

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS

Žilvinas Mateikis

MAGNETINĖS LEVITACIJOS TYRIMAS IR ŠIO PROCESO
VALDYMAS

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas
Prof. Vytenis Sinkevičius

PANEVĖŽYS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS
TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

Doc. dr. Arūnas

Tautkus

2016-06-01

MAGNETINĖS LEVITACIJOS TYRIMAS IR ŠIO PROCESO
VALDYMAS

Baigiamasis magistro projektas
VALDYMO TECHNOLOGIJOS (kodas 621H66001)

Vadovas

2016-06-01 Vytenis Sinkevičius

Recenzentas

2016-06-

Projektą atliko

Žilvinas Mateikis

2016-06-01

KAUNAS, 2016



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

(Fakultetas)

Žilvinas Mateikis

(Studento vardas, pavardė)

Valdymo technologijos, 621H66001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Magnetinės levitacijos tyrimas ir šio proceso valdymas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 16 m. Birželio 1 d.
Panevėžys

Patvirtinu, kad mano Žilvino Mateikio baigiamasis projektas tema „Magnetinės levitacijos tyrimas ir šio proceso valdymas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

TURINYS

1. ĮVADAS	7
2. ANALITINĖ DALIS	8
1.1. Levitacija	8
1.2. Elektromagnetinės levitacijos taikymo sritys	9
1.3. MAGLEV sistemos	9
1.3.1. Magnetiniai guoliai	11
1.3.2. Magnetinės vėjo turbinos	12
1.3.3. Buityje naudojami įrenginiai, veikiantys magnetinės levitacijos pagrindu	13
1.4. Elektromagnetinės levitacijos reiškinio realizacija	15
3. EKSPERIMENTINĖ DALIS	20
1.5. Tuščios eigos tyrimai	20
1.5.1. Srovės jutiklio priklausomybių tyrimas.....	20
1.5.2. Magnetinio lauko jutiklio tyrimas tuščioje eigoje.....	26
1.5.3. Galios stiprintuvo tyrimas	28
1.6. Tyrimai su apkrova	30
1.6.1. Magnetinio srauto jutiklio tyrimai esant objektui prie solenoido.....	39
4. TIRIAMOJI DALIS	40
5. IŠVADOS	47
6. LITERATŪROS SĄRAŠAS	48

Mateikis, Ž. Magnetinės levitacijos tyrimas ir šio proceso valdymas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. Vytenis Sinkevičius; Kauno technologijos universitetas, Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas, Technologijų katedra.

Panevėžys, 2016. 39 psl.

SANTRAUKA

Darbo tikslas yra sukurti magnetinės levitacijos valdymo sistemą ir ištirti levituojančių objektų stabilumo kriterijus. Šiame darbe apžvelgiamos įvairios elektromagnetinės levitacijos sistemos, jų valdymo būdai, nagrinėjamos techninės, programinės priemonės, kurios užtikrina levituojančių objektų stabilumą. Taip pat nustatyti elektromagnetinės levitacijos proceso kritiniai parametrai, jų išplėtimo galimybės.

Ekspimentinėje dalyje aprašyta kuriamos sistemos aparatūrinė dalis.

Tiriamajoje darbo dalyje apskaičiuoti elektromagnetinės ritės parametrai, išanalizuotos medžiagos, iš kurių gali būti pagaminta ritė ir atrinktos efektyviausios iš jų, aptarta, kokia elektromagnetinė ritė geriausiai tinka kuriamam magnetinės levitacijos įrenginiui. Taip pat ištirtas sukurtos sistemos stabilumas, parinkti optimalūs valdymo sistemos parametrai, keičiant objekto svorį. Nustatyti didžiausias ir mažiausias atstumai nuo elektromagneto iki objekto, ištirtos valdymo sistemos parametru ribų išplėtimo galimybės ir reikalingos tam priemonės.

Išvadose apibendrinti gauti tyrimų metu rezultatai, kurie palyginti su kitų mokslinių darbuose pateiktais rezultatais. Pateikti siūlymai dėl suprojektuoto magnetinės levitacijos įrenginio pritaikymo galimybių.

Mateikis, Z. Research of Magnetic Levitation process and its control. Masters final project / Head of the work prof. Vytenis Sinkevičius; Kaunas university of Technology, Panevezys Faculty of Technologies and Business, Department of Technologies.

Panevėžys, 2016. 39 pages.

SUMMARY

The aim of work is to create magnetic levitation's management system and explore stability standards of levitating objects. In this work there are overviewed various electromagnetic levitation's systems, their management ways, analyzed technical programme devices, which ensure levitating objects stability. Also there are determined critical parameters of electromagnetic levitation's process , their expansion opportunities.

In the experimental part there is described creating system's hardware part.

In the exploratory work part there are calculated the electromagnetic coil's parameters, analyzed the materials of which can be manufactured the coil and selected the most effective of them, discussed what the electromagnetic coil is the best suited in setting the magnetic levitation's device. Also there is investigated the stability of the created system, selected optimal control system parameters, changing the weight of the object. There is determined maximum and minimum distances from the solenoid (electromagnet) to the object, explored management system's parameters limits expansion opportunities and the necessary measures in order.

In the conclusions are summarized the results of the studies, which are compared with other scientific works submitted results. There are submitted proposals for the designed magnetic levitation device adjusted options.

1. ĮVADAS

Darbo naujumas ir aktualumas. Magnetinės levitacijos reiškinys pradėtas nagrinėti šeštajame ir septintajame praėjusio amžiaus dešimtmečiuose. Tais laikais buvo fiksuojama ir aprašoma labai nedaug levitacijos atvejų, dažniausiai tik kaip į orą kyla žmonės arba objektai. Turbūt daugelis pamena antrą fantastinio filmo-trilogijos „Atgal į ateitį“ dalį, kurioje pagrindinis herojus persikėlė į 2015 m. ir susidūrė su skraidančiomis riedlentėmis. Tais laikais, kai buvo pastatytas šis filmas, atrodė, kad tai fantastika, kuri niekada nevirš realybe. Tačiau šiuo metu magnetinės levitacijos pagrindu veikiančių įrenginių tiek paklausa, tiek paplitimas didėja. Keliaujant galima pastebėti, kaip intensyviai modernizuojamos miestus jungiančios geležinkelio linijos. Transporto inžinerijoje, būtent geležinkelių srityje, revoliuciją pradėjo magnetinės levitacijos principo atradimas, kai didžiuliu greičiu skriejantis traukinys pakyla virš bėgių. Tokios linijos jau veikia kai kuriose pasaulio valstybėse. Traukinys, lekiantis 500 km/h greičiu, atrodo įspūdingai, tačiau magnetinės levitacijos technologijos kol kas labai brangios. Todėl viso pasaulio mokslininkai deda dideles pastangas magnetinės levitacijos reiškiniui iširti ir įvairiems to reiškinio realizacijos būdams sukurti.

Darbo metodai – mokslinės literatūros analizė ir eksperimentai.

Darbo objektas – magnetinės levitacijos reiškinys.

Darbo tikslas: sukurti magnetinės levitacijos valdymo sistemą ir iširti levituojančių objektų stabilumo kriterijus.

Darbo uždaviniai:

1. Išnagrinėti egzistuojančias magnetinės levitacijos sistemas ir šių sistemų realizacijos būdus.
2. Išsiaiškinti, kokiomis techninėmis, programinėmis ar kt. priemonėmis užtikrinamas levituojančių objektų stabilumas.
3. Suprojektuoti ir eksperimentiškai iširti levitacinės sistemos stabilumą.
4. Parinkti sukurtai sistemai optimalius valdymo parametrus, keičiant objekto svorį.
5. Nustatyti kritinius parametrus (didžiausią ir mažiausią atstumus nuo elektromagneto iki objekto), šių parametrų ribų išplėtimo galimybes ir tam reikalingas priemones.

2. ANALITINĖ DALIS

1.1. Levitacija

Kas yra levitacija? Terminų žodyne [1] terminas *levitacija* apibūdinamas kaip „materialių kūnų savaiminis kilimas į orą ir pakibimas jame, prieštaraujantis visuotiniam Žemės traukos dėsniai“. Kitaip sakant, levitacija yra tiek daikto, tiek žmogaus gebėjimas pakilti ir sklandyti erdvėje, nepaisant gravitacijos dėsnio.

Egzistuoja kelios levitacijos rūšys:

- elektromagnetinė (traukos ar stūmimo aukštn jėgą sukuria elektromagnetiniai laukai);
- optinė;
- akustinė.

Šiame baigiamajame darbe analizuojama elektromagnetinė levitacija, kai objektas yra metalinis ar turi masyvią metalinę dalį. Levituojančiame objekte nėra pastovių magnetų. Elektromagnetinės levitacijos taikymo sritys:

- transporto inžinerijoje (MAGLEV traukiniai);
- aplinkos inžinerijoje (magnetinės vėjo turbinos);
- kosminėje pramonėje (erdvėlaiviai, raketos);
- mechanikos inžinerijoje (magnetiniai guoliai);
- elektros inžinerijoje (magnetai) ir kt.

Elektromagnetinės levitacijos reiškinį (arba Meisnerio efektą) 1933 m. pirmą kartą pastebėjo vokiečių mokslininkas fizikas Valteris Fricas Meisneris, pasinaudojęs superlaidumo atradimu [2].

Superlaidumą 1911 m. atrado fizikas Heikė Kamerlingas Onesas (Heike Kamerlingh Onnes). Jis pastebėjo, kad gyvsidabris, atšaldytas iki 269 C temperatūros, netenka varžos.

Superlaidumas – kai kurių medžiagų gebėjimas kritinėje temperatūroje turėti nulinę elektrinę varžą. Superlaidžiomis savybėmis pasižyminti medžiaga (aliuminis, alavas, kai kurie puslaidininkiai ir metalų lydiniai) vadinama superlaidininku. Tačiau superlaidumu nepasižymi taurieji metalai (pvz., auksas ar sidabras) ir dauguma feromagnetinių metalų. Iš superlaidininkų galima pagaminti labai stiprius elektromagnetus, nes jais gali tekėti labai stipri elektros srovė [3].

Elektromagnetinė levitacija – tai daiktų pakėlimo metodas, naudojant vien tik elektromagnetinį lauką. Elektromagnetinė levitacija pasiekama tada, kai stipri magnetinė jėga įveikia gravitacinę jėgą. Daiktai gali būti pakeliami į orą, jei pakankamo stiprumo dvipoliai magnetai padedami ten, kur jie turi sukurti magnetinį lauką aplink daiktus.

Atlikta eksperimentų, kuriais akivaizdžiai iliustruojama, kaip į orą pakeliamos ir jame kabo įvairios monetos ar net kristalo gabalėliai. Reikia paminėti, kad metalai ore gali ne tik levituoti, bet ir

tuomet pat metu lydysis. Tas elektromagnetinis stebuklas, kuris priverčia metalus būtent taip elgtis, yra indukcinis šildytuvas. Į orą pakeltas, pavyzdžiui, nedidelis aliuminio svarelis erdvėje ne tik levituoja, bet ir veikiamas indukcinio šildytuvo įkaista iki $+1200^{\circ}\text{C}$, o vėliau išsilydo. Reikia, kad indukcinis šildytuvas būtų apytiksliai 1,6 kW galios ir 204 kHz dažnio (1 pav.) [4].



1 pav. Levituojantis ir lydomas aliuminio gabalėlis [4]

1 paveiksle pavaizduoto eksperimento metu maždaug po 1,5 min. aliuminio svarelis pakeičia spalvą: iš sidabrinės į oranžinę, vėliau į rausvą, o po kurio laiko įkaista iki baltumo. Kad cilindras visiškai išsilydė, įsitikinti galima išjungus šildytuvą. Iki baltumo įkaitusio aliuminio lydiny s krinta ant stalo ir virsta akimirksniu sustingstančio nepaprastai karšto metalo balute.

Elektromagnetine levitacija įmanoma pasiekti ir dar daugiau – Kinijoje jau dabar važinėja traukiniai ant magnetinių oro pagalvių.

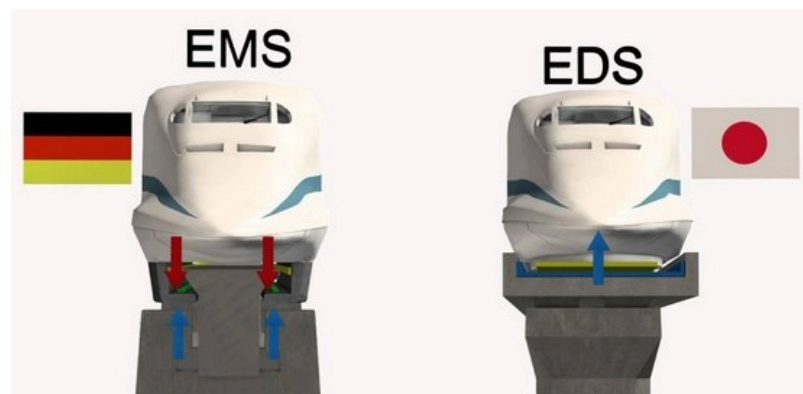
1.2. Elektromagnetinės levitacijos taikymo sritys

1.3. MAGLEV sistemos

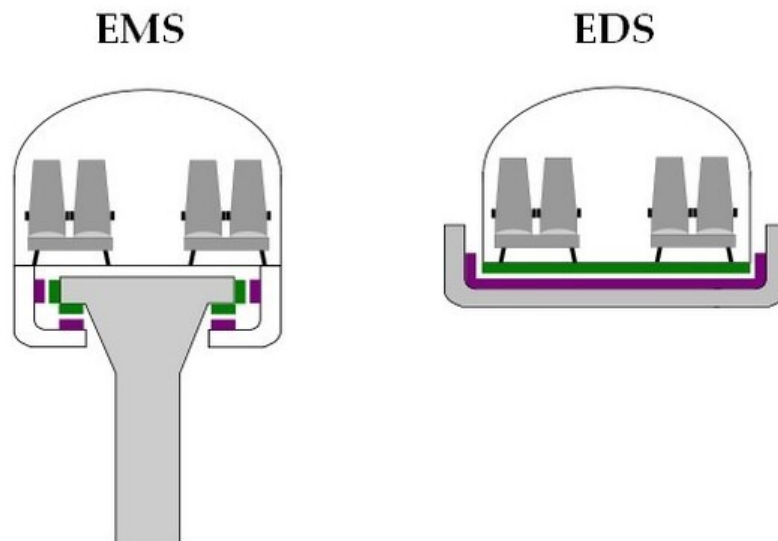
Šiuo metu populiariausias magnetinės levitacijos kūrinys yra greitas traukinys (2 pav.). Tokias sistemas dar vadina MAGLEV (*MAGnetic LEVitation*) sistemomis. Šiose sistemose naudojamos dvi elektromagnetinės rūšies bėgių pakabos: tai EMS technologija (3 pav.), kuri traukiniui pakelti naudoja traukiančią elektromagnetų jėgą ir EDS technologija (3 pav.), kuri naudoja elektromagnetų stumiančią jėgą tarp dviejų magnetinių laukų traukiniui nuo bėgių stumti. Šie traukiniai gali pasiekti apytiksliai 500 km/h greitį, JAV mokslininkai mėgina šį traukinį įdėti į vakuuminį vamzdį, kur jis galėtų pasiekti net 4000 km/h greitį.



2 pav. Greitasis MAGLEV traukinys [5]



a)



b)

3 pav. EMS ir EDS technologijos: a) realus vaizdas; b) vidinis pjūvis [5]

Taigi MAGLEV sistemos:

1. pasižymi aukštomis eksploatacinėmis charakteristikomis: didžiausias greitis (581 km/val., vietomis – net 1 000 km/val.), technologijas galima taikyti agresyviose terpėse, esant aukštomis ir žemoms temperatūroms;
2. yra ekonomiškos (didelis atsparumas nusidėvėjimui);
3. pasižymi energijos vartojimo efektyvumu (energija MAGLEV sistemose naudojama tris kartus efektyviau negu automobiliuose ir penkis kartus efektyviau negu lėktuvuose);
4. yra ekologiškos (žemas triukšmo lygis);

Nežiūrint visų šių sistemų pranašumų, šiuo metu vienas didžiausių trūkumų yra jų kaina. Tokioms sistemoms turi būti nutiestas naujas specialus kelias, o jo tiesimas atsieina labai brangiai – senų geležinkelio linijų modernizuoti MAGLEV poreikiams neįmanoma. Todėl tokio tipo viešasis transportas, galima sakyti, egzistuoja tik Japonijoje.

1.3.1. Magnetiniai guoliai

Magnetiniai guoliai (4 pav.) naudojami kaip detalės įvairiuose įrenginiuose, prietaisuose ir mechanizmuose. Akivaizdžiu privalumu laikoma tepimo medžiagų nenaudojimas, nes nėra mechaninio kontakto tarp judančių detalių.

Tai suteikia plačias panaudojimo galimybes tokiems guoliams ekstremaliomis sąlygomis, kur sudėtinga atlikti remonto ar aptarnavimo darbus (pvz., atominė energetika) [5].



4 pav. Magnetiniai guoliai

Amerikiečių fizikai atliko tyrimus, susijusius su objekto padėties erdvėje valdymu naudojant magnetinę levitaciją, t. y. bekontaktius objekto judesius ore arba skystyje. Tyrimo rezultatus mokslininkai publikavo žurnale „Proceedings of the National Academy of Sciences“.

Manoma, kad tyrimų rezultatai leis sukurti minkštus robotus – elastingas mašinas be kietų konstrukcijos sujungimų elementų.

Eksperimentinė platforma, kurioje buvo atlikti bandymai, atrodo taip: tarp dviejų nuolatinių magnetų padėtas konteineris su paramagnetiniu skysčiu, o šiame skystyje – diamagnetinis objektas, kurio orientaciją mokslininkai ir sugebėjo valdyti.

Objekto padėtis konteineryje veikiama magnetinių ir gravitacinių jėgų, taip pat jo geometrijos ir vidinių struktūrų. Tyrimams mokslininkai naudojo rutuliukus ir cilindrus.

Objektų (šiuo atveju – cilindrų) buvimo vietos ir orientacijos reguliavimas buvo atliekamas naudojant išorinius magnetus.

1.3.2. Magnetinės vėjo turbinos

Magnetinėje levitacijoje plačiai naudojamos magnetinės vėjo turbinos (5 pav.). Panaudojus magnetinius guolius jos tapo ypač patrauklios elektros energijai išgauti iš vėjo. Faktiškai vėjo generatoriaus rotorius kabo magnetiniame lauke ir neturi kinematinės trinties porų. Todėl vėjo energija neekvojama trinčiai tarp detalių nugalėti [5].



5 pav. Magnetinės vėjo turbinos

2007 m. Jungtinėse Amerikos Valstijose išradėjai Jamesas A. Rowanas ir Thomasas J. Priest-Brownas užpatentavo naują magnetinės vėjo turbinos technologiją. Tai vėjo turbina su vertikalia ašimi. Vertikali ašis ir ant jos sumontuoti metalo lakštai magnetiškai pakeliami virš turbinos pagrindo, todėl sumažinama trintis sistemoje. Lakštai arba mentės apie vertikalią ašį išdėstyti taip, kad būtų panašūs į išsipūtusią laivo burę ir pagautų vėją 360° kampu, esant bet kokioms vėjo sąlygoms. „Sistema turi ašinio srauto alternatorių su kintamos varžos ritėmis, kurios gali būti atskirai įjungiamos ar išjungiamos, priklausomai nuo vėjo sąlygų ir reikiamo traukimo. Rites taip pat galima naudoti mechaniniam turbinos stabdymui, esant stipriam vėjui arba techniniam aptarnavimui atlikti. Sistemą

galima užprogramuoti, kad ji nustatytų, ar jos sugeneruota elektros energija turi būti perduodama į viešo paskirstymo tinklus, ar naudojama vietinei akumuliatorių sistemai pakrauti.“ [6]

1.3.3. Buityje naudojami įrenginiai, veikiantys magnetinės levitacijos pagrindu

Kompanija „Darfon“ parodoje „Computex 2014“ pristatė nešiojamiems kompiuteriams skirtą klaviatūrą (6 pav.), kurios tipinis silikoninis paspaustų mygtukų grąžinimo mechanizmas pakeistas elektromagnetiniu lauku.



6 pav. MAGLEV klaviatūra [7]

Klaviatūroje naudojama ta pati technologija, kaip ir itin greitų traukinių, veikiančių magnetinės levitacijos principu. Elektromagnetinis laukas grąžina mygtuką po paspaudimo į pradinę būseną.

Iš klaviatūros pašalinus įprastą silikoninį mygtuko grąžinimo mechanizmą, kūrėjams pavyko sukurti plonesnį analogą už tuos, kurie naudojami dabartiniuose nešiojamuose kompiuteriuose.

Panašūs sprendimai ypač patrauklūs ultrablokų ir kitų mobiliųjų sistemų gamintojams, vis dar naudojantiems mechaninę duomenų įvestį. Tačiau žmonės, išbandę šią naujovę, teigia, kad klaviatūra nėra tokia patogi kaip jau įprastos, mechaninės. Komforto neprideda ir labai maža mygtukų eiga. Tačiau mokslininkai teigia, kad viską galima patobulinti, nes elektromagnetinio lauko stiprumą galima reguliuoti. Taip galima pasiekti vartotojui patogią mygtukų paspaudimo pasipriešinimo jėgą [7].

Magnetinės levitacijos principas taip pat naudojamas įvairių žaislų bei suvenyrų gamyboje (7–9 pav.). Dažniausiai tokie daiktai sudaryti iš sklendančio ore kūno, kuris turi metalinę dalį, t. y. plokštę ar juostą, ir pagrindo, kurį sudaro elektromagnetas. Šio elektromagneto magnetinio lauko stipris yra koku nors būdu reguliuojamas.



7 pav. Suvenyras – MAGLEV širdelė [8]

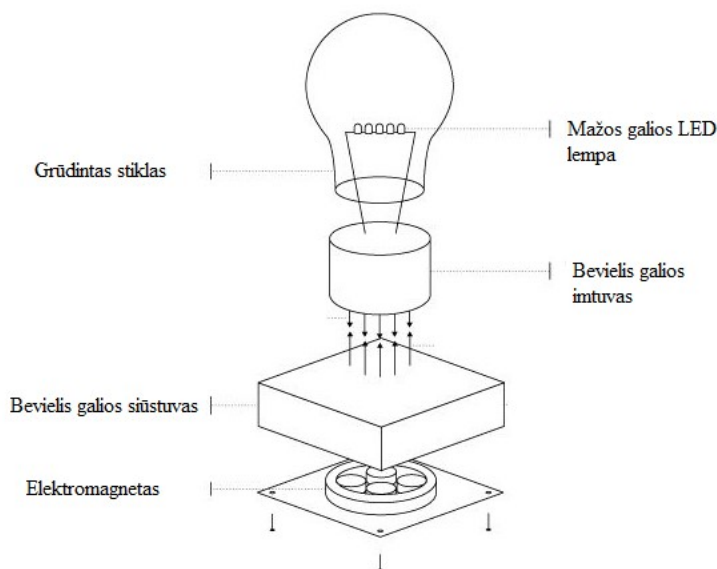


8 pav. MAGLEV stalias [9]



9 pav. MAGLEV šachmatai [10]

MAGLEV technologiją galima taikyti ir energijai perduoti. Dar vienas įrenginys, kuriame realizuotas elektromagnetinės levitacijos principas – levituojanti šviečianti lempa (10 pav.). Šis įrenginys energiją gauna ne iš baterijų, o iš elektromagneto. Tokį objektą sudaro mažos galios LED lempa, grūdinto stiklo gaubtas, belaidis energijos siųstuvas ir imtuvas.

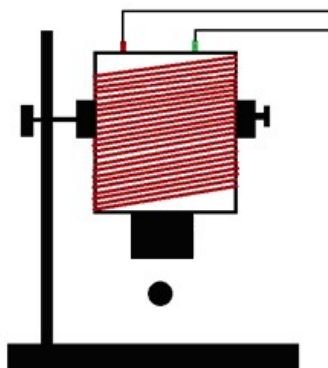


10 pav. MAGLEV lempa [11]

1.4. Elektromagnetinės levitacijos reiškinio realizacija

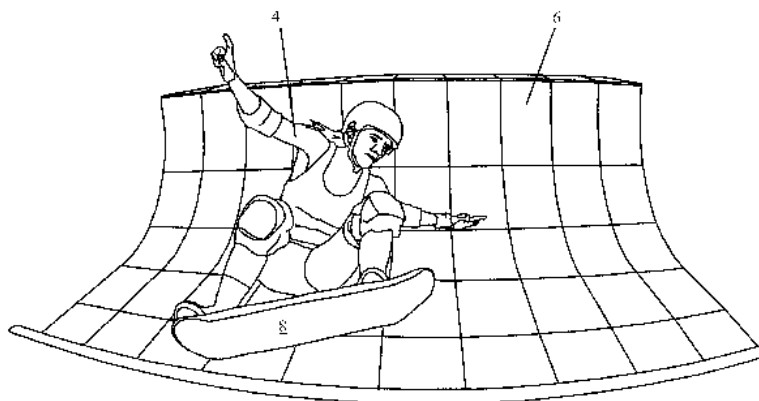
Sukurta labai daug įvairių levitacijos sistemų, kuriose levitacijos reiškinys realizuotas skirtingai. Pirmą levitacijos reiškinio realizacijos metodą sudaro solenoido ritė ir holo jutiklis, matuojantis elektromagnetinio lauko stiprį (11 pav.). Elektromagnetinio lauko stipris priklauso nuo srovės, tekančios ritė, stiprio ir atstumo, iki levituojančio objekto. Metalinis objektas, artėdamas prie solenoido šerdies, keičia magnetinio lauko stiprį prie Holo jutiklio. Šie pokyčiai panaudoti apskaičiuoti atstumą nuo solenoido šerdies galo iki levituojančio objekto.

Vieni tokio tipo sistemai realizuoti taiko tranzistorinį-relinį valdymo būdą, kiti renkasi valdiklį. Relinio valdymo būdas priklauso nuo panaudoto holo jutiklio parametrų. Yra parenkama slenkstinė jutiklio įtampa, kurią viršijus išjungiami solenoidu tekanti srovė. Priešingu atveju srovė įjungiami. Tokiu būdu levituojantis objektas švytuoja vertikalios ašies kryptimi, o atstumas iki solenoido šerdies galo toks, kad magnetinio lauko stiprio jutiklio išėjimo įtampa sutaptu su slenkstine įtampa.



11 pav. Elektromagnetas ir holo jutiklis

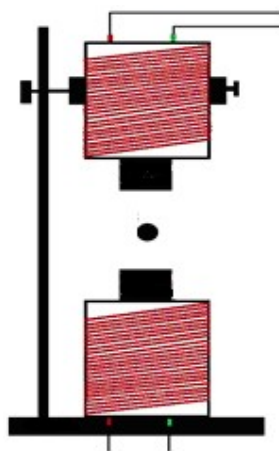
Toks magnetinės levitacijos realizacijos būdas naudojamas kuriant MAGLEV riedlentes (12 pav.). Tačiau tokio tipo sistemos turi vieną esminį trūkumą – jos gali veikti tik virš metalinio paviršiaus.



12 pav. MAGLEV riedlentės

Antrąjį levitacijos reiškinio realizacijos metodą (13 pav.) sudaro dvi ritės ir du holo jutikliai. Valdymas: viena ritė nuo kitos traukia levituojamą kūną ir taip išlaiko objektą ore [12] [13] [14]. Čia galima levituojančio objekto eiga yra didesnė.

Šios sistemos valdymas daug sudėtingesnis. Kadangi sistemoje naudojamos dvi ritės, tai reikalingi ir du holo jutikliai duomenims apie atstumą nuskaityti. Ši sistema už pirmąją pranašesnė tuo, kad esant magnetiniam poveikiui iš viršaus ir apačios daug lengviau išlaikyti objektą levituojantį.



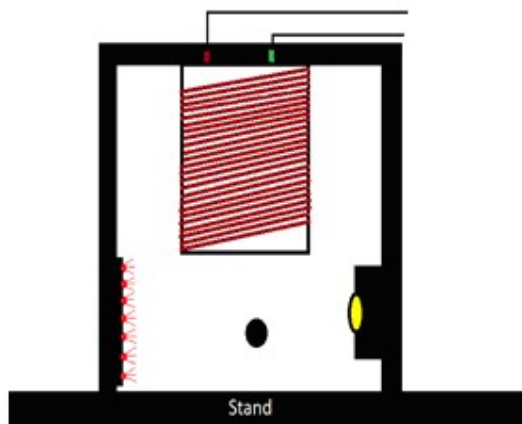
13 pav. Dviejų elektromagnetų sistema

Šis magnetinės levitacijos realizacijos būdas yra naudojamas MAGLEV traukiniuose, kur viena ritė yra pritaisyta prie traukinio korpuso, o kita – prie bėgių.

Trečiasis magnetinės levitacijos reiškinio realizavimo būdas (14 pav.) grindžiamas fotojutiklio, kuris matuoja atstumą iki solenoido šerdies galo, naudojimu. Yra trys pagrindiniai matavimo būdai:

- jutiklis yra žemiau levituojančio objekto, įtaisas MAGLEV įrenginio pado;

- jutiklis įtaisytas solenoido šerdies viduje;
- jutiklis įtaisytas MAGLEV sistemos šone ir sudarytas iš šviesos šaltinio ir foto varžos ar fotodiodų matricos (14 pav.).



14 pav. Elektromagnetas ir fotojutiklis

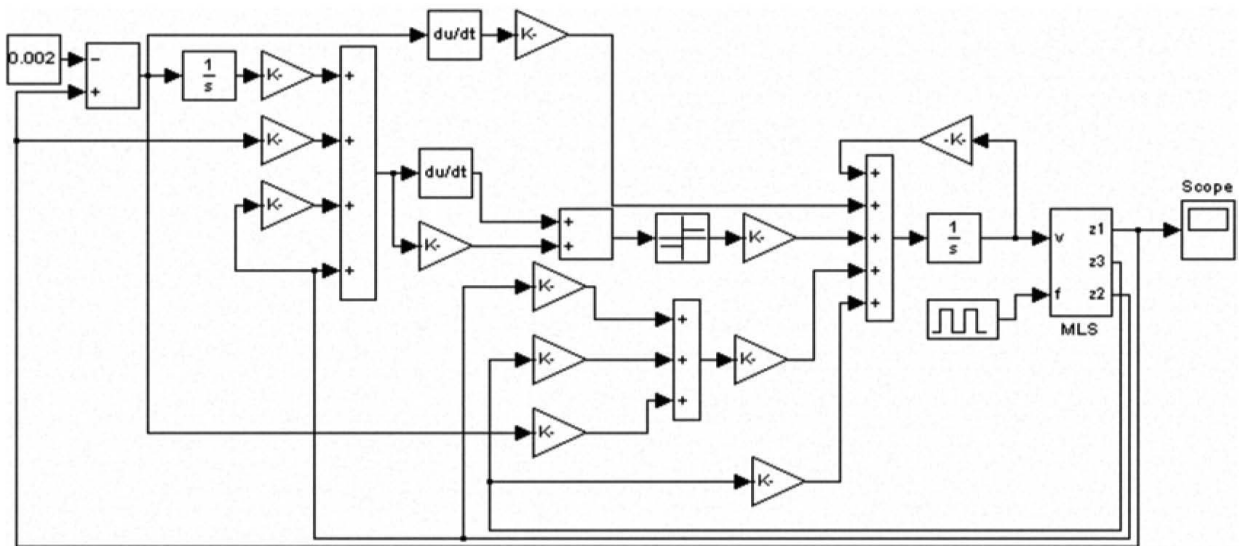
Levituojantis kūnas uždengia sklindančius šviesos spindulius nuo šviesos šaltinio ir taip sumažina šviesos srautą į fotojutiklius [15] [16] [17]. Tokio tipo sistemoje objekto ir fotojutiklio dalių matmenys turi būti suderinti tarpusavyje. Be to foto jutiklis turi būti įgilintas į korpusą taip, kad jo neveiktų aplinkos šviesa.

Magnetinės levitacijos principu veikiančių sistemų pradiniai tyrimai daugelio mokslininkų yra atliekami programos „MatLab“ terpėje „Simulink“ priemonėmis [18]. 15 pav. pavaizduotas vienas labiausiai aprašytų modelių, kurį sukūrė Kinijos mokslininkai. Čia yra įvertinti tokie MAGLEV sistemos modelio parametrai:

- plieno magnetinę skverbtį;
- oro tarpo magnetinę skverbtį;
- vakuumo absoliučiąją magnetinę skverbtį;
- magnetinį srautą;
- laisvojo kritimo pagreitį;
- kūno masę;
- žemės traukos jėgą;
- magnetinio lauko stiprį;
- magnetinę indukciją;
- elektromagneto šerdies plotą;
- šerdies spindulį;
- indukcijos B šerdyje vidurio linijos ilgį;
- oro tarpo ilgį;

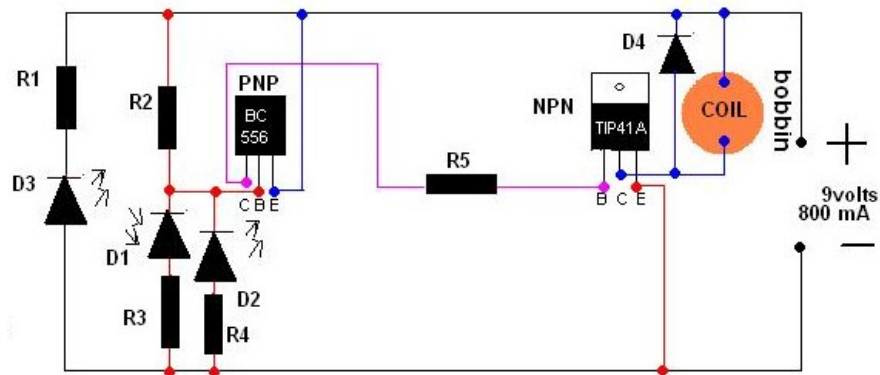
- srovę ritėje;
- ritės vijų skaičių.

Mokslinės literatūros analizė parodė, kad kuo preciziškiau, t. y. įvertinus kaip galima daugiau sistemą veikiančių poveikių ir pačios sistemos parametrų, sudarytas matematinis eksperimentinis modelis, tuo tikslesnius duomenis apie levituojančio kūno padėties kitimo aukštį (t. y. judėjimą aukštyn ir žemyn), svorio įtaką ir ritės magnetinio lauko traukos jėgą galima gauti.



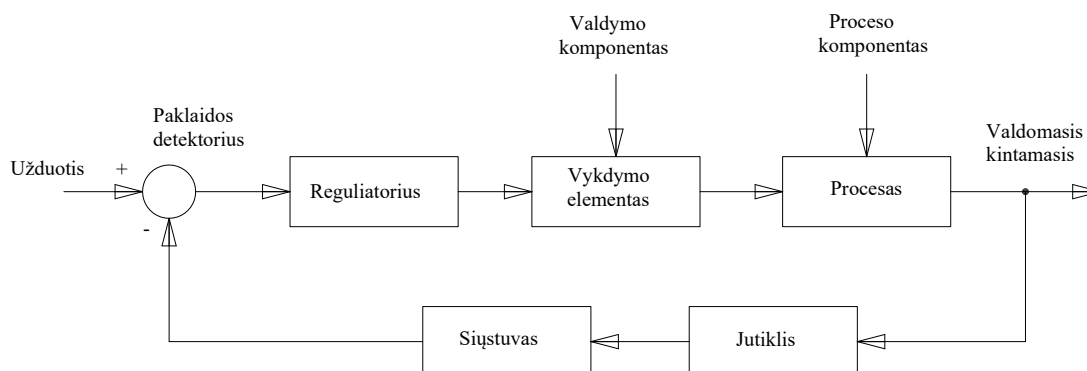
15 pav. „Matlab“ simuliacinis modelis [18]

Elektromagnetinės levitacijos sistemos tranzistorinio valdymo schema, dirbanti reliniame režime, pateikta 16 pav. Čia D3 yra atstumo jutiklio šviesos diodas, o D1 yra to jutiklio foto imtuvas. Tarp jų aukštyn ir žemyn juda levituojantis objektas. Diodas D2 indikuoja jutiklio būseną. Srovę solenoido ritėje komutuoja TIP41A tranzistorius, o diodas D4 skirtas panaikinti viršįtampius, kurie kyla uždarius tranzistorių ir taip nutraukiant srovės grandinę.



16 pav. Levitatoriaus schema [19]

Vienas iš pagrindinių šio baigiamojo projekto tikslų yra magnetinės levitacijos valdymo sistemos sukūrimas. Taigi, bus kuriama sistema su grįžtamoju ryšiu. Tokių sistemų struktūra yra tipinė ir pateikta 17 pav..



17 pav. Grįžtamojo ryšio sistemos blokinė diagrama

Magnetinės levitacijos atveju tokioje sistemoje užduotimi laikoma objekto pozicija. Palyginimo blokas (paklaidos detektorius) palygina esamą objekto poziciją su nustatyta užduotimi ir reguliatoriui perduoda šių dydžių skirtumą. Regulatorius, jo struktūra čia neapibrėžta, apdoroja skirtumą ir suformuoja valdantį signalą vykdikliams. Šiuo atveju priimta, kad galios stiprintuvas ir elektromechaninis vykdymo įtaisas yra vienas blokas.

Magnetinės levitacijos atveju vykdymo elementas yra elektromagnetinė ritė su metaline šerdimi, kuri dėka tekančios jos apvijomis srovės sukuria elektromagnetinį lauką.

Pats procesas šiuo atveju yra elektromagnetinio lauko sąveika su objektu. Proceso valdomas kintamasis (išėjimas) yra levituojančio ore kūno (objekto) pozicija atžvilgiu solenoido ritės šerdies galo. Pats procesas esminių trikdžių iš išorės neturi, nebent specialiai objektas būtų pastumtas vertikalia ar horizontalia kryptimi.

Grįžtamojo ryšio grandis, susidedanti iš jutiklio ir jutiklio signalo keitiklio. Yra naudojami keli sprendimai kaip nustatyti objekto atstumą iki solenoido šerdies galo [20].

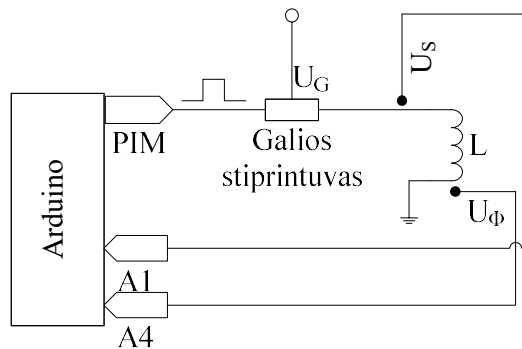
Analizuodami panašių sistemų šuolinę reakciją matome, kad mažinant kylančio objekto masę trumpėja pereinamosios reakcijos laikas ir susiregulavimo laikas, tačiau didėja amplitudė. Sistema yra stabili, švytavimas nuslopsta [20].

Tokios magnetinės levitacijos sistemos turi du darbo režimus. Pirmasis, tai kai objektas yra reikiamoje pozicijoje ir sistema tik stengiasi jį palaikyti toje vietoje. Antrasis, tai objekto įtraukimas ar nustūmimas į reikiamą poziciją. Tai būtų sistemos darbo pradžia, kai objektas tik įnešamas į magnetinį lauką, o sistemą jį pastato reikiamoje pozicijoje ir valdo jo levitaciją.

3. EKSPERIMENTINĖ DALIS

1.5. Tuščios eigos tyrimai

Šių tyrimų tikslas surasti srovės, tekančios per ritę, ir srovės jutiklio bei magnetinio lauko stiprio jutiklio perdavimo koeficientus. Eksperimento schema pateikta 18 pav.. Arduino PIM (Platuminės Impulsinės Moduliacijos) išvestis prijungta prie tranzistorinio BUZ11 galios stiprintuvo, dirbančio raktų režime. Galios stiprintuvo išėjimas sujungtas su solenoido rite, kuri turi metalinę šerdį. Šerdies apačioje, specialiai padarytame įdubime priklijuotas magnetinio lauko stiprio jutiklis. Galios stiprintuvo išėjimo įtampa U_G , srovės jutiklio įtampa U_S ir magnetinio lauko stiprio jutiklio įtampa U_ϕ prijungta prie Arduino analoginių signalų prievadų.



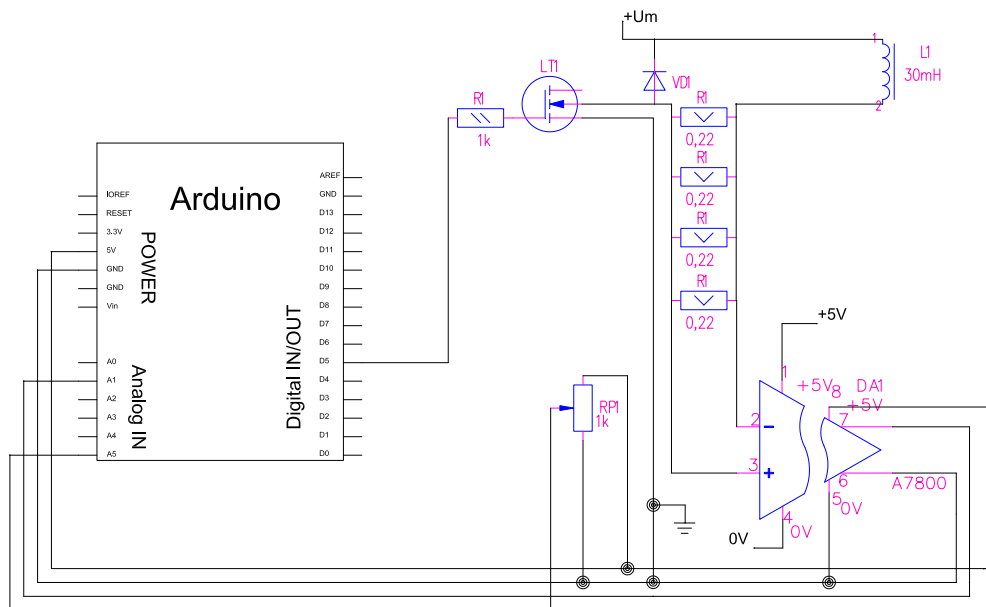
18 pav. Tuščios eigos tyrimo eksperimento schema

Solenoido ritės induktyvumas L yra 30mH, o šaltų vijų varža 2,96 Ω . Arduino analoginių jėgimų matavimo diapazonas yra nuo 0 iki 5V. Kadangi analogas-kodas keitiklis yra 10 bitų raiškos, tai gautų įtampos kodų reikšmės gali būti nuo 0 iki 1024.

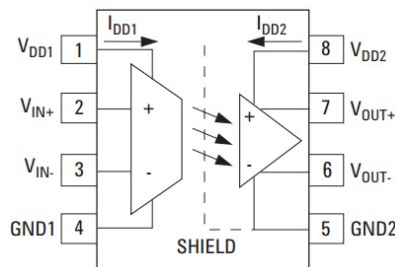
PIM panaudotas standartinis, todėl jo valdymui galimos kodų reikšmės nuo 0 iki 255.

1.5.1. Srovės jutiklio priklausomybių tyrimas

Srovės jutiklio ir matavimo schema parodyta 19 pav. Srovės grandinėje lygiagrečiai sujungtos 4-ios 0,22 Ω varžos ir jų ekvivalentinė varža yra 0,055 Ω . Prie šių varžų galų prijungtas optroninis operacinis stiprintuvas DA1. Operacinio stiprintuvo išėjimo kontaktas 7 prijungtas prie Arduino analoginio jėgimo A1. PIM reikšmės keičiamos rankiniu būdu sukant potenciometro R1 rankenėlę taip, kad srovė būtų pakeista žingsniu 0,5A. Eksperimento metu buvo matuojamas magnetinio lauko stipris, jo matavimo schema ir rezultatai pateikti kitame skyrelyje.



19 pav. Srovės jutiklio DA1 matavimo schema



20 pav. Optroninio operacinio stiprintuvo A7800 blokinė schema

Ekspimento metu srovė keičiama nuo 0 žingsniu 0,5A iki tol, kol PIM valdantis kodas tampa lygus 255 – maksimali galima reikšmė. Techninėje A7800 dokumentacijoje pateikta, kad optroninio operacinio stiprintuvo DA1 perdavimo koeficientas yra 8, o išėjimo įtampos nulis atitinka 2,545V (tačiau nurodyta, kad jis gali būti nuo 2,2V iki 2,8V). Maksimali išėjimo įtampa yra 3,8V, o minimali 1,29V. Kadangi pokytis išėjime yra 1,3V, tai maksimalus pokytis įėjime bus $1,3/8=0,1625V$. Planuojame matuoti iki 6A srovę. Todėl šunto varža turi būti ne didesnė kaip:

$$R = \frac{U}{i} = \frac{0,1625}{6} = 0,027\Omega. \quad (1)$$

Ekspimentą valdantis programos kodas:

```
int analogPin = 1;
int analogPin2 = 4;
int rasyti = 5;
int potPIN=7;
int val2 = 507; // stiprio jutiklio nulis
int val7=0; // PIM pradinė reikšmė
```

```

void setup()
{
  pinMode(rasyti, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
}
void loop()
{
  val = analogRead(analogPin); // srovės jutiklis
  val2 = analogRead(analogPin2); // srauto jutiklis
  val7=analogRead(potPIN); // potenciometras
  analogWrite(rasyti, val7); // PIM užduotis
  Serial.print(val7); // potenciometro įtampa
  Serial.print(" ");
  Serial.print(val-530); // srovės matuoklio įtampa
  Serial.print(" ");
  Serial.println(507-val2); // magnetinio lauko stipris
}

```

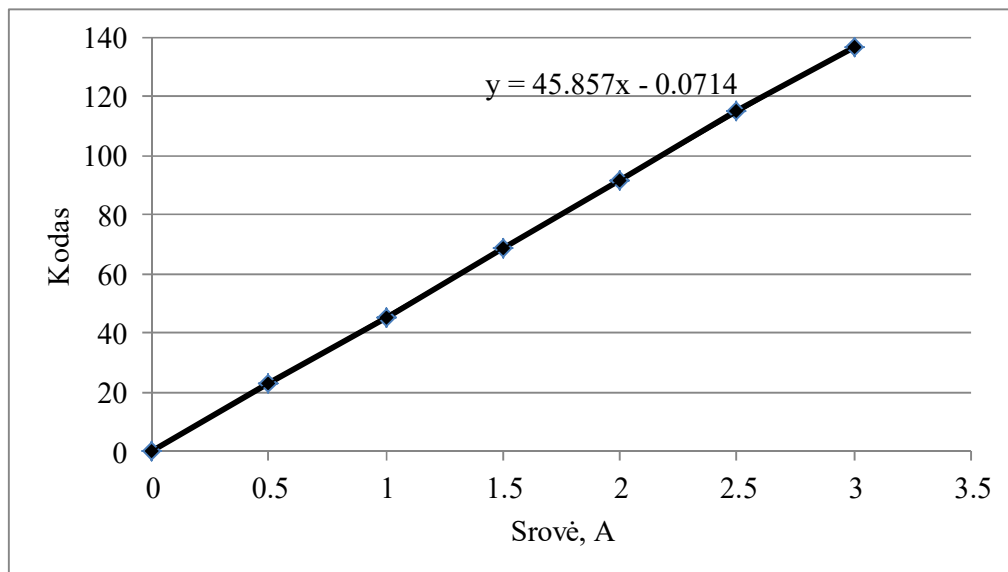
Ekspimento rezultatai pateikti Lentelė 1 ir 21 pav.

Lentelė 1

Srovės jutiklio tyrimo eksperimento rezultatai, kai $U_M=10V$

i	PWM	U_s	U_ϕ	ΔU_s	ΔU_ϕ
0	0	531	506	0	0
0.5	43	554	477	23	29
1	76	576	444	45	62
1.5	110	600	425	69	81
2	144	623	413	92	93
2.5	180	646	402	115	104
3	218	668	394	137	112
3.45	255	689	387	158	119

Iš lentelių aiškiai matoma, kad esant 10 V maitinimo įtampai pasiekta maksimali srovė 3,45 A. Nustatytos U_s ir U_ϕ kodų reikšmės: U_s kodas kinta nuo 531 iki 689. Reikšmė 531 atitinka optroninio stiprintuvo nulį. Todėl iš visų U_s reikšmių atimama 531 ir taip gaunama pokyčio ΔU_s reikšmė. Nustatyta, kad magnetinio srauto stiprio jutiklio nulis yra lygus kodui 506. Tada ΔU_ϕ reikšmių stulpelis gautas iš ΔU stulpelio reikšmių atėmus 506 ir pakeitus ženklą į plusą.



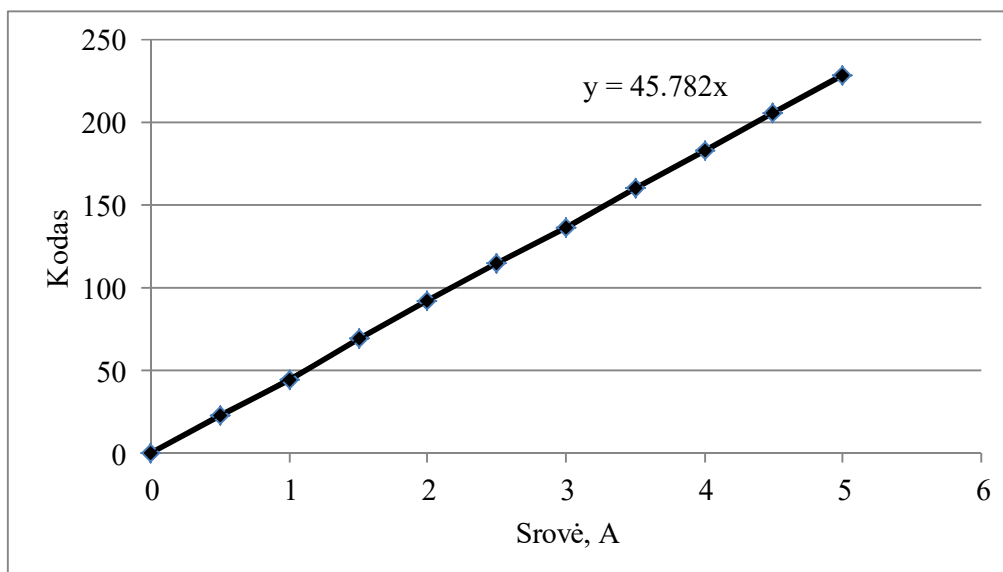
21 pav. Valdikliu išmatuotos srovės jutiklio kodo reikšmės priklausomybės nuo srovės stiprio, kai maitinimo įtampa 10V

Kitas tyrimas toks pats priklausomybių tyrimas atliktas padidinus maitinimo įtampą iki 15 V (Lentelė 2, 22 pav.). Gauta maksimali srovė, tekanti rite, 5,06 A. Tuo tarpu U_S ir U_ϕ kodų reikšmės: U_S 0-232, o U_ϕ 0-139 – soties režimas nepasiektas. Pati priklausomybė tiesinė.

Lentelė 2

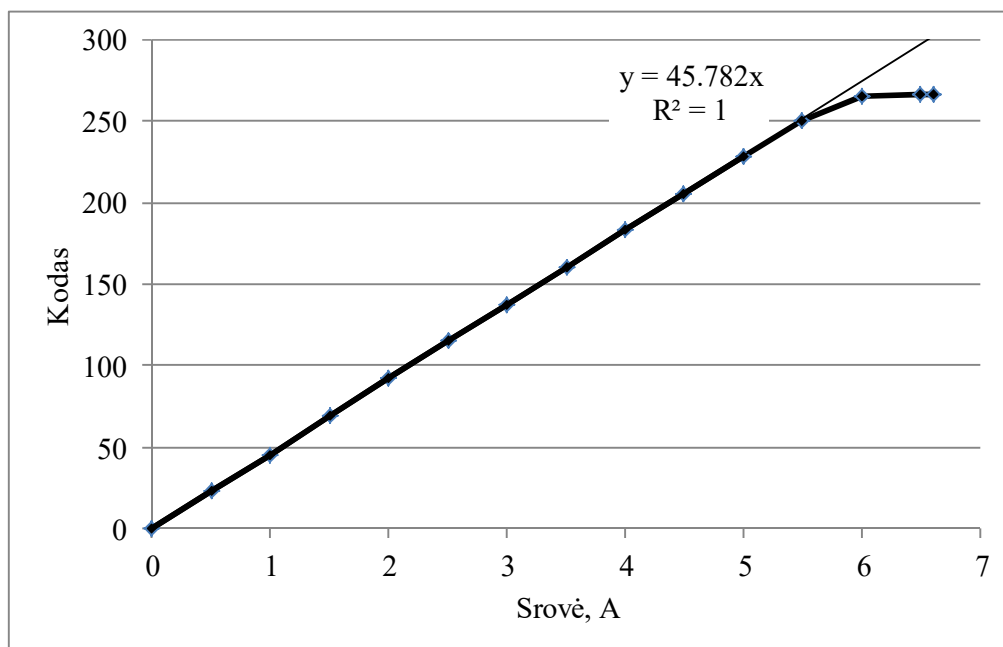
Srovės jutiklio tyrimo eksperimento rezultatai, kai $U_M=15V$

i	PWM	U_S	U_ϕ	ΔU_S	ΔU_ϕ
0	0	531	506	0	0
0.5	29	554	477	23	29
1	52	576	444	45	62
1.5	75	600	425	69	81
2	97	623	413	92	93
2.5	120	646	402	115	104
3	143	668	394	137	112
3.5	167	691	387	160	119
4	193	714	379	183	127
4.5	221	737	373	206	133
5	251	760	367	229	139
5.06	255	763	367	232	139



22 pav. Valdikliu išmatuotos srovės jutiklio kodo reikšmės priklausomybės nuo srovės stiprio, kai maitinimo įtampa 15V

Trečiuoju bandymu, kada panaudota maitinimo įtampa 20 V, gauta maksimali srovė 6,6 A, U_S kinta 0-267, o U_ϕ 0-156 (23 pav., Lentelė 3). Srovės matavimo sistema, tekant srovei virš 5,5-ių amperų dirba soties režime, todėl srovių matavimo diapazonas šioje schemoje yra nuo 0 iki 5,5 A. Soties režimo ribą galima pastumti į didesnių srovių diapazoną sumažinus srovės šunto varžą – lygiagrečiai prijungus vieną ar kelias varžas. Tolesniuose tyrimuose apsiribosime maksimalia 5,5 A srove, todėl srovės matavimo schemas nekeisime.



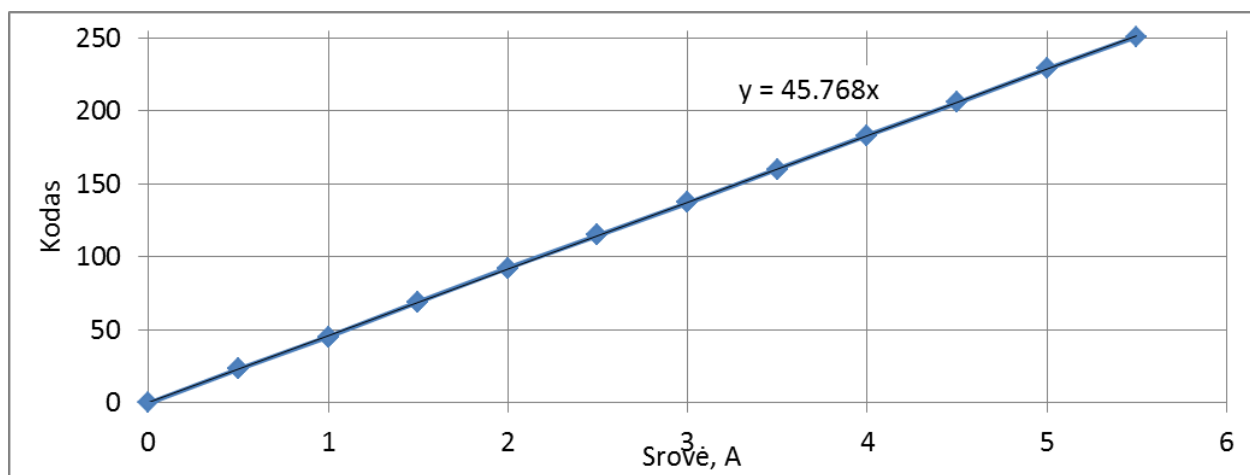
23 pav. Valdikliu išmatuotos srovės jutiklio kodo reikšmės priklausomybės nuo srovės stiprio, kai maitinimo įtampa 20V

Srovės jutiklio tyrimo eksperimento rezultatai, kai $U_M=20V$

i	PWM	U_s	U_ϕ	ΔU_s	ΔU_ϕ
0	0	531	506	0	0
0.5	22	554	474	23	32
1	40	576	442	45	64
1.5	57	600	426	69	80
2	74	623	412	92	94
2.5	91	646	400	115	106
3	107	668	392	137	114
3.5	125	691	387	160	119
4	144	714	380	183	126
4.5	163	737	371	206	135
5	182	760	366	229	140
5.5	202	782	361	251	145
6	225	797	356	266	150
6.5	250	798	351	267	155
6.6	255	798	350	267	156

Apdorojus visų trijų eksperimentų rezultatus nustatyta (24 pav.), kad Arduino kodas susietas su matuojama solenoido ritės srove tokia lygtimi:

$$\text{kodas}_i = 45,768 \cdot i \quad (2)$$

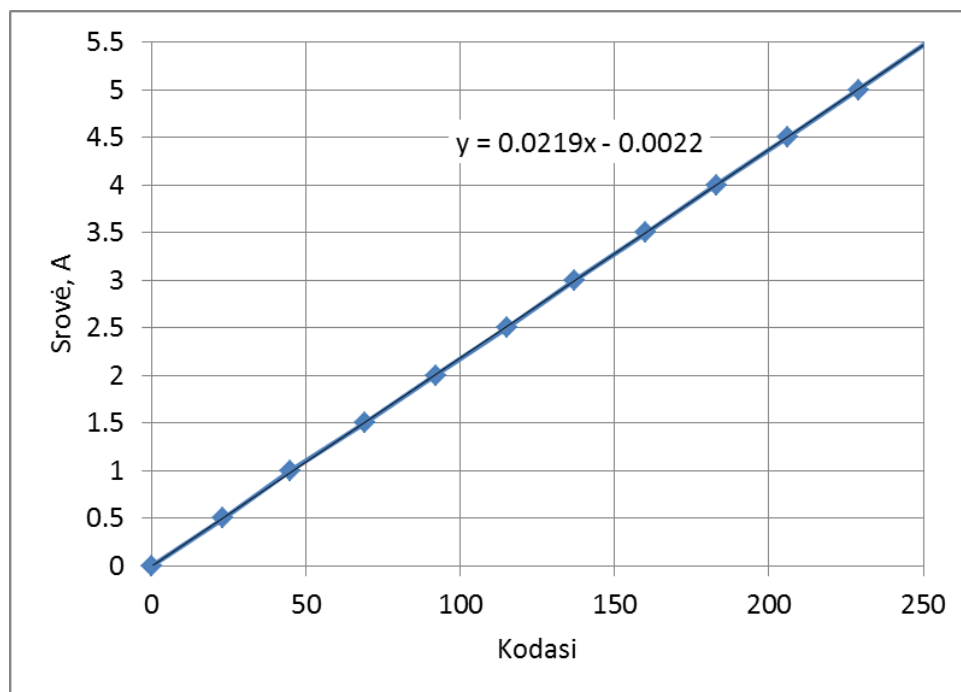


24 pav. Srovės jutiklio įtampos kodas ir solenoido srovės bendros priklausomybės, kai maitinimo įtampa 10V, 15V ir 20V

Valdymo metu būtina žinoti tikrąją solenoido srovės vertę, kuri toliau bus panaudota PID reguliatoriuje. Sudarysime tiesės lygtį srovės priklausomybėms kodų reikšmėms nuo 0 iki 250. Šios režimo sritį atmetame. Iš grafiko gauta tiesės lygtis yra tokia (25 pav.):

$$i = 0,0219 \cdot \text{kodas}_i - 0,0022 \quad (3)$$

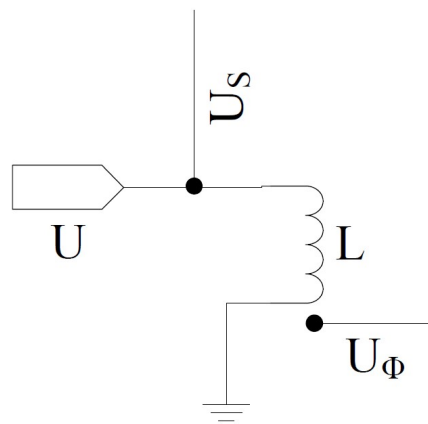
Koreliacijos koeficiento kvadrato reikšmė gauta $R = 1$



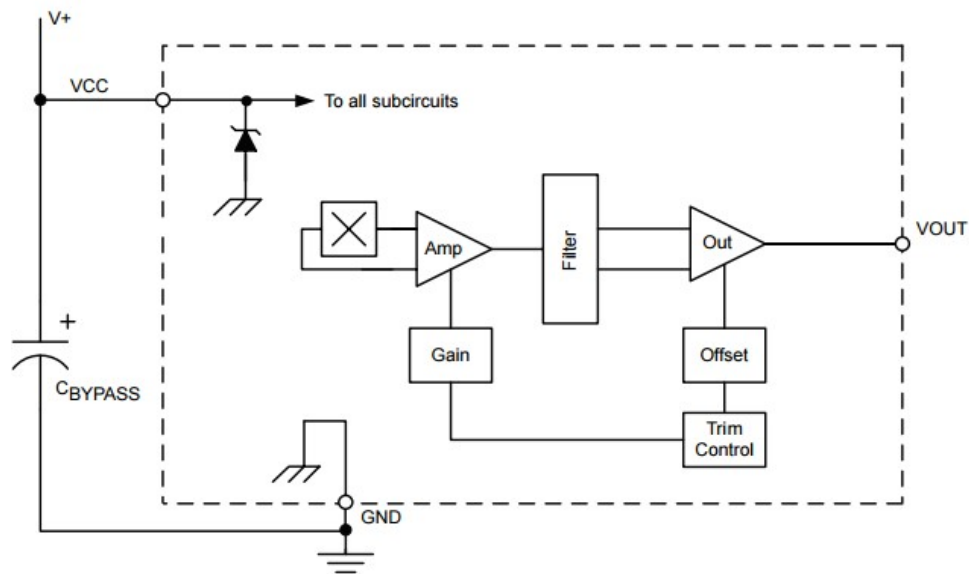
25 pav. Srovės jutiklio įtampos kodas ir solenoido srovės priklausomybių tiesinė dalis

1.5.2. Magnetinio lauko jutiklio tyrimas tuščioje eigoje

Prie solenoido metalinės šerdies apačios pritvirtintas holo jutiklis matuoja magnetinio lauko stiprį (26 pav.). Tačiau iš daviklio gaunamas signalas yra tik įtampos pokytis jutiklio išėjime (27 pav.). Techninėje jutiklio specifikacijoje nurodytas jautris yra 2,5 mV/G. Tačiau pagrindinėje lentelėje jau nurodytas jautrių diapazonas nuo 2.0 iki 3.0 mV/G. Holo jutiklis išėjimo signalo nulis 25°C temperatūros aplinkoje taip pat nurodomas diapazone nuo 2,4 – 2,6V įtampos. Magnetinio jutiklio tyrimai buvo atlikti du: vienas tuščioje eigoje, kai prie solenoido šerdies nebuvo jokių metalinių ar magnetinių objektų ir buvo keičiama srovė solenoido apvijose, antrasis, kai levituojantis objektas buvo pritvirtintas žinomam atstumui ir taip pat buvo keičiama srovė solenoido apvijose. Tuščios eigos tyrimo rezultatai pateikti lentelėse 1-3, i , U_{ϕ} ir ΔU_{ϕ} stulpeliai.



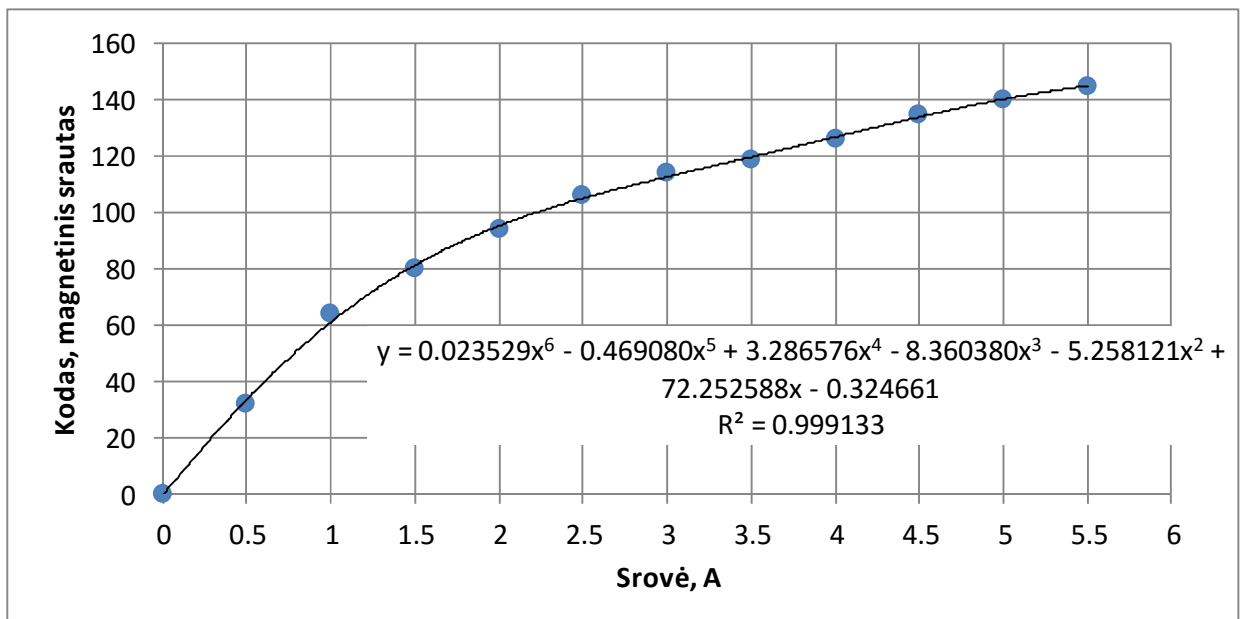
26 pav. Srovės ir magnetinio lauko stiprių jutiklių išdėstymo schema



27 pav. Magnetinio srauto stiprio jutiklio funkcinė – blokinė schema

Magnetinio lauko stiprio jutiklio įtampa matuojama Arduino analogas kodas keitikliu ir eksperimento rezultate gaunamas 10-ties bitų kodas. Kodo reikšmių priklausomybė nuo solenoido rite tekančios srovės, kai aplinkoje nėra metalinių ar magnetinių objektų, pateiktas 28 pav. Šis grafikas sudarytas iš Lentelė 1, 2 ir 3 duomenų. Magnetinio lauko stipris priklauso tik nuo srovės ir nepriklauso nuo maitinančios įtampos dydžio, grafike visos trys kreivės sutampa. Tačiau pati priklausomybė yra netiesinė ir mažiausių kvadratų metodu gauta aproksimuojanti lygtis tokia:

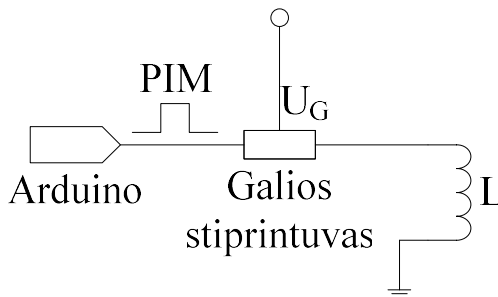
$$\begin{aligned}
 y &= 0,023529x^6 - 0,469080x^5 + 3,286576x^4 - 8,360380x^3 - \\
 &- 5,258121x^2 + 72,252588x - 0,324661 \\
 R &= 0,999133
 \end{aligned}
 \tag{4}$$



28 pav. Magnetinio lauko stiprio, paversto kodu, priklausomybė nuo srovės

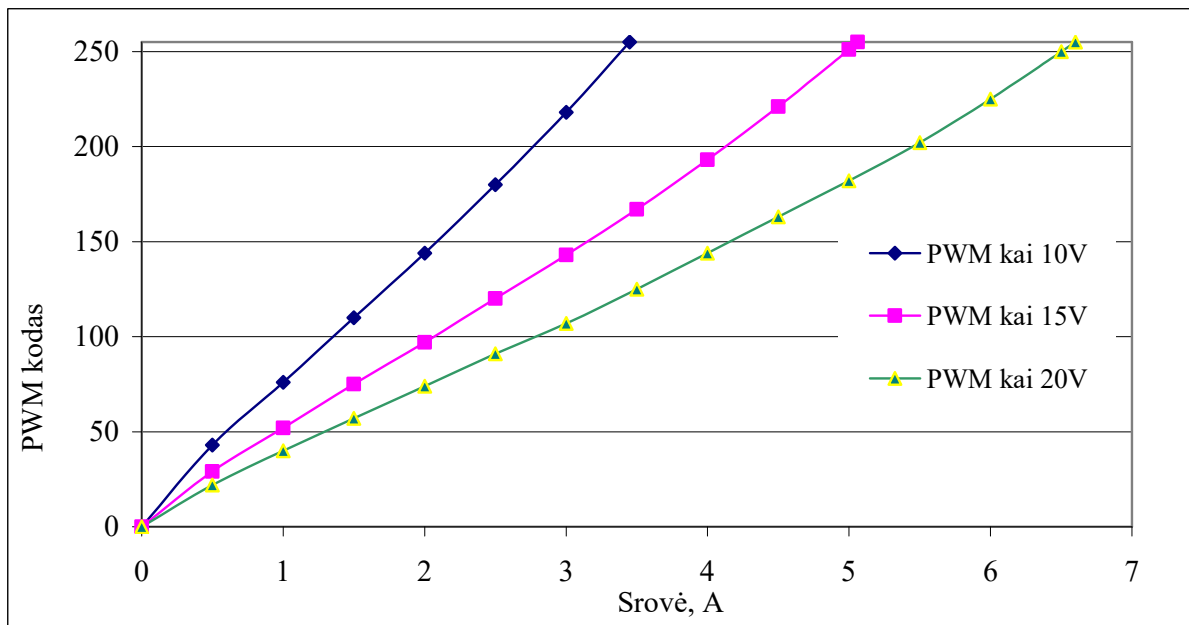
1.5.3. Galios stiprintuvo tyrimas

Tranzistorinis galios stiprintuvas BUZ11 veikia rakto režimu. Valdymo įtampa 2,1 – 4V, įsijungimo laikas 30 ns, išsijungimo 180 ns. Jį valdo valdiklis siųsdamas jam PIM signalus, Eksperimento metu PIM plotis buvo užduodamas daugiasūkiu potenciometru (19 pav., RP1), kurio šliaužiklis prijungtas prie analogas-kodas įėjimo. PIM užduodamų kodų diapazonas nuo 0 iki 255.



27 pav. Galios stiprintuvo valdymo schema

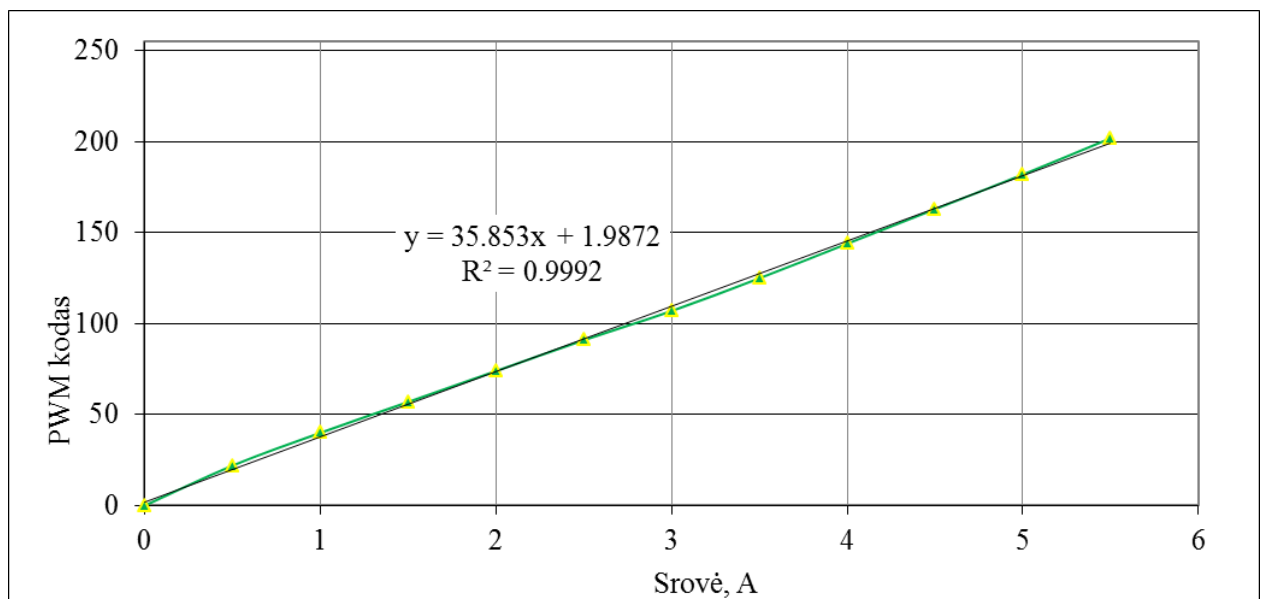
Eksperimento eigoje potenciometru RP1 buvo keičiama srovė žingsniu 0,5 A ir buvo fiksuojama PWM impulso plotis. Eksperimento rezultatai lentelėse 1, 2 ir 3. Bandymų metu maitinimo įtampos reikšmės buvo užduotos 10, 15 ir 20 V. Matavimų rezultatai pateikti 29 pav. Matome, kad visos trys grafikai yra netiesiniai.



28

pav. PIM kodai prie skirtingų maitinimo įtampų

Valdymo metu būtina žinoti, kokio pločio PIM impulsus reikia paduoti į galios stiprintuvą, kad būtų gauta reikiama solenoido srovė. Šiuo atveju ieškome srovės priklausomybės nuo PIM impulso pločio (29 pav.), formulė 5.



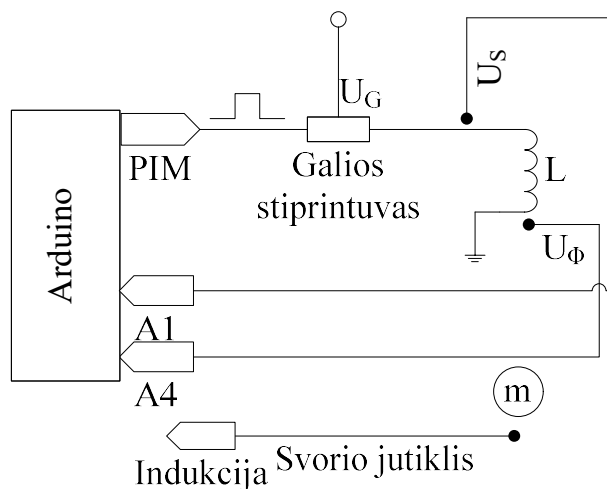
29 pav. PIM kodo priklausomybė nuo srovės, maitinimas 20V

$$kodas_{PWM} = 35,853 \cdot i + 1,9872 \quad (5)$$

1.6. Tyrimai su apkrova

Tyrimų su apkrova metu levituojantis objektas buvo pritvirtintas prie sunkaus pado ir padėtas ant svarstyklių. Tarp objekto ir solenoido šerdies galo talpinamos plastmasinės plokštelės ir krumpliastiebine pavara plokštelės suspaudžiamos tarp šerdies ir objekto. Taip nustatomas atstumas nuo šerdies iki objekto (lentelė 4). Po to plokštelės ištraukiamos ir atliekamas eksperimentas.

Eksperimento metu potenciometru RP1 keičiama solenoido ritės srovė žingsniu 0.5A. Matuojama srovės jutiklio įtampa U_s , magnetinio lauko stiprio jutiklio įtampa U_ϕ ir svarstyklių rodmėnų sumažėjimas, kas atitinka solenoido elektromagnetinio lauko traukos jėgą F .



30 pav. MAGLEV funkcinė schema

Lentelė 4

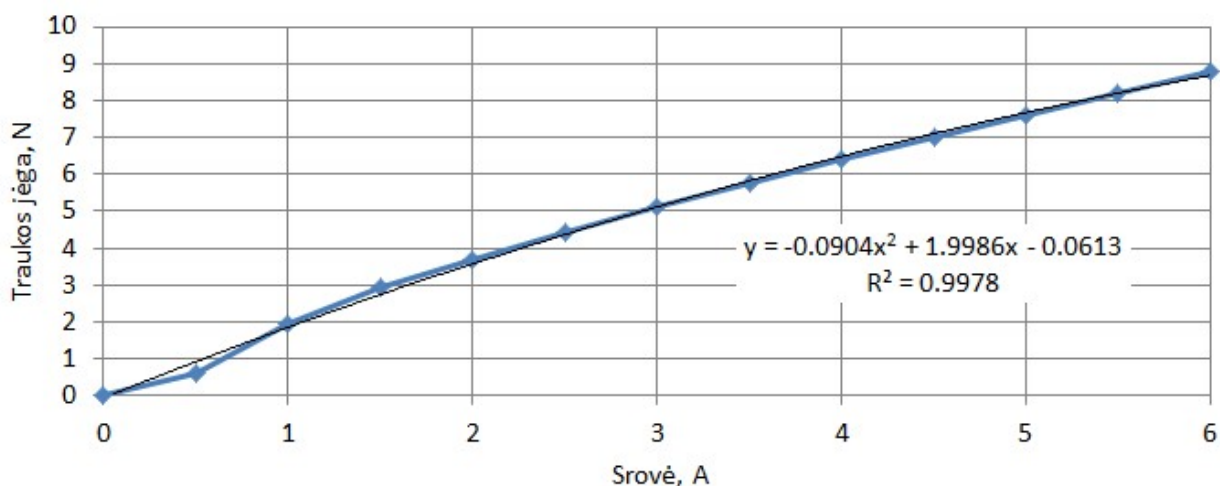
Lentelė X vienetų konvertavimas į centimetrus.

Plokštelių kiekis.	Atstumas tarp levituojančio objekto ir solenoido šerdies, cm
1	0.33
2	0.66
3	0.95
4	1.28
5	1.6
6	1.9
7	2.25
8	2.58

Lentelėje matavimų rezultatai kai atstumas 0,33cm

i	PWM	U _s	U _φ	ΔU _s	ΔU _φ	F, kG
0	0	531	487	0	0	0
0.5	22	554	427	23	60	0.059
1	40	577	366	46	121	0.194
1.5	57	600	334	69	153	0.293
2	74	623	312	92	175	0.368
2.5	91	645	296	114	191	0.442
3	107	668	280	137	207	0.512
3.5	125	691	266	160	221	0.577
4	144	713	256	182	231	0.64
4.5	163	736	244	205	243	0.702
5	182	760	236	229	251	0.759
5.5	202	782	224	251	263	0.819
6	225	797	215	266	272	0.881

Kadangi pati „levitacijos“ sąvoka sako, kad objektas turi kabėti ore, tai atvejais, kai atstumas lygus nuliui nėra analizuojamas. Traukos jėgos priklausomybė, esant atstumui tarp solenoido šerdies galo iki objekto 0,33 cm, nuo solenoidu tekančios srovės pateiktas 31 pav. Priklausomybė netiesinė, tačiau pats netiesiškumas yra nežymus.



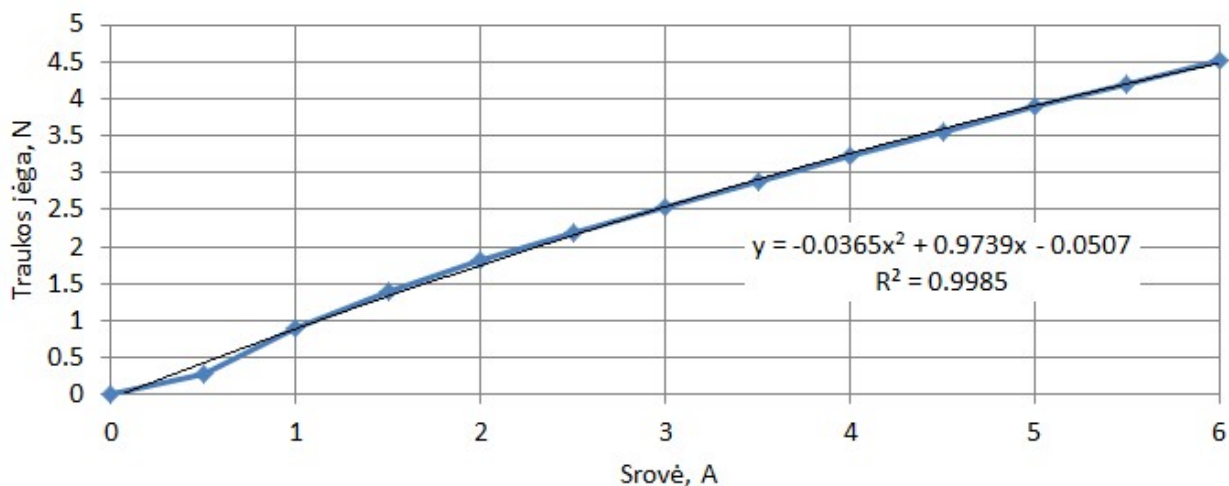
31 pav. Traukos jėgos priklausomybė nuo solenoidu tekančios srovės, kai atstumas 0,33cm

Kitas eksperimentas atliktas kai atstumas padidintas iki 0,66 cm. Eksperimento rezultatai lentelėje 6.

Lentelėje matavimų rezultatai kai atstumas 0,66 cm

i	PWM	U _s	U _φ	ΔU _s	ΔU _φ	F, kG
0	0	531	495	0	0	0
0.5	22	554	450	23	45	0.028
1	40	577	400	46	95	0.09
1.5	57	599	376	68	119	0.14
2	74	622	356	91	139	0.181
2.5	91	645	343	114	152	0.218
3	107	667	330	136	165	0.254
3.5	125	691	320	160	175	0.289
4	144	713	310	182	185	0.322
4.5	163	737	300	206	195	0.356
5	182	760	290	229	205	0.389
5.5	202	782	280	251	215	0.42
6	225	797	276	266	219	0.452

Kaip ir pirmuoju atveju priklausomybės kreivė nėra tiesinė. Galima pastebėti, kad prie srovės 0,5A gauta traukos jėga šiek tiek mažesnė, kaip ir pirmajame eksperimente (32 pav.). Levituojančio objekto sunkio jėga yra 0,240N. Tokiame atstume traukos jėga 20 kartų viršija sunkio jėgą, kai teka 6 A srovė.



32 pav. Traukos jėgos priklausomybė nuo solenoidu tekančios srovės, kai atstumas 0,66 cm

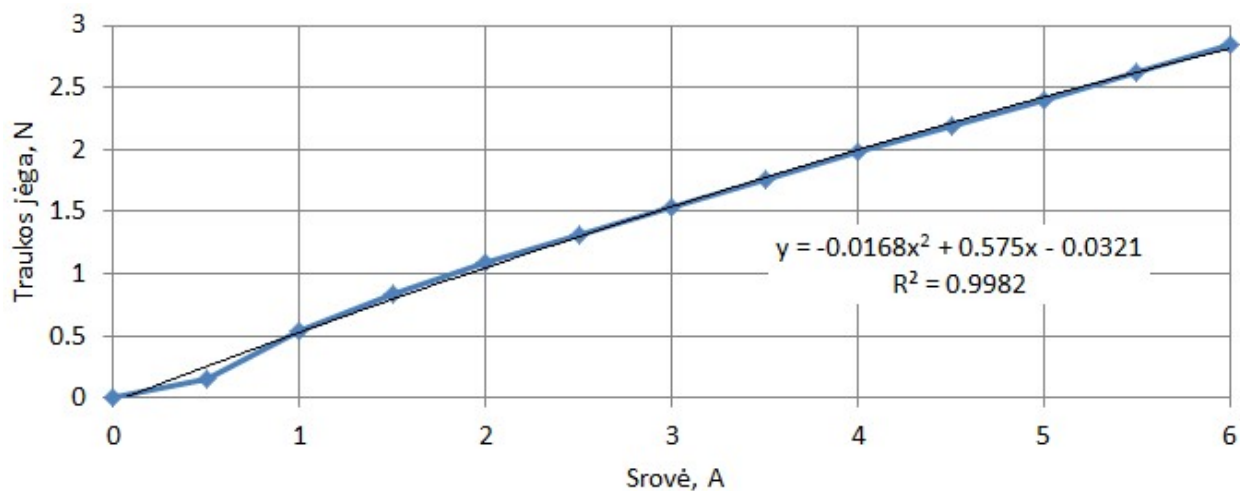
Toliau didiname atstumą tam, kad nustatyti ribą, kur levitacija su pasirinktu objektu taps neįmanoma – sunkio jėga taps didesnė už traukos jėgą. Kitas eksperimentas atliktas kai atstumas padidintas iki 0,95 cm. Eksperimento rezultatai lentelėje 7.

Lentelė 7

Lentelėje matavimų rezultatai kai atstumas 0,95 cm

i	PWM	U _s	U _φ	ΔU _s	ΔU _φ	F, kG
0	0	531	499	0	0	0
0.5	22	554	462	23	37	0.015
1	40	577	417	46	82	0.054
1.5	57	599	396	68	103	0.084
2	74	622	380	91	119	0.109
2.5	91	645	370	114	129	0.132
3	107	667	358	136	141	0.154
3.5	125	691	349	160	150	0.176
4	144	714	340	183	159	0.198
4.5	163	736	330	205	169	0.219
5	182	759	323	228	176	0.24
5.5	202	783	316	252	183	0.262
6	225	797	307	266	192	0.285

Traukos jėga sumažėja, charakteristika netiesinė (33 pav.). Tolesnių bandymų rezultatai pateikti lentelėse 8-12, o visų traukos jėgų suvestinė pateikta 34 pav.



33 pav. Traukos jėgos priklausomybė nuo solenoidu tekančios srovės, kai atstumas 0,95 cm

Lentelėje matavimų rezultatai kai atstumas 1,28 cm

i	PWM	U _s	U _φ	ΔU _s	ΔU _φ	F, kG
0	0	531	501	0	0	0
0.5	22	554	466	23	35	0.01
1	40	577	428	46	73	0.034
1.5	57	599	407	68	94	0.052
2	74	622	391	91	110	0.068
2.5	91	644	380	113	121	0.084
3	107	667	370	136	131	0.099
3.5	125	691	363	160	138	0.112
4	144	713	353	182	148	0.127
4.5	163	736	350	205	151	0.141
5	182	758	340	227	161	0.156
5.5	202	781	335	250	166	0.17
6	225	797	327	266	174	0.186

Lentelėje matavimų rezultatai kai atstumas 1,6 cm

i	PWM	U _s	U _φ	ΔU _s	ΔU _φ	F, kG
0	0	531	503	0	0	0
0.5	22	554	470	23	33	0.006
1	40	577	432	46	71	0.022
1.5	57	600	413	69	90	0.034
2	74	622	400	91	103	0.045
2.5	91	645	390	114	113	0.055
3	107	667	380	136	123	0.065
3.5	125	690	370	159	133	0.075
4	144	713	364	182	139	0.084
4.5	163	737	358	206	145	0.095
5	182	759	350	228	153	0.104
5.5	202	782	344	251	159	0.114
6	225	797	338	266	165	0.125

Lentelėje matavimų rezultatai kai atstumas 1,9 cm

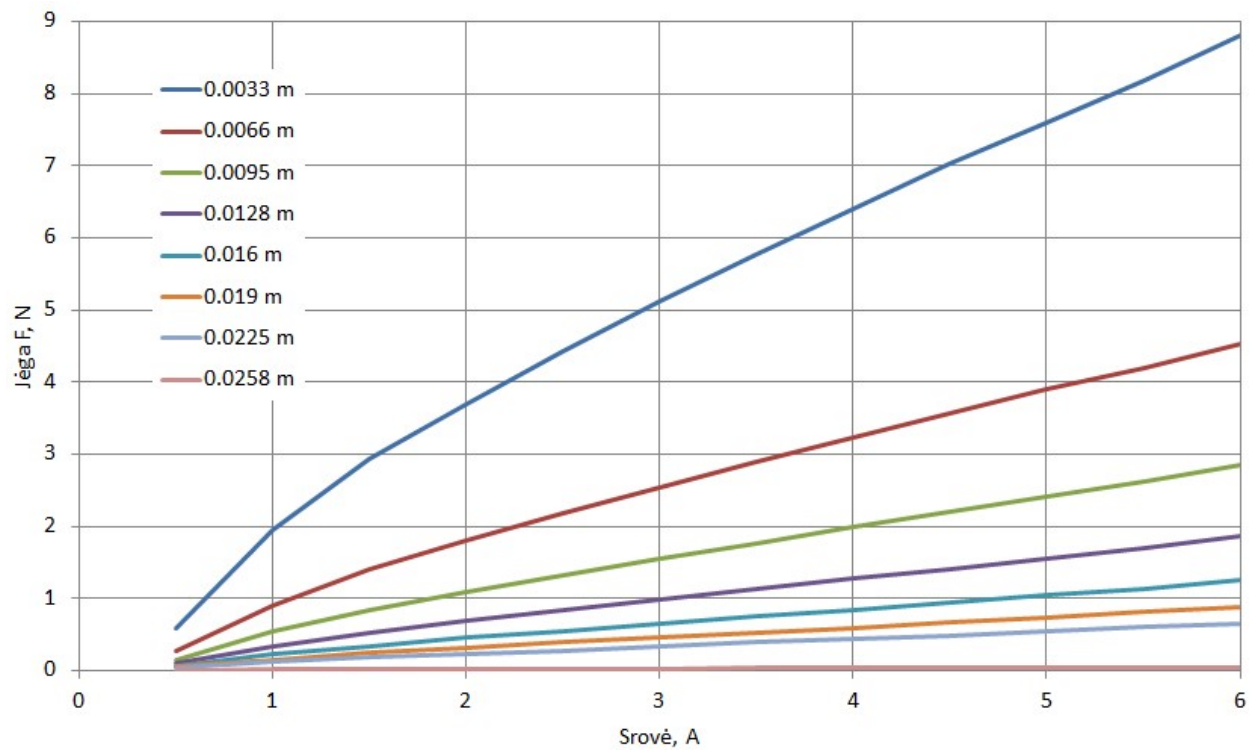
i	PWM	U _s	U _φ	ΔU _s	ΔU _φ	F, kG
0	0	531	503	0	0	0
0.5	22	554	473	23	30	0.005
1	40	576	437	45	66	0.015
1.5	57	600	417	69	86	0.024
2	74	622	406	91	97	0.031
2.5	91	644	392	113	111	0.039
3	107	667	384	136	119	0.046
3.5	125	690	376	159	127	0.053
4	144	713	370	182	133	0.059
4.5	163	736	361	205	142	0.067
5	182	759	355	228	148	0.074
5.5	202	781	350	250	153	0.081
6	225	797	344	266	159	0.088

Lentelėje matavimų rezultatai kai atstumas 2,25 cm

i	PWM	U _s	U _φ	ΔU _s	ΔU _φ	F, kG
0	0	531	504	0	0	0
0.5	22	554	472	23	32	0.004
1	40	576	437	45	67	0.012
1.5	57	600	420	69	84	0.018
2	74	621	407	90	97	0.023
2.5	91	644	396	113	108	0.028
3	107	667	386	136	118	0.033
3.5	125	690	379	159	125	0.039
4	144	714	370	183	134	0.044
4.5	163	736	366	205	138	0.049
5	182	758	360	227	144	0.054
5.5	202	781	353	250	151	0.06
6	225	797	347	266	157	0.065

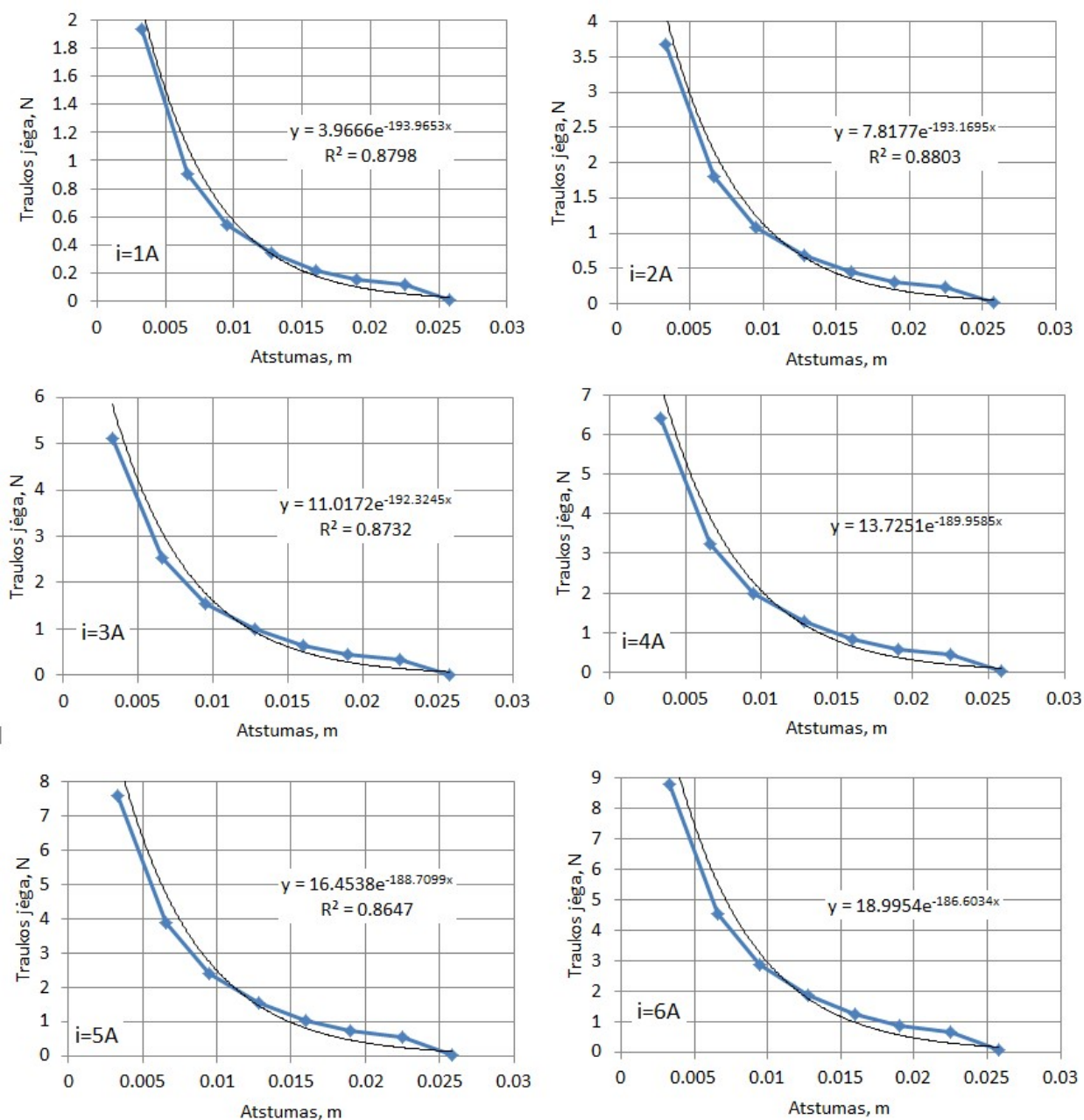
Lentelėje matavimų rezultatai kai atstumas 2,58 cm

i	PWM	U _s	U _φ	ΔU _s	ΔU _φ	F, kG
0	0	531	504	0	0	0
0.5	22	556	473	25	31	0.003
1	40	577	440	46	64	0.009
1.5	57	600	420	69	84	0.014
2	74	622	407	91	97	0.018
2.5	91	645	395	114	109	0.021
3	107	668	388	137	116	0.025
3.5	125	691	380	160	124	0.029
4	144	713	372	182	132	0.033
4.5	163	737	366	206	138	0.037
5	182	759	360	228	144	0.04
5.5	202	783	355	252	149	0.045
6	225	797	349	266	155	0.049



34 pav. Magnetinės traukos jėgos priklausomybės nuo srovės ir atstumo

Modeliavime būtina žinoti funkcinę traukos jėgos priklausomybę nuo srovės ir atstumo – reikia sukurti formulę, kuri aprašys šias priklausomybes. Pirmiausiai iš eksperimento rezultatų (lentelės 5-12) sudarysime traukos jėgos priklausomybių nuo atstumo grafikus kiekvienai diskretinei solenoido ritės srovei. Šiems grafikams mažiausių kvadratų metodu surasime funkcinės priklausomybes. Grafikai pateikti 35 pav.



35 pav. Traukos jėgų priklausomybės nuo atstumo kiekvienai diskretinei solenoido ritės srovei

Kiekviena kreivė gali būti aprašyta tokia funkcija:

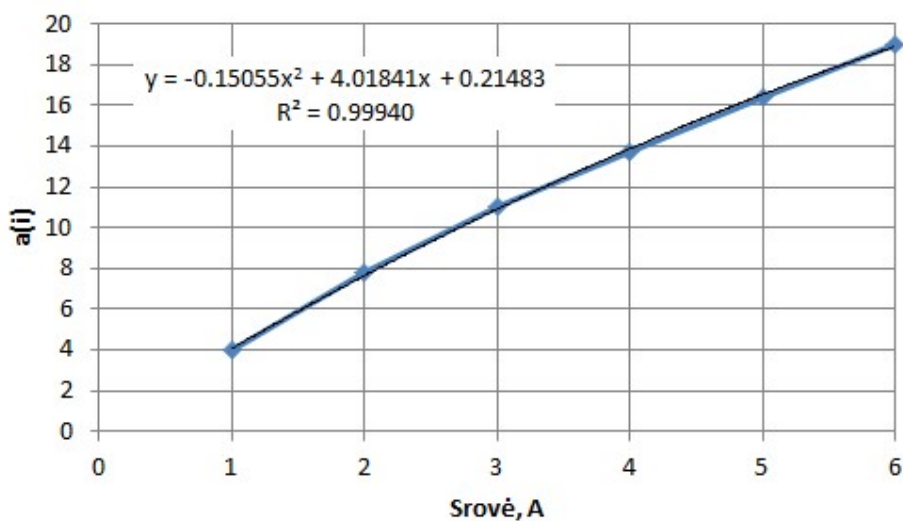
$$F(i, x) = a(i) \cdot e^{b(i) \cdot x} \quad (6)$$

Iš grafikus aproksimuojančių funkcijų sudarysime koeficientų lentelę (lentelė 13). Iš lentelės duomenų nubrėšime a(i) ir b(i) grafikus (36, 37 pav.) ir aproksimuosime funkcijomis.

Lentelė 13

Funkcijos koeficientai, priklausantys nuo srovės

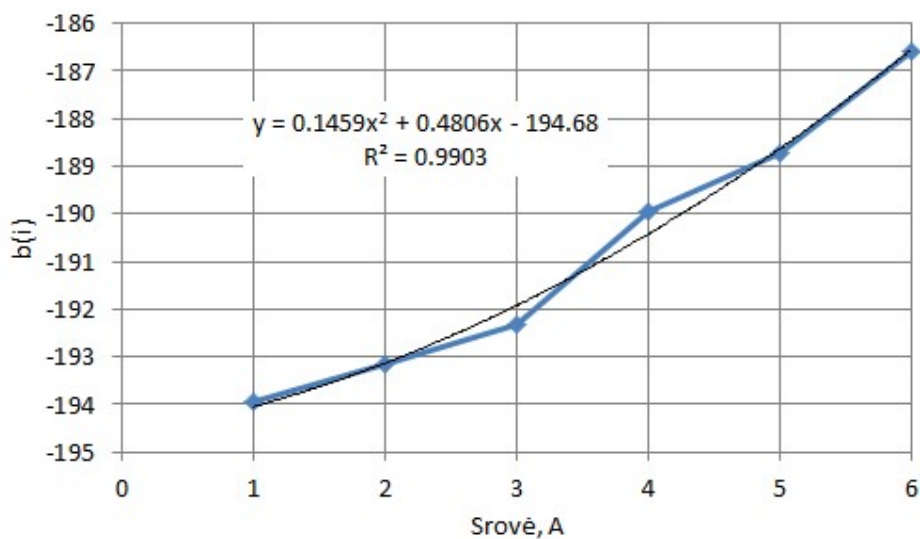
i, A	a(i)	b(i)
1	3.96660	-193.96530
2	7.81770	-193.16950
3	11.01720	-192.32450
4	13.72510	-189.95850
5	16.45380	-188.70990
6	18.99540	-186.60340



36 pav. Funkcijos a(i) priklausomybė nuo srovės

Iš gautų aproksimuojančių funkcijų galima užrašyti traukos jėgos priklausomybės nuo atstumo taro solenoido šerdies ir objekto bei solenoido ritės srovės stiprio:

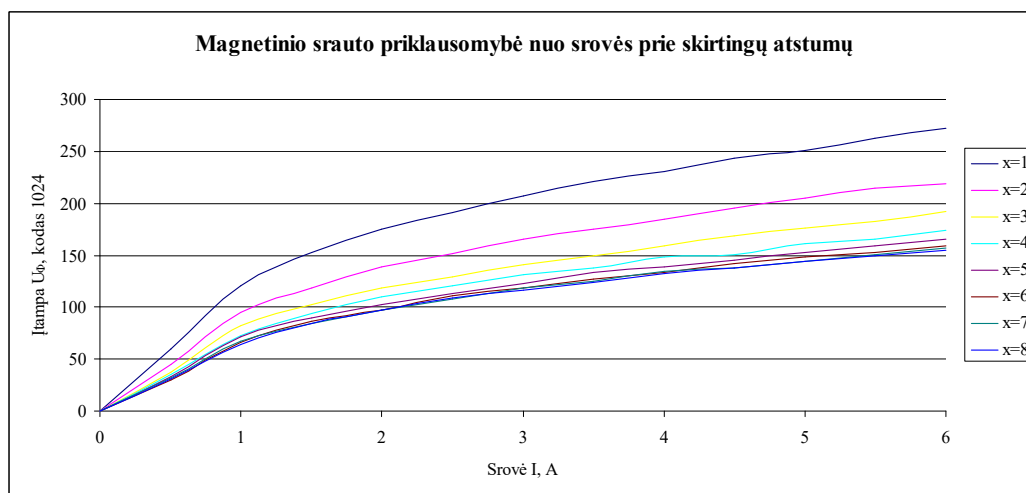
$$F(i, x) = (-0.15055 \cdot i^2 + 4.01841 \cdot i + 0.21483) \cdot e^{(0.1459 \cdot i^2 + 0.4806 \cdot i - 194.68)x} \quad (7)$$



37 pav. Funkcijos $b(i)$ priklausomybė nuo srovės

1.6.1. Magnetinio srauto jutiklio tyrimai esant objektui prie solenoido

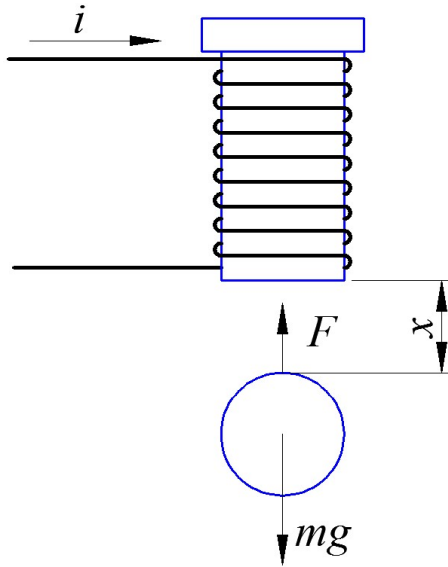
Magnetinis srautas kaip ir jėga didėjant atstumui mažėja 38 pav. Tačiau kuo kūnas toliau nuo ritės tuo srautas mažiau kinta. Taip yra dėl holo jutiklio veikimo diapazono. Jis tiesiog nebereguoja. Manoma, kad magnetinio srauto jutiklį bus galima panaudoti kaip atstumo iki objekto jutiklį.



38 pav. Magnetinio srauto priklausomybė nuo srovės prie skirtingų atstumų

4. TIRIAMOJI DALIS

Tiriamajoje dalyje bus sudarytas magnetinės levitacijos matematinis modelis, jį realizuojantis Simulink modelis ir atlikti tyrimai modeliuojant su PID reguliatoriumi. Magnetinės levitacijos matematinio modelio sudarymui panaudosime 39 pav. žymėjimus.



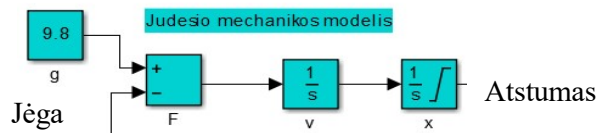
39 pav. Magnetinės levitacijos matematinio modelio sudarymo schema

Sistema labai paprasta. Metalinę detalę, kurios masė m veikia tik dvi jėgos. Sunkio jėga mg traukia žemyn, o magnetinio lauko sukurta jėga F traukia aukštyn. Šį procesą aprašo tokia diferencialinė lygtis:

$$m \frac{dx^2}{d^2t} = mg - F \quad (8)$$

Visus lygties (8) narius padalinsime iš masės m ir gausime lygtį, kurią naudosime Simulink programoje:

$$\frac{dx^2}{d^2t} = g - \frac{F}{m} \quad (9)$$

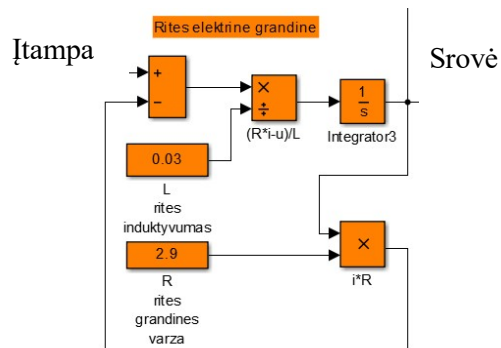


40 pav. Judėsio mechanikos modelis pagal 9 formulę

Ritė turi savo induktyvumą L ir apvijų laidų varžą R . Lygtis, kuri parašo srovės ritėje dinamiką, kai prie ritės yra prijungta u įtampa:

$$\frac{di}{dt} = i \cdot R - u \quad (10)$$

Šią lygtį realizuojantis Simulink modelis pateiktas 41 pav.

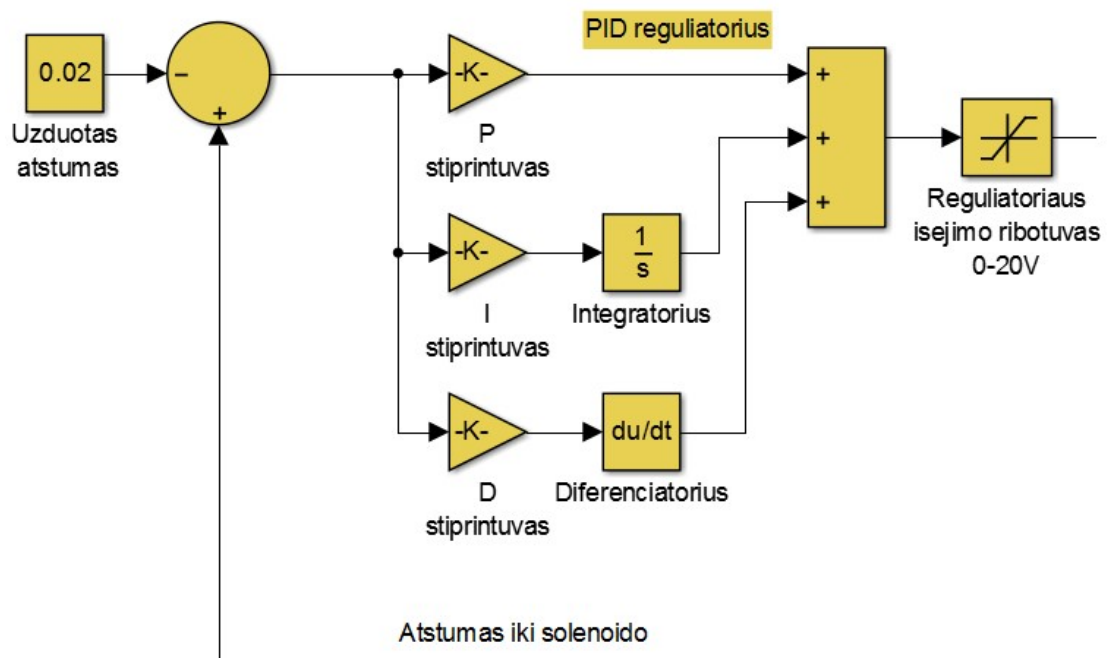


41pav. Ritės elektrinė grandinė pagal 10 formulę

Magnetinės levitacijos sistemai valdyti naudosime PID reguliatorių, kurio veikimą aprašo tokia lygtis:

$$u_r = k_p \cdot \Delta u + k_I \cdot \int \Delta u \cdot dt + k_d \cdot \frac{d\Delta u}{dt} \quad (11)$$

Regulatoriaus realizacija Simulink priemonėmis pateikta 42 pav.

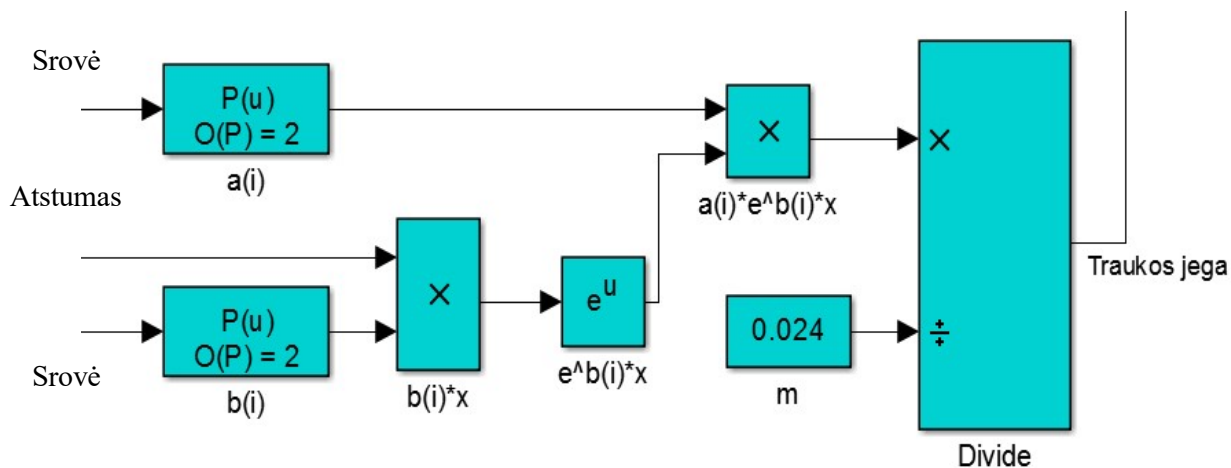


42 pav. PID reguliatorius magnetinės levitacijos sistemoje

Magnetinio lauko sukurta keliamoji jėga priklauso nuo atstumo iki metalinės detalės ir nuo magnetinį lauką sukuriančios srovės stiprio:

$$F(i, x) = (-0.15055 \cdot i^2 + 4.01841 \cdot i + 0.21483) \cdot e^{(0.1459 \cdot i^2 + 0.4806 \cdot i - 194.68)x} \quad (12)$$

Šios lygties realizacijai Simulink terpėje panaudoti matematiniai moduliai (43 pav.)



43 pav. Traukosjėgos modelis pagal formulę (12)

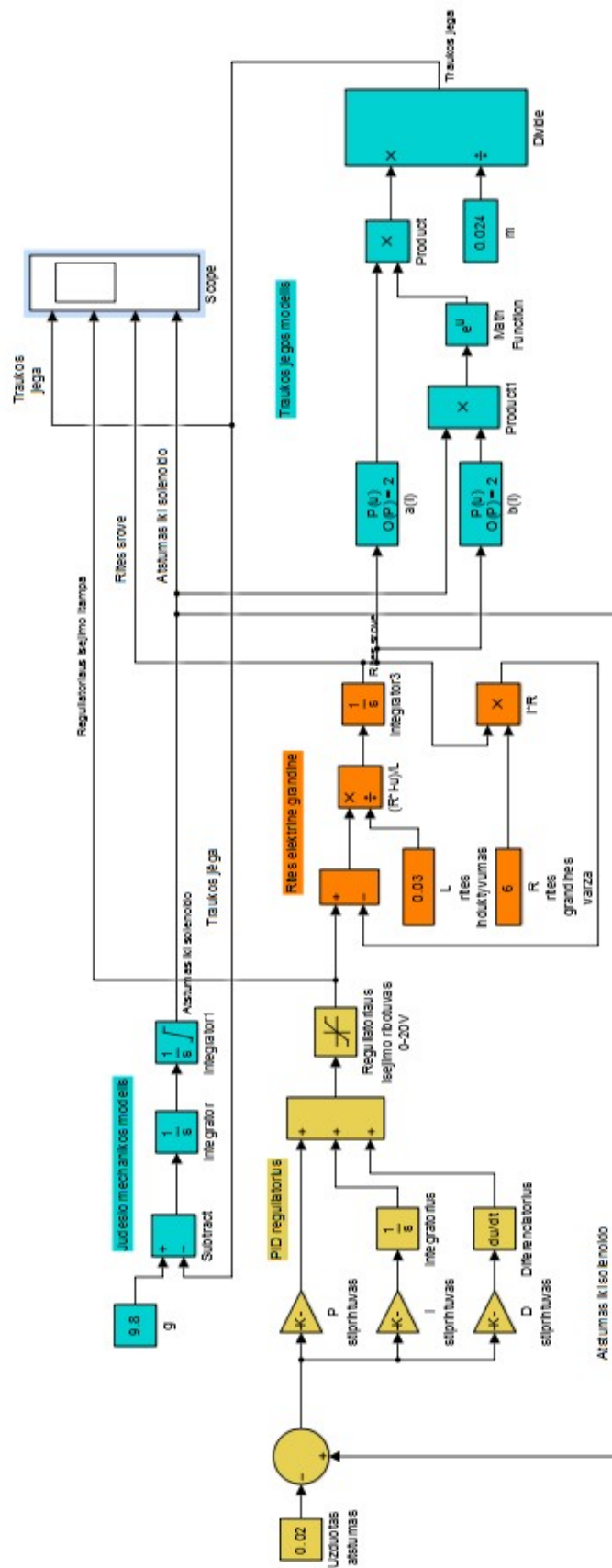
PID reguliatorius – tai vienas iš plačiausiai šiuolaikinėse valdymo sistemose naudojamas reguliatorius. Šis reguliatorius bando mažinti (koreguoti) paklaidą tarp išmatuoto proceso kintamojo (esamo lygio) ir siekiamo (norimo) lygio, apskaičiuodamas kitai iteracijai reikalingą valdymo signalą, kad esamo lygio reikšmės artėtų prie norimo lygio reikšmių. Klasikinis PID reguliatorius sudarytas iš 3 grandžių: proporcinės (P), integruojančios (I) ir diferencijuojančios (D). Modeliuojant matematinį modelį šis reguliatorius labai dažnai išsprendžia daug valdymo problemų.

Magnetinės levitacijos sistema su PID reguliatorium pateikta 44 pav..

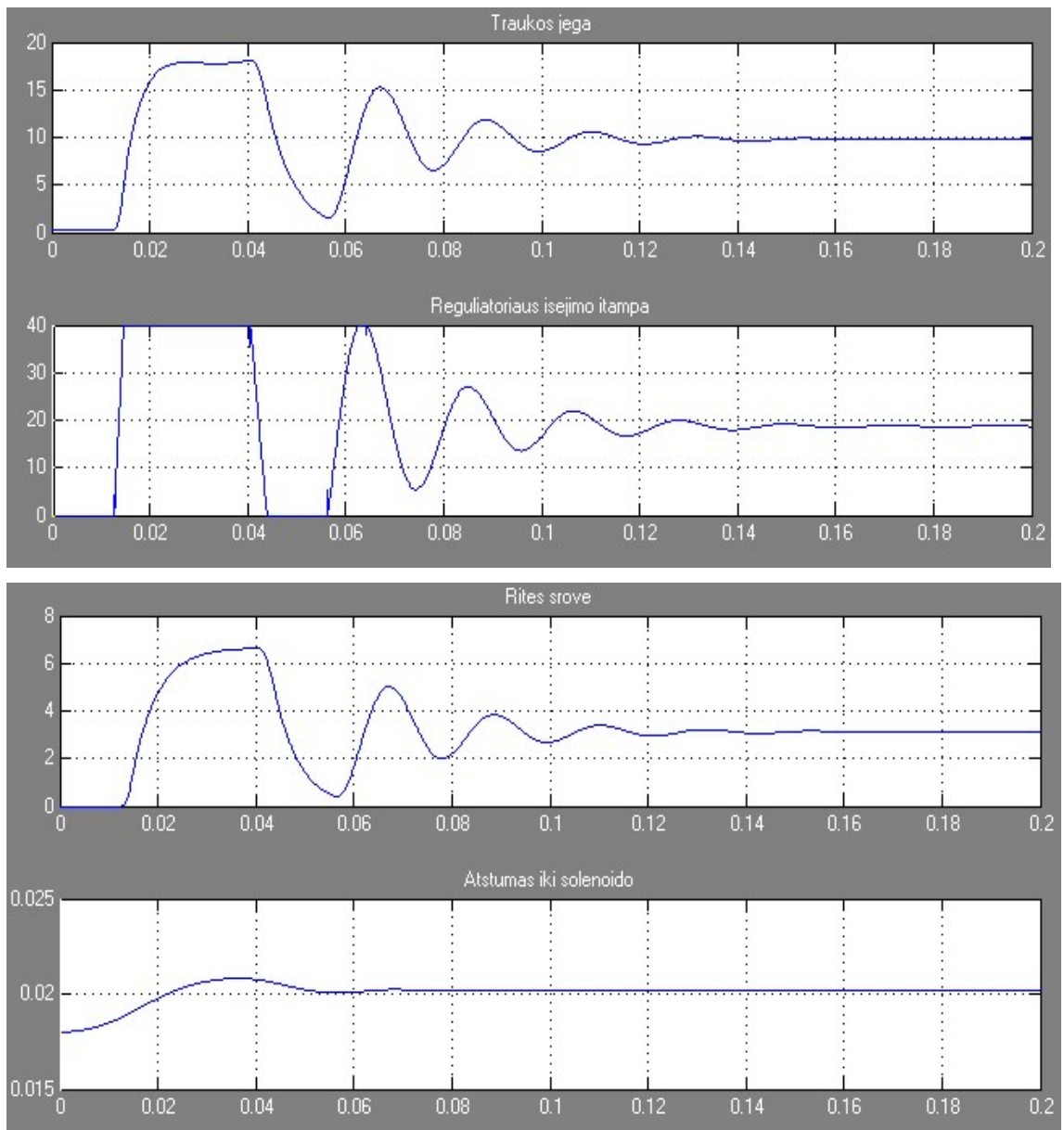
Buvo atlikti sistemos darbo modeliavimai, kai objektas darbo pradžioje talpinamas:

- arčiau solenoido nei užduota (45 pav.);
- toliau solenoido nei užduota (46 pav.);
- tiksliai užduotama atstume nuo solenoido (47 pav.).

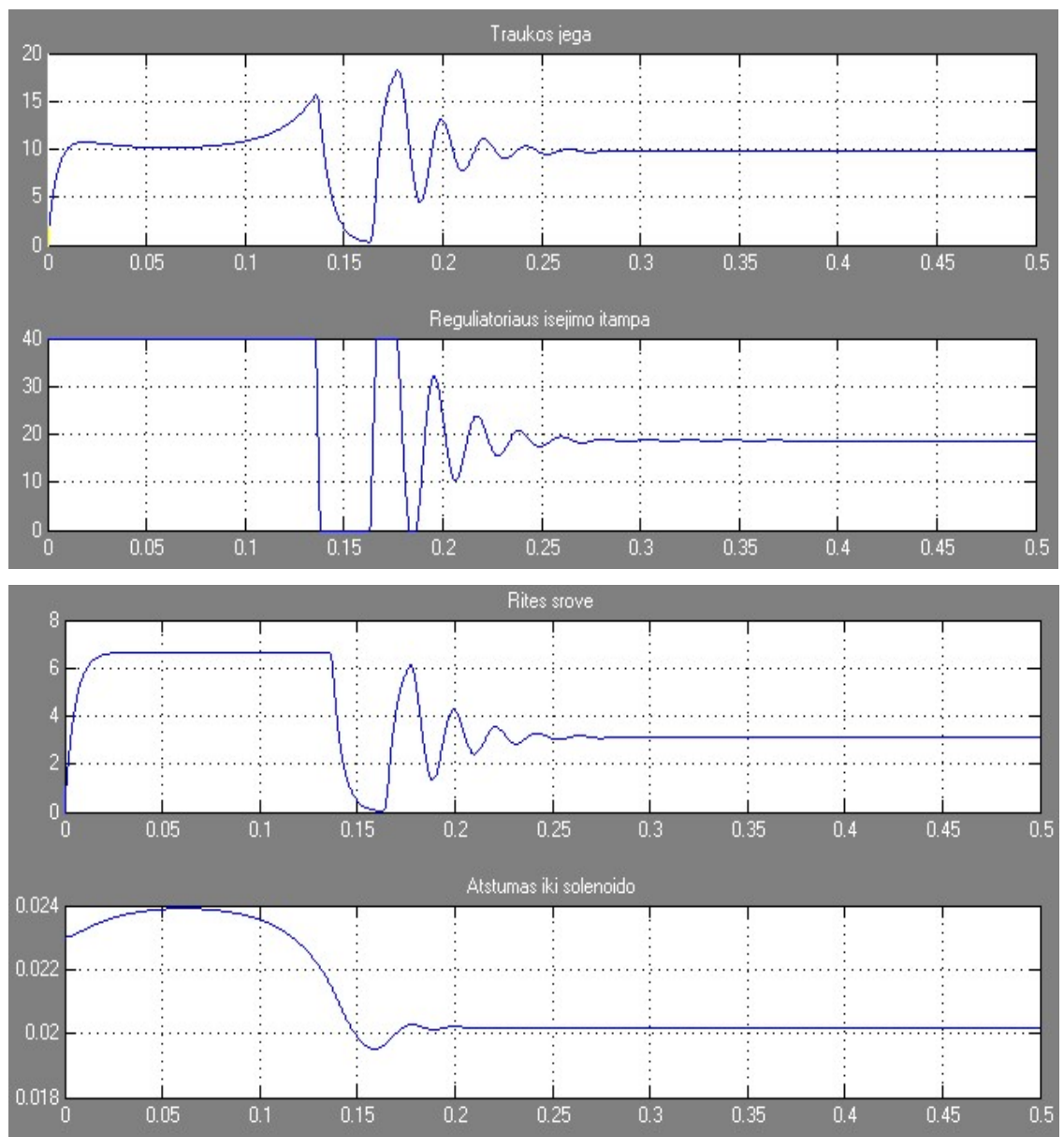
Nustatyta, kad sistema stabiliai dirba, kai pastatymo vieta nuo užduotos skiriasi ne daugiau 5mm.



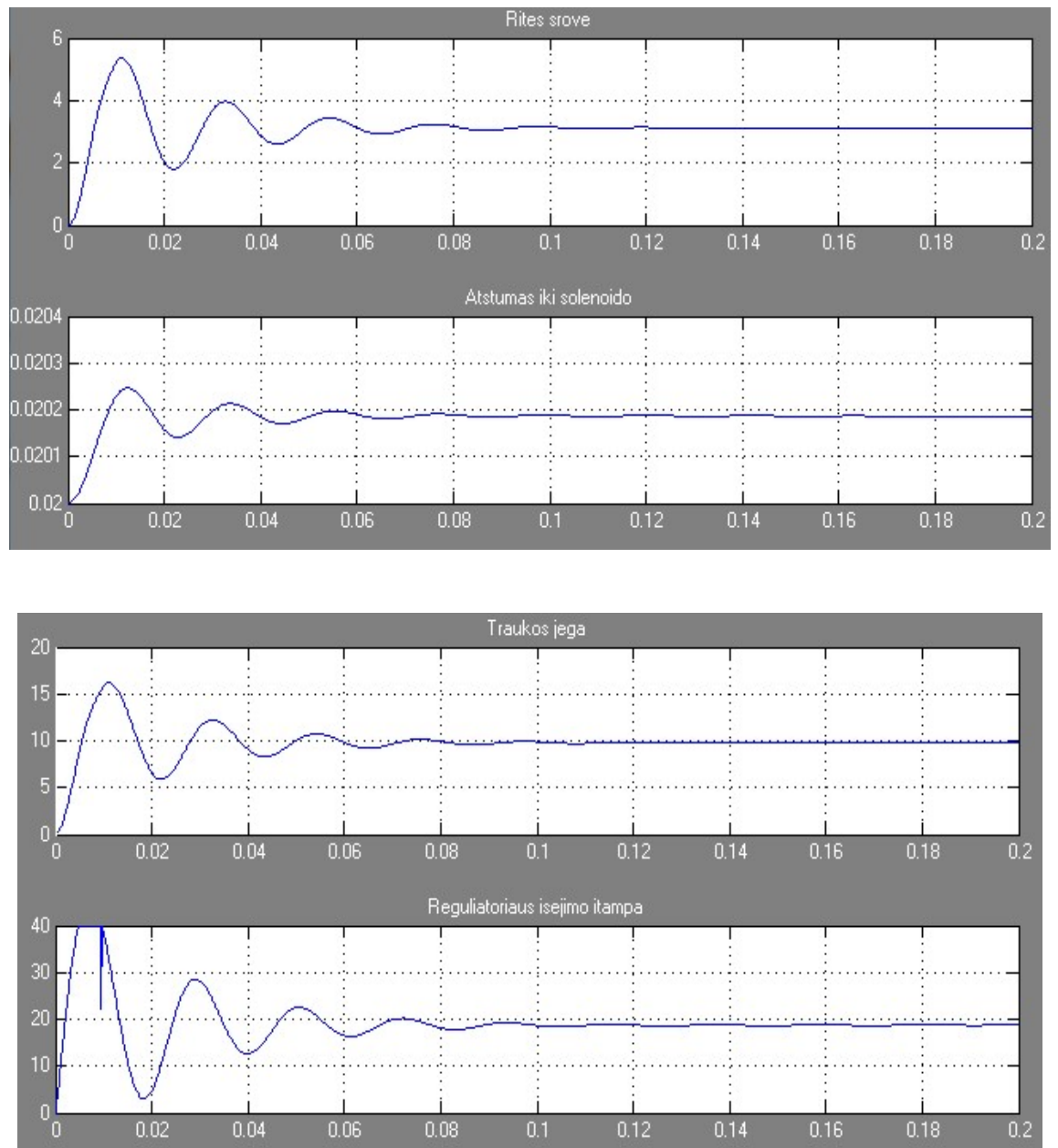
44 pav. Magnetinės levitacijos modelis su PID reguliatoriumi



45 pav. MAGLEV sistemos Simulink matematinio modelio su PID reguliatoriumi rezultatai kai atstumas mažesnis nei užduotas



46 pav. MAGLEV sistemos Simulink matematinio modelio su PID reguliatoriumi rezultatai kai kūnas toliau nei numatyta programoje



47 pav. MAGLEV sistemos Simulink matematinio modelio su PID reguliatoriumi rezultatai kai kūnas padedamas ten kur numatyta.

5. IŠVADOS

- Ištirta magnetinės levitacijos sistemos traukos priklausomybės nuo ritės srovės ir atstumo. Nustatyta, kad priklausomybė netiesinė.
- Eksperimento būdu parinkti PID reguliatoriaus parametrai.
- Modeliuojant magnetinės levitacijos sistemos darbą nustatyta, kad objektas turi būti pastatytas užduotos padėties atžvilgiu ± 5 mm atstumu.

6. LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Lietuvių žodynas [Interaktyvus]. Žiūrėta: 2014 m. vasario 20 d. Prieiga per internetą: <http://www.lietuviuzodynas.lt/terminai/Levitacija>
2. YAGHOUBI H. Practical Applications of Magnetic Levitation Technology [Interaktyvus]. Žiūrėta: 2014 m. kovo 1 d. Prieiga per internetą: http://www.maglev.ir/eng/documents/reports/IMT_R_22.pdf
3. В. Л. ГИНЗБУРГ Сверхпроводимост и сверхтекучест [Interaktyvus]. Žiūrėta: 2014 m. vasario 1 d. Prieiga per internetą: http://www.google.lt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CB8QFjAA&url=http%3A%2F%2Fufn.ru%2Fufn97%2Fufn97_4%2FRussian%2Fr974e.pdf&ei=9nlsVfn4Gcm3s wGV_ZiYDw&usg=AFQjCNEEcFTkR212EZvWdUqp_H6mR78RyQ&bvm=bv.94455598,d.bGg
4. Kaip išlydyti levituojantį aliuminį? [Interaktyvus]. Žiūrėta: 2014 m. vasario 20 d. Prieiga per internetą: http://www.technologijos.lt/n/mokslas/idomusis_mokslas/S-39582/straipsnis/Kaip-islydyti-levituojanti-aliumini-Video
5. Поезда на магнитной подушке – транспорт, способный изменить мир [Interaktyvus]. Žiūrėta: 2014 m. liepos 20 d. Prieiga per internetą: <http://itc.ua/articles/poezda-na-magnitnoy-podushke-transport-sposobnyiy-izmenit-mir/>
6. MAGNETINĖ VĖJO TURBINA SU VERTIKALIA AŠIMI [Interaktyvus]. Žiūrėta: 2014 m. kovo 15 d. Prieiga per internetą: http://www.google.lt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CCUQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.sarmatas.lt%2F%3Fdl_id%3D43&ei=FntsVfebO4OMsAHguY_QAw&usg=AFQjCNENbw_mDCXMQaaTHxHARncOxK87tw&bvm=bv.94455598,d.bGg
7. Magnetinė levitacija leis sukurti plonesnes klaviatūras [Interaktyvus]. Žiūrėta: 2014 m. gegužės 13 d. Prieiga per internetą: <http://www.globenews24.com/lt/news,magnetine-levitacija-leis-sukurti-plonesnes-klaviaturas>
8. CHEERLINK Heart Shape Magnetic Levitation Rotating Photo Frame with LED – Red [Interaktyvus]. Žiūrėta: 2014 m. gegužės 13 d. Prieiga per internetą: <http://www.dx.com/p/cheerlink-heart-shape-magnetic-levitation-rotating-photo-frame-with-led-red-249900#.VWy6ds-qqko>
9. Magnetic Floating Table [Interaktyvus]. Žiūrėta: 2014 m. gegužės 13 d. Prieiga per internetą: <http://imgarcade.com/1/magnetic-floating-table/>

10. Magnetinė magija: levituojantys šachmatai ir plyta ant sklandančios pagalvės [Interaktyvus]. Žiūrėta: 2014 m. birželio 18 d. Prieiga per internetą: delfi.lt/mokslas/mokslas/magnetine-magija-levituojantys-sachmatai-ir-plyta-ant-sklandancios-pagalves.d?id=64997511
11. Levitating Lamp: Flyte by Simon Morris [Interaktyvus]. Žiūrėta: 2015 m. vasario 3 d. Prieiga per internetą: <http://oddstuffmagazine.com/hover-lamp.html>
12. Simon, Heflinger, and Geim. Diamagnetically stabilized magnet levitation. California, 2001.
13. Magneti Levitation Experiment [Interaktyvus]. Žiūrėta: 2014 m. vasario 20 d. Prieiga per internetą: http://mechatronics.poly.edu/Control_Lab/maglev.pdf
14. A1301 Datasheet(PDF) 4 Page - Allegro MicroSystems [Interaktyvus]. Žiūrėta: 2014 m. vasario 20 d. Prieiga per internetą: <http://html.alldatasheet.com/html-pdf/480117/ALLEGRO/A1301/1186/4/A1301.html>
15. AMP50 Datasheet(PDF) 1 Page - List of Unclassified Manufacturers [Interaktyvus]. Žiūrėta: 2014 m. vasario 19 d. Prieiga per internetą: <http://html.alldatasheet.com/html-pdf/105180/ETC/AMP50/52/1/AMP50.html>
16. Arduino Magnet Levitation – detailed description [Interaktyvus]. Žiūrėta: 2014 m. vasario 19 d. Prieiga per internetą: <https://mekonik.wordpress.com/2009/03/17/arduino-magnet-levitation/>
17. Magnetic levitation [Interaktyvus]. Žiūrėta: 2014 m. spalio 8 d. Prieiga per internetą: <http://uzzors2k.4hv.org/?page=magneticlevitation>
18. Chunfang Liu and Qingguang Chi. Studing of NC Tool Crossbeam Magnetic Levitation System Based on Dynamic Integral Sliding Mode Control. Kinija, 2010.
19. Magnetic levitation science Project [Interaktyvus]. Žiūrėta: 2014 m. spalio 20 d. Prieiga per internetą: <http://e-tech-newz.blogspot.com/2012/03/magnetic-levitation-science-project.html>
20. Stuknys G. „Levitacijos įrenginio valdymas“ Panevėžys, 2005.
21. Израильтяне удивили публику квантовой левитацией [Interaktyvus]. Žiūrėta: 2014 m. spalio 8 d. Prieiga per internetą: <http://www.membrana.ru/particle/16986>
22. Arreola B. R. NONLINEAR CONTROL DESIGN FOR A MAGNETIC LEVITATION SYSTEM [Interaktyvus]. Žiūrėta: 2015 m. vasario 1 d. Prieiga per internetą: http://www.control.utoronto.ca/theses/Rafael_Becerril_03.pdf
23. Magnetinė levitacija leis sukurti plonesnes klaviatūras [Interaktyvus]. Žiūrėta: 2015 m. vasario 1 d. Prieiga per internetą: <http://faceit.lt/2014/06/magnetine-levitacija-leis-sukurti-plonesnes-klaviaturas/>
24. Minkštus robotus padės sukurti magnetinė levitacija [Interaktyvus]. Žiūrėta: 2015 m. vasario 3 d. Prieiga per internetą: <http://faceit.lt/2014/08/minkstus-robotus-pades-sukurti-magnetine-levitacija/>

25. Magnetic levitation [Interaktyvus]. Žiūrėta: 2015 m. vasario 3 d. Prieiga per internetą: <http://www-inst.eecs.berkeley.edu/~ee128/fa10/Labs/Lab4-Fa10.pdf>
26. Marwan K. Abbadi, Modeling and Control of a Magnetic Levitation System [Interaktyvus]. Žiūrėta: 2015 m. vasario 10 d. Prieiga per internetą: <http://cegt201.bradley.edu/projects/proj2003/maglev/docs/PDF/final.pdf>
27. WILLIAMS L. ELECTROMAGNETIC LEVITATION THESIS [Interaktyvus]. Žiūrėta: 2015 m. vasario 10 d. Prieiga per internetą: http://www.rrsg.ee.uct.ac.za/theses/ug_projects/williams_ugthesis.pdf
28. V. Zaveckas „Elektrotechnikos pagrindai“ Vilnius „Technika“, 2012.
29. The Magnetic Field [Interaktyvus]. Žiūrėta: 2015 m. gegužės 11 d. Prieiga per internetą: <http://web.monroecc.edu/manila/webfiles/spiral/3.MagneticField.pdf>
30. THE CASSINI MAGNETIC FIELD INVESTIGATION [Interaktyvus]. Žiūrėta: 2015 m. gegužės 11 d. Prieiga per internetą: http://lasp.colorado.edu/~horanyi/graduate_seminar/Magnetometer.pdf
31. Research on Levitation Coupled with Standing Wave Levitation and Electromagnetic Levitation [Interaktyvus]. Žiūrėta: 2015 m. gegužės 12 d. Prieiga per internetą: http://www.sv-jme.eu/data/upload/2013/12/07_2013_1093_Liu_04.pdf