

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

GRAŽVYDAS KAZOKAITIS

MAGNETOSFERINĖS PJEZOELEKTRINĖS
PAVAROS, SKIRTOS NANOPALYDOVAMS
ORIENTUOTI, KŪRIMAS BEI TYRIMAI

Daktaro disertacija
Technologijos mokslai, Mechanikos inžinerija (T 009)

2021, Kaunas

Disertacija rengta 2016–2020 metais Kauno technologijos universiteto Mechatronikos institute.

Mokslinis vadovas:

Prof. dr. Vytautas JŪRĖNAS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija, T 009).

Interneto svetainės, kurioje skelbiama disertacija, adresas: <http://ktu.edu/>

Redagavo:

Rozita Znamenskaitė (leidykla „Technologija“)

TURINYS

1. LITERATŪROS APŽVALGA	12
1.1. Mažųjų palydovų tipai ir jų klasifikacija	12
1.2. Palydovų orientavimo sistemos	13
1.3. Palydovą veikiančios jėgos.....	15
1.4. Palydovų orientavimo įranga ir veikimo principai	19
1.5. Palydovų orientavimo koordinačių sistemos	21
1.6. Palydovo pozicionavimo judesio lygtis	23
1.7. Pagrindiniai palydovo konstrukcijos elementai	24
1.8. Pavaros ir reikalavimai joms	27
1.9. Pjezoelektrinės medžiagos.....	29
1.10. Pjezoelektrinių elementų virpesių modos	31
1.11. Pjezoelektrinės pavaros ir jų tipai.....	32
1.12. Pjezoelektrinės pavarų konstrukcijos su keletu laisvės laipsnių.....	37
1.13. Skyriaus apibendrinimas ir išvados bei tikslai.....	42
2. PALYDOVŲ KONSTRUKCIJOS, PAGRINDINIAI ELEMENTAI IR SKAIČIUOJAMASIS PAVAROS MODELIS	44
2.1. Siūlomos pavaros modelis	44
2.1.1. Pavaros konstrukcijos koncepcija bei veikimo principas	44
2.1.2. Pavaros konstrukcinis modelis	47
2.2. Matematinis modelis.....	48
2.3. Skaičiuojamasis pavaros modelis	51
2.3.1. Pjezoelektrinio keitiklio su skirtingu elektrodo sudaliniu analizė	52
2.3.2. Pjezoelektrinio keitiklio su skirtinga jungės geometrija analizė.....	60
2.4. Skyriaus išvados	66
3. EKSPERIMENTINIS PJEZOELEKTRINĖS ULTRAGARSINĖS PAVAROS TYRIMAS	67
3.1. Pjezoelektrinių keitiklių elektrinio impedanso matavimas	68
3.2. Rezonansinių dažnių ir virpesių formų tyrimas.....	72
3.3. Pjezoelektrinės pavaros skyros matavimai	76
3.4. Keitiklio vieno aktyvaus taško poslinkių matavimai.....	78
3.5. Pavaros sukimosi dažnio matavimo eksperimentai	80

3.6. Skyriaus išvados	80
4. Palydovo misijos ir sąlygų simuliacijos	82
4.1. <i>CubeSat</i> tipo palydovų misijos planavimas ir pagrindiniai etapai	82
4.2. Palydovo misijos simuliacija	83
4.3. SNAP simulatoriaus aplinka, pagrindinės funkcijos	83
4.4. Sumodeliuotos pavaros maketo integracija į palydovą.....	84
4.4.1. Pavaros integracija į palydovą	85
4.4.2. Palydovo misijos parametrų skaičiavimas	87
4.4.3. Palydovo misijos simuliacija	91
4.5. Palydovo pavaros valdymo sistema.....	97
4.5.1. Palydovo pozicijos nustatymo ir kontrolės sistemos (ADCS).....	97
4.5.2. Palydovo pozicijos kontrolės sistema	98
4.5.3. Palydovo kontrolės jutiklių bandymai	98
4.5.4. Palydovo kontrolės sistemos įranga.....	101
4.5.5. Palydovo kontrolės sistemos algoritmas.....	102
4.6. Skyriaus išvados	105
5. IŠVADOS	106
6. PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS.....	115
7. PRIEDAI	117
7.1.1. Priedas. Palydovo misijos planavimo etapai, jų aprašai, palydovų sistemų bandymų įranga ir metodai	117
7.2.2. Priedas. SNAP įrankio blokinė veikimo schema.....	124
7.3.3. Priedas. Magneto pjezoelektrinės pavaros įrenginys.....	125

Santrumpos

MPP – magnetosferinė pjezoelektrinė pavara

ŽŽO – žemoji Žemės orbita (angl. *low Earth orbit, LEO*)

GEO – geosinchroninė orbita (angl. *geosynchronous orbit*)

VŽO – vidutinė Žemės orbita (angl. *Medium Earth 's orbit*)

SRS – Saulės radiacinis slėgis (angl. *Solar radiation pressure*)

SEO – stipriai eliptiška orbita (angl. *highly elliptical orbit*)

UGM – Ultragarsinis variklis (angl. *ultrasonic motor, USM*)

LLS – laisvės laipsniai (angl. *degrees of freedom*)

IS – išorinis skersmuo

VS – vidinis skersmuo

PĮ – programinė įranga

BEM – baigtinių elementų metodas (angl. *Finite element analysis*)

EMI – elektromagnetinė interferencija (angl. *electromagnetic interference*)

EMS – elektromagnetinis suderinamumas (angl. *electromagnetic compatibility*)

VPSŽ – Valdymo ir palaikymo sistema iš Žemės (angl. *mechanical ground and support equipment, MSGE*)

KVKM – krypties vektoriaus kosinusų matrica (angl. *direction cosinus matrix, DCM*)

ĮVADAS

Temos aktualumas

Šiuolaikinėse sistemose pjezoelektrinės pavaros bei įvairūs įrenginiai, pagaminti remiantis pjezoelektrinėmis medžiagomis bei jų savybėmis, yra plačiai paplitę ir naudojami įvairioms pramoninėms, mokslinėms bei plataus vartojimo prekėms. Įrenginiai, kurie turi pjezoelektrinę pavarą, gali būti sumontuoti: optinėse bei lazerinėse sistemose, mikromanipuliatoriuose bei robotuose, metrologiniuose įrenginiuose, medicinos prietaisuose, tikslaus medžiagų apdirbimo staklėse [1, 2]. Pjezoelektrinės pavaros yra preciziškos, kompaktiškos, nedidelės masės, tokių įrenginių inercija yra maža ir atsako trukmė nedidelė. Tokios savybės leidžia pasiekti didelį galios ir masės santykį įrenginiuose, kur tokio tipo elementai yra naudojami.

Lietuvos mokslininkai vieni iš pirmųjų pasaulyje tyrė šias problemas bei sprendė įvairius precizinės vibromechanikos uždavinius, kūrė mechanizmus ir technologijas. Vibrotechnikos pradininkas Lietuvoje yra prof. habil. dr. K. Ragulskis, jis įkūrė vibrotechnikos laboratoriją bei mokyklą Kauno technologijos universitete (buv. KPI). Didelė dalis vibrotechnikos laboratorijos darbuotojų, žymiai prisidėjusių prie vibromechanikos uždavinių sprendimo, šios srities plėtojimo, tapo habilituotais mokslo daktarais, profesoriais: V. Augustaitis, R. Bansevicius, B. Bakšys, V. Barzdaitis, A. Bubulis, R. Barauskas, A. Busilas, J. Dulevičius, A. Fedaravičius, R. Jonušas, S. Kaušinis, A. Palevičius, G. Kulvietis, A. Kasparaitis, V. Ostaševičius, B. Spruogis, R. T. Toločka, V. Volkovas, P. Žiliukas ir daug kitų. Šių nusipelnusių mokslininkų dėka vibroinžinerijos mokslinėje srityje padaryti atradimai bei konstrukciniai sprendimai pritaikyti įvairiose praktikos srityse: mašinų bei prietaisų pramonėje, mokslo įrenginiuose, aerokosminėje technikoje, medicinoje, laivyboje ir kt. Šie mokslininkai ištyrė netiesinių dinaminių sistemų efektus bei principus, sukūrė mokslinius pagrindus ir principus naujoms sistemoms sudaryti, išplėtojo precizinės vibromechanikos sritį iki taikomųjų mokslų rezultatų inžinerinei praktikai [3]. Nepaisant daugiamečio įdirbio vibromechanikos srityje tiek Lietuvoje, tiek ir pasaulyje, vis dar gausu neišspręstų bei atsirandančių naujų mokslinių uždavinių, susijusių su vibromechanika. Viena iš daugelio tokių sričių yra kosmoso pramonė su joje kylančių iššūkių sprendimu bei diegimu naujų technologijų, kurios gali būti pagrįstos vibromechanikos principais.

Pjezoelektrinės pavaros yra gaminamos iš neferomagnetinių medžiagų ir gali būti naudojamos ten, kur neturėtų būti magnetinio lauko ar interferencijos su juo [4]. Šio tipo pavaros tylios, tad jas galima naudoti ten, kur aplinkos triukšmas yra nepageidaujamas, pavyzdžiui, medicinoje, vaistų tiekimo sistemose ar išmaniuosiuose asmeniniuose įrenginiuose [3, 5]. Pjezoelektrinio tipo pavaras valdyti gana nesudėtinga – sužadinus tam tikru elektriniu valdymo signalu, pavarai yra suteikiamas tiesinis arba kampinis poslinkis. Pjezoelektrinės pavaros sunaudoja labai nedidelius energijos kiekius veikdamos statiniu režimu ir yra itin efektyvios, kai pavaros energijos sąnaudos neviršija keleto dešimčių vatų lyginant su standartinėmis elektromagnetinėmis pavaromis. Pjezoelektrinėms pavaroms nereikalingas tepimas, tad tokios pavaros tinka naudoti ten, kur tepimas yra nepageidaujamas: pavaras sunku

ar neįmanoma sutepti, siekiama išvengti tepalo garavimo aplinkoje, pavyzdžiui, vakuume [6, 7]. Taip pat pjezoelektrinės pavaros esant darbiniam režimui kaista nežymiai, tad ši savybė leidžia naudoti tokio tipo pavaras ten, kur šilumos generavimas yra nepriimtinas. Pjezoelektrinės pavaros gali veikti itin žemose temperatūrose, siekiančiose keletą kelvinų [8].

Kadangi pavaros yra nesudėtingos, o valdymo moduliai paprasti, tokių pavarų kaina santykinai nedidelė. Pjezoelektrinės pavaros yra lengvai pritaikomos prie reikalingų uždavinių bei integracijos reikalavimų.

Ultragarsinės stovinčiosios ar bėgančiosios bangos pavaros yra nuodugniai išnagrinėtos kaip galimas analogas tipinėms elektromechaninėms pavaroms, tačiau, nepaisant anksčiau paminėtų privalumų, šio tipo pavaros turi ir tam tikrų trūkumų, kurie apriboja galimą tokių pavarų panaudojimą: pavarų poslinkių dydis ir pavarų matmenys negali būti didinami, kartais nepakankamas pavarų tikslumas, kontaktinių paviršių dėvėjimasis, pavarų kūrimo gamybos kaštai tampa ekonomiškai nenaudingi. Tad vis dar atliekama nemažai tyrimų ir bandymų, kaip tokio tipo pavaras modifikuoti norint išvengti ar sumažinti anksčiau minėtus trūkumus bei susijusias problemas.

Siekiant panaudoti pjezoelektrines pavaras palydovuose reikia pažymėti, kad šio tipo pavaros užima nors ir nedidelį, bet tam tikrą tūrį, joms reikalingas valdymo modulis bei energijos šaltinis, kuris užtikrintų stabilų pavaros darbą, taip pat reikalingi matavimo ir grįžtamojo ryšio elementai, kuriuos panaudojant galima sekti pavaros poziciją darbo metu. Visi šie elementai turi būti integruojami į palydovą, jo valdymo bei sekimo sistemą.

Nepaisant keliamų reikalavimų bei tam tikrų anksčiau paminėtų trūkumų, kuriuos turi pjezoelektrinės pavaros, jos gali būti panaudojamos mažuose palydovuose: šių pavarų masė ir dydis yra tinkamas, jų energijos sąnaudos yra pakankamai mažos, užtikrina didelį išėjimo grandies generuojamo poslinkio tikslumą, joms nebūtinai tepimas, tad gali dirbti vakuume aplinkoje ir žemose temperatūrose.

Tyrimo tikslas ir uždaviniai

Šio tyrimo tikslas – sukurti ir ištirti kelių laisvės laipsnių magnetosferinėje pjezoelektrinėje sukimo pavarą, skirtą aktyviai nanopalydovų orientacijai erdvėje.

Tikslui pasiekti iškelti tokie uždaviniai.

1. Atlikti egzistuojančių pjezoelektrinių pavarų konstrukcijų analizę, siekiant nustatyti jų panaudojimo galimybes aktyviai bei pasyviai nanopalydovų orientacijai erdvėje, pagerinti palydovo pozicionavimo tikslumo ir energinio naudingumo charakteristikas.
2. Suprojektuoti pjezoelektrinės pavaros, skirtos aktyviai trimatei nanopalydovų orientacijai erdvėje, skaitinius modelius bei atlikti jos valdymo režimų patikrą ir ištirti dinamines charakteristikas bei keitiklio valdymo elektrodų konfigūracijos įtaką daugiakrypčių virpesių žadanimui.
3. Sukurti pjezoelektrinės pavaros su sferiniu rotoriumi eksperimentinį maketą, atsižvelgiant į analitinius skaičiavimus ir atlikti valdymo

režimų bei dinamiųjų parametrų eksperimentinius tyrimus su šiuo maketu.

4. Atlikti skriejančio nustatyta trajektorija aplink Žemę nanopalydovo simuliaciją, jo trimačiam orientavimui erdvėje naudojant sukurtą pjezoelektrinę pavarą su magnetiniu sferos formos rotoriumi ir pateikti išvadas.

Tyrimo metodai

Šis darbas parengtas pasitelkiant teorinius bei eksperimentinius tyrimo metodus. Trimačių modelių sukūrimui bei jų analizei naudoti šie programiniai paketai ir įranga: *Autodesk Inventor Professional 2018*, *COMSOL MultiPhysics 5.3*, *Microsoft Excel* bei *Matlab 2017a* su papildiniais *Simulink* ir *Smart Nanosatellite Attitude Propagator (SNAP) V3.0*.

Eksperimentiniai tyrimai atlikti Kauno technologijos universiteto, Mechatronikos instituto laboratorijose. Pjezoelektrinės pavaros virpesių dinaminiams parametrams tirti bei poslinkiams matuoti buvo naudojami lazeriniai Doplerio vibrometrai *Polytec PSV-500-3D-HV* ir *OFV-5000/505* bei signalų generatorius *WW5064 (Tabor Electronics Ltd.)* ir įtampos stiprintuvas *EPA-104 (PiezoSystems Inc.)*. Impedanso tyrimams atlikti naudotas *Wayne Kerr 6500B* impedanso analizatorius. Sferos magnetinio lauko stipris matuotas trijų ašių magnetometru, modeliu *460 (Lake Shore Cryotronics, Inc.)*.

Mokslinis naujumas

1. Sukurta nauja pjezoelektrinė ultragarsinė sukamojo judesio trimatėje erdvėje pavara, pasižyminti dideliu sferinio rotoriaus pozicionavimo tikslumu ir leidžianti atlikti palydovo trimačio orientavimo erdvėje funkcijas.
2. Sukurtas ir ištirtas aukštesnių virpesių modų pagrindu funkcionuojantis pjezoelektrinis ultragarsinis vykdiklis, kurio aukštesnės modos virpesių sužadinimui nustatyti ir apskaičiuoti keitiklio geometriniai parametrai bei efektyviam valdymui reikalinga valdymo elektrodų konfigūracija.
3. Sudaryti ir ištirti unimorfino tipo žiediniai pjezoelektrinio keitiklio skaitiniai modeliai judesio trajektorijoms tirti.

Ginamieji teiginiai

1. Sukurta ultragarsinė pjezoelektrinė pavara su sferiniu rotoriumi, kuri pasižymi dideliu kampinio poslinkio tikslumu (skyra $30 \mu\text{rad} \pm 1 \mu\text{rad}$) ir kuri gali būti panaudota mažų palydovų aktyvaus orientavimo trimatėje erdvėje sistemose.
2. Sukurtas bei ištirtas ultragarsinės pavaros pjezoelektrinis vykdiklis, kurio darbinis rezonanso dažnis yra $\sim 95 \text{ kHz}$, nustatyti bei apskaičiuoti vykdiklio geometriniai parametrai ir dinaminės charakteristikos, kurie yra reikalingi siekiant surasti efektyviausią jo valdymo elektrodų sudalinimo konfigūraciją.

3. Sudaryti unimorfino tipo pjezoelektrinių žiedo formos vykdklių skaitiniai modeliai, kurie skirti nagrinėti jo atskirų taškų erdvinių virpesių amplitudėms bei judesio trajektorijoms ir rezonansiniams darbiniam dažniams.

Praktinė vertė

1. Sukurti trimačiai pjezoelektrinės pavaros modeliai, kuriuos naudojant galima atlikti skaičiavimus, nagrinėti įvairias pavaros konfigūracijas, vykdyti teorinius tyrimus.
2. Daugiakanalis elektrinio valdymo signalo modulis gali būti naudojamas pjezoelektrinėms ultragarsinėms pavaroms tirti su skirtinga valdymo elektrodų konfigūracija ir/ar kitokios geometrijos pjezoelektriniam keitikliams.
3. Sukurtas ir ištirtas unimorfino tipo žiedinis pjezoelektrinis vykdklis su keliomis jungės formomis, veikdamas aukštesnės modos virpesių režimu, užtikrina didesnę sferinio rotoriaus kampinio poslinkio tikslumą ir yra energetiškai efektyvesnis.
4. Sukurta pjezoelektrinės pavaros konstrukcija gali būti naudojama ne tik aktyviam palydovų orientavimui, bet ir robotikoje, optomechanikos inžinerijoje bei kitose tikslaus pozicionavimo sistemose.

Gauti tyrimų rezultatai taikyti Europos Sąjungos fondų investicijų veiksmų programos priemonės nr. 01-2.2-LMT-K-718 „Tiksliniai moksliniai tyrimai sumanios specializacijos srityje“ finansuojamame projekte (nr. 01.2.2-LMT-K-718-01-0010). Projekto vadovas prof. habil. dr. Dalius Mažeika.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijoje pateikiami tyrimai buvo publikuoti įvairiuose leidiniuose bei konferencijose.

Dviejose *Web of Science* duomenų bazėje referuojamuose žurnaluose su dideliu citavimo indeksu (žurnalo „Sensors“ specialiajame leidinyje „Development of Piezoelectric Sensors and Actuators“(IF3); žurnale „Applied Science“ (IF2.4)).

Dalyvauta ir pristatyti rezultatai tarptautinėse konferencijose:

- *Proceedings of the 22nd International Scientific Conference Mechanika*, 2017, Kaunas;
- *Proceedings, of 29th International Conference on Vibroengineering*, 2017, Vilnius;
- *Joint event proceedings of 2-nd International Conference on Advanced Robotics, Mechatronics and Artificial Intelligence and 3-rd International Conference on Design & Production Engineering*, 2018, Valensija;
- *8th International Conference on Smart Materials and Structures*, 2019, Dublinas;
- *Proceedings of the 24 International Scientific Conference Mechanika*, 2019, Kaunas;

- *15th International Conference Mechatronic Systems and Materials*, 2020, Lenkija.

Patentuota pavaros konstrukcija:

- Gražvydas Kazokaitis; Vytautas Jūrėnas; Darius Eidukynas. Magneto pjezoelektrinės pavaros įrenginys; patento nr. LT 6728 B, 2020-04-10.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro: įvadas, 4 skyriai, darbo rezultatų apibendrinimas – išvados bei priedai, 117 literatūros šaltinių ir autoriaus publikacijų sąrašas. Šio darbo apimtis:

- 132 puslapiai;
- 40 formulių;
- 110 iliustracijų;
- 19 lentelių.

Pirmas skyrius: literatūros apžvalga. Šiame skyriuje apžvelgiami pozicionavimo ir orientavimo mechanizmai, valdymo metodai, kurie šiuo metu yra naudojami palydovams. Vėliau aprašomos pjezoelektrinės medžiagos, pjezoelektrinių pavarų tipai. Skyrius užbaigiamas egzistuojančių pjezoelektrinių pavarų konstrukcine analize, pažymint šių pavarų trūkumus bei privalumus, sukongretizuojamos savybės, kurias galima panaudoti projektuojant pjezoelektrinės pavaros su sferiniu rotoriumi, skirtos nanopalydovų orientavimo ir pozicionavimo mechanizmui, eksperimentinį maketą.

Antras skyrius: čia pristatoma magnetosferinės pjezoelektrinės pavaros (MPP) konstrukcija, veikimo principas. Vėliau aprašomas baigtinių elementų metodui pritaikytas MPP modelis, aprašoma skaitinių tyrimų seka bei skaičiavimo metodai. Galiausiai, aprašomi atlikti MPP skaitiniai tyrimai, gauti rezultatai bei pateikiamos skyriaus išvados.

Trečias skyrius: jo pradžioje pateiktos eksperimentinio MPP maketo modifikacijos. Tolimesniuose poskyriuose aprašomi atlikti pavaros natūriniai eksperimentai – impedanso skaičiavimai, rezonansinių dažnių bei virpesių formų tyrimai, kampinio poslinkio skyros nustatymas, vieno aktyvaus taško poslinkio tyrimas bei pavaros sukimosi dažnis. Skyriaus pabaigoje pateikiamos apibendrinamosios trečiojo skyriaus tyrimų išvados ir gauti rezultatai.

Ketvirtas skyrius: pradžioje aprašomi palydovų misijos planavimo ir įgyvendinimo etapai. Tolesniuose poskyriuose pristatoma *ESTCube-1* palydovui pritaikyta MPP, galima jos integracija į palydovo konstrukciją. Vėliau skyriuje apibrėžiami kriterijai, reikalingi atlikti palydovo skaitinei misijos analizei. Suskaičiuojami palydovo su MPP misijos skaitinei analizei reikalingi parametrai, atliekama skaitinė analizė bei pristatomi rezultatai. Skyriaus pabaigoje pateikiamos palydovų pozicijos kontrolės sistemos aprašas, reikalingi jutikliai grįžtamajam ryšiui iš MPP gauti bei analizuojamas palydovo kontrolės sistemos veikimo algoritmas. Taip pat skyriaus pabaigoje pateikiamos išvados.

Išvados: apibendrinami ir pateikiami atliktų teorinių bei eksperimentinių tyrimų rezultatai.

Priedai: juose pateikiamas išsamus misijos planavimo žingsnių ir vykdymo aprašas, pozicionavimo bei orientavimo sistemų bandymų įrangos veikimo principai ir eksperimentiniai metodai. Prieduose taip pat pateiktas SNAP, naudojamos palydovų misijos skaitinėms analizėms, programinės įrangos algoritmas.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Mažųjų palydovų tipai ir jų klasifikacija

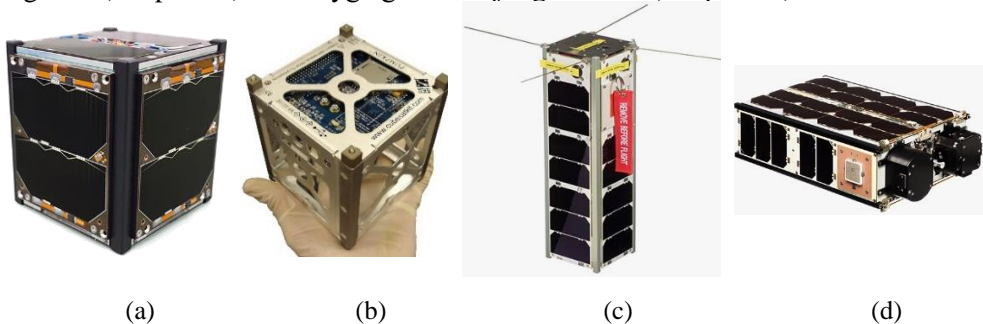
Mažieji palydovai gali būti klasifikuojami pagal įvairius parametrus, nusakant jų svorį, orbitą, paskirtį ir pan. Dažniausiai mažieji palydovai yra skirstomi pagal masę į šias kategorijas [9]:

- minipalydovai 100–180 kg;
- mikropalydovai 10–100 kg;
- nanopalydovai 1–10 kg;
- pikopalydovai 0,01–1 kg;
- femtopalydovai 1–100 g.

Populiariausia mažųjų palydovų grupė – *CubeSat*. Ši grupė priklauso nanopalydovų kategorijai ir pastaruoju metu dažniausiai mėgėjų, jų grupių ar komercinių subjektų yra naudojami mokslo bei technologiniams pasiekimams demonstruoti. *CubeSat* palydovai turi griežtai reglamentuotas taisykles [10, 11, 12]. Remiantis šiomis taisyklėmis bei reikalavimais, nanopalydovas projektuojamas ir išdėstomi jo vidiniai komponentai.

Reikalavimus nanopalydovams išdėstė bei reglamentavo šio tipo palydovų autoriai – Kalifornijos politechnikos universitetas. Idėjos autoriai: profesorai Jordi Puig-Suari (Kalifornijos politechnikos universitetas), San Luis Obispo bei Bob Twiggs (Stanfordo universitetas), 1999 metai [13]. Šiuose reikalavimuose nurodoma, kad nanopalydovo minimalūs matmenys yra 10 cm × 10 cm × 10 cm, o masė – 1,33 kg. Toks vienas tūrinis dydis yra santykinai žymimas 1U. Praktikoje dažnai naudojami didesni palydovai, kurie turi iteracinius tūrinius dydžius: 1.5U, 2U, 3U, 6U ir pan. Toks žymėjimas reiškia, kad palydovas nekeičia savo ilgio ir pločio matmenų, tačiau kinta jo aukštis. 1.1 pav. pateikti keli pavyzdžiai, kaip atrodo tipinis *CubeSat* palydovas. Praktiškai visos *CubeSat* misijos vyksta žemojoje Žemės orbitoje (ŽŽO, (angl. *Low Earth Orbit*)).

Galimas nuoseklus ir lygiagretusis 1U jungimas: 3U nuoseklus trijų 1U jungimas (1.1 pav., c); 6U – lygiagrečiai sujungti du 3U (1.1 pav., d).



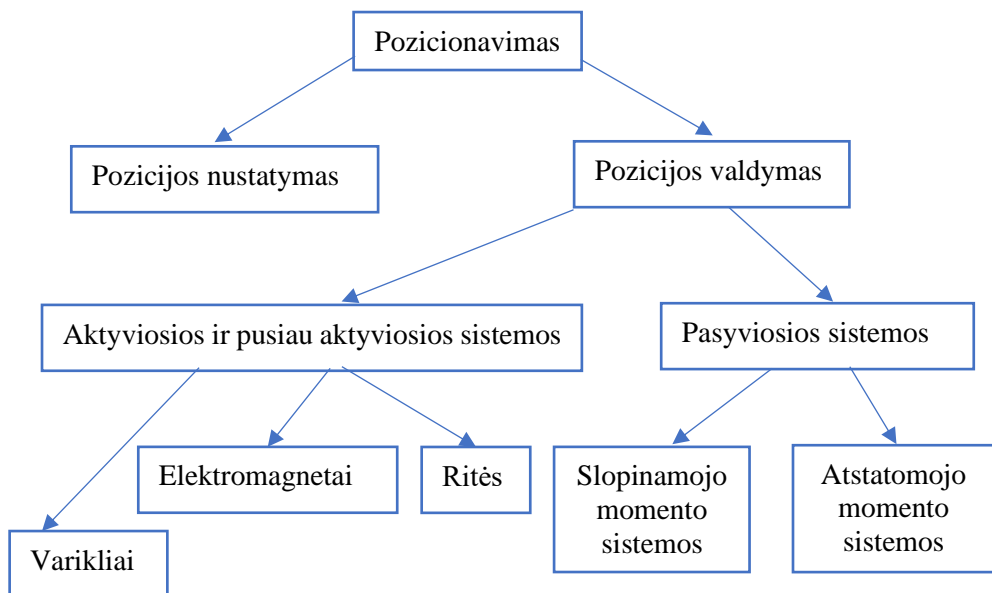
1.1 pav. *CubeSat* palydovų pavyzdžiai: a) ISIS 1U; b) *Pumpkin* sistemos 1U; c) M3U; d) M6U [14, 15, 16, 17]

Dėl mažo *CubeSat* palydovų dydžio, griežto masės ir masės centro reglamentavimo bei kitų standartizuotų apibrėžčių palydovo viduje esantys komponentai turi griežtus apribojimus. Todėl palydove esantys energijos šaltiniai yra labai limituoti, o orientavimui naudojami mechanizmai – maži. Šie apribojimai suponuoja, kad mechanizmai bei elektronika turi būti efektyvūs, maži bei sunaudoti kuo mažesnius energijos kiekius tam, kad būtų galima energija aprūpinti stebėjimo ir matavimų įrangą ar pratęsti misijos trukmę.

1.2. Palydovų orientavimo sistemos

Pozicionavimas – procesas, kurio metu palydovas yra pozicijuojamas erdvėje pagal nustatytą atskaitos tašką, koordinacių sistemą. Šią sistemą paprastai sudaro jutikliai, vykdikliai, avionika, matematiniai algoritmai ir programinė įranga bei Žemės, Saulės ar žvaigždžių sekimo įranga, kuri padeda sekti, nusakyti ir valdyti palydovo padėtį erdvėje. Tokios sistemos yra vadinamos įvairiai: pozicijos nustatymo ir kontrolės sistema (angl. *Attitude determination and control system (ADMS)*), pozicionavimo su Žeme sistema (angl. *Attitude ground system (AGS)*), pozicionavimo bei orbitos kontroliavimo sistema (angl. *Attitude and orbit control system (AOCS)*), valdymo, navigavimo ir kontrolės sistemos (angl. *guidance, navigation and control (GNC)*) [18].

Pozicionavimo uždavinys yra skaidomas į dvi dedamąsias: pozicijos nustatymo bei pozicijos valdymo. Pozicijos nustatymas – tai procesas, kurio metu naudojantis įvairiais jutikliais yra apibrėžiama ir matuojama palydovo orientacija erdvėje. Pozicijos valdymas – procesas, kurio metu palydovas yra nukreipiamas į numatytąją padėtį [19]. Šiam uždaviniui atlikti naudojamos įvairios sistemos: pasyviosios, aktyviosios ar pusiau aktyviosios (1.2 pav.).

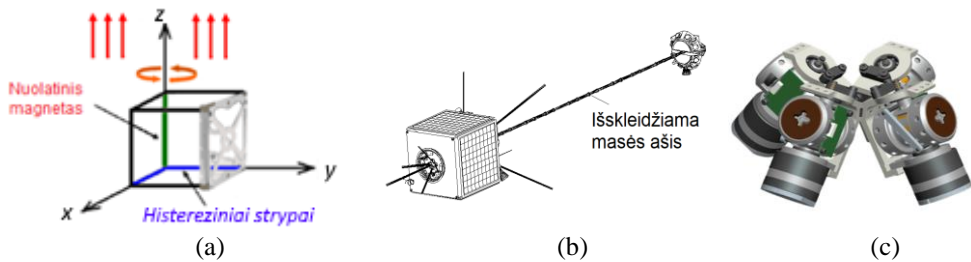


1.2 pav. Pozicionavimo sistemų klasifikacija [20]

Pasyviosiose pozicionavimo sistemose dažniausiai naudojami pasyvūs, nuolatiniai magnetai, gravitaciniai gradiento elementai (smagračiai, judančios masės švytuoklės, histereziniai strypai, sukūrinės srovės, (1.3 pav., *a*). Nuolatinį magnetų atveju sistemos yra orientuojamos kartu su Žemės magnetiniu lauku taip, kad palydove sumontuoto nuolatinio magneto vektorius sutaptų su Žemės magnetinio lauko vektoriumi. Jei naudojama judančioji masė, tada sistema nukreipiama taip, kad masę sudarantys elementai būtų nukreipiami Žemės atžvilgiu.

Pusiau aktyviosiose sistemose – elektromagnetinės sistemos, magnetinės sistemos su judančiąja mase. Tokiu atveju galima valdant magnetą valdyti pozicionavimo sistemą (1.3 pav., *b*). Elektromagnetinės sistemos turi ortogonaliai įmontuotas tris elektromagnetines solenoido tipo rites, kurios yra suaktyvinamos, kai norima atlikti pozicionavimo veiksmą.

Aktyviosios sistemos – raketinio kuro, greitai judančios masės (giroskopai) (1.3 pav., *c*) [21, 22, 23]. Šiuo atveju palydovuose, kuriems reikalingas tikslus jų pozicionavimas tiek Žemės, tiek ir orbitos atžvilgiu, montuojamos sudėtingos sistemos su raketinio kuro varikliais, plazminiais varikliais, greitai besisukančios masės mechanizmais. Tokios sistemos veikia nuolat, jų funkcionavimui reikalingos didelės energijos sąnaudos. 1.1 lentelėje pateiktas skirtingų sistemų palyginimas, jų tikslumai bei gyvavimo trukmės. 1.2 lentelėje pateikta sistemų klasifikacija, jas suskirstant į keturias grupes: varančiosios masės išmetimas (angl. *mass expulsion*), impulsinės (angl. *momentum exchange*), priklausomos nuo veikiančios aplinkos (angl. *environmental*) bei išskleidančios (angl. *dissipative*). Pozicionavimo sistemas gali sudaryti įvairūs komponentai bei mechanizmai iš įvairių grupių, tuos mechanizmus komplektuojant į vieną bendrą palydovo korpusą.



1.3 pav. Pozicionavimo sistemų pavyzdžiai: a) nuolatinio magneto ir histerezinių strypų pozicijos palydove; b) pusiau aktyviosios sistemos su išskleidžiama mase; c) elektros varikliai su greitai besisukančia mase aktyviam pozicionavimo valdymui [19, 22, 24]

1.1 lentelė. Pozicionavimo sistemų palyginimas

Tipas	Kryptis/ Orientavimas	Manevringumas		Tikslumas	Gyvavimo trukmė
		Tiesinis	Sukimo		
Pasyvi	į Žemę	Tik jei naudojami papildomi elementai – varikliai	Riboti	$\pm 5^\circ$	Neribojama
Pusiaupasyvi	<ul style="list-style-type: none"> • Fiksuota bet kuria kryptimi • Fiksuota, bet gali būti perorientuota • Visomis, išskyrus antenos/išskleidžiamos masės ašimi 	Galimas aplink fiksuotą orientavimo ašį arba jei naudojami papildomi varikliai	Tik jei naudojami papildomi elementai	$< \pm 1^\circ$ Arba priklauso nuo orientavimo krypties bei mechanizmo	Tol, kol užtenka energijos
Aktyvi	Visomis	Bet kuria kryptimi	Bet kuria kryptimi/ribojimais vertikalaus sukimosi ašimi, jei naudojami giroskopai	$\pm 0,001^\circ \pm 1^\circ$ Priklauso nuo matavimo įrangos ir pavarų	Priklauso nuo kuro, sensorių bei pavarų gyvavimo trukmės

1.2 lentelė. Pozicionavimo sistemų klasifikacija pagal veikimo tipą [25]

Varančiosios masės išmetimas	Impulsiniai	Priklausomi nuo veikiančios aplinkos	Išsklaidančios
	Girokopiniai	Gravitacijos gradiento	Judančiosios masės
	Smagratinis	Magnetinės	Viskoziniai
	Kontroliuojamos ašies girokopiniai	Aerodinaminės	

1.3. Palydovą veikiančios jėgos

Palydovą misijos metu veikia nemažai trikdžių bei išorinių jėgų, į kurias reikia atsižvelgti projektuojant pozicionavimo mechanizmą. Šiame poskyryje pateikti pagrindiniai jėgų momentai, veikiantys palydovą: išoriniai trikdžiai, atmosferos jėgos, gravitacijos gradiento ir Saulės slėgio bei magnetiniai momentai. Šių momentų dydžiai priklauso nuo tokių faktorių kaip: orbitos aukščio, masės pasiskirstymo

palydove, formos, paviršiaus ploto, Saulės aktyvumo, atmosferos tankio, magnetų stiprumo palydove. 1.3 lentelėje pristatomas veikiančių momentų palyginimas ir sąlygos. 1.4 lentelėje pateiktas pavyzdys su veikiančių išorinių momentų reikšmėmis, kai palydovas yra 600 km orbitoje [26]. 1.4 pav. ir 1.5 pav. matyti grafikai, kurie atspindi veikiančių išorinių momentų bei jėgų priklausomybę nuo palydovo skrydžio orbitos aukščio ir kiti misijos bei palydovų paleidimo, pozicionavimo parametrai [18, 25]. 1.5 lentelėje pateikti skirtingų pozicionavimo sistemų generuojami momentai.

Išorinės jėgos – tai jėgos bei momentai, kurie veikia palydovą, kai jis yra vedamas iš orbitos. Šie trukdžiai gali būti skirstomi pagal du tipus, kurie priklauso nuo jų veikimo: cikliniai bei globalūs. Cikliškai pasikartojantys trukdžiai veikia palydovą bei neleidžia jam nusistovėti ir skrieti savo orbitoje. Šie trukdžiai stengiasi išvesti palydovą iš orbitos. Tokių veikiančių momentų pavyzdžiai: atmosferos jėgos, magnetiniai momentai, kurie priklauso nuo palydovo aukščio bei padėties.

Globalūs trukdžiai – veikiant šiems trukdžiams, palydovas yra nuolat veikiamas pridėtinės, išorinės jėgos ar momento, kurie greitina palydovą kampiniu pagreičiu bėgant laikui. Atsižvelgiant į palydovo tipą bei jo suprojektuotą konstrukciją, atitinkami trukdžiai yra vertinami: jei palydovas turi skrieti toje pačioje orientacijoje ir negali suktis, tada skaičiuojami ir vertinami globalūs trukdžiai. Vis dėlto, jei palydovas gali suktis aplink savo ašį, tačiau negali būti išvedamas iš savo orbitos – vertinami cikliniai trukdžiai, jėgos [19]. Šių trukdžių pavyzdžiai: gravitacijos gradientas, saulės slėgis, taip pat gali būti atmosferos jėgos ir pan.

Atmosferoje veikiančios jėgos stipriai veikia palydovą. Šios jėgos yra nepastovios ir priklauso nuo keleto faktorių: atmosferos slėgio, atmosferos traukos koeficiento, palydovo greičio, palydovo greičio vektoriaus koeficiento. Atmosferos jėgos yra apskaičiuojamos taikant 1.1 formulę [25]:

$$T_a = F(C_{pa} - C_g); \quad (1.1)$$

čia: T_a – aerodinaminio pasipriešinimo jėga; C_{pa} – atmosferos slėgio centras; C_g – masės centras; F_{Drag} – veikianti jėga, kuri gali būti apskaičiuota taikant 1.2 formulę:

$$F_{Drag} = \frac{1}{2} \rho C_{Drag} A v^2; \quad (1.2)$$

čia: ρ – atmosferos tankis; C_{Drag} – traukos koeficientas (paprastai naudojamos reikšmės 2–2,5), A – plotas, į kurį veikia jėga; v – greitis.

Bet koks kūnas orbitoje yra veikiamas gravitacijos jėgų, kurios traukia objektą prie Žemės. Ši trauka mažėja, tolstant nuo Žemės. Taip pat bet kuris objektas, jei jis asimetriškas, yra veikiamas sunkio jėgos skirtingai: pvz., jei objektas turi „sunkesnę“ ir „lengvesnę“ puses, tai jis visada erdvėje bus atsukamas „sunkesniąja“ puse į apačią. Tas pats galioja ir palydovams: jei palydovas yra asimetriškas, turi pusę, kur sukonzentruota didesnioji viso palydovo masės dalis, jis šia puse bus atsukęs į Žemę. Taip pat kuo palydovas yra aukščiau, tuo mažiau jį veikia sunkio jėga. Gravitacijos gradientas yra apskaičiuojamas taikant 1.3 formulę [25]:

$$T_g = \frac{3\mu_g}{2R^3} |I_z - I_y| \sin(2\theta); \quad (1.3)$$

čia: T_g – maksimalus gravitacijos gradientas; μ_ζ – Žemės gravitacijos parametras; R – orbitos spindulys; I_Z bei I_Y – masės inercijos momentai atitinkamose ašyse; θ – maksimalus kampo poslinkis nuo vertikalios palydovo ašies.

Saulės spinduliuotė sukuria tam tikrą slėgį bei veikia palydovų paviršių. Tiksliai jėgos skaitinė reikšmė, kuri veikia palydovą, priklauso nuo to, kiek spinduliuotės buvo sugerta, atspindėta [19]. Saulės slėgis gali būti apskaičiuojamas taikant 1.4 formulę:

$$T_{SRP} = F(C_{ps} - C_g); \quad (1.4)$$

čia: T_{SRP} – Saulės slėgis; C_{ps} – centras, į kurį veikia Saulės slėgis; C_g – masės centras; F – veikianti jėga, kuri gali būti apskaičiuota taikant 1.5 formulę [25]:

$$F = \frac{F_S}{c} A_s (1 + \rho) \cos i; \quad (1.5)$$

čia: F_S – Saulės spinduliuotės intensyvumas $\left[\frac{W}{m^2} \right]$; c – šviesos greitis vakuume;

A – plotas, kuris apšviečiamas Saulės; i – Saulės spinduliuotės kritimo kampas; ρ – atspindžio koeficientas ($(0 < \rho < 1)$), paprastai $\sim 0,6$).

Magnetinio lauko momentas yra sukuriamas dėl Žemės magnetinio dipolio. Palydovo magnetinį momentą kuria palydove sumontuotų magnetų magnetinio dipolio kuriamas laukas. Palydovo magnetinis laukas priklauso nuo orbitos aukščio, koordinatų, saulės aktyvumo bei palydovo pozicijos. Magnetinis laukas gali būti naudojamas palydovo parametrų valdyti – jam lėtinti, stabdyti sukimašį ir pan. [27]. Magnetinio lauko jėgų dydis gali būti apskaičiuojamas taikant 1.6 formulę:

$$\vec{T}_m = \vec{m} \times \vec{B}; \quad (1.6)$$

čia: \vec{T}_m – magnetinė jėga; \vec{m} – palydovo magnetinio dipolio dedamoji, matuojama ($A \times m^2$), \vec{B} – Žemės magnetinio lauko stipris.

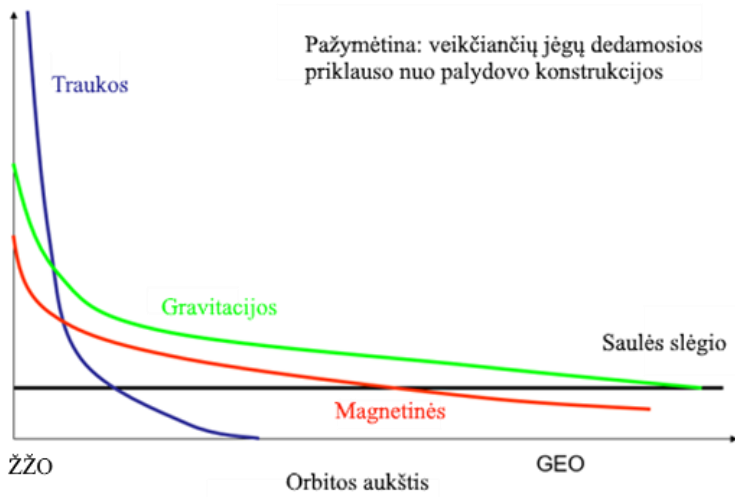
1.3 lentelė. Palydovą veikiančių jėgų ir momentai [19]

Jėga	Veikimo sąlygos
Atmosferinės jėgos	Iki 500 km
Gravitacijos gradientas	Nuo 500 km iki kelių tūkst. km
Saulės slėgis	Visada

1.4 lentelė. 3U CubeSat palydovą veikiančių momentų reikšmės

Veikiantis momentas	Reikšmė (Nm)
Aerodinaminis	8×10^{-8}
Gravitacijos gradientas	6×10^{-8}
Radiometrinis	1×10^{-8}
RMS suminis	1×10^{-7}

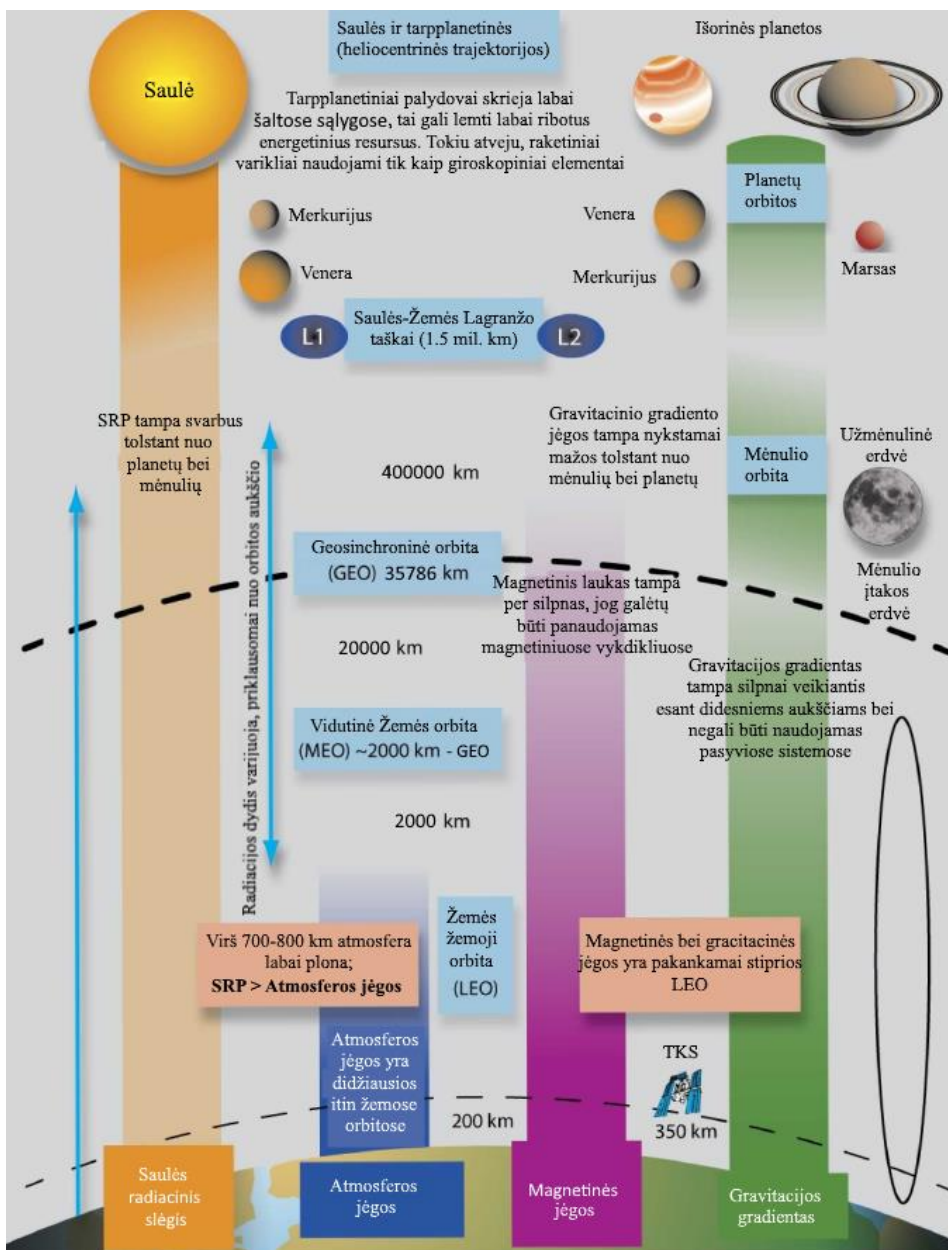
Veikiančios išorinės jėgos bei momentai



1.4 pav. Palydovą veikiančių jėgų ir momentų priklausomybės nuo orbitos aukščio grafikas

1.5 lentelė. Pozicionavimo sistemų generuojamų momentų reikšmės [25]

Pozicionavimo mechanizmo tipas	Generuojamas momentas (Nm)
Smagratinis	10^{-2} – 10
Magnetinio momento	10^{-2} – 10^{-1}
Gravitacijos gradiento	10^{-6} – 10^{-3}
Aerodinaminių jėgų	10^{-5} – 10^{-3}
Giroskopiniai	10^{-1} – 1
Kontroliuojamos ašies giroskopinis	10^{-2} – 10^3



1.5 pav. Palydovą veikiančių jėgų, jų priklausomybių misijos parametru, grafinis vaizdas

1.4. Palydovų orientavimo įranga ir veikimo principai

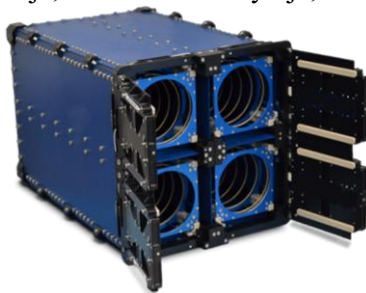
Palydovai misijos metu yra veikiami įvairių jėgų: gravitacijos, Saulės slėgio, magnetinių bei aerodinaminių. Jie taip pat gali būti paveikiami ir įvairių vidinių trukdžių: neišbalansuoto masės centro, variklių ar valdymo mechanizmų neidealių ar nepakankamai standžių įtvirtinimų, matavimo įrangos paklaidos, paties palydovo

nešančiojo rėmo poslinkių ir deformacijų, skysto kuro judėjimo kuro talpose [25]. Visi šie išoriniai ir vidiniai trukdžiai veikia palydovą, taip pat daro įtaką palydovo aukščiui, orbitai bei orientacijai. Šių trukdžių kontrolei bei palydovo valdymui naudojamos pozicionavimo sistemos, kurios buvo apžvelgtos anksčiau: aktyviosios, pusiau aktyviosios bei pasyvosios.

Naudojant pasyviausias magnetines sistemas, palydovai neturi jutiklių ar giroskopų, kurie padėtų apibrėžti palydovo padėtį erdvėje, tačiau šiai palydovo orientacijai apibrėžti naudojami Saulės elementų paneliai, kuriuos Saulė apšviečia skirtingai, matuojant panelių generuojamą elektros srovę nustatoma palydovo orientacija erdvėje. Pasyviosios magnetinės sistemos padeda sutaupyti vietos bei svorio palydove, tačiau tokių sistemų valdymas ir veikimo algoritmas yra gan sudėtingas.

Kai kuriuose palydovuose priimami visiškai priešingi konstrukciniai sprendimai, taip pat jie yra aprūpinami įvairiais jutikliais bei vykdikliais: giroskopais, Saulės sekimo jutikliais, magnetinio lauko stiprio jutikliais, pasyviais nuolatinais magnetiniais ar elektromagnetiniais strypais, smagračiais bei raketiniais varikliais. Visi šie išvardinti įrenginiai atlieka savo uždavinius: Saulės sekimo jutikliai nusako Saulės poziciją, magnetinio lauko stiprio jutikliai padeda apibrėžti Žemės ir palydovo poziciją bei orientaciją, o magnetinės, elektromagnetinės, smagratinės ir raketinės pavaros leidžia atlikti pozicionavimo bei orientavimo uždavinius.

CubeSat tipo palydovai yra paleidžiami grupėmis – jie sudedami į specialų konteinerį, kuris paleidimo metu išleidžia grupę palydovų. Toks įrenginys yra vadinamas paleidikliu, angliškai sutrumpintai žymimas *P-POD*. Paleidimo mechanizmas pateiktas 1.6 pav. Palydovų paleidimo metu jie išspaudžiami iš konteinerio ir paleidžiami į orbitą. Paleidimo metu palydovai išleidžiami skrieti į orbitą jau suorientuoti į reikiamą orientaciją (pasyviųjų sistemų atveju) arba iš karto po paleidimo įjungiamos aktyviosios sistemos, kurios padeda palydovui stabilizuotis erdvėje ir suorientuoja palydovą į reikiamą poziciją (aktyviosios sistemos). Naudojant pusiau aktyviausias sistemas scenarijus gali būti įvairus, po paleidimo palydovas aktyviaisiais elementais yra stabilizuojamas, vėliau pereina į stacionarią orientaciją erdvėje arba palydovai iš anksto yra suorientuojami ir paleidimo metu jie pasiekia savo darbinę orbitą tam tikroje, iš anksto numatytoje, orientacijoje [28].

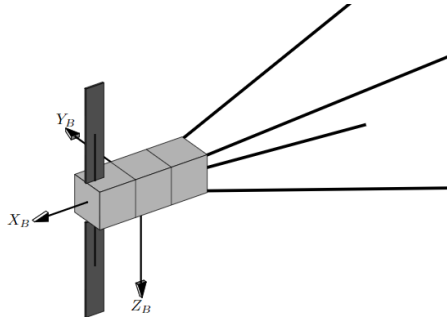


1.6 pav. *CubeSat* tipo palydovų paleidimo įtaisas *QuickPad* [29]

1.5. Palydovų orientavimo koordinatinių sistemų

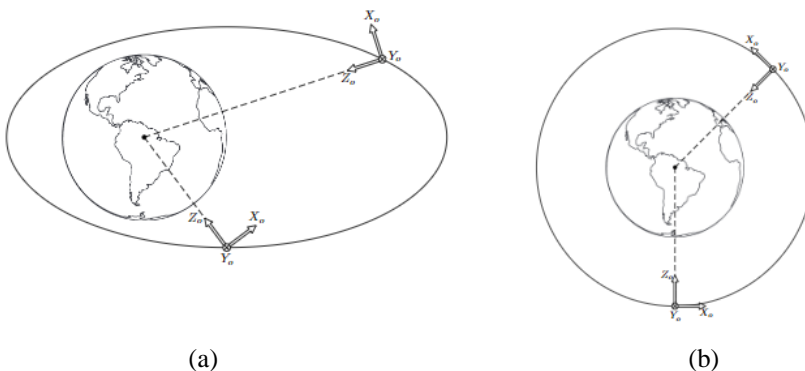
Palydovo pozicija ir orientacija yra nusakoma pagal reliatyvius atskaitos taškus ir koordinatinių sistemas. Nusakant palydovų poziciją ir orientaciją yra naudojamos trys atskaitos sistemos: palydovo koordinatinių sistema, orbitos koordinatinių sistema bei Žemės atskaitos sistema.

Palydovo koordinatinių sistema yra orientuota su paties palydovo geometrinio centru pagal visas tris koordinates ir dažniausiai sutampa su masės centru. Dažniausiai X koordinatė yra lygiuojama pagal palydovo ilgį, judėjimo kryptį bei žymima X_B . Z koordinatė yra lygiuojama pagal palydovą veikiančių aerodinaminių jėgų kryptį bei mažiausios inercijos kryptį, žymima Z_B . Atitinkamai, likusioji koordinatė yra statmena X_B ir Z_B , orientuojama pagal didžiausios inercijos kryptį ir žymima Y_B , žr. 1.7 pav. [30, 31, 32].



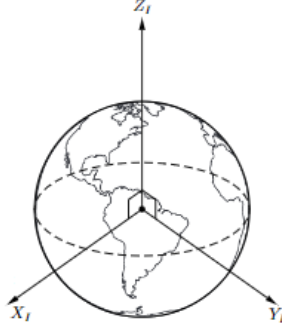
1.7 pav. Koordinatinių atskaitos sistema bei ašių kryptys pagal palydovą [30]

Antrosios, orbitos koordinatinių sistemos, atskaitos taškas taip pat yra palydovo masės centre, kaip ir palydovo koordinatinių sistemos atveju, ir juda kartu su palydovu. Tačiau šiuo atveju koordinatinių sistemos ašys išdėstytos taip: Z ašis visada yra nukreipta į Žemės rutulio centrą, ši ašis žymima Z_o . X ašis yra nukreipta pagal greičio vektorius kryptį, žymima X_o . Likusioji Y ašis, žymima Y_o bei nukreipta statmenai orbitos plokštumai. 1.8 pav. pavaizduoti du atvejai: palydovo orbita elipsės bei apvalios formos.



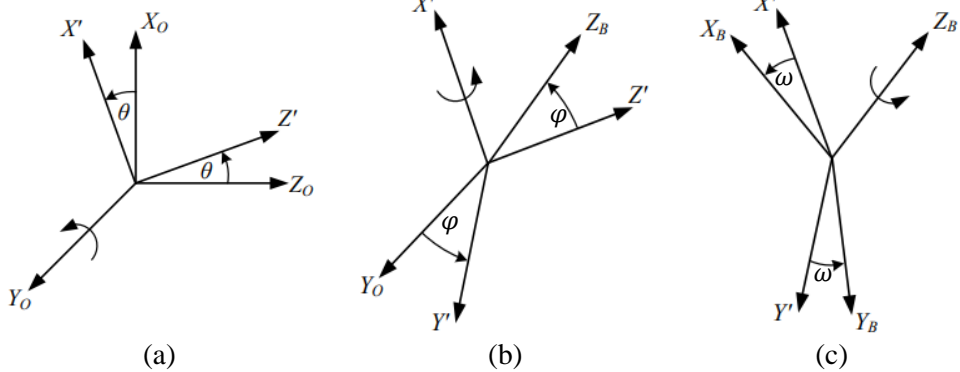
1.8 pav. Orbitos koordinatinių sistema: (a) palydovo orbita elipsės formos; (b) apskritimo formos [30]

Žemės koordinatčių sistema orientuojama taip: Z ašis nukreipta į Žemės šiaurinį polių, žymima Z_I . X koordinatė nukreipta pagal pavasario lygiadienį bei kerta pusiaują, žymima X_I . Likusioji, Y koordinatė, yra statmena X ir Z ašims, žymima Y_I [19]. Ši koordinatčių sistema pavaizduota 1.9 pav.



1.9 pav. Žemės koordinatčių sistema [30]

Palydovo orientacija erdvėje reliatyviai susieta su orbitos koordinatčių sistema. Šis skirtumas yra aprašomas ir suskaičiuojamas, naudojantis Eulerio kampais, nusakant juos: posvyrio – φ , polinkio – θ , pokrypio – ω (angl. atitinkamai – *roll*, *pitch* ir *yaw*). Naudojant išvardintus kampus, nusakomas skirtumas tarp palydovo koordinatčių sistemos ir orbitos koordinatčių sistemos. Kad apibrėžtume šiuos kampus būtina žinoti, kokia eilės tvarka jie yra naudojami norint pasukti ir suorientuoti palydovą orbitoje. Pavyzdžiui, naudojant kampų nusakymo seką 213, palydovas bus valdomas taip: pasukama išilginiu (2) kampu apie Y_O ašį, vėliau – sukimo (1) kampu apie jau pasuktos koordinatčių sistemos X' ašį ir galiausiai – nuokrypio (3) ašimi pasukamas palydovas apie Z_B ašį. Kampų sekos pasukimai pavaizduoti 1.10 pav.



1.10 pav. Palydovo orientavimo seka, naudojant Eulerio kampus: (a) pasukimas apie Y_O ašį; (b) pasukimas apie naująją reliatyvią X' ašį; (c) pasukimas apie Z_B ašį [30]

Šis koordinatčių pasukimas gali būti užrašomas naudojant transformacijų matricinę formą. Naudojantis šia transformacijų matrica krypties vektorių transformavimui ir orbitos koordinatčių sistemos perskaičiavimui į palydovų

koordinacių sistemą, apskaičiuojama taikant (1.7) pateiktą transformacijų matricą, kai palydovo pasukimui naudojama kampų seka yra 213:

$$A_{O/B} = \begin{bmatrix} (\sin \varphi \sin \theta \sin \omega + \cos \theta \cos \omega) & \cos \varphi \sin \omega & (\sin \varphi \sin \theta \sin \omega - \sin \theta \cos \omega) \\ (\sin \varphi \sin \theta \cos \omega - \cos \theta \sin \omega) & \cos \varphi \cos \omega & (\sin \varphi \sin \theta \cos \omega + \sin \theta \sin \omega) \\ \cos \varphi \sin \theta & -\sin \varphi & \cos \varphi \sin \theta \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

Jei transformacijų matrica yra žinoma, tada individualūs Eulerio kampai gali būti apibrėžti taikant šias formules [30]:

$$\varphi = -\arcsin(A_{32}); \quad (1.8)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{A_{31}}{A_{33}}\right); \quad (1.9)$$

$$\omega = \arctan\left(\frac{A_{12}}{A_{22}}\right); \quad (1.10)$$

čia: $\arctan()$ yra apskaičiuojama keturių kvadrantų funkcija [33].

Naudojantis Eulerio teorema ir kvadrantais, palydovo transformacijų $A_{O/B}$ matrica, gali būti aprašyta 1.11 matrica [30]:

$$A_{O/B} = \begin{bmatrix} q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 + q_4^2 & 2(q_1q_2 + q_3q_4) & 2(q_1q_3 - q_2q_4) \\ 2(q_1q_2 - q_3q_4) & -q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 + q_4^2 & 2(q_2q_3 + q_1q_4) \\ 2(q_1q_3 - q_2q_4) & 2(q_2q_3 - q_1q_4) & -q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 + q_4^2 \end{bmatrix}. \quad (1.11)$$

1.6. Palydovo pozicionavimo judesio lygtis

Palydovo pozicionavimo pokytis gali būti aprašomas matematiškai, naudojant kinematinės bei dinaminės lygtis. Kinematinė lygtis nusako palydovo pozicijos pokytį pagal iš anksto nustatomus ar suskaičiuojamus parametrus, nepaisant palydovą veikiančių jėgų. Kinematinė kvadrantų lygtis pateikta 1.12 matricoje [34]:

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & \omega_{OZ} & -\omega_{OY} & \omega_{OX} \\ -\omega_{OZ} & 0 & \omega_{OX} & \omega_{OY} \\ \omega_{OY} & -\omega_{OX} & 0 & \omega_{OZ} \\ -\omega_{OX} & -\omega_{OY} & -\omega_{OZ} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix}; \quad (1.12)$$

čia: $\omega_{OX}, \omega_{OY}, \omega_{OZ}$ yra vektoriniai greičio elementai ζ_B^O iš orbitos koordinacių sistemos. Šie palydovo vektoriniai greičio elementai gali būti apskaičiuojami remiantis Žemės koordinacių sistemos vektoriais ζ_B^I (1.13 formulė) [34]:

$$\zeta_B^O = \zeta_B^I - A_{O/B} [0 - \omega_0 0]^T; \quad (1.13)$$

čia: ω_0 – žiedinės orbitos palydovo orbitinio greičio reikšmė; $A_{O/B}$ – vektorių transformacijos matrica.

Dinaminė lygtis, kurioje nusakomas ne tik judesys, bet veikiančios jėgos (1.14 formulė) [34]:

$$I\zeta_B^I = N_{GG} + N_M + N_{Aero} - \zeta_B^I \times (I\zeta_B^I + h) - \dot{h}; \quad (1.14)$$

čia: ζ_B^I – inertiškai judančio palydovo greičio vektorius; ω_0 – žiedinės orbitos palydovo orbitinio greičio reikšmė; N_{GG} – gravitacijos gradiento jėgos reikšmė; N_M – magnetinių jėgų, kurių nuolatinio magneto, vektoriaus reikšmė; N_{Aero} – aerodinaminių jėgų reikšmė; h – kampinio momento, kuriamo groskopinio mechanizmo, vektoriaus reikšmė; I – inercijos momento reikšmė. Ji gali būti apskaičiuojama pagal 1.15 matricą [30]:

$$I = \begin{bmatrix} I_{XX} & 0 & 0 \\ 0 & I_{YY} & 0 \\ 0 & 0 & I_{ZZ} \end{bmatrix}; \quad (1.15)$$

čia: I_{XX}, I_{YY}, I_{ZZ} – palydovo inercijos momentai atitinkamose ašyse.

1.7. Pagrindiniai palydovo konstrukcijos elementai

Palydovai yra projektuojami bei gaminami taip, kad būtų galima sutalpinti mažiausios masės bei gabaritų įrangą reikiams funkcijoms atlikti ir taip, kad palydovo konstrukcija atlaikytų misijoje numatytas apkrovas. Palydovų ir jų įrangos priežiūrai reikalingų mazgų projektavimui plačiai taikomos šiuolaikinės technologijos, leidžiančios pritaikyti efektyvius, novatoriškus sprendimus bei panaudoti medžiagas. Išoriniai palydovų elementai yra kuriami taip, kad patikimai įtvirtintų palydovą paleidimo mechanizme ir užtikrintų patikimą jų paleidimo procesą. Taip pat palydovo išorėje yra sumontuojami energijos generavimo komponentai (fotovoltiniai elementai) bei išorinė įranga, kuri reikalinga atlikti palydovo pozicionavimo ir orientavimo uždavinius. Dar palydovo išorėje gali būti sumontuoti ir komunikacijos elementai, antenos.

Šiame darbe nagrinėjami *CubeSat* tipo palydovai bei jų pozicionavimo mechanizmas. Šitie palydovai yra standartizuoti – paleidimo įranga ir palydovo korpusas yra griežtai apibrėžti. Reikalavimai ir standartai aprašyti šio darbo 1.1 skyriuje.

Kaip pavyzdys, 1.11 pav. pavaizduotas *ESTCube-1* [35] palydovas, kuriame jo pozicionavimui erdvėje naudojamos dvi sistemos: aktyvioji (elektromagnetinių ričių) sistema ir pasyvioji – ant išleidžiamos gembės galo pritvirtintos gravitacinės masės sistema. Palydovas priekinėje dalyje turi sumontuotus jutiklius, kurie padeda nusakyti palydovo padėtį bei orientaciją erdvėje. Po jutikliais, kurie padeda nusakyti palydovo padėtį ir orientaciją erdvėje, sumontuota elektromagnetinė ritė, kuri naudojama pozicionavimo ir orientavimo sistemoje. Po šia sistema įrengta valdymo bei duomenų apdorojimo kompiuterio sistema. Žemiau sumontuota aukštosios įtampos valdymo sistema, o po ja – kamera, kuri naudojama Žemei fotografuoti. Palydovo centre pozicionuojama masės išleidimo sistema. Žemiau po masės išleidimo sistema – energijos kaupimo ir valdymo sistema ir galiausiai – komunikacijos sistema. Iš dviejų šonų – taip pat pritaisytos elektromagnetinės ritės, reikalingos palydovui

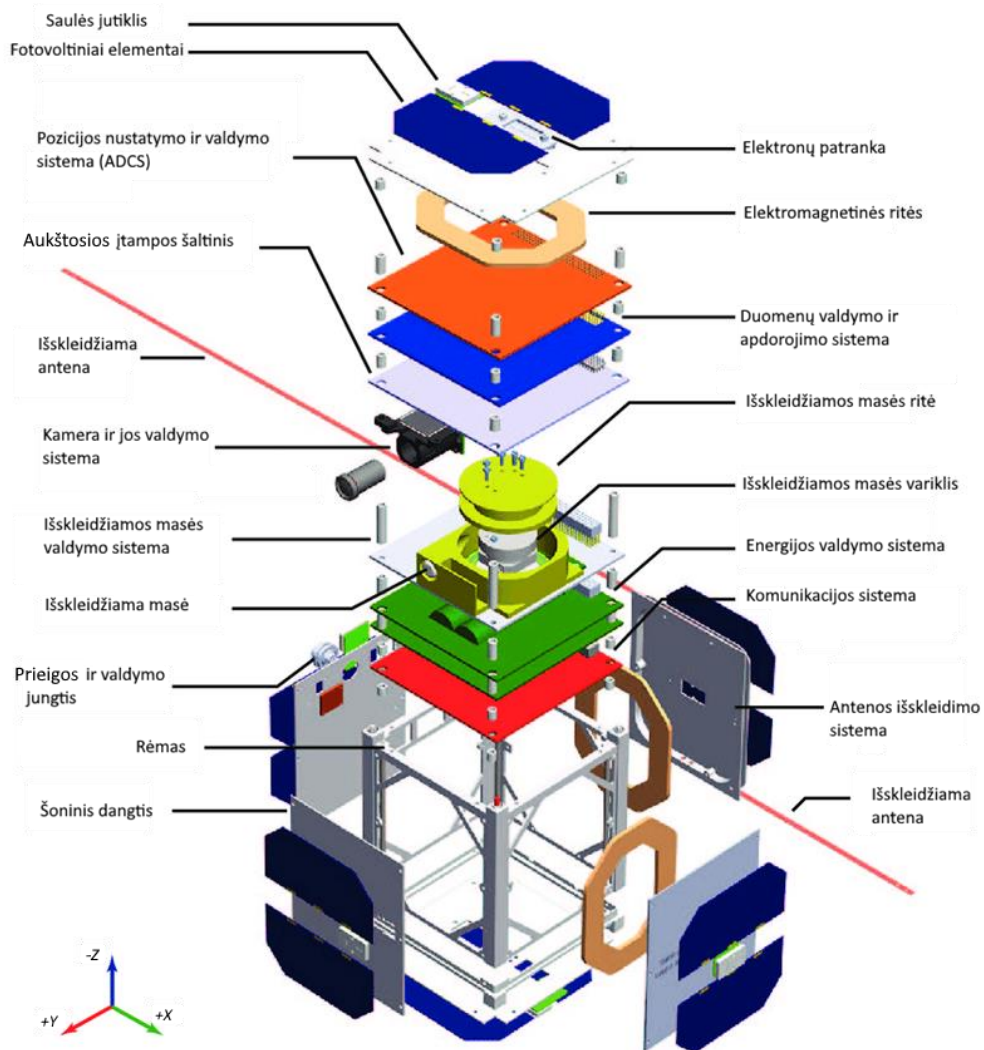
pozicionuoti. Visos palydovo pusės padengtos Saulės elementais, į kuriuos surenkama šiam palydovui reikalinga Saulės energija. Vienoje pusėje sumontuota prieigos sistema, kuri reikalinga paleidimo metu. Atskirų palydovo sistemų masės nurodytos 1.6 lentelėje. 1.7 lentelėje pateiktas misijos metu sunaudojamas energijos kiekis [35].

1.6 lentelė. *ESTCube-1* palydovo sistemų masės

Sistema	Masė (g)
Rėmas	287
Energijos kaupimo ir valdymo	291
Valdymo, duomenų apdorojimo	49
Komunikacinė	75
Išleidžiamos masės	206
Išleidžiamos masės, fotografavimo	30
Pozicijos nusakymo bei valdymo	112
Iš viso	1150

1.7 lentelė. *ESTCube-1* sunaudojamas energijos kiekiai

Sistema	Maksimali sunaudojama momentinė galia(mW)	Vidutinė galia misijos metu (mW)
Pozicijos nustatymo	300	–
Pozicijos valdymo	840	–
Fotografavimo	300	–
Valdymo, duomenų apdorojimo	300	220
Komunikacijos	2000	550
Elektros valdymo	150	150
Masės išleidimo	4200	–
Antenos išskleidimo	4200	–



1.11 pav. *ESTCube-1* struktūrinė sandara ir pagrindiniai elementai [35]

Palydovo pagrindinis nešantysis konstrukcinis elementas, kuris naudojamas visai sistemai surinkti, yra rėmas. Rėminėje konstrukcijoje montuojami visi likę sistemos elementai. Paprastai rėmai gaminami iš aliuminio lydinių, skirtų aviacijai bei tikslųjų prietaisų gamybai (AW-6082, AW-6061, AW-7075 ir pan.) [35, 36, 37]. Rėmai ir šoniniai dengiantieji paneliai, prieš naudojimą yra anoduojami, tokiu būdu sutvirtinant mechaninių dalių paviršius, apsaugant aliuminį nuo oksidacijos. Šoniniai paneliai taip pat gaminami iš aliuminio, o jų storis – apie 1 mm. Šie skydai ne tik atlieka struktūrinę palydovo funkciją, bet ir saugo nuo dalies radiacijos vidinius sistemos komponentus.

Energija palydovo sistemoms tiekama naudojant vidinius energijos šaltinius – maitinimo baterijas. Baterijos yra įkraunamos pasitelkiant fotovoltinius elementus,

kurie montuojami viso palydovo paviršiuje. Kartais palydovai siekiant surinkti kuo didesnę energijos kiekį naudoja išskleidžiamus fotomodulių panelius [38, 39]. Palydovuose montuojamos baterijos, kurios pasižymi didele talpa. Tai dažniausiai būna ličio jonų ar polimerų baterijos.

Saulės elementų generuojamos energijos stebėjimui ir valdymui naudojamos pramonėje gerai žinomos MPPT (angl. *Maximum power point tracking*) sistemos. Šios sistemos matuoja ir valdo Saulės elementų temperatūrą, jų elektrines charakteristikas. Kintant įkrovos sąlygoms (Saulės elementų įkrovos naudingumas priklauso nuo temperatūros, varžos, apšvitos), sistema stebi ir keičia elektrinius parametrus, siekiant išlaikyti krovimą didžiausios galios perdavimo režimu. Tokiu būdu užtikrinamos geriausios baterijos įkrovos sąlygos.

Energijos valdymo sistemos yra susietos su įkrovos sistema ir baterijos stebėjimo bei galios skirstymo grandimis. Šios yra atsakingos už palydovo periferinių sistemų atjungimą, kai periferinių sistemų nebereikia. Tokiu būdu, pvz., atjungus palydovo siūstuvą ir imtuvą, galima sutaupyti nemažus energijos kiekius [35]. Palydovo elektrinėms grandims dažniausiai naudojama 3,3 V, 5 V ir 12 V įtampa.

Duomenų valdymo ir apdorojimo sistemos dalis iš esmės yra borto kompiuteris, kuris sujungia ir stebi visą palydovo funkcionavimą, paleidžia komandas atlikti tam tikrus veiksmus, kaupia duomenis, inicijuoja jų išsiuntimo komandas. Taip pat ši sistema valdo palydovo įrangą, kuri skirta atlikti misijai – tai gali būti Žemės fotografavimas, įvairių parametrų stebėjimas bei vertinimas. Paprastai tokios sistemos būna dubliuojamos, pvz., naudojami keli mikrovaldikliai, kurių vienas yra atsarginis [40].

CubeSat palydovai, kurie traktuojami kaip mokslinės ar komercinės paskirties, dažniausiai dirba mėgėjiškais radijo dažniais, VHF ir UHF diapazonais [41]. Duomenims perduoti taip pat gali būti naudojamas ir lazerinis signalas [42].

Palydovai radijo ryšiui naudoja įvairias antenas – integruotas, išskleidžiamas, kryptines ir nekryptines. Antenos padeda užtikrinti stabilų ryšį komunikacijos metu. Jos taip pat gali būti naudojamos kaip dalis pasyviosios pozicionavimo sistemos, leidžiančios stabilizuoti palydovą pagal koordinatę.

Erdvinės padėties nustatymo bei valdymo sistema padeda nustatyti bei valdyti palydovo poziciją, tam atlikti gali būti naudojami įvairūs įrenginiai: Saulės ar žvaigždžių sekimo jutikliai, GPS sistemos, magnetometrai, girokopai ir kt. Palydovui pozicionuoti taikomi įvairūs būdai ir naudojamos sistemos, kurių tipiniai pavyzdžiai aprašyti 1.2 skyriuje.

Atlikus matavimus, duomenys yra apdorojami duomenų valdymo ir apdorojimo sistemoje, kuri, jei reikia, atlieka palydovo pozicionavimo korekcijas, įjungia aktyviasias ar pusiau aktyviasias sistemas.

1.8. Pavaros ir reikalavimai joms

Šiuolaikinės sistemos ir įvairūs prietaisai, naudojančios elektros energiją, dėl nuolatinio inovacijų diegimo ir naujų technologijų bei medžiagų taikymo gamyboje nuolat tobulėja. Tokios tendencijos lemia tai, kad sistemos bei prietaisai tampa vis mažesni bei sunaudoja mažesnius energijos kiekius. Tačiau, mažėjant komponentams,

atitinkamai vis mažiau vietos tenka ir energijos šaltiniams – tad taupus energijos sunaudojimas, nepaisant tobulesnių sistemų, vis dar aktualus. Norint optimizuoti sistemų darbą bei leisti įrenginiams dirbti kuo ilgiau, racionalus energijos naudojimas yra itin reikalingas.

Mažėjant sistemų bei įrenginių gabaritams, didėja tolerancijos, kurios reikalingos tiems įrenginiams pagaminti, o vėliau – naudoti. Todėl maži prietaisai tampa vis tikslesni, o terminas „preciziškas“ tampa neatsiejamu sistemų ir prietaisų sinonimu. Mažos bei tikslios sistemos gali atlikti tiesinio ar sukamojo judesio precizinius poslinkius su mikro ar nano skyra. Šios sistemos pritaikomos tokiose srityse kaip optomechanika, metrologija, itin tikslus apdirbimas, robotika bei kosmoso pramonė [2, 43].

Įgyvendinus mažai energijos naudojančius bei mažo dydžio prietaisus ir įrenginius, galima kurti įvairius produktus, kurie turi įvairias paskirtis: tiek plataus naudojimo prekės, tiek specializuoti įrenginiai ir prietaisai. Paprastos konstrukcijos, maži gabaritai, o dažnai – ir nedidelė kaina tokius komponentus išpopuliarina greitai ir plačiame rate.

Įvairūs tikslūs poslinkio mechanizmai, kuriuos sudaro rotacinės ar linijinės pavaros, yra tobulinami daugiau nei 50 metų. Nepaisant įvairiausių modifikacijų ir konstrukcijų, esminiai sistemos komponentai išliko tie patys: sistema būtinai turi turėti nejudamąją dalį (statorių) bei judamąją dalį (rotorių ar tiesinio judėjimo elementą). Šios dvi esminės dalys sudaro pavarą. Jeigu tokia sistema yra aprūpinama valdymo ir grįžtamojo ryšio blokais, užtikrinamas itin didelio tikslumo mechanizmas. Paprastai pavaros turi vieną laisvės laipsnį – t. y. galimybę atlikti poslinkį viena kryptimi: kampine ar tiesine koordinate.

Tipiniai elektromagnetiniai varikliai ir pavaros yra plačiausiai paplitusios mašinos, kurios labiausiai tobulinamos ir naudojamos. Šio tipo įrenginiai turi labai daug skirtingų variantų: nuo paprastų sistemų iki sudėtingų, su grįžtamojo ryšio signalu bei valdymo aparatūra. Plėtojantis pramonei ir mokslui, didėjant reikalavimams bei atsirandant naujiems metodams, standartinio tipo pavaros ne visada gali atlikti joms skirtus uždavinius. Tokiose srityse, kaip medicina, lazerinės ar optomechaninės sistemos, robotika, karinės technologijos, kosmoso pramonė, kasdien vis daugiau reikalavimų: mažesniam dydžiui, paprastai konstrukcijai ir integralumui, didelei greitimeikai bei tikslumui, didesniam laisvės laipsnių skaičiui, energijos taupymui bei mažai kainai, tad standartiniai judesio generavimo šaltiniai susiduria su iššūkiais ir atsiremia į savo galimybių ribas.

Norint išspręsti kylančius uždavinius, kuriamos ir pritaikomos naujoviškos pavaros bei jose naudojamos daugiafunkcės „sumanios“ medžiagos, tokios kaip elektrostrikcinės, magnetostrikcinės, atmintį turintys lydiniai (angl. *shape memory alloys*) ir kt., yra išbandomi kaip galima alternatyva [6]. Tačiau viena labiausiai paplitusių alternatyvų – pjezoelektrinės pavaros. Šio tipo pavarose naudojamos daugiafunkcės pjezoelektrinės medžiagos, ir jos atitinka didžiąją dalį jau minėtų reikalavimų: yra greitos, nesudėtingos, tylios, pigios ir kt.

Pjezoelektrinėse pavarose išėjimo grandies, rotoriaus ar šliaužiklio, judesį generuoja keitiklis, pagamintas iš pjezoelektrinės medžiagos, kuri elektros energiją

(elektrinį signalą) verčia į mechaninę energiją. Šio tipo pavaros yra plačiai paplitusios įvairiose srityse, kur reikalingas didelis tikslumas bei patikimumas, tad šių pavarų naudojimas įsigali tokiose srityse, kaip aviacija, karinė pramonė, kosmoso pramonė, metrologinė bei tikslių įrenginių, skirtų mokslui, pramonė.

1.9. Pjezoelektrinės medžiagos

Tai tokios medžiagos, kurios gali generuoti elektros įtampą tuo metu, kai jas veikia mechaniniai trukdžiai, jėgos. Šis reiškinys yra vadinamas tiesioginiu pjezoelektriniu efektu. Taip pat medžiagos, kurios turi pjezoelektrinių savybių, gali veikti ir priešingai: paveiktos elektros krūvio, jos deformuojasi, generuoja mechanines jėgas; šis reiškinys yra vadinamas atvirkštiniu pjezoelektriniu efektu. Jis gali vykti tik tokiose medžiagose, kurių kristalai neturi centrinės simetrijos. Gamtoje egzistuoja nemažai natūralių medžiagų, kurios gali generuoti įtampą veikiant mechaninėms jėgoms, štai keletas pavyzdžių:

- kristalai;
- specifinės keramikos rūšys;
- emalis;
- šilkas.

Veikiant mechaninėms jėgoms, deformuojasi pjezoelektrinių medžiagų kristalai, šis struktūrinis pokytis generuoja elektrinį krūvį, o toks pokytis yra vadinamas dipoliniu momentu ir išreiškiamas pagal 1.16 formulę [44, 4]:

$$P_i = d_{ijk} \sigma_{jk}; \quad (1.16)$$

čia: P_i – poliarizacijos vektorius, d_{ijk} – pjezoelektrinis koeficientas, σ_{jk} – mechaniniai įtempiai, veikiantys medžiagoje. Pjezoelektrinis koeficientas kinta esant skirtingoms medžiagoms.

Natūralios bei dirbtinės medžiagos ir kristalai, kurios pasižymi pjezoelektrinėmis savybėmis, pateiktos toliau [4].

- Natūralios kristalinės medžiagos, kurios randamos gamtoje:
 - kvarcas (dažnai naudojamas elektronikai bei laikrodžiams);
 - sacharozė;
 - Rošelio druska (gali generuoti aukštąsias įtampas, veikiant mechaniniam spaudimui);
 - topazas (mineralas);
 - turmalinas (mineralas);
 - berlinitas (retas fosfatinis mineralas, savo struktūra identiškas kvarcui).
- Pramoniniu būdu pagaminti kristalai, pasižymintys pjezoelektrinėmis savybėmis:
 - galio ortofosfatas (GaPO_4);
 - langazitas ($\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$).

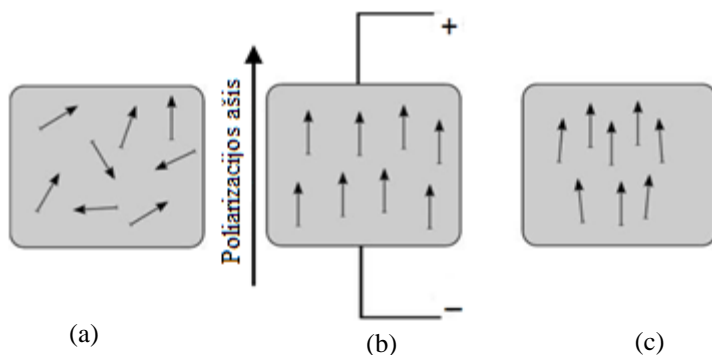
- Pjezoelektrinė keramika:
 - bario titanatas (BaTiO_3);
 - švino titanatas (PbTiO_3);
 - švino cirkonato titanatas (PZT);
 - kalio niobatas (KNbO_3);
 - ličio niobatas (LiNbO_3);
 - ličio tantalatas (LiTaO_3);
 - natrio volframatas (Na_2WO_4).
- Taip pat egzistuoja keramika, kurioje nenaudojamas švinas, siekiant išvengti žalingo poveikio žmonėms bei gamtai:
 - natrio kalio niobatas (NaNbO_3);
 - bismuto feritas (BiFeO_3);
 - natrio niobatas (NaNbO_3).

Taip pat viena iš populiarėjančių medžiagų rūšių – polimerinės medžiagos, pasižymintys pjezoelektrinėmis savybėmis. Jos yra lengvesnės, gali būti mažesnių gabaritų bei efektyvesnės, lyginant su tipinėmis medžiagomis. Viena iš tokių medžiagų rūšių – polivinilideno fluoras (PVDF). Ši medžiaga dažnai naudojama medicinos bei medicininės technikos srityse.

Pirmoji medžiaga, kuri buvo panaudota pjezoelektriniame vykdiklyje – kvarcas. Kvarco kristalai gali būti dviejų skirtingų būsenų: α -kvarcas, turintis pjezoelektrinių savybių, ir nepjezoelektrinis β -kvarcas. Jei kvarcas paveikiamas temperatūra, aukštesne nei 573° pagal Celsijų, kuri vadinama Kiuri temperatūra, ir aukštesniu nei 1 atmosferos slėgiu, α -kvarcas keičia savo būseną į β -kvarčą. Ši konversija yra grįžtamoji, nukritus slėgiui bei temperatūrai, medžiaga grįžta į pradinę būseną, tačiau šis procesas nėra tiesinis, t. y. kvarcas lieka paveiktas ir jame negrįžtamai dalis kristalų susijungia, todėl gamybos proceso metu būtina užtikrinti, kad kvarcas nepereitų iš vienos būsenos į kitą. Gaminant keitiklius, naudojamas tik α -kvarcas [45].

Šiuo metu vykdiklių gamybai dažniausiai naudojamas švino cirkonato titanatas ($\text{Pb}[\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x}]\text{O}_3$, ($0 \leq x \leq 1$)), (PZT). Tai pjezoelektrinių savybių turinti polikristalinė keramika, iš kurios gali būti gaminami įvairios formos elementai, o štai monokristalinės medžiagos turi būti pjaunamos išilgai kristalografine kryptimi; tad ši savybė riboja, kokio dydžio bei formos gali būti pjezovykdiklis. Taip pat pjezokeramika yra sudaryta iš smulkių kristalų bei neturi nustatytos poliarizacijos krypties, nes kristalai išsidėstę atsitiktinai ir nepasižymi jokiais pjezoelektrinėmis savybėmis.

Tačiau paveikus pjezokeraminę medžiagą stipriu elektriniu lauku joje prasideda poliarizacijos procesas, kurio metu kristalai yra paveikiami bei orientuojami tam tikra kryptimi (1.12 pav.). 1.8 lentelėje pateikta pjezoelektrinių medžiagų pavyzdžių su jų savybėmis.



1.12 pav. Pjezokeramikos gamybos procesas: (a) prieš polarizaciją; (b) atliekamas polarizacijos procesas; (c) poliarizuota medžiaga po proceso [45]

1.8 lentelė. PZT medžiagų savybių palyginimas

Medžiaga	Sujungimo faktorius			Pjezo-ikrovos koef. (10^{-12} C/N)		Kiuri temp. ($^{\circ}$ C)	Dielektrinė konst. (1 kHz)	Mech. Kokybės fakt. (Q_m)	Nuoro-da
	k_{15}	k_{33}	k_{31}	d_{31}	d_{33}				
PZT-4D	0,62	0,71	0,33	-145	360	310	1280	1000	[6, 46, 47]
PZT-8	0,57	0,68	0,34	-105	280	320	1000	982	[6, 46, 47]
BaTiO₃	0,57	0,49	0,47	-79	191	125	1680	1300	[6, 46]
LiNbO₃	0,68	0,17	0,49	-0,85	6	1150	85.2	1000	[48]
PbTiO₃(52%) PbZrO₃(48%)¹	0,4	0,43	0,17	-43	110	350	7000	-	[49]
PVDF	-	0,18	0,12	23	33	170	12	4	[6]
Kvarcas (SiO₂)	-	0,07	-	-0,93	-2,3	573	-	-	[50]

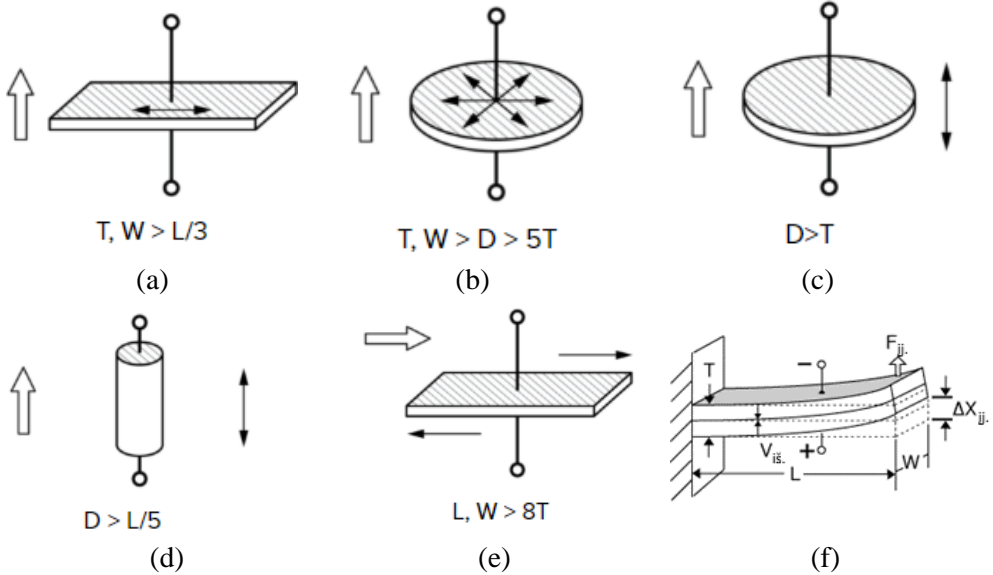
1.10. Pjezoelektrinių elementų virpesių modos

Moda – dinaminių sistemų harmoniniai svyravimai pagal tam tikrą judėjimo dėsnį, pvz., sinusoidę, vienodu dažniu. Dinaminės sistemos natūralūs virpesiai tam tikru dažniu vadinami rezonansiniais arba savaisiais. Kiekvienas fizikinis kūnas turi savo savuosius virpesius, kurie priklauso nuo daugelio veiksnių: formos, dydžio, medžiagos ir pan. Dinaminės sistemos gali turėti keletą modų, kuriose sistema virpa savaisiais dažniais.

Pjezoelektriniai keitikliai, veikiami elektrinio signalo, deformuojasi. Šių deformacijų dydis bei forma priklauso nuo to, kokio tipo (sinusoidinis, pjūklo tipo ar pan.), kokio dažnio bei amplitudės yra signalas, žadinantis pjezoelektrinį keitiklį. Kai elektrinio žadinimo signalo parametrai atitinka elemento formą, toks pjezoelementas rezonuoja tam tikru dažniu ir tam tikra kryptimi.

¹ Medžiaga, naudojama kosmoso pramonei [117]

Modos yra apibrėžiamos nusakant virpesių dažnį ω_n bei fazę φ_n . Modų parametrai priklauso nuo elemento masės, standumo bei jo pasiskirstymo, kraštinių bei darbo sąlygų. Modos gali būti šių tipų: skersinės (statmenos poliarizacijos kryptčiai) – 1.13 pav., *a*, radialinės – 1.13 pav., *b*, išilginės (lygiagrečios poliarizacijos vektoriaus kryptčiai, kai elemento storis mažesnis už ilgį, pvz., plokštelės, diskai) 1.13 pav., *c*, išilginės (strypuose, kai ilgis didesnis už plotį) 1.13 pav., *d*, šlyties 1.13 pav., *e*, lenkimo 1.13 pav., *f* [51, 52].



1.13 pav. Pjezoelektrinių elementų virpesių modos: (a) skersinės (statmenos poliarizacijos kryptčiai); (b) radialinės; (c) išilginės (lygiagrečios poliarizacijos vektoriaus kryptčiai, kai elemento storis mažesnis už ilgį, pvz., plokštelės, diskai); (d) išilginės (strypuose, kai ilgis didesnis už plotį); (e) šlyties. Čia: L – ilgis; W – plotis; T – storis; D – skersmuo

1.11. Pjezoelektrinės pavaros ir jų tipai

Pjezopavarų, kuriose yra naudojamas pjezoelektrinis keitiklis, veikimo principas yra pagrįstas atvirkštiniu pjezoelektriniu efektu. Pjezoelektrinis keitiklis, kuris gali tampriai deformuotis, yra sužadinamas elektriniu valdymo signalu. Pjezoelektrinis keitiklis, sužadintas valdomo signalo, deformuojasi ir elektrinis signalas paverčiamas mechaniniu poslinkiu. Jei elektrinio valdymo signalo dažnis sutampa su vienu iš pjezoelektrinio keitiklio rezonansinių dažnių, tai jo deformacijų forma atitinka žadinamo rezonanso modą.

Pjezoelektriniuose keitikliuose, kurie dirba ultragarsinių dažnių rėžyje, dažniausiai gali būti sužadinami rezonansiniai kelių modų virpesiai, pvz., išilginiai–lenkimo, radialiniai–lenkimo ar šlyties–lenkimo.

Keitikliai pagal virpesių bangos sklidimą juose yra skirstomi į dvi kategorijas: stovinčiosios bangos ar bėgančiosios bangos. Stovinčiosios bangos virpesiai keitiklyje sužadina stabilias maksimalių (pūpsnių zona) ir minimalių (mazginė zona) amplitudžių zonas. Tokiu būdu tas pats keitiklio taškas virpa tam tikro dydžio

amplitude. Bėgančiosios bangos virpesiai keitiklyje sužadunami, kai pjezoelektrinis keitiklis žadinamas keliuose skirtinguose elektroduose su skirtingos fazės rezonansinio dažnio elektriniais signalais. Tokiu būdu keitiklyje virpa visi taškai, tik su tam tikru faziniu atsilikimu, ir jame yra sužadinama kryptingai bėganti virpesių banga.

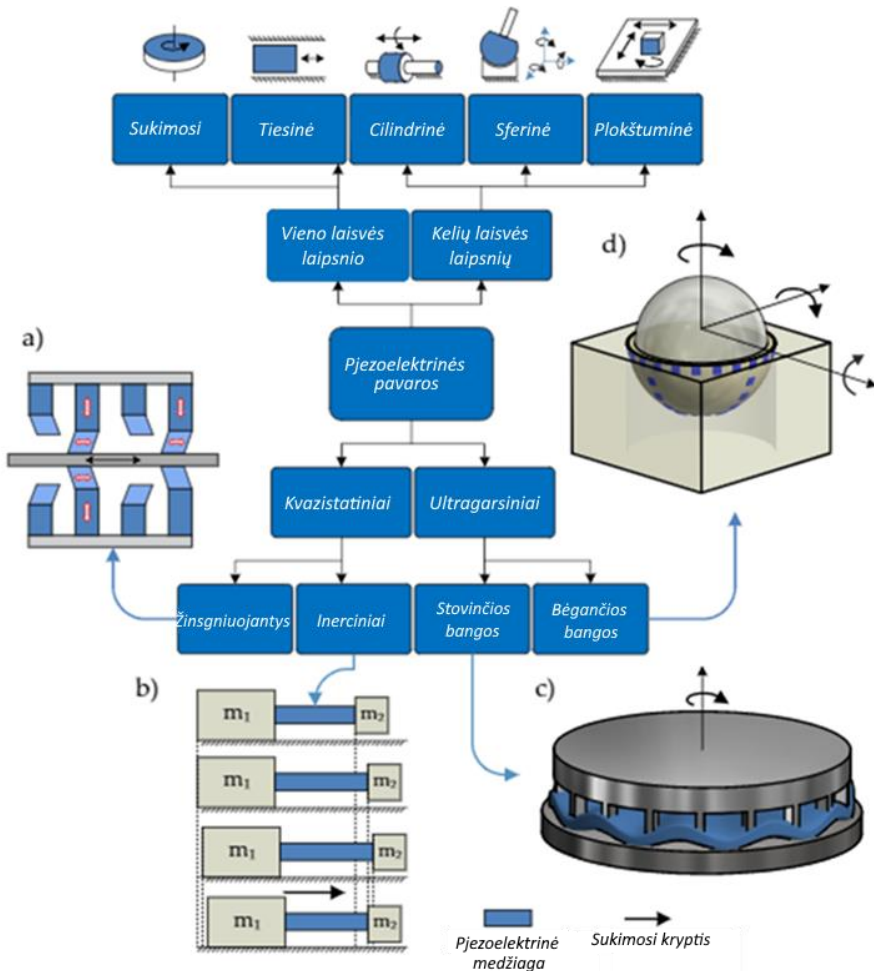
Toks mazgas, kuris susideda iš pjezoelektrinio keitiklio bei papildomų elementų, yra vadinamas pjezoelektriniu vykdikliu.

Pjezopavaros gali būti klasifikuojamos pagal įvairius kriterijus: veikimo principą, formą, judesio tipą, laisvės laipsnių skaičių ir pan. 1.14 pav. pateiktas susistemintas pavarų klasifikavimas pagal jų tipą [53].

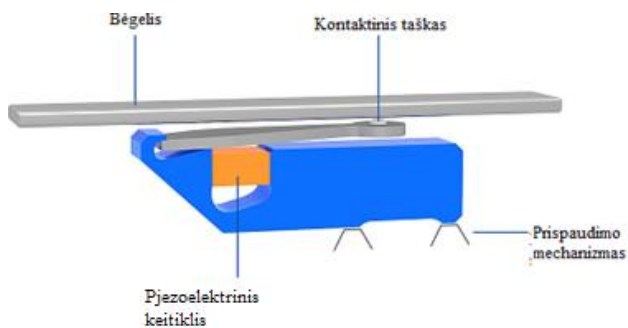
Pjezopavaros, atsižvelgiant į jų tipą, veikimo principą, judesio tipą, gali būti klasifikuojamos į tris grupes [54, 55]:

- inercinės pavaros;
- žingsninės pavaros;
- rezonansinės pavaros.

Inercinių pavarų judėjimas yra realizuojamas dėl trinties jėgų ciklinio kitimo tarp pavaros išėjimo grandies (rotorius, šliaužiklis) ir vykdiklio, kai šis yra žadinamas asimetriniais kvazistatiniais nerezonansiniais virpesiais. Tokio tipo pavaros yra kompaktiškos, neturinčios eigos apribojimų ir galinčios generuoti pakankamai dideles laikymo jėgas. Šio tipo pavaroje pjezoelektrinis keitiklis generuoja asimetrinius pjūklo formos virpesius, kurie per svirtį ir trintį kontaktiniame taške suteikia bėgeliui kryptingą slenkamąjį judesį (1.15 pav.). Tokios pavaros yra valdomos pjūklo tipo elektriniu signalu, o pati pavara gali generuoti vieno laisvės laipsnio judesį.



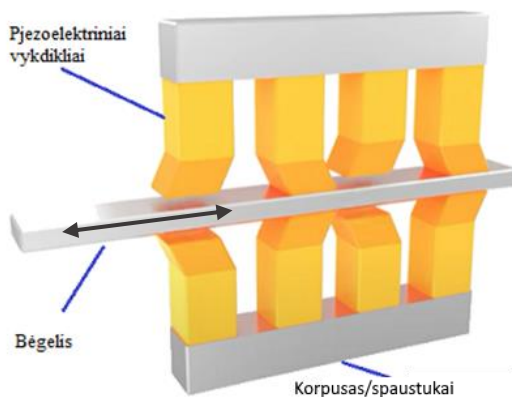
1.14 pav. Pjezopavarų klasifikacija pagal virpesių tipus bei mechaninį poslinkių judesį: (a) žingsninės eigos pavaros; (b) inercinės pavaros; (c) stovinčiosios bangos sukamojo judesio pavaros; (d) bėgančiosios bangos pavaros



1.15 pav. Inercinės sistemos pavarą [56]

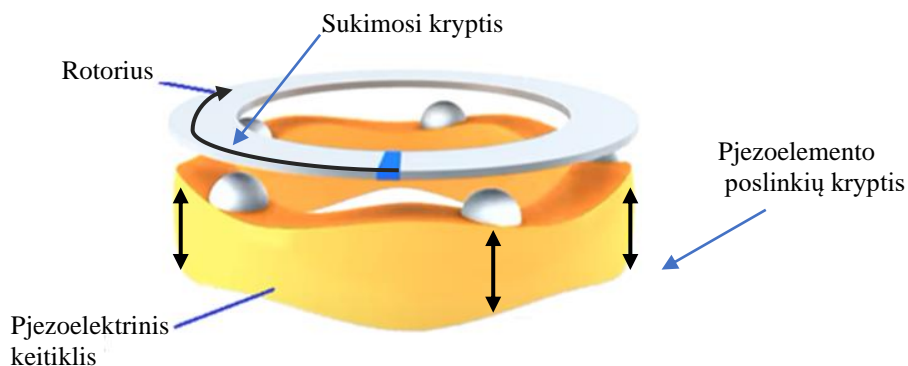
Žingsninių pavarų veikimo principas pagrįstas tuo, kad sukimo ar tiesinis judesys yra kuriamas panaudojant įvairius, dažniausiai kelis, pjezoelektrinius keitiklius, kurie generuoja ciklinius stūmimo–perkėlimo judesius. Keitikliai šio tipo pavarose veikia kvazistatiniu nerezonansiniu režimu. Pavaroje naudojami pjezoelektriniai keitikliai yra iš anksto prispaudžiami su tam tikra jėga prie rotoriaus arba šliaužiklio, atitinkamai deformuojantis keitikliams generuojamas poslinkis. Pavaros principinė schema pateikta 1.16 pav. Šio tipo pavaros yra itin tikslios, gali veikti vakuumo aplinkoje ir neturi feromagnetinių elementų, tad gali būti naudojamos ten, kur magnetinius laukus turinčios pavaros yra netinkamos.

Tiek inercinės, tiek ir žingsninės pavaros yra savistabdės – tuo metu, kai pjezoelektriniam vykdikliui neduodamas valdymo signalas, pavaroje veikiančios trinties jėgos neleidžia rotoriumi arba šliaužikliui pajudėti ir negeneruoja šilumos.

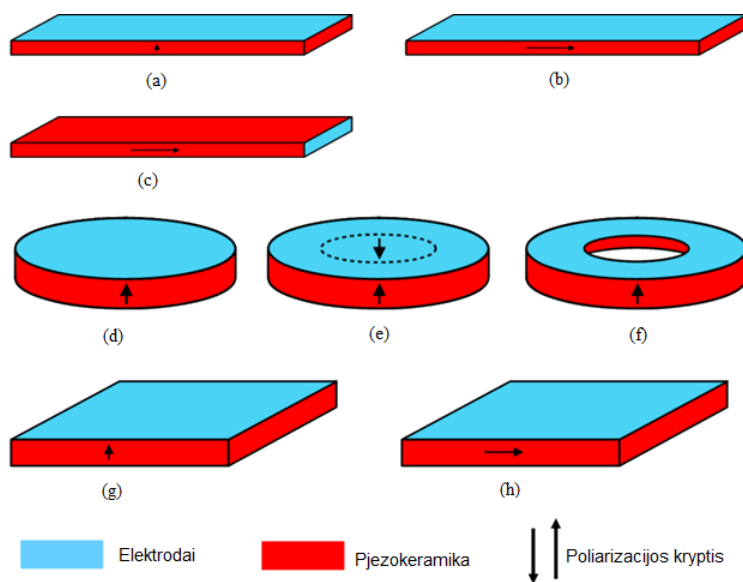


1.16 pav. Žingsninės sistemos pavana [57]

Rezonansinių (jos dar vadinamos ultragarsinėmis) pavarų veikimas pagrįstas tuo, kad pjezoelektriniuose keitikliuose yra sužadunami rezonansiniai vienos ar kelių modų ultragarsinio dažnio virpesiai, kurie pasitelkiant trinties jėgas tarp keitiklio ir pavaros išėjimo grandies (rotorius arba šliaužiklis) jai suteikia kryptingą sukamąjį arba slenkamąjį judesį. Ultragarsinio tipo pavaros pasižymi labai dideliu naudingo veikimo koeficientu, nes yra taikomas rezonansorezonanso pjezoelektrinio keitiklio darbo režimas. Vykdikliai yra gaminami panaudojant įvairiausių formų pjezoelektrinius elementus: plokšteles, cilindrus, diskus, žiedus ir pan. (1.18 pav.). Tai leidžia juose sužadinti įvairių modų rezonansinius virpesius. Šios pavaros yra kompaktiškos, gali generuoti poslinkius keliais laisvės laipsniais. Pavarų valdymas nesudėtingas, lengvai realizuojamas įvairaus tipo sistemose. Sukamojo judesio pavana su žiediniu pjezoelektriniu keitikliu, kuriame sužadinta bėgančioji virpesių banga, yra pavaizduota 1.17 pav.



1.17 pav. Ultragarstinė pavara su žiediniu pjezoelektriniu keitikliu [58]

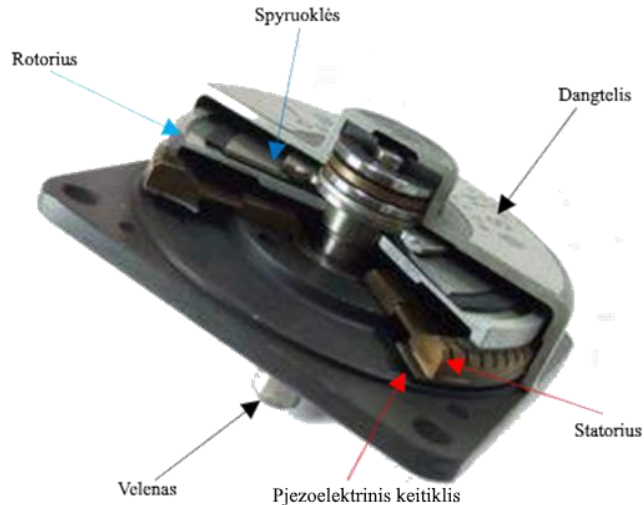


1.18 pav. Pjezoelektrinių keitiklių geometrinės formos, poliarizacijos kryptis bei elektrodai: (a) strypas, skersinė poliarizacija; (b) ir (c) strypas su išilgine poliarizacijos kryptimi bei skirtinga elektrodų pozicija; (d) diskas; (e) diskas su priešingais poliarizacijos poliais; (f) žiedinis diskas; (g) ir (h) plokštelės tipo vykdikliai su skirtingomis poliarizacijos kryptimis [59]

Kitas ultragarstinio variklio, turinčio didelį sukimo momentą, pavyzdys pateiktas 1.19 pav. Statorius yra suklijuotas iš dviejų žiedinių elementų – pjezoelektrinio ir metalinio su mažais radialiai suformuotais krumpliais. Krumpliai yra skirti sustiprinti pjezoelektrinio vykdklio perduodamus poslinkius rotoriumi. Variklis veikia statoriuje žadindamas bėgančiąją bangą, kuri rotoriumi pasitelkiant trinties jėgas perduoda kryptingą sukamąjį judesį.

Ultragarstinio dažnio pjezoelektriniai varikliai turi tokius pranašumas: tylus darbas, nes pavara dirba didesniu nei girdėjimo zonos dažniu (>20 kHz), nereikia greičio redukavimo elementų, pati pavara juda pakankamai lėtai. Pavara turi greitą

atsaką, kuris siekia kelias μs , greitą stabdymą bei paleidimą. Taip pat tokia pavara pasižymi dideliu masės bei sukimo momento santykiu, kuris siekia daugiau nei 10 Nm/kg . Tačiau tokia pavara turi ir trūkumų – ji nėra technologiška, tad sunkiau pagaminti bei užtikrinti pakankamą statoriaus ir pjezoelektrinio elemento akustinį kontaktą, nes tarpusavyje šie elementai yra klijuojami, taip atliekant šių komponentų sujungimą [45, 60].



1.19 pav. Pjezoelektrinio ultragarsinio variklio pjūvis [45]

1.12. Pjezoelektrinės pavarų konstrukcijos su keletu laisvės laipsnių

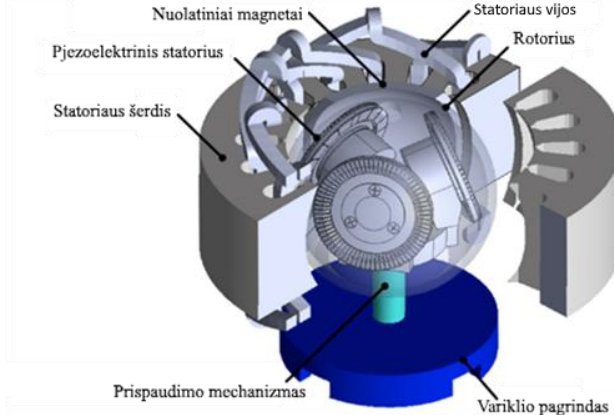
Pavarose gali būti vienas ar keli vykdikliai, kurie atlieka energijos konvertavimo funkciją ir energiją per papildomus periferinius komponentus perduoda į poslinkio ar jėgos kūrimo mazgą.

Paprastai didžioji dauguma pjezoelektrinių keitiklių, montuojamų pavarose, suteikia vieno laisvės laipsnio judesį rotoriumi arba šliaužikliui (1.18 pav. *a, b, c*). Tačiau egzistuoja daug sričių, kuriose vieno laisvės laipsnio nebepakanka. Norint, kad sistema turėtų keletą laisvės laipsnių, tipiniu atveju reikia sujungti ir sudėti keletą vieno laisvės laipsnio keitiklių skirtingoms ašims; taip sistemos tampa pakankamai komplikotos ir sudėtingai valdomos. Taip pat tokios sistemos yra sunkiai įgyvendinamos ten, kur reikalinga maža sistemos masė bei dydis ir didelis tikslumas.

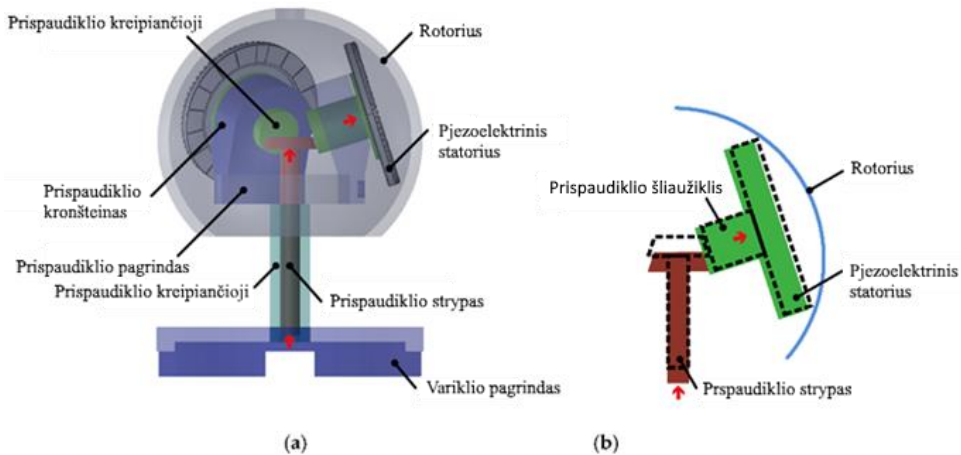
Pavara, kurioje naudojami keli keitikliai skirtingiems laisvės laipsniams su ultragarsinės pjezoelektrinės pavaros elementais, pateikta 1.20 pav. [61]. Šiame pavyzdyje autoriai pristato hibridinę magnetinę–pjezoelektrinę trijų laisvės laipsnių pavara. Ši pavara sudaryta iš keleto komponentų: pagrindo, įvaržos reguliavimo mechanizmo, elektromagnetinio statoriaus bei ričių, trijų pjezoelektrinių statorių, rotorius ir dviejų porų nuolatinių magnetų. Šitos magnetų poros yra sujungtos tarpusavyje ir sudaro magnetinę sferą su šiaurės bei pietų dipoliu. Šios sferos viduje, kas 120° erdvėje, išdėstyti statoriaus diskai su pjezoelektriniais vykdikliais.

Pasitelkiant įvaržos reguliavimo mechanizmą, pjezoelektriniais statoriaus diskais yra prispaudžiami prie magnetinės sferos sienelių (1.21 pav.). Prijungus valdomą

elektrinį signalą pjezoelektriniams keitikliams, juose generuojama bėgančioji banga; kadangi vykdikliai prispausti prie magnetinio rotoriaus, rotoriumi yra suteikiamas sukamasis judesys pagal tris koordinatas. Išorėje sumontuotas statorius generuoja elektromagnetinį lauką, o šis kuria sferos sukimo momentą. Kombinuojant galimybę sukėti nuolatinio magneto sferą aplink, naudojant pjezoelektrinius vykdiklius bei sukant pačią sferą elektromagnetiniu lauku, pavara gali sukėti pagal tris koordinatas.



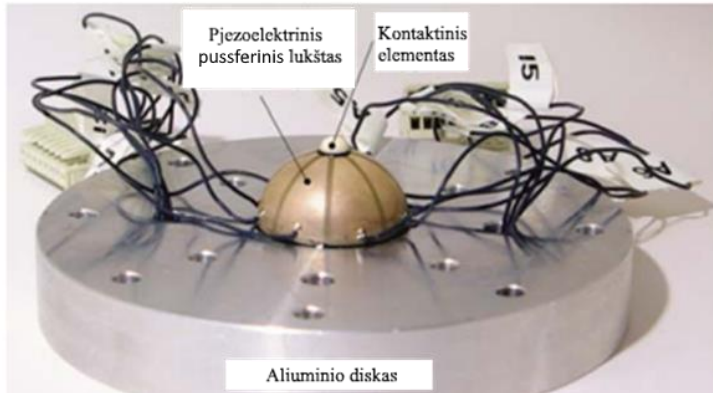
1.20 pav. Struktūrinė hibridinės magnetinės–pjezoelektrinės pavaros schema



1.21 pav. Pavaros schema bei prispaudimo apkrovos reguliavimo mechanizmas: (a) schematinė pavaros diagrama; (b) išankstinės apkrovos reguliavimo schema

Kita pavara su ultragarsinio pjezovariklio konstrukcija pateikta 1.22 pav. [62]. Ši konstrukcija pasižymi tuo, kad pusė sferos formos yra pagaminta iš pjezoelektrinės medžiagos su skersine poliarizacija ir elektrodais, kurie išdėstyti sferos išorinėje bei vidinėje pusėje. Vykdiklis tampriai pritvirtintas ant plokščio aliumininio korpuso taip, kad apatinis žiedinis sferos paviršius liečiasi su korpuso plokštumu, o jo viršutinėje dalyje yra priklijuotas kontaktinis elementas, kuris kontaktuoja per trintį su judančia pavaros grandimi (rotorius, šliaužiklis).

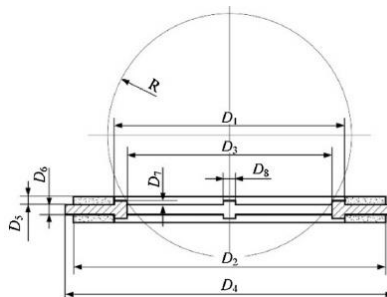
Pavaros veikimo principas toks: vykdyklyje, kuris pagamintas iš pjezoelektrinės medžiagos, elektriniu valdymo signalu yra sužadunami erdviniai kontaktinio elemento virpesiai, kurie trinties jėgomis pavaros judančiai grandžiai suteikia kryptingą judesį. Judesio kryptis yra keičiama perjungiant vykdyklio valdymo elektrodus.



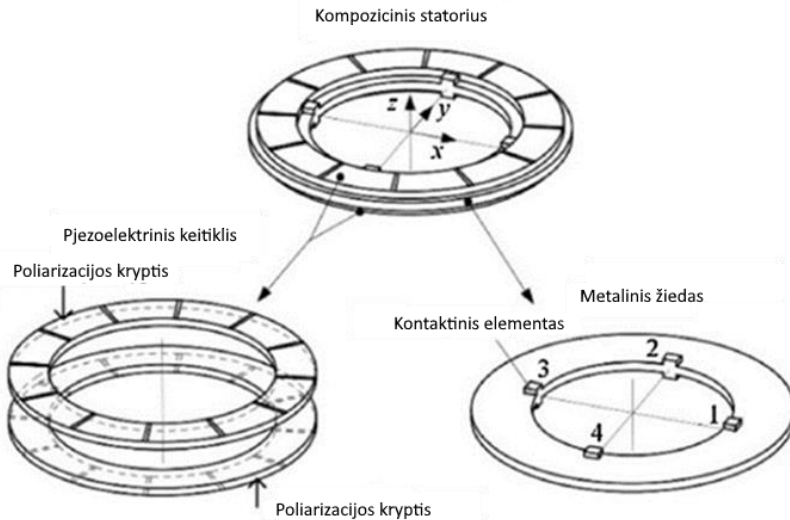
1.22 pav. Pavaros prototipas su sfera, pagaminta iš pjezoelektrinių medžiagų [62]

Pavara, kuri gali būti naudojama humanoido roboto akies orientavimo sistemoje, pateikta 1.23 pav. [63]. Šioje pvaroje yra naudojamas žiedinis pjezoelektrinis keitiklis–statorius, suteikiantis trimatį sukamąjį judesį sferiniam rotorui, kuriame gali būti sumontuota kamera. Autoriai teigia, kad žiedinis statorius turi pranašumų prieš prizmės, cilindro ar disko formos pjezoelektrinius keitikius dėl paprastesnės konstrukcijos bei galimybės sukuti rotorius didesniais kampais – taip užtikrinant kamerai pakankamai platų matymo lauką; pavaros struktūrinė schema pateikta 1.24 pav.

Pavaros statorius sudarytas iš dviejų pjezoelektrinių žiedų, kurie suklijuoti su metaline žiedine plokšte, kaip parodyta 1.24 pav. Pjezoelektriniai žiedai kartu su metaline plokšte sudaro bimorfinį vykdyklį, kuriame yra sužadunami lenkimo formos virpesiai, tad metalinė plokštelė, kuri skiria du pjezoelektrinius keitikius, deformuojama, o kontaktiniai elementai (1, 2, 3 ir 4), į kuriuos atremtas sferinis rotorius, juda erdvėje, taip kurdami erdvinius kampinius poslinkius. Perjungiant pjezoelektrinių keitiklių valdymo elektrodus, galima kontroliuoti sferos sukimosi kryptį.

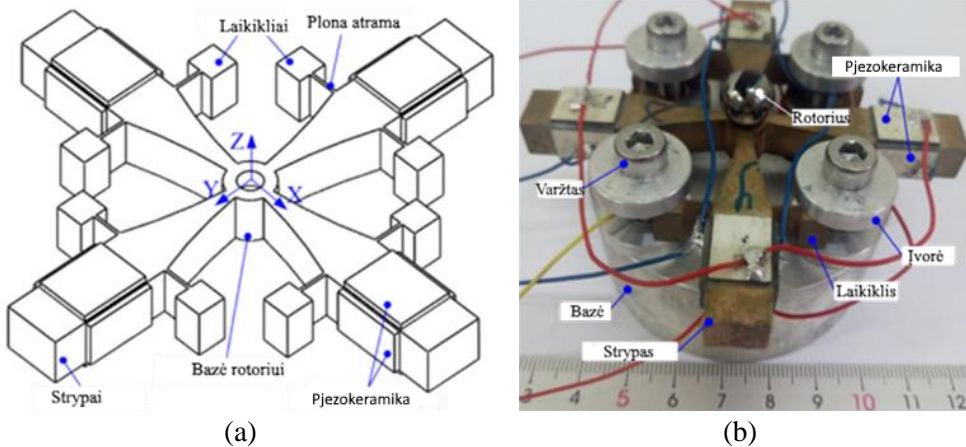


1.23 pav. Pavaros vaizdas pjūvyje [63]



1.24 pav. Pjezoelektrinio vykdiklio struktūra [63]

Pavara, kurios rotorius juda keliais laisvės laipsniais, naudojant metalinius strypus su priklijuotais keitikliais, pateikta 1.25 pav. [64]. Šią pavara sudaro keturių strypų simetrinė struktūra su aplink strypus apklijuotomis šešiolika plokštelėmis, pagamintomis iš pjezoelektrinės medžiagos. Pavaros centrinėje dalyje yra kiaurymė, kurioje į kontaktinius elementus atremta sfera – rotorius.

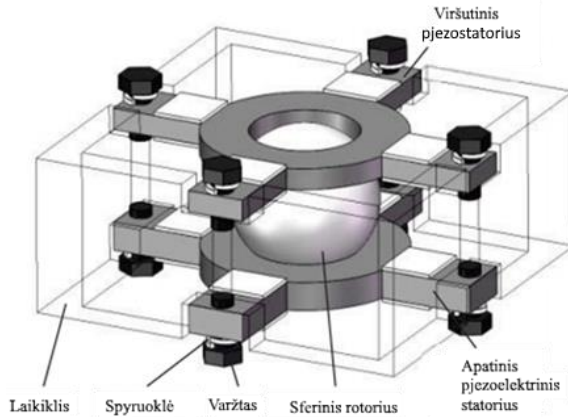


1.25 pav. Pjezoelektrinė pavara su keturių strypų simetrine struktūra: (a) strypų schema su pjezoelementais; (b) pavaros prototipas [64]

Šioje pavaroje sferinis rotorius turi tris laisvės laipsnius. Sukimasis pasiekiamas, kai sužadunami virpesiai skirtingose pjezoelektrinių vykdiklių porose, jie sukelia lenkimo bei ašinius virpesius skirtingose strypo kvadratinio profilio ašyse.

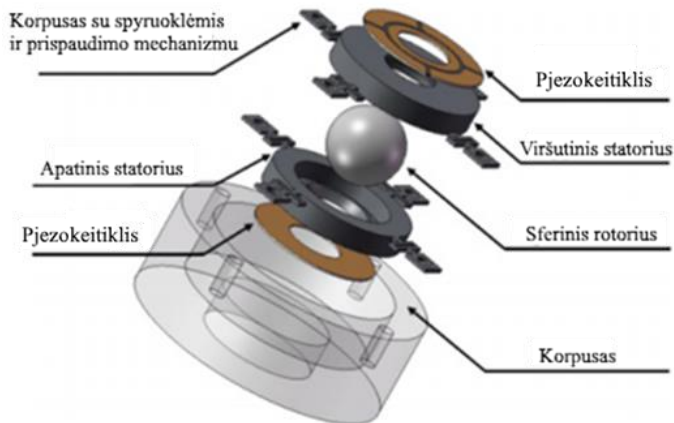
Pavaros konstrukcija, kai sferinis rotorius yra suspaustas tarp dviejų statoriaus plokštelių, pateikta 1.26 pav. [65]. Statorius yra pagamintas iš elastingos medžiagos, o prie jo iš skirtingų pusių priklijuotos pjezoelektrinės plokštelės. Viršutinio ir

apatinio statoriaus konstrukcijos yra vienodos. Jie yra pritvirtinti prie nešančiosios konstrukcijos keturiais varžtais su spyruokline įvarža. Tokiu būdu galima valdyti sferos suspaudimo jėgą.

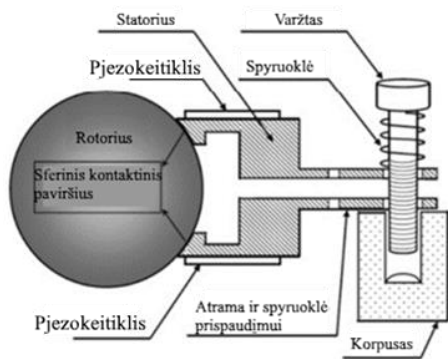


1.26 pav. Struktūrinė dviejų laisvės laipsnių pavaros schema [65]

Pavara su sferiniu rotoriumi, suspaustu tarp dviejų statoriaus elementų, prie kurių yra priklijuoti žiedo formos pjezoelektriniai keitikliai, pateikta 1.27 pav. [66]. Pavaros statoriai yra žiedinės formos, su keturiais pritvirtintais izoliaciniais elementais; šie veikia ir kaip izoliatoriai, ir kaip spyruoklės, kuriomis reguliuojama sferos įvarža. Prie statoriaus pritvirtintas pjezoelektrinės medžiagos žiedo formos diskas su keturiais elektrodais kas 90° bei centru, penktuoju, elektrodu, kuris skirtas skersinei virpesių modai generuoti. Pavaros pavyzdys pateiktas 1.27 pav. Šio paveikslo *a* dalyje pateiktas pavaros trimatis struktūrinis modelis, kuriame pavaizduoti konstrukcijos komponentai; *b* dalyje pavaizduota pavaros struktūrinė schema; *c* dalyje – surinktas pavaros prototipas.



(a)



(b)



(c)

1.27 pav. Pavaros su sferiniu rotoriumi ir dviem statoriais, schema: (a) trimatis pavaros vaizdas; (b) schematinis vaizdas; (c) surinktas prototipas su elektrodais [66]

1.13. Skyriaus apibendrinimas ir išvados bei tikslai

Šiame skyriuje apžvelgta mažųjų palydovų klasifikacija, jų valdymo bei orientavimo mechanizmai ir principai, jų trūkumai bei privalumai, palydovus veikiančios jėgos, pjezoelektrinės pavaros, jų tipai, pjezoelektrinės medžiagos bei ultragarsinės pjezoelektrinės pavarų konstrukcijos, kurias galima būtų taikyti mažų palydovų trimačiam orientavimui erdvėje. Remiantis pristatyta medžiaga, galima daryti tokias išvadas.

- Mažieji palydovai, kaip palydovų kategorija, dar skirstomi į skirtingas klases pagal tai, kokiais kriterijais vadovaujamosi, tačiau pats populiariausias palydovų klasifikavimo metodas – pagal masės dydį. Pati populiariausia grupė tarp visų mažųjų palydovų yra nanopalydovai ir jų klasė *CubeSat*.
- Mažiesiems palydovams pozicionuoti naudojamos sistemos gali būti skirstomos į tris grupes: pasyviosios sistemos, pusiau aktyviosios bei aktyviosios sistemos. Pasyviosios sistemos nenaudoja energijos, tačiau yra statiškos ir neleidžia valdyti pozicionavimo palydovo misijos metu. Aktyviosios sistemos leidžia atlikti korekcijas, tačiau jos užima nemažai vietos ir sunaudoja santykinai didelius kiekius energijos.
- Pjezoelektrinės pavaros, kurių elektrinis galingumas neviršija 30 W, energetiškai yra efektyvesnės už elektromagnetines, be to, jos užtikrina didelį generuojamo poslinkio tikslumą, todėl gali būti panaudotos mažuose palydovuose. Pagal savo veikimo principą pjezoelektrinės pavaros skirstomos į tris grupes: inercinės; žingsninės; rezonansinės bei rezonansinės ultragarsinės. Trečiosios grupės pavaros yra kompaktiškiausios, turi didžiausią naudingo veikimo koeficientą ir paprasčiausiai valdomos dėl mažo pjezovykliklių kiekio, taip pat gali generuoti labai tikslius poslinkius keliomis kryptimis. Tai ypač svarbu

kosmoso srityje todėl, kad dydžio, masės, konstrukcijos paprastumo klausimai yra itin aktualūs, o paprasti sprendimai leidžia sumažinti palydovo gamybos ir paleidimo išlaidas, neprarandant funkcinių galimybių.

- Pjezoelektrinės ultragarsinės pavaros turi platų panaudojimo spektrą – jos yra tylios, nes dirba ultragarsiniu dažniu, greitaieigės bei lengvasvorės, masės bei sukamojo judesio santykis yra didelis. Pjezoelektrinės pavaros gali atlikti tiesinius arba sukimo judesius viena ašimi, tačiau egzistuoja nemažai konstrukcijų, kurios leidžia pasiekti ir daugiaašius poslinkius.
- Išnagrinėta keletas skirtingų konstrukcijų pavarų, kurios gali atlikti sukamąjį judesį keliomis ašimis. Šios pavaros pasižymi teigiamomis dinaminėmis charakteristikomis – greitaveika, valdymo preciziškumu, tačiau jos yra technologiškai ir struktūriškai sudėtingos, joms būtina nemažai papildomų konstrukcinių elementų, kurie didina pavaros masę bei gabaritus. Tokios pavaros neturėtų būti naudojamos kosmoso ir precizinių mikrosistemų technikoje, ten, kur reikalingi maži gabaritai bei masė, didelis patikimumas bei paprastas valdymas.

Remiantis atlikta literatūros apžvalga ir pateiktomis išvadomis, buvo suformuluotas šio darbo tikslas ir uždaviniai.

Darbo tikslas

Šio tyrimo tikslas – sukurti ir iširti kelių laisvės laipsnių pjezoelektrinę sukimo pavarą, skirtą aktyviai nanopalydovų orientacijai erdvėje.

Tikslui pasiekti iškelti tokie uždaviniai.

1. Atlikti egzistuojančių pjezoelektrinių pavarų konstrukcijų analizę, siekiant nustatyti jų panaudojimo galimybes aktyviai bei pasyviai nanopalydovų orientacijai erdvėje, pagerinti palydovo pozicionavimo tikslumo ir energinio naudingumo charakteristikas.
2. Suprojektuoti pjezoelektrinės pavaros, skirtos aktyviai trimatei nanopalydovų orientacijai erdvėje, skaitinius modelius bei atlikti jos valdymo režimų patikrą ir iširti dinamines charakteristikas bei keitiklio valdymo elektrodo konfigūracijos įtaką daugiakrypčių virpesių žadinimui.
3. Sukurti pjezoelektrinės pavaros su sferiniu rotoriumi eksperimentinį maketą, atsižvelgiant į analitinius skaičiavimus ir atlikti valdymo režimų bei dinaminių parametrų eksperimentinius tyrimus su šiuo maketu.
4. Atlikti skriejančio iš anksto nustatyta trajektorija aplink Žemę nanopalydovo simuliaciją, jo trimačiam orientavimui erdvėje naudojant sukurtą pjezoelektrinę pavarą su magnetiniu sferos formos rotoriumi ir pateikti išvadas.

2. PALLYDOVŲ KONSTRUKCIJOS, PAGRINDINIAI ELEMENTAI IR SKAIČIUOJAMASIS PAVAROS MODELIS

Prieš pradėdant pavaros eksperimentinio maketo gamybą remiantis literatūros apžvalga ir suformuluotais darbo uždaviniais, turi būti atlikti teoriniai pozicionavimo sistemų bei pavarų tyrimai. Tokie teoriniai tyrimai reikalingi pavarų skaičiavimo ir projektavimo etapuose. Šiame skyriuje nagrinėjami palydovo pozicionavimo teoriniai principai, problematika, palydovų konstrukcija ir siūloma nanopalydovo pozicionavimo erdvėje pavaros koncepcija. Taip pat šiame skyriuje pristatomi teoriniai pavaros skaičiavimų rezultatai – tikrųjų dažnių bei formų ir amplitudės dažnių charakteristikų skaitiniai tyrimai.

2.1. Siūlomos pavaros modelis

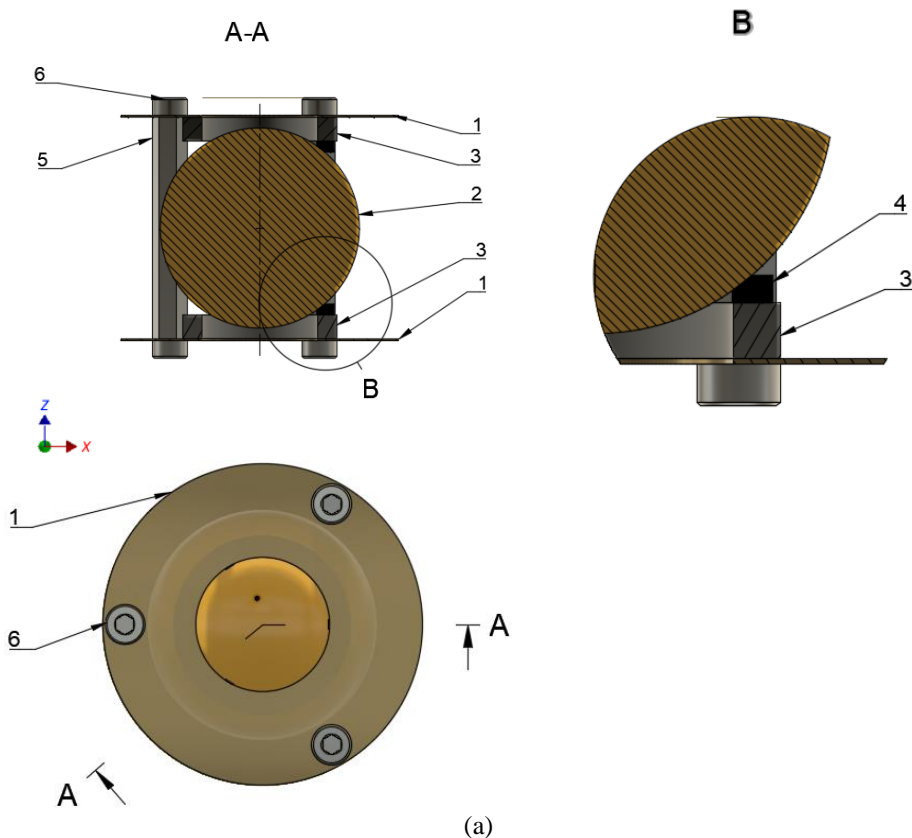
Egzistuojančių pavarų palydovo orientavimo uždaviniams atlikti analizė išryškino šiuos skirtingų pavarų bei jų sistemų trūkumus ir pranašumas: pasyvosios sistemos nenaudoja energijos, kuri yra kritiškai svarbi palydovo misijai. Tačiau tokios sistemos užtikrina tik vieną palydovo poziciją ir neleidžia atlikti pozicionavimo korekcijų po to, kai palydovas yra paleidžiamas orbitoje. Aktyviosios sistemos leidžia valdyti palydovo poziciją bei orientaciją misijos metu, tačiau tokios sistemos užima labai daug vietos ir sunaudoja nemažai energijos. Užimamo tūrio (ir drauge – didėjančios masės) klausimas yra taip pat labai aktualus, sprendžiant mažųjų palydovų konstrukcinius uždavinius. Todėl privalu turėti sistemą, kuri sunaudoja mažai energijos, yra kompaktiška bei integrali su palydovo sistemomis.

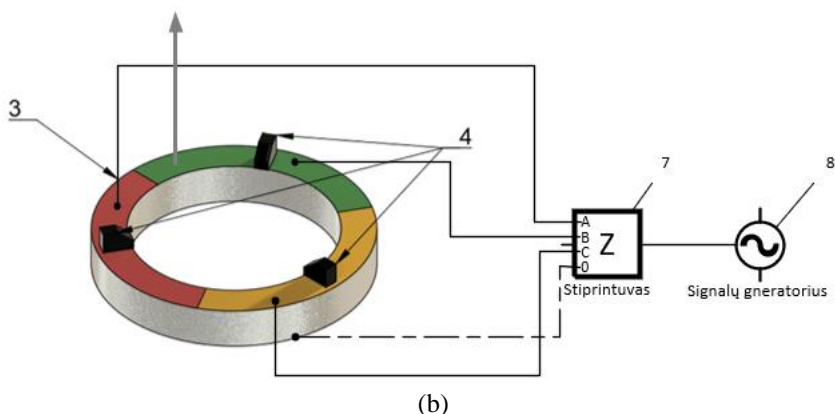
Išvardintoms problemoms spręsti siūlomas trimatis sukamojo judesio pjezoelektrinės pavaros su nuolatinio sferiniu magnetu modelis, kuris konstrukcine prasme yra sąlygiškai paprastas, lengvai integruojamas ir sunaudoja iki kelių milivatų energijos. Ši pavara sujungia teigiamas pozicionavimo sistemų savybes – išnaudojant pasyviųjų sistemų privalumus (nuolatinis magnetas) gali atlikti aktyviųjų sistemų uždavinius (galima keisti palydovo orientaciją). Nuolatinis magnetas naudojamas magnetinio lauko sinchronizacijai su Žemės magnetiniu lauku, tačiau, jei prireikia, pakeitus sferos orientaciją (t. y. pakreipus palydovo pavaros magnetinio lauko vektorių) galima atlikti palydovo perorientavimo funkciją. Po perorientavimo pjezoelektrinė pavara gali būti atjungta nuo valdymo bloko, nes jai būdinga pasyvi savitabda; tad, kai sferinis rotorius nejuda, tokia pavara visiškai nenaudoja elektros energijos.

2.1.1. Pavaros konstrukcijos koncepcija bei veikimo principas

Siūlomos trijų laisvės laipsnių (LLS) sukamojo judesio pjezoelektrinės pavaros konstrukcija pavaizduota 2.1 pav. Ši pjezoelektrinė pavara yra sudaryta iš dviejų žiedinių pjezoelektrinių keitiklių, sferinio nuolatinio magneto rotoriaus bei jungių (flanšų), prie kurių pritvirtinti pjezoelektriniai keitikliai. Šios jungės yra integruojamos (tvirtinamos) palydovo korpuse. Sferinis pavaros rotorius yra įterptas tarp dviejų pjezoelektrinių keitiklių, o šie priklijuoti prie jungių. Toks keitiklių sujungimas sukuria unimorfinę sistemą – aktyvus pjezoelektrinis keitiklis sujungiamas su pasyvia jungė ir sudaro pjezoelektrinį vykdiklį. Jungės tarpusavyje

sutvirtintos smeigėmis tam, kad sferinis rotorius turėtų pastovų frikcinį kontaktą su pjezoelektriniais keitikliais, turinčiais tam tikrą įvaržą. Ši įvarža privalo būti tolygi visuose kontaktiniuose taškuose. Kadangi pavaroje naudojamos trys kontaktinės atramos su kiekvienu pjezoelektriniu keitikliu, tokiu atveju įvaržos dydis yra paskirstomas tolygiai į kontaktines atramas, kai pavara yra surenkama bei užveržiami varžtai. Varžtų tolygų prispaudimą galima reguliuoti dinamometrinio raktu. Kai elektrinis signalas sužadina pjezoelektrinius keitiklius, pavaros rotorius pasukamas aplink vieną iš trijų ašių. Du žiediniai pjezoelektriniai keitikliai yra išdėstyti vienas priešais kitą tam, kad kuo tolygiau į sferinį rotorių veiktų tiek statinė, tiek dinaminė apkrova, ir šitaip padidintų jo sukimo momentą. Toks pavaros principas gali būti taikomas plačiai – ne tik palydovo orientavimo sistemose, bet ir robotikoje, lazerio spindulio valdymo sistemose ir pan., kur tikslus ir energiją tausojantis trimatis orientavimo mechanizmas gali būti reikalingas.





2.1 pav. 3 LLS UGM pavaros su sferiniu magnetiniu rotoriumi sandara: 1 – jungė; 2 – sferinis nuolatinio magneto rotorius; 3 – pjezoelektrinis keitiklis; 4 – kontaktinė atrama; 5 – smeigė; 6 – varžtas; 7 – daugiakanalis stiprintuvas; 8 – harmoninio elektrinio signalo generatorius; (a) struktūrinė pavaros bei elektrinių jungčių schema; (b) pjezoelektrinis keitiklis su kontaktiniais elementais bei nurodyta poliarizacijos kryptimi

Pjezoelektrinės ultragarsinės pavaros sandara: sferinis rotorius (2) įterptas tarp dviejų pjezoelektrinių keitiklių (3), prie šių keitiklių priklijuotos trys trinčiai atsparios kontaktinės atramos (4), kurios remiasi į sferinį rotorių. Pjezoelektrinio keitiklio vienoje plokščiųjų pusių elektrodo paviršius suskirstytas į tris segmentus (žalias, raudonas ir geltonas (pjezosegmentai)) (2.7 pav., *b*). Šių pjezosegmentų centruose ir priklijuotos kontaktinės atramos (4). Apatinis keitiklio elektrodas yra vientisas, jis priklijuotas prie plonos bronzinės jungės (1). Pavaros konstrukcija yra simetriška, tad apatinė pavaros dalis yra identiška viršutinei. Viršutinė ir apatinė jungės sujungtos smeigėmis (5), o smeigės prie jungių prisuktos varžtais (6).

2.1 pav., *b* pavaizduota elektrinė pavaros schema, kur elektrinio signalo generatorius (8) prijungtas prie daugiakanalio stiprintuvo (7). Šis stiprintuvas turi 3 valdymo signalo kanalus A, B bei C ir O įžeminimo kanalą, prie kurio prijungtas nesegmentuotas pjezoelektrinio keitiklio elektrodas. Kiekvienas iš valdymo signalo kanalų yra elektriškai sujungtas su pjezosegmentais. Apatinis ir viršutinis keitikliai sujungti tarpusavyje lygiagrečiai, t. y. viršutinio keitiklio vienas iš pjezosegmentų sujungtas su atitinkamu apatiniu pjezosegmentu, o šie tarpusavyje – prijungti prie signalų stiprintuvo kanalo. Toks pjezosegmentų sujungimo būdas leidžia vienu metu sužadinti du elektrodus bei sustiprinti žadinimo metu generuojamą sukimo momentą, kuris suka sferinį rotorių.

Šios pavaros veikimo principas pagrįstas tuo, kad pjezoelektrinį keitiklį sužadinus nustatyto dažnio ir amplitudės harmoniniu elektriniu signalu, keitiklis pradeda veikti aukštesnėse lenkimo modose. Poslinkiai yra pasiekiami tada, kai pjezoelektrinis keitiklis yra žadinamas aukštesnės harmonikos rezonansiniu dažniu. Šie poslinkiai priverčia keitiklį deformuotis erdvėje, t. y. keitiklio atskiri taškai pradeda judėti elipsine trajektorija. Kadangi prie pjezoelektrinio keitiklio yra priklijuoti nedideli kontaktiniai elementai, tad, judant keitikliui, kartu juda ir kontaktinės atramos. Šių atramų judėjimas bei smūgiavimas į sferinio rotoriaus

paviršių dėl veikiančios trinties priverčia sferinį rotorių kryptingai sukstis. Sukimosi greitis ir sukimo momentas yra valdomi, kontroliuojant žadinimo signalo amplitudę. Norint pakeisti sferinio rotoriaus sukimosi kryptį žadinami skirtingi pjezoelektrinio keitiklio elektrodų segmentai.

2.1.2. Pavaros konstrukcinis modelis

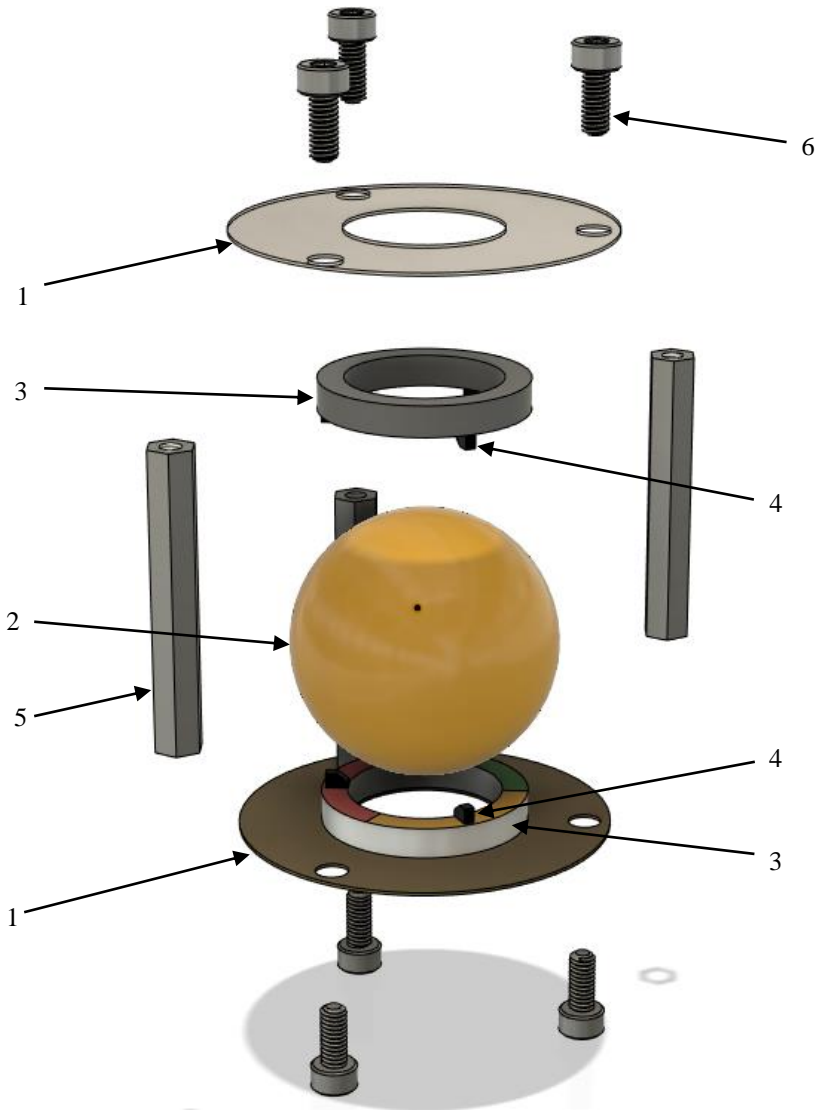
Šiame skyriuje bus išsamiai pristatyta ankstesniuose skyriuose minima pjezoelektrinės ultragarsinės pavaros konstrukcija, jos esminiai komponentai bei šių komponentų matmenys. Pavaros modelis bus naudojamas atliekant skaitinius tyrimus.

Trimatis konstrukcinis pjezoelektrinės pavaros modelis buvo sukurtas naudojantis parametrinio projektavimo programine įranga *Autodesk Inventor Professional 2018* [67]. Taip pat vizualizacijų kūrimui buvo naudojamas *Autodesk Fusion 360* programinės įrangos paketas [68].

Išrinktos pjezoelektrinės pavaros vaizdo projekcija pateikta 2.8 pav. Pagrindiniai pavaros komponentai ir jų dydžiai bei medžiagos išvardintos toliau.

- Jungė (1). Ji padaryta iš fosforinės bronzos C52100. Jos išorinis skersmuo 36 mm, vidinis – 15 mm. Jungės storis 0,3 mm.
- Sferinis magnetinis rotorius (2). Jis pagamintas iš retųjų Žemės metalų – neodimio geležies borido (NdFeb), jo skersmuo 25 mm. Šio magneto stipris 0,65 T;
- Pjezoelektrinis keitiklis (3). Pjezoelektrinis žiedinis keitiklis pagamintas iš pjezokeraminės PZT-4 tipo medžiagos. Keitiklio matmenys: išorinis skersmuo – 20 mm; vidinis skersmuo – 15 mm; storis – 3 mm. Keitiklio poliarizacija nukreipta teigiamojo elektrodo kryptimi, į viršų (2.1 pav., *b*); Elektrodai išdėstyti ant plokščių žiedo paviršių.
- Kontaktinė atrama (4). Ji pagaminta iš aliuminio oksido keramikos (Al_2O_3). Ši atrama yra 1,5 mm aukščio, 1 mm storio bei 2,2 mm pločio.
- Smeigė (5). Ji yra 28 mm ilgio, su M2,5 sriegiu bei 5 mm pločio.
- Varžtas (6). ISO 4762 M2,5×10 mm, nerūdijančiojo plieno varžtas.

Pavaros valdymo dalis yra nagrinėjama 4 skyriaus poskyriuose.



2.2 pav. Pjezoelektrinės ultragarsinės pavaros detalizuoto vaizdo projekcija: 1 – jungė; 2 – sferinis nuolatinio magneto rotorius; 3 – pjezoelektrinis keitiklis; 4 – kontaktinė atrama; 5 – smeigė; 6 – varžtas

2.2. Matematinis modelis

Pagrindinės pjezoelektrinės pavaros dinaminės lygtys yra gaunamos iš minimalios potencinės energijos principo, taikant kintamuosius funkcinius parametrus, ir jos gali būti išreikštos taip (2.1 lygčių sistema) [69]:

$$\begin{cases} M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku + T\varphi = F, \\ T^T u + S\varphi = Q; \end{cases} \quad (2.1)$$

čia: M , K , T , S ir C yra masės, standumo, elektroelastiškumo, talpos bei slopinimo matricos; atitinkamai u , φ , F bei Q mazgų poslinkio vektorių, įtampos, išorinių mechaninių jėgų, krūvių reikšmės. Keitiklio baigtinių elementų diskretizaciją sudaro elementai, kurių mazgai sujungti su elektrodais; šių žinomos elektrinio potencialo vertės. Likusiųjų elementų elektrinis potencialas mazguose yra suskaičiuojamas sprendimo metu. Pjezoelektrinės pavaros dinaminę lygtį šiuo atveju galima išreikšti taip (2.2 formulė):

$$\begin{cases} M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku + T_1\varphi_1 + T_2\varphi_2 = F, \\ T_1^T u - S_{11}\varphi_1 - S_{12}\varphi_2 = Q_1, \\ T_2^T u - S_{12}^T\varphi_1 - S_{22}\varphi_2 = 0; \end{cases} \quad (2.2)$$

čia T ir S išreiškiami:

$$T = \begin{bmatrix} T_1 & T_2 \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{12}^T & S_{22} \end{bmatrix}; \quad (2.4)$$

čia φ_1, φ_2 yra atitinkamai vektoriai mazgų potencialų, sujungtų su elektrodais, ir mazgų potencialų vektoriai, apskaičiuoti atitinkamai skaitinio modeliavimo metu. Tikrieji dažniai bei formos ω yra gaunamos iš pjezoelektrinės sistemos tikrųjų dažnių bei formų virpesių sprendinio:

$$\det(K^* - \omega^2 M) = 0; \quad (2.5)$$

čia K^* yra modifikuota standumo matrica. Tuo atveju, kai $Q_1=1$, tada galima išreikšti tokia forma:

$$K^* = K + T S^{-1} T^T; \quad (2.6)$$

tuo atveju, kai $\varphi_1 = 0$, modifikuota standumo matrica yra:

$$K^* = K + T_2 S_{22}^{-1} T_2^T. \quad (2.7)$$

Pjezoelektrinio vykdyklio harmoninis žadinimas yra atliekamas, pjezoelektrinį keitiklį žadinant harmoniniu elektriniu signalu, keičiant žadinimo įtampos vertę bei žadinant skirtingomis signalo fazėmis. Dėl atvirkštinio pjezoelektrinio efekto gaunamos atitinkamos mechaninės jėgos:

$$F_1 = (T_2 S_{22}^{-1} S_{12}^T - T_1) U \sin(\omega_k t); \quad (2.8)$$

čia U yra veikiančios žadinimo įtampos amplitudės vektorius žadinimo mazge.

Pjezoelektrinis keitiklis yra pjezokeramikos gaminy su suformuotais žadinimo elektrodais. Virpesių atsiradimas yra pagrįstas ryšiais tarp poliarizacijos ir poslinkio kryptų. Pavyzdžiui, išilginiai virpesiai yra lygiagretūs su poliarizacijos kryptimi, skersiniai virpesiai – statmeni poliarizacijos kryptims. Labai svarbu pasirinkti tinkamą elektrodo sudalinimo konfigūraciją, nes tokiu būdu generuojami norimi virpesiai ir sumažinami nepageidaujami. Elektrodo padėtis ir forma, sužadavimo tvarka – visa tai labai svarbu kuriant pavaros konstrukciją, renkantis pjezoelektrinius keitiklius. Parinkus naują, papildomą, elektrodo konfigūraciją tam pačiam keitikliui, galima

sukurti pavarą su keliais žadinimo elektrodų rinkiniais, veikiančiais keliais skirtingais režimais. Kiekvienos harmonikos amplitudė pasirenkama keičiant elektrodo plotą arba į elektrodus tiekiamos įtampos amplitudę [28]:

$$\begin{aligned} U_1 &= U_0 \cos \omega t; \\ U_2 &= \alpha_a \cos(2\omega t + \beta); \\ U_3 &= \alpha_a U_0 \cos(2\omega t + \beta + \pi) \end{aligned} \quad (2.9)$$

čia α_a bei β yra parametrai, kurie apibrėžia asimetrijos laipsnį; ω – dažnis, kuriame pasiekiamas pirmasis išilginių virpesių rezonansas. Standartinė išilginių virpesių išraiška [28]:

$$f_k = \frac{k}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}}; \quad (2.10)$$

čia: E – Jungo modulis; ρ – medžiagos tankis; l – ilgis; k – išilginių virpesių modos skaičius (1, 2, 3, ...).

Elektriniu signalu žadinamas pjezoelektrinis keitiklis deformuojasi, t. y. juda tam tikra trajektorija. Kontaktiniuose taškuose į pjezoelektrinį keitiklį remiasi rotorius, arba kitaip tariant – kur ant keitiklio yra pritvirtintos kontaktinės atramos (2.1 pav., *b*). Šitie taškai dėl erdvinų virpesių superpozicijos žadinimo metu juda elipsine trajektorija. Šio judėjimo metu sferinis rotorius dėl trinties tarp kontaktinio taško ir sferos yra kryptingai sukamas. Svarbu paminėti, kad būtina apibrėžti, kaip kontaktinis taškas juda plokštumos atžvilgiu. Efektyviausiai sferinis rotorius yra sukamas tuo metu, kai elipsė sudaro 45° su X (skersineskersine) ašimi. Tačiau esant tam tikroms sąlygoms elipsės gali pakeisti kryptį, tokiu atveju keitiklis nebeveikia tinkamai [28].

Jėgų vertės apskaičiuojamos atliekant amplitudės dažninės charakteristikos skaitinę analizę, kai žinomi kontaktinių taškų judesiai. Tada galima apskaičiuoti suminius poslinkio vektorius. Pagrindinis matematinio modeliavimo uždavinys yra apskaičiuoti vektorių ilgį laiko srityje, kai nurodomas jėgos vektoriaus ilgis ir kryptis. Judesio vektoriaus pradžios koordinatės (x_0, y_0, z_0) yra kontaktinio taško koordinatės, kai keitiklis nežadinamas. Poslinkio taško koordinatės gaunamos apskaičiuojant poslinkio reikšmę [28]:

$$(x, y, z) = (x_0 + ux, y_0 + uy, z_0 + uz). \quad (2.11)$$

Trajektorijos analizė yra atliekama, kai koordinačių ašies Z dedamoji yra statmena ir eina per pjezoelektrinio keitiklio sukimosi ašį (ašinė kryptis); X koordinatė – skersineskersine kryptimi (2.1 pav., *a*). Visų pirma, koordinačių sistemos matrica yra transponuojama:

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (2.12)$$

Stulpelių vektoriai yra pasukami, taikant transponavimo matricą:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}. \quad (2.13)$$

Kampas θ yra apskaičiuojamas, Dekarto koordinačių sistemą transformuojant į cilindrinę:

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2}; \quad (2.14)$$

$$\theta = \begin{cases} 0, & \text{jei } x = 0, y = 0 \\ \arcsin\left(\frac{y}{\rho}\right), & x \geq 0 \\ \arcsin\left(\frac{y}{x}\right), & x > 0 \\ -\arcsin\left(\frac{y}{\rho}\right) + \pi, & x < 0 \end{cases}; \quad (2.15)$$

čia: x žymi ux bei y žymi uy . Sąlyčio taškas yra randamas bei nusakomas taikant sinuso funkciją. Kai transformacija yra baigta ir surastos x' reikšmės, elipsė yra apskaičiuojama taikant kanoninių lygčių sistemą:

$$F(x, y) = a_{11}x^2 + 2a_{12}xy + a_{22}y^2 + 2a_{13}x + 2a_{23}y + a_{33} = 0 \quad (2.16)$$

Paprastumo dėlei koordinačių sistema yra sutapatinama su elipsės centru. Tai leidžia supaprastinti 2.16 lygtį. Tokiu atveju lygtis atrodo taip:

$$F(x, y) = a_{11}x^2 + 2a_{12}xy + a_{22}y^2 + a_{33} = 0. \quad (2.17)$$

Koeficientai yra surandami išsprendus lygtį. Pagrindinės elipsės ašies ilgis yra poslinkių vektoriaus ilgis. Kai abiejų taškų poslinkių vektoriai randami, suminis poslinkių vektorius suskaičiuojamas.

2.3. Skaičiuojamasis pavaros modelis

Šiame darbe nagrinėjamas pjezoelektrinės ir ultragarsinės pavaros modelis. Skaičiuojamasis pavaros modelis (baigtinių elementų modelis, BE modelis) sudarytas supaprastinant kompiuterinį konstrukcinį modelį. BE modelis sudarytas iš esminių komponentų: pjezoelektrinio žiedo, jungės bei kontaktinių atramų. Pavara yra simetriška, todėl viršutinės pavaros dalies modeliuoti nėra būtinybės. Atliekant pavaros skaitinius tyrimus, nagrinėtos skirtingos simuliacijos sąlygos, o šių sąlygų rezultatai pateikti toliau.

Kompiuterinės analizės tikslas – rasti keitiklio tikruosius dažnius bei formas ir nustatyti amplitudines dažnines charakteristikas, nustatyti, kokie dažniai yra reikalingi, kad būtų užtikrintas patikimas pavaros rotoriaus sukamasis judesys trimatėje erdvėje. Atliekant skaičiavimus nagrinėjami du atvejai: poslinkių amplitudės priklausomybė nuo žadinimo elektrodo sudalinimo ir nuo jungės formos. Skaičiavimai atliekami dviem etapais: iš pradžių atliekamas tikrųjų dažnių ir formų skaitinis tyrimas, vėliau, remiantis gautais rezultatais, atliekami amplitudinių dažnių charakteristikų skaičiavimai.

Nagrinėjant žadinimo elektrodo sudalinimo įtaką poslinkių amplitudei, pjezoelektrinio keitiklio elektrodas buvo sudalintas į 3, 6 ir 9 vienodus pjezosegmentus. Mažesnio ploto žadinimo elektrodas turi mažesnę elektrinį talpą, nes signalo ir įžeminto elektrodų pora keitiklyje veikia kaip kondensatorius, o tai reiškia didesnę keitiklio energetinį efektyvumą. Tačiau pavara, turinti mažesnio ploto ir talpos elektrodus, taip pat praranda dalį savo generuojamos galios, o tai – tiesioginė įtaka kontaktinio taško, kuris remiasi į sferą, poslinkių amplitudei. Norint rasti efektyviausią elektrodų sudalinimo konfigūraciją, kai generuojant kontaktinio taško poslinkius jų amplitudės yra didžiausios, o pjezosegmento plotas yra mažiausias, atliekama keitiklio amplitudinių–dažninių charakteristikų analizė.

Antruoju atveju pjezoelektrinis keitiklis savo plokščiuoju žiediniu paviršiumi yra kietai pritvirtinamas (klijuojant) prie jungės – tokiu atveju pjezoelektrinis keitiklis kartu su jungė veikia kaip unimorfinis vykdiklis. Tokiame vykdiklyje pjezoelektrinis keitiklis yra aktyvioji dalis, o jungė – pasyvioji. Šio eksperimento tikslas – pjezoelektrinį keitiklį sujungus su jungė, gauti tampriai rezonuojančią pjezomechaninę sistemą, kuri turėtų paprastesnę konstrukciją bei užtikrintų didesnę rotoriaus generuojamo poslinkio tikslumą. Pirmuoju atveju, kai pjezoelektrinis keitiklis per papildomus virpesius slopinančius elementus yra dinamiškai atrišamas nuo jungės, dalis dinaminės energijos sugerinama. Tačiau privertus kartu su keitikliu rezonuoti ir jungę pasiekiamas didesnis dinaminis ir energetinis efektyvumas, o visa pavaros konstrukcija tampa standesnė; tai sąlygoja didesnę rotoriaus pozicionavimo tikslumą.

Kompiuterinėms simuliacijoms atlikti naudojama *Comsol Multiphysics 5.4* programinė įranga (PI), skirta daugiadiscipliniams modeliavimo uždaviniams spręsti [70]. Šios PI skaičiavimo principas pagrįstas baigtinių elementų (BE) metodu. Šita PI naudojama atlikti tikrųjų dažnių bei formų ir amplitudės dažninių charakteristikų skaitinius tyrimus, suskaičiuoti kontaktinio taško trajektoriją.

2.3.1. Pjezoelektrinio keitiklio su skirtingu elektrodo sudalinimu analizė

Keitiklio su skirtingu elektrodo sudalinimu skaitiniams tyrimams atlikti taikomas BE modelis, kuris sudarytas tik iš esminių komponentų: pjezoelektrinio vykdiklio, kontaktinių atramų ir jungės. Likusieji elementai yra eliminuojami iš skaitinių tyrimų. Medžiagų savybės bei geometriniai dydžiai pateikti 2.1 lentelėje [71, 72, 73, 74].

2.1 lentelė. Medžiagų savybės bei elementų dydžiai, naudoti simuliacijoms

Savybė	Mat. vnt.	Keitiklis	Jungė	Kontaktinės atramos
Medžiaga	–	PZT-4	Aliuminis 6061	Aliuminio oksidas (Al ₂ O ₃)
Tankis	kg/m ³	7500	2700	3950
Matmenys	mm	IS – 20; VS – 15; T – 3	IS – 35; DS – 34; T – 0,3	W – 1; L – 2,2; H – 1,5
Puasono koef.	–	0,31	0,31	0,21

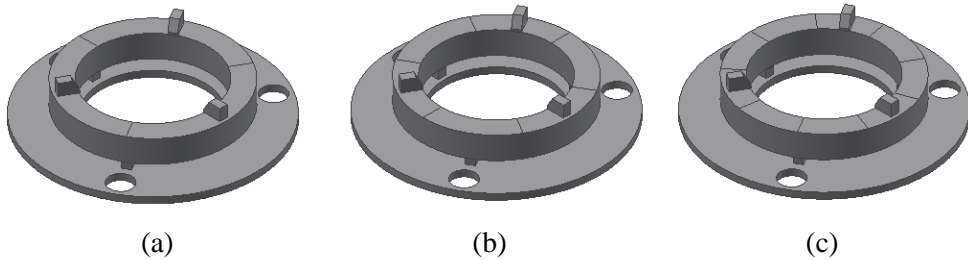
Jungo modulis	GPa	63	68,9	215
Dielektrinė skvarba, 10^3	F/m	$\epsilon_{11} = 1,48,$ $\epsilon_{22} = 1,48, \epsilon_{33} = 1,3$	–	–
Pjezoelektrinių koeficientų matrica, 10^{-12}	C/N	$d_{31} = -123, d_{32} = -$ $123, d_{33} = 289,$ $d_{24} = 496,$ $d_{15} = 496$	–	–
Tamprumo matrica, 10^{-12}	m^2/N	$c_{11} = 12,3, c_{21} = -$ $4,05, c_{31} = -5,31,$ $c_{22} = 12,3, c_{32} = -$ $5,31, c_{33} = 15,5,$ $c_{44} = 39, c_{55} = 39,$ $c_{66} = 32,7$	–	–

Visų pirma buvo atliktas pjezoelektrinio vykdiklio tikrųjų dažnių ir virpesių tyrimas, traktuojant, kad elementas nėra žadinamas, tačiau apkraunant 0,8 N jėga kontaktines atramas, į kurias remiasi sferinis rotorius. Vykdiklis buvo įtvirtintas trijuose taškuose ties 3 kiaurymėmis. Pjezoelektriniai bei dielektriniai nuostoliai nebuvo vertinami. Tačiau komponentams priskirti mechaninio slopinimo koeficientai 0,001 bei 0,004, atitinkamai aliuminiui bei PZT-4 [75, 76]. Kontaktinių atramų mechaninis slopinimas nebuvo vertinamas, nes jo įtaka sistemoje yra mažai reikšminga – jų geometriniai matmenys yra labai maži ir jie yra pagaminti iš kietos aliuminio oksido (Al_2O_3) keramikos (54C, matuojant HRC [77]), tad šių elementų įtaka bendroje sistemoje yra nedidelė. Skaitinėms analizėms atlikti buvo naudojamas *Comsol Multiphysics* funkcinis modulis *Piezoelectric Devices*. Skaitiniuose modeliuose naudojami BE tinkleliai yra sudaryti iš tetraedrinių elementų, kurie proporcingai pritaikomi (diskretizuojami) kiekvienam skaičiuojamam elementui individualiai, t. y. smulkūs sistemos elementai (kontaktinės atramos) bei kontaktuojančios elementų vietos turi tankesnę BE tinklelį, o didesnių matmenų elementai (jungė, pjezoelektrinis keitiklis) – stambesnę. Mažiausias BE dydis: 0,35 mm, didžiausias – 2,8 mm. Suminis BE skaičius siekia ~145 300 (vykdiklis su diskine jungė) bei ~110 500. Racionalus BE tinklelio dydis buvo nustatinėjamas iteraciniu būdu, siekiant priimtinos kombinacijos tarp skaičiavimo tikslumo bei trukmės.

Valdymo signalo elektrodas buvo dalinamas į tris skirtingas konfigūracijas: 3 dalis, kas 120° ; 6 dalis, kas 60° ; 9 dalis, kas 40° . Toks sudalinimas parinktas todėl, kad sferiniam rotoriumi išstatyti reikalingi trys atramos taškai, kurie realizuojami trimis kontaktinėmis atramomis, priklijuotomis viduje elektrodo (2.3 pav.), prie kurio pajungtas elektrinis valdymo signalas. 6 atskiri elektrodo segmentai leidžia keisti elektrodo plotą, sudalinant žadinimo elektrodą į šešias lygias dalis ir taip, kad kontaktinės atramos būtų išdėstomos kas 120° . Analogiškai ir su 9 segmentais – jie sudalina žadinimo elektrodą tolygiai mažinant plotą ir išdėstant kontaktines atramas kas 120° . Mažesnis elektrodo plotas turi mažesnę elektrinę talpą, tad jam reikia mažiau elektros energijos. Nors šis dydis sąlygiškai daug nesiskiria, tačiau pavaros

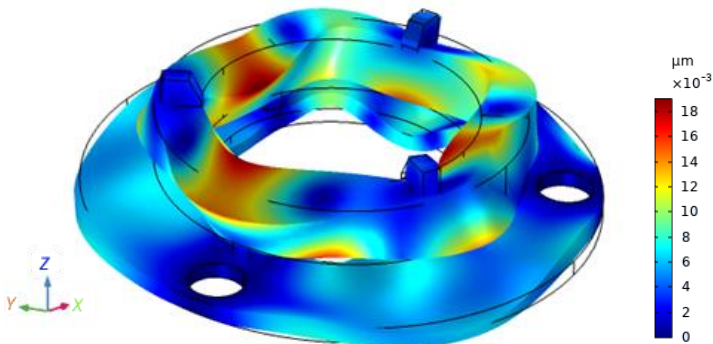
energetinis efektyvumas leidžia panaudoti tokio tipo pavara sistemose, kur energetinės sąnaudos yra itin aktualios. Mechaniniu aspektu – jei pavara gali generuoti panašios ar didesnės amplitudės poslinkius su mažesnėmis energetinėmis sąnaudomis, pavaros konstrukcija yra racionalizuojama.

Pjezoelektrinis keitiklis nuo junggės pakeltas ant trijų elastiškų atramų – tokiu būdu junggė nėra standžiai sujungta su pjezoelektriniu keitikliu, kurio virpesiai galėtų paveikti junggę. Atramos, skiriančios junggę nuo keitiklio – išdalintos ir išstatytos elektrodų dalinimo vietose, vienodai nutolusiose nuo kontaktinių atramų, į kuriuos remiasi sfera. Taip pat tvirtinimo kiaurymės yra vienoje ašyje su atramomis (2.3 pav.).



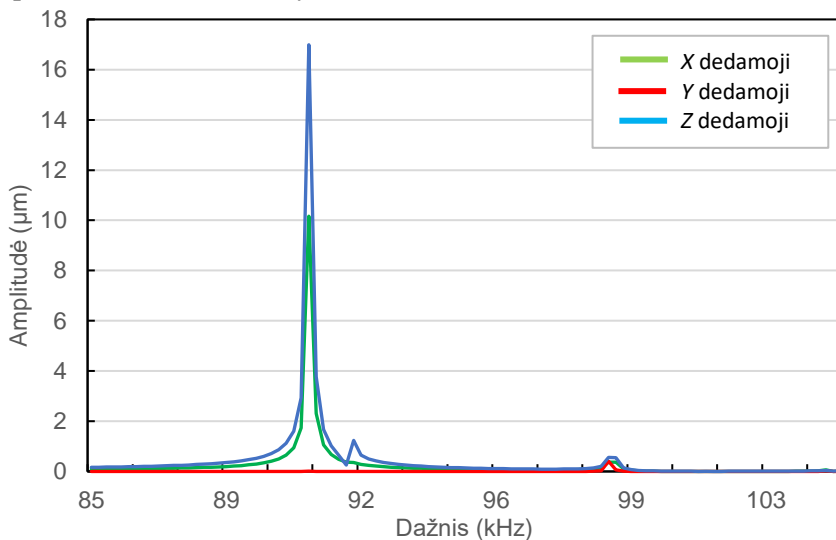
2.3 pav. Žiedinio keitiklio su junggės ir skirtingu žadinimo elektrodo sudaliniu skaitiniai modeliai: (a) 3 dalys, kas 120°; (b) 6 dalys, kas 60°; (c) 9 dalys, kas 30°

Tikrųjų virpesių ir formų tyrimų tikslas – nustatyti keitiklio rezonansinius dažnius, ties kuriais yra sužadunami jo harmoniniai virpesiai skersineskryptine bei ašine kryptimis. Tikrinės formos nusako harmoniškai virpančios konstrukcijos poslinkius kraštinėje deformuotoje padėtyje [78, 79]. Pavaros keitiklio poslinkių nustatymas X , Y bei Z kryptimis leidžia nusakyti rezonansinio darbo režimą, kuriam esant yra generuojami elipsiniai poslinkiai trimatėje erdvėje, reikalingi sferinio rotoriaus sukimui. Išanalizavus virpesius plačiame dažnių rėžyje (50–110 kHz), buvo nustatyti keli rezonansiniai darbo režimai, kai poslinkiai dominuoja ašine (Z) bei skersineskryptine (X) kryptimis. Šitie poslinkiai šiomis kryptimis yra reikalingi tam, kad sfera būtų sukama. Analizuojant gautus rezultatus nustatyta, kad sferos sukimas įmanomas esant 91,15 kHz tikrajam dažniui. Tikrųjų virpesių forma virpant 91,15 kHz tikruoju dažniu pateikta 2.4 pav.

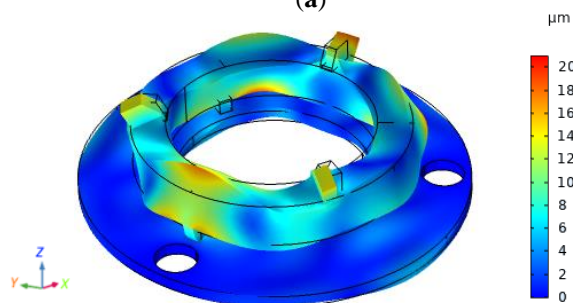


2.4 pav. Tikrųjų virpesių forma esant 91,15 kHz tikrajam dažniui

Vėliau buvo apskaičiuotos vykdiklių amplitudinės dažninės charakteristikos, kai pjezoelektrinis keitiklis yra žadinamas 100 V elektriniu signalu, žadinant tik vieną pjezosegmentą. Taip atlikta todėl, kad: a) sistema yra simetriška; b) realioje sistemoje tik vienas pjezosegmentas vienu laiko momentu yra žadinamas. Atliekant amplitudinius dažnių charakteristikų tyrimus, buvo pasinaudota tikrinių dažnių ir formų skaitinių tyrimų rezultatais, tolimesniems tyrimams pasirinktas dažnių režis nuo 85 kHz iki 110 kHz. Atliekant amplitudės dažnių charakteristikų tyrimus, nagrinėjami trys galimi atvejai: signalo elektrodas yra sudalintas į 3, 6 bei 9 lygias dalis. Elektrodo sudalinimo įtaka poslinkiams ir virpesių amplitudėms atitinkamai X , Y ir Z ašimis pateikta 2.5–2.7 pav. Pažymėtina, kad: koordinatinių sistemos Z ašis yra sutapatinta su vykdiklio sukimosi ašimi, X ašis – sutapatinta su elektriškai žadinamo vieno iš pjezosegmentų viduriu bei eina per kontaktinės atramos centrą, t. y. X sutampa su skersineskersine vykdiklio ašimi.

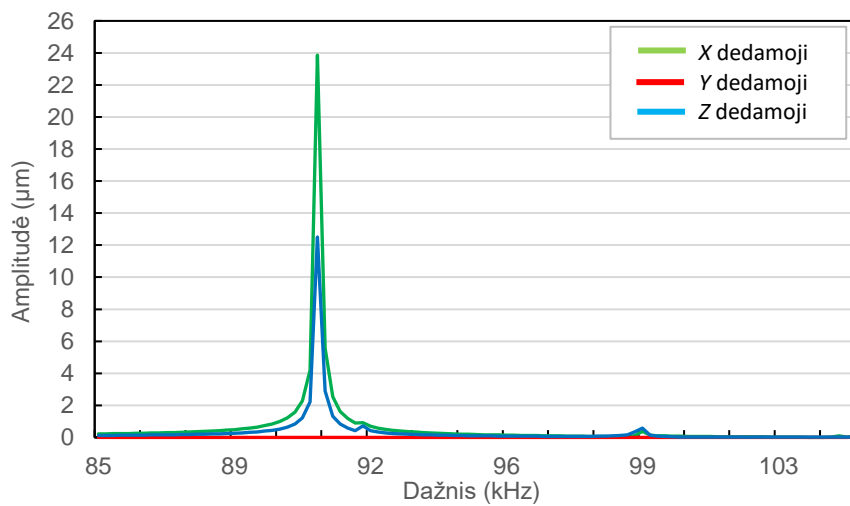


(a)

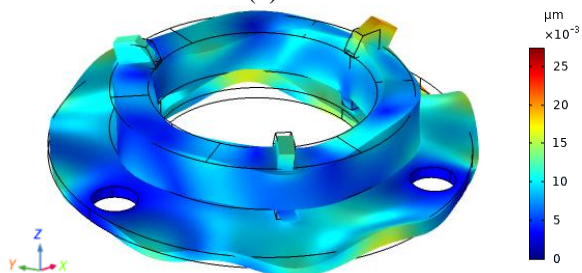


(b)

2.5 pav. Harmoninio žadinimo analizė, kai signalo elektrodas sudalintas į 3 lygias dalis: (a) amplitudinės dažninės charakteristikos; (b) virpesių formos ties 90,80 kHz

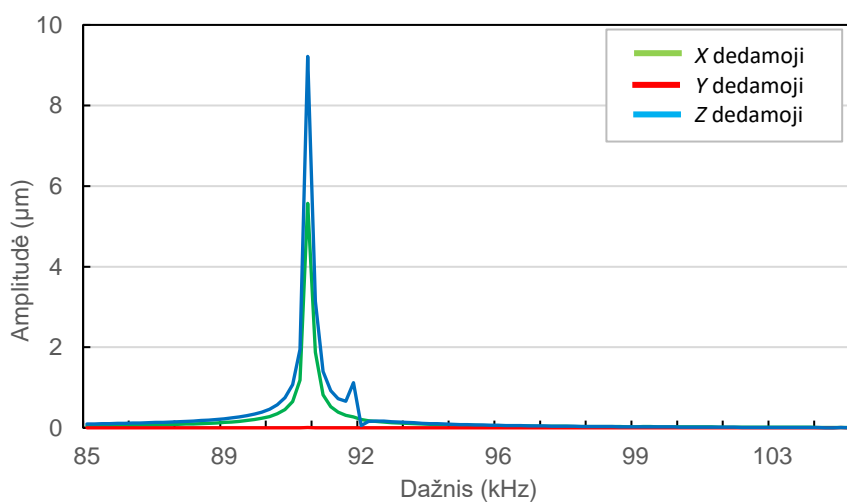


(a)

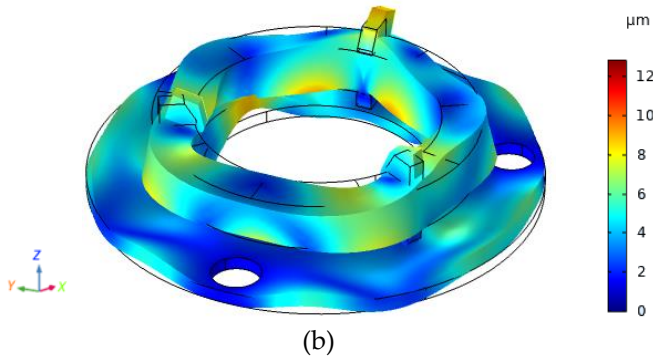


(b)

2.6 pav. Harmoninio žadinimo analizė, kai signalo elektrodas sudalintas į 6 lygias dalis:
 (a) amplitudinės dažninės charakteristikos; (b) virpesių formos ties 90,80 kHz

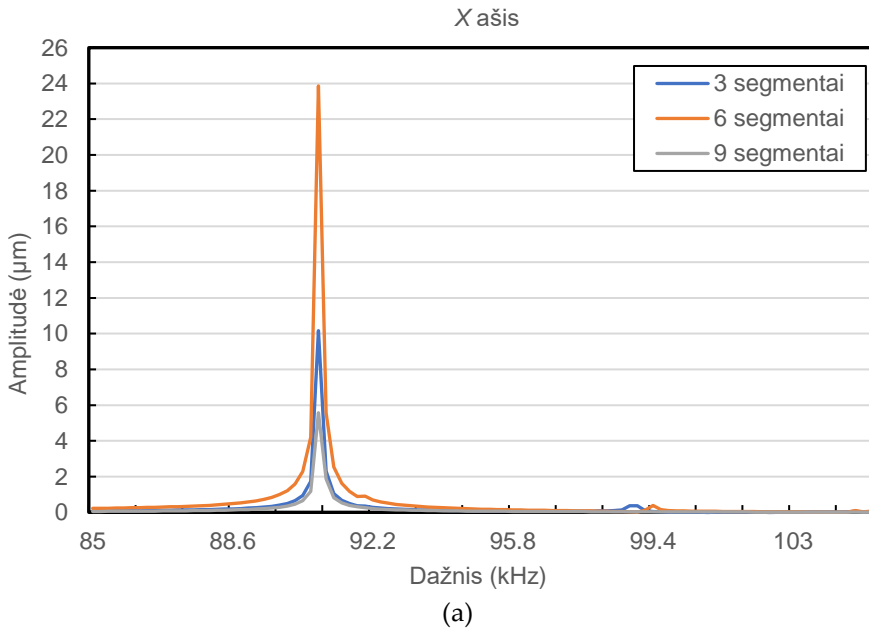


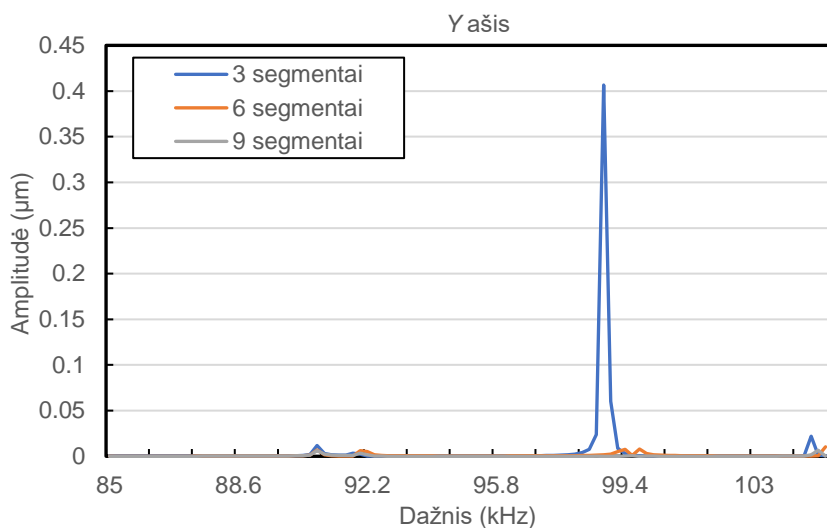
(a)



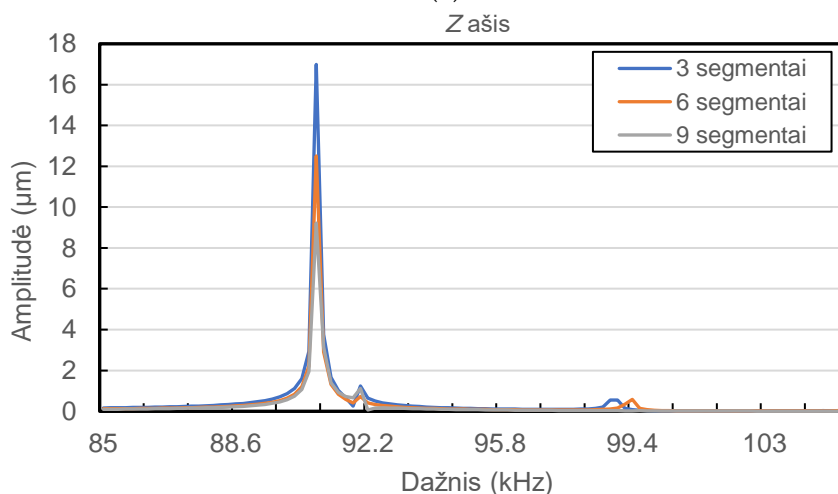
2.7 pav. Harmoninio žadinimo analizė, kai signalo elektrodas sudalintas į 9 lygias dalis:
 (a) amplitudinės dažninės charakteristikos; (b) virpesių formos ties 90,80 kHz

Apibendrinant gautus rezultatus iš dažninių–amplitudinių charakteristikų, kai žadinimo elektrodas sudalintas į: 3, 6 ir 9 lygias dalis, galima sudaryti poslinkių palyginimų grafikus, kuriuose pavaizduotas amplitudės kitimas, kintant sudalinimo tipui. Skirtingų ašių rezultatai pateikti 2.8 pav.





(b)



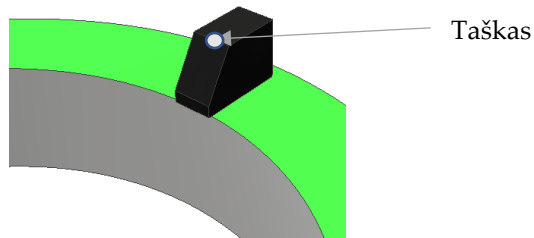
(c)

2.8 pav. Apibendrinti amplitudinės dažninės charakteristikos rezultatai, nagrinėjant sudalinimo įtaką amplitudės dydžiui: (a) poslinkių amplitudė X (skersine) kryptimi, rezonanso dažnis 90,8 kHz; (b) poslinkių amplitudė Y kryptimi, rezonanso dažnis 99,2 kHz; (c) poslinkių amplitudė Z (ašine) kryptimi, rezonanso dažnis 90,8 kHz

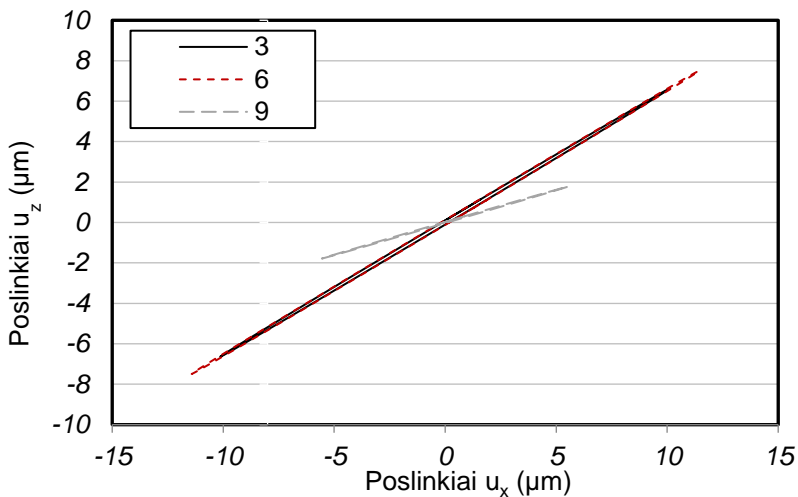
Šiuose grafikuose vaizduojama virpesių amplitudės priklausomybė. Galima pastebėti, kad didžiausios amplitudės yra pasiekiamos skersine (X) bei ašine (Z) kryptimis. Poslinkiai šiomis ašimis yra reikalingi sferos sukimui. Didžiausi poslinkiai yra ašine kryptimi, jie siekia 23,9 μm ir pasiekiami tuo metu, kai elektrodas yra sudalintas į šešias lygias dalis. Šis poslinkis yra apie 2,5 karto didesnis nei tuo atveju, kai elektrodas yra sudalintas į tris lygias dalis, bei beveik šešis kartus didesnis nei tada, kai jis sudalintas į devynias dalis. Didžiausi poslinkiai ašine kryptimis yra lygūs

17,1 μm , o elektrodas yra sudalintas į tris dalis. Šis rezultatas yra apie 25 % didesnis nei tuo atveju, kai elektrodas yra sudalintas į šešias dalis ir 50 % didesnis nei tuo atveju, kai elektrodas sudalintas į devynias dalis. Poslinkiai Y ašimi yra žymiai mažesni, lyginant su rezultatais skersineskersine bei ašine kryptimis. Šis dydis siekia 0,41 μm . Rezonanso Rezonanso Rezonanso dažnis, kai pasiekiami didžiausi poslinkiai ašine ir skersineskersine kryptimis, yra 90,80 kHz. Tik Y ašimi rezonansorezonansorezonanso dažnis pasislenka iki 99,2 kHz.

Analizuojant gautus rezultatus, atlikta kontaktinės vietos (taško), kuris yra ant kontaktinės atramos ir turi frikcinę kontaktinę sąveiką su sferiniu rotoriumi, judėjimo trajektorijos skaičiavimai. Šis kontaktinis taškas pavaizduotas 2.9 pav. Taško judėjimo trajektorijos, esant skirtingiems žadinimo elektrodo sudalinimams, pateiktos 2.10 pav.



2.9 pav. Kontaktinio taško vieta



2.10 pav. Kontaktinio taško judėjimo trajektorijos, žadinant rezonansiniu dažniu (90,8 kHz), kai elektrodas sudalintas į 3, 6 ir 9 pjesegmentus

Iš 2.10 pav. pavaizduoto grafiko matyti, kad kontaktinio taško poslinkio trajektorija yra elipsinė. Tokia trajektorija reikalinga tam, kad sfera būtų kryptingai sukama. Taip pat ši analizė patvirtina, kad tokio tipo pavara gali būti naudojama sferos sukimui. Elipsės pagrindinės ašies ilgis yra didžiausias tuomet, kai elektrodas yra sudalintas į 6 segmentus, t. y. sudalintų elektrodų lanko kampas lygus 60° . Likusiųjų ašių ilgiai yra apibendrinti ir pavaizduoti 2.2 lentelėje.

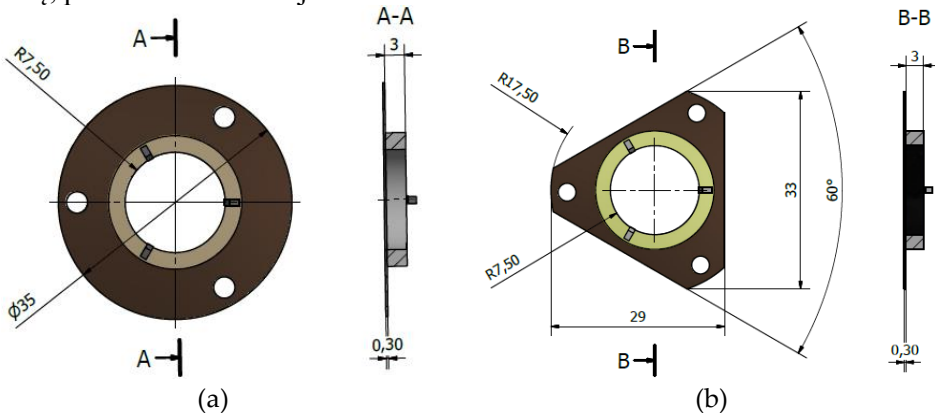
2.2 lentelė. Judėjimo trajektorijos elipse ašių ilgiai pagal elektrodo sudalinimą

Ašys	3 segmentai, (μm)	6 segmentai, (μm)	9 segmentai, (μm)
Pagrindinė $U_{(xz)}$	24,24	27,31	11,66
Mažoji $U_{(xz)}$	12,605	13,63	12,64

2.3.2. Pjezoelektrinio keitiklio su skirtinga jungės geometrija analizė

Siekiant išdirbti racionalesnę pavaros konstrukciją, sumažinant pačios pavaros dydį, svorį ir kartu energijos sąnaudas, tam, kad pavara būtų efektyvi ir galėtų būti naudojama mažuose palydovuose, keitiklio konstrukcija modifikuota performuojant jį į unimorfinį vykdiklį. Šiuo atveju pjezoelektrinis keitiklis buvo priklijuotas prie plonos bronzinės jungės. Ši tampri bronzinė jungė gali būti naudojama kaip tvirtinimo elementas sistemoje, ir ji sukuria tamprią įvaržą rotoriumi. Jungė turi būti simetriška su mažu kampų skaičiumi, nes kitu atveju, jei kampų skaičius padidėtų, atsirastų energijos nuostoliai bei sumažėtų poslinkių amplitudės. Todėl toliau bus nagrinėjamos dvi galimos konstrukcijos: kai jungė neturi nė vieno kampo (diskas); kai turi tris kampus, kurių viršūnėse yra trys tvirtinimo kiaurymės, skirtos sujungti abu unimorfinius vykdiklius vieną su kitu, tarp jų patalpinant sferinį rotorių, ir pritvirtinti pavarą sistemoje.

Kaip ir 2.3.1 poskyryje nagrinėjamos konstrukcijos atveju, taip ir dabar, atliekant kompiuterinę analizę, BE modelis buvo supaprastintas, paliekant tik esminius komponentus: jungę, keitiklį bei kontaktines atramas. Jungių geometrija ir dydžiai pateikti 2.11 pav. Medžiagos, kurios buvo naudojamos atliekant kompiuterinę analizę, pateiktos 2.3 lentelėje.

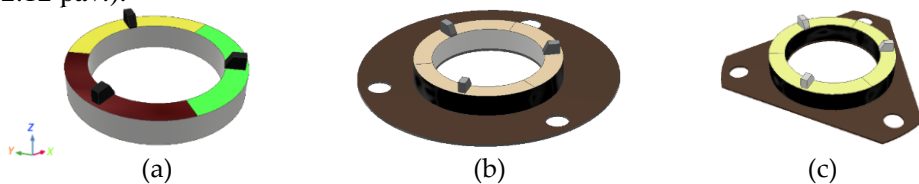


2.11 pav. Vykdiklio geometrija su skirtingomis jungėmis: (a) vykdiklis su disko formos jungė; (b) vykdiklis su trikampė jungė

2.3 lentelė. Medžiagų savybės bei elementų matmenys [80]

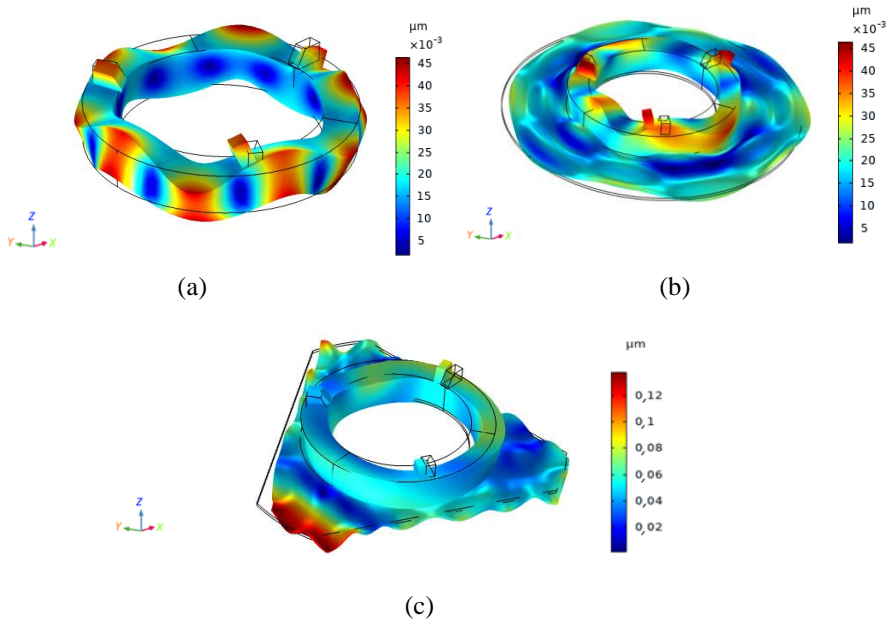
Savybė	Mat. vnt.	Keitiklis	Jungė	Kontaktinė atrama
Medžiaga	–	PZT-4	Fosforinė bronz C52100	Aliuminio oksidas (Al ₂ O ₃)
Tankis	kg/m ³	7500	8800	3950
Matmenys	mm	IS – 20; VS – 15; T – 3	IS – 35; VS – 34; T – 0,3	W – 1; L – 2,2; H – 1,5
Puasono koef.	–	0,31	0,34	0,21
Jungo modulis	GPa	63	110	215
Dielektrinė skvarba, 10 ³	F/m	$\epsilon_{11} = 1,48,$ $\epsilon_{22} = 1,48,$ $\epsilon_{33} = 1,3$	–	–
Pjezoelektrinių koeficientų matrica, 10 ⁻¹²	C/N	$d_{31} = -123,$ $d_{32} = -123,$ $d_{33} = 289,$ $d_{24} = 496,$ $d_{15} = 496$	–	–
Tamprumo matrica, 10 ⁻¹²	m ² /N	$c_{11} = 12,3, c_{21} = -$ $4,05, c_{31} = -5,31,$ $c_{22} = 12,3, c_{32} = -$ $5,31, c_{33} = 15,5,$ $c_{44} = 39, c_{55} = 39,$ $c_{66} = 32,7$	–	–

Kaip ir 2.3.1 poskyrio atveju, taip ir šiuo – analizės procesas sudarytas iš dviejų etapų: atliekant tikrųjų dažnių bei formų analizę ir remiantis gautais rezultatais, atliekami amplitudės dažnių charakteristikų skaitiniai tyrimai. Šiuo atveju nagrinėjamos trys konfigūracijos: pjezoelektrinis keitiklis be jungės, pjezoelektrinis keitiklis su disko formos jungė bei pjezoelektrinis keitiklis su trikampėje jungė (2.12 pav.).



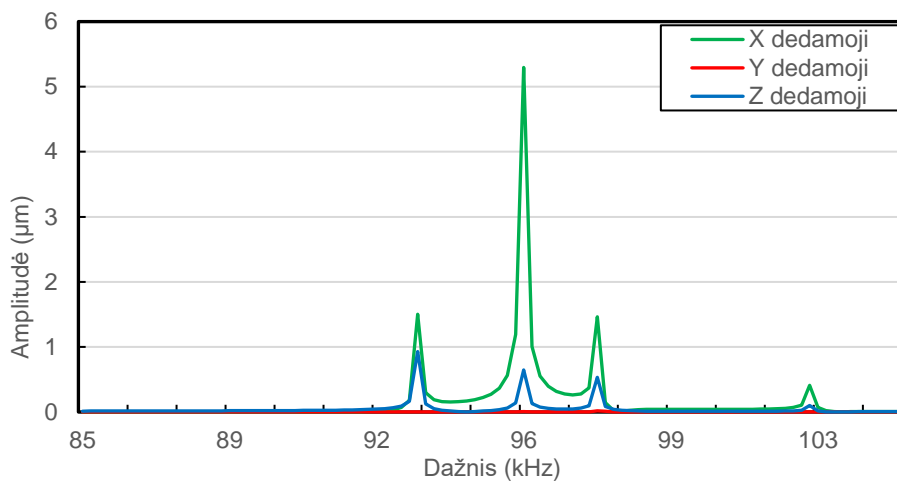
2.12 pav. Skaitmeniniai pavaros modeliai, naudoti atliekant analizę: (a) pjezoelektrinis keitiklis; (b) pjezoelektrinis keitiklis su disko formos jungė; (c) pjezoelektrinis keitiklis su trikampėje jungė

Atliekant tikrųjų dažnių ir formų tyrimus, pasirinktas virpesių dažnių režis nuo 50 kHz iki 110 kHz. Šių tyrimų metu buvo nustatyta, kad pjezoelektrinio keitiklio tikrinius virpesius skersineskrose bei ašine kryptimis galima pasiekti esant keliems rezonansiniams dažniams. Vienas tokių dažnių yra 93,2 kHz. Keitiklių poslinkiai ir tikrosios pjezoelektrinių keitiklių formos kraštinėse padėtyse pateiktos 2.13 pav.

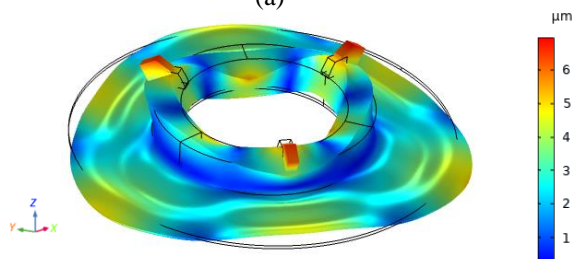


2.13 pav. Pavaros vykdiklio tikrųjų virpesių bei formų kraštinėse padėtyse rezultatai esant rezonansorezonanso dažniams: (a) tik keitiklio (93,2 kHz); (b) vykdiklio su disko formos junge (94,8 kHz); (c) vykdiklio su trikampu junge (95,3 kHz)

Remiantis tikrinių dažnių bei formų tyrimų rezultatais, atlikti amplitudinių dažninių charakteristikų skaitiniai tyrimai. Šiuo atveju, harmoninio žadinimo signalo įtampa 50 V, nagrinėjamas dažnių režis 85–110 kHz. Vienas dažnio žingsnis 50 Hz. Kompiuterinės analizės metu buvo nagrinėjama, koks dažnis reikalingas norint sužadinti vykdiklius taip, kad kontaktinė atrama judėtų elipsine trajektorija. Šios analizės rezultatai parodyti 2.14 ir 2.15 pav. 2.16 pav. pateikti kontaktinės atramos virpesių X , Y ir Z kryptimis amplitudinių–dažninių charakteristikų palyginimai, kaip kinta poslinkių amplitudės esant skirtingoms jungės formoms.

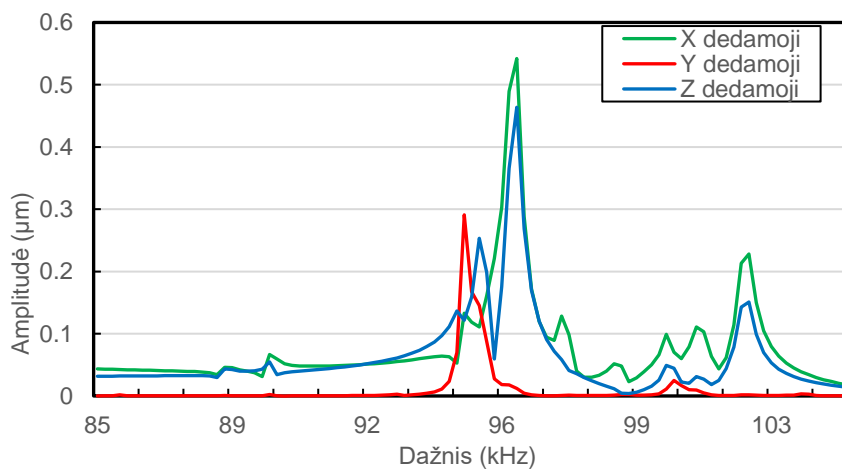


(a)

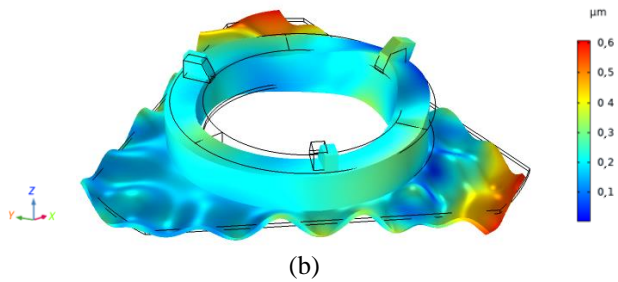


(b)

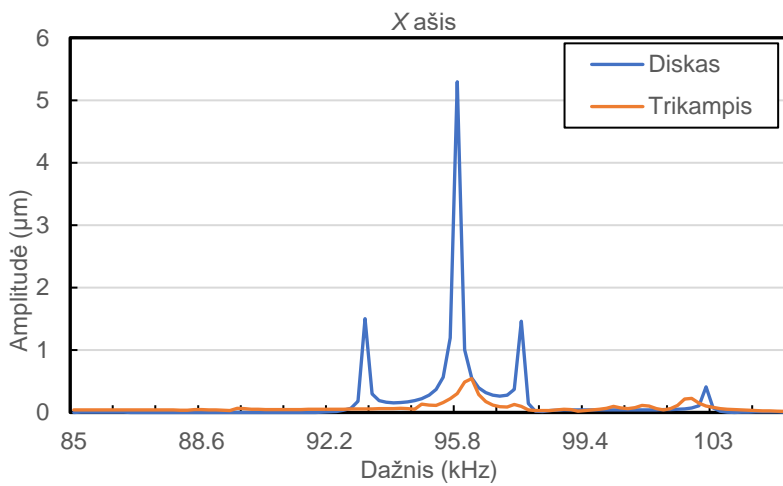
2.14 pav. Atsako į harmoninį žadinimą, kai naudojama disko tipo jungė, rezultatai: (a) amplitudinės dažninės charakteristikos; (b) virpesių modos ties 95,8 kHz



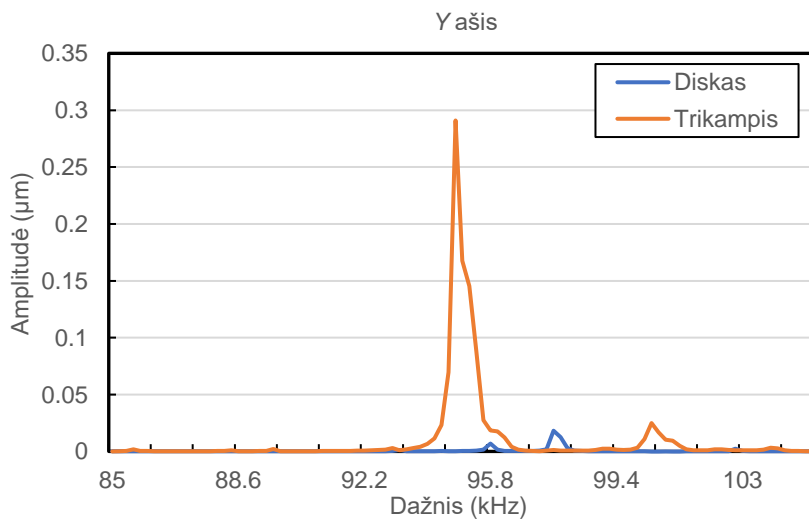
(a)



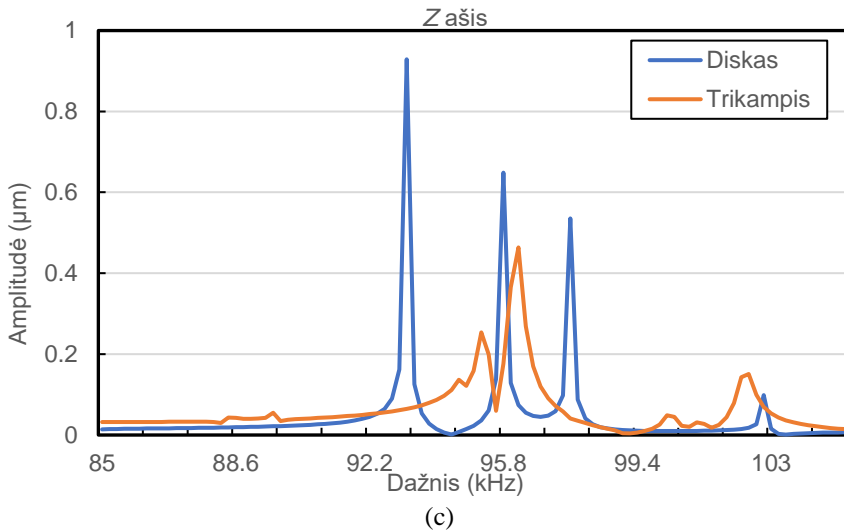
2.15 pav. Atsako į harmoninį žadinimą, kai naudojama trikampė jungė, rezultatai: (a) amplitudinės dažninės charakteristikos; (b) virpesių modos ties 96,2 kHz



(a)



(b)



2.16 pav. Apibendrinti amplitudinės dažninės charakteristikos rezultatai, nagrinėjant jungės formos įtaką poslinkių dydžiui: (a) poslinkių amplitudė X (skersine) kryptimi; (b) poslinkių amplitudė Y kryptimi; (c) poslinkių amplitudė Z (ašine) kryptimi

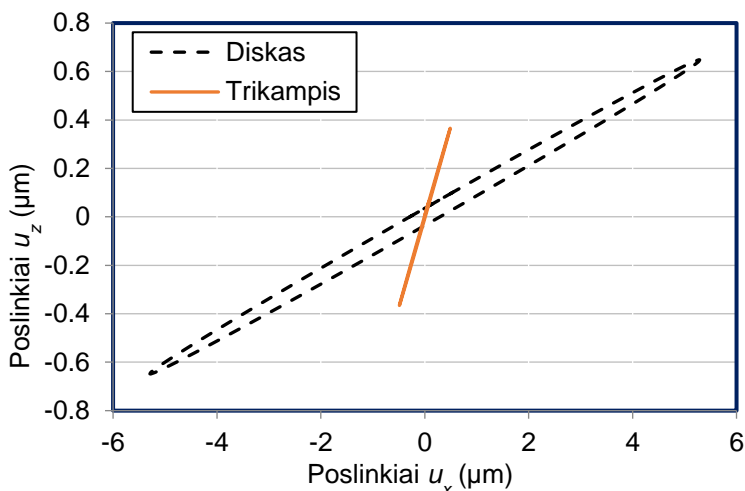
Iš pateiktų grafikų matyti, kad dominuojantys virpesiai sugeneruojami skersine (X) ir ašine (Z) kryptimis, o jungės forma turi didelę įtaką poslinkių amplitudėms. Didesni poslinkiai buvo nustatyti X ašies kryptimi pavara su disko formos jungė. Šis poslinkis siekia $6,2 \mu\text{m}$. Ašiniai poslinkiai Z ašies kryptimi taip pat yra didesni vykdyklyje su disko formos jungė ir lygūs $0,92 \mu\text{m}$. Pažymėtina, kad tuo metu, kai jungė trikampė, virpesių amplitudė yra 2 kartus mažesnė ašine kryptimi ir apie 5 kartus mažesnė skersine kryptimi, lyginant su vykdykliu, turinčiu disko formos jungę. Vykdyklio su disko formos jungė rezonansorezonansorezonanso dažnis $95,8 \text{ kHz}$, o vykdyklio su trikampio formos jungė $96,2 \text{ kHz}$. Poslinkių amplitudės ašine bei skersine kryptimis mažėja, esant aukštesniems rezonanso dažniams. Galima daryti išvadą, kad disko formos jungė yra tinkamesnė, nes keitklio su disko formos jungė poslinkių amplitudės yra didesnės.

Analizuojant šiuos rezultatus galima rasti kontaktinio taško, kuris yra ant kontaktinės atramos, judesio trajektoriją. Šis kontaktinis taškas pavaizduotas 2.9 pav. Taško judesio trajektorijos, esant skirtingoms jungės formoms, pateiktos 2.17 pav.

Iš 2.17 pav. matoma, kad kontaktinis taškas juda elipsine trajektorija. Ši analizė patvirtina, kad tokio tipo pavara gali būti naudojama kryptingam sferos sukimui. Elipsės pagrindinės ašies ilgis yra 8 kartus didesnis tada, kai jungė yra disko formos. Likusiųjų ašių ilgiai yra apibendrinti ir pavaizduoti 2.4 lentelėje.

2.4 lentelė. Judėjimo elipsės ašių ilgiai pagal jungės formą

Jungė	Diskinė	Trikampė
Pagrindinė $U_{(xz)}$	10,7	1,22
Mažoji $U_{(xz)}$	3,42	0,584



2.17 pav. Kontaktinio taško judėjimo trajektorijos, žadinant rezonansiniu dažniu, kai naudojamos disko formos (95,8 kHz) bei trikampio formos (96,2 kHz) jungės

2.4. Skyriaus išvados

Šiame skyriuje atlikti pjezoelektrinės ultragarsinės pavaros keitiklio skaitiniai tyrimai. Remiantis gautais rezultatais, galima daryti tokias išvadas.

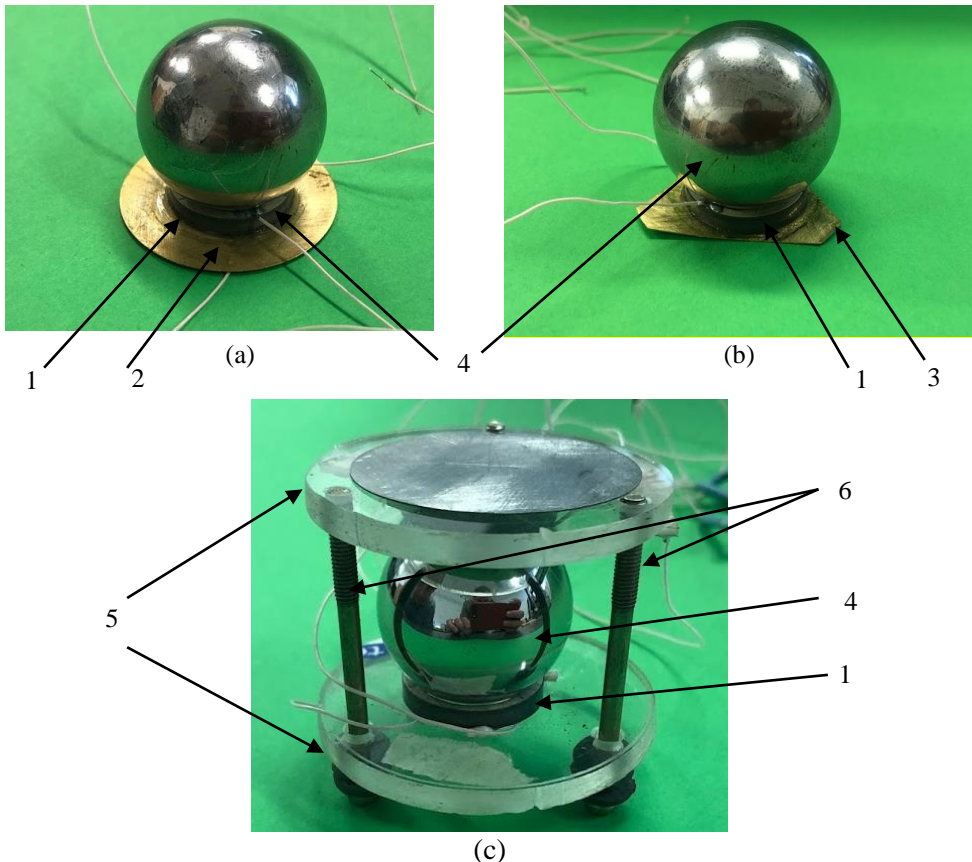
- Sudarytas pjezoelektrinis BE modelis, kuris leidžia išspręsti dinaminę keitiklio judesio lygtį, suskaičiuota, kokios jėgos yra generuojamos, pagal žadinimo signalą, nustatytos poslinkio amplitudžių dydžių reikšmės bei suskaičiuotos taško, esančio ant kontaktinės atramos, poslinkio koordinatės.
- Tikrųjų dažnių bei formų ir amplitudės dažninių charakteristikų skaitiniai tyrimai rodo, kad, atsižvelgiant į pasirinktą keitiklio elektrodų sudalinimo konfigūraciją bei jungės geometriją, šios pjezoelektrinės pavaros rezonansiniai darbiniai dažniai yra 90–96 kHz režyje. Tuo metu yra užtikrinamas veiksmingiausias sferinio rotoriaus sukamasis darbo režimas.
- Analizė parodė, kad žadinimo elektrodo sudalinimas turi įtakos poslinkių amplitudei. Didžiausios poslinkių amplitudės yra pasiekiamos tada, kai žiedo formos keitiklio elektrodas yra sudalintas į 6 lygius segmentus.
- Unimorfinio vykdiklio jungės formos įtakos dinaminiam atsakui skaičiavimai atskleidė, kad didesnius poslinkius vykdiklis pasiekia tada, kai jungė yra disko formos.
- Tyrimais nustatyta, kad dažnių juostoje nuo 90 kHz iki 96 kHz maksimalūs kontaktinių atramų poslinkiai vykdiklio rezonansinių virpesių režimu formuoja elipsės formos trajektoriją, o tai atitinkamai užtikrina tolygų ir kryptingą sferinio rotoriaus sukamąjį judesį.

3. EKSPERIMENTINIS PJEZOELEKTRINĖS ULTRAGARSINĖS PAVAROS TYRIMAS

Šiame skyriuje aprašomi pjezoelektrinės ultragarsinės pavaros eksperimentai, kuriuose yra pateikiami šie pavaros modifikacijų tyrimai: nustatytos pjezoelektrinės pavaros dinaminės charakteristikos, atlikti pjezoelektrinio keitiklio bei vykdiklių kontaktinių zonų virpesių tyrimai, išmatuota sferinio rotoriaus kampinio poslinkio skiriamoji geba.

Siekiant verifikuoti teorinių tyrimų rezultatus buvo pagaminti pjezoelektrinio keitiklio bei vykdiklių eksperimentiniai maketai, juos matote 3.1 pav., *a* ir *b*. 3.1 pav., *c* pavaizduota pjezoelektrinė ultragarsinė pavara, kurios sandara buvo smulkiai aprašyta 2 skyriuje.

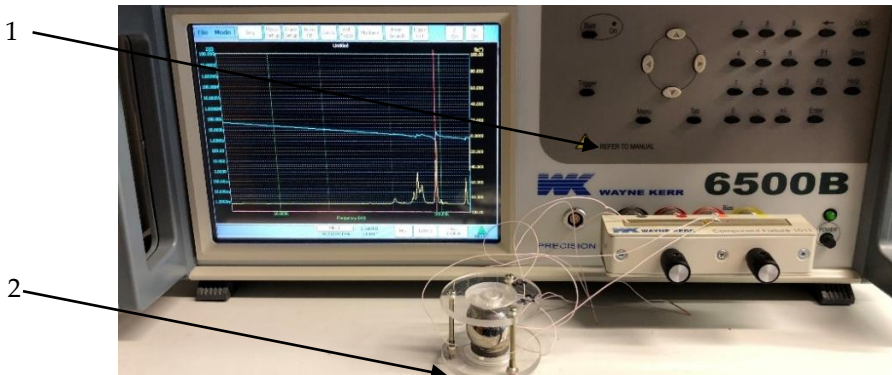
Šie pavarų maketai buvo suprojektuoti ir tirti atliekant pavaros teorinius skaičiavimus. Elementų geometrija, medžiagos atitinka skaitiniuose tyrimuose analizuotus konstrukcinius modelius.



3.1 pav. Pagamintų pjezoelektrinių pavarų maketai: (a) vykdiklis su diskine jungė; (b) vykdiklis su trikampė jungė; (c) surinkta pavara; 1 – žiedinis keitiklis; 2 – diskinė jungė; 3 – trikampė jungė; 4 – sferinis rotorius; 5 – tvirtinimo diskai; 6 – smeigė

3.1. Pjezoelektrinių keitiklių elektrinio impedanso matavimas

Siekiant įvertinti ir patikrinti teorinių tyrimų rezultatus, susijusius su galimais pjezoelektrinės ultragarsinės pavaros rezonansiniais dažniais ir virpesių formomis, buvo atlikta pjezoelektrinių keitiklių impedanso analizė. Šiai analizei atlikti buvo naudojamas impedanso matavimo prietaisas (*Wayne Kerr 6500B*, 3.2 pav.).

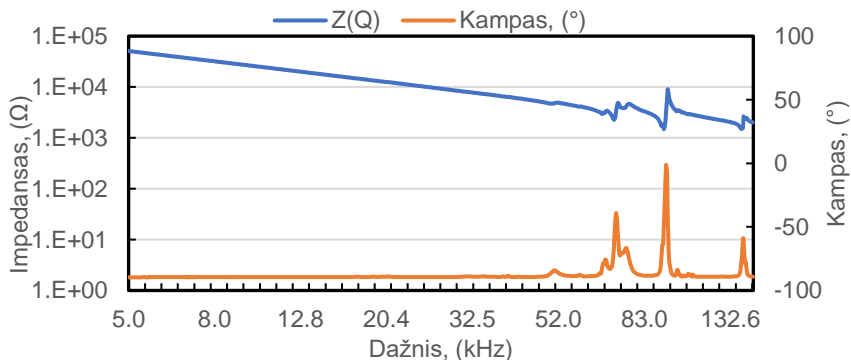


3.2 pav. Impedanso matavimo įranga: 1 – *Wayne Kerr 6500B* impedanso analizatorius; 2 – pjezoelektrinė pavara su sferiniu rotoriumi

Matavimai buvo atliekami nagrinėjant įvairius atvejus:

- pavara surinkta;
- žadinami skirtingai sudalinti keitikliai;
- pavaroje naudojama diskinė jungė;
- pavaroje naudojama trikampė jungė.

Surinktos pavaros atveju rezonansiniai viršutinio bei apatinio pjezoelektrinių keitiklių virpesiai buvo žadinami jų valdymo elektrodus sujungiant lygiagrečiai. Matavimų rezultatai pateikti 3.3 pav. Kaip galima pastebėti, egzistuoja trys rezonanso dažniai, kuriuose keičiasi varžos ($Z(Q)$) bei fazinio kampo (θ_z) reikšmės. Didžiausias pokytis nustatytas dažnių rėžyje nuo 90 kHz iki 100 kHz.



3.3 pav. Impedanso ir fazinio kampo matavimų rezultatai, matuojant pjezoelektrinių keitiklių savybes, kai MPP yra surinkta ir keitiklio sudalinimas yra 3 lygios dalys

Matuojant skirtingų žadinimo elektrodų sudalinimo variantus, buvo nagrinėjama keitiklio elgsena, kai keitiklio elektrodas yra sudalinamas į skirtingą segmentų skaičių: 3, 6 ir 9. Matavimų rezultatai pateikti 3.4 pav. Grafikuose matyti, kad didėjant segmentų skaičiui didėja impedanso ($Z(Q)$) reikšmės, kai pjezoelektrinis keitiklis veikia rezonansiniu režimu. Šis dydis didėja: nuo ~260 k Ω (3 segmentai), ~390 k Ω (6 segmentai), iki ~580 k Ω (9 segmentai). Fazinio kampo (θ_z) kitimas, didėjant segmentų skaičiui atitinkamai keičiasi: nuo 52° (3 segmentai), 32° (6 segmentai) iki 27° (9 segmentai). Keitikliui veikiant darbinio rezonansiniu režimu, virpesių dažnis kinta 92—95 kHz intervale.

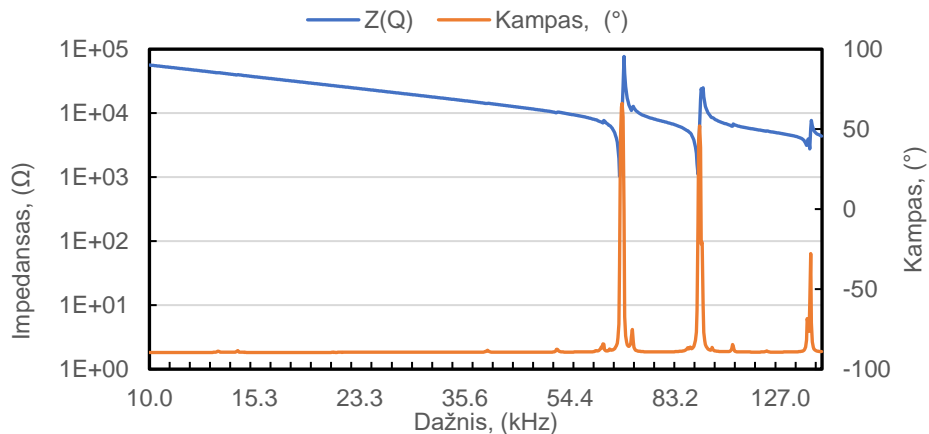
Impedanso matavimai rodo, kad keitiklio elektrodų sudalinimas mažai keičia vykdiklio rezonansinį dažnį, tačiau turi didelės įtakos jo elektriniam talpiui. Galima daryti išvadą, kad racionaliausia dalinti į 6 dalis, nes tokio keitiklio elektrinė talpa yra mažesnė ir energetiškai tokia pavara yra efektyvesnė. Atitinkamai pateikiami elektrinės talpos matavimų rezultatai, kai elektrodas yra:

- nesudalintas – 0,9 nF;
- 3 segmentai – 0,34 nF;
- 6 segmentai – 0,15 nF;
- 9 segmentai – 0,1 nF.

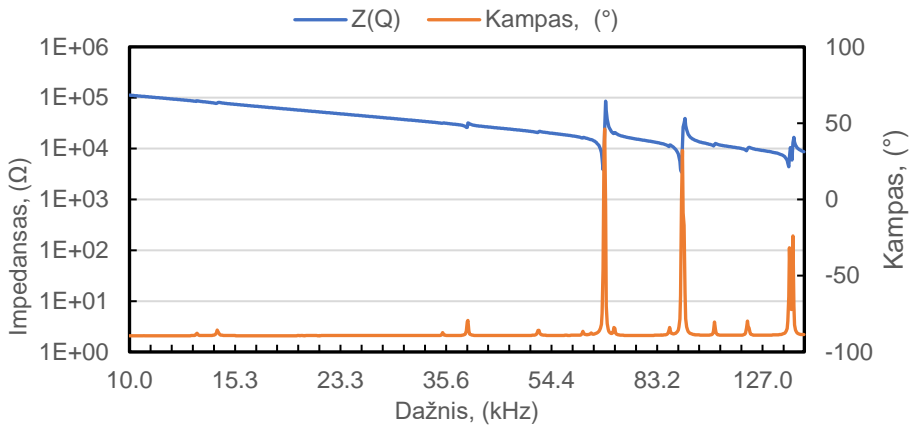
Kaip matoma iš pateiktų rezultatų, tuo atveju, kai keitiklio valdymo elektrodas yra sudalintas į 6 dalis, lyginant su dalinimu į 3 dalis, galima dvigubai sumažinti energijos poreikį pjezoelektrinės pavaros valdymui, nes pagal 3.1 formulę mažesnė elektrinė talpa sąlygoja ir mažesnę srovę:

$$I_{\max} = f \times \pi \times C \times V_{pp}; \quad (3.1)$$

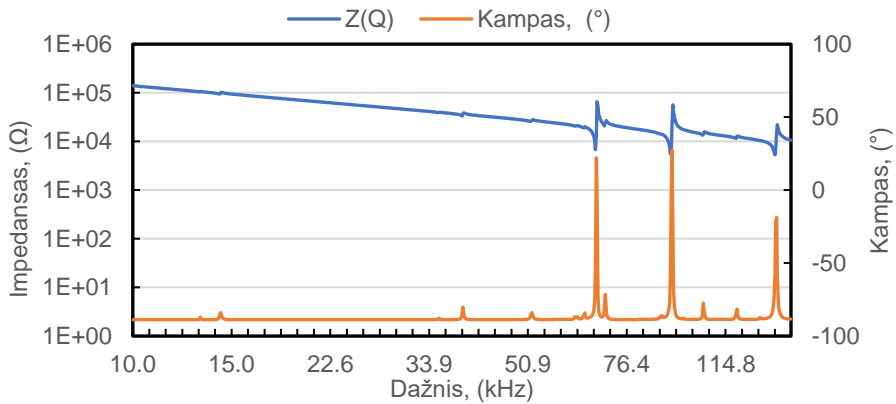
čia: I_{\max} – reikalinga srovė; f – darbinis dažnis; C – segmento talpis; V_{pp} – dvigubos amplitudės įtampa, generuojama valdiklyje.



(a)



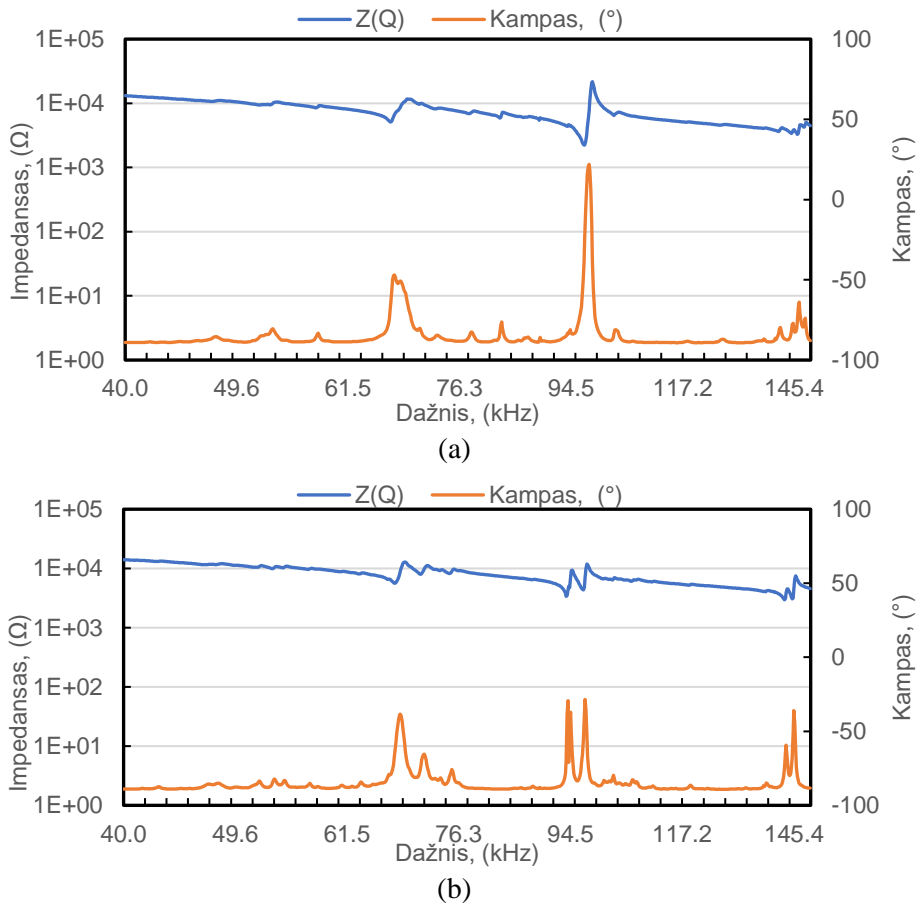
(b)



(c)

3.4 pav. Keitiklio impedanso matavimų rezultatai, kai žadinimo elektrodas yra sudalintas į: a) 3 pjezosegmentus; b) 6 pjezosegmentus; c) 9 pjezosegmentus

Tolesni impedanso matavimai buvo atlikti matuojant keitiklius su skirtingos formos jungėmis. Iš matavimų rezultatų (3.5 pav.) galima pastebėti, kad vykdiklio su trikampė jungė impedanso kokybė yra mažesnė nei vykdiklio su diskine jungė. Šių matavimų rezultatai: impedanso ($Z(Q)$) reikšmės, kai pjezoelektrinis keitiklis veikia rezonansiniu režimu: $\sim 190 \text{ k}\Omega$ (vykdiklis su diskine jungė), $\sim 104 \text{ k}\Omega$ (vykdiklis su trikampė jungė). Fazinio kampo (θ_z) kitimas pagal jungės geometriją: 18° (vykdiklis su diskine jungė), 28° (vykdiklis su trikampė jungė). Vykdikliams veikiant darbinium rezonansiniu režimu, virpesių darbinis dažnis: $\sim 96 \text{ kHz}$ (diskinė jungė) ir $\sim 94 \text{ kHz}$ (trikampė jungė).



3.5 pav. Impedanso matavimų rezultatai, kai matuotas: a) vykdiklis su diskine jungė; b) vykdiklis su trikampio formos jungė

Apibendrinant galima pasakyti, kad tiriamų keitiklių elektrinio impedanso matavimai rodo, jog pavaros darbinis rezonanso dažnis varijuoja 90–100 kHz intervale. Skirtumas tarp skaitiniuose tyrimuose gautų rezultatų ir impedanso analizatoriaus atliktų matavimų siekia: ~1 % (keitikliui), ~1,1 % (vykdikliui su diskine jungė), ~1,2 % (vykdikliui su trikampio formos jungė). Skirtumus galima paaiškinti tuo, kad gaminant pavarų maketus atskirų elementų medžiagų charakteristikos nebūtinai visai sutampa su naudotomis skaičiavimams. Nepaisant visų skirtumų ir atsižvelgiant į darbinį dažnių intervalų panašumą galima teigti, kad nustatytas darbinio dažnio intervalas yra tinkamas pavaros darbui. Taip pat pažymėtina, kad BEM skaičiavimų metu nustatytos konkrečios teorinio modelio darbinio dažnio reikšmės, kurios patenka į impedanso rezultatų intervalus. Taip pat pabrėžtina, kad keitiklio su skirtingu elektrodų sudalinimu talpa skiriasi žymiai – sudalinto į 3 segmentus ir sudalinto į 9 segmentus elektrinės talpos reikšmė skiriasi 3 kartus ir yra proporcinga elektrodo plotui.

3.2. Rezonanso dažnių ir virpesių formų tyrimas

Siekiant įvertinti, ar nustatytos pavaros darbinio dažnio vertės yra teisingos bei siekiant išplėsti pagrindinių dinaminių savybių, susijusių su tiriamu pjezoelektriniu ultragarsiniu vykdikliu supratimą, būtina atlikti teorinių tikrųjų dažnių bei formų ir amplitudės dažninių charakteristikų skaitinių rezultatų patikrinimą.

Šiuose tyrimuose taikyta trimatė lazerinio skenavimo technika, kurios veikimas pagrįstas lazerine Doplerio vibrometrija (LDV). Šis metodas yra vienas iš neardomųjų bandymų metodų, taikomų objekto paviršiaus judesio charakteristikoms (greičiui bei poslinkiui) tirti. Šio matavimo būdo principas yra pagrįstas šviesos interferencija bei Doplerio efektu.

Tyrimuose naudojamo skenuojančio vibrometro *Polytec PSV-500-3D-HV* specifikacijos pateiktos 3.1 lentelėje [81].

3.1 lentelė. Skenuojančio vibrometro *Polytec PSV-500-3D-HV* specifikacijos

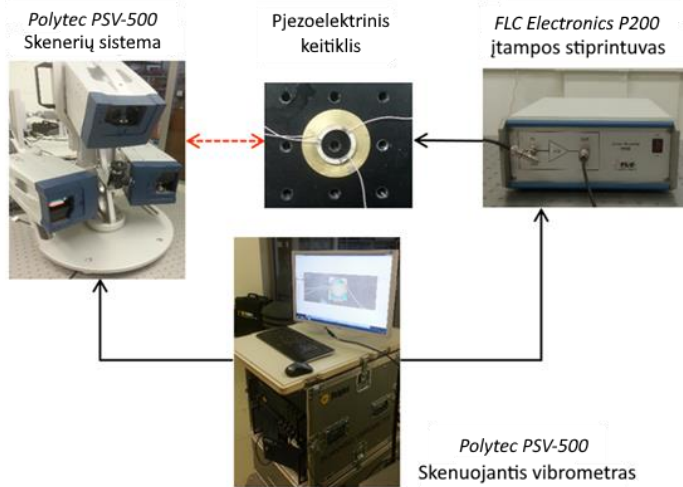
PSV-500	
Matmenys [PxIxA]	189 mm × 370 mm × 177 mm
Masė	9 kg
Lazeris	HeNe, bangos ilgis 670 nm (raudonas), galia <1 mW
Darbinis atstumas	125 mm–100 m
Skenavimo kampas[VxH]	50° × 40°
Skenavimo raiška	Kampinė skyra <0,002°, kampinis stabilumas <0,001°/h,
Taško skyra	2 mm ² –2 m ²
Kamera	HD, 20x optinis priartinimas, maks. kampas [HxV]55° x

Šiame tyrime naudojama eksperimentinė įranga pateikta 3.6 pav. Sistemos centre yra trimačio skenavimo LDV sistema „Polytec PSV-500-3D-HV“ su PSV 9.2 programine įranga. Norint tinkamai palyginti su BEM modeliavimo rezultatais, pjezoelektrinis ultragarsinis vykdiklis buvo išimtas iš pjezoelektrinės pavaros. Vykdiklis matavimų metu buvo nejudamai pritvirtintas, naudojant viskoelastinę dvipusę lipnią juostą, prie masyvios plieninės plokštės. Šiuo tvirtinimo būdu stengiamasi izoliuoti pjezoelektrinį keitiklį nuo plieninės plokštės, siekiant išvengti slopinimo, kuris gali atsirasti nuo tampraus pjezokeitiklio ir plieninės plokštės sujungimo. Atlikti pjezoelektrinio keitiklio, suklijuoto su diskine jungė bei pjezoelektrinio keitiklio suklijuoto su trikampė jungė matavimai. Elementų rezonansiniai dažniai buvo nagrinėjami 50–110 kHz intervale.

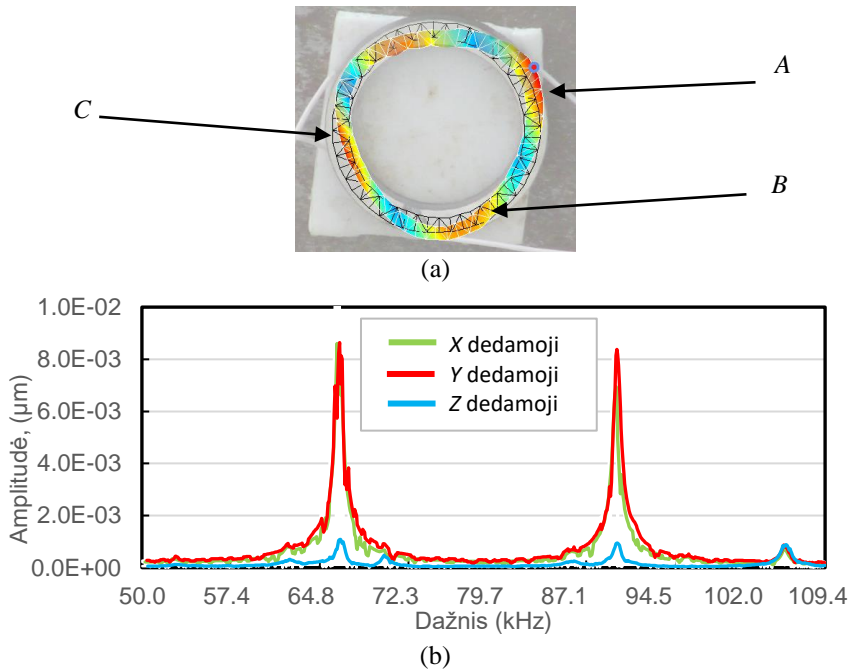
3.7 pav. pavaizduoti skenavimo rezultatai, kai pjezoelektrinis keitiklis yra „minkštai“ (su viskoelastine dvipuse lipnia plėvele) priklijuotas prie plieninės plokštės. Atlikus matavimus nustatyta, kad pjezoelektrinis keitiklis turi du ryškiai išreikštus rezonansinius dažnius: ties 61 kHz ir ties 92,8 kHz.

3.8 pav. parodyti matavimo rezultatai, kai pjezoelektrinis vykdiklis yra standžiai priklijuotas prie disko formos jungės, siekiant suformuoti unimorfinį vykdiklį. Šiuo atveju vykdiklio rezonanso dažniai buvo pasiekti ties 64,8 kHz bei 93,72 kHz.

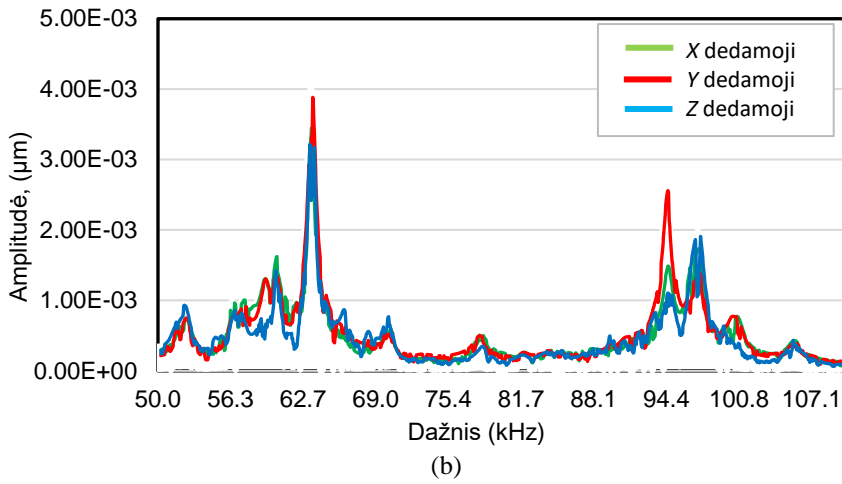
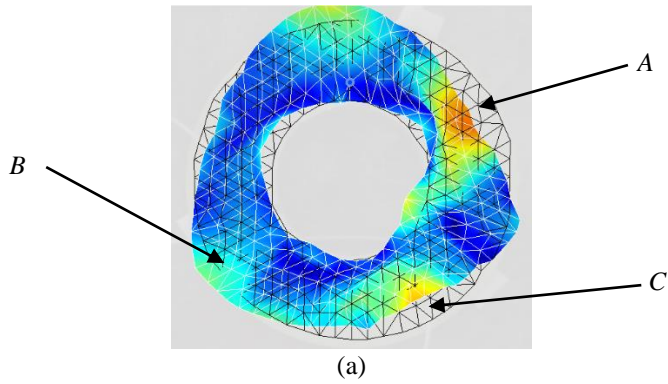
3.9 pav. pateikti matavimo rezultatai, kai pjezoelektrinis vykdiklis yra standžiai priklijuotas prie trikampės jungės. Vykdiklio rezonanso dažniai buvo pasiekti ties 65,8 kHz ir 94,4 kHz.



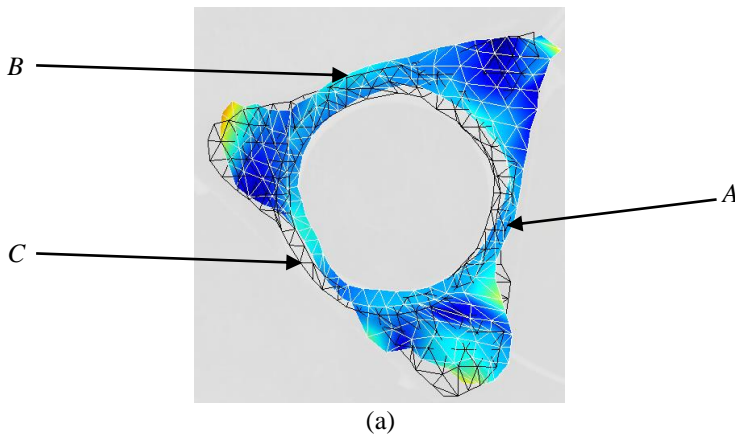
3.6 pav. Pjezoelektrinių keitiklių poslinkio matavimų trimatėje erdvėje įranga

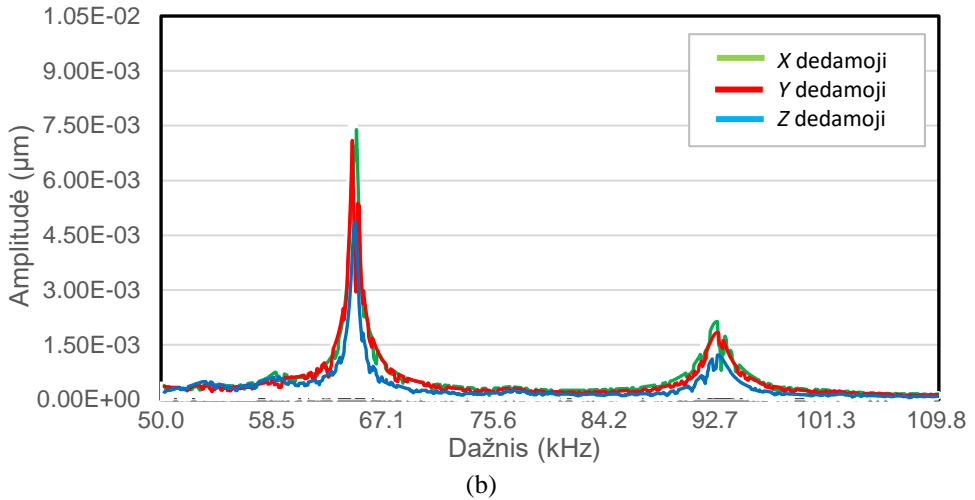


3.7 pav. Išmatuotos pjezoelektrinio keitiklio, su viskoelastine dvipuse lipnia juosta priklijuoto prie plieninės plokštės, virpesių formos kraštinėse padėtyse: a) keitiklio poslinkiai ir forma, žadinant 92,48 kHz harmoniniu elektriniu signalu; b) poslinkio amplitudės ir dažnio priklausomybės grafikas, rezonansiniai virpesiai esant 61 kHz ir 92,48 kHz dažniams



3.8 pav. Išmatuotos pjezoelektrinio vykdiklio su diskine jungė virpesių formos kraštinėse padėtyse: a) vykdiklio deformacijos ir forma, žadinant 94,4 kHz harmoniniu elektriniu signalu; b) poslinkio amplitudės ir dažnio priklausomybės grafikas, rezonansiniai virpesiai esant 65,8 kHz ir 94,4 kHz dažniams





3.9 pav. Išmatuotos pjezoelektrinio vykdiklio su trikampyje jungė virpesių formos kraštinėse padėtyse: a) vykdiklio deformacijos ir forma, žadinant 93,72 kHz harmoniniu elektriniu signalu; b) poslinkio amplitudės ir dažnio priklausomybės grafikas, rezonansiniai virpesiai esant 64,8 kHz ir 93,72 kHz dažniams

3.7–3.9 pav., *a* dalyse pavaizduoti paviršių poslinkiai ir vykdiklių virpesių formos, kai elementas sužadintas darbinio dažniu. Yra trys zonos (*A*, *B*, *C*), kuriose poslinkiai pasiekia maksimalias vertes; šios zonos atitinka faktines kontaktinių zonų vietas. Remiantis anksčiau aprašytais impedanso matavimo rezultatais, darbinio rezonanso dažnių režis yra tarp 90 kHz ir 95 kHz. Šis dažnių režis buvo pasirinktas toks, nes nors esant ~60–65 kHz žadinimui poslinkių amplitudės pasiekiamos didesnės, tačiau pats pavaro darbas yra prasčiau kontroliuojamas: poslinkio kryptis rotoriaus sukimosi metu yra nepastovi, rotoriaus kampinio greičio valdymo stabilumas yra nepatikimas, sukimosi metu rotorius juda netolygiai, atsiranda nedidelis žingsniavimas. Taip pat, esant ~60–65 kHz žadinimui (3.7 pav., *b*), keitiklio tikrosios formos buvo elipsinės, o esant ~92 kHz žadinimui – tikrosios formos panašesnės į trikampį (3.7 pav., *a*). Trikampio formos, kai sferinis rotorius kontaktuoja su keitikliu trijuose taškuose per kontaktines atramas, užtikrina geresnį rotoriaus sukamojo judesio kryptingumą. Todėl, atsižvelgiant į tai, parinktas 90–95 kHz darbinis dažnių intervalas. Taip pat verta paminėti, kad nustatytieji darbiniai virpesių dažniai labai panašūs į pasirinktus BEM modeliuose. Pavaro darbinis dažnių skirtumas tarp skaitinių ir natūrinių eksperimentų yra atitinkamai ~1 % su trikampio formos jungė ir ~3 % su disko formos jungė.

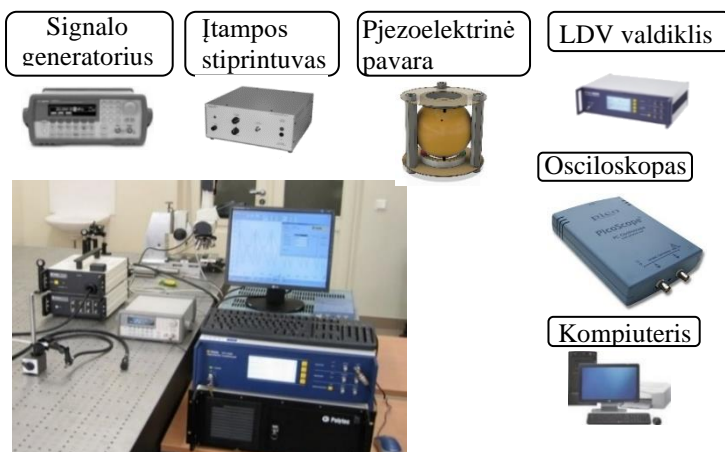
Apibendrinant galima teigti, kad nustatytieji rezonanso dažniai pjezoelektriniuose keitikliuose sukelia tokius virpesius, kurie suteikia tolygų sferinio rotoriaus sukimąsi, o jo kryptis priklauso nuo žadinamo keitiklio elektrodo segmento ar jų tarpusavio sujungimo porų. Remiantis tuo patvirtinama, kad darbiniai dažniai buvo nustatyti teisingai.

3.3. Pjezoelektrinės pavaros skyros matavimai

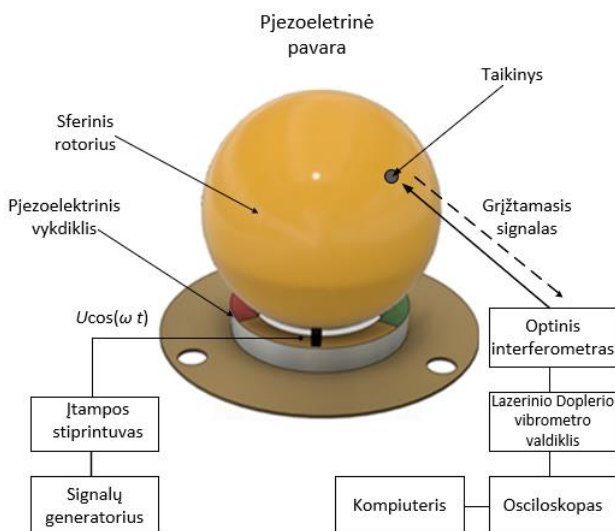
Remiantis apibrėžimais šaltiniuose [82, 83], skyra yra mažiausias įvesties parametro pokytis, kurį galima patikimai nustatyti bei išmatuoti. Pavaros atveju jis apibūdina mažiausią praktiškai sugeneruojamą išėjimo grandies eigos pokytį.

Siekiant sukurti precizinio pozicionavimo pavarą, ji turi tiksliai pasukti ir fiksuoti sferinio rotoriaus padėtį, tad šios pavaros labai svarbi metrologinė charakteristika yra didelė skyra. Šita savybė leidžia itin tiksliai nustatyti sferinio rotoriaus padėtį, ir ji leistų užtikrinti pakankamą sferinio rotoriaus nustatymo tikslumą, reikalingą magnetinio dipolio orientavimui [30, 84].

Siekiant ištirti pavaros skyrą buvo sukomplektuotas eksperimentinis stendas, kuris pateiktas 3.10 pav., o supaprastinta šios įrangos konfigūracijos schema parodyta 3.11 pav. Tyrimas buvo atliktas žadinant pjezoelektrinį keitiklį aukštojo dažnio harmoniniu-paketiniu signalu, kurį formavo signalų generatorius, sustiprinus jį įtampos stiprintuvu. Eksperimentinis stendas buvo padėtas ant guminio pagrindo, siekiant sumažinti aplinkos virpesių įtaką eksperimentų metu. Sferinis rotorius buvo uždėtas ant kontaktinių atramų nenaudojant jokio prispaudimo, išskyrus paties sferinio rotoriaus sunkio jėgą. Sužadinus keitiklį, sferiniam rotoriumi buvo suteiktas kryptingas sukamasis judesys per kontaktines atramas ir atlikti matavimai. Sujungus šiuos komponentus, mažas šviesą gerai atspindintis taikinyš buvo uždėtas ant sferinio rotoriaus paviršiaus. Lazero spindulys buvo nukreiptas į taikinį tokiu būdu, kad būtų galima išmatuoti rotoriaus judesį tangentine kryptimi. Gautas grįžtamasis signalas, rodantis žingsnio poslinkį, buvo perduotas vibrometro valdikliui, o tada apdorotas osciloskopu. Surinkti duomenys buvo išsaugoti, apdoroti ir pateikti grafiniu pavidalu. Po to išvestiniai duomenys gauti įvertinus vibrometro jautrio koeficientą ir paversti rotoriaus kampine poslinkio skyra.



3.10 pav. Eksperimentinių tyrimų įranga, naudota sferinio rotoriaus kampinio poslinkio skyros matavimams: signalų generatorius (*Agilent 33220A*), įtampos stiprintuvas (*EPA-104*); pjezoelektrinė pavana; lazerinis Doplerio vibrometras (*Polytec OFV-5000*); osciloskopas (*PicoScope-3424*); kompiuteris

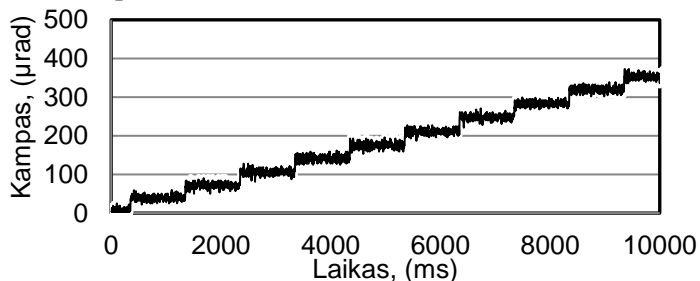


3.11 pav. Matavimų ir įrangos schema, naudota sferinio rotoriaus kampinio poslinkio skyros tyrimams

Matuojant poslinkio skyrą pavara dirbo žingsniniu režimu, kurio metu buvo sugeneruojamas vieno žingsnio rotoriaus kampinis poslinkis. Buvo žadinamas vienas iš pjezosegmentų, kurio elektrinio signalo parametrai tokie:

- žadinimo signalo tipas – harmoninis-paketinis;
- paketų skaičius per sekundę – 1;
- signalo įtampos amplitudė – 60 V;
- signalo dažnis – 92 kHz.

Nustatant pjezoeltrinės pavaros skyrą, reikšmingi du parametrai: 1) harmoninio valdymo signalo periodų skaičius pakete per sekundę; 2) valdymo signalo įtampos amplitudė. Sumažinus bet kurią iš jų (geriausiu atveju abu), stebimas mažiausias rotoriaus poslinkio kampas. Eksperimentiškai nustatyta, kad pavaros maketas, žadinamas harmoniniu-paketiniu signalu, kurio periodų skaičius pakete lygus 20, o įtampos amplitudė – 60 V, generavo sferinio rotoriaus kampinį poslinkį, kurio vidutinė vieno žingsnio (skyros) vertė $30 \mu\text{rad} \pm 1 \mu\text{rad}$. Matavimų rezultatai pavaizduoti 3.12 pav.



3.12 pav. Išmatuotos skyros rezultatai, atliekant kampinį sferos poslinkį

3.2 lentelėje pateikti pozicionavimo tikslumo, kuris priklauso nuo pasirinktos pozicionavimo įrangos, dydžiai [85]. Projektuojamos pavaros tikslumas yra pakankamas tam, kad būtų galima siūlomą pavarą naudoti mažiesiems palydovams.

3.2 lentelė. Pozicionavimo sistemų tikslumas

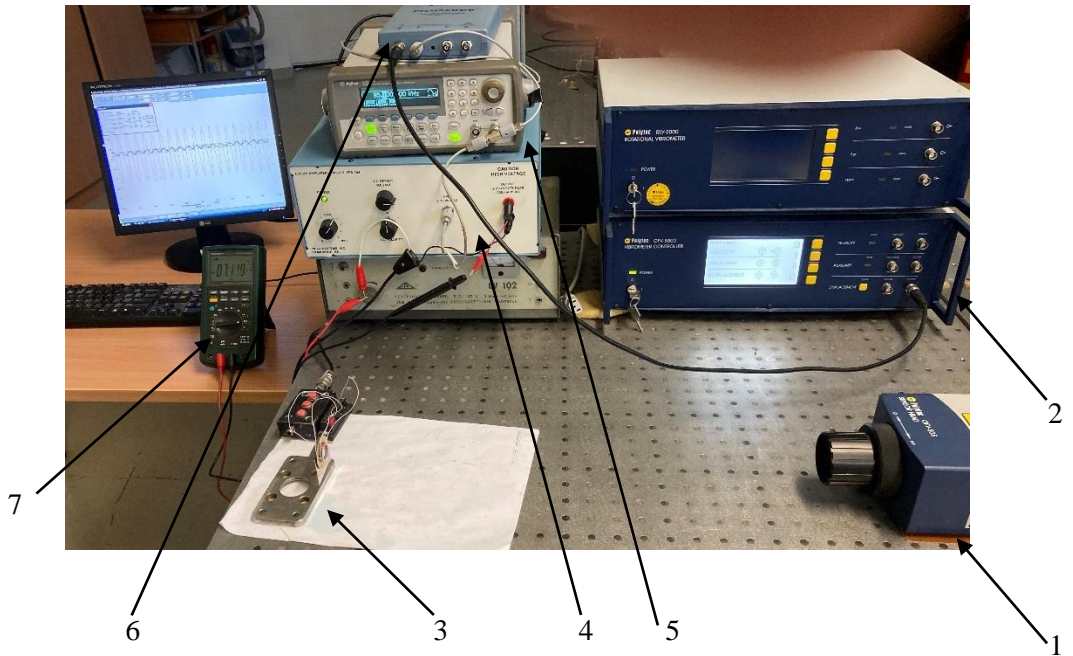
Metodas	Tikslumas, (°)
Sukimosi stabilizavimas	0,1
Gravitacijos gradientas	1–3
Momentiniai reaktyviniai varikliai	0,1
Magnetiniai strypai	1–2
Smagratiniai	0,1
Girokopiniai (su greitai besisukančia mase)	0,01

3.4. Keitiklio vieno aktyvaus taško poslinkių matavimai

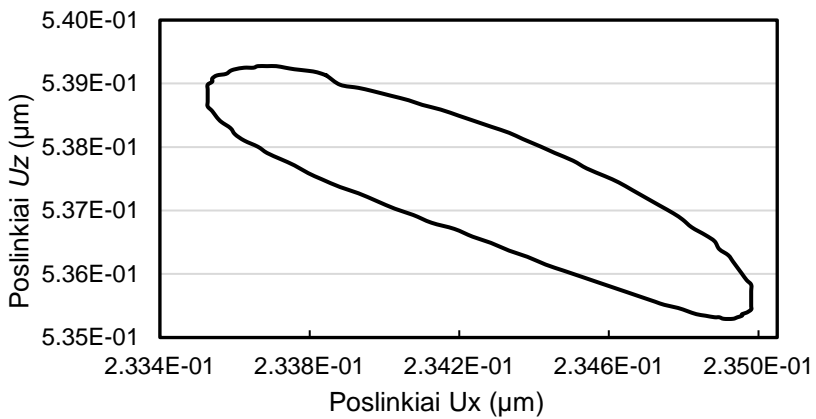
Atlikti eksperimentai siekiant patikrinti vieno aktyvaus kontaktinio taško, kuris yra ant žadinamo pjezoelektrinio keitiklio segmento, erdvinius virpesius. Šių matavimų metu, darbinio dažnio harmoniniu elektriniu signalu žadinamas pjezoelektrinis keitiklis, kuris yra priklijuotas prie jungės, o su skenuojančiu lazeriniu vibrometru matuojama aktyvaus taško virpesių amplitudė skersine bei ašine kryptimis. Matavimų schema ir įranga pateikta 3.13 pav. Matavimai buvo atlikti ant optinio stalo su aktyvia vibroapsauga.

Matavimų metu pjezoelektrinis vykdiklis buvo pastatytas priešais skenuojantį vibrometrą. Iš pradžių buvo matuojami poslinkiai, kai keitiklis žadinamas rezonanso dažniu, ašine kryptimi, o vėliau persukus keitiklį – skersine to paties segmento kryptimi. Gauti matavimų duomenys apdoroti kompiuteriu ir pateikti 3.14 pav. Rezonanso dažnis matuojant keitiklį su disko formos junge – 95,1 kHz ir įtampos amplitudė – 50 V. Rezonanso dažnis matuojant keitiklį su trikampio formos junge – 94,6 kHz. Įtampa – 50 V.

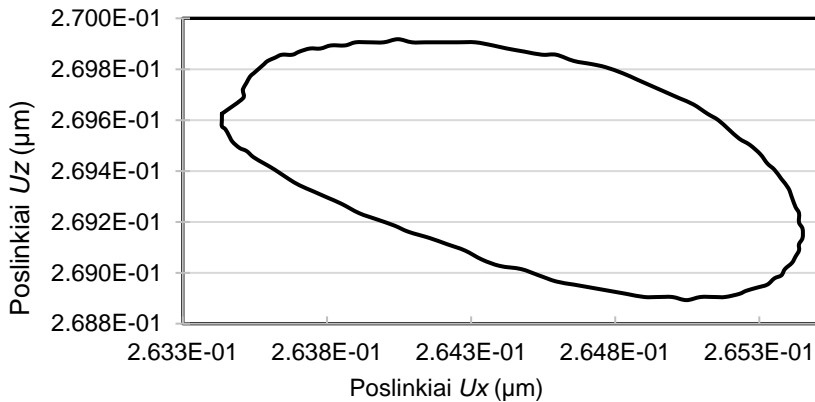
Iš gautų duomenų matyti, kad taškas, kaip ir BE modelyje, juda elipsine trajektorija. Tačiau ši trajektorija nėra ideali. Tam turėjo įtakos matavimo paklaidos dėl kelių dešimčių nanometrų lygio jį siekiančių aplinkos virpesių, kurie sumuojasi su keitiklio generuojamais virpesiais, neidealios tiriamo eksperimentinio maketo medžiagų savybės, jo komponentų geometrija, įtvirtinimo laisvumai bei kitos objektyvios priežastys.



3.13 pav. Kontaktinio taško poslinkių matavimo įranga ir schema: 1) 1D lazerinis skenuojantis vibrometras (*Polytec OFV-505*); 2) valdiklis (*Polytec OF-5000*); 3) vykdiklis, pritvirtintas prie pagrindo, naudojant minkštą dvipusę lipnią juostą; 4) įtampos stiprintuvus (*EPA-104*); 5) signalų generatorius (*Agilent 33220A*); 6) osciloskopas (*Piscope 3424*); 7) multimetras (*Mastech 8218*)



(a)



(b)

3.14 pav. Poslinkių matavimai, matuojant taško poslinkį rezonansiniu darbo režimu: a) keitiklis su diskine jungė (94,6 kHz); b) keitiklis su trikampė jungė (95,1 kHz)

3.5. Pavaros sukimosi dažnio matavimo eksperimentai

Siekiant sužinoti pavaros maksimalų sukimosi dažnį jai veikiant darbinium režimu, atlikti bandymai, kurių metu nustatytos vidutinės kampinio greičio reikšmės, naudojant vykdiklius su skirtingos formos jungėmis. Sferos sūkių skaičius buvo fiksuojamas tam tikrą laiką.

Atlikus bandymus keletą kartų, surastos vidurkių reikšmės ir nustatyta, kad: kai pavaroje naudojamas vykdiklis su diskine jungė, esant rezonansiniam 94,4 kHz dažniui bei 70 V žadinimo įtampai, sferinis rotorius sukimosi dažnis siekė $30 \text{ aps/min} \pm 2 \text{ aps/min}$. O jei naudojamas vykdiklis su trikampė jungė ir žadinama 93,8 kHz bei 70 V įtampa, sukimosi dažnis – $27 \text{ aps/min} \pm 2 \text{ aps/min}$.

3.6. Skyriaus išvados

Trečiajame skyriuje pristatyti eksperimentinių tyrimų rezultatai, kai nagrinėjami keitikliai, pavara bei vykdikliai su skirtingomis jungėmis. Buvo atliekamas impedanso, poslinkių amplitudžių matavimo trimatėje erdvėje bei virpesių modų identifikavimas, skyros įvertinimas, kontaktinio taško poslinkių trajektorijos bei sferinio rotorius sukimosi dažnio matavimai. Nustatyta, kad:

- Impedanso matavimo metu nustatyta, kad rezonansiniai vykdiklių dažniai yra 90–100 kHz intervale. Elektrodo sudalinimas neturi didelės įtakos impedanso rezultatams, tačiau elektrodo talpis skiriasi žymiai – beveik tris kartus, lyginant 3 ir 9 elektrodo sudalinimus. Atitinkamai, energijos sąnaudos taip pat kinta, t. y. sumažėja tris kartus.
- Atliekant rezonansinio dažnio, virpesių modų bei poslinkio amplitudžių tyrimus, nustatyta, kad vykdikliai turi dvi ryškias rezonansinių pikų zonas: ties ~60 kHz bei ~92 kHz. Pirmojoje zonoje keitikliai ir vykdikliai gali turėti didesnes poslinkių amplitudes rezonansiniuose dažniuose, tačiau šios amplitudės dominuoja skersine ir tangentine (žiedinio keitiklio

atžvilgiu), ašimis. Tokie poslinkiai netinkami sferinio rotoriaus sukimui, pavarą sunkiau valdyti. Esant ~92 kHz dažniui – nors ir sumažėja pavaros poslinkių amplitudės 1–2 kartus, tačiau pavara suka sferinį rotorių tolygiau, pavaros darbą galima paprastai kontroliuoti komutuojant skirtingus keitiklio elektrodo segmentus.

- Skyros matavimų metu nustatyta, kad esant 60 V žadinimo įtampai bei 92 kHz žadinimo signalo dažniui, pavaros vidutinė kampinio poslinkio skyra siekia $\sim 30 \mu\text{rad} \pm 1 \mu\text{rad}$. Tokio kampinio poslinkio tikslumas yra pakankamas siekiant valdyti palydovo magnetinio lauko vektorių kryptį.
- Keitiklių aktyvaus kontaktinio taško poslinkių matavimai patvirtino skaitinio modelio rezultatus ir rodo, kad kontaktinės atramos su sfera taškas erdvėje juda elipsine trajektorija, kuri suteikia sferiniam rotoriumi sukimosi judesį.
- Pavaros maksimalus sukimosi vidutinis dažnis siekia $\sim 27 \text{ aps/min} \pm 2 \text{ aps/min}$. su trikampio formos jūne ir $30 \text{ aps/min} \pm 2 \text{ aps/min}$ su disko formos jūne. Toks sukimosi dažnis yra daugiau nei pakankamas numatomos pavaros taikymo srityje: palydovo orientavimo erdvėje laikas gali siekti nuo keliasdešimt minučių iki kelių parų, tad siekiant pritaikyti pavarą palydovams didelis sukimosi dažnis nėra reikalingas.

4. PALYDOVO MISIJOS IR SĄLYGŲ SIMULIACIJOS

Šiame skyriuje aprašomi su mažųjų palydovų misija, jos planavimais ir valdymo sistemomis susiję klausimai ir jų sprendimo būdai. Iš pradžių nagrinėjami misijos planavimo, misijos parametrų skaičiavimo klausimai, vėliau aprašomi pavaros valdymo prietaisai ir pateikiama pjezoelektrinės pavaros, skirtos nanopalydovo orientavimui, valdymo sistema.

Siekiant apskaičiuoti misijos metu veikiančias jėgas, orbitą ir kitus parametrus, naudojama kompiuterinės simuliacijos programinė įranga. Tai įprasta praktika siekiant apskaičiuoti palydovų misijos parametrus.

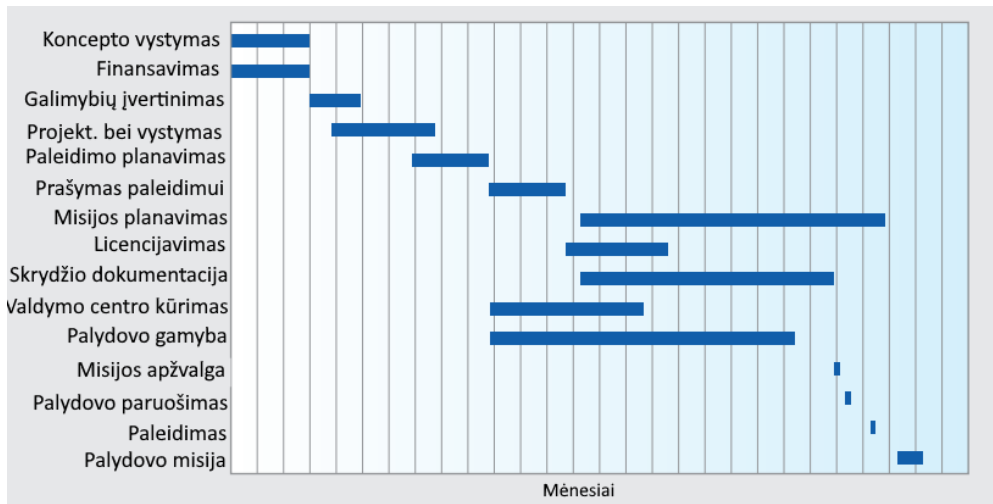
4.1. *CubeSat* tipo palydovų misijos planavimas ir pagrindiniai etapai

Mažieji palydovai gali būti sukurti, pagaminti ir ištestuoti bei paruošti misijai per 9 mėnesius, tačiau tipinis laikas – 18–24 mėn. Kai tik palydovas yra pristatomas paleidimui, pats paleidimo procesas gali užtrukti iki poros metų. Šis periodas labai priklauso nuo to, iš kur ir su kokia raketa nešėja palydovas bus paleidžiamas į orbitą bei kiek laiko užtruks galutinis testavimo procesas, kuris priklauso nuo raketos nešėjos gamintojo ir paleidimo organizacijos [86].

Paprastai egzistuoja šie misijos etapai bei jų tipinės trukmės:

- koncepto kūrimas (1–6 mėn.);
- finansavimo užsitikrinimas (1–12 mėn.);
- galimybių įvertinimas (1–2 mėn.);
- *CubeSat* tipo palydovo projektavimas ir tobulinimas (1–6 mėn.);
- sistemos parengimo ir perdavimo išvedimo į orbitą organizacijai planavimas (3–4 mėn.);
- prašymo paleisti palydovą į orbitą pateikimas ir nagrinėjimas (1–36 mėn.);
- misijos koordinavimas bei planavimas (9–18 mėn.);
- licencijų, reikalingų misijai, gavimas (4–6 mėn.);
- skrydžio planavimo dokumentacijos paruošimas ir tvirtinimas (10–12 mėn.);
- valdymo centro Žemėje parengimas bei testavimas (2–12 mėn.);
- *CubeSat* palydovo gamyba, surinkimas bei testavimas (2–12 mėn.);
- misijos parengties apžvalga (0,5 dienos);
- palydovo parengimas ir įdėjimas į paleidimo įrenginį bei testavimas (1 d.);
- paleidimas (1 d.);
- palydovo misija (trunkanti iki 20 metų).

4.1 pav. pateikta misijos planavimo etapų trukmės lentelė bei procesai, kurie gali perdengti vienas kitą, taip taupant laiką, reikalingą misijai įgyvendinti. 1 priede pateiktas išsamus kiekvieno etapo, reikalingo misijai įgyvendinti, aprašas.



4.1 pav. Palydovo paleidimo pagrindiniai raidos etapai bei jų trukmė [86]

4.2. Palydovo misijos simuliacija

Siekiant patikrinti, kaip veiktų sistema, jei palydove būtų sumontuota šiame darbe aprašoma pjezoelektrinė ultragarsinė pavara su sferiniu rotoriumi, jei ji būtų sumontuota palydove misijos metu, atliekamos kompiuterinės simuliacijos naudojantis įrankiu SNAP (angl. *Smart Nanosatellite Attitude Propagator*) ir veikia kaip papildinys *Matlab* skaičiavimo aplinkoje [87, 88, 89].

Šis programinis įrankis skirtas simuliuoti ir analizuoti įvairiems parametrų, su kuriais susiduriama misijos planavimo ir testavimo metu. Kadangi palydovo į misiją paleisti vien pavaros patikrinimui ar projektuoti ir gaminti visą bandymams finansiškai nenaudinga ir neefektyvu, naudojamos kompiuterinės simuliacijos aplinkos, kurios pagal iš anksto nustatytus misijos ir palydovo sistemų parametrus gali atlikti skaičiavimus. Toks testavimas yra įprastas ir sukurta nemažai įrankių, kurie naudojami atlikti tokiems bandymams [87, 90, 91]. SNAP buvo sukurtas kaip įrankis, kuriuo buvo atlikti orientavimo testavimai KySAT-1 bei KySAT-2 palydovams, kurie į orbitą paleisti 2011–2013 metais bei sėkmingai atliko savo misijas. Vėliau šis įrankis buvo praplėstas bei išpublikuotas viešai.

4.3. SNAP simulatoriaus aplinka, pagrindinės funkcijos

SNAP simulatorius veikia *Matlab* programinio paketo, *Simulink* programavimo aplinkoje. SNAP yra mažųjų palydovų analizės ir simuliacijų įrankis, kuris skirtas analizuoti palydovų veikiančioms aplinkos jėgoms ir projektuoti bei analizuoti sistemoms su pasyviu pozicionavimo valdymu: pasyviu magnetiniu mechanizmu, gravitacijos gradiento stabilizavimu ir aerodinaminiu stabilizavimu.

Šis įrankis padeda numatyti įvairius skrydžio scenarijus ir palydovo konfigūraciją orbitoje. 2 priede pavaizduotas *Simulink* dialogas, kuriame palydovo dinamika yra apibrėžta 6 LLS bloke, į kurį įeina dinamikos ir kinematinų lygčių,

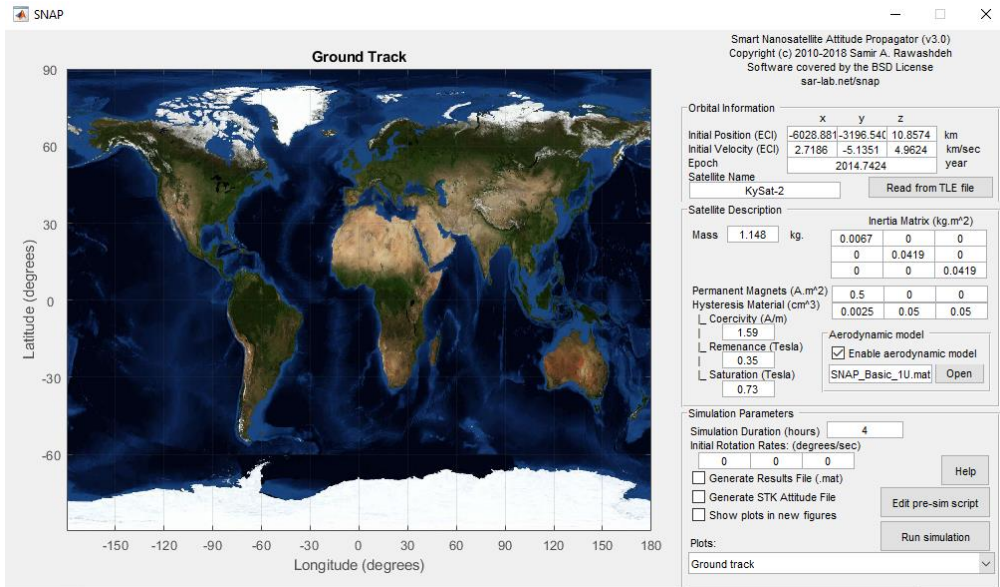
kvadrantų sprendinių įgyvendinimas [89]. Programinio įskiepio pagrindinio lango pavyzdys pateiktas 4.2 pav.

Šis įrankis gali atlikti simuliacijas, remdamasis įvesties duomenimis, nusakančiais palydovo:

- dydį;
- inercijos momentų matricą;
- orbitos parametrus;
- misijos pradžios laiką;
- pozicionavimo sistemos parametrus.

Atlikus simuliaciją, grafiškai pavaizduojami gauti rezultatai. Šie rezultatai apima, bet neapsiriboja:

- veikiančias jėgas ir momentus;
- orbitą;
- greičių vektorius;
- Eulerio kampus ir kt.



4.2 pav. SNAP programinio paketo pagrindinio lango pavyzdys

4.4. Sumodeliuotos pavaros maketo integracija palydove

Tolimesnėms palydovo ir jo maketo simuliacijoms bus naudojamas 1U standarto (10 cm × 10 cm × 10 cm) *ESTCube-1* palydovo prototipas bei jo misijos parametrai. Šitas palydovas turi išsamiai aprašytą struktūrą, misijos parametrus bei telemetriją. Šio palydovo struktūra ir pagrindiniai elementai buvo aprašyti 1.7 poskyryje. Tokiu būdu parenkamas prototipas turės praktinį įvertį jau egzistuojančioje sistemoje.

Siekiant atlikti analizę su suprojektuota orientavimo mechanizmo pavara, vietoj 1.17 pav. pavaizduotos išskleidžiamos masės sistemos (išskleidžiama masė, ritė, pavara bei valdymo sistema) skaičiavimuose bus modeliuojama situacija, kai pjezoelektrinė ultragarsinė pavara pakeičia eilę komponentų, skirtų palydovui orientuoti erdvėje. Modifikuotos pavaros konstrukcija, susiję skaičiavimai, kurie pasikeitė dėl pakeistos palydovo konstrukcijos ir yra reikalingi modeliuojant palydovo misiją SNAP įrankiu, pateikti tolesniuose poskyriuose.

4.4.1. Pavaros integracija į palydovą

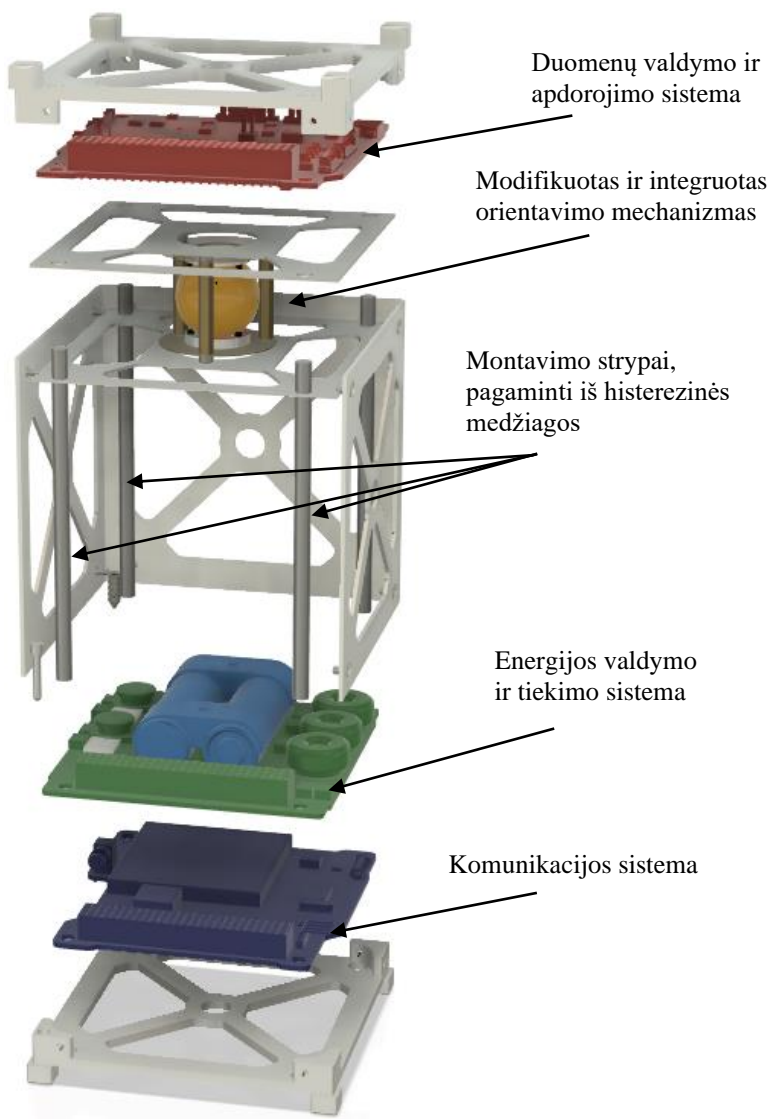
Siekiant sistemą išlaikyti kuo mažiau pakeistą, 1.17 pav. pavaizduota palydovo konstrukcija taip, kad buvęs orientavimo mechanizmas pakeistas pjezoelektrine ultragarsine pavara. Šio pakeitimo įgyvendinimas pateiktas 4.3 pav. Tokia palydovo struktūra yra supaprastinta. Dėl pakitusios konstrukcijos pasikeitusios masės vertės pateiktos 4.1 lentelėje.

4.1 lentelė. Masių pokytis, pakeitus orientavimo sistemą

Sistema	Masė (g)	
	<i>ESTCube-1</i>	<i>ESTCube-1</i> modifikuota
Rėmas	287	
Energijos kaupimo ir valdymo	291	
Valdymo, duomenų apdorojimo	49	
Komunikacinė	75	
Išleidžiama masė	206	–
Išleidžiamos masės, fotografavimo	30	
Pozicijos nusakymo bei valdymo	112	160
Iš viso	1050	892

Kaip matyti, pakeitus orientavimo sistemą bendra palydovo masė sumažėjo ~15 %. Tai leidžia papildomai įterpti elementus, kurie gali būti naudingi atliekant misijas: įvairūs jutikliai, kameros. Kadangi nebereikia atviro palydovo šono išskleidžiamos masės išvedimui į kosmosą, erdvė aplink pavara gali būti išnaudojama kur kas produktyviau – pvz., padengiant didesnę plotą Saulės elementais ar papildomais jutikliais.

Palydovo masės centras, kuris yra kritinis parametras ir charakterizuojamas *CubeSat* reikalavimų apraše, ir ekscentricitetas nuo palydovo tūrio centro negali būti didesnis nei 2 cm [86]. Šiuo pakeistu atveju ekscentricitetas lygus 5 mm, 4.4 pav. Tad masės centras faktiškai sutampa su palydovo geometrinio centru. Žinoma, šis dydis gali dar truputį varijuoti, priklauso nuo to, kokia įranga yra sumontuojama palydovo centre, tačiau didžiausios masės (energijos sistema bei pozicijos valdymo sistema) koncentruotos palydovo centre. Tai užtikrina masės simetriškumą, o kartu – ir paprastesnę palydovo valdymą.



4.3 pav. Supaprastinta ir modifikuota palydovo *ESTCube-1* struktūrinė schema



4.4 pav. Palydovo masės centro bei geometrinio centro nuotolis

4.4.2. Palydovo misijos parametrų skaičiavimas

Naudojantis *ESTCube-1* telemetrijos tyrimų rezultatais bei į palydovą integruotos orientavimo pavaros duomenimis, atliekami bandymai ir simuliacijos, kurios duos rezultatus apie modifikuoto palydovo elgseną misijos metu [35, 92, 93, 94, 95, 96, 97]. Šiems skaičiavimams atlikti reikalingi duomenys:

- palydovo pozicija (koordinatės, naudojant Žemės koordinačių sistemą) paleidimo metu;
- pradinis palydovo greitis;
- palydovo masė;
- misijos pradžios data;
- inercijos momentų matrica;
- nuolatinio magneto stiprumo charakteristikos;
- histerezinių strypų charakteristikos.

Turint šiuos duomenis ir suvedus juos į SNAP aplinką, sistema atliks skaičiavimus ir pateiks rezultatus, kaip palydovas elgtųsi naudojant tokio tipo pavarą. Šių testavimo duomenų rezultatai pateikti žemiau.

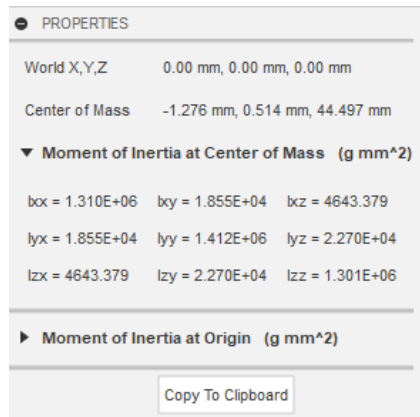
ESTCube-1 palydovas buvo paleistas iš paleidimo įrenginio *Proba-V*, antras eilėje, po *VNREDSat-1A* palydovo. Palydovai buvo paleisti ŽŽO, 704 km aukštyje [92]. Palydovo paleidimo data – 2013 05 07. *ESTCube-1* altitudė ŽŽO 670 km, o posvyrio kampas $98,5^\circ$. Palydovo paleidimo į orbitą koordinatės pagal ECI koordinačių sistemą buvo suskaičiuotos remiantis [98, 96]: $x - 6328,72$; $y - 3248,728$; $z - 15,752$. Pradinis palydovo greitis paleidimo metu siekė $x - 0,5186$; $y - 0,894531$; $z - 7,873$ km/s.

Palydovų paleidimo laikas skaičiuojamas naudojant epochas ir Julijaus datos liekaną. Toks skaičiavimas reiškia, kad: nurodomi misijos metų paskutiniai skaičiai, dienų, praėjusių nuo metų pradžios skaičius. Pavyzdžiui, 13.12710 reiškia, kad palydovas buvo paleistas 2013 metais, 127 metų dieną (gegužės 7-ąją). 10 – 10:00

vietovės, iš kurios buvo paleistas laiku [99]. *ESTCube-1* buvo paleistas 2013 metais, gegužės 7 d. Tad šio palydovo epochos žymėjimas SNAP sistemoje: 2013.12710. Julijaus kalendorių naudoti skaičiavimams įprasta, tai NASA sukurta praktika, nes ji patogesnė atliekant datos ir laiko konversijas, šitoks datos ir laiko užrašymas yra naudojamas misijų metu [100].

Palydovo masė su modifikuotu orientavimo mechanizmu 892 g. Šis dydis bus naudojamas atliekant skaičiavimus.

Inercijos masių matricos dedamosios gali būti suskaičiuojamos dvejopai: atliekant bandymus arba naudojantis CAD sistemos modeliu, kuriame išdėstyti visi komponentai, nurodytos jų masės. Antrasis būdas yra žymiai populiariesnis, vis dėlto mažiau tikslus, nes konkrečių sistemos komponentų masės gali šiek tiek skirtis nuo nominalių reikšmių. Tačiau, kadangi šiose simuliacijose naudojamas tik kompiuterinis modelis, tai dedamosios I_{XX} , I_{YY} bei I_{ZZ} bus paimamos iš skaitinio modelio (4.5 pav.).



4.5 pav. Palydovo inercijos momentų matricos dedamosios

Naudojant nuolatinį magnetą, jo stipris turi būti parenkamas toks, kad būtų didesnis už veikiančių jėgų suminę dedamąją. Skaičiuojant maksimalias galimas jėgas, modeliuojama pati blogiausia galima situacija: esant 700 km orbitos altitūdei ir, jei masės centras yra išnešamas maksimaliai leidžiamu 2 cm atstumu nuo geometrinio palydovo centro, tada palydovą veikiančių jėgų dydžiai yra tokie, kokie pateikti 4.3 lentelėje. Iš pateiktų dydžių matyti, kad palydovo judesiui ir orientacijai didžiausią įtaką daro Žemės magnetinė jėga [89].

4.2 lentelė. Didžiausios galimos jėgos, veikiančios 1U palydovą, esant 700 km orbitoje

Momentas	Dydis	Mat. vnt.
Aerodinaminis	$8,717 \times 10^{-10}$	Nm
Gravitacijos gradiento	$6,805 \times 10^{-10}$	
Saulės slėgio	$3,772 \times 10^{-9}$	
Magnetinio momento	$4,530 \times 10^{-7}$	
Iš viso:	$4,583 \times 10^{-7}$	

Sferinio rotoriaus magnetinio momento dydis gali būti apskaičiuojamas remiantis 4.1 lygtimi [89]:

$$\mu = M \times V ; \quad (4.1)$$

čia: V – magneto tūris; M – magnetinio lauko stipris. Šis dydis gali būti randamas taip:

$$M = \frac{Br}{\mu_0} ; \quad (4.2)$$

čia: Br – magnetinės indukcijos vertė, kuri nusistovi po įmagnetinimo uždarytoje magneto grandinėje neveikiant išoriniam magnetiniam laukui. μ_0 magnetinė konstanta atvirame kosmose lygi $4\pi \times 10^{-7}$.

Tokiu atveju panaudotos magnetinės sferos, pagamintos iš NdFeB, magnetinio momento dydį galima apskaičiuoti taikant 4.3 formulę:

$$\mu = M \times V = \frac{Br \times V}{\mu_0} . \quad (4.3)$$

Konkreči Br reikšmė buvo išmatuota trijų ašių magnetometru, kurio modelis 460 (*Lake Shore Cryotronics, Inc.*). Šis dydis yra 1,2 T. Sferos skersmuo 25 mm, tad jos tūris V lygus $8,18 \times 10^{-6} \text{ m}^3$. Sustačius reikšmes į 4.3 lygtį apskaičiuota, kad $\mu = 0,78 \text{ A} \times \text{m}^2$.

Siekiant valdyti palydovo kampinio greičio slopinimą, kuris yra viena pagrindinių palydovo padėties erdvėje dinamikos valdymo problemų, į palydovo korpusą montuojami slopinimo elementai, vadinami histereziniais strypais. Šių strypų (gali būti ne tik strypai, bet ir, pvz., varžtai, pagaminti iš tinkamos medžiagos, tai – pasyvūs elementai) paskirtis – sumažinti palydovo padėties svyravimus, kurie atsiranda dėl nepakankamos trinties (slopinimo). Kosminėje aplinkoje beveik nėra trinties (ar slopinimo), tad sukimo momentas priešingai proporcingas palydovo sukimosi kampiniam greičiui ir yra minimalus. Tokio tipo elementų pagrindinis veikimo principas tas, kad keičiant magnetinio lauko stiprį dėl palydovo sukimosi ir orbitos padėties, histerezinis strypas kaip magnetinio pralaidumo elementas sugeria magnetinio lauko jėgas ir sukuria priešingos krypties magnetinio srauto tankį. Šis procesas slopina palydovo svyravimų energiją ir laikui bėgant ją sumažina.

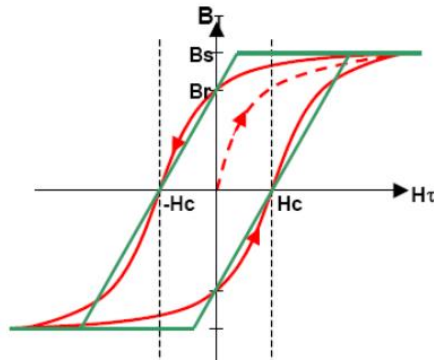
Palydove pasyvusis stabilizavimas yra antraeilė sistema su labai mažu slopinimo koeficientu. Siekiant paaiškinti pasyvaus stabilizavimo esmę, kaip pavyzdį galima pateikti fizikinę švytuoklę, svyruojančią vakuume be jokio slopinimo. Arba kitas pavyzdys – spyruoklinė masės sistema, judanti be slopinimo.

Palydovai kosmose stabilizuojami gravitacijos gradientu, taip palydovas yra stabilizuotas ir svyruoja aplink ašinės krypties (Žemės koordinacių sistema) vektorių. Veikiant aerodinamiui stabilizavimui palydovas svyruoja apie greičio vektoriaus ašį. O kai palydovas yra stabilizuojamas magnetinėmis jėgomis, jis osciluoja aplink Žemės magnetinio lauko linijas orbitoje.

Projektuojant palydovą turi būti atsižvelgiama į kampinio slopinimo virpesius, siekiant juos stabilizuoti ir minimalizuoti. Gravitacijos gradientas ir nuolatiniai magnetai nesuteikia jokios energijos išsisklaidymo formos, o aerodinamių jėgų sukeltas pasipriešinimas yra nereikšmingas. Šiuo atveju sukimo momento dydis, atsirandantis dėl kampinio judėjimo, yra maždaug keturiomis eilėmis mažesnis už pagrindinę sukimo momento dedamąją, kurią sukelia aerodinaminės jėgos. Kampinio

greičio slopinimą galima pasiekti naudojant giroskopines pavaras arba magnetinio momento rites. Vienas iš būdų pasyviai slopinti kampinį palydovo greitį yra tiesiog įmontuojant elementus, pagamintus iš histerezinės medžiagos.

Palydovuose naudojamos medžiagos su pakankamai mažu koerciniu lauko stipriu H_c , tam, kad būtų galima juos įmagnetinti ir išmagnetinti, naudojant Žemės magnetinį lauką. Taip pat didelis magnetinis pralaidumas padidina histerezės efektyvumą. Tipinė magnetinės histerezės forma pavaizduota 4.6 pav. Čia: H_c yra koercinis lauko stipris, B_r – liekamasis tankis, o B_s – prisotinto magnetinio srauto tankis. Kai H ciklo metu palydovas sukasi per magnetinį lauką, medžiaga yra įmagnetinama ir išmagnetinama išilgai histerezės kreivės. Histerezės kilpos viduje esanti energija prarandama kaip šiluma per tam tikrą ciklą [89].



4.6 pav. Magnetinės histerezės kilpos modelis [89]

Siekdami apskaičiuoti, kokių histerezinių strypų ir jų parametrų reikia norint, kad jie tiktų naudoti palydove, taikome tokias formules ir metodus. Magnetinio lauko intensyvumas apskaičiuojamas pagal [89]:

$$H_E = \frac{1}{\mu_0} B_E ; \quad (4.4)$$

čia: H_E – Žemės magnetinio lauko intensyvumas; B_E – Žemės magnetinio lauko vektoriaus dydis; μ_0 – magnetinis laidumas atvirame kosmose, lygus $4\pi \times 10^{-7}$.

Magnetinio lauko tankis apskaičiuojamas pagal aproksimuotą histerezės modelį, taikant 4.5 išraišką [89]:

$$B_{HMat} = \text{Histerizes kreivė}(H_E) ; \quad (4.5)$$

čia: B_{HMat} – histerezinės medžiagos magnetinio lauko sugerties dydis.

Magnetinio momento, kuriamo histerezinės medžiagos objekto, dydis apskaičiuojamas taip [89]:

$$m_{his} = \frac{B_{HMat} V_{His}}{\mu_0} ; \quad (4.6)$$

čia: V_{His} – histerezinio elemento medžiagos tūris, bendras visame palydove.

Kuriamas momentas apskaičiuojamas taip [89]:

$$M_{His} = m_{his} \times B_E . \quad (4.7)$$

Siekiant supaprastinti histerezinių elementų parinkimą ir skaičiavimus, misijos simuliacijoje naudojami histereziniai strypai, kurių parametrai buvo apskaičiuoti ir pritaikyti 1U palydovui, esant 700 km orbitai, kitų autorių [101, 26].

4.4.3. Palydovo misijos simuliacija

Ankstesniame poskyryje suskaičiuotos ar surastos reikšmės, reikalingos nusakyti palydovo parametrus, norint atlikti jo misijos simuliaciją. Šiame skyriuje bus pateiktos suvestos sąlygos bei aptarti gauti simuliacijos rezultatai. 4.7 pav. pavaizduotas pagrindinis simulatoriaus langas su suvestomis reikšmėmis, kurios gautos ankstesniame poskyryje.

Smart Nanosatellite Attitude Propagator (v3.0)
Copyright (c) 2010-2018 Samir A. Rawashdeh
Software covered by the BSD License
sar-lab.net/snap

Orbital Information

	x	y	z	
Initial Position (ECI)	6328.72	3248.728	-15.752	km
Initial Velocity (ECI)	-0.5186	0.894531	-7.873	km/sec
Epoch	2013.12710			year

Satellite Name
ESTCube-1_mod

Satellite Description

Mass kg.

Inertia Matrix (kg.m ²)		
0.00131	0	0
0	0.001412	0
0	0	0.0013

Permanent Magnets (A.m²)

0.78	0	0
0.0032	0.046	0.048

Hysteresis Material (cm³)

Coercivity (A/m)

Remanance (Tesla)

Saturation (Tesla)

Aerodynamic model
 Enable aerodynamic model

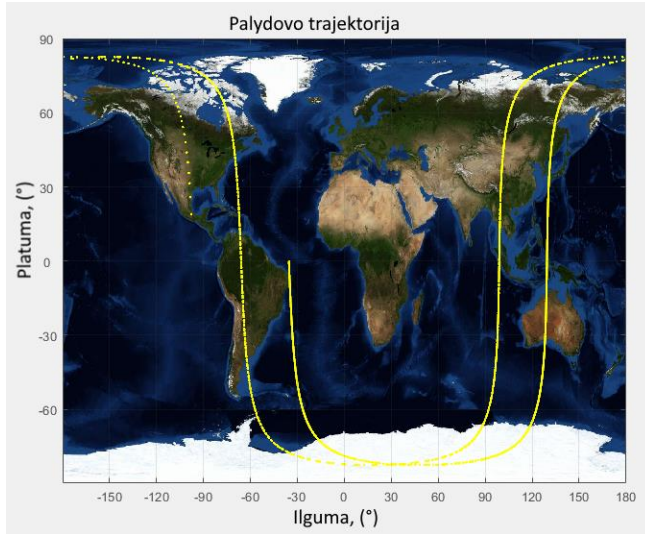
4.7 pav. Palydovo simuliacijos pradinės sąlygos

Atlikus palydovo simuliaciją, SNAP programinis paketas suskaičiavo šiuos misijos parametrus:

- palydovo orbitos trajektoriją;
- Eulerio kampus;
- palydovo ašių išsidėstymą pagal magnetinio lauko kryptis;
- palydovo ašių išsidėstymą pagal greičio vektorius;
- kampinio judesio santykius;
- gravitacijos gradiento momentą;
- nuolatinio magneto, sumontuoto palydove, momentą;
- histerezinių strypų kuriamą momentą;
- aerodinamines jėgas.

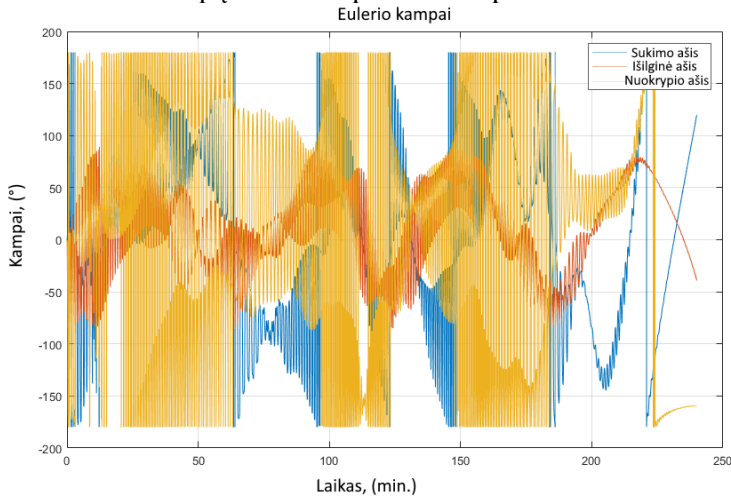
Buvo pasirinkta magnetinių jėgų atžvilgiu sudėtingiausia misija, kai palydovas juda apskritimine orbita (4.8 pav.) aplink Šiaurės bei Pietų polių. Jo orbita ganėtinai

stabili, nuokrypiai nedideli. Vadinasi, parinkto magneto stiprumas yra pakankamas tam, kad išlaikytų palydovą tinkamoje orbitoje.



4.8 pav. Palydovo misijos simuliacija. Palydovo skrydžio orbita

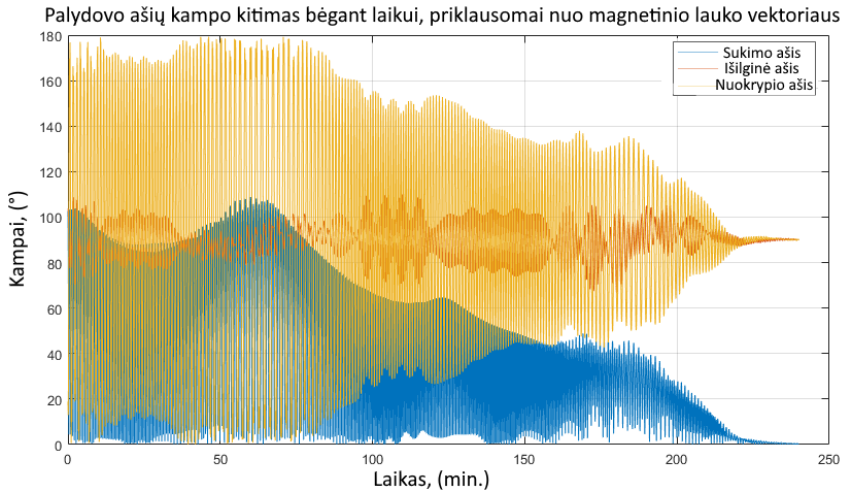
Palydovo Eulerio kampų rezultatai pateikti 4.9 pav.



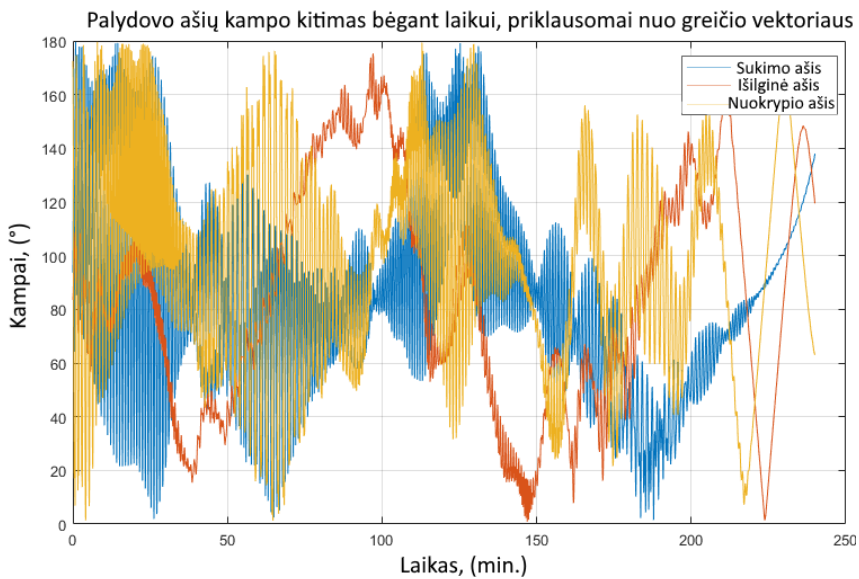
4.9 pav. Palydovo sukimasis Eulerio kampais apie sukimo, išilginę bei nuokrypio ašis

Palydovo orientacijos kitimas bėgant laikui nuo: a) magnetinio lauko vektoriaus krypties; b) nuo greičio vektoriaus pavaizduotas 4.10 pav. Galima pastebėti, kad ilgainiui palydovo orientacija erdvėje stabilizuojasi ir sinchronizuojasi su Žemės magnetinio lauko dipoliu, tad kampo kitimas tampa vis mažesnis. Taip pat, kadangi palydovas stabilizuojasi erdvėje, jo ašys svyruoja vis mažesniais kampais, atitinkamai pokytis nuo greičio vektoriaus vis labiau mažėja, kol šis dydis tampa pastovus, tik

priklauso nuo to, kuriame orbitos taške palydovas yra nustatytu laiko momentu. Tai patvirtina, kad pavara veikia ir kad ji veikia tinkamai.



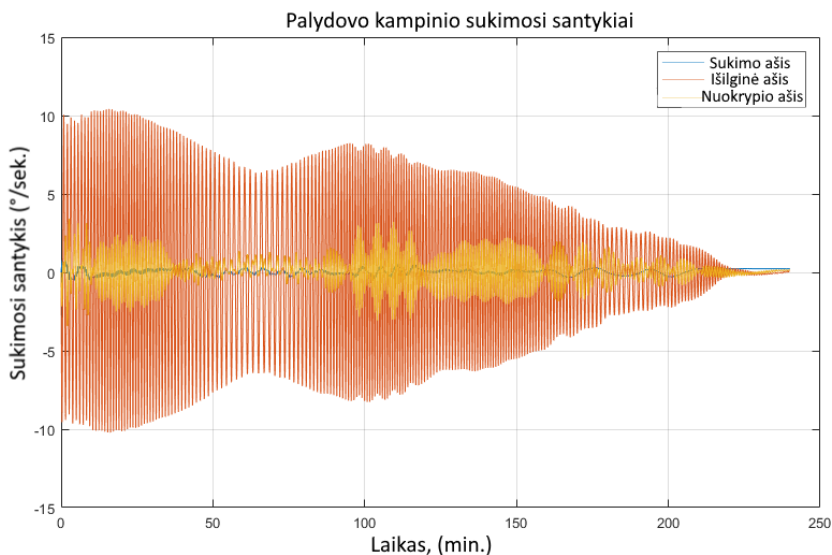
(a)



(b)

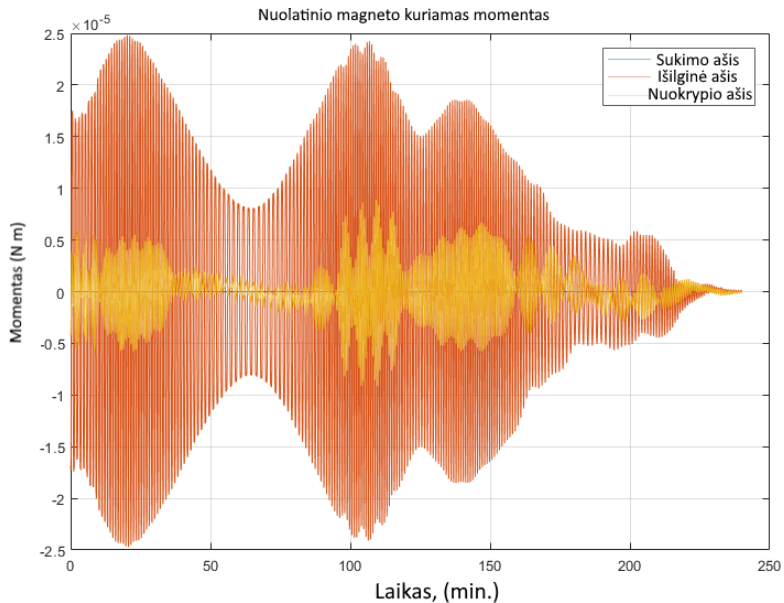
4.10 pav. Palydovo orientacijos kitimas bėgant laikui nuo: a) magnetinio lauko vektoriaus krypties; b) nuo greičio vektoriaus

Palydovo svyravimas aplink kiekvieną iš ašių bėgant laikui, pavaizduotas 4.11 pav. Jame taip pat, kaip ir 4.10 pav., matyti, kad bėgant laikui palydovas stabilizuojasi, jo sukimasis ir/ar svyravimai apie kiekvieną iš ašių tendencingai mažėja, kol galiausiai nusistovi ties $0,098 \text{ } ^\circ/\text{sek.}$ reikšme.

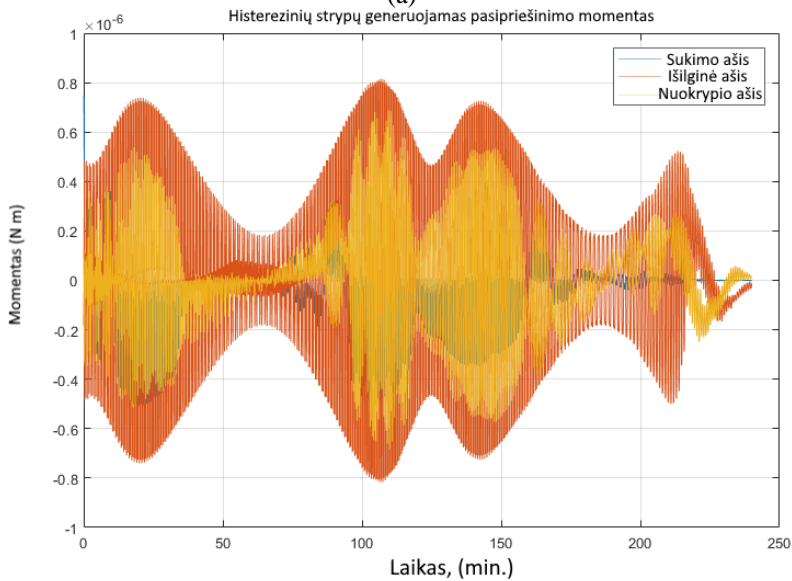


4.11 pav. Palydovo sukimosi aplink ašis santykiai

Nuolatinio magneto kuriamo sukimo momento dydis bei histerezinių elementų kuriamo pasipriešinimo momento dydis pateikti 4.12 pav. Šiuose grafikuose galima pastebėti, kad veikiantys momentai yra netolygūs bei kinta pagal palydovo poziciją orbitoje. Jei palydovas yra tam tikrame taške, kai įvyksta palydove esančio magneto sinchronizacija su Žemės magnetiniu lauku, pasipriešinimo momento dydis sumažėja. Atitinkamai tas pats galioja ir histereziniams elementams. Tačiau, kai palydovas atsiduria kitame orbitos taške, įvyksta desinchronizacija, kurios metu magnetas stengiasi suorientuoti palydovą su Žemės magnetiniu lauku, momento vertė padidėja. Šis periodinis kitimas vyksta tol, kol palydovas galiausiai atsiduria nuolatinėje sinchronizacijoje su Žemės magnetiniu lauku. Jei palydove keistųsi magneto orientacija, kuriami pasipriešinimo momentai vėl padidėtų ir vyktų slopinamasis momentų mažėjimas, kol vėl palydove esantis magnetas sinchronizuotųsi su Žemės magnetiniu lauku.



(a)



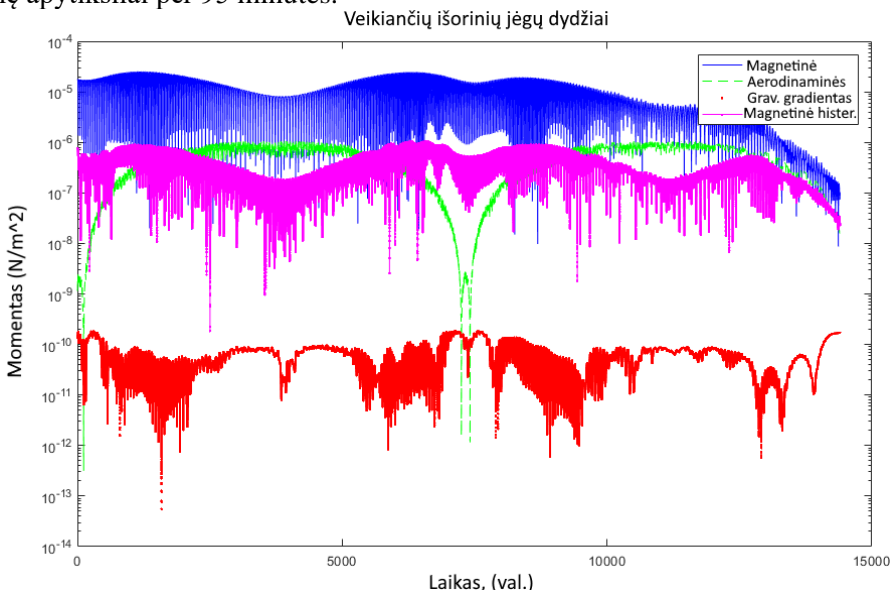
(b)

4.12 pav. Palydove esančių elementų kuriamas momentas: a) nuolatinio magneto; b) histerezinių elementų

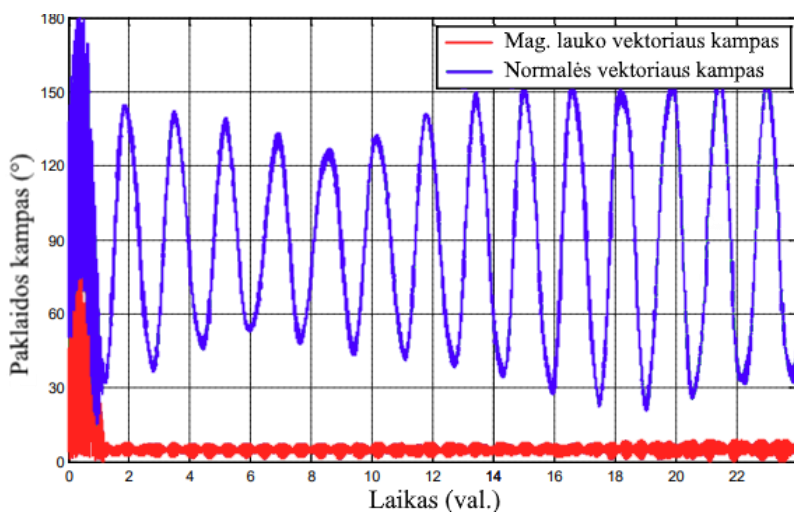
1.3 poskyryje buvo paminėta, kad palydovas, skriejantis orbitoje, nuolat yra veikiamas tam tikrų jėgų: atmosferos, gravitacijos gradiento, Saulės slėgio bei magnetinių. Kaip ir buvo minėta, jos gali veikti įvairiai: nuolat, pagal orbitos aukštį, esant skirtingoms sąlygoms ir pan. Suminis grafikas, kuriame pavaizduotos veikiančios jėgos bei šių jėgų dydžiai, pateiktas 4.13 pav. Iš šio grafiko matyti, kad

didžiausia veikianti jėga yra magnetinė jėga, kuriama Žemės magnetinio dipolio. Mažiausia – gravitacijos gradiento. Palydovo vieno apsisukimo apie Žemę periodas – 98,03 min [93].

Buvo atlikti skaitiniai skaičiavimai palydovui skriejant nustatyta orbita, kurios inklinacija yra 98° . Tai sąlygoja kampo tarp palydovo normalinio vektoriaus, nukreipto nuo palydovo į Žemės centrą, ir sferinio rotoriaus magnetinio lauko vektoriaus kitimą pagal sinusinį dėsnį, pavaizduotą 4.14 pav. mėlyna spalva. Kampo tarp sferinio rotoriaus magnetinio lauko vektoriaus ir Žemės magnetinio lauko vektoriaus kitimas, palydovui skriejant nustatyta orbita, pavaizduotas raudona spalva. Pagal pateiktą grafiką galima daryti išvadą, kad nanopalydovo orientacija Žemės magnetinio lauko atžvilgiu trunka apie 1,5 valandos. Normalinio vektoriaus kampo harmoninis kitimas indikuoja apie tai, kad palydovas apsisuka nustatyta orbita aplink Žemę apytiksliai per 95 minutes.



4.13 pav. Suminis veikiančių išorinių jėgų grafikas



4.14 pav. Palydovo kampų tarp normalinio vektoriaus ir palydovo sferinio rotoriaus magnetinio lauko vektoriaus kitimo grafikas

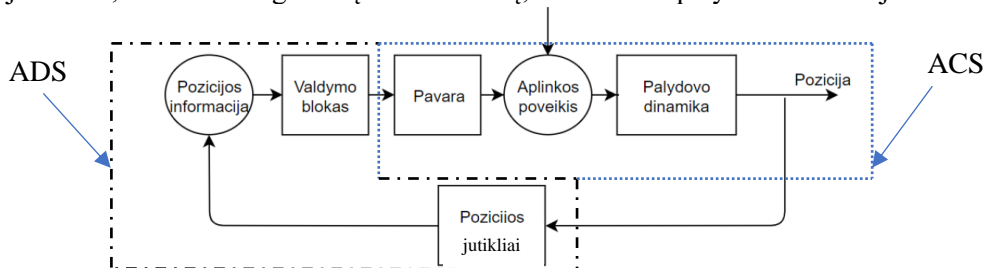
4.5. Palydovo pavaros valdymo sistema

Palydove sumontuotai pavarai yra reikalinga valdymo bei matavimų įranga, kuria galima nustatyti palydove sumontuoto sferinio rotoriaus poziciją, išmatuoti Žemės magnetinį lauką bei atitinkamai koreguoti sferinio rotoriaus poziciją. Šiam procesui reikalinga elektronika turi būti sumontuota kuo arčiau magneto (magneto matavimams) bei kuo toliau nuo sferinio rotoriaus likusiems matavimams atlikti. Palydovo sferinio rotoriaus pasukimo kampą, greitį reguliuoja ir aktyvina pozicijos nustatymo sistema (ADS), o pozicijos kontrolė atliekama su (ACS) sistema.

4.5.1. Palydovo pozicijos nustatymo ir kontrolės sistemos (ADCS)

Palydovo pozicijos nustatymo ir kontrolės sistema gali būti skaidomos į dvi sudedamąsias dalis: pozicijos nustatymo sistemos (ADS) bei pozicijos valdymo sistemos (ACS). ADCS sistemos principinė schema pavaizduota 4.15 pav.

ADS sistemos tikslas – nustatyti tikslią palydovo poziciją orbitoje, o gauti duomenys yra perduodami į valdymo bloką. Šiame bloke informacija yra apdorojama ir, jei reikia, duodamas signalas į ACS sistemą, kuri atlieka palydovo korekcijas.



4.15 pav. Kontrolės bei valdymo sistemos veikimo schema (ADCS) [102]

ADS sistema naudoja įvairius jutiklius, kurie sumontuoti palydove. Šie jutikliai gali būti įvairūs: Saulės, Žemės ar žvaigždžių pozicijų nusakymo, magnetinio lauko. Gauti duomenys apdorojami ir perduodami į valdymo bloką.

ACS sistema, naudodama valdymo algoritmus bei pavaras, pagal nustatytą signalą iš valdymo bloko atlieka perorientavimo veiksmus, tokiu būdu įvedamos korekcijos į palydovo orbitos trajektoriją. Siūlomos sistemos atveju ACS sistema valdytų sferinio rotoriaus poziciją.

4.5.2. Palydovo pozicijos kontrolės sistema

Siekiant atlikti palydovo misiją bei pasiekti tinkamą veikimą, sistema turi kontroliuoti palydovą pagal grįžtamąjį ar išmatuotą signalą. Jei palydovas yra išstatomas tam tikroje, numatytoje, pozicijoje, jis gali atlikti priskirtas užduotis: fotografuoti, stebėti oro masių srautus. Atsukus palydovą taip, kad jo antenos būtų nukreiptos imtuvo kryptimi – užtikrinti stiprų ryšio signalą, perduoti duomenis didesniu greičiu. Šiam tikslui pasiekti naudojama suprojektuota pavara su nuolatinio magneto sferiniu rotoriumi, kuris turi 3 kampinius laisvės laipsnius ir atitinkamai gali savo orbita skriejančiam palydovui suteikti trimatę kampinę orientaciją.

4.5.3. Palydovo kontrolės jutiklių bandymai

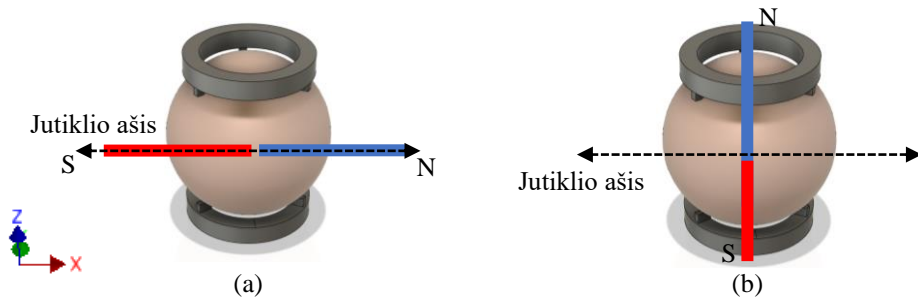
Buvo atliktas tyrimas, siekiant nustatyti anizotropinių magnetorezistorinių (AMR) jutiklių, skirtų magnetinio lauko matavimams atlikti, tinkamumą pavara su sferiniu magnetiniu rotoriumi [102]. Tyrimuose naudojama schema: vienas jutiklis, kuris yra mažo jautrumo, pritvirtinamas kuo arčiau magnetinės sferos. Šio jutiklio paskirtis – matuoti sferos magnetinio lauko stiprį bei nustatyti sferos poziciją. Antrasis, didesnio jautrumo jutiklis, yra atitraukiamas nuo sferinio rotoriaus, tam, kad gebėtų matuoti Žemės magnetinio dipolio lauką ir kryptį. Svarbu, kad jutiklis nebūtų labai arti sferos, nes tokiu atveju jis taps išotintas ir duomenys taps netikslūs. Naudotų jutiklių parametrai pateikti 4.4 lentelėje.

Atliekant sferos magnetinio lauko pokyčio bandymus, išlaikant tą pačią poziciją erdvėje Žemės magnetinio lauko atžvilgiu, AMR jutiklis (modelis LIS2MDL) bei magnetinės sferos dipolis yra pozicionuoti horizontaliai (4.16 pav., *a*). Atlikus matavimus, magnetinio lauko dipolis yra orientuojamas vertikalčiai, o jutiklis – išlaikomas horizontalioje padėtyje (4.16 pav., *b*). Šių matavimų rezultatai pateikti 4.17 pav. [103, 104].

Pirmojo bandymo metu sfera buvo sukama tik viena kryptimi, atitinkamai aplink *X*, *Y* bei *Z* ašis. Šių bandymų duomenys pavaizduoti 4.18 pav. Punktyrine ir ištisine linija vaizduojami kelių bandymų rezultatai.

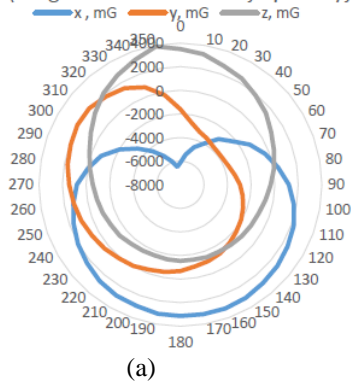
4.3 lentelė. Jutiklių, naudotų matavimams, pagrindinės savybės

Savybė	LIS2MDL	LISL3MDL	Mat. vnt.
Magneto dinamikos rėžiai	$\pm 49,52$	± 60	Gs
Jautris	1,5	2,2	mGs
Jautrio pokytis veikiant temperatūrai	$\pm 0,03$		%/°C
RMS triukšmai	3	3,2	mGs (RMS)
Veikimo temperatūra	-40/+85	-40/+85	°C

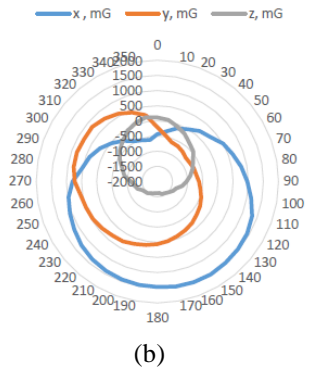


4.16 pav. Magnetinio dipolio padėtis matavimų metu: a) horizontali; b) vertikali [102]

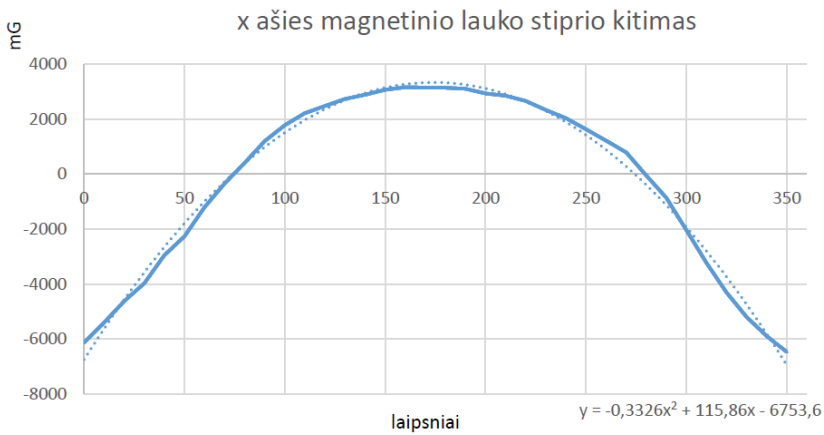
Magnetinio lauko kitimas keičiantis magneto padėčiai (magnetas horizontalioje padėtyje)



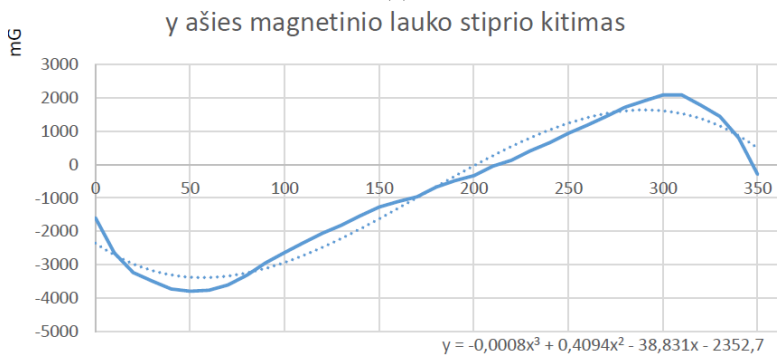
Magnetinio lauko kitimas keičiantis magneto padėčiai (magnetas orientuotas aukštyn)



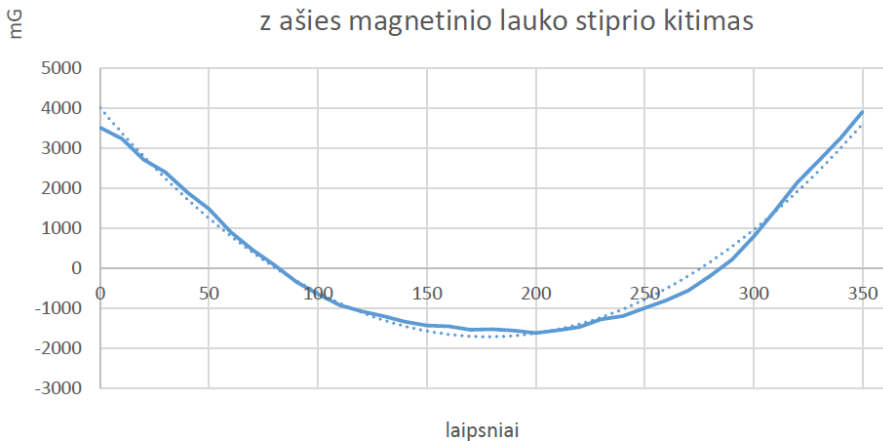
4.17 pav. Magnetinio lauko stiprio kitimas sukant sferą aplink ašį, kai dipolis orientuotas: a) horizontaliai; b) vertikaliai [102]



(a)



(b)



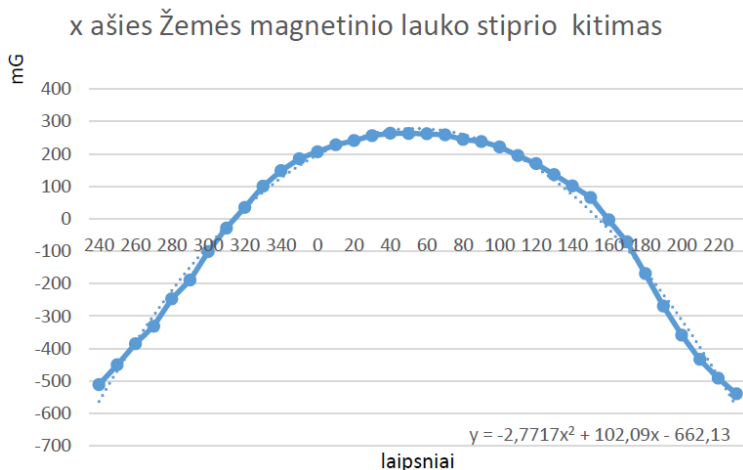
(c)

4.18 pav. Magnetinio lauko stiprio kitimas: a) x ašies; b) y ašies; c) z ašies kryptimis [102]

Iš šių bandymų rezultatų aiškiai matyti, kad sukantis sferai viena ašimi fiksuojamas magnetinio lauko stiprio kitimas yra ciklinis – sukimo pradžios bei galo

koordinatės sutampa. Matematiškai apdorojant duomenis, galima nusakyti bet kurio taško, esančio ant magneto, koordinatės kitimą erdvėje bei valdyti sferos pasukimo kampą, kryptį ir pasukimo dydį norimais žingsniais.

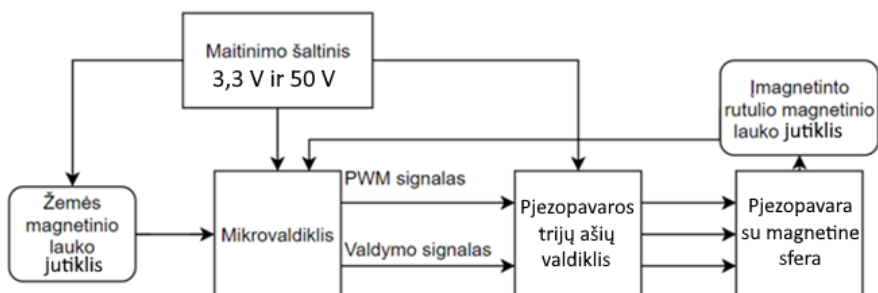
Antrojo bandymo metu buvo matuojamas Žemės magnetinio lauko stipris. Šiuo atveju jutiklis (modelis LIS3MDL) buvo pastatytas 20 cm atstumu nuo sferinio rotoriaus. Sferinis rotorius išliko stacionarioje aplinkoje, tad žinomos sferinio magnetinio lauko dydžio dedamosios atitinkamomis kryptimis, jas būtina eliminuoti iš galutinių skaičiavimo rezultatų. Kitimui matuoti visa sistema (pavara bei jutikliai) buvo sukami horizontalioje plokštumoje. Iš gautų matavimo rezultatų buvo eliminuoti sferos magnetinio lauko rezultatai. Gauti dydžiai pateikti 4.19 pav.



4.19 pav. Magnetinio lauko kitimas [102]

4.5.4. Palydovo kontrolės sistemos įranga

Pavarai valdyti, buvo sukurta sistema, kuria atliekamas magnetinių dydžių matavimas, perduodami duomenys į mikrovaldiklį (imituoja palydovo valdymo ir duomenų apdorojimo sistemą), o jis perduoda valdymo signalą sferai sukti. Šio proceso principinė schema pateikta 4.20 pav.



4.20 pav. Kontrolės sistemos principinė schema [102]

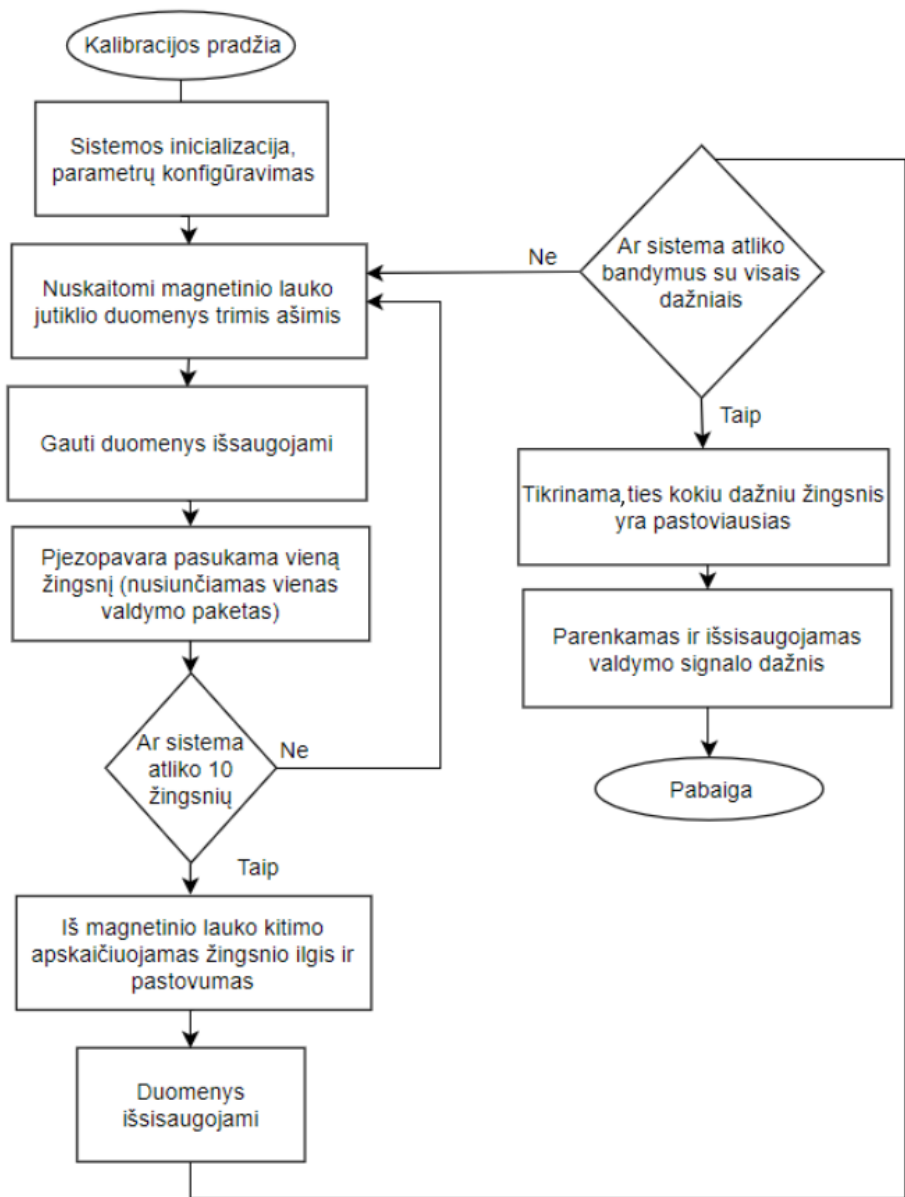
Įtampa sistemai yra tiekama iš energijos valdymo bloko, šios įtampos dydis 12 V. Energijos valdymo blokas taip pat generuoja 50 V įtampą, kuri reikalinga pjezoelektriniams keitikliams. Pjezoelektrinė pavara yra valdoma trijų valdiklių, vienas valdiklis skirtas vienam pavaros elektrodo segmentui. Magnetinio lauko jutikliai perduoda duomenis į mikrovaldiklį, kuris savo ruožtu generuoja signalą segmentų valdymo keitikliams. Ši sistema turi grįžtamąjį ryšį.

4.5.5. Palydovo kontrolės sistemos algoritmas

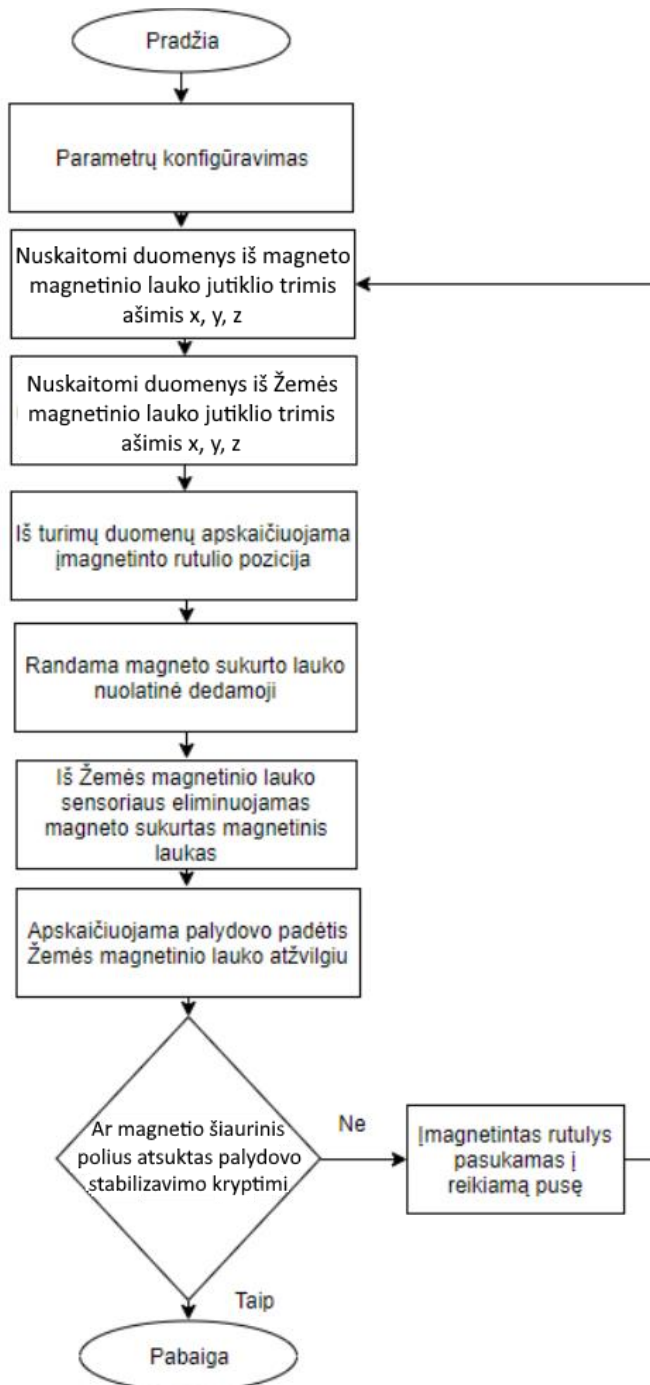
Sistemos darbui užtikrinti turi būti sudarytas valdymo algoritmas, kuriuo vadovaujantis pavara yra valdoma. Šis algoritmas užtikrina matavimo duomenų apdorojimą, sistemos elgseną bei kontrolę. Taip pat sistema komunikuoja tarpusavyje su likusiomis palydovo sistemomis.

Prieš pradėdant matavimus, sistema turi atlikti kalibravimą. Šio etapo metu nuskaitomi priminiai parametrai, duomenys iš jutiklių. Pavara yra sužadinama, nustatomas tam tikras pasisukimo žingsnių kiekis. Pasukus pavara, išmatuojamas magnetinio lauko kitimas, duomenys apdorojami ir išsaugomi. Šie etapai atliekami sukant pavara kiekviena ašimi (X , Y , Z) atskirai. Kalibravimo algoritmas pateiktas 4.21 pav.

Darbinio pavaros režimo algoritmas grindžiamas gautais duomenimis iš AMR jutiklių. Iš pradžių sistema yra sukalibruojama. Kitame etape atliekami matavimai: matuojamas tiek magnetinės sferos lauko stipris, tiek Žemės magnetinio lauko stipris. Šis matavimas atliekamas tik tada, kai sfera suorientuojama taip, kad magnetinis sferos dipolis orientuojamas į horizontalią padėtį. Pagal gautus duomenis suskaičiuojama, kiek reikia pasukti sferinį rotorių, kad jis būtų suorientuojamas reikiama kryptimi, atsižvelgiant į norimą rezultatą. Darbinio algoritmo schema pateikta 4.22 pav.



4.21 pav. Palydovo pavaros kalibravimo algoritmas [102]



4.22 pav. Darbinis palydovo pavaros valdymo algoritmas [102]

4.6. Skyriaus išvados

Ketvirtajame skyriuje nagrinėtos temos, susijusios su palydovo misijos planavimu, pavaros charakteristikų matavimais, misijos simuliacijomis, pavaros integracija į 1U dydžio palydovo sistemas bei valdymo algoritmais. Apibendrinamieji skyriaus rezultatai:

- Palydovų sistemos bandymai yra komplikuoti dėl terpės, kurioje jie atliekami. Nepaisant to, konstruojami specialūs standai, kuriuose patalpinami ir išbandomi palydovai bei jų sistemos. Egzistuoja trys būdai, kuriais remiantis atliekami matavimai: naudojant oro guolius, ant vandens ir skaitinis.
- Pasiūlytas pavaros mechanizmas dėl savo mažo dydžio galėtų būti integruojamas į 1U tipo palydovus. Tokia integracija leistų sumažinti palydovo sistemų bendrąją masę bei tūrį ir užtikrinti erdvinį palydovo orientavimą.
- Iš atliktų skaitinių tyrimų matyti, kaip pasiūlyta pavara veiktų galimoje misijoje. Jos rotoriaus magnetinio dipolio momentas yra pakankamas, kad nugalėtų suminę išorinių trukdžių jėgą.
- Pateiktas pavaros valdymo algoritmas, susidedantis iš dviejų etapų: kalibravimo, kuris reikalingas prieš pradėdant darbą su pavara bei darbinis pavaros algoritmas, skirtas palydovo orientavimui Žemės magnetinio lauko atžvilgiu. Valdymo ir kontrolės sistema sudaryta iš dviejų AMR jutiklių, kurių vienas matuoja sferinio rotoriaus magnetinio lauko dydį trijose tarpusavyje statmenose ašyse. Antrasis, jautresnis jutiklis skirtas matuoti Žemės magnetiniam laukui.

5. IŠVADOS

1. Išryškinti pagrindiniai įvairių pavarų, kurios naudojamos palydovams pozicionuoti ir orientuoti erdvėje, tipų privalumai ir trūkumai. Pavarų projektavimui aktualūs, misijoje veikiantys momentai yra $8 \times 10^{-8} \text{ Nm} - 1 \times 10^{-8} \text{ Nm}$ intervale. Rotorinių pavarų tipų analizė atskleidė, kad lyginant su elektros varikliais iki keliasdešimties W galios, pjezoelektrinės pavaros dėl savo mažo dydžio, sąlygiškai didelių pasiekiamų jėgų ir galimybių dirbti vakuomo sąlygomis turi didelį potencialą būti panaudotos mažuosiuose palydovuose. Tačiau pjezoelektrinės pavaros turi ir trūkumų: jos dažniausiai generuoja poslinkius tik viena ašimi; jei reikalingi daugiaašiai poslinkiai, sistemos tampa sudėtingesnės. Taip pat tokios pavaros negali būti panaudotos ten, kur reikalingos didesnės pasiekiamos jėgos – pjezoelektrinės pavaros nepasiekia pakankamo našumo. Kompaktiškų pjezoelektrinių pavarų gamyba sunkiau automatizuojama, o palydovams kompaktiškumas yra vienas iš reikšminių kriterijų.
2. Realizuoti supaprastinti universalūs parametriniai pjezoelektrinės pavaros BE modeliai, kurie buvo sudaryti remiantis suprojektuota pavaros konstrukcija: kai pjezoelektrinis keitiklis turi skirtingą žadinimo elektrodų skaičių ir su skirtingos geometrijos jungėmis, tokiu būdu suformuodamas unimorfinį vykdiklį. Universalūs BE modeliai gali būti pritaikomi projektuojant skirtingų konfigūracijų magnetosferines pjezopavaras, adaptuojant jas skirtingų charakteristikų bei orbitos aukščių *CubeSat* tipo palydovams.
3. Atlikti sukurtos pjezoelektrinės pavaros, vykdiklių dinaminiai skaitiniai ir eksperimentiniai tyrimai, kurių metu buvo nagrinėjamos kelių modifikacijų vykdiklių virpesių charakteristikos bei jų įtaka pavaros dinamikai ir nustatyta, kad:
 - I. Vykdiklių rezonansiniai (darbiniai) dažniai kinta 90–100 kHz intervale. Pastebėta, kad elektrinis impedansas rezonansiniame dažnyje, kai valdymo elektrodas sudalintas į skirtingą segmentų skaičių, kinta nežymiai, skirtingų elektrodo sudalinimo konfigūracijų talpis skiriasi beveik tris kartus, kai lyginamas 3 segmentų (sudalinimas kas 120°) ir 9 segmentų (sudalinimas kas 40°) variantai. O tai tiesiogiai daro įtaką energetiniam pavaros efektyvumui, t. y. mažesnę elektrinę talpą turinčio pjezoelektrinio vykdiklio energetinės sąnaudos mažėja.
 - II. Rezonansiniu režimu veikiančios pavaros vykdikliai turi keletą rezonansinių zonų, tačiau praktiškai aktualiausias iš jų – ties $\sim 60 \text{ kHz}$ bei $\sim 92 \text{ kHz}$. Atitinkamai pirmojoje iš jų poslinkiai yra didesni, tačiau šie poslinkiai dominuoja skersine ir tangentine ašimis, o tai yra nepalanku rotoriaus sukamojo judesio formavimui, nes sudėtinga užtikrinti judesio stabilumą bei valdomumą erdvėje. Kai pjezoelektrinis elementas yra žadinamas ties $\sim 92 \text{ kHz}$ zona, dominuojantys kontaktinio taško poslinkiai yra generuojami skersine bei ašine kryptimis, tačiau nors amplitudė ir sumažėja apie 1–2 kartus, lyginant su pirmąja rezonansinio piko zona,

- tačiau pagerėja pavaros valdomumas ir sferos sukimasis tampa tolygesnis, sfera sukama kryptingai.
- III. Pranašesnė yra vykdklio su diskine jungė konfigūracija, nes šio vykdklio poslinkių amplitudė yra 15 % didesnė nei vykdklio su trikampe jungė.
 - IV. Vidutiniškai rotoriaus kampinio poslinkio skyra siekia $\sim 30 \mu\text{rad} \pm 1 \mu\text{rad}$, žadinant 60 V ir 92 kHz elektriniu signalu. Tokia skyra yra pakankama tam, kad būtų užtikrinamas sferos magnetinio dipolio vektoriaus pozicionavimo tikslumas Žemės magnetinio lauko atžvilgiu, kuris yra reikalingas palydovo erdvinio pozicionavimo ir orientavimo sistemoms.
 - V. Pavaros su diskine jungė maksimalus sūkių dažnis yra ~ 30 aps/min, o su trikampe jungė ~ 27 aps/min, šis dydis gali būti valdomas, keičiant elektrinio signalo įtampos amplitudę. Toks sūkių dažnis yra pakankamas tam, kad palydovo magnetinio dipolio vektorius būtų orientuojamas pagal nustatytas koordinates Žemės magnetinio lauko atžvilgiu.
 - VI. Skirtumai tarp skaitinių ir eksperimentinių rezonanso dažnių reikšmių yra nedideli: žiedinio keitiklio atveju siekia ~ 1 %; vykdklių su skirtingų formų jungėmis $\sim 2\text{--}3$ %. Tikėtinos šių neatitikimų priežastys: netapačios medžiagų fizikinių charakteristikų skaitiniame ir natūriniame modelyje reikšmės, idealizuotos sąlygos sukurtuose BE modeliuose, valdymo elektrodų sudalinimo bei laidų litavimo įtaka ir kt.
4. Atlikus palydovo *ESTCube-1* konstrukcijos modifikaciją, buvo pakeistas egzistuojantis orientavimo ir pozicionavimo pavaros konstrukcinis mazgas magnetosferine pjezoelektrine pavara bei atlikta skaitinė analizė. Modifikuotas palydovo 1U modelis buvo naudojamas misijos analizei atlikti ir nustatyta, kad:
- I. Pasiūlytas pavaros konstrukcijos tūris ir masė ~ 10 % mažesni nei standartinė pavara, kuri buvo sumontuota šiame palydove imituojamos misijos metu ir užtikrina aktyvų trimatį (3D) palydovo orientavimą erdvėje.
 - II. Magnetosferinėje pjezoelektrinėje pavaroje esančio nuolatinio magneto kuriamos jėgos pakaktų palydovui orientuoti jam skriejant apskritimine orbita ne didesniame nei 700 km aukštyje. Palydovas, skriedamas orbita, pasiekia stacionarią padėtį per ~ 200 min nuo misijos pradžios/pozicijos pakeitimo.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

- [1] B. Kang ir J. Won, „Micro-Navigation Satellite Network Design and Analysis“. *Proceedings of 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, Savannah, GA, 2008.
- [2] J. Uchino ir J. R. Giniewicz, *Micromechatronics*, New York: Marcel Dekker Inc., 2003, pp. 1-32.
- [3] K. Ragulskis, *Vibrotechnika* 50, Kaunas: VĮ Mokslotyros institutas, 2013.
- [4] F. Mends, „What Are Piezoelectric Materials?“ 09 09 2019. [interaktyvus], [žiūrėta 29 06 2020]. Prieiga per: <https://sciencing.com/piezoelectric-materials-8251088.html>.
- [5] M. Chen-Glasser, L. Panpan, J. Ryu ir S. Hong, „Piezoelectric Materials for Medical Applications“. *Piezoelectricity. Organic and Inorganic Materials and Applications*, 2018.
- [6] I. Grybas, „*Research and development of a high-resolution piezoelectric rotary stage*“, daktaro disertacija, KTU, Kaunas, 2017.
- [7] M. Hustig, „Piezoelectric Inertia Motors - A Critical Review of history, Concepts, Design, Applications and Perspectives“, *Actuators*, t. 6, nr. 7, p. 35, 2017.
- [8] R. Vaccanore ir R. Möller. "*Cryogenic Behavior of Piezoelectric Bimorph Actuators*", 2000, pp. 275-282.
- [9] E. Mabrouk, „What are SmallSats and CubeSats?“. NASA, 26 02 2015. [interaktyvus], [žiūrėta 22 06 2020] . Prieiga per: <https://www.nasa.gov/content/what-are-smallsats-and-cubesats>.
- [10] NASA, „Basic Concepts and Processes for First-Time CubeSat Developers“, NASA, 10 2017. [interaktyvus], [žiūrėta 22 06 2020]. Prieiga per: https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/nasa_csli_cubesat_101_508.pdf.
- [11] E. S. Agency, „CubeSat - Deployer standards“ European Space Agency, [interaktyvus], [žiūrėta 22 06 2020] . Prieiga per: <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/cubesat-deployer>.
- [12] ISO, „ISO 17770:2017(en) Standard“ 2017. [interaktyvus], [žiūrėta 22 06 2020]. Prieiga per: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:17770:ed-1:v1:en>.
- [13] C. P. S. University, „CubeSat Design Specification“, [interaktyvus], [žiūrėta 22 06 2020] . Prieiga per: https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/56e9b62337013b6c063a655a/1458157095454/cds_rev13_final2.pdf.
- [14] I. Space. [interaktyvus], [žiūrėta 22 06 2020]. Prieiga per: <https://www.isispace.nl/wp-content/uploads/2018/07/ISIS-1U-CubeSat-Brochure.pdf>.
- [15] C. S. Agency. [interaktyvus], [žiūrėta 22 06 2020]. Prieiga per: <https://www.asc-csa.gc.ca/eng/search/images/watch.asp?id=7101&search=>.
- [16] Nanoavionics, „M3P“ [interaktyvus], [žiūrėta 22 06 2020]. Prieiga per: <https://nanoavionics.com/nanosatellite-buses/3u-nanosatellite-bus-m3p/>.
- [17] Nanoavionics, „M6P“ [interaktyvus], [žiūrėta 22 06 2020]. Prieiga per: <https://nanoavionics.com/nanosatellite-buses/3u-nanosatellite-bus-m6p/>.
- [18] S. R. Starin ir J. Eterno, „Attitude Determination and Control Systems“ 2011.

- [19] V. Francois-Lavet, „Study of passive and active attitude control systems for OUFTE nanosatellites“, Liège, 2009-2010.
- [20] M. Ovchinnikov, „Methods to Control the Attitude Motion of a Satellite by EARTH's Magnetic Field“, *Cooperation in Space, Euro-Asian Space Week : where East and West finally meet, Singapore*, t. 430, pp. 475-483, 23-27 11 1998.
- [21] A. Gaude ir V. Lappas, „Design and Structural Analysis of a Control Moment Gyroscope (CMG) Actuator for CubeSats“, *Aerospace*, t. 55, 11 05 2020.
- [22] J. D. Munoz, V. Nagabhushan, S. Asundi ir N. Fitz-Coy, „High fidelity simulation of swampsat attitude determination and control system“, *Spaceflight Mechanics*, 2011.
- [23] A. Čerečka ir G. Augustinavičius, „Pozicionavimo sistemos su lanksčiaisiais elementais histerizės tyrimas“, *Mokslas – Lietuvos Ateitis*, t. 6, nr. 6, pp. 607-611, 2014.
- [24] T. Muller, „SUNSAT-1 in its operational configuration“, 1999.
- [25] A. Ketsdever, „Attitude Determination and Control“, 05 10 2018. [interaktyvus], [žiūrėta 01 07 2020]. Prieiga per: <http://genderi.org/attitude-determination-and-control-dr-andrew-ketsdever.html>.
- [26] D. Gerthart ir S. Palo, „Passive Magnetic Attitude Control for CubeSat“, *24th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, Logan, UT, 2010.
- [27] Z. You, „A volume in Micro and Nano Technologies“, įtraukta *Space Microsystems and Micro/Nano Satellites*, Butterworth-Heinemann, 2018, p. 440.
- [28] J. Janutenaitė-Bogdaniienė, „Control of Piezobots' Trajectories for Nanosatellite Stabilization“, daktaro disertacija, VGTU Leidykla, Technika, Vilnius, 2019.
- [29] ISIS Space, [interaktyvus], [žiūrėta 05 07 2020]. Prieiga per: <https://www.isispace.nl/product/quadpack-cubesat-deployer/>.
- [30] J. Auret, „Design of an Aerodynamic Attitude Control System for a CubeSat“, Stellenbosch, 2012.
- [31] R. Berner, „Control Moment Gyro Actuator for Small Satellite Applications“, Stellenbosch, 2005.
- [32] F. Alvenes, „Satellite Attitude Control System“, 2012.
- [33] W. H. Steyn ir V. Lappas, „CubeSat solar sail 3-axis stabilization using panel tranformation and magnetic torquing“, *Aerospace Science and Technology*, 11 09 2011.
- [34] Y. Yang, *Spacecraft Modeling, Attitude Determination, and Control. Quaterion-Based Approach*, CRC Press, 2019.
- [35] A. Slavinskis, S. Latt ir I. Sunter, „ESTCube-1 nanosatellite for electric solar wind sail in-orbit technology demonstration“, *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 2014.
- [36] EnduroSAT, „1U CUBESAT STRUCTURE“, EnduroSAT, 2020. [interaktyvus], [žiūrėta 05 07 2020]. Prieiga per: <https://www.endurosat.com/cubesat-store/cubesat-structures/1u-cubesat-structure/>.
- [37] V. Kostopoulos ir A. Ampatzoglou, „Design, Analysis, Optimization, Manufacturing, and Testing of a 2U Cubesat“, *International Journal of Aerospace Engineering*, t. 2018, nr. CubeSat and Small satellites, p. 15, 12 06 2018.

- [38] ISIS, „Custom Solar Panels for CubeSats and Nanosats“, ISIS, 2020. [interaktyvus], [žiūrėta 05 07 2020]. Prieiga per: <https://www.isispace.nl/product/custom-solar-panels-cubesats-nanosats/>.
- [39] G. A. Structures, „NexGen CubeSat“, GTM Advanced Structures, [interaktyvus], [žiūrėta 05 07 2020]. Prieiga per: <https://gtm-as.com/aerospace/nextgen-cubesat/>.
- [40] K. Laizans, I. Sunter, K. Zalite, H. V. M. Kuuste, K. Tarbe, V. O. G. Allik, P. L. S. Laes ir M. Noorma, „Design of the fault tolerant command and data handling subsystem for ESTCube-1“, *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 2014.
- [41] ISIS, „Communication systems“, ISIS, [interaktyvus], [žiūrėta 05 07 2020] . Prieiga per: <https://www.isispace.nl/products/communication-systems/>.
- [42] Nasa, „NASA Demos CubeSat Laser Communications Capability“, NASA, 9 04 2019. [interaktyvus], [žiūrėta 05 07 2020] . Prieiga per: <https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=7371>.
- [43] X. Lu, J. Hu, L. Yang ir C. Zhao, „A Novel dual Stator-Ring Rotary Ultrasonic Motor“, *Sensors and Actuators*, t. 189, pp. 504-511, 15 1 2013.
- [44] J. Kulvelytė, „Pokelso Elementų Naudojamų Aukšto Pasikartojimo Dažnio Lazerinėse sistemose, Savybių tyrimas“, magistro darbas, Vilnius, 2017.
- [45] R. Ryndzionek, „Conception, Realisation et caractérisation D'un moteur Piezoelectrique Multicellulaire, pour Applications Automobiles“, Toulouse, 2015.
- [46] B. P. O. Inc., „CERAMIC MATERIALS“, Boston Piezo Optics Inc., [interaktyvus], [žiūrėta 29 06 2020] . Prieiga per: <https://www.bostonpiezooptics.com/ceramic-materials-pzt>.
- [47] D. A. DeAngelis ir G. W. Schulze, „Performance of PZT8 versus PZT4 piezoceramic materials in ultrasonic transducers“, *44th Annual Symposium of the Ultrasonic Industry Association, UIA 44th Symposium, 20-22 April 2015, Washington, DC, USA and of the 45th Annual Symposium of the Ultrasonic Industry Association, UIA 45th Symposium, 4-6 April 2016, Seattle, WA, USA*, 2016.
- [48] „Lithium Niobate Properties“, Roditi, [interaktyvus], [žiūrėta 29 06 2020] . Prieiga per: <http://www.roditi.com/SingleCrystal/LiNbO3/LiNBO3-Properties.html>.
- [49] D. A. Berlincourt, C. Cmolik ir H. Jaffe, „Piezoelectric Properties of Polycrystalline Lead Titanate Zirconate Compositions“, *IRE*, 04 09 1959.
- [50] O. Guillon, *Advanced Ceramics for Energy Conversion and Storage*, F. Oliveira, Mont., Deans, M., 2020, p. 711.
- [51] „PIEZOELECTRIC MODES OF VIBRATION“, Seacor Piezo Ceramics, [interaktyvus], [žiūrėta 29 06 2020] . Prieiga per: <https://seacorpiezo.com/definitions-and-terminology/piezoelectric-modes-of-vibration/>.
- [52] [interaktyvus], [žiūrėta 01 07 2020] . Prieiga per: <http://www.wlnpp.org/ares/Circuits/Parts/PIEZO.COM/TECH2I~1/TECH2I~1.JPG>.
- [53] R. Ryndzionek, L. Sienkiewicz, M. Michna ir F. Kutt, „Design and Experiments of a Piezoelectric Motor Using Three Rotating Mode Actuators“, *Sensors*, t. 19, nr. 23, p. 19, 26 11 2019.
- [54] K. Spanner ir B. Koc, „Piezoelectric Motors, an Overview“, *Actuators*, t. 5, nr. 1, 26 02 2016.

- [55] T. Martinez, G. Pillonnet, D. Vasic ir F. Costa, „Study and Modeling of a Traveling Wave Piezoelectric“, *Journal of Physics: Conference Series*, 2018.
- [56] „Piezoelectric Inertia Drives“, Physikinstrumente, [interaktyvus], [žiūrėta 29 06 2020]. Prieiga per: <https://www.physikinstrumente.com/en/technology/piezoelectric-drives/piezo-inertia-drives/>.
- [57] „PiezoWalk Piezo Motors“, [interaktyvus], [žiūrėta 29 06 2020]. Prieiga per: <https://www.physikinstrumente.com/en/technology/piezoelectric-drives/piezowalk-piezo-motors/>.
- [58] „Compact Drives, Fast and Self-Locking“, Physikinstrumente, [interaktyvus], [žiūrėta 29 06 2020]. Prieiga per: <https://www.physikinstrumente.com/en/technology/piezoelectric-drives/piline-ultrasonic-motors/>.
- [59] J. Erhart, L. Rusin ir L. Seifert, „Resonant frequency temperature coefficients for the piezoelectric resonators working in various vibration modes“, *Journal of Electroceramics*, t. 19, pp. 403-406, 01 2007.
- [60] A. Arnau, *Piezoelectric Transducers and Applications*, 2nd mont., Springer, 2008, p. 532.
- [61] Z. Li, P. Guo, Z. Wang, L. Zhao ir Q. Wang., „Design and Analysis of Electromagnetic-Piezoelectric Hybrid Driven Three-Degree-of-Freedom Motor“, *Sensors, special Issue "Development of Piezoelectric Sensors and Actuators"*, t. 20, nr. 6, 14 03 2020.
- [62] B. Keller ir W. Schinkoethe, „K. Bastian, and W. Schinkoethe, "Multi-degree-of-freedom“, *Jahresberichr IKFF 2013*, Stuttgart, 2013.
- [63] S. Shi, Z. Huang, J. Yang, Y. Liu, W. Chen ir K. Uchino, „Development of a compact ring type MDOF piezoelectric ultrasonic“, *Sensors and Actuators A: Physical*, t. 272, pp. 1-10, 31 01 2018.
- [64] J. Wang, Q. Quan, K. Xue ir H. Li, „Development of a three-DOF piezoelectric actuator using a thin cross-beam vibrator“, *International Journal of Mechanical Sciences*, t. 149, pp. 54-61, 24 09 2018.
- [65] Z. Chen, Y. Yang, X. Hong, J. Qiu ir X. Li, „Spherical Shape ultrasonic Motor with Two Degrees of Freedom“, *Chen, H., Yang, Y., Hong, X., Qiu, J., & Li, X. (2019). Spherical Shape Ultrasonic Motor With Two Degrees Of Freedom. 2019 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves and Device Applications (SPAWDA), 1-5., 2019.*
- [66] B. Lu, M. Aoyagi, T. Takano ir H. Tamura, „Examination of Sandwich-Type Multidegree-of-Freedom Spherical Ultrasonic Motor“, *Japanese Journal of Applied Physics*, t. 49, 20 07 2010.
- [67] "Professional-grade 3D CAD software for product design and engineering," Autodesk, 2020. [interaktyvus], [žiūrėta 10 08 2020]. Prieiga per: <https://www.autodesk.com/products/inventor/overview>.
- [68] „Fuion 360. Integrated CAD, CAM, and CAE software.“, Autodesk, [interaktyvus], [žiūrėta 10 08 2020]. Prieiga per: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>.
- [69] H. Tzou, *Piezoelectric Shells Distributed Sensing and Control of Continua*, Dordrecht, 1993, p. 320.

- [70] Comsol, „Understand, Predict, and Optimize Physics-Based Designs and Processes with COMSOL Multiphysics®“, Comsol, 2020. [interaktyvus], [žiūrėta 06 07 2020]. Prieiga per: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>.
- [71] C. Zhao, „Ultrasonic motors“, *Technologies and applications*, pp. 23-27, 2010.
- [72] „Aluminum 6061-T6“, [interaktyvus], [žiūrėta 07 07 2020]. Prieiga per: <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA6061T6>.
- [73] „Alumina - Aluminum Oxide Al₂O₃“, [interaktyvus], [žiūrėta 07 07 2020]. Prieiga per: <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=52>.
- [74] M. Zhang ir J. Zhao, „Electromechanical properties of lead zirconate titanate piezoceramics under the influence of mechanical stresses“, *IEEE Transaction on ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, t. 46, nr. 6, pp. 1518-1526, 6 11 1999.
- [75] G. Nader, E. N. Silva ir J. C. Adamowski, „Effective Damping Value of Piezoelectric Transducer Determined by Experimental Techniques and Numerical Analysis“, *ABCM Symposium Series in Mechatronics*, 2004.
- [76] N. Granick ir J. E. Stern, „Material Damping of Aluminum by a Resonant-Dwell Technique“, Nasa, Washington, 1965.
- [77] P. S. SOLUTIONS, „What are grinding and polishing diamond metallographic consumable material technologies?“, PRECISION SURFACING SOLUTIONS, [interaktyvus], [žiūrėta 04 02 2021]. Prieiga per: <https://www.precision-surface.com/what-are-consumables.html>.
- [78] V. K. Augustaitis, *Mechaninių virpesių pagrindai*, Vilnius: Žiburio leidykla, 2000, p. 319.
- [79] P. Žiliukas ir R. Barauskas, *Mechaniniai virpesiai*, Vilnius: Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla, 2008, p. 412.
- [80] „Material: Phosphor bronze C52100“, [interaktyvus], [žiūrėta 07 07 2020]. Prieiga per: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6417>.
- [81] Polytec, „PSV-500 Scanning Vibrometer. Datasheet“, Polytec, [interaktyvus], [žiūrėta 10 07 2020]. Prieiga per: https://www.polytec.com/fileadmin/d/Vibrometrie/OM_DS_PSV-500-1D_E_42445.pdf.
- [82] J. Moermod, „Resolution, Accuracy, and Repeatability“, 2010. [interaktyvus], [žiūrėta 11 07 2020]. Prieiga per: <https://automation-insights.blog/2010/04/05/resolution-accuracy-and-repeatability/>.
- [83] Aerotech, Aerotech, [interaktyvus], [žiūrėta 11 07 2020]. Prieiga per: https://www.aerotech.com/media/247122/section%201_engineering%20reference_resolution,%20accuracy,%20repeatability.pdf.
- [84] S. Starin, „19.1 Attitude Determination and Control Systems“, NASA, 2011. [interaktyvus], [žiūrėta 01 07 2020]. Prieiga per: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20110007876.pdf>.
- [85] P. Bayod, „Study and Design of the attitude control of a cubesat 1U based on reaction wheels“, Barcelona, 2019.

- [86] S. L. O. (. P. C. S. E. L. California Polytechnic State University, „CubeSat 101 Basic Concepts and Processes for First-Time CubeSat Developers“, NASA CubeSat Launch Initiative, 2017.
- [87] S. Rawashdeh, „Smart Nanosatellite Attitude Propagator (SNAP)“, 2019. [interaktyvus], [žiūrėta 15 07 2020]. Prieiga per: <https://se.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/68652-smart-nanosatellite-attitude-propagator-snap>.
- [88] „About Matlab,“ Matlab, [interaktyvus], [žiūrėta 15 07 2020]. Prieiga per: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.
- [89] S. Rawashdeh, „Passive Attitude Stabilization for Small Satellites,“ 2010.
- [90] H. Schumann, A. Berres, O. Maibaum ir T. Liebezeit, „Simulation-Based Testing of Small Satellite Attitude Control Systems“, *6th IAA Symposium on Small Satellites for Earth Observatio*, 2007.
- [91] H. L. Koenigsmann ir G. Gurevich, „AttSim, Attitude Simulation with Control Software in the Loop“, *Microcosm*, p. 13.
- [92] E. M. Relations, „N° 12–2013: ESA’s Vega launcher scores new success with Proba-V“, 7 5 2013. [interaktyvus], [žiūrėta 15 07 2020]. Prieiga per: http://www.esa.int/Newsroom/Press_Releases/ESA_s_Vega_launcher_scores_new_sccess_with_Proba-V.
- [93] „ESTCube-1 (Estonian Student Satellite-1)“, Sharing Earth Observation Reources, 2015. [interaktyvus], [žiūrėta 16 07 2020]. Prieiga per: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/e/estcube-1#Bw@hK13cHerb>.
- [94] EstCube, „EstCube“, [interaktyvus], [žiūrėta 16 07 2020]. Prieiga per: <https://www.estcube.eu/en/home>.
- [95] H. Ehrpais, J. kutt, I. Sunter, E. Kulu, A. Slavinskis ir M. Noorma, „Nanosatellite spin-up using magnetic actuators: ESTCube-1 flight results“, *Acta Astronautica*, t. 128, pp. 210-216, 2016.
- [96] S. e. al., „ESTCube-1 In-Orbit Experience and Lessons Learned“, *Aerospace and Electronic Systems*, t. 30, nr. 8, pp. 12-22, 2015.
- [97] „DK3WN SatBlog“, 2013. [interaktyvus], [žiūrėta 25 07 2020]. Prieiga per: <https://www.satblog.info/category/estcube-1/page/24/>.
- [98] L. Daga, „The ECI Satellite Position Calculation in Matlab“, [interaktyvus], [žiūrėta 16 07 2020]. Prieiga per: <http://leonardodaga.insyde.it/DVS/SatPos.htm>.
- [99] K. Dismukes, „Definition of Two-line Element Set Coordinate Syste“, Nasa, 23 09 2011. [interaktyvus], [žiūrėta 16 07 2020] . Prieiga per: https://spaceflight.nasa.gov/realdata/sightings/SSapplications/Post/JavaSSOP/SSOP_Help/tle_def.html.
- [100] F. Espenak, „Calendar Dates“, Nasa, 04 01 2007. [interaktyvus], [žiūrėta 01 08 2020]. Prieiga per: <https://eclipse.gsfc.nasa.gov/SEhelp/calendar.html>.
- [101] S. Jayaram ir D. Pais, „Model-based Simulation of Passive Attitude Control of SLUCUBE-2 Using Nonlinear Hysteresis and Geomagnetic Models“, *International Journal of Aerospace Sciences*, t. 1, nr. 4, pp. 77-84, 2012.

- [102] D. Vaškas, „Nanopalydovo stabilizavimo naudojant magnetinio lauko sensorius ir pjezopavarą tyrimas“, magistro darbas, KTU, Kaunas, 2019.
- [103] „Digital output magnetic sensor: ultra-low-power, high-performance 3-axis magnetometer“, STmicroelectronics, [interaktyvus], [žiūrėta 15 08 2020]. Prieiga per: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/lis3mdl.pdf>.
- [104] „LIS2MDL: Digital output magnetic sensor: ultra-low-power, high-performance 3-axis magnetometer“, STMicroelectronics, [interaktyvus], [žiūrėta 15 08 2020]. Prieiga per: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/lis2mdl.pdf>.
- [105] B. R. Castelo, „CubeSat Mission Planning Toolbox“, San Luis Obispo, 2012.
- [106] J. P. Mason, B. Lamprecht ir T. Woods, „CubeSat On-Orbit Temperature Comparison to Thermal-Balance-Tuned Model Predictions“, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, t. 32, nr. 6, p. 47, 2017.
- [107] „Mission Planning Guide“, Spaceflight, 2019.
- [108] K. Khalil ir S. Samwel, „Effect of Air Drag Force on Low Earth Orbit Satellites During Maximum and Minimum Solar Activity“, *Space Research Journal*, pp. 1-16, 2016.
- [109] A. Tavakoli, A. Faghihinia ir A. Kalhor, „An Innovative Test Bed for Verification of Attitude Control System“, *Aerospace and Electronic Systems Magazine*, t. 32, nr. 6, pp. 16-22, 2017.
- [110] J. Lloyd, S. Matlock, M. Nieberding ir P. A. Huan, „Permanent Magnet Active Attitude Control of a CubeSat for Space Instruments“, *Lunar and Planetary Science Conference*, Woodlands, Texas, 2015.
- [111] R. Cardoso da Silva, S. Battistini, R. Borges ir C. Cappelletti, „Tabletop testbed for attitude determination and control of nanosatellites“, *Journal of Aerospace Engineering*, p. 30, 2018.
- [112] M. D., A. Bahu, G. Curzi ir A. Togni, „A Dynamic Testbed for Nanosatellites Attitude Verification“, *Aerospace*, t. 7, nr. 3, p. 19, 2020.
- [113] L. Jones-Wilson ir S. Mohan, „Small Satellite Dynamics Testbed (SSDT)“, Nasa, [interaktyvus], [žiūrėta 14 07 2020]. Prieiga per: <https://scienceandtechnology.jpl.nasa.gov/small-satellite-dynamics-testbed-ssdt>.
- [114] Polytec, "VIBRATION MEASUREMENT METHODS," Polytec, [interaktyvus], [žiūrėta 10 07 2020]. Prieiga per: [https://www.polytec.com/eu/vibrometry/technology/\\$laser-doppler-vibrometry/](https://www.polytec.com/eu/vibrometry/technology/$laser-doppler-vibrometry/).
- [116] Laderaranch, „Basic schematic of a laser Doppler vibrometer.“, 18 09 2008. [interaktyvus], [žiūrėta 10 07 2020]. Prieiga per: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:LDV_Schematic.png.
- [117] „Encyclopedia of Condensed Matter Physics“, *Damjanovic, D.*, Lausanne, 2005, pp. 300-309.

6. PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS

Mokslinės informacijos instituto duomenų bazės „*ISI Web of Science*“ leidiniuose, turinčiuose citavimo indeksą

Tarptautiniai leidėjai

- Jūrėnas, V.; Kazokaitis, G.; Mažeika, D. 3DOF ultrasonic motor with two piezoelectric rings // *Sensors: Special issue: Development of piezoelectric sensors and actuators*. Basel : MDPI AG. ISSN 1424-8220. eISSN 1424-8220. 2020, vol. 20, iss. 3, art. no. 834, p. 1-14. DOI: 10.3390/s20030834. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); Scopus; EI Compendex Plus] [IF: 3,031; AIF: 3,797; IF/AIF: 0,798; Q1 (2018, InCites JCR SCIE)]
- Jūrėnas, V.; Kazokaitis, G.; Mažeika, D. Design of Unimorph Type Multi-DOF Ultrasonic Motor// *Applied Sciences (ISSN 2076-3417): Special Issue: Ultrasonic Transducers and Related Apparatus and Applications*. Basel: MDPI AG. Appl. Sci. 2020, 10(16), 5605; <https://doi.org/10.3390/app10165605> [IF:2.4; Q2 (2018, InCites JCR SCIE)]

Mokslinės informacijos instituto duomenų bazės „*ISI Web of Science*“ leidiniuose, neturinčiuose citavimo indekso

Tarptautiniai leidėjai

- Kazokaitis, G.; Jurenas, V. Spherical magnetic drive for attitude control on nano satellites // *Journal of applied mechanical engineering: conferenceseries.com joint event: 2nd international conference on advanced robotics, mechatronics and artificial intelligence and 3rd international conference on design and production engineering: December 03-04, 2018, Valencia, Spain*. Hyderabad: OMICS International. ISSN 2168-9873. 2018, vol. 7, p. 73. DOI: 10.4172/2168-9873-C2-020.
- Jūrėnas, V.; Kazokaitis, G.; Vaškas, D. Ultrasonic Motor with Spherical Rotor for Nanosatellite Orientation // *15th International Conference Mechatronic Systems and Materials (MSM 2020)*, 1-3 July 2020, Białystok, Poland: book of abstracts. Białystok : Białystok University of Technology. 2020. pp. 1-5. ISBN:978-1-7281-6957-6

Nacionaliniai leidėjai

- Kazokaitis, G.; Jūrėnas, V.; Eidukynas, D. A study on nano satellite orientation and attitude control systems for laser communication technologies // *Mechanika 2017 : proceedings of the 22nd international scientific conference, 19 May 2017, Kaunas University of Technology, Lithuania / Kaunas University of Technology, Lithuanian Academy of Science, IFTOMM National Committee of Lithuania, Baltic Association of Mechanical Engineering*. Kaunas : Kaunas University of Technology. ISSN 1822-2951. 2017, p. 177-182
- Kazokaitis, G.; Jūrėnas, V.; Eidukynas, D. Research and analysis of spherical magnetic drive for attitude control on nano satellites // *Vibroengineering*

procedia : [29th International conference on vibroengineering, Vilnius, Lithuania, December 1st 2017]. Kaunas : JVE International. ISSN 2345-0533. 2017, vol. 15, p. 50-55. DOI: 10.21595/vp.2017.19431. [Scopus; ; Academic Search Complete]

- Kazokaitis, G.; Jurėnas, V. Spherical piezoelectric magnetic drive // Mechanika 2019: proceedings of the 24th international scientific conference, 17 May 2019, Kaunas University of Technology, Lithuania / Kaunas University of Technology, Lithuanian Academy of Science, IFTOMM National Committee of Lithuania, Baltic Association of Mechanical Engineering. Kaunas : Kaunas University of Technology. ISSN 1822-2951. 2019, p. 76-79.

Konferencijų pranešimai

Tarptautiniai leidėjai

- Kazokaitis, G.; Jurenas, V. Spherical piezoelectric drive // 8th international conference on smart materials and structures, August 01 - 02, 2019, Dublin, Ireland. London: iMedPub. 2019, p. 34.

7. PRIEDAI

7.1. 1 priedas. Palydovo misijos planavimo etapai, jų aprašai, palydovų sistemų bandymų įranga ir metodai

Palydovo charakteristikų apibrėžimas

Prieš pradėdant palydovo projektavimo darbus, būtina apibrėžti palydovo misiją bei techninius aspektus: kas bus siekiama misijos metu, kokie pagrindiniai kriterijai, kuriais remiantis palydovas turės atlikti savo misijas. Dažnu atveju siūloma peržvelgti analogiškų misijų, kurios jau yra įvykusios, sukauptus duomenis bei praktikas, siekiant išvengti klaidų bei pasinaudoti jau turima informacijos baze.

Misijos trukmė

Kitas etapas – planuojamos misijos trukmė. Misijos trukmė apibrėžia, kokia įranga bei sąlygos yra reikalingos palydovui įvykdyti keliamus reikalavimus. Nuo misijos trukmės priklauso, kokia įranga bus montuojama palydove, kokios talpos prireiks baterijos, kokią komunikacijos įrangą reikės sumontuoti į palydovą. Išvardintų ir visų likusiųjų parametrų aibė apibrėš, kokios techninės galimybės yra reikalingos palydovui atlikti keliamus uždavinius.

Palydovo dydis

Žinant, kokią pagrindinę veiklą vykdys palydovas, kokia tos misijos trukmė ir kokia įranga bus montuojama palydove, galima spręsti apie palydovo dydį. Kuo misijos yra ilgesnės ir kuo sudėtingesnius uždavinius palydovas atlieka, tuo sudėtingesnė įranga turės būti sumontuota palydove. Įrangos sudėtingumas, jos kiekis, baterijų talpis, Saulės elementų kiekis bei dydis nulemia, kokio dydžio turės būti projektuojamas mažasis palydovas – 1U, 2U ar 3U.

Palydovo orbita

Visos ankstesnės misijos, neatsižvelgiant į palydovo tipą, buvo vykdomos žemojoje Žemės orbitoje (ŽŽO), ateityje misijos gali būti įvairių tipų orbitų, pradėdant nuo ypatingai žemų orbitų iki geosinchroninių orbitų ir už Žemės orbitos ribų. Nors orbitos parametrai ir apibūdina misijos tipą, tačiau jo nenustato, nes dauguma *CubeSat* palydovų misijų vyko iki 800 km orbitoje, pvz., pirmieji palydovai skriejo ŽŽO. Mokslinės misijos artimiausioje ateityje galės vykti ir vidutinėje Žemės orbitoje (MEO) (iki 2000 km) ir geosinchroninėje (GEO) orbitoje. Pagrindinė priežastis, dėl kurios bandymai su palydovais apsiriboja ŽŽO, yra dėl ribotos siųstuvų galios. Jei *CubeSat* turėtų palaikyti ryšį su palydovu, naudodamas MEO, tam prireiktų kur kas daugiau nei vieno vato siųstuvo, tipinio dabartinėse ŽŽO misijose [105].

Palydovo projektavimas

Pagrindinės palydovų sistemos buvo išvardintos 2.4 poskyryje. Projektavimo metu, laikantis visų nurodymų ir apribojimų, kurie yra nurodyti *CubeSat* palydovų standarte (žr. 1.1 poskyrį) bei palydovus paleidžiančios organizacijos, gaminamos palydovo sistemos ir sudedamos į palydovo korpusą. Šio etapo metu, laikantis griežtų

reikalavimų ir atsižvelgiant į duomenis iš praėjusių misijų, atliekama palydovo gamyba. Kadangi nemažai dalių ir sistemų yra standartizuota, egzistuoja daug įmonių ir institucijų, kurios parduoda sudedamąsias sistemų dalis, jau patikrintas ir naudotas misijose. Tai leidžia apsisaugoti nuo netikėtumų bei klaidų gaminant palydovą.

Žemiau išvardintos pagrindinės gairės, kuriomis vadovaujantis reikėtų projektuoti bei gaminti palydovą [86]:

- paprastas dizainas/konstrukcija;
- svarbiausi elementai turi būti palydovo išorėje;
- laikytis nustatytų palydovo charakteristikų bei matmenų;
- pagrindinių sistemų dubliavimas;
- misijose naudotų ir patikrintų komponentų naudojimas;
- sertifikuotų baterijų naudojimas;
- aukštatemperatūrių medžiagų naudojimas.

Kuo paprastesnė palydovo konstrukcija, tuo paprasčiau gauti visus reikalingus leidimus misijai įgyvendinti. Reikia stengtis nenaudoti sprogių, lengvai užsidegančių medžiagų ar sistemų. Esant itin sudėtingai konstrukcijai, paleidimą organizuojanti ir įgyvendinanti organizacija gali priimti sprendimą nepaleisti/nepriimti palydovo, ypač jei tai pirmoji palydovo kūrėjų misija su sudėtingos konstrukcijos palydovais.

Prieš paleidžiant palydovą į orbitą atliekama nemažai testų, susijusių su konstrukcijos patikimumu bei atsparumu tam tikroms sąlygoms, kurios susidaro, kai palydovas keliamas į orbitą. Šių testų metu neretai komponentai sugenda ir lūžta, tad lengvas priėjimas prie esminių, lūžtančių komponentų ir paprastas jų pakeitimas ar remontas pagreitina testavimo procesą ir kartu reikalingų testų atlikimą.

Palydovo sistemų aprašuose yra nurodyti palydovo aukščio, pločio bei ilgio matmenys, masės pasiskirstymas, užrakto paleidimo sistemos įgyvendinimas ir daugelis kitų apribojimų bei reikalavimų. Palydovas, kuris projektuojamas misijai atlikti, privalo laikytis visų nurodytų reikalavimų ir negali paleidimo sistemose turėti išsikišančių dalių, papildomų komponentų.

Palydove yra nemažai sistemų, kurios potencialiai gali sugesti testavimo ar paleidimo metu. Norint maksimaliai apsisaugoti nuo galimų sutrikimų esmines sistemas, kurias įmanoma, reikėtų papildomai dubliuoti, pvz., Saulės elementų išskleidimo, duomenų siuntimo ir gavimo, energijos valdymo.

Atliekant projektavimą, ypač jeigu tai yra viena pirmųjų misijų, reikėtų naudoti kiek įmanoma standartines, žinomų gamintojų sistemas, kurios jau ne vieną kartą buvo patikrintos ir paleistos į misijas. Tokiu būdu siekiama apsisaugoti nuo galimų netikėtumų, kai paleidus palydovą paaiškėja, kad jo viena ar kita sistema nefunkcionuoja ar funkcionuoja netinkamai.

Vienas pačių svarbiausių elementų, nuo kurio priklauso misijos trukmė ir sėkmė – tinkamos baterijos. Baterijos apskritai yra padidintos rizikos objektas, nes pažeistos mechaniškai ar termiškai jos sprogs. Todėl labai svarbu atkreipti dėmesį bei rinktis tokio tipo baterijas, kurios yra pritaikytos plačiam temperatūros intervalui, mechaniškai patikimos bei sertifikuotos naudojimui kosmose.

Palydovai paleidimo ir misijos metu yra veikiami įvairių temperatūrų, nuo -20° iki $+60^{\circ}$ [106]. Projektuojant palydovą reikia numatyti, kad jis naudojamas plačiame temperatūrų intervale, atitinkamai parinkti komponentus, kurie galėtų tokias temperatūras atlaikyti. Tačiau būtina atminti, kad medžiagos, kurios naudojamos palydove, turi atitikti reikalavimus, jog baigus misiją, kai palydovas patenka į Žemės atmosferą, jis turi sudegti. Tam medžiagos turi būti parinktos tokios, kad tenkintų šį reikalavimą.

Palydovo ir jo sistemų testavimas

Prieš palydovui patenkant į paleidimo platformą, sistema turi atlikti nemažai testų, kurių metu tikrinamas palydovo sistemų darbas ir gebėjimas atlaikyti įvairius išorinius trukdžius. Dalis testų, kurie atliekami su palydovu, aprašyti toliau pateiktoje 7.1 lentelėje [86, 107].

7.1 lentelė. Testavimo etapai ir procedūros

Testo pavadinimas, procedūra	Tikslas
Išorinių trukdžių testai - kvazistatinių apkrovų; - harmoninių virpesių; - atsitiktinių virpesių; - smūgiavimo; - terminių	Patikrinti palydovo mechaninių sistemų patikimumą, parengimą skrydžiui
Baterijų sertifikatų patikra	Atitikimo transportavimui ir patikimumui patikra
Elektrinių jungčių ir komponentų patikra	Elektrinių ir elektronikos sistemų patikra pagal galiojančius reikalavimus
EMI/ECM spinduliuotės bei jautrumo testai	Atitikimo radijo ir elektromagnetinių bangų trukdžiams
Švaros patikra	Reikalavimai švarai, dulkių kiekiui
Vakuuminės kameros patikra	Sistemos gebėjimas dirbti vakuume
VPSŽ patikra	Atitikimas pagal VPSŽ reikalavimus
Palydovo paleidimo, atsiskyrimo bei suderinamumo su paleidimo sistema tyrimai	Paleidimo ir transportavimo sistemų suderinamumo patikra

Mechaniniai, išorinių trukdžių testai skirti ištestuoti sistemos atsakus į įvairius žadinimo tipus. Šie testai atliekami specialiuose stenduose, kurie kartu su pritvirtintu palydovu virpa įvairiais dažniais, tikrinant sistemos atsakus ir sistemų patikimumą. *CubeSat* tipo palydovai turi atitikti virpesių reikalavimus, jog sistemos tikrasis dažnis yra >150 Hz.

Palydovams keliami dideli reikalavimai, kurie nurodo, kokios baterijos gali būti integruojamos. Šie reikalavimai yra pagrįsti standartais, pvz., AFSPCMAN 91-710, Jungtinių Tautų nurodytu standartu „Pavojingų daiktų nurodymai bei testavimo kriterijai“.

Siekiant atitikti elektrinių bei elektronikos sistemų ir spinduliuočių atsparumo bei tinkamumo testus, atliekami bandymai, kurių metu tikrinama, kaip palydovai gali

tinkamai atlaikyti kritines situacijas – staigius energijos šuolius, dideles elektromagnetines spinduliuotes. Palydovuose privalo būti bent du nepriklausomi jungikliai, kurie atjungia bet koki energijos tiekimą sistemoms. Palydovai paleidimo metu, iki tol, kol nėra išleisti iš paleidimo platformos, turi būti su nutrauktu energijos tiekimu ir tik po paleidimo iš platformos, praėjus 30 s, palydovas gali būti įjungiamas. Sistemos turi būti įžemintos.

Palydovai, prieš patekdami į testavimo aplinką, turi būti surinkti ir išvalyti laikantis švaros reikalavimų. Šie reikalavimai nurodo, kad privaloma laikytis SN-C-0005 minimalios švaros standarto.

Palydovai yra tikrinami vakuomo kameroje. Šių testų metu palydovas yra patalpinamas į vakuomo kamerą, nustatoma aplinkos temperatūra 60 °C ir slėgis $1,33 \times 10^{-5}$ mbar. Šio proceso metu taip pat išgarinamos medžiagos ir įvairūs teršalų likučiai, kurie potencialiai galėtų garuoti misijos metu, taip užteršdami matavimo prietaisus palydovo viduje.

Palydovų gamintojas turi pateikti testams palydovo palaikymo ir valdymo sistemą (VPSŽ), reikalingą integracijai atlikti ir ištestuoti. Palydovo gamintojo pateikiama sistema turi atitikti saugos reikalavimus ir orlaivio saugumo reikalavimus, kaip nurodyta konkrečios misijos paleidimo dokumentacijoje. Šių testų metu tikrintojams privaloma pateikti visą reikalingą dokumentaciją bei prieigą prie sistemos. Palydovo gamintojas turi pateikti eksploatacines medžiagas, raketinį kurą, reikalingą integracijai ir testavimo veiklai.

Palydovo pozicionavimo sistemų bandymai

Šiame darbe pristatyta ir nagrinėjama palydovo orientavimui erdvėje skirta energetiškai efektyvi pjezoelektrinė ultragarsinė pavara. Anksčiau buvo pristatytos bendrosios testavimo prieš misiją gairės bei etapai. Šiame poskyryje bus plačiau apžvelgtos sistemos, skirtos palydovo pozicionavimo ir orientavimo uždaviniams atlikti.

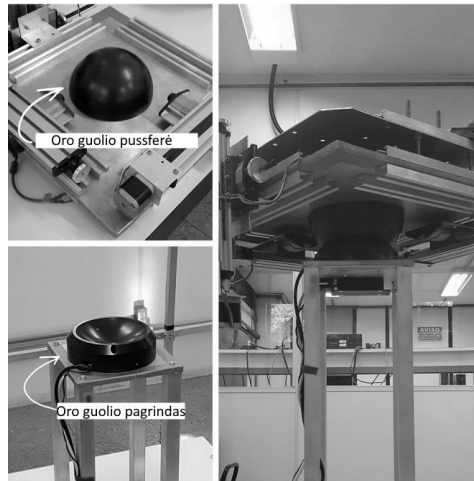
Palydovų sistemos ir jų specifika yra tokia, kad bet kokie testavimo žingsniai misijos metu yra nepageidaujami – tai kainuoja, neįmanoma padaryti pakeitimų, susijusių su konstrukcinėmis klaidomis ar netobulais sprendimais. Todėl, prieš paleidžiant palydovą į misiją, atliekami sistemų bandymai ir pagal gautus rezultatus daromi pakeitimai, kurie vėliau vėl testuojami.

Palydovai misijos metu skrieja žemojoje Žemės orbitoje, kurioje oro kiekis yra labai mažas, tačiau vis tiek egzistuoja [108]. Siekiant atlikti sistemų bandymus, kurie imituoja misijos metu veikiančias jėgas, reikalingi specialūs bandymų standai, kuriuose patalpinami palydovai. Šie bandymų standai skirti simuliuoti tokioms sąlygoms, kurias Žemėje sunku išgauti: nulinę ar pakankamai žemą gravitaciją; labai mažą oro tankį ar apskritai beorę aplinką, labai mažas trinties ir pan. Todėl gaminant testavimo įrangą stengiamasi maksimaliai sumažinti Žemėje veikiančias jėgas, sukurti sąlygas, kurios kuo artimiau atkartotų sąlygas misijos metu. Taip pat, bandymų metu testuojamos valdymo sistemos, stebėjimo ir orientavimosi erdvėje sistemos.

Vienas svarbiausių aspektų atliekant bandymus su pozicionavimo ir orientavimo įranga, yra standas, kuris galėtų minimalizuoti veikiančias trinties jėgas.

Testavimo stendo viduje patalpintas palydovas, suaktyvintus orientavimo mechanizmą, turi atlikti orientavimo ir/ar pozicionavimo uždavinius. Šie uždaviniai yra atliekami erdvėje – stendas turi tris laisvės laipsnius, kuriais palydovas gali būti pasukamas.

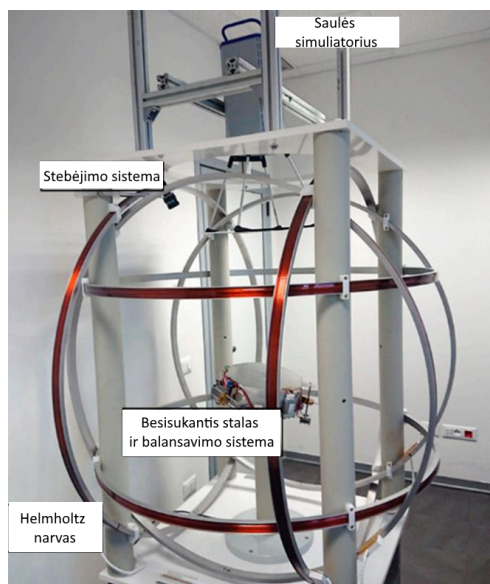
Tokio tipo eksperimentai atliekami bandymų stende, kuriame trinties mažinimo principai gali būti įvairūs: oro guoliai, vandens paviršius [109, 110]. Taip pat, tokiuose stenduose neretai būna sumontuota papildoma įranga, kurios padedamas palydovas gali atlikti jam skirtus uždavinius: elektromagnetinės ritės, imituojančios Žemės magnetinį lauką, Saulės ar žvaigždžių imitacijos, leidžiančios palydovo įrangai nusistatyti savo orientaciją erdvėje. Keletas tokių bandymų stendų pavyzdžių pateikta 7.1–7.5 pav.



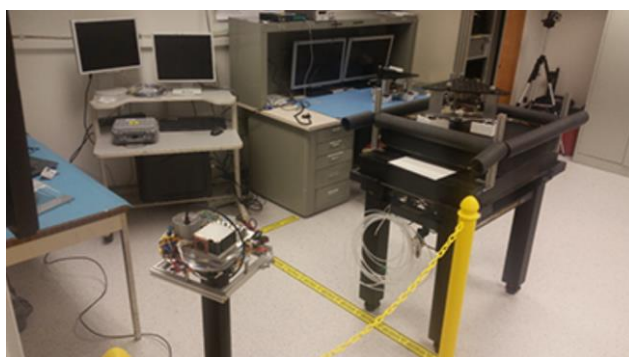
7.1 pav. Sferinio guolio ant oro pagalvės mazgas, skirtas palydovo sistemų bandymams [111]



7.2 pav. Helmholtzo rėmas, kurio viduje sumontuota sistema su oro guoliu, skirta palydovų sistemų bandymams atlikti [111]



7.3 pav. Universalus dinaminių bandymų stendas, skirtas nanopalydovų bandymams atlikti [112]



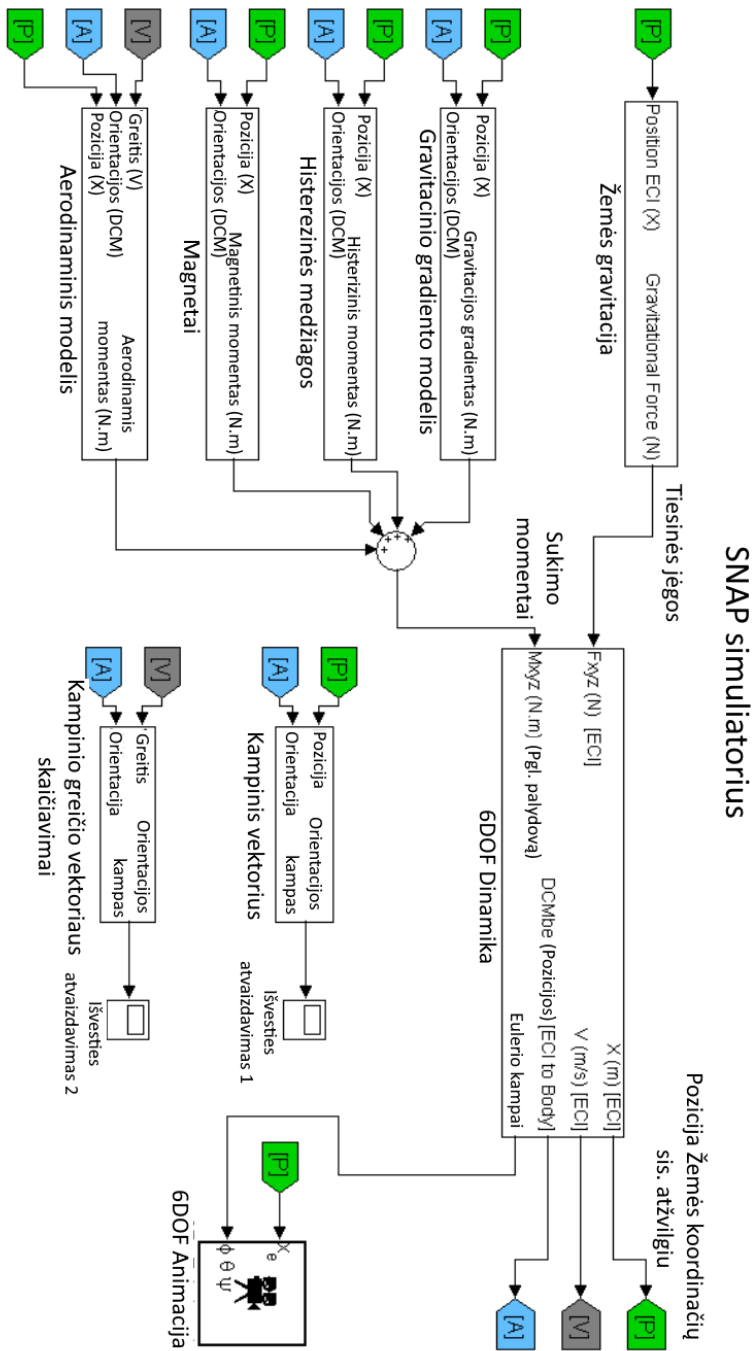
7.4 pav. Mažųjų palydovų orientavimo ir pozicionavimo sistemų bandymų stendas NASA laboratorijoje [113]



7.5 pav. Mažųjų palydovų bandymų stendas ant vandens pagalvės [110]

Kaip galima pastebėti iš bandymų įrangos, esminės tokių sistemų dalys yra šios: stalas su oro ar vandens pagalve, kurioje sumažinama trintis, aplink stalą sumontuojama rėminė konstrukcija su elektromagnetinėmis ritėmis, kuriomis galima imituoti Žemės magnetinio lauko jėgą, atitinkamai palydovas turi gebėti persiorientuoti pagal simuliuojamą Žemės magnetinį lauką; Saulės bei žvaigždžių imitavimo sistemos, leidžiančios patikrinti palydovo jutiklių ir programinės įrangos bei valdymo sistemų darbą.

7.2. 2 priedas. SNAP įrankio blokinė veikimo schema



7.6 pav. SNAP programinio paketo skaičiavimų blokinė schema

7.3. 3 priedas. Magneto pjezoelektrinės pavaros įrenginys



(10) **LT 6728 B**

(12) **PATENTO APRAŠYMAS**

(11) Patento numeris: **6728** (51) Int. Cl. (2020.01): **G01C 19/00
H02N 2/00**

(21) Paraiškos numeris: **2018 531**

(22) Paraiškos padavimo data: **2018-06-19**

(41) Paraiškos paskelbimo data: **2019-12-27**

(45) Patento paskelbimo data: **2020-04-10**

(62) Paraiškos, iš kurios dokumentas išskirtas, numeris: —

(86) Tarptautinės paraiškos numeris: —

(86) Tarptautinės paraiškos padavimo data: —

(85) Nacionalinio PCT lygio procedūros pradžios data: —

(30) Prioritetas: —

(72) Išradėjas:

**Gražvydas KAZOKAITIS, LT
Vytautas JÜRĖNAS, LT
Darius EIDUKYNAS, LT**

(73) Patento savininkas:

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS, K. Donelaičio g. 73, 44249
Kaunas, LT**

(74) Patentinis patikėtinis/atstovas:

**Reda ŽABOLIENĖ, Advokatų profesinė bendrija „Žabolienė ir partneriai
METIDA“, Verslo centras VERTAS, Gynėjų g. 16, LT-01109 Vilnius, LT**

LT 6728 B

(54) Pavadinimas:

Magneto pjezoelektrinės pavaros įrenginys

(57) Referatas:

Šiuo aprašymu pateikiamas techninis sprendimas skirtas mažų kosminių erdvėlaivių orientavimui, pasukimui, nukreipimui erdvėje. Pateikiamas įrenginys, kurio veikimas pagrįstas pjezoelektriniu efektu. Įrenginį sudaro mechaninė dalis ir elektrinė dalis. Įrenginio veikimo principo esmę sudaro nustatytų elektros signalų veikiamų pjezoelementų kuriami virpesiai, kurie generuoja ir perduoda judesį rutulio formos magnetui (rotoriui), turinčiam vieną porą (šiaurės ir pietų) polių. Parinkta pjezoelektrinių keitiklių forma ir padėtis rotorius atžvilgiu leidžia reikiama kryptimi pasukti rotorių apie jo centrą. Įrenginys pasižymi itin didele precizinio pozicionavimo skryra ir greitaveika, efektyviai vartojama elektros energija, nesudėtinga konstrukcija, nėra guolinių mazgų (dėl ko padidėja veikimo patikimumas). Įrenginys užima nedaug vietos, todėl nesudėtingai pritaikomas mažų ir nano-erdvėlaivių nukreipimui. Įrenginio laikančios, korpuso konstrukcijos paprastai integruojamos į erdvėlaivio konstrukciją. Įrenginys negeneruoja elektromagnetinio triukšmo.

TECHNIKOS SRITIS

Išradimas priskiriamas pjezoelektrinių pavarų sričiai, o konkrečiai, pjezoelektrinio elemento panaudojimas magnetinio rotoriaus pasukimui. Aprašomas įrenginys gali būti naudojamas mažų objektų orientavimui erdvėje, mažų, nano-tipo palydovų orientavimo ir pozicionavimo sistemose, kai palydovas yra kosmose ir panašiai.

TECHNIKOS LYGIS

Yra žinomas įrenginys, kuriame nuolatinis magnetas yra sumontuotas šarnyrinėje sistemoje su elektromechanine pavara, leidžiančioje keisti magneto kampinę padėtį erdvėje. Norint pakeisti nanopalydovo orientaciją ar pozicijuoti jį erdvėje, sukami elektros varikliai, kurie atitinkamai pasuka nuolatinį magnetą. Tokiu būdu, palydovas veikiamas Žemės magnetinio lauko ir tinkamos nuolatinio magneto orientacijos, yra pakreipiamas norima kryptimi (Rex A. Bair. Gimbaled Permanent Magnet-Based Attitude Control for Pico/Nano Satellites, The University of Arkansas, USA, 2011). Tokia sistema užima daug vietos. Lyginant su nuolatinium magnetu, elektros varikliai, ašys, pasukimo mechanizmai, jutikliai ir korpusas užima didžiausią dalį viso įrenginio tūrio. Atitinkamai, didėjant įrenginio gabaritams, didėja ir jo masė, o tai blogina tokios palydovų orientavimo ir pozicionavimo sistemos efektyvumą.

Dokumente US5476018 (publikuotas 1995 gruodžio mėn. 19d.) pateikiamas įrenginys su elektromagnetine pavara, kuriame varomąjį judesį atlieka magnetiniai laukai, sukantys sferinį rotorių. Sistemos veikimas pagrįstas tuo, kad sferinis rotorius yra įtaisytas į rėmą, o aplink jį išstatyti elektromagnetai. Kuriamas valdomas magnetinis laukas suka rotorių norima kryptimi. Taip kuriamas mechaninis, giroskopo principu veikiantis, momentas. Nurodytame įrenginyje rotorius yra išstatomas naudojant sferinius hidrostatinus guolius. Veikiant tokiam įrenginiui, reikia daug energijos bei kyla nemažai elektromagnetinio triukšmo. Tokias pavaras yra sudėtinga integruoti mažuose tūriuose, todėl jas dėl vietos ir energetinių resursų komplikuoja naudoti mažuosiuose palydovuose.

Apibendrinus aukščiau pateiktus technikos lygio dokumentus, galima išskirti tokius trūkumus:

- įrenginiui veikti naudojama daug elektros energijos, įrenginys nėra energiškai efektyvus,

- įrenginys generuoja daug elektromagnetinio triukšmo,
- įrenginį sudėtinga, beveik neįmanoma pritaikyti mažuose įrenginiuose, pvz., nanopalydovuose,
- sudėtinga, iš daugelio komponentų sudaryta sistema, dėl ko mažėja efektyvumas, patikimumas.

Šiame aprašyme pateikiamas techninis sprendimas neturi aukščiau išvardintų trūkumų.

IŠRADIMO ESMĖ

Šiuo aprašymu pateikiamas techninis sprendimas skirtas mažų kosminių erdvėlaivių orientavimui, pasukimui, nukreipimui erdvėje. Pateikiamas įrenginys, kurio veikimas pagrįstas pjezoelektriniu efektu. Įrenginį sudaro mechaninė dalis ir elektrinė dalis. Įrenginio veikimo principo esmę sudaro nustatytų elektros signalų veikiamų pjezoelementų kuriami virpesiai, kurie generuoja ir perduoda judesį rutulio formos magnetui (rotoriui), turinčiam vieną porą (šiaurės ir pietų) polių. Parinkta pjezoelektrinių keitiklių forma ir padėtis rotoriaus atžvilgiu leidžia reikiama kryptimi pasukti rotorių apie jo centrą.

Įrenginys pasižymi itin didele precizinio pozicionavimo skyra ir greitaveika, efektyviai vartojama elektros energija, nesudėtinga konstrukcija, nėra guolinių mazgų (dėl ko padidėja veikimo patikimumas). Įrenginys užima nedaug vietos, todėl nesudėtingai pritaikomas mažų ir nano-erdvėlaivių nukreipimui. Įrenginio laikančios, korpuso konstrukcijos nesudėtingai integruojamos į erdvėlaivio konstrukciją. Įrenginys negeneruoja elektromagnetinio triukšmo.

TRUMPAS BRĖŽINIŲ APRAŠYMAS

1 pav. vaizduoja pjezoelektrinio įrenginio principinę sandaros schemą.

2 pav. vaizduoja pjezokeitiklį su elastiniais tarpikliais ir atraminiais elementais bei jo valdymo schemą.

Skaičiais paveiksluose pažymėta:

1 - elastinis tarpiklis; 2 - pjezoelektrinis keitiklis (pjezokeitiklis); 3 - rotorius; 4 - atraminis elementas; 5 - jungė; 6 - pjezokeitiklio nepadalintas elektrodas; 7 - pjezokeitiklio į 3 lygius segmentus kas 120° padalintas elektrodas; 8 – varžtas, 9 -

elektrodo padalinimo vietas; 10 - signalų generatorius; 11 - valdymo blokas.

TINKAMIAUSI ĮGYVENDINIMO VARIANTAI

Išradimo tikslas - sukurti nuolatinio magneto sukimo erdvėje pavarą, kurios pagalba būtų galima pozicionuoti ir orientuoti nano-tipo palydovą kosmose. Taip pat ši sistema turi neskleisti elektromagnetinio triukšmo. Tokios pavaros privalumai: aukšta skyra ir greitaveika, paprasta konstrukcija.

Išradimo tikslas pasiekiamas tuo, kad pjezoelektriniame įrenginyje, susidedančiame iš mechaninės ir elektrinės dalies, rutulio formos nuolatinio magneto rotorius yra patalpintas tarp dviejų pjezoelektrinių žiedų, suteikiančių rotoriumi sukamąjį judesį ir leidžiančių keisti jo kampinę padėtį erdvėje.

Mechaninę įrenginio dalį sudaro:

- rotorius (3) - magnetinis rutulys turintis vieną porą (šiaurės ir pietų) polių,
 - statorius, kurį sudaro du žiedo formos pjezoelektriniai keitikliai (2), tarp kurių talpinamas rotorius (3), keitikliai (2) išdėstyti priešingose rotoriaus (3) pusėse,
 - korpusas, kurį sudaro jungė (5) ir varžtai (8),
- ir kitos sudedamosios dalys.

Kaip minėta, statorių sudaro du pjezoelektriniai keitikliai (2), savo forma primenantys žiedą.

Pjezoelektrinis keitiklis (2) turi du priešingose jo pusėse išdėstytus elektrodus (6) ir (7), iš kurių vienas yra ištisinis (6), o kitas (7), kas 120° , padalintas į 3 lygius segmentus. Kiekvieno iš trijų minėtų segmentų viduryje yra pritvirtintas atraminis elementas (4). Atraminis elementas (4) gaminamas iš trinčiai atsparios medžiagos. Šiais atraminiais elementais (4) pjezoelektrinis keitiklis remiasi į rotorius (3). Kiekvieno atraminio elemento (4) kitoje nei rotorius (3) pusėje yra pritvirtintas elastinis tarpiklis (1). Visi elastiniai tarpikliai (1) ant pjezoelektrinio keitiklio (2) išdėstyti kas 120° , elektrodo (7) padalinimo vietose (9).

Įrenginio korpusą sudaro dvi jungės (5), prie kurių per elastinius tarpikius (1) tvirtinami pjezoelektriniai keitikliai (2). Jungės (5) su pritvirtintais pjezokeitikliais (2) ir tarp jų patalpintu rotoriumi (3) yra sujungti varžtais (8), kurie užtikrina tinkamą įvaržą ir abiejų pjezokeitiklių (2) atraminių elementų (4) kontaktą su rotoriumi (3).

LT 6728 B

Pjezokeitikliai (2) vienas kito atžvilgiu yra išdėstyti priešingose rotoriaus (3) pusėse ir pozicijuojami koncentriškai, o jų atraminių elementų (4) kontakto su rotoriaus (3) paviršiumi taškai yra tiesėje, einančioje per rotoriaus (3) centrą, t.y. prieš kiekvieną vieno pjezokeitiklio (2) atraminį elementą (4) priešingoje rotoriaus (3) pusėje yra kito pjezokeitiklio (2) vienas iš atraminių elementų (4). Pjezokeitiklių (2) valdymo elektrodai yra sujungti taip: nesudalinti pjezokeitiklių elektrodai (6) sujungiami tarpusavyje ir prijungiami prie valdymo bloko (11) nulinio kanalo 0, o diametraliai priešingose, rotoriaus (3) atžvilgiu, pusėse esantys pjezokeitiklių padalinti elektrodai (7) sujungiami tarpusavyje ir kiekviena pora padalintų elektrodų (7) prijungiama prie valdymo bloko (11) trijų fazinių kanalų A, B ir C (2 pav.).

Elektrinę prietaiso dalį sudaro harmoninio signalo generatorius (10) ir valdymo blokas (11), kurie yra elektriškai sujungti su pjezokeitiklių elektrodais (6) ir (7).

Įrenginio rotorius (3) - nuolatinis rutulio formą primenantis magnetas, turintis vieną porą (šiaurės ir pietų) polių - įtvirtintas tarp dviejų žiedo formos pjezoelektrinių keitiklių (2), kurie išdėstyti priešingose rotoriaus pusėse ir kontaktuoja su rotoriumi (3) per atraminius elementus (4). Kiekvienas pjezoelektrinis keitiklis (2) turi du priešingose jo pusėse išdėstytus elektrodus, iš kurių vienas yra ištisinis (6), o kitas (7) - kas 120° , padalintas į 3 lygius segmentus (padalinimo vietos (9)). Kiekvieno iš minėtų trijų segmentų viduryje yra pritvirtintas atraminis elementas (4) (pagamintas iš trinchiai atsparios medžiagos). Pjezoelektrinio keitiklio (2) kitoje nei rotorius (3) pusėje, kurioje yra nepadalintas elektrodas (6), yra pritvirtinti 3 elastiniai tarpikliai (1), kurie išdėstyti kas 120° , elektrodo (7) padalinimo vietose (9).

Tam tikros amplitudės ir dažnio elektrinis signalas yra paduodamas iš harmoninio signalo generatoriaus (10) į valdymo bloką (11), kuris šį signalą perduoda vienam iš trijų padalintų elektrodų (7), taip sužadinant pjezokeitikliuose (2) aukšto dažnio erdvinius trimačius virpesius. Šie virpesiai priverčia du priešingose rotoriaus (3) pusėse esančius atraminius elementus (4) judėti elipsinėmis trajektorijomis. Judantys atraminiai elementai (4) dėl trinties perduoda ir generuoja rotoriaus (3) sukamąjį judesį aplink savo centrą. Atraminiai elementai (4) su rotoriumi (3) sudaro kinematinę porą, kurioje atraminių elementų (4) generuojami elipsiniai judesiai yra transformuojami į kryptingą rotoriaus (3) sukimosi judesį. Į valdymo bloką (11) padavus elektrinį signalą kitai padalintų pjezokeitiklių elektrodų (7) porai, sužadunami

kitų atraminių elementų (4) virpesiai ir rotorius (3) keičia sukimosi kryptį. Jei valdymo bloko (11) faziniuose kanaluose (A, B ir C) vienu metu paduodamas tam tikro dažnio trifazis elektros signalas ($U\sin(\omega t)$, $U\sin(\omega t+120^\circ)$ ir $U\cos(\omega t+240^\circ)$), pjezokeitikliuose bus sužadunami bėgančios bangos virpesiai, kurie sugeneruos rotoriaus (3) kryptingą sukimąsi apie vertikalią ašį. Norint pakeisti rotoriaus (3) sukimosi kryptį (pjezoelektriniame keitiklyje (2) bėgančios bangos sklidimo kryptį), į du pjezoelektrinio keitiklio (2) elektrodus patenkantys skirtingų fazių elektriniai signalai sukeičiami vietomis, pvz., į $U\sin(\omega t)$ fazės įtampai numatytą elektrodą tiekama $U\sin(\omega t+120^\circ)$ fazės įtampa ir atvirkščiai - į $U\sin(\omega t+120^\circ)$ fazės įtampai numatytą elektrodą tiekama $U\sin(\omega t)$ fazės įtampa.

Siekiant iliustruoti ir aprašyti šį išradimą, aukščiau pateiktas tinkamiausių įgyvendinimo variantų aprašymas. Tai nėra išsamus arba ribojantis aprašymas, siekiantis nustatyti tikslią formą arba įgyvendinimo variantą. Į aukščiau pateiktą aprašymą reikia žiūrėti daugiau kaip į iliustraciją, o ne kaip į apribojimą. Akivaizdu, kad tos srities specialistams gali būti akivaizdžios daugybė modifikacijų ir variacijų. Įgyvendinimo variantas yra parinktas ir aprašytas tam, kad tos srities specialistai geriausiai išaiškintų šio išradimo principus ir jų geriausią praktinį pritaikymą, skirtą skirtingiems įgyvendinimo variantams su skirtingomis modifikacijomis, tinkančiomis konkrečiam panaudojimui arba įgyvendinimo pritaikymui. Numatyta, kad išradimo apimtis apibrėžiama prie jo pridėta apibrėžtimi ir jos ekvivalentais, kuriuose visi minėti terminai turi prasmę plačiausiose ribose, nebent nurodyta kitaip.

Įgyvendinimo variantuose, aprašytuose tos srities specialistų, gali būti sukurti pakeitimai, nenukrypstantys nuo šio išradimo apimties, kaip tai nurodyta toliau pateiktoje apibrėžtyje.

IŠRADIMO APIBRĖŽTIS

1. Magneto pjezopavaros įrenginys, kurį sudaro magnetinis rotorius ir statorius,

prijungtas prie daugiafazio harmoninių signalų generatoriaus (10), b e s i s k i r i a n t i s t u o, kad magnetinis rotorius (3), turintis vieną porą (šiaurės ir pietų) polių, įtvirtintas tarp dviejų žiedo formos pjezoelektrinių keitiklių (2), kurie išdėstyti priešingose rotoriaus (3) pusėse ir kontaktuoja su rotoriumi (3) per atraminius elementus (4).

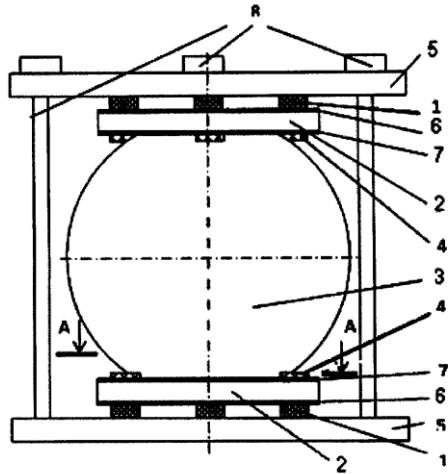
2. Magneto pjezopavaros įrenginys pagal 1 punktą b e s i s k i r i a n t i s t u o, kad atraminiai

elementai (4) su rotoriumi (3) sudaro kinematinę porą, kurioje atraminių elementų (4) generuojami elipsiniai judesiai yra transformuojami į kryptingą rotoriaus (3) sukimosi judesį.

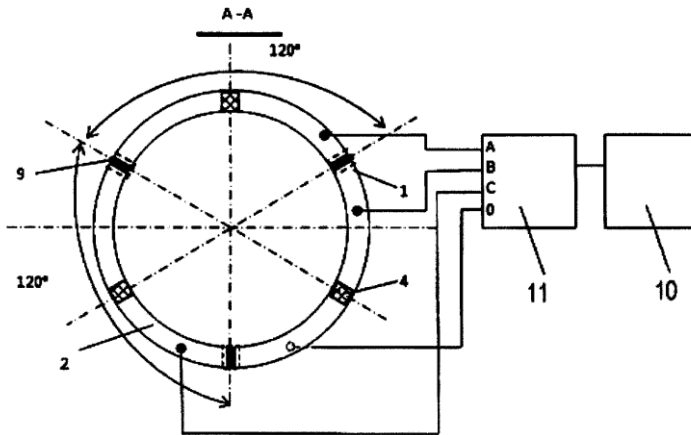
3. Magneto pjezopavaros įrenginys pagal 1 punktą b e s i s k i r i a n t i s t u o, kad įrenginyje rotoriaus (3) pozicionavimui nenaudojamos guolinės atramos, kas ženkliai supaprastina visos sistemos konstrukciją ir eliminuoja galimas pozicionavimo tikslumo paklaidas.

4. Magneto pjezopavaros įrenginys pagal 1 punktą b e s i s k i r i a n t i s t u o, kad įrenginio statorių sudaro du žiedo formos pjezokeitikliai (2), kiekvienas turintys pritvirtintus po 3 atraminius elementus (4) ir vienas kito atžvilgiu yra išdėstyti priešingose rotoriaus 3 pusėse koncentriškai, o jų atraminių elementų (4) kontakto su rotoriaus (3) paviršiumi taškai yra tiesėje, einančioje per rotoriaus (3) centrą, t.y. prieš kiekvieną vieno pjezokeitliklio atraminį elementą (4) priešingoje rotoriaus pusėje yra kito pjezokeitliklio vienas iš atraminių elementų (4).

5. Magneto pjezopavaros įrenginys pagal ankstesnius punktus naudojamas mažų, nano-tipo erdvėlaivių orientavimui, pasukimui, nukreipimui erdvėje.



1 Pav.



2 Pav.

SL344. 2021-*-* , * leidyb. apsk. I. Tiražas 12 egz. Užsakymas * .
 Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas
 Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas