



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Propelerio traukos krypties valdymo keičiant kampinį pagreitį tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Matas Zakarevičius
Projekto autorius

Doc. Martynas Lendraitis
Vadovas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Propelerio traukos krypties valdymo keičiant kampinį pagreitį tyrimas

Baigiamasis magistro projektas
Aeronautikos inžinerija (6211EX024)

Matas Zakarevičius

Projekto autorius

Doc. Martynas Lendraitis

Vadovas

Prof. Sigitas Kilikevičius

Recenzentas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Matas Zakarevičius

Propelerio traukos krypties valdymo keičiant kampinį pagreitį 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.

Matas Zakarevičius

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kaunas technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Magistro baigiamojo projekto užduotis

Išduota studentui (-ei) – Matas Zakarevičius

1. Projekto tema

Propelerio traukos krypties valdymo keičiant kampinį pagreitį tyrimas

(Lietuvių kalba)

Research of Propeller Thrust Direction Control by Changing Angular Acceleration

(Anglų kalba)

2. Projekto tikslas ir uždaviniai

Tikslas: ištirti traukos vektoriaus krypties keitimo galimybes ir valdymo algoritmus, naudojant kampiniu pagreičiu valdomą propelerio žingsnio keitimo mechanizmą.

Uždaviniai:

1. išanalizuoti esamus traukos valdymo metodus naudojant vieno veleno sistemą.
2. suprojektuoti ir pagaminti propelerio mechanizmą, leidžiantį keisti propelerio žingsnį keičiant sukimosi pagreitį.
3. suprojektuoti ir pagaminti matavimo stendą, kuris geba matuoti generuojamą trauką ir jos kryptį.
4. sukurti ir pritaikyti traukos krypties valdymo algoritmus.
5. ištirti propelerio valdymą ir valdymo efektyvumą stende.

3. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos

Suprojektuotas ir pagamintas matavimo stendas, turi fiksuoti traukos dydį ir kryptį. Suprojektuotas ir pagamintas propeleris su lanksčiais mentės tvirtinimo mazgais, kurie geba keisti individualų žingsnį greitinant arba lėtinant propelerio sūkius. Sukuriamas bešepetėlinio variklio valdymo algoritmas, kuris leidžia greitinti ir lėtinti variklio sūkius pasirinktu dažniu, užtikrinant galimybę keisti traukos kryptį. Turi būti atlikti valdymo algoritmo ir traukos valdymo tyrimai.

4. Papildomi reikalavimai projektui, ataskaitai ir jos priedams

Netaikoma

Projekto autorius

Matas Zakarevičius
(Vardas, Pavardė)

2026-02-15
(Data)

Projekto vadovas

Martynas Lendraitis
(Vardas, Pavardė)

2026-02-15
(Data)

Krypties studijų
programų vadovas

Artūras Keršys
(Vardas, Pavardė)

2026-02-15
(Data)

Zakarevičius, Matas. Propelerio traukos krypties valdymo keičiant kampinį pagreitį tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. Martynas Lendraitis; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypties grupė): Aeronautikos inžinerija (E14), Inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: vieno rotoriaus variklis, propelerio valdymas, propeleris su lanksčiais tvirtinimo mazgais, kampinis pagreitis, trauka, momentas

Kaunas, 2026. 63 p.

Santrauka

Šiame darbe nagrinėjama galimybė valdyti propelerio traukos kryptį naudojant lanksčiai įtvirtintas mentes ir tikslų propelerio sukimosi valdymą. Siūlomas metodas leidžia užtikrinti traukos krypties valdymą be tiesioginio mechaninio valdymo.

Darbe suprojektuotas propelerio mechanizmas su lanksčiais mentės tvirtinimo mazgais, leidžiantis keisti mentės žingsnį priklausomai nuo kampinio pagreičio krypties. Pasirinktas 10x6 *Direct Drive* propeleris, kuris naudojamas mentėms ir suprojektuotas propelerio mechanizmas, kurio bendras skersmuo sumontuotu propeleriu yra 336 mm. Atlikti stiprumo skaičiavimai, kai mechanizmas su propeleriu yra sukamas 2000 aps. per min. dažniu. Taip pat apskaičiuoti mechanizmo komponentų atsargos koeficientai.

Siekiant įvertinti propelerio charakteristikas, buvo pagamintas eksperimentinis stendas, leidžiantis matuoti trauką ir jos kryptį. Tiksliam propelerio sukimosi valdymui naudotas *Raptor Pro 30A* elektroninis greičio reguliatorius su *DShot300* protokolu. Siekiant tiksliai nustatyti propelerio poziciją valdymo metu, pasirinktas *AS5600* magnetinis kampo jutiklis. Surinkti duomenis, naudota *National Instruments Ni-9238* ir *cDaq-9173* įrangos. Besisukant mechanizmui veikiančios apkrovos yra perduomamos į vidurinę stendo dalį, todėl atliktos poslinkio ir dažninės analizės. Vidurinei stendo daliai pritvirtintai prie jutiklių analizės metu nustatyti nedideli poslinkiai – 0,21 mm, o propelerio sukimosi dažnis gerokai mažesnis už dažnį, kuriam esant susidaro rezonansas – 301 Hz.

Norint valdyti propelerio mechanizmą sukurtas valdymo algoritmas, kuriuo galima keisti signalo vertės reikšmės pagal rotoriaus pasisukimo kampą. Valdymo signalas sudarytas pagal sinusoidinę priklausomybę, įvedant valdymo kampą, kuriuo galima keisti sinusoidės pradžios tašką. Sudarytos algoritmo veikimo ir jos programos schemas, taip pat nubražyta elektros funkcinė schema. Sukurtas alternatyvus valdymo metodas, kuriame maksimalios ir minimalios reikšmės palaikomos ilgesnį laiką, taip sukuriant ilgesnį greitėjimo ir stabdymo intervalą.

Siekiant rezultatus gauti SI sistemos vienetais prieš matavimus atliktas jutiklių kalibravimas. Kad pakeisti traukos kryptį plokštumoje buvo keičiamas valdymo kampas (0° , 90° , 180° ir 270°). Pagal sinusoidės valdymo signalą didžiausia trauka gauta, kai maksimalios amplitudės vertė yra 24 %, o minimalios 18 %, o su ilgesniu stabdymu – 1 N. Įvertintos traukos jėgos ir momentai, kai išlaikomas vienodas sukimosi dažnis, tačiau keičiant skirtumą tarp amplitudžių procentaliai. Trauka esant 25% skirtumui siekė 0,142 N, o momentas – 0,0013 Nm. Kai 100% skirtumui trauka buvo 0,112 N, o momentas 0,0055 Nm. Tai įrodo, kad geresnį valdymą galima pasiekti mažinant trauką ir didinant procentalų skirtumą tarp amplitudžių.

Zakarevičius, Matas. Research of Propeller Thrust Direction Control by Changing Angular Acceleration. Masters's Final Degree Project / supervisor Assoc. Prof. Martynas Lendraitis; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Aeronautical Engineering (E14), Engineering Science.

Keywords: single-rotor engine, propeller control, swashplateless propeller, hinges, angular acceleration, thrust, torque.

Kaunas, 2026. 63 p.

Summary

This project examines the possibility of controlling the direction of propeller thrust using flexibly attached blades and precise control of propeller rotation. The suggested method allows for control of the thrust direction without direct mechanical control.

A propeller mechanism with flexible blades was designed in this study, allowing the blade pitch to be adjusted according to the direction of angular acceleration. A 10x6 Direct Drive propeller was selected for the blades, and a propeller mechanism was designed with a total diameter of 336 mm. Strength analyses were performed when the mechanism is rotated at a frequency of 2000 RPM. Also the factors of safety for the mechanism components were also calculated.

To evaluate the propeller characteristics, an experimental testing stand was built to measure thrust and its direction. A Raptor Pro 30A electronic speed controller with the DShot300 protocol was used for precise control of the propeller rotation. An AS5600 magnetic angle sensor was selected to accurately determine position during performance. National Instruments Ni-9238 and cDaq-9173 equipment was used to collect data. As the mechanism rotates, the operating loads are transmitted to the middle section of the test stand, so displacement and frequency analyses were performed. During the analysis, displacements of 0.21 mm were detected in the central part of the test stand attached to the load cells, and the propeller rotational frequency was significantly lower than the resonance frequency of 301 Hz.

An algorithm was developed to control the propeller mechanism, which allows the signal values to be adjusted according to the rotor angle of rotation. The control signal is generated based on a sinusoidal wave, with the control angle used to adjust the starting point. Diagrams of the algorithm operation and its program have been created, and an electrical functional diagram has been drawn. An alternative control method has been developed in which the maximum and minimum values are maintained for a longer period, thereby creating a longer acceleration and deceleration interval.

To obtain results in SI units, the sensors were calibrated prior to the measurements. To change the direction of thrust in the plane, the control angle was varied (0° , 90° , 180° , and 270°). Based on the sinusoidal control signal, the maximum thrust was obtained when the maximum amplitude value was 24%, and the minimum at 18%, and with a longer deceleration – 1 N. Thrusts and torques were evaluated while maintaining a constant rotational frequency but varying the difference between amplitudes in percentage terms. The thrust at a 25% difference was 0.142 N, and the torque was 0.0013 Nm. At a 100% difference, the thrust was 0.112 N, and the torque was 0.0055 Nm. This demonstrates that better control can be achieved by reducing the thrust and increasing the percentage difference between the amplitudes.

Turinys

Lentelių sąrašas	9
Paveikslų sąrašas	10
Santrumpų ir terminų sąrašas	12
Įvadas.....	13
1. Literatūros apžvalga	14
1.1. Bepiločių orlaivių tipai ir jų valdymo ypatumai.....	14
1.2. Kvadkopterio valdymas.....	14
1.3. Trikopterio valdymas.....	16
1.4. Sraigtasparnio valdymas.....	17
1.5. Vieno rotoriaus sistemų valdymas.....	18
1.5.1. Eksperimentinis stendas skirtas matuoti vieno rotoriaus traukai	21
1.6. Propelerio veikimo principas ir pagrindiniai parametrai.....	22
1.7. Elektroniniai greičio reguliatoriai.....	24
1.7.1. Greičio reguliatoriaus valdymo protokolai.....	24
2. Propelerio mechanizmo projektavimas ir jo komponentų stiprumo vertinimas	27
2.1. Propelerio mechanizmo komponentų projektavimas	27
2.2. Propelerio mechanizmo stiprumo vertinimas	28
2.3. Propelerio mechanizmo surinkimas	30
3. Eksperimentinio stendo projektavimas ir gamyba	31
3.1. Stendo projektavimas	31
3.2. Elektronikos komponentai.....	31
3.3. Suprojektuoti stendo komponentai	36
3.4. Suprojektuotų komponentų analizė	39
3.5. Sumontuotas eksperimentinis stendas	40
4. Krypties valdymo algoritmai.....	41
4.1. Algoritmo veikimas	41
4.2. Valdymo signalo skaičiavimai	43
4.3. Algoritmo veikimo schema	45
4.4. Programos algoritmo schema	46
4.5. Elektronikos komponentų funkcinė schema.....	48
4.6. Valdymo signalas pagal pilną sinusoidę.....	49
4.7. Valdymo signalas pagal sinusoidę su ilgesniu stabdymu.....	50
5. Traukos jėgos vektoriaus krypties ir momento skaičiavimas	52
5.1. Jėgos jutiklių kalibravimas	52
5.2. Traukos padėties nustatymo skaičiavimas.....	53
5.3. Skaičiavimai valdant pagal sinusoidę ir ilginant stabdymo laiką.....	56
5.4. Darbo rezultatų apibendrinimas ir išvalgos.....	58
Išvados	60
Literatūros sąrašas	61
Priedai.....	64
1 priedas. MATLAB jutiklių kalibravimo kodas	64
2 priedas. MATLAB jėgų, momentų ir traukos krypties skaičiavimo kodas.....	65
3 priedas. Dviejų skirtingų siunčiamų signalų duomenys.....	67

4	priedas. Stendo apatinės dalies brėžinys	70
5	priedas. Stendo išorinės dalies brėžinys	71
6	priedas. Stendo vidurinės dalies brėžinys.....	72
7	priedas. Korpuso pakylės brėžinys	73
8	priedas. Dėžutės apatinės dalies brėžinys.....	74
9	priedas. Dėžutės viršutinės dalies brėžinys	75
10	priedas. Vidurinės dalies brėžinys	76
11	priedas. Laikiklio brėžinys	77
12	priedas. Eksperimentinio stendo bendro vaizdo brėžinys	78

Lentelių sąrašas

1 lentelė. <i>Ni-9237</i> ir svorio jutiklių signalų jungimas [33]	33
2 lentelė. Svorio jutiklių kalibravimo konstantos	53
3 lentelė. Traukos krypties vektorių taškai pagal sinusoidės valdymo kampą	55
4 lentelė. Momentų ir jėgų rezultatai palaikant sukimosi dažnį ir keičiant amplitudžių skirtumą .	58

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Kvadkopterio rotoriai ir jų sukimosi kryptys [11]	15
1.2 pav. Kvadkopterio valdymas ir jo rotorių veikimas [12]	15
1.3 pav. Trijų rotoriaus drono vaizdas iš viršaus [15]	16
1.4 pav. Tradicinio straigtsparniio trys pagrindiniai valdymai [18].....	18
1.5 pav. Besisukančio vieno rotoriaus konstrukcija [2]	19
1.6 pav. Besisukančio vieno rotoriaus sukimas pagal tris laisvės laipsnius [2]	19
1.7 pav. Rotoriaus kuriamos jėgos ir sukimo momentai [2]	20
1.8 pav. Propeleris su lanksčiais mentės tvirtinimo mazgais [1]	20
1.9 pav. Mentės pasisukimas propeleriui besisukant [21].....	21
1.10 pav. Sumontuotas bandymų stendas matuoti traukai [22]	21
1.11 pav. Propelerio mechanizmo traukos priklausomybė nuo mazgų tvirtinimo kampo [22]	22
1.12 pav. Besisukantis propeleris su trimis mentėmis [24].....	23
1.13 pav. Vaizdas žiūrint išilgai mentės [24]	23
1.14 pav. Elektroninio greičio regulatoriaus jungimo su varikliu schema [25].....	24
1.15 pav. Darbo ciklo schemas [27]	25
1.16 pav. PWM dažnis [27].....	26
2.1 pav. Suprojektuotas propelerio mechanizmas su lanksčiais mentės tvirtinimo mazgais	27
2.2 pav. Tvirtinimo mazgų pasisukimai keičiantis sukimosi dažniui.....	28
2.3 pav. Suprojektuoto propelerio mechanizmo komponentų jungiamos ašys	28
2.4 pav. Mechanizmo laikiklį veikiančios jėgos ir įtempių pasiskirstymai	29
2.5 pav. Mechanizmo vidurinę dalį veikiančios jėgos ir įtempių pasiskirstymai	29
2.6 pav. Surinktas propelerio mechanizmas su lanksčiais mentės tvirtinimo mazgais.....	30
3.1 pav. Suprojektuotas stendas su besisukančiu propelerio mechanizmu	31
3.2 pav. <i>TAL221</i> 300 g svorio jutiklis	32
3.3 pav. <i>Ni-9237</i> įranga svorio jutiklių duomenų perdavimui [32].....	33
3.4 pav. <i>cDAQ-9173</i> duomenų surinkimo korpusas [34].....	33
3.5 pav. <i>PropDrive V2 2830 800KV</i> [35].....	34
3.6 pav. <i>ESC Single Flycolor Raptor Pro 30A 2-4S</i> [36].....	34
3.7 pav. <i>NodeMcu ESP32</i> mikrovaldiklis su <i>USB-C</i> [38].....	35
3.8 pav. <i>AS5600</i> magnetinis kampo jutiklis [39].....	35
3.9 pav. Magneto šiaurinio poliaus nustatymas	36
3.10 pav. Stendo apatinė dalis.....	36
3.11 pav. Stendo išorinė dalis	37
3.12 pav. Stendo vidurinė dalis	37
3.13 pav. Suprojektuota variklio pakyls konstrukcija su imontuotu kampo jutiklio moduliu	38
3.14 pav. Korpuso konstrukcija variklio padėčiai paaukštinti dėl srauto interferencijos	38
3.15 pav. Vidurinės dalies poslinkių analizė.....	39
3.16 pav. Vidurinės dalies tvirtinimo vietos ir dažninės analizės pirmos modos rezultatai	40
3.17 pav. Sumontuotas eksperimentinis stendas su besisukančiu propeleriui	40
4.1 pav. Propelerio mechanizmo pagreičio valdymo algoritmas su menčiu pasisukimu.....	41
4.2 pav. Propelerio mechanizmo pagreičio valdymo algoritmas su valdymo kampu B	42
4.3 pav. Algoritmo veikimo schema	45
4.4 pav. Pagrindinė programos veikimo schema	46
4.5 pav. Duomenų apdorojimo schema.....	47

4.6 pav. Pasisukimo nuskaitymo schema.....	47
4.7 pav. Valdymo signalo skaičiavimo schema	48
4.8 pav. Elektronikos komponentų funkcinė schema	48
4.9 pav. Valdymo signalo ir sukimosi dažnio priklausomybė nuo pasisukimo padėties.....	49
4.10 pav. Pagreičio priklausomybė nuo pasisukimo padėties.....	50
4.11 pav. Valdymo signalo ir sukimosi dažnio priklausomybė nuo pasisukimo padėties su ilgesniu stabdymu.....	50
4.12 pav. Pagreičio priklausomybė nuo pasisukimo padėties su ilgesniu stabdymu.....	51
5.1 pav. Suprojektuota ir pagaminta detalė leidžianti tiksliai atlikti kalibravimą.....	52
5.2 pav. Naudoti etalonai svareliai svorio jutiklių kalibravimui.....	53
5.3 pav. Jėgų veikimo statinė schema ieškant x ir y verčių	54
5.4 pav. Traukos vektoriaus krypties priklausomybė nuo sinusoidės valdymo kampo	55
5.5 pav. Statinė schema siekiant įverti susidariusį momentą tarp jutiklių	56
5.6 pav. Traukos palyginimas tarp dviejų siunčiamų signalų	57
5.7 pav. Sukimosi momento palyginimas tarp dviejų siunčiamų signalų.....	57

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

VTOL- Vertikalaus kilimo ir tūpimo orlaivis

ESC – Elektroninis greičio reguliatorius

PWM – Impulso pločio moduliacija

Įvadas

Pastaraisiais metais bepiločiai orlaiviai yra vis plačiau naudojami įvairiose srityse nuo paprastų stebėjimų ar filmavimų iki sudėtingesnių užduočių vykdymo. Todėl visada yra ieškoma metodų, kaip pagerinti dronų valdymą, siekiant supaprastinti jų konstrukciją ir padidinti valdomumą. Vienas svarbiausių sistemos elementų yra traukos krypties valdymas. Dažniausiai traukos krypties valdymas remiasi kelių besisukančių rotorių sistemomis arba pasitelkiant posvyrio vairo, kurie leidžia pakreipti propelerį norima kryptimi erdvėje. Tačiau tuo didėja sistemos sudėtingumas, masė ir energijos sąnaudos. Didėjant komponentų skaičiui, didėja tikimybė atsirasti gedimams arba netikslumams. Todėl aktualu ieškoti paprastesnių sprendimų, kurie leistų išlaikyti valdomumą ir sumažinti konstrukcijos sudėtingumą.

Vienas iš traukos krypties valdymo metodų yra propeleris su lanksčiais mentės tvirtinimo mazgais, kurio veikimo principas pagrįstas mentės pastatymo kampo keitimu pagal rotoriaus sukimosi režimą, nenaudojant papildomo mechaninio posvyrio vairo. Tyrimė *Flight performance of swashplateless micro air vehicle* pateikta sistema be posvyrio vairo (ang. *Swashplateless*) gali užtikrinti pakankamą valdomumą išlaikant paprastesnę orlaivio konstrukciją. Eksperimentiškai patvirtinta, kad keičiant rotoriaus kampinį pagreitį galima efektyviai valdyti traukos kryptį, išvengiant sudėtingų mechaninių komponentų [1]. Analogiškai, darbe *Modelling, control and simulation of a single rotor UAV with swashplateless torque modulation* pagal sukimosi režimą, galima keisti mentės pasisukimo kampą. Šis valdymo metodas yra perspektyvus, kuris leidžia išvengti sudėtingų mechaninių sprendimų [2]. Tačiau tokio tipo sistemų valdymo metodai ir jų efektyvumas vis dar nėra pakankamai ištirti, ypač vertinant trauką, jos kryptį ir momentą.

Šiame darbe nagrinėjama galimybė valdyti propelerio traukos kryptį naudojant lanksčiai įtvirtintas mentes pagal propelerio mechanizmo sukimosi valdymą. Pristatoma sistema, kuri leidžia užtikrinti traukos kryptį be tiesioginio mechaninio valdymo. Kadangi toks traukos krypties valdymo metodas nėra plačiai išnagrinėtas, dėl šios priežasties siekiama ištirti būtent tokio propelerio mechanizmo traukos valdymo galimybes keičiant kampinį pagreitį, įvertinti algoritmų efektyvumą, kuris metodas užtikrina geresnį valdomumą bei didesnę traukos jėgą.

Tikslas: ištirti traukos vektoriaus krypties keitimo galimybes ir valdymo algoritmus, naudojant kampiniu pagreičiu valdomą propelerio žingsnio keitimo mechanizmą.

Uždaviniai:

1. išanalizuoti esamus traukos valdymo metodus naudojant vieno veleno sistemą.
2. suprojektuoti ir pagaminti propelerio mechanizmą, leidžiantį keisti propelerio žingsnį keičiant sukimosi pagreitį.
3. suprojektuoti ir pagaminti matavimo stendą, kuris geba matuoti generuojamą trauką ir jos kryptį.
4. sukurti ir pritaikyti traukos krypties valdymo algoritmus.
5. ištirti propelerio mechanizmo valdymą ir valdymo efektyvumą stende.

1. Literatūros apžvalga

Šioje literatūros apžvalgoje analizuojami bepiločių orlaivių valdymo metodai ir veikimo ypatumai. Nagrinėjami dronų komponentai, tokie kaip elektriniai varikliai, greičio reguliatoriai, valdymo metodų protokolai ir propelerių aerodinaminės charakteristikos. Taip pat ir šiuolaikiniai valdymo metodai, leidžiantys užtikrinti efektyvų ir patikimą belipoločių orlaivių veikimą.

1.1. Bepiločių orlaivių tipai ir jų valdymo ypatumai

Per paskutinius keletą metų, vis dažniau yra naudojami bepiločiai orlaiviai. Jie yra naudojami dėl didelių panaudojimo galimybių civiliniame gyvenime, kur anksčiau dronai buvo naudojami tik kariuomenėje, pavojingoms operacijoms ir gelbėjimo misijoms. Bepiločiai orlaiviai, paprastai vadinami dronais, tai orlaiviai, kurie gali skristi valdomi operatoriaus per tam tikrą atstumą nuotoliniu būdu, be piloto ar keleivių arba savarankiškai pagal iš anksto užprogramuotą kursą [3]. Šiomis dienomis dronai naudojami telekomunikacijų perdavimui, stebėjimui, pasienio patuliavimui ir žvalgyboje [4]. Taip pat ateityje yra siekiama bepiločius orlaivius pritaikyti komerciniam transportui. Dronus arba bepiločius orlaivius galima skirstyti į tipus pagal jų konstrukciją arba variklių skaičių. Šis paskirstymas yra svarbus, kad būtų pasirinkta reikiama konstrukcija pagal reikalingus poreikius - logistikai, miškų saugai, žemės ūkiui ar dar kokiam nors asmeniniam naudojimui [5].

Fiksuoto sparno dronai pasižymi dideliu sparnų pločiu, kuris leidžia skraidyti didesniais greičiais nei įprasti dronai, jie dažniausiai naudojami žemėlapių sudarymui [6]. Taip pat hibridinis VTOL dronas, kuris leidžia leisti ir kilti vertikaliai. Tai dronas, kuris sujungia fiksuoto sparno ir daugiau rotorių turinčius dronus, jis yra universalus įvairiems naudojimams [7].

Multikopteriai, tai kvadkopteriai, heksakopteriai ir oktakopteriai, kurie turi kelis rotorius ir užtikrina vertikalių pakilimą ir manevringumą. Jie naudojami fotografavimui, taip pat pristatymui, kai nuotolis nėra ilgas. Jie yra dažniausiai naudojami dėl jų tikslumo ir stabilumo atlikti įvairioms užduotims dėl geros konstrukcijos ir gerų aerodinaminių charakteristikų [8].

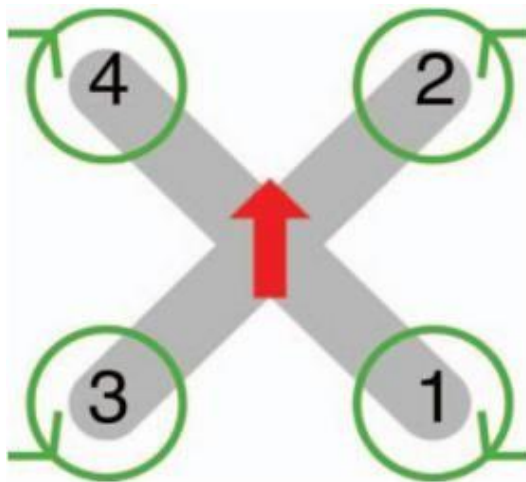
Vieno rotoriaus dronai, tai lyg sraigstasparnio konstrukcijos dronas, turi vieną pagrindinį rotorių, kuris jam užtikrina keliamąją jėgą ir uodegą, kuri jam užtikrina stabilumą. Taip pat šio tipo dronai gali turėti pokrypio mechanizmą. Jie gali ilgiau išbūti ore lyginant su daugiau rotorių turinčiais dronais ir dažniausiai naudojami, kai reikia gabenti sunkesnę krovinį, todėl jie sutinkami krovinių gabenime arba žemės ūkyje.

1.2. Kvadkopterio valdymas

Kvadkopteris – tai dronas su keturiais rotoriais, kurių varikliai nukreipti į viršų ir išdėstyti lyg kvadrato formos, vienodu atstumu nuo masės centro. Ši drono konstrukcija yra dažniausia tarp mažų bepiločių orlaivių, nes ji yra paprasta ir lengvai valdoma. Jie naudojami paieškai ir gelbėjimui, statybose, logistikoje ir laivų priežiūrai [9].

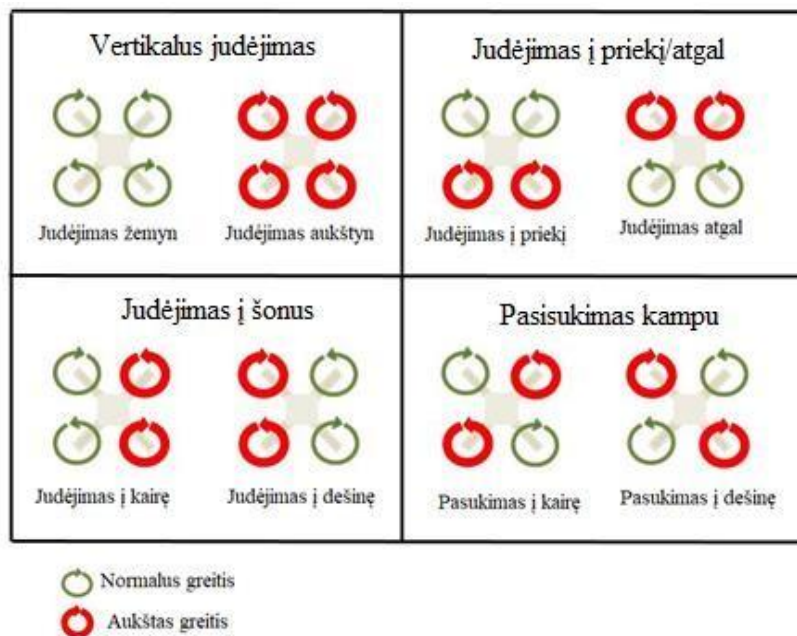
Juose naudojami rotoriai, kurių greičių kitimas nepriklauso vienas nuo kito, kad būtų pasiektas stabilumas ir efektyvus valdymas. Tokiu atveju keičiant kiekvieno rotoriaus greitį, galima keisti trauką, kad pakeisti traukos centrą ar vertikaliai, ar išilgai, taip pat gauti norimą sukimosį momentą [10]. Bešepetėliniai nuolatinės srovės varikliai yra dažnai naudojami kvadkopteriuose.

Propeleriai būna įvairių dydžių, jie yra žymimi pagal skersmesnį ir žingsnį. Pagal žingsnį matuojama, kaip toli propeleris nukeliauja per vieną apsisukimą. Todėl propelerio parinkimas yra labai svarbu, kad būtų užtikrinta tinkama traukos jėga. Tam reikalinga, kad varikliai neperkaistų ir išlaikytų normalią temperatūrą [11]. Visų šių propelerių sukimosi kryptis ant visų keturių rotorių nėra vienoda. Propeleriai (1) ir (4) sukasi į dešinę pusę, o (2) ir (3) į kairę (žr. 1.1 pav.).



1.1 pav. Kvadkopterio rotorai ir jų sukimosi kryptys [11]

Kvadkopterio kilimas – tai toks etapas, kai jis pakyla nuo žemės ir pereina į kabėjimo padėtį, tas pats ir atvirkščiai leidimasis, kai leidžiasi vertikaliai link žemės. Pagal paveikslėlį (žr. 1.2 pav.) yra matoma, kaip keičiasi rotorių greitis vienu metu, dronui judant.



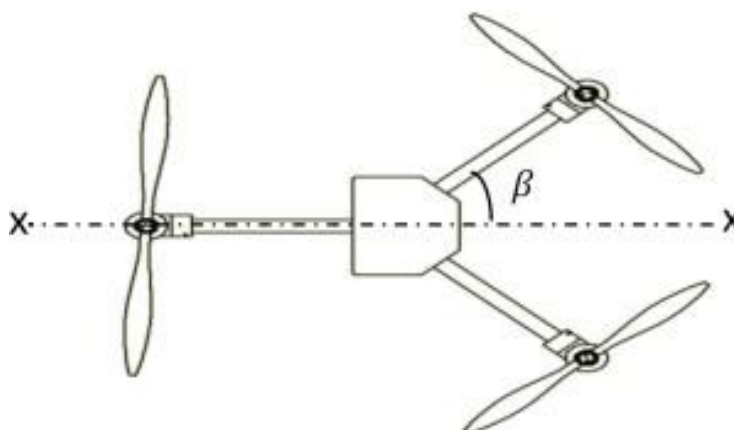
1.2 pav. Kvadkopterio valdymas ir jo rotorių veikimas [12]

Dronui leidžiantis žemyn yra mažinamas rotorių greitis pagal kurį gali jis nusileisti saugiai, o kylant atvirkščiai – visų rotorių greitis yra didinamas tuo pačiu metu. Dronui skristi į priekį galiniai rotorai yra greitinami ir priekiniai palaikomi normaliu greičiu, o atgal atvirkščiai priekiniai rotorai sukasi greičiau nei galiniai. Dronui judėti į kairę yra greitinami dešinėje pusėje esantys rotorai, o į dešinę,

kairėje pusėje rotorai yra greitinami. Drono pasisukimo kampas yra valdomas greitinant įstrižai rotorius, pagal tai galima pasukti droną į kairę arba dešinę pusę. Kvadkopterio sistema turi 6 judėjimo erdvės laipsnius, bet tik 4 valdymo laisvės laipsnius. Lyginant su sraigtasparniu, kvadkopteris gali pasiekti mažiau skrydžio padėčių, tačiau mechaninė konstrukcija yra daug paprastesnė. Šio drono priežiūra ir sąnaudos yra žymiai mažesnės, todėl jis turi didesnę pranašumą nei sraigtasparnis [13]. Kad nustatyti kvadkopterio padėtį, pagreitį ir kampinį greitį yra naudojami trijų krypčių giroskopai ir trijų ašių pagreičio jutikliai. Su skrydžio valdikliu yra siekiama išlaikyti norimą sukimosi jėgą, keliamąją jėgą, o elektroniniu greičio reguliatorium, kad variklis galėtų pasiekti atitinkamą jėgą [14]. Norint pasiekti geresnių valdymo sistemos parametrų, reikia nustatyti dinaminį standumą. Jis naudojamas kaip rodiklis drono valdymo sistemos atsparumo išorinei apkrovai.

1.3. Trikopterio valdymas

Trikopteris – tai dronas, kuris yra sudarytas iš trijų bendraašinių rotorių ir kiekvienas iš šių variklių sukasi priešinga kryptimi, nei kitas prie jo esantis rotorius, kad būtų panaikintas posvyrio momentas, kuris yra sukuriamas kiekvieno variklio. Kita trikopterių kategorija, kai turi tris pavienius variklius ir vienam iš šių variklių yra naudojamas servo rotorius. Jis yra naudojamas, kad būtų galima keisti pasukimo kampą. Sukant variklį prieš laikrodžio rodyklę arba pagal būtų keičiamas drono pasukimo kampas. Taigi šiuose abiejose atvejuose yra būtina stabilizuoti posvyrio momentą [15].



1.3 pav. Trijų rotoriaus drono vaizdas iš viršaus [15]

Trikopterio konstrukcija yra pavaizduota (žr. 1.3 pav.), tai drono vaizdas iš viršaus. Ties centrine ašimi yra drono rėmas. Visos šios konstrukcijos atramų ilgiai iki rotorių yra vienodi. Centrinis korpusas pavaizduotas dėl paprastumo. Jame yra naudingas krovyns, valdiklis ir maitinimo šaltinis. Su kiekvienu rotoriumi yra palaikomas ryšis naudojant elektroninį greičio reguliatorių - ESC. Pagal paveikslėlį du rotorai yra priekiniai ir vienas galinis rotorius. Kampas tarp kiekvienos iš priekinių rotorių laikančių atramų ir ašinės linijos ir vadinamas β . Kiekvienas rotorius turi pritvirtinta propelerį su fiksuotomis mentėmis, kad visi šie propeleriai būtų viename lygyje. Sistema gali valdyti sukimosi greitį, kad ji galėtų kabėti ore ir manevruoti. Dėl to galima nenaudoti bendraašinių rotorių arba servo variklio. Tokiu principu valdiklis nustato, kad visi rotorai sukėtųsi vienu greičiu kylant, o vėliau padidinti arba sumažinti bet kurio propelerio sukimosi greitį, kad būtų išlaikytas bendras stabilumas [15].

Dronui judėti į viršų yra greitinami visi trys varikliai, o į apačią atvirkščiai. Judėti į priekį ir atgal yra mažinami arba didinami priekinio ir galinių variklių greičiai. Judant į šonus, priekinis variklis

greitėja, vienas iš galinių variklių išlaiko tą patį greitį, o vienas lėtėja. Trikopteriui pasisukti yra naudojamas pakreipiamas rotorius, dažniausiai tai būna galinis, kuris gali pakeisti traukos kryptį ir sukuriamas momentas leidžiantis pasukti droną.

1.4. Sraigtasparnio valdymas

Sraigtasparnis – tai toks orlaivis, kuris kuria keliamąją jėgą iš besisukančių menčių virš jo. Rotoriaus mentėms besisukant apie vertikalią ašį, jos sudaro tarsi diską horizontalioje plokštumoje. Tokiu būdu menčių santykinis pavišiaus judėjimas sukuria aerodinamines jėgas. Sraigtasparnis su besisukančiomis mentėmis gali sukurti šias jėgas, kai net jo greitis yra lygus nuliui. Kai orlaiviai su fiksuotais sparnais to padaryti negali, kuriems palaikyti pastovias jėgas reikia pastovaus greičio. Dėl to sraigtasparnis gali skristi vertikaliai, kilti aukštyn, leistis žemyn arba kabėti ore. Pagrindinė šio rotoriaus savybė yra kad būtų įvykdytas vertikalus skrydis [16].

Kad išlaikyti ore esantį sraigtasparnio svorį, mentės su rotoriumi turi išlaikyti efektyvią traukos jėgą. Todėl turi būti kuo įmanoma mažesnė apkrova, nes orlavio galia ir degalų sanaudos yra proporcingos galiai. Oras turi būti greitinamas žemyn, nes keliamąją jėgą atitinka priešingą besisukančių sparnų reakcija į orą, tai yra jėgos momentą. Rotorius taip yra veikiamas jėgų ir momentų, kuriais yra valdoma orlavio padėtis. Fiksuoto sparno orlavio atveju, keliamąją, varomąją ir valdymo jėgas sukuria skirtingi aerodinaminiai paviršiai. Srautas kuris praeina pro sraigtasparnį yra sudėtingesnis lyginant su kitais orlaiviais. Nes srautas virš besisukančių menčių niekada nebūna tiesinis, lyginant su fiksuoto sparno orlaiviais. Dėl to gali kilti problemų modeliuojant, nes netiesinių reiškinių stebėjimai gali būti sunkiai panaudojami dėl jų sudėtingumo [16].

Sraigtasparnis buvo sukurtas, kad jis galėtų atlikti tokias užduotis, kurių negali fiksuoto sparno orlaiviai. Tai yra vertikaliai leistis žemyn, kilti aukštyn ar kabėti ore. Todėl pagal tai yra skirstoma į keturis skrydžio režimus pagal kuriuos veikia sraigtasparnis:

- Pirmas – kabėti ore, kai rotoriaus menčių sukuriamą trauką atsveria sraigtasparnio svorį ir jis nejudama tam tikrame taške nuo žemės paviršiaus.
- Antras – vertikalus kilimas, kai didėja trauka ir leidžia pakilti sraigtasparniui aukštyn.
- Trečias – vertikalus leidimasis, sudėtingesnis režimas, nes rotoriuje yra srautai, kurie yra nukreipti aukštyn ir žemyn, kas gali sukelti menčių vibracijas.
- Ketvirtas – tai skrydis į pasirinktą kryptį, kai rotoriaus menčių sukuriamas diskas yra pakreipiamas skrydžio kryptimi. Pagal tai, kad ta kryptimi susidarytų trauką ir sraigtasparnis galėtų judėti norima kryptimi.

Skrydis į pasirinktą kryptį yra apibūdinamas žingsnio santykiu, pagal formulę:

$$\mu = \frac{v}{\Omega \cdot R} \quad (1.1)$$

čia v – skrydžio greitis skrendant į priekį, m/s

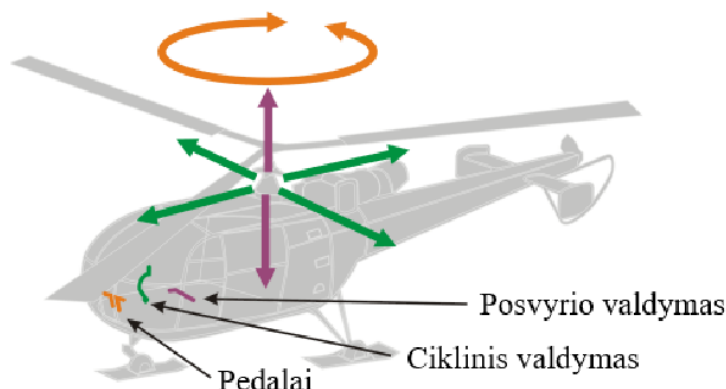
Ω - rotoriaus kampinis greitis, rad/s

R - rotoriaus spindulys, m

Dažniausiai pagal konstrukcinius apribojimus $\mu < 0,4$. Nusileidimas yra skrydžio pirmyn ir vertikalaus nusileidimo junginys. Ideali situacija sraigtasparniui būtų pasiekti pastovią keliamąją

jėgą per visą rotoriaus sukimosi ciklą. Tačiau, rotoriaus mentėms besisukant viena kryptimi, kai jis juda į priekį atsiranda momentų disbalansas [17].

Rotoriaus mentės juda ta pačia kryptimi kaip ir greitis. Greitis prie mentės yra didelis, o keliamoji jėga yra lygi greičio kvadratui, todėl atakos kampas gali būti pakankamai mažas, kad būtų pasiekta reikiama keliamoji jėga. Kai mentė juda priešingai skrydžio kryptčiai, tai santykinis greitis yra mažesnis. Todėl turi būti atakos kampas didesnis, kad būtų galima pasiekti tą pačią bendrą keliamąją jėgą [17].



1.4 pav. Tradicinio sraigstasparniio trys pagrindiniai valdymai [18]

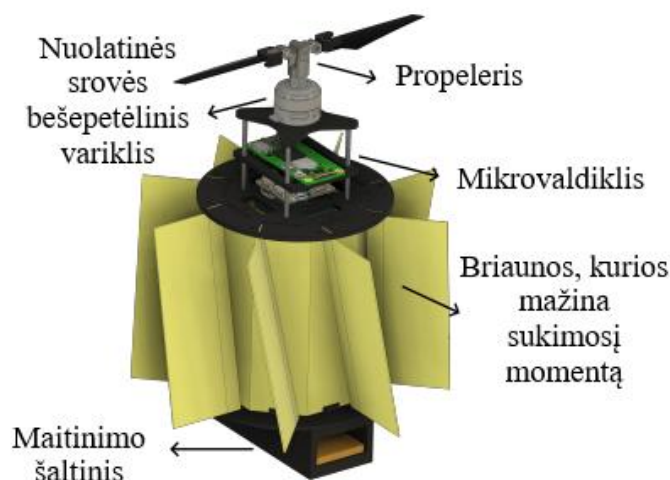
Tradiciniam sraigstasparniui stabiliam ir tiksliam skrydžiui naudojami trys pagrindiniai valdymai (žr. 1.4 pav.): ciklinis valdymas, posvyrio valdymas, pedalų valdymas. Kiekvienas iš jų atlieka tam tikrą funkciją, kuri yra svarbi valdant sraigstasparnio padėtį ir skrydį .

- Ciklinio valdymo funkcija yra reguliuoti pagrindinio rotoriaus menčių žingsnį jam besisukant, kuris padeda sraigstasparniui judėti į priekį, atgal ir į šonus. Rotoriui besisukant, sukasi diskas, kuris pasisuka tam tikra kryptimi sukuriant asimetrinę keliamąją jėgą. Tokiu atveju sraigstasparnis yra pekreipiamas ir leidžia skristi nukreipta kryptimi.
- Posvyrio valdymo metu vienu metu keičiami visų rotoriaus menčių posvyrio kampai, kuris leidžia reguliuoti vertikalų judėjimą, tai kilti aukštyn arba leistis. Padidinus menčių posvyrio kampą, sraigstasparnis pakyla ir sukuria didesnę keliamąją jėgą. Sumažinus posvyrio kampą, sraigstasparnis leidžiasi, nes sumažėja keliamoji jėga.
- Pedalai yra sukimo momento kontrolės sistema, reguliuoti uodegos sukuriamą trauką. Spaudžiant pedalus keičiamas uodegos rotoriaus menčių posvyris. Tokiu būdu yra reguliuojamas rotoriaus sukuriamas priešpriešinis sukimo momentas, todėl sraigstasparnis gali sukis į kairę arba į dešinę [19].

1.5. Vieno rotoriaus sistemų valdymas

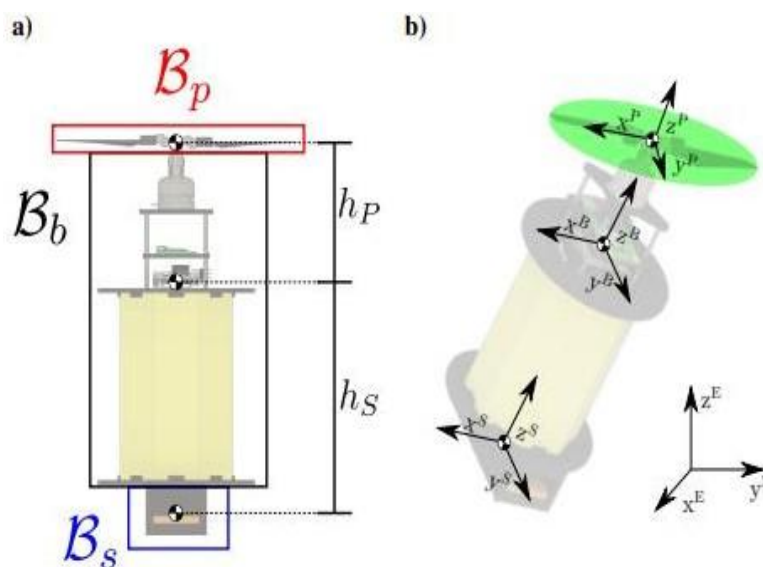
Multikopteriai, ypač kvadkopteriai yra labiausiai paplitęs dronų tipas, nes jie yra paprasti, lengvai valdomi. Tuo pačiu naudojant keturis rotorius yra paprasta keisti traukos jėgą ir sukimosį momentą tame pačiame lygyje. Dronas *Gemini* yra naudojamas su dviejais rotoriais, yra pagrįstas sraigstasparnio veikimo principu, kuris yra efektyvus ir praktiškai pritaikomas. Tokio drono mechanizacija yra labai sudėtinga, kadangi yra naudojami du servo varikliai [20]. Siekama yra paprastesnio varianto, kad dronas būtų valdomas vieno variklio ir būtų užtikrinta jam reikiama

kuriama trauka ir būtų stabilus. Tačiau tokie bepiločiai orlaiviai yra labai retai naudojami dėl jų sudėtingumo ir prasto ekonomiškumo.



1.5 pav. Besisukančio vieno rotoriaus konstrukcija [2]

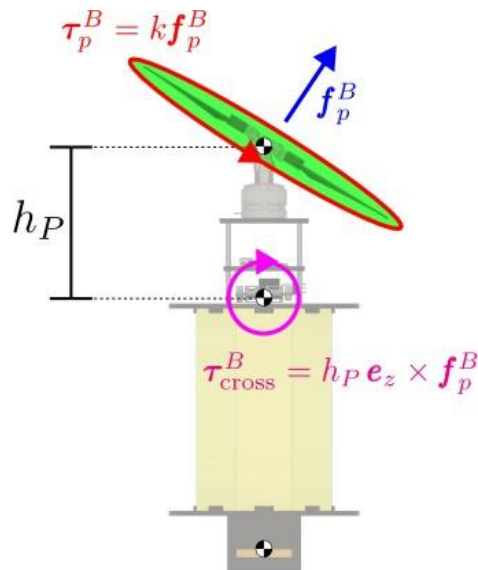
Paveikslėlyje (žr. 1.5 pav.) besisukančio vieno rotoriaus konstrukcija. Šiuo atveju trauka yra sukuriama besisukant bešepetėliniui varikliui, kurio mikrovaldiklis gali valdyti rotoriaus greitį sinusiniu greičiu. Prie rotoriaus pritvirtintas besisukantis propeleris, kuris leidžia valdyti vektoriaus kryptį visais trimis laisvės laipsniais. Briaunos sumažinančios sukimo momentą, kurios yra aplink bepiločio orlaivio korpusą. Didžiausią viso šio propelerio masės dalį sudaro maitinimo šaltinis, kuris yra sumodeliuotas centre po korpusu [2].



1.6 pav. Besisukančio vieno rotoriaus sukimas pagal tris laisvės laipsnius [2]

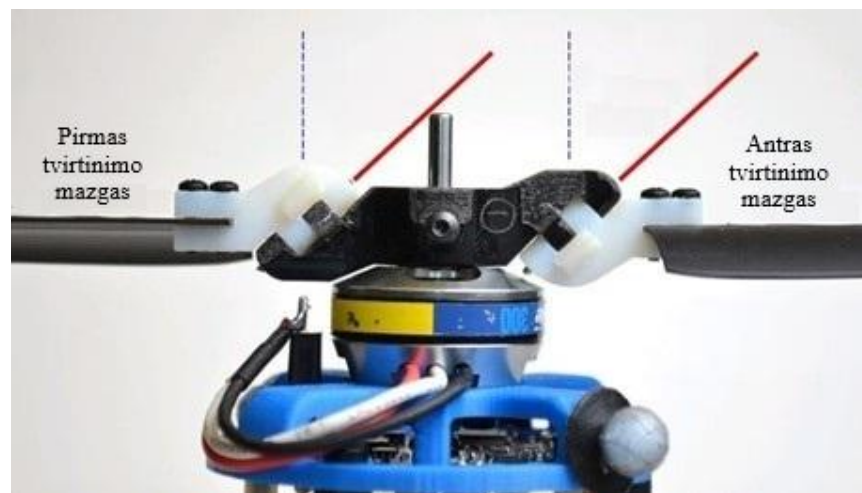
Pagal paveikslėlį (žr. 1.6 pav.) propeleris B_b yra drono rėmas, kuris gali sukis su trijais laisvės laipsniais pagrindinio rėmo atžvilgiu. Paveikslėlyje a) yra pavaizduotos trys atskiros detalės, kurios sudaro vieno rotoriaus veikimą. B_p yra propeleris, B_b – pagrindinis besisukančio propelerio rėmas ir B_s maitinimo šaltinis. Paveikslėlyje b) yra pateikta schema, kurioje pavaizduota inercinė koordinatinių sistema F_E , pagrindinė propelerio struktūros sistema - F_B , maitinimo šaltinio sistema F_S ,

ir propelerio rėmo sistema F_P . Žalia spalva pažymėta propelerio sukimosi zona. Pagrindinis masės centras lieka netoli rėmo apačios, todėl baterija yra naudojama apačioje siekiant stabilizuoti drono padėtį [2].



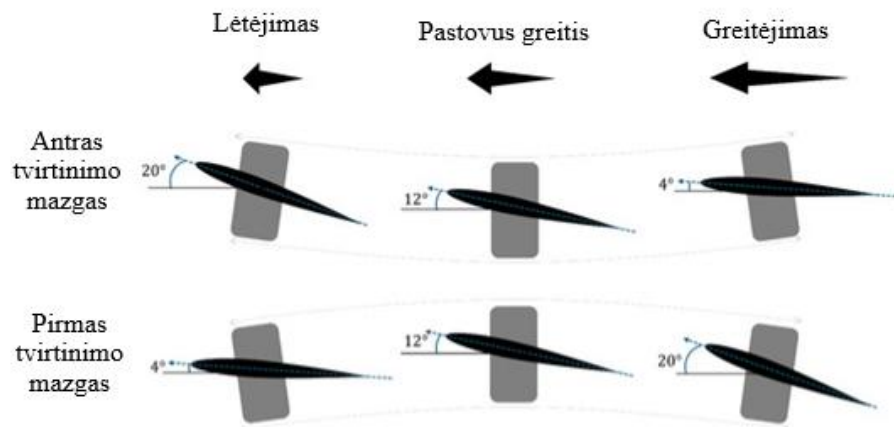
1.7 pav. Rotoriaus kuriamos jėgos ir sukimo momentai [2]

Traukos vektorius, kuris pažymėtas raudona spalva (žr. 1.7 pav.) laikomas, kad yra proporcingas rotoriaus vidutinio kampinio greičio kvadratui. Sukimo momento dalis yra žalia spalva pažymėtas diskas, kuris lygus tiesinei traukos jėgai. Kita momento dalis violetine spalva pažymėtas momentas, kuris atsiranda dėl atstumo tarp propelerio traukos centro ir bendro masės kūno centro [2].



1.8 pav. Propeleris su lanksčiais mentės tvirtinimo mazgais [1]

Paveikslėlyje (žr. 1.8 pav.) dvi mentės iš kairės ir dešinės pusės su lanksčiais tvirtinimo mazgais, nedideliu atstumu nuo sukimosi centro. Šių tvirtinimo mazgų sujungimai nėra vertikalūs, kaip dažniausiai būna įprastuose sraigtasparnių variklio mechanizmuose. Toks propeleris gali būti atvaizduotas iš šono būtent veikiant lanksčiams tvirtinimo mazgams, propeleriui besisukant kaip pateikta (žr. 1.9 pav.) paveikslėlyje [1].

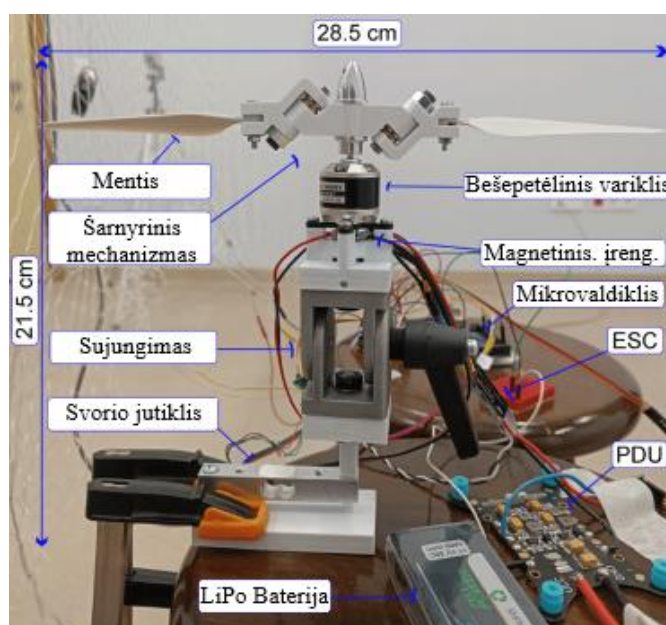


1.9 pav. Mentės pasisukimas propeleriui besisukant [21]

Propeleriui besisukant ir greitėjant antro tvirtinimo mazgo mentis pakrypsta atgal ir sukuriama didesnė atakos kampas, kas užtikrina didesnę trauką. Kai vyksta lėtėjimas, mentis iš inercijos pasisuka į priekį ir generuoja mažesnę trauką. Pirmojo tvirtinimo mazgo mentis greitėjant pasvyra į priekį, siekiant sumažinti trauką, o lėtėjant atgal, kad padidinti generuojamą trauką [21]. Pridedant sukimosi greitį pagal sinusą, kurios kryptis sutampa su variklio sukimosi kryptimi. Vieną kartą per apsisukimą yra atliekamas šis principas su greitėjimu ir lėtėjimu propeleriui besisukant. Toks tolygus svyravimas per kiekvieną apsisukimą yra panašus į ciklinį žingsnio valdymą, tačiau šiuo būdu jis valdomas keičiant sinuso amplitudę ir kampinį pagreitį [1].

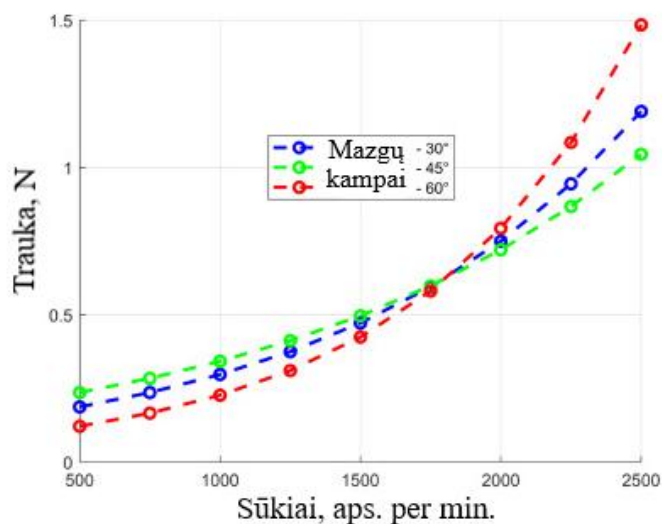
1.5.1. Eksperimentinis stendas skirtas matuoti vieno rotoriaus traukai

Tyrime *Characterization of different hinge angles for swashplateless micro aerial robots* propelerio mechanizmas pagamintas naudojant PLA 3D spausdinimo technologiją, prie kurių tvirtinasi 8,5x1 colio propeleriai. Paveikslėlyje (žr. 1.10 pav.) pateiktas eksperimentinis stendas su gabaritiniais išmatavimais. Stendo aukštis – 21,48 cm, o propelerio mechanizmo skersmuo 28,5 cm [22]



1.10 pav. Sumontuotas bandymų stendas matuoti traukai [22]

Bandymo metu buvo naudojamas *Emax XA2212 1400KV* bešepėtelinis nuolatinės srovės variklis, o variklio valdymui naudotas elektroninis greičio reguliatorius *30A LittleBee BLHeli*. Rotoriaus pasisukimo kampui nustatyti naudotas *AS5600* magnetinis kampo jutiklis, juo galima nustatyti variklio padėtį ir sukimosi dažnį. Iš propelerio mechanizmo gauta traukos jėga buvo matuojama svorio jutikliu. Duomenų siuntimas iš bandymų stendo į kompiuterį siunčiamas naudojant *Teensy 4.1 32 bitų ARM Cortex-M7* mikrovaldiklį su 600 Mhz apdorojimo dažniu. Naudota 11.1V 3.4Ah talpos *LiPo* baterija [22].



1.11 pav. Propelerio mechanizmo traukos priklausomybė nuo mazgų tvirtinimo kampo [22]

Šio tyrimo tyrimu metu buvo vertinama generuojama trauka pagal propelerio mechanizmo mazgų tvirtinimo kampą. Paveikslėlyje (1.11 pav.) pateiktas grafikas kuriame galima pamatyti kaip keičiasi trauka šiam kampui besikeičiant. Sūkliai kurie yra mažesni nei ~1700 aps. per min. didžiausią trauką generuoja, kai mazgų kampai yra 45°, o mažiausia trauka, kai 60°. Tačiau viršijus šią ribą, priklausomybės tarsi apsikeičia vietomis ir 60° mazgų kampai generuoja didžiausią trauką, o 45° mažiausią. Siekiant didžiausios traukos prie mažų sūkių optimaliausia rinktis, kai mazgų tvirtinimo kampai yra pastatyti 45° kampu [22].

1.6. Propelerio veikimo principas ir pagrindiniai parametrai

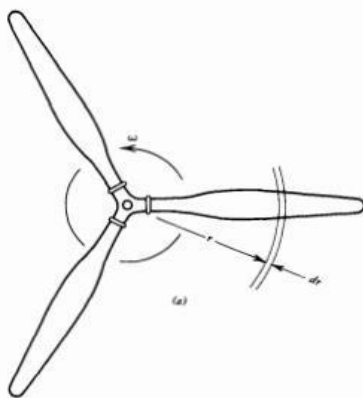
Propeleris tai yra vertikaliai ir išlginę lėkuvo ašį orientuotas susuktas sparnas. Priekinė kuriama propelerio trauka yra panaši į sparno sukurtą aerodinaminę keliamąją jėgą. Jis taip pat patiria trinties ir indukuotus pasipriešinimus. Dėl to šio propelerio pasipriešinimai yra nuostoliai naudingai galiai gauti. Pagal tai galima spręsti, kad galia visada mažesnė, nei velenų perduodama variklio galia. Todėl variklio ir propelerio galia P_a visada mažesnė nei įprasta galia P [23]. Pagal tai šią priklausomybę galima pastebėti (1.2) formulėje. Propelerio naudingumo koeficientas visada $\eta_{pr} < 1$

$$P_A = \eta_{pr} \cdot P \tag{1.2}$$

čia P_A – galima galia iš variklio ir propelerio junginio, W

η_{pr} – propelerio naudingumo koeficientas

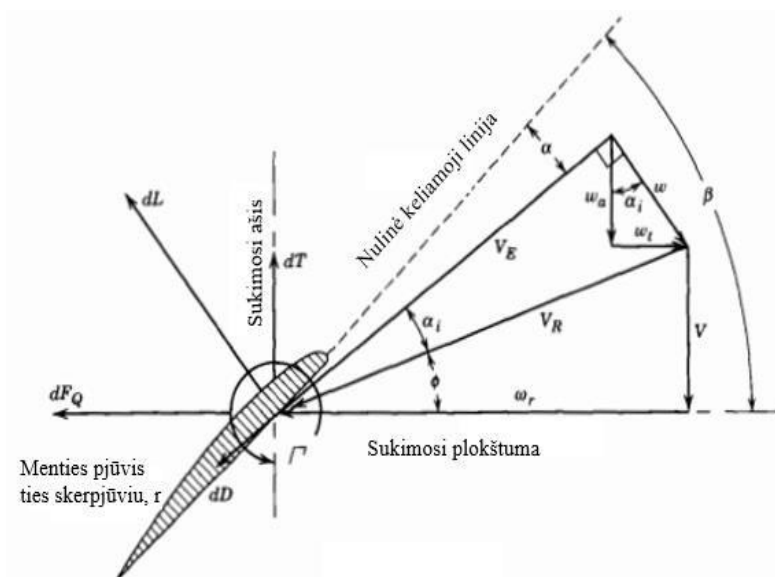
P – variklio galia, W



1.12 pav. Besisukantis propeleris su trimis mentėmis [24]

Norint suprojektuoti propelerį arba tiksliau įvertinti jau turimo propelerio veikimą reikia išanalizuoti mentės aerodinamines savybes. Paveikslėlyje (žr. 1.12 pav.) pateiktas trijų menčių propeleris, kuris sukasi kampiniu greičiu ω rad/s ir juda į priekį tam tikru greičiu V [24]. Keičiant propelerio kampinį pagreitį keičiasi sukimosi greitis. Didėjant kampiniui pagreičiui didėja sukimosi greitis, o mažėjant atvirkščiai.

Mentės vaizdas išilgai yra pavaizduotas (žr. 1.13 pav.) paveikslėlyje, žingsnio kampas β , tai yra tarp nulinės keliamosios linijos ir ašinės linijos. Tačiau renkantis žingsnio kampą, reikia būti įsitikinus, kadangi žingsnio kampai dažnai pateikiami su stygos ilgiu arba apatiniu plokščiu paviršiumi [24]. Reikia įvertinti galimus mentės žingsnio pastatymo būdus ir galimybes renkantis propelerį.



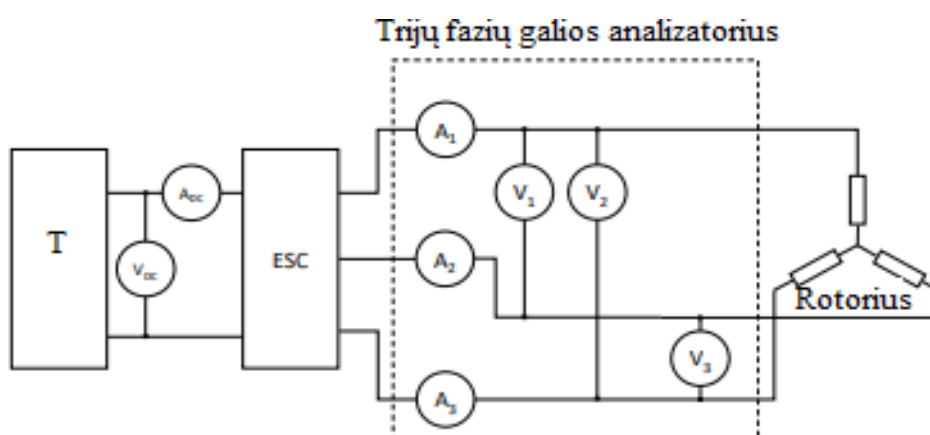
1.13 pav. Vaizdas žiūrint išilgai mentės [24]

Propelerio pastovus žingsnis, fiksuotas žingsnis ir kintamas žingsnis yra propelerio žingsnio parametrai, kurie gali būti skirtingi. Pastovus žingsnis, tai žingsnis kai yra apibrėžiamos jo geometrijos ir negali būti pakeistos. Fiksuotas arba kintamo žingsnio propeleris reiškia, kad mentėms sukantis aplink sukimosi ašį gali būti pakeistas menčių žingsnių kampas. Tačiau fiksuoto žingsnio kampas gali būti pakeistas tik vieną kartą prieš pradėdant jį naudoti. Kai kuriuose

propeleriuose būna įrengti reguliatoriai, kurie palaiko tą patį sūkių dažnį per minutę. Didinant menčių žingsnio kampus, propelerio apskukos didėja dėl didesnės galios. Mažinant menčių žingsnį, kai mažėja galia. Tai galima pavadinti kaip pastovaus greičio propeleriu [24].

1.7. Elektroniniai greičio reguliatoriai

Vienas iš esminių dronų sistemų komponentų yra elektroninis greičio reguliatorius, trumpinamas kaip ESC. Jis užtikrina ryšį tarp galios šaltinio ir elektrinio variklio. Su juo yra valdomas variklio išėjimo galios ir sukimosi greičiai pagal operatoriaus perduodamas komandas valdymo metu. ESC iš elektros šaltinio gaunamą nuolatinės srovės elektrą paverčia trifaziu kintamosios srovės varikliu, kuris suka nuolatinės srovės bešepetėlinį variklį. Toks efektyvumo nuostolis yra pasiekiamas, kai yra naudojamas aukšto dažnio elektroninis perjungimas. Šio elektroninio greičio reguliatoriaus veikimas yra labai svarbus varomosioms sistemoms, kuriose galia ribota, o įtampa veikiant apkrovai, gali smarkiai kisti [25].



1.14 pav. Elektroninio greičio reguliatoriaus jungimo su varikliu schema [25]

Pagal paveikslėlį (žr. 1.14 pav.) stendą sudaro nuolatinės srovės maitinimo šaltinis, ESC - elektroninis greičio reguliatorius, trifazis maitinimo šaltinis, elektroninis variklis. Šiame stende įrengti didelio tikslumo įtampos ir srovės jutikliai, kurių pagalba yra matuojama elektroninio greičio reguliatoriaus nuolatinės srovės galia. Nuolatinė srovė yra paverčiama į trifazę kintamąją srovę, kad būtų galima valdyti bešepetėlinį variklį. Prieš naudojant šią trifazę kintamąją srovę, ji yra perduodama per trijų fazių galios analizatorių. Su juo galima pamatuoti trijų fazių galią su tam tikru tikslumu. Pagal tai galima pastebėti, kaip svarbus yra ESC ir jo valdymo principas, kad be jo būtų sunku valdyti rotoriaus greitį ir propelerio sūkius atliekant įvairias paskirtis jo valdyme [25].

1.7.1. Greičio reguliatoriaus valdymo protokolai

Elektroniniai greičio reguliatoriai yra viena iš svarbiausių orlaivių varomosios sistemos dalis atsakingą už elektrinių variklių valdymą ir efektyvų energijos panaudojimą. Priklausomai nuo konstrukcijos ir valdymo protokolų, galima skirstyti į keletą grupių pagal tam tikrus kriterijus:

1. *PWM* – plačiai naudojamas protokolas, kuris yra paprastas, tačiau ribotu tikslumu ir jautrumu elektriniams trikdžiams.
2. *OneShot* – greitesnis nei *PWM*, kuris užtikrina greitesnį signalo perdavimą, tačiau vis vien turi analoginio signalo trūkumus.

3. *MultiShot* – dar spartesnis valdymo protokolas, dažniausiai naudojamas lenktyniuose dronuose, tačiau pasižymi dideliu jautrumu triukšmui.
4. *DShot* – skaitmeninis valdymo protokolas, užtikrinantis didelę tikslumą, atsparumą trikdžiams, kuriam nereikia kalibracijos.

DShot tai naujo skaitmeninio ESC protokolo pavadinimas. Nors šis protokolas naudoja mikrovaldiklių PWM funkcijas, jis yra skaitmeninis. PWM skirta efektyviai valdyti elektros prietaisams tiekiamą energiją, norint pasiekti pageidaujamą vidutinę įtampą ar galios lygį [26]. Signalo arba sistemos veikimo trukmė yra išreikšta laiku, tam tikra sekundės dalimi, vadinama darbo ciklu. Jis išreiškiamas procentais arba santykiu. Laikas per kurį signalas užbaigia *ON-OFF* ciklą, vadinamas periodu. Laiko dalis, per kurią skaitmeninis signalas yra įjungtas per tam tikrą laikotarpį arba intervalą, tiksliai apibūdinama procentinio darbo ciklu, kuris aprašomas pagal (1.3) formulę:

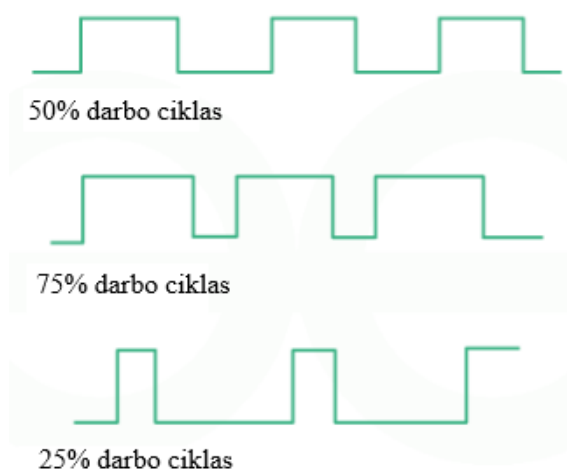
$$DC = \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}} \quad (1.3)$$

čia DC – darbo ciklas, %

T_{ON} – laikas, kuriuo metu signalas yra įjungtas, s

T_{OFF} – laikas, kuriuo metu signalas yra išjungtas, s

Skaitmeninis signalas turi 50% darbo ciklą ir atrodo kaip kvadratas jeigu jis yra įjungtas pusę laiko ir kitą pusę laiko išjungtas. Signalas praleidžia daugiau laiko aukštoje būsenoje nei žemoje, jeigu procentas yra daugiau nei 50% ir atvirkščiai jeigu, jeigu darbo ciklas yra mažesnis nei 50% (žr. 1.15 pav.). 100% darbo ciklas atitinka 5V įtampos nustatymą. Signalo įžeminimas atitiktų 0% darbo ciklą [27].



1.15 pav. Darbo ciklo schemas [27]

Greitis, kuriuo kažkas vyksta per tam tikrą laikotarpį vadinamas dažniu. Šis dažnis paprastai matuojamas sekundėmis. Duomenys perduodami per ryšio kanalus, naudojant PWM darbo ciklą ryšio sistemoje (žr. 1.16 pav.). Tai yra technika, skirta aukšto dažnio impulsams konvertuoti į žemo dažnio išėjimo signalus [27].



1.16 pav. PWM dažnis [27]

DShot išsiskiria lyginant su kitais ESC protokolais:

- Sumažintas vėlavimas
- Padidintas patikimumas
- Nereikia kalibruoti, nes naudoja skaitmeninį kodą
- Galima keisti variklio sukimosi kryptį neperjungiant laidų
- Palaikoma daugiau komandų

Ne skaitmeniniai PWM protoklai, tokie kaip *Multishot*, *OneShot42*, *OneShot125* ir kiti, tiesiog remiasi impulso pločiu, kad nurodytų greičio padėtį. Jie turi trūkumų, tokių kaip signalo šokinėjimas aplink norimą tašką. Kuo trumpesnis impulsų plotis, tuo didesnė šio virpėjimo tikimybė ir poveikis. Taip pat impulso pločio svyravimai sukelia nežinomą nulinio ir maksimalaus greičio padėtį. Dėl šios priežasties naudojant PWM reikia kalibruoti ESC [27].

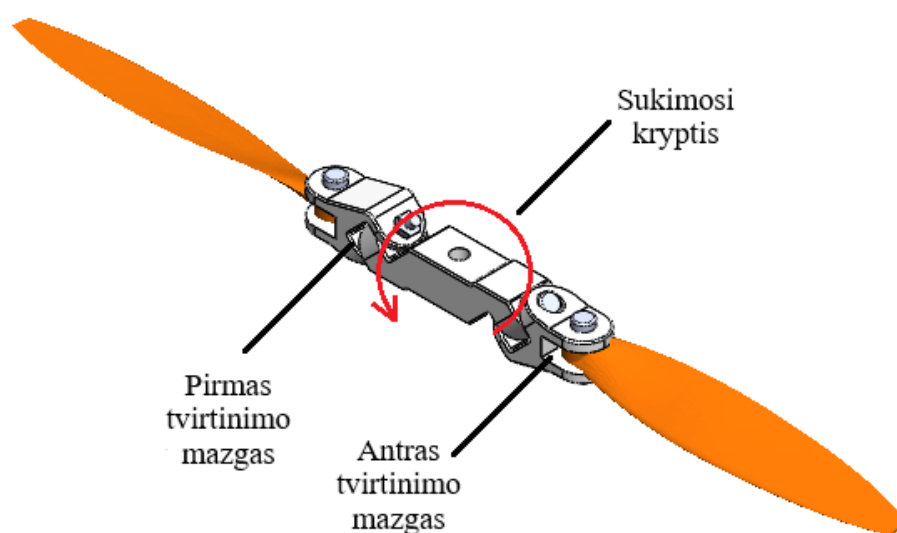
DShot600, skaičius šiuo atveju 600 reiškia perdavimo spartą, kilobitais per sekundę trumpiniu kbs. *Dshot300* ir *Dshot150* iš esmės tas pats tik jų perdavimo sparta yra lėtesnė, 300 bitų per sekundę yra 2 kartus lėtesnė, o 150 kilobitų 4 kartus lėtesnė. Tai reiškia, kad laikas yra ilgesnis 2 ir 4 kartus. *DShot300* ir *DShot150* buvo įdiegti, kad būtų palaikomi, šiek tiek senesni ESC, kad galėtų pilotai pasinaudoti skaitmeninio tikslumo privalumais [27].

2. Propelerio mechanizmo projektavimas ir jo komponentų stiprumo vertinimas

Šiame skyriuje aprašomas mechanizmo su lanksčiais mentės tvirtinimo mazgais projektavimas ir komponentų stiprumo vertinimas. Pateikiami mechanizmo suprojektuoti komponentai, apskaičiuojamos veikiančios išcentrinės jėgos ir *SolidWorks Simulation* programoje įvertinami maksimalūs įtempiai. Pateiktas propelerio mechanizmo surinkimas.

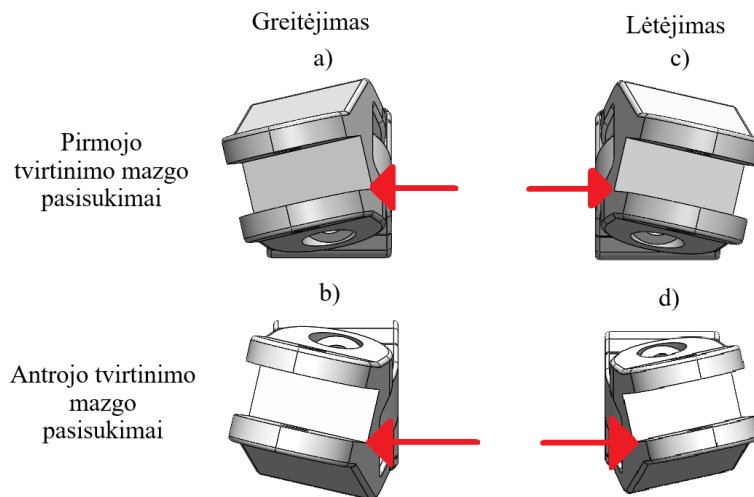
2.1. Propelerio mechanizmo komponentų projektavimas

Prieš pradėdant projektuoti mechanizmą, pasirenkamos 10x6 *Direct Drive* propelerio mentės, kurios tvirtinsis prie tvirtinimo mazgų. Jos skirtos naudoti su elektriniais bešepetėliniais nuolatinės srovės varikliais, bei užtikrina subalansuotą traukos ir greičio santykį, tinkamą įvairiems modeliams. Pagamintos iš lengvo, bet pakankamai tvirto plastiko, sustiprinto kompozitine medžiaga, kad būtų atsparios deformacijai sukimosi metu [28]. Propelerio mechanizmo (žr. 2.1 pav.) dizainas buvo pritaikytas, kad jis būtų gamybiškai patvaresnis ir konstrukciškai patikimesnis. Taip pat siekiant sumažinti aštrias briaunas ir išlaikyti kiek įmanoma geresnę aerodiškumą. Projektuojant buvo atsižvelgta į medžiagos stiprumą, menčių geometriją, bei tvirtinimo vietas, siekiant sumažinti įtempius.



2.1 pav. Suprojektuotas propelerio mechanizmas su lanksčiais mentės tvirtinimo mazgais

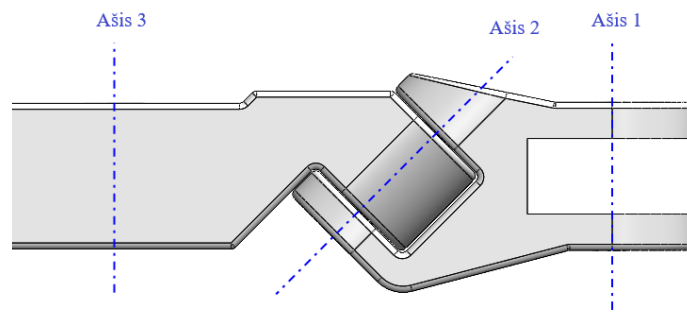
Suprojektuoto mechanizmo paveikslėlyje (žr. 2.2 pav.) raudona spalva pažymėta kryptis į kurią pasisuka tvirtinimo mazgai. Jų pastatymo kampai gali keistis keičiant sukimosi greitį. Mechanizmas suprojektuotas taip, kad lankstus mentės tvirtinimo mazgas su horizontalia plokštuma galėtų pasisukti $\pm 20^\circ$ ir vertikalia $\pm 13^\circ$ kai propelerio sūkliai yra greitunami arba lėtinami. Paveikslėlyje a) Pirmojo tvirtinimo mazgo mentės pasisukimas, kai vyksta greitėjimas, mentė pasukama į viršų ir sudaromas didesnis atakos kampas, leidžiantis toje mechanizmo pusėje generuoti daugiau traukos. b) Antrojo mentės pasisukimas, kai mechanizmas greitėja, generuojama mažiau traukos. c) Letėjimo metu, kai pirmojo mentis pasvyra į priekį, generuojama mažiau traukos d) Antrojo, letėjimo metu, išgaunama didesnė trauka.



2.2 pav. Tvirtinimo mazgų pasisukimai keičiantis sukimosi dažniui

2.2. Propelerio mechanizmo stiprumo vertinimas

Siekiant įvertinti kokia išcentrinė jėga veikia šį propelerio mechanizmą, buvo pasvertos mentys ir išmatuoti atstumai tarp ašių. Mentės masė yra 5 g, jos svorio centras 43 mm iki pirmosios ašies, paveikslėlyje (žr. 2.3 pav.) pažymėta – Ašis 1. Atstumas tarp pirmosios ašies (Ašis 1) ir antrosios ašies (Ašis 2) yra 17,7 mm. Laikiklio, kuris pritvirtintas prie mentės masė lygi – 4,2 g, o vidurinės dalies – 10,5 g. Pasirinkta medžiaga mechanizmo tvirtinimo komponentams yra *PCTG*, tai tvirtas kopoliesterio plastikas. Mechanizmo mazgų tvirtinimai suprojektuoti, kad būtų 45° kampu.



2.3 pav. Suprojektuoto propelerio mechanizmo komponentų jungiamos ašys

Pasirinktas maksimalus sukimosi greitis – 2000 aps. per minutę. Pagal turimus komponentų duomenis, galima apskaičiuoti išcentrinę jėgą, tačiau pirmiausia apskaičiuotas kampinis greitis pagal formulę:

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 2000}{60} = 209,3 \text{ rad/s} \quad (2.1)$$

čia n – apsisukimų skaičius per minutę, aps. per min.

Išcentrinė jėga apskaičiuota pagal formulę:

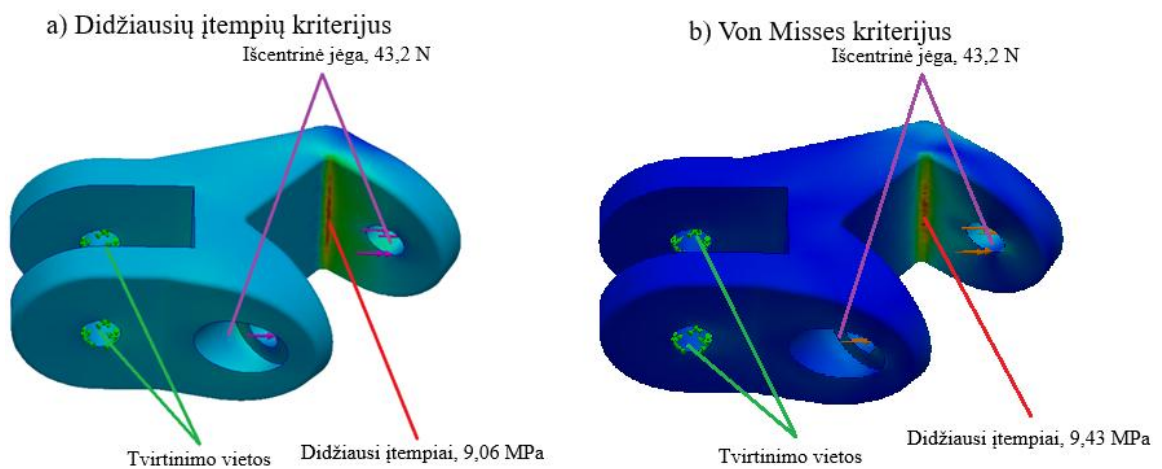
$$F_c = m \cdot \omega^2 \cdot r = 0,0147 \cdot 209,3^2 \cdot 0,067 = 43,2 \text{ N} \quad (2.2)$$

čia m – masė, kg

ω – kampinis greitis, rad/s

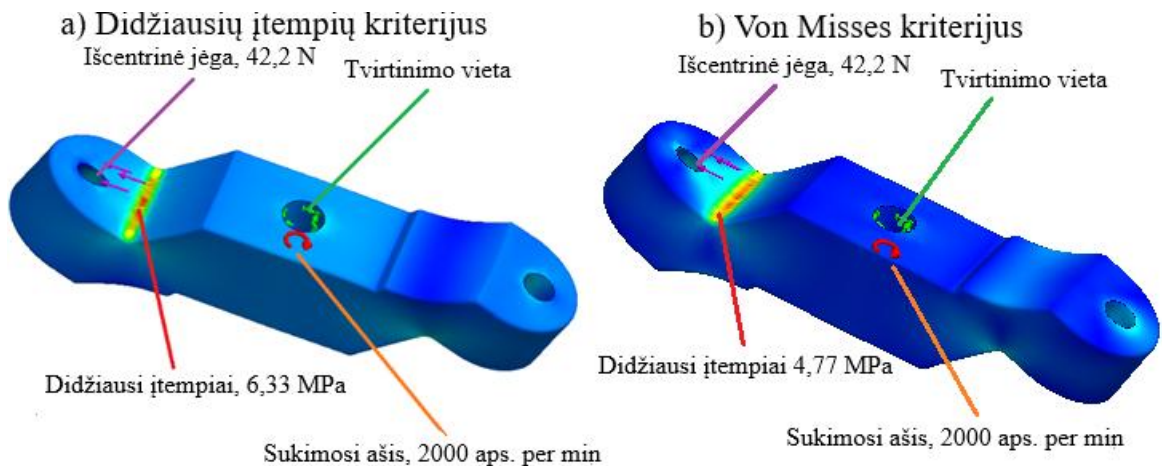
r – atstumas tarp centrų, m

Atlikus šiuos skaičiavimus, apskaičiuota išcentrinė jėga pritaikyta *SolidWorks Simulation* stiprumo vertinimui. Kadangi mechanizmo komponentai gaminami 3D spausdinimo būdu, medžiaga yra nehomogeniška, todėl jos savybės skiriasi priklausomai nuo spausdinimo krypties. Siekiant užtikrinti konservatyvų ir patikimą įvertinimą, skaičiavimai atliekami keliais supaprastintais metodais. Taip yra atliekama, nes konstrukcija bus fiziškai testuojama, todėl siekiama sumažinti jos suirimo tikimybę. Priimta, kad medžiaga yra vienalytė, bet stiprumas vertintas pagal spausdintos medžiagos silpniausias krypties charakteristikas. Atlikta analizė vertinama pagal didžiausius įtempius ir *Von Mises* kriterijų.



2.4 pav. Mechanizmo laikiklį veikiančios jėgos ir įtempių pasiskirstymai

Paveikslėlyje (žr. 2.4 pav.) pateikta mechanizmo laikiklio tvirtinimo vietos, veikiančios apkrovos ir didžiausi įtempiai. a) Didžiausių įtempių kriterijus ir b) *Von Mises* kriterijus. Žalia rodyklės spalva pažymėtos tvirtinimo vietos, prie kurių tvirtinasi mentė ir violetine išcentrinė veikiama jėga. Raudona spalva pateikti didžiausi įtempiai, kurie lygūs 9,06 MPa pagal didžiausių įtempių kriterijus ir 9,43 MPa pagal *Von Mises* kriterijus.



2.5 pav. Mechanizmo vidurinę dalį veikiančios jėgos ir įtempių pasiskirstymai

Atlikta mechanizmo vidurinės dalies analizė ir pateikti įtempių pasiskirstymai (žr. 2.5 pav.). Žalia rodyklės spalva pažymėta tvirtinimo vieta, kuri prisisuka prie rotoriaus stebulės, oranžinė - sūkliai, violetinė – išcentrinė jėga ir raudona spalva pažymėti didžiausi įtempiai, kurie yra a) 6,33 MPa didžiausių įtempių kriterijus ir b) 4,77 MPa *Von Mises* kriterijus. Pagal spausdintos *PCTG* medžiagos takumo riba siekia iki 43 MPa [29]. Maksimalūs įtempiai yra kelis kartus mažesni už takumo ribą, todėl atlaiko veikiančias jėgas prie 2000 aps. per minutę. Taip pat apskaičiuoti mechanizmo komponentų atsargos koeficientai. Laikiklio atsargos koeficientas – 4,55, o vidurinės dalies – 9. Abiejų komponentų saugos koeficientai atitinka ir neviršija šių reikalavimų.

2.3. Propelerio mechanizmo surinkimas

Paveikslėlyje (žr. 2.6 pav.) surinktas propeleris, su lanksčiais mentės tvirtinimo mazgais. Vidurinė dalis sujungta su laikikliais, o laikikliai tvirtinami kartu su mentėmis. Propelerio komponentams sujungti naudoti *DIN965 M3x20* ir *M3x16* varžtai su *DIN934* veržlėmis. Naudojamos fiksacinės veržlės, kad besisukant prie aukštesnio dažnio neatsisuktų ir neišsiardytų komponentai. Pastoviai greičiui didėjant ir mažėjant susidaro vibracijos dėl kurių gali atsisukti detalės. Propeleris yra paruoštas algoritmo valdymui ir tirti generuojamą trauką naudojant eksperimentinį standą.



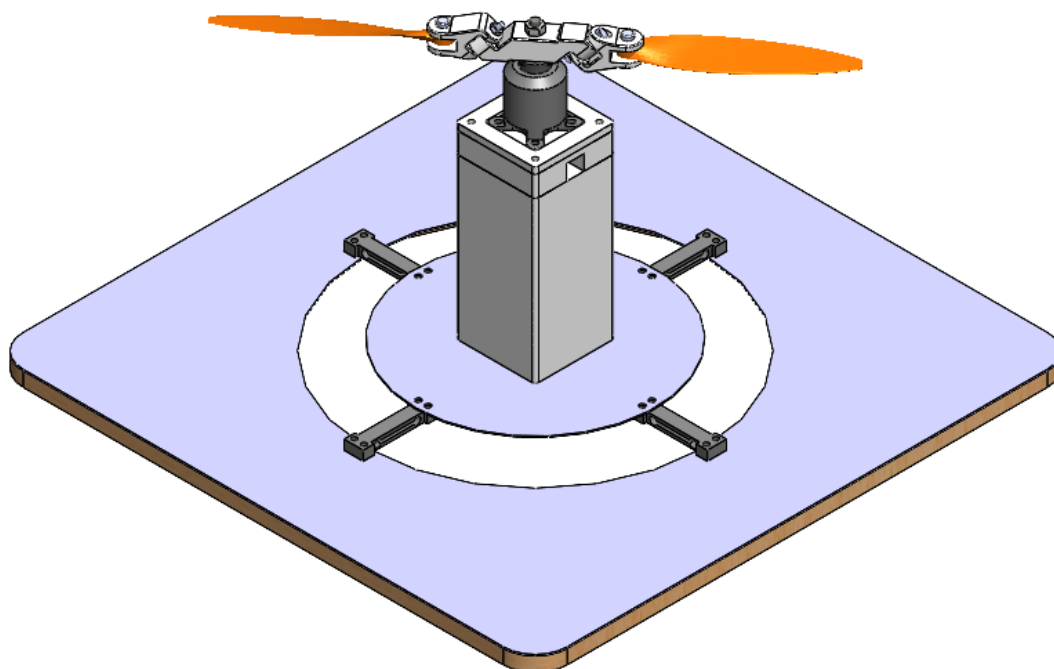
2.6 pav. Surinktas propelerio mechanizmas su lanksčiais mentės tvirtinimo mazgais

3. Eksperimentinio stendo projektavimas ir gamyba

Šiame skyriuje aprašomas eksperimentinio stendo projektavimas ir gamyba. Pateikiami pasirinkti elektronikos komponentai, reikalingi stendo veikimui užtikrinti. Suprojektuoti stendo komponentai, parinktos jų medžiagos ir atlikta poslinkių ir dažninė analizė, siekiant įsitikinti, kad konstrukcija atlaikys veikiančias apkrovas ir nesusidarys rezonansas.

3.1. Stendo projektavimas

Suprojektuotas stendas (žr. 3.1 pav.) propelerio mechanizmo traukos krypties nustatymui, jo konstrukcija užtikrina standumą ir stabilumą veikiančių apkrovų metu. Stendą sudaro apatinė, išorinė ir vidurinė stendo dalys, svorio jutikliai, variklio pakylas ir korpuso konstrukcija bei elektronikos komponentai, reikalingi propelerio valdymui ir duomenų gavimui. Apkrovos veikiančios besisukant varikliui yra perduodamos į vidurinę stendo dalį, o rezultatai matuojami po ja pritvirtintais svorio jutikliais. Siekiant sumažinti srauto interferencijos įtaką matavimams, mechanizmas pakeliamas aukščiau. Toliau pateikiami elektronikos komponentai ir suprojektuoti konstrukciniai elementai.



3.1 pav. Suprojektuotas stendas su besisukančiu propelerio mechanizmu

3.2. Elektronikos komponentai

Kad pasirinkti tinkamus svorio jutiklius, reikia įvertinti kokią trauką generuos propelerio mechanizmas prie pasirinktų sukčių. Pagaminto mechanizmo atstumas tarp menčių galiukų yra 336 mm. Pavertus 336 mm į colius, gauta apytiksliai 13 colių, pagal tai galima apsibrėžti propelerį, kuris šiuo atveju yra 13x6, jam besisukant prie 2000 apsisukimų per minutę Turint bendrą ilgį ir norimus sukčius galima nustatyti preliminarią generuojama traukos jėgą iš *APC Propellers* katalogo, kuri yra 1,96 N [30]. Pasirinkta naudoti 300 g svorio jutiklius, kurie yra gali matuoti jėgą iki 3 N. Toliau apskačiuota maksimali leistina jutiklių jėga pagal (3.1) formule:

$$F_{LC} = n \cdot m \cdot g = 4 \cdot 0,3 \cdot 9,8 = 11,78 \text{ N} \quad (3.1)$$

čia F_{LC} – maksimali svorio jutiklių jėga, N;

n – svorio jutiklių skaičius;

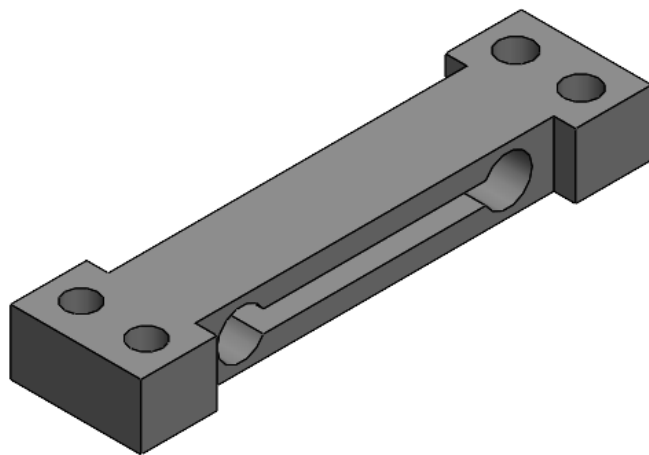
m – svorio jutiklio maksimali masė, kg;

g – laisvojo kritimo pagreitis, m/s^2

$$T_M < F_{LC} = 1,96 \text{ N} < 11,78 \text{ N} \quad (3.2)$$

čia T_M – propelerio maksimali trauka prie 2000 aps. per minutę, N;

Propelerio generuojama trauka yra mažesnė nei leistina svorio jutiklių apkrova pagal (3.2) formule, todėl jie yra tinkami naudoti stende. Pasirinkti svorio jutikliai yra *TAL221* (žr. 3.2 pav.), tai dažnai naudojami svorio jutikliai, dėl savo mažos kainos ir gero tikslumo, šio jutiklio matavimo paklaida yra apie $\pm 0,005$ N. Sutinkami matavimo įrenginiuose, kur svoris nėra didelis. Svorio jutiklis siunčia elektrinį signalą, kai jį veikia jėga ir jis yra deformuojamas. Signalas perduodamas mV, kurį galima konvertuoti į traukos jėgą. Jis pagamintas iš aliuminio lydinio, kuris lengvas ir turi standžią konstrukciją. IP65 apsaugos klasė nurodo įrenginio atsparumą aplinkos poveikiui – dulkėms ir drėgmei. Svorio jutiklis gali matuoti [31].



3.2 pav. *TAL221* 300 g svorio jutiklis

Svorio jutiklių duomenims gauti naudotas *NI-9237* (žr. 3.3 pav.) 4 kanalų analoginių jungčių modulis. Jį galima naudoti mechaninių dydžių matavimui, tokių kaip deformacijai arba jėgos apkrovai. Šiuos duomenis leidžia surinkti realiu ir juos apdoroti į jėgos matavimo vienetus, siekiant surasti sukurtą trauką. Sujungti svorio jutiklius naudotas *Ethernet* laidas su signalais AI+, AI-, EX+ ir EI-, kad gauti tikslius svorio jutiklio duomenis [32].



3.3 pav. Ni-9237 įranga svorio jutiklių duomenų perdavimui [32]

Kad svorio jutikliai galėtų perduoti signalą į NI-9237 jie sujungti su T568B Ethernet laidu. Ethernet laidas turi 8 signalo perduodamus laidus, naudojamas modulis – 10, o svorio jutikliai – 4. Pagal pirmą lentelę sujungiami laidai, kurių pagalba svorio jutikliai galėtų perduoti duomenis į NI-9237.

1 lentelė. Ni-9237 ir svorio jutiklių signalų jungimas [33]

Ni-9237	Laido signalas	T568B signalas	Svorio jutiklio signalas
2	AI+	Oranžinis su baltu	Žalias
3	AI-	Oranžinis	Baltas
6	EX+	Mėlynas su baltu	Raudonas
7	EX-	Žalias	Juodas

Surinkti duomenis iš Ni-9237 naudotas cDAQ-9173 (žr. 3.4 pav.) duomenų surinkimo korpusas. Jis naudojamas jutikliams ir matavimo signalams prijungti prie kompiuterio, kad būtų galima atlikti duomenų analizę. Ši įranga skirta matuoti įtampai, temperatūrai, deformacijai ir vibracijai. USB laidu matavimo duomenis perduodami į kompiuterį ir jie apdorojami naudojant programinę įrangą NI MAX [34]



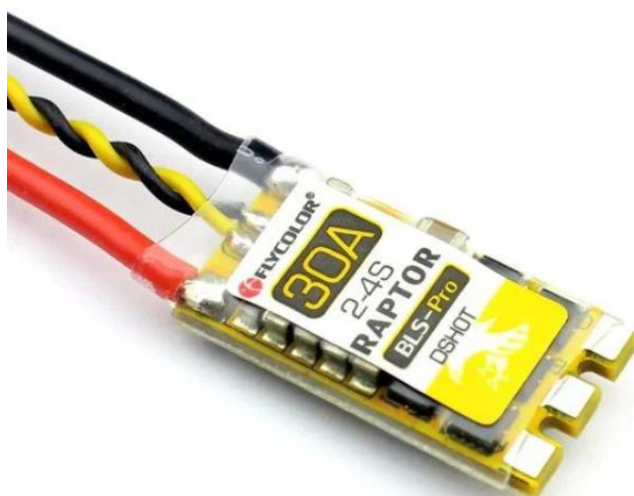
3.4 pav. cDAQ-9173 duomenų surinkimo korpusas [34]

Kadangi propelerio mechanizmas sukamas prie mažų sūkių, pasirinktas *PropDrive V2 2830 800KV* variklis (žr. 3.5 pav.). Tai trijų fazių bešepetėlinis variklis, skirtas lengviems ir vidutinio dydžio orlaiviams. Variklio *800KV* apibrėžia teorinį sukimosi greitį, tai yra 800 aps. per min. vienam įtampos voltui. Skaičiai *2830* nurodo variklio išmatavimus, kurio skersmuo yra 28 mm ir aukštis – 30 mm. Jis yra plačiai naudojamas dėl didelio galios ir svorio santykio, paprastos konstrukcijos bei pakankamo efektyvumo. Variklis tinkamas naudoti su 3-4S LiPO baterija (11,1-14,8 V) ir ESC, kurio vardinė srovė siekia 25-30 A. Priklausomai nuo sūkių bei propelerio išmatavimų, maksimali galia gali siekti 270 W [35].



3.5 pav. *PropDrive V2 2830 800KV* [35]

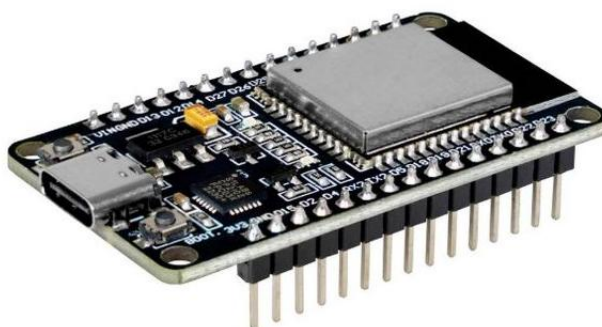
Siekiant, kad elektroninis greičio reguliatorius galėtų keisti sukimosi greitį pagal variklio pasisukimo kampą greitu signalu, pasirinktas *Single Flycolor Raptor Pro* (žr. 3.6 pav.) suderinamas su greitais protokolais, tokiais kaip *OneShot*, *DShot*, *MultiShot*, todėl yra idealus pasirinkimas greitiems signalams perduoti, kai yra teikiami dideli reikalavimai. Palaiko *Dshot150*, *Dshot300* ir *Dshot600* skaitmeninius signalus, atsparius trukdžiams, galintis dirbti maksimaliu 50 MHz darbo dažniu ir pasiekti iki 500k eRPM. Elektroninio greičio reguliatoriaus nuolatinė srovė 30A ir tinkamas naudoti su 2-4S LiPo baterija [36].



3.6 pav. ESC *Single Flycolor Raptor Pro 30A 2-4S* [36]

Jis taip pat buvo sukalibruotas pasinaudojus *BLHeliSuite* konfigūratorių. Įjungtas parametras *Brake On Stop*, kurio pagalba galima aktyviai stabdyti, kai reikia mažinti sūkius [37]. Svarbu paminėti, kad programa geba dirbti kartu tik su *Arduino* mikrovaldikliais, todėl vien nustatyti parametrus pasirinktas naudoti *Arduino Uno*, kuris vėliau darbe nebus naudojamas.

Pasirinktas mikrovaldiklis *ESP32* (žr. 3.7 pav.) su integruotu belaidžiu ryšiu, skirtas nesudėtingų prototipų kūrimui, nes su juo yra lengva programuoti. Šios plokštės vykdymo komandų greitis yra 240 MHz, kuris yra daug kartų greitesnis lyginant su *Arduino Uno* arba *Nano* mikrovaldikliais, kuris yra 16 MHz. Turi dviejus režimus neskaitant *USB-C* jungties, tai *Wi-Fi* ir *BT* belaidžius ryšius. Palaiko kelias programavimo kalbas, tai *Arduino IDE*, *ESP-IDF* ir *MicroPython*. Mikrovaldiklis išsiskiria maža kaina ir dideliu efektyvumu. Turi viešas kodavimo bibliotekas ir techninius sprendimus [38].



3.7 pav. *NodeMcu ESP32* mikrovaldiklis su *USB-C* [38]

Pasisukimo kampui nustatyti naudotas *AS5600* (žr. 3.8 pav.) kuris gali labai tiksliai pamatuoti ašies kampą, magnetinio lauko pagalba. Kad jutiklis veiktų magnetas turi turėti du polius per jo skersmenį ir būti pritvirtintas prie besisukančio veleno. Magnetą turi būti padėtas virš esančio magnetinio kampo jutiklio, maksimalus leistinas atstumas – 2 mm. Pagal parametrus, šis modulis veikia 3,3 V įtampa maitinimu ir signalu. Jeigu rezistorius R1 yra nereikalingas, galima naudoti ir 5 V įtampą [39].



3.8 pav. *AS5600* magnetinis kampo jutiklis [39]

Pasirinktas naudoti mažas magnetas (žr. 3.9 pav.) turintis du magnetinius polius, šiaurinį ir pietinį per jo skersmenį. Kad nustatyti šiaurinio poliaus padėtį, naudotas magnetas, pagal kurį magnetinis kampo jutiklis galės nustatyti veleno pasisukimo kampą ir keisti sukimosi greitį prie tam tikro kampo. Turint

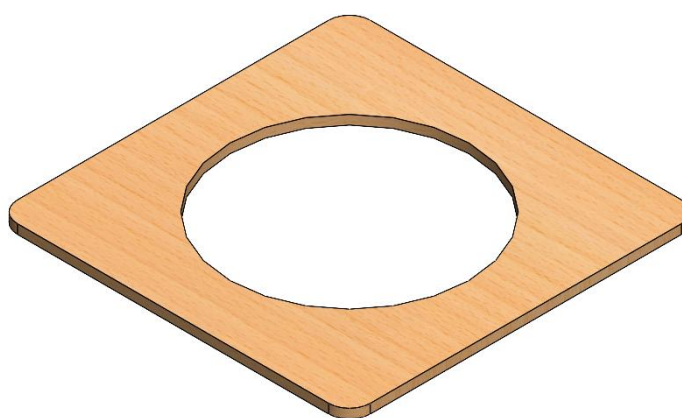
šiaurinių polių galima žinoti kada bus atliekamas vienas apsisukimas, kai jis apsisuks nuo 0° iki 360° , šio magneto skersmuo yra 4 mm, taip pat ir kaip veleno, aukštis – 2mm.



3.9 pav. Magneto šiaurinio poliaus nustatymas

3.3. Suprojektuoti stendo komponentai

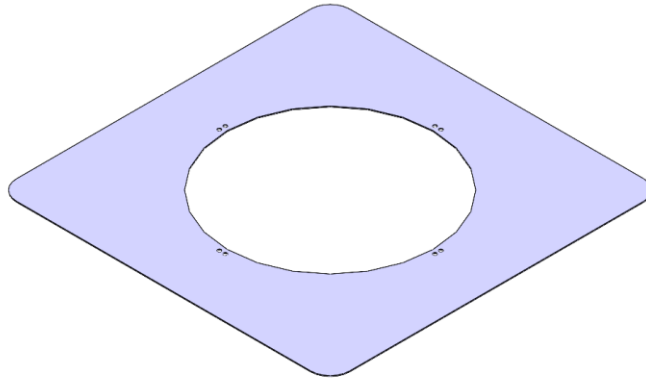
Eksperimentiniam stendui pasirinkta naudoti fanera, siekiant didesnio stabilumo ir nerūdijančio plieno skarda, kuri tvirtinsis prie stendo apatinės dalies. Suprojektuota stendo apatinė dalis (žr. 3.10 pav.), kuri būtų tvirta sukantis propeleriui, jos išmatavimai yra 340 x 340 mm ir 9 mm storio. Taip pat išpjauta ertmė, kurios skersmuo yra 230 mm, kad galėtų tvirtintis kiti suprojektuoti komponentai.



3.10 pav. Stendo apatinė dalis

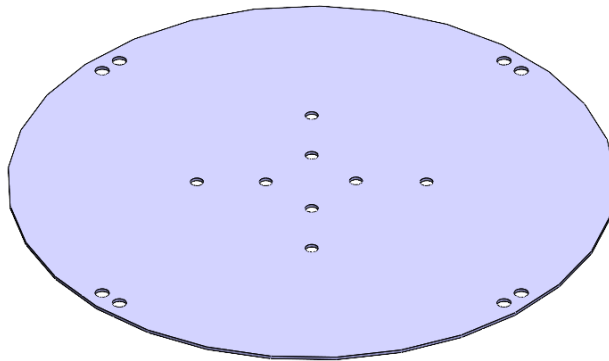
Fenolinė fanera yra vadinama tokia medžiaga, kurios abi paviršiaus dalys yra mirkomos dervoje, kas sukuria stabilų, lygų, patvarų ir asparų vandeniui paviršių. Fenoliniu paviršiumi dengta fanera turi savybes, kurių neturi kitos faneros – tvirtumas, stabilumas, atsparumas trūkiams ir skilimui nuo tvirtinimo komponentų. Ji yra lygi, todėl galima lengvai uždėti kitus komponentus [40].

Suprojektuota stendo išorinė dalis (žr. 3.11 pav.), kuri klijuojama dvipuse 3M juosta prie apatinės dalies. Išoriniai išmatavimai išlieka tokie patys kaip ir apatinės dalies su kampų užapvalinimais, skardos storis – 0,8 mm. Išpjautos skylės skersmuo yra 210 mm, 20 mm mažesnis nei apatinėje dalyje, kad būtų vietos prisukti svorio jutiklius. Jiems padarytos 3,2 mm skermens skylės, 5 mm atstumu nuo vidinės skylės iki jų centrų.



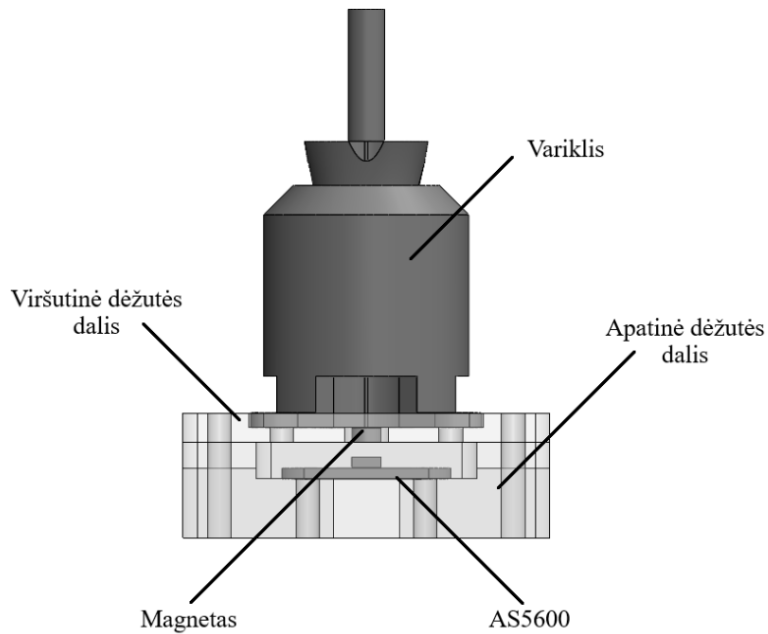
3.11 pav. Stendo išorinė dalis

Vidurinė stendo dalis, kurios skersmuo yra 150 mm ir 0,8 mm storio, taip pat iš nerūdijančio plieno (žr. 3.12 pav.). Šonuose 3,2 mm skermens skylės, 5 mm atstumu nuo sienelių iki skylių centrų, svorio jutiklių tvirtinimui. Viduryje padarytos skylės korpuso konstrukcijos prisukimui. Kadangi vidurinė dalis tvirtinsis prie svorių jutiklių reikia įvertinti jo masę. Panaudojus *Mass Properties* funkciją nustatyta, kad komponento masė yra 110 g arba 1,1 N. Tai svarbu kad neviršytų leistinos jutiklių jėgos, kuri yra lygi 11,78 N.



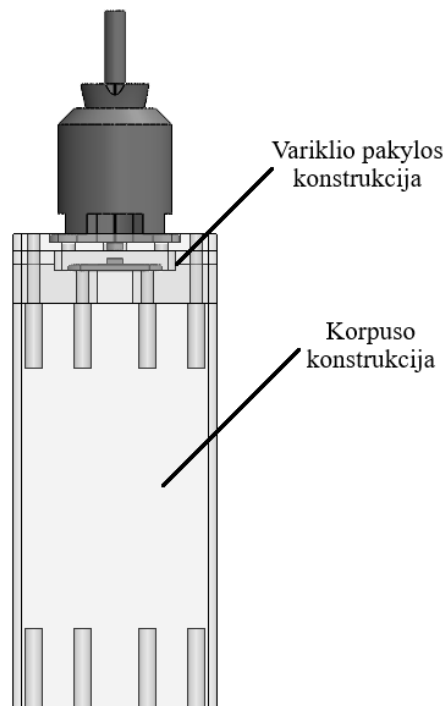
3.12 pav. Stendo vidurinė dalis

Variklio pakyla (žr. 3.13 pav.) skirta varikliui tvirtinti ir magnetinio kampo jutiklio *AS5600* integravimui. kad būtų galima tiksliai nuskaityti rotoriaus sukimosi kampą. Magnetis, priklijuotas prie veleno, kuris kartu sukasi su varikliu ir perduoda sukimosi kampą jutikliui per magnetinį lauką. Jutiklio specifikacijose nurodyta, kad patikimam veikimui reikalingas kuo mažesnis atstumas tarp magneto ir jutiklio, tokiu būdu suprojektuota konstrukcija, kad neviršytų 2 mm. Jutiklis *AS5600* pritvirtintas prie dėžutės apačios ir korpuso konstrukcijos, kuri atspausdinta iš *PET* medžiagos, o ant viršaus viršutinė dėžutės dalis kartu su prisuktu varikliu. Bendras dėžutės aukštis su apatine ir viršutine dalimi yra 15 mm.



3.13 pav. Suprojektuota variklio pakyls konstrukcija su imontuotu kampo jutiklio moduli

Propelerio mechanizmui besisukat arti paviršiaus atsiranda srauto interferencija, kai rotoriaus nuleidžiamas oro srautas atsitrenkia į paviršių ir sukuria aukštesnio slėgio zona po mentėmis. Dėl šios priežasties sumažėja sūkurinės srovės propelerio galuose, sistema tokiu atveju praranda mažiau energijos tačiau susidaro turbulentiškos sūkurinės srovės, kurios neigiamai gali veikti mechanizmo sukimosi stabilumą ir trikdyti matavimų tikslumą [41]. Kadangi eksperimentinio stendo propeleris sukasi nedideliame aukštyje nuo paviršiaus, todėl siekiama sumažinti šio reikškinio įtaką.

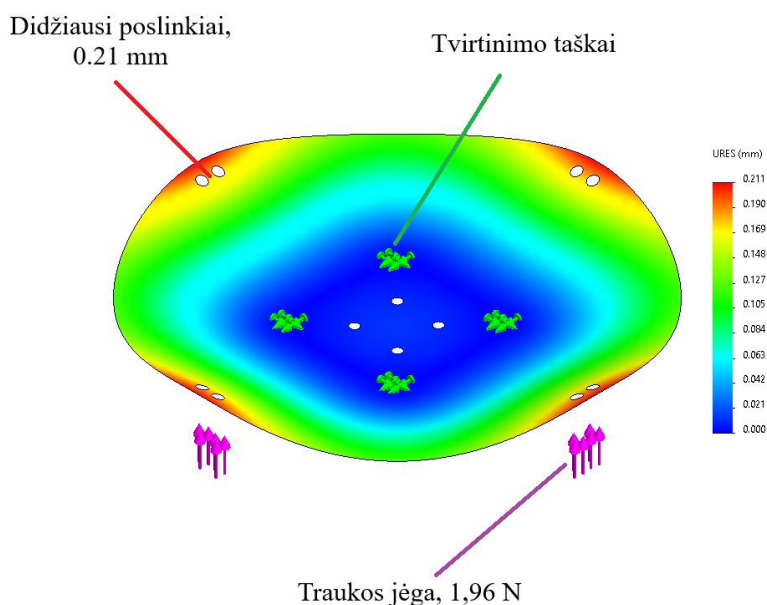


3.14 pav. Korpuso konstrukcija variklio padėčiai paaukštinti dėl srauto interferencijos

Siekiant to, suprojektuota korpuso konstrukcija (žr. 3.14 pav.), kuri pakelia besisukantį propelerio mechanizmą aukščiau nuo paviršiaus. Konstrukcija yra tokio paties pločio ir ilgio kaip variklio pakyla, tačiau jos aukštis siekia 100 mm. Viduje padarytos 4 mm skylės, kad įsistatytų kaitinamos įvorės, prie kurių varžtais prisukama pakylės konstrukcija.

3.4. Suprojektuotų komponentų analizė

Kadangi propelerio mechanizmui besisukant apkrovos yra perduodamos į vidurinę stendo dalį, reikia įsitikinti ar komponentas yra tinkamas naudoti, todėl įvertinami poslinkiai. Teoriškai nustatyta, kad propelerio mechanizmas generuos 1,96 N traukos jėgą, tai galima apskaičiuoti *SolidWorks* platformoje (žr. 3.15 pav.). Atlikus analizę galima pastebėti, kad didžiausi poslinkiai, kurie susidarys yra 0,21 mm. Jie yra maži, todėl didelės įtakos vidurinei daliai neturi.



3.15 pav. Vidurinės dalies poslinkių analizė

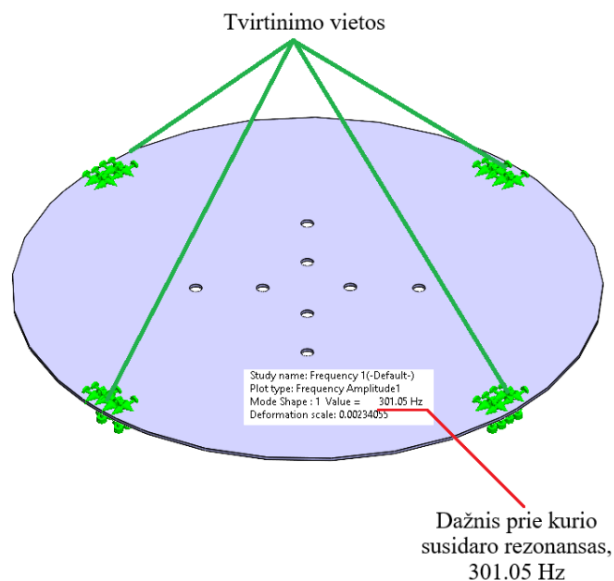
Siekiant užtikrinti tinkamą svorio jutiklių veikimą, atlikta dažninė analizė naudojant *Frequency study* funkciją, kuria įvertinta ar propelerio mechanizmui besisukant konstrukcijoje nesusidarys rezonansas. Pagal analizės rezultatus komponento tvirtinimo vietos nustatomos ties svorio jutiklių tvirtinimo vietomis.

Pagal gautus rezultatus dažninės analizės rezultatus (žr. 3.16 pav.) nustatyta, kad konstrukcijos pirmosios modos rezonansinis dažnis siekia 301 Hz. Kad svorio jutikliai veiktų tiksliai, propelerio mechanizmo sukimosi dažnis turi neviršyti šios ribos, nes konstrukcijoje susidaręs rezonansas iškreipytų matavimų rezultatus. Kadangi propelerio mechanizmo sukimosi dažnis yra 33,3 Hz, tai yra gerokai mažiau nei lestinos ribos, atliktas palyginimas pagal (3.3) formulę.

$$f_m < f_{rz} = 33,3 \text{ Hz} < 305 \text{ Hz} \quad (3.3)$$

čia f_m – propelerio pasirinktas maksimalus sukimosi dažnis, Hz

f_{rz} – dažnis prie kurio įvyksta rezonansas, Hz

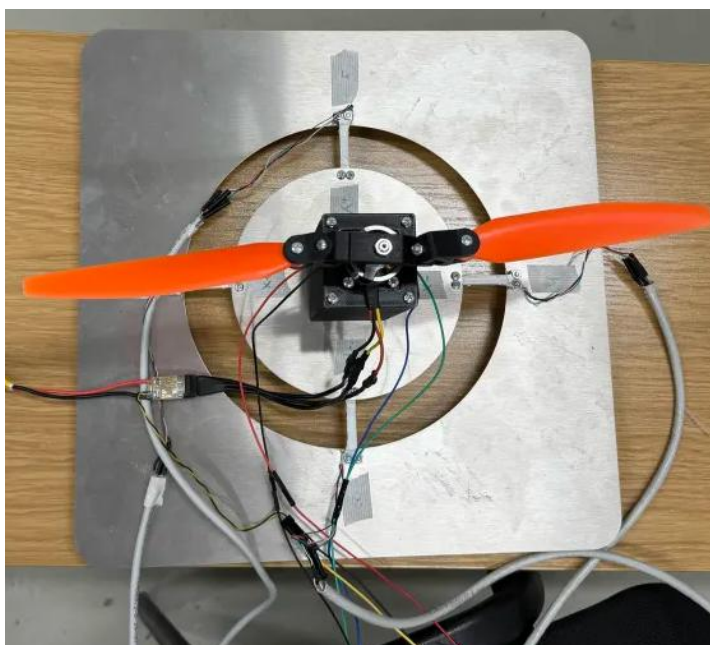


3.16 pav. Vidurinės dalies tvirtinimo vietos ir dažninės analizės pirmos modos rezultatai

Analizės ir skaičiavimų pagalba pasirinkta vidurinės dalies konstrukcija ir medžiaga yra tinkama naudoti gamybai, nes neviršija dažnio prie kurio susidaro rezonansas. Turint visus komponentus įvertinta visų jų masė, kuri veikia jutiklius. Bendra komponentų masė, kuri tvirtinasi ant jutiklių – 390 g arba 3,9 N yra mažiau nei leistina maksimali svorio jutiklių jėga – 11,76 N.

3.5. Sumontuotas eksperimentinis stendas

Sumontuotas eksperimentinis stendas (žr. 3.17 pav.) su komponentais ir propelerio mechanizmu. Centre yra variklis su pagamintu propeleriu ir tvirtinimo mazgais, kurie leidžia keisti mentės žingsnį. Apkrovos veikiančios besisukant varikliui perduodamos į vidurinę stendo dalį, kuri atlaiko jėgas ir rezultatai matuojami po jais pritvirtintais svorio jutikliais.



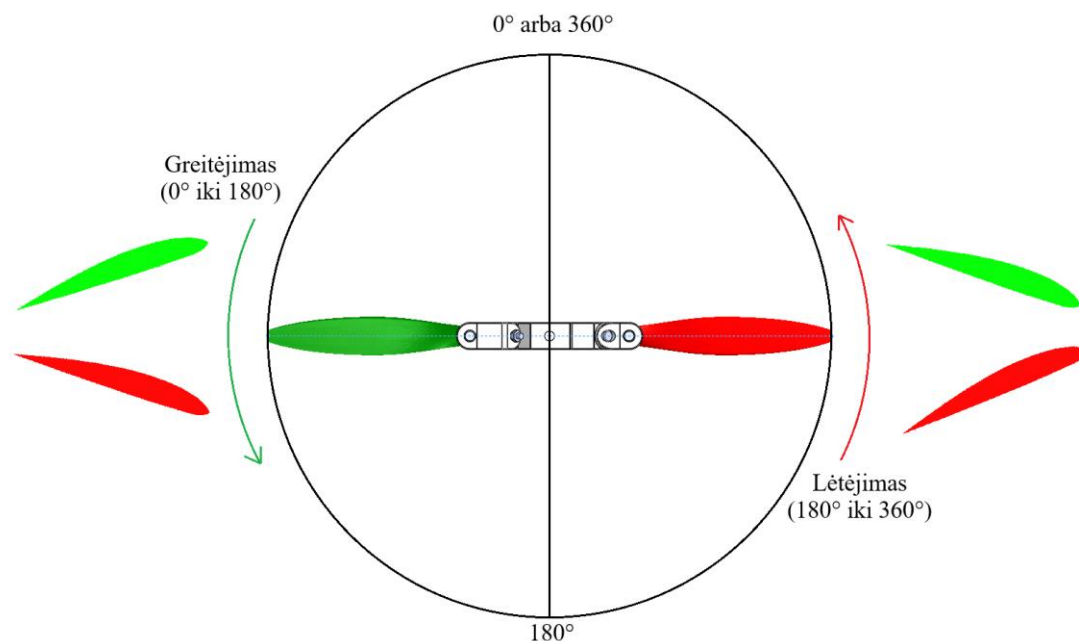
3.17 pav. Sumontuotas eksperimentinis stendas su besisukančiu propeleriu

4. Krypties valdymo algoritmai

Šiame skyriuje aprašomas sukurtas krypties valdymo algoritmas naudojant sumontuotą eksperimentinį bandymų stendą. Aprašomas valdymo algoritmas ir jo veikimas paremtas priklausomybe nuo rotoriaus pasisukimo kampo. Pateikiama elektros funkcinė schema, kurioje apibrėžiami elektronikos komponentai ir jų tarpusavio ryšiai. Atliekami valdymo signalo skaičiavimai ir lyginami dviejų skirtingi valdymo signalai.

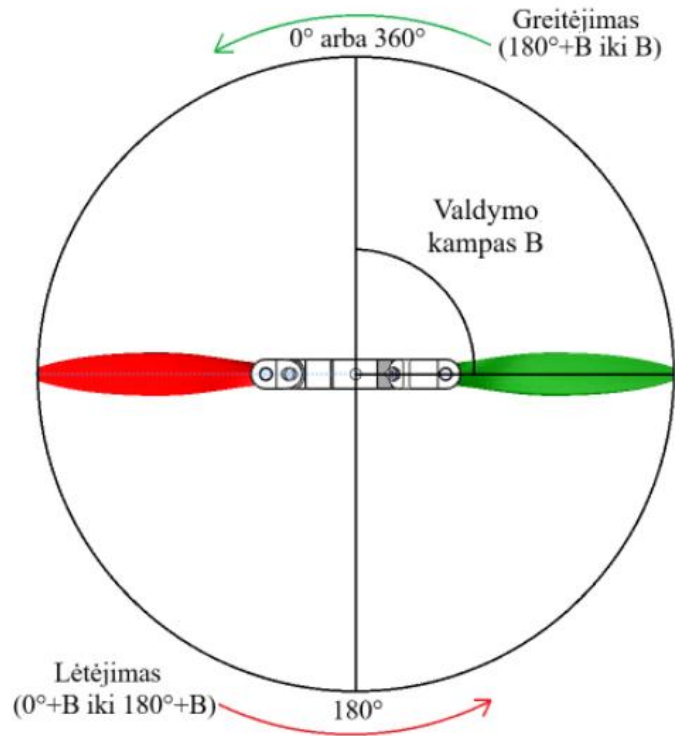
4.1. Algoritmo veikimas

Kad propelerio mechanizmo tvirtinimo mazgai galėtų sukintėti per vietas, kur vidurinė dalis yra sujungta su laikikliais, jis privalo turėti bent du skirtingus režimus per vieną apsisukimą – greitėjimo ir lėtėjimo [1]. Siekiant sumažinti vibracijas ir palengvinti propelerio valdymą, pasirinkta, kad per vieną apsisukimą propeleris vieną kartą greitėja ir lėtėja. Pagal paveikslėlį (žr. 4.1 pav.) matyti kai pasisukimo kampas yra tarp 0° ir 360° . Nuo sukimosi pradžios taško 0° pagreitis didėja, tuo pačiu didėja ir sukimosi greitis. Pasiėkus 180° pagreitis pradeda mažėti, tuo pačiu ir greitis iki kol pasiekia 360° ribą. Tokiu principu algoritmo veikimas skirstomas į dvi zonas – greitėjimo ir lėtėjimo. Greitėjimo, kai kampinis pagreitis didėja, todėl kampinis pagreitis yra teigiamas $a_n > 0$, o lėtėjimo, kai kampinis pagreitis mažėja ir jis yra neigiamas $a_n < 0$. Šonuose pateikti abiejų menčių pasisukimai, kai yra greitinama ir lėtinama.



4.1 pav. Propelerio mechanizmo pagreičio valdymo algoritmas su menčių pasisukimu

Pasirinkta, kad propeleris turi 2 režimus per apsisukimą, jis turi gebėti keisti šių režimų pasiskirtymą kampo atžvilgiu. Tai padaryta įvedant valdymo kampą B (žr. 4.2 pav.), kuris leidžia perkelti taškus, kuriuose prasideda ir baigiasi greitėjo arba lėtėjimo etapai. Keičiant valdymo kampą B, šie etapai pasislenka kampo atžvilgiu, todėl galima valdyti kuriame sukimosi intervale bus didžiausias dažnis ir didžiausia generuojama trauka, kas leis optimizuoti propelerio darbą jam besisukant.



4.2 pav. Propelerio mechanizmo pagreičio valdymo algoritmas su valdymo kampū B

Sudarytas valdymo modelis (4.1) naudojant kampo padėties, sukimosi dažnio ir kampinio pagreičio nustatymui, remiantis duomenimis iš *AS5600* magnetinio kampo jutiklio. Šis modelis leidžia realiu laiku, įvertinti variklio sukimosi parametrus ir pritaikyti valdymo algoritmams.

$$\left\{ \begin{array}{l} u_n = u_A \cdot \sin(\theta_n) + u_B; \\ \theta_n = \begin{cases} \theta_2 - \theta_1; & \theta_1 \leq \theta_2 \\ (360 - \theta_1) + \theta_2; & \theta_2 < \theta_1 \end{cases} \\ f_n = \frac{\theta_n}{360 \cdot \Delta t_n} \\ a_n = \frac{f_n - f_{n-1}}{\Delta t_n} \end{array} \right. \quad (4.1)$$

Pirmiausia yra įvertinamas kampo pokytis θ_n kai reiškmės pereina 360° ribą. Tai naudojama, kad būtų išvengta neteisingų duomenų matavimų ir užtikrintų kampo tęstinumą, kuris būtų tarp 0° ir 360° reikšmių.

Toliau apskaičiuotas sukimosi dažnis f_n , kuris apskaičiuojamas pagal kampo pokyčio ir laiko intervalo santykį. Pagal šitą dydį galima matyti koku greičiu sukasi variklis, siekiant įvertinti greitį prie tam tikro pasisukimo kampo.

Apskaičiuotas kampinis pagreitis a_n , kuris apibrėžia dažnio pokytį per laiko vienetą. Juo galima įvertinti kaip greitai kinta sukimosi greitis. Jo pagalba galima analizuoti greitėjimą ir lėtėjimą bei sistemos valdymo greitį.

Valdymo signalui u_n nustatyta kaip sinusinė funkcija, tokiu metodu galima valdyti galią pagal periodą, kad sumažinti įmanomus trikdžius ir vėlavimus siunčiant galios didėjimo arba mažėjimo signalą.

4.2. Valdymo signalo skaičiavimai

Pagal sudarytą valdymo modelį atliekami skaičiavimai, kurio metu nustatomi valdymo signalo parametrai ir sudaromi grafikai. Valdymo signalas u_n modeliuojamas kaip tolydi sinusinė funkcija, ji apskaičiuojama pagal (4.2) formulę.

$$u_n = u_A \cdot \sin(\theta) + u_B \quad (4.2)$$

čia u – valdymo signalas, %

θ – pasisukimo kampas, °

u_A – amplitudė, %

u_B – vidurinė linija, %

Siekiant apskačiuoti valdymo signalą u_n reikia įvertinti signalo u_A amplitudę ir vidurinę liniją u_B , kurių pagalba apibrėžia signalo svyravimo ribas. Tai apskaičiuota (4.3) ir (4.4) formulėmis.

$$u_A = \frac{u_{max} - u_{min}}{2} \quad (4.3)$$

čia u_A – amplitudė, %

u_{max} – didžiausia signalo valdymo reikšmė, %

u_{min} – mažiausia signalo valdymo reikšmė, %

$$u_B = \frac{u_{max} + u_{min}}{2} \quad (4.4)$$

čia u_B – vidurio linija, %

Apskaičiuotas kampo pokytis įvertinant 360° maksimalią ribą pagal (4.5) formulę.

$$\theta_n = \begin{cases} \theta_2 - \theta_1, & \theta_1 \leq \theta_2 \\ ((360 - \theta_1) + \theta_2), & \theta_2 < \theta_1 \end{cases} \quad (4.5)$$

čia θ_n – kampo pokytis, °

θ_1 – pradinis kampas, °

θ_2 – sekantis kampas, °

Kampo laipsniais konvertavimas į radianus pagal (4.6) formulę.

$$\theta_{rad} = \theta_n \cdot \frac{\pi}{180} \quad (4.6)$$

čia θ_{rad} – kampas radianais, rad

θ_n – kampas laipsniais, °

Apskaičiuotas realus sukimosi dažnis pagal kampo ir laiko pokyčių santykį naudojant (4.7) formule.

$$f_n = \frac{\theta_n}{360 \cdot \Delta t} \quad (4.7)$$

čia f_n – sukimosi dažnis, Hz

θ_n – kampinis pokytis, °

Δt – laiko skirtumas, s

Apskaičiuotas realus kampinis pagreitis, kaip kinta dažnis per tam tikrą laiko vienetą pagal (4.8) formule.

$$a_n = 2\pi \cdot \left(\frac{f_n - f_{n-1}}{\Delta t} \right) \quad (4.8)$$

čia a_n – pagreitis, rad/s²

f_n – skaitomas sukimosi dažnis, Hz

f_{n-1} – prieš tai nuskaitytas sukimosi dažnis, Hz

Δt – laiko skirtumas, s

Apskaičiuotas valdymo signalo greitis per valdymo signalų laiko skirtumą, pagal (4.9) formule.

$$v_u = \frac{u_n - u_{n-1}}{\Delta t} \quad (4.9)$$

čia v_u – valdymo signalo greitis, %/s

u_n – dabartinis valdymo signalas, %

u_{n-1} – ankstesnis valdymo signalas, %

Δt – laiko skirtumas, %

Duomenims analizuoti naudotas slenkantis vidurkis padedantis suvidurkinti duomenis pagal pasirinktą duomenų kiekį. Apskaičiuotas pagal (4.10) formule.

$$S_{vid} = \frac{1}{K} \sum_{i=n-k+1}^n p_i \quad (4.10)$$

čia S_{vid} – slenkantis vidurkis

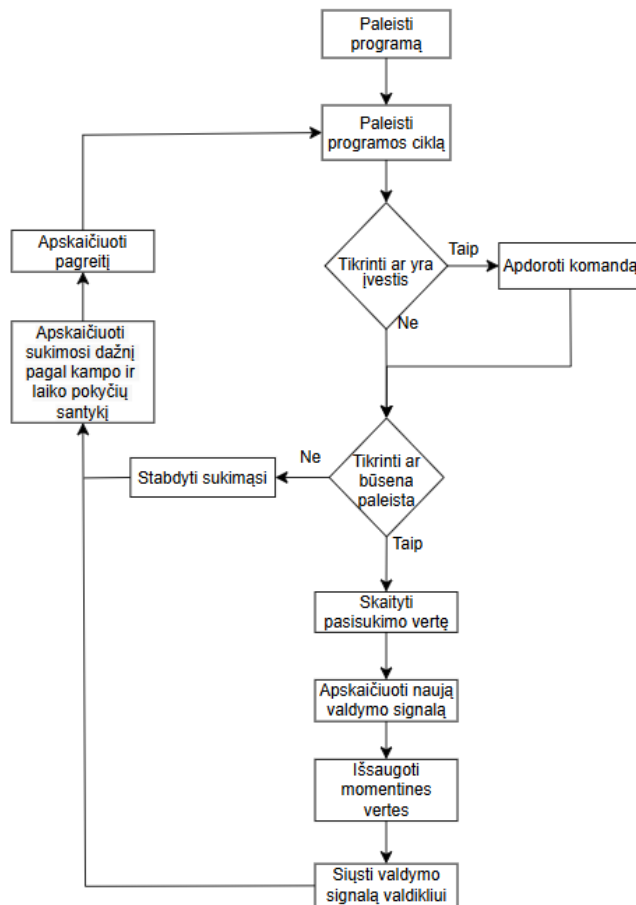
K – lango dydis arba iš kiek reiškmių daromas vidurkis

p_i – duomenų reikšmės

$i = n - k + 1 \dots n$ – paskutinės K reikšmės

4.3. Algoritmo veikimo schema

Programos veikimo algoritmas sudarytas taip, kad užtirtų nuolatinį ir patikimą įrenginio valdymą realiuoju laiku. Algoritmo veikimo schemoje (žr. 4.3 pav.) programa pradeda darbą nuo ciklo paleidimo. Kiekvieno ciklo metu pirmiausia yra tikrinama, ar yra gautas įvesties signalas iš serijinės įvesties. Jeigu yra įvestis – komanda yra apdorojama, nuskaitomi duomenys ir ciklas yra tęsiamas toliau. Jei įvesties nėra pereinama prie kito patikrinimo ar sistema šiuo metu yra paleistoje būsenoje. Sistema paleista, nuskaitoma dabartinė variklio pasisukimo vertė iš pasisukimo kampo jutiklio. Nuskaityti duomenys panaudojami naujam valdymo signalui apskaičiuoti. Išsaugomos momentinės vertės, leidžiančios sekti duomenis.



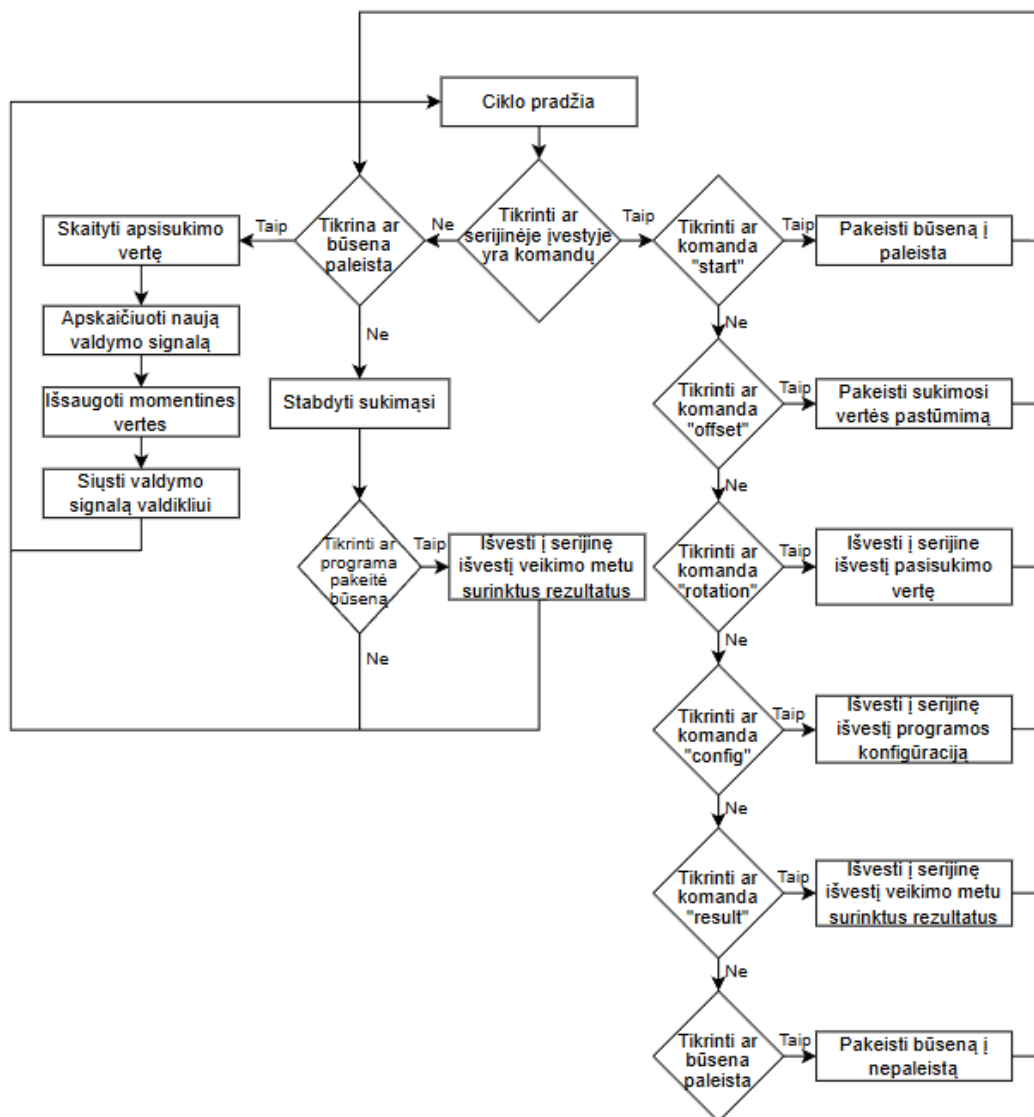
4.3 pav. Algoritmo veikimo schema

Apskaičiuotas sukimosi dažnis pagal kampo ir laiko pokyčių santykį, taip pat ir pagreitis naudojant išsaugotas momentines vertes. Apskaičiuotas valdymo signalas siunčiamas valdikliui, kuris

reguliuoja variklio darbą. Jeigu sistema nėra paleista, siunčiamas stabdymo signalas, kuris sustabdo variklį. Ciklas yra kartojamas iš naujo, kol programa yra sustabdyta.

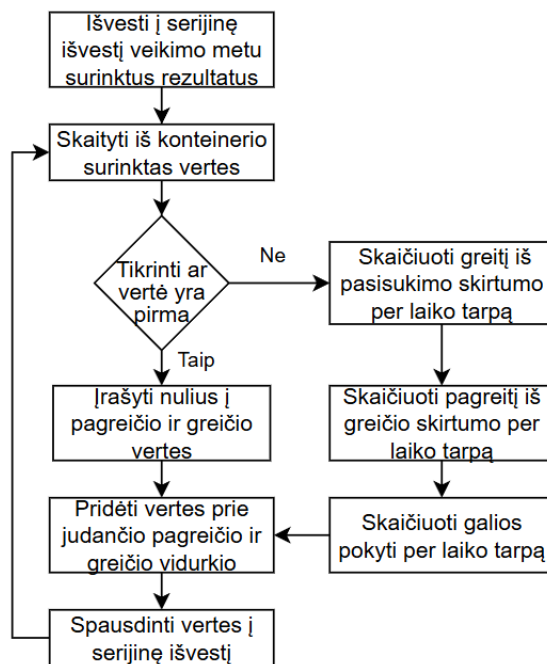
4.4. Programos algoritmo schema

Programos valdymas prasideda nuo pačio pagrindinio ciklo (žr. 4.4 pav.), kuriame tikrinama ar serijinėje įvestyje yra įvestų komandų. Jeigu komanda aptinkama, ji identifikuojama ir vykdomas paleidimas su *start* komanda. Sukimosi vertės pastūmimą arba kitaip valdymo kampą galima koreguoti komanda *offset*. *Rotation* išveda esamą kampo reikšmę. *Config* pateikia sistemos parametrus, o *result* komanda išvedami veikimo metu gauti rezultatai.



4.4 pav. Pagrindinė programos veikimo schema

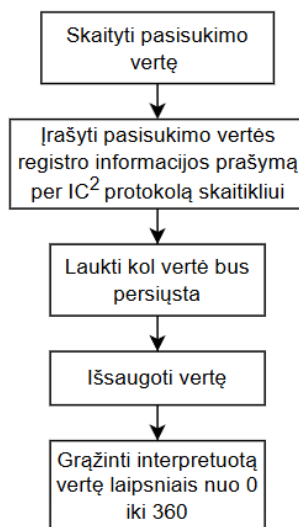
Jeigu sistema paleista yra toliau vykdomas sistemos valdymo algoritmas, nuskaitomas variklio pasisukimo kampas ir pagal jį skaičiuojamas naujas valdymo signalas. Išsaugomos momentinės reikšmės ir siunčiamas naujas signalas varikliui. Variklis yra stabdomas, jeigu sistema nėra paleista, o prieš tai išsaugoti duomenys pateikiami į serijinę išvestį. Tokiu metodu yra užtikrinamas nuoseklus režimas leidžiantis tarp variklio sukimosi ir stabdymo bei duomenų analizės po veikimo ciklo.



4.5 pav. Duomenų apdorojimo schema

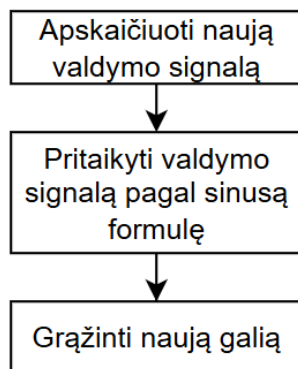
Duomenys yra saugomi *buffer*, iš kur jie yra nuosekliai skaitomi. Pirmosios greičio ir pagreičio vertės matavimo metu yra laikomos nuliui (žr. 4.5 pav.), nes nėra prieš tai esančių verčių skaitymui. Po to skaičiuojamas sukimosi greitis, įvertinant pasisukimo kampo pokytį per laiko tarpą. Pagal apskaičiuotą greitį, apskaičiuojamas kampinis pagreitis. Taip pat įvertinimas valdymo signalo pokytis per laiką, kuris leidžia analizuoti kaip keičiasi valdymo signalas.

Pagal pasisukimo nuskaitymo schemą (žr. 4.6 pav.) pirmiausia yra nuskaitymas pasisukimo kampas su I²C ryšio protokolu. Tada kampinio pasisukimo jutiklis perduoda duomenis apie savo pasisukimo vietą. Gauta reikšmė išsaugoma ir naudojamas laipsniais intervale nuo 0° iki 360°. Tokiu metodu užtikrinamas tikslus variklio nustatymas, kuris naudojamas algoritmo skaičiavimui.



4.6 pav. Pasisukimo nuskaitymo schema

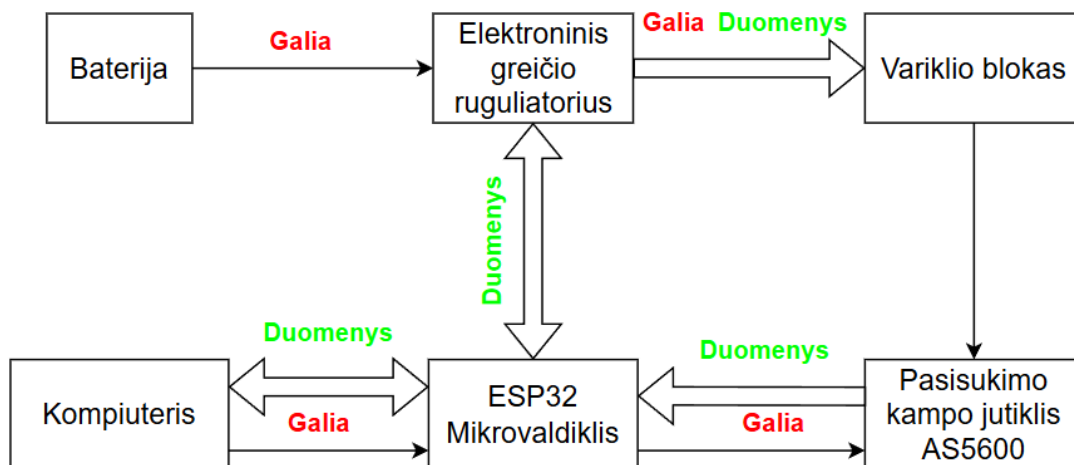
Valdymo signalas apskaičiuojamas taikant sinusinę priklausomybę nuo rotoriaus pasisukimo kampo (žr. 4.7 pav.) Variklio valdymo signalas naudojamas kaip funkcija, kuri leidžia keisti galią priklausomai nuo pasisukimo kampo, išvengiant staigių greičio šokinėjimu.



4.7 pav. Valdymo signalo skaičiavimo schema

4.5. Elektronikos komponentų funkcinė schema

Nubraižyta elektronikos komponentų funkcinė schema (žr. 4.8 pav.) pagal kurią išdėstyti elektros komponentai ir jų ryšiai. Raudona spalva parašyta galia, kur reikalinga elektros srovė ir žalia kur yra siunčiami ir skaitomi duomenys. Abipusės rodyklės tarp kompiuterio ir *ESP32* mikrovaldiklio yra todėl, kad atgal yra siunčiami duomenys ir braižomi grafikai.

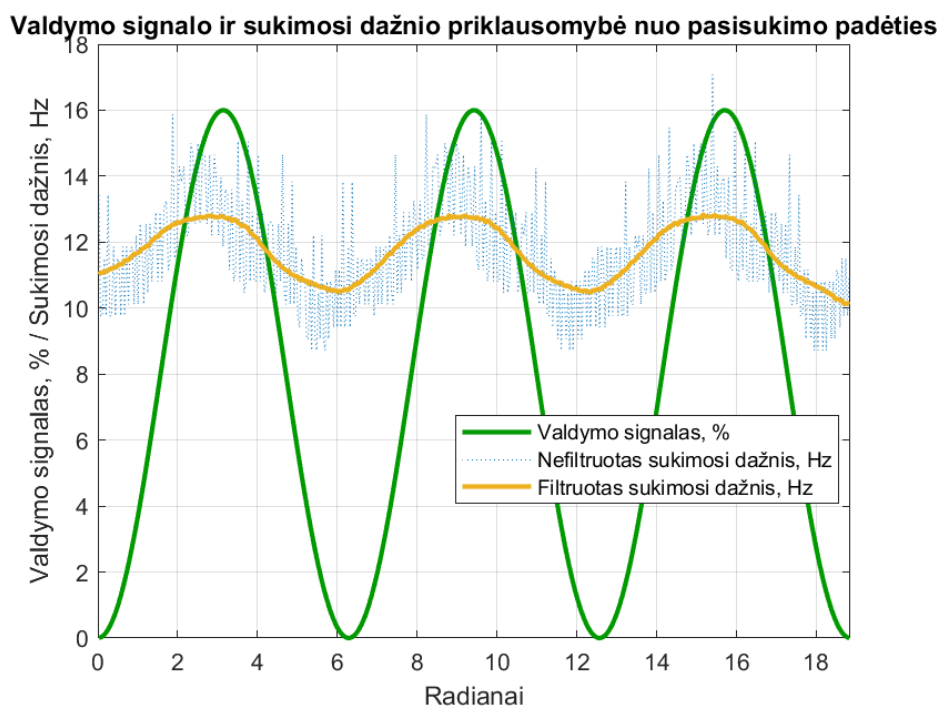


4.8 pav. Elektronikos komponentų funkcinė schema

Pagal nubraižytą schemą, baterija paduoda galią į elektroninį greičio reguliatorių – *ESC*, kuris taip pat perduoda galią ir siunčia valdymo signalą į variklio bloką. Variklio blokas yra todėl, nes susideda iš variklio ir pagamintos pakylės, kurioje yra magnetas ir jam besisukant kartu su varikliu, dėl dviejų polių išsidėstymo per jo skersmenį, siunčiami duomenys į magnetinį kampo jutiklį *AS5600*. Iš jutiklio duomenys yra perduodami į mikrovaldiklį *ESP32*, kuris siunčia ir gauna duomenis iš *ESC*. Taip pat ir siunčia gautus rezultatus į kompiuterį iš kurio yra siunčiamas algoritmo kodas į mikrovaldiklį. Galia yra perduodama iš kompiuterio per *USB-C* jungtį į mikrovaldiklį, kuris perduoda galią į *AS5600* kampo pasisukimo jutiklį.

4.6. Valdymo signalas pagal pilną sinusoidę

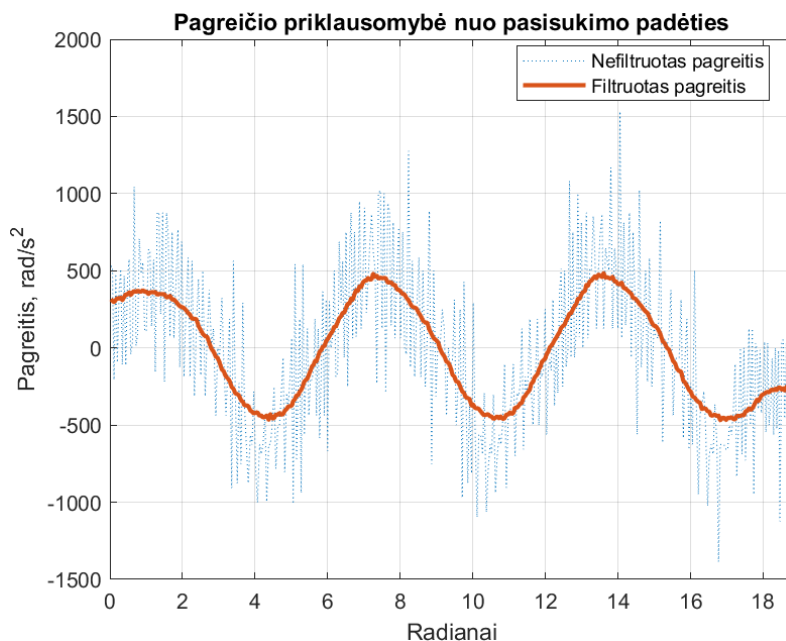
Šios formulės pritaikytos skaičiuoti naudojant *Arduino IDE* programą, ji palaiko *C* ir *C++* programavimo kalbas. Kadangi pasirinktas mikrovaldiklis *ESP32* nėra palaikomas *Arduino* programos, buvo įrašytas *espressif* paketas, kurio pakalpa galima naudoti pasirinktą mikrovaldiklį tyrimui. Programavimui naudoti pasirinkta *DShotRTM* biblioteka naudojant *DShot300* valdymo signalą valdant *Single Flycolor Raptor Pro* elektroninį greičio reguliatorių [42].



4.9 pav. Valdymo signalo ir sukimosi dažnio priklausomybė nuo pasisukimo padėties

Pasirinkta, kad didžiausia valdymo signalo reikšmė yra 16%, o mažiausia 0% (žr. 4.9 pav.), turint šiuos parametrus pagal aprašytą algoritmą, siunčiamas valdymo signalas į elektroninį greičio reguliatorių. Grafikams braižyti naudota *MATLAB* programa, kurios pagalba galima pritaikyti slenkančio vidurkio funkcija duomenims apdoroti dėl galimų trikdžių. Vienas periodas yra lygus vienam pilnam apsisukimui. Pasisukimo kampas yra matuojamas radianais, kurio vienas apsisukimas yra lygus 2π . Žalia kreivė kinta sinusoidės forma, pradžioje didėja, pasiekia maksimalią signalo reikšmę ties 3,1 radianais ir mažėja iki minimumo ties 6,2 radianais ir vėl pradeda kilti. Punktyrinė mėlyna spalva vaizduoja neapdorotą sukimosi greitį, kur matomi svyravimai ir triukšmai. Geltona spalva tai filtruotas greitis, kuris aiškiau parodo propelerio sukimosi dažnį. Didžiausias sukimosi dažnis yra 12,8 Hz, ties 0,75 radianais ir mažiausias 10,2 Hz ties 4,8 radianais.

Grafike (žr. 4.10 pav.) pavaizduota pagreičio priklausomybė nuo pasisukimo padėties. Punktyrinė mėlyna spalva vaizduoja neapdorotą pagreičio signalą su triukšmu ir svyravimais, o raudona filtruotą pagreitį. Pradžioje pagreitis didėja iki kol pasiekia maksimalią reikšmę ties 0,94 radianais ir mažėja iki minimumo reikšmės ties 4,4 radianais.

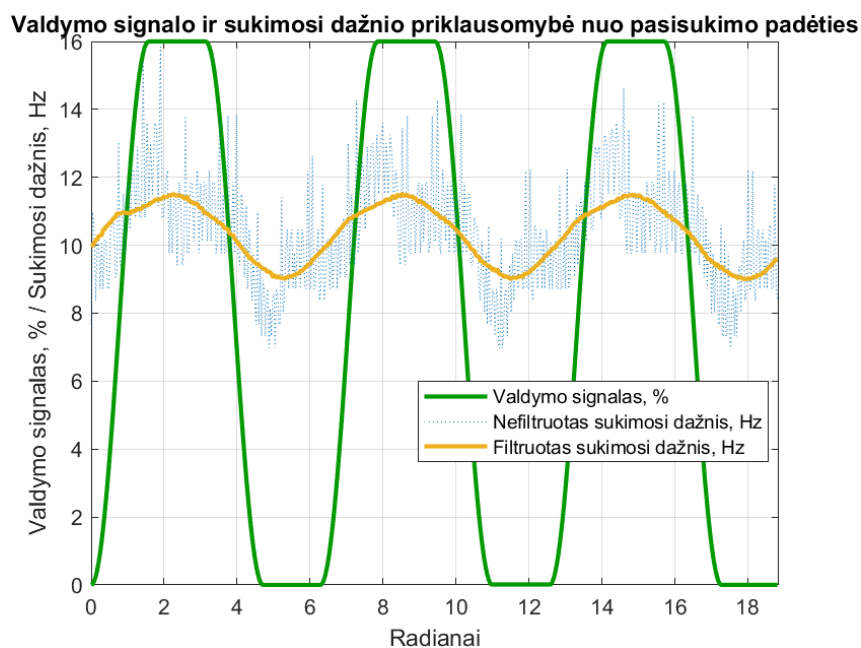


4.10 pav. Pagreičio priklausomybė nuo pasisukimo padėties

Pagal gautus duomenis, apskaičiuota, kad magnetinis campo jutiklis gali atlikti 126 matavimus per vieną apsisukimą, kai didžiausias valdymo signalas yra 16% ir mažiausias 0%. Vidutinis valdymo signalas yra 8% kai valdymo signalas siunčiamas sinusoide ir propelerio vidutinis sukimosi dažnis yra 11,5 Hz.

4.7. Valdymo signalas pagal sinusoidę su ilgesniu stabdymu

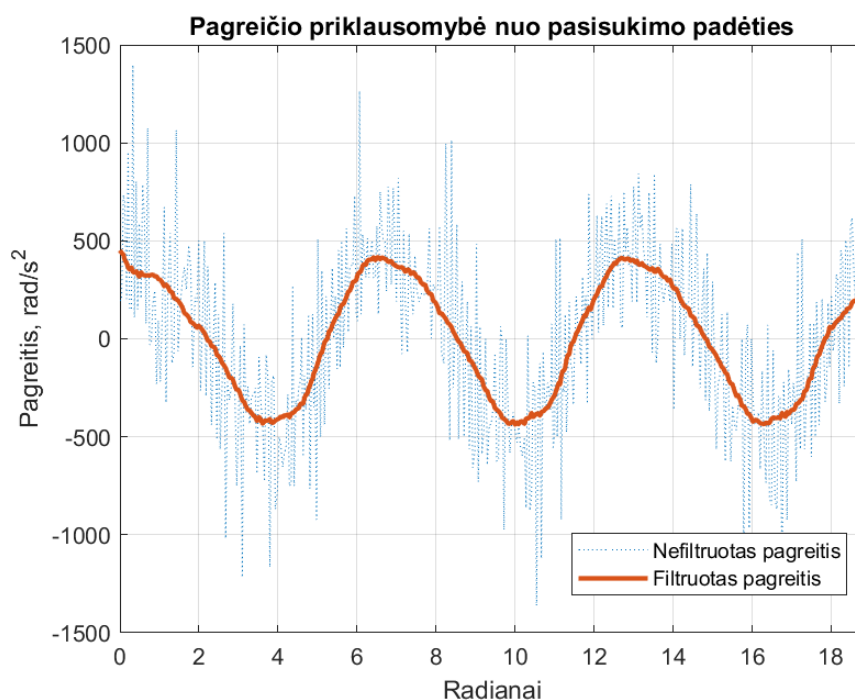
Alternatyviam propelerio valdymui pasirinkta naudoti tos pačios maksimumo 16% ir minimumo 0% signalo vertės, tačiau greitėjimo ir lėtėjimo fazės yra du kartus trumpesnės, tai reiškia, kad vietoj 180° greitėjimo ir lėtėjimo yra 90°.



4.11 pav. Valdymo signalo ir sukimosi dažnio priklausomybė nuo pasisukimo padėties su ilgesniu stabdymu

Tai galima įsivaizduoti taip, kad nuo 0 iki 90° vyksta greitėjimas, 90° - 180° maksimalaus signalo vertė, 180° - 270° lėtėjimas ir minimalaus signalo vertė 270°-360°, kai yra 90° laipsnių valdymo kampas, kadangi sinusoidė prasideda nuo koordinatinių pradžių taško. Paveikslėlyje (žr. 4.11 pav.) pateikta būtent šio valdymo signalo ir sukimosi dažnio priklausomybė, kai yra ilgesnis stabdymo kelias.

Grafike vienas periodas yra lygus vienam apsisukimui, kuris yra lygus 2π . Žalia kreivė yra valdymo signalas, kuris yra panašus į sinusoidės formą, tačiau maksimalaus ir minimalaus valdymo signalo vertės trunka ilgiau. Neapdorotas sukimosi greitis yra pavaizduotas punktyrine mėlyna spalva ir geltona realus sukimosi greitis. Iš pradžių vyksta greitėjimas iki kol pasiekia maksimumą 11,45 Hz ties 2,1 radianais ir po to pradeda lėtėti iki 9 Hz ties 5,3 radianais ir palaiko žemą valdymo signalą iki kito apsisukimo.



4.12 pav. Pagreičio priklausomybė nuo pasisukimo padėties su ilgesniu stabdymu

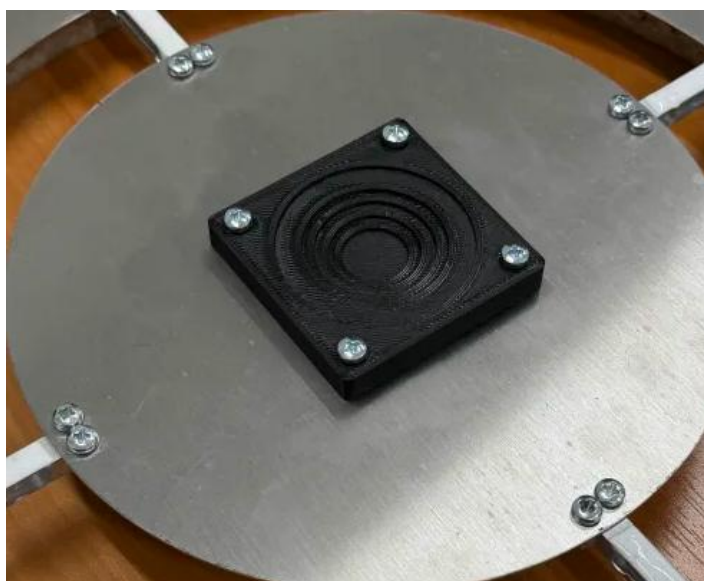
Grafike (žr. 4.12 pav.) pagreičio priklausomybė nuo pasisukimo kampo padėties, kai yra ilgesnis stabdymas. Mėlyna punktyrinė spalva žymi neapdorotą pagreičio signalą, o raudoną apdorotą. Pradžioje pagreitis yra pasiekęs maksimalią reikšmę ir mažėja iki kol pasiekia 3,7 pasisukimo vertę ir po vėl kyla. Kampo jutiklis šiuo metodu atliko 116 matavimus per vieną apsisukimą, kai vidutinis sukimosi greitis buvo 10,2 Hz ir valdymo signalas 7,1%.

5. Traukos jėgos vektoriaus krypties ir momento skaičiavimas

Šiame skyrelyje aprašomi atlikti eksperimentiniai tyrimai ir gauti rezultatai. Atliktas svorio jutiklių kalibravimas naudojant etaloninius svarelius. Nustatyta traukos vektoriaus padėtis koordinačių sistemoje esant skirtingams valdymo kampams. Atliktas dviejų skirtingų signalų palyginimas, vertinant jų traukos jėgą ir sukimosi momentus.

5.1. Jėgos jutiklių kalibravimas

Prieš pradant atlikti traukos tyrimus, pirmiausia reikia atlikti jėgos jutiklių kalibravimą, o tai galima padaryti apskaičiuojant jų koeficientus, kurie parodo kiek pasikeičia jutiklio signalas, kai pasikeičia svoris, o dauginant iš šio koeficiento duomenys yra konvertuojami į gramus. Kad kuo tiksliau atlikti svorio jutiklių kalibravimą, buvo suprojektuota ir 3D atspausdinta detalė (žr. 5.1 pav.) leidžianti sudėti svarelius kuo įmanoma daugiau per centrą, visų jutiklių atžvilgiu.



5.1 pav. Suprojektuota ir pagaminta detalė leidžianti tiksliai atlikti kalibravimą

Kalibravimui pasirinkti etaloniniai svareliai su skirtingomis masėmis (žr. 5.2 pav.). Paveikslėlyje pateikti 20, 50, 100, 200 ir 500 gramų svareliai, kurie buvo naudojami svorio jutiklių kalibravimui. Kad matuoti siučiamą svorių jutiklių signalą pasinaudota *MATLAB Ni* biblioteka, kurių vertės spausdinamos į komandų langą ir galima išsaugoti ir naudoti skaičiavimams [43].

Pasinaudojus *MATLAB* kodu, kuris parašytas taip, kad iš eilės dedami svareliai ir atimamos vertės, kai ant stendo paviršiaus yra prisukta tik kalibravimui skirta detalė. Kalibravimo konstantos apskaičiuotos pagal (5.1) formulę.

$$k = \frac{m}{A - A_0} \quad (5.1)$$

čia m – žinomas svarelio svoris, g

A – jutiklio išmatuotas signalas esant apkrovai

A_0 – jutiklio išmatuotas signalas be apkrovos



5.2 pav. Naudoti etaloniniai svareliai svorio jutiklių kalibravimui

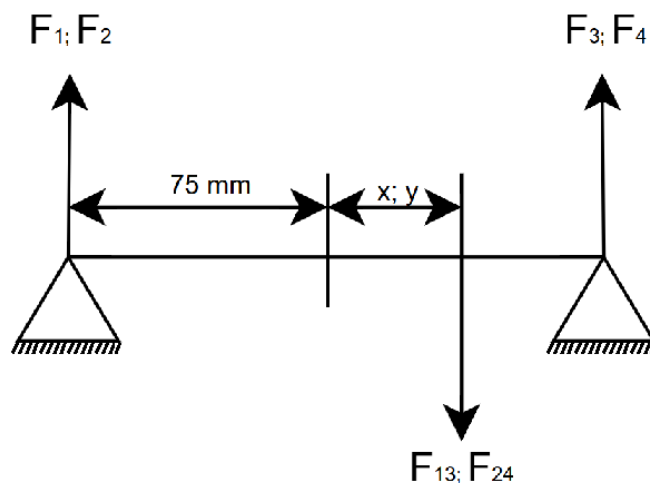
Kalibravimo konstantos pateiktos antroje lentelėje pagal jų prijungtą ir siunčiamą kanalo signalą. Matavimai atlikti 5 kartus ir paimtos jų vidurkių reikšmės, kad kiek įmanoma tiksliau būtų galima gauti kalibravimo konstantas.

2 lentelė. Svorio jutiklių kalibravimo konstantos

	Pirmas kanalas, 10^6	Antras kanalas, 10^6	Trečias kanalas, 10^6	Ketvirtas kanalas, 10^6
1 matavimas	1,269	1,297	1,197	1,361
2 matavimas	1,362	1,306	1,247	1,323
3 matavimas	1,224	1,308	1,189	1,375
4 matavimas	1,265	1,263	1,214	1,339
5 matavimas	1,261	1,260	1,209	1,340
Matavimų vidurkis	1,276	1,287	1,211	1,3479

5.2. Traukos padėties nustatymo skaičiavimas

Toliau ant stendo buvo sužymėtos x , $-x$, y ir $-y$ ašys, kurių pagalba bus galima žinoti, kurioje stendo vietoje yra traukos kryptis. Sudarytos dvi statinės lygtys x (5.2) ir y (5.3) ašims pagal nubražyta jėgų veikimo schemą (žr. 5.3 pav.). Vidurinė dalis kuri yra 150 mm skermens, pažymėti svorio jutikliai ir jų veikiamos jėgos, kartu su bendra veikiamą jėgų suma ir atstumu iki jėgos veikiamo taško, jutikliams esant vienam priešais kitą. Jėga priklausomai nuo jutiklio padėties turi savo numerį, tai 1 ir 3, 2 ir 4, jutikliai esantys vienas priešais kitą.



5.3 pav. Jėgų veikimo statinė schema ieškant x ir y verčių

Sudaryta lygtis surasti x taškui:

$$-F_3 \cdot (150 + (75 + x)) \cdot F_{13} = 0 \quad (5.2)$$

čia F_{13} – pirmo ir trečio jutiklių išmatuota suma, N

F_3 – trečiojo jutiklio išmatuota jėga, N

x – atstumas nuo vidurinės dalies centro iki jėgos taško x ašimi, mm

Sudaryta lygtis surasti y taškui:

$$-F_4 \cdot (150 + (75 + y)) \cdot F_{24} = 0 \quad (5.3)$$

čia F – antro ir ketvirto jutiklių išmatuota suma, N

F_4 – ketvirto jutiklio išmatuota jėga, N

y – atstumas nuo vidurinės dalies centro iki jėgos taško y ašimi, mm

Iš šių lygčių išvedamos x ir y reikšmės, kurių pagalba bus galima žinoti, kurioje disko dalyje yra traukos kryptis. Pagal (5.4) ir (5.5) formules apskaičiuotos jų reikšmės.

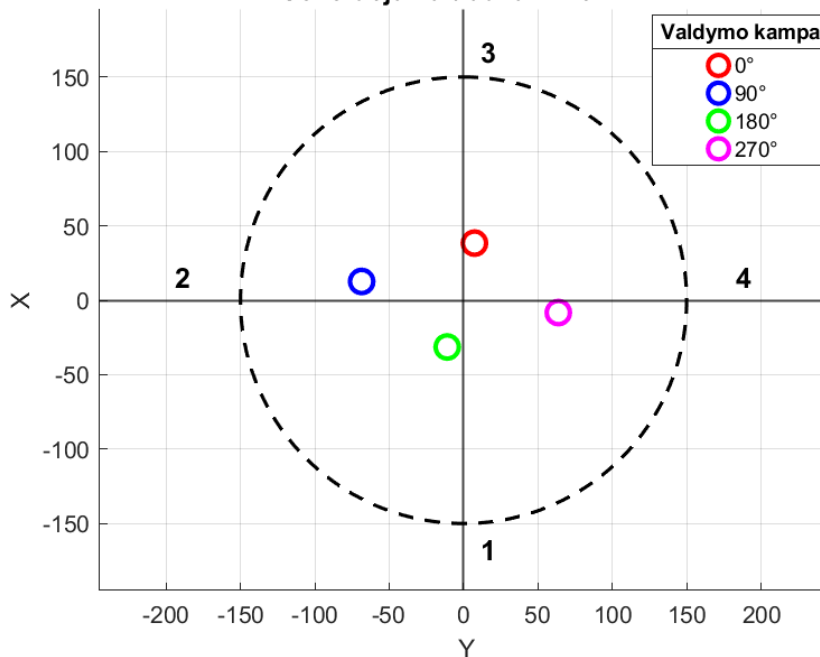
$$x = \frac{((-F_3 \cdot 150 + 75 \cdot F_{13}))}{-F_{13}} \quad (5.4)$$

$$y = \frac{((-F_4 \cdot 150 + 75 \cdot F_{24}))}{-F_{24}} \quad (5.5)$$

Pagal šias formules apskaičiuotos x ir y koordinatės, kai sinusoidės pradžios taškas yra be valdymo ir su valdymo kampais. Priklausomai nuo kiekvienos valdymo kampo reikšmės, traukos vektoriaus pozicija tarsi pasislenka per pasirinktą kampo reikšmę. Paveikslėlyje (žr. 5.4 pav.) pateiktas apskritimas 150 mm – tai vidurinės stendo dalies skersmuo, tarsi kaip diskas leidžiantis indukuoti

kurioje vietoje yra generuojama trauka. X ir Y ašys pritaikytos pagal jutiklių poziciją, taip pat surašyti skaičiai apibrėžia jutiklio numerį. Pagal valdymo kampą galima pamatyti kaip keičiasi vektoriaus traukos kryptis. Skirtingomis spalvomis pažymėtos traukos kryptis esant skirtingiems fazės kampams (0°, 90°, 180° ir 270°). Grafike naudojama koordinačių sistema, kurioje x yra vertikaliai ir y horizontaliai, siekiant įvertinti fizinį jutiklių išsidėstymą, apskaičiuota generuojama trauka yra 0,11 N.

Traukos vektoriaus krypties priklausomybė nuo sinusoidės vėlavimo kampo
Generuojama trauka $F = 0.11 \text{ N}$



5.4 pav. Traukos vektoriaus krypties priklausomybė nuo sinusoidės valdymo kampo

Pagal paveikslėlį ir gautus rezultatus sudaryta lentelė pagal kurią galima pamatyti x ir y koordinates prie kiekvieno valdymo kampo, rezultatai pateikti trečioje lentelėje. Atstumas nuo koordinačių pradžios taškos iki traukos krypties vietos apskaičiuotas pagal (5.6) formulę:

$$l = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (5.6)$$

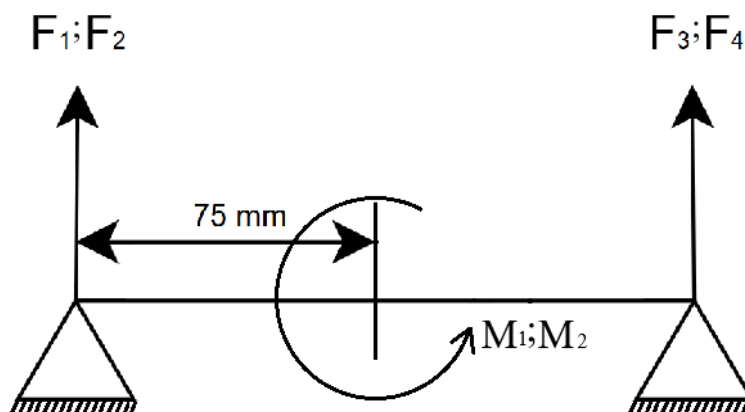
3 lentelė. Traukos krypties vektoriaus taškai pagal sinusoidės valdymo kampa

Valdymo kampas, B	x ašies taškas	y ašies taškas	l, mm
0°	7,3	38,39	39,1
90°	-68,5	12,6	69,7
180°	-11	-31,38	33,3
270°	63,7	-8,27	64,2

Lentelėje pateikti traukos vektoriaus taškai, priklausomai nuo sinusoidės valdymo kampo. Kai kur matoma, kad x ir y reikšmės kinta nevienodai lyginant su kitais valdymo kampais, ties ašimis. Vienais atvejais didesnė x reikšmė, kitais y. Nors ir vektorius keičia kryptį kas 90° tačiau taškai kinta nesimetriškai. Didžiausias atstumas nuo koordinačių pradžios taško 69,7 mm su 90° valdymo kampu, o mažiausias 33,3 su 180° valdymo kampu.

5.3. Skaičiavimai valdant pagal sinusoidę ir ilginant stabdymo laiką

Turint jutiklių išmatuotas jėgas ir žinant jų išsidėstymą, sudaryta statinė schema (žr. 5.5 pav.) pagal kurią apskaičiuotas momentas ties vidurinės dalies centru. Pagal momentą galima žinoti besisukančio propelerio valdumą, o tai įvertinta lyginant su alternatyviu valdymo metu, kai stabdymas yra ilgesnis ir palaikomas ilgesnis maksimalus valdymo signalas.



5.5 pav. Statinė schema siekiant įverti susidariusį momentą tarp jutiklių

Pagal (žr. 5.6 pav.) statinę schemą apskaičiuoti momentai x ir y ašimis naudojant (5.7) ir (5.8) formules.

$$M_x = (F_3 - F_1) \cdot r \quad (5.7)$$

čia F_1 – pirmo jutiklio išmatuota jėga, N

F_3 – trečio jutiklio išmatuota jėga, N

r – atstumas nuo vidurinės dalies centro iki jėgos taško y ašimi, m

$$M_y = (F_4 - F_2) \cdot r \quad (5.8)$$

čia F_2 – antro jutiklio išmatuota jėga, N

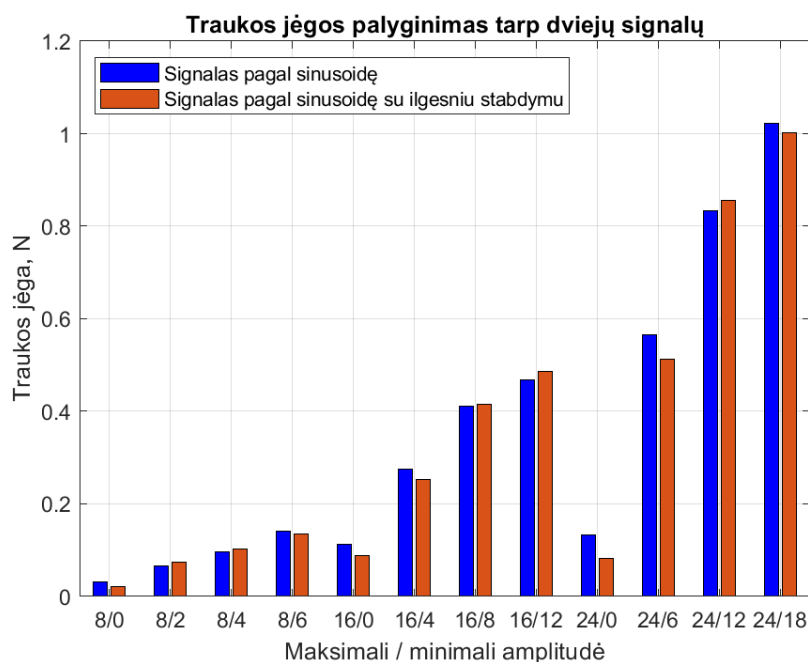
F_4 – ketvirto jutiklio išmatuota jėga, N

Turint momentų M_x ir M_y reikšmes galima surasti bendrą momentą ties disko centru, kuris apskaičiuotas pagal (5.9) formulę.

$$M = \sqrt{M_x^2 + M_y^2} \quad (5.9)$$

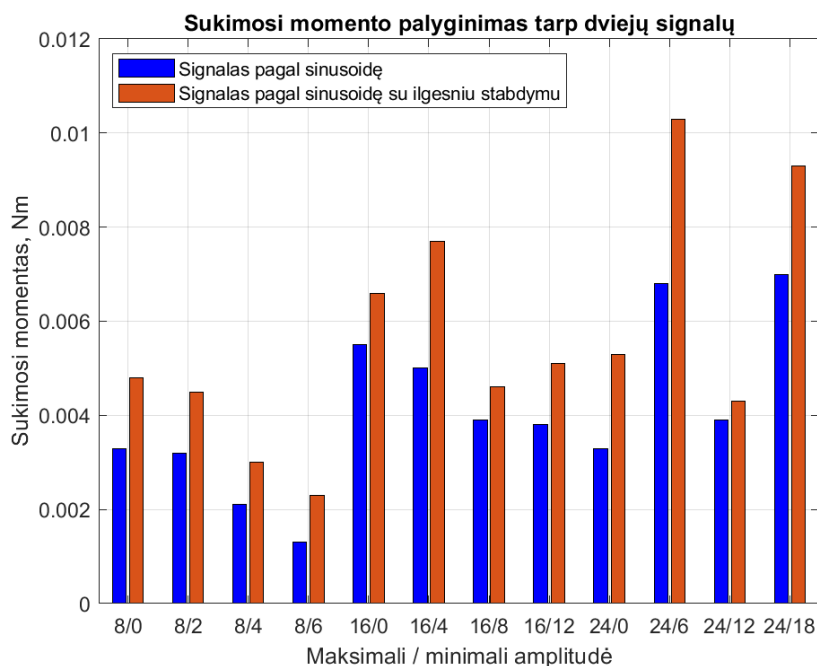
Duomenys apskaičiuoti, kai yra skirtingos maksimalaus ir minimalaus signalo vertės, taip pat kaip kinta jų skirtumas procentaliai (100%, 75%, 50% ir 25%). Kai vienam yra siunčiamas signalas pagal sinusoidę ir kitam kai vyksta ilgesnis stabdymas. Pagal rezultatus sudaroma stulpelinė diagrama, kurioje galima matyti kaip keičiasi traukos jėga keičiantis maksimaliajai amplitudei ir skirtumui tarp maksimalios ir minimalios amplitudžių. Sudarytas stulpelinis grafikas (žr. 5.6 pav.) kuriame lyginami

dviejų skirtingų siunčiamų signalų rezultatai. Horizontalioje ašyje yra pateiktos siunčiamo signalo maksimalios ir minimalios amplitudžių vertės, o vertikalioje generuojama traukos jėgos.



5.6 pav. Traukos palyginimas tarp dviejų siunčiamų signalų

Skirtumas tarp maksimalios ir minimalios kinta procentaliai. Mėlyna spalva žymi signalą pagal sinusoidę, o oranžinė signalą su ilgesniu stabdymu. Vertikalioje ašyje yra išmatuotos vertės, tai yra traukos jėga, kuri didėja didėjant maksimalioms amplitudėms, taip pat ir mažėjant skirtumui tarp maksimalios ir minimalios amplitudės. Daugeliu atveju mėlynos vertės yra aukštesnės už oranžines, kur skirtumas tarp jų nėra didelis. Didžiausios traukos vertės pasiekiamos, kai maksimali signalo amplitudė yra 24/18, kurios yra pagal sinusoidę 1,02 N ir su ilgesniu stabdymu 1 N.



5.7 pav. Sukimosi momento palyginimas tarp dviejų siunčiamų signalų

Paveikslėlyje pavaizduotas grafikas pagal stulpelinę diagramą (žr. 5.7 pav.), kuriame lyginamas sukimosi momentas tap dviejų siunčiamų signalų. Horizontalioje ašyje pateiktos maksimalios ir minimalios amplitudžių vertės. Vertikaliuoje ašyje yra apskaičiuotas momentas pagal išmatuotus jutiklių jėgų matmenis. Iš grafiko matyti, kad daugeliu atveju oranžiniai stulpeliai yra aukštesni už mėlynus, tai parodo kad jis sukuria didesnę momentą. Didesnis skirtumas yra ypač matomas, kai yra didesnės amplitudės, kur momentas pasiekia didžiausias reikšmes, kai yra 24/6 siunčiamas signalas. Tai reiškia, kad signalas su ilgesniu stabdymu sukuria didesnę momentą nei su sinusoide. Lentelė su papildomais duomenimis, įskaitant sukimosi dažnį pateikta prieduose.

Siekiant papildomai įvertinti amplitudžių įtaką traukai ir sukimosi momentui, buvo atliktas amplitudžių palyginimas pagal sinusoidės siunčiamą signalą, išlaikant tą patį sukimosi dažnį, kuris pasirinktas apytiksliai 11 Hz, tačiau keičiant skirtumą tarp maksimalios ir minimalios amplitudžių vertės procentaliai (100%, 75%, 50% ir 25%).

4 lentelė. Momentų ir jėgų rezultatai palaikant sukimosi dažnį ir keičiant amplitudžių skirtumą

Sukimosi dažnis, Hz	Maksimali amplitudė	Minimali amplitudė	Skirtumas tarp maksimalios ir minimalios vertės, %	Momentas, Nm	Traukos jėga, N
11,48	16	0	100%	0,0055	0,112
11,59	10	2.5	75%	0,0030	0,127
11,28	9	4.5	50%	0,0027	0,129
11,62	8	6	25%	0,0013	0,142

Pagal ketvirtą lentelę galima pamatyti, kad esant tam pačiam sukimosi dažniui ir mažiausiam skirtumui 25% trauka yra didžiausia, kuri lygi 0,142 N, o sukimosi momentas mažiausias – 0,0013 Nm. Didžiausiam skirtumui 100% trauka yra mažiausia 0,112 N, o momentas yra didžiausias – 0,0055 Nm. Pagal tai galima spręsti, kad siekiant daugiau traukos yra prarandamas momentas, kitaip tariant valdumas. Siekiant geresnio valdymo yra pasiekiamos aukštesnės momento vertės, tačiau prarandama trauka. Propeleris suktas esant mažesnėms apsukoms, siekiant iširti valdymą, kadangi momento vertės, esant aukštesniam sukimosi dažniui, padidėja po to vėl sumažėja, mažinant amplitudžių procentų skirtumą.

5.4. Darbo rezultatų apibendrinimas ir išvalgos

Suprojektuotas propelerio mechanizmas su lanksčiais tvirtinimo mazgais geba keisti mentės padėtį pagal valdymo algoritmą. Tačiau siekiant efektyvaus mazgų lankstymosi reikėtų atlikti papildomus bandymus keičiant pačio mechanizmo konstrukcija su skirtingais prototipais. Tokiam bandymui stebėti reikėtų naudoti filmavo kamerą, kuri gali filmuoti ir fiksuoti besisukančią mechanizmą maždaug 1000 kadrų per sekundę.

Suprojektuotas ir sumontuotas eksperimentinis stendas geba matuoti traukos jėgą ir jos kryptį, todėl buvo galima matyti kurioje vidurinės stendo dalyje yra traukos kryptis, pagal jutiklių išsidėstymą, kas 90°. Stendo surinkimo metu didžiausia problema buvo AS5600 kampo jutiklio pozicija, kadangi vos keliems milimetrams nukrypus nuo magneto pozicijos, kuris priklijuotas prie variklio, duomenys buvo siunčiami klaidingai. Tai galėjo nutikti dėl pačio jutiklio arba magneto, kuris yra silpnas, tačiau įsigyti magnetą, kuris per skersmenį turi du polius yra gan sudėtinga, nes dažniausiai tai yra kubo formos magnetai, kuri priklijuoti prie besisukančio variklio veleno būtų gan ne tikslu. Tyrimo metu

nustatyta, kad jutiklis gali siųsti maždaug apie ~900 matavimo verčių per sekundę, todėl šis jutiklis tinkamas naudoti tik sukant variklį prie mažų sūkių, dėl tikslesnių duomenų gavimo.

Elektroninis greičio reguliatorius *Single Flycolor Raptor Pro* pagal gamintojo specifikacijas nurodytas galintis veikti kartu ir su greitesniu *DShot600* protokolu, kai darbe naudotas *DShot300*, kuris yra dvigubai lėtesnis. Testuojant su *DShot600* protokolu, pagal *DShotRTM* biblioteka greičio reguliatorius nerodė jokio signalo ir nesiuntė komandų į variklį. Todėl reikėtų atlikti papildomus bandymus naudojant skirtingas bibliotekas arba sukurti biblioteką, kuri galėtų sukurti variklį su greitesniu protokolu, nei *DShot300*. Taip pat naudojant *BLHeliSuite* konfiguratorių buvo įjungta komanda *BrakeOnStop* paliekant kitus parametrus pagal gamintojo nustatytas specifikacijas. Reikėtų atlikti papildomus bandymus didinant parametro *RampUp Power* reikšmę, ar įmanoma dar greičiau perduoti siunčiamą signalą, kad variklis greičiau pasiektų norimą sukimosi dažnį. Taip pat su galimybe panaudoti dar kokį nors kitą elektroninį greičio reguliatorių su greitesniu protokolu ir taip pat skirtingu konfiguratoriumi, kuris turi daugiau nustatymų nei naudotas ESC su *BLHeliSuite* konfiguratoriumi.

Sukant mechanizmą prie nedidelių sūkių ir mažų amplitudžių, keičiant amplitudžių skirtumą procentaliai, trauka tolyginiai mažėja, kai momentas didėja. Tačiau padidinus amplitudžių vertes, traukos ir momentų vertės vienu momentu didėja ir vėl mažėja, keičiant skirtumo vertes. Šiuos duomenis yra sudėtinga įvertinti, todėl reikėtų eksperimentuoti keičiant po vieną eksperimento komponentą arba keisti jo parametrus.

Išvados

1. Atlikus literatūros analizę nustatyta, kad traukos valdymas keičiant propelerio sukimosi pagreitį, naudojant lanksčius mechanizmus žingsniui keisti yra perspektyvi alternatyva egzistuojantiems valdymo metodams bepiločiuose orlaiviuose. Šis metodas leidžia valdyti traukos vektoriaus kryptimi nenaudojant sudėtingų mechaninių mazgų, tačiau mokslinių tyrimų šioje kryptyje dar nėra daug.
2. Suprojektuotas ir pagamintas propelerio mechanizmas, su lanksčiais mentės tvirtinimo mazgais, gebantis keisti propelerio mentės žingsnį pagal sukimosi pagreitį. Stiprumui įvertinti pasirinktas sukimosi greitis 2000 apsisukimai per minutę. Mechanizmo komponentai pagaminti pasitelkus 3D spausdinimo technologija. Medžiaga nustatyta, kad yra vienalytė, tačiau stiprumo vertinimas atliktas pagal medžigos silpniausios krypties charakteristikas. Apskaičiuoti propelerio mechanizmo komponentų atsargos koeficientai. Laikiklio atsargos koeficientas – 4,55, o mechanizmo vidurinės dalies – 9.
3. Suprojektuotas ir pagamintas eksperimentinis stendas, kuris leidžia matuoti propelerio mechanizmo traukos jėgą ir kryptį. Pasirinktų stende naudojamų jutiklių matavimo paklaida yra $\pm 0,005$ N. Suprojektuota variklio pakylės konstrukcija užtikrina efektyvų pasisukimo kampo perdavimą į mikrovaldiklį. Stendo konstrukcija pakankamai standi esant didžiausioms projekcinėms apkrovoms, vidurinės dalies poslinkiai siekia 0,21 mm. Pasirinktas propelerio mechanizmo sukimosi dažnis yra žymiai mažesnis už nustatytą rezonanso dažnį – 301 Hz, todėl rezonanso reiškiniai eksperimento metu nepasireiškia.
4. Sukurtas krypties valdymo algoritmas, kuriuo galima keisti maksimalios ir minimalios valdymo signalo vertės reikšmes pagal rotoriaus pasisukimo kampą. Valdymo signalas apskaičiuojamas pagal sinusoidinę priklausomybę, kurioje įvedant valdymo kampą, galima valdyti sinusoidės pradžios tašką, taip keičiant traukos kryptį. Aprašytos algoritmo veikimo ir programos algoritmo schemas. Taip pat nubražyta elektronikos komponentų funkcinė schema su komponentų ryšiais. Lyginant du valdymo metodus, nustatyta, kad pilnos sinusoidės signalas užtikrina didesnę vidutinį sukimosi dažnį – 11,5 Hz, o sinusoidės su ilgesniu stabdymu – 10,2 Hz, kai maksimalios amplitudės reikšmė yra 16 %, o minimalios 0 %.
5. Atlikus propelerio traukos tyrimus nustatyta, kad traukos vektoriaus kryptis kinta tiesiogiai nuo sinusoidės valdymo kampo. Keičiant sinusoidės kampus kas 90 laispnių, traukos stende buvo fiksuojamas atitinkamas traukos vektoriaus pasisukimas. Didžiausia traukos jėga naudojant pilną sinusoidę – 1,02 N, kai pasirinktos 24/18 amplitudžių reikšmės, o naudojant sinusoidę su ilgesniu stabdymu – 1 N. Nors ir sinusoidės traukos jėgos vertės buvo didesnės lyginant su ilgesniu stabdymu, tačiau sukimosi momentas buvo mažesnis. Todėl valdymas su ilgesniu stabdymu yra geresnis nei pilnos sinusoidės. Analizuojant amplitudžių reikšmes ir išlaikant tą patį sukimosi dažnį, esant 25% amplitudžių skirtumui trauka yra didžiausia ir lygi 0,142 N, o sukimosi momentas mažiausias – 0,0013 Nm. Mažiausia trauka esant 100% skirtumui – 0,112 N, o momentas didžiausias – 0,0055 Nm. Prie mažo sukimosi dažnio, kuris siekia apie 11 Hz, norint geresnio valdymo ir aukštesnio sukimosi momento yra prarandama trauka. Atlikti tyrimai rodo, kad sukurtas propelerio mechanizmas ir traukos krypties valdymo algoritmas veikia kaip tikėtasi ir gali būti taikomas bepiločiuose orlaiviuose.

Literatūros sąrašas

1. PAULOS, James. ir Mark YIM. Flight performance of a swashplateless micro air vehicle. 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) [interaktyvus]. Seattle, WA, USA: IEEE, 2015, p. 5284–5289. [žiūrėta 2026-03-11]. Prieiga per: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7139936/>.
2. BERNARDES, Evandro. Frédéric BOYER. ir Stéphane VIOLLET. Modelling, control and simulation of a single rotor UAV with swashplateless torque modulation. *Aerospace Science and Technology*. 2023, Vol. 140, p. 108433.
3. IQBAL, Farkhund. Benjamin YANKSON. Maryam A. ALYAMMAHI. ir kt. Drone forensics: examination and analysis. *International Journal of Electronic Security and Digital Forensics*. 2019, Vol. 11, no. 3, p. 245.
4. CAVOUKIAN, A. Privacy and Drones: Unmanned Aerial Vehicles. . 2012, p. 30.
5. KARDASZ, Piotr. ir Jacek DOSKOCZ. Drones and Possibilities of Their Using. *Journal of Civil & Environmental Engineering* [interaktyvus]. 2016, Vol. 6, no. 3. [žiūrėta 2026-03-10]. Prieiga per: <http://www.omicsgroup.org/journals/drones-and-possibilities-of-their-using-2165-784X-1000233.php?aid=73599>.
6. YAN, Jun. Huiping HU. Jiangkun GONG. ir kt. Exploring Radar Micro-Doppler Signatures for Recognition of Drone Types. *Drones*. 2023, Vol. 7, no. 4, p. 280.
7. HU, Jiahao. Jingbo WEI. Kun LIU. ir kt. Hybrid Mode: Routinization of the Transition Mode as the Third Common Mode for Compound VTOL Drones. *Drones*. 2024, Vol. 8, no. 3, p. 93.
8. ALHAMMADI, Mohamed. Mohammed ALAVI. Ali ALAMERI. ir kt. Aerodynamic Study and Design of Fixed Wing and Multi-copter Combination. *Engineering World*. 2022, Vol. 4, p. 91–95.
9. LUUKKONEN, T. Modelling and control of quadcopter. . 2011, p. 26.
10. TATALE, Omkar. Anekar NITINKUMAR. Supriya PHATANK. ir kt. Quadcopter: Design, Construction and Testing. . 2019, p. 7.
11. OLIVER, Russell. Sui Yang KHOO. Michael NORTON. ir kt. Development of a single axis tilting quadcopter. 2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON) [interaktyvus]. Singapore: IEEE, 2016, p. 1849–1852. [žiūrėta 2026-03-10]. Prieiga per: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7848341/>.
12. How to Fly a Drone – The Ultimate Guide. UAV COACH [interaktyvus]. 2016, [žiūrėta 2026-03-10]. Prieiga per: <https://uavcoach.com/how-to-fly-a-quadcopter-guide/>.
13. ZUO, Zongyu. Cunjia LIU. Qing-Long HAN. ir kt. Unmanned Aerial Vehicles: Control Methods and Future Challenges. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. 2022, Vol. 9, no. 4, p. 601–614.
14. YAO, Wu-Sung. ir Chun-Yi LIN. Dynamic Stiffness Enhancement of the Quadcopter Control System. *Electronics*. 2022, Vol. 11, no. 14, p. 2206.
15. SABABHA, Belal H. Hamzeh M. Al ZU'. N.A. BI. ir kt. A rotor-tilt-free tricopter UAV: design, modelling, and stability control. *International Journal of Mechatronics and Automation*. 2015, Vol. 5, no. 2/3, p. 107.
16. JOHNSON, Wayne. Helicopter Theory [interaktyvus]. New York, 1980, 1085 p.
17. CONLISK, A.T. Modern helicopter rotor aerodynamics. *Progress in Aerospace Sciences*. 2001, Vol. 37, no. 5, p. 419–476.

18. Helicopter control. Helicopterflights [interaktyvus]. [žiūrēta 2026-04-25]. Prieiga per: <https://www.helicopterflights.com/en/docs/show/25/helicopter-control>.
19. KUREEEMUN, R. D.J. WALKER. B. MANIMALA. ir kt. Helicopter Flight Control Law Design Using H>inf<#8734;>/inf<Techniques. Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control [interaktyvus]. Seville, Spain: IEEE, 2005, p. 1307–1312. [žiūrēta 2026-03-10]. Prieiga per: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1582339/>.
20. QIN, Youming. Wei XU. Adrian LEE. ir kt. Gemini: A Compact yet Efficient Bi-copter UAV for Indoor Applications. IEEE Robotics and Automation Letters. 2020, p. 1–1.
21. FLORES, Jonathan. Sergio SALAZAR. Ivan GONZALEZ-HERNANDEZ. ir kt. Control of Helicopter Using Virtual Swashplate. Drones. 2024, Vol. 8, no. 7, p. 327.
22. KARASAHIN, Ali Tahir. Characterization of different hinge angles for swashplateless micro aerial robots. Engineering Science and Technology, an International Journal. 2024, Vol. 55, p. 101750.
23. ANDERSON, John David. Aircraft Performance And Design. 1999, 580 p.
24. MCCORMICK, Barnes W. Aerodynamics, Aeronautics, And Flight Mechanics. 1995, 664 p.
25. GONG, Andrew. ir Dries VERSTRAETE. Experimental Testing of Electronic Speed Controllers for UAVs. 53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference [interaktyvus]. Atlanta, GA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2017, [žiūrēta 2026-03-10]. Prieiga per: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2017-4955>.
26. DShot. Betaflight [interaktyvus]. [žiūrēta 2026-03-10]. Prieiga per: <https://www.betaflight.com/docs/development/Dshot>.
27. Pulse Width Modulation (PWM). GeeksForGeeks [interaktyvus]. 2025, [žiūrēta 2026-03-10]. Prieiga per: <https://www.geeksforgeeks.org/electronics-engineering/pulse-width-modulation-pwm/>.
28. 10x6 Direct Drive Propeller. Plastic Models [interaktyvus]. [žiūrēta 2026-03-11]. Prieiga per: <https://www.rcnz.com/categories/propellers-and-spinners/plastic-props/gws-10x6-direct-drive-prop/>.
29. PCTG Filament. Fiberlogy [interaktyvus]. [žiūrēta 2026-05-02]. Prieiga per: https://fiberlogy.com/en/PCTG-Filament-1_75mm-0_75kg.
30. 13x10 Data. APC Propellers [interaktyvus]. 2022, [žiūrēta 2026-03-11]. Prieiga per: https://www.apcprop.com/files/PER3_13x10.dat?v=a2c291924843.
31. TAL221 Miniature load cell. Sparkfun [interaktyvus]. [žiūrēta 2026-03-11]. Prieiga per: <https://cdn.sparkfun.com/assets/9/9/a/f/3/TAL221.pdf>.
32. Ni-9237. Ni [interaktyvus]. [žiūrēta 2026-03-11]. Prieiga per: https://www.ni.com/en-us/shop/model/ni-9237.html?srsltid=AfmBOor65UXFJmKXoW_NURWgGuKNFSVpQ_8RYm5NqCzjuoMpeesf1K2Z.
33. How to wire Ni9237 to Load Cell? Fibossensor [interaktyvus]. [žiūrēta 2026-03-11]. Prieiga per: <https://www.fibossensor.com/how-to-wire-ni9237-to-load-cell.html>.
34. cDAQ-9173. Ni [interaktyvus]. [žiūrēta 2026-03-14]. Prieiga per: https://www.ni.com/en-us/shop/model/cdaq-9173.html?srsltid=AfmBOorHHJ0tTwmXgia5NOe2QT7j7jpXP-ugWCDkdbqtqSb8_ohkPx5X.

35. PROPDRIVE v2 2830 800KV. RC Dalys [interaktyvus]. [žiūrėta 2026-03-11]. Prieiga per: https://www.rcdalys.lt/detales/0/20031/PROPDRIVE-v2-2830-800KV-Brushless-Outrunner-Motor-Short-Shaft-Version?category_id=0.
36. ESC Single Flycolor Raptor Pro 30A 2-4S. Baltic Drones [interaktyvus]. [žiūrėta 2026-03-11]. Prieiga per: <https://balticdrones.lt/products/esc-single-flycolor-raptor-pro-30a-2-4s>.
37. How to Connect, Flash and Configure BLHeli_S ESCs. OscarLiang [interaktyvus]. 2023, [žiūrėta 2026-03-19]. Prieiga per: <https://oscarliang.com/connect-flash-blheli-s-esc/>.
38. NodeMcu ESP32 mikrovaldiklis su USB-C. Lemona Electronics [interaktyvus]. [žiūrėta 2026-03-11]. Prieiga per: <https://www.lemona.lt/nodemcu-esp32-mikrovaldiklis-su-usb-c-joy-it.html>.
39. AS5600 Magnetic Angle Sensor Encoder Module. Tinytronics [interaktyvus]. [žiūrėta 2026-03-11]. Prieiga per: <https://www.tinytronics.nl/en/sensors/magnetic-field/as5600-magnetic-angle-sensor-encoder-module>.
40. Phenolic Plywood. ThePlywood [interaktyvus]. [žiūrėta 2026-03-11]. Prieiga per: <https://theplywood.com/phenolic-plywood/>.
41. MEHRABI, Ali. ir Ali R. DAVARI. Outwash flow measurement around the subscale tandem rotor in ground effect. Engineering Science and Technology, an International Journal. 2020, Vol. 23, no. 6, p. 1374–1384.
42. DShotRMT. Github [interaktyvus]. 2025, [žiūrėta 2026-03-19]. Prieiga per: <https://github.com/derdokter667/DShotRMT>.
43. Acquire Data Using NI Devices. MATLAB Help Center [interaktyvus]. [žiūrėta 2026-04-05]. Prieiga per: <https://se.mathworks.com/help/daq/acquire-data-using-ni-devices.html>.

Priedai

1 priedas. MATLAB jutiklių kalibravimo kodas

```
format longe;
dq=daq("ni");
dq.Rate=8333;

ch1=addinput(dq,"cDAQ1Mod1","ai0","Bridge");
ch2=addinput(dq,"cDAQ1Mod1","ai1","Bridge");
ch3=addinput(dq,"cDAQ1Mod1","ai2","Bridge");
ch4=addinput(dq,"cDAQ1Mod1","ai3","Bridge");

chs=[ch1 ch2 ch3 ch4];

for ch=chs
    ch.BridgeMode="Full";
    ch.NominalBridgeResistance=300;
    ch.ExcitationVoltage=2.5;
end

%Tare runas
sv=[20; 50; 100; 200; 500]; %svareliai
n=length(sv);

A1=zeros(n,4);
disp('Nuimti visus svorius ir paspausti Enter');
pause;
data0=read(dq, seconds(1));
A0=table2array(data0);
Nulinimas=mean(A0,1);
disp('Nulinės reikšmės:');
disp(Nulinimas);

%Taravimas
for i=1:n
    disp(['Uždėti ' num2str(sv(i)) ' svarelių ir paspausti Enter']);
    pause;
    data=read(dq, seconds(1));
    A=table2array(data);
    Avid=mean(A,1);
    A1(i,:)=Avid-Nulinimas;
end

k1=zeros(1,4);

for j=1:4
    p=polyfit(A1(:,j), sv, 1);%k ir b
    k1(j) = p(1);
end

disp('Kalibravimo koeficientai k1:');
disp(k1);
```

2 priedas. MATLAB jėgų, momentų ir traukos krypties skaičiavimo kodas

```
dq=daq("ni");
dq.Rate=8333;
format short g

ch1=addinput(dq, "cDAQ1Mod1", "ai0", "Bridge");
ch2=addinput(dq, "cDAQ1Mod1", "ai1", "Bridge");
ch3=addinput(dq, "cDAQ1Mod1", "ai2", "Bridge");
ch4=addinput(dq, "cDAQ1Mod1", "ai3", "Bridge");

chs=[ch1 ch2 ch3 ch4];

koeficientai=[
    1.269374681794414e+06    1.297618059752601e+06    1.197080471612100e+06
    1.361079036255908e+06
    1.362545769543368e+06    1.306644590816654e+06    1.247209441669876e+06
    1.323177910791017e+06
    1.224939813379340e+06    1.308846172044967e+06    1.189280824381535e+06
    1.375360172571979e+06
    1.265517398517111e+06    1.263619752867302e+06    1.214194299777130e+06
    1.339441128025091e+06
    1.261998882053204e+06    1.260939782292981e+06    1.209061157790733e+06
    1.340843349905614e+06];

k1=mean(koeficientai);

for ch=chs
    ch.BridgeMode = "Full";
    ch.NominalBridgeResistance = 300;
    ch.ExcitationVoltage = 2.5;
end

%Data read
disp('Nulinimas x asimi')
pause;
data=read(dq,seconds(2));
A1=table2array(data);
A1vid=mean(A1(:,,:),1)/4;
Fx0=(A1vid.*k1);

disp('Nulinimas y asimi')
pause;
data=read(dq,seconds(2));
A1=table2array(data);
A1vid=mean(A1(:,,:),1)/4;
Fy0=(A1vid.*k1);

F0=(Fx0+Fy0)/2;

disp('Pradeti sukti propeleri ir paspausti Enter')
pause;

data=read(dq,seconds(10));

A1=table2array(data);
A1vid=mean(A1(:,,:),1)/4;
F=((A1vid.*k1)-F0)*-1;

visas=sum(F);
```

```

F1=F(:,1);
F3=F(:,3);
F13=F1+F3;

F2=F(:,2);
F4=F(:,4);
F24=F2+F4;

x=(-F3*150+75*F13)/-F13;
y=(-F4*150+75*F24)/-F24;

x1=x*(-1);
y1=y*(-1);

r=0.075;
g0=9.81/1000;

Mx=r*(F4-F2)*g0;
My=r*(F3-F1)*g0;
M=sqrt(Mx.^2+My.^2);

disp('F reiksmes')
disp(F1);
disp(F2);
disp(F3);
disp(F4);

disp('Momentai')
disp(Mx);
disp(My);
disp(M);

disp('Traukos kryptis')
disp(x)
disp(y)

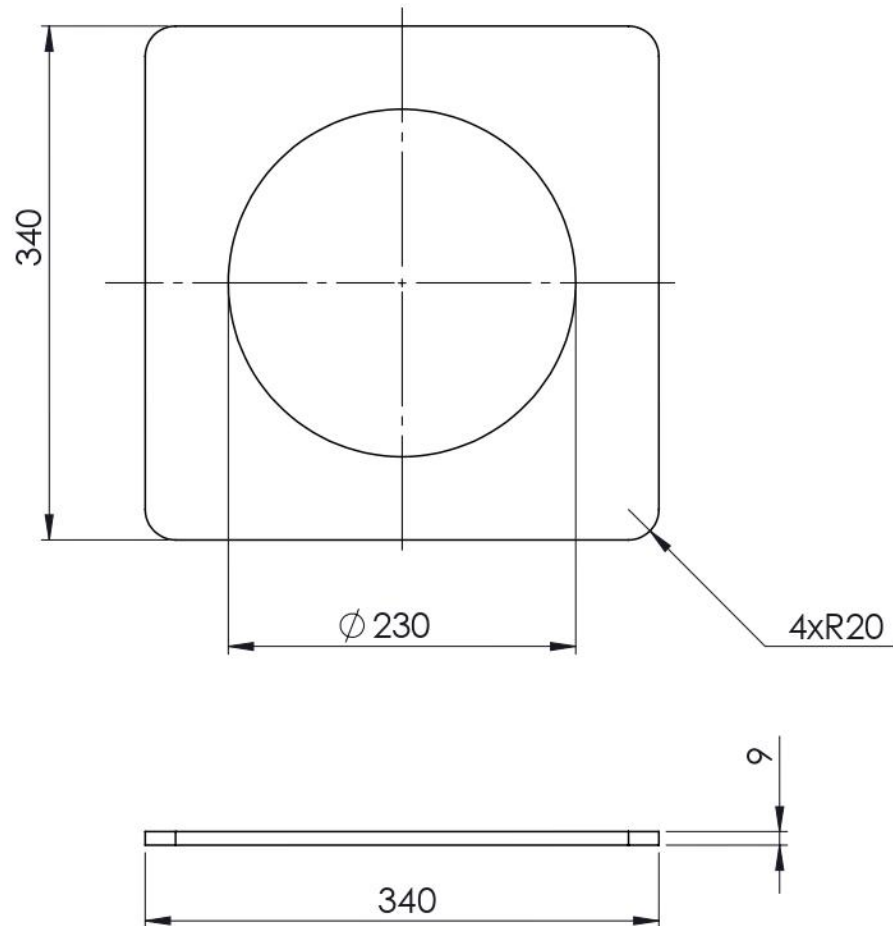
```

3 priedas. Dviejų skirtingų siunčiamų signalų duomenys

Rezultatai pagal sinusoidės siunčiamą signalą				
Sukimosi dažnis, Hz	Maksimali amplitudė	Minimali amplitudė	Momentas, Nm	Traukos jėga, N
7,76	8	0	0,0033	0.032
9,26	8	2	0.0032	0.066
10,58	8	4	0.0021	0.096
11,62	8	6	0.0013	0.142
11,48	16	0	0.0055	0.112
16,41	16	4	0.0050	0.276
19,37	16	8	0.0039	0.411
20,98	16	12	0.0038	0.469
12,53	24	0	0.0033	0.133
22,8	24	6	0.0068	0.566
27,14	24	12	0.0039	0.833
30	24	18	0.0070	1.022
Rezultatai pagal sinusoidės siunčiamą signalą su ilgesnius stabdymu				
Sukimosi dažnis, Hz	Maksimali amplitudė	Minimali amplitudė	Momentas, Nm	Traukos jėga, N
7,81	8	0	0,0048	0,021
9,55	8	2	0,0045	0,075
10,78	8	4	0,0030	0,102
11,67	8	6	0,0023	0,135
10,24	16	0	0,0066	0,088
15,78	16	4	0,0077	0,253
19,63	16	8	0,0046	0,416
21,08	16	12	0,0051	0,486
10,72	24	0	0,0053	0,083
21,86	24	6	0,0103	0,512
27,42	24	12	0,0043	0,855
29,97	24	18	0,0093	1,003

- 4 priedas. Stendo apatinės dalies brėžinys**
- 5 priedas. Stendo išorinės dalies brėžinys**
- 6 priedas. Stendo vidurinės dalies brėžinys**
- 7 priedas. Korpuso pakylės brėžinys**
- 8 priedas. Dėžutės apatinės dalies brėžinys**
- 9 priedas. Dėžutės viršutinės dalies brėžinys**
- 10 priedas. Vidurinės dalies brėžinys**
- 11 priedas. Laikiklio brėžinys**
- 12 priedas. Eksperimentinio stendo bendro vaizdo brėžinys**

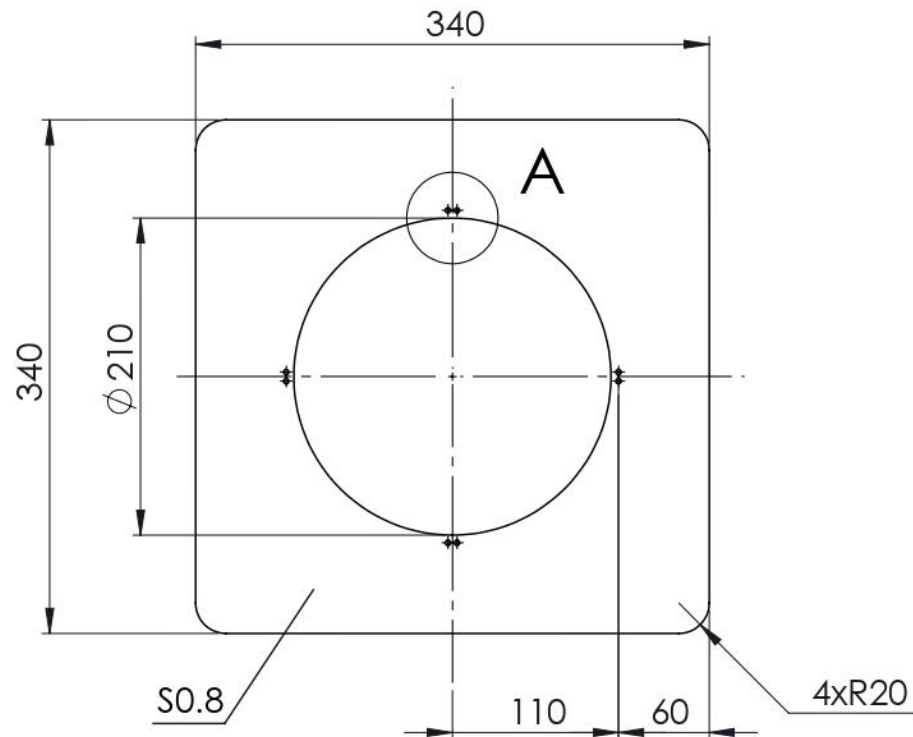
$\sqrt{Rz20}$ (\checkmark)



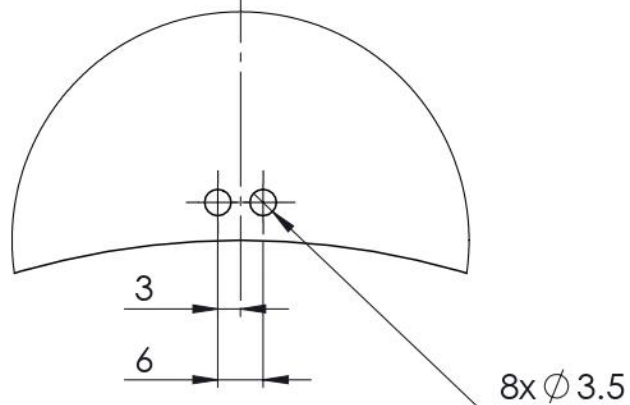
1. Nenurodytos matmenų, padėties ir formos nuokrypos pagal LST EN 22768-mK.
2. Aštrias briaunas suapvalinti spinduliu $R=0.25$ mm.

	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga K-MDP-18	Mastelis 1:5		
Atsakinga žinyba MIDF	Konsultantas	Dokumento tipas Detalės brėžinys	Dokumento statusas Mokomasis			
Savininkas 	Rengė Matas Zakarevičius	Antraštė Stendo apatinė dalis	TIK.MZ.01.01			
	Tvirtino Martynas Lendraitis		Laida A	Data 06/05/2026	Kalba Lt	Lapas 1/1

$\sqrt{Rz20}$ (✓)



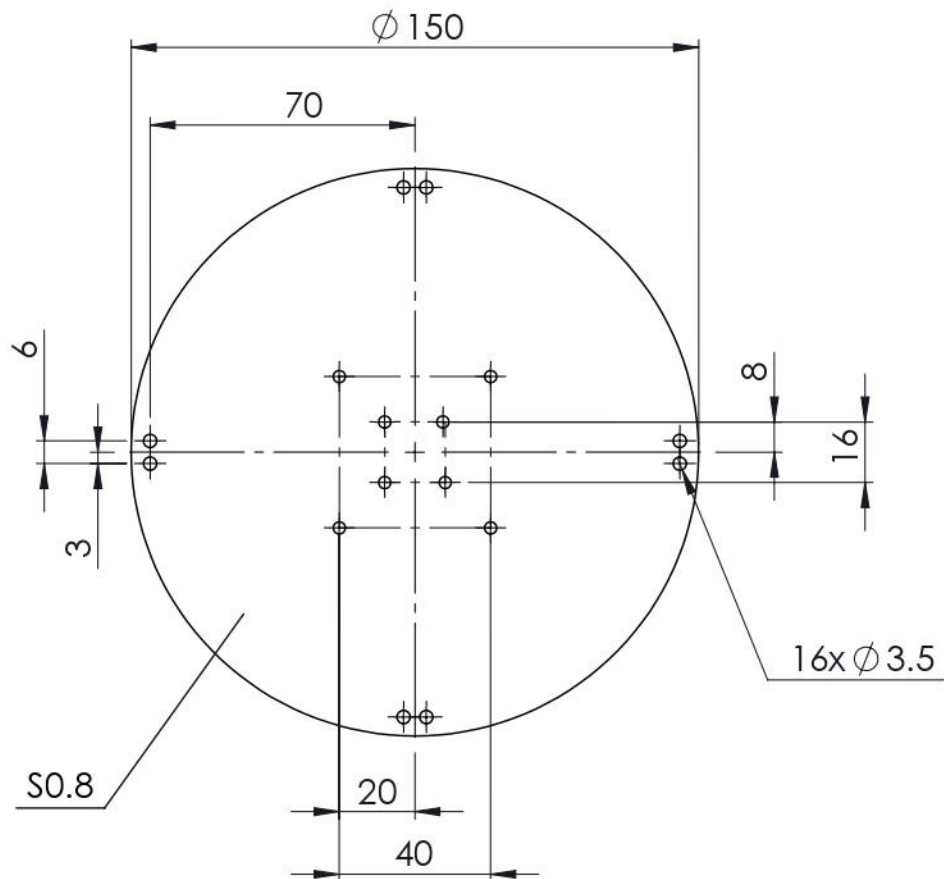
Vaizdas
A(1:1)



1. Nenurodytos matmenų, padėties ir formos nuokrypos pagal LST EN 22768-mK.
2. Aštrius briaunas suapvalinti spinduliu $R=0.25$ mm.

	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga <i>Plienas C45 LST EN 10083-1</i>	Mastelis <i>1:5</i>		
Atsakinga žinyba <i>MIDF</i>	Konsultantas	Dokumento tipas <i>Detalės brėžinys</i>	Dokumento statusas <i>Mokomasis</i>			
Savininkas 	Rengė <i>Matas Zakarevičius</i>	Antraštė <i>Stendo išorinė dalis</i>	<i>TIK.MZ.01.02</i>			
	Tvirtino <i>Martynas Lendraitis</i>		Laida <i>A</i>	Data <i>06/05/2026</i>	Kalba <i>Lt</i>	Lapas <i>1/1</i>

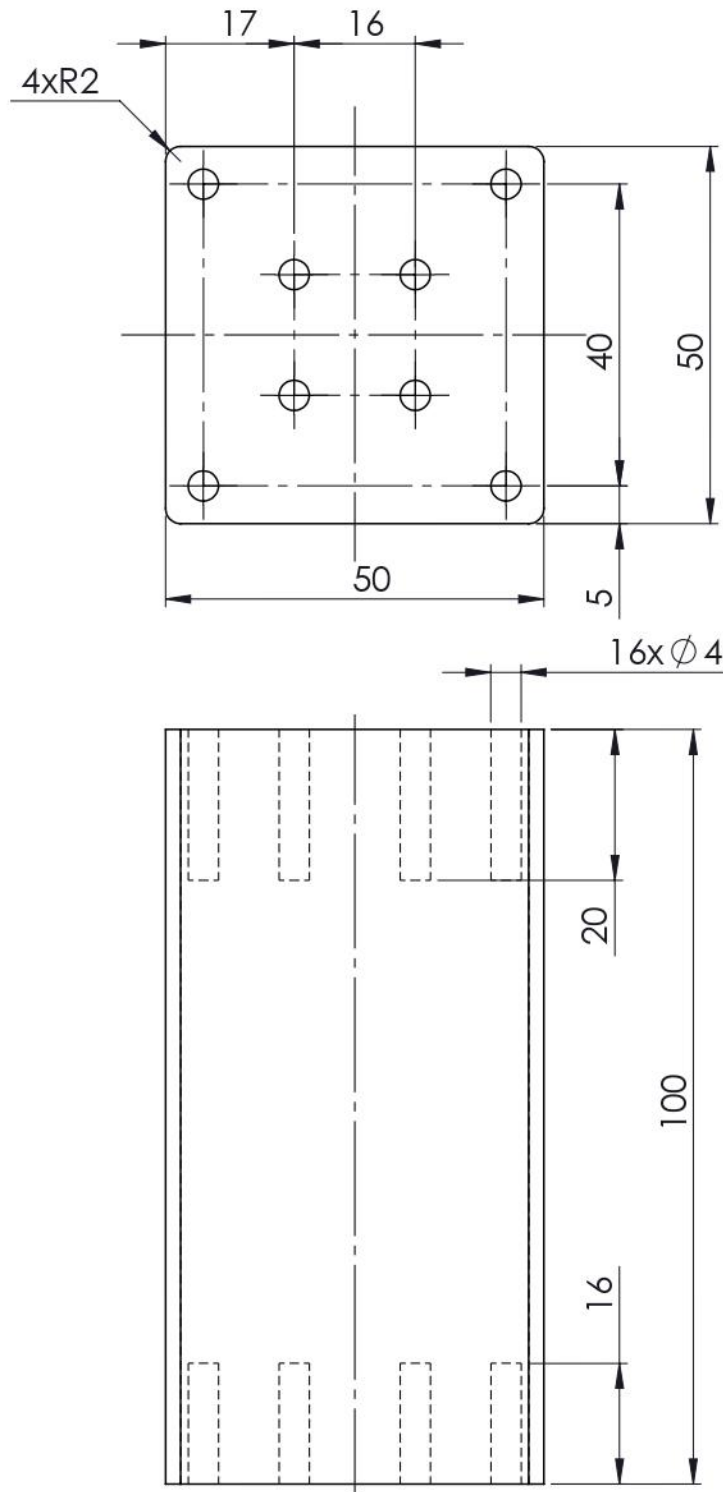
$\sqrt{Rz20}(\sqrt{\quad})$



1. Nenurodytos matmenų, padėties ir formos nuokrypos pagal LST EN 22768-mK.
2. Aštrius briaunas suapvalinti spinduliu $R=0.25$ mm.

	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga <i>Plienas C45 LST EN 10083-1</i>	Mastelis <i>1:2</i>		
Atsakinga žinyba <i>MIDF</i>	Konsultantas	Dokumento tipas <i>Detalės brėžinys</i>	Dokumento statusas <i>Mokomasis</i>			
Savininkas  kauno technologijos universitetas 1922	Rengė <i>Matas Zakarevičius</i> Tvirtino <i>Martynas Lendraitis</i>	Antraštė <i>Stendo vidurinė dalis</i>	<i>TIK.MZ.01.03</i>			
			Laida <i>A</i>	Data <i>06/05/2026</i>	Kalba <i>Lt</i>	Lapas <i>1/1</i>

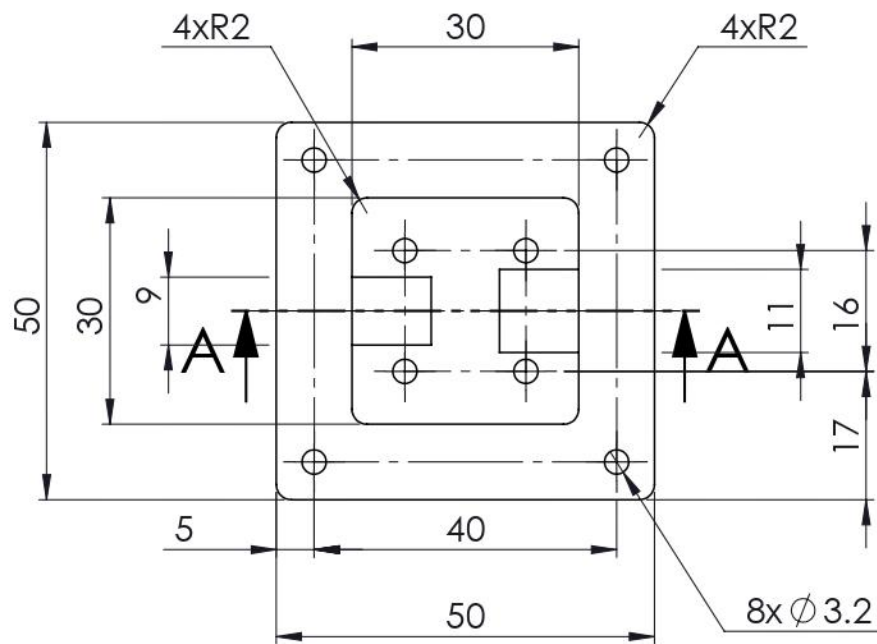
$\sqrt{Rz20}$ (✓)



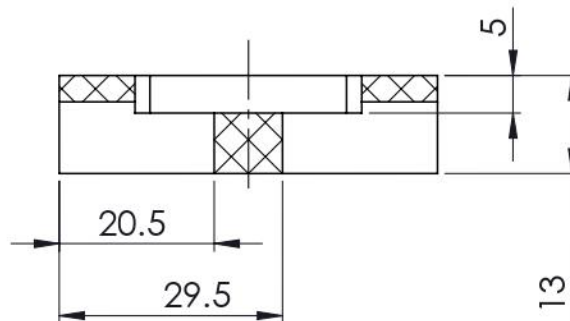
1. Nenurodytos matmenų, padėties ir formos nuokrypos pagal LST EN 22768-mK.
2. Aštrius briaunas suapvalinti spinduliu $R=0.25$ mm.

	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga PET	Mastelis 1:1		
Atsakinga žinyba MIDF	Konsultantas	Dokumento tipas Detalės brėžinys	Dokumento statusas Mokomasis			
Savininkas  kauno technologijos universitetas 1922	Rengė Matas Zakarevičius Tvirtino Martynas Lendraitis	Antraštė Korpuso pakyla	TIK.MZ.01.04			
			Laida A	Data 06/05/2026	Kalba Lt	Lapas 1/1

$\sqrt{Rz20}$ (✓)



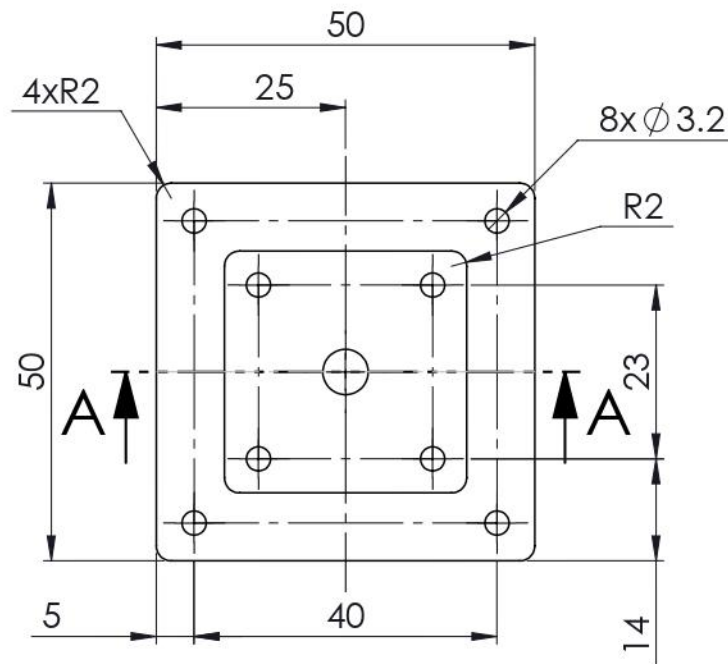
Vaizdas A-A



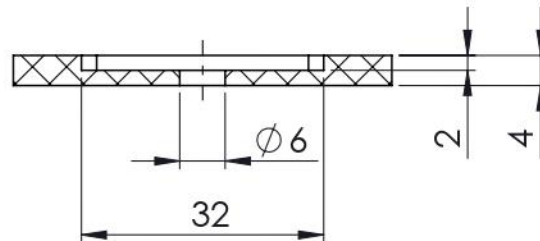
1. Nenurodytos matmenų, padėties ir formos nuokrypos pagal LST EN 22768-mK.
2. Aštrius briaunas suapvalinti spinduliu $R=0.25$ mm.

	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga PET	Mastelis 1:1		
Atsakinga žinyba MIDF	Konsultantas	Dokumento tipas Detalės brėžinys	Dokumento statusas Mokomasis			
Savininkas 	Rengė Matas Zakarevičius	Antraštė Dėžutės apatinė dalis	TIK.MZ.01.05			
	Tvirtino Martynas Lendraitis		Laida A	Data 06/05/2026	Kalba Lt	Lapas 1/1

$\sqrt{Rz20}$ (✓)



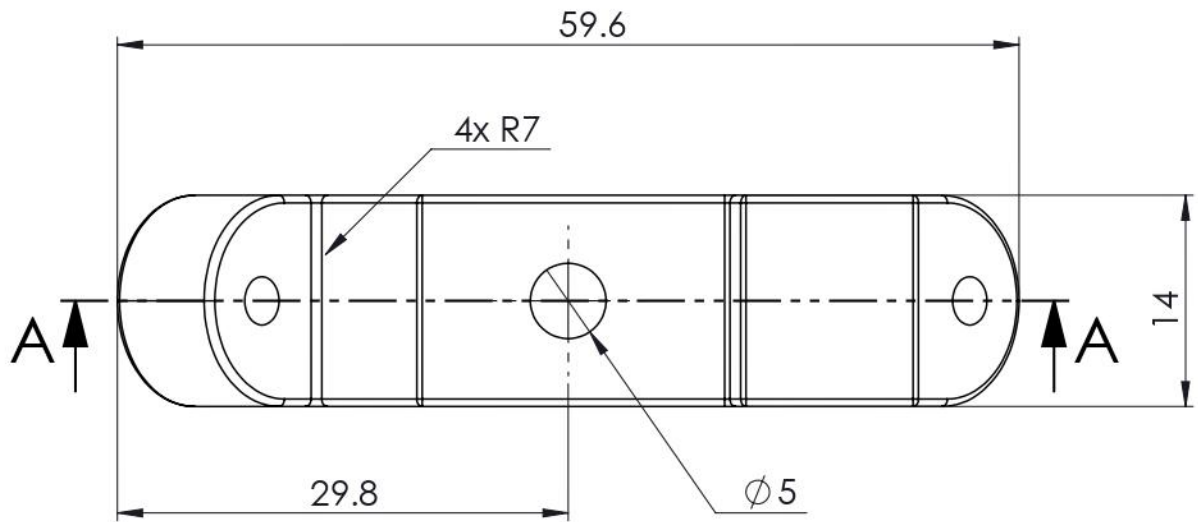
Vaizdas A-A



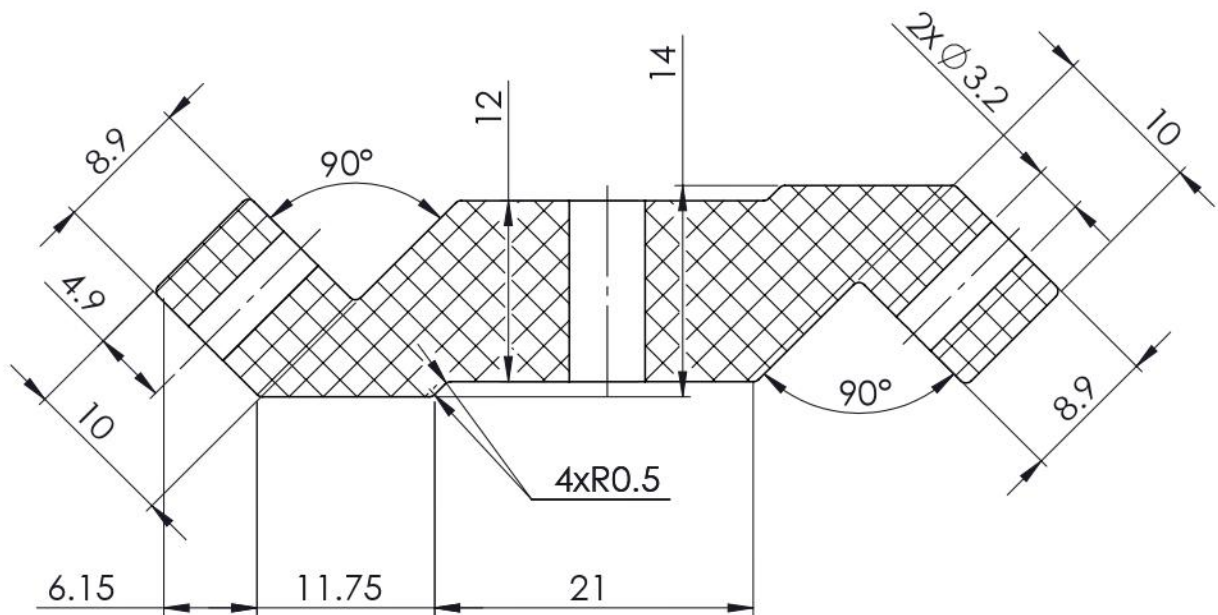
1. Nenurodytos matmenų, padėties ir formos nuokrypos pagal LST EN 22768-mK.
2. Aštrius briaunas suapvalinti spinduliu $R=0.25$ mm.

	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga PET	Mastelis 1:1
Atsakinga žinyba MIDF	Konsultantas	Dokumento tipas Detalės brėžinys	Dokumento statusas Mokomasis	
Savininkas  kauno technologijos universitetas 1922	Rengė Matas Zakarevičius Tvirtino Martynas Lendraitis	Antraštė Viršutinė dėžutės dalis	TIK.MZ.01.06	
		Laida A	Data 06/05/2026	Kalba Lt
			Lapas 1/1	

$\sqrt{Rz20}$ (✓)



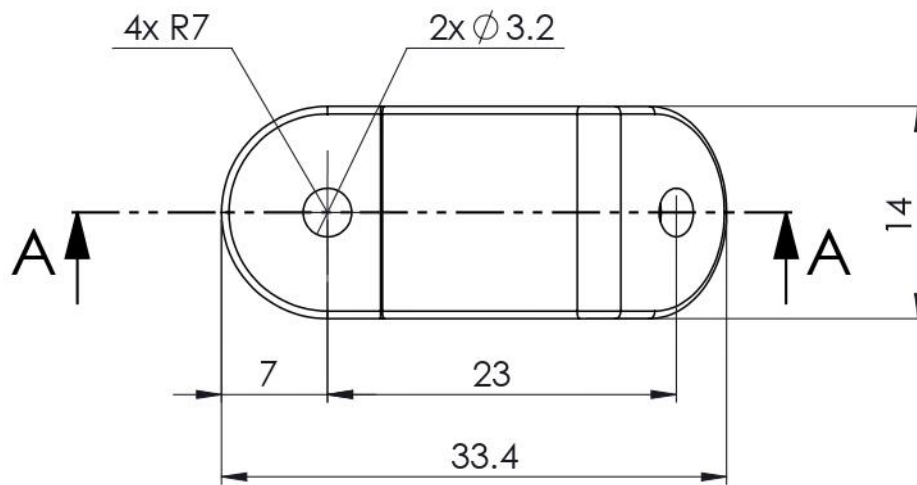
Vaizdas A-A



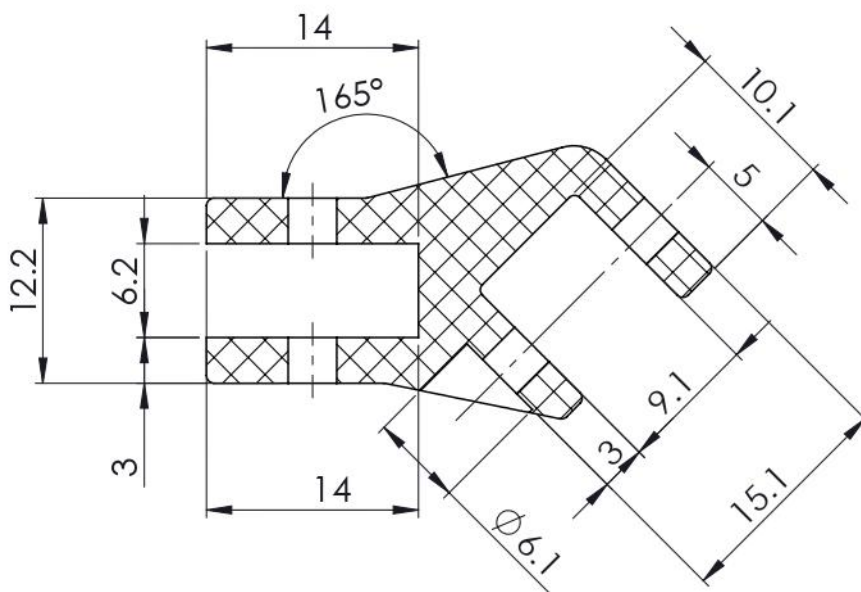
1. Nenurodytos matmenų, padėties ir formos nuokrypos pagal LST EN 22768-mK.
2. Aštrius briaunas suapvalinti spinduliu $R=0.25$ mm.

	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga PCTG	Mastelis 2:1
Atsakinga žinyba MIDF	Konsultantas	Dokumento tipas Detalės brėžinys	Dokumento statusas Mokomasis	
Savininkas 	Rengė Matas Zakarevičius	Antraštė Mechanizmo vidurinė dalis	TIK.MZ.01.07	
	Tvirtino Martynas Lendraitis		Laida A	Data 06/05/2026
			Kalba Lt	Lapas 1/1

$\sqrt{Rz20}$ (✓)



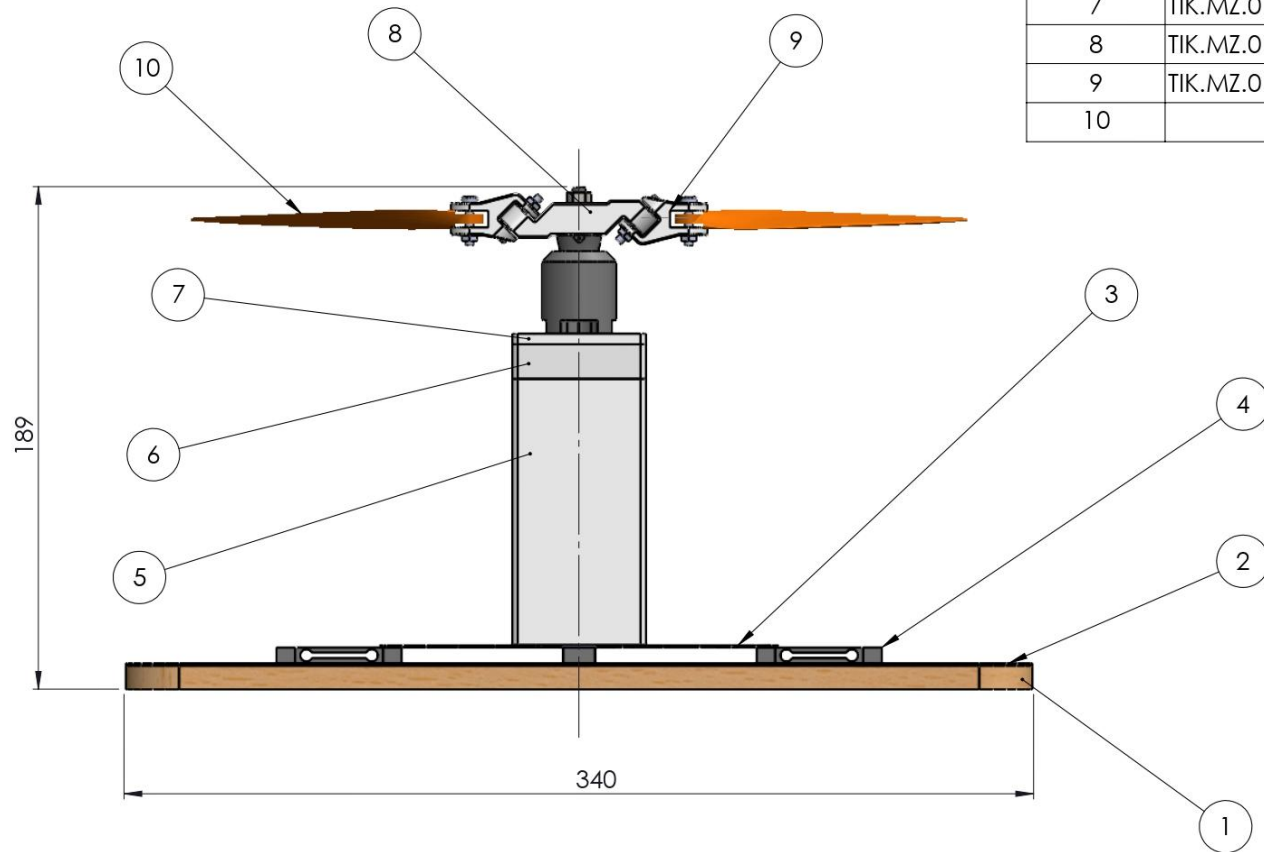
Vaizdas A-A



1. Nenurodytos matmenų, padėties ir formos nuokrypos pagal LST EN 22768-mK.
2. Aštrius briaunas suapvalinti spinduliu $R=0.25$ mm.

	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga PCTG	Mastelis 2:1		
Atsakinga žinyba MIDF	Konsultantas	Dokumento tipas Detalės brėžinys	Dokumento statusas Mokomasis			
Savininkas  kauno technologijos universitetas 1922	Rengė Matas Zakarevičius Tvirtino Martynas Lendraitis	Antraštė Laikiklis	TIK.MZ.01.08			
			Laida A	Data 06/05/2026	Kalba Lt	Lapas 1/1

Poz.	Žymėjimas	Pavadinimas	Kiekis
1	TK.MZ.01.01	Apatinė stendo dalis	1
2	TIK.MZ.01.02	Viršutinė stendo dalis	1
3	TK.MZ.01.03	Vidurinė stendo dalis	1
4		Svorio jutikliai	4
5	TIK.MZ.01.04	Korpuso konstrukcija	1
6	TIK.MZ.01.05	Dėžutės apatinė dalis	1
7	TIK.MZ.01.06	Dėžutės viršutinė dalis	1
8	TIK.MZ.01.07	Vidurinė dalis	1
9	TIK.MZ.01.08	Laikiklis	2
10		Propeleris	2



	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga	Mastelis 1:2
Atsakinga žinyba MIDF	Konsultantas	Dokumento tipas Bendro vaizdo brėžinys	Dokumento statusas Mokomasis	
Savininkas ktu Kauno technologijos universitetas	Rengė Matas Zakarevičius Tvirtino Martynas Lendraitis	Antrašlė Ekspimentinis stendas	TIK.MZ.01.00 BV	
		Laida A	Data 28/04/2026	Kalba Lt Lapas 1/1