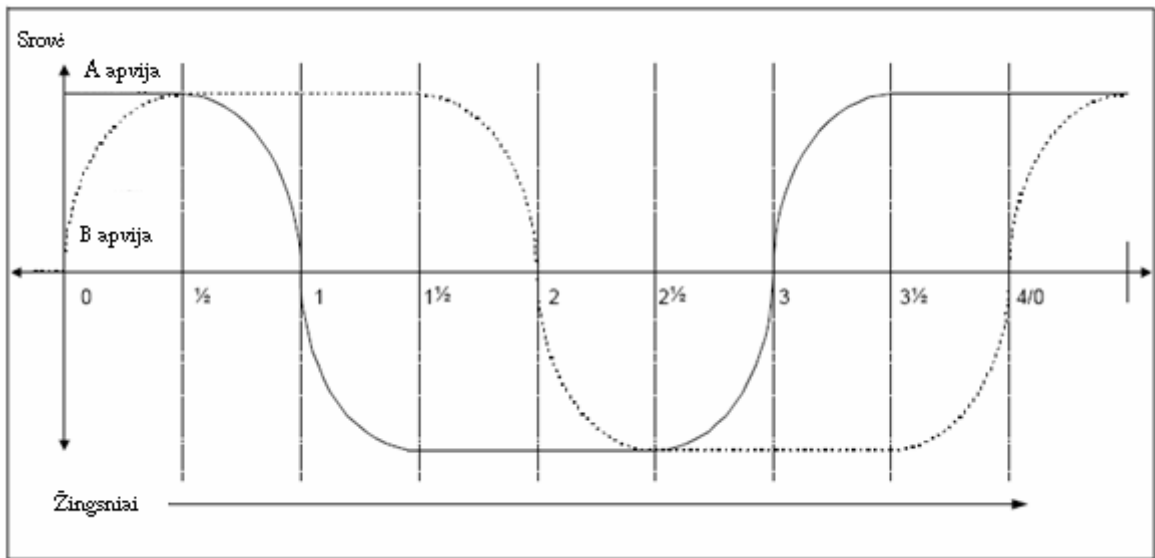
Grafiškai sistema pavaizduota 4.2.1 pav.



4.2.1. pav. Statoriaus srovės ir atstojamosios srovės vektoriaus padėtis mikrožingsnio režimu

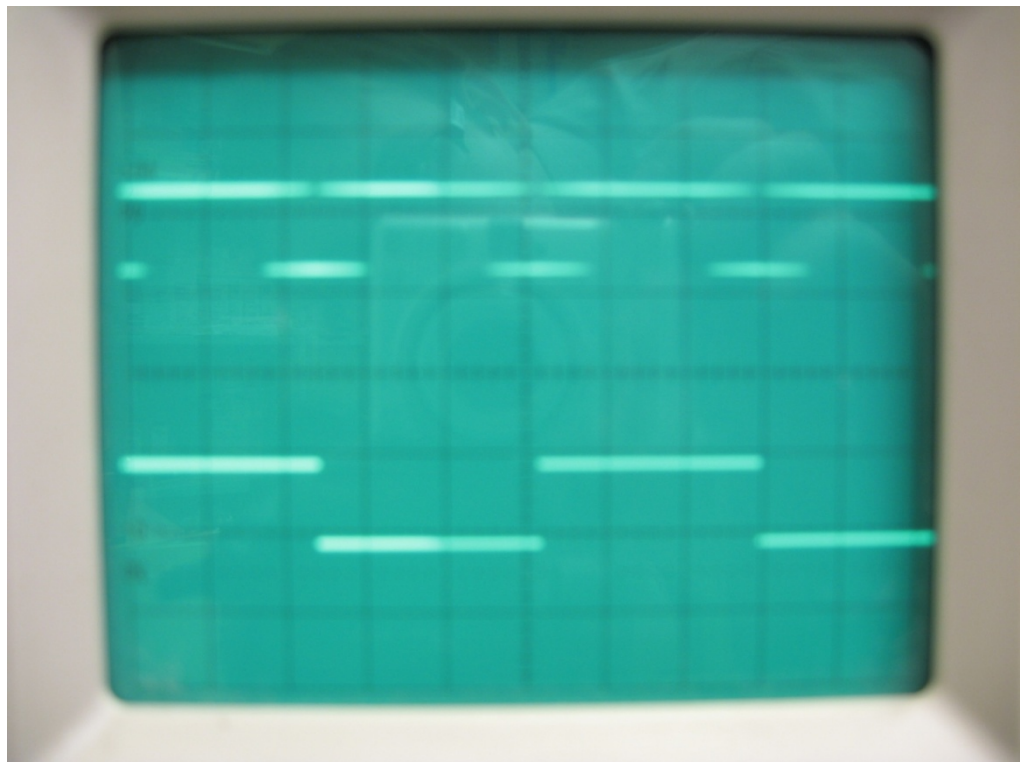
Kaip parodyta 4.2.1 pav., kiekvienos apvijos srovės kitimas duoda sukamojo srauto padėties pokytį oro tarpe. Taigi kiekvienas padidėjimas elektrinio kampo θ , srauto ir momento atitinkamai $I_{\max}$ yra sukuriamas esamame kampe θ , tuo būdu kuriamas pastovus sukamasis srautas/momentas, kuris padaro įmanomą mikrožingsnio režimą.

Praktiškai, srovė vienoje apvijoje palaikoma pastovi pusę viso žingsnio, o srovė kitoje apvijoje yra keičiama pagal funkciją $\sin \theta$. Taip daroma, kad variklio sukimo momentas būtų didžiausias. Toks metodas pavaizduotas 4.2.2 paveiksle.

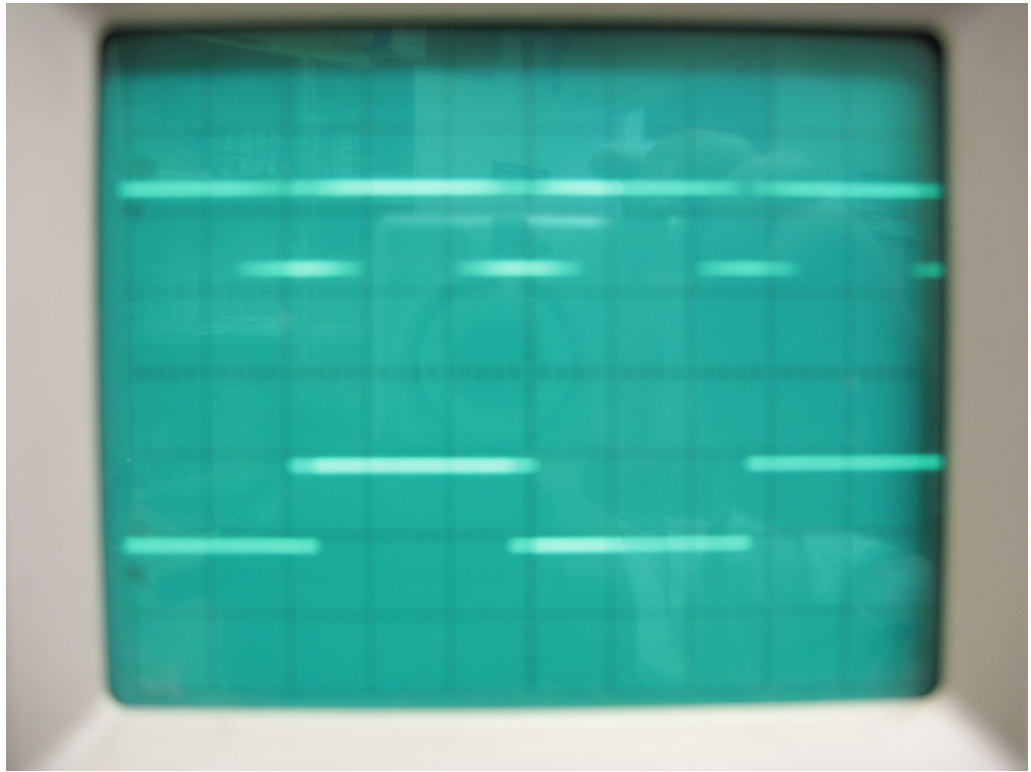


4.2.2 pav. statoriaus srovės praktikoje

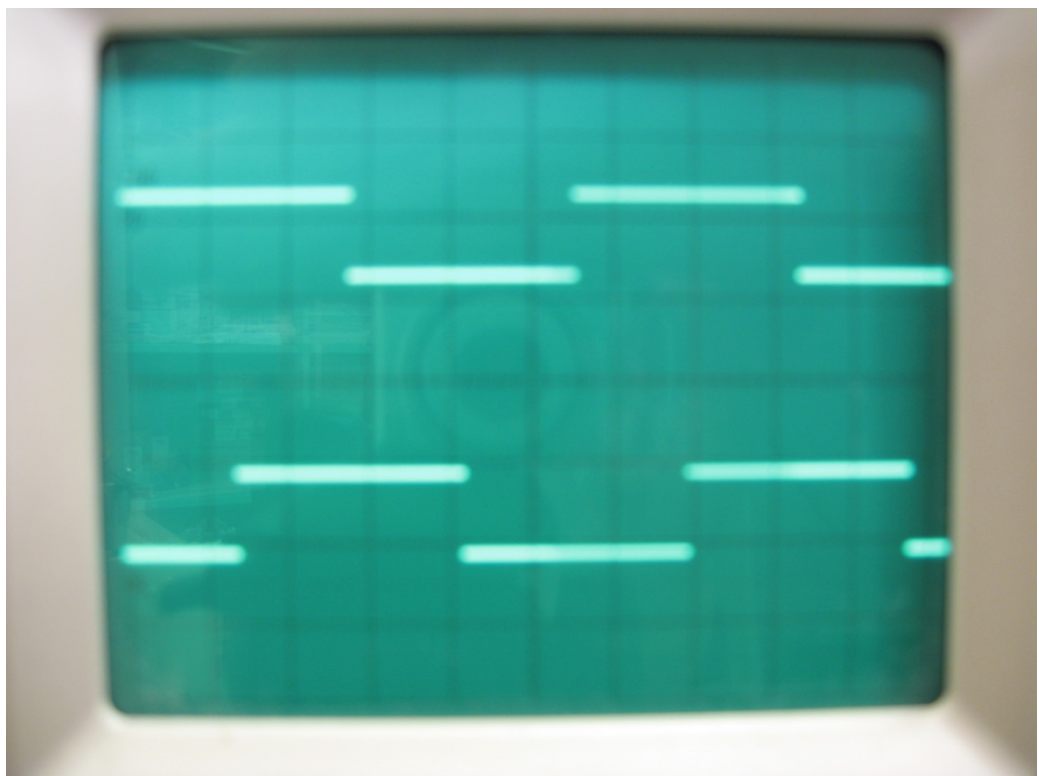
Sumontavus schemą ir atliekant testavimus, gautas impulso pločio moduliavimas (CCP1 ir CCP2) ir jo komutacinių impulsų (CNT1 ir CNT2) oscilogramos. Jos pateiktos 4.2.3–4.2.5 paveiksluose.



4.2.3 pav. CPP1 ir CNT1 oscilograma



4.2.4 pav. CCP2 ir CNT2 oscilograma



4.2.5 pav. CNT1 ir CNT2 oscilograma

4.2.3 ir 4.2.4 pav. pavaizduotas variklio apvijų valdymo impulso pločio moduliavimas CCP1, CCP2 ir jų komutavimo signalai CNT1 bei CNT2. Oscilogramos paimtos kai pavara sukosi 1/32 žingsnio režimu. 4.2.5 pav. CNT1 ir CNT2 oscilogramos, šios dvi kreivės parodo kokia seka siunčiami impulsai variklio apvijoms. Galima pastebėti, kad jos perstumtos per 90°. Matavimai atlikti su oscilografu HAMEG HM303–6.

4.3. Valdiklio algoritmų ir programų sudarymas

Žemiau pateiktas Asemblerio kodu parašytos PIC18F452 mikrovaldiklio programos fragmentas, reguliuojantis žingsnius ir komutuojantis IPM.

```
*****
```

Šis paprogramis IPM vertes iš lentelės įrašo į CCPR1L ir CCP1CON<5:4> registrus, taip pat inkrementuoja lentelės žymeklį prie sekančios vertės, atitinkamai nuo parinkto mikrožingsnių skaičiaus.

```
*****
```

```
CCP1_INCREASE
```

```
TBLRD*+
```

```
movff TABLAT,CCPR1L
```

```
TBLRD*+
```

```
bcf CCP1CON,4 ; IPM ciklo atnaujinimas iš lentelės
```

```
bcf CCP1CON,5
```

```
movf TABLAT,0
```

```
iorwf CCP1CON,1
```

```
btfsc FLAG_BYTE,3
```

```
call table_adjust_positive ; Lentelės atnaujinimas naujam skaičiui
```

```
return
```

```
*****
```

Šis paprogramis IPM vertes iš lentelės įrašo į CCPR1L ir CCP1CON<5:4> registrus, taip pat dekrementuoja lentelės žymeklį prie sekančios vertės, atitinkamai nuo parinkto mikrožingsnių skaičiaus.;*****

CCP1_DECREASE

TBLRD*–

bcf CCP1CON,4

bcf CCP1CON,5 ; IPM ciklo atnaujinimas iš lentelės

movf TABLAT,0

iorwf CCP1CON,1

TBLRD*–

movff TABLAT,CCPR1L

btfsc FLAG_BYTE,3

call table_adjust_negative ; Lentelės atnaujinimas naujam skaičiui

return

;*****

Šis paprogramis IPM vertes iš lentelės įrašo į CCPR2L ir CCP2CON<5:4> registrus, taip pat inkrementuoja lentelės žymeklį prie sekančios vertės, atitinkamai nuo parinkto mikrožingsnių skaičiaus.

;*****

CCP2_INCREASE

TBLRD*+

movff TABLAT,CCPR2L ;Read Vertčių nuskaitymas iš lentelės ir IPM ciklo atnaujinimas

TBLRD*+ ;(10 bits)of CCP2

bcf CCP2CON,4

bcf CCP2CON,5

movf TABLAT,0

iorwf CCP2CON,1

btfsc FLAG_BYTE,3

call table_adjust_positive ; Lentelės kursoriaus nustatymas

return

```
;*****
```

Šis paprogramis IPM vertes iš lentelės įrašo į CCPR2L ir CCP2CON<5:4> registrus, taip pat dekrementuoja lentelės žymeklį prie sekančios vertės, atitinkamai nuo parinkto mikrožingsnių skaičiaus.

```
;*****
```

```
CCP2_DECREASE
```

```
TBLRD*–
```

```
bcf CCP2CON,4
```

```
bcf CCP2CON,5
```

```
movf TABLAT,0
```

```
iorwf CCP2CON,1
```

```
TBLRD*–
```

```
movff TABLAT,CCPR2L
```

```
btfsc FLAG_BYTE,3
```

```
call table_adjust_negative ; Lentelės atnaujinimas naujam skaičiui
```

```
return
```

```
;*****
```

Šis paprogramis perkelia lentelės žymeklį į lentelės pradžią, kuri yra parenkama prieš tai buvusiam paprogramyje

```
;*****
```

```
point_to_begining_of_table
```

```
TBLRD*+
```

```
TBLRD*+
```

```
TBLRD*+
```

```
call table_adjust_positive ; Naudojama lentelės vertių praleidimui, dėl 16 mikrožingsnių  
; režimo
```

```
btfsc FLAG_BYTE,3
```

```
call table_adjust_positive ; Lentelės atnaujinimas naujam skaičiui
```

```
return
```

```
;*****
```

Šis paprogramis perkelia lentelės žymeklį į lentelės galą, kuri yra parenkama prieš tai buvusiam paprogramyje

```
;*****
```

```
point_to_end_of_table
```

```
TBLRD*–
```

```
TBLRD*–
```

```
TBLRD*–
```

```
call table_adjust_negative ;Naudojama lentelės vertių praleidimui, dėl 16 ;  
mikrožingsnių režimo
```

```
btfsc FLAG_BYTE,3
```

```
call table_adjust_negative ; Lentelės atnaujinimas naujam skaičiui
```

```
return
```

```
;*****
```

Šis paprogramis pagreitina lentelės žymeklį per (STEP_JUMP–1)*2 kartų. Naudojama 16, 8, 4, 2 žingsnių/žingsnyje režimuose

```
;*****
```

```
table_adjust_positive
```

```
movf STEP_JUMP,W
```

```
dcfsnz WREG,F ;W= STEP_JUMP–1
```

```
return
```

```
rlncf WREG,W ;W=(STEP_JUMP–1)*2
```

```
bcf STATUS,C
```

```
addwfc TBLPTRL,F ;TablePointer= Table_pointer+W
```

```
clrf WREG
```

```
addwfc TBLPTRH,F
```

```
addwfc TBLPTRU,F
```

```
return
```

```
;*****
```

; Šis paprogramis pagreitina lentelės žymeklio grįžimą per (STEP_JUMP–1)*2 kartų. Naudojama 16, 8, 4, 2 žingsnių/žingsnyje režimuose

```

;*****
table_adjust_negative
movf STEP_JUMP,W
dcfsnz WREG,F ;W= STEP_JUMP-1
return
rlncf WREG,W ;W=(STEP_JUMP-1)*2
bsf STATUS,C
subwfb TBLPTRL,F ;TablePointer= Table_pointer-W
clrf WREG
subwfb TBLPTRH,F
subwfb TBLPTRU,F
return
;*****

IPM1 paverčia aukštu signalo lygiu, IPM2 žemu signalo lygiu
;*****

CCP1_HIGH_CCP2_LOW
movlw 0x0FF ;Set CCPR1L 100% duty cycle
movwf CCPR1L ;8MSB's of duty cycle
movlw 0x30 ;2 LSB's at CCPxCON<5:4>
iorwf CCP1CON,F
movlw 0X0 ;Set CCP2 duty cycle to 0%
movwf CCPR2L
movlw 0X0CF
andwf CCP2CON,F
return

;*****

IPM1 paverčia žemu signalo lygiu, IPM2 aukštu signalo lygiu

```

```

;*****
CCP1_LOW_CCP2_HIGH
movlw 0x0 ; Nustatyti CCPR1L į 0%
movwf CCPR1L ;8MSB's ciklo
movlw 0x0CF ;2 LSB's at CCPxCON<5:4>
andwf CCP1CON,F
movlw 0X0FF ;nustatyti CCP2 100% ciklo
movwf CCPR2L
movlw 0X030
iorwf CCP2CON,F
return
;*****
; Šis paprogramis nustato ADC GO bitą aukštu, po užklausos laiko apie 20μs
;*****
SET_ADC_GO
call CALCULATE_RPM1
btfss ADCON0,GO
bsf ADCON0,GO ;nustatyti GO bit į ADC konversijos pradžią
return

;*****
; Šis paprogramis nustato greitį RPM, pagal kintamos varžos padėtį
;*****
CALCULATE_RPM1
clrf TEMP
clrf TEMP1
movf RPM_VALUE+1,W

```

```

btfsc STATUS,Z
incf RPM_VALUE+1,F
movlw 0x2F
movwf TEMP_LOCATION
movlw 0xAE
movwf TEMP_LOCATION+1
continue_subtraction1
bsf STATUS,C
movf RPM_VALUE+1,W
subwfb TEMP_LOCATION+1,F
movlw 0x0
subwfb TEMP_LOCATION,F
btfss STATUS,C
goto keep_result_in_rpm1
incf TEMP,F
btfsc STATUS,C
incf TEMP1,F
goto continue_subtraction1
keep_result_in_rpm1
;Timer0 value = FFFF–Timer0
rlcf TEMP,F
rlcf TEMP1,F
bcf STATUS,C
rlcf TEMP,F
rlcf TEMP1,F
bsf STATUS,C
movlw 0xFF
subfwb TEMP,F
subfwb TEMP1,F

```

```
movff TEMP1,SPEED_REF_H
```

```
movff TEMP,SPEED_REF_L
```

```
return
```

```
*****  
;
```

Mikrožingsnių verčių lentelė

```
*****  
;
```

TABLE code 0x02A0

sine_table

```
db 0x00,0x00,0x20,0x30,0x34,0x20,0x42,0x10,0x50,0x00,0x5C,0x10,0x68,0x20
```

```
db 0x74,0x30,0x80,0x30,0x8C,0x30,0x98,0x30,0xA4,0x20,0xB0,0x10,0xC3,0x10
```

```
db 0xD6,0x20,0xEA,0x20,0xFF,0x30
```

```
*****  
;
```

Visa programa assemblerio kodu pateikta darbo priede.

4.4. Geodezijos prietaisų kalibravimo stendo parametrų tyrimas

Šioje dalyje pateikiamos pavaros režimų tyrimo eksperimentinės kreivės ir aptariami gauti rezultatai. Bandymai atlikti naudojant skaitmeninį rodmenų įtaisą CS3000 (4.4.1 pav.) ir Precizika elektroninį kampamatį A36-F-3600-5V (4.4.2 pav.). Tyrimai atliekami su žingsniniais varikliais Densitron DSM5750H-18075 ir Vexta PK266-02B.



4.4.1 pav. CS3000 skaitmeninis rodmenų įtaisas



4.4.2 pav. A36-F-3600-5V kampamatis

Surinkus pavaros schema, reikia ištirti jos veikimo tikslumą, ir parametrus. 4.4.1–4.4.6 lentelėse duomenys, gauti matuojant variklio žingsnio kampą viso žingsnio, pusės žingsnio, 1/4 žingsnio, 1/8 žingsnio, 1/16 žingsnio ir 1/32 žingsnio režimais.

4.4.1 lentelė viso žingsnio režimas 1,8°

Žingsnis	DENSITRON		VEXTA	
	Kampas	Žingsnio kampas	Kampas	Žingsnio kampas
1	1,833	1,83	1,800	1,8
2	3,533	1,867	3,600	1,800
3	5,400	1,767	5,400	1,800
4	7,167	1,766	7,167	1,767
5	8,933	1,800	8,967	1,800
6	10,733	1,800	10,767	1,800
7	12,533	1,834	12,533	1,767
8	14,367	1,766	14,333	1,800
9	16,133	1,800	16,133	1,800
10	17,933	1,834	17,933	1,800
11	19,767	1,800	19,733	1,800
12	21,567	1,766	21,533	1,800
13	23,333	1,800	23,333	1,800
14	25,133	1,834	25,133	1,800
15	26,967	1,800	26,933	1,800
16	28,767	1,867	28,733	1,800

4.4.2 lentelė 1/2 žingsnio režimas 0,9°

Žingsnis	DENSITRON		VEXTA	
	Kampas	Žingsnio kampas	Kampas	Žingsnio kampas
1	0,900	0,9	0,967	0,967
2	1,800	0,900	1,800	0,833
3	2,767	0,967	2,733	0,933
4	3,633	0,867	3,600	0,867
5	4,500	0,867	4,567	0,967
6	5,433	0,933	5,400	0,833
7	6,400	0,967	6,333	0,933
8	7,200	0,800	7,200	0,867
9	8,067	0,867	8,167	0,967
10	8,867	0,800	9,000	0,833
11	9,800	0,933	9,933	0,933
12	10,800	1,000	10,800	0,867
13	11,633	0,833	11,767	0,967
14	12,500	0,867	12,633	0,867
15	13,417	0,917	13,533	0,900
16	14,400	0,983	14,433	0,900

4.4.3 lentelė 1/4 žingsnio 0,45°

Žingsnis	DENSITRON		VEXTA	
	Kampas	Žingsnio kampas	Kampas	Žingsnio kampas
1	0,567	0,567	0,633	0,633
2	0,933	0,367	1,333	0,700
3	1,267	0,333	1,633	0,300
4	1,733	0,467	1,833	0,200
5	2,233	0,500	2,433	0,600
6	2,633	0,400	3,133	0,700
7	2,967	0,333	3,400	0,267
8	3,533	0,567	3,633	0,233
9	4,133	0,600	4,233	0,600
10	4,533	0,400	4,967	0,733
11	4,867	0,333	5,233	0,267
12	5,367	0,500	5,433	0,200
13	5,867	0,500	6,067	0,633
14	6,233	0,367	6,733	0,667
15	6,633	0,400	7,033	0,300
16	7,200	0,567	7,233	0,200

4.4.4 lentelė 1/8 žingsnio režimas 0,225°

Žingsnis	DENSITRON		VEXTA	
	Kampas	Žingsnio kampas	Kampas	Žingsnio kampas
1	0,167	0,167	0,433	0,433
2	0,333	0,167	0,700	0,267
3	0,533	0,200	0,833	0,133
4	0,833	0,300	0,967	0,133
5	1,100	0,267	1,067	0,100
6	1,333	0,233	1,167	0,100
7	1,533	0,200	1,400	0,233
8	1,733	0,200	1,767	0,367
9	1,867	0,133	2,200	0,433
10	2,033	0,167	2,433	0,233
11	2,300	0,267	2,600	0,167
12	2,633	0,333	2,733	0,133
13	2,967	0,333	2,833	0,100
14	3,233	0,267	2,933	0,100
15	3,433	0,200	3,167	0,233
16	3,600	0,167	3,567	0,400

4.4.5 lentelė 1/16 žingsnio režimas 0,1125°

Žingsnis	DENSITRON		VEXTA	
	Kampas	Žingsnio kampas	Kampas	Žingsnio kampas
1	0,100	0,100	0,200	0,200
2	0,167	0,067	0,433	0,233
3	0,233	0,067	0,567	0,133
4	0,333	0,100	0,700	0,133
5	0,400	0,067	0,800	0,100
6	0,500	0,100	0,833	0,033
7	0,600	0,100	0,933	0,100
8	0,733	0,133	0,967	0,033
9	0,933	0,200	1,033	0,067
10	1,100	0,167	1,067	0,033
11	1,233	0,133	1,133	0,067
12	1,433	0,200	1,200	0,067
13	1,567	0,133	1,267	0,067
14	1,700	0,133	1,400	0,133
15	1,833	0,133	1,567	0,167
16	1,900	0,067	1,800	0,233

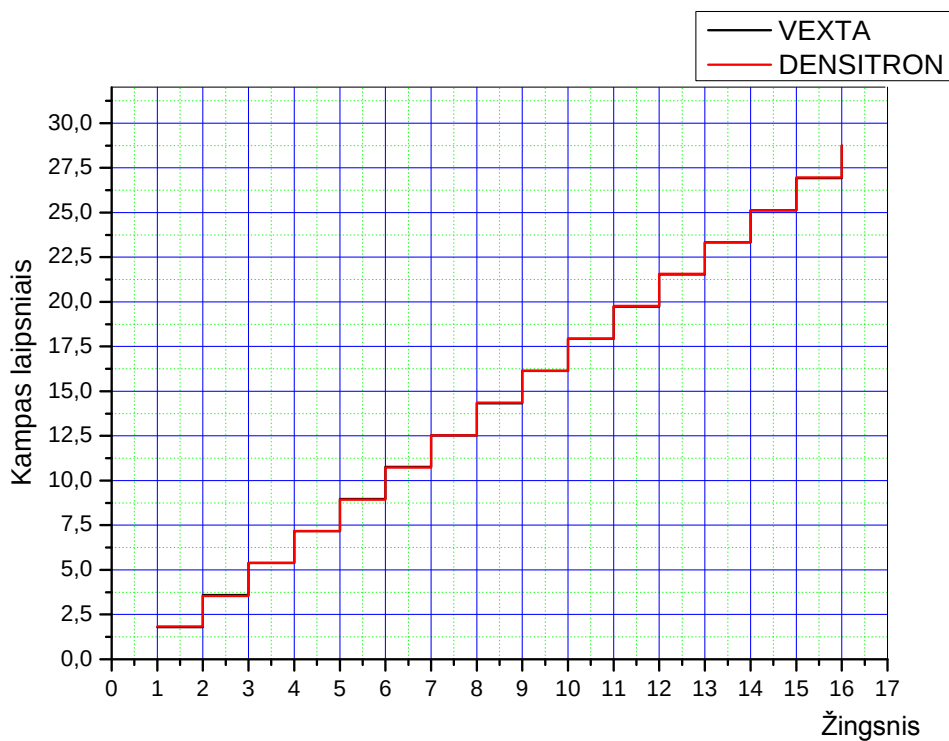
4.4.6 lentelė 1/32 žingsnio režimas 0,056°

Žingsnis	DENSITRON		VEXTA	
	Kampas	Žingsnio kampas	Kampas	Žingsnio kampas
1	0,067	0,067	0,067	0,067
2	0,133	0,067	0,133	0,067
3	0,167	0,033	0,200	0,067
4	0,233	0,067	0,267	0,067
5	0,333	0,100	0,333	0,067
6	0,400	0,067	0,400	0,067
7	0,433	0,033	0,433	0,033
8	0,533	0,100	0,467	0,033
9	0,567	0,033	0,500	0,033
10	0,633	0,067	0,533	0,033
11	0,667	0,033	0,567	0,033
12	0,733	0,067	0,600	0,033
13	0,767	0,033	0,633	0,033
14	0,833	0,067	0,667	0,033
15	0,867	0,033	0,700	0,033
16	0,933	0,067	0,733	0,033

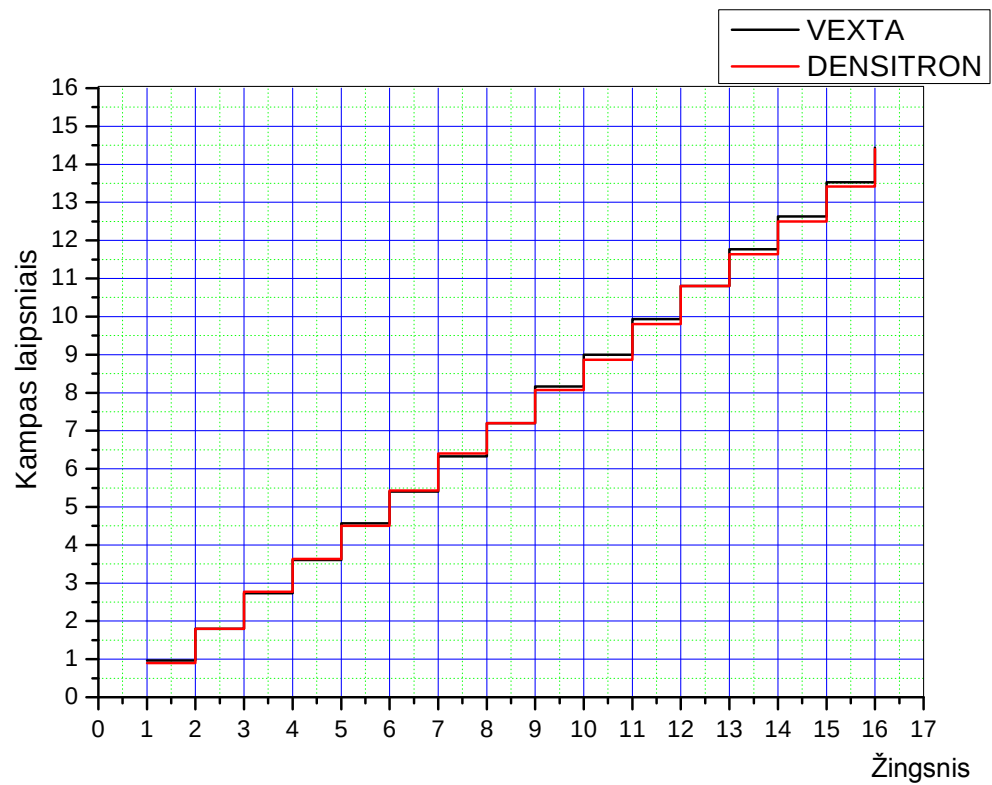
4.4.6 lentelės tęsinys

Žingsnis	DENSITRON		VEXTA	
	Kampas	Žingsnio kampas	Kampas	Žingsnio kampas
17	0,967	0,033	0,800	0,067
18	1,000	0,033	0,833	0,033
19	1,033	0,033	0,900	0,067
20	1,067	0,033	0,967	0,067
22	1,133	0,067	1,033	0,067
23	1,167	0,033	1,100	0,067
24	1,200	0,033	1,167	0,067
25	1,233	0,033	1,233	0,067
26	1,300	0,067	1,267	0,033
27	1,333	0,033	1,333	0,067
28	1,400	0,067	1,400	0,067
29	1,433	0,033	1,433	0,033
30	1,533	0,100	1,500	0,067
31	1,567	0,033	1,567	0,067
32	1,667	0,100	1,633	0,067

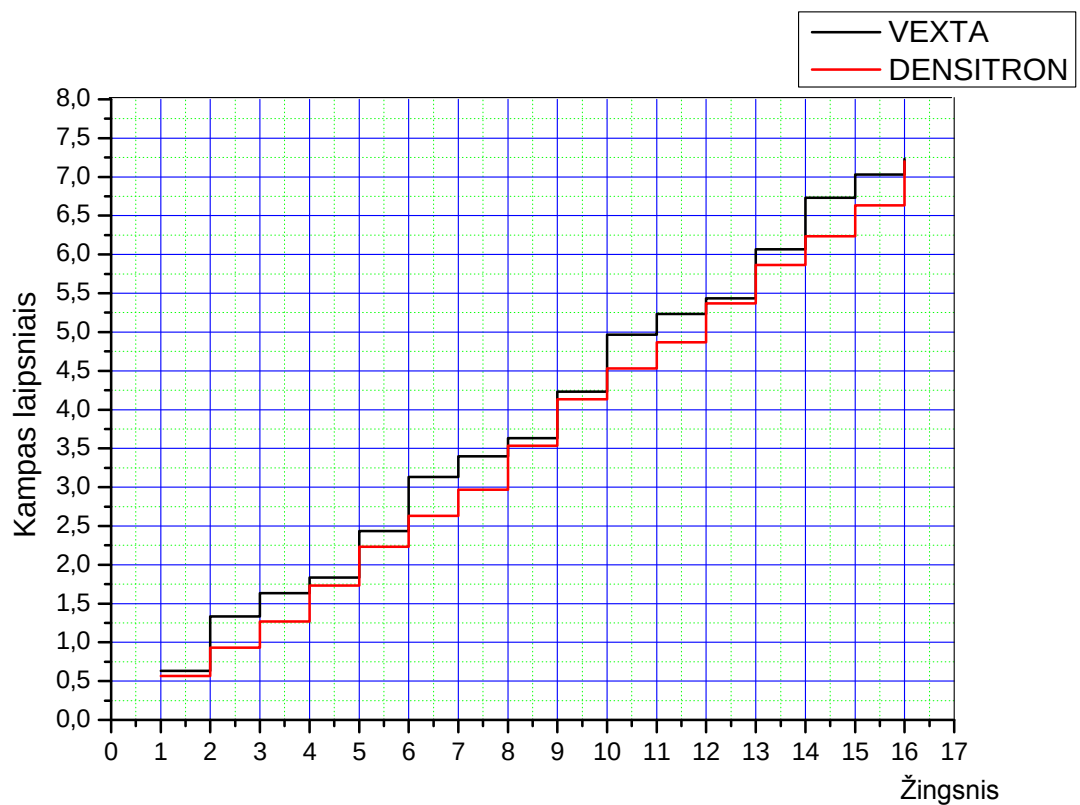
Pagal 4.4.1, 4.4.2, 4.4.3, 4.4.4, 4.4.5, 4.4.6 lentelių duomenis nubrėžti kampo kitimo grafikai, pavaizduoti 4.4.3, 4.4.4, 4.4.5, 4.4.6, 4.4.7, 4.4.8 pav.



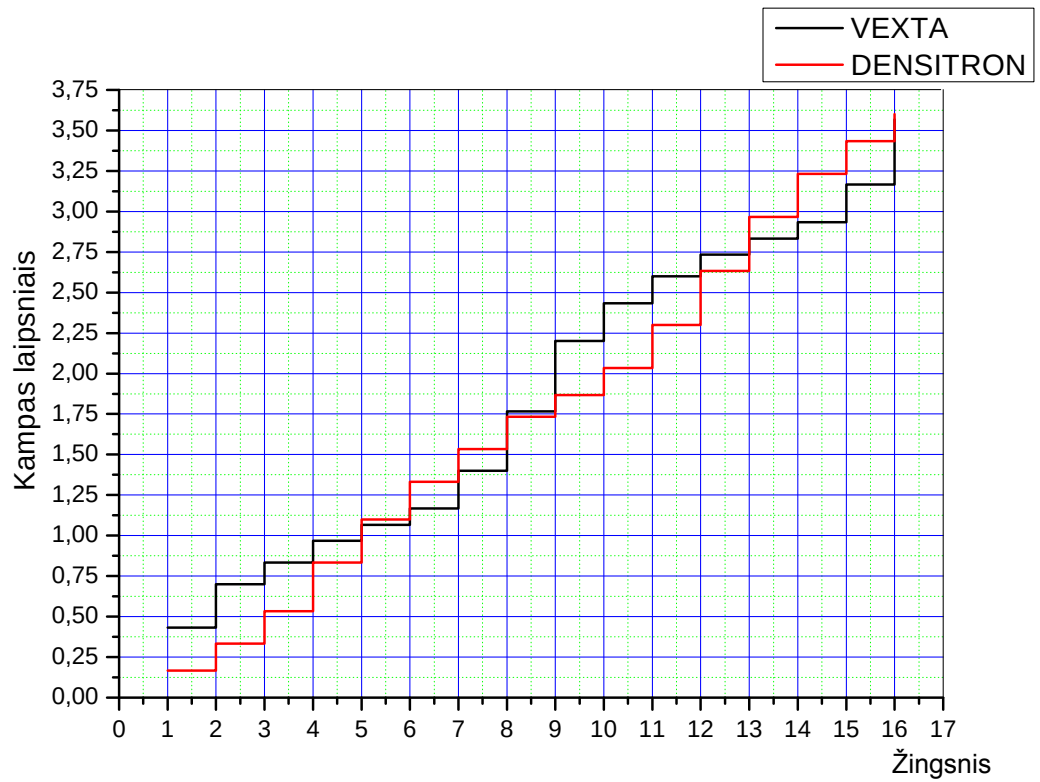
4.4.3 pav. Variklių pasisukimo kampo kitimas viso žingsnio režimu



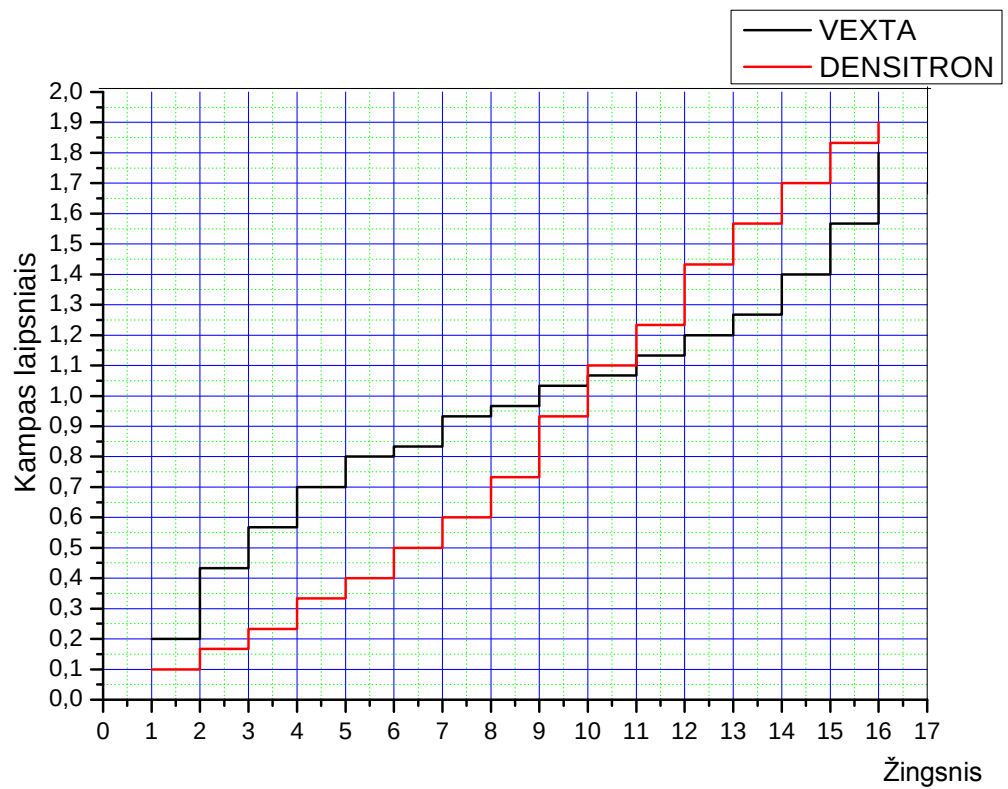
4.4.4 pav. Variklių pasisukimo kampo kitimas pusės žingsnio režimu



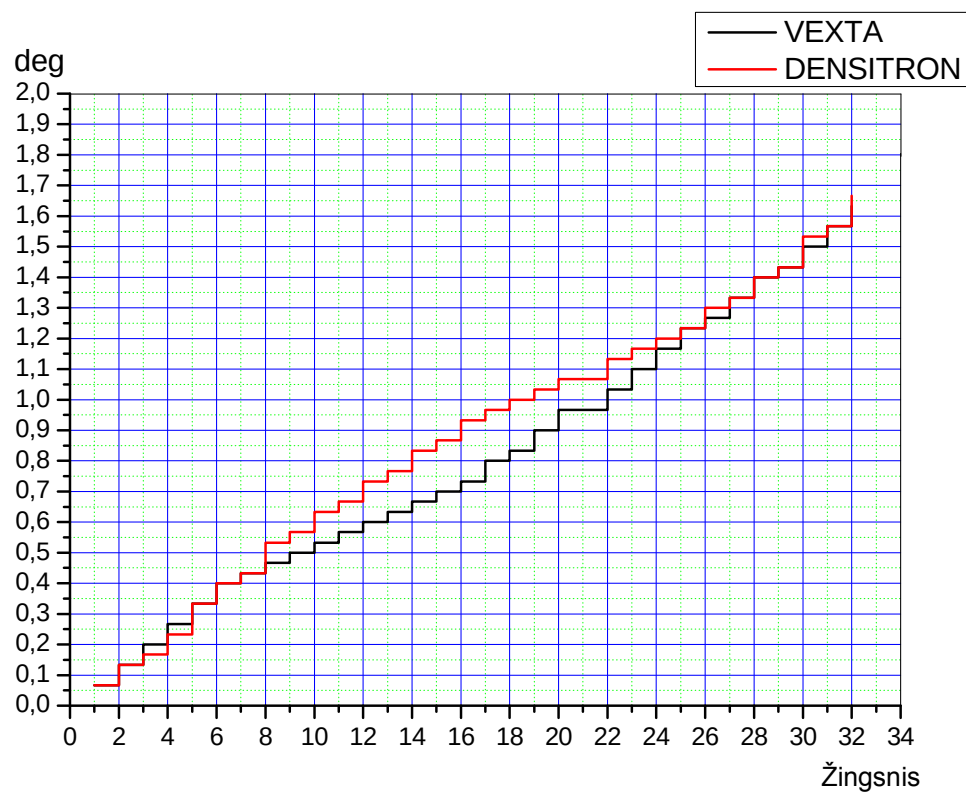
4.4.5 pav. Variklių pasisukimo kampo kitimas 1/4 žingsnio režimu



4.4.6 pav. Variklių pasisukimo kampo kitimas 1/8 žingsnio režimu



4.7 pav. Variklių pasisukimo kampo kitimas 1/16 žingsnio režimu



4.4.8 pav. Variklių pasisukimo kampo kitimas 1/32 žingsnio režimu

4.4.7 lentelė Viso apsisukimo matavimas viso žingsnio režimu

Žingsnis	DENSITRON			VEXTA		
	Kampas	Žingsnio kampas	Paklaida	Kampas	Žingsnio Kampas	Paklaida
1	1,833	1,830	0,030	1,800	1,800	0,000
2	3,533	1,867	0,067	3,600	1,800	0,000
3	5,400	1,767	-0,033	5,400	1,800	0,000
4	7,167	1,766	-0,034	7,167	1,767	-0,033
5	8,933	1,800	0,000	8,967	1,800	0,000
6	10,733	1,800	0,000	10,767	1,800	0,000
7	12,533	1,834	0,034	12,533	1,766	-0,034
8	14,367	1,766	-0,034	14,333	1,800	0,000
9	16,133	1,800	0,000	16,133	1,800	0,000
10	17,933	1,834	0,034	17,933	1,800	0,000
11	19,767	1,800	0,000	19,733	1,800	0,000
12	21,567	1,766	-0,034	21,533	1,800	0,000
13	23,333	1,800	0,000	23,333	1,800	0,000
14	25,133	1,834	0,034	25,133	1,800	0,000
15	26,967	1,800	0,000	26,933	1,800	0,000
16	28,767	1,867	0,067	28,733	1,800	0,000
17	30,597	1,830	0,030	30,533	1,800	0,000

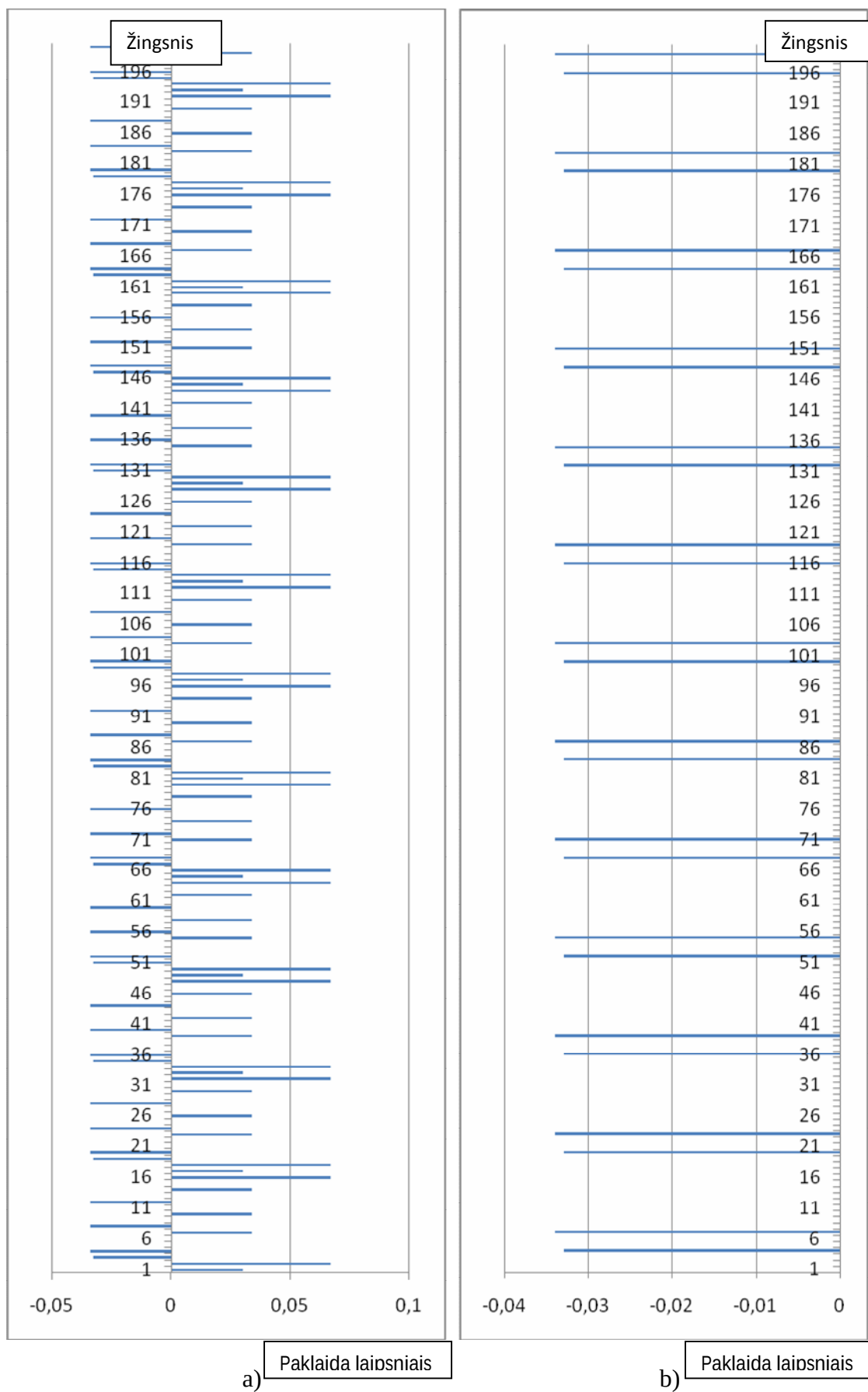
Žingsnis	DENSITRON			VEXTA		
	Kampas	Žingsnio kampas	Paklaida	Kampas	Žingsnio Kampas	Paklaida
18	32,464	1,867	0,067	32,333	1,800	0,000
19	34,231	1,767	-0,033	34,133	1,800	0,000
20	35,997	1,766	-0,034	35,900	1,767	-0,033
21	37,797	1,800	0,000	37,700	1,800	0,000
22	39,597	1,800	0,000	39,500	1,800	0,000
23	41,431	1,834	0,034	41,266	1,766	-0,034
24	43,197	1,766	-0,034	43,066	1,800	0,000
25	44,997	1,800	0,000	44,866	1,800	0,000
26	46,831	1,834	0,034	46,666	1,800	0,000
27	48,631	1,800	0,000	48,466	1,800	0,000
28	50,397	1,766	-0,034	50,266	1,800	0,000
29	52,197	1,800	0,000	52,066	1,800	0,000
30	54,031	1,834	0,034	53,866	1,800	0,000
31	55,831	1,800	0,000	55,666	1,800	0,000
32	57,698	1,867	0,067	57,466	1,800	0,000
33	59,528	1,830	0,030	59,266	1,800	0,000
34	61,395	1,867	0,067	61,066	1,800	0,000
35	63,162	1,767	-0,033	62,866	1,800	0,000
36	64,928	1,766	-0,034	64,633	1,767	-0,033
37	66,728	1,800	0,000	66,433	1,800	0,000
38	68,528	1,800	0,000	68,233	1,800	0,000
39	70,362	1,834	0,034	69,999	1,766	-0,034
40	72,128	1,766	-0,034	71,799	1,800	0,000
41	73,928	1,800	0,000	73,599	1,800	0,000
42	75,762	1,834	0,034	75,399	1,800	0,000
43	77,562	1,800	0,000	77,199	1,800	0,000
44	79,328	1,766	-0,034	78,999	1,800	0,000
45	81,128	1,800	0,000	80,799	1,800	0,000
46	82,962	1,834	0,034	82,599	1,800	0,000
47	84,762	1,800	0,000	84,399	1,800	0,000
48	86,629	1,867	0,067	86,199	1,800	0,000
49	88,459	1,830	0,030	87,999	1,800	0,000
50	90,326	1,867	0,067	89,799	1,800	0,000
51	92,093	1,767	-0,033	91,599	1,800	0,000
52	93,859	1,766	-0,034	93,366	1,767	-0,033
53	95,659	1,800	0,000	95,166	1,800	0,000
54	97,459	1,800	0,000	96,966	1,800	0,000
55	99,293	1,834	0,034	98,732	1,766	-0,034
56	101,059	1,766	-0,034	100,532	1,800	0,000
57	102,859	1,800	0,000	102,332	1,800	0,000
58	104,693	1,834	0,034	104,132	1,800	0,000
59	106,493	1,800	0,000	105,932	1,800	0,000
60	108,259	1,766	-0,034	107,732	1,800	0,000

61	110,059	1,800	0,000	109,532	1,800	0,000
62	111,893	1,834	0,034	111,332	1,800	0,000
63	113,693	1,800	0,000	113,132	1,800	0,000
64	115,560	1,867	0,067	114,932	1,800	0,000
65	117,390	1,830	0,030	116,732	1,800	0,000
66	119,257	1,867	0,067	118,532	1,800	0,000
67	121,024	1,767	-0,033	120,332	1,800	0,000
68	122,790	1,766	-0,034	122,099	1,767	-0,033
69	124,590	1,800	0,000	123,899	1,800	0,000
70	126,390	1,800	0,000	125,699	1,800	0,000
71	128,224	1,834	0,034	127,465	1,766	-0,034
72	129,990	1,766	-0,034	129,265	1,800	0,000
73	131,790	1,800	0,000	131,065	1,800	0,000
74	133,624	1,834	0,034	132,865	1,800	0,000
75	135,424	1,800	0,000	134,665	1,800	0,000
76	137,190	1,766	-0,034	136,465	1,800	0,000
77	138,990	1,800	0,000	138,265	1,800	0,000
78	140,824	1,834	0,034	140,065	1,800	0,000
79	142,624	1,800	0,000	141,865	1,800	0,000
80	144,491	1,867	0,067	143,665	1,800	0,000
81	146,321	1,830	0,030	145,465	1,800	0,000
82	148,188	1,867	0,067	147,265	1,800	0,000
83	149,955	1,767	-0,033	149,065	1,800	0,000
84	151,721	1,766	-0,034	150,832	1,767	-0,033
85	153,521	1,800	0,000	152,632	1,800	0,000
86	155,321	1,800	0,000	154,432	1,800	0,000
87	157,155	1,834	0,034	156,198	1,766	-0,034
88	158,921	1,766	-0,034	157,998	1,800	0,000
89	160,721	1,800	0,000	159,798	1,800	0,000
90	162,555	1,834	0,034	161,598	1,800	0,000
91	164,355	1,800	0,000	163,398	1,800	0,000
92	166,121	1,766	-0,034	165,198	1,800	0,000
93	167,921	1,800	0,000	166,998	1,800	0,000
94	169,755	1,834	0,034	168,798	1,800	0,000
95	171,555	1,800	0,000	170,598	1,800	0,000
96	173,422	1,867	0,067	172,398	1,800	0,000
97	175,252	1,830	0,030	174,198	1,800	0,000
98	177,119	1,867	0,067	175,998	1,800	0,000
99	178,886	1,767	-0,033	177,798	1,800	0,000
100	180,652	1,766	-0,034	179,565	1,767	-0,033
101	182,452	1,800	0,000	181,365	1,800	0,000
102	184,252	1,800	0,000	183,165	1,800	0,000
103	186,086	1,834	0,034	184,931	1,766	-0,034
104	187,852	1,766	-0,034	186,731	1,800	0,000
105	189,652	1,800	0,000	188,531	1,800	0,000
106	191,486	1,834	0,034	190,331	1,800	0,000

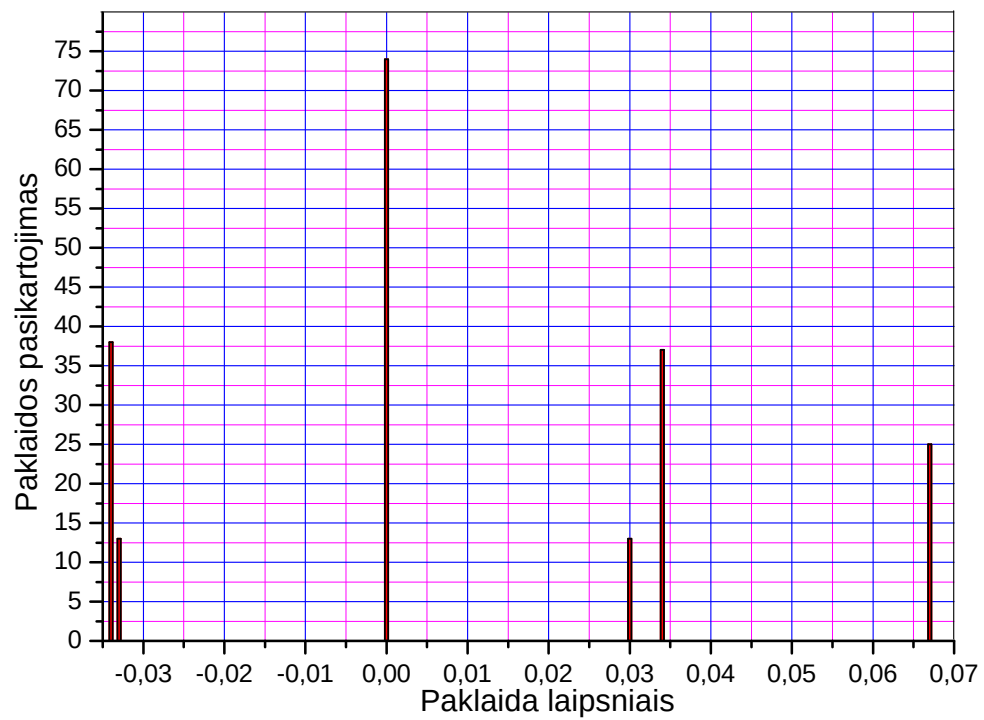
107	193,286	1,800	0,000	192,131	1,800	0,000
108	195,052	1,766	−0,034	193,931	1,800	0,000
109	196,852	1,800	0,000	195,731	1,800	0,000
110	198,686	1,834	0,034	197,531	1,800	0,000
111	200,486	1,800	0,000	199,331	1,800	0,000
112	202,353	1,867	0,067	201,131	1,800	0,000
113	204,183	1,830	0,030	202,931	1,800	0,000
114	206,050	1,867	0,067	204,731	1,800	0,000
115	207,817	1,767	−0,033	206,531	1,800	0,000
116	209,583	1,766	−0,034	208,298	1,767	−0,033
117	211,383	1,800	0,000	210,098	1,800	0,000
118	213,183	1,800	0,000	211,898	1,800	0,000
119	215,017	1,834	0,034	213,664	1,766	−0,034
120	216,783	1,766	−0,034	215,464	1,800	0,000
121	218,583	1,800	0,000	217,264	1,800	0,000
122	220,417	1,834	0,034	219,064	1,800	0,000
123	222,217	1,800	0,000	220,864	1,800	0,000
124	223,983	1,766	−0,034	222,664	1,800	0,000
125	225,783	1,800	0,000	224,464	1,800	0,000
126	227,617	1,834	0,034	226,264	1,800	0,000
127	229,417	1,800	0,000	228,064	1,800	0,000
128	231,284	1,867	0,067	229,864	1,800	0,000
129	233,114	1,830	0,030	231,664	1,800	0,000
130	234,981	1,867	0,067	233,464	1,800	0,000
131	236,748	1,767	−0,033	235,264	1,800	0,000
132	238,514	1,766	−0,034	237,031	1,767	−0,033
133	240,314	1,800	0,000	238,831	1,800	0,000
134	242,114	1,800	0,000	240,631	1,800	0,000
135	243,948	1,834	0,034	242,397	1,766	−0,034
136	245,714	1,766	−0,034	244,197	1,800	0,000
137	247,514	1,800	0,000	245,997	1,800	0,000
138	249,348	1,834	0,034	247,797	1,800	0,000
139	251,148	1,800	0,000	249,597	1,800	0,000
140	252,914	1,766	−0,034	251,397	1,800	0,000
141	254,714	1,800	0,000	253,197	1,800	0,000
142	256,548	1,834	0,034	254,997	1,800	0,000
143	258,348	1,800	0,000	256,797	1,800	0,000
144	260,215	1,867	0,067	258,597	1,800	0,000
145	262,045	1,830	0,030	260,397	1,800	0,000
146	263,912	1,867	0,067	262,197	1,800	0,000
147	265,679	1,767	−0,033	263,997	1,800	0,000
148	267,445	1,766	−0,034	265,764	1,767	−0,033
149	269,245	1,800	0,000	267,564	1,800	0,000
150	271,045	1,800	0,000	269,364	1,800	0,000
151	272,879	1,834	0,034	271,130	1,766	−0,034
152	274,645	1,766	−0,034	272,930	1,800	0,000

153	276,445	1,800	0,000	274,730	1,800	0,000
154	278,279	1,834	0,034	276,530	1,800	0,000
155	280,079	1,800	0,000	278,330	1,800	0,000
156	281,845	1,766	−0,034	280,130	1,800	0,000
157	283,645	1,800	0,000	281,930	1,800	0,000
158	285,479	1,834	0,034	283,730	1,800	0,000
159	287,279	1,800	0,000	285,530	1,800	0,000
160	289,146	1,867	0,067	287,330	1,800	0,000
161	290,976	1,830	0,030	289,130	1,800	0,000
162	292,843	1,867	0,067	290,930	1,800	0,000
163	294,610	1,767	−0,033	292,730	1,800	0,000
164	296,376	1,766	−0,034	294,497	1,767	−0,033
165	298,176	1,800	0,000	296,297	1,800	0,000
166	299,976	1,800	0,000	298,097	1,800	0,000
167	301,810	1,834	0,034	299,863	1,766	−0,034
168	303,576	1,766	−0,034	301,663	1,800	0,000
169	305,376	1,800	0,000	303,463	1,800	0,000
170	307,210	1,834	0,034	305,263	1,800	0,000
171	309,010	1,800	0,000	307,063	1,800	0,000
172	310,776	1,766	−0,034	308,863	1,800	0,000
173	312,576	1,800	0,000	310,663	1,800	0,000
174	314,410	1,834	0,034	312,463	1,800	0,000
175	316,210	1,800	0,000	314,263	1,800	0,000
176	318,077	1,867	0,067	316,063	1,800	0,000
177	319,907	1,830	0,030	317,863	1,800	0,000
178	321,774	1,867	0,067	319,663	1,800	0,000
179	323,541	1,767	−0,033	321,463	1,800	0,000
180	325,307	1,766	−0,034	323,230	1,767	−0,033
181	327,107	1,800	0,000	325,030	1,800	0,000
182	328,907	1,800	0,000	326,830	1,800	0,000
183	330,741	1,834	0,034	328,596	1,766	−0,034
184	332,507	1,766	−0,034	330,396	1,800	0,000
185	334,307	1,800	0,000	332,196	1,800	0,000
186	336,141	1,834	0,034	333,996	1,800	0,000
187	337,941	1,800	0,000	335,796	1,800	0,000
188	339,707	1,766	−0,034	337,596	1,800	0,000
189	341,507	1,800	0,000	339,396	1,800	0,000
190	343,341	1,834	0,034	341,196	1,800	0,000
191	345,141	1,800	0,000	342,996	1,800	0,000
192	347,008	1,867	0,067	344,796	1,800	0,000
193	348,838	1,830	0,030	346,596	1,800	0,000
194	350,705	1,867	0,067	348,396	1,800	0,000
195	352,472	1,767	−0,033	350,196	1,800	0,000
196	354,238	1,766	−0,034	351,963	1,767	−0,033
197	356,038	1,800	0,000	353,763	1,800	0,000
198	357,838	1,800	0,000	355,563	1,800	0,000

199	359,672	1,834	0,034	357,329	1,766	−0,034
200	361,438	1,766	−0,034	359,129	1,800	0,000

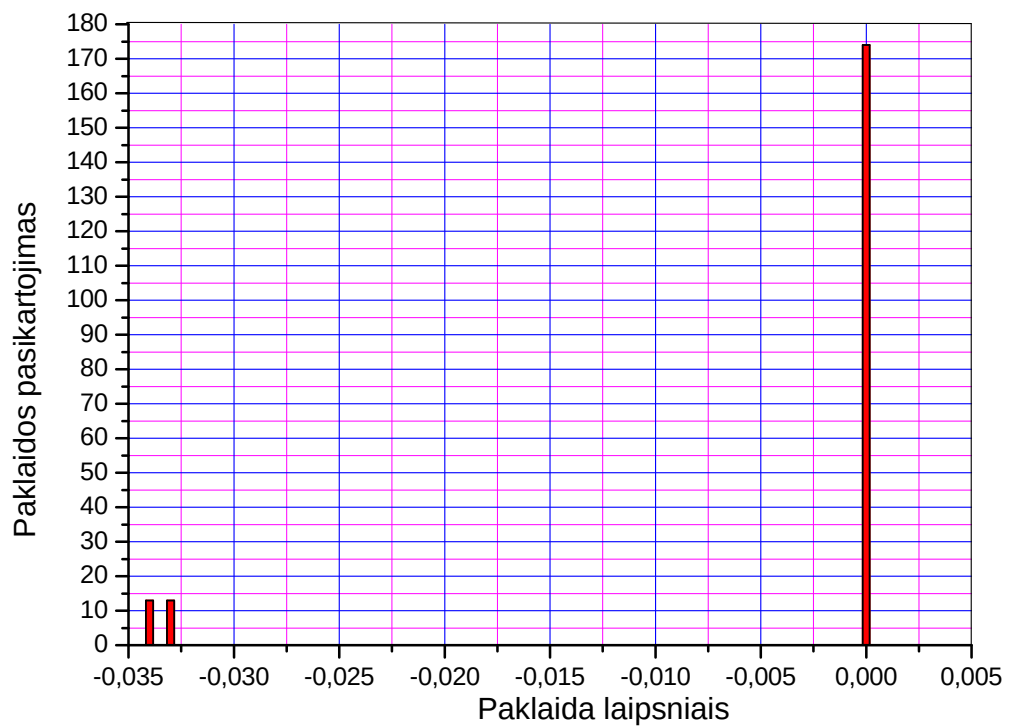


4.4.8 pav. Variklių pasisukimo kampo paklaidų diagrama: a) DENSITRON, b) VEXTA



4.

4.9 pav. Densitron variklio žingsnio kampo paklaidų pasiskirstymas



4.4.10 pav. Vexta variklio žingsnio kampo paklaidų pasiskirstymas

Atlikti bandymai su dviem anksčiau minėtais varikliais. Iš gautų bandymų rezultatų galima padaryti išvadas, kad varikliai labai panašiai elgiasi viso žingsnio ir pusės žingsnio režimų metu. Apsukus visą ratą (200 žingsnių po $1,8^\circ$) Densitron variklis pasisuko $361,438^\circ$, o Vexta variklis $359,129^\circ$. Viso žingsnio režimo metu apsukant visą apsisukimą, gautų paklaidų diagrama pateikta 4.4.8 paveiksle, o paklaidų pasiskirstymas 4.4.9 ir 4.4.10 pav. Iš variklių paklaidų pasiskirstymo diagramos galima spręsti, kad Densitron variklio pagaminimo precizika prastesnė už Vexta variklio. Densitron variklio rotorius nuokrypis gali būti ir į didesnio ir į mažesnio žingsnio pusę, o Vexta variklio žingsnio kampas gali būti tik mažesnis. Per 200 žingsnių (visą apsisukimą) Vexta variklis tiksliai pasisuko 174 kartus, o Densitron tik 76; didesniu kampu Vexta pasisuko 0 kartų, o Densitron 62 kartus; mažesniu kampu Vexta pasisuko 26 kartus, o Densitron – 62 kartus. Densitron viso žingsnio režimu kampo paklaida neviršija $0,25^\circ$ t.y. 13%, o Vexta $0,033^\circ$ t.y. 1,83%. Dalinant žingsnį į daugiau dalių, paklaida didėja. Esant mažam žingsnio dydžiui ($0,056^\circ$ – $0,45^\circ$) dėl įvairių mechaninių priežasčių sunku rotorius nustatyti į tiksliai reikiamo kampo padėtį. Todėl praktiškai nėra prasmės tokio variklio kampo dalinti į daugiau nei 32 dalis. Turint mikroprocesorinę valdymo sistemą, ir tiksliai ištyrus variklio mechanines savybes kiekvieno žingsnio padėtyje, galima įvesti pataisą. Tačiau pataisos yra programinės ir apkrauna variklio valdymo sistemą papildomais veiksmiais. Taip pat matavimo paklaida susidaro dėl kampamačio standartinės kampo matavimo nuokrypos ($3'$). Geodezinių prietaisų kalibravimo sistemoje variklis naudojamas su sliekine pavara, kurios perdavimas yra 1:6048. Todėl vieno mikrožingsnio įtaka disko sukimuisi yra nykstamai maža $0,000001^\circ$. Tai reiškia, kad net ir su didele mikrožingsnio paklaida stendo disko pasisukimo paklaida bus labai maža. Tačiau mikrožingsnio režimas smarkiai nutolina variklio rezonanso reiškinį, todėl variklis gali suktis iki dviejų kartų greičiau. Tai labai pagerina pavaros dinamines savybes.

Išvados ir pasiūlymai

Magistro darbe ištirta ir modernizuota geodezinių prietaisų derinimo stendo pozicionavimo pavara.

Atlikus bandymus su naujai suprojektuota pavara, pastebėta, kad praktiškai nėra tikslo variklio žingsnį dalinti į daugiau nei 32 dalis. Taip yra todėl, kad mikrožingsnis pasidaro mažesnis už variklio žingsnio paklaidą, ir variklis gavęs valdymo impulsą gali nepasisukti.

Tačiau mikrožingsnio režimas labai nutolina rezonanso reiškinių ir pavara gali sukis iki 2-jų kartų greičiau.

Nors atskirų žingsnių paklaidos yra nedidelės, tačiau apsisukus rotorui visą apsisukimą, atsiranda paklaida net iki $1,5^\circ$.

Pavara tirta naudojant du variklius: Vexta PK266-02B ir Densitron DSM5750H-18075. Tiriant pastebėta, kad Vexta variklis pagamintas tiksliau, pavaros paklaidos mažesnės naudojant šį variklį.

Projektuojant pavaros valdymo schemą pastebėta, kad labai didelę įtaką pavaros veikimui turi valdiklio programos ilgis – kuo programa trumpesnė, tuo didesnis pavaros stabilumas. Siekiant kuo mažesnės programos apimties valdiklis programuotas assemblerio kalba.

Pavaros paklaidas įmanoma sumažinti programiškai įvedus variklio žingsnio pataisas, tačiau tada valdymo sistemą bus galima naudoti tik su jai skirtu konkrečiu varikliu.

Vilniaus Gedimino technikos universitete Geodezijos institute vyksta tolimesnis kalibravimo stendo tobulinimas ir skaičiuojamos bendrosios paklaidos. Šiame darbe rastus žingsninės pavaros parametrus galima įtraukti į tolimesnius bendruosius paklaidų skaičiavimus.

Tolimesnė pavaros modernizacija galėtų būti vykdoma įdiegiant ryšį su kompiuteriu. Tai galėtų būti įvykdyta per RS232 arba USB sąsajas. Po šios modernizacijos, tikslinga programą papildyti, kad apvijų srovės būtų keičiamos nustatant jas paieškinės optimizacijos metodais arba iš karto sudarant koreguojančias disko ir variklio pataisos lenteles. Šiam tikslui reikalingas grįžtamasis ryšys.

Literatūra

1. Smilgevičius A. Automatikos mikromašinos. Vadovėlis techniškujų universitetų Elektros inžinerijos studentams. Vilnius: Technika, 2005. 343 p.
2. Informacija apie žingsninį variklį ШД-5Д1МУ3 [žiūrėta 2007-11-30]. Prieiga per internetą: <http://zenon2000.narod.ru/shd5.htm>
3. Informacija apie žingsninio variklio sandarą [žiūrėta 2007-11-30]. Prieiga per internetą: <http://www.ams2000.com/stepping101.html>
4. Informacija apie žingsninius variklius [žiūrėta 2007-11-30]. Prieiga per internetą: <http://www.doc.ic.ac.uk/~ih/doc/stepper/kp4m4/>
5. Žingsninio variklio būsenų skaičiavimas [žiūrėta 2007-11-30]. Prieiga per internetą: <http://www.ik.ku.lt/lessons/diplom/olga-diplom/varikliai.htm#how>
6. Žingsninio variklio veikimo principo aprašymas [žiūrėta 2007-11-30]. Prieiga per internetą: <http://www.solarbotics.net/library/pdflib/pdf/motorbas.pdf>
7. Informacija apie geodezinius įtaisus [žiūrėta 2007-11-20]. Prieiga per internetą: http://www.gc.vgtu.lt/upload/geod_zurn/3p66-70.pdf
8. Žingsninių variklių katalogas [žiūrėta 2007-11-20]. Prieiga per internetą: <http://www.st.com/stonline/products/literature/an/1679.pdf>
9. Žingsninių pavarų katalogas [žiūrėta 2007-11-20]. Prieiga per internetą: <http://www.techlib.com/electronics/stepper.html>
10. PIC mikrovaldiklių katalogas [žiūrėta 2007-11-21]. Prieiga per internetą: <http://www.piclist.com/techref/io/stepper/linistep/index.htm>
11. Pozicionavimo pavarų principai [žiūrėta 2007-11-21]. Prieiga per internetą: <http://www.glolab.com/freeinfo/positioner2w.pdf>
12. Žingsnio variklio veikimo principas [žiūrėta 2007-11-21]. Prieiga per internetą: http://www.euclidres.com/apps/stepper_motor/stepper.html
13. Žingsninio variklio veikimo principai [žiūrėta 2007-11-21]. Prieiga per internetą: <http://www.shinano.com/xampp/docs/Stepper%20Motor%20Operation%20&%20Theory.pdf>
14. Žingsninių variklių tipai [žiūrėta 2008-10-21]. Prieiga per internetą: <http://www.cs.uiowa.edu/~jones/step/types.html>
15. Pavaros projektavimo principai [žiūrėta 2008-10-21]. Prieiga per internetą: <http://www.linengineering.com/>
16. Žingsninio variklio valdymo metodai [žiūrėta 2008-10-21]. Prieiga per internetą: <http://www.doc.ic.ac.uk/~ih/doc/stepper/control2/connect.html>
17. Žingsninio variklio darbo režimai [žiūrėta 2008-10-21]. Prieiga per internetą: <http://www.atmsite.org/contrib/Rowe/dastep/dastep.html>

18. Mikrožingsnio darbo režimo principas [žiūrėta 2008-9-10]. Prieiga per internetą:
<http://www.embeddedtronics.com/microstep.html>
19. Žingsninių variklių tipai [žiūrėta 2008-9-10]. Prieiga per internetą:
<http://zone.ni.com/devzone/cda/ph/p/id/287>
20. Žingsninio variklio sandara [žiūrėta 2008-9-10]. Prieiga per internetą:
<http://zone.ni.com/devzone/cda/ph/p/id/286>
21. Žingsninio variklio veikimo principas [žiūrėta 2008-9-10]. Prieiga per internetą:
<http://zone.ni.com/devzone/cda/ph/p/id/248>
22. Žingsninio variklio parinkimo metodika [žiūrėta 2008-9-10]. Prieiga per internetą:
<http://zone.ni.com/devzone/cda/ph/p/id/223>
23. Tiesiaiegiai žingsniniai varikliai [žiūrėta 2008-9-12]. Prieiga per internetą:
<http://zone.ni.com/devzone/cda/ph/p/id/133>
24. Žingsninio variklio valdymo principai [žiūrėta 2008-9-12]. Prieiga per internetą:
<http://zone.ni.com/devzone/cda/ph/p/id/247>
25. Pavaros valdymo chemos aprašymas [žiūrėta 2008-9-15]. Prieiga per internetą:
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00822a.pdf>
26. Pavaros su mikrožingsnio režimu valdymo principai [žiūrėta 2008-9-15]. Prieiga per internetą:
<http://www.stm.com/stonline/books/pdf/docs/8700.pdf>
27. Valdymo sistemos schema [žiūrėta 2008-9-15]. Prieiga per internetą:
<http://home.att.net/~wzmicro/3960drv.html>
28. Žingsninio variklio veikimo principas [žiūrėta 2008-9-15]. Prieiga per internetą:
<http://gyan.fragmel.ac.in/~dileep/stepperworking.pdf>
29. Dinaminių charakteristikų skaičiavimas [žiūrėta 2008-9-19]. Prieiga per internetą:
http://www.ik.ku.lt/lessons/konspekt/mechatronika_html/handbook/k3/k3-10.pdf
30. Programavimo assembleriu pagrindai [žiūrėta 2009-01-10]. Prieiga per internetą:
http://www.technologijos.lt/archyvas/elektronika/skaitmenine_elektronika/PIC_haker_prakt/zings_var_pic/view
31. Žingsninių variklių valdymo schemos [žiūrėta 2009-01-12]. Prieiga per internetą:
<http://home.cogeco.ca/~rpaisley4/Stepper.html>
32. Mikrožingsnio režimo būdai [žiūrėta 2009-01-12]. Prieiga per internetą:
<http://www.st.com/stonline/books/pdf/docs/8700.pdf>
33. Mikrožingsnio režimo principas [žiūrėta 2009-01-12]. Prieiga per internetą:
<http://pheatt.emporium.edu/projects/stepper/microstepping.pdf>
34. Informacija apie geodezinius prietaisus [žiūrėta 2009-02-01]. Prieiga per internetą:
http://www.gc.vgtu.lt/upload/geod_zurn/3p66-70.pdf

35. Informacija apie kampų matavimus [žiūrėta 2009-04-10]. Prieiga per internetą:
<http://zurnalas.mechanika.ktu.lt/files/Giniotis573.pdf>
36. Bručas D. Development and research of the test bench for the angle calibration of geodetic instruments. Doctoral dissertation, technological science, measurement engineering (10T). Vilnius: Technika, 2008.
37. Radzevičius L. Elektros inžinerijos magistrantūros studijų tiriamieji ir baigiamieji darbai. Metodikos nurodymai. Vilnius: Technika, 2009.
38. Gelgota V. Žingsninio variklio tyrimas. Baigiamasis magistro darbas Vilnius, 2004. 77 p.