



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

# **Magneto klasės identifikavimo stendo sukūrimas ir tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Linas Minkevičius**

Projekto autorius

**Prof. Dr. Renaldas Urniežius**

Vadovas

---

**Kaunas, 2021**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

# **Magneto klasės identifikavimo stendo sukūrimas ir tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Valdymo technologijos (6211EX014)

---

**Linas Minkevičius**

Projekto autorius

**Prof. Dr. Renaldas Urniežius**

Vadovas

**Lekt. Dr. Vytautas Gargasas**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2021**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

Linas Minkevičius

## **Magneto klasės identifikavimo stendo sukūrimas ir tyrimas**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Linas Minkevičius

*Patvirtinta elektroniniu būdu*

Linus Minkevičius. Magneto klasės identifikavimo stendo sukūrimas ir tyrimas. Baigiamasis magistro projektas / vadovas prof. dr. Renaldas Urniežius; Kauno technologijos universitetas, elektros ir elektronikos fakultetas

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): elektronikos inžinerija (inžinerijos mokslai)

Reikšminiai žodžiai: magnetas, klasė, stendas, identifikavimas.

Kaunas, 2021. 47 p.

### **Santrauka**

Projektinio darbo metu buvo sukurtas magnetų klasės identifikavimo stendas, naudojantis teoriniu modeliu. Buvo atlikti magnetometro kalibravimo ir teorinio modelio tikrinimo eksperimentai. Eksperimentuose naudoti kelių skirtingų tiekėjų magnetai.

Linus Minkevičius. Development and Research of Test Stand for Magnet Class Identification. Master's Degree Final Project/ prof. dr. Renaldas Urniežius; Electricity and Electronics Faculty, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): electronic engineering (engineering science)

Keywords: magnet, grade, stand, identification.

Kaunas, 2021. 47 p.

### **Summary**

During the project work, a magnet class identification stand was developed using a theoretical model. Experiments on magnetometer calibration and theoretical model verification were performed. Magnets from several different suppliers were used.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>7</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>8</b>
<b>Santrumpų ir terminų sąrašas .....</b>	<b>10</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>11</b>
<b>1. Eksperimentinis tyrimas .....</b>	<b>16</b>
1.1. Magnetinio srauto tankio jutiklio kalibravimas.....	16
1.2. Jutiklio savarankiškas testas .....	16
1.3. Magnetometro kalibravimas .....	16
1.3.1. Jutiklio kalibravimas naudojantis žemės magnetiniu lauku .....	18
1.4. Tyrimo aprašas ir eiga .....	22
1.5. Galutinio eksperimento medžiagos .....	23
1.6. Pirminis eksperimentas.....	24
1.6.1. Įranga ir eksperimento eiga .....	24
1.6.2. Analizė ir rezultatai .....	25
1.6.3. Išvados.....	27
<b>2. Projektinė dalis .....</b>	<b>28</b>
2.1. Pirminis automatizuotas stendas.....	28
2.1.1. Mechanika .....	28
2.1.2. Elektronika .....	29
2.1.3. Valdiklio programinė įranga.....	30
2.1.4. Operatoriaus langas kompiuteryje.....	31
2.1.5. Programos algoritmas:.....	31
2.1.6. Rezultatai ir išvados .....	32
2.2. Galutinio stendo projektavimas.....	33
2.2.1. Elektronika ir jos projektavimas.....	33
2.2.2. Mechanika ir jos projektavimas.....	35
2.3. Programinė įranga .....	37
2.3.1. Operatoriaus langas .....	37
2.3.2. Parametrų identifikavimo patikrinimas .....	40
2.3.3. Valdymo plokštės programinė įranga.....	40
<b>Rezultatai ir išvados .....</b>	<b>44</b>
<b>Literatūros sąrašas .....</b>	<b>45</b>
<b>Priedai.....</b>	<b>48</b>
1 priedas. Rankinio valdymo stendo valdiklio programos kodas.....	48
2 priedas. Galutinio stendo eksperimentų grafikai .....	50
3 priedas. Operatoriaus lango algoritmo schema .....	55

## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė.</b> Žemės magnetinio srauto tankio matavimai, atlikti duomenų bazės ir skirtingų išmaniųjų telefonų .....	19
<b>2 lentelė.</b> Skirtumas tarp telefonų vidutinių magnetinio srauto tankio matavimų ir duomenų bazės matavimo .....	20
<b>3 lentelė.</b> Santykinis skirtumas tarp telefonų vidutinių magnetinio srauto tankio matavimų ir duomenų bazės matavimo .....	20
<b>4 lentelė.</b> Telefonų matavimų standartinė santykinė ir absoliuti deviacija .....	21
<b>5 lentelė.</b> Eksperimente naudojami cilindriniai magnetai .....	23
<b>6 lentelė.</b> Eksperimente naudojami stačiakampiai magnetai .....	23
<b>7 lentelė.</b> Pradinio eksperimento rezultatai .....	26
<b>8 lentelė.</b> Galutinio stendo parametrų identifikavimo patikrinimo rezultatai .....	40
<b>9 lentelė.</b> Galutinio stendo eksperimentų rezultatai .....	44

## Paveikslų sąrašas

1 pav.	Automobiliai tūkstančiui gyventojų Europos sąjungoje [3] .....	11
2 pav.	Elektrinių automobilių rinka 2010–2019 metais [4].....	11
3 pav.	Elektrinio motociklo sudėtis [5] .....	12
4 pav.	Kūrybinių dirbtuvių kiekis ES 2016 m. [6] .....	12
5 pav.	Magnetų klasės ir likutinio magnetinio srauto tankio lentelė [1] .....	13
6 pav.	Cilindrinio magneto schema [10]. .....	14
7 pav.	Stačiakampės prizmės magneto schema [10] .....	14
8 pav.	Jutiklių rodmenų programa <i>Sensors Toolbox</i> išmaniajame <i>Android</i> telefone [19] .....	18
9 pav.	Išmaniųjų telefonų ir duomenų bazės magnetinio lauko matavimai XYZ ašimis .....	19
10 pav.	Vidutinis telefonų matavimo skirtumas nuo duomenų bazės matavimo .....	20
11 pav.	Santykinis vidutinis telefonų matavimo skirtumas nuo duomenų bazės matavimo .....	20
12 pav.	Telefonų matavimų standartinė deviacija .....	21
13 pav.	Telefonų matavimų santykinė standartinė deviacija .....	21
14 pav.	Principinė stendo schema skirta atlikti eksperimentui .....	22
15 pav.	Pirminio eksperimento stendas .....	24
16 pav.	<i>Brick Viewer</i> programos langas [30] .....	25
17 pav.	Žinomo magneto likutinio magnetinio srauto tankio apskaičiavimui naudoti parametrai ...	26
18 pav.	Riedžio likutinio magnetinio srauto tankio apskaičiavimui naudoti parametrai .....	26
19 pav.	Žinomos klasės magneto išmatuoto ir apskaičiuoto magnetinio lauko srauto kreivės .....	27
20 pav.	Riedžio magneto išmatuoto ir apskaičiuoto magnetinio lauko srauto kreivės .....	27
21 pav.	Sumodeliuotas stendo prototipas .....	28
22 pav.	Atspausdintas stendo prototipas .....	29
23 pav.	Surinktas stendo prototipas.....	30
24 pav.	Pirmojo stendo operatoriaus langas .....	31
25 pav.	Stendo valdymo plokštė.....	34
26 pav.	3.3V įtampos reguliatoriaus schema su apsauginiu diodu.....	35
27 pav.	Galutinio stendo žingsninis variklis ir platformos pakėlimo mechaninė sistema .....	36
28 pav.	Mėginio laikiklis virš magnetometro.....	36
29 pav.	Galutinis stendas.....	37
30 pav.	Prisijungimo prie stendo langas.....	37
31 pav.	Rankinio valdymo langas .....	38
32 pav.	Eksperimento programos langas.....	39
33 pav.	Eksperimento duomenų įvedimas.....	39
34 pav.	Parametrų identifikavimo tikrinimo grafikas .....	40
35 pav.	Valdiklio konfigūravimo langas <i>STM Cube IDE</i> programoje .....	41
36 pav.	Telefono jutiklių rodmenys esant šalia stendo .....	42
37 pav.	Stendo akselerometro ir magnetometro rodmenys .....	43
38 pav.	1-ojo magneto eksperimento rezultatai.....	50
39 pav.	2-ojo magneto eksperimento rezultatai.....	50
40 pav.	3-ojo magneto eksperimento rezultatai.....	51
41 pav.	4-ojo magneto eksperimento rezultatai.....	51
42 pav.	5-ojo magneto eksperimento rezultatai.....	52
43 pav.	6-ojo magneto eksperimento rezultatai.....	52
44 pav.	7-ojo magneto eksperimento rezultatai.....	53



<b>45 pav.</b> 8-ojo magneto eksperimento rezultatai.....	53
<b>46 pav.</b> 9-ojo magneto eksperimento rezultatai.....	54
<b>47 pav.</b> 10-ojo magneto eksperimento rezultatai.....	54

## Santrumpų ir terminų sąrašas

### Santrumpos:

BLDC – bešepetėlis nuolatinės srovės (angl. Brushless Direct Current). Nuolatinės srovės bešepetėlis sudarytas iš nuolatinių magnetų suklijuotų ant rotoriaus, statoriaus iš feromagnetinių lakštų suklijuotų tarp nelaidžios elektrai dervos ir varinių apvijų apvyniotų aplink statorių. Nuolatinės srovės variklis valdomas trifaziu sinusoidiniu arba trapeciniu signalu, sugeneruotu iš 6 tranzistorių moduliacijos, plačiai naudojamas elektrinėse transporto priemonėse, dronuose;

ES – Europos Sąjunga;

ETP – elektrinė transporto priemonė-s;

NMKJ – nuolatinio magneto klasės jutiklis;

Prof. – profesorius.

### Terminai:

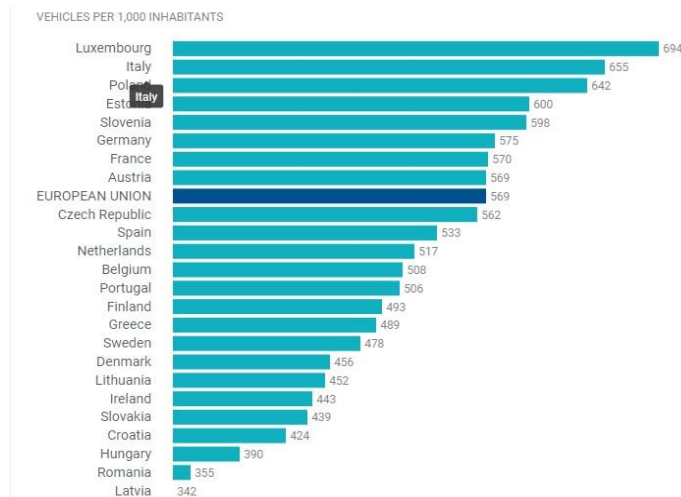
**Techninis kūrėjas** – asmuo, kuris savo pomėgiui užsiima technine kūrybine veikla, kurdamas naujus prietaisus, keisdamas esamus ar remontuodamas savais įgūdžiais be gamintojo pagalbos. Techninių kūrėjų darbai dažniausiai būna ne komerciniams tikslams, bet dalis jų atliktų darbų būna atlikti startuolių ir tiriamųjų darbų pagrindu.

**Kūrybinės dirbtuvės** – erdvė, kurioje renkasi techniniai kūrėjai vykdyti kūrybines veiklas. Dirbtuvėse dažnai būna įvairiausių bendro naudojimo įrangų ir įrankių, su kurių pagalba techniniai kūrėjai pasiekia savo tikslus.

**Liekamasis magnetizmas** – magnetinės indukcijos arba magnetinio srauto tankio, kuris lieka magnete po sėkmingo įmagnetinimo, matavimas. Kuo didesnė ši vertė, tuo „stipresnis“ magnetas. Šis matavimas žymimas  $B_r$ , matavimo vienetas  $T$  (Tesla) arba  $G$  (Gausai). Šis matavimas dažnai naudojamas magnetų klasės lentelėse, nurodant jų stiprumą [1, 2].

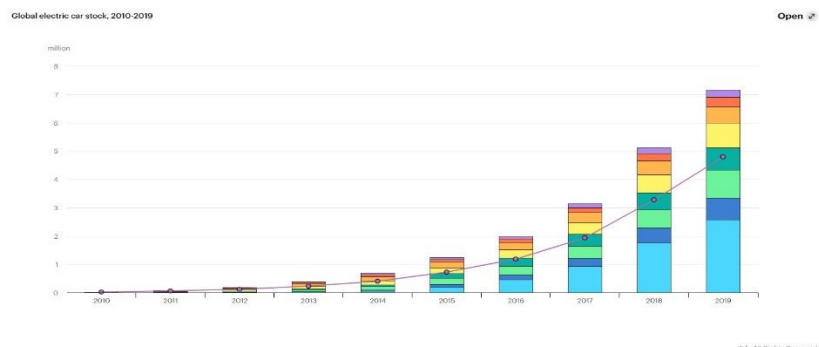
## Įvadas

Žmonės iš prigimties yra keliautojai, jie negali nustygti vietoje, viską nori padaryti kuo greičiau, lengviau. Tai įgyvendinti padeda asmeninės transporto priemonės - automobiliai, dviračiai, paspirtukai, riedlentės ir t. t. Europos automobilių gamintojų asociacijos ACEA 2019 metų duomenimis, kas antras ES narys turi automobilį, o Lietuvoje, šiek tiek mažiau nei ES vidurkis (žr. 1 pav.).



1 pav. Automobiliai tūkstančiui gyventojų Europos sąjungoje [3]

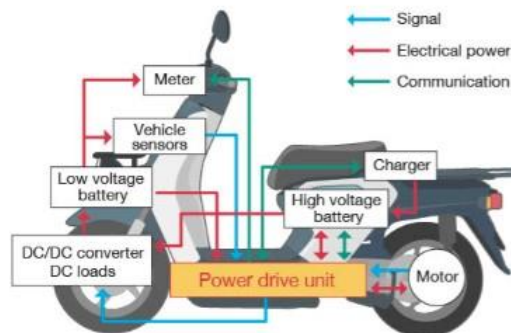
Kol kas didžioji dalis transporto priemonių yra iškastiniu kuru varomos transporto priemonės, bet, remiantis „Tarptautinės Energijos Agentūros“ IEA 2010–2019 metų duomenimis, per kelis dešimtmečius tai gali pasikeisti, nes elektrinių automobilių rinka pradeda augti eksponentiškai (žr. 2 pav.).



2 pav. Elektrinių automobilių rinka 2010–2019 metais [4]

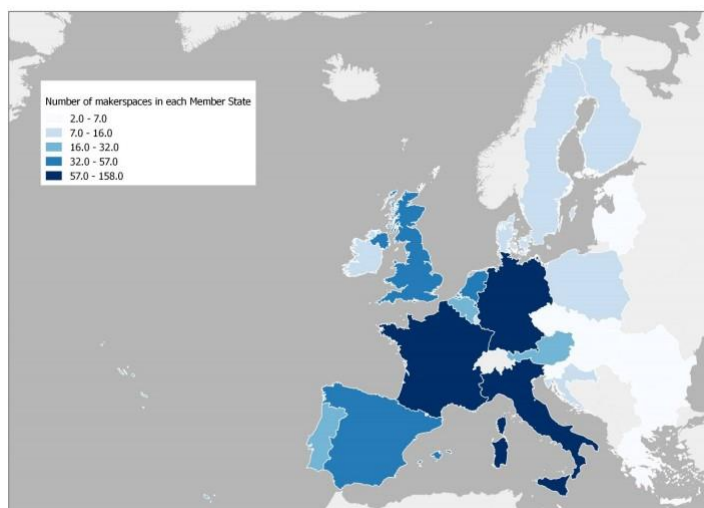
Prie šio augimo prisideda vis daugiau valstybių, kurios pradeda inicijuoti įvairias politikas dėl iškastinio kuro sunaudojimo mažinimo, skatina naudotis viešuoju transportu, iškeisti senus automobilius į elektrinius paspirtukus ir t. t. Per pastaruosius 10 metų ypač padaugėjo elektrinių motociklų ir elektrifikuotų, žmogaus varomų transporto priemonių, pavyzdžiui, paspirtukai, dviračiai, riedžiai, riedlentės ir daugelis kitų egzotinių elektrinių transporto priemonių, kurie yra naudojami ne tik pramogoms, bet ir kasdienėms kelionėms į darbą. Šių priemonių privalumai – paprastas naudojimas, kompaktiškumas, pigi priežiūra ir remontas, tylumas, mažesnė kaina nei automobilių, nereikia stovėti spūstyse ir dažnai nuvykstama į kelionės tikslą greičiau nei įprastinėmis transporto priemonėmis. O vienas iš pagrindinių dalykų važiuojant į darbus ar kitas viešas vietas – nereikia fizinio krūvio, dėl kurio atvykus į kelionės tikslą asmuo gali turėti nemalonų prakaito kvapą.

Elektrifikuotos transporto priemonės kaip motociklai ar žmogaus varomos transporto priemonės pasižymi nesudėtinga struktūra, kurią dažnai sudaro tik keletas komponentų, kurie gali būti lengvai pakeičiami ir remontuojami (žr. 3 pav.). Dauguma elektrinių transporto, priemonių išskyrus automobilius, turi labai panašią struktūrą, kurios pagrindiniai ir patys brangiausi komponentai yra baterijų blokas, galios ir valdymo modulis (angl. *Power Drive Unit*) ir vienas ar keli BLDC varikliai.



**3 pav.** Elektrinio motociklo sudėtis [5]

Bet kaip ir su daugeliu naujų technologijų, ne visi gamintojai suteikia galimybę pigiai ir greitai suremontuoti ar pakeisti gaminio komponentus, dėl monopolistinės praktikos draudžiant parduoti tam tikrus komponentus ar dirbtinai iškeliant remonto kainas. Dažnai aukštųjų technologijų produktų remontas pas jų gamintoją kainuoja beveik tiek pat, kiek ir naujas produktas, dėl to vartotojai dažnai būna priversti pirkti naują produktą. Tokia gaminių politika yra neekologiška ir nesąžininga neautorizuotų remonto technikų, techninių kūrėjų ar šiek tiek didesnį nei bazinį techninį išsilavinimą turinčių žmonių atveju, kurie praranda galimybę remontuoti, keisti turimą produktą ar kurti naujus, pagal panašų dizainą. Tai pasidarė ypač aktualu ši dešimtmetį dėl smarkiai padidėjusio techninių kūrėjų ir kūrybinių dirbtuvių kiekio (žr. 4 pav.) bei techninių kūrėjų, kurie pradeda įsitraukti ir į mokslinę veiklą [6].



**4 pav.** Kūrybinių dirbtuvių kiekis ES 2016 m. [6]

Dėl šios ir kitų priežasčių ES parlamente siekiama įteisinti „teisę remontuoti“ [7]. Po kurios įgyvendinimo gamintojai bus įpareigoti suteikti papildomos informacijos apie savo gaminius. Turėdami papildomą informaciją, gamintojai ir techniniai kūrėjai galės efektyviau tobulinti

produktus. ETP atveju, labai svarbu žinoti valdymo bloko parametrus ir variklio parametrus, nes tai nulemia didžiausią priemonės efektyvumą [8]. Kitas dalykas teikiantis poreikį remontuoti ETP variklius, tai jų naudojimas ne pagal gamintojo nurodymus, pavyzdžiui – galios padidinimas, ko pasekoje, variklis dirba aukštesnėje, temperatūroje, kas spartina magnetų išsimagnetinimą.

Šiuo darbu bus siekiama užtikrinti, kad kūrėjai ir ETP remonto specialistai ir techniniai kūrėjai turėtų galimybę identifikuoti vieną iš svarbiausių ETP BLDC variklių magnetų parametrų – nuolatinio magneto likutinį magnetinio srauto tankį  $B_r$ , nuo kurio priklauso variklio efektyvumas ir galia [8]. Siekiant užtikrinti, kad variklis veiktų efektyviausiai ir pagal specifikacijas, reikia, kad visi jo magnetai būtų vienodo stiprumo (žr. 5 pav.).

Grade	Residual magnetism		Coercive field strength				Energy product		Max. operational temp.
	Br		bHc		iHc		(BxH)max		
	Gauss (G)	Tesla (T)	kOe	kA/m	kOe	kA/m	MGOe	kJ/m <sup>3</sup>	
N30	10800-11200	1.08-1.12	9.8-10.5	780-836	≥12	≥955	28-30	223-239	≤80
N33	11400-11700	1.14-1.17	10.3-11	820-876	≥12	≥955	31-33	247-263	≤80
N35	11700-12100	1.17-1.21	10.8-11.5	860-915	≥12	≥955	33-35	263-279	≤80
N38	12200-12600	1.22-1.26	10.8-11.5	860-915	≥12	≥955	36-38	287-303	≤80
N40	12600-12900	1.26-1.29	10.5-12.0	860-955	≥12	≥955	38-40	303-318	≤80
N42	12900-13200	1.29-1.32	10.8-12.0	860-955	≥12	≥955	40-42	318-334	≤80
N45	13200-13700	1.32-1.37	10.8-12.5	860-995	≥12	≥955	43-45	342-358	≤80
N48	13700-14200	1.37-1.42	10.8-12.5	860-995	≥12	≥955	45-48	358-382	≤80
N50	14000-14600	1.40-1.46	10.8-12.5	860-995	≥12	≥955	47-51	374-406	≤80
N52	14200-14700	1.42-1.47	10.8-12.5	860-995	≥12	≥955	48-53	380-422	≤65
30M	10800-11200	1.08-1.12	9.8-10.5	780-836	≥14	≥1114	28-30	223-239	≤100
33M	11400-11700	1.14-1.17	10.3-11	820-876	≥14	≥1114	31-33	247-263	≤100
35M	11700-12100	1.17-1.21	10.8-11.5	860-915	≥14	≥1114	33-35	263-279	≤100
38M	12200-12600	1.22-1.26	10.8-11.5	860-915	≥14	≥1114	36-38	287-303	≤100
40M	12600-12900	1.26-1.29	10.8-12	860-955	≥14	≥1114	38-40	303-318	≤100
42M	12900-13200	1.29-1.32	10.8-12.5	860-995	≥14	≥1114	40-42	318-334	≤100
45M	13200-13700	1.32-1.37	10.8-13	860-1035	≥14	≥1114	43-45	342-358	≤100
48M	13700-14200	1.37-1.42	10.8-12.5	860-995	≥14	≥1114	45-48	358-382	≤100
50M	14000-14600	1.40-1.46	10.8-12.5	860-995	≥14	≥1114	47-51	374-406	≤100
27H	10200-10600	1.02-1.06	9.5-10.1	756-804	≥17	≥1353	25-27	199-215	≤120
30H	10800-11200	1.08-1.12	10.1-10.6	804-844	≥17	≥1353	28-30	223-239	≤120
33H	11400-11700	1.14-1.17	10.3-11	820-876	≥17	≥1353	31-33	247-263	≤120
35H	11700-12100	1.17-1.21	10.8-11.5	860-915	≥17	≥1353	33-35	263-279	≤120
38H	12200-12600	1.22-1.26	10.8-11.5	860-915	≥17	≥1353	36-38	287-303	≤120

5 pav. Magnetų klasės ir likutinio magnetinio srauto tankio lentelė [1]

Nuolatinė magnetų stiprumas gali skirtis ir keistis nuo gamybos proceso, laikymo ir transportavimo sąlygų, darbinės temperatūros ar savaiminio išsimagnetinimo. Tačiau gamintojai ir ypač tiekėjai, retai nurodo parduodamo magneto likutinį magnetinio srauto tankį. Dažniausiai nurodoma iš ko magnetas yra pagamintas ir kokia jo klasė. Jei pardavėjas nurodo likutinį magnetinio srauto tankį, klientui nėra galimybės pasitikrinti ar tikrai gavo kokybišką produktą. Kitoje srityje – ETP remonto metu, nėra galimybės nustatyti, koks magnetų nusidėvėjimo lygis ir ar jų likutiniai magnetinio srauto tankiai yra suderinti.

Turėdami prietaisą, su kuriuo būtų galima tiksliai nustatyti bet kokio magneto likutinį magnetinio srauto tankį, leistų ETP kūrėjams kurti efektyvesnius variklius, o ETP remontininkams tausoti aplinką, nekeičiant viso motoro, bet tik sudėti tinkamos galios magnetus.

Šiuo darbu siekiama sukurti įrangą, skirtą identifikuoti nuolatinė magnetų likutinį magnetinio srauto tankį ir klasę, naudojantis J. M. Camacho ir V. Sosa torinį modelį, skirtą apskaičiuoti azimutinės geometrijos magnetų likutinį magnetinio srauto tankį  $B_r$ ,  $Z$  ašyje (1,2) (žr. 7,6 pav.)[9]. Darbe bus naudojami dažniausiai plačiausiai paplitusios geometrijos magnetai, t. y. cilindro ir stačiakampės prizmės formos (žr. 7,6 pav.). Ši įranga būtų orientuota į ETP remonto, kūrybinėms dirbtuvėms, individualiems ETP kūrėjams ir testo inžinieriams, kurie kalibruoja holo jutiklius.

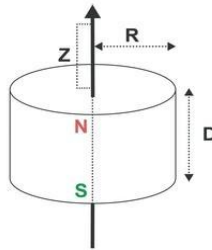
Žinant atstumą nuo magneto polio paviršiaus, galima rasti cilindro formos magnetinio lauko srauto tankį panaudojus (1), o stačiakampės prizmės formos magnetui panaudojus (2)[10]. Daroma prielaida, kad magnetinio lauko srauto tankis yra toks pats prie abiejų magneto polių.

$$B(z) = \frac{B_r}{2} \left( \frac{D+z}{\sqrt{R^2+(D+z)^2}} - \frac{z}{\sqrt{z^2+R^2}} \right); \quad (1)$$

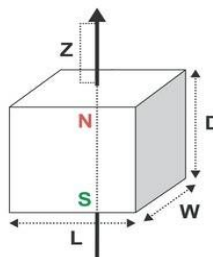
čia  $B(z)$  – magnetinio srauto tankis  $z$  atstumu nuo magneto poliaus paviršiaus,  $B_r$  – magneto likutinis magnetinis lauko tankis,  $z$  – atstumas nuo magneto polio paviršiaus,  $R$  – cilindro spindulys,  $D$  – cilindro aukštis (žr. 6 pav.) [10].

$$B(z) = \frac{B_r}{\pi} \left( \arctan \frac{LW}{(2z)\sqrt{L^2+W^2+4z^2}} - \arctan \frac{LW}{2(D+z)\sqrt{L^2+W^2+4(D+z)^2}} \right); \quad (2)$$

čia  $B(z)$  – magnetinio srauto tankis  $z$  atstumu nuo magneto poliaus paviršiaus,  $B_r$  – magneto likutinis magnetinis lauko tankis,  $z$  – atstumas nuo magneto polio paviršiaus,  $L, W, D$  – stačiakampės prizmės matmenis (žr. 7 pav.) [10].



6 pav. Cilindrinio magneto schema [10].



7 pav. Stačiakampės prizmės magneto schema [10]

Darbe bus matuojamas magnetinio srauto tankis, atstumas nuo magneto poliaus ir ieškoma magneto parametro  $B_r$ . Paieškai bus panaudotas mažiausių kvadratų metodas (3) su gradientiniu greičiausio nusileidimo metodu (4)[11, 12].

$$S = \sum_{i=1}^n (\tilde{y}_i - y_i)^2 \longrightarrow \min \quad (3)$$

čia  $\tilde{y}_i$  – išmatuota reikšmė,  $y_i$  – funkcijos reikšmė  $i$ -ajame taške.

Mažiausių kvadratų metodu siekiama rasti tokius funkcijos parametrus, kad skirtumas funkcijų taškuose tarp apskaičiuotos ir tikrosios funkcijos, būtų mažiausias. Programavime, šis metodas susideda iš parametrų ribų parinkimo ir visų skaičių tarp ribų įstatymo į funkciją. Naudojant tik mažiausių kvadratų metodą iškyla ribų ir žingsnio dydžio parinkimo problema. Renkantis mažą žingsnį, skaičiavimų kiekis gali išaugti tiesiškai, o pasirinkus didelį žingsnį, prarandamas galutinis

tikslumas. Taip pat didelė problema gali būti ir su ribomis, nes parinkus netinkamas ribas, tiksliausias atsakymas gali būti už parinktų rėžių. Parinkus plačias ribas, taip pat kaip ir su žingsniu, išilgsta skaičiavimų laikas. Todėl bus kartu naudojamas gradientinis greičiausio nusileidimo optimizavimo metodas, kuris yra tinkamas surasti lokalų ekstremumą, o šio darbo atveju – vienintelį funkcijos ekstremumą. Šio metodu, parametras pakeičiamas žingsniu iki funkcijos minimumo, antigradiento kryptimi pagal formulę (4).

$$x_{k+1} = x_k + a \cdot S_k \quad (4)$$

čia  $S_k$  – tikslo funkcijos antigradientas,  $a$  – žingsnio daugiklis,  $x_k$  – dabartinis žingsnis,  $x_{k+1}$  – sekantis žingsnis. Žingsnio daugiklis  $a$  yra kintamas ir parenkamas pagal esančius parametro rėžius, ir norimą maksimalų tikslumą.

Įstačius išmatuotas ir apskaičiuotas magnetinio lauko srauto tankio reikšmes į (3), gauname:

$$S = \sum_{z=1}^n (B(\tilde{z}) - B(z, Br))^2 \rightarrow \min \quad (5)$$

čia  $B(\tilde{z})$  – išmatuotas magnetinio lauko srauto tankis aukštyje  $z$ ,  $B(z, Br)$  – apskaičiuotas magnetinio lauko srauto tankis su spėjamu  $Br$  parametru,  $z$  aukštyje.

Darbo vadovo patarimu, (5) išraiška gali būti patobulinta padidinant tikslumą ir pridėdant papildomą atstumo nuokrypio parametras  $err$ , nurodanti kokia buvo atstumo paklaida [13].

$$S = \sum_{z=1}^n \frac{((B(\tilde{z}) - B(z + err, Br))^2)}{(B(\tilde{z}))^2} + \frac{B(\tilde{z}) - B(z + err, Br))^2}{2} \rightarrow \min \quad (6)$$

čia  $B(\tilde{z})$  – išmatuotas magnetinio lauko srauto tankis aukštyje  $z$ ,  $B(z, Br)$  – apskaičiuotas magnetinio lauko srauto tankis su spėjamu  $Br$  parametru,  $z$  aukštyje,  $err$  – atstumo nuokrypis skirtas kompensuoti nulinės pozicijos netikslumus.

## Tyrimų objektas

Tiriamąjį darbo objektai – cilindro ir stačiakampės prizmės neodimio magnetai pirkti iš trijų Lietuvos tiekėjų ir vieno Kinijoje esančio tiekėjo.

## Darbo tikslas

Sukurti automatizuotą stendą, skirtą identifikuoti įvairių magnetų likutinį magnetinio lauko srauto tankį ir magneto klasę.

## Darbo uždaviniai

Žemiau pateikiami pagrindiniai darbo uždaviniai:

- praktiškai įvertinti teorinį modelį;
- suprojektuoti ir pagaminti automatizuotą stendą;
- atlikti magnetų klasės identifikavimo eksperimentus su automatizuotu stendu;

## 1. Eksperimentinis tyrimas

### 1.1. Magnetinio srauto tankio jutiklio kalibravimas

Eksperimentuose reikės matuoti magnetų magnetinio srauto tankį. Šiam tikslui bus naudojamas magnetometro jutiklis. Jis yra rodo magnetinio lauko srauto tankio kryptį ir galią. Magnetometrai yra ganėtinai jautrūs mechaninėms deformacijos ir litavimo proceso pokyčiams, kadangi šie jutikliai dažnai būna maži (apie  $2\text{mm}^2$ ), o tai gali iškreipti jų matavimus. Kaip ir su daugeliu jutiklių naudojamų eksperimentuose, reikia žinoti ar turimas jutiklis matuoja tinkamai. Siekiant turėti tikslius matavimus, privaloma atlikti jutiklio kalibravimą. Kalibravimas – procesas, tikrinantis matavimo prietaiso ir etalono rodmenų atitikimą. Magnetometro kalibravimo procesas susideda iš kelių etapų.

### 1.2. Jutiklio savarankiškas testas

Savarankiškas testas gali būti naudojamas keitiklio ir signalo grandinės funkcionalumui patikrinti, netaikant pagreičio stimulo. Taip pat šiuo testu galima patikrinti valdiklio programos veikimą skaitant jutiklio registrus. Įjungus akselerometro savikontrolę, jutikliui taikoma elektrostatinė įjungimo jėga, imituojanti nedidelį pagreitį. Tokiu atveju jutiklių X, Y ir Z išėjimai parodys nuolatinės srovės lygių pokytį, susijusį su pasirinktu visos skalės diapazonu (jautrumu). Įjungus savikontrolę, prietaiso išėjimo lygis nustatomas pagal jutiklį veikiančio pagreičio ir elektrostatinės savitikros jėgos generuojamų signalų algebrinę sumą [14, 8.3 skyrius].

### 1.3. Magnetometro kalibravimas

Magnetometrų kalibravimas įvairiose taikymo srityse dažnai yra komercinė tiekėjų ir gamintojų paslaptis, dėl kurios yra sudėtinga rasti šaltinių kaip atlikti kalibravimo procedūras. Bet galima naudotis pateiktais terminais iš magnetometrų gamintojų:

- **Minkštos geležies kompensavimas** (angl. *Soft Iron*). Kalbant apie minkštos geležies kompensavimą reikia galvoti apie elektromagnetinių laukų skydus, varžtus ir baterijos kontaktus [15]. Kaip ir elektronai, kurie teka per mažiausiai pasipriešinimo turinčias medžiagas, taip ir magnetiniai laukai skverbiasi per didžiausią magnetinį laidumą turinčias medžiagas. Šis poveikis turėtų būti pašalintas siekiant tiksliausių matavimų. Minkštos geležies poveikis iškreipia apskritimą, kurio spindulys yra lygus aplinkos magnetinio lauko dydžiui, į elipsę. Taigi atlikus matavimus elipsoido taškuose ir perkėlus į sferą gausime minkštos geležies kompensacijos koeficientus. Šio kompensavimo reikia tik tuo atveju, jei įrenginys judės magnetiniame lauke. Šio darbo atveju įrenginys bus stacionarus, todėl pakaks kelių matavimų, atliktų iš prietaiso fiksavimo vietos.
- **Kietos geležies kompensavimas** (angl. *Hard Iron*). Fizikos terminais tai nuolatinio magneto kompensavimas [15]. Vienas iš pavyzdžių yra telefone esančio garsiakalbio kuriamo magnetinio lauko kompensavimas. Šis kompensavimas negali būti naudojamas su judančiais magnetais, bet šio darbo atveju, bus naudojamas kietos geležies kompensavimas, siekiant kompensuoti žemės ir aplinkinių prietaisų kuriamą lauką bei iškraipymus, atsiradusius litavimo proceso metu. Šiam kompensavimui, programos paleidimo metu (funkcijos atlikti pastoviai negalima, nes tai iškreips matavimus) bus pasinaudota jutiklio įdiegta funkcija nustatoma *M\_CTRL\_REG1* registre [14]. Jutiklio keitiklis su šia funkcija įrašo tuo laiku matuojamų *XYZ* reikšmių vidurkį į *M\_OFF\_XYZ* registrą. Taip sumažėja reikalingų



skaičiavimų kiekis, nes tolimesni matavimai bus tik santykiniai jutiklio atžvilgiu ir nereikės kiekvieną kartą kompensuoti aplinkinius magnetinius laikus.

- **Žinomo magnetinio srauto tankio išmatavimas.** Priešingai nei su akselerometrų, magnetometro kalibravimas nėra toks paprastas, nes matuojama reikšmė nėra lengvai patikrinama be specialių priemonių. Taip pat magnetometras neturi savitiktros funkcijos, su kuria būtų galima žinoti ar išmatuojamos tikslios vertės. Kitas faktorius, trukdantis žinoti ar magnetometras funkcionuoja tinkamai, tai žemės ir elektros prietaisų kuriami magnetiniai laukai.

Norint patikrinti jutiklį, reikia atlikti žinomo magnetinio srauto tankio matavimo eksperimentą, kurio metu iš kelių šaltinių išmatuojamas žinomas magnetinio srauto tankis ir sulyginamas su jutiklio matuojama reikšme. Jei jutiklio reikšmės sutampa su žinoma reikšme, galima tęsti to jutiklio naudojimą. Priešingu atveju, reikia įvertinti ar išmatuotas skirtumas atsirado dėl litavimo proceso ar jutiklio ar jo programos kodo defekto. Šiam eksperimentui galima naudoti kelis žinomus magnetinio lauko šaltinius.

1. Žemės magnetinis laukas.
2. Solenoidas.
3. Žinomos galios nuolatinis magnetas.

Turėdami žinomos galios nuolatinį magnetą, galima naudoti J. M. Camacho ir V. Sosa teorinį modelį, apskaičiuoti tikslų magnetinio srauto tankį erdvėje [9]. Tuomet nustačius magneto padėtį į tokią, kurios vektorius nuo magnetometro sudarytų  $45^\circ$  laipsnių kampą su XYZ ašimis, galima patikrinti visų ašių matavimus vienu metu, nes turima visa informacija (atstumas, kampas, magneto stipris) reikalinga apskaičiuoti magnetinio srauto tankį magnetometro koordinatėje. Tačiau, šiam metodui reikalingas žinomos galios magnetas, tad prieš naudojant šį būdą, reikalingas stendas su kuriuo būtų nustatytas to magneto magnetinio srauto tankis. Tad šį būdą bus galima naudoti tik po šio baigiamojo darbo, nes šio darbo rezultatas bus toks stendas.

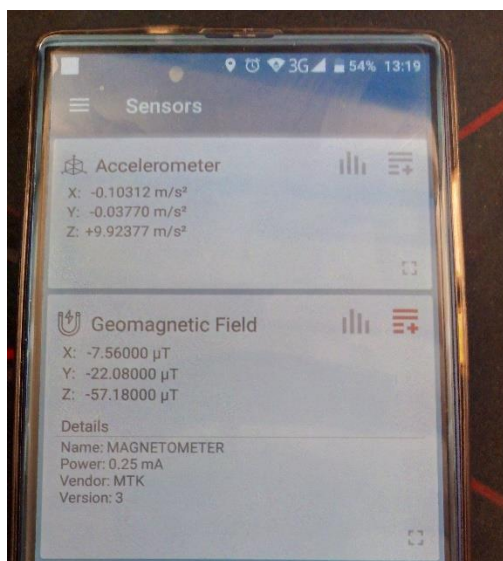
Kitas būdas patikrinti ar gerai matuojamas žinomas magnetinio srauto tankis, tai naudoti elektromagnetą ir remiantis Ampero dėsniumi, apskaičiuoti solenoido magnetinio srauto tankį esantį solenoido šerdyje. Tuomet įterpus magnetometrą į šerdies centrą reikia palyginti apskaičiuotą reikšmę su išmatuota magnetometro reikšme [16]. Tačiau šiam būdai reikalingas tikslus srovės šaltinis, solenoidas ir matavimo grandinė, kas duotų papildomas išlaidas kuriant stendą ir padidintų jo sudėtingumą.

Trečiasis būdas – matuoti žemės magnetinį lauką. Matavimams atlikti galima panaudoti duomenų bazines kurios atvaizduoja globalius žemės magnetinio srauto tankio matavimus ir sertifikuotus prietaisus kurie jau turi magnetometrus, pavyzdžiui – išmanieji telefonai. Duomenų bazių matavimai, kaip ir telefonų matavimai dažniausiai naudojami kompasuose ir žemėlapių programose siekiant surasti įrenginio orientaciją į žemės magnetinį polių. Kaip ir su prieš tai minėtais būdais, reikia palyginti žinomus matavimus su einamuoju matavimu. Dėl plataus telefonų naudojimo, šiam darbui bus naudojamas šis metodas. Bet prieš naudojant šį būdą, reikalinga įsitikinti, prietaisų ir duomenų bazių matavimų tikslumu.

### 1.3.1. Jutiklio kalibravimas naudojantis žemės magnetiniu lauku

Žemės magnetinio srauto tankį galima sužinoti dvejais būdais – iš duomenų bazių kurios ir prietaisų, kurie jau turi įdiegtus magnetometrų. Duomenų bazių matavimams pasirinktas Jungtinės Karalystės ir Jungtinių valstijų gynybos ministerijos patvirtintas „Pasaulio magnetinis modelis“, kuris sukurtas iš „Europos Kosmoso Agentūros“ magnetinio lauko tyrimų palydovų ir 160 observatorijų duomenų [17]. Ši duomenų bazė yra naudojama kompasų instrumentų matavimų tikslinimui priklausomai nuo vietos pasaulyje. Tačiau duomenų bazės magnetinio srauto tankis yra globalus ir gali būti naudojamas tik kaip atskaitos taškas, jei darbe naudojama įranga nėra lauke. Taip yra dėl to, kad nėra numatoma, kad patalpoje gali būti magnetinio srauto tankį įtakojančių įrenginių ir medžiagų. Kadangi įranga bus naudojama patalpoje, reikalinga patikrinti matavimą ir su lokalų magnetinį lauką matuojančiu prietaisu. Šiuo atveju buvo pasirinkta naudoti išmaniuosius telefonus ir lyginti jų matavimus su duomenų baze.

Tiriant išmaniųjų telefonų magnetometrų matavimus, buvo naudoti *Samsung* ir *Doogee* kompanijų išmanieji *Android* telefonai, kurių išleidimo į rinką data yra tarp 2011 ir 2018 metų. *Doogee* kompanijos telefonai turi tokį patį magnetometrą, o *Samsung* skirtingus (žr. 1 lent.). Pačių magnetometrų orientacija ir padėtis telefonuose nėra žinoma, tad taikoma prielaida, kad jų orientacija yra tokia pati, dėl plataus magnetometrų naudojimo kompasų ir navigacijos programoms. Magnetometrų matavimams gauti, buvo panaudota aplikacija *Sensor Toolbox* (žr. 8 pav.), kuri realiu laiku atvaizduoja visus išmaniojo telefono matavimus, įskaitant ir magnetometro. Aplikacija, taip pat parodo ir jutiklių modelius, kurie buvo įtraukti į 1 lentelę. Duomenų analizei naudota *MATLAB R2020a* programa [18].



8 pav. Jutiklių rodmenų programa *Sensors Toolbox* išmaniajame *Android* telefone [19]

#### Eksperto eiga

4. Iš duomenų bazės gautas magnetinio srauto tankis XYZ ašimis ir bendra magnetinio srauto tankio amplitudė [17]. Matavimų koordinatės yra 54.894 platumos, 23.957 ilgumos ir 48 m virš jūros lygio – Kauno miestas (žr. 1 lent.).
5. Ant medinio stalo, ant kurio bus testuojamas stendas, padėtas vienas iš išmaniųjų telefonų į darbo vietą ir orientuotas į pietus. Aplink stalą 30 cm atstumu pašalintos medžiagos kurios galėtų įtakoti matuojamą magnetinį lauką.
6. Su *Sensor Toolbox* išmatuotas vietinis magnetinis laukas.

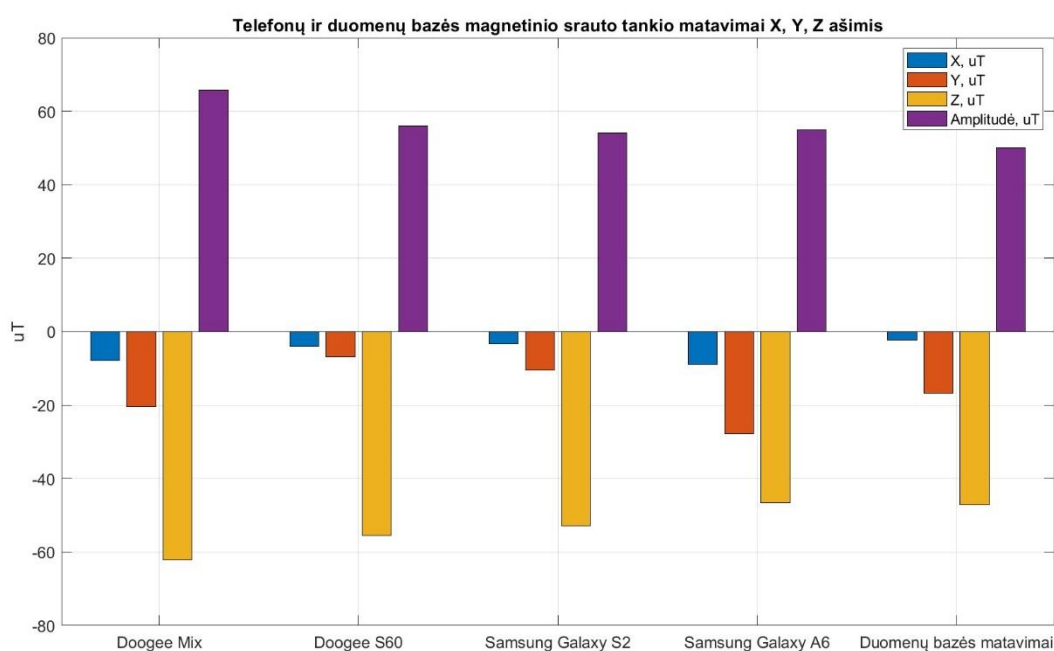
7. Matavimai pakartoti su kitais telefonais, juos padedant į tą pačią vietą.
8. Matavimai atvaizduoti lentelėje (žr. 1 lent.).

**1 lentelė.** Žemės magnetinio srauto tankio matavimai, atlikti duomenų bazės ir skirtingų išmaniųjų telefonų

Telefono pavadinimas	Magnetometro pavadinimas	X, uT	Y, uT	Z, uT	Amplitudė, uT
Doogee Mix	MTK Generic	-7.8	-20.5	-62.1	65.85
Doogee S60	MTK Generic	-4.08	-6.72	-55.4	55.95
Samsung Galaxy S2	AK8975 Asahi Kasei Microdevices	-3.4	-10.5	-52.9	54.03
Samsung Galaxy A6	YAS539 Yamaha Corporation	-8.9	-27.8	-46.5	54.90
Žemės magnetinio lauko matavimai koordinatėse[17]	<i>Platuma 54.894; Ilguma=23.957; Aukštis virš jūros lygio 48 m;</i>	-2.31	-16.80	-47.17	50.12

### Ekspimento rezultatai

Vizualiai perteikus rezultatus, matoma, kad visų telefonų magnetometrų orientacija sutampa su globaliu išmatuotu magnetiniu lauku (žr. 9 pav.). Taip pat visų matavimų amplitudės vizualiai atrodo panašios.

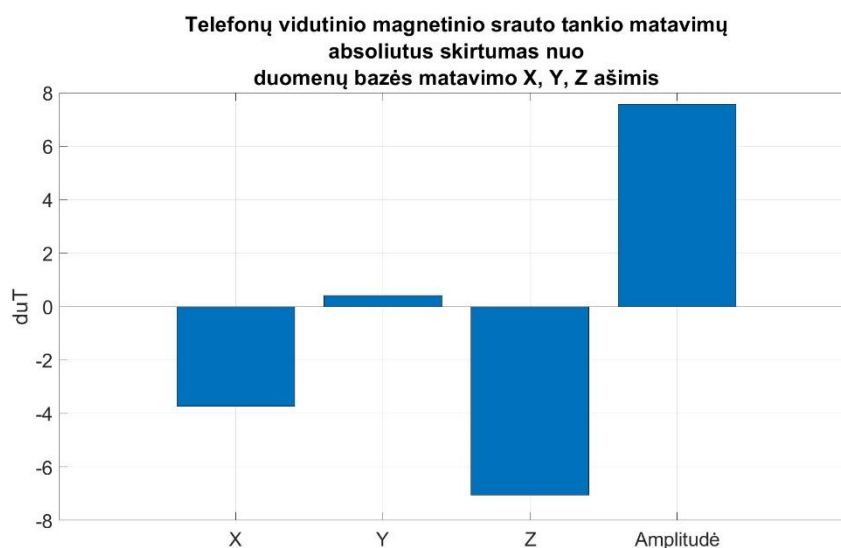


**9 pav.** Išmaniųjų telefonų ir duomenų bazės magnetinio lauko matavimai XYZ ašimis

Apskaičiavus vidutines telefonų matavimų reikšmes ir palyginus su duomenų bazės matavimus, gautas absoliutus ir santykinis skirtumas tarp matavimų (žr. 10,11 pav.). Maksimalus skirtumas tarp matavimų yra 7 uT Z ašyje, bet santykinai didžiausias skirtumas 61.8 % X ašyje (žr. 2,3 lent.). Tai, kad Z ašyje skirtumas yra ganėtinai mažas, yra svarbu, nes stende didžiausią įtaką matavimams darys Z ašis.

**2 lentelė.** Skirtumas tarp telefonų vidutinių magnetinio srauto tankio matavimų ir duomenų bazės matavimo

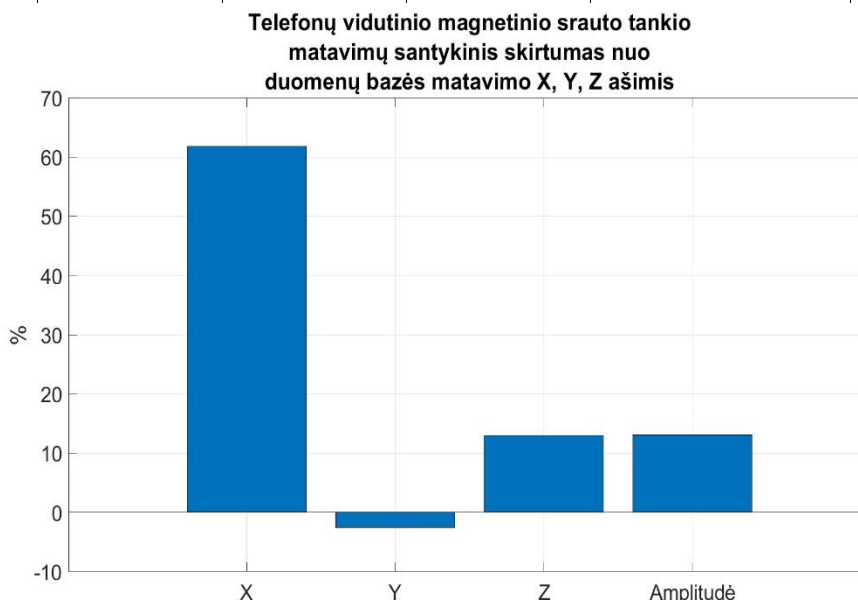
<b>dX, uT</b>	<b>dY, uT</b>	<b>dZ, uT</b>	<b>dAmplitudė, uT</b>
-3.736	0.422	-7.054	7.562



**10 pav.** Vidutinis telefonų matavimo skirtumas nuo duomenų bazės matavimo

**3 lentelė.** Santykinis skirtumas tarp telefonų vidutinių magnetinio srauto tankio matavimų ir duomenų bazės matavimo

<b>dX, %</b>	<b>dY, %</b>	<b>dZ, %</b>	<b>dAmplitudė, %</b>
61.803	-2.576	13.008	13.108



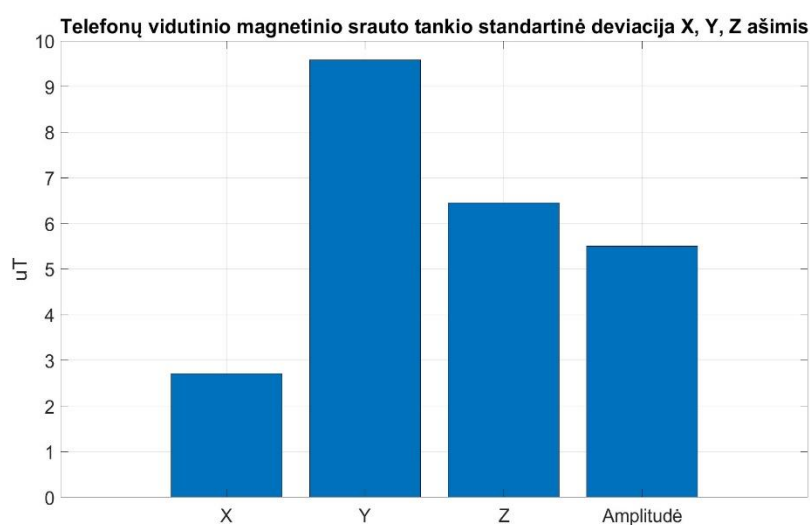
**11 pav.** Santykinis vidutinis telefonų matavimo skirtumas nuo duomenų bazės matavimo

Atlikti standartinės deviacijos skaičiavimai tarp skirtingų telefonų, rodo, kad maksimali absoliuti deviacija yra  $9.5 \text{ uT}$  Y ašyje, o mažiausia –  $2.7 \text{ uT}$  X ašyje (žr. 4 lent.). Tačiau santykinai su ašių matavimo vidurkiu mažiausia deviacija yra  $11.9 \%$  Z ašyje (žr. 13 pav., grafikas kairėje). Tokia

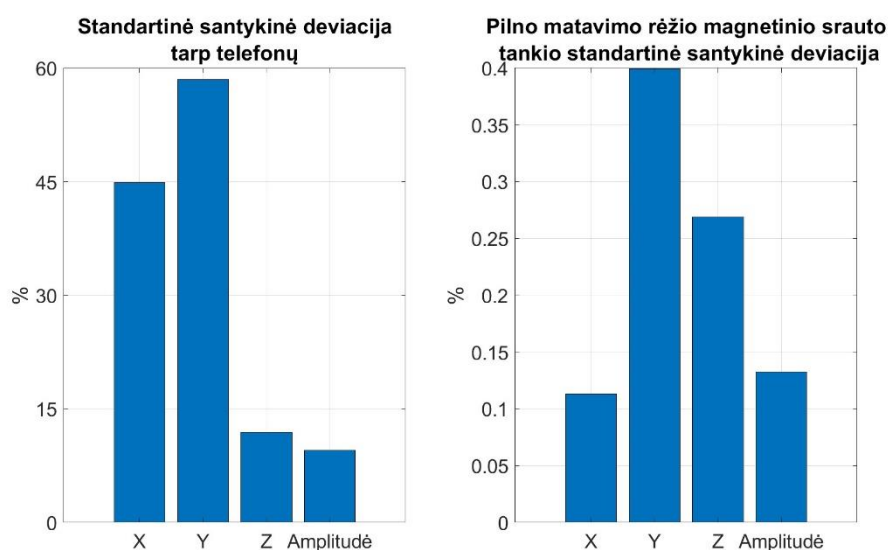
deviacija atrodytų didelė, kol lyginama matavimus tarp telefonų. Bet reikia nepamiršti, kad stendas naudos pilną matavimo režį, kuris yra  $\pm 1000 \mu T$  [14]. Tokiu atveju skirtumai tarp matavimų tampa santykinai maži, t. y. mažesni nei 1 % (žr. 4 lent.).

**4 lentelė.** Telefonų matavimų standartinė santykinė ir absoliuti deviacija

Matavimas	Standartinė deviacija, $\mu T$	Standartinė santykinė deviacija, %	Standartinė santykinė deviacija nuo pilno matavimo režio, %
X	2.713	44.887	0.113
Y	9.579	58.480	0.399
Z	6.450	11.895	0.268
Amplitudė	5.503	9.539	0.132



**12 pav.** Telefonų matavimų standartinė deviacija



**13 pav.** Telefonų matavimų santykinė standartinė deviacija

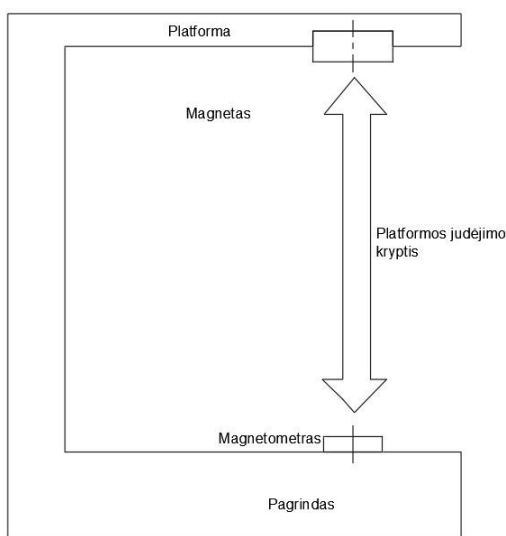
## Eksperimento išvados

9. Telefonų matavimai sutampa, su žemės magnetiniu lauku Z ašyje ir amplitude 13% skirtumu.
10. Telefonų žemės magnetinio lauko matavimai Z ašyje ir amplitude svyruoja 9-12%, o nuo pilno magnetometro matavimo režio ( $\pm 1000 \mu T$ ) 0.11 - 0.4%.
11. Dėl mažo matavimo skirtumo nuo duomenų bazės matavimo ir matavimų svyravimo nuo pilno matavimo režio, darant prielaidą, kad duomenų bazės matavimas yra tikslingas globaliai ir neatsižvelgia į vietinius matavimo triukšmo šaltinius, galima teigti, kad išmanieji telefonai yra tinkami atlikti magnetometro kalibravimą, siekiant išsiaiškinti ar magnetometro reikšmės atitinka realybę.

#### 1.4. Tyrimo aprašas ir eiga

Prieš pradėdant projektuoti stendą, jei yra įmanoma, reikia atlikti preliminarius eksperimentus siekiant patikrinti teorinio modelio tinkamumą stendui. Teorinio modelio ir stendo veikimo principo patvirtinimui reikia penkių dalių:

- magnetometro jutiklio;
- programinės įrangos magnetometro matavimams gauti ir juos analizuoti;
- žinomos klasės magneto;
- aukščio skalės ar atstumo matavimo prietaiso, atstumo nuo magnetometro įvertinimui;
- slankomo magneto įtvirtinimo kuris leistų  $\pm 1 mm$  tikslumu keisti magneto atstumą nuo magnetometro (žr. 14 pav.);



14 pav. Principinė stendo schema skirta atlikti eksperimentui

Turėdami šią įrangą, galima atlikti eksperimentą rankiniu būdu pagal eigą.

1. Prie stabilios ir lygios platformos statmenai pritvirtinti aukščio skalę.
2. Prie skalės pritvirtinti magnetometrą - taip, kad jo Z ašis būtų statmena platformai.
3. Pritvirtinti slankomą magneto įtvirtinimą greta skalės, lygiagrečiai platformai.
4. Prijungti magnetometrą prie kompiuterio ir paleisti programinę įrangą.
5. Platformą pakelti į aukščiausią įmanomą padėtį.
6. Iš programinės įrangos išmatuoti ir pasižymėti pradines magnetometro vertes.
7. Prie platformos pritvirtinti žinomos klasės magnetą.
8. Leisti platformą žemyn fiksuotu žingsniu ir žymėtis magnetometro matavimus ir aukštį lentelėje iki tol, kol bus pasiektas minimalus atstumas arba magnetometro matmenys pasieks savo ribas.

9. Užpildytoje lentelėje kompensuoti pirminius magnetometro matavimus ir magnetometro aukštį iš likusių matavimų.
10. Lentelėje pasižymėti magneto išmatavimus ir formą.
11. Atlikti skaičiavimus mažiausių kvadratų metodu ir rasti magneto likutinį magnetinio srauto tankį (6).
12. Palyginti gautą likutinį magnetinio srauto tankį su 5 pav. esančia lentele ir žinoma magneto klase. Jei klasė patenka į lentelės režius, eksperimentas buvo sėkmingas ir tyrimą galima tęsti toliau.

Remiantis aukščiau aprašyta eiga, galima atlikti ir automatizuotus eksperimentus, pakeitus rankines operacijas, kaip slankiojimas, matavimų surinkimas ir analizė, į automatines. Šį aprašą galima naudoti ir nežinomos klasės magnetams identifikuoti. Sekančiuose skyriuose bus aprašytos galutiniam teste naudojamos medžiagos ir testo įrangos kūrimo eiga.

### 1.5. Galutinio eksperimento medžiagos

Galutiniam eksperimentui atlikti buvo nupirkti magnetai iš kelių skirtingų tiekėjų (žr. 5, 6 lent.). Kiekvienam magnetui priskirtas numeris, kuris vėliau tekste bus naudojamas, kaip nuorodą į magneto parametrus. Du cilindriniai magnetai buvo pirkti 2019 metais iš Kinijos, o kiti 2021 metais iš Lietuvoje esančių tiekėjų. Kad surinkti duomenys būtų reikšmingi, ieškota vienodų dydžių ir klasių magnetų, tačiau tokių rasti nepavyko, nes dalis pardavėjų iš viso nenurodo magneto klasės, kas tik pabrėžia šiame darbe daromo stendo naudą. Kaip alternatyva, naudojami magnetai yra panašių išmatavimų ir klasių.

**5 lentelė.** Eksperimente naudojami cilindriniai magnetai

Nr.	R, mm	D, mm	Klasė pagal tiekėją	Tiekėjas
1	3	1	N35	Aliexpress
2	12	1	N50	Aliexpress
3	8	5	N38	geoshop.lt [20]
4	3	1	N38	anodas.lt [21]
5	12	1	N42	geoshop.lt [22]

**6 lentelė.** Eksperimente naudojami stačiakampiai magnetai

Nr.	L, mm	W, mm	D, mm	Klasė pagal tiekėją	Tiekėjas
6	10	5	1.9	115mT	Lemona.lt [23]
7	10	10	2	N45	Lemona.lt [24]
8	5	5	2	N35	anodas.lt [25]
9	10	5	3	N35	geoshop.lt [26]
10	5	4	1.5	N48	lemona.lt[27]

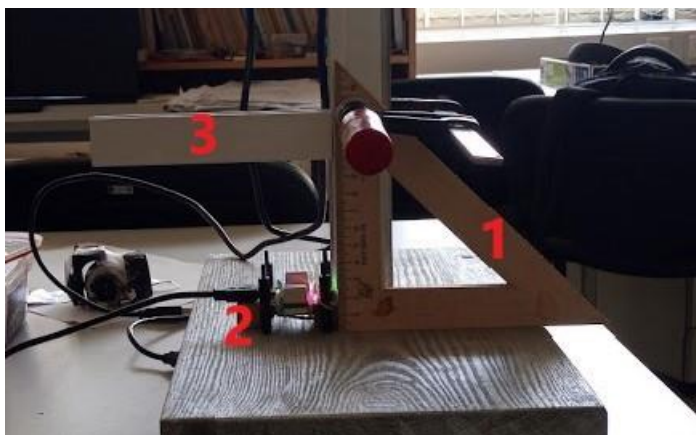
## 1.6. Pirminis eksperimentas

Remiantis 2 skyriaus aprašu, pradėtas ruošti ir vykdyti pirminis eksperimentas, kurio metu bus išbandomas teorinis modelis ir ieškoma, kaip patogiau atlikti eksperimentą.

### 1.6.1. Įranga ir eksperimento eiga

#### Naudota įranga:

- *TinkerForge IMU Brick 2.0* (žr. 15 pav. 2). Bosh BNO055 3 ašių magnetometro, akselerometro ir giroskopo modulis [28, 29]. Jo magnetinio srauto tankio matavimo režiai z ašyje –  $\pm 2500\mu T$ ;
- *Brick Viewer*. Programinė įranga skirta *TinkerForge IMU Brick 2.0* matavimam skaityti [30];
- trikampė liniuotė (žr. 15 pav. 1);
- medinė platforma su statmenai pritvirtintu stulpu centre;
- medinis strypelis su pritvirtintu magnetu (žr. 15 pav. 3);
- 5x4x1.5mm N45 klasės magnetas [27];
- 10x30x2mm nežinomos klasės magnetas iš riedžio variklio;

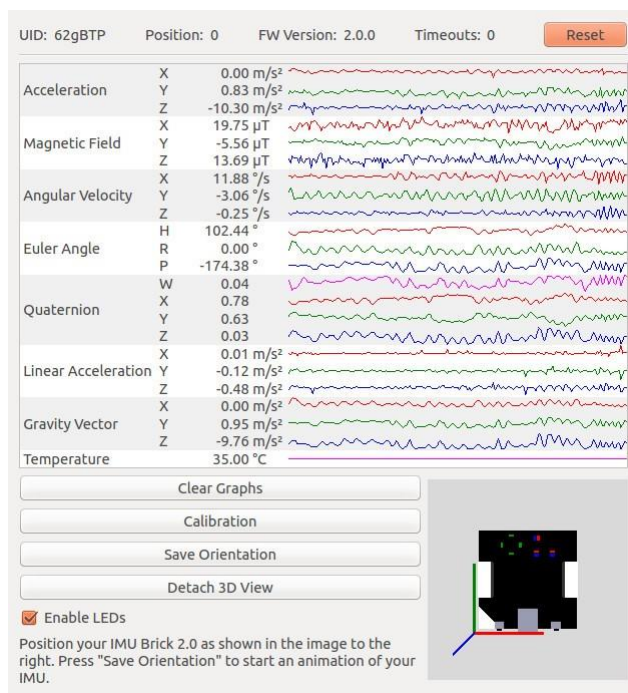


15 pav. Pirminio eksperimento stendas

#### Eksperimento eiga

Remiantis eksperimento aprašu ir stendo schemas paveikslu (žr. 14 pav.), buvo sujungta įranga (žr. 15 pav., 1 – trikampė liniuotė aukščiui matuoti, 2 – *TinkerForge IMU Brick 2.0*, 3 – slankiojantis strypelis ant kurio tvirtinamas magnetas), pradėtas atlikti eksperimentas. Prie kompiuterio prijungtas *IMUBrick2.0* modulis ir paleista *BrickViewer* programa (žr. 16 pav.), kurios lange galima matyti visus jutiklių išmatavimus ir jų grafikus realiu laiku. Iš programos lango skirsnio *Magnetic Field* išmatuoti pradiniai matavimai (žr. 16 pav.). Šie matavimai vėliau buvo atimti iš visų likusių matavimų, siekiant kompensuoti aplinkinius magnetinius laukus. Taip pat atlikta ir su atstumu tarp magnetometro ir stalo paviršiaus.





16 pav. Brick Viewer programos langas [30]

Tuomet prie slankiklio pritvirtintas N48 klasės magnetas [27]. Slankiklis pradėtas nuleidinėti po 1mm ir iš programos lango pradėti užsirašinėti matavimai. Pasiekus magneto matavimų viršutinės ribas (apie  $2500\mu T$ ), matavimai buvo nutraukti. Eksperimentas pakartotas su riedžio magnetu. Kadangi jo tūris buvo 20 kartų didesnis, matavimo ribos pasiektos anksčiau nei praeito magneto – ties 32cm.

### 1.6.2. Analizė ir rezultatai

Duomenų analizei ir parametrų identifikavimui, buvo naudota *Microsoft Excel* programa su *Solver* įskiepiu [31]. Su darbo vadovu, paruošta skaičiuoklė, pasirinktas *Evolutionary* sprendimo metodas (žr. 17, 18 pav.). Skaičiuoklės tikslas – pasiekti mažiausią paklaidų sumą rastą naudojantis (6) formule, keičiant  $B_r$  ir *offs* parametrus. *offs* parametras, kompensuoja pradinio aukščio matavimo netikslumus. Aukščio matavimams pasirinkti  $\pm 10mm$  atstumo režiai. Riedžio likutinio magnetinio srauto tankio parametro režiai parinkti  $1000000\mu T < B_{rhov} < 1500000\mu T$ , t. y. pilni režiai iš (žr. 5, 18 pav.). Kadangi riedžio magneto klasė nėra žinoma, parametro paieška turi būti atliekama per visą lentelę. Žinomos klasės magnetui,  $B_r$  režiai parinkti pagal tos klasės režius –  $1370000\mu T < B_{rhov} < 1420000\mu T$  (žr. 5, 17 pav.).

V	W	X	Y	Z	AA	AB
Aukštis	Aukštis be paklaidos	B(z), uT	Paklaida	Paklaidų suma		
80	84,32694629	10,90541539	1,2979483	3868,989973		
78	82,32694629	11,71892913	0,0838831			
76	80,32694629	12,61539116	0,0524969	kk		
74	78,32694629	13,60564603	0,0268962	436523,034		
72	76,32694629	14,70228462	0,4582195			
70	74,32694629	15,91998121	0,0145633	offs		
68	72,32694629	17,2759068	0,5968356	-4,326946294		
66	70,32694629	18,79023899	0,0221217			
64	68,32694629	20,48679432	1,1114021	mju0		
62	66,32694629	22,3938172	0,0268272	1,25664E-06		
60	64,32694629	24,54497052	0,2252177			
58	62,32694629	26,98058764	1,8453873	Br		
56	60,32694629	29,74926617	0,2363823	1371377,557		
54	58,32694629	32,90991195	0,0231736			
52	56,32694629	36,53438153	0,038732	Koreliacija		
50	54,32694629	40,71092763	0,0374271	0,999460206		
48	52,32694629	45,54873252	0,0279301			
46	50,32694629	51,1839316	4,8972882			
44	48,32694629	57,78770098	0,0112266			
42	46,32694629	65,57723949	0,053568			
40	44,32694629	74,82086371	10,902866			

Solver Parameters

Set Objective:

To:  Max  Min  Value Of:

By Changing Variable Cells:

Subject to the Constraints:

- Br <= 142000
- Br >= 1370000
- offs <= 10
- offs >= -10

Make Unconstrained Variables Non-Negative

Select a Solving Method: Evolutionary

17 pav. Žinomo magneto likutinio magnetinio srauto tankio apskaičiavimui naudoti parametrai

V	W	X	Y	Z	AA	AB
B(z), uT išmatuota	Aukštis	Aukštis be paklaidos	B(z), uT apskaičiuota	Paklaida	Paklaidų suma	
250	80	79,08674462	245,1184055	11,91536352	5510,553	
267,9375	78	77,08674462	264,1681055	7,104365342		
279,75	76	75,08674462	285,2291997	15,01119824	kk	
318,9375	74	73,08674462	308,5722233	53,72053702	420176,9	
349	72	71,08674462	334,5122127	104,9497137		
378,6875	70	69,08674462	363,4174098	116,589454	offs	
401,9375	68	67,08674462	395,7199487	19,32921145	0,913255	
457,625	66	65,08674462	431,9290441	330,1442274		
484,5	64	63,08674462	472,6473511	70,24324132	Koreliacija	
527,375	62	61,08674462	518,5913723	38,57633487	0,999104	
595,0625	60	59,08674462	570,6170607	298,7914381		
620,9375	58	57,08674462	629,7521355	38,84910069	Br	
702,25	56	55,08674462	697,2371309	12,56447905	1320025	
738,75	54	53,08674462	774,5778874	641,8211081	Riedžio magnetai yra	
822,4375	52	51,08674462	863,6131343	847,7192936	N45	
983,5625	50	49,08674462	966,6022155	143,8259228		
1088,875	48	47,08674462	1086,339626	3,214065594		
1227,75	46	45,08674462	1226,306172	1,042321738		
1394,125	44	43,08674462	1390,869747	5,298341123		
1533,0625	42	41,08674462	1585,554738	1377,718696		

Solver Parameters

Set Objective:

To:  Max  Min  Value Of:

By Changing Variable Cells:

Subject to the Constraints:

- BrHov <= 1500000
- BrHov >= 1000000
- offsHov <= 10
- offsHov >= -10

Make Unconstrained Variables Non-Negative

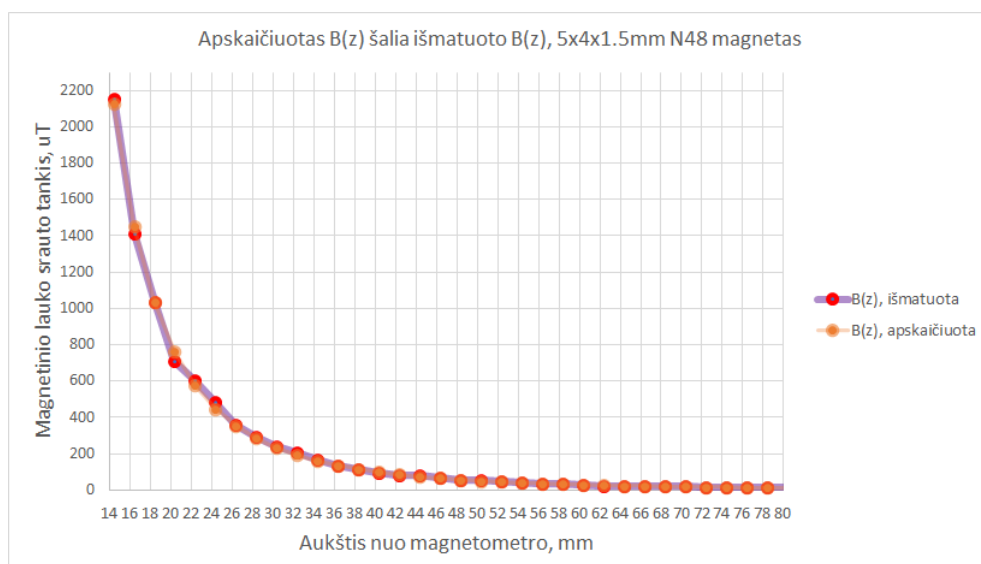
Select a Solving Method: Evolutionary

18 pav. Riedžio likutinio magnetinio srauto tankio apskaičiavimui naudoti parametrai

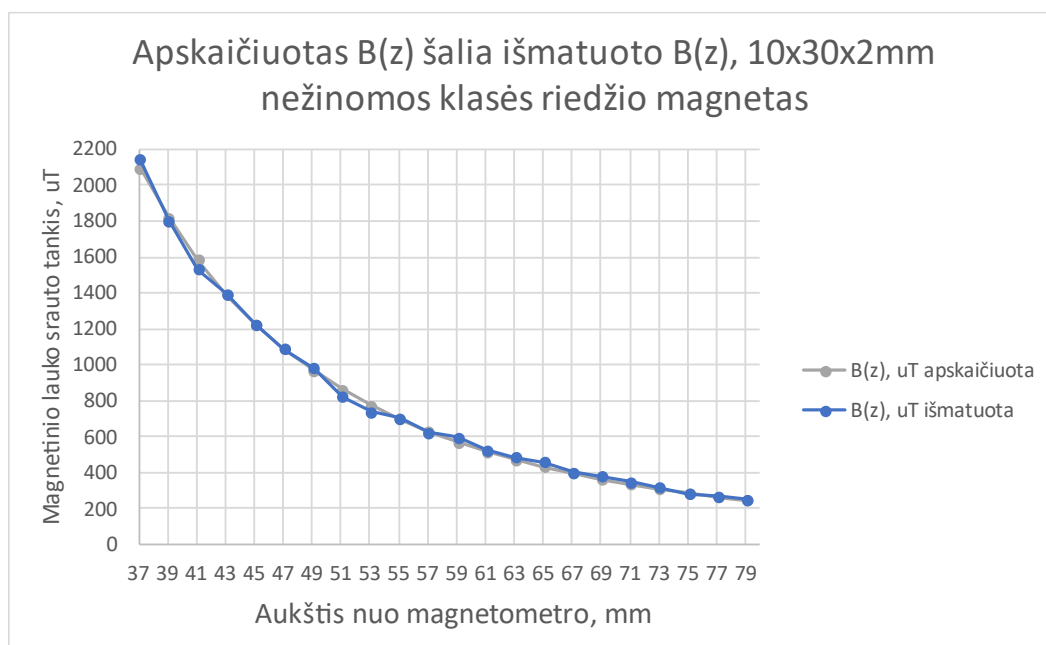
Skaičiuoklei atlikus skaičiavimus, gauti rezultatai (žr. 7 lent.). Žinomos klasės magneto rezultatai, atitinka 5 paveikslėlyje esančias, likutinio magnetinio srauto tankio reikšmes ( $1370000\mu T < Br_{hov} < 1420000\mu T$ ), o koreliacija  $\rho$  tarp išmatuoto ir apskaičiuoto  $B(z)$ , siekia 0.99946, kas įrodo, kad rasti parametrai yra ypač tikslūs. Išmatuoto ir apskaičiuoto  $B(z)$  kreivės pateiktos 19. Į ką reikia reikia atkreipti dėmesį, tai kad pradinio aukščio paklaida yra  $-4.3mm$ . Ši paklaida galėjo atsirasti dėl to, kad magnetas buvo nuleidinėjamas ranka. Ši paklaida yra mažesnė su riedžio magnetu, galimai dėl jo didesnio tūrio, tad maži jo pasukimai mažiau įtakojo matavimus. Nustatyta, kad riedžio magnetas yra N45 klasės, kas atitinka rinkoje dažnai naudojamus magnetus. Koreliacija tik patvirtina gerai nustatytą klasę. Riedžio magneto išmatuoto ir apskaičiuoto  $B(z)$  kreivės pateiktos 20.

7 lentelė. Pradinio eksperimento rezultatai

Magnetas	$S_{min}$	$B_r, \mu T$	Gauta klasė	$z_{err}, mm$	$\rho$
5x4x1.5mm N48	3868	1371377.5	N48	-4.326	0.99946
10x30x2mm Riedžio	5510	1320024.5	N45	0.913	0.99910



19 pav. Žinomos klasės magneto išmatuoto ir apskaičiuoto magnetinio lauko srauto kreivės



20 pav. Riedžio magneto išmatuoto ir apskaičiuoto magnetinio lauko srauto kreivės

### 1.6.3. Išvados

Aukštos žinomo ir riedžio magneto determinacijos koeficientas ( $R^2 > 0.9994$ ) ir tai, kad žinomos klasės magnetas atitinką pardavėjo pateiktą klasę, patvirtina (1 - 2, 6) formules ir testavimo procedūrą. (1 - 2, 6) formulės gali būti naudojamos stende skirtam identifikuoti magneto klasė ir likutinį magnetinio srauto tankį.

## 2. Projektinė dalis

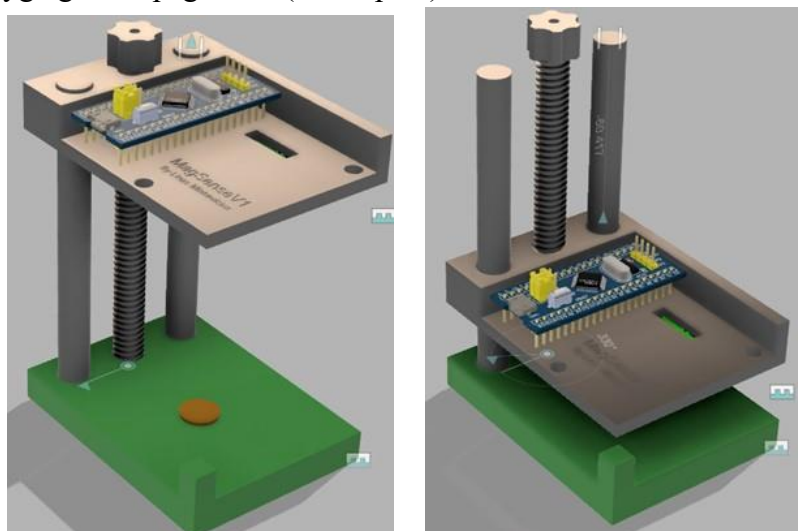
### 2.1. Pirminis automatizuotas stendas

Po pirminio eksperimento, nustatyta, kad jo procesas yra labai lėtas ir linkęs į klaidas. Vieno magneto eksperimentas užtrukdavo iki 30 minučių ir dažnai vedant ranka, dažnai reikėdavo iš naujo užsirašyti matavimų reikšmes. Planuojant, kad eksperimentas bus atliekamas daug kartų ir su įvairiais magnetais, nuspręsta kurti automatizuotą stendą. Kuriant pirminį stendą buvo mėginta spręsti tris pagrindines problemas.

1. Rankinis atstumo matavimas.
2. Rankinis magnetometro matavimas.
3. Nepatogus magneto pakėlimas.

#### 2.1.1. Mechanika

Pagal 2 skyrių, *Autocad Fusion360* programos aplinkoje sumodeliuota mechaninė stendo dalis [32]. Platforma juda dviejų ašinių ir vieno sriegio sistema, t. y. sukant sriegį ranka, platforma slenka aukštyn ir žemyn lygiagrečiai pagrindui (žr. 21 pav.).



(a) Sumodeliuotas stendo prototipas

(b) Sumodeliuotas stendo prototipas su pakelta platforma su nuleista platforma

21 pav. Sumodeliuotas stendo prototipas

Pagrindo, ašinių, platformos ir sriegio detalės buvo atspausdintos 3D spausdintuvu (žr. 22 pav.). Kadangi mėginta palaikyti mažą stendo tūrį, buvo nuspręsta sriegį sukuti ranka ir laikyti visas detales arti viena nuo kitos. Tam, kad mechaniniai komponentai netrukdytų magnetometro matavimus, sriegis ir ašinės taip pat gamintos iš plastiko. Gaminti ašines sekėsi ypač sunkiai, dėl 3D spausdinimo technologijos apribojimų, nes spausdinant strypus vertikaliai, jie dėl silpno plastiko sluoksnių sukibimo pasidaro per pus silpnesni nei horizontaliai spausdinti strypai ir tai, kad spausdinant horizontaliai sunku užtikrinti strypo apvalumą. Dėl tvirtumo ašinės spausdintos horizontaliai ir po to nušlifautos.



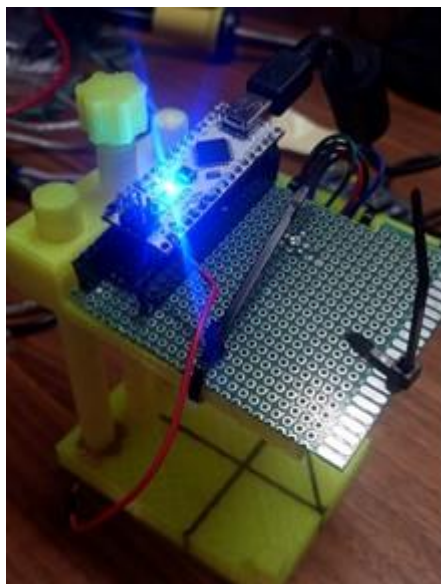
22 pav. Atspausdintas stendo prototipas

### 2.1.2. Elektronika

Dėl tuo metu trūkusių elektronikos projektavimo įgūdžių, nuspręsta eiti greituoju keliu ir viską lituoti ant prototipavimo plokštės, o jutiklius sujungti laidais ir visą elektroniką prijungti prie stendo karštais klizais ir užtraukiamais dirželiais. Remiantis 1.4 skyriumi, standas turi turėti atstumo matavimo prietaisą ir magnetometrą. Magnetinio lauko srauto tankiui matuoti, pasirinktas tuo metu vis dar gaminamas 3 ašių magnetometras *MAG3110*, kurio matavimo režiai  $\pm 1000 \mu T$  [33]. Atstumo matavimui pasirinktas *VL5310X* lazerinis atstumo jutiklis [34]. Jutiklis pasirinktas dėl jo  $\pm 2.5 mm$  matavimo tikslumo ir dėl to, kad jis jau buvo naudotas praeituose projektuose. Tiek magnetometras tiek lazerinis atstumo jutiklis naudoja I2C sąsają, kas sumažina bendrą laidų kiekį ir paprastina galutinę schemą.

Kadangi šie jutikliai tiesiogiai į kompiuterį neprisijungia, reikalingas už jų rodmenų nuskaitymą atsakingas mikrovaldiklis. Jis taip pat atliks bendravimo su kompiuteriu funkciją. Pirminiu variantu buvo rinkta naudoti *BluePill* mikrovaldiklį su  $72 MHz$  *STM32F103* mikroprocesoriumi, kas palengvintų sekančių stendo versijų gamybą, leistų išvengti procesoriaus greičio apribojimų, sumažintų jų kainą, tačiau greitai nustatyta, kad šiam mikrovaldikliui nėra parengtos lazerinio atstumo jutiklio bibliotekos [35, 36, 37]. Kaip alternatyva pasirinktas *Arduino Nano* mikrovaldiklis su  $16 MHz$  *Atmega328p* mikroprocesoriumi [38, 39]. Dėl to, kad tuo metu nebuvo galimybės naudoti pirmą mikrovaldiklį, vėliau susidurta su atminties trūkumo problema. *Arduino Nano* turi 4 kartus mažiau atminties nei *BluePill* mikrovaldiklis (*BluePill* 128KB, o *Arduino Nano* 32KB), tad dėl didelės lazerinio jutiklio bibliotekos, mikrovaldiklio atmintis buvo užimta virš 90%, kas apribojo tolimesnį programavimą ir tobulinimą.

Surinkus visus mechaninius ir elektronikos komponentus, pagamintas standas (žr. 23 pav.). Surinkus standą, pradėta rašyti jo programinė įranga.



23 pav. Surinktas stendo prototipas

### 2.1.3. Valdiklio programinė įranga

Valdiklis buvo programuojamas *ArduinoIDE* aplinka pasinaudojus jutiklių bibliotekomis [40, 37, 41]. Dėl to, kad magnetometras ir atstumo jutiklis buvo naudotas praeituose projektuose, reikėjo sujungti jų naudojimą toje pačioje programoje. Apjungimas nebuvo visiškai sklandus dėl 5.2 poskyryje minėtos atminties problemos. Valdikliui turint mažai likusios atminties, jis tampa nestabilus, nesiprogramuoja, užstringa. Pirmose programinės įrangos stadijose, net nebuvo galimybės turėti magnetometro ir lazerinio atstumo jutiklio bibliotekų vienu metu, bet po bibliotekų atnaujinimo ir kodo optimizavimo, jas pavyko sujungti.

Patikimam duomenų perdavimui į kompiuterį, komunikacija vykdoma ne tekstu, kaip įprasta daugumai *Arduino* mikrovaldiklių pagrindu kurtų projektų, bet siunčiant duomenų struktūras *DataPacket* ir *TextPacket* (žr. 1 priedą). O tam, kad užtikrinti, kad gautų baitų struktūra atvyko reikiama tvarka, naudoti pradžios, pabaigos baitai ir struktūrų suspaudimas [42]. Dauguma modernių kompiliatorių išdėlioja duomenis atmintyje specifine tvarka, dažniausiai sulygiuojant duomenis kas 4 ar 8 baitus, kas pagreitina prieigą į atmintį, bet palieka tarpus atmintyje. Jeigu mes naudotume įprastas struktūras, susidurtume su problema, kad struktūros dydis tarp mikrovaldiklio ir kompiuterio skiriasi, nors naudoja tokius pačius laukus. Kas dar pablogina situacija – nėra bendro standarto tarp kompiliatorių, nurodančio vieningą duomenų išdėliojimą. Todėl jei struktūra veiks vienoje kalboje ar kompiuteryje, tai gali neveikti kituose. Dėl to ypač svarbu, kad struktūros būtų suspaustos – naudotų „packed“ parametą kuriant struktūrą (žr. 1 priedą). Taip užtikrinamas struktūrų dydis tarp skirtingų kompiliatorių.

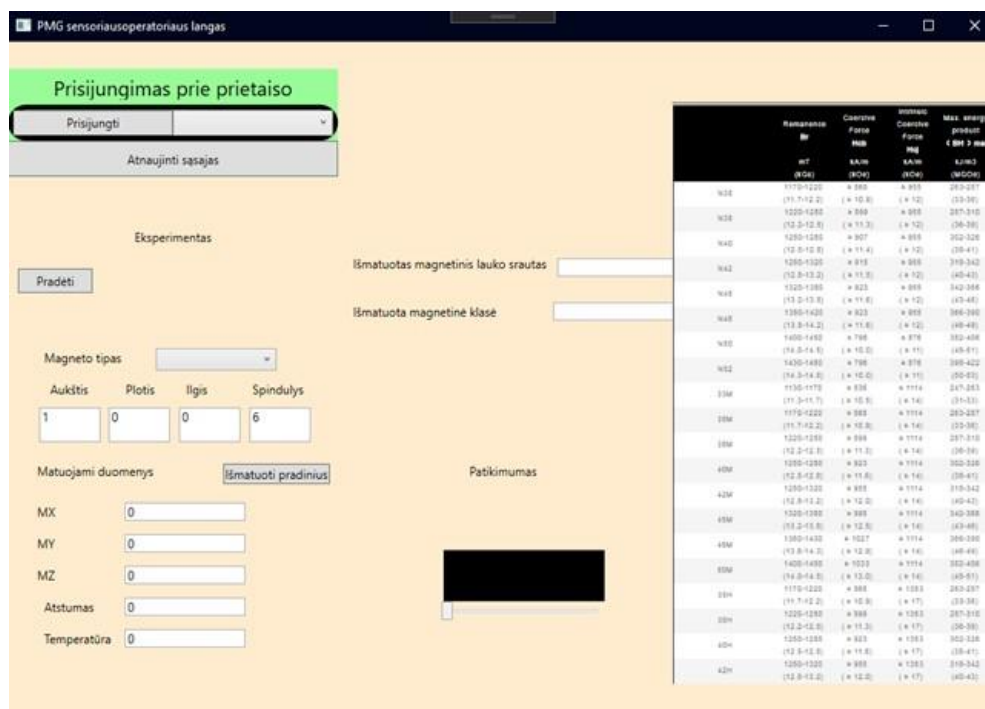
#### Programos algoritmas:

1. nuskaitomi magnetometro rodmenys;
2. nuskaitomi lazerinio atstumo jutiklio rodmenys;
3. rodmenys ir duomenų persiuntimo komanda sudedami į struktūrą;
4. struktūra išsiunčiama per serijinę komunikaciją;
5. išsiųsti duomenis tuomet pasiekia kompiuterį, kuriame vyksta jų apdorojimas.

## 2.1.4. Operatoriaus langas kompiuteryje

Dauguma laboratorinių stendų negali egzistuoti be kompiuterių, kurie suteikia vartotojui informaciją apie vykstantį procesą ir apdoroja duomenis. Taip ir šis stendas turi būti naudojamas su kompiuteriu ir valdymo panelės programine įranga. Kompiuterio naudojimas taip pat užtikrina, kad nebus pritrūkta skaičiavimo resursų, kol nėra žinoma, kiek jų reikės. Žinant kiek resursų reikės, galima priimti sprendimą perkelti duomenų apdorojimą į patį valdiklį. Vartotojo sąsajos kūrimui naudota *Visual Studio 2019* ir daugelyje operacinių sistemų naudojamą *.netCore3* kalba ir *Windows Presentation Foundation – WPF* grafinės sąsajos architektūra [43, 44, 45].

Operatoriaus langas susideda iš prietaiso valdymo, magneto parametrų suvedimo, einamųjų duomenų atvaizdavimo, magneto klasių lentelės ir rezultato blokų (žr. 24). Prietaiso valdymo bloke, pasirenkama serijinė jungtis prie kurios bus prisijungta. Einamųjų matavimų bloke, atvaizduojami iš jutiklio gaunami duomenys realiu laiku. Rezultatų bloke, po eksperimento atvaizduojamas išmatuotas magnetinio lauko srautas ir rasta magneto klasė



24 pav. Pirmojo stendo operatoriaus langas

## 2.1.5. Programos algoritmas:

1. operatorius prisijungia prie stendo;
2. pasirenkamas magneto tipas. Cilindras arba stačiakampė prizmė;
3. suvedami magneto išmatavimai;
4. paspaudžiamas mygtukas „Išmatuoti pradinius“. Taip išmatuojamos pradinės magnetometro reikšmės ir ignoruojami aplink esantys magnetiniai laukai;
5. ant pagrindo uždedamas magnetas, juodų linijų sankirtoje (žr. 23);
6. paspaudžiamas „Pradėti“ mygtukas. Taip pradedami rinkti duomenys;
7. programa pradeda kaupti matavimų masyvą. Programoje aukštis yra suskaidytas po 1 mm nuo 0 iki 100 mm, t. y. 100 skirsnių. Eksperimento metu, programa gauna iš stendo aukščio ir magnetometro matavimus, iššaukiama „InvokeUpdatePack“ funkcija, kuriai perduodami

matavimai (kodo fragmentas pateiktas žemiau). Gauti magnetometro matavimai tuomet kaupiami į gauto aukščio skirsnį `dataset[distance].Add(data)`. Operatorius gali matyti kiek buvo surinkta matavimų tame skirsnyje pagal „Patikimumas“ langą (žr. 24 pav.). Kuo daugiau matavimų, tuo daugiau žalių linijų lange.

---

```
public void InvokeUpdatePack(ExperimentData data)
{
    mx = data.mx - baseReading.mx; my = data.my
    - baseReading.my; mz = data.mz -
    baseReading.mz; distance = data.distance;
    temperature = data.temperature; data.mz =
    mz; data.mx = mx; data.my = my; if
    (allowCollecting) // only if base reading is
    taken then collect.
    {
        if
        (dataset.ContainsKey(d
        istance))
            dataset[distance].Add(
            data);
        else { var blankList = new
            List<ExperimentData>();
            blankList.Add(data);
            dataset.Add(distance, blankList);
        }
    }
}
```

---

8. operatorius pasuka sriegį ir palaukia kol užsipildys žaliai to aukščio patikimumo langas.;
9. operatorius kartoja praeitą žingsnį tol, kol platforma pilnai nėra nuleista;
10. paspaudžiamas „Stabdyti“ mygtukas;
11. programa naudojantis mažiausių kvadratų metodu randa magnetinio lauko srautą ir iš lentelės gauna magneto klasę (6);
12. rezultatų bloke parodomas rezultatas;
13. platforma pakeliama į viršutinę padėtį;

### 2.1.6. Rezultatai ir išvados

Pabaigus, operatoriaus lango programą, pradėta vertinti testavimo procedūra, stendo patikimumas ir mėginta atlikti identifikavimo eksperimentą. Automatinis matavimų surinkimas pasiteisino, nes neberekėjo duomenų rašyti ranka, bei buvo surenkama daugiau duomenų per tą patį laiką. Tačiau identifikuotos keletas problemų susijusių su stendu:

- stendo platforma dažnai užstrigdavo;
- sriegio tolerancijos buvo per didelės, dėl to platforma klibėdavo ir nebuvo lygiagreti pagrindui. Taip pat pritvirtintas jutiklis taip pat nebuvo lygiagretus platformai;
- ranka sukant sriegį, testas vis vien būna per lėtas ir daug darbo reikalaujantis procesas;
- lazerinio jutiklio atstumo matavimas nebuvo tikslus, kisdavo  $\pm 10mm$ . Dėl to, magnetometro matavimai prarasdavo reikšmę, o eksperimentas smarkiai išilgėdavo;
- programinė įranga buvo nepritaikyta pradinio lygio programuotojui, neturėjo grafinių rezultatų atvaizdavimo funkcijų, patogaus duomenų kaupimo;

Dėl šių problemų nuspręsta toliau vystyti stendą, norint padidinti stendo patikimumą, tvirtumą ir lengvumą naudotis.



## **2.2. Galutinio stendo projektavimas**

Atsižvelgiant į praeitų eksperimentų ir stendų rezultatus, buvo pradėtas modeliuoti galutinis stendas. Pasirinkta *Autodesk Fusion 360* modeliavimo ir projektavimo aplinka, dėl jos išskirtinės funkcijos išlaikyti pakeitimus tarp elektronikos brėžinių ir mechanikos [32]. Turėdami šią funkciją, galima pagreitinti kūrimo procesą, nes padarius pakeitimus, tokius kaip pajudintas komponentas, pakeitimai pereina per visas projektavimo aplinkas, taip nebereikia iš naujo atidarinėti ir perprojektuoti dalių.

Šiame stende buvo išspręstos 2.1 skyriuje aprašyto stendo problemos, kaip:

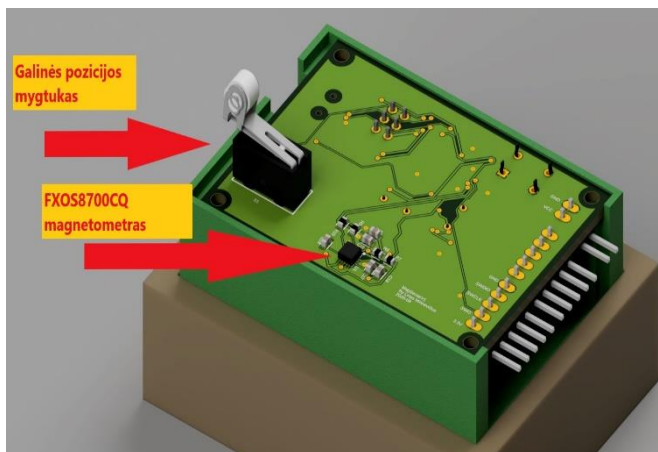
- Sriegio laisvumas;
- Strypų užsikirtimas;
- Ilgas rankinis procesas sukant sriegį;
- Atstumo matavimo netikslumai;
- Sudėtingas magnetometro sulygiavimas;
- Programinės įrangos nepatogumas atliekant eksperimentus;

### **2.2.1. Elektronika ir jos projektavimas**

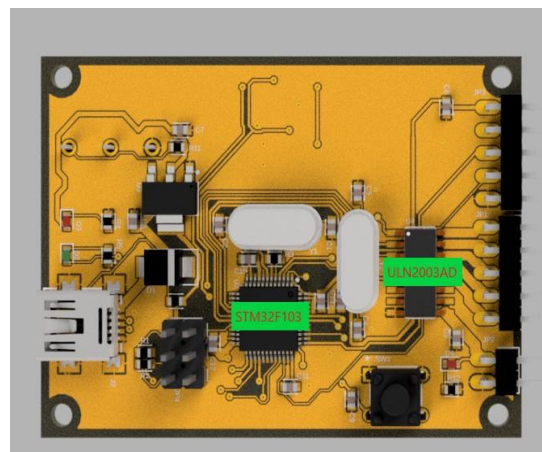
Siekiant užtikrinti įrangos patikimumą ir magnetometro sulygiavimą, buvo nuspręsta stendui suprojektuoti valdymo plokštę. Valdymo plokštei iškelti reikalavimai.

1. Turėti programuojamą ir plačiai prieinamą mikrovaldiklį;
2. Turėti galimybę prisijungti prie testo kompiuterio ar kito įrenginio be sudėtingų komunikacijų sąsajų;
3. Valdiklis gali būti programuojamas ir valdomas vienu metu;
4. Valdiklis turi galėti valdyti ir maitinti žingsninius variklius;
5. Valdiklis turi turėti galinės padėties mygtuką;
6. Valdiklis turi turėti magnetometrą;

Laikantis šių reikalavimų buvo suprojektuota ir pagaminta stendo valdymo plokštė.



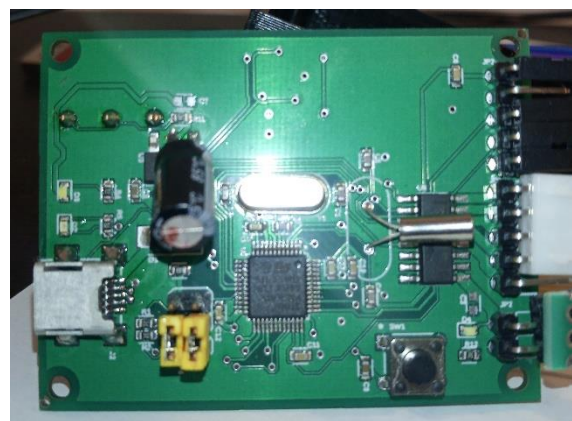
(a) Suprojektuota valdymo plokštės viršutinė dalis



(b) Suprojektuota valdymo plokštės apatinė dalis



(c) Pagamintos valdymo plokštės viršutinė dalis

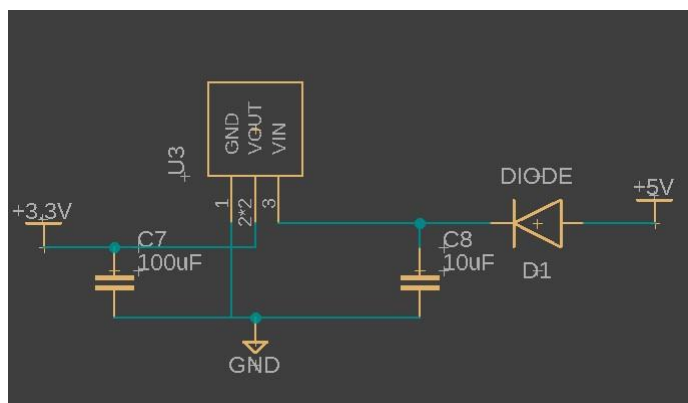


(d) Pagamintos valdymo plokštės apatinė dalis

### 25 pav. Stendo valdymo plokštė

Valdymo plokštės mikrovaldiklis yra  $72\text{ MHz}$  *STM32F103* (žr. 25 pav., b) [36]. Šis valdiklis pasirinktas dėl pakankamo sąsajų kiekio, ypač plataus jo naudojimo visose srityse, tiek profesionaliai tiek mėgėjiškai ir jo virtualios serijinės jungties funkcijos, dėl kurios nereikia papildomos mikroschemos norint prisijungti prie kompiuterio per *USB* jungtį. Taip pat dėl vienos iš mažiausių tokios klasės mikrovaldiklių kainos –  $2\ \$\text{ USD}$ .

Paprastam prisijungimui prie įrenginio naudota *STM32F103* valdiklio funkcija veikti kaip *USB* įrenginys ir *USB-Mini* jungtis. Tačiau, mikrovaldiklio programavimas turi būti atliekamas programatoriaus, nes be jo, neišlieka funkcija spręsti kodo problemas žingsniu režimu. Tam, kad būtų galima naudotis tiek programavimu ir *USB* jungtimi vienu metu, kas yra ypač patogu programuojant ne galutinį produktą, reikia neleisti iš programatoriaus ateinanti  $3.3\text{V}$  įtampa, nepasiekę *USB 5V* linijos per  $3.3\text{V}$  reguliatorių. Tam buvo naudotas apsauginis diodas (žr. 26 pav.). Ši funkcija daugumoje valdiklių nėra naudojama, tad programuojant kyla galimybė sudeginti tiek mikrovaldiklį tiek programatorių, kas yra dažna problema kuriant prototipus.



26 pav. 3.3V įtampos reguliatoriaus schema su apsauginiu diodu

Mėginio judinimui testo metu pasirinkta naudoti 28BYJ-48 - 5V žingsninį variklį (žr. 27 pav., a) ir vienpolių žingsninių variklių valdiklį ULN2003AD (žr. 25 pav., b) [46, 47]. 28BYJ-48 - 5V žingsninis variklis užtikrina pakankamą sukimo momentą atlikti mėginių pakėlimo testus, jis taip pat yra mažos galios, kas svarbu siekiant sumažinti elektromagnetinį triukšmą prie magnetometro. Šio variklio ir jo valdiklio kaina yra 1.9 €. Taip pat žingsninių variklių naudojimas yra plačiai taikomas tikslaus pozicionavimo įrenginiuose, kaip 3D spausdintuvai, nes variklio poliai yra komutuojami tam tikra seka ir nesisuka toliau, tad jo judesiai primena žingsnius [48]. Kadangi stende reikia atlikti absoliutųjį pozicionavimą, buvo įprojektuotas galinės pozicijos mygtukas (žr. 25 pav., a), kurį nuspaudus galima teigti, kad mėginio platforma yra nulinėje pozicijoje, o toliau keliant platformą fiksuotais žingsninio motoro žinginiiais, galima sekti atstumą nuo nulinės pozicijos.

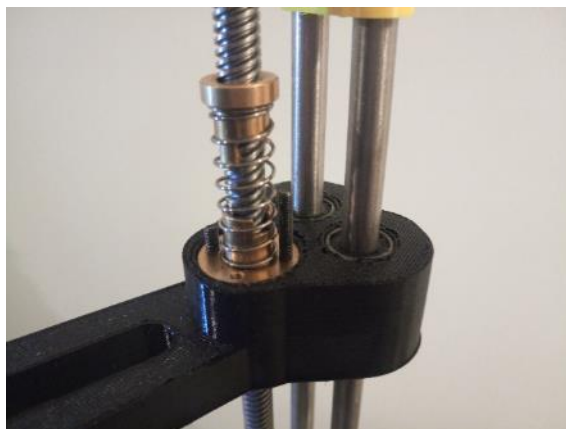
Siekiant užtikrinti, kad stendas būtų lengvai prieinamas, reikia parinkti komponentus, kurie yra plačiai naudojami. Pirmieji magnetometrai, kurie atsiranda daugumoje paieškų, tai *Invensense MPU-9250*, *Honeywell HMC5883L* ir *NXP Mag3110* [49, 50, 33]. Šie komponentai yra plačiai naudojami visame pasaulyje tiek mėgėjų tiek profesionalų ir dažniausiai yra parduodami jau surinktuose moduluose. Tačiau, šių komponentų oficialūs gamintojai jau nebegamina, tad galima teigti, kad rinka yra užpildyta jų likučiais arba trečių šalių kopijomis ir jie yra netinkami naudoti kuriant įrangą kuri gali būti naudojama mokslo ar komerciniais tikslais. Buvo rasta alternatyva šiems komponentams – *NXP FXOS8700CQ* [14]. Šis komponentas yra patobulinta *MAG3110* magnetometro versija, kuri taip pat turi akselerometrą ir daug judesio aptikimo funkcijų. Šis magnetometras gali naudoti *I2C* ir *SPI* komunikaciją su mikrovaldikliu. Dėl mažesnio jungčių kiekio pasirinktas *I2C* protokolas. Šio jutiklio kaina 1000-ui vienetų - 1.58 \$ USD. Jutiklis plokštėje buvo montuojamas kaip įmanoma toliau nuo kitų komponentų, siekiant sumažinti matavimo iškreipimus (žr. 25 pav., a).

### 2.2.2. Mechanika ir jos projektavimas

Projektuojant mechaninę dalį siekta išlaikyti tokį patį veikimo principą kaip ir pirmame stende, t. y. sriegiu pakeliama platforma virš magnetometro. Esminis skirtumas, kad nuo praeito stendo – naudojamas variklis sujungtas su trapeciniu kreipiančiuoju sriegiu ir dvejais strypais su slydimo guoliais (žr. 27 pav.). Trijų strypų sistema užtikrina maksimalų stendo stabilumą. Kadangi naudojamos detalės yra metalinės, padidintas jų atstumas nuo stendo valdymo plokštės, siekiant užtikrinti minimalų matavimų iškreipimą (žr. 29 pav.).



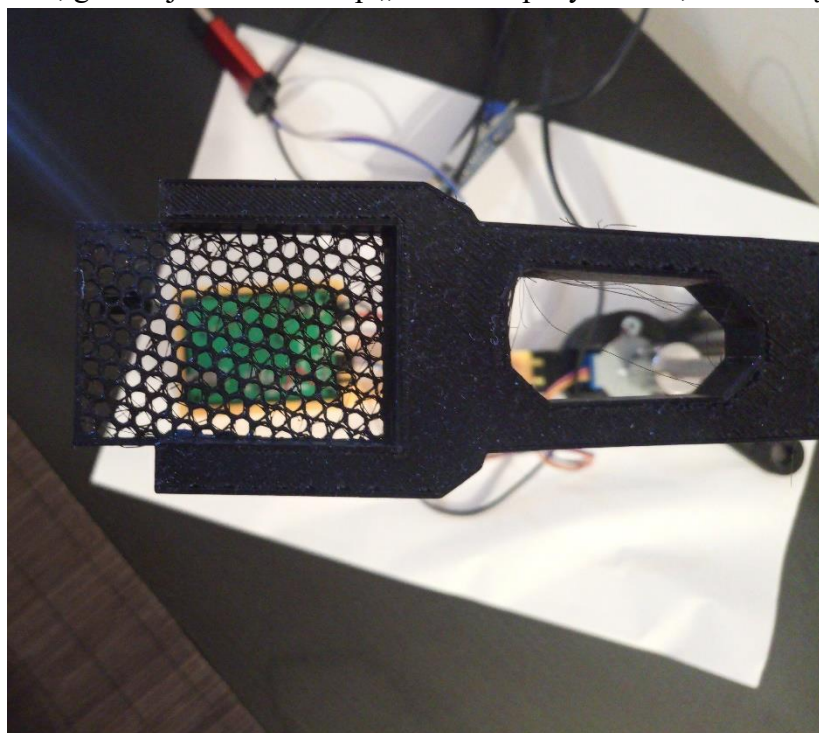
(a) Stendo 28BYJ-48 - 5V žingsninis variklis



(b) Stendo pakeliamos platformos sujungimas

**27 pav.** Galutinio stendo žingsninis variklis ir platformos pakėlimo mechaninė sistema

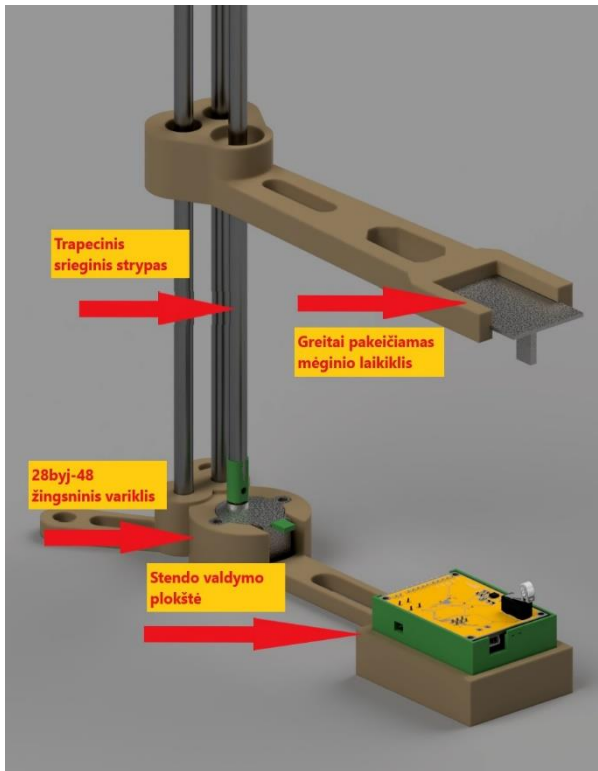
Norint kad eksperimentai ilgai neužtruktų ir būtų galima juos lengvai pakartoti, mėginio laikiklis suprojektuotas - taip, kad jis būtų greitai pakeičiamas. Norint jį pakeisti užtenka jį ištraukti ir įstatyti kitą. Mėginio laikymo plokštelės gali būti nesunkiai suprojektuotos ir greitai pagamintos tam kad laikytų įvairių formų magnetus, tiesiai virš magnetometro (žr. 28 pav.). Atlikus eksperimentus su tokiomis plokštelėmis, galima jas naudoti kaip „auksinius pavyzdžius“, tikrinant įrangą.



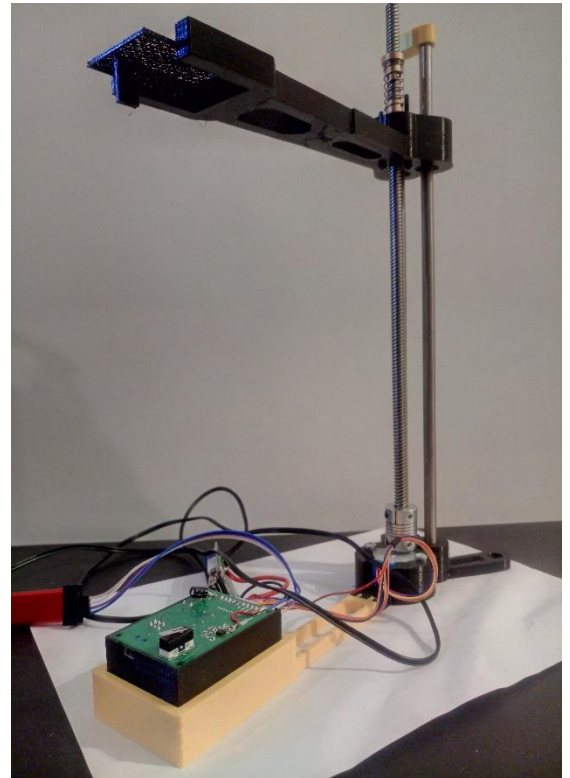
**28 pav.** Mėginio laikiklis virš magnetometro

Valdymo plokštės laikymui buvo suprojektuota dėžutė kuri įsistato į stendą. Taip užtikrinamas greitas remontas ir galimybė naudoti valdymo plokštę kitose srityse (žr. 29 pav.).

Suprojektavus visas laikančiąsias dalis, jos buvo atspausdintos 3D spausdintuvu (žr. 29 pav.). Visas ilgas dalis teko spausdinti iš dviejų dalių, dėl spausdintuvo apribojimų. Dalys suklijuotos greitai stingstančiais klijais. Visa stendo gamyba ir surinkimas truko apie 2 paras. Tik po pagaminimo nustatyta, kad buvo pamiršta suprojektuoti vietą laidams. Taip pat nustatyta, kad galutinės pozicijos mygtuko vieta sukelia nežymų platformos linkimą, kas pablogina stendo tikslumą.



(a) Galutinio stendo modelis



(b) Pagamintas galutinis stendas

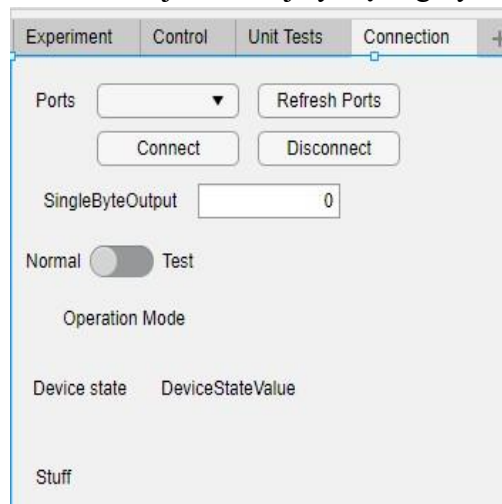
29 pav. Galutinis stendas

## 2.3. Programinė įranga

### 2.3.1. Operatoriaus langas

Operatoriaus langui kurti, buvo naudojama plačiai mokslinėje bendruomenėje paplitusi programa *MATLAB* [18]. Ši programa pasirinkta dėl jos populiarumo ir galybės įrankių, tokių kaip vartotojo sąsajos kūrimas, grafikų atvaizdavimas, komunikacija su išoriniais įrenginiais, parametrų identifikavimo įskiepių ir daugelių kitų.

*Connection* lange (žr. 30 pav.), pasirenkama įrenginio sąsaja ir *Connect* mygtuko paspaudimu, prisijungiama prie jo. *Device state* nurodo kokioje būsenoje yra įrenginys.



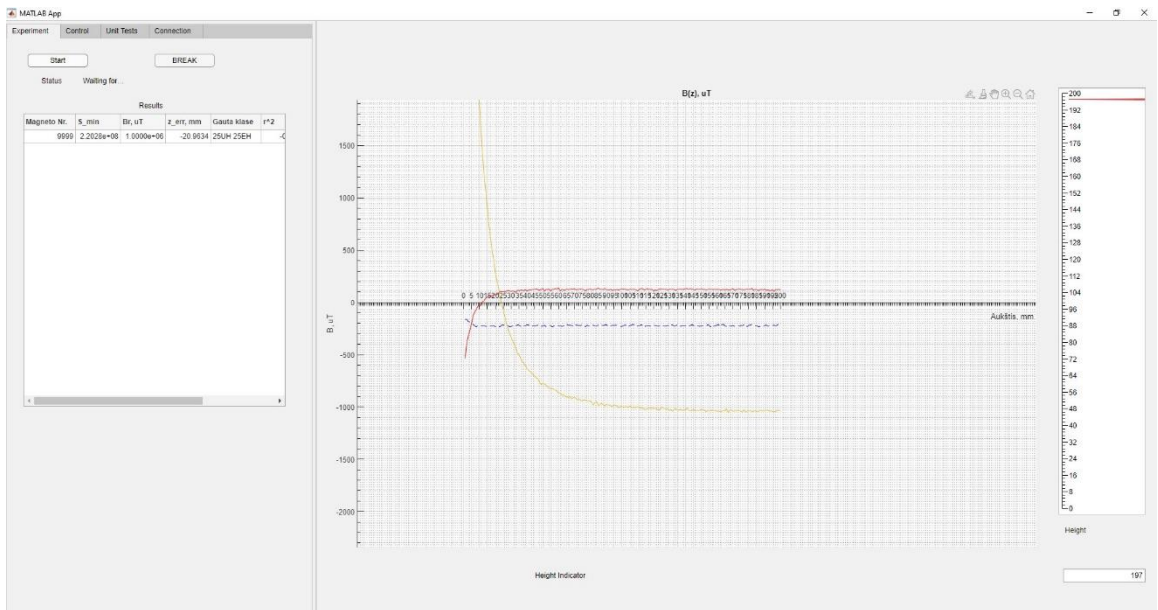
30 pav. Prisijungimo prie stendo langas

Rankinio valdymo lange (žr. 31 pav.), galima rankiniu būdu valdyti stendą. *Home* mygtukas, paleidžia nulinės pozicijos paprogramę, kurios metu stendas leidžiasi tol, kol būna nuspauštas galinis mygtukas (žr. 25 pav., c). Pasiekus šią poziciją, dešiniau esantis indikatorius, užsidega žaliai. Kas kartą įjungus stendą iš naujo, **būtina** atlikti šią procedūrą, tam, kad tinkamai būtų matuojamas aukštis. Žemiau esantys mygtukai, leidžia rankiniu būdu judinti stendo platformą pasirinktu žingsniu *Step size*. O *Measure* mygtukas, nusiunčia komandą valdymo plokštei, kad ji atsiųstų matavimus į kompiuterį.

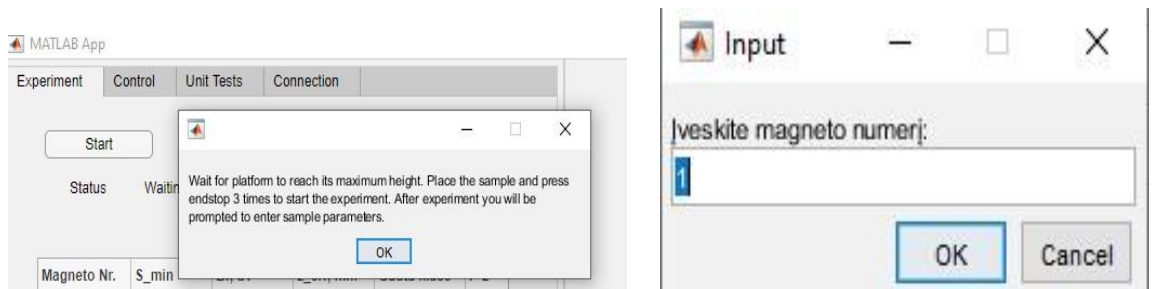


31 pav. Rankinio valdymo langas

Eksperimento lange, valdoma eksperimento eiga, atvaizduojami rezultatai, magnetometro ir aukščio matavimai (žr. 32 pav.). Norint pradėti eksperimentą, reikia spausti *Start* mygtuką. Paspaudus mygtuką, operatorius bus informuotas padėti mėginį ant padėkliuko (žr. 33 pav., a). Toliau eksperimentas vykdomas automatiškai. Eksperimentui pasibaigus, operatorius bus informuotas suvesti magneto parametrus (žr. 33 pav., b-d), magneto numeris parenkamas remiantis 6 ir 5 lentelėmis. Įvedus parametrus vykdomas parametrų identifikavimas, kurio rezultatai atvaizduojami grafike ir lentelėje *Results* (žr. 34 pav.). Tuomet operatoriaus užklausiama ar nori išsaugoti rezultatus į failą. Operatoriaus lango algoritmo schemą pavaizduota 3 priede.



32 pav. Eksperimento programos langas

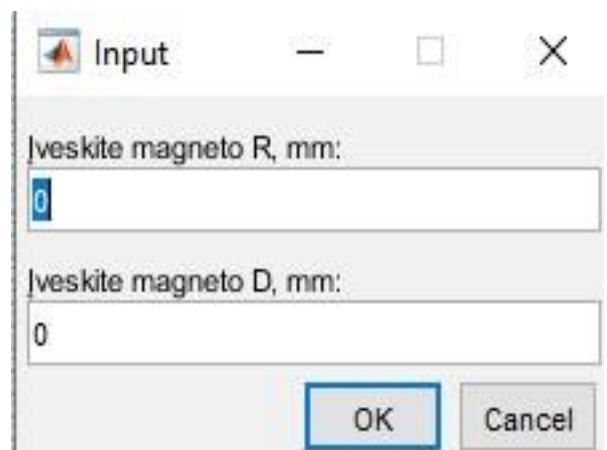


(a) Eksperimento pradžios išspėjimo langas

(b) Magneto numerio įvedimo langas



(c) Magneto tipo langas pasirinkimo langas

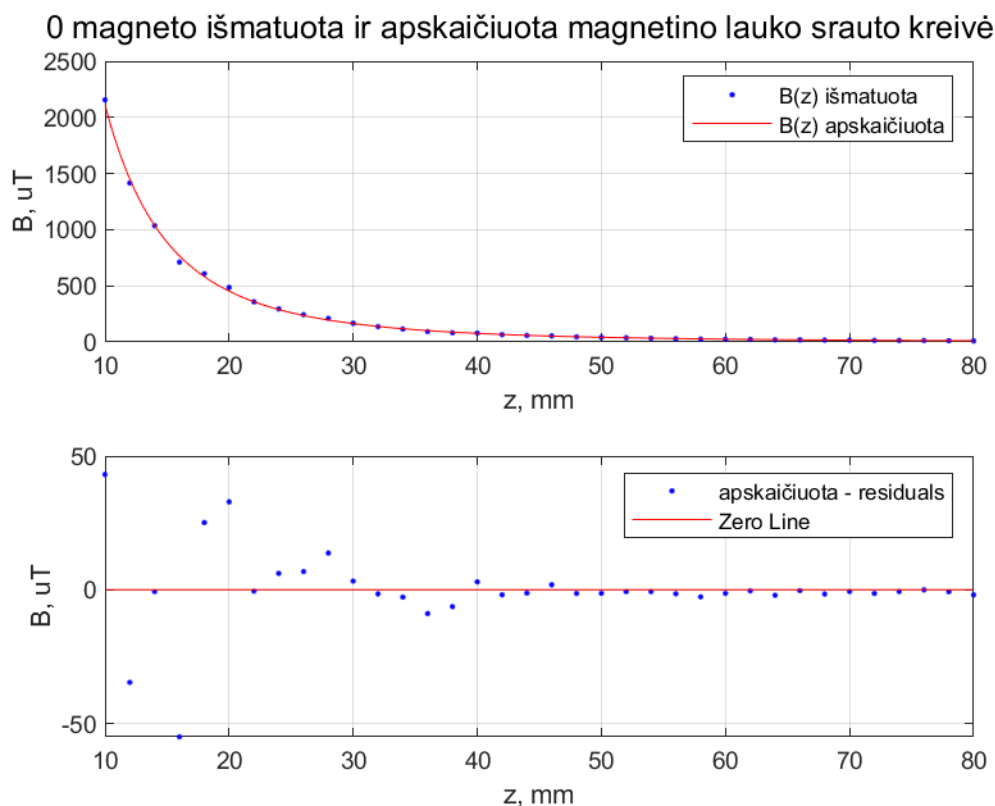


(d) Magneto matmenų įvedimo langas

33 pav. Eksperimento duomenų įvedimas

### 2.3.2. Parametrų identifikavimo patikrinimas

Siekiant užtikrinti, kad parametrų identifikavimas veikia tinkamai, buvo panaudoti 1.6 skyriuje gauti duomenys ir magneto parametrai (žr. 34 pav.). Atitikus parametrams  $B_r$  ir  $z_{err}$  nuspręsta, kad identifikavimas tinkamas ir gali būti naudojamas toliau.



34 pav. Parametrų identifikavimo tikrinimo grafikas

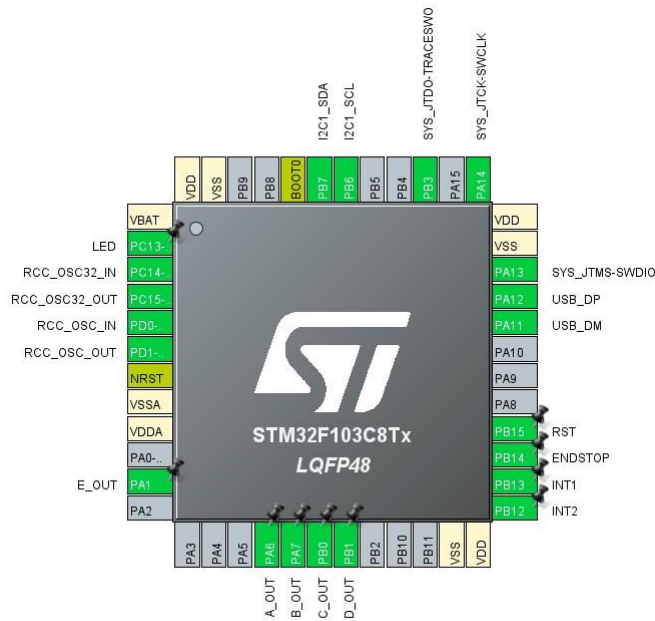
8 lentelė. Galutinio stendo parametrų identifikavimo patikrinimo rezultatai

Magneto Nr.	$S_{min}$	$B_r, \mu T$	$z_{err}, mm$	Gauta klasė	$R^2$	RMSE
0	1033	1424943	-3.81	N50 N52 50M	0.99985	5.5122

### 2.3.3. Valdymo plokštės programinė įranga

Valdymo plokštei programuoti, buvo naudojama *STM Cube IDE* programa, skirta programuoti *ST* kompanijos mikrovaldiklius [51]. Ši programinė įranga pasirinkta dėl labai paprasto valdiklio konfigūravimo ir funkcionalios kodo redagavimo platformos (žr. 35 pav.).





35 pav. Valdiklio konfigūravimo langas *STM Cube IDE* programoje

Valdiklio programinė įrangos algoritmas susidaro iš trijų pagrindinių būsenų – pradinės padėties ieškojimo, laukimo ir eksperimento būsenų. Žemiau pateikta kodo iškarpa su veiksmų paaiškinimais.

```
//Pradinės padėties ieškojimas case HomingS: { if (!homed) { if
(!endstop_state) // Tol kol nesuspaustas galines padeties
mygtukas, nuleidžiama platforma.
    stepper_step_angle(5, STEPPER_DIR_DOWN, 11);
    else { homed = 1; // Nuspaudus galines padeties mygtuka, sustabdomas
    motoras, nustatomas aukstis i 0 stepper_stop(); packGeneric(Home,
    indexToRespond, HomingS, homed, 0, 0, 0); // Pranesame klientui, kad
    pradine padetis rasta height = 0;
    }
} else {
    MagGradeState = IdleNormals; // Pereiname i laukimo busena, po pradinės
    padeties radimo.
}
} break; //Laukimo busena case IdleNormals: { if (homed
&& (height < MAX_HEIGHT)) { //Pakeliama platforma i
auksciausia padeti stepper_step_angle(stepperConstant,
STEPPER_DIR_UP, 11); height += 1;
    packFull(Status, indexToRespond, mag_raw.x,
    mag_raw.y, mag_raw.z, height,
    temperature, 0, 0, 0, 0, endstop_state);
    // Kol platforma keliama, siunciame
    matavimus
} else {
    stepper_stop();
    MagGradeState = counterr >= 3 && !endstop_state ? AutoS :
    IdleNormals; //Pasiekus auksciausia padeti, laukiame
    //kada bus paspaustas galines padeties mygtukas tris kartus. Tuomet
    pereiname i eksperimento rezima}
}
bre
ak;
//Eksperimento rezimas case AutoS: { if (ticksPassedCOM >= COMPeriod) { if
(!endstop_state && abs(mag_raw.z) < 1200) { // Nuleidžiama platforma tol
nenuspaustas galines padeties mygtukas,
    // arba napsiekikiama ūmatavim riba
    HAL_GPIO_TogglePin(LED_GPIO_Port, LED_Pin);
```

```

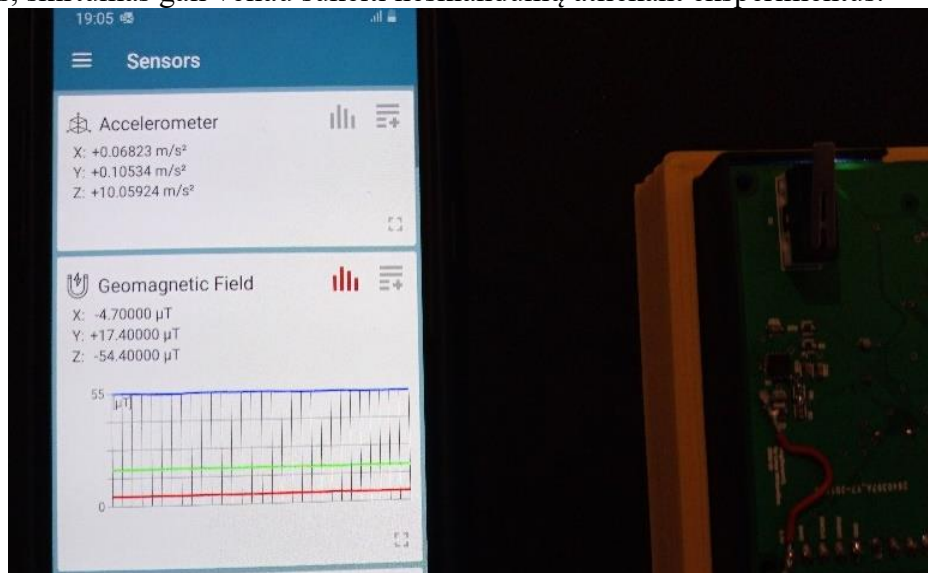
packFull(Status, indexToRespond, mag_raw.x,
        mag_raw.y, mag_raw.z, height, temperature,
        0, 0, 0, 0, endstop_state); // Po
        kiekvieno zingsnio, nusiunčiamas matavimas

// Start moving down
stepper_step_angle(stepperConstant,
STEPPER_DIR_DOWN, 11); height -= 1; //
Sumazinamas aukštis ticksPassedCOM =
0;
} else {
// Eksperimentas baigtas, grįžtama į
laukimo būseną MagGradeState =
IdleNormalS; packGeneric(Auto,
indexToRespond, IdleNormalS, homed, 0, 0,
0); // Pranesama klientui apie baigimą. }
}
}
bre
ak;

```

Programuojant valdiklį, buvo patikrinti jutiklio matavimų rodmenys, remiantis 1.3 skyriuje aprašytu, telefonų kalibravimo procedūra. Šalia stendo padėjus telefoną, palyginti akcelerometro ir magnetometro rodmenys (žr. 36, 37 pav.). 37 pav. *aoffset* – akcelerometro matavimai, *moffset* – magnetometro.

Telefono ir stendo akcelerometro ir magnetometro *X,Y* ašių matavimai sutapo, o magnetometro *Z* ašies skyrėsi dvigubai (2% pilno matavimo režio). Remiantis akcelerometro ir magnetometro *X,Y* ašių matavimais ir magnetometro *Z* ašies matavimo ženklu, galima spręsti, kad jutiklis matuoja tinkamai. Tačiau *Z* ašies, skirtumas gali vėliau sukelti nesklandumų atliekant eksperimentus.



36 pav. Telefono jutiklių rodmenys esant šalia stendo

▼ ⓘ aoffset	SRAWDATA	{...}
X= x	int16_t	26
X= y	int16_t	-53
X= z	int16_t	1029
▼ ⓘ moffset	SRAWDATA	{...}
X= x	int16_t	-9
X= y	int16_t	-20
X= z	int16_t	-103

**37 pav.** Stendo akselerometro ir magnetometro rodmenys

Patikrinus jutiklio matavimu atitikimą, įdiegta funkcija, kuri kas kart įsijungiant valdikliui, atlieka 1.3 skyriuje aprašytą, „kietosios geležies“ kompensavimą. Atlikus visus programavimo darbus, pradėti vykdyti eksperimentai.

## Rezultatai ir išvados

### Rezultatai

Atlikus eksperimentus gauta rezultatų lentelė (žr. 9 lent.). Lentelėje pateikti magnetų numeriai iš 5 ir 6 lentelių, apskaičiuota minimali paklaida  $S_{min}$ , likutinis magnetinio srauto tankis  $B_r$ , magneto klasė parinkta iš 5 paveikslėlio, atstumo paklaida  $Z_{err}$ , determinacijos koeficientas  $R^2$  ir kvadratinė vidutinė paklaida  $RMSE$  tarp išmatuoto magnetinio srauto tankio ir apskaičiuotojo. Stulpelyje „Grafikas“ yra nuorodą į to magneto apskaičiuotos ir išmatuotos  $B(z)$  kreives, kurias galima rasti 2 priede.

**9 lentelė.** Galutinio stendo eksperimentų rezultatai

Magneto Nr.	$S_{min}$	$B_r, \mu T$	$Z_{err}, mm$	Gauta klasė	$R^2$	RMSE	Grafikai
1	9.14	110729	1.75		0.99776	0.61718	(38 pav.)
2	85.65	122432	2.21		0.99995	0.9209	(39 pav.)
3	194.78	215876	-0.57		0.99997	1.1358	(40 pav.)
4	8.52	174508	-0.31		0.99881	0.5423	(41 pav.)
5	105.17	136656	0.19		0.99994	0.9823	(42 pav.)
6	368.87	974720	-2.58		0.99988	1.8068	(43 pav.)
7	119.5	997792	-1.37	25UH 25EH	0.99998	0.82899	(44 pav.)
8	59.79	448655	-0.94		0.99971	0.95186	(45 pav.)
9	251.89	602222	-1.71		0.99992	1.4997	(46 pav.)
10	65.37	1064438	-1.90	28UH 28EH 28AH	0.99982	0.9399	(47 pav.)

### Išvados

- Darbo metu sukurtas magneto klasės identifikavimo stendas, darbo eigos aprašas, atlikti įrangos ir teorinio modelio įvertinimo eksperimentai. Įranga gali identifikuoti magneto likutinį magnetinio srauto tankį  $0.999574 R^2$  tikslumu, pagal išmatuotus duomenis, įskaitant ir rankiniu būdu atliktus eksperimentus. Tačiau dėl netinkamai veikiančio magnetometro, nebuvo galima identifikuoti magneto klasės. Pagal 2.3.2 skyriuje gautus rezultatus, galima teigti, kad sutvarkius magnetometrą, stendas turėtų tinkamai identifikuoti magneto klasę.
- Sukurta programinė įranga stendui valdyti ir eksperimentams atlikti. Tiek įranga tiek programa reikalauja minimalaus operatoriaus įsikišimo, kas sumažina operatorių daromas klaidas. Operatoriaus laikas atlikti eksperimentui  $51 s$ , bendras laikas eksperimentui –  $3 min$ .

## Literatūros sąrašas

1. Physical Magnet Data - Supermagnete.De. URL:<https://www.supermagnete.de/eng/physical-magnet-data>(tikrinta 2021-04-28).
2. What Does Magnetic Remanence Mean? - Supermagnete.De. URL:<https://www.supermagnete.de/eng/faq/What-does-remanence-mean>(tikrinta 2021-04-28).
3. Motorisation Rates in the EU, by Country and Vehicle Type | ACEA - European Automobile Manufacturers' Association. URL:<https://www.acea.be/statistics/tag/category/vehicles-per-capita-by-country>(tikrinta 2021-04-03).
4. Global EV Outlook 2020 – Analysis. IEA. URL:<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>(tikrinta 2021-04-03).
5. Control Unit for Electric Motorcycle (Power Drive Unit) | Motorcycle Products. SHINDEN-GEN ELECTRIC MFG.CO.,LTD.URL:[products/electro/motorcycle/ev/](http://products/electro/motorcycle/ev/)(tikrinta 2021-04-03).
6. FPFIS team. Overview of the Maker Movement in the European Union. EU Science Hub -European Commission. 2017-10-24. URL:<https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/overview-maker-movement-european-union>(tikrinta 2021-04-03).
7. Parliament Wants to Grant EU Consumers a “Right to Repair” | News | European Parliament. 2020-11-25. URL:<https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20201120IPR92118/parliament-wants-to-grant-eu-consumers-a-right-to-repair>(tikrinta 2021-04-03).
8. Y.B. Adyapaka Apatya, Aries Subiantoro ir Feri Yusivar. „Design and Prototyping of 3-Phase BLDC Motor“. 2017 15th International Conference on Quality in Research (QiR) : International Symposium on Electrical and Computer Engineering. 2017 15th International Conference on Quality in Research (QiR): International Symposium on Electrical and Computer Engineering. Nusa Dua: IEEE, 2017-07, p.p. 209–214. ISBN: 978-1-5090-6397-0. DOI:10.1109/QIR.2017.8168483. URL:<http://ieeexplore.ieee.org/document/8168483/>(tikrinta 2021-04-03).
9. J M Camacho ir V Sosa. „Alternative Method to Calculate the Magnetic Field of Permanent Magnets with Azimuthal Symmetry“. Rev. Mex. Fis. E(2013), p. 10.
10. Calculate Magnetic Flux Density (Formula) - Supermagnete.De. URL:<https://www.supermagnete.de/eng/faq/How-do-you-calculate-the-magnetic-flux-density>(tikrinta 2021-04-28).
11. Aurimas Gajauskas. „MATLAB/SIMULINK PROGRAMŲ TIPINIŲ OPTIMIZAVIMO METODŲ TYRIMUI SUKŪRIMAS“. (2015), p. 71.
12. Ekonometrika. URL:<http://www.ilab.lt/stabingiene/sk3.html>(tikrinta 2021-04-28).
13. Renaldas Urniezius ir kt. „From Physics to Bioengineering: Microbial Cultivation Process Design and Feeding Rate Control Based on Relative Entropy Using Nuisance Time“. Entropy 20.10(102018-10), p.779. DOI:10.3390/e20100779. URL:<https://www.mdpi.com/1099-4300/20/10/779>(tikrinta 2021-04-30).
14. FXOS8700CQ, 6-Axis Sensor with Integrated Linear Accelerometer and Magnetometer. 2016. URL:<https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/FXOS8700CQ.pdf>(tikrinta 2020-12-30).
15. MEMS Industry Group. Hard and Soft Iron Magnetic Compensation Explained. MEMS-blog. 2011-03-22. URL:<https://community.nxp.com/pwmxy87654/attachments>

- /pwmxy87654/sensors%40tkb/180/1/HardAndSoftIronCompensationExplained.pdf(tikrinta 2020-12-28).
16. Solenoids as Magnetic Field Sources. URL:<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/solenoid.html>(tikrinta 2020-12-30).
  17. World Magnetic Model Calculator. URL:[http://www.geomag.bgs.ac.uk/data\\_service/models\\_compass/wmm\\_calc.html](http://www.geomag.bgs.ac.uk/data_service/models_compass/wmm_calc.html)(tikrinta 2021-04-10).
  18. MATLAB - MathWorks. URL:<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>(tikrinta 2021-04-18).
  19. Sensors Toolbox - Apps on Google Play. URL:<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.exatools.sensors&hl=en&gl=LT>(tikrinta 2021-04-11).
  20. Neodimo Magnetas, Apvalus, N35 D3x1. URL:[http://www.geoshop.lt/index.php?route=product/product&path=57\\_66&product\\_id=375&sort=p.price&order=DESC#.YIVg6ZAzaHs](http://www.geoshop.lt/index.php?route=product/product&path=57_66&product_id=375&sort=p.price&order=DESC#.YIVg6ZAzaHs)(tikrinta 2021-04-25).
  21. Neodimio magnetas apvalus 3x1mm N38 10vnt. Neodimio magnetas apvalus 3x1mm N3810vnt. URL:<https://www.anodas.lt/neodimio-magnetas-apvalus-3x1mm-n38-10vnt>(tikrinta 2021-04-25).
  22. Neodimo Magnetas, Apvalus, D12x1, N42. URL:[http://www.geoshop.lt/index.php?route=product/product&path=57\\_66&product\\_id=440&sort=p.price&order=DESC#.YIVjNZAZaHs](http://www.geoshop.lt/index.php?route=product/product&path=57_66&product_id=440&sort=p.price&order=DESC#.YIVjNZAZaHs)(tikrinta 2021-04-25).
  23. MEDER Magnetas 10x5x1.9mm 115mT | LEMONA. URL:<https://www.lemona.lt/magnetas-10x5x1-9mm-115mt.html>(tikrinta 2021-04-25).
  24. kiti Magnetas 10x10x2mm NdFeB N45. Lemona. URL:<https://www.lemona.lt/magnetas-10x10x2mm-ndfeb-n45.html>(tikrinta 2021-04-25).
  25. Neodimio magnetas kvadratinis 5x5x2mm N35. Neodimio magnetas kvadratinis 5x5x2mmN35. URL:<https://www.anodas.lt/neodimio-magnetas-kvadratinis-5x5x2mm-n35>(tikrinta 2021-04-25).
  26. Neodimo Magnetas N35 10x5x3. URL:[http://www.geoshop.lt/index.php?route=product/product&path=57\\_66&product\\_id=212#.YIVzApAzaHs](http://www.geoshop.lt/index.php?route=product/product&path=57_66&product_id=212#.YIVzApAzaHs)(tikrinta 2021-04-25).
  27. kiti Magnetas 5x4x1.5mm NdFeB N48. Lemona. URL:<https://www.lemona.lt/magnetas-5x4x1-5mm-ndfeb-n48.html>(tikrinta 2021-04-25).
  28. New IMU Brick (IMU 2.0) | Tinkerforge. URL:<https://www.tinkerforge.com/en/blog/new-imu-brick-imu-20/>(tikrinta 2021-04-05).
  29. Bosch Sensortec. „Intelligent 9-Axis Absolute Orientation Sensor“. (2020), p. 118.
  30. Doc | Tinkerforge. URL:[https://www.tinkerforge.com/en/doc/Hardware/Bricks/IMU\\_V2\\_Brick.html#imu-v2-brick](https://www.tinkerforge.com/en/doc/Hardware/Bricks/IMU_V2_Brick.html#imu-v2-brick)(tikrinta 2021-04-05).
  31. Define and Solve a Problem by Using Solver. URL:<https://support.microsoft.com/en-us/office/define-and-solve-a-problem-by-using-solver-5d1a388f-079d-43ac-a7eb-f63e45925040>(tikrinta 2021-05-01).
  32. Fusion 360 | 3D CAD, CAM, CAE & PCB Cloud-Based Software | Autodesk. URL:<https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>(tikrinta 2021-04-24).

33. MAG3110|High Accuracy, 3D Magnetometer | NXP Semiconductors. URL:<https://www.nxp.com/products/no-longer-manufactured/high-accuracy-3d-magnetometer:MAG3110>(tikrinta 2021-04-24).
34. VL53L0X-Time-of-FlightRangingSensor-STMicroelectronics.URL:[https://www.st.com/en/ima-ging-and-photonics-solutions/vl53l0x.html](https://www.st.com/en/imag-ing-and-photonics-solutions/vl53l0x.html)(tikrinta 2021-04-28).
35. Thomas Gravekamp.STM32F103C8T6 - Blue Pill. STM32-base project.URL:<https://stm32-base.org/boards/STM32F103C8T6-Blue-Pill.html>(tikrinta 2021-04-28).
36. STM32F103 - Arm Cortex-M3 Microcontrollers (MCU) 72 MHz - STMicroelectronics. URL:<https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f103.html>(tikrinta 2021-04-24).
37. VL53L0X - Arduino Reference. URL:<https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/vl53l0x/>(tikrinta 2021-04-28).
38. Arduino Nano | Arduino Official Store. URL:<https://store.arduino.cc/arduino-nano>(tikrinta 2021-04-28).
39. ATmega328P - 8-Bit AVR Microcontrollers. URL:<https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega328P>(tikrinta 2021-04-28).
40. Software. URL:<https://www.arduino.cc/en/software>(tikrinta 2021-04-28).
41. Sparkfun/SparkFun\_MAG3110\_Breakout\_Board\_Arduino\_Library. SparkFun Electronics,2020-06-19.URL:[https://github.com/sparkfun/SparkFun\\_MAG3110\\_Breakout\\_Board\\_Arduino\\_Library](https://github.com/sparkfun/SparkFun_MAG3110_Breakout_Board_Arduino_Library)(tikrinta 2021-04-28).
42. The Lost Art of Structure Packing. URL:<http://www.catb.org/esr/structure-packing/>(tikrinta 2021-04-28).
43. Visual Studio IDE, Code Editor, Azure DevOps, & App Center - Visual Studio. URL:<https://visualstudio.microsoft.com/>(tikrinta 2021-04-28).
44. Download .NET (Linux, macOS, and Windows). Microsoft.URL:<https://dotnet.microsoft.com/download>(tikrinta 2021-04-28).
45. TerryGLee.What Is WPF? - Visual Studio. URL:<https://docs.microsoft.com/en-us/visualstudio/designers/getting-started-with-wpf>(tikrinta 2021-04-28).
46. 28BYJ-48 Stepper Motor Pinout Wiring, Specifications, Uses Guide & Datasheet. Components101.URL:<https://components101.com/motors/28byj-48-stepper-motor>(tikrinta 2021-04-24).
47. ULN2003AD | Buy TI Parts | TI.Com. URL:<https://www.ti.com/store/ti/en/p/product/?p=ULN2003AD>(tikrinta 2021-04-24).
48. Stepper Motor: How Does It Work? - Motion Control Products Ltd.Motion Control Products.URL:<https://www.motioncontrolproducts.com/applications/stepper-motor-how-does-it-work/>(tikrinta 2021-04-24).
49. MPU-9250 | TDK. URL:<https://invensense.tdk.com/products/motion-tracking/9-axis/mpu-9250/>(tikrinta 2021-04-24).
50. Adafruit Industries.Triple-Axis Magnetometer (Compass) Board - HMC5883L. URL:<https://www.adafruit.com/product/1746>(tikrinta 2021-04-24).
51. STM32CubeIDE-IntegratedDevelopmentEnvironmentforSTM32-STMicroelectronics.URL:<https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html>(tikrinta 2021-05-01).

# Priedai

## 1 priedas. Rankinio valdymo stendo valdiklio programos kodas

```
#include "Adafruit_VL53L0X.h"
#include <Wire.h>
#include "i2c.h"
#include "i2c_MAG3110.h"
MAG3110 mag3110;
Adafruit_VL53L0X lox = Adafruit_VL53L0X();
#define PROBINGMAG 0x01
#define MAGMISSING 0x02
#define MAGFOOUND 0x03
#define PROBINGLASER 0x04
#define LASERMISSING 0x05
#define LASERFOUND 0x05
#define ERRORCODE 0x06
#define LASEROUTOFRANGE 0x07

#define TEXTCMD 0x01 #define DATACMD 0x02
typedef struct __attribute__((packed))
TextPacket
{ uint8_t StartByte; uint8_t Command;
//Either text or data packet uint8_t
Code; uint8_t EndByte; }; //4
typedef struct __attribute__((packed)) DataPacket
{ uint8_t StartByte; uint8_t Command;
//Either text or data packet uint8_t
mx1; uint8_t mx2; uint8_t mx3; uint8_t
mx4; uint8_t my1; uint8_t my2; uint8_t
my3; uint8_t my4; uint8_t mz1; uint8_t
mz2; uint8_t mz3; uint8_t mz4;

uint16_t distance;
uint16_t temperature;
uint8_t EndByte;
}; //19
TextPacket textPacket;
DataPacket dataPacket;
void setup() {
Serial.begin(115200);
textPacket.StartByte = 0xAB;
dataPacket.StartByte = 0xAB;
textPacket.EndByte = 0xEB;
dataPacket.EndByte = 0xEB;
uint8_t err = 0;

SendTextPacket(TEXTCMD, PROBINGMAG); if
(mag3110.initialize()) SendTextPacket(TEXTCMD,
MAGFOOUND); else {
SendTextPacket(TEXTCMD,
MAGMISSING); err = 1;
}
SendTextPacket(TEXTCMD,
PROBINGLASER); if (!lox.begin()) {
SendTextPacket(TEXTCMD,
LASERMISSING); err = 1;
}
else
SendTextPacket(TEXTCMD,
LASERFOUND); if (err)
while (1) {
SendTextPacket(TEXTCMD, ERRORCODE);
delay(1000);
};
}

void loop() {
float xyz_uT[3];
uint16_t temper=analogRead(A6);
mag3110.getMeasurement(xyz_uT);
VL53L0X_RangingMeasurementData_t measure;
lox.rangingTest(&measure, false); // pass in 'true'
to get debug data printout!
if (measure.RangeStatus != 4) { // phase failures have incorrect data
SendDataPacket(DATACMD, (int32_t)xyz_uT[0], (int32_t)xyz_uT[1], (int32_t)xyz_uT[2],
measure.RangeMilliMeter, temper);

//Serial.println();
//Serial.println(temper);
//Serial.println();
} else {
SendTextPacket(TEXTCMD, LASEROUTOFRANGE);
}

delay(100);
} void SendTextPacket(uint8_t cmd, uint8_t
code) {
textPacket.Command = cmd;
textPacket.Code = code;
```



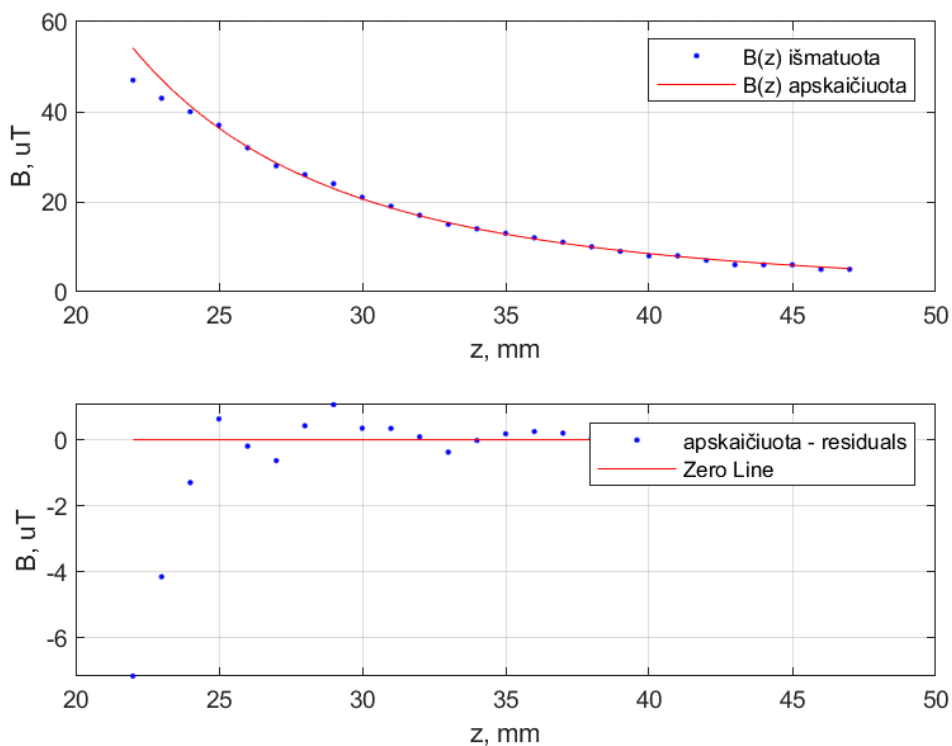
```

    Serial.write((uint8_t*)&textPacket, sizeof(textPacket));
} void SendDataPacket(uint8_t cmd, int32_t mx, int32_t my, int32_t mz, uint16_t distance, uint16_t
temperature) {
    dataPacket.Command = cmd;
    dataPacket.mx1 = (uint8_t)mx;
    dataPacket.mx2 = (uint8_t)(mx>>8);
    dataPacket.mx3 =
    (uint8_t)(mx>>16); dataPacket.mx4
    = (uint8_t)(mx>>24);
    dataPacket.my1 = (uint8_t)my;
    dataPacket.my2 = (uint8_t)(my>>8);
    dataPacket.my3 =
    (uint8_t)(my>>16); dataPacket.my4
    = (uint8_t)(my>>24);
    dataPacket.mz1 = (uint8_t)mz;
    dataPacket.mz2 = (uint8_t)(mz>>8);
    dataPacket.mz3 =
    (uint8_t)(mz>>16); dataPacket.mz4
    = (uint8_t)(mz>>24);
    dataPacket.distance = distance;
    dataPacket.temperature =
    temperature;
    Serial.write((uint8_t*)&dataPacket, sizeof(dataPacket));
}

```

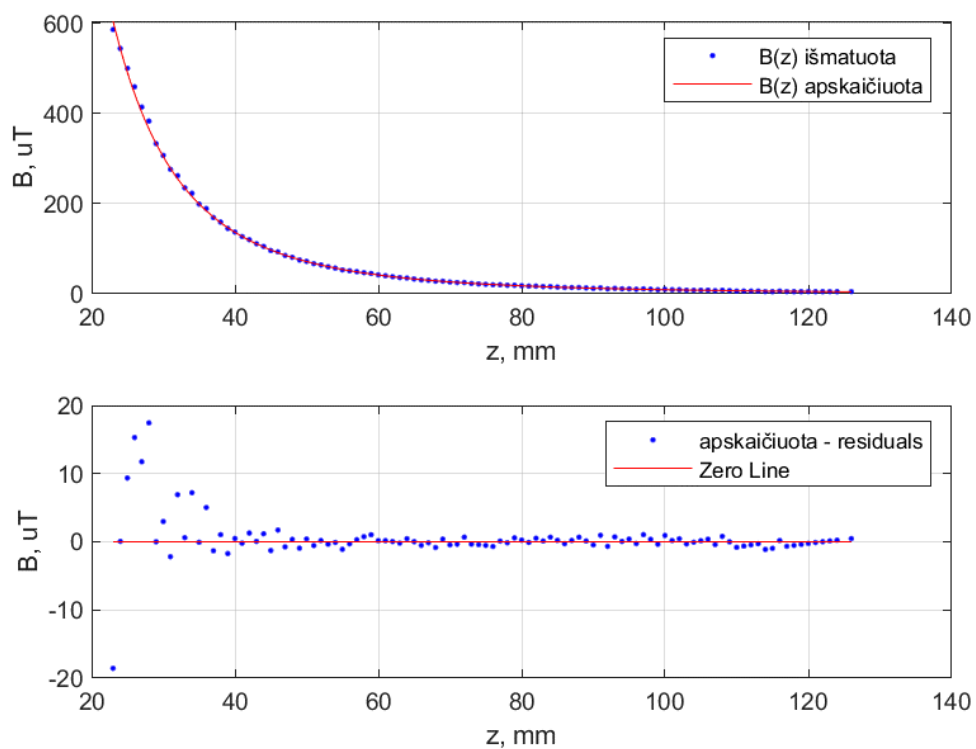
## 2 priedas. Galutinio stendo eksperimentų grafikai

1 magneto išmatuota ir apskaičiuota magnetino lauko srauto kreivė



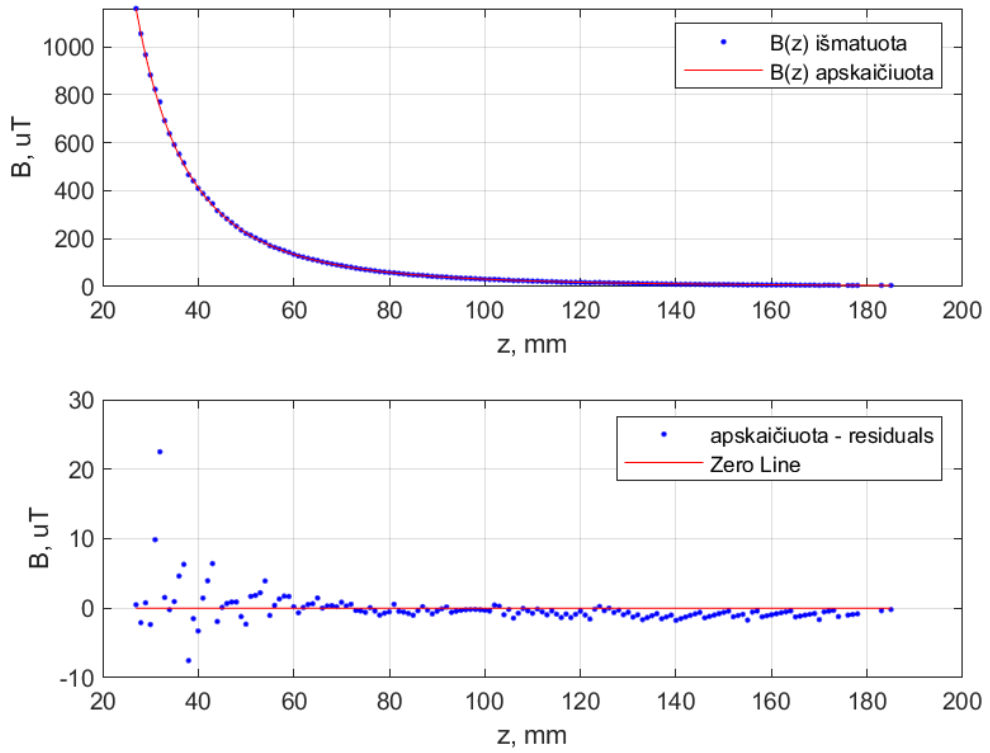
38 pav. 1-ojo magneto eksperimento rezultatai

2 magneto išmatuota ir apskaičiuota magnetino lauko srauto kreivė



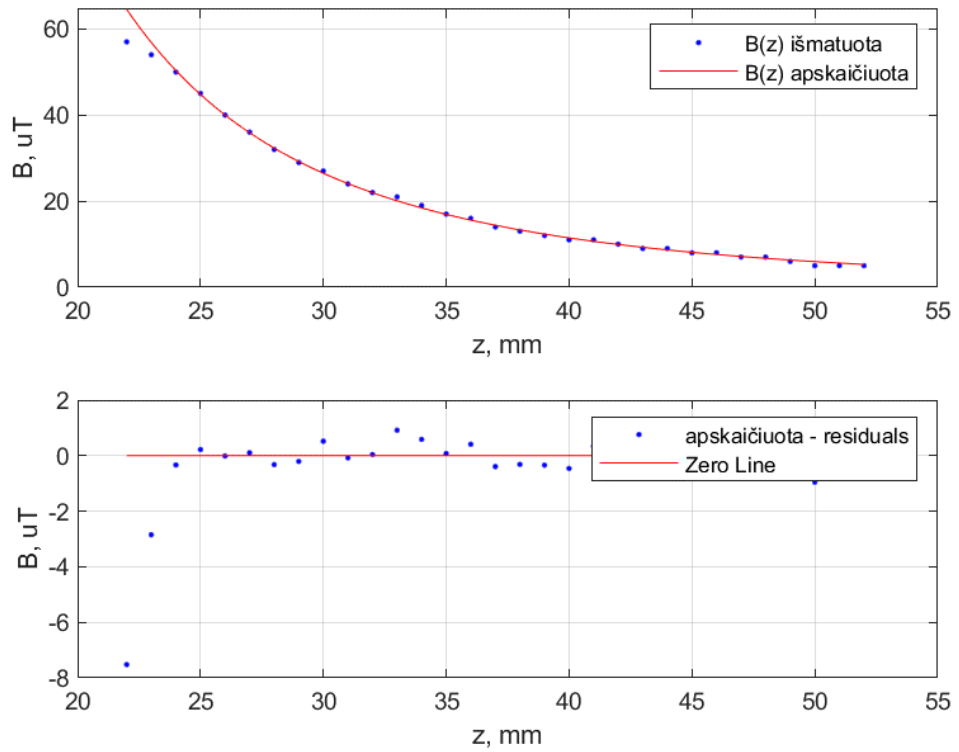
39 pav. 2-ojo magneto eksperimento rezultatai

### 3 magneto išmatuota ir apskaičiuota magnetino lauko srauto kreivė



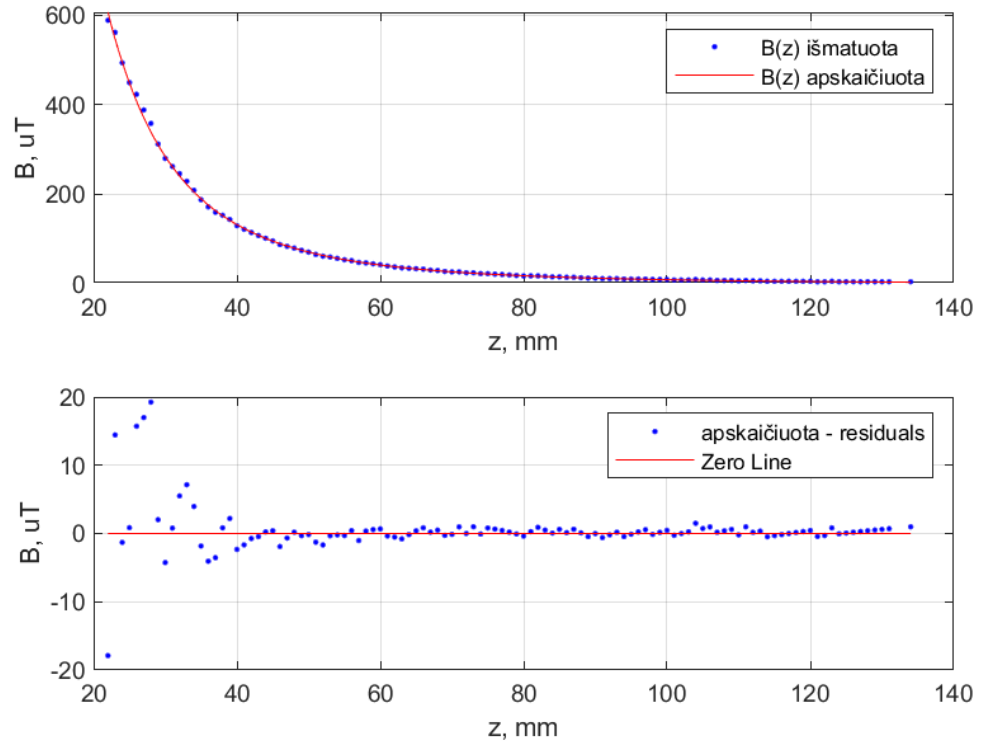
40 pav. 3-ojo magneto eksperimento rezultatai

### 4 magneto išmatuota ir apskaičiuota magnetino lauko srauto kreivė



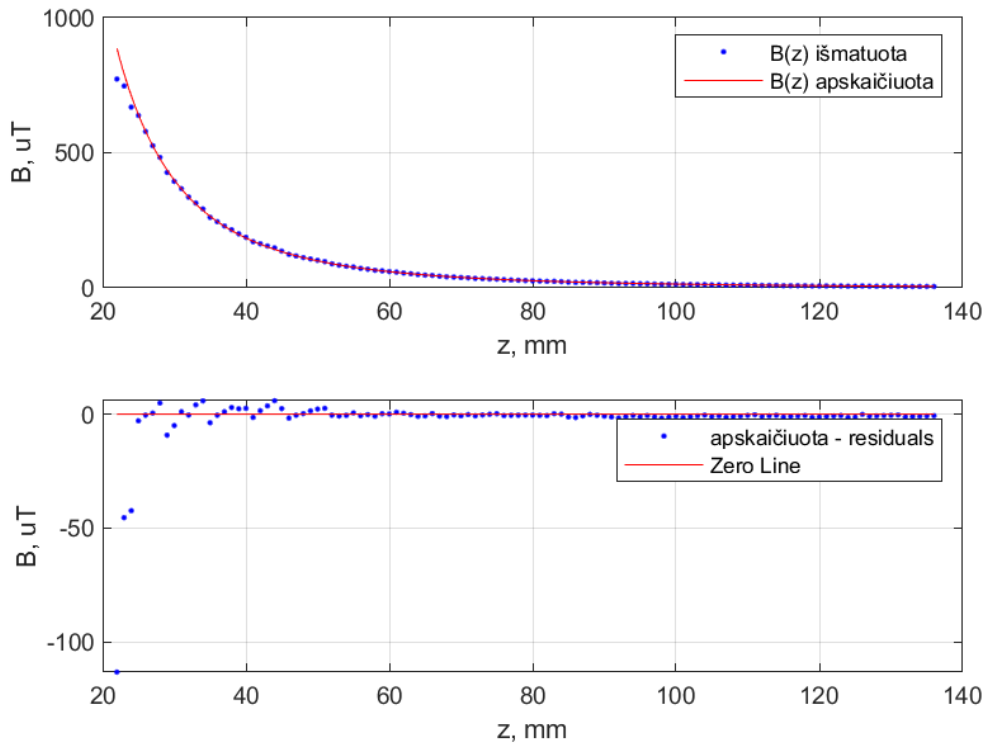
41 pav. 4-ojo magneto eksperimento rezultatai

5 magneto išmatuota ir apskaičiuota magnetino lauko srauto kreivė



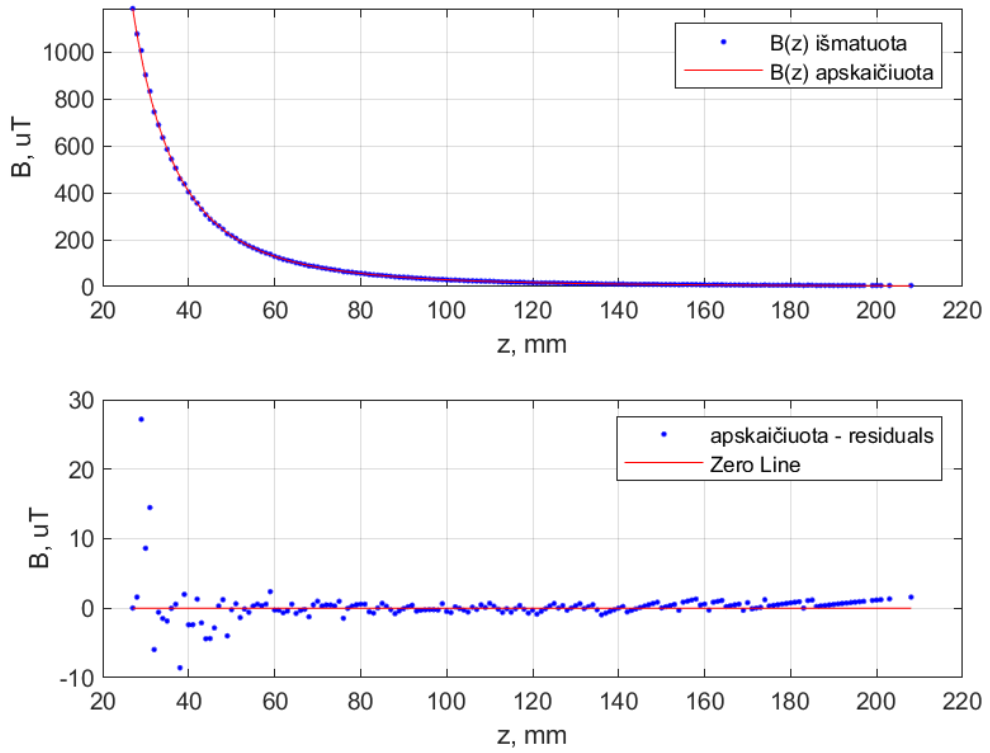
42 pav. 5-ojo magneto eksperimento rezultatai

6 magneto išmatuota ir apskaičiuota magnetino lauko srauto kreivė



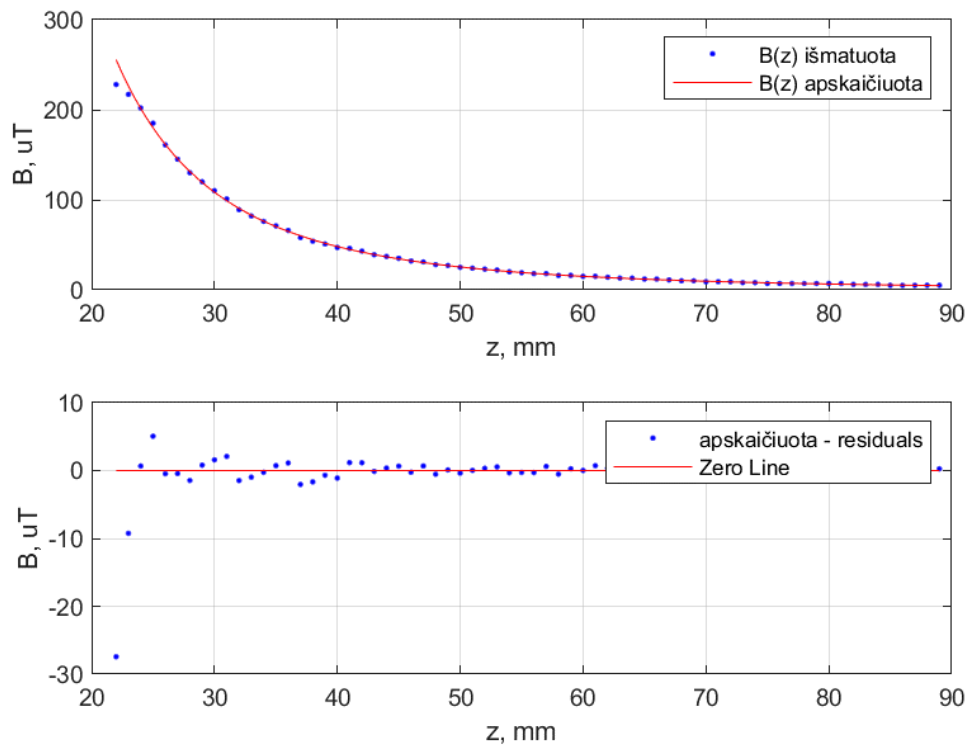
43 pav. 6-ojo magneto eksperimento rezultatai

### 7 magneto išmatuota ir apskaičiuota magnetino lauko srauto kreivė



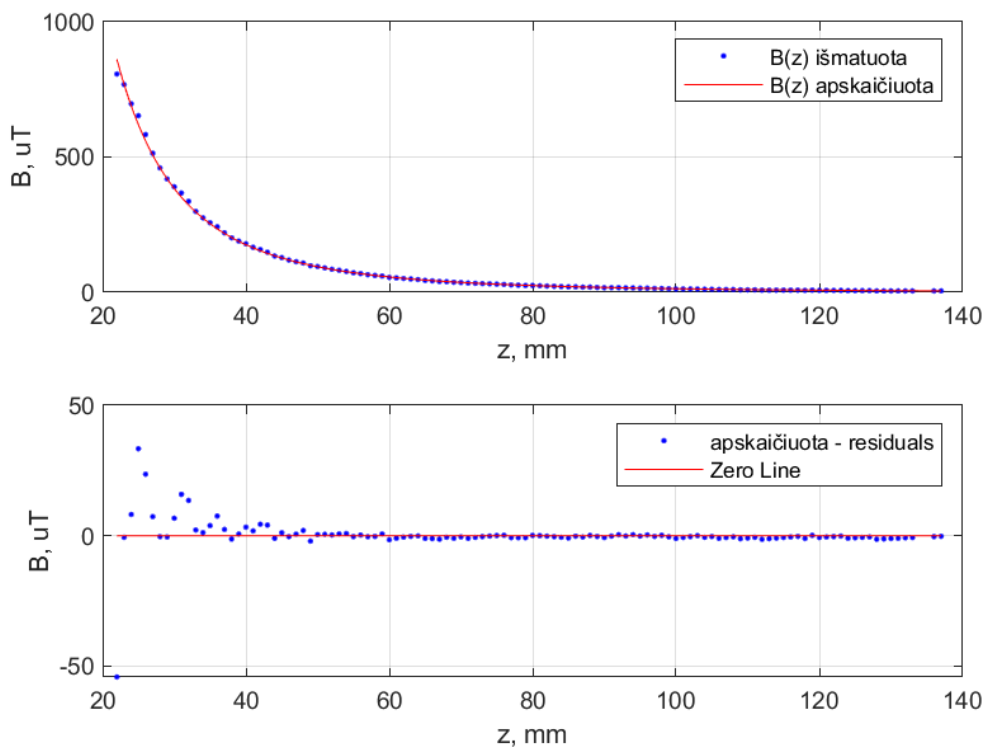
44 pav. 7-ojo magneto eksperimento rezultatai

### 8 magneto išmatuota ir apskaičiuota magnetino lauko srauto kreivė



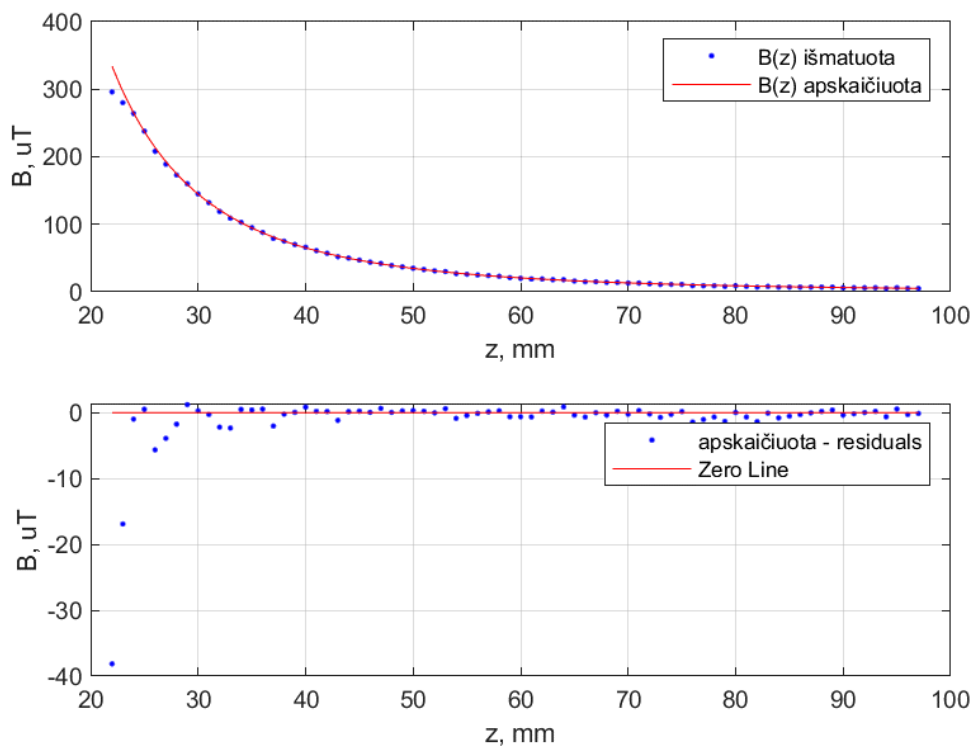
45 pav. 8-ojo magneto eksperimento rezultatai

### 9 magneto išmatuota ir apskaičiuota magnetino lauko srauto kreivė



46 pav. 9-ojo magneto eksperimento rezultatai

### 10 magneto išmatuota ir apskaičiuota magnetino lauko srauto kreivė



47 pav. 10-ojo magneto eksperimento rezultatai

### 3 priedas. Operatoriaus lango algoritmo schema

