Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas
Cheminės fizikos institutas

Martynas Mažrimas

MECHANINIUS VIRPESIUS IZOLIUOJANČIO STENDO SU MAGNETINE LEVITUOJANČIA PAKABA TYRIMAS

Pagrindinių studijų baigiamasis darbas

Moderniųjų technologijų fizika ir vadyba

Studentas	Martynas Mažrimas
Darbo vadovas	doc. dr. Liudas Tumonis
Instituto direktorius	dr. (HP) Valdas Šablinskas
Recenzentas	dr. Kristijonas Genevičius

Vilnius 2020

`

Turinys

Įvadas....3

1. Mechaninius virpesius izoliuojantis stendas su magnetine levituojančia pakaba 4

1.1 Nykštukinių variklių jėgos matavimo būdai....4

1.2 Aplinkos mechaninių virpesių įtaka jėgos matavimo tikslumui....7

1.3 Earnshaw teorema....11

1.4 Grįžtamojo ryšio sistema. PID valdiklis.....12

1.5 Dviejų laisvės laipsnių pakaba 14

1.6 Skaitiniai diferencialinių lygčių sprendimo metodai....17

2. Tyrimo metodika. 21

2.1 Magnetinės levitacijos stendas su pakaba 21

2.2 Elektromagneto tyrimas....22

2.3 Magnetinės levitacijos stendo dinamikos programa....26

Rezultatai ir išvados 28

Literatūros sąrašas 29

Summary....30

`

Įvadas

Nano palydovai sukasi aplink žemę elipsiniu arba apskritiminiu kosminiais greičiais, kad išlaikytų orbitą. Palydovo gyvavimo trukmę nusako jo orbita, atmosferos dujų tankis orbitoje, kuris sukelia trinties jėgas. Be variklio palydovas lėtės veikiamas išorinių jėgų ir galiausiai nukris. Siekiant koreguoti palydovo greitį ir orientaciją kosmose naudojami reaktyviniai varikliai. Reaktyviniai varikliai veikia pagal trečią Niutono dėsnį – juda priešinga kryptimi negu yra stumiamas kuras.

Dauguma palydovų naudoja cheminius variklius - suskystinto kuro ir oksidatoriaus reaktyvinius variklius, šiuo metu tokie varikliai gali sukurti didžiausią varos jėgą, yra patikimi, bet užima daugiau vietos nei kiti reaktyviniai varikliai [1]. Nano palydovams patogu naudoti šaltus dujinius variklius, jie veikia dėl suslėgtų inertinių dujų plėtimosi – šie varikliai sunaudoja daugiau dujų sukurdami tą patį judesio kiekį, dėl to yra mažiau naudingi ir mažiau galingi nei cheminiai varikliai, bet yra paprasti, pigūs, užima mažai vietos ir yra patogūs taisyti orbitą ir manevruoti [2]. Elektriniai šiluminiai raketiniai varikliai - varikliai, kuriuose elektra šildo dujas taip padidindami variklo savitąjį impulsą (dujų ištekėjimo greitį). Elektrinių variklių pranašumas yra mažas sunaudojamo kuro kiekis – su vienu papildymu ilgiau gali gyvuoti orbitoje, o elektros energija yra generuojama saulės baterijomis. Reaktyvinių variklių varomąją jėgą galima apskaičiuoti teoriškaita tačiau sunku įvertinti konstrukcijos ir kitų veiksnių įtaką variklio jėgai, todėl yra svarbu eksperimentiškai išmatuoti variklio kuriamą jėgą. Kaikurioms kosminėms misijoms atlikti nano palydovams reikia μN tikslumo jėgų. Matuoti tokią mažą variklio kuriamą jėgą galima pakabinus ant siūlo ar švytuoklės. Matavimo tikslumui didelę įtaką turės išorinės vibracijos ir švytuoklės kuriamos vibracijos, nes virpesiai į palydovą persiduoda per pakabą, taip iškreipdami išmatuotą variklio jėgą. Vienas iš būdų išvengti išorinių virpesių perdavimo bandiniui yra bandinio izoliavimas nuo išorinių virpesių šaltinių. Vienas iš tokių būdų yra magnetinė pakaba. Joje valdomas elektromagnetas traukia nuolatinį magnetą, taip palaikydamas reikiamą tarpą tarp aplinkos ir bandinio, mechaniniai virpesiai per stendą veikia elektromagnetą, bet grįžtamojo ryšio sistema aktyviai slopina šiuos virpesius tokiu būdu užtikrindama bandinio mechaninę izoliaciją nuo aplinkos. Šio darbo tikslas yra toliau patobulinti dalinai sukurtą stendą siekiant sukurti tinkamai veikiantį įrenginį. Darbui pasiekti iškelti šie uždaviniai:

Sukurti ir ištirti magnetinės levitacijos stendą, kuris sukurtų pakankamą traukos jėgą, gebančią išlaikyti bandinį. Išmatuoti jėgos priklausomybes nuo tarpelio tarp elektromagneto ir nuolatinio magneto aukščio bei srovės stiprio. Sukurti matematinį stendo modelį tirti valdymo algoritmui.

`

1 Mechaninius virpesius izoliuojantis stendas su magnetine levituojančia pakaba

Šiame skyriuje yra apžvelgti mažos varos jėgos palydovo raketiniai varikliai, reikalavimai jų jėgos matavimų staleliams ir tų stalelių rūšys bei savybės.

1.1 Nykštukinių variklių jėgos matavimo būdai

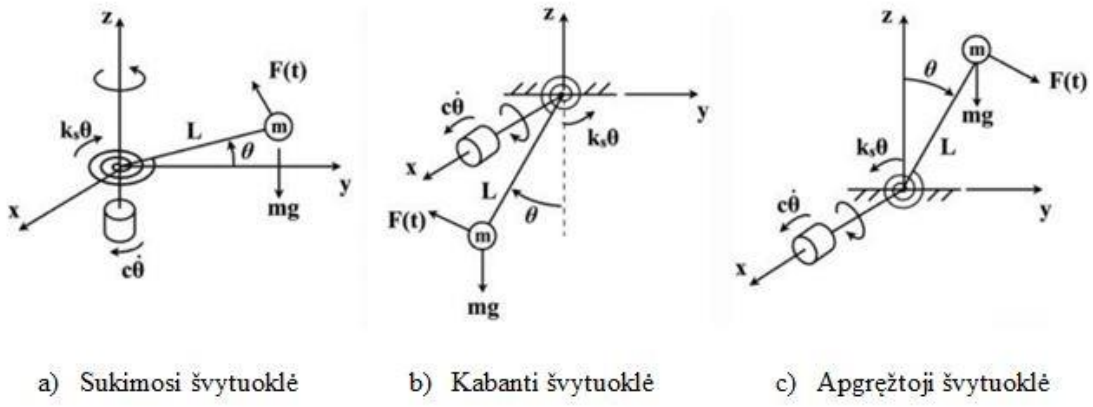
1 lentelė. Tam tikroms kosminėms misijoms atlikti reikalinga variklio varos jėga

Misija	Misijos laikas, h	Veikimo trukmė, min.	ΔV(m/s)	Varos jėga (μN/kg)
Pakeisti aukštį nuo 700km iki 701km	0.82	10	0,53	880
Pajudėti 10km į priekį 700km aukštyje	3.3	40	1,1	460
Pakeisti nuolydį 1° 700km aukštyje	0.82	10	131	220 000

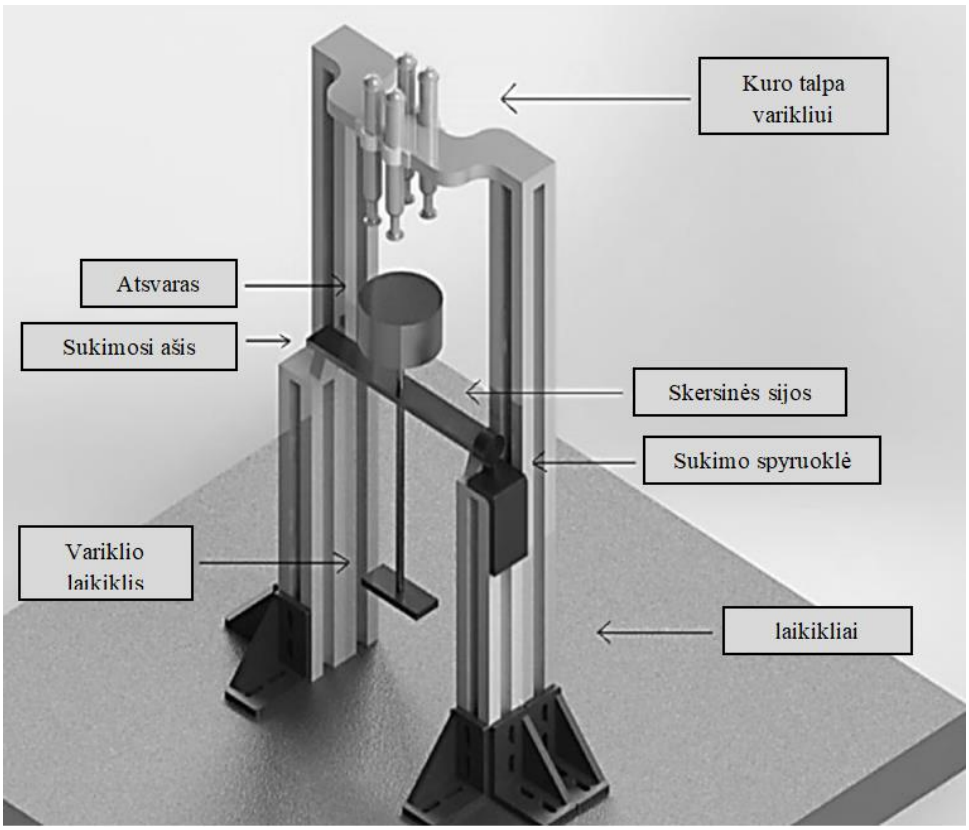
Lentelėje (1 lentelė) atvaizduotos jėgos reikalingos nanopalydovams atlikti manevrus kosmose. Pavyzdžiui pajudėti 10km į priekį 700km aukštyje 1-kg klasės nanopalydovams reikia 460 μN jėgos impulso – reiškia reikia jautraus variklio, kuris gali sukurti jėgos impulsą μN tikslumu. Ne visi tradiciniai reaktyviniai varikliai gali būti sumažinti iki mažo dydžio. Šaltų dujų, kietojo kuro, kietieji cheminiai ir elektriniai šiluminiai varikliai gali būti sumažinti iki miliniutonų jėgų paaukojant veikimo efektyvumą dėl išaugusių trinties nuostolių dujų sraute [10]. Matome, kad nanopalydovams tikslinga naudoti μN eilės jėgą, norint tai pasiekti turime sukurti jautrų reaktyvinį variklį ir sistemą galinčią μN tiksliumu išmatuoti jo varos jėgą.

Vienas iš būdų, galintis pamatuoti variklio varomąją jėga mikro niutonų tikslumu yra švytuoklės metodas. Trys pagrindinės naudojamos švytuoklės konfiguracijos yra kabančioji švytuoklė, apgręžtoji švytuoklė ir sukamoji švytuoklė (2 pav.).

`



2 pav. Trys švytuoklių konfiguracijos variklių jėgai matuoti ir jose veikiančios jėgos [11]



3pav. Kabančios švytuoklės modelio pavyzdys

2 pav. Pavaizduoti jėgos matavimo švytuoklėmis būdai. Pagrindinis šių trijų švytuoklių tarpusavio skirtumas yra kaip gravitacijos jėga veikia pakabintą krovinį ir kaip gravitacija gražina švytuokles į pradinę padėtį. Pagrindinis matavimų tikslumą lemiantis faktorius yra pakabos ilgis *L*, spyruoklės ir aplinkos kuriamos virbacijos taip pat įtaką turi poslinkio ir laiko matavimų įtaisų paklaidos, poslinkis įprastai matuojamas lazeriniu interferometru. Švytuoklių pagrindiniai veikimo elementai yra pakaba *L*, spyruoklės *k*, kurios sugrąžina švytuoklę į pradinę poziciją ir slopintuvas *c*, kuris slopina spyruoklių ir švytuoklės

`

sąveikos sukeltus virpesius ir poslinkį matuojantys elementai iš kurių sėkmingai taikomi talpos jutikliai, optiniai interferometrai, skaituliniai optiniai atspindžio jutikliai, tiesiniai diferencialiniai keitikliai ir kiti. Jėga skaičiuojama vadovaujantis Niutono dėsniais [12]:

$$I\ddot{\theta} + c\dot{\theta} + k\theta = F(t)L \tag{1}$$

Čia I – inercijos momentas, L – peties ilgis (atstumas tarp jėgos ir sukimosi taško) θ – poslinkio kampas, k – spyryoklės tamprumo koeficientas, c – slopinimo konstanta. Jeigu yra naudojami aktyvūs slopinimo metodai, kurie priklauso nuo dažnio šią lygtį galima užrašyti standartine forma

$$\ddot{\theta} + 2\zeta\omega_s\dot{\theta} + \omega_s^2\theta = F(t)L/I \tag{2}$$

Kur ζ – slopinimo koeficientas. jėgos vertė gaunama matuojant poslinkio kampą, atsižvelgiant į spyruoklės tamprumo koeficientą.

$$\theta = \frac{FL}{I\omega_s^2} = \frac{FL}{k} \tag{3}$$

Čia ω_s – savitasis dažnis

$$\omega_s = \sqrt{\frac{k}{I}} \tag{4}$$

Kabančios švytuoklės principas turi paprasčiausią konstrukciją iš trijų. Variklį pakabinus ant švytuoklės, kuri pritvirtinta guoliais prie sukimosi ašies centro interferometru matuojamas poslinkio kampas θ ir laikas per kurį buvo padarytas poslinkis. Interferometras veikia lazerio spindulį padalinus į du spindulius, kurie sklinda skirtingomis kryptimis, vienas atsispindi nuo pagrindo, kitas nuo švytuoklės, o tada intereruoja. Interferavę spinduliai turės skirtingą fazę ir jų interferencija bus išmatuota fotodiodo, interferencija laikui bėgant bus kintanti, nes keičiasi atstumai tarp švytuoklės. Kadangi atstumas matuojamas pagal šviesos bangos ilgį galima pasiekti dešimčių mikrometrų matavimo tikslumą, bet optinis interferometras yra brangus. Pagrindinė variklį grąžinanti jėga šiame stende yra sunkio jėga, dėl to nekyla tiek daug problemų su spyruoklės tamprumo koeficientais. Pagrindinis šio metodo trūkumas – atsilenkimo kampas priklauso nuo visos sistemos masės ir variklio jėgos

`

santykio. Pakitus sistemos masei jėga turi būti perskaičiuojama atsižvelgiant į tą santykį. Šiuo metodu galima matuoti 1 mN eilės jėgas [11].

Sukimosi švytuoklės pakabos sukimosi plokštuma yra statmena gravitacijos jėgai, taigi idealiuoju atveju gravitacijos jėga neturi įtakos poslinkiui, tai reiškia, kad nano palydovo variklis nebus veikiamas gravitacijos jėgos, tai leidžia pasiekti didesnį tikslumą dėl mažesnių vibracijų pakaboje. Šie matavimų stendai mažai jautrūs variklio svoriui – gali matuoti tiek lengvesnių, tiek sunkesnių variklių jėgas. Šiuo metodu galima pasiekti 0.5 μN tikslumą matuojant variklio varomąsias jėgas 1-100 μN tarpe [14].

Apgręžtoji švytuoklė išsiskiria tuo, kad atramos taškas yra žemiau sistemos svorio centro, tai lemia didelę gravitacijos įtaką matavimams, bet nepaisant to gali pasiekti labai didelį jautrumą. Tinkamai sukonstruota apgręžtoji švytuoklė gali pasiekti 5-20 mN tikslumą su 1,5% paklaida, bet šis metodas kelia daug iššūkių norint išspręsti konstrukcijos sukeltas problemas tokias kaip sistemos kaitimas, atsirandančios paklaidos [15]. Dėl savo konstrukcijos ši švytuoklė gali būti labai kompaktiška, tačiau dėl tos pačios priežasties jai yra reikalinga aušinimo sistema, nes variklis arti švytuoklės mechanizmo ir sukurta šiluma veikia spyruoklės tamprumo koeficientą.

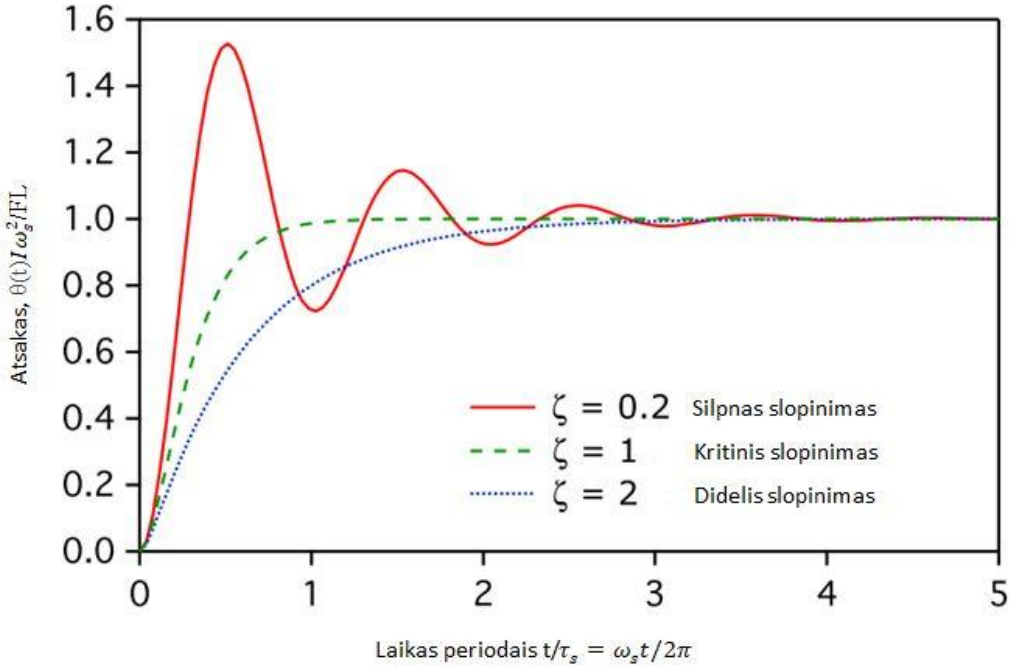
Švytuoklių metodų problema matuojant miliniutonų eilės jėgas yra ta, kad reikia slopinti aplinkos pakabai perduotus mechaninius virpesius, nes jų sukeltos paklaidos turės įtaką matavimų tikslumui, kai yra matuojamos itin mažos jėgos.

1.2 Aplinkos mechaninių virpesių įtaka jėgos matavimo tikslumui

Mechaninių virpesių įtaką švytuoklėse lemia aplinkos ir spyruoklės vibracijos, kurios yra perduodamos stendui. Šių vibracijų pagrindinis sukelėjas gamtinės ir dirbtinės kilmės virpesių šaltiniai. Gamtinės – žemės drebėjimai, vėjas, banguojantys vandens telkiniai. Dirbtinės – mašinos, žmonės, transportas, garsas, elektros varikliai ir kt. Spyruoklių tamprumo koeficientui didžiausią įtaką turi prie jų pritvirtintas svoris ir temperatūra. Švytuoklės stendo jautrumą apibūdina veikiančios jėgos sukeltas nuokrypis $\theta(t)$ (3) lygtis. Pagrindinis dizaino sprendimas didinant matavimų tikslumą yra pailginant pakabą L, tada tamprumo koeficientas turi sąlyginai mažesnę įtaką. Naudojant atsvarus sumažinamas atsilenkimo kampas θ dėl to spyruoklės standumo koeficientas pastovesnis, tokiu būdu sumažinama įtaka matavimams. Šie dizaino sprendimai sumažina mechaninių virpesių įtaką, bet jų nepanaikina, stendas vistiek turės savitajį dažnį ir reaguos į aplinkos sukeltus mechaninius virpesius dažniu ω_s. Kiekviena sistema turi savitajį dažnį, tai dažnis, kuriuo sistema svyruoja neveikiama išorinių jėgų, šis dažnis įprastai yra labai mažas ir daugeliui

`

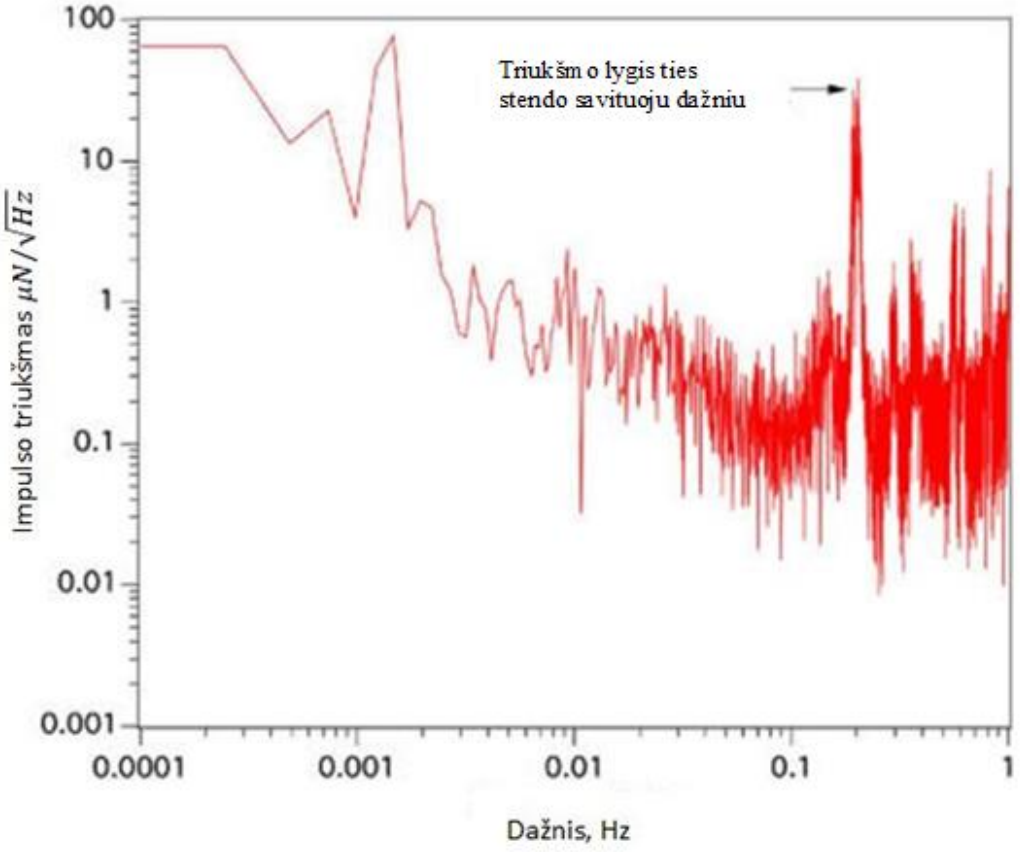
matavimų neturi įtakos, bet matuojant nykštukinių palydovų variklių jėgas netgi mikro niutonų eilės vibracijos turės įtaką matavimų tikslumui.



4pav. Stendo spyruoklės atsakas gavus impulsą esant skirtingiems slopinimo koeficientams[11]

Neslopinta švytuoklė svyruoja (*4 pav.*) , šie svyravimai kuria vibracijas stende ir gali būti aproksimuojami iš (2) lygties. Slopinant virpesiai nėra panaikinami, tik sumažinami, spyruoklės sukurti ir nuslopinti virpesiai vistiek turės įtaką µN ribose. Kritinio slopinimo atveju po vieno periodo švytuoklė nusistovi pakankamai arti ramybės būsenos. Vienas periodas yra dydis, kuris visada ribos stendo galimybę matuoti variklio žingsnio pasikeitimus – niekada nebus galima išmatuoti pasikeitimų dažnesnių nei vienas periodas, šį periodą lemia savitasis dažnis. Šalia to vibracijos atsirandančios dėl variklio triukšmo, aplinkos vibracijos sukeltos garsų, žingsnių laboratorijoje ir panašiai indukuos virpesius stende taip pat gali rezonuoti su savituoju stendo dažniu, tokiu atveju virpesiai sustiprėtų kelis kartus.

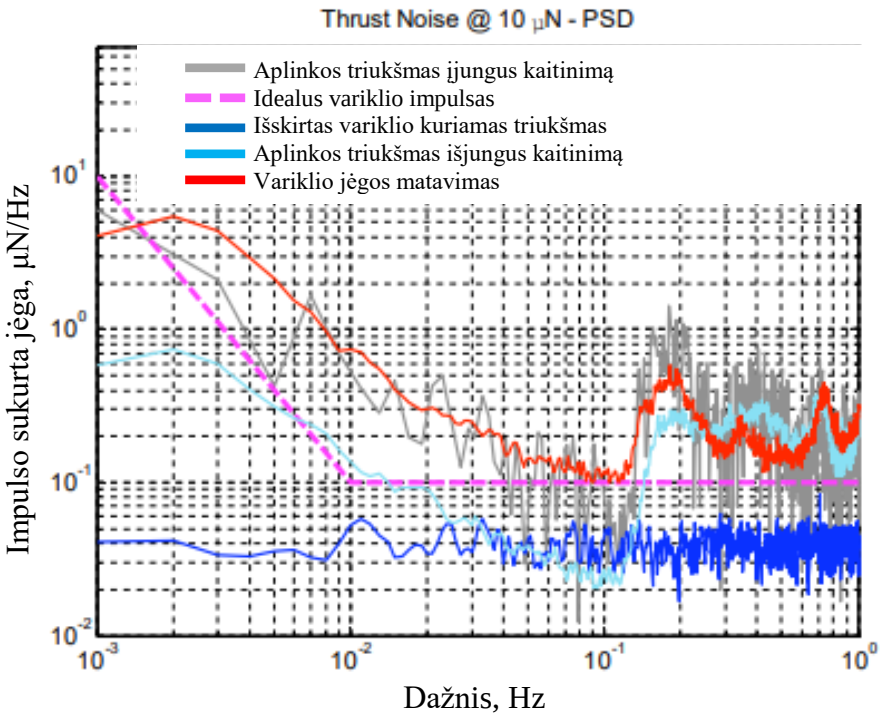
`



5pav. Sukimosi švytuoklėje išmatuoto triukšmo po variklio impulso pavyzdys [11]

Iškarto po variklio sukelto impulso (5 pav.) stendas vibruoja kelių dešimčių $\mu N/\sqrt{Hz}$ ribose, tuo metu stendo triukšmo dažnis labai žemas, iki 0,01 Hz. Toliau, impulsui pasibaigus stendas bando pasiekti ramybės būseną, tada svyravimai silpnesni – 0,01-10 $\mu N/\sqrt{Hz}$ ribose, bet dažnesni. Ties 0,2 Hz riba stebime rezonansą, išorinių virpesių dažnis sutampa su stendo savituoju dažniu ir svyravimų amplitudė padidėja kelis kartus, toliau didėjant dažniui stebimi kartotiniai savitajam dažniui rezonansai. Šios vibracijos atsiranda dėl spyruoklės ir aplinkos sukelto triukšmo, jos turi įtaką viso matavimo metu, bet įpatingai svarbu išvengti rezonanso su savituoju stendo dažniu.

`



6 pav. Nano palydovų variklių matavimų stende išmatuoti skirtingi triukšmai 1000s tarpe po 10 μN impulso [16]

Paveiksle (6 pav.) Pavaizduotas matavimų rezultatų aplinkos triukšmas su įjungtu kaitinimu, išjungus kaitinimą, variklio triukšmas, variklio jėgos matavimas ir idealaus impulso atskaitos kreivė. Kaitinimas keičia spyruoklės tamprumo koeficientą, dėl to buvo ištirta kaitinimo įtaka triukšmui. Šio stendo triukšmai nuslopinti aktyviais ir pasyviais triukšmo slopinimo būdais ir žinant aplinkos sukeltus triukšmus galima į juos atižvelgus išmatuoti 10 μN impulsą, bet tokį tikslumą pasiekti sudėtinga, jei triukšmai būtų bent kiek didesni iš šių matavimų nebūtų galima išgauti jokios naudingos informacijos. Norint pasiekti 10 μN eilės tikslumą reikia taikyti aktyvius virpesių slopinimo metodus su grįžtamojo ryšio sistema – sensoriais juntančias svyravimus ir elektroniniais komponentais slopinančias virpesius.

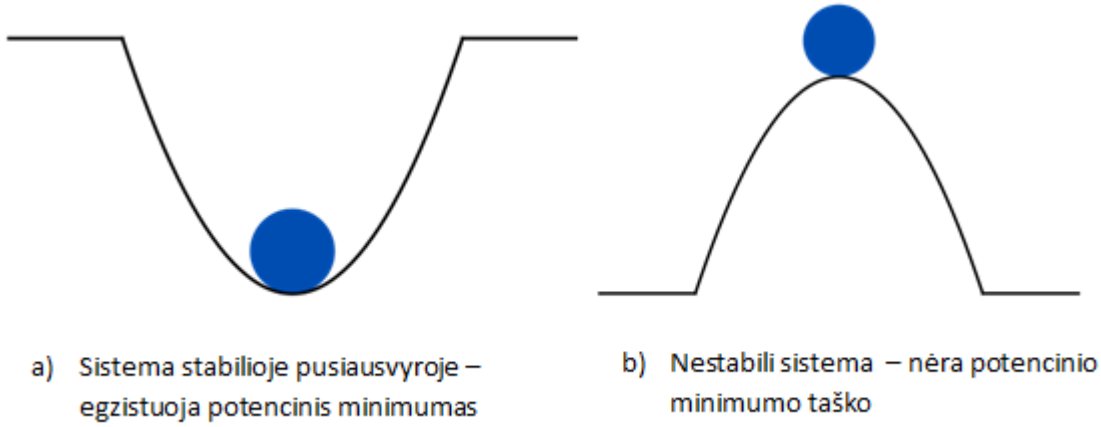
Virpesių slopinimas – virpesių sugėrimas arba pakeitimas į kitą energiją – šilumą, arba naudojant pjezo elektrikus – elektros jėgą, kad įranga sugertų mažiau virpesių. Pasyvūs metodai naudoja mechaninius įrenginius, skysčius, elastometrinias medžiagas. Švytuoklėse pasyvus slopinimas naudojamas prie švytuoklės guolio. Aktyvieji metodai naudoja uždaras sistemas su grįžtamuoju ryšiu. Švytuoklių matavimo stenduose vienas iš naudojamų aktyvaus slopinimo būdų – elektromagnetas su sensoriais juntantis vibracijas, pavyzdžiui talpos jutikliu, tada informacija perduodama grįžtamojo ryšio sistemai ir elektromagnetas duoda atitinkamą impulsą slopinti virpesius. Panašią sistemą galima panaudoti siekiant išvengti virpesių, izoliuoti bandinį nuo stendo – pasitelkiant magnetinę levitaciją. Naudojant

`

magnetinę levitaciją nano palydovo variklis būtų pakabintas ant stendo, kuris elektromagnetu kompensuoja sunkio jėgą, aplinkos virpesiai persiduoda į prie stendo pritvirtintą elektromagnetą, bet šiuos virpesius paprasčiau suvaldyti ir aktyviai slopinti grįžtamojo ryšio sistema. Tokiu būdu bandinys neturi tiesioginio mechaninio kontakto su stendu ir sumažėja aplinkos triukšmo įtaka.

1.3 Earnshaw teorema

Earnshaw teorema teigia, materialiųjų krūvių sankaupa negali būti išlaikyta stacionarioje pusiausvyroje dėl statinės dalelių tarpusavio sąveikos. Sistemoje turi egzistuoti potencinio minimumo taškas, kad sistema galėtų išlaikyti pusiausvyrą.



7 pav. Stabilios ir nestabiliios mechaninės pusiausvyros sistemos

Ant nestabilios sistemos pastatytas rutulys (7 pav. b) bent kiek pajudintas iškarto nuriedėtų žemyn, tuo tarpu stabilioje sistemoje (7 pav. a) pajudintas rutulys grįžtų atgal į pusiausvyros padėtį (potencinio minimumo tašką). Pastovus megnetinis laukas yra nestabili sistema, norint sukurti stabilią sistemą magnetiniais laukais reikia sukurti kintantį magnetinį lauką. Earnshaw teorema iš pradžių pritaikyta elektrostatiniuose laukuose, bet galioja ir magnetiniuose laukuose, nes magnetiniai laukai nusako elektringųjų dalelių magnetinę sąveiką [4]. Pagal Gauso dėsnį laisvoje erdvėje betkokia elektrinio lauko divergencija yra lygi nuliui (tenkins Laplaso lygtį). Pažymėjus U – magnetinio lauko energija, M – magnetinio dipolio momentas, B –magnetinis laukas

$$U = -M \cdot B \tag{5}$$

$$\nabla^2 U = 0 \tag{6}$$

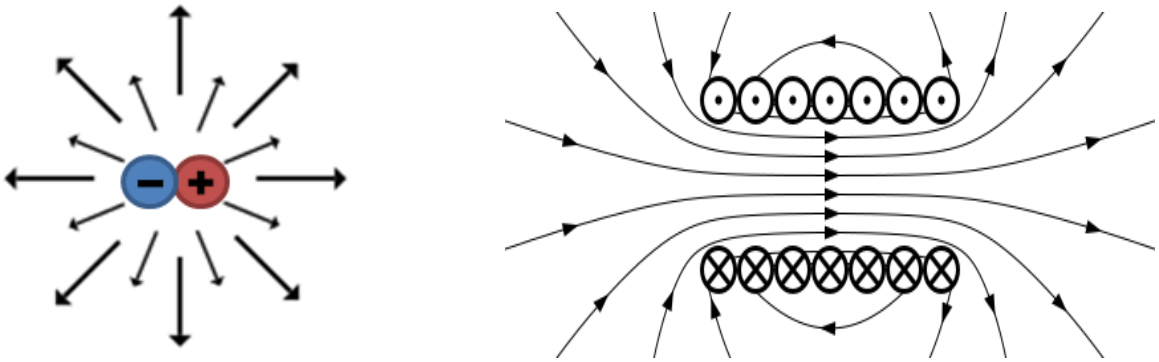
`

Elektrinis dipolis gali būti pusiausvyroje tik tokiame taške, kur lauko energija turi minimumą, energija turės minimumą taške, kur energijos Laplasianas yra didesnis už nulį (dipolio megnetinė jėga yra vienoda ir nukreipta visomis kryptimis iš centro į išorę), tokiu atveju

$$\nabla^2 U > 0 \tag{7}$$

bet tai prieštarauja Gauso dėsniui. Kadangi $\nabla^2 U = 0$ reiškia, kad betkoks mažas virpesys pajudins pusiausvyroje esantį magnetą ir jį magnetinė jėga nustums nuo pradinio taško – praras pusiausvyrą, bus arba pritrauktas arba išstumtas iš megnetinio lauko.

.



8 pav. Elektrinis dipolis, kurio laplasianas didesnis už 0 ir Solenoido magnetinis laukas

Tokiu būdu Earnshaw teorema yra įrodyta. Iš to seka, kad norint pasiekti magnetinę levitaciją reikia turėti kintantį megnetinį lauką - taikyti skaitinius skaičiavimo metodus ir galėti valdyti veikiančias jėgas laike.

1.4 Grįžtamojo ryšio sistema. PID valdiklis.

Maglev elektromagneto magnetinis laukas turi būti nuolatos tikslingai kintantis siekiant išlaikyti bandinį nustatytoje padėtyje taigi reikia visada žinoti tarpelio tarp elektromagneto ir pastovaus magneto dydį ir atitinkamai koreguoti elektromagneto jėgą – reikia grįžtamojo ryšio sistemos. Proporcinio integrinio diferencialinio valdiklio – PID algoritmas yra grįžtamojo ryšio algoritmas, kur žinant galutinio tikslo poziciją ir esamą poziciją, o proporcingai paklaidos dydžiu keičiant valdymo signalą yra keičiama sistemos būsena. Algoritmas keičia valdymo signalą iki kol paklaida sumažinama iki užsibrėžto slenksčio (pasiekiamas galutinis tikslas) [5]. Magnetinės levitacijos atveju algoritmas nuolatos

`

koreguos magneto jėgą ir taip palaikys pastovią bandinio padėtį tokiu būdu palaikydamas levitaciją. PID algoritme didžiausią įtaką turi P – proporcinė algoritmo dalis, ji seka momentinį pokytį, kuris skaičiuojamas pagal proporcinį koeficientą K_P, pažymint paklaidą (pozicijos nuokrypį nuo pageidautinos pozicijos) $p(t)$ proporcinė algoritmo dalis:

$$P = K_P \cdot p(t) \tag{8}$$

integrinė algoritmo dalis skaičiuoja funkcijos $p(t)$ integralą ir padauginant iš koeficiento K_I sumažina P ir D dalių paklaidas

$$I = K_I \cdot \int p(t)\, dt \tag{9}$$

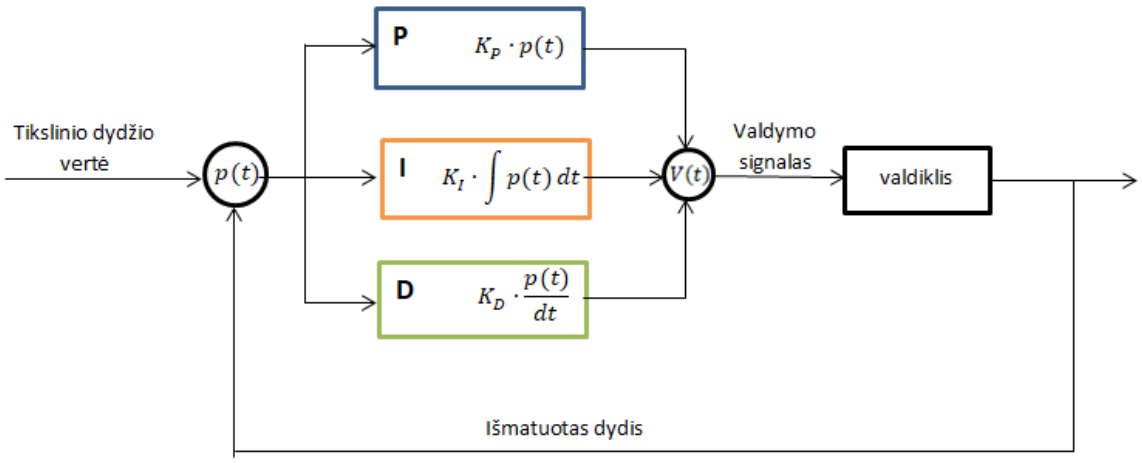
Diferencialinė algoritmo dalis gaunama padauginus funkcijos $p(t)$ išvestinę iš koeficiento K_D, kuri išlygina signalą, kad nebūtų didelių šuolių.

$$D = K_D \cdot \frac{dp(t)}{dt} \tag{10}$$

Valdymo signalas $V(t)$ skaičiuojamas

$$V(t) = K_P \cdot p(t) + K_I \cdot \int p(t)\, dt + K_D \cdot \frac{p(t)}{dt} \tag{11}$$

PID valdiklio veikimo principas pavaizduotas (9 pav.)



9 pav. PID valdiklio blokinis modelis

`

Proporcinė koeficiento dalis P – tiesiškai veikia sistemą. Jeigu didelė paklaida – duodamas stiprus valdymo signalas. Pati savaime P algoritmo dalis duoda per stiprius impulsus artėjant prie tikslinio dydžio vertės – peršoka užsibrėžtą tikslą, tada sustoja, norėdama tai kompensuoti ir sistemoje vėl atsiranda paklaida. Tokiu būdu valdymo signalas pastoviai svyruoja. Diferencialinė algoritmo dalis D – nuslopina P dalies sukurtus svyravimus parinkdama pokyčių greitį. P ir D dalių užtenka, kad sistema pasiektų pusiausvyrą, o tokiu atveju, kai sistema pasiekė pusiausvyrą, bet nepasiekė tikslinio dydžio reikalinga integrinė I algoritmo dalis – ji panaikina paklaidą tarp pusiausvyros sistemos ir tikslinio dydžio. Koeficientai $K_{I,}\, K_p, K_D$ nustatomi eksperimentiškai išmatavus arba skaitiškai sumodeliavus sistemos elgseną. Magnetinės levitacijos stendo atveju paklaida *p(t)* yra atstumas tarp elektromagneto ir bandinio, šis atstumas nustatomas talpos jutikliu. Talpos jutiklis turi aukštą tikslumą ir yra optimalus matuojant milimetrų eilės atstumus. Prie elektromagneto ir nuolatinio magneto pritvirtintos kondencatoriaus plokštės prijungtos prie talpos jutiklio. Atstumas su talpa susijęs formule :

$$\mathrm{d} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{C} \tag{12}$$

Čia C – talpa, ε – medžiagos dielekrinė konstanta (tuo atveju kai nėra vakuumo tarp kondensatoriaus plokčių) ε_0 – vakuumo dielektrinė skvarba S – kondensatoriaus plokštės paviršiaus plotas, d – atstumas tarp kondensatoriaus plokščių. Pagal talpos pokytį matuojamas atstumo pokytis, ši informacija toliau perduodama grįžtamojo ryšio sistemai – PID valdikliui.

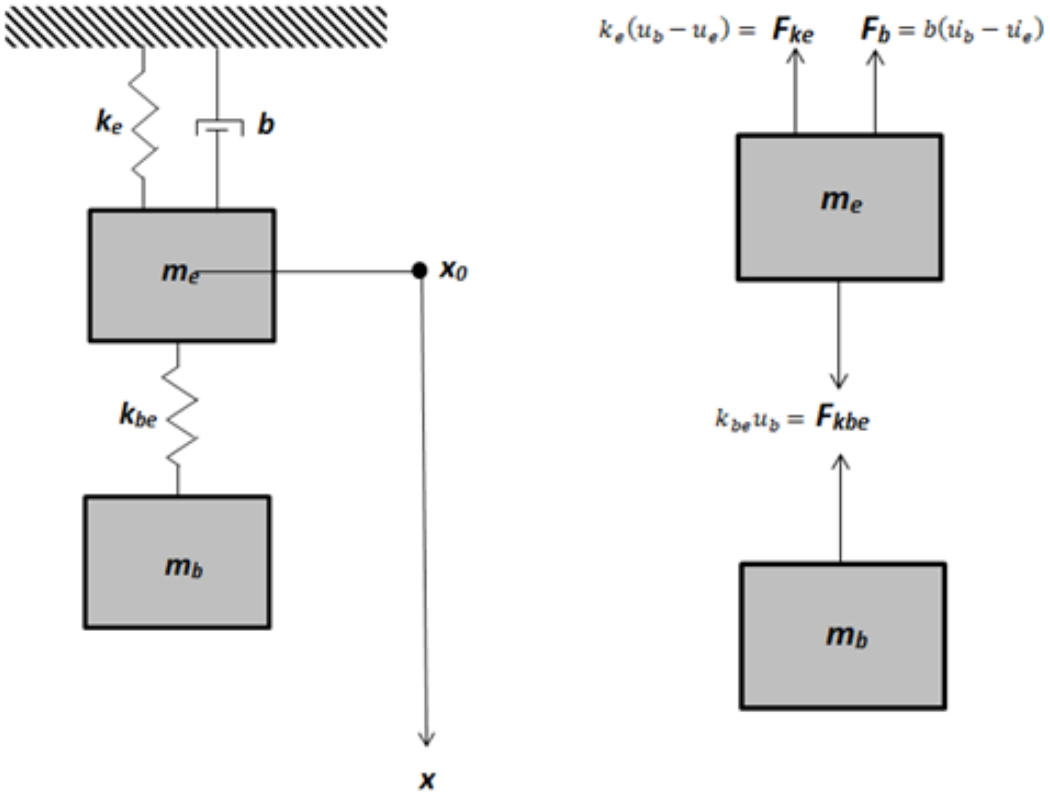
1.5 Dviejų laisvės laipsnių pakaba

PID algoritmo koeficientus rasti galima dar neturint veikiančio prietaiso – juos galima rasti atlikus skaitinį eksperimentą. Tam kad atlikti skaitinį eksperimentą, reikia sudaryti matematinį modelį. Magnetinės levitacijos stende palydovą elektromagnetas veikia vertikaliai, pati stendo konstrukcija, rėmas taip pat turi savo standumą vertikalia kryptimi, jis nėra atsparus vibracijoms dėl kurių išorinis žadinimas keičia elektromagneto padėtį, kadangi atstumas tarp palydovo ir magneto yra milimetrų eilės, netgi maži svyravimai turės įtaką. Šiuos svyravimus galima slopinti grįžtamojo ryšio sistema. Sudarant dviejų laisvės laipsnių modelį galima aprašyti stendo svyravimų įtaką levituojančiam bandiniui. Magnetinės levitacijos pakabos modelis yra panašus į automobilio pakabą. Automobilio pakabos matematinis modelis turi dvi mases sujungtas spyruoklėmis ir slopintuvą, automobilio ratas turi tamprią padangą, kurios tamprumo koeficientas k_1 laikomas tampria spyruokle, pastaroji

`

įtakoja rato padėtį, o rato padėtis veikia pakabos spyruoklę k_2 ir slopintuvą b [6], šios stabilizacijos sistemos principus galima pritaikyti ir maglev stendo stabilizavimui.

Sudarant magnetinės pakabos matematinį modelį elektromagnetas ir bandinys yra nagrinėjami kaip dvi atskiros masės sujungtos spyruoklėmis. Pasinaudodami sutelktinių masių artiniu (kuomet atskiras dalis laikome materialiaisiais taškais), stendo tamprumą ir elektromagnetinį lauką laikant bemasėmis spyruoklėmis, laikant kad sistema juda tik statmena kryptimi. Pasirinkus tokį tašką, kad tamprumo jėgos pokytis $u = 0$, kai sistemoje nusistovėjusi pusiausvyra ir spyruoklių tamprumo jėga yra atstojamoji sunkio jėgai, šios jėgos išsiprastina, jų žymėti nebūtina ir abu kūnai nejuda. Pažymint m_e – elektromagneto masė, m_b – bandinio masė, x_e – elektromagneto pozicija, x_b – bandinio pozicija, k_e – standumo koeficientas tarp elektromagneto ir statinės pakabos, b – slopintuvas tarp elektromagneto ir statinės pakabos, k_{be} – standumo koeficientas tarp elektromagneto ir bandinio. Bandinio tamprumo jėgos pokytis $u_b = x_b - x_{b0}$ ir elektromagneto tamprumo jėgos pokytis $u_e = x_e - x_{e0}$. Sistemoje, kur abu kūnai pasislenka x ašies kryptimi ir $u_e < u_b$, laikant kad gniuždomos spyruoklės jėga yra nukreipta nuo spyruoklės vidurio taško, o pailgėjusios į vidurio tašką grafiškai atvaizduojame šią masių sistemą ir užrašome jėgų lygtis:



10 pav. Magnetinės pakabos veikimo modelis ir mases veikiančių jėgų matematinis modelis

`

Turime jėgą aprašančią lygtį:

$$F = m\frac{d^2x}{dt^2} \tag{13}$$

ją pažymėjus $F = m\ddot{x}$ projektuojame jėgų atstojamąją kiekvienam kūnui:

$$m_b\ddot{x_b} = -F_{kbe} \tag{14}$$

$$m_e\ddot{x_e} = F_{kbe} - (F_{ke} + F_b) \tag{15}$$

$$m_b\ddot{x_b} = -k_{be}(u_b - u_e) \tag{16}$$

$$m_e\ddot{x_e} = k_{be}u_b - b(\dot{u_b} - \dot{u_e}) - k_e(u_b - u_e) \tag{17}$$

Tokiu būdu aprašoma, kaip kūnai įtakoja vienas kito judėjimą, išmatavus stendo tamprumą k_e ir slopinimą b, o k_{be} spyruoklės tamprumas yra pakeičiamas elektromagneto keliamosios jėgos priklausomybe nuo atstumo ir tada visi koeficientai yra žinomi. Magnetinė pakaba yra sudaryta iš feromagnetinės šerdies ir ritės, kuria tekanti elektra kuria magnetinį lauką ir stiprina feromagnetinės šerdies magnetinį lauką, elektromagnetinio lauko sukurta jėga:

$$F_m = \frac{B^2l^2S}{2a^2\mu} \tag{18}$$

čia B – magnetinė indukcija, l – solenoido ilgis S - šerdies plotas a – atstumas tarp ritės ir nuolatinio magneto μ – magnetinės skvarbos konstanta. Magnetinė indukcija priklauso nuo ritės parametrų

$$B = \frac{\mu IN}{l} \tag{19}$$

Kur I – rite tekančios srovės stipris, N – ritės apvijų skaičius. Sudarius matematinį modelį šias lygtis reikia išspręsti. Turint magnetinės jėgos parametrus galima nuspėti kaip bus veikiamas po elektromagnetu pastatytas kūnas, bet elektromagnetinis laukas yra sudetingesnis nei spyruoklė ir jame pasiekti pusiausvyrą neužtenka palaukti kol nusistovės pusiausvyra ir bus

`

kompensuota sunkio jėga kaip dviejų masių modelio atveju (10 pav.) taigi reikia rasti būdą pasiekti pusiausvyrą magnetiniame lauke.

1.6 Skaitiniai diferencialinių lygčių sprendimo metodai

Noritnt išspręsti (14-17) lygčių sistemą analitiniai metodai tam netinka, nes sistema perdaug sudėtinga, dėl to reikia taikyti skaitinius diferencialinių lygčių sprendimo metodus. Baigtinių elementų metodo pagrindu yra sukurta daug universalių bei specializuotų kompiuterinių programų, kurios leidžia greitai ir patikimai ištirti projektuojamas sistemas ir dar projektavimo stadijoje patikrinti ar realizuoti jų savybes [9]. Siekiant sukurti magnetinės levitacijos stendo matematinį modelį virtualioje aplinkoje pradžioje reikia gauti diferencialinės lygties sprendimą pasinaudojant apytiksliais diferencialinių lygčių sprendimo metodais.

Magnetinės pakabos uždavinį nagrinėjant kaip n-tosios eilės diferencialinę lygtį, kur ieškomas funkcijos y sprendinys:

$$y^{(n)} = f(x, y,\ y',\ y'', \dots,\ y^{(n-1)}) \tag{20}$$

Šitos lygties bendras sprendinys turi n laisvų konstantų, bet nagrinėjant žinomą sistemą nereikia bendro sprendinio, nes yra žinomi pradiniai sistemos parametrai [7]. Magnetinio stendo parametrus taip pat žinome (elektromagneto jėga, atstumas tarp elektromagneto ir palydovo, stendo tamprumo koeficientas) ir pradines sąlygas (pradinis atstumas, palydovo masė, elektromagnetinio lauko pradinis stipris), turint pradines sąlygas galima spręsti Košį uždavinį [7]. Ieškomas (20) lygties sprendinys laikant, kad

$$y(x_0) = y_0, \qquad y'(x_0) = y_0', \qquad \dots, \qquad y^{(n-1)}(x_0) = y_0^{(n+1)} \tag{21}$$

$x_0, y_0,\ y_0',\ y_0^{(n+1)}$ – žinomi dydžiai.

Žinant, kad yra sprendžiamas košį uždavinys galime taikyti diferencialinių lygčių apystikslius skaitinius metodus, nes žinant sprendinio išvestinių reikšmes viename taške galima rasti sekančio taško reikšmes.

Baigtinių skirtumų metodas pakeičia diferencialines lygtis aproksimacijomis pasinaudojant išvestinės apibrėžimu [8].

`

$$\frac{dv(t)}{dt} = \lim_{z \to 0} \frac{v(t+z) - v(t)}{z}, \qquad z > 0 \tag{22}$$

Kai nagrinėjama sistema neturi analitinio sprendimo – neieškoma sistemos išvestinė bendru atveju, žinant išvestinės vertę viename taške galima rasti sekančio taško reikšmes. Išvestinę pakeičiant funkcija ieškomi taškai skaitiniu būdu aproksimuojantys sistemą. Naują funkciją tikslingiau žymėti kitu nežinomuoju, nes tai yra aproksimacija [8], tai $v(t) = y^n$ (20 lygtis) ir ieškant skaitinio sprendimo:

$$v(t) = \frac{v(t+z) - v(t)}{z} \tag{23}$$

Čia z – pasirinktas kitimo intervalas (laiko žingsnis)

$$zv(t) = v(t+z) - v(t) \tag{24}$$

$$zv(t) + v(t) = v(t+z) \tag{25}$$

$$v(t+z) = (z+1)v(t) \tag{26}$$

žinant v_0, ir kai $t = 0$

$$v(0+z) = v_0(z+1) \tag{27}$$

šią gautą vertę toliau naudojant gauti sekančią vertę.

$$v(z+z) = (1+z)(1+z) \text{ arba } v(2z) = (1+z)^2 \tag{28}$$

kartojant šį procesą galima sudaryti ir visus kitus funkcijos taškus ir tokiu būdu gauti aproksimaciją. Dabar galima užrašyti galutinę formulę ieškant sekančio nario baigtinių skirtumų metodu v_{n+1}:

$$v_{n+1} = (1+z)v_n \tag{29}$$

Tokiu būdu gauta aproksimacija nėra labai tiksli ir yra skaitinių metodų su kuriais galima ją patobulinti Eulerio metodu.

`

Nagrinėjant baigtinių skirtumų formulę (23) ir pasinaudojant Teiloro skelidiniu aproksimuojant išvestinę užrašoma, kad

$$\frac{v^{n+1}-v^n}{z} = v'(t) + \frac{z^2}{2}v''(t) \tag{30}$$

Iš (29 lygties) turime Eulerio lygtį:

$$v^{n+1} = v^n + z_{n+1}F(t_n, v^n) \tag{31}$$

Kur $F(t_n, Y^n)$ yra išvestinės aprokcimacija. Iš košį uždavinio sąlygos reikia pridėti, kad yra žinomas v^0 ir pokyčio intervalas yra natūralusis skaičius $n = 0,1, \dots, N$ Eulerio metodo paklaida yra dydžio (z^2) eilės [8]. Eulero metodo paklaidą galima sumažinti verleto metodu.

Verleto metodas naudoja tris pozicijas x_{n-1} x_n ir x_{n+1} , šios pozicijos skaičiuojamos pasitelkus kinematine judesio lygtimi ir Eulerio metodu greitis yra išreiškiamas padėties x pokyčiu užrašant lygtį v_{n+1} greičio nariui:

$$v_{n+1} = v_n + za_n \tag{32}$$

Iš čia lygtis x_{n+1} pozicijos nariui

$$x_{n+1} = x_n + zv_{n+1} \tag{33}$$

užrašant x_n poziciją pasinaudojant x_{n-1} pozicija

$$x_n = x_{n-1} + zv_n \tag{34}$$

ir iš pozicijos pokyčio išreiškant greitį v_n

$$v_n = (x_n - x_{n-1})\frac{1}{z} \tag{35}$$

sprendžiama sekančio nario x_{n+1} lygčių sistemą įsistatant x_n ir v_n išraiškas

$$x_{n+1} = x_n + z(v_n + za_n) \tag{36}$$

`

$$x_{n+1} = x_n + z((x_n - x_{n-1})\frac{1}{z} + ha_n) \quad (37)$$

Gaunasi Verleto lygtis:

$$x_{n+1} = 2x_n - x_{n-1} + z^2 a_n \quad (38)$$

Verleto lygties paklaida yra $O(h^4)$ eilės, taigi šis metodas yra tikslesnis nei Eulerio metodas ir galima nesekti greičio – užtenka turėti pozicijos koordinates [7].

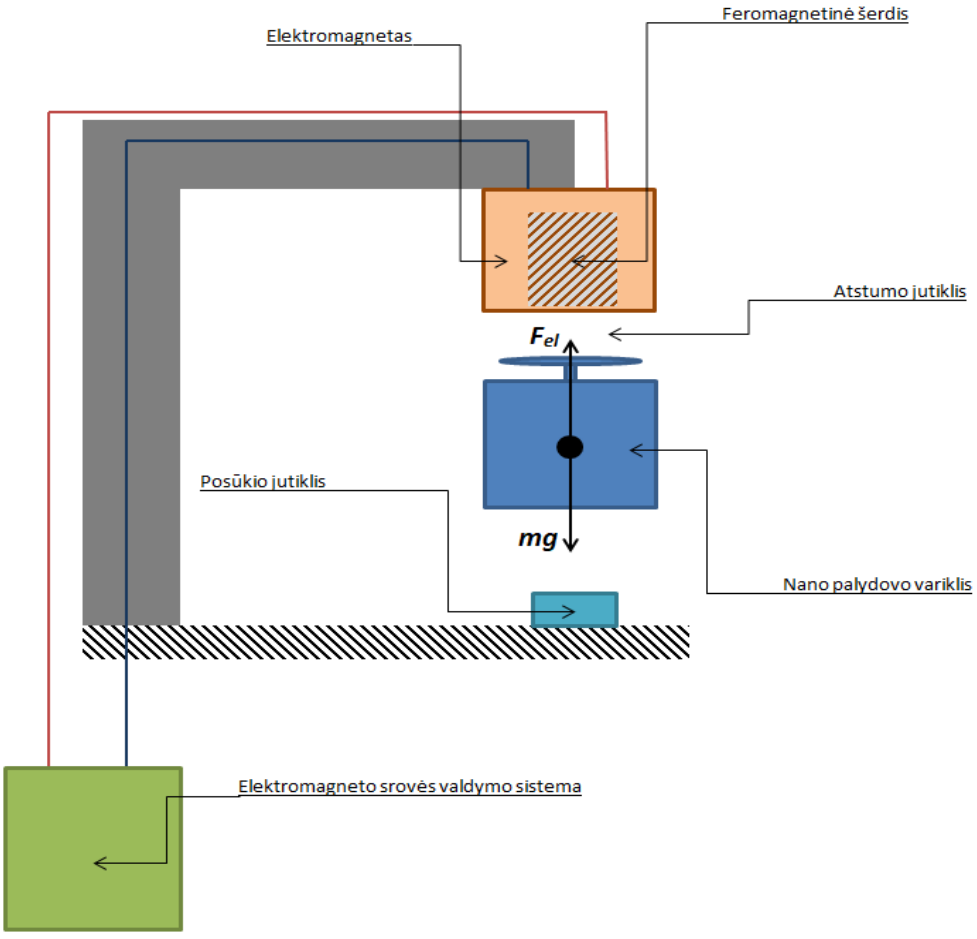
`

2 Tyrimo metodika

Šiame skyriuje aprašyta elektromagneto jėgos matavimo metodika, stendo modelis, o taip pat programa, atliekanti stendo dinamikos modeliavimą.

2.1 Magnetinės levitacijos stendas su pakaba

Magnetinės levitacijos stendas yra pakabinto nuolatinio magneto ir elektromangeto sistema valdoma valdikliu ir atstumo jutikliais tam, kad izoliuotų nuo mechaninių aplinkos trikdžių nano palydovą (11 pav.).



11 pav. Magnetinės levitacijos stendo sudedamosios dalys ir veikimo modelis

Stendo su magnetine pakaba supaprastintas veikimo modelis pavaizduotas (11 pav.), kur pakaba pritvirtinta prie nejudančio pagrindo, $\boldsymbol{mg}$ – sunkio jėga, $\boldsymbol{F_{el}}$ – elektromagneto traukos jėga. Levituojantis palydovas sukasi aplink vertikaliąją savo ašį, levitacija nesukelia pašalinių

`

jėgų variklio jėgos kryptimi matuojant variklio varomąją jėgą, dėl to galima tiksliai išmatuoti jėgą su posūkio jutikliu matuojant kampinį poslinkį [3]. Prie bandinio pritvirtintas nuolatinis magnetas, kad padidintų keliamąją jėgą. Pagal išmatuotos talpos pokytį atstumo jutiklis matuoja atstumą tarp elektromagneto ir nuolatinio magneto.

2.2 Elektromagneto tyrimas

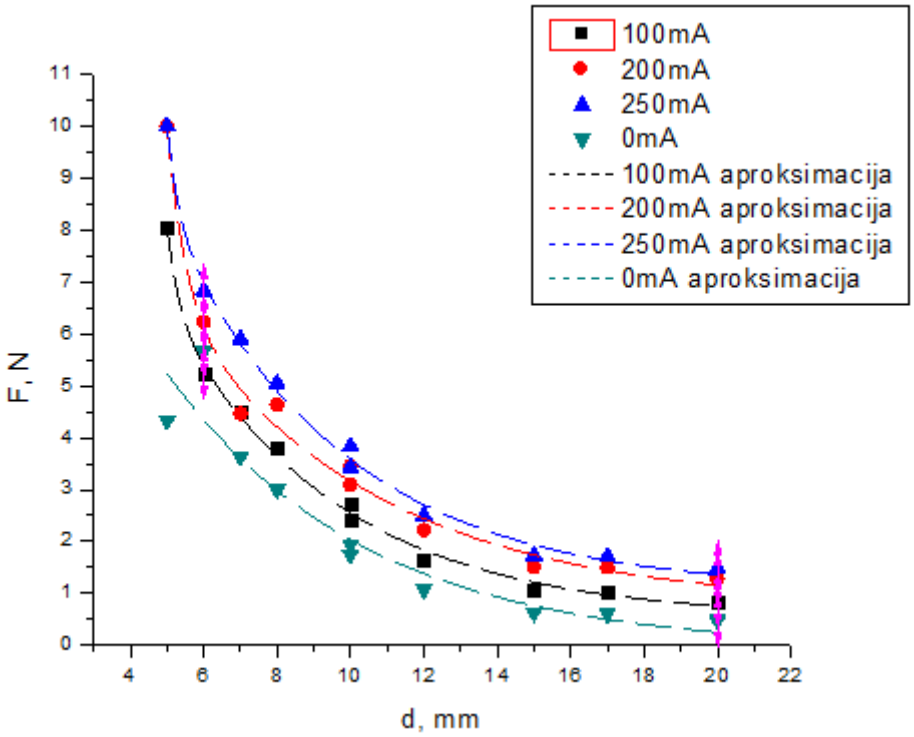
Elektromagneto keliamoji jėga buvo matuojama pritvirtinus elektromagnetą prie slankiojančio stendo, padėjus bandinį po elektromagnetu ant svarstyklių ir keičiant rite tekančią elektros srovę ir/arba atstumą tarp elektomagneto ir prie bandinio pritvirtinto nuolatinio magneto (12 pav.). Pagal poreikį buvo keičiamas bandinio svoris.



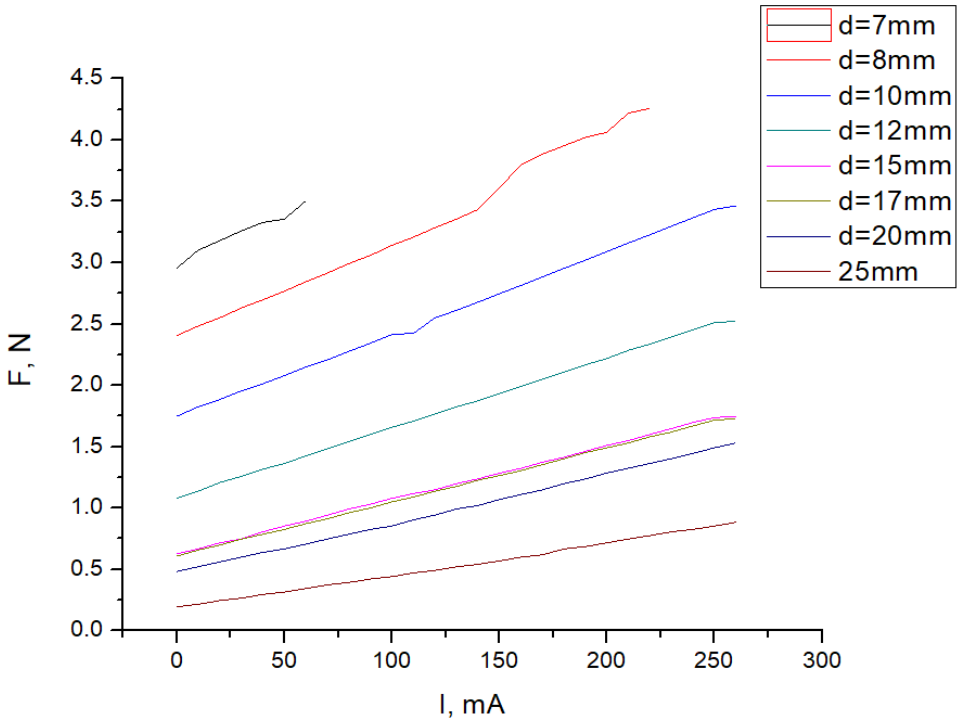
12 pav. Elektromagneto keliamosios galios matavimo stendas

Kartojant bandymą su skirtingomis srovėmis ir atstumais tarp elektromagneto ir nuolatinio magneto, užrašomas bandinio svorio pokytis ir apskaičiuojama keliamosios jėgos priklausomybė nuo srovės stiprio ir atstumo tarp magnetų. Siekiant modelyje panaudoti kuo tikslesnius dydžius, buvo ištirta ritė esanti laboratorijoje, kuri ankščiau buvo naudojama magnetinės levitacijos stendui.

`



13 pav. Elektromagneto keliamosios jėgos priklausomybė nuo atstumo tarp elektromagneto ir nuolatinio magneto



14 pav. Elektromagneto keliamosios jėgos priklausomybė nuo srovės stiprio prie skirtingų atstumų tarp elektromagneto ir nuolatinio magneto

`

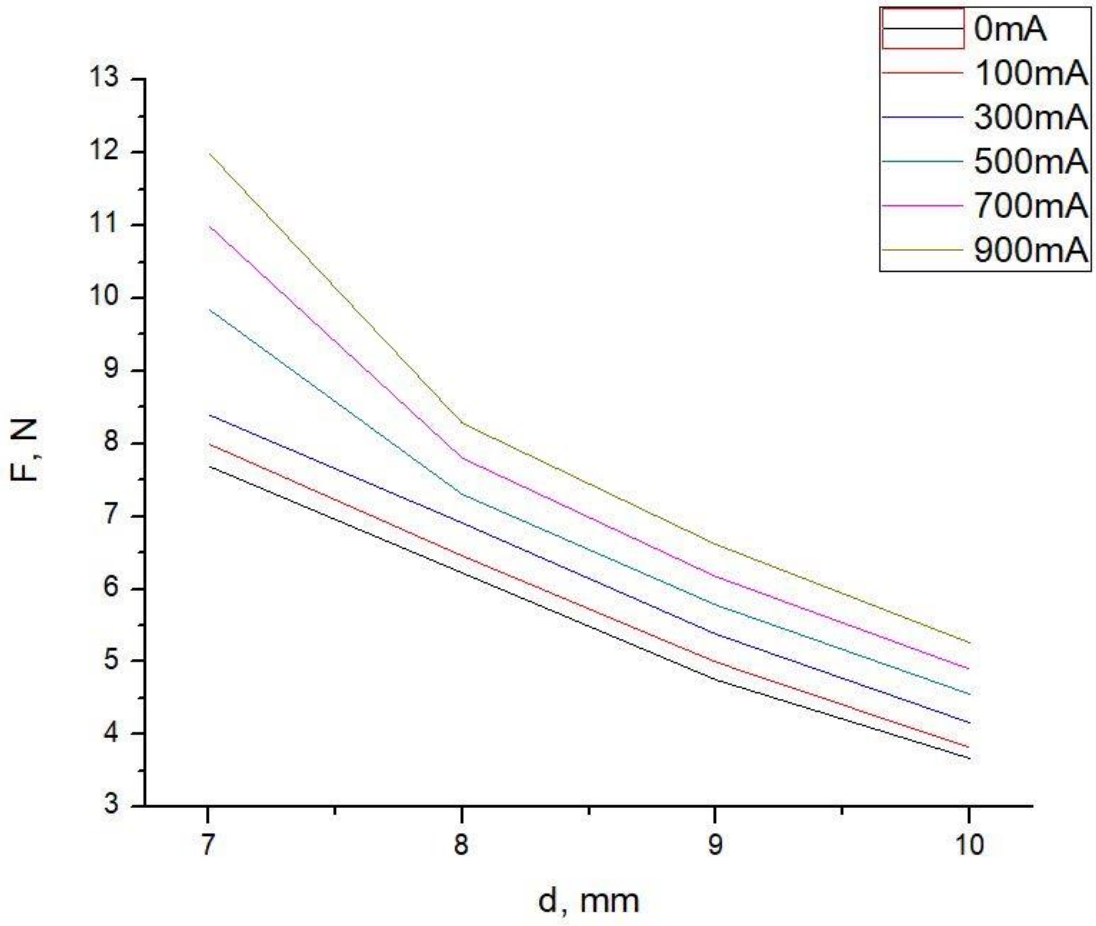
Ištyrus ritę, išmatuota maksimali keliamoji galia buvo ~3 N. Matuojant jėgą 7 mm atstumu nuolatinio magneto jėga buvo per didelė ir padidinus elektromagneto jėgą bandinys buvo pritraukiamas prie elektromagneto. Laboratorijoje esantis elektros šaltinis turi apsaugą, kuri maksimalią leistiną srovę nustato pagal ritės varžą, ritės varža buvo apie 119 Ω ir neleido kelti srovės stiprio daugiau nei 252 mA (didžiausia leidžiama šaltinio įtampa 30 V). Tekant tokiai srovei išsiskiria P = 7,5 W, norint gauti daugiau keliamosios jėgos reikėtų didinti srovės stiprį ir būtų viršyta 30 W kaitinimo galia, reikėtų sudėtingesnės vėsinimo sistemos. Dėl to buvo pagaminta nauja ritė iš storesnio, 0,8 mm laido (15 pav.).



15 pav. Nauja ritė

Ritė turi tilpti į laboratorijoje esančia vakuminę kamerą VUP-1 [3]. Šios pabaigtos ritės apvijų skaičius *N* = 700, solenoido ilgis $l = 50\ mm$, solenoido skersmuo *D* – 38 mm, varža *R*= 5 Ω, ritė varinė. Naujos ritės jėga buvo matuojama remiantis ankstesniais matavimų rezultatais žinant, kad didžiausią keliamąją jėgą duodantis atstumas tarp elektromagneto ir nuolatinio magneto, kuriame keliamoji jėga nėra tokia didelė, kad per greitai pritraukia bandinį, yra 7 – 10 mm.

`



16 pav. Elektromagneto keliamosios jėgos priklausomybė nuo atstumo tarp elektromagneto ir feromagnetinės masės esant skirtingoms rite tekančioms srovėms

Paveiksle (16 pav.) nėra akivaizdžios eksponentinės priklausomybės dėl to, kad matavimai atlikti mažame atstumų diapazone (7-10mm).

Atlikus matavimus buvo įsitikinta, kad elektromagneto keliamosios jėgos priklausomybė atitinka teorines vertes (18 formulė). Aproksimuojant gautus rezultatus tiesėmis ir suradus koeficientus turime lygtį apytiksliai aprašančią elektromagneto keliamosios galios priklausomybę nuo atstumo ir srovės stiprio:

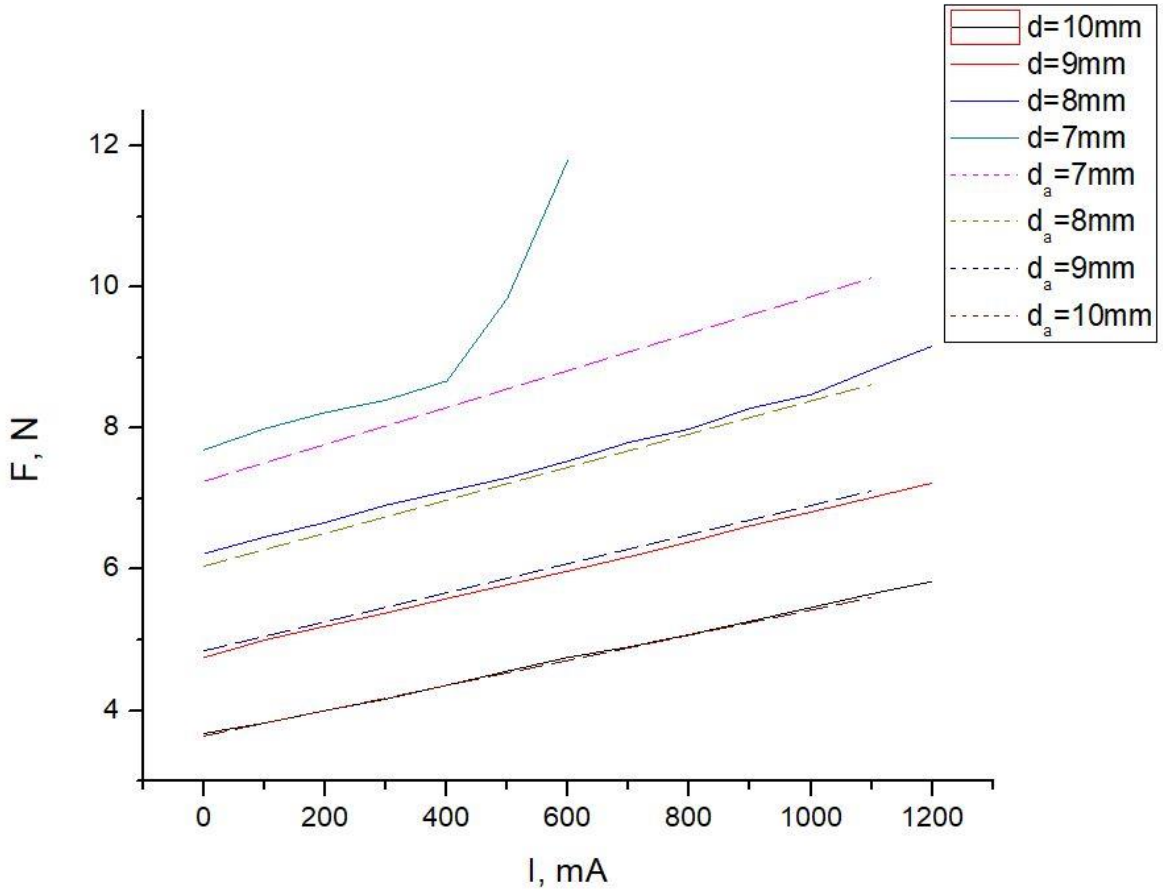
$$F(I,d) = (15654 - 1201 \cdot d) + (4.58 - 0.28 \cdot d(mm)) \cdot I(mA) \qquad (39)$$

Ir kai d $<$ 7mm

$$F(I,d) = (15654 - 1201 \cdot d(mm)) + (30.6 - 3.5 \cdot d) \cdot I(mA) \qquad (40)$$

`

Matavimo rezultatų ir aproksimacijos priklausomybių (39-40) palyginimas pateiktas (17 pav.).



17 pav. F(I, d) aproksimacijos ir išmatuotų verčių palyginimas

Staigus jėgos kilimas 7 mm atstumu (17 pav.) iliustruoja bandinio pritraukimą prie elektromagneto. Kintant apvija tekančios srovės stipriui 0 – 1,2 A ribose, apvijoje išsiskiria 0 – 6,2 W šiluma. Kad apvija neperkaistų, stipriausia tekanti srovė gali tikėti sąlyginai trumpą laiką pageidautina, kad srovės stipris neviršytų 0,5 A.

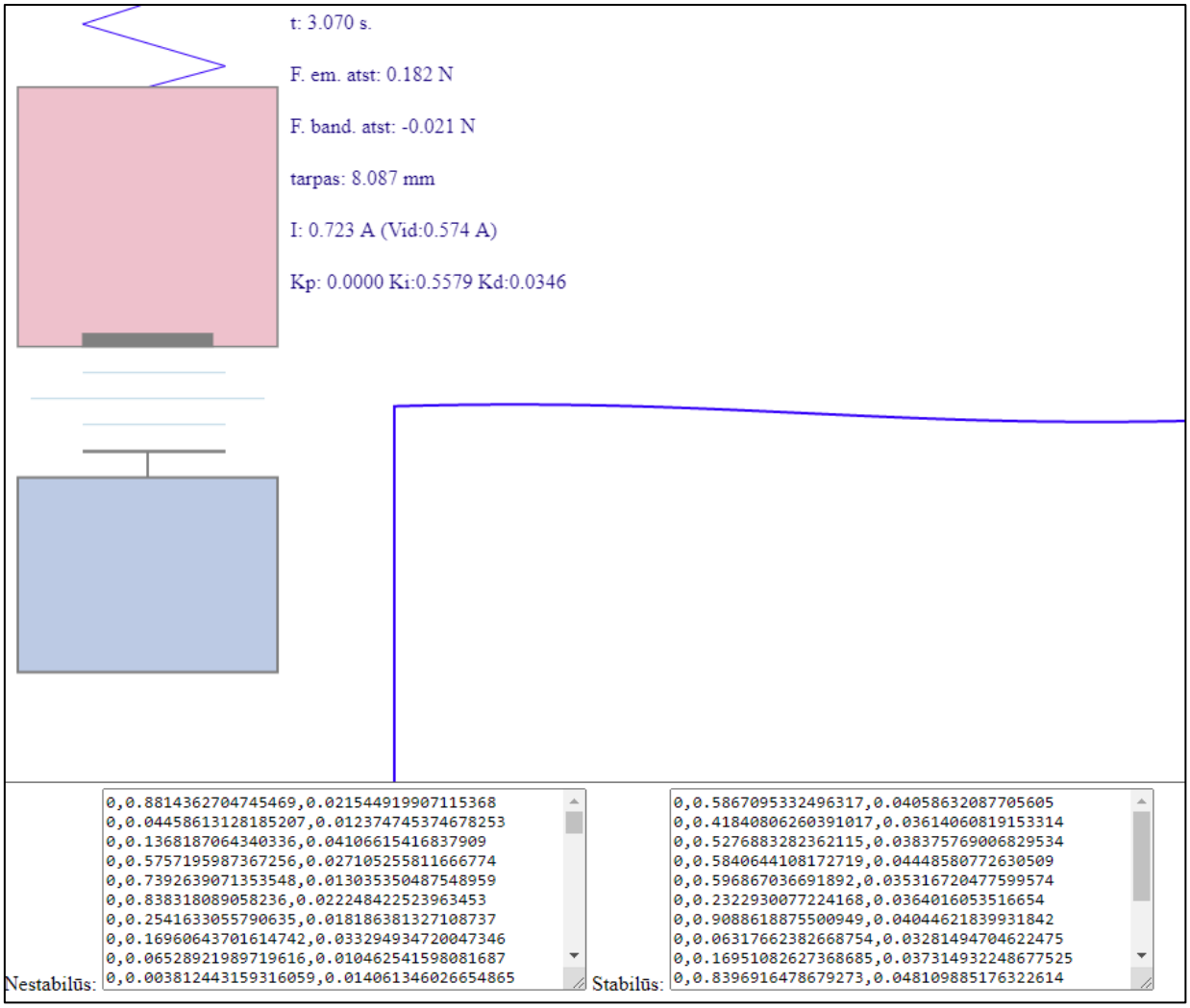
2.3 Magnetinės levitacijos stendo dinamikos programa

Javascript programavimo kalbos aplinkoje sukurtas skaitinis magnetinės levitacijos stendo modelis pasinaudojus išmatuotomis elektromagneto keliamosios jėgos priklausomybėms ir pritaikant PID algoritmą (1.4 skyrius), dviejų masių matematinį modelį (1.5 skyrius), integravimui naudojamas Verleto metodas (1.6 skyrius). Programoje naudojamos konstantos: elektromagneto masė m_e = 0,5 kg, bandinio masė m_b = 0,85 kg, stendo tamprumo koeficientas k_s = 10000 N/m, stendo slopinimo koeficientas c = 1,5,

`

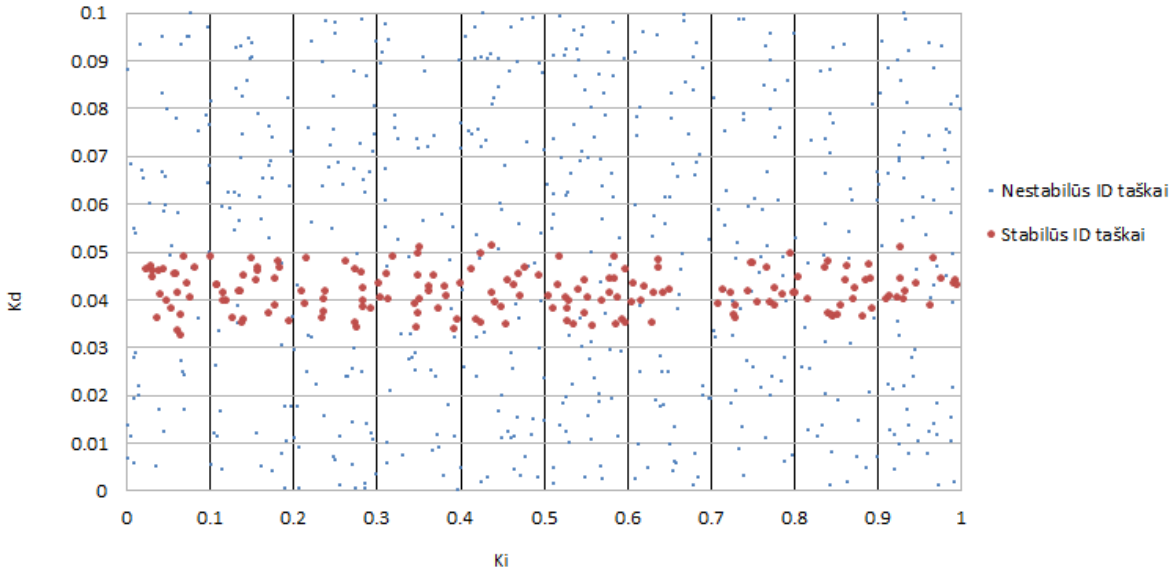
naudojamas laiko žingsnis Δt = 50 µs. Javascript programoje pritaikytas PID algoritmas, gauti PID koeficientai K_I, K_p, K_D, kurie bus panaudoti tikro stalelio valdymui.

Iš matavimų rezultatų gauta jėgos priklausomybė nuo atstumo pritaikyta javascript programoje. Gautos elektromagnetu tekančios srovės priklausomybės nuo laiko esant skirtingiems atsitiktiniems atstumams tarp elektromagneto ir nuolatinio magneto grafikas pavaizduotas (18 pav.) Šiame paveiksle atvaizduotas elektromagnetas tampria jungtimi prijungtas prie stendo, po juo bandinys. Šalia užrašyti programa suskaičiuoti parametrai ir atvaizduotas valdymo signalas. Ieškomi koeficientai K_I, K_p, K_D, kurie palaikytų stabilų valdymo signalą.



18 pav. Magnetinės levitacijos stendo programinis modelis

`



19 pav. Programinio modelio rasti stabilūs ID koeficientų taškai.

Programos simuliacijoje (19 pav.) nebuvo rasta K_p vertė su kuria sistema būtų stabili, tai $K_p = 0$, diferencialinio koeficiento vertės su kuriomis buvo pasiektas stabilus valdymo signalas $K_D \in [0{,}032 - 0{,}051]$, tuo tarpu $K_I \in [0{,}02 - 0{,}65]$ ir $K_I \in [0{,}7 - 1]$.

Rezultatai ir išvados

Atlikus darbe numatytus darbus, ir ištyrus elektromagneto savybes, paaiškėjo, kad tinkamiausias tarpelio tarp elektromagneto ir nuolatinio magneto dydis yra 7 – 8 mm.

Esant 7 – 8 mm tarpelio dydžiui, keliamoji jėga siekia 6,0 – 7,5 N, kai $d \in [7 - 8\,mm]$ kuomet srovė neteka ir iki 7,5 – 9,0 N, kai $d \in [7 - 8\,mm]$ ir teka I = 1,2 A stiprio srovė. Tokiu atveju elektromagneto galia 6,2 W ir jam nereikia papildomo vėsinimo.

Valdant srovę, priklausomai nuo tarpelio dydžio keliamąją jėgą galima keisti 1,5 – 2,5 N ribose). Skaičiavimai parodė, kad to pakanka stabiliai levitacijai užtikrinti. Elektromagnetas atitinka jam iškeltus reikalavimus – geba pakelti iki 900 g sveriantį bandinį.

Sėkmingai sudarytas matematinis modelis ir jį realizuojanti programa. Rasti PID valdiklio koeficientai $K_p = 0$, $K_D \in [0{,}032 - 0{,}051]$, $K_I \in [0{,}02 - 0{,}65]$ ir $K_I \in [0{,}7 - 1]$. Mechaninių virpesių įtaka elektromagnetui optimaliai sumažinama sudarytu matematiniu stendo modeliu apskaičiavus PID valdiklio koeficientus.

`

Literatūros sąrašas

[1]. "AerojetCubeSatThrusters". Aerojet Rocketdyne. *www.rocket.com/cubesat*

[2]. "Spacecraft Propulsion – Chemical". www.sv.vt.edu. 2015

[3]. Dominyka stonytė „NYKŠTUKINIO PALYDOVO MATAVIMŲ STENDAS SU MAGNETINĖS LEVITACIJOS PAKABA*“*

[4]. Weinstock, Robert. "On a fallacious proof of Earnshaw's theorem". *American Journal of Physics*

[5]. *Brian douglas – „Fundamentals of Control theory“ 2016*

[6]. Mike Blundell, Damian Harty, The Multibody Systems Approach to Vehicle Dynamics (Second Edition), 2015

[7]. B. Kvedaras, M. Sapagovas „Skaičiavimo metodai“

[8]. Raimondas Čiagies „Diferencialinių lygčių skaitiniai sprendimo metodai“

[9]. *R.Barauskas, R.Belevičius, R.Kačianauskas „Baigtinių elementų metodo pagrindai“*

[10]. MICROTHRUSTERS FOR NANOSATELLITES, Janson, Helvajian, Hansen, and Lodmell 1999

[11]. Recommended Practice for Thrust Measurement in Electric Propulsion Testing JOURNAL OF PROPULSION AND POWER 2017

[12]. Angeles, J., “Time Response of First- and Second-Order Dynamical Systems,” Dynamic Response of Linear Mechanical Systems: Modeling, Analysis and Simulation, Springer, New York, 2012, Chap. 2.

[13]. Cesare, S., Musso, F., D’Angelo, F., Castorina, G., Bisi, M., Cordiale, P., Canuto, E., Nicolini, D., Balaguer, E., and Frigot, P.-E., “Nanobalance: The European Balance for Micro-Propulsion,” 2009.

[14]. Ziemer, J., “Performance Measurements Using a Sub-Micronewton Resolution Thrust Stand,” 2001.

[15]. Manzella, D., Oleson, S., Sankovic, J., Haag, T., Semenkin, A., and Kim, V., “Evaluation of Low Power Hall Thruster Propulsion,” 1996.

[16]. Nicolini, D., Frigot, P., Musso, F., Cesare, S., Castorina, G., Ceruti, L., Bartola, F., Zanella, P., Ceccanti, F., Priami, L., and Paita, L., “Direct Thrust and Thrust Noise Measurements on the LISA Pathfinder Field Emission Thruster IEPC-2009-183,” 2009.

`

Martynas Mažrimas

MECHANICAL VIBRATION ISOLATION WITH MAGNETIC LEVITATION STAND STUDY

Summary

Nanosatellites are gaining popularity. However, in order to complete certain maneuvers in space they require thrust levels of the μN order. To achieve such small force a sensitive jet engine is required as well as a device capable of measuring thrust force in the μN order. Popular devices to measure nanosattelite jet engine thrust are pendulum stands, but they have a mechanical connection to the jet engine and use springs. Both background noise and vibrations caused by the spring are transfered to the jet engine via mechanical connection thus creating noise in the measurements and compromising the accuracy. In order to isolate vibrations from the test subject a magnetic levitation stand is used. According to Earnshaw theorem achieving stable mechanical equilibrium is impossible in a static magnetic field. Achieving magnetic levitation requires a changing magnetic field so a PID feedback loop controller system is used to actively change the current output to the magnet accordingly. A capacitor sensor is used to measure the distance between electromagnet and the jet engine these measurement are then passed to the PID controller to adjust the current. The magnetic levitation stand is still vulnerable to background noise as it is transferred to the electromagnet through the stand. However, by creating a mathematical two degree of freedom model of the stand we can predict the motions of the system as well as account for the vibrations and actively dampen them with PID feedback loop algorithm. Having the mathematical stand model allows the use of numerical differential equation solving methods to simulate the experiment. This simulation allows solving for PID feedback loop coefficients $K_I,\ K_p,\ K_D$.