



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

AUTOMATIKOS KATEDRA

Audrius Vilkelis

**PENKIAFAZĖS MIKROŽINGSNINĖS POZICIONAVIMO PAVAROS
TYRIMAS**

FIVE PHASE MICROSTEPPER POSITIONING DRIVE RESEARCH

Baigiamasis magistro darbas

Automatikos studijų programa, valstybinis kodas 621H62001

Mechatroninių sistemų automatikos specializacija

Elektronikos ir elektros inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2016

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Elektronikos fakultetas
Automatikos katedra

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

Antrosios pakopos studijų **Automatikos** programos magistro baigiamasis darbas 4

Pavadinimas **Penkifazės mikrožingsninės pozicionavimo pavaros tyrimas**
Autorius **Audrius Vilkelis**
Vadovas **Dainius Udris**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe tiriamas autokoreliatoriaus penkifazės žingsninės pavaros tikslumas.

Darbe yra apžvelgti žingsninių variklių tipai, jų savybės ir valdymo būdai. Aprašytas matematinis modelis. Sudaryti dvifazio ir penkifazio žingsninio variklio imitaciniai modeliai, naudojant „SIMULINK“ programinį paketą. Sudarytas tiriamosios sistemos maketas, kuriuo buvo tiriamas penkifazis žingsninis variklis. Buvo sukurta kompiuterinė programa ir algoritmas valdyti variklį. Atliktas penkifazio žingsninio variklio mikrožingsnio tikslumo eksperimentinis tyrimas. Sulyginti gauti rezultatai ir parašytos išvados bei rekomendacijos.

Darbą sudaro: įvadas, literatūros apie žingsninius variklius analizė, tyrimo tikslas ir uždaviniai, teorinė dalis, tyrimo rezultatų apibendrinimas ir išvados.

Darbo apimtis – 64 p. teksto be priedų, 55 iliustracijos, 3 lentelės, 22 literatūros šaltiniai.

Prasminiai žodžiai: žingsninis variklis, penkifazis žingsninis variklis, dvifazis žingsninis variklis, pozicionavimas, autokoreliatorius, prijungimas žvaigžde, prijungimas penkiakampiu.

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

TURINYS

IVADAS	5
1. LITERATŪROS ŠALTINIŲ APŽVALGA IR ANALIZĖ	7
1.1. Žingsninių variklių tipai ir savybės	10
1.2. Žingsninių variklių valdymo būdai	13
2. TYRIMO TIKSLAS IR UŽDAVINIAI	18
3. TEORINĖ DALIS	19
3.1. Žingsninio variklio matematinis modelis	29
3.2 Penkiafazio žingsninio variklio imitacinio modelio sudarymas	35
4. TIRIAMOJI DALIS	41
4.1 Tiriamosios sistemos maketo sudarymas	41
4.2 Valdiklio veikimo algoritmo ir programos sudarymas	46
4.3 Mikrožingsninės pavaros eksperimentinis tyrimas	48
TYRIMO REZULTATŲ APIBENDRINIMAS	57
Išvados	57
Rekomendacijos ir pasiūlymai	58
LITERATŪRA	59
PRIEDAI	61

IVADAS

Informacijos apie žingsninius variklius yra nemažai. Tačiau, kai reikalinga platesnė informacija apie penkiafazius žingsninius variklius, informacijos kiekis labai susiaurėja, nes šie varikliai yra vieni naujausių. Žingsninių variklių vystymąsi lemia poreikis. Sparčiai besivystant šiuolaikinei technikai, kartu vystosi ir įrenginių miniatiūrizacija. Kai kuriems įrenginiams yra būtinos elektros pavaros, kurios pasižymi greita eiga ir dideliu tikslumu. Didėjant pavarų reikalavimams, tikslumui ir greičiui, būtina išlaikyti to paties technologinio proceso ryšį, tarp judančių agregatų. Taip pat optimizuoti jų veikimą įvairiais parametrais. Šie visi reikalavimai labai pasunkino elektrinės pavaros valdymą, todėl vienas geriausių šios problemos sprendimų yra žingsninė pvara. Žingsninė pvara naudojama didelio tikslumo įrenginiuose, pavyzdžiui: CNC staklėse, 3D spausdintuvuose, lazerų įrangose ir t. t., išskirtinai dėl jos paprasto valdymo, didelio tikslumo ir patikimos konstrukcijos.

Lazerius gaminančios ir eksploatuojančios įmonės naudoja autokoreliatorius. Šie preciziniai prietaisai yra naudojami lazerio impulso pluošto trukmei matuoti. Taip pat, perkloti skirtingų šviesos harmonikų impulsus laike vieną ant kito, tam norint sustiprinti šviesos impulso galią. Kai autokoreliatoriuje impulsai į kristalą patenka vienu metu, nekolineariai sugeneruojama didžiausio intensyvumo antrosios harmonikos spinduliuotė. Kai impulsai persikloja tik iš dalies – sugeneruotos antrosios harmonikos intensyvumas yra mažesnis. Jeigu impulsai laike nepersikloja – nekolineari antroji harmonika negeneruojama.

Temos naujumas ir aktualumas. Autokoreliatoriuje, penkiafazio žingsninio variklio valdymui naudojama sena, jau nebegaminama elektronika, žingsninis variklis prijungtas senuoju žvaigždės jungimu. Todėl žmonės, naudojantys autokoreliatorių, kad preciziškai išmatuotų lazerio šviesos pluošto impulso trukmę laikinėje skalėje, susiduria su problema – per mažas pavaros tikslumas.

Tyrimo objektas – penkiafazio žingsninis variklis naudojamas autokoreliatoriuje.

Darbo tikslas – išmatuoti esamą mikrožingsninės pavaros tikslumą žvaigždės jungimu ir penkiakampio jungimu.

Siekiant sėkmingai įgyvendinti tiriamojo darbo tikslą, buvo iškelti tokie darbo uždaviniai:

1. Apžvelgti žingsninių variklių tipus ir savybes;
2. Apžvelgti valdymo būdus;
3. Sudaryti matematinį modelį;
4. Sudaryti imitacinį modelį;
5. Pasigaminti matavimo stendo maketą;

6. Sudaryti valdymo programos algoritmą ir parašyti programą;
7. Atlikti eksperimentinį tyrimą.

Darbo metodai: mokslinės literatūros apžvalga, kompiuterinis modeliavimas „Simulink“ programinėje įrangoje, eksperimentinis tyrimas naudojant matavimų stendą.

1. LITERATŪROS ŠALTINIŲ APŽVALGA IR ANALIZĖ

Lietuvių autorių išleistų straipsnių ar knygų apie žingsnines pavaras yra labai mažai. Turbūt labiausiai Lietuvoje žinoma knyga „Automatikos mikromašinos“ [1], kurią parašė Algirdas Smilgevičius, kurioje autorius pateikia bendrinę informaciją apie žingsnines pavaras išskirdamas joms vieną skyrių. Knygoje žingsninis variklis apibūdinamas kaip ryškiapolė sinchroninė mikromašina, kurios tolydus ar diskretus sukamasis judesys gaunamas maitinant statoriaus apvijas nuolatinės įtampos impulsais. Poskyriuose aprašomi viso, pusės bei mikrožingsnio valdymo režimai. Viso žingsnio režimu variklis sukasi, kai viena apvija yra maitinama nuolatinės įtampos srove. Pusės žingsnio valdymo režimu, statoriaus apvijos jungiamos taip, kad srovių suminis laukas pasisuktų pusės žingsnio kampą, o mikrožingsnio režimas padaromas kai srovės stiprį pakeičia tam tikrose apvijose nuosekliai. Taip pat knygoje pateikti posūkio kampo skaičiavimo pavyzdžiai.

Daugiau informacijos galima rasti užsienio leidiniuose, straipsniuose, knygose ar internetiniuose tinklapiuose, kur taip pat apžvelgiami bei aprašomi žingsninių variklių pagrindai. Douglaso W. Jonesas straipsnyje „Žingsninių variklių pagrindai“ [2], aprašyta žingsninių variklių tipai, bei jų valdymo būdai. Straipsnyje sudarytos ir aprašytos visų tipų žingsninių variklių principinės elektrinės schemos. Ant kiekvienos variklio apvijos prijungiami apsauginiai diodai, kurie apsaugo puslaidininkinį valdymo tranzistorių, kadangi visose induktyviosiose apkrovose perjungus apviją srovė jose stiprėjai eksponentiškai, o atjungimo metu susikuria atgalinė srovė, kuri gali jį sugadinti, todėl diodas apsaugo tranzistorių perleisdamas srovę per save. Tokias apsaugas naudoja visų tipų varikliuose, kuriuos valdo puslaidininkiniai tranzistoriai. Straipsnyje aprašomas ir mikrožingsnio režimas. Kitame Douglaso W. Joneso straipsnyje „Žingsninių variklių tipai“ [2]. Straipsnyje aprašomi variklių tipai šiek tiek plačiau. Įvade apibūdinamas žingsninis variklis kaip nuolatinės srovės variklis be komutatoriaus, kai visos variklio apvijos valdomos atskirai suprojektuotos valdymo sistemos tam, kad bet kada žingsninis variklis galėtų sukis į bet kokią pasirinktą poziciją. Autorius aprašo žingsninius variklius su nuolatiniais magnetais ir hibridinius. Kintamo magnetinio srauto varikliai dažniausiai turi tris apvijas su bendru grįžtamuoju ryšiu. Žingsniniai varikliai su šepetėliais (arba be jų) ir nuolatiniais magnetais turi dažniausiai dvi apvijas. Straipsnio pirmajame skyriuje trumpai aprašomi variklių tipai. Apžvelgtas trifazis žingsninis variklis, kuris prijungtas žvaigžde, variklio apvijos prijungtos tam tikra tvarka atsižvelgiant į kurią pusę norima sukti variklį. Šio tipo variklis per žingsnį pasisuka 30 laipsnių kampą, o kampas priklauso nuo dantų skaičiaus ir jų pločio. Toliau apžvelgiamas vienkryptis variklis, kurio rotoruje yra magnetas su šešiais poliais, o iš statoriaus kiekvienos apvijos centro yra išvedami valdymo galai. Šio tipo variklis taip pat pasisuka 30 laipsnių kampą, tačiau jam vienu

metu galima siųsti kelis impulsus iš eilės. Dvikrypčio žingsninio variklio su nuolatiniu magnetu komutavimas vyksta tokiu pačiu principu tačiau turi vieną esminį skirtumą, šio tipo variklio valdymas paremtas tuo, kad valdymo apvijų išėina ne iš apvijų centro, o iš apvijų galų, todėl tokį variklį paprasčiau valdyti. Variklio valdymo schema turi turėti galimybę keisti įtampos poliarumus apvijoje. Todėl šio tipo varikliai yra paprastesni, tačiau jų valdymo schemos yra sudėtingesnės.

Zsolt Albert Barabas ir Alexandru Morar straipsnyje „Didelio tikslumo mikrožingsnio valdymo sistema penkifaziam varikliui“ [3]. Straipsnyje aprašomas penkifazių žingsninių variklių taikymo sritys, CNC mašinos puslaidininkų elementų gamyboje, kopijavimo, skenavimo aparatuose, optiniuose prietaisuose, kur reikalingas didelis tikslumas. Paašškinta, kuo skiriasi penkifazis variklis nuo dvifazio. Dvifazis variklis su dalintu rotoriumi geriausiu atveju gali turėti 400 dantų ant rotoriaus, o penkifazis su dalintu rotoriumi gali turėti 1000 dantų, tai reiškia, kad be žingsnio dalinimo penkifazis variklis yra 2,5 karto tikslesnis nei dvifazis. Taip pat aprašomas mikrožingsninio valdymo parinkimas penkifaziam žingsniniam varikliui. Siūloma sistema gebanti žingsnį dalinti iš 2, 4, 5, 8, 10, 20, 40 su mažom vibracijom ir mažu triukšmu. Straipsnyje taip pat aprašoma penkifazio žingsninio variklio struktūra. Penkifazis žingsninis variklis gali žingsniuoti 0,72 arba 0,36 laipsnio kampu be žingsnio dalinimo, o dvifazis variklis 0,9 arba 1,8 laipsnio be žingsnio dalinimo. Straipsnyje apžvelgiama mikrožingsniavimo sistema, bei pateikiama jos blokinė schema.

Žurnalo „Machine design“ straipsnyje „Where five phases excel“ [4], aprašomi dvifazio ir penkifazio žingsninio variklio skirtumai. Iš esmės yra du pagrindiniai skirtumai. Tai mechaninis, pirmiausiai statoriaus konstrukcija, nors abiejų variklių rotorai dažniausiai dalinami į dvi dalis, kurias sudaro po 50 dantų, tačiau esminis skirtumas tas, kad dvifazis žingsninis variklis turi tik 8 magnetinius polius, o penkifazis variklis 10 polių. Antras esminis šių dviejų variklių tipų skirtumas yra fazių skaičius. Šiame kontekste skirtingas fazių skaičius reiškia skirtingą polių skaičių. Dvifazis žingsninis variklis turi tik dvi fazes pažymėtas A ir B. Kiekviena fazė junginėja 2 polių poras. Penkifaziame variklyje yra dar C, D ir E fazės, tačiau kitaip nei dvifaziame variklyje, čia fazės junginėja tik po vieną polių porą per fazės komutavimą. Straipsnyje toliau aprašoma skyra bei vibracija. Kaip minėta anksčiau abu variklių rotorai turi po 50 dantų, bet penkifazis žingsninis variklis turi 10 polių, du vienai fazei, todėl jie reikia rotorų pasukti per 0,1 rotoriaus dantį, kad galėtų aktyvuotis kita fazė, o dvifaziame variklyje fazei tenka keturi poliai fazei, todėl jam reikia pasisukti 0,25 danties aktyvuoti kitą fazę.

Dėl tokios konstrukcijos dvifazis žingsninis variklis su nedalintu rotoriumi turi 200 žingsnių ir 1,8 laipsnio posūkio kampą per vieną žingsnį, jie su dalintu rotoriumi 400 žingsnių ir 0,9 laipsnio per posūkio kampo vieną žingsnį. Penkifazis žingsninis variklis su nedalintu rotoriumi turi 500 žingsnių raišką ir 0,72 laipsnio posūkio kampą per žingsnį, o su dalintu rotoriumi

1000 žingsnių ir 0,32 laipsnio kampą per vieną žingsnį. Toliau nagrinėjama trumpai sukimo momentai, sinchronizacijos, bei kampo priklausomybė nuo sukimo momento.

Anitha Karthi straipsnyje „Penkiafazio žingsninio variklio valdymas naudojant skaitmeninį valdiklį“ [5]. Šiame straipsnyje tyrinėjama penkiafazio žingsninio variklio valdymo technologija naudojant skaitmeninį signalų valdiklį (dsPIC30F4011). Valdymo impulsai valdomi valdiklio per procesorių, valdo kiekvieną variklio fazę ir yra paduodami iš valdiklio, kuris yra suprogramuotas išgauti iki 1000 mikrožingsnių. Fiksuota srovės kontrolė yra naudojama, kai visas sinusų valdymo impulsai pasiektų norimą amplitudę. Išvystyta valdiklio technologija gali būti naudojama judesio valdymui tarp 1 ir 60 rpm su padidinta mikrožingsnių raišką, nuo viso žingsnio iki 1000 mikrožingsnių sukimuisi tiek pagal, tiek prieš laikrodžio rodyklę. Toks variklio valdymas pasiekiamas naudojant fiksuotos apvijos srovės ir variklio eigos daviklius. Toliau straipsnyje nagrinėjamas programos algoritmas, principinė valdiklio ir visos sistemos schematika bei aprašomas standas. Apibendrinami gauti rezultatai.

1.1. Žingsninių variklių tipai ir savybės

Žingsninis variklis

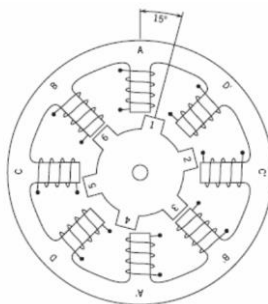
Žingsninis variklis yra sinchroninė ryškiapolė mikromašina, kuri visą savo sukimosi perimetrą padalina į (priklausomai nuo variklio) žingsnių skaičių. Tokiam varikliui, nereikalaujant jokio atgalinio ryšio galima užduoti bet kokią žingsnių skaičių bei nustatyti poziciją.

Trys pagrindiniai tipai:

- Reaktyvieji žingsniniai varikliai.
- Žingsniniai varikliai su nuolatiniais magnetais.
- Hibridiniai.

Reaktyvieji žingsniniai varikliai

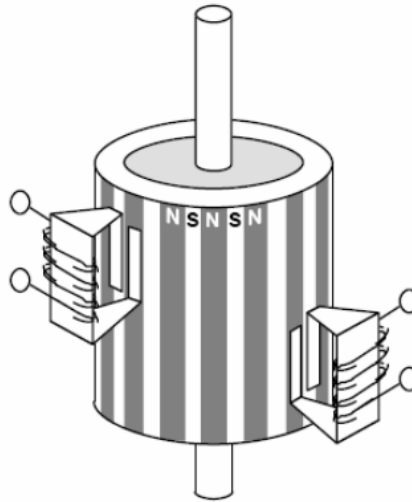
Tai vieni seniausiai naudojamų variklių tipų, kadangi pagal jį lengviausia suprasti, kaip veikia žingsninis variklis. Tokio tipo varikliai susideda iš dantyto rotoriaus, kurio dantų magnetinis laidas yra didelis, o tarp dantų yra mažas. Statoriaus su apvijomis, kurių skaičius negali būti mažesnis negu trys. Rotorius pasisuka į mažiausios magnetinės varžos padėtį, kai į apvijas tiekama nuolatinė srovė ir poliai įsimagnetina [2; 6; 7].



1.1 pav. Reaktyviojo žingsninio variklio skerspjūvis [6]

Žingsniniai varikliai su nuolatiniais magnetais

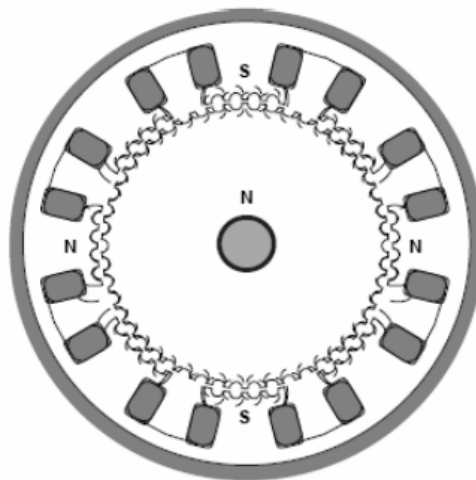
Šie varikliai yra pigesni, o charakteristikos lyginant su reaktyviaisiais varikliais yra šiek tiek geresnės. Žingsnio kampai yra nuo 7,5 iki 15 laipsnių, tai yra tarp 48–24 žingsnių per apsisukimą. Šio tipo variklių rotorius nėra dantytas, lyginant su reaktyviaisiais varikliais, kadangi vietoje to rotorius yra įmagnetintas alternatyviais šiauriniais ir pietiniais poliais, kurie yra aplink visą rotorį. Tokie įmagnetinti rotoriaus poliai suteikia padidintą magnetinio srauto intensyvumą, todėl varikliai su nuolatiniais magnetais yra geresni, nes turi pagerintą sukimo momentą lyginant su reaktyviaisiais varikliais [2; 6; 7; 8].



1.2 pav. Variklio su nuolatiniais magnetais sandara [6]

Hibridiniai žingsniniai varikliai

Hibridinis variklis yra brangesnis už variklius su nuolatiniais magnetais, bet jo žingsniavimo ir sukimo momento, bei greičio charakteristikos yra geresnės. Šių variklių žingsnis dažniausiai yra nuo 0,9 iki 3,6 laipsnių, tai yra 100–400 žingsnių per apsisukimą. Hibridinis variklis turi visus nuolatinių magnetų ir reaktyviųjų variklių privalumus. Rotorius su statoriumi kaip ir reaktyviajame variklyje yra daugiadantis, be to rotorius sudarytas iš ašine kryptimi įmagnetinto nuolatinio magneto bei dviejų dalių iš minkštamagnetinės medžiagos. Ant rotoriaus esantys dantukai suteikia geresnį magnetinio srauto kelią per oro tarpą, o tai užtikrina geresnį pastovų ir dinaminį sukimo momentą lyginant su reaktyviaisiais varikliais ar varikliais su nuolatiniais magnetais [2; 6; 7; 8].



1.3 pav. Hibridinio žingsninio variklio skerspjūvis [6]

Taip pat sukančiam variklį išskiriama mažiau šilumos ir vartojama mažiau energijos.

Privalumai ir trūkumai

Trūkumai:

- Jei per didelis valdymo impulsų dažnis, variklis praranda sinchronizavimą.
- Mechaniniai svyravimai, momentinis nestabilumas.
- Prie didelio greičio atsirandantis rezonansas.

Privalumai:

- Jeigu apvijoms tiekama energija, žingsninis variklis visą sukimo momentą turi ramybės būsenoje.
- Kadangi variklis neturi šepetėlių, variklio eksploatacijos trukmė priklauso nuo jo konstrukcijos patvarumo.
- Žingsnio paklaida tarp 3–5 %. Tikslumo paklaida nedidėja kintant žingsniams.
- Geras valdymas.
- Variklio rotoriaus posūkio kampas proporcingas įėjimo impulsui.
- Valdymo sistemą pigesne ir paprastesne padaro variklio reagavimas į skaitmeninius įėjimo impulsus atviroje valdymo sistemoje.
- Platus sukimosi greičio diapazonas priklausomas nuo impulso dažnio.

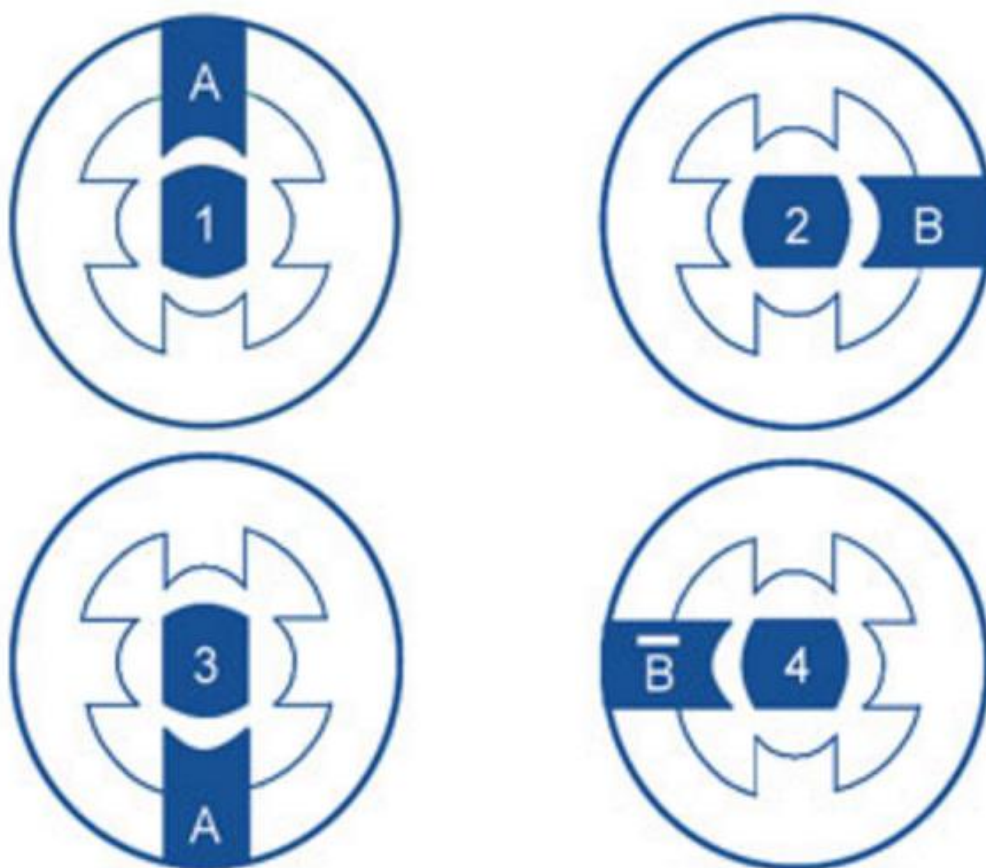
Mažo greičio pasiekiamumas su prijungta apkrova [2],

1.2. Žingsninių variklių valdymo būdai

Yra pagrindiniai keturi žingsninių variklių valdymo būdai:

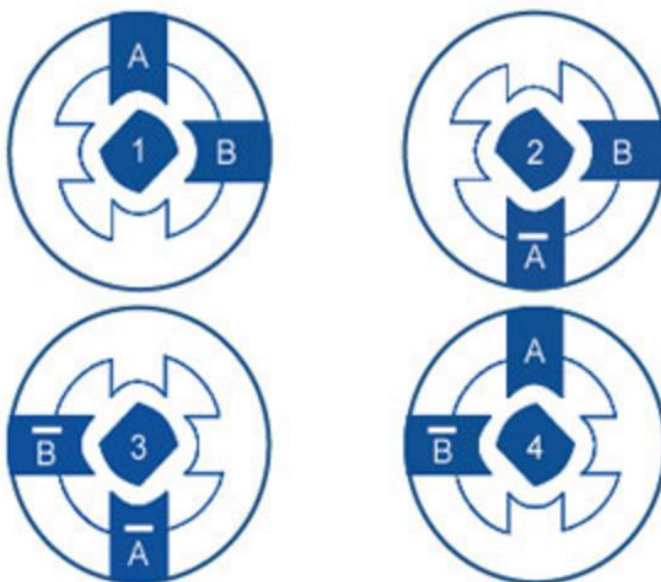
1. Vienos fazės (angl. *Wave drive*)
2. Pilno žingsnio (angl. *Full step*)
3. Pusės žingsnio (angl. *Half step*)
4. Mikrožingsnio (angl. *Microstepping*)

Pirmasis valdymo būdas yra vienos fazės. Vienos fazės valdymo metodu vienu metu būna aktyvinta tik viena apvija, todėl šiuo metodu sukamas variklis turi tokį patį žingsnių skaičių kaip ir pilno žingsnio valdymas, tačiau šis valdymo būdas turi mažą sukimo momentą. Žemiau pateiktoje iliustracijoje supaprastintai paašškintas šio tipo valdymas. Kiekvienas 90° kampo pasisukimas atspindi realaus žingsninio variklio 1.8° rotoriaus kampo pasisukimą. Kai išjungiamas A fazė ir įjungiamas B fazė, rotorius pasisuka 90° (1.8°) kampu. Kiekvienu tokiu pasisukimu veikia tik viena fazė. Šis valdymo metodas retai naudojamas dėl savo mažo sukimo momento [7; 8; 17].

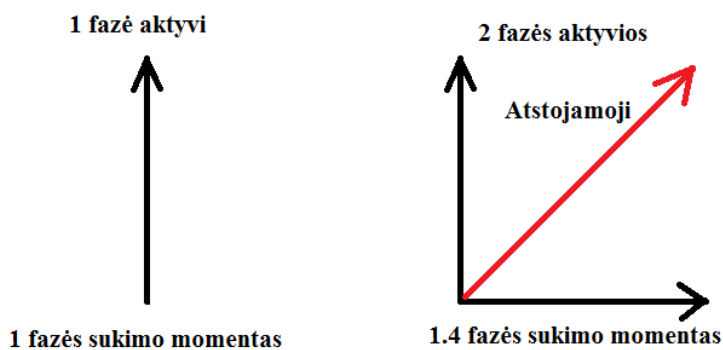


1.4 pav. Žingsninio variklio rotoriaus padėtis [17]

Antruoju, viso žingsnio valdymo metodu nuolatos būna aktyvios dvi fazės. Šis valdymo būdas yra iliustruojamas pavaizduotas, kiekvienas 90° kampas atitinka 1.8° rotoriaus posūkio kampą. Jei abu fazės A ir B yra įjungtos kaip teigiami poliai, tai neigiamas rotoriaus polius pasisuks tiesiai per vidurį A ir B polių. Taip iš eilės perjunginėjant fazes rotorius atsistoja tarp fazių į vidurį [8; 17].



1.5 pav. Žingsninio variklio rotoriaus padėtis [17]

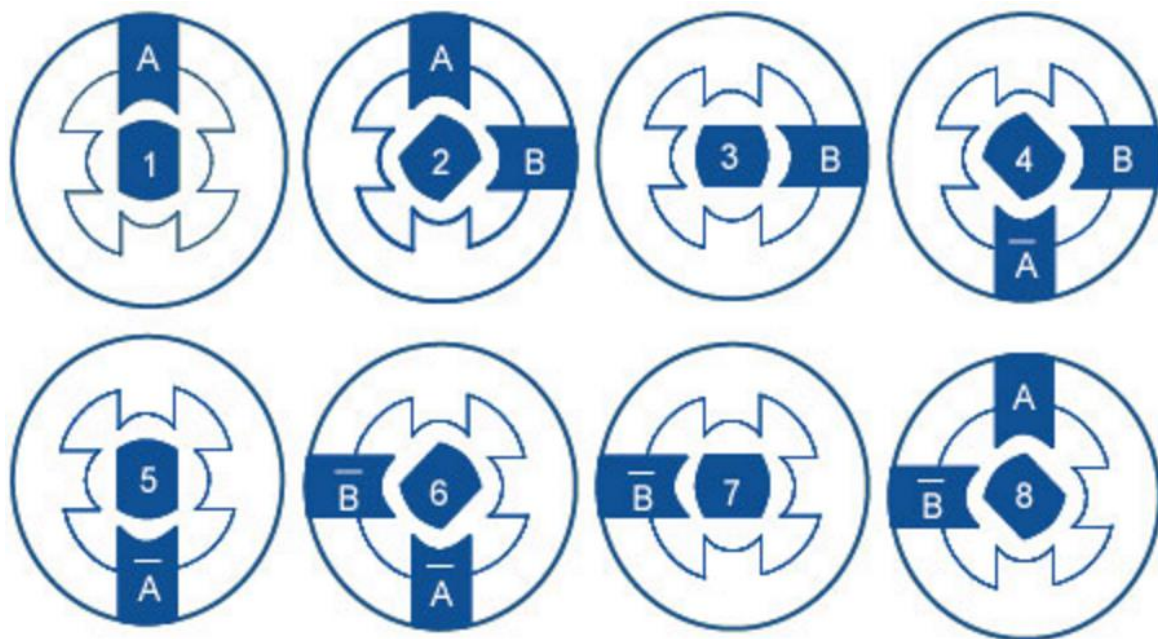


1.6 pav. Posūkio kampo atstojamoji

Pilno žingsnio metodo pranašumas prieš vienos fazės metodą yra sukimo momentas. Vienos fazės valdyme sukimo momentas yra sukuriamas iš vienos fazės, o viso žingsnio, arba dviejų fazių valdyme sukimo momentas sukuriamas naudojant dvi aktyvias fazes. Kai viena fazė aktyvi 12 valandos padėtyje, kita aktyvi 3 valandos padėtyje, tai sudėjus abiejų fazių sukimo momentų vektorius gauname 45° ir sukimo momentą net 41,4 % didesnį. Naudojant pilno

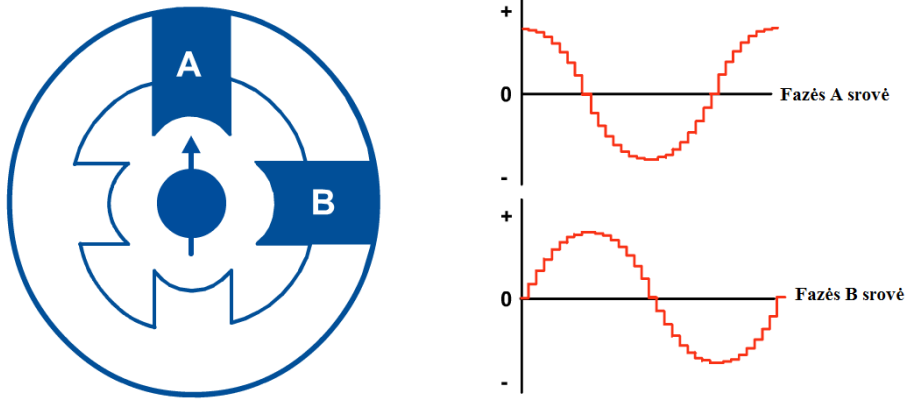
žingsnio valdymo metodą gauname tą patį žingsnių skaičių kaip ir vienos fazės valdymo metode, tačiau turime 41 % didesnę sukimo momentą.

Trečiuoju pusės žingsnio valdymo metodas yra hibridinis pirmojo ir antrojo valdymo. Vienu metu aktyvinama fazė A, rotorius pasisuka ties ja. A fazė neišjungiama ir aktyvinama fazė B, tuomet rotorius pasisuka per vidurį fazių 45° ($0,9^\circ$) kampą. Toliau neišjungiant B fazės atjungiama fazė A ir rotorius pasisuka dar 45° kampą ties fazės B poliumi. Tokiu būdu junginėjamos fazės ir rotorius sukasi pusės žingsnio kampą [8; 17].



1.7 pav. Žingsninio variklio rotoriaus padėtis [17]

Ketvirtasis mikrožingsnio metodas yra sudėtingiausias. Šis valdymo metodas mažus žingsnius paverčia dar mažesniais, dėl to padidėja skyra ir pagerėja vibracinės charakteristikos. Mikrožingsnio valdymo metu fazės nebūna nei visiškai įjungtos, nei visiškai išjungtos. Fazės A ir B sinusinės srovės paslinktos viena kitos atžvilgiu per 90° (išskyrus penkiazaziuose varikliuose). Kai maksimali srovė būna fazėje A, tuo metu fazėje B būna minimali srovė. Palaipsniui fazės A srovė mažėja, o fazės B srovė didėja. Rotorius taip pat palaipsniui keičia savo padėtį ties didžiausios srovės vieta. Tokiu būdu palaipsniui kaitaliojant sroves rotorius sukasi mažais žingsneliais [17; 8].



1.8 pav. Srovės fazių sinusoidės [17]

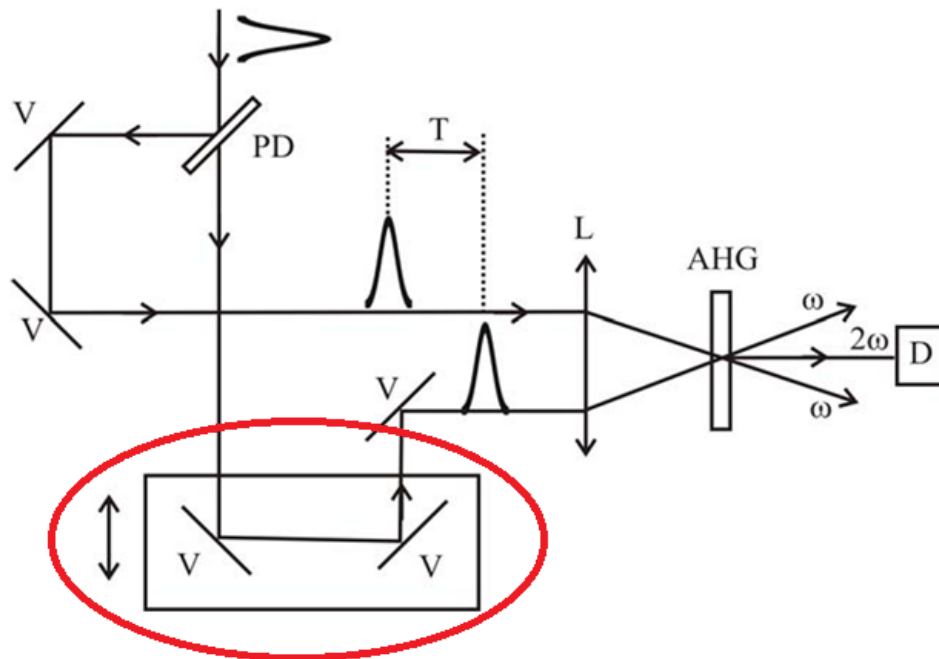
Yra keletas problemų susijusių su mikrožingsniavimu. Tai problemos su tikslumu ir sukimo momentu. Kadangi srovės fazėse nėra maksimaliai įjungtos, sukimo momentas sumažėja maždaug 30 %. Sukimo momentas tarp srovių pasikeitimo yra toks mažas, todėl rotorius ne visada gali atsistoti į reikiamą poziciją, nes būna nepajėgus įveikti mechanines apkrovas. Tokiais atvejais (dažniausiai kai mikrožingsnio skyra per didelė) variklis gali pasisukti kelis žingsnius tuščiai kol pradeda iš tikrųjų sukstis. Todėl esant labai smulkiems žingsniams sistemose naudojami enkoderiai (posūkio kampo matuokliai), o tai pabrangina sistemą [2; 8].

Autokoreliatorius

Ultratrumpųjų lazerio impulsų trukmės nustatymui naudojami autokoreliatoriai. Optinio autokoreliatoriaus veikimo principas paremtas netiesine šviesos impulsų sąveika.

Daugiašūvio autokoreliatoriaus schema pateikiama 1.9 pav. Į autokoreliatorių patenkantis lazerio impulsinis pluoštas dalinamas pluošto dalikliu PD į dvi lygias dalis. Pirmoji pluošto dalis atsispindi nuo pluošto daliklio ir veidrodžiais V1 ir V2 nukreipiamas į lęšį L. Lęšiu L lazerio pluoštas fokusuojamas į antrosios harmonikos generavimui naudojamą netiesinį optinį kristalą AHG. Kita pluošto dalis, praėjusi pluošto daliklį, atsispindi nuo veidrodžių V3 ir V4 ir taip pat lęšiu L fokusuojama į netiesinį kristalą AHG. Veidrodžiai V3 ir V4 yra pritvirtinti prie poslinkio staliuko, kurio padėtis keičiama naudojant penkiafazį žingsninį variklį su reduktoriumi. Keičiant poslinkio staliuko poziciją kartu keičiama antrojo šviesos impulso padėtis laike pirmojo impulso atžvilgiu, t. y. keičiamas impulsų laikinis persiklojimas netiesiniame kristale. Kai impulsai į kristalą patenka vienu metu, nekolonarijai sugeneruojama didžiausio intensyvumo antrosios harmonikos spinduliuotė. Kai impulsai persikloja tik iš dalies – sugeneruotos antrosios harmonikos intensyvumas yra mažesnis. Jeigu impulsai laike nepersikloja – nekolonarijai antroji harmonika negeneruojama. Todėl keičiant optinio kelio ilgį vienoje koreliatoriaus šakoje (t. y. keičiant impulsų vėlinimą) bei registruojant sugeneruotos spinduliuotės intensyvumą

fotodetektoriumi D, galima išmatuoti koreliacinę funkciją. Koreliacinės funkcijos smailės plotis yra tiesiogiai proporcingas impulso trukmei [19].



1.9 pav. Autokoreliatoriaus schema [9]

Nekolinearaus intensyvumo autokoreliatoriaus schema. V – veidrodis, PD – pluošto dalytuvas, L – lęšis, AHG – antros harmonikos generatorius (netiesinis kristalas), D – detektorius.

Raudonai pažymėta vieta schemeje yra penkiafazio variklio su reduktoriumi modulis, kuris pzicionuoja šviesos pluošto impulso vietą laike. Penkiafazis žingsninis variklis yra prijungtas žvaigždės tipo jungimu, o senąja programine įranga, žingsnis dalinamas iš 5.

2. TYRIMO TIKSLAS IR UŽDAVINIAI

Tikslai:

1. Ištirti penkiafazio žingsninio variklio žingsnio tikslumą žvaigždės jungimo būdu, naudojamu autokoreliatoriuje ir išmatuoti jungimo penkiakampiu tikslumą, bei parinkti tikslesnį.

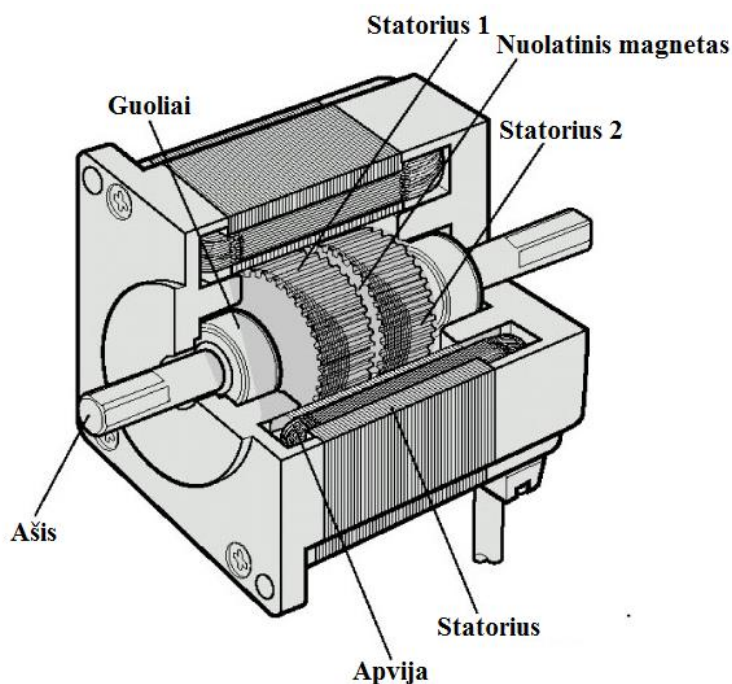
Uždaviniai:

1. Apžvelgti žingsninių variklių tipus ir jų valdymo būdus.
2. Sudaryti penkiafazio žingsninio variklio matematinį ir imitacinį modelį.
3. Sudaryti tiriamosios sistemos maketą.
4. Sudaryti variklio valdymo algoritmą ir valdymo programą.
5. Atlikti eksperimentinį tyrimą.
6. Aprašyti gautus rezultatus.

3. TEORINĖ DALIS

Penkiafazio žingsninio variklio konstrukcija

Žingsninis variklis susideda iš dviejų pagrindinių dalių: statoriaus ir rotoriaus. Rotorius yra sudarytas iš trijų komponentų: Pirmojo ir antrojo rotorių, ir nuolatinio magneto, kurie yra sumontuoti ant rotoriaus ašies, ant kurios jungiama apkrova. Rotorius variklio korpuse įmontuotas į guolius. Guoliai yra vienintele mechaniškai susidėvinti variklio dalis. Rotoriaus tiek pirmasis tiek antrasis puodeliai turi po 50 dantukų, kurie yra perslinkti vieni kitų atžvilgiu per pusę dantuko. Rotoriaus nuolatinis magnetas yra įmagnetintas ašine kryptimi, taigi jei pirmojo puodelio poliarizacija yra įmagnetinta neigiama, tai antrojo bus teigiama poliarizacija. Dėl skirtingo poliariškumo tekant statoriuje srovei priešingo poliariškumo rotoriaus dantukai yra pritraukiami prie statoriaus dantukų, taip sukuriama rotoriaus sukimas judėjimas. Statorius turi 10 magnetinių polių su mažais dantukais, kurie generuoja magnetinį lauką. Kiekviena apvija yra prijungta prie dviejų polių, kurie tekant srovei įsimagnetina tokiu pačiu poliškumu [7; 18].

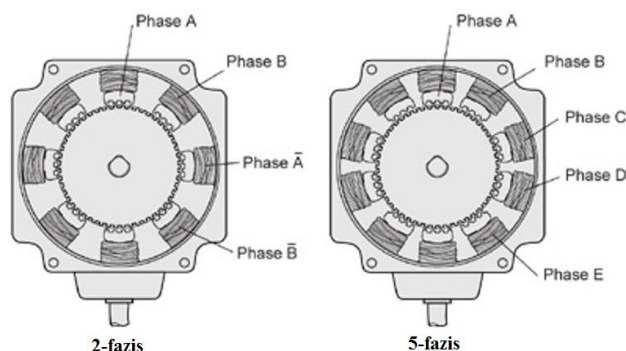


3.1 pav. Penkiafazio žingsninio variklio konstrukcija [2]

Skirtumai tarp dvifazio ir penkiafazio variklio

Yra pagrindiniai du skirtumai tarp dvifazio ir penkiafazio žingsninio variklio. Pirmasis yra mechaninis. Kaip anksčiau minėta, varikliai susideda iš dviejų pagrindinių dalių, statoriaus ir rotoriaus. Dviejų fazių variklyje statorius yra sudarytas iš 8 magnetinių polių mažais dantukais, o penkiafaziame variklyje statorius yra sudarytas iš 10 magnetinių polių [8].

Antrasis esminis skirtumas tarp variklių yra fazių skaičius. Dvifaziame variklyje yra dvi fazės, A ir B fazė. Penkiazfasis variklis turi penkias fazes. Iš esmės skirtingas fazių skaičius siejasi su skirtingomis polių kombinacijomis kurios statoriuje pritraukia rotorį [4; 7; 8; 18].



3.2 pav. Dvifazio ir penkiazfazio žingsninių variklių fazių skirtumas [4]

Skyra

Struktūriškai penkiazfasis žingsninis variklis nedaug kuo skiriasi nuo dvifazio. Rotorius abiejuose varikliuose turi po 50 dantų. Esminį skirtumą sudaro poliai. Penkiazfasis turi 10 polių, du poliai fazei, rotorius turi pasisukti tik 1/10, kad išsirikiuotu prie kitos fazės. Dvifaziame variklis turi 8 polius, 4 poliai vienai fazei, todėl rotorius turi pasisukti 1/4, kad atsistotu dantukas ties kita faze.

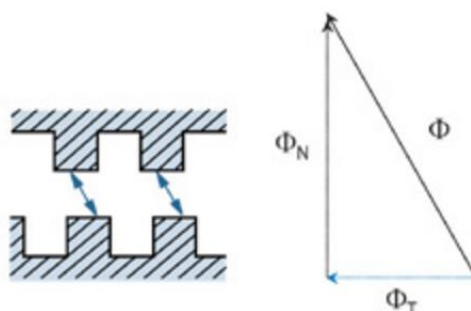
Dėl šios priežasties dvifazis variklis turi 200 žingsnių per apsisukimą, kur vienas žingsnis yra 1.8° . Penkiazfasis žingsninis variklis turi 500 žingsnių per apsisukimą, kur vienas žingsnis yra $0,72^\circ$. Didelė skyra yra neatsiejama penkiazfazio variklio dalis. Su atitinkamu valdikliu penkiazfazio variklio žingsnius galima dalinti, ir net pasiekti $0,00288^\circ$ laipsnio vienam žingsniui, tačiau tuomet kenčia tikslumo pakartojamumas. Tiek dvifaziam tiek penkiazfaziui varikliui mechaninis tikslumas yra $\pm 0,05^\circ$ [4;18].

Sukimo momentas

Yra mažas skirtumas tarp išėjimo sukimo momento dvifaziame ir penkiazfaziame variklyje. Nors abiejų tipų varikliai sukuria sukimo momento pulsacijas, tačiau penkiazfazio variklio sukimo momentas yra labiau tinkamas naudoti.

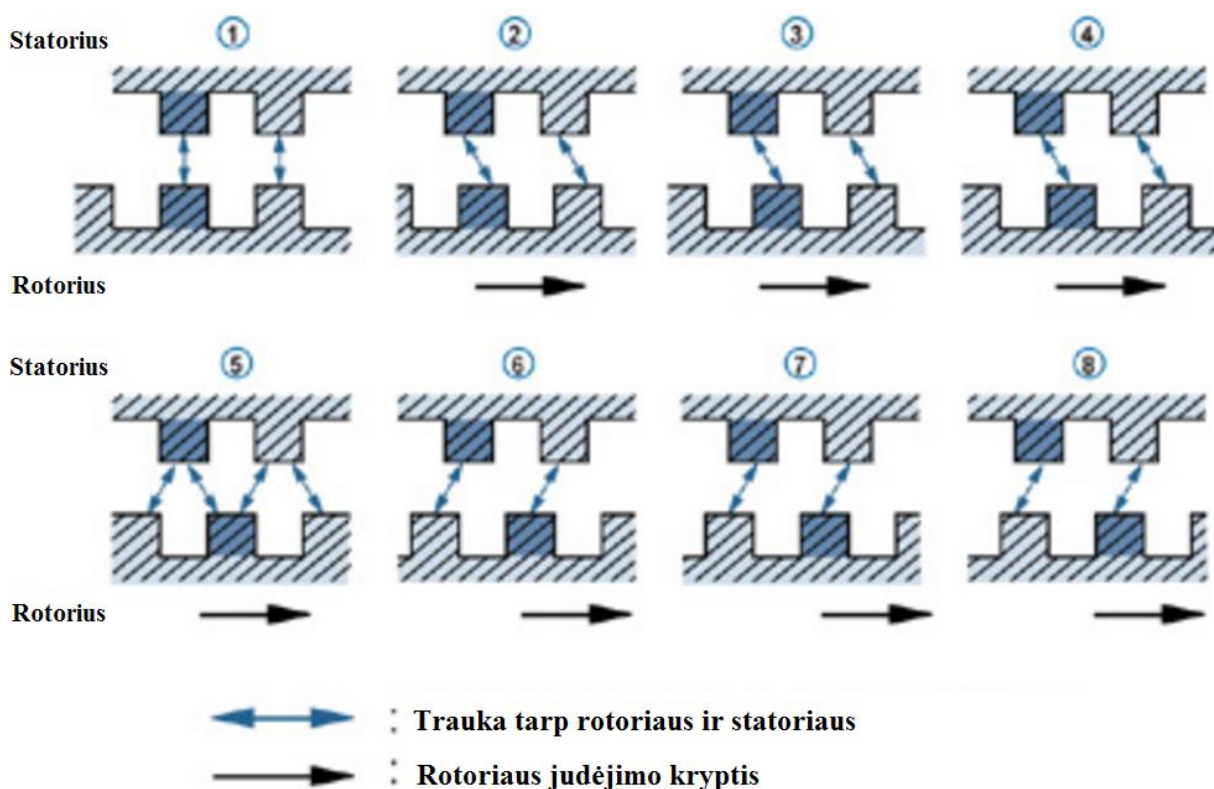
Pusės žingsnio ir mikrožingsnio valdymo režimais, penkiazfazio žingsninio variklio sukimo momentas pagerėja iki 10%, nes daugiau fazių yra aktyvios. Dvifaziame variklyje sukimo momentas sumažėja maždaug iki 40% tokiais valdymo režimais. Tačiau daugelis dvifazių valdiklių kompensuoja tai, srovės paviršiu į priešingą momento vektorį. Kai statorius yra aktyvintas, jis sukuria elektromagnetinį lauką, kuris traukia rotoriaus magnetinį srautą. Magnetinis

srautas gali būti paskirstytas į du vektorius, vieną normalų ir vieną tangento. Sukimo momentas atsiranda tik tada, kai magnetinio srauto vektorius atitinka tangentės vektorių [4; 8; 18].



3.3 pav. Sukimo momento vektoriai [18]

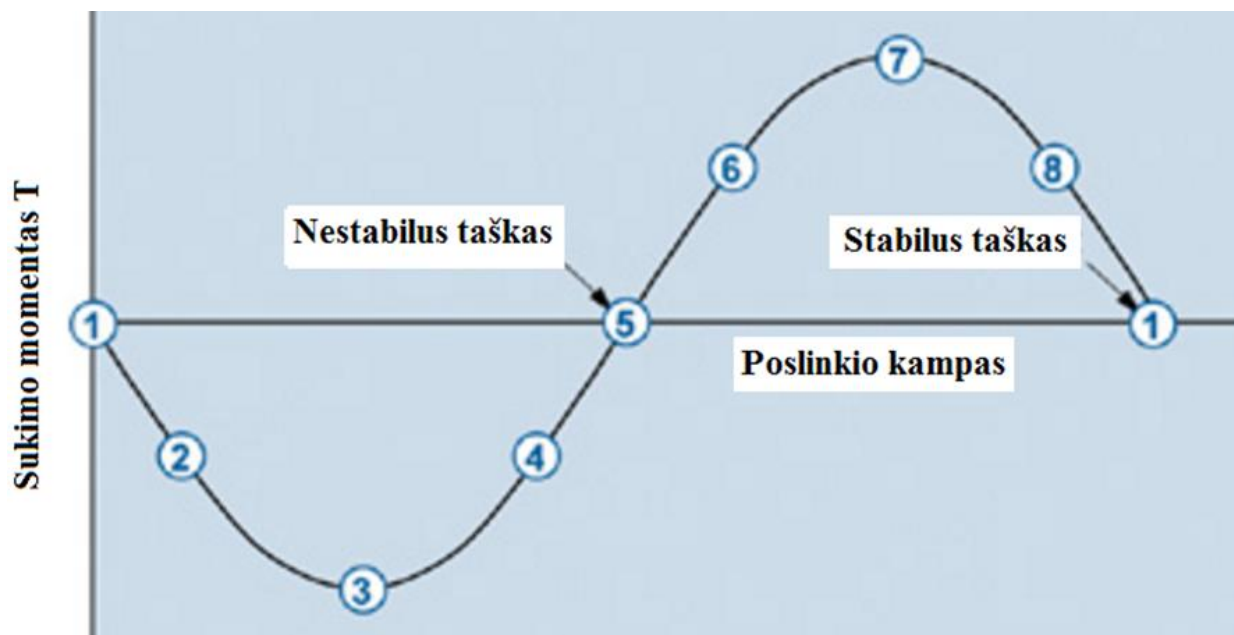
3.3 paveiksle pirmuoju numeriu pažymėta rotoriaus dantų padėtis, kai jie tiesiogiai išsirikiavę vienas prieš kitą, todėl yra tik vienas normalus vektorius. Tokiu metu sukimo momentas nesukuriamas. 2, 3 ir 4 numeriu pažymėtose padėtyse yra pasislinkęs rotorius statoriaus atžvilgiu. Tuomet jau atsiranda neigiamas sukimo momentas, kadangi statorius bando rotorių pritraukti atgal į stabilią padėtį. 5 numeriu pažymėtoje padėtyje magnetinis srautas dalinasi pusiau tarp statoriaus dantų. Šiuo atveju sukimo momentas nesusidaro. 6, 7 ir 8 numeriais pažymėtose padėtyse vėl atsiranda sukimo momentas, tik šį kartą jau teigiamas. Statorius bando pritraukti rotorių, kad šis išsirikiuotu tiesiai su rotoriaus dantimis, iki kol rotorius vėl atsistoja 1 poziciją [4; 8; 18].



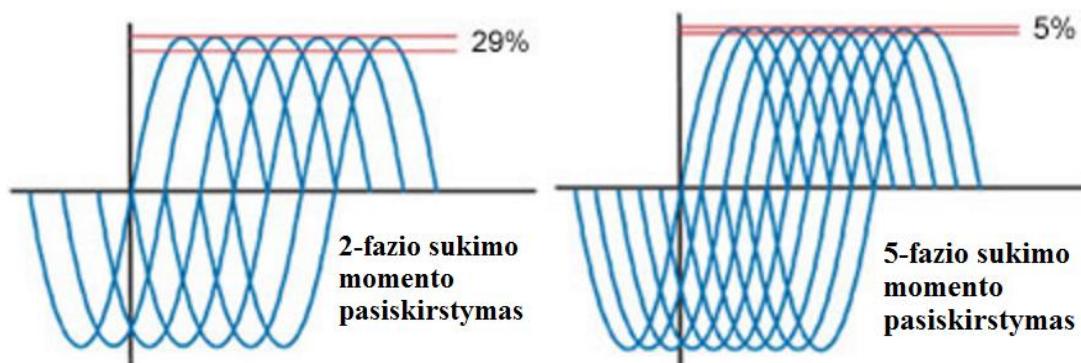
3.4 pav. Sukimo momento susidarymo žingsniai [18]

Kiekviena variklio fazė sukuria sinuso sukimo momento formos kreivę visam variklio sukimo momentui. Skirtumas tarp fazių viršūnės, ir fazių susikirtimo yra vadinamas pulsacijomis. Taigi, kuo didesnės pulsacijos, tuo didesnės vibracijos.

Kuo daugiau fazių visam sukimo momentui sukurti, tuo mažesnės pulsacijos. Sukimo momento pulsacijos penkiafaziam variklyje yra ženkliai mažesnės nei dvifaziam. Skirtumas tarp fazės viršūnės ir fazių susikirtimo dvifaziam variklyje gali siekti net 29%, tuo tarpu penkiafaziam variklyje apie 5%. Kadangi sukimo momento pulsacijos tiesiogiai atstoja variklio vibracijas, penkiafazis variklis yra pranašesnis už dvifazį [4; 18].



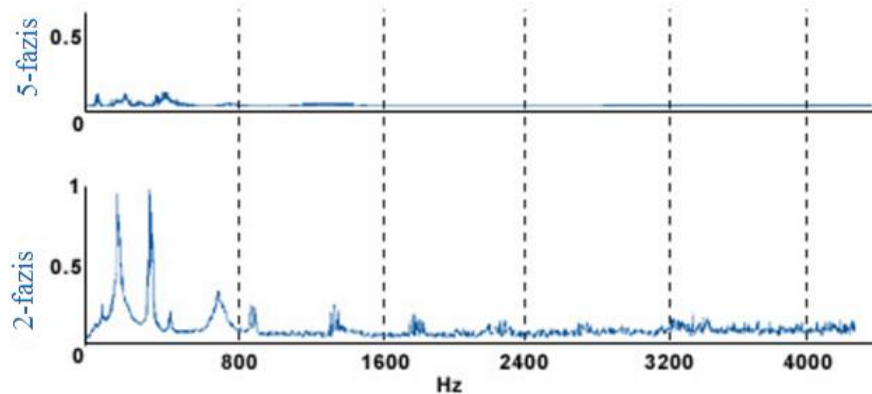
3.5 pav. Kampo ir sukimo momento charakteristika [4]



3.6 pav. Dvifazio ir penkiafazio variklių sukimo momentų pulsacijų pasiskirstymas [4]

Vibracija

Dėl mažesnių žingsnių penkiafaziam žingsniniame variklyje negu dvifaziam variklyje, vibracijos penkiafaziam yra daug mažesnės. Grafike atvaizduotos abiejų žingsninių variklių sukuriamos vibracijos.



3.7 pav. Dvifazio ir penkiafazio žingsninių variklių vibracijų diagramos [18]

Kai žingsninis variklis atlieka žingsnį, rotorius pasisukęs iš karto nesustoja. Rotorius susvyruoja kol nusistovi rimties būsenoje. Taip nutinka kiekviename žingsnyje kol variklis sukasi pavieniu žingsniu. Varikliui sukantis nepavieniais žingsniais, varikliui impulsas suktis sekančiam žingsniui yra užduodamas anksčiau nei jis pasiekia savo žingsnio vietą, taip yra šiek tiek sumažinama vibracija. Mažinti vibracijas visada reikia naudoti apkrovą, nesvarbu, ar žengiant pavienius žingsnius ar ne. Apkrovos būna skirtingų tipų, pastoviosios fiksuotos, bei inercinės. Abiem atvejais vibracijos yra sumažinamos. Variklio apkrova turėtų būti tarp 30% - 70% variklio sukimo momento. Trečiasis būdas norint sumažinti vibracijas yra variklį sukti mikrožingsnio režimu. Tokiu būdu variklio žingsniai tampa tokie maži, kad vibracijos yra juntamos nežymiai. Žemiau pateiktas variklio vibracijų kreivės, kuriose pavaizduotos vibracijos be variklio apkrovos, su fiksuota apkrova ir su inercine apkrova [4; 17;18;]

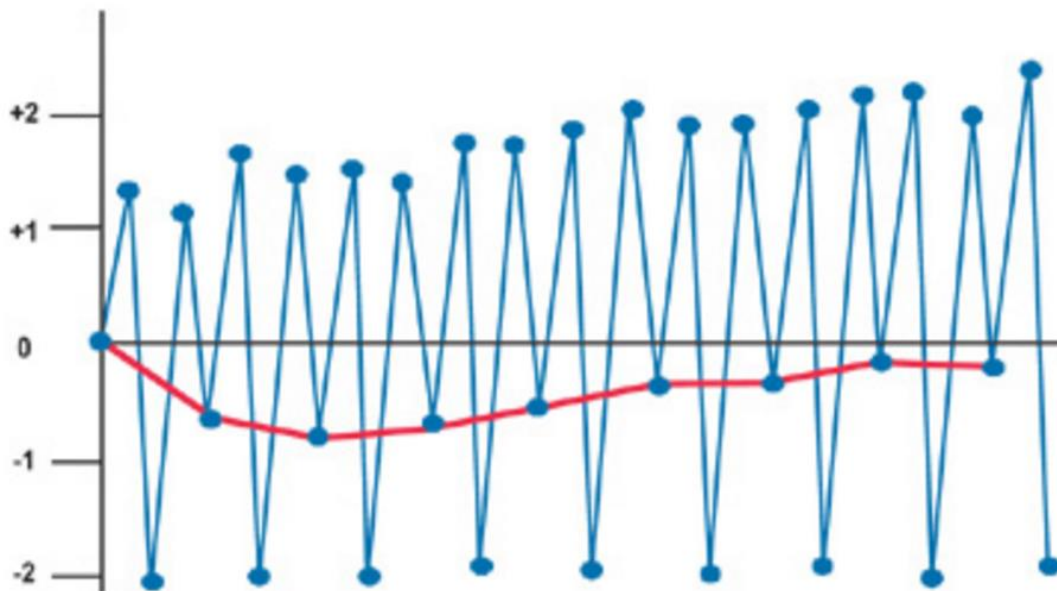


3.8 pav. Žingsninio variklio vibracijų kreivės, kai variklis be apkrovos, su fiksuota apkrova ir inercine apkrova [17]

Tikslumas

Tikslumui užtikrinti naudojami du komponentai, tai elektrinis ir mechaninis. Elektrinis netikslumas gali atsirasti dėl fazių disbalanso. Pavyzdžiui, variklio apvijų varža specifikuojama $\pm 10\%$, tai jei variklio specifikacija yra 10W, tai viena fazė gali būti 9,2W, o kita jau 10,6W. Dėl šios priežasties variklio fazės gali skirtinga jėga pritraukinėti rotorius viena kitos atžvilgiu.

Variklyje yra keli komponentai dėl kurių gali atsirasti netikslumai. Pagrindinis yra danties konfigūracija. Nors dantys ant variklio, kaip manoma yra kvadratiniai, tačiau gamybos metu šampavimo procesas ir šampo amžius gali daryti įtaką dantų formai. Kai kurie dantys gali būti apvaliniais kampais, arba šiek tiek suapvalinti, todėl vietoje tiesioginio magnetinio srauto, jis gali nutekėti kur nors kitur, kai dantys yra užapvalinti. Šie veiksniai yra pagrindiniai prisidedant prie netikslumo. Naudojant pilno žingsnio režimą, dvifazis variklis atkartoja kiekvieną ketvirtą žingsnį, tuo tarpu penkifazis, kas dešimtą. Atsiradus bet kokiam elektriniam nestabilumui fazėse, tai atsilieps dvifaziame variklyje kas ketvirtame žingsnyje, o penkifaziame kas dešimtaine. Kai variklis apsisuka 360° tai variklio rotoriaus dantis grįžta į pradinį atspirties tašką. Dvifazis variklis per apsisukimą padaro 200 žingsnių, tai beveik kiekvienas žingsnis yra tobulas. Penkifaziame variklyje yra 500 žingsnių per atsisukimą, tai beveik visi 500 žingsnių būna tobuli [17;18]

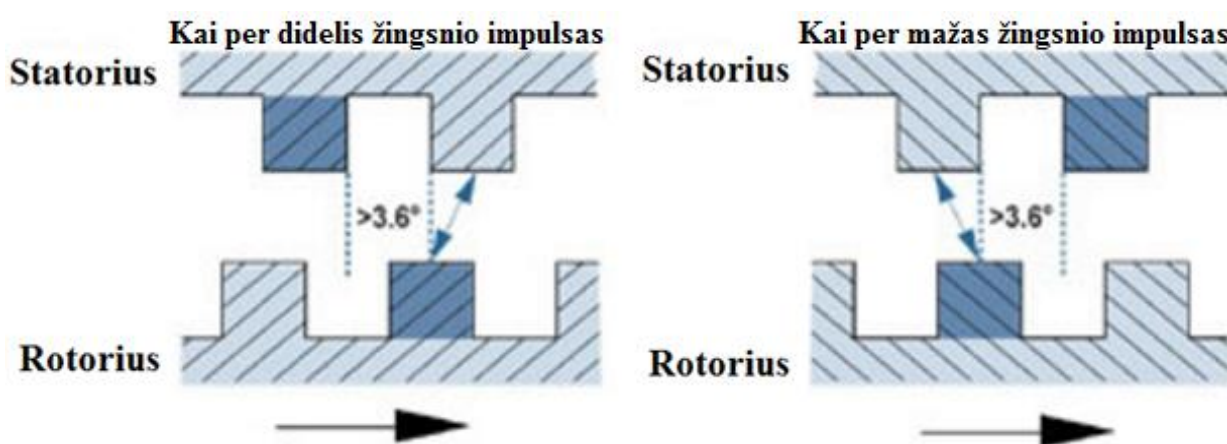


3.9 pav. Dvifazio žingsninio variklio tikslumo nuokrypa kas ketvirtą žingsnį [18]

Sinchronizavimas

Penkifazis žingsninis variklis sukasi tik $0,72^\circ$ per žingsnį, todėl beveik neįmanoma šiam varikliui praleisti žingsnį dėl per daug pavažiavimo ir nepakankamo pavažiavimo. Variklis praras sinchroniškumą arba praleis žingsnį tik tada, kai dantys ant rotoriaus nesueis į vieną liniją

su teisingais dantimis ant statoriaus. Kas tai lemia? Pirma, kad rotoriaus dantis nesulygiuotų tinkamai, kitas dantis turi sulygiuoti ten, kur reikia. Norint, kad taip nutiktų, rotorius turi veikti taip : turi įvykti žingsnio per dideliam pavažiavimui (praleistų tinkamą statoriaus dantį) arba neprivažiutų nepasiekęs (nepajudėtų pakankamai, tiek kiek reikia, kad sulygiuotų su reikiamu statoriaus dantimi) daugiau nei 3.6° . Kodėl 3.6° ? nes dantys yra įmagnetinti ir vienas kitą traukia. Reikiamas dantis turi būti daugiau nei per vidurį tarp statoriaus ir rotoriaus dantų, kad sulygiuotų (7.2° tarp rotoriaus dantų tarpą padalinus iš 2 gauname 3.6°). Taigi, kai rotorius peršoka reikiamą statoriaus dantį daugiau nei 3.6° , kitas dantis sulygiuos į jo vietą, o tai ir lemia, kad bus praleistas vienas žingsnis. Atvirkščiai bus jei rotorius pajudės mažiau nei 3.6° , esamas dantis sulygiuos su statoriaus dantimi ir rotorius nepasisuks, tada bus praleistas žingsnis [18]



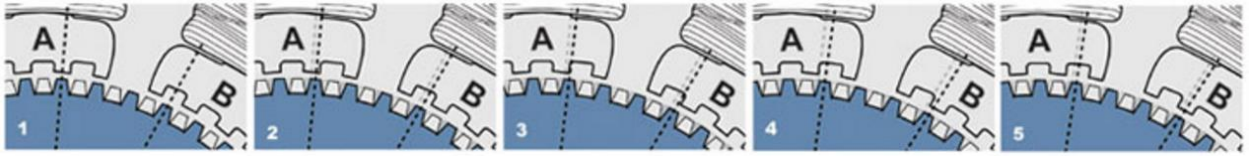
3.10 pav. Žingsnio paklaidos pavyzdys, kai žingsnio impulsas netolygus [18]

Žingsninio variklio mikrožingsninio valdymas

Mikrožingsnio valdymo schema dalina pagrindinį variklio žingsnio kampą, mažindami srovę vienai fazei, didindami srovę kitai fazei. Rezultate gaunami mažesni žingsniai. Su mikrožingsnio valdymo schema žingsnius galima padalinti nuo 1/1 iki 1/250.

Dvifazio variklio mikrožingsninio valdymo pavyzdys:

1. Fazė A yra 100% srovės, todėl rotorius išsirikiuoja tiesiogiai.
2. Srovė fazėje A sumažinama iki 75%, kol 25% srovės pereina į fazę B.
3. Srovė abiejose apvijose A ir B yra po 50%, taigi rotorius pasisuka tiesiai per vidury abiejų polių.
4. Fazė A maitinama tik 25% nuo maksimalios srovės, o fazė B 75%, todėl rotorius pasisuka arčiau fazės B poliaus.
5. Fazė A yra išjungta, o fazė B užmaitinama visu 100% srovės, taigi rotorius atsistoja tiesiogiai B fazei [18]

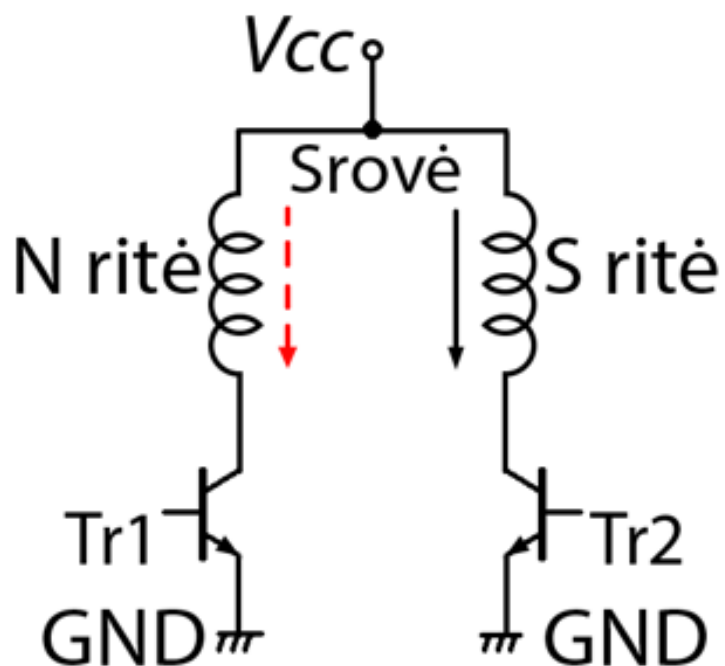


3.11 pav. Mikrožingsnio detalus pavyzdys [18]

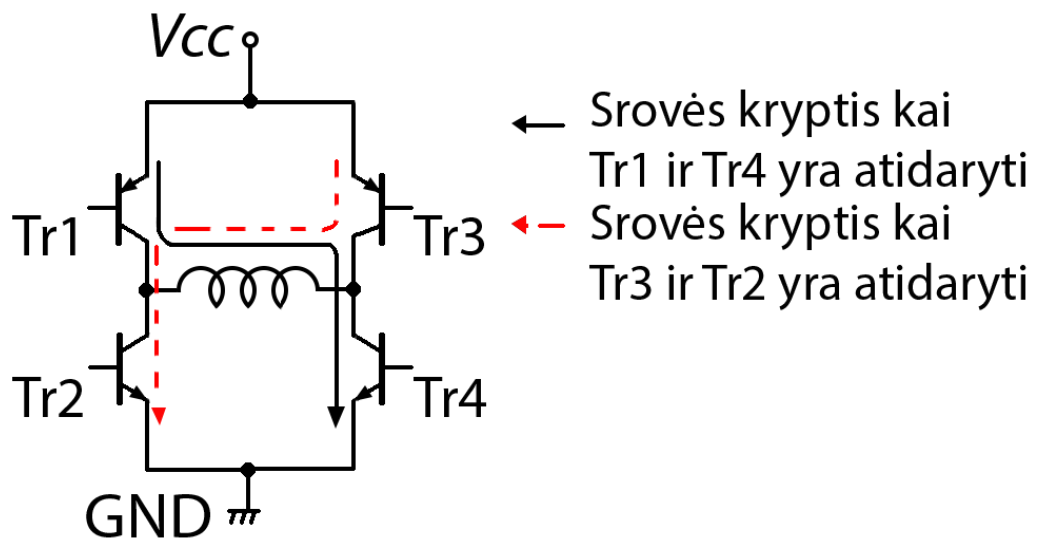
Tokiu pačiu principu mikrožingsniavimas vykdomas ir penkiafaziam variklyje, fazės nuosekliai atjungiamos ir prijungiamos tiek didinant tiek mažinant jų sroves.

Žingsninio variklio jungimas žvaigžde ir penkiakampiu

Žingsninį variklį jungiant penkiakampiu (dvipoliu), variklyje srovė teka dviem kryptimis: generuojami šiaurinis ir pietinis magnetiniai laukai. Šis variklio jungimas vadinamas dvipoliu, nes srovė teka dviem kryptimis. Variklio prijungimo režimas, kai srovė teka viena kryptimi, vadinamas vienpoliu.



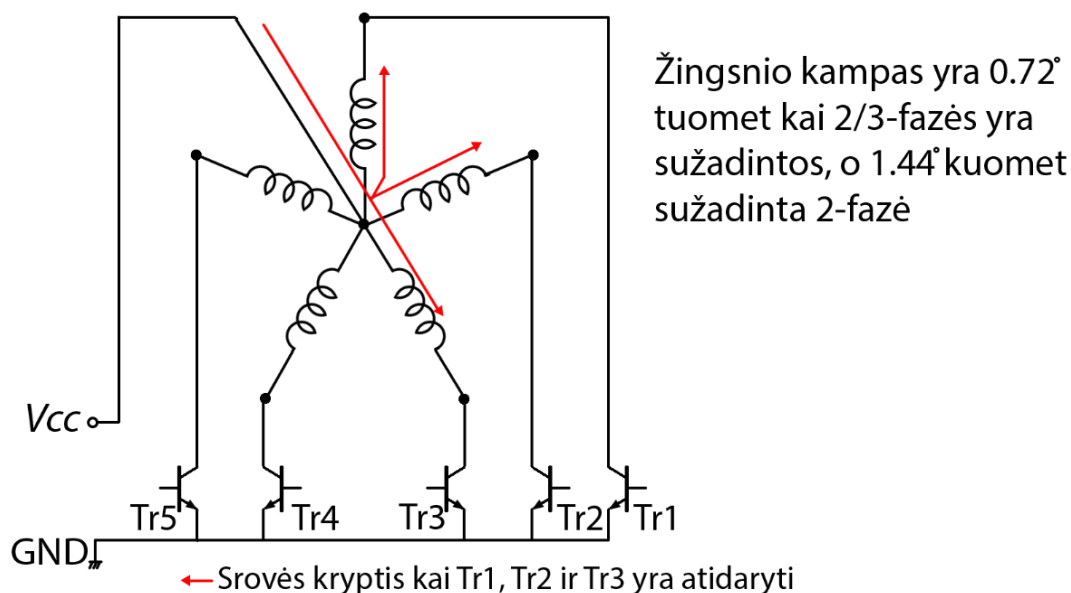
3.12 pav. Vienpolio režimo (žvaigžde) jungimo schema vienai fazei. Tr1 ir Tr2 – tranzistoriai, GND – įžeminimas, Vcc – maitinimo šaltinio įtampa [16]



3.13 pav. Dvipolio režimo (penkiakampio) jungimo schema vienai fazei. Tr1, Tr2, Tr3, Tr4 – tranzistoriai, GND – įžeminimas, Vcc – maitinimo šaltinio įtampa [16]

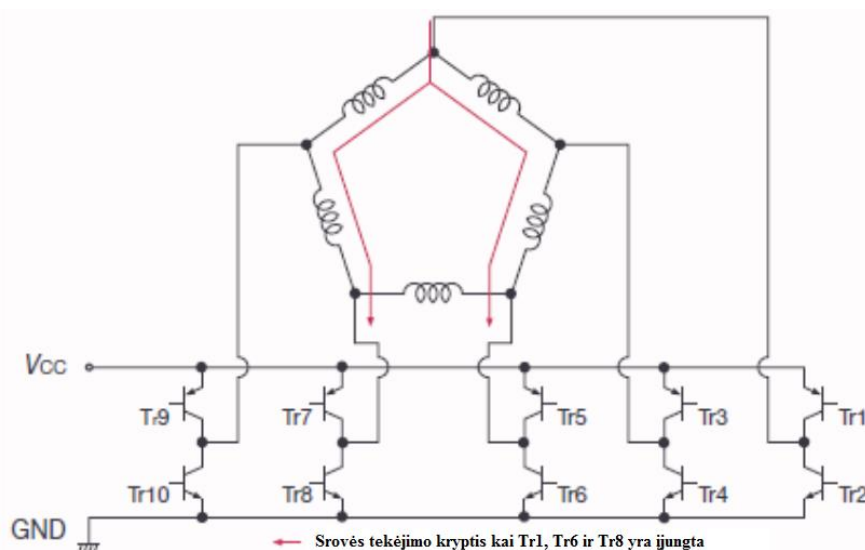
Žvaigždės režimu prijungtas žingsninis variklis pasižymi pranašumu, tokiu kaip sukimo momentu prie didelių greičių, taip pat valdiklio schema yra kur kas paprastesnė, reikalaujanti tik dviejų tranzistorių vienai fazei. Tačiau fazės naudingumo koeficientas yra žemesnis nei jungimo penkiakampiu. Taip pat sukimo momento generavimo charakteringa savybė yra žemesnės sukantis mažais greičiais.

Penkiakampio jungimo metu, keturi tranzistoriai yra naudojami kiekvienai variklio fazei. Šis jungimo būdas generuoja didesnę sukimo momentą sukantis mažesniu greičiu. 4.13 pav. Atvaizduoja anksčiau naudoto žvaigždinio jungimo būdo pavyzdį. Šio prijungimo dizainas yra paprastesnis, nes naudojami tik 5 tranzistoriai. Tačiau šis jungimo būdas pasižymi žemomis variklio apvijų išnaudojimo charakteristikomis, taip pat žingsnio skyros charakteristikos yra žemesnės nei penkiakampio jungimo.



3.14 pav. Žvaigždės jungimo schema. Tr1, Tr2 ir Tr3 – tranzistoriai, GND – įžeminimas, Vcc – maitinimo šaltinio įtampa [16]

Penkiakampio jungimo būdas pavaizduotas 3.14 pav. Penkiakampio jungimo būdu, žingsninis variklis efektyviau dirba. Pagerėja eksploatacinės charakteristikos, tokios kaip greitis, sukimo momentas, sklandumas bei žingsnio tikslumas lyginant su jungimo žvaigžde. Jungimo penkiakampiu valdymui reikalingi tik 10 tranzistorių. Penkiakampio jungimo valdyme 4 fazės yra sužadinamos vienu metu ir viena fazė lieka išjungta. Naudojant penkiakampio jungimo būdą žingsnio laipsnis pasiekia $0,72^\circ$ kampą. Šis režimas sumažina vibraciją dėl padidėjusio žingsnio skyros ir stabilizuoja darbo režimą [16].

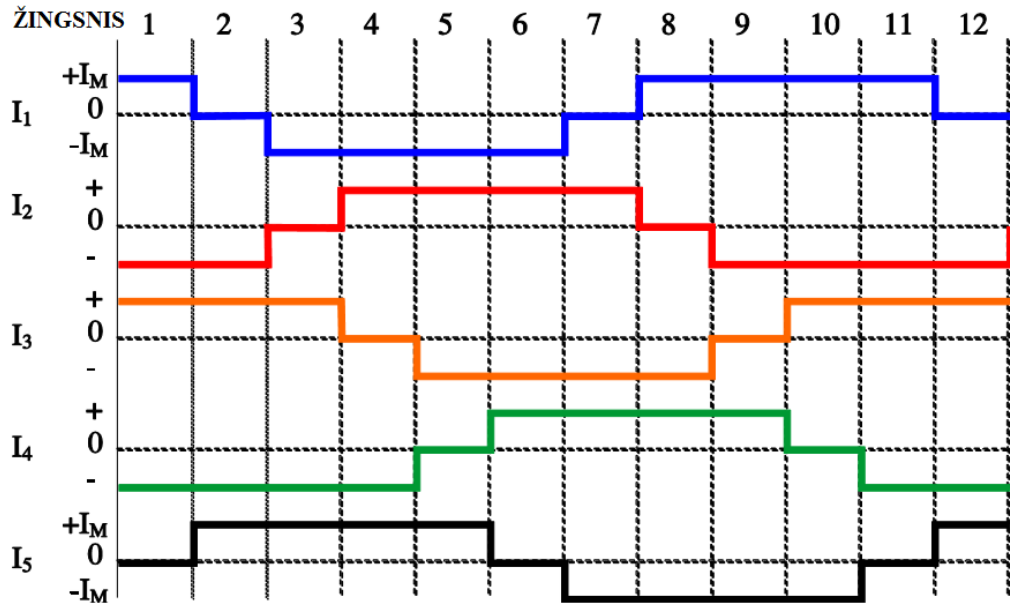


3.15 pav. Penkiafazio žingsninio variklio jungimo schema penkiakampiu. Tr1–Tr10 – tranzistoriai, GND – įžeminimas, Vcc – maitinimo šaltinio įtampa [16]

3.1. Žingsninio variklio matematinis modelis

Penkiafazio žingsninio variklio sukimo momento ir srovių skaičiavimas

Žemiau pateiktas penkiafazio hibridinio žingsninio variklio turinčio 500 žingsnių per apsisukimą skaičiavimo modelis. Natūralus šio žingsninio variklio žingsnio kampas yra $\theta_{st} = 36^\circ$ matuojant elektronikos vienetais, arba $0,72^\circ$ mechaniniais, kuris pasiekiamas dvipoliu srovės šaltiniu su keturių fazių sužadinimu. Teorinės srovės fazių stiprio bangos yra parodytos 4.1.1.



3.16 pav. Penkiafazio variklio srovių diagrama [3]

Remiantis elektromagnetiniu sukimo momento modeliu, neatsižvelgiant į magnetinės srovės netiesiškumą ir oro tarpų įmagnetinimą. Šiomis sąlygomis statinio sukimo momento fazių kreivės yra sinusoidinės, o ryšys tarp srovės stiprio ir sukimo momento yra linijinis. Tai leidžia susumuoti srovės fazių sukimo momentus remiantis vektorinėmis diagramomis [3] 4.1.1. išanalizuota pirmoji padėtis, kurioje fazių srovės yra lygios:

$$I_1 = I_M \quad I_2 = -I_M \quad I_3 = I_M \quad I_4 = -I_M \quad I_5 = 0. \quad (1)$$

Šiuo atveju I_M yra apskaičiuotas srovės stipris, kuomet fazė yra sužadinama. Apskaičiuotas srovės stipris yra lygus vertei, kurią žingsninis variklis statiskai vartodamas neperkaistų nelimituotą laiko tarpą. Žinoma, žingsninis variklis gali dirbti ir nebūtinai apskaičiuotos srovės režimu tiek statiskai, tiek dinamiškai, pavyzdžiui greitėjant, lėtėjant arba pereinant į rezonansines zonas. Penkiafazio hibridinio žingsninio variklio statinis sukimo

momentas sulig kiekviena faze yra proporcingas fazės srovės stipriui. Srovės stipris iš pirmosios padėties [3; 10; 11; 12]. 4.1.1, statinis sukimo momentas gali būti išreikštas formulėmis apačioje:

$$T_1 = k_M \cdot I_M \cdot \sin \Theta . \quad (2)$$

$$T_2 = -k_M \cdot I_M \cdot \sin(\Theta - 144^\circ) . \quad (3)$$

$$T_3 = k_M \cdot I_M \cdot \sin(\Theta + 72^\circ) . \quad (4)$$

$$T_4 = -k_M \cdot I_M \cdot \sin(\Theta - 72^\circ) . \quad (5)$$

$$T_5 = k_M \cdot 0 \cdot \sin(\Theta + 144^\circ) = 0 . \quad (6)$$

Kur k_M yra pastovus dydis priklausantis nuo žingsninio variklio charakteristikos, I_M fazės srovė, o Θ yra rotoriaus pasisukimas matuojant elektros kampą. Fazės perėjimas tarp dviejų gretimų fazių yra iš 216° elektrinio kampo, o pradžia yra statoriaus pirmo danties centras fazėje numeris 1. Sukimo momento vektorių dydžiai atitinka T_M , kur $T_M = k_M \cdot I_M$ yra statinio sukimo momento sinusoidinės kreivės amplitudė varoma vienos fazės srovės stipriu lygiu I_M . Bendras sukimo momentas T_E yra visų penkių fazių sukimo momento suma. Susumavę sukimo momento (1) iki (5) formules ir pertvarkę lygtį, bendras sukimo momentas lygus:

$$\begin{aligned} T_E &= 4 \cdot k_M \cdot I_M \cos 72^\circ \cdot \cos 36^\circ \cdot \sin(\Theta + 54^\circ) = 3,078 \cdot k_M \cdot I_M \cdot \sin(\Theta + 54^\circ) = \\ &= 3,078 \cdot T_m \cdot \sin(\Theta + 54^\circ). \end{aligned} \quad (7)$$

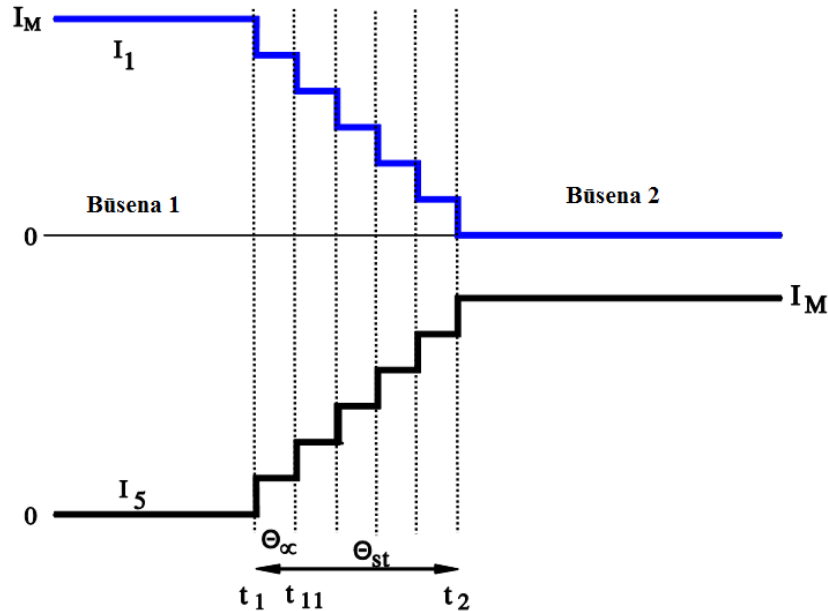
Hibridinio žingsninio variklio mikrožingsnio srovių skaičiavimas

Norint apskaičiuoti žingsnių dalinimą reikia žinoti sukimo momento vektoriaus sumą sulig kiekvienu mikrožingsninio elektros srovės fazės pasikeitimu. Mikrožingsnio kampą apibrėžia sukimo momento vektoriaus kampinė padėtis [3; 10; 11; 12].

Elektros srovės bangos parodytos 3.1 paveiksle, sudaro aptariamo mikrožingsnių valdymo pagrindą. Įsivaizduokime perėjimą iš padėties 1 į padėtį 2 pav. 3.1 Čia srovė I_1 nukrenta nuo I_M iki 0, kuomet srovė I_5 pakyla nuo 0 iki I_M . Per šį pasikeitimą hibridinio žingsninio variklio rotorius pasisuka prieš laikrodžio rodyklę vienu natūralaus žingsnio kampu lygiu $0,36^\circ$. Mikrožingsnių valdymo principas yra iliustruotas 3.2 paveiksle. Tam, kad pradėtume valdymą nuo laiko T_1 , elektros srovė I_1 pradeda mažėti, o srovė I_5 didėti. Šiuo atveju abu srovės stipriai turi apibrėžtas vertes. Kiekvienai padėčiai (priklausomai nuo srovės stiprio), rotorius pasisuka mikrožingsnio kampu Θ_μ prieš laikrodžio rodyklę:

$$\Theta_{\mu} = \frac{\Theta_{st}}{n} \quad (8)$$

Kur n yra numeris iš kurio natūralus žingsnis yra padalinamas. Šis numeris taip pat nurodo skirtingus srovės stiprius nuo laiko T_1 iki T_2 parodytus 3.2 paveiksle. (Morar, A., 2007, 263 p.).



3.17 pav. Srovės būsenos [3]

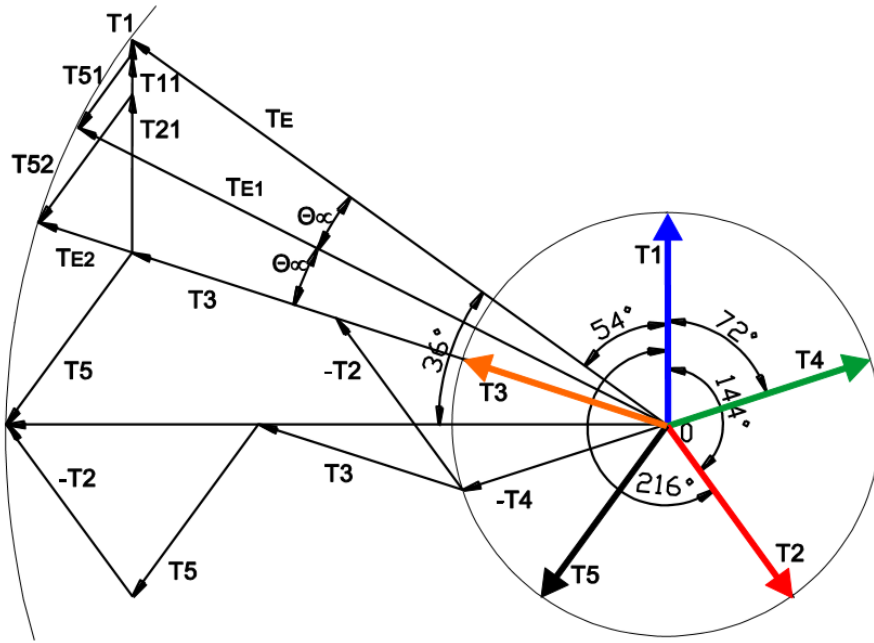
Procesas nurodytas paveiksle turi būti atliekamas su kiekviena sužadavimo padėtimi apibūdinta 3.1paveiksle, kad padidintų kiekvieną natūralų variklio žingsnį. 3.2 paveiksle tai parodyta sukimo momento – vektoriaus diagrama pačioms pirmosioms padėtimis tarp momentų T_1 ir T_2 iš 3.2 pav., kuomet natūralus žingsnis yra padalintas iš 4.

T_{11} ir T_1 yra fazės 1 sukimo momentai. T_{51} ir T_{52} – fazės, o T_E , T_{E1} ir T_{E2} bendro sukimo momento sumos vektoriai, kuomet srovės stipris yra keičiamas nuo I_1 iki I_5 .

Srovės stiprių vertė gali būti apskaičiuota remiantis limituojančiais parametrais. Šie parametrai yra:

- Bendro statinio sukimo momento sinusoidės amplitudė išlieka nepakitusi – bendra vektoriaus vertė yra nekintanti ir lygi kitoms 4 fazėms sužadintoms srovės stiprio I_M .
- Bendras sukimo momento vektorius pasisuka vieno mikrožingsnio kampą Θ_{μ} sulig kiekviena padėtimi [3; 10; 11; 12].

Vektorių diagrama 3.3 paveiksle yra iliustruota šiais teiginiais.



3.18 pav. Posūkio vektoriaus diagrama, kai žingsnis dalinamas iš 4 [3]

Kai kas gali įžvelgti sukimo momento pakitimus, kuomet kečiasi srovės stipriai tarp dviejų komutuojančių fazių. Sukimo momentas pirmoje fazėje mažėja, tuo tarpu penktoje didėja. Rezultate bendras sukimo momento vektorius sukasi prieš laikrodžio rodyklę, per vieną mikrožingsnio kampą sulig kiekviena faze. Bendro sukimo momento vektoriai sudaro apskritimą dėl pastovios vertės. Nežinomieji yra sukimo momentų T_{11}/T_{13} ir T_{51}/T_{53} vertės. Atsižvelgiant į tai, kad santykis tarp statinių sukimo momentų ir fazės srovės yra linijinis (formulės nuo 2 iki 6). Santykiai tarp srovės stiprių gali būti išreikšti taip pat kaip ir santykiai tarp sukimo momentų. [3; 10; 11; 12]. Po to šie srovės stipriai gali būti apskaičiuoti remiantis trigonometrinėmis funkcijomis.

Padėčiai nurodytai 3.2 pav. ir remiantis srovės ženklais 3.1 pav. ir formulėmis (2): (6), bendras hibridinio mikrožingsninio variklio sukimo momentas gali būti išreikštas:

$$T_E = T_1 - T_2 + T_3 - T_4 + T_5 = k_M = \begin{bmatrix} I_1 \sin \Theta - I_M \sin(\Theta - 144^\circ) + I_M \sin(\Theta + 72^\circ) \\ -I_M \sin(\Theta - 72^\circ) + I_5 \sin(\Theta + 144^\circ) \end{bmatrix} \quad (9)$$

Šioje formulėje srovės stipriai I_1 ir I_2 yra nežinomi ir kintantys, tuo tarpu kitos fazės yra sužadindamos srovės I_M . Supaprastinus ši formulė tampa:

$$T_E = k_M [I_1 \sin \Theta + 2,62 I_M \sin(\Theta + 72^\circ) + I_5 \sin(\Theta + 144^\circ)]. \quad (10)$$

Atsižvelgiant į tai, kad statinio sukimo momento vertė privalo išlikti tokia pati ir naudojantis formulėmis 7 ir 10, lygtis gali būti parašyta:

$$k_M [I_1 \sin \Theta + 2,62 I_M \sin(\Theta + 0,72^\circ) + I_5 \sin(\Theta + 144^\circ)] = 3,078 \cdot k_M \cdot I_M \sin(\Theta + 54^\circ + p\Theta\mu). \quad (11)$$

Šioje lygtyje p yra kiekvieno sekančio mikrožingsnio numeris. Padalinus kiekvieną formulės 11 pusę iš k_M ir pritaikant -54° fazės pasikeitimą gauname:

$$I_1 \sin(\Theta - 54^\circ) + 2,62 \cdot I_M \sin(\Theta + 18^\circ) + I_5 \sin(\Theta + 90^\circ) = 3,078 \cdot I_M \sin(\Theta + p\Theta\mu). \quad (12)$$

Ši lygtis turi būti išspręsta I_1 ir I_5 . Po pertvarkymo gauname:

$$I_1 \sin(\Theta - 54^\circ) + I_5 \cos(\Theta + 90^\circ) = 3,078 \cdot I_M \sin(\Theta + p\Theta\mu) - 2,62 \cdot I_M \sin(\Theta + 18^\circ). \quad (13)$$

$$I_1 \sin \Theta \cdot \cos 54^\circ + (I_5 - I_1 \sin 54^\circ) \cos \Theta = I_M \left[\sin \Theta (3,078 \cos p\Theta\mu - 2,62 \cos 18^\circ) + \cos \Theta (3,078 \sin p\Theta\mu - 2,62 \sin 18^\circ) \right] \quad (14)$$

Galiausiai iš (14) gauname:

$$0,59 \cdot I_1 \sin \Theta + (I_5 - 0,81 \cdot I_1) \cos \Theta = I_M (3,078 \cos p\Theta\mu - 2,49) \sin \Theta + I_M (3,078 \sin p\Theta\mu - 0,81) \cos \Theta. \quad (15)$$

Tai gali būti išreikšta lygčių sistema I_1 ir I_5 :

$$\begin{cases} 0,59 \cdot I_1 = I_M (3,078 \cos p\Theta\mu - 2,49) \\ I_5 - 0,81 \cdot I_1 = 3,078 \sin p\Theta\mu - 0,81. \end{cases} \quad (16)$$

Sprendimas šiai lygčių sistemai yra:

$$\begin{cases} I_1 = I_M (5,235 \cos p\Theta\mu - 4,235) \\ I_5 = I_M (3,078 \sin p\Theta\mu + 4,235 \cos p\Theta\mu - 4,235). \end{cases} \quad (17)$$

Naudojantis lygtimis pateiktomis (17) galime išspręsti fazinių srovės stiprių I_1 ir I_5 vertes p -th žingsnyje po padėties T_1 iš diagramos 3.3 pav. Ta pati sprendimo metodika gali būti pritaikyta apskaičiuoti I_2 ir I_4 . Remiantis šiuo sprendimu bandymas atliekamas su penkiafaziu hibridiniu žingsniniu varikliu, su 500 žingsnių per apsisukimą ir natūraliu žingsniu $\Theta_{\mu}=36^{\circ}$ [3]. Šis mikrožingsnio kampas yra apskaičiuojamas kuomet natūralus žingsnis yra dalinamas iš 4:

$$\Theta_u = \frac{\Theta_{st}}{n} = \frac{36^{\circ}}{4} = 9^{\circ} \quad (18)$$

I_1 ir I_5 vertės yra apskaičiuojamos remiantis formule 17, tam kad variklis dirbtų 9 mikrožingsniu. Rezultatai pateikti lentelėje. Jie yra išreikšti santykiu I_M .

$$I_1 = \frac{I_1}{I_M} \quad I_5 = \frac{I_5}{I_M} \quad (19)$$

1 lentelė. Modelio skaičiavimai.

Θ ,deg	0	9	18	27	36
I_1	1	0,9358	0,7439	0,4293	0
I_5	0	0,4293	0,7439	0,9358	1

Tarkim. Kad n yra 8, mikrožingsnio kampas yra 4,5

$$\Theta_{\mu} = \frac{\Theta_{st}}{10} = 4,5^{\circ} \quad (20)$$

Tokiu atveju variklis padarys 4000 mikrožingsnių per apsisukimą. Naudojantis 19 ir 17, I_1 ir I_5 vertės yra apskaičiuojamos ir pateikiamos 2 lentelėje.

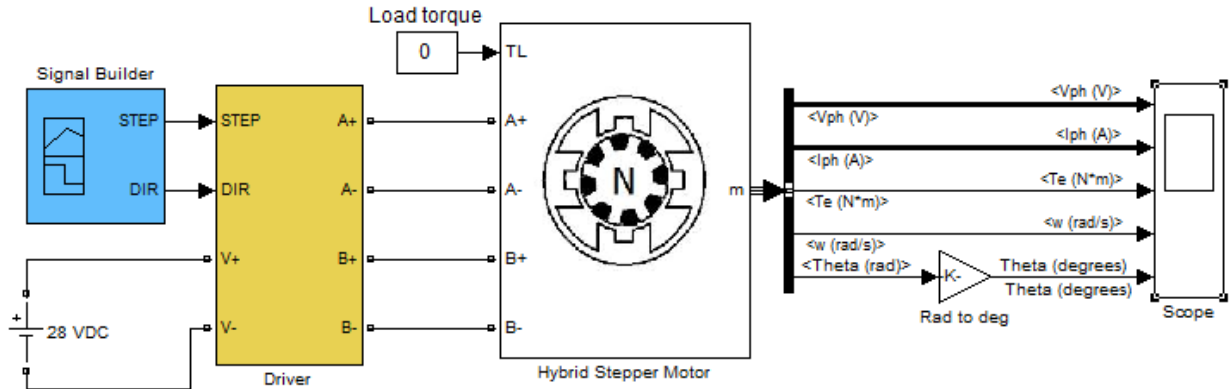
Srovės stipris natūraliam žingsniui, padalintam iš bet kokio teigiamo skaičiaus, gali būti apskaičiuojamas naudojantis aprašytu metodu [3].

2 lentelė. Skaičiavimai.

Θ ,deg	0	4,5	9	13,5	18	22,5
I_1	1	0,984	0,936	0,855	0,744	0,602
I_5	0	0,229	0,429	0,602	0,744	0,855
Θ ,deg	27	31,5	36			
I_1	0,429	0,229	0			
I_5	0,936	0,984	1			

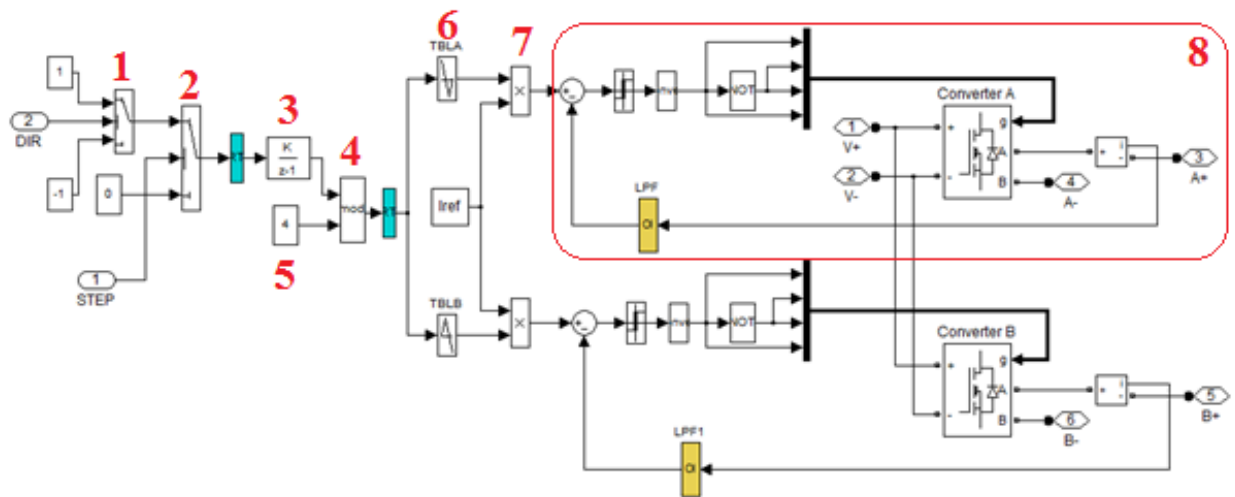
3.2 Penkiafazio žingsninio variklio imitacinio modelio sudarymas

Dvifazio žingsninio variklio modelis



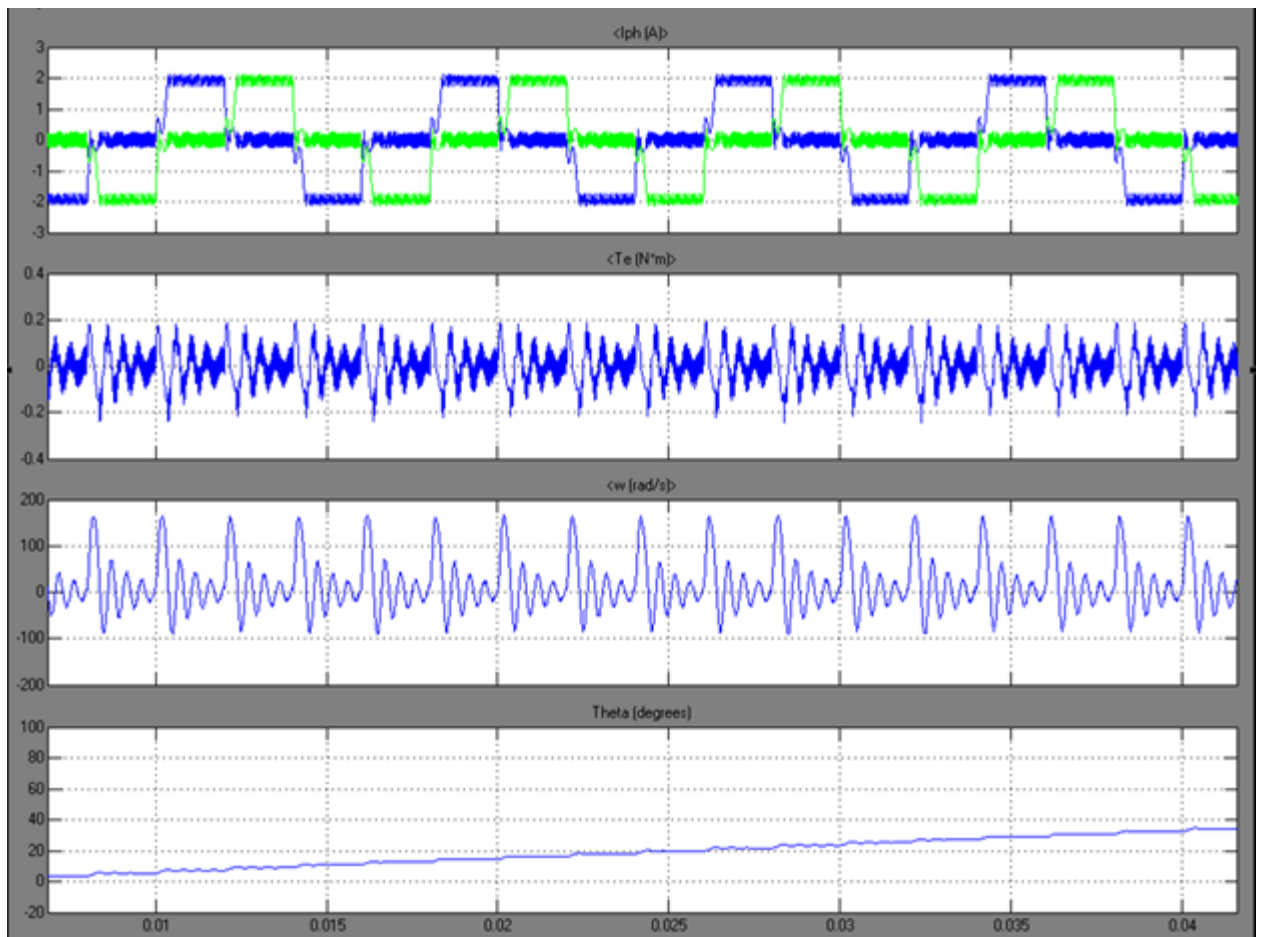
3.19 pav. Dvifazio žingsninio variklio „Simulink“ modelis [13]

Schemoje pavaizduotas dvifazis žingsninis variklis, kuris naudoja hibridinį dviejų fazių modelį, pasirinktą iš programinio paketo „MATLAB – Simulink“ valdymo skydelio. Variklio parametrai yra mažo žingsninio variklio, dydis 23. Variklio fazės yra maitinamos dviejų H-tiltinių MOSFET impulso pločio moduliacijos konverteriu (PWM – impulso pločio moduliacija). Nuolatine įtampa (DC) maitinamas 28 V DC įtampos šaltiniu. Variklio srovės yra atskirai reguliuojamos dviejų, histerize paremtu valdikliu, kurie generuoja MOSFET įrenginio signalus, pagal išmatuotos srovės ir jos kitimo palyginimu. Srovės yra reguliuojamos komparatoriaus histerizės kilpa. Perjungimo dažnis yra įvairus ir priklauso nuo variklio parametrų. Tai yra vienos fazės sukėlimo schema, panaudota dėl jos paprastumo. Stačiakampio signalo srovės kitimai yra generuojami panaudojant srovės amplitudę ir žingsnio dažnio parametrus, detalizuotus valdymo skydelyje. Žingsninio variklio sukimasis yra reguliuojamas (STEP – žingsnis) ir (DIR – kryptis) signalais, gaunamais iš signalų bloko. (STEP) reguliuoja žingsnius, (DIR) reguliuoja kryptį į kurią variklis turi sukis.



3.20 pav. Dvifazio žingsninio variklio valdiklio Simulink modelis [13]

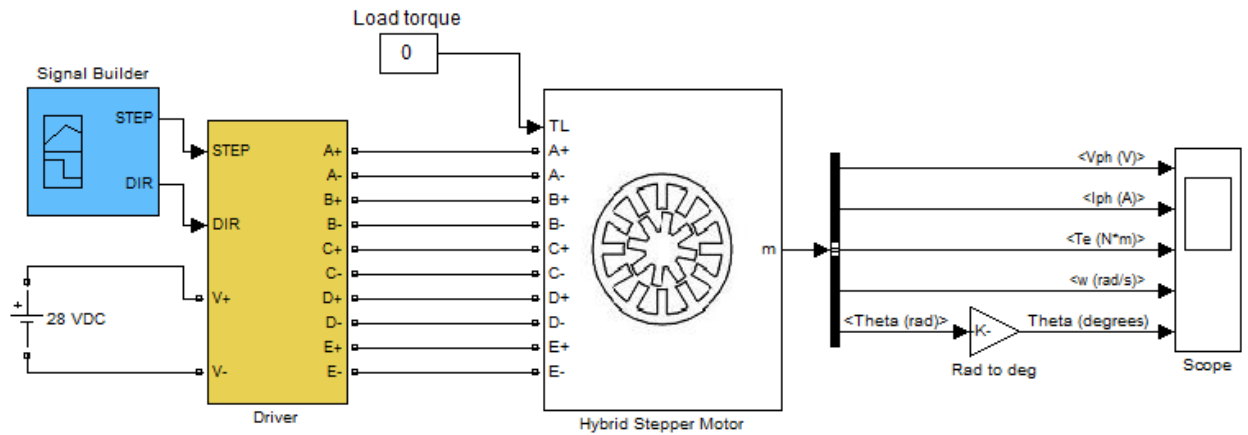
1. Pirmuoju numeriu schemoje pavaizduotas blokas, tai valdymo kontaktai skirti kryptiai (DIR) nustatyti ir žingsniui (STEP).
2. Antruoju numeriu pažymėtas blokas yra rėlės perjungiklis (selektorius). Šis nustatomas tuomet, kai parenkami valdymo parametrai pažymėti pirmuoju numeriu.
3. Integratorius.
4. Dalybos modulis, kuriam užduodamas konstanta.
5. Žingsnių skaitiklis.
6. Penktuoju numeriu pažymėtos konstantos dydis atitinka lentelės dydį lentelėje (TBLA).
7. Daugiklyje lentelės reikšmės padauginamos iš atraminės srovės.
8. PWM (Impulso pločio moduliacija) generatorius/srovės stabilizatorius palaiko nustatyto taško srovę.



3.21 pav. Dvifazio žingsninio variklio „Matlab“ modelio oscilografo rodmenys [13]

3.21 paveiksle lange atvaizduota dvifazio žingsninio variklio fazių srovių kitimo diagrama. Žalia spalva žymima pirmoji srovė, mėlyna – antroji srovė.. Iš „Simulink“ programos pavyzdžio, matosi, kad srovės kinta per 2 A teigiama, ir 2 A neigiama srove. Antrajame lange atvaizduota dvifazio žingsninio variklio sukimo momento diagrama. Iš diagramos matosi, kad maksimalus žingsnio sukimo momentas yra 0,22 N·m. Trečiajame oscilogramos lange matosi žingsnio kampinis dažnis su žingsnio švytavimais. Ketvirtame oscilogramos lange atvaizduotas kampo kitimas laipsniais. Iš grafiko matosi, kad keičiantis fazių srovių poliškumui, ir persijunginėjant fazėms, atsiranda netikslus sukimo momentas bei kampinis dažnis. Dėl šių netiesiškumų, posūkio kampo kreivėje, atsiranda netolygumų ir bangavimų.

Penkiafazio žingsninio variklio modelis



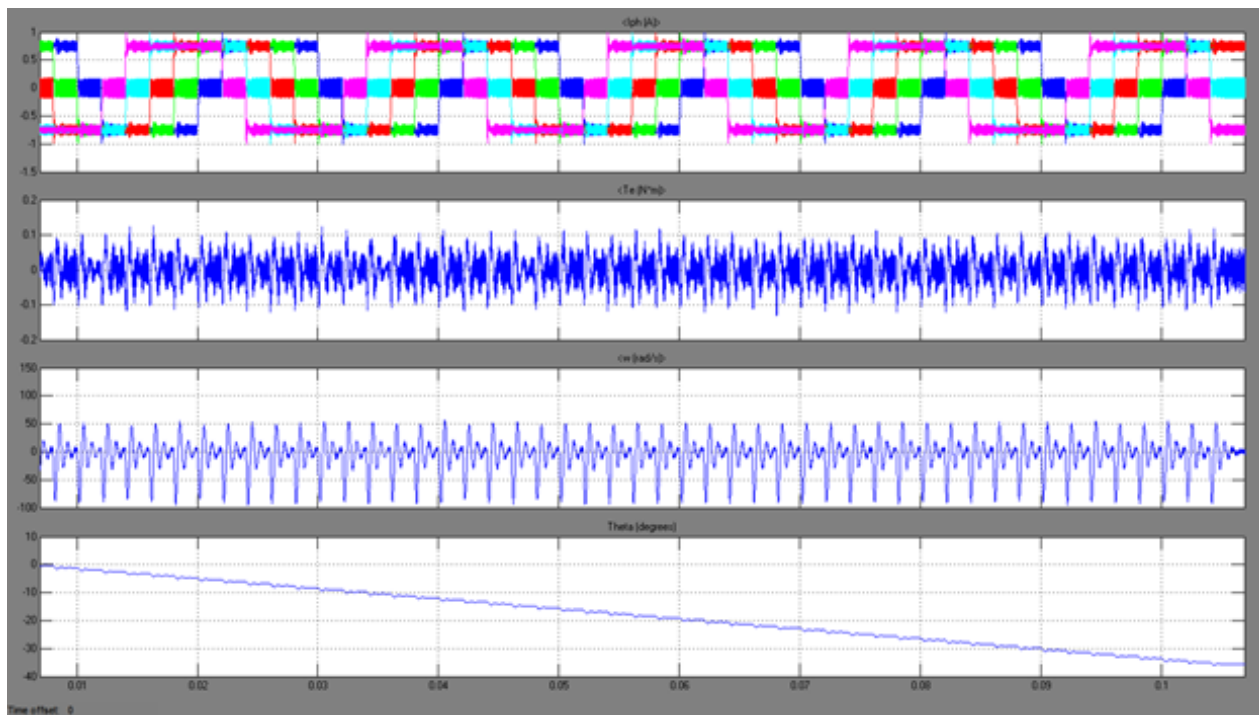
3.22 pav. Penkiafazio žingsninio variklio valdiklio „Simulink“ modelis.

Iš esmės penkiafazio ir dvifazio modeliai nedaug kuo skiriasi. Kaip pavyzdys buvo paimtas dvifazio modelis, pakeisti variklio parametrai iš dvifazio į penkiafazį. Pagal variklio gamintojo duotą variklio specifikacijų lentelę, į modelio variklio parametrų lentelę surašyti tiriamojo variklio parametrai. Kadangi penkiafazio variklis turi daugiau apvijų ir polių reikėjo pertvarkyti ir variklio valdymo schemą. Valdymo fazių skaičius buvo padidintas nuo keturių iki dešimties. Toliau visa kita liko taip pat kaip ir dvifazio variklio modelyje.



Timing diagram for a 10-bit shift register. The diagram shows five waveforms: Pulse Input, A Phase, B Phase, C Phase, D Phase, and E Phase. The Pulse Input is a clock signal with pulses at every 10th unit. The A Phase through E Phase are data signals that shift right by one unit per clock pulse. The A Phase starts at 0, B Phase starts at 1, C Phase starts at 0, D Phase starts at 1, and E Phase starts at 0. The diagram is labeled with units 0 through 9 at the top.

39

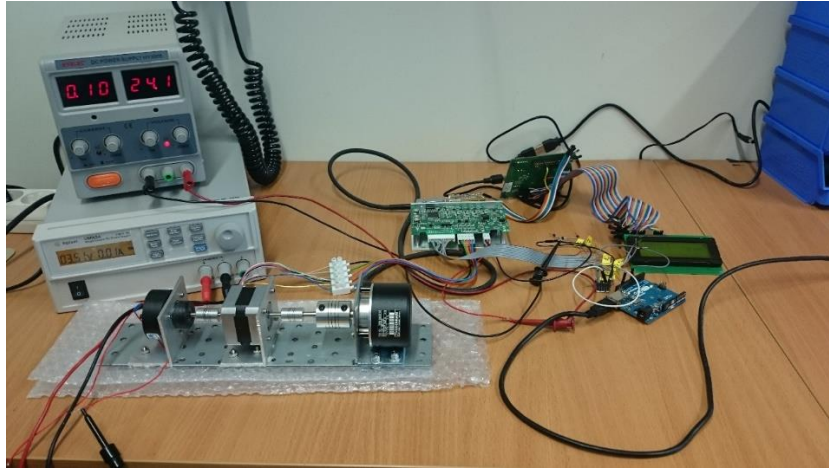


3.25 pav. Penkiafazio žingsninio variklio „Matlab“ modelio oscilografo rodmenys.

3.25 paveiksle, pirmajame lange atvaizduota penkiafazio žingsninio variklio fazių srovių kitimo diagrama. Grafike matosi visos penkios fazės: rožine spalva – pirmą fazę, žydra – antrąją, raudona – trečiąją, žalia – ketvirtąją ir mėlyna spalva penktąją fazę. Srovių pokytis 0,75A teigiama ir 0,75A neigiama srove. Antrajame oscilogramos grafike matosi penkiafazio žingsninio variklio sukimo momento diagrama. Maksimalus žingsnio sukimo momentas siekia 0,13 N·m. Trečiajame oscilogramos lange matosi kampinio dažnio pokytis su švytavimais kiekviename žingsnyje. Ketvirtame oscilogramos lange atvaizduotas kampo kitimas laipsniais. Iš grafiko matosi, kad keičiantis fazių srovių poliškumui, ir persijunginėjant fazėms, atsiranda netikslus sukimo momentas bei kampinis dažnis. Dėl šių netiesiškumų, posūkio kampo kreivėje, atsiranda netolygumų ir bangavimų.

4. TIRIAMOJI DALIS

4.1 Tiriamosios sistemos maketo sudarymas



4.1 pav. Tiriamosios sistemos maketas.

Tiriamajame makete naudojamas autokoreliatoriaus penkiafazis žingsninis variklis, kurio parametrai yra:

- Modelis – PK543-B (ašis iš dviejų pusių).
- Maksimaliai išlaikomas sukimo momentas $0,13\text{N}\cdot\text{m}$.
- Rotoriaus inercija $35\cdot 10^{-7}\text{J}$.
- Srovė vienai fazei $0,75\text{A}$.
- Apvijos varža $1,7\Omega$.

Žingsninio variklio valdiklis



4.2 pav. Penkiafazio žingsninio variklio valdiklis „Sanmotion F5“ [14]

Penkiafazio žingsninio variklio valdymui pasirinktas naujo tipo valdiklis „Sanmotion F5“. Viena iš pagrindinių šio valdiklio savybių yra paprastas jo valdymas. Valdyti penkiafazį žingsninį variklį užtenka pagal pasirinkto variklio parametrus, rankiniu būdu nustatyti

perjungiklius ir į valdiklio įėjimą paduoti vienetinius impulsus. Valdiklis gaudamas vienetinius impulsus generuoja išėjime fazinį pasislinkimą laike. Valdiklio korektiškam darbui valdiklis turi būti valdomas 5V įėjimo impulsais.

ŽYMĖJIMAS	0	1	2	3	4	5	6	7
VARIKLIO SROVĖ	1.4A	1.35A	1.3A	1.25A	1.2A	1.15A	1.1A	1.05A
ŽYMĖJIMAS	8	9	A	B	C	D	E	F
VARIKLIO SROVĖ	1.0A	0.95A	0.9A	0.85A	0.8A	0.75A	0.7A	0.65A

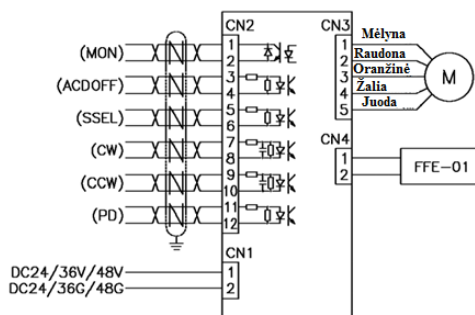


4.3 pav. Variklio parametrai ir žingsnio dalinimas nustatomi potenciometais [14]

Pagal variklio parametrus pirmuoju potenciometu nustatoma valdiklio srovė. Perjungiklių bloke rankiniu būdu nustatomas valdymo tipas, žingsnio režimas mikrožingsniais, valdiklio valdymas penkioms fazėms. Toliau pagal gamintojo duotą lentelę, naudojant potenciometrus SS1 ir SS2 pasirenkamas žingsnio dalinimas.

3 Lentelė. Žingsnio skyros parinktys

Penkių fazių valdymas			
SS1,SS2	Žingsnio dalinimas	Rezoliucija	Žingsnio kampas
0	1	500	0.72°
1	2	1000	0.36°
2	2.5	1250	0.288°
3	4	2000	0.18°
4	5	2500	0.144°
5	8	4000	0.09°
6	10	5000	0.072°
7	20	10000	0.036°
8	25	12500	0.0288°
9	40	20000	0.018°
A	50	25000	0.0144°
B	80	40000	0.009°
C	100	50000	0.0072°
D	125	62500	0.00576°
E	200	100000	0.0036°
F	250	125000	0.00288°



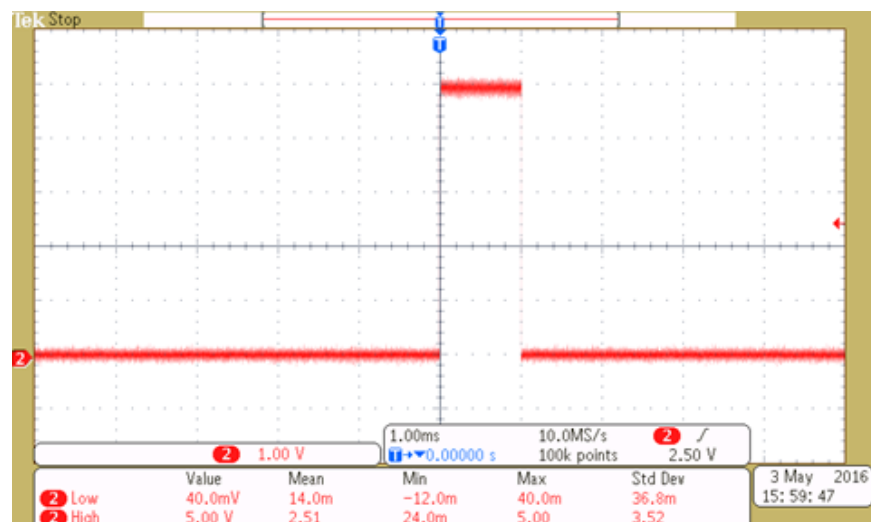
4.4 pav. Išorinė variklio valdiklio prijungimo schema [14]

Variklio valdymui pasirinktas CW-CCW valdymo būdas (angl. *ClockWise* – pagal laikrodžio rodyklę, *CCW- CounterClockWise* – prieš laikrodžio rodyklę). Šis valdymo būdas pagrįstas tuo, į 7 valdiklio įėjimo kontaktą paduodant 5 V valdymo impulsą variklis suksis pagal laikrodžio rodyklę. Paduodant į 9 valdiklio įėjimo kontaktą 5V, variklis suksis prieš laikrodžio rodyklę. 8 ir 10 valdiklio kontaktai turi būti prijungti prie GND (bendrojo laido).

Kadangi reikia į variklio valdymo valdiklį paduoti valdymo impulsus, reikalingas kitas valdiklis kuris generuotų juos. Pasirinktas „Arduino Uno“ valdiklis, kuris panaudotas kaip impulsų generatorius. Arduino valdikliui parašytas valdymo kodas valdymui iš kompiuterio (kodas skyriuje PRIEDAI).



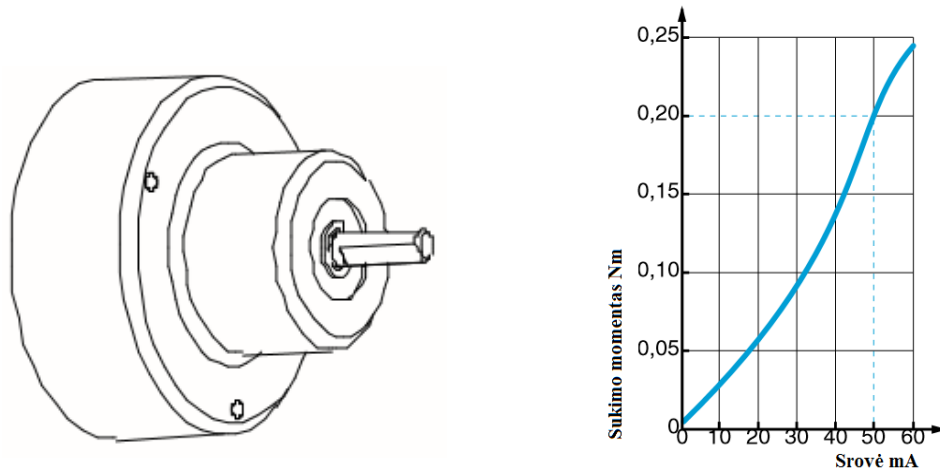
4.5 pav. Arduino Uno valdiklis [21]



4.6 pav. Arduino Uno valdiklio 5V amplitudės išėjimo impulsas. Osciloskopo rodmenys.

Paveiksle iš „Arduino Uno“ į valdiklį siunčiamas impulsinis signalas. Žemas lygis yra iki 40 mV, aukštas lygis 5 V, Laikas 1 ms.

Kadangi nežinoma, kokia reduktoriaus apkrova apkraunama penkiafazio žingsninio variklio ašis autokoreliatoriuje, variklio tyrimui panaudotas elektrinis stabdis.FAS2M.



4.7 pav. Elektrinis stabdis ir jo charakteristikų grafikas [20]

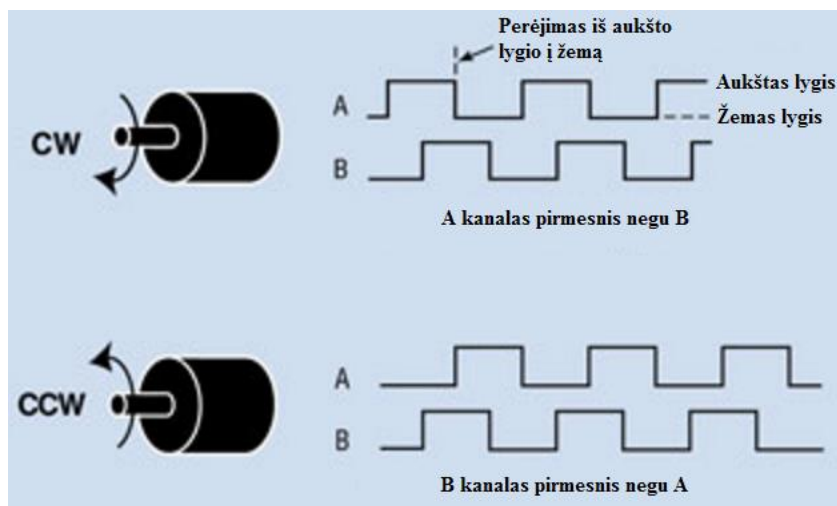
4 Lentelė. Elektrinio stabdžio specifikacijos

Vardinis sukimo momentas	(N·m)	0,20
Minimalus sukimo momentas	(N·m)	0,007
Apvijos varža 20°C	(Ω)	195
Nominali srovė DC	(A)	0,05
Rotoriaus inercija	(kg·m ²)	0,8·10 ⁻⁶
Svoris	(kg)	0,20

Posūkio kampo matuoklis

Tiriamosios sistemos makete, posūkio kampui matuoti panaudotas didelio tikslumo Haidenhain ROD 420, 5000 žingsnių posūkio kampo matuoklis.

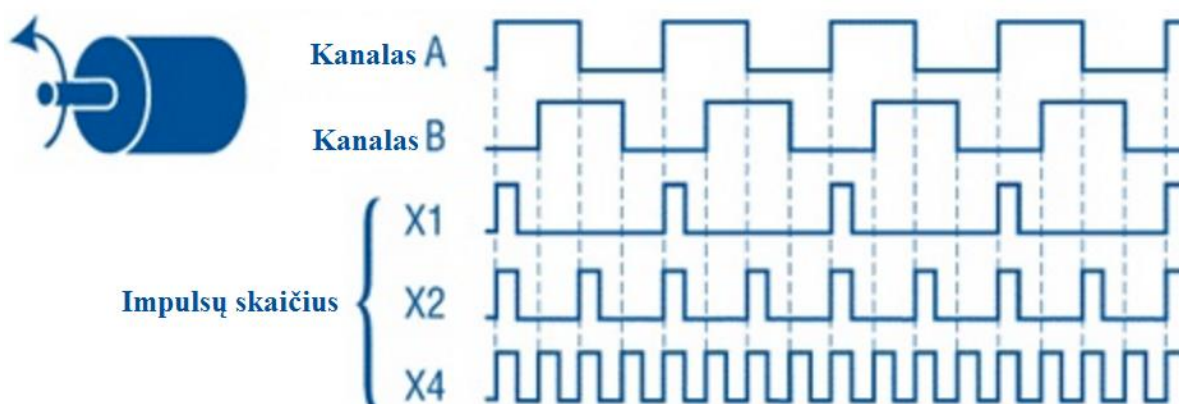
Posūkio kampo matuoklio veikimo principas yra nesudėtingas. Kodavimo įrenginio viduje esantis kodo diskas turi du takelius, paprastai pažymėtus A ir B kanalais. Šie kanalai užkoduoti 90 elektrinių laipsnių per fazę ir tai yra svarbiausias elementas, nuo kurio priklauso įrenginio funkcionalumas. Srityse, kuriose reikalaujamas krypties jautrumas, duomenų valdytojas arba pultas gali nustatyti judėjimo kryptį, remdamasis A ir B kanalų fazių sąryšiu. 5.1.8 paveiksle, kuomet kodavimas sukasi pagal laikrodžio rodyklę – jo signalas rodytų, kad kanalas A pirmauja prieš kanalą B. Kai jis suksis kita kryptimi, bus priešingai [21].



4.8 pav. Posūkio kampo matuoklio veikimo schema [19]

Nepriklausomai nuo krypties, pozicija taip pat gali būti stebima su kodavimo įrenginiu, kai bus leidžiamas kitas signalas, žinomas kaip „markeris“, „indeksas“ ar Z kanalas. Šis Z signalas atsiranda kartą per pilną kodavimo įrenginio apsisukimą, dažniausiai naudojamas nustatyti specialią poziciją per 360° apsisukimą.

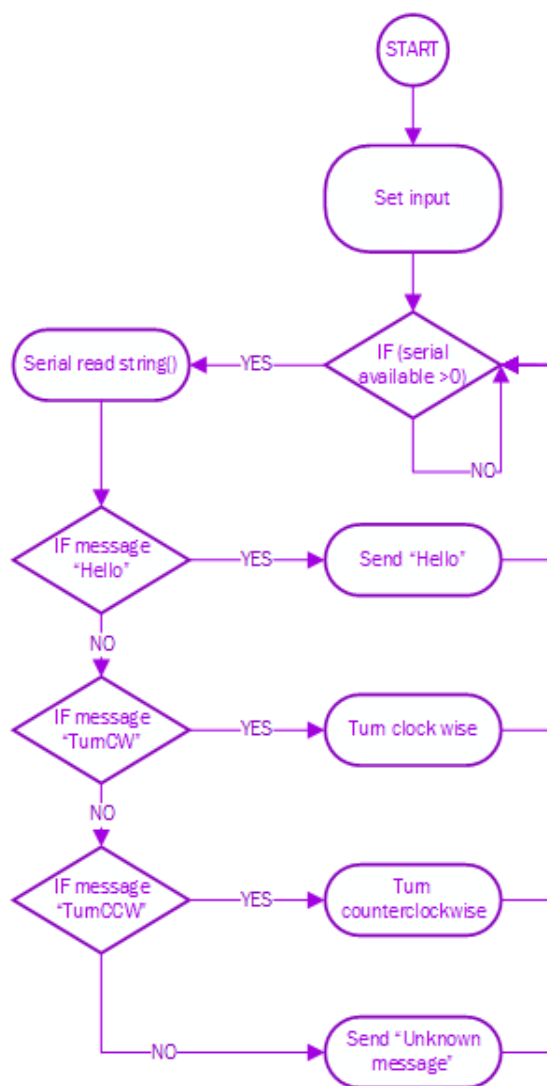
Kai reikia didesnio apsisukimo tikslumo, įmanoma skaitikliui skaičiuoti pirmuosius ir paskutiniuosius impulso frontus įrenginio impulsų grandinėje iš vieno kanalo, kuris padvigubina impulsų skaičių. Per apsisukimą. Skaičiuojant ir pirmuosius ir paskutinius frontus abiejų įrenginio kanalų, impulsų skaičių galima padidinti net 4 kartus per pilną apsisukimą. Rezultate 10 000 impulsų per apsisukimą gali būti sugeneruota iš kodavimo įrenginio. Standartiškai šis įrenginys padidinus jo tikslumą 4 kartus generuoja tik ± 1 impulso paklaidą, todėl tiriamosios sistemos makete panaudotas 4 kartus padidintas tikslumas. Rezultatas 20 000 impulsų per apsisukimą [15; 19; 20]



4.9 pav. Posūkio kampo matuoklio padidintos skyros atvaizdavimas grafiškai [19]

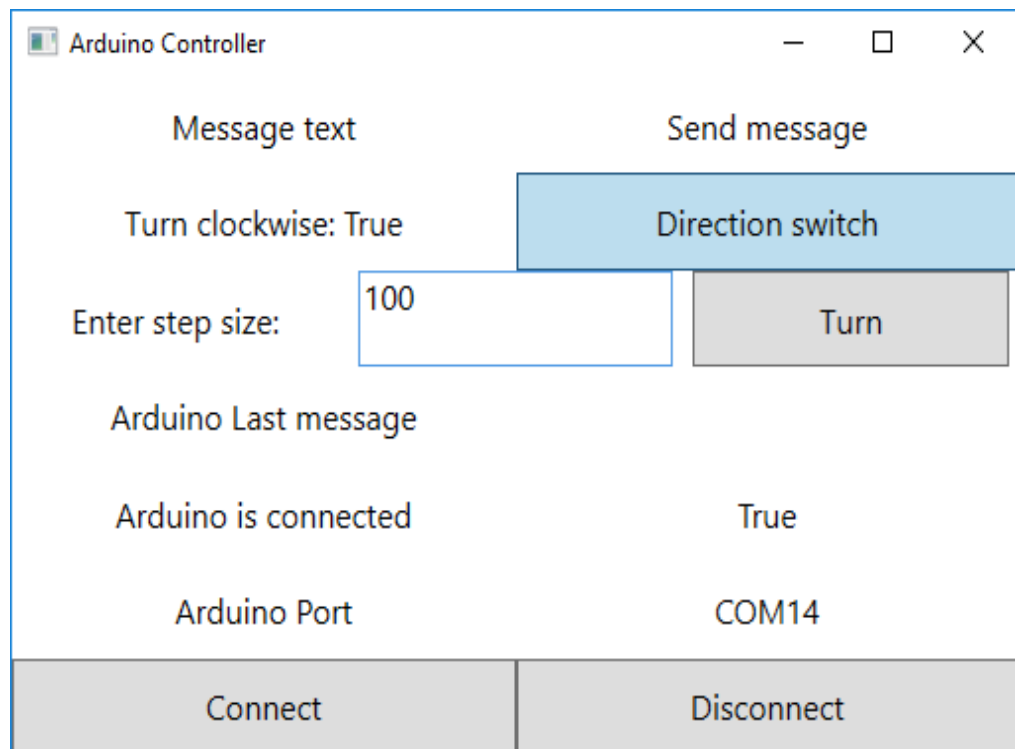
4.2 Valdiklio veikimo algoritmo ir programos sudarymas

Norint valdyti žingsninį variklį reikia jam siųsti srovės impulsus, todėl reikėjo valdikliui parašyti kodą, kurios pagalba galima būtų visa tai atlikti. Žemiau pateiktas programinio kodo algoritmas. Programos pradžioje nustatomi valdiklio signalų išėjimo kontaktai, kur kuris kontaktas. Tuomet siunčiamos komandų reikšmės ir tikrinamos, jeigu reikšmė yra 0, tuomet vėl tikrinama, vyksta pastovi tikrinimo procedūra. Jeigu reikšmė yra teigiama >0 daugiau už nulį, tuomet pradedama nuskaityti siunčiama žinutė. Jei nuskaityta žinutė yra „Hello“, tuomet veiksmas grįžta atgal į tikrinimo skiltį. Jeigu atėjo žinutė „TurnCW“ (pasukti pagal laikrodžio rodyklę), tuomet bus siunčiamas signalas sukti pagal laikrodžio rodyklę, o jei atėjo žinutė „TurnCCW“ (suktis prieš laikrodžio rodyklę), bus nusiųsta žinutė į valdiklį suktis prieš laikrodžio rodyklę. Jei tarkim bus nusiųsta netaisyklinga žinutė, bus užrašoma „Unknown message“ (angl. nežinoma žinutė).



4.10 pav. „Arduino Uno“ valdiklio programos algoritmas

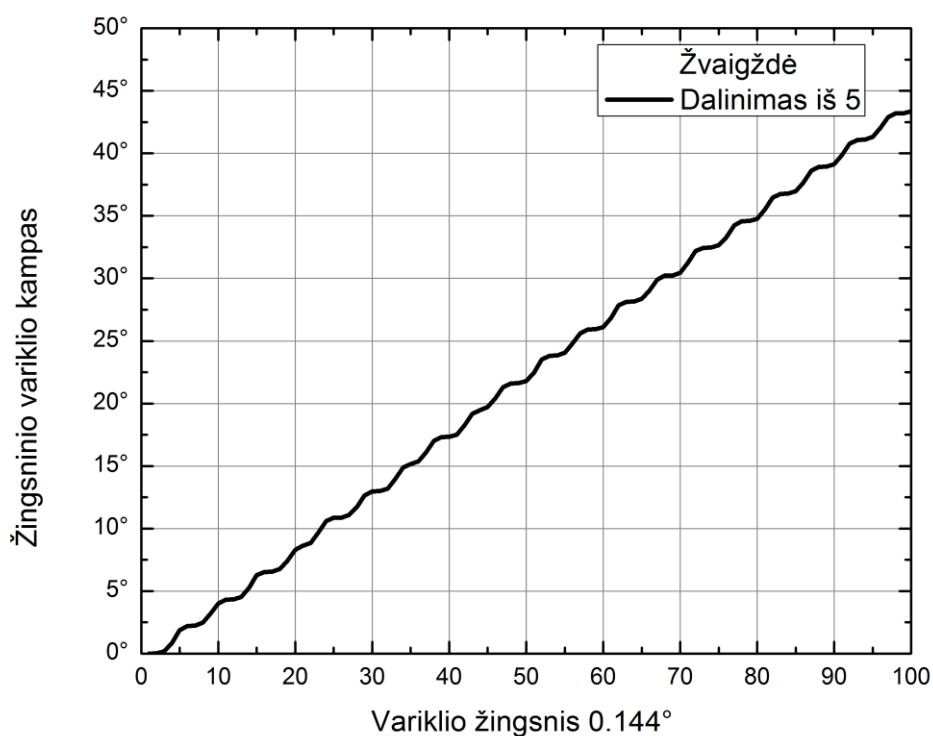
Variklio valdymui iš kompiuterio naudojant „C-Sharp“ programinį paketą buvo parašyta programos vartotojo sąsaja, kuria būtų paprasta naudotis. Ja galima, pasirinkti sukimosi kryptį, žingsnių skaičių, patikrinti ar valdiklis yra prisijungęs, automatiškai nuskaitymas COM’portas, prie kurio prisijungta ir parodoma ar komanda išsiųsta teisingai, ar įvestas teisingas, sveikas žingsnių skaičius.



4.11 pav. Valdymo iš kompiuterio programos langas.

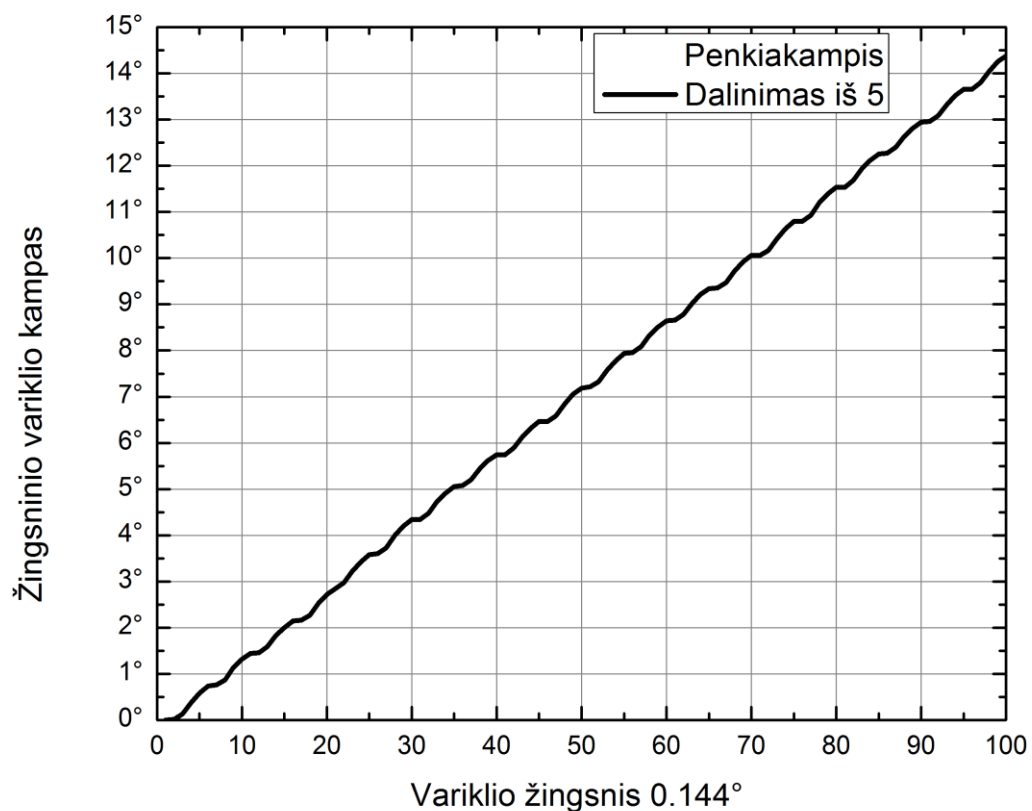
4.3 Mikrožingsninės pavaros eksperimentinis tyrimas

Tyrimas vyko dviem etapais. Pirmajame tyrimo etape, penkiafazis žingsninis variklis buvo prijungtas kaip autokoreliatoriuje, žvaigžde. Antrajame tyrimo etape, variklis buvo prijungtas penkiakampiu. Su penkiafaziu žingsniniu varikliu, sumontuotu ant stendo, atliktas mikrožingsnio tyrimas. Nustatomas žingsnio dalinimas ir žingsniuojamas po 100 žingsnių. Po kiekvieno žingsnio, posūkio kampo matuoklio rodmenys užrašomi. Tokiu būdu atlikti daugiau nei 40 matavimų su skirtingais žingsnio padalinimais iš 0, 2, 2.5, 4, 5, 8. Taip pat su kiekvienu žingsnio dalinimu ištirtos variklio charakteristikos naudojant elektrinį stabdį. Žemiau pateikti (5.3.1 ir 5.3.2 pav.) du pirminio matavimo pavyzdžiai su žingsnio dalinimu iš 5. Idealiomis sąlygomis, grafikai turėtų būti tiesės, tačiau dėl mechaninių variklio, fazės apvijos, varžos ir valdiklio netikslumų atsiranda pasikartojančios sinusoidinės paklaidos. Šios netobulumo paklaidos atsispindi grafikuose.



4.12 pav. Penkiafazio žingsninio variklio jungimas žvaigžde su žingsnio dalinimu iš 5.

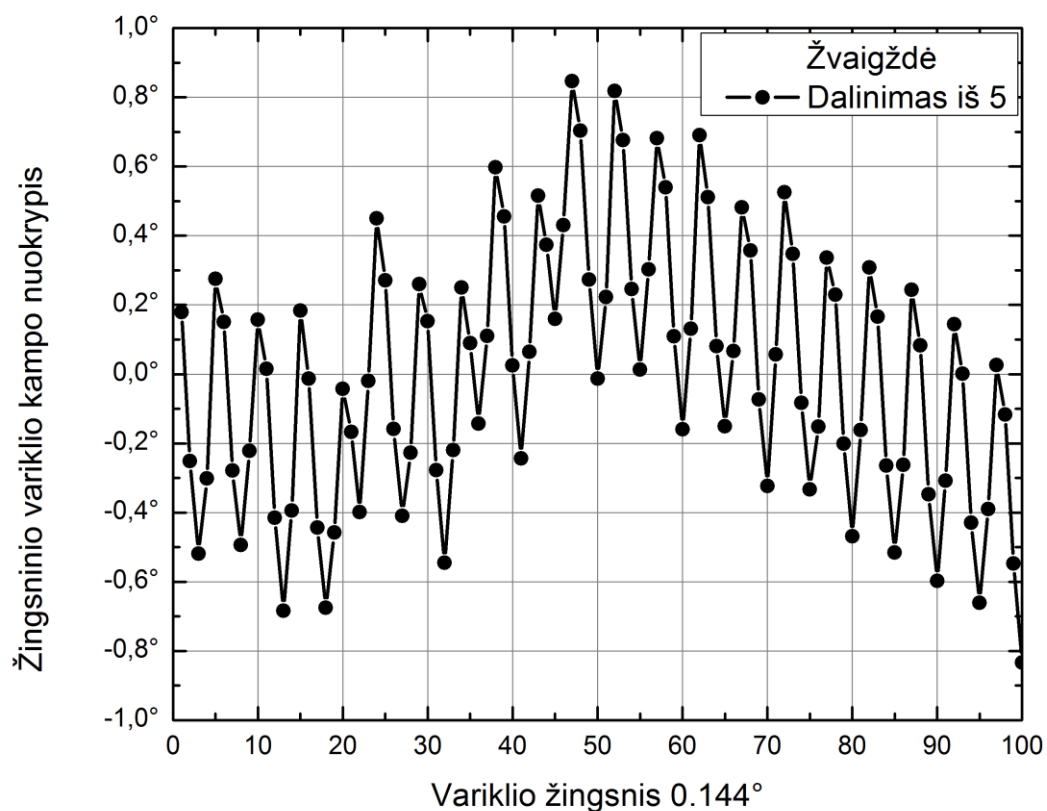
4.12 grafike, vienas variklio žingsnis teoriškai yra $0,144^\circ$, tačiau iš grafiko matyti, kad per 100 mikrožingsnių variklis pasisuko net 43° , o tai yra negerai. Su šiuo žingsnio dalinimu žingsninis variklis turėtų pasisukti apie $14,4^\circ$. Iš čia galima spėti, kad su šiuo žingsninio variklio prijungimo būdu autokoreliatoriuje atsiranda didelės paklaidos, nes žingsnio dydis yra 3 kartus didesnis.



4.13 pav. Penkiafazio žingsninio variklio jungimas penkiakampiu su žingsnio dalinimu iš 5.

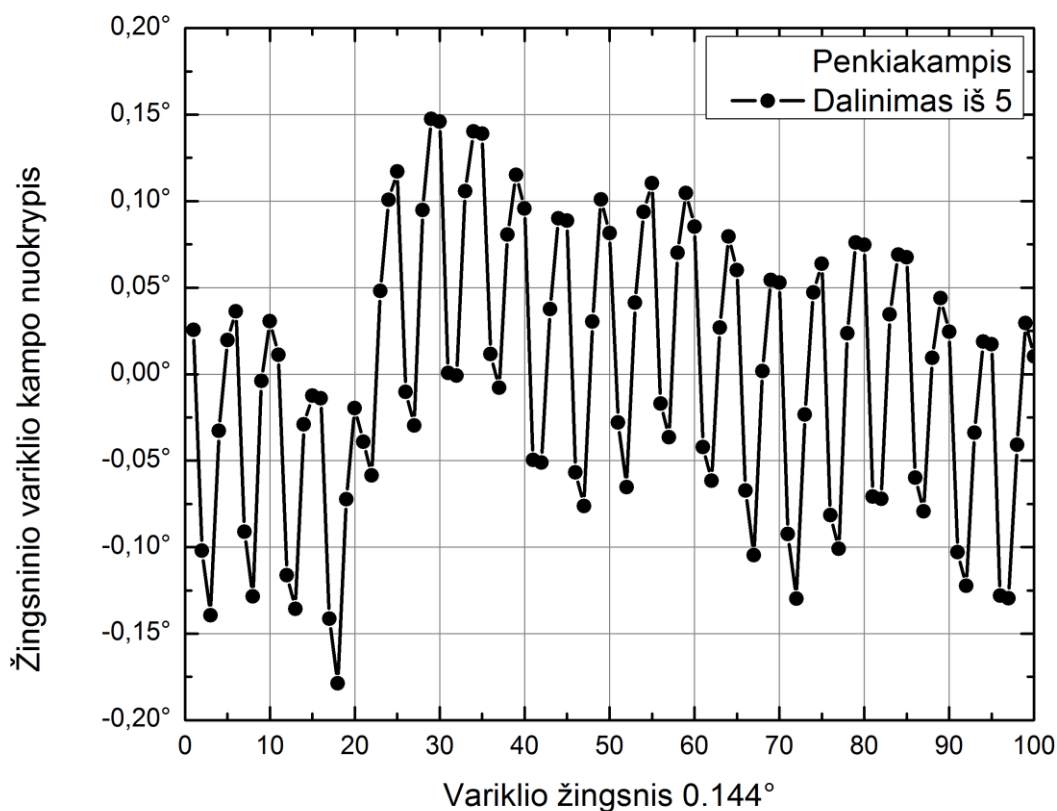
4.13 grafike, taip pat vienas variklio žingsnis teoriškai yra $0,144^\circ$. Iš grafike matosi, kad žingsninis variklis per 100 žingsnių pasisuko teisingai $14,4^\circ$.

Tokiu principu, kaip (4.12 ir 4.13 pav.) buvo sudaryti visi grafikai. Tiesinės aproksimacijos metodu, kiekvienas grafikas buvo aproksimuotas ir automatiškai programoje apskaičiuota vidutinė kvadratinė nuokrypa nuo aproksimacijos tiesės.



4.14 pav. Penkiafazio žingsninio variklio, jungimo žvaigždė, su žingsnio dalinimu iš 5, grafiko apsoksimacija.

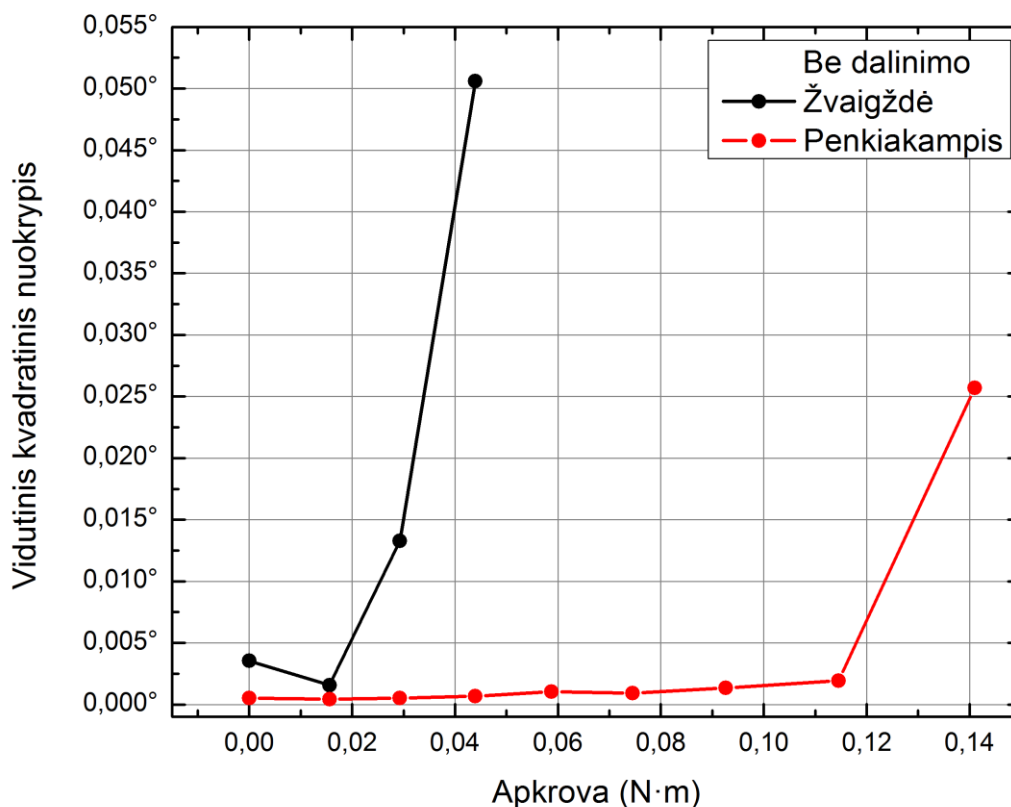
Kiekvienas juodas taškas grafike 4.14 žymi žingsnį. Iš grafiko matosi, kad žingsnio nuokrypa žvaigždės jungimu yra didelė. Nuokrypos nuo aproksimacijos tiesės, nulinės horizontalės, paklaidos į vieną ir kitą pusę siekia po $0,8^\circ$, o bendra paklaidos amplitudė net $1,6^\circ$ per 100 žingsnių.



4.15 pav. Penkifazio žingsninio variklio, jungimo penkiakampiu, su žingsnio dalinimu iš 5, grafiko aproksimacija.

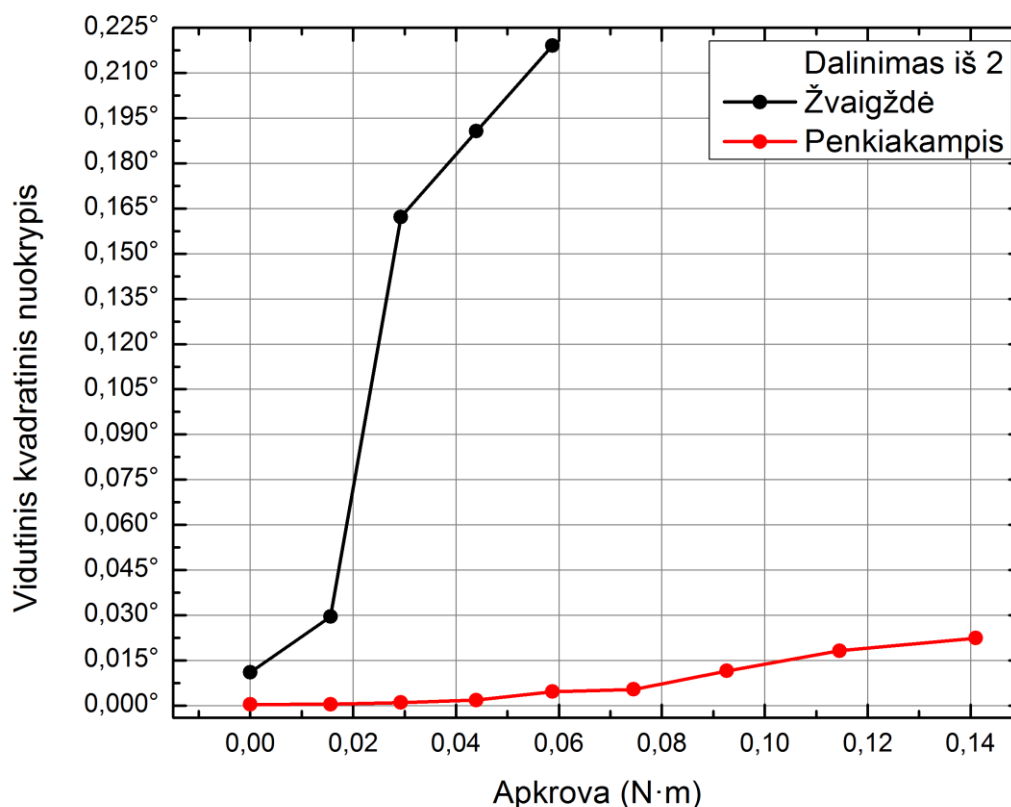
Iš 4.15 grafiko matosi, kad kitaip nei jungimo žvaigžde grafike, jungimo penkiakampiu tikslumas yra žymiai geresnis. Nuokrypos nuo aproksimacijos tiesės, nulinės horizontalės, paklaidos į vieną ir kitą pusę siekia apie $0,15^\circ$. Bendra paklaidos amplitudė yra $0,32^\circ$ per 100 žingsnių.

Toliau, pagal visų grafikų aproksimacijos duomenis, paskaičiuotos kiekvieno grafiko vidutinės kvadratinės nuokrypos. Duomenys sugrupuoti pagal žingsnio dalinimą ir žingsninio variklio jungimo būdą. Iš vidutinių kvadratinė nuokrypų sudaryti palyginimo grafikai, kuriuose atsispindi skirtumas tarp žingsnio dalinimų, skirtingo prijungimo būdo ir variklio mikrožingsnio charakteristikos pridėjus apkrovą.



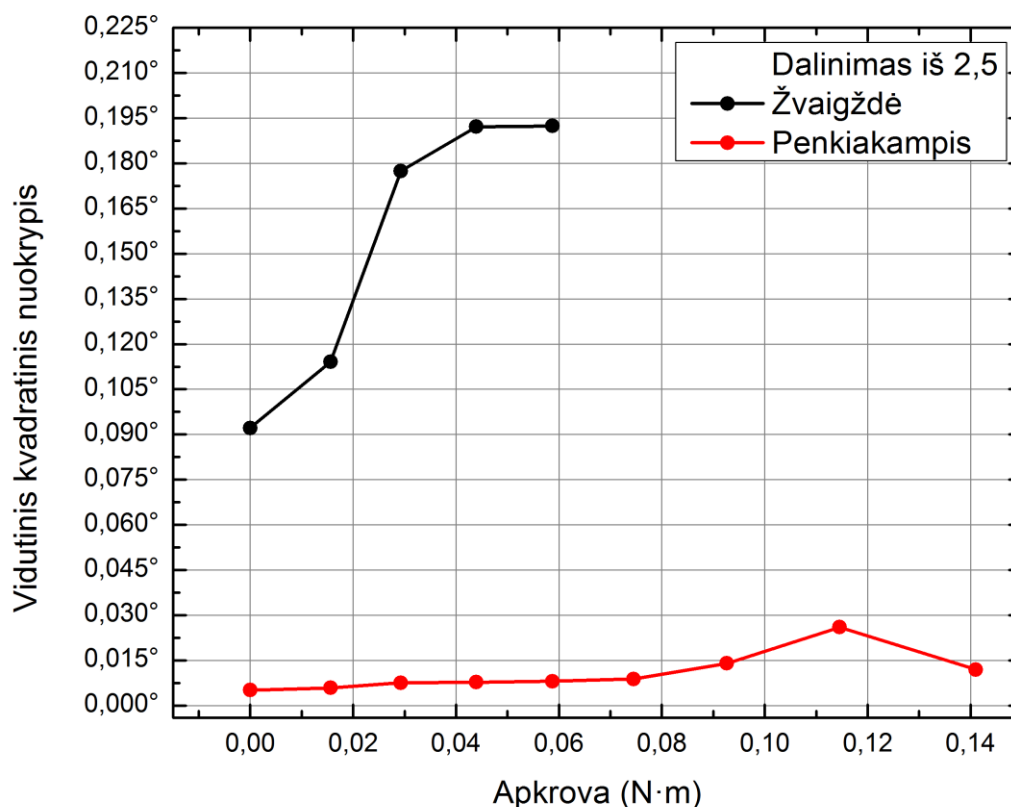
4.16 pav. Penkiafazio žingsninio variklio vidutinių kvadratinių nuokrypų grafikas, kai žingsnis nėra dalinamas. Juoda kreivė rodo žvaigždės jungimo būdą, raudona – jungimą penkiakampiu.

4.16 grafike atvaizduoti juodai jungimas žvaigžde, raudonai penkiakampiu jungimo būdai. Grafikas sudarytas iš vidutinių kvadratinių nuokrypų be žingsnio dalinimo prie taškais pažymėtų skirtingų apkrovų. Grafike matytosi, kad be apkrovos jungimo žvaigžde nuokrypis yra 0,004°, o jungimo penkiakampiu 0,001°. Prijungus variklio ašį su apie 0,015 N·m apkrova, abiejų tipų jungimo tikslumas padidėja ir tampa labai panašus 0,002°. Padidinus apkrovą iki 0,029 N·m, jungimo būdas žvaigžde tikslumas ženkliai sumažėja iki 0,013° lyginant su penkiakampiu. Penkiakampio tikslumas išlieka praktiškai toks pats kaip ir prie 0,015 N·m. Ties 0,043 N·m apkrova, jungimo žvaigžde tikslumas dar labiau sumažėja, 0,051°, o jungimas penkiakampiu prie tokios apkrovos toliau praktiškai nekinta. Prie 0,058 N·m apkrovos žingsninis variklis žvaigždės jungimu korektiškai nebesisuka dėl per didelės apkrovos. Penkiakampio jungimu variklis, su labai mažu paklaidos augimu korektiškai sukasi iki 0,114 N·m apkrovos. Nuo 0,114 N·m apkrovos paklaida pradeda drastiškai didėti. Prie 0,141 N·m apkrovos paklaida siekia 0,026°.



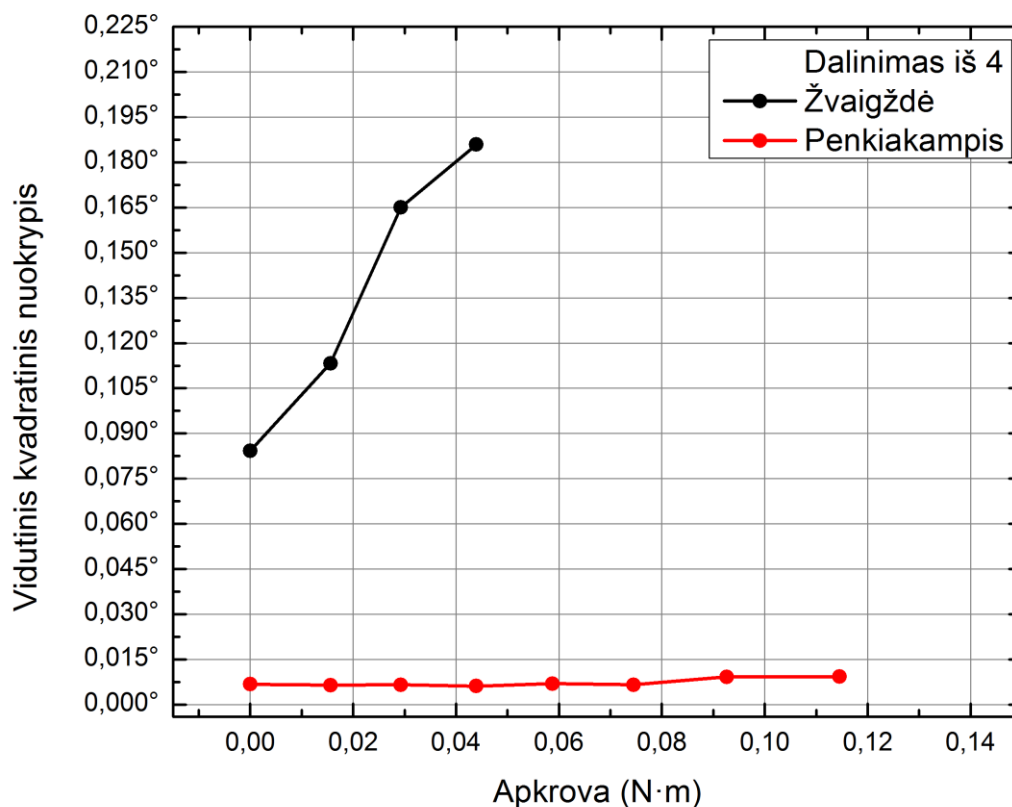
4.17 pav. Penkiafazio žingsninio variklio vidutinių kvadratinių nuokrypų grafikas, kai žingsnis dalinamas iš 2. Juoda kreivė rodo žvaigždės jungimo būdą, raudona – jungimą penkiakampiu.

Grafike 4.17 pavaizduotas žingsnio dalinimas iš 2. Juodai – jungimas žvaigžde, raudonai penkiakampiu jungimo būdai. Grafikas sudarytas iš vidutinių kvadratinių nuokrypų. Taškais pažymėti matavimai prie skirtingų apkrovų. Žingsnio dalinime iš dviejų be apkrovos, jungimo žvaigžde tikslumas mažesnis už jungimo penkiakampiu apytiksliai 0,013°. Prie 0,015 N·m apkrovos, jungimo žvaigžde paklaida padidėja apie 0,016°, o jungimo penkiakampiu paklaida išlieka tokia pati kaip ir be apkrovos praktiškai nulinė. Prie 0,029 N·m apkrovos jungimo žvaigžde paklaida padidėja 9 karus iki 0,164°, jungimo penkiakampiu paklaida padidėja apie 0,001°. Prie 0,043 N·m apkrovos jungimo penkiakampiu tikslumas sumažėja apie 0,002°. Jungimo žvaigžde tikslumas dar sumažėja iki 0,193°. Esant 0,058 N·m apkrovai, jungimo žvaigžde tikslumas sumažėja iki 0,221° ir nuo šios apkrovos, korektiškai nebevažiuoja dar didinant apkrovą. Nuo 0,058 N·m apkrovos tikslumas tolygiai mažėja iki pat iki 0,141 N·m apkrovos kol paklaida pasiekia 0,023° paklaidą. Apkrovus variklio ašį 0,141 N·m apkrova, šis korektiškai nebevažiuoja, kadangi vardinė maksimali variklio apkrova siekia 0,13 N·m (kuri tikrai yra su atsarga).



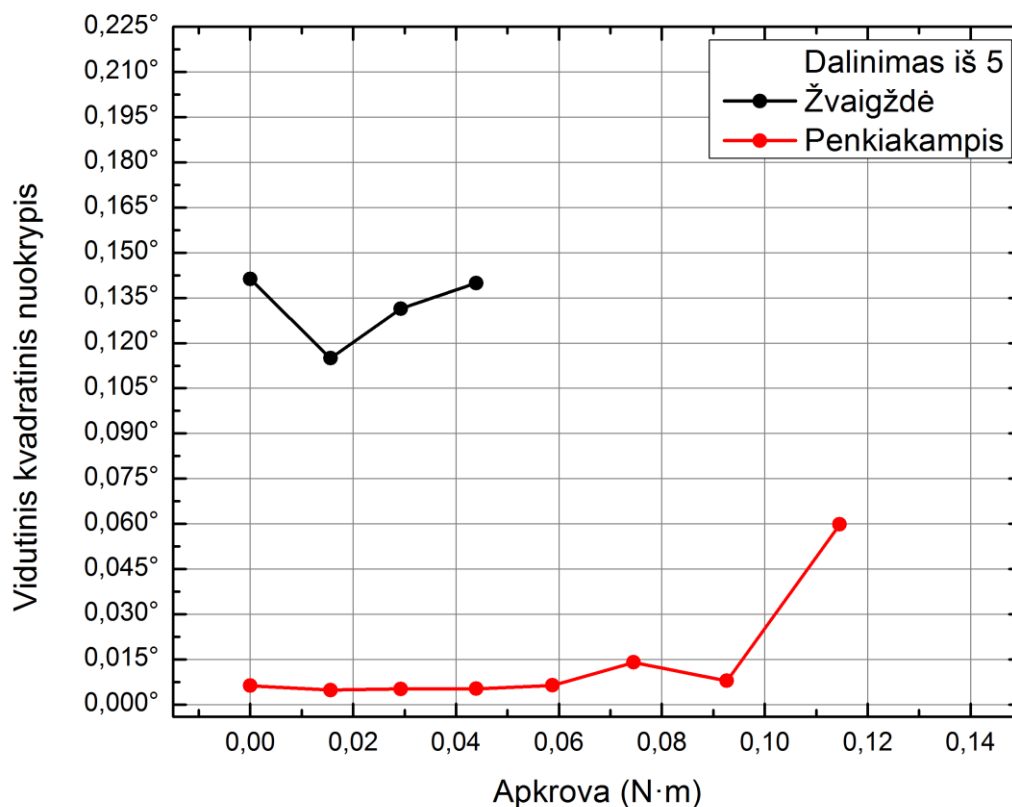
4.18 pav. Penkiafazio žingsninio variklio vidutinių kvadratinių nuokrypų grafikas, kai žingsnis dalinamas iš 2,5. Juoda kreivė rodo žvaigždės jungimo būdą, raudona – jungimą penkiakampiu.

Grafike 4.18 pavaizduotas žingsnio dalinimas iš 2,5. Juodai – jungimas žvaigžde, raudonai penkiakampiu jungimo būdai. Grafikas sudarytas iš vidutinių kvadratinių nuokrypų. Taškais pažymėti matavimai prie skirtingų apkrovų. Žingsnio dalinime iš 2,5 be apkrovos, jungimo penkiakampiu tikslumas siekia apie 0,006°. Jungimo žvaigžde paklaida yra 0,092°. Prie 0,015 N·m apkrovos jungimo žvaigžde tikslumas yra apie 0,113°, o jungimo penkiakampiu tikslumas 0,008°. Esant 0,029 N·m apkrovos, jungimo žvaigžde paklaida išauga iki 0,178°. Prie 0,043 N·m jungimo žvaigžde paklaida padidėja iki 0,193° ir nekinta iki 0,058 N·m apkrovos, vėliau didinant apkrovą taisykliai nebesisuka. Jungimo penkiakampiu prie 0,043 N·m, paklaida apie 0,012°, ir su nežymiu didėjimu didėjant apkrovai iki 0,074 N·m išlieka tokia pati. Nuo 0,074 N·m apkrovos, tikslumas jungimo penkiakampiu mažėja iki 0,114 N·m – 0,027°. Prie 0,141 N·m apkrovos jungimo penkiakampiu vidutinė žingsnio paklaida yra 0,014°.



4.19 pav. Penkiafazio žingsninio variklio vidutinių kvadratinių nuokrypų grafikas, kai žingsnis dalinamas iš 4. Juoda kreivė rodo žvaigždės jungimo būdą, raudona – jungimą penkiakampiu.

Grafike 4.19 pavaizduotas žingsnio dalinimas iš 4. Juodai – jungimas žvaigžde, raudonai penkiakampiu jungimo būdai. Grafikas sudarytas iš vidutinių kvadratinių nuokrypų. Taškais pažymėti matavimai prie skirtingų apkrovų. Žingsnio dalinime iš 4 be apkrovos, jungimo penkiakampiu vidutinė palaida yra $0,007^\circ$, o jungimo žvaigžde $0,084^\circ$. Apkraunant variklio ašį $0,015 \text{ N}\cdot\text{m}$ apkrova, jungimo žvaigžde vidutinė paklaida padidėja iki $0,117^\circ$. Prie $0,029 \text{ N}\cdot\text{m}$ apkrovos, jungimo žvaigžde paklaida dar padidėja iki $0,165^\circ$. Prie $0,043 \text{ N}\cdot\text{m}$ apkrovos, jungimo žvaigžde paklaida padidėja jau iki $0,187^\circ$, toliau didėjant apkrovai variklis korektiškai nesisuka. Jungimo penkiakampiu paklaida be apkrovos $0,009^\circ$ išlieka tokia pati iki $0,074 \text{ N}\cdot\text{m}$ apkrovos. Toliau didinant apkrovą iki $0,114 \text{ N}\cdot\text{m}$ nuokrypis siekia $0,011^\circ$.



4.20 pav. Penkiafazio žingsninio variklio vidutinių kvadratinių nuokrypų grafikas, kai žingsnis dalinamas iš 5. Juoda kreivė rodo žvaigždės jungimo būdą, raudona – jungimą penkiakampiu.

Grafike 4.20 pavaizduotas žingsnio dalinimas iš 5. Juodai – jungimas žvaigžde, raudonai penkiakampiu jungimo būdai. Grafikas sudarytas iš vidutinių kvadratinių nuokrypų. Taškais pažymėti matavimai prie skirtingų apkrovų. Žingsnio dalinime iš 5 be apkrovos, jungimo žvaigžde vidutinė nuokrypa yra 0,143°, o jungimo penkiakampiu 0,006°. Esant 0,015 N·m apkrovai, jungimo žvaigžde vidutinė nuokrypa sumažėja iki 0,116°, o jungimo penkiakampiu sumažėja nežymiai apie 0,005°. Prie 0,029 N·m apkrovos, jungimo žvaigžde paklaida vėl pradeda didėti iki 0,132°, jungimo penkiakampiu tikslumas išlieka toks pats 0,005°. Esant 0,043 N·m apkrovai, jungimo žvaigžde tikslumas dar sumažėja iki 0,140°, o jungimo penkiakampiu išlieka vėl toks pat 0,005°. Didinant apkrovą iki 0,058 N·m, jungimo žvaigžde variklis jau nustoja korektiškai sukis, jungimo penkiakampiu vidutinė paklaida išlieka stabili. Prie 0,074 N·m apkrovos jungimo penkiakampiu paklaida šiek tiek padidėja iki 0,015°. Esant 0,094 N·m apkrovos, jungimo penkiakampiu vidutinė paklaida sumažėja iki 0,012°. Apkraunant variklio ašį 0,115 N·m apkrova, jungimo penkiakampiu vidutinė paklaida smarkiai padidėja iki 0,060°.

TYRIMO REZULTATŲ APIBENDRINIMAS

Išvados

Atlikus žingsninio variklio posūkio kampo matavimus žvaigždės tipo jungimu ir penkiakampio jungimu prie skirtingų apkrovų pastebėta, kad autokoreliatoriuje naudojamas žvaigždės prijungimo būdas yra neteisingas, nenuosekliai prijungtos fazės, nes žingsnio dydis be žingsnio dalinimo ir be apkrovos didesnis už specifikuotą variklio žingsnį net 3 kartus, tai yra vietoje $0,72^\circ$ yra $2,2^\circ$.

Taip pat atlikus matavimus pastebėta, kad prie skirtingų apkrovų, su skirtingais žingsnio dalinimais žvaigždės prijungimo ir penkiakampio prijungimo skiriasi sukimo momentas ir vidutinis kvadratinis nuokrypis. Be žingsnio dalinimo žvaigždės prijungimo būdu, žingsninis variklis su mažiausiu vidutiniu nuokrypiu $0,002^\circ$ sukasi kai variklio ašies apkrova yra $0,015 \text{ N}\cdot\text{m}$. Penkiakampio prijungimo būdu, vidutinis kvadratinis nuokrypis nesiekia $0,003^\circ$ iki pat $0,114 \text{ N}\cdot\text{m}$.

Žingsnio dalinime iš 2, žvaigždės prijungimu žingsninis variklis geriausiai sukasi tik be apkrovos, kai kvadratinis nuokrypis yra $0,012^\circ$. Toliau didinant apkrovą, nuokrypis drastiškai didėja. Penkiakampio prijungimo būdu, mažiausias nuokrypis $0,001^\circ$ išsilaiko iki $0,043 \text{ N}\cdot\text{m}$ apkrovos, vėliau didinant apkrovą nuokrypis tolygiai didėja, kol prie $0,014 \text{ N}\cdot\text{m}$ nuokrypis siekia $0,018^\circ$.

Žingsnio dalinime iš 2,5 žvaigždės jungimo būdu mažiausias vidutinis nuokrypis yra be apkrovos $0,092^\circ$. Toliau didinant apkrovą nuokrypis didėja. Penkiakampio prijungimo būdu, mažiausias nuokrypis yra kai nėra apkrovos $0,006^\circ$, tačiau ir didinant apkrovą iki $0,094 \text{ N}\cdot\text{m}$ vidutinis nuokrypis nesiekia $0,015^\circ$. Net esant $0,141 \text{ N}\cdot\text{m}$ apkrovai nuokrypis yra $0,014^\circ$.

Žingsnio dalinime iš 4, žvaigždės prijungimo būdu mažiausias nuokrypis kai nėra apkrovos $0,083^\circ$. Toliau didinant apkrovą nuokrypis drastiškai didėja. Penkiakampio prijungimo būdu $0,009^\circ$ vidutinis nuokrypis išsilaiko iki pat $0,074 \text{ N}\cdot\text{m}$. Prie $0,114 \text{ N}\cdot\text{m}$ apkrovos nuokrypis $0,009^\circ$.

Žingsnio dalinime iš 5, žvaigždės prijungimo būdu mažiausias nuokrypis $0,117^\circ$ yra su $0,015 \text{ N}\cdot\text{m}$ apkrova. Didinant ar mažinant apkrovą vidutinė paklaida didėja. Penkiakampio prijungimo būdu vidutinis nuokrypis $0,007^\circ$ išsilaiko iki $0,058 \text{ N}\cdot\text{m}$ apkrovos, vėliau didinant apkrovą nuokrypis didėja. Prie $0,094 \text{ N}\cdot\text{m}$ nuokrypis siekia $0,012^\circ$.

Visais atvejais pozicionavimo tikslumas penkiakampio jungimu yra aukštesnis, todėl tikslinga jį taikyti modernizuojant autokoreliatoriaus valdiklį.

Rekomendacijos ir pasiūlymai

Tolimesniam tyrimui, galima būtų panaudoti penkiafazį variklį su dvigubu rotoriumi, kurio žingsnių skaičius be dalinimo yra 1000. Taip pat patyrinėti ant šio testavimo stendo ir dvifazį variklį su dvigubu rotoriumi, kurio žingsnių skaičius be dalinimo yra 400. Galima būtų palyginti ar didelis skirtumas tarp penkiafazio su 500 žingsnių per apsisukimą ir dvifazio su 400 žingsnių.

LITERATŪRA

1. Smilgevičius A. Automatikos mikromašinos. 2005. Vadovėlis techniškujų universitetų inžinerijos studentams. Vilnius: Technika, 343 p.
2. Douglas, W. J. Stepping motors fundamentals. 2004. University of Iowa [žiūrėta 2016-03-17]. Interneto prieiga: <https://pi-plates.com/wp-content/uploads/2015/04/steppermotor.pdf>
3. Zsoltas, A; Moraras, A. High performance microstepping driver system based on five-phase stepper motor. 2014. Bucharest. [žiūrėta 2016-03-12]. Interneto prieiga: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212017313006452>
4. Where five phase excel, Mashine design. 2006. 108 – 112 p. [žiūrėta 2016-03-21]. Interneto prieiga: <http://machinedesign.com/archive/where-five-phases-excel>
5. Karthi, A. Paranjothi, R. Solaimanohar. S. Implementation of digital micro-step Driver of five-phase Hybrid Stepper motor using Digital Signal Controller. 2013. Cheninai [žiūrėta 2016-02-20]. Interneto prieiga: http://ieeexplore.ieee.org/sci-hub.ac/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6508285&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxp%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6508285
6. Step Motor Basics [interaktyvus], [žiūrėta 2016-02-20] . Interneto prieiga: <http://www.solarbotics.net/library/pdflib/pdf/motorbas.pdf>
7. McCombas, M. Seminare. 2007. Sanghai [interaktyvus]. [žiūrėta 2016-03-21]. Interneto prieiga: http://www.microchip.com/stellent/groups/SiteComm_sg/documents/DeviceDoc/en543047.pdf
8. Stepper motor drive types.[interaktyvus], [žiūrėta 2016-04-12]. Interneto prieiga: https://en.wikipedia.org/wiki/Stepper_motor
9. Stabinis, A; Valiulis, G. Ultrumpųjų šviesos impulsų netiesinė optika. Vilniaus universitetas, 2008. 35 p.
10. Kuo, B. C; Tal, J. Incremental motion control stepper motors and drive systems. 1993. Shanghai.
11. Bellinis, A.; Concaris, C.; Francheschinis, G; Toscani, A. Mixed mode PWM for high performance stepping motor. 2007. IEE Trans. Industrial electronic, vol 6, 54 p.
12. Weerakoonas, T; Samaranyake, L. Development of a Drive Topology of a Five Phase Stepper Motor. 2008. IEEE Industrial and Information Systems Conf. 1-6 p.
13. MathWorks. [interaktyvus]. [žiūrėta 2016-04-15]. Interneto prieiga: <http://se.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/steppermotor.html>
14. Sanmotion stepping systems F5. Instruction manual. 2012.

15. Tech Authority gamintojo aprašymas, [interaktyvus]. [žiūrėta 2016-04-18]. Interneto prieiga: <<http://www.atechauthority.com/products.asp?id=173>>
16. Johantgen, N. New pentagon drive technology. Oriental motor. 2010, Tokyo [interaktyvus]. [žiūrėta 2016-04-22]. Interneto prieiga: <<http://www.orientalmotor.com/technology/articles/pdfs/NewPentagonDriverTechnology.pdf>>
17. Johantgen, N. Stepper motor basics. Oriental motor. 2010, Tokyo [interaktyvus]. [žiūrėta 2016-04-22]. Interneto prieiga: <<http://www.orientalmotor.com/technology/articles/step-motor-basics.html#drive>>
18. Johantgen, N. 2-phase vs 5 phase steppers. Oriental motor. 2010, Tokyo [interaktyvus]. [žiūrėta 2016-04-22]. Interneto prieiga: <<http://www.orientalmotor.com/technology/articles/2phase-v-5phase.html#drive>>
19. Dynapar gamintojo puslapis [interaktyvus]. [žiūrėta 2016-04-21]. Interneto prieiga: <http://www.dynapar.com/Technology/Encoder_Basics/Quadrature_Encoder/>
20. Midoland gamintojo katalogas, Motion control and force regulation. [interaktyvus]. [žiūrėta 2016-04-22]. Interneto prieiga: <<http://www.midoland.com/movie/catalogue+GB+d.pdf>>
21. Arduino Uno gamintojo aprašymas, Interneto prieiga: <<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>>
22. Radzevičius, L. Elektros inžinerijos magistrantūros studijų tiriamieji ir baigiamieji darbai. Metodiniai nurodymai. Vilnius: Technika, 2009. 66 p.

PRIEDAI

„Arduino Uno“ valdiklio kodas:

```
// Viena karta ivygdomas. pries loop()
void setup() {
    // Serijiniui isstatom bit rate
    Serial.begin(9600);
    // abu pinus nustatom isvedimui
    pinMode(7, OUTPUT);
    pinMode(9, OUTPUT);
}

//int BuffSize = 128; - istrinem nes nereikalingas
// nuskaitomos zinutes dydis (max dydis), cis is serial porto(kompo).
char charArray[128];
int StepDelay = 50;
// vygdo nuolatos.
void loop() {
    // If there is something to read.
    if (Serial.available() > 0) {
        // musu bufferi, atminties gabala nusinulinam. visi elementai bus = 00000000
        for (int i=0; i <= 128; i++) charArray[i] = 0;
        // 128 - pasakom kiek daugiausiai baitu nuskaityti, charArray - i cia iraso, skaitom iki ' ' simbolio.
        // pvz: zinute "TurnCW 120", nuskaitis i buferi "TurnCW", readInt = 6,
        int readInt = Serial.readBytesUntil(' ', charArray, 128);
        // sukuriam simboliu eilute is musu buferio.
        String commandName(charArray);
        // cia skaito iki galo(tiek kiek liko baitu) ir sukuria i simboliu eilute, pvz: "120"
        String commandArgs = Serial.readString();
        // paverciam i sveika skaiciu. pvz: 120. Kai pranesimas "arduino" => 0
        int intArg = commandArgs.toInt();
        // tikrinam: jei komanda = "Hello"
        if (commandName == "Hello") {
            // Vygdo kai hello
            // issiunciam pranesima hello
            Serial.print("Hello");
        } else if (commandName == "TurnCW"){
            // Vygdo kai TurnCW
```

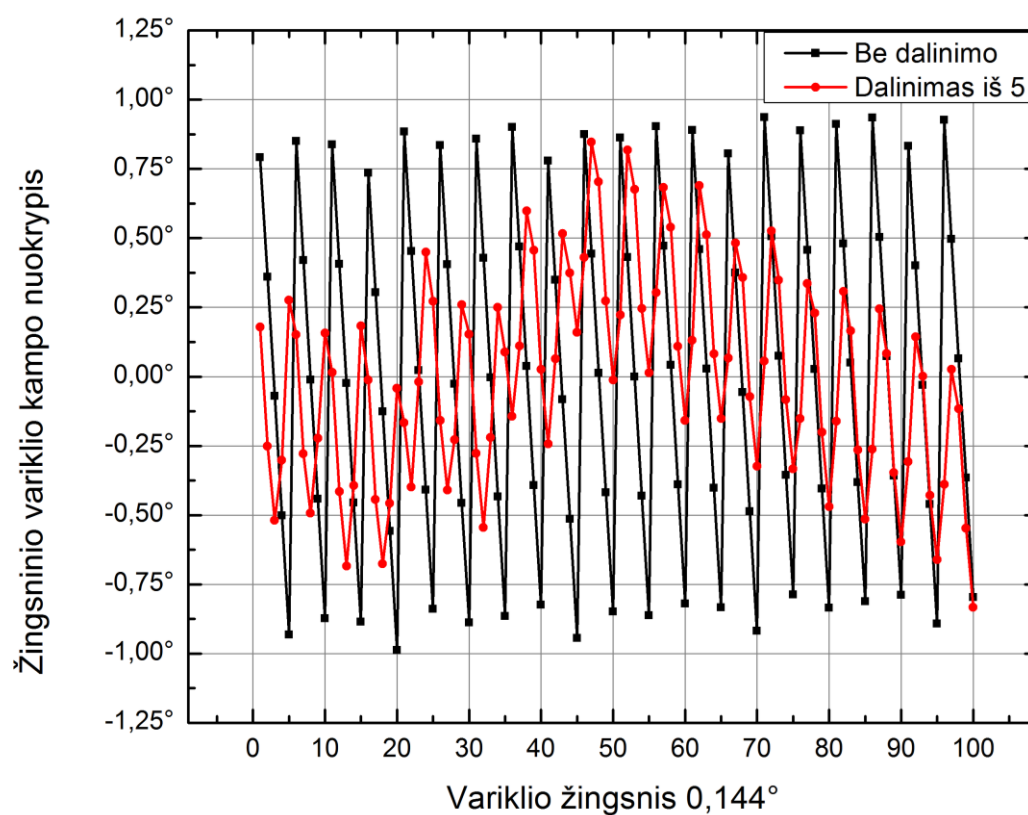
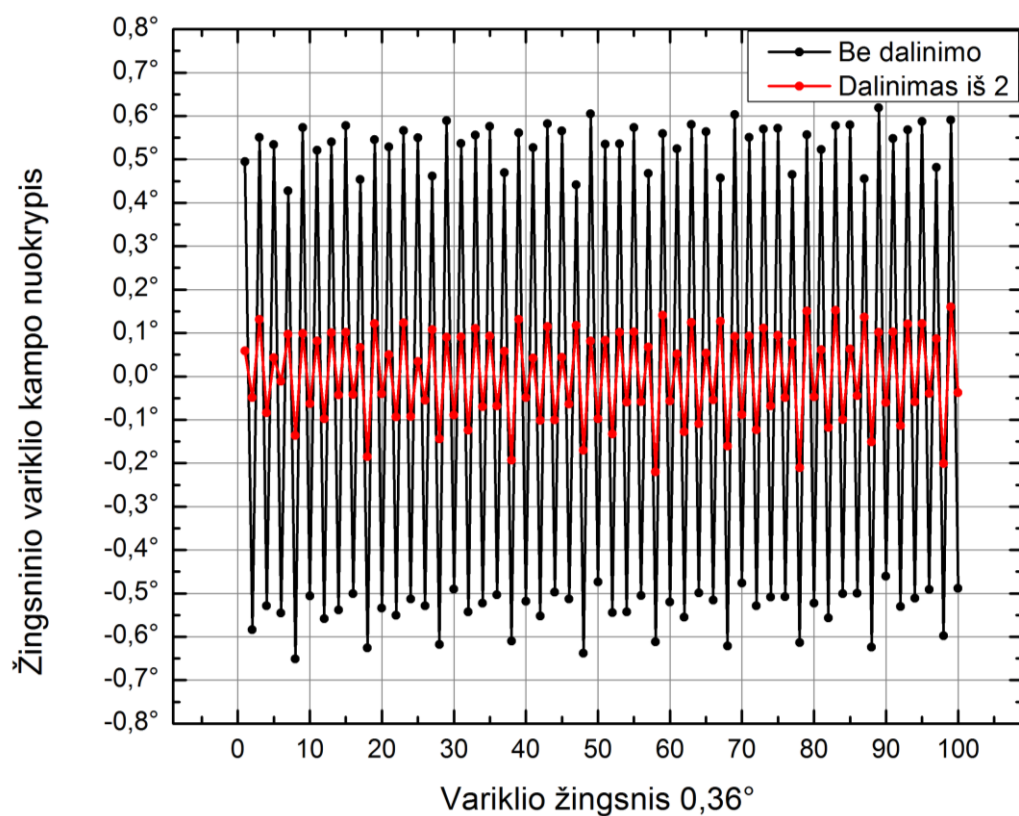
```

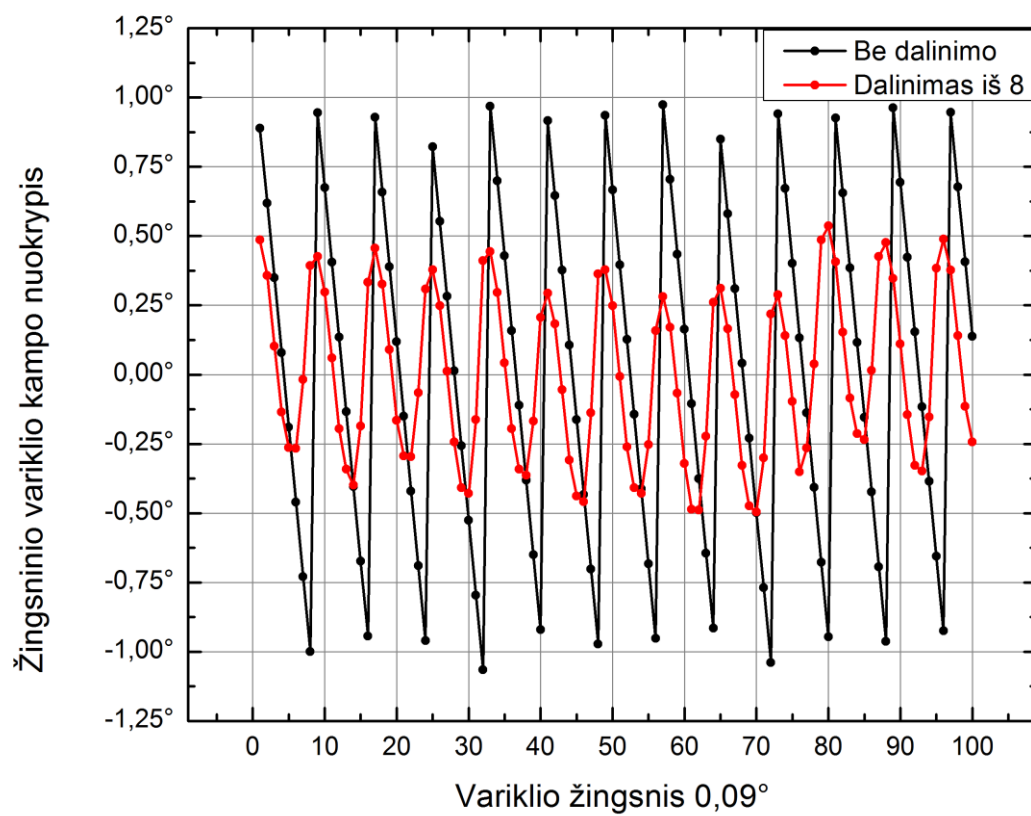
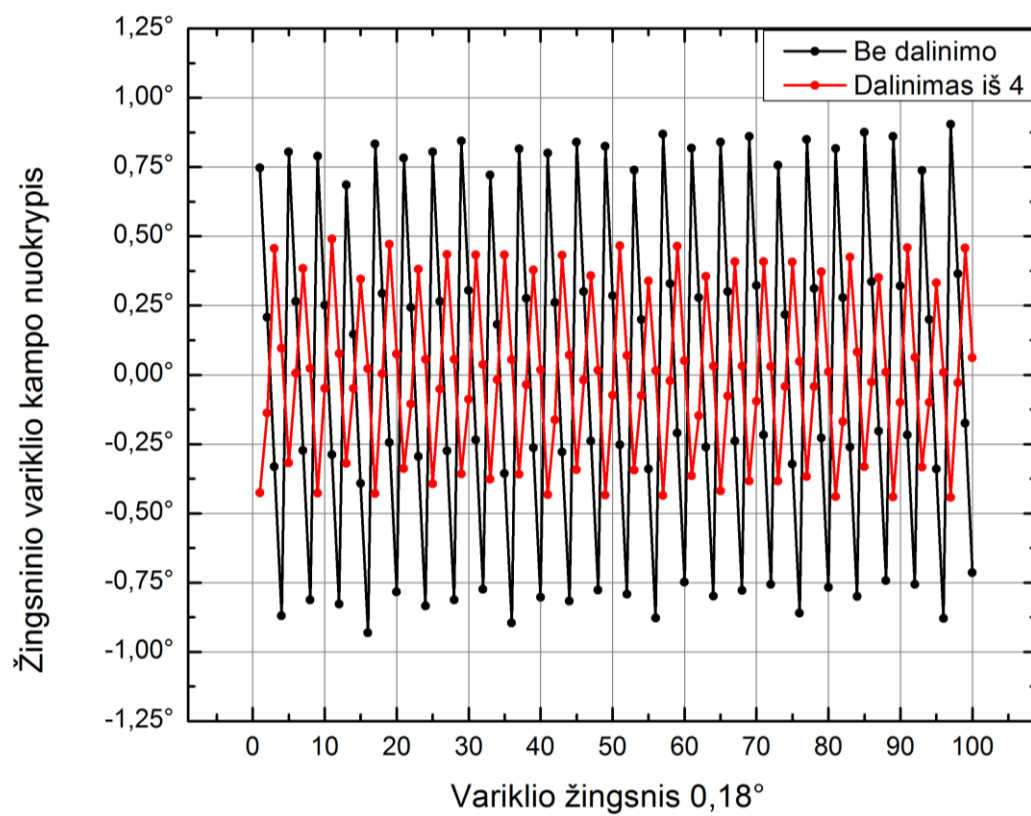
// tiek kartu vygdo koks dydis intArg, pvz: intArg = 5, vygdis 5 kartus.
for (int index = 0; index < intArg; index++){
    // pakelti itampa tarp pino nr. 7
    digitalWrite(7, HIGH);
    delay(StepDelay);
    // nuleisti itampa tarp pino nr. 7
    digitalWrite(7, LOW);
    delay(StepDelay);
}
// issiunciam atsakymo zinute:
Serial.print("turn clockwise completed");
} else if (commandName == "TurnCCW"){
    // Vygdo kai TurnCCW
    for (int index = 0; index < intArg; index++){
        digitalWrite(9, HIGH);
        delay(StepDelay);
        digitalWrite(9, LOW);
        delay(StepDelay);
    }
    Serial.print("turn counter clockwise completed");
    } else Serial.print("Unknown message: " + commandName + " " + commandArgs); //ateinam kai nezinomas
    pirma zodis zinuteje, ir atsakom i zinute.
}
}

```

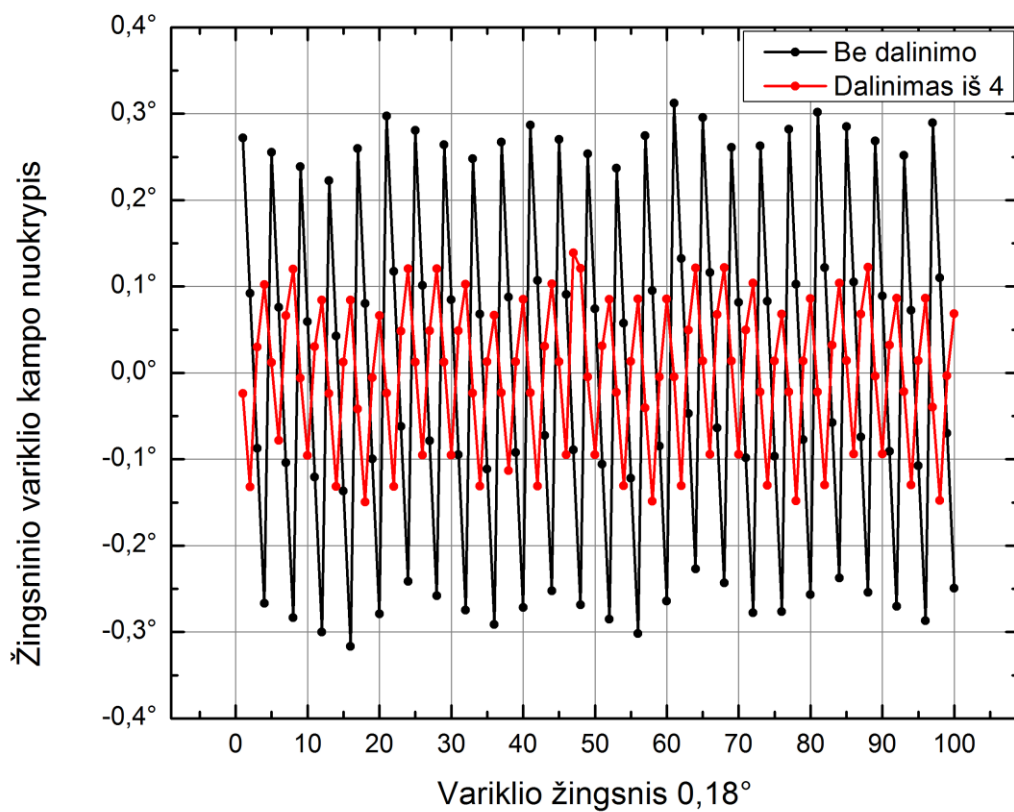
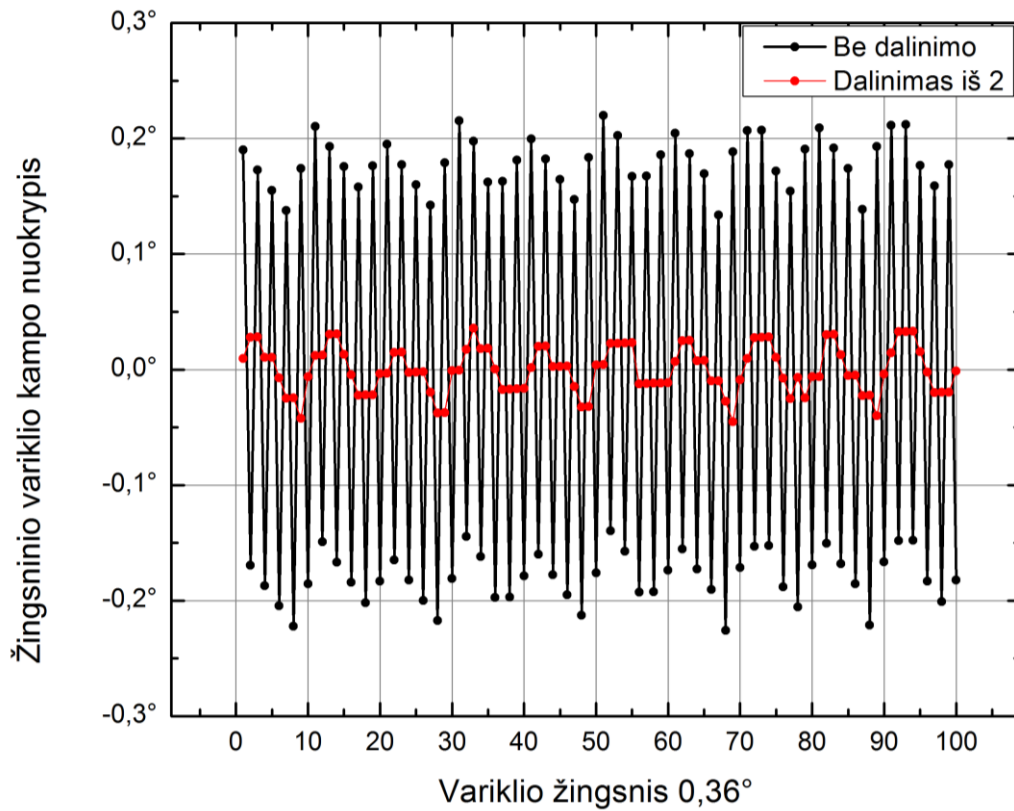
Grafikų aproksimacijos

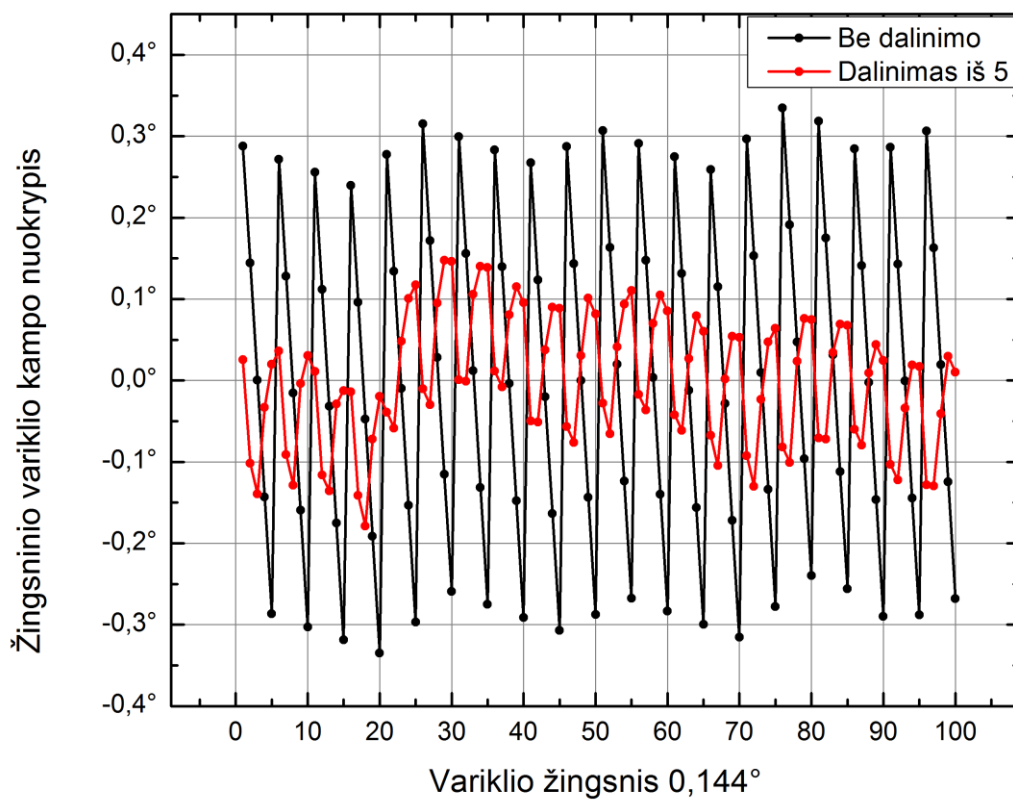
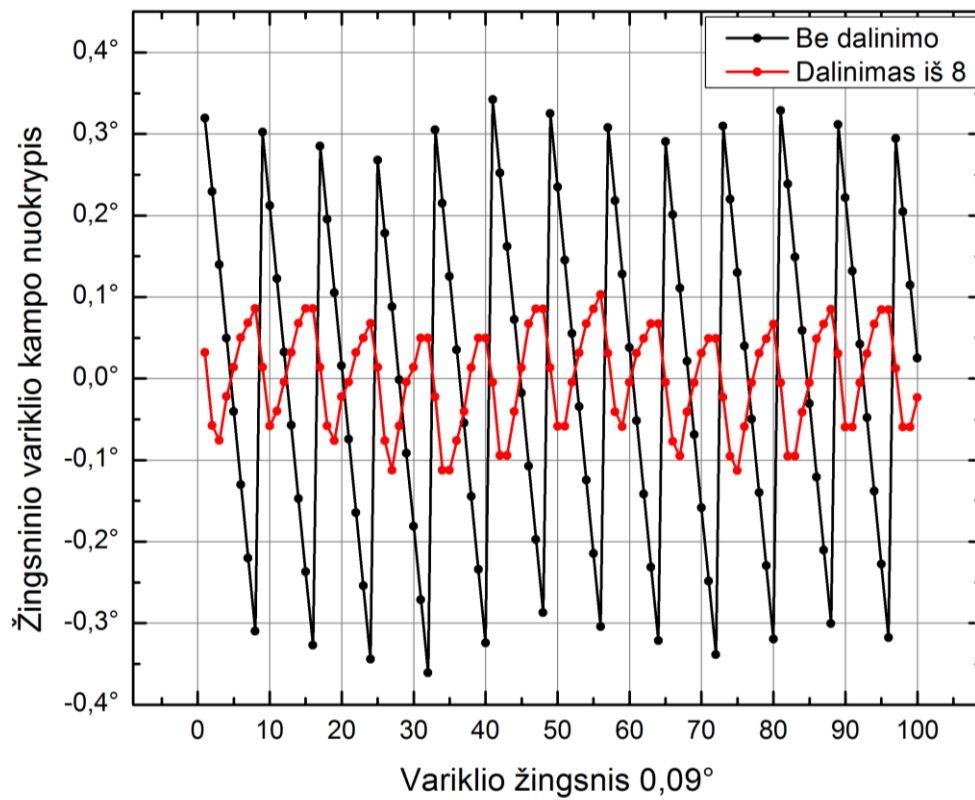
Žvaigždės prijungimo būdu be apkrovos



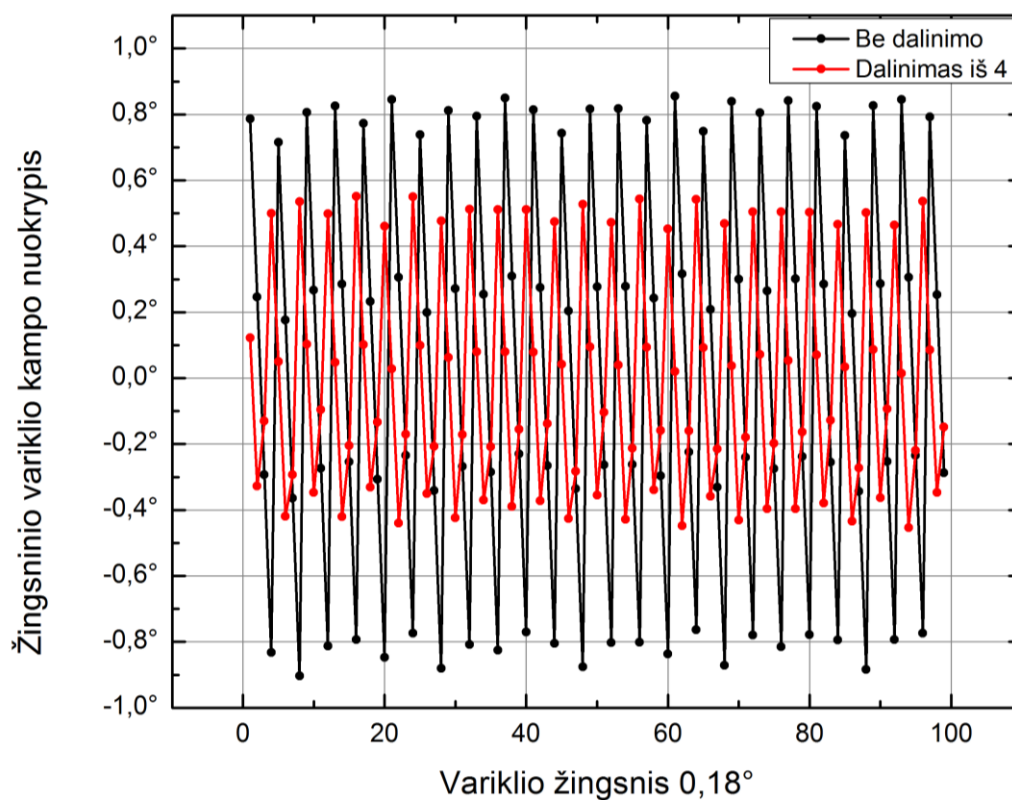
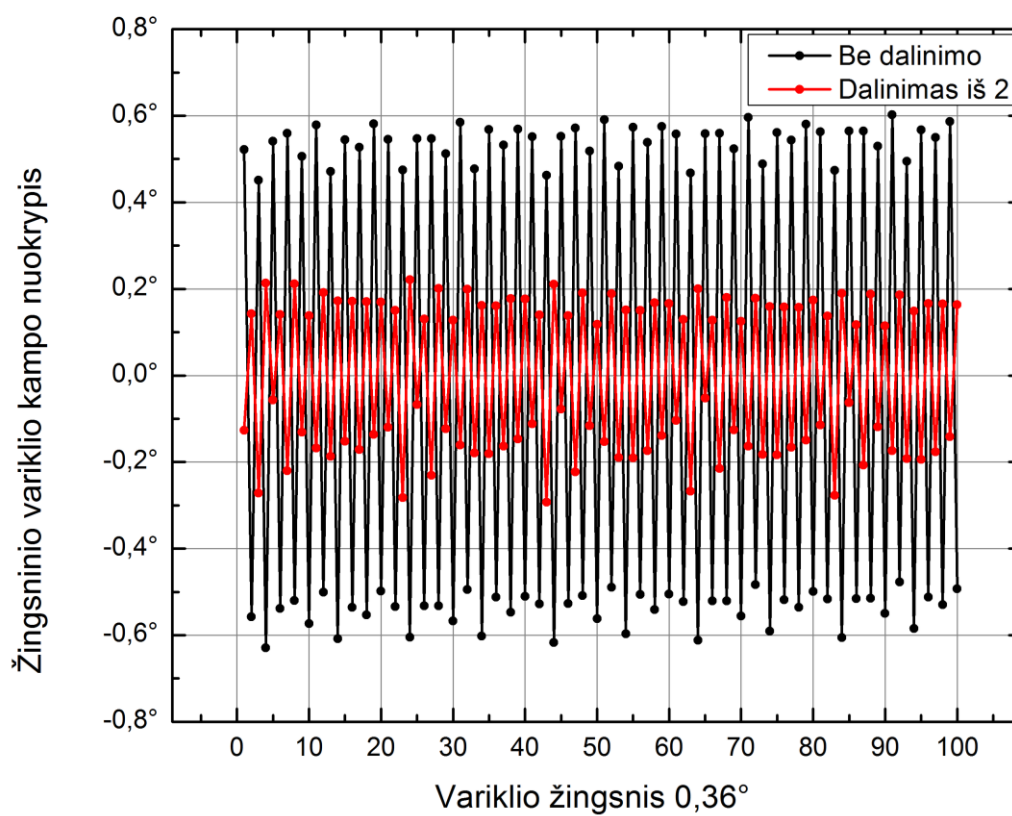


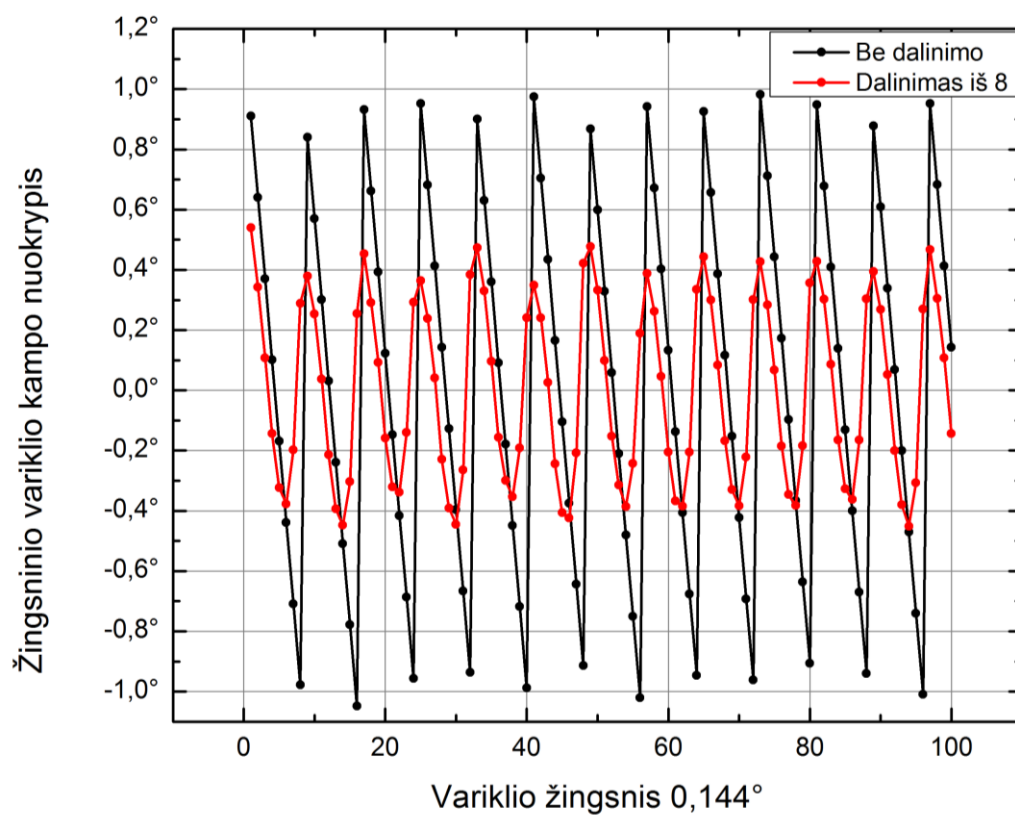
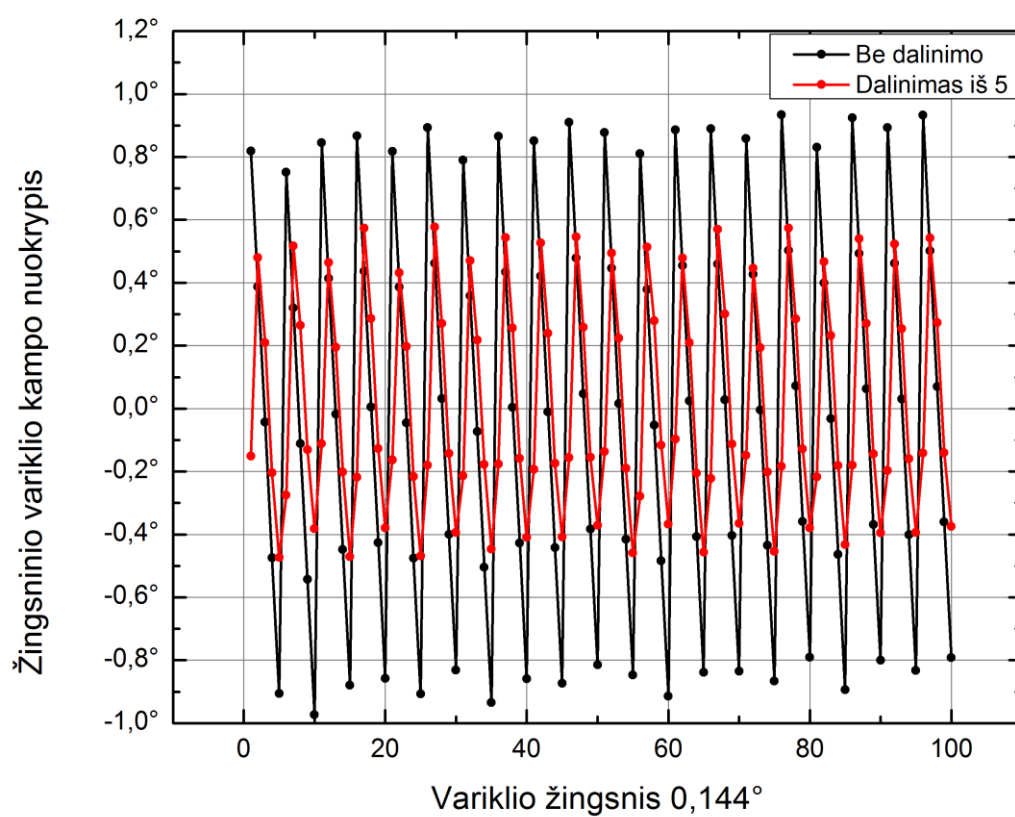
Penkiakampio prijungimo būdu be apkrovos



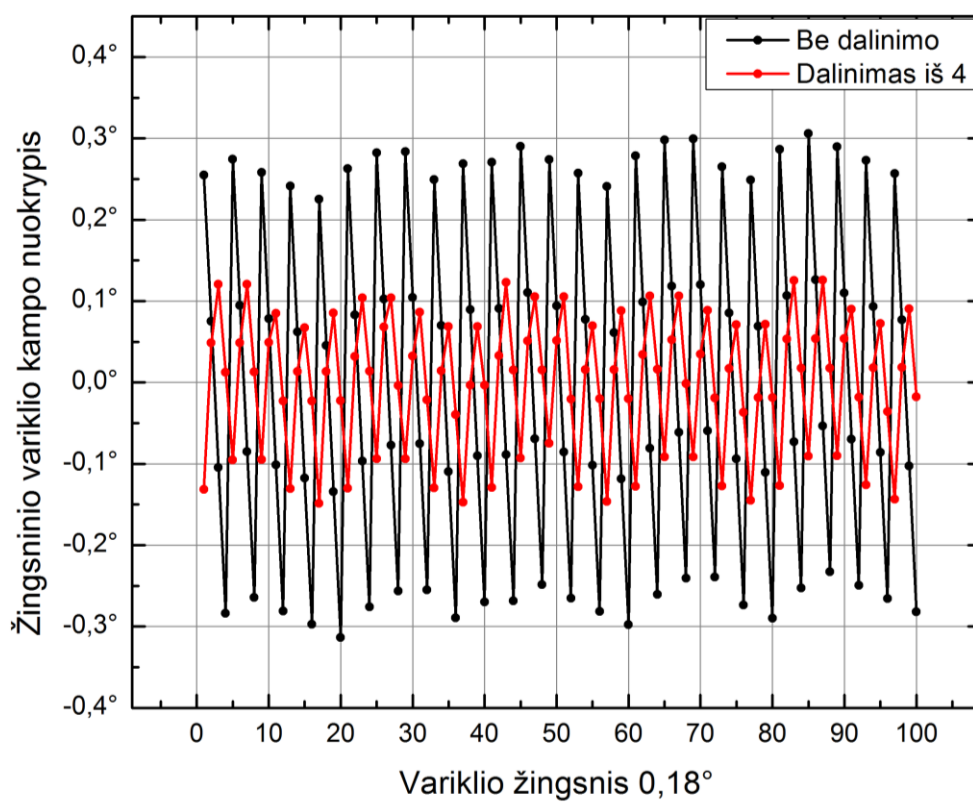
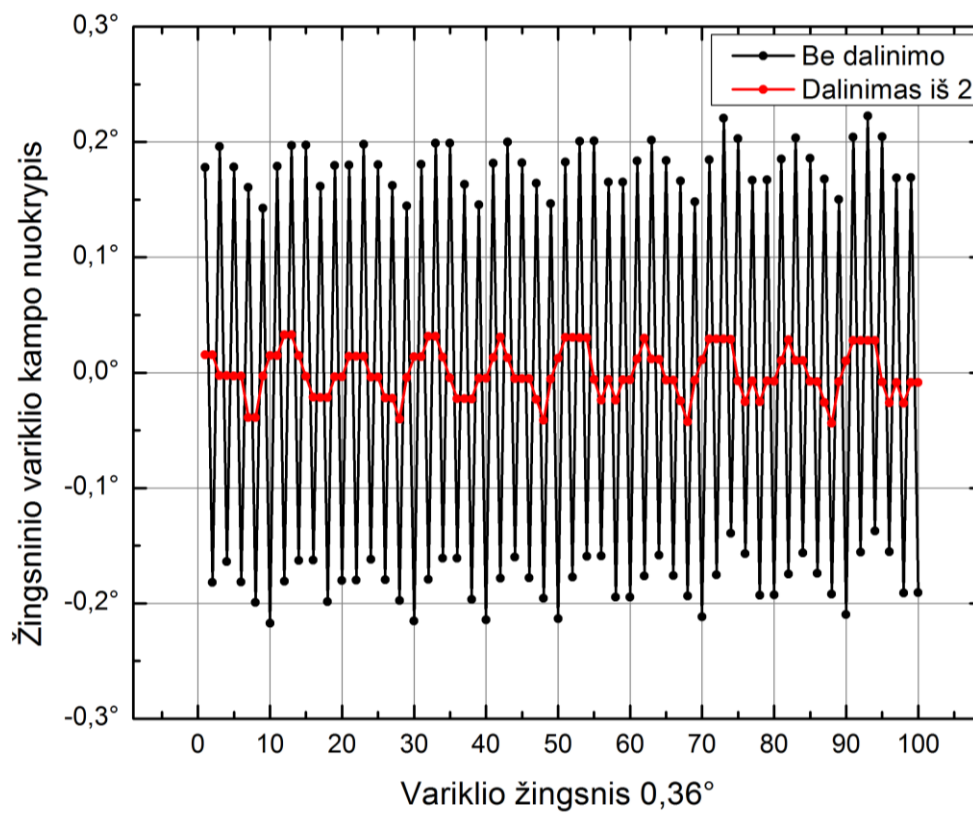


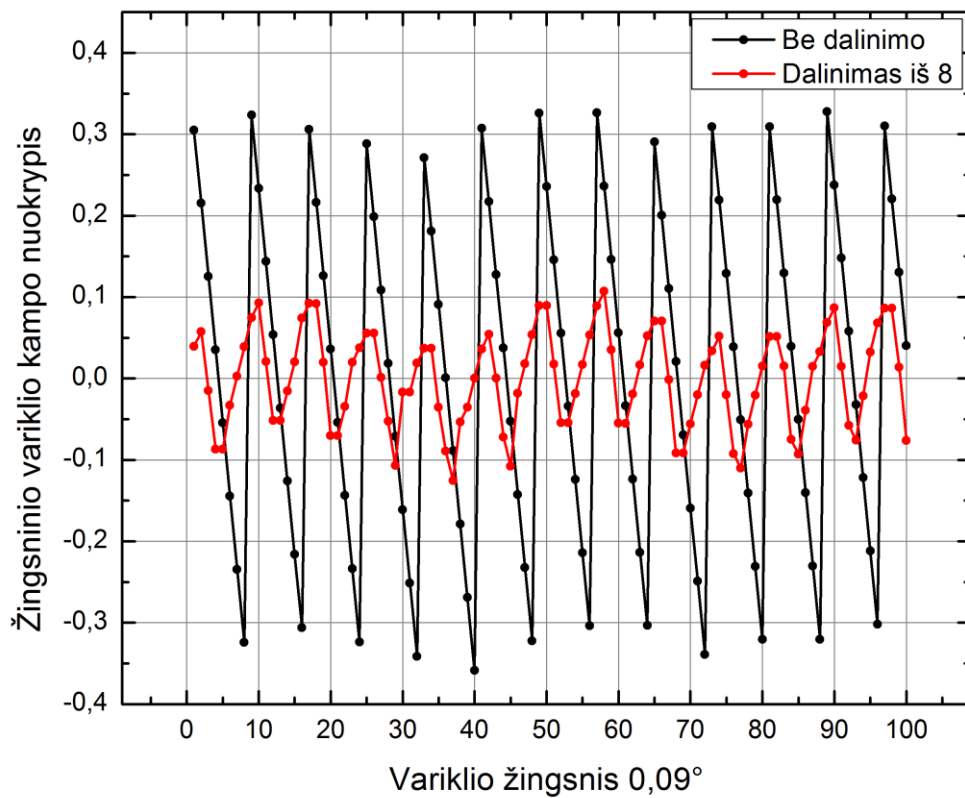
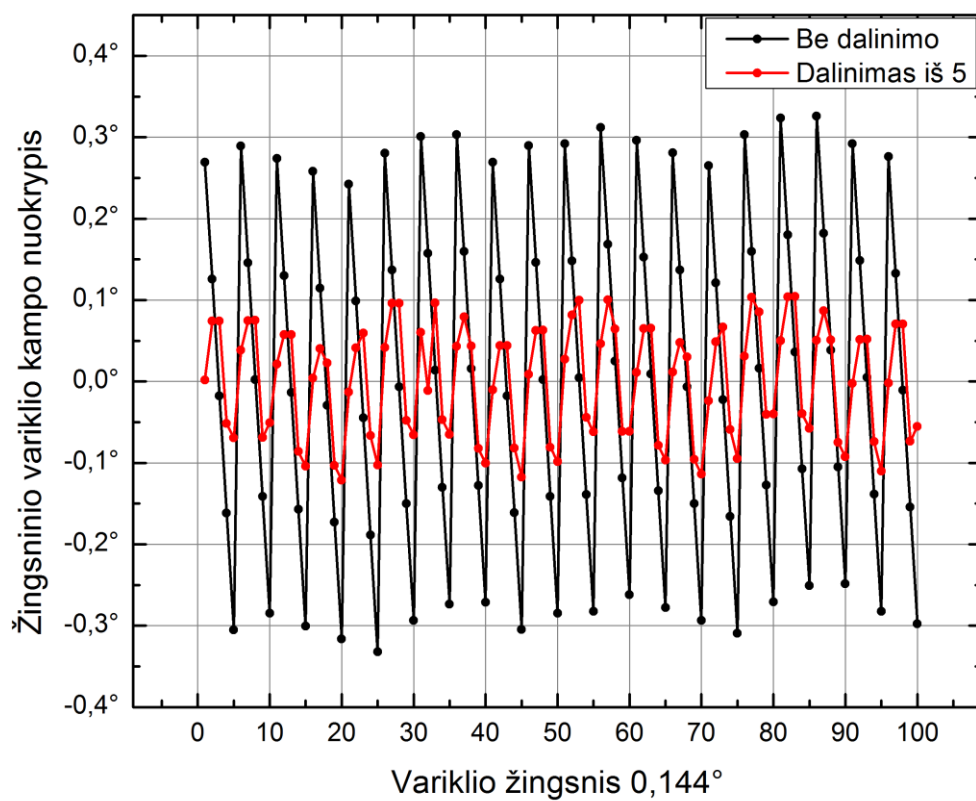
Žvaigždės prijungimo būdas su 0,015 N·m apkrova



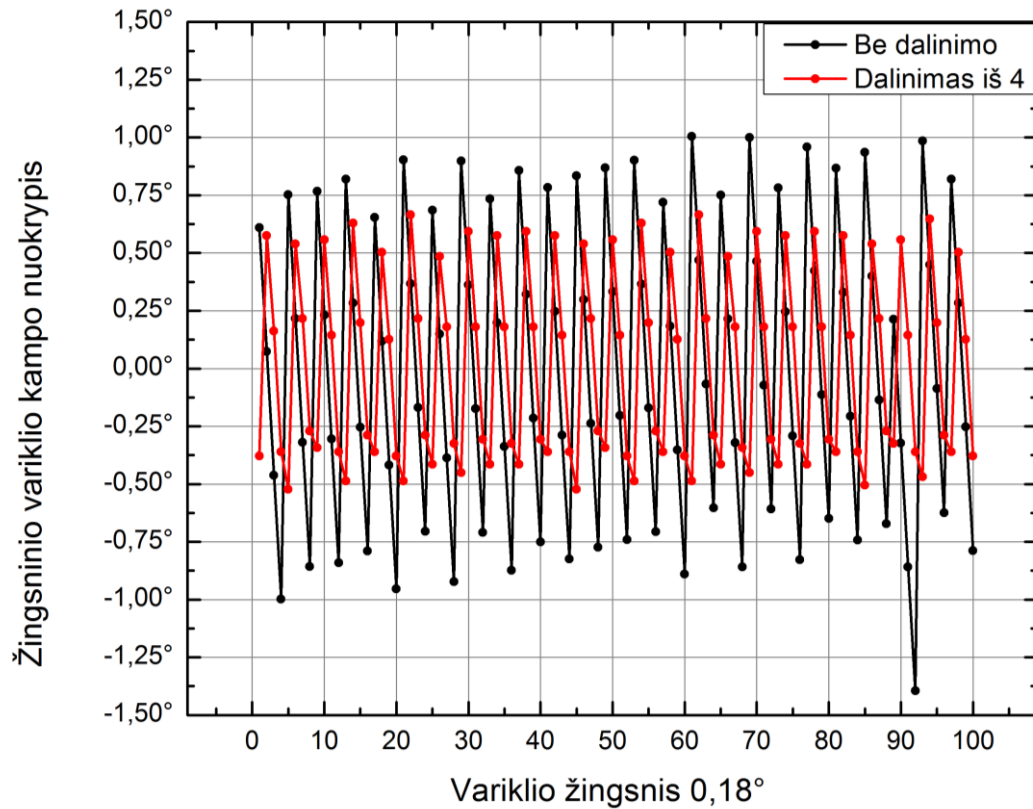
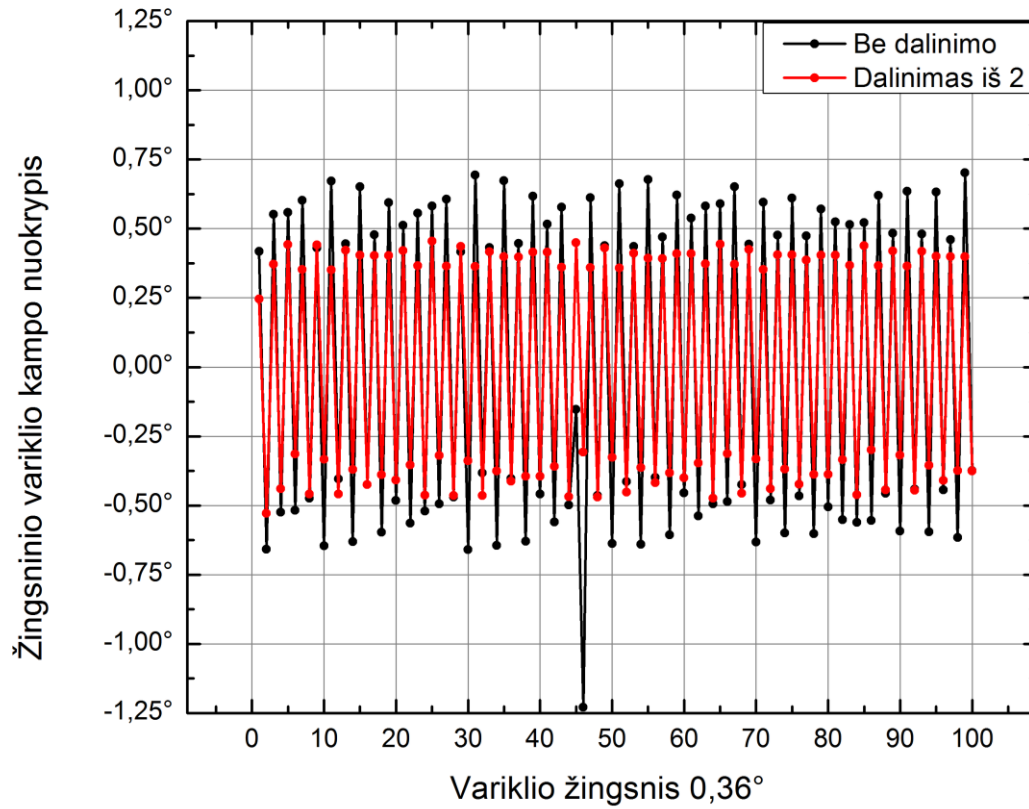


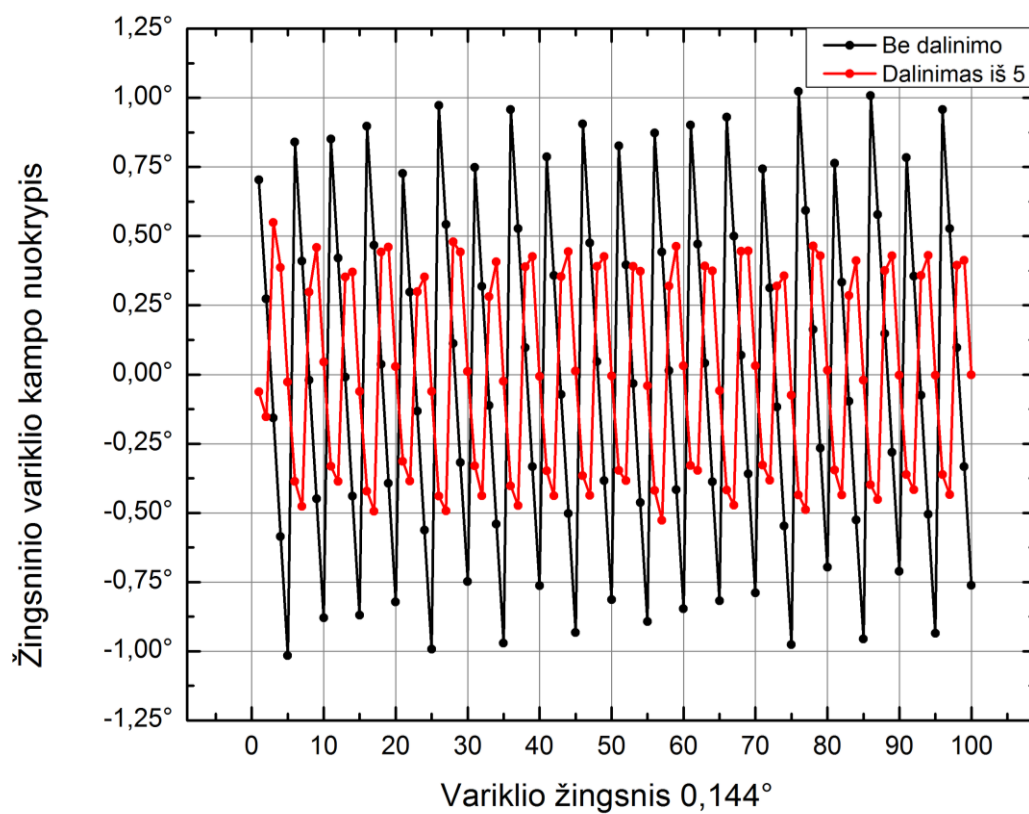
Penkiakampio prijungimo būdu



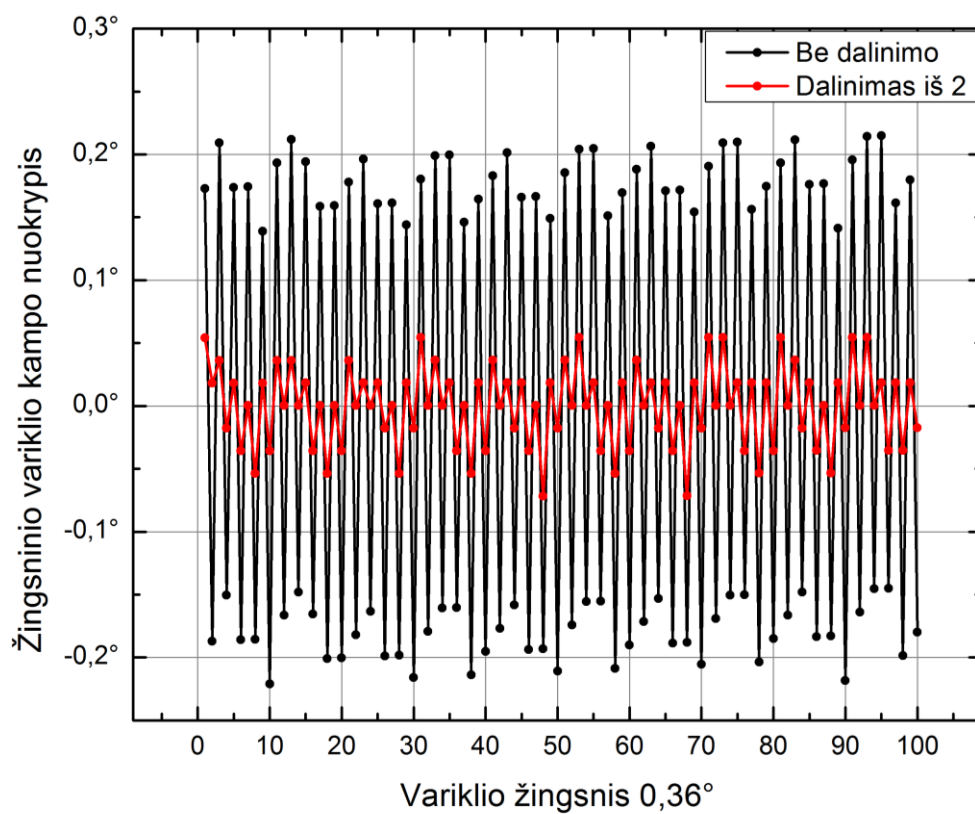


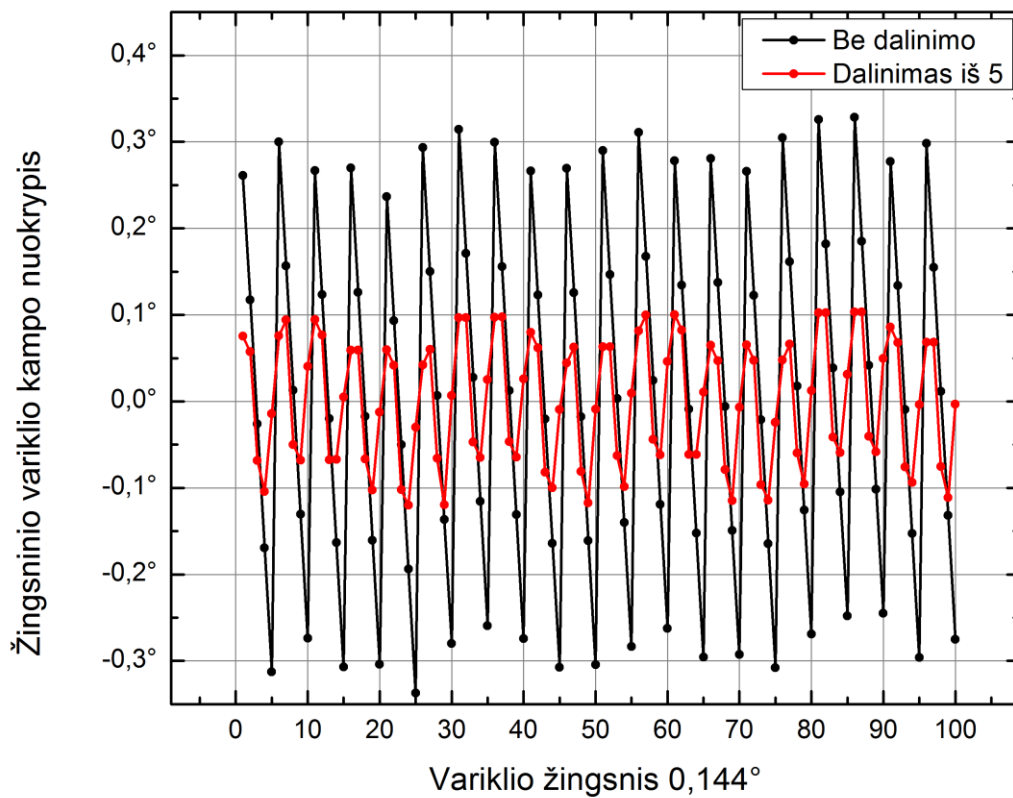
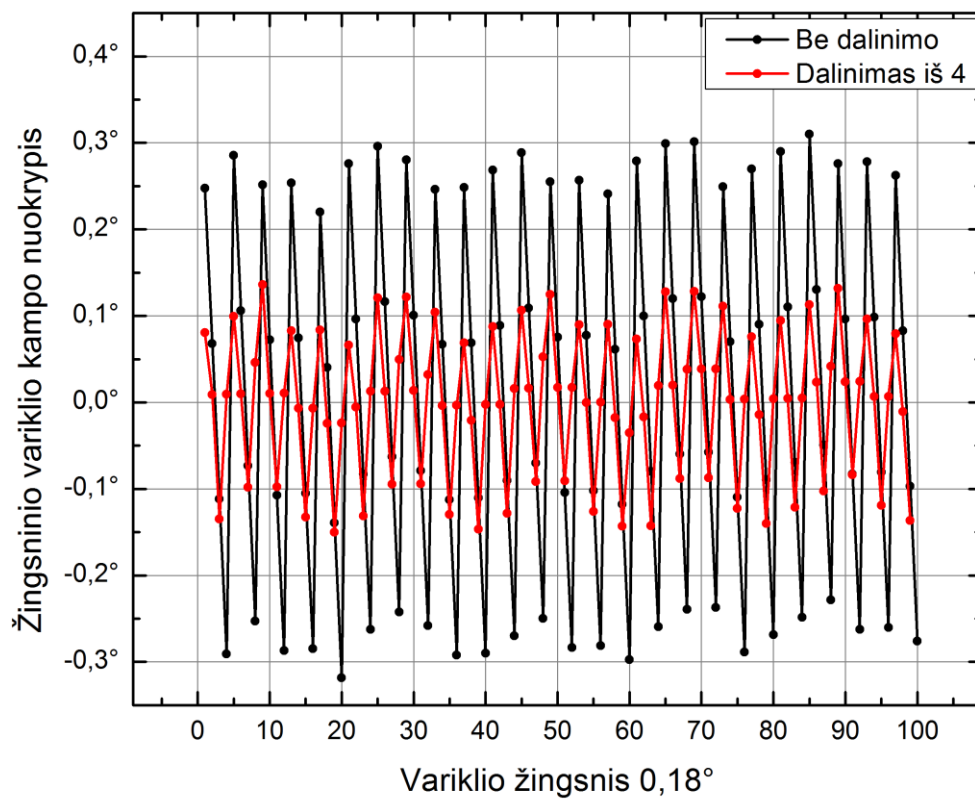
Žvaigždės prijungimo būdu su 0,029 N·m apkrova



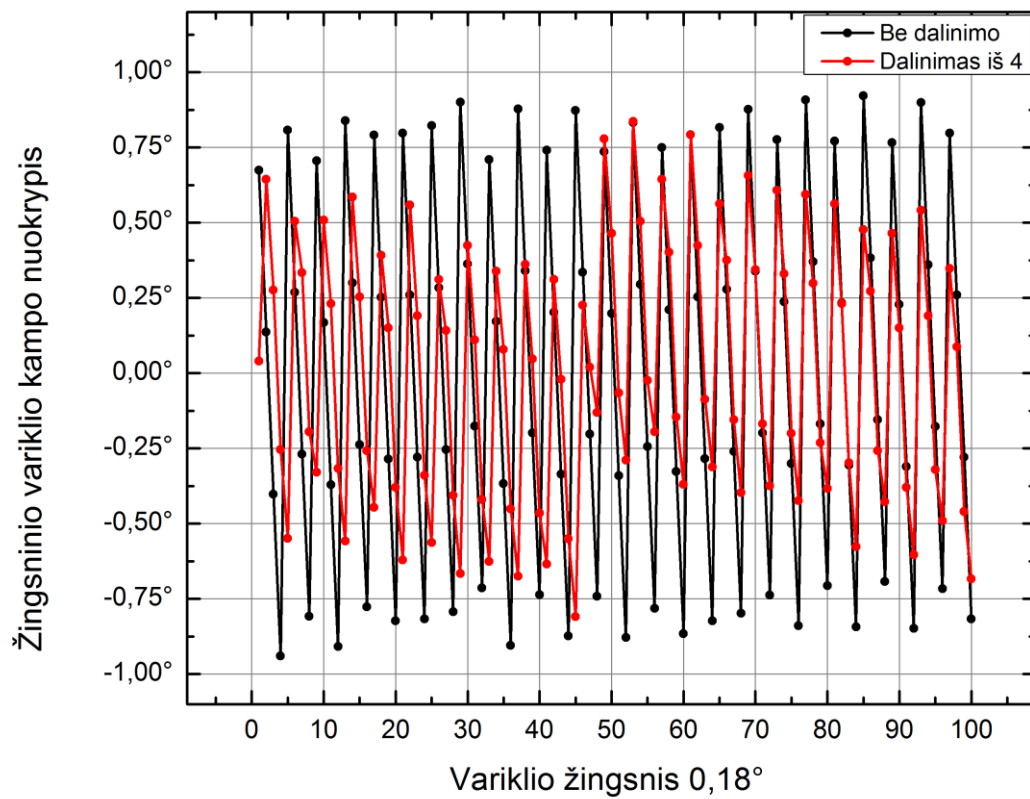
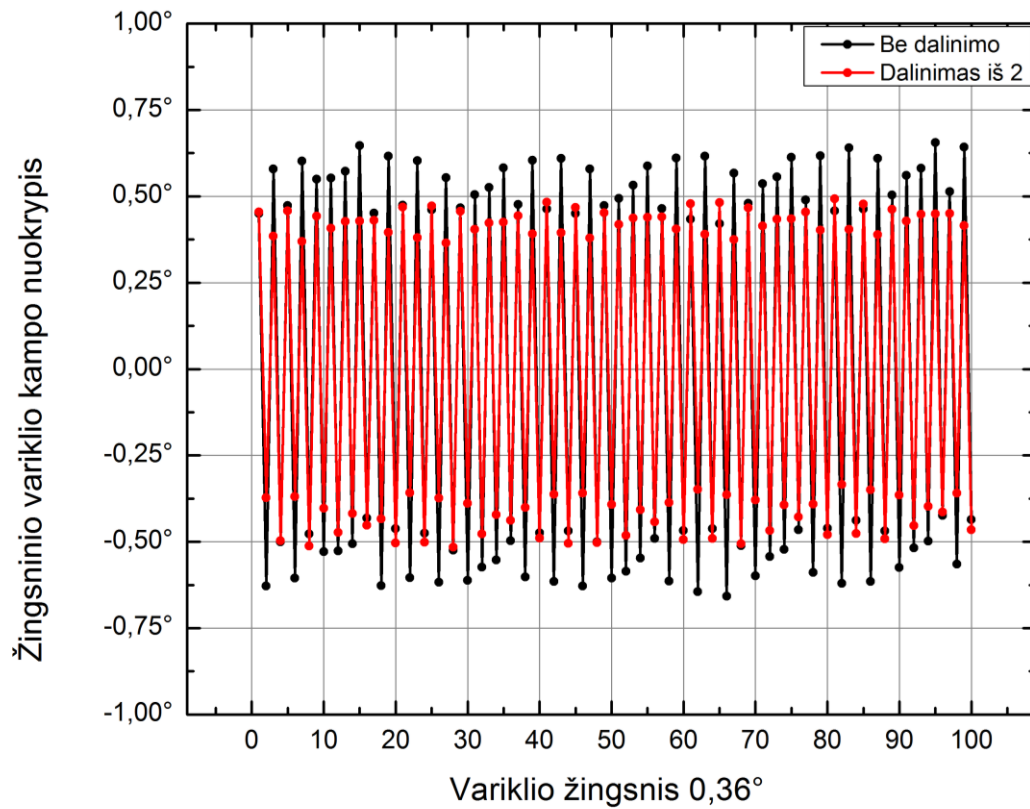


Penkiakampio prijungimo būdu

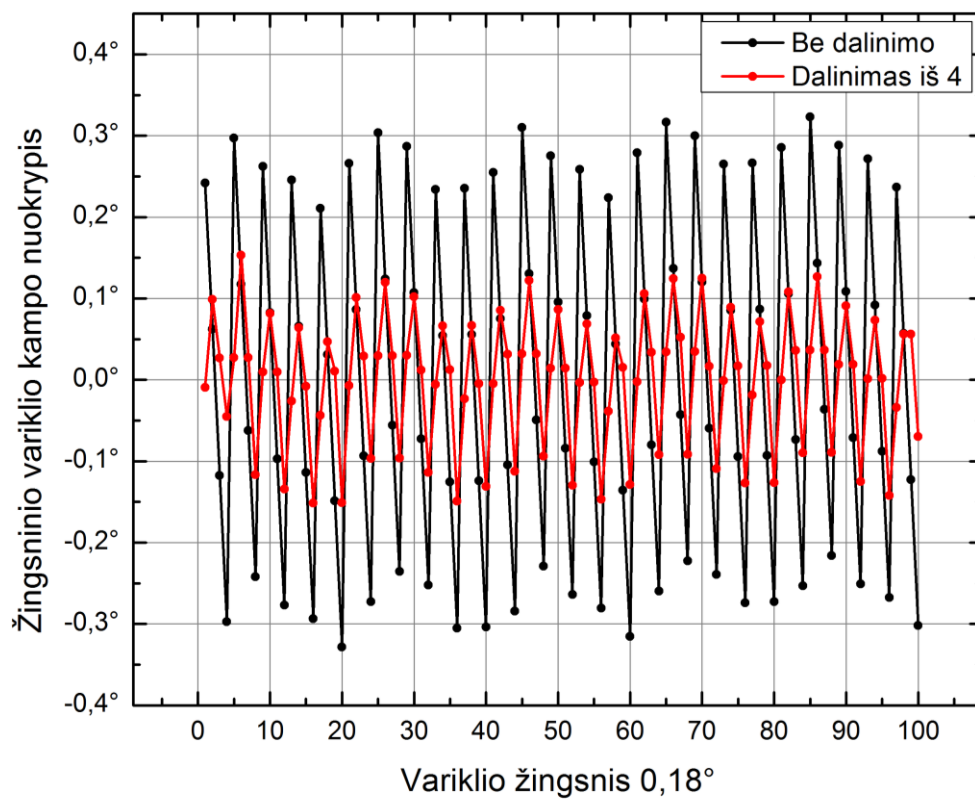
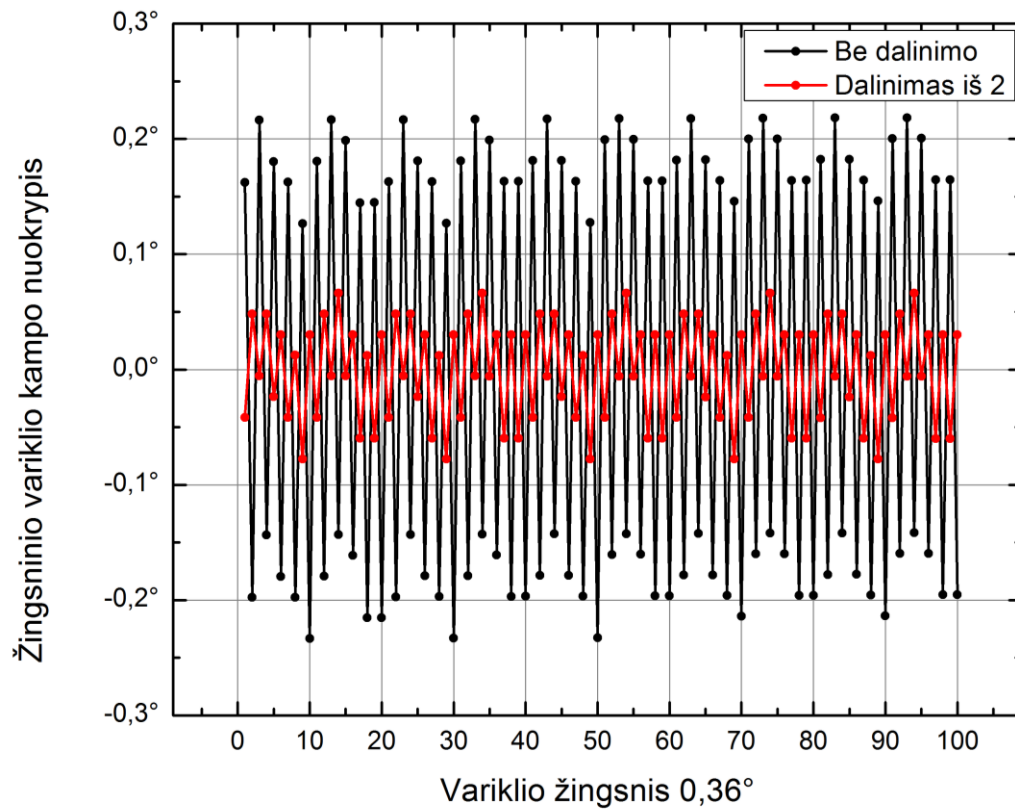


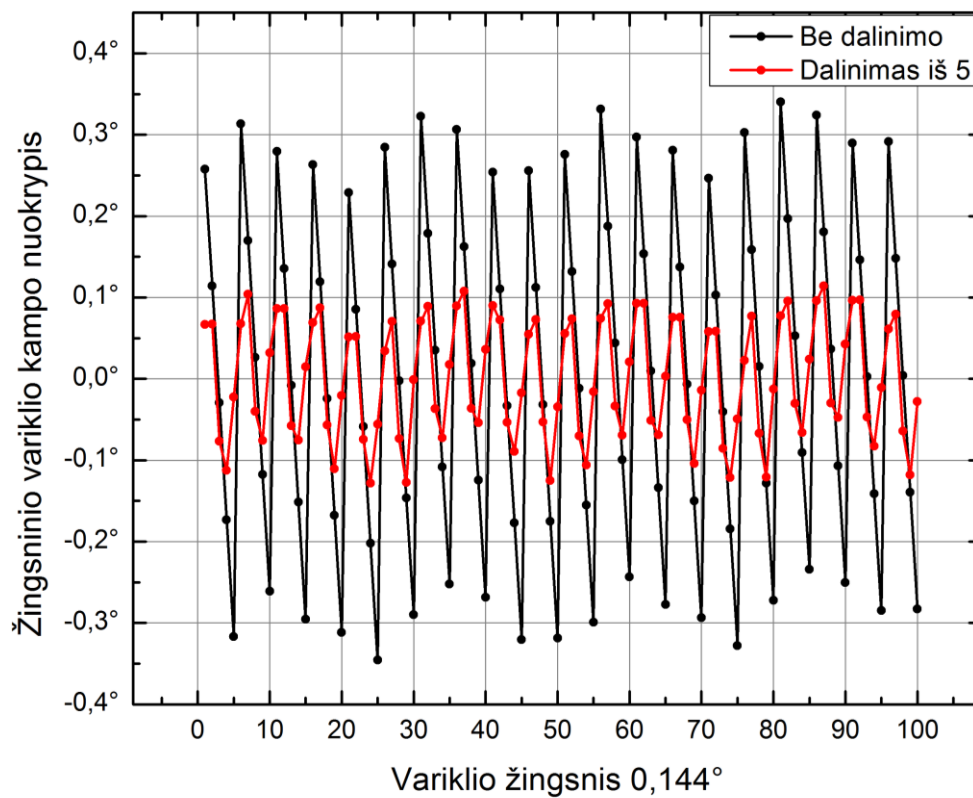


Žvaigždės prijungimo būdu su 0,043 N·m aprova

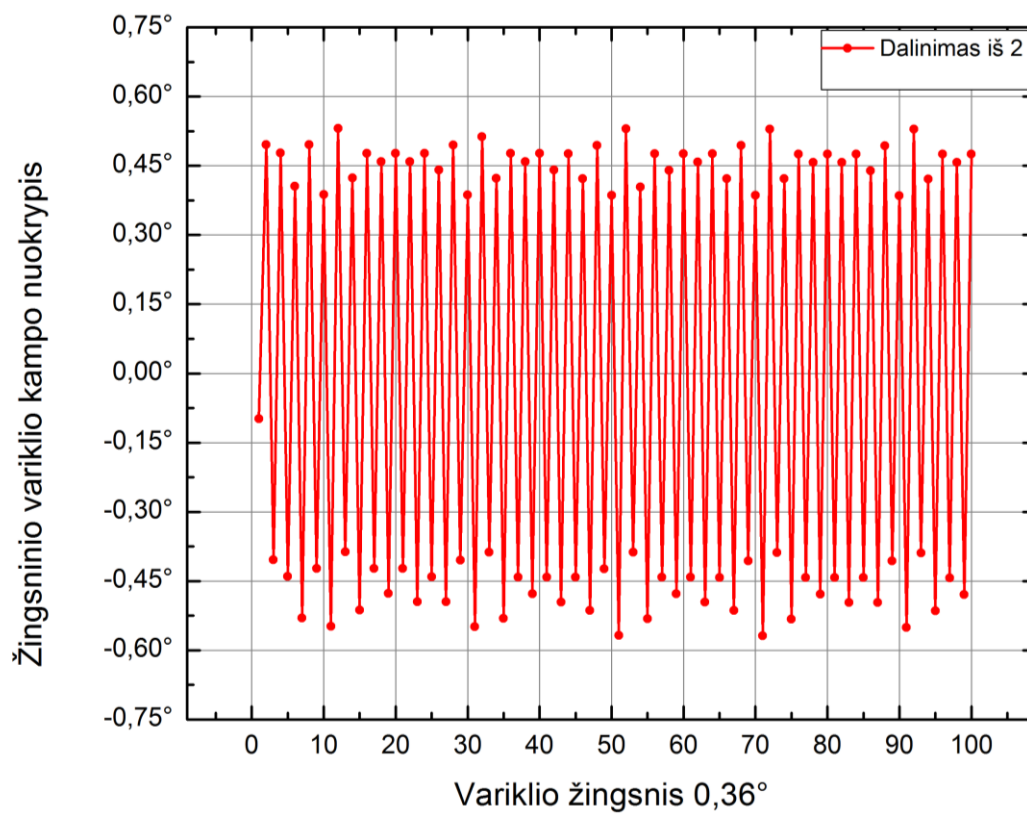


Penkiakampio prijungimo būdu

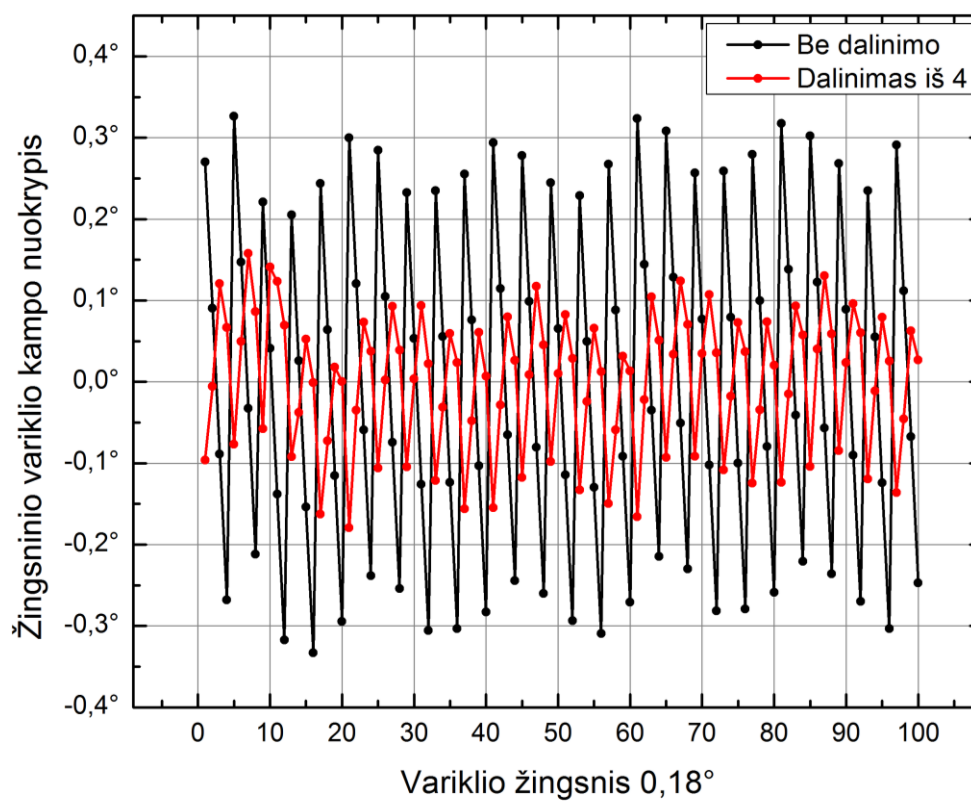
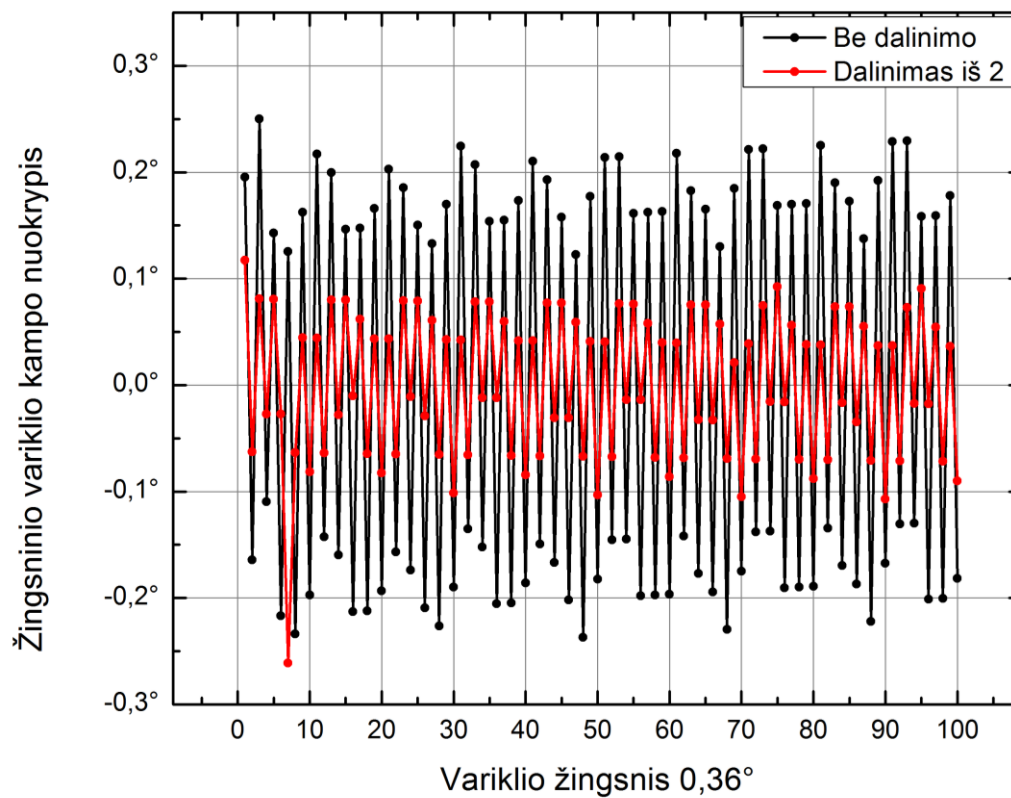


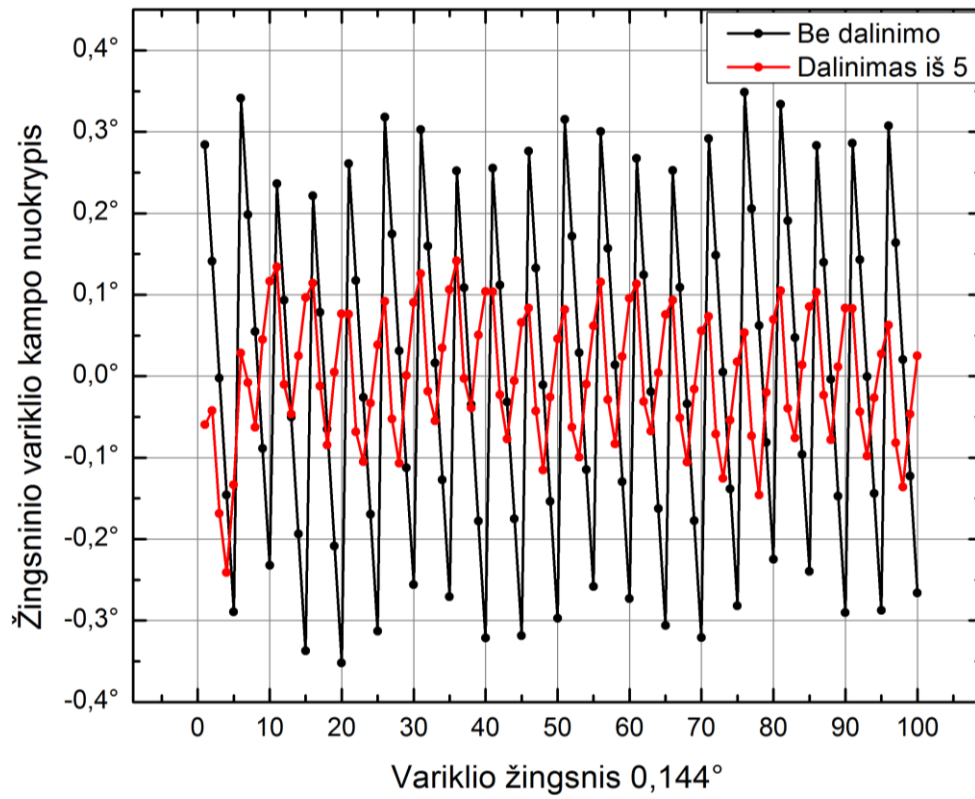


Žvaigždės prijungimo būdu su $0,058 \text{ N}\cdot\text{m}$ apkrova

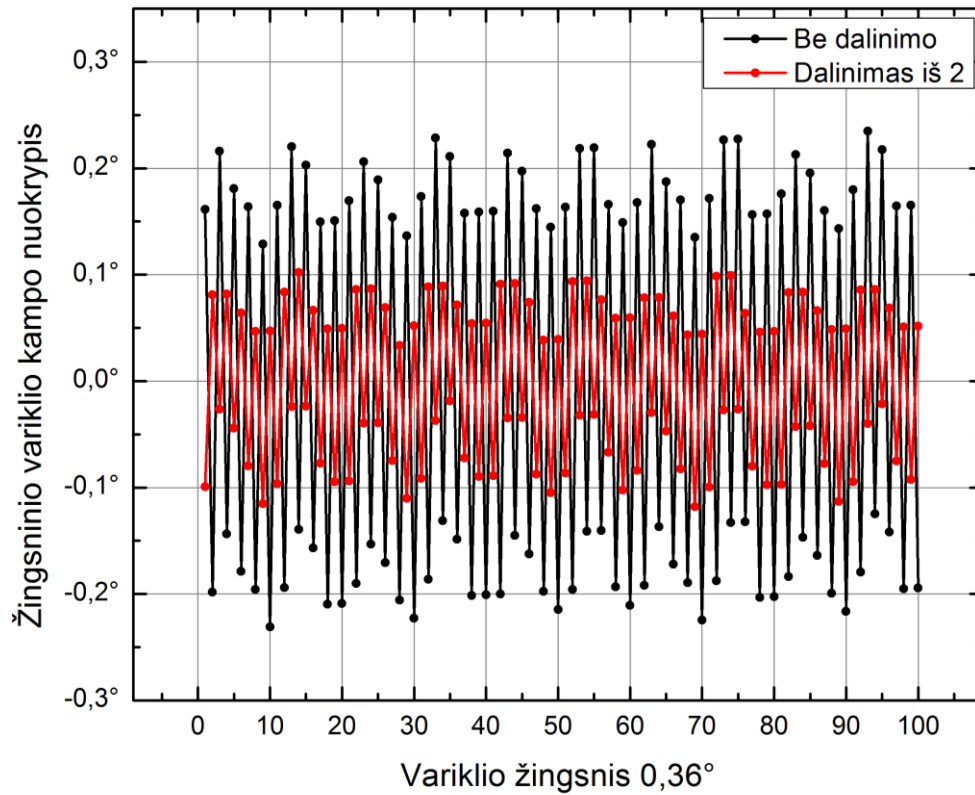


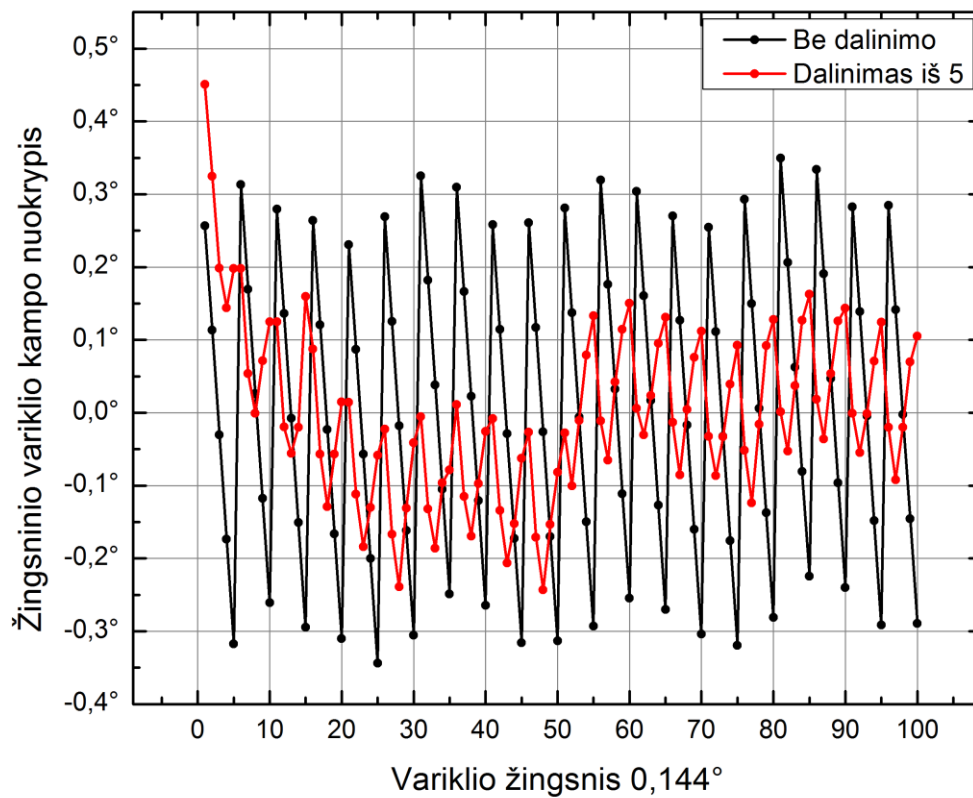
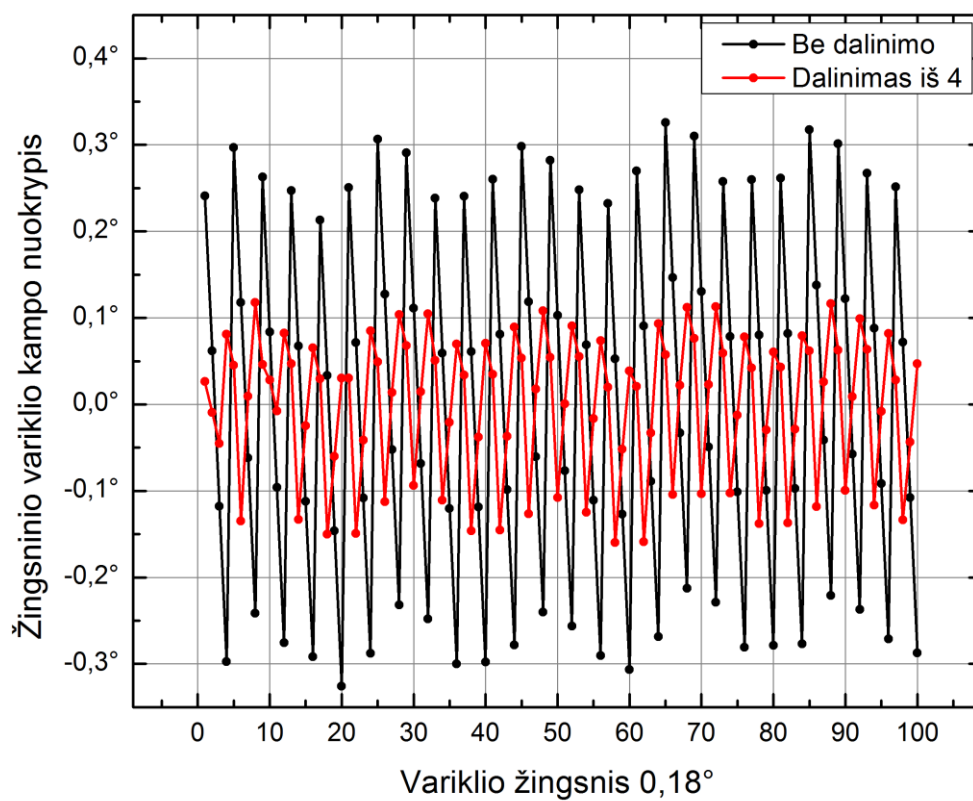
Penkiakampio prijungimo būdu



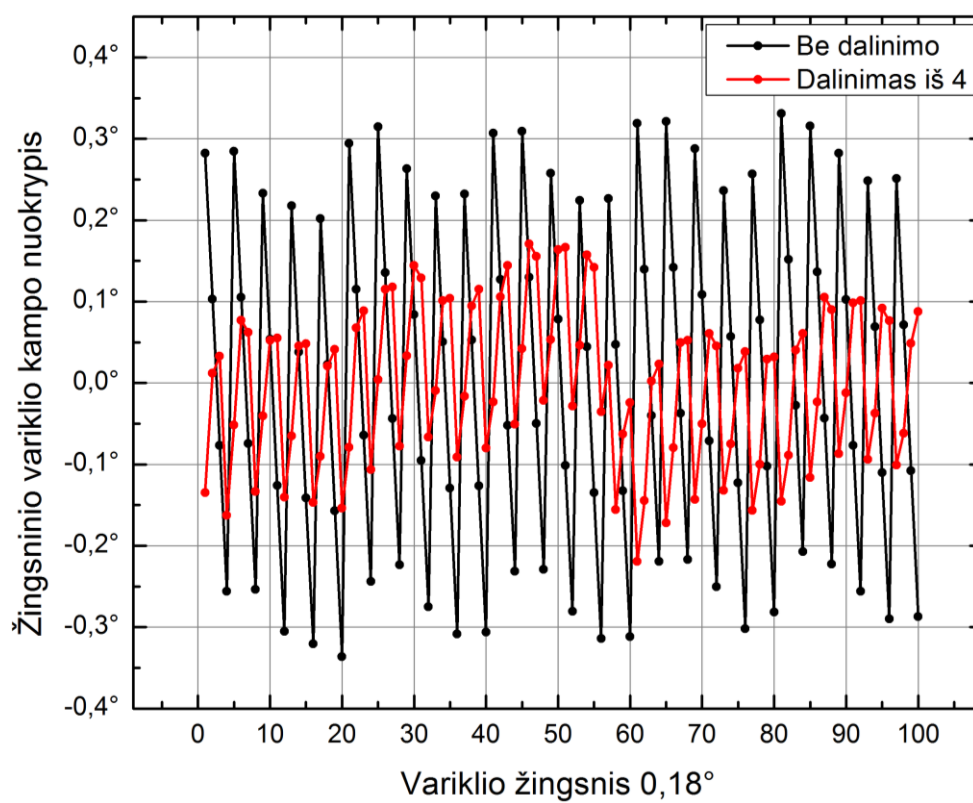
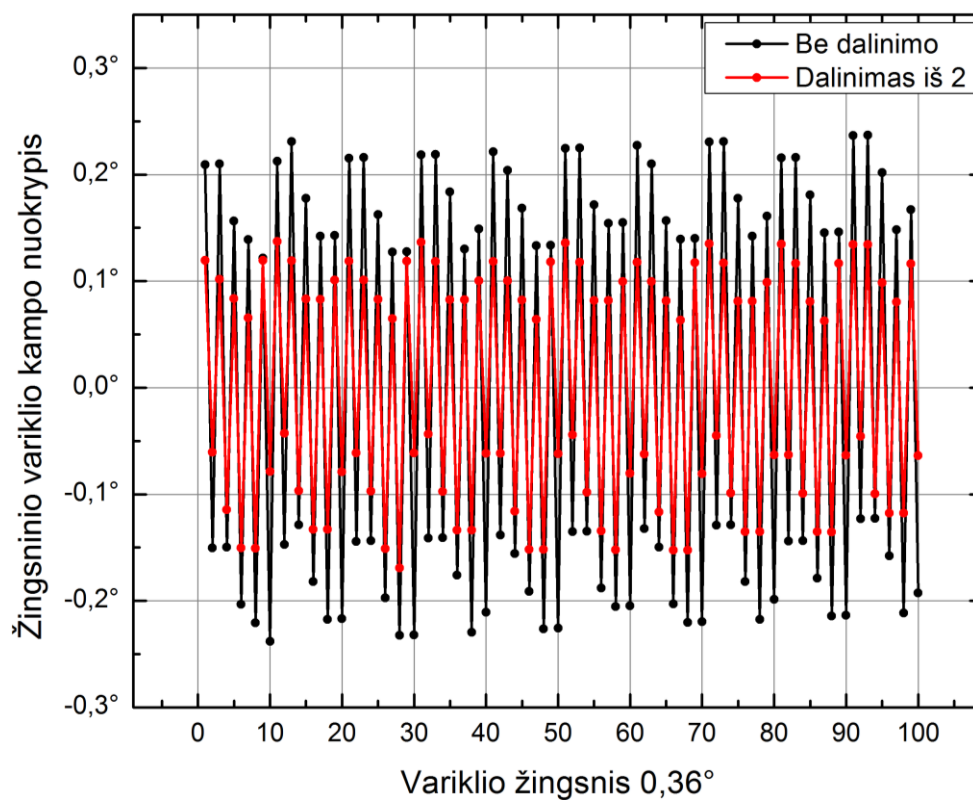


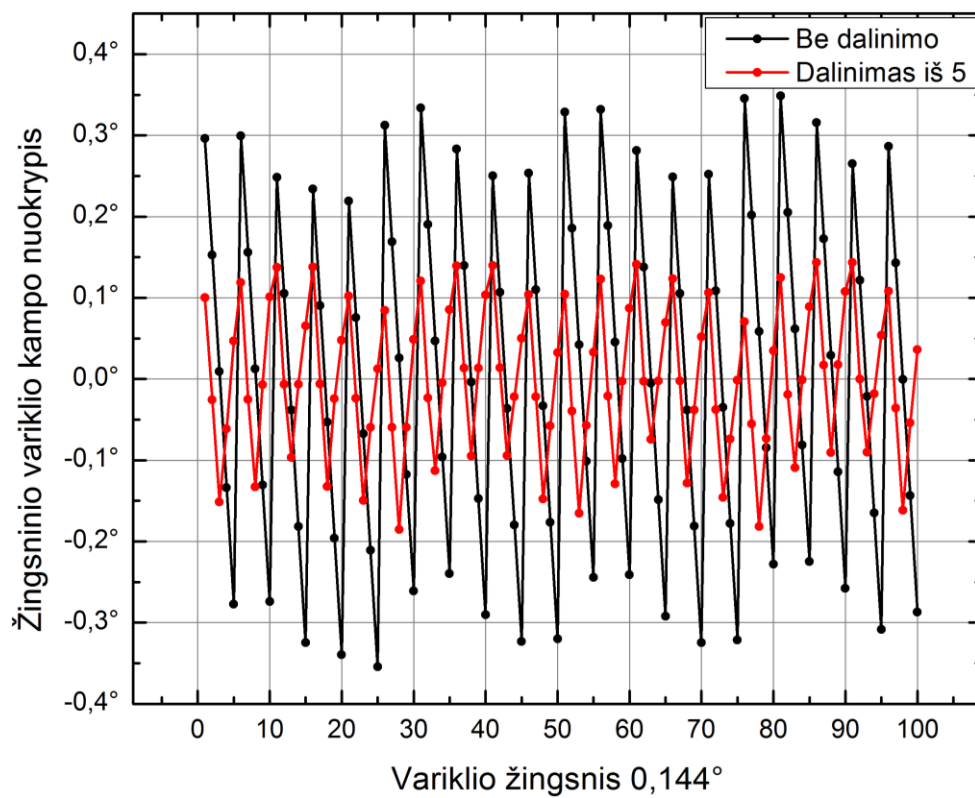
Penkiakampio prijungimo būdu su $0,074 \text{ N}\cdot\text{m}$ apkrova





Penkiakampio prijungimo būdu su 0,092 N·m apkrova





Penkiakampio prijungimo būdu su $0,114 \text{ N}\cdot\text{m}$ apkrova

