



Kauno technologijos universitetas

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Bepiločio orlaivio pritaikymo aplinkos oro užterštumui matuoti galimybių tyrimas

Baigiamasis magistro studijų projektas

Eimantas Bručas

Projekto autorius

asist. dr. Olga Strikulienė

Vadovė

Panevėžys, 2025



Kauno technologijos universitetas

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Bepiločio orlaivio pritaikymo aplinkos oro užterštumui matuoti galimybių tyrimas

Baigiamasis magistro studijų projektas

Valdymo technologijos (6211EX014)

Eimantas Bručas

Projekto autorius

asist. dr. Olga Strikulienė

Vadovė

Recenzentas (-ė)

Panevėžys, 2025



Kauno technologijos universitetas

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Eimantas Bručas

Bepiločio orlaivio pritaikymo aplinkos oro užterštumui matuoti galimybių 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 baigiamojo 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.

Eimantas Bručas

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kauno technologijos universitetas
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

TVIRTINU
TVKC vadovė
Doc. dr. Nida Kvedaraitė

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Diplomantui **Eimantui Bručiui**

Baigiamojo projekto tema (lietuvių kalba)	Bepiločio orlaivio pritaikymo aplinkos oro užterštumui matuoti galimybių tyrimas
Baigiamojo projekto tema (anglų kalba)	Research of the Possibilities of Using a Drone to Measure Ambient Air Pollution

Patvirtinta 2025 m. balandžio 14 d. dekanų potvarkiu Nr. V25-13-12

Parengto baigiamojo projekto įkėlimo į „Moodle“ aplinką terminas iki 2025 m. gegužės 29 d.

Duomenys, reikalavimai ir sąlygos baigiamajam projektui

—

Baigiamojo projekto užduotys / uždaviniai, kurie turi būti atskleisti projekte

1. Išnagrinėti skirtingas bepiločių orlaivių konstrukcijas ir valdymo metodus.
2. Išanalizuoti bepilotės skraidyklės panaudojimo kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių koncentracijai matuoti galimybes.
3. Suprojektuoti ir sumontuoti prie bepiločio orlaivio korpuso tvirtinamą kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių matavimo sistemą.
4. Ištirti suprojektuotą prie bepiločio orlaivio korpuso pritvirtintą kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių matavimo sistemą, taikant skirtingus teršalų matavimo metodus.

Vadovė asist. dr. Olga Strikulienė

(vadovo pareigos, vardas, pavardė, parašas)

Užduotį gavau Eimantas Bručas

(studento vardas, pavardė, parašas)

2025 m. balandžio 24 d.

Bručas, Eimantas. Bepiločio orlaivio konstrukcijos įtakos dujų jutiklio parodymams tyrimas. Magistro studijų baigiamasis projektas / vadovė asist. dr. Olga Strikulienė; Kauno technologijos universitetas, Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis: elektronikos inžinerija, technologijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: bepilotis orlaivis, dronas, bepilotė skraidyklė, matavimo būdai, kenksmingos dujos, kietosios dalelės.

Panevėžys, 2025. 66 p.

Santrauka

Baigiamajame projekte ištirta galimybė taikant skirtingus matavimo būdus bepiločiu orlaiviu išmatuoti ore esančias įvairių kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių koncentracijas, taip pat išanalizuota kokio svorio įrangą tiriamas dronas gali sėkmingai pakelti ir skraidinti. Projekto tikslas – ištirti bepiločio orlaivio pritaikymo aplinkos oro užterštumui matuoti galimybes. Tikslui pasiekti iškelti keturi pagrindiniai uždaviniai: išnagrinėti skirtingas bepiločių orlaivių konstrukcijas ir jų valdymo metodus; išanalizuoti bepilotės skraidyklės panaudojimo kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių koncentracijai matuoti galimybes; suprojektuoti ir sumontuoti prie bepiločio orlaivio korpuso tvirtinamą kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių matavimo sistemą; ištirti suprojektuotą prie bepiločio orlaivio korpuso pritvirtintą kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių matavimo sistemą, taikant skirtingus teršalų matavimo metodus.

Analitinėje šio projekto dalyje apžvelgtos bepiločių orlaivių konstrukcijos, jų valdymo metodai, taip pat dronų panaudojimo kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių matavimams atlikti galimybės. Matavimus galima atlikti žmogui sunkiai arba visai nepasiekiamose vietose, pavyzdžiui virš aukštai esančių kaminų. Tyrimai taip pat atskleidė, kad matavimo įrangą būtina apsaugoti ar kitaip uždengti nuo vėjo. Vieno sparno konstrukcija nors ir pasižymi dvigubai ilgesniu skrydžio laiku, bet daugiasraigčiai bepiločiai orlaiviai universalesni. Taip pat nustatyta, kad „Fuzzy-PID“ valdymo stabilizatoriai užtikrina 2–3 kartus mažesnę užduotos pozicijos paklaidą ir trumpesnę stabilizavimo laiką lyginant su PID reguliatoriais.

Eksperimentinėje dalyje išnagrinėta naudota gamyklinė įranga (tiriamasis „DJI Mavic 3 Enterprise RTK“ bepilotis orlaivis, matavimo prietaisai: kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių, „Extech instruments“ 45160 oro sąlygų, „Raytek MiniTemp MT“ infraraudonųjų spindulių temperatūros ir kt.). Taip pat specialiai šiam projektui suprojektuotos bei 3D spausdintuvu spausdintos detalės (laikiklis, gaubtas, vamzdelis ventiliatoriui, dėžė).

Tiriamajoje dalyje aprašyti septyni įgyvendinti moksliniai eksperimentai: temperatūros pokyčių, bepiločio orlaivio varikliuose, akumuliatoriuje ir radiatoriuje, esant skirtingam krovinio svoriui, tyrimas; variklių sukeltos oro turbulencijos, esant skirtingam krovinio svoriui, tyrimas; krovinio svorio įtakos bepilotės skraidyklės skrydžio laikui tyrimas; kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių matavimai: a) be drono, tiriant matavimo įrangos galimybes, b) su dronu, kai matavimų įranga pritvirtinta prie virvės, c) naudojant matavimo su gaubtu metodą, d) naudojant matavimo per vamzdelį metodą.

Matavimo su gaubtu metodui įgyvendinti matavimų įranga buvo prikabinta ant drono su dviejų metrų virve ir uždengta gaubtu, siekiant apsaugoti orlaivį nuo oro turbulencijos ir vėjo. Matavimo per vamzdelį metodui įgyvendinti matavimo įranga pritvirtinta ant drono korpuso viršaus, uždengiant jutiklius specialia konstrukcija, o dūmus įtraukiant reguliuojamo greičio ventiliatoriumi per anglies pluošto vamzdelį.

Atlikti tyrimai leido įvertinti bepiločio orlaivio galimybes gabenti 605 ir 402 gramų svorio įrangą. Nustatyta, kad kuo didesnis prie bepilotės skraidyklės pritvirtintos matavimo įrangos svoris, tuo: a) 3 kartus mažesnis skrydžio laikas; b) variklių temperatūrą artima kritinei, t. y. 92 °C; c) didesnė oro turbulencija drono apačioje (9,1 m/s). Naudojant matavimo per vamzdelį metodą galima pašalinti vėjo įtaką matavimo rezultatams, o ventiliatoriaus užtikrina, kad jutikliai nepasiektų savo maksimalių matuojamų reikšmių.

Bručas, Eimantas. Research of the Possibilities of Using a Drone to Measure Ambient Air Pollution. Master's Final Degree Project / supervisor assist. dr. Olga Strikulienė; Panevėžys Faculty of Technologies and Business, Kaunas University of Technology.

Study field and area: Electronics Engineering, Technology Sciences.

Keywords: unmanned aerial vehicle, drone, unmanned aircraft, measurement methods, harmful gases, particulate matter.

Panevėžys, 2025. 66 pages.

Summary

The final project investigated the possibility of using different measurement methods with an unmanned aerial vehicle to measure the concentration of various harmful gases and particulate matter in the air. It also analyzed the weight of the equipment that the test drone can successfully lift and carry. The aim of the project is to explore the possibilities of using an unmanned aerial vehicle to measure ambient air pollution. To achieve this aim, four main tasks were set: to analyze different UAV designs and their control methods; to examine the possibilities of using a drone to measure concentrations of harmful gases and particulate matter; to design and mount a measurement system for harmful gases and particulate matter on the UAV body; and to test the designed measurement system mounted on the UAV body by applying different pollutant measurement methods.

The analytical part of this project reviews UAV structures, their control methods, as well as the potential of drones for measuring harmful gases and particulate matter. Measurements can be performed in places that are difficult or even impossible for humans to access, such as above high chimneys. The research also revealed that the measurement equipment must be protected or otherwise shielded from the wind. Although a fixed-wing design offers twice the flight time, multicopter UAVs are more versatile. It was also found that Fuzzy-PID control stabilizers ensure 2–3 times smaller position error and shorter stabilization time compared to PID controllers.

The experimental part examined the factory equipment used (the test UAV “DJI Mavic 3 Enterprise RTK”, measuring devices: for harmful gases and particulate matter, “Extech Instruments” 45160 weather meter, “Raytek MiniTemp MT” infrared thermometer, etc.). Also, parts specially designed for this project and printed with a 3D printer (a holder, hood, tube for the fan, and a container).

The research part describes seven scientific experiments carried out: investigation of temperature changes in the UAV motors, battery, and radiator at different payload weights; investigation of air turbulence generated by the motors at different payload weights; investigation of the effect of payload weight on drone flight time; measurements of harmful gases and particulate matter: a) without the drone, assessing the capabilities of the measurement equipment, b) with the drone, when the measuring device is attached to a rope, c) using the hooded measurement method, d) using the tube-based measurement method.

To implement the hooded measurement method, the measurement equipment was suspended on the drone with a two-meter rope and enclosed in a hood to protect the device from air turbulence and wind. To implement the tube-based measurement method, the measurement equipment was mounted

on top of the drone body, with sensors enclosed in a special structure, and smoke was drawn in using a variable-speed fan through a carbon fiber tube.

The conducted research enabled the evaluation of the drone's ability to carry equipment weighing 605 and 402 grams. It was found that the greater the weight of the measurement equipment attached to the UAV, the following occurs: flight time is reduced by a factor of three; the motor temperature approaches a critical level of 92°C; and air turbulence under the drone increases (9.1 m/s). The tube-based measurement method eliminates the effect of wind on the measurement results, and the fan ensures that the sensors do not reach their maximum measurable values.

Turinys

Lentelių sąrašas	10
Terminų sąrašas.....	13
Įvadas.....	14
1. Bepiločių orlaivių konstrukcijos ir valdymo metodai	15
1.1. Skirtingos bepiločių orlaivių konstrukcijos.....	15
1.1.1. Fiksuoto sparno bepilotis orlaivis.....	15
1.1.2. Keturių sraigčių bepilotis orlaivis	16
1.1.3. Šešių sraigčių bepilotis orlaivis.....	17
1.1.4. Aštuonių sraigčių bepilotis orlaivis.....	17
1.2. Bepiločių orlaivių valdymo metodai	17
1.2.1. Papildoma įranga ir energijos šaltiniai	25
1.3. Bepiločių orlaivių diagnostika.....	27
2. Bepilotės skraidyklės panaudojimas skirtinguose žmogaus kasdieninio gyvenimo srityse	32
2.1. Siuntų pristatymas ir žemės ūkis	32
2.2. Kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių koncentracijos matavimas	33
3. Eksperimentinė dalis	37
3.1. Reikalavimai skrydžiams.....	37
3.2. Tiriamos medžiagos.....	37
3.3. Fizinė įranga	38
3.3.1. Bepilotis orlaivis „DJI Mavic 3 Enterprise RTK“.....	38
3.3.2. Kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių matavimo prietaisas	39
3.3.3. Nešiojamas kompiuteris „LENOVO YOGA Slim 6 14IAP8“ su programine įranga	41
3.3.4. Oro sąlygų matavimo prietaisas „Extech instruments“ 45160.....	42
3.3.5. Infraraudonųjų spindulių temperatūros matavimo prietaisas „Raytek MiniTemp MT“	42
3.4. Matavimo su gaubtu metodas	43
3.4.1. Papildomi konstrukciniai elementai	43
3.4.2. Struktūrinė schema	45
3.5. Matavimo per vamzdelį metodas.....	46
3.5.1. Papildomi konstrukciniai elementai ir įranga.....	46
3.5.2. Struktūrinė schema	50
4. Tiriamoji dalis.....	52
4.1. Svorio įtaka variklių ir radiatoriaus temperatūroms	52
4.2. Oro turbulencijos priklausomybė nuo krovinio svorio.....	53
4.3. Svorio įtaka skrydžio laikui.....	55
4.4. Aukščio pokyčio priklausomybė nuo įrangos svorio	56
4.5. Kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių matavimai	56
Išvados	62
Literatūros ir informacinių šaltinių sąrašas	63

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Vėjo įtaka skrydžio laikui [5]	17
2 lentelė. Bepilotės skraidyklės modelio duomenys [13]	20
3 lentelė. Krovinio svorio santykis su skrydžio laiku [27]	32
4 lentelė. CO dujų matavimo rezultatai skirtingu laiku ir skirtingame aukštyje [34]	34
5 lentelė. Bepiločio orlaivio „DJI Mavic 3 Enterprise“ techninė specifikacija	38
6 lentelė. Elektrocheminių ZE03 jutiklių techninė specifikacija	39
7 lentelė. Lazerinio kietųjų dalelių jutiklio ZH03B techninė specifikacija	40
8 lentelė. Mikrovaldiklio „Raspberry PI Zero W“ techninė specifikacija	40
9 lentelė. Modulio „LiPO SHIM“ techninė specifikacija	40
10 lentelė. Kompiuterio „LENOVO YOGA Slim 6 14IAP8“ techniniai duomenys.....	41
11 lentelė. Oro sąlygų matavimo prietaiso „Extech instruments“ 45160 techninė specifikacija	42
12 lentelė. Temperatūros matavimo prietaiso „Raytek MiniTemp MT“ techninė specifikacija	43
13 lentelė. Elektronikos komponentai greičio valdymo schemai.....	49
14 lentelė. „LoLin NodeMCU“ ESP8266 mikrovaldiklio techniniai parametrai	49
15 lentelė. Svorio įtaka variklių ir radiatoriaus temperatūroms	53
16 lentelė. Svorio įtaka skrydžio laikui.....	55
17 lentelė. Aukščio pokyčio priklausomybė nuo įrangos svorio	56
18 lentelė. Kietojo kuro katilo „KALVIS PR2-SN“ techninė specifikacija	57
19 lentelė. Kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių matavimų rankiniu būdu rezultatai.....	58
20 lentelė. Kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių matavimų rezultatai, naudojant matavimo su gaubtu metoda, bet neuždėjus paties gaubto	58
21 lentelė. Kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių matavimų rezultatai, naudojant matavimo su gaubtu metoda	60
22 lentelė. Kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių matavimų rezultatai, naudojant matavimo per vamzdelį metoda	60

Paveikslų sąrašas

1 pav. Skrydžio greitis esant skirtingiems skrydžio režimams [3].....	16
2 pav. Aukščio kontrolė [10].....	18
3 pav. Vertimosi į šonus kontrolė [10].....	18
4 pav. Vertimosi pirmyn-atgal kontrolė [10]	18
5 pav. Sukimosi aplink savo ašį kontrolė [10]	19
6 pav. Aukščio kontrolės vertinimas, esant vėjui [12]	19
7 pav. PID valdymo modelis [13]	20
8 pav. PID valdymo metodo rezultatai [13]: a) pakilimas į aukštį; b) pasisukimas į šonus; c) pasivertimas pirmyn-atgal; d) pasivertimas į šonus	21
9 pav. PID valdymo metodo rezultatai, esant triukšmui [13]: a) pakilimas į aukštį; b) pasisukimas į šonus; c) pasivertimas pirmyn-atgal; d) pasivertimas į šonus	22
10 pav. „Backstepping“ valdymo metodo rezultatai, esant triukšmui [13]: a) pakilimas į aukštį; b) pasisukimas į šonus; c) pasivertimas pirmyn-atgal; d) pasivertimas į šonus	22
11 pav. Pasiektas aukštis [15]	23
12 pav. Pasiektas greitis [15]	23
13 pav. Pasiakta akceleracija [15].....	23
14 pav. Tinkamo skrydžio atstumo matavimas [17]	24
15 pav. Pasisukimo reakcijos laikas [17]	25
16 pav. Pasivertimo reakcijos laikas [17]	25
17 pav. Naujos ir senos baterijų išsikrovimo lygio palyginimas [22].....	27
18 pav. Baterijos talpos kritimas didėjant įkrovimo ciklams [22]	27
19 pav. Sistemos su TMR ir be TMR patikimumo palyginimas [24].....	28
20 pav. Skrydžio duomenų palyginimas naudojant naują filtrą ir duomenys iš IMU jutiklio [26]	29
21 pav. Skrydžio kelias su bepiločio orlaivio vaizdo kamera [26]	30
22 pav. Skrydžio kelias su bepiločio orlaivio įvykių kamera [26].....	30
23 pav. Skrydžio metu gauti testavimo duomenys [26].....	31
24 pav. Nuodingų dujų matavimo rezultatai, priklausomai nuo dronų būrio išsidėstymą erdvėje [33]	33
25 pav. CO dujų matavimo sistema [34].....	34
26 pav. Kietųjų dalelių matavimai virš elektrinės kamino [35].....	35
27 pav. Miško gaisrų metu išsiskiriančių kenksmingų medžiagų matavimai bepiločiu orlaiviu [36]	36
28 pav. Metano dujų matavimai [37]	36
29 pav. Kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių matavimo prietaisas	41
30 pav. Laikiklis skirtas bepiločiam orlaiviui	44
31 pav. Laikiklis skirtas virvei pririšti	44
32 pav. Laikiklis skirtas virvei ir įrangai prisukti	44
33 pav. Plastmasinis kubelis iš žaislinio rinkinio	45
34 pav. Plastmasinė tuščiavidurė lazdelė iš žaislinio rinkinio	45
35 pav. Gaubtas matavimo įrangai apsaugoti	45
36 pav. Eksperimentinės sistemos schema, naudojant matavimo su gaubtu metodą.....	46
37 pav. Matavimo įrenginio uždengimo konstrukcija	46
38 pav. Dėžė matavimo įrangai montuoti	47
39 pav. Dėžės dangtelis.....	47

40 pav.	Ventiliatorius, naudojamas oro srautui vamzdyje sukurti	47
41 pav.	Perėjimas iš ventiliatoriaus į anglies pluošto vamzdelį.....	48
42 pav.	Anglies pluošto vamzdelis.....	48
43 pav.	Ventiliatoriaus valdymo elektrinė schema	48
44 pav.	Sulituota ventiliatoriaus greičio reguliavimo schema	49
45 pav.	„LoLin NodeMCU“ ESP8266 mikrovaldiklis	49
46 pav.	Sukurtos „Android“ programėlės vaizdas telefone	50
47 pav.	Eksperimentinės sistemos schema, naudojant matavimo su vamzdeliu metodą.....	51
48 pav.	Bepiločio orlaivio „DJI Mavic 3 Enterprise RTK“ variklių ir radiatoriaus išdėstymas.....	52
49 pav.	Išmatuota oro turbulencijos reikšmė be matavimo įrangos.....	54
50 pav.	Išmatuota oro turbulencijos reikšmė, taikant matavimo su gaubtu metodą	54
51 pav.	Išmatuotos oro turbulencijos reikšmė, taikant matavimo per vamzdelį metodą	54
52 pav.	Oro turbulencijos priklausomybė nuo krovinio svorio	54
53 pav.	Skrydžio laiko priklausomybės nuo skraidinamos įrangos svorio grafikas	55
54 pav.	Matavimo rezultatų pavyzdys „MobaXterm“ programinėje įrangoje.....	57
55 pav.	Matavimas laikant įrangą rankoje	58
56 pav.	Matavimas, naudojant matavimo su gaubtu metodą, bet neuždėjus paties gaubto	59
57 pav.	Matavimas naudojant matavimo su gaubtu metodą	59
58 pav.	Matavimas naudojant matavimo per vamzdelį metodą.....	60

Terminų sąrašas

Terminai:

Dronas (bepilotė skraidyklė, bepilotis orlaivis) – autonomiškai arba nuotoliniu būdu valdomas skraidymo aparatas, kuriame nėra piloto (įgulos), naudojamas kariniais, civiliniais, komerciniais ar pramogų tikslais [30].

Ivadas

Kasdien sparčiai augant prekių / produktų vartojimo mastams, didėja kenksmingų atliekų kiekiai. Ne visos atliekos rūšiuojamos arba bent jau pasiekia specialias tam skirtas vietas: šiukšlių kontenerius, atliekų sąvartynus ir kt. Išmestos atliekos išskiria metano dujas ir anglies dioksidą. Šios dujos daro neigiamą poveikį gamtai, žemės atmosferai. Augant žmonių mobilumui, didėja automobilių su vidaus degimo varikliais skaičius. Nemaža tokių transporto priemonių dalis turi netvarkingas išmetimo sistemas, prisidedančias prie didmiesčių oro užterštumo didinimo. Taip pat ne paslaptis, kad gamybos įmonės į aplinką „išmeta“ kenksmingas medžiagas, kurios teršia orą, vandenį ir dirvožemį. Greitai ir efektingai užfiksuoti labiausiai užterštus miesto ar miško plotus galima naudojant jutiklius, matuojančius kenksmingų dujų kiekius ore. Šioje vietoje kyla techninė problema, kaip tokius jutiklius transportuoti virš didelių, pvz., miško plotų, gatvių, miestų ar aukštai esančių kaminų. Galimas sprendimas – naudoti dronus, kurie plačiai naudojami daugelyje pramonės šakų.

Tyrimo objektas – bepilotis orlaivis su kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių matavimo įranga.

Tikslas – ištirti bepiločio orlaivio pritaikymo aplinkos oro užterštumui matuoti galimybes.

Uždaviniai:

1. Išnagrinėti skirtingas bepiločių orlaivių konstrukcijas ir valdymo metodus.
2. Išanalizuoti bepilotės skraidyklės panaudojimo kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių koncentracijai matuoti galimybes.
3. Suprojektuoti ir sumontuoti prie bepiločio orlaivio korpuso tvirtinamą kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių matavimo sistemą.
4. Ištirti suprojektuotą prie bepiločio orlaivio korpuso pritvirtintą kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių matavimo sistemą, taikant skirtingus teršalų matavimo metodus.

Tyrimo metodai – mokslinės literatūros analizė, praktiniai eksperimentai.

Konferencijoje(-jose) skaityti pranešimai:

1. Bručas, Eimantas; Bepiločio orlaivio su kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių matavimo įranga tyrimas. 24-oji studentų mokslinių darbų konferencija „Technologijų ir verslo aktualijos“. Panevėžys: Kauno technologijos universiteto Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas, 2024 m. lapkričio 22 d.

Autoriaus publikuotų straipsnių bibliografinis sąrašas:

1. Bručas, Eimantas; Strikulienė, Olga; Pelenis, Donatas. Bepiločio orlaivio su kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių matavimo įranga tyrimas // Technologijų ir verslo aktualijos – 2024: studentų mokslinių darbų konferencijos pranešimų medžiaga, Lietuva, Panevėžys, 2024 m. lapkričio 22 d. / Kauno technologijos universiteto Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas. Kaunas: Kauno technologijos universitetas. ISSN 2538-8045. 2024, p. 266–273.

1. Bepiločių orlaivių konstrukcijos ir valdymo metodai

Pirmiausiai, bus apžvelgti skirtingų konstrukcijų bepiločiai orlaiviai, kurie projekte dar bus vadinami dronais arba bepilotėmis skraidyklėmis. Tai pagrindiniai tiriamosios įrangos nešėjai, todėl itin svarbu teisingai parinkti jų konstrukcijas ir valdymo metodus, siekiant užtikrinti ilgiausią skrydžio laiką bei išlaikyti greitį.

1.1. Skirtingos bepiločių orlaivių konstrukcijos

Siekiant nustatyti, kokio tipo bepilotis orlaivis tinką tam tikrai operacijai atlikti, būtina išsiaiškinti kiekvienos konstrukcijos ypatybes.

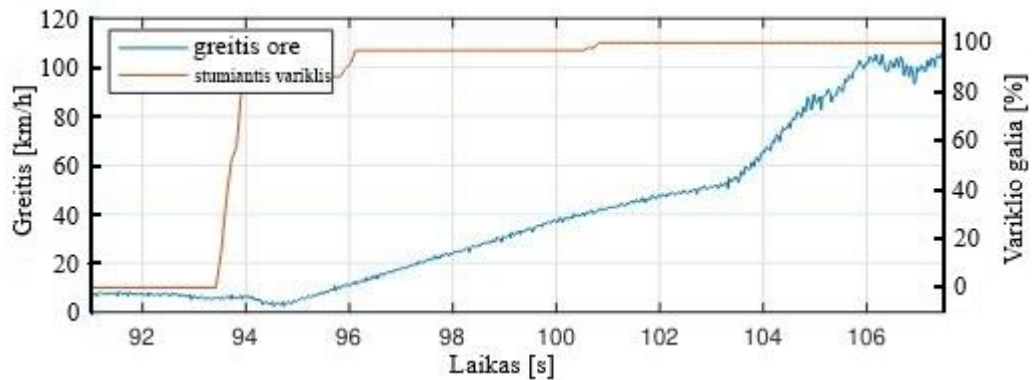
1.1.1. Fiksuoto sparno bepilotis orlaivis

Fiksuoto sparno bepiločių orlaivių konstrukcija panaši į šiomis dienomis gaminamų komercinių ir pramoginių lėktuvų konstrukciją. Dažniausiai šie orlaiviai turi vieną arba du variklius, kurie leidžia jam pakilti į norimą aukštį vertikaliai arba horizontaliai. Fiksuoto sparno orlaiviai naudojami karinėje pramonėje, nes vieno sparno konstrukcija leidžia sklęsti oru, sunaudojant mažiau energijos, dėl ko prailgėja skrydžio laikas. Naudojant GPS jutiklį galima užtikrinti visiškai autonominį drono veikimą. Šio tipo skraidyklę tyrė mokslininkai Hasan'as ir kt. [1]. Tyrėjai naudodami droną ne tik atliko eksperimentinius skrydžius, bet ir tyrė jo galimybes virtualioje erdvėje. Virtualiam vieno sparno bepilotės skraidyklės modeliui atliktas aerodinamikos tyrimas, kuris leido įvertinti šios konstrukcijos savybę pasipriešinti vėjui kai orlaivis sklendžia. Autoriai naudodami „SolidWorks CFD“ programinę įrangą, leidusią įvertinti oro srauto ir slėgio pasiskirstymą aplink skraidyklę, ją veikiant 90 km/h vėjui. Viršutinės sparno dalies slėgis siekė 101 375,29 Pa, o apatinės dalies – 101 298,67 Pa, gautas 76,62 Pa skirtumas. Įvertinus gautą skirtumą, apskaičiuotas maksimalus aukštis, į kurį gali pakilti dronas. Vykdam realius skrydžio testus, nustatytas orlaiviui pakilti reikalingas ir sklandymo greičiai, atstumas, kuriuo jis gali nutolti nuo valdymo centro ir maksimalus skrydžio laikas. Kadangi skraidyklė buvo sukurta naudoti pesticidams laukuose purkšti, papildomai vertintas ir jos išpurkšto pesticidų kiekio pasiskirstymo plotas. Rezultatai parodė, kad 4,5 kg svorio dronui reikalingas 45–50 km/h pakilimo greitis, o skrydžio metu jo greitis varijavo nuo 30 iki 60 km/h. Įrenginio skrydžio laikas siekė apie 20 minučių, o toliausias nuo valdymo centro nuskristas atstumas – 5 kilometrai.

Kūrėjai Hasan'as ir kt. [2] tyrė ir didesnių gabaritų vieno sparno bepiločių skraidyklių modelius. Pirma, buvo apskaičiuota ir įvertinta jų keliamaoji galia. Priimta, kad 8 kilogramų dronas kels 12,6 kilogramų svorį. Šių mokslininkų atliktas tyrimas įrodė, kad esant aprašytos sąlygoms, reikalingas 45 km/h pakilimo greitis. Palyginus abu tyrimus matyti, kad norint į orą pakelti 4,5 kg ir 8 kg dronus, reikalingas toks pat 50 km/h pakilimo greitis.

Atliktas eksperimentas taip pat įrodė, kad kuo sunkesnė skraidyklė ir kuo ilgesnis yra norimas skrydžio laikas, tuo žemesniame aukštyje dronas turi skristi. Taip atsitinka todėl, kad dideliame aukštyje pučia stipresnis vėjas ir orlaivis turi įveikti didesnę pasipriešinimą, todėl reikalingas reikalingos didesnės variklio apsukos tolygiam skraidyklės greičiui išlaikyti.

Kūrėjai Okulsk'is ir Ławrynczuk'as sukūrė droną „hibridą“ [3], kuris turi du sparnus ir penkis variklius: vienas variklis naudojamas skrendant lėktuvo režimu, o keturi varikliai – drono režimu ir pakilimui į norimą aukštį. Analizuotas maksimalus tokio tipo orlaivio greitis, skrendant skirtingais režimais. Rezultatai pateikti grafike (žr. 1 pav.).



1 pav. Skrydžio greitis esant skirtingiems skrydžio režimams [3]

Grafike (žr. 1 pav.) mėlyna linija vaizduoja skrydžio greitį, kai skrendama drono režimu ir naudojami keturi varikliai – pasiektas maksimalus apie 100 km/h greitis, o raudona linija vaizduoja skrydžio greitį, kai skrendama lėktuvo režimu ir naudojamas vienas variklis – pasiektas tolygus apie 110 km/h greitis, maksimalus greitis pasiekiamas per 12 sekundžių [3].

1.1.2. Keturių sraigčių bepilotis orlaivis

Renkantis drono tipą, svarbu įvertinti jo turimų variklių skaičių. Keturių variklių sistema – dažnai naudojamas variantas, kadangi sveria mažiau, lyginant su šešių ar aštuonių variklių sistemomis, nes naudojamas skirtingas komponentų skaičius, kurie ir nulemia bendrą skraidyklės svorį. Tačiau daugiau nei keturis variklius turinčios skraidyklės pasižymi didesne keliamąja galia. Kvadropterio tipo dronai lengvi, mobilūs ir tinka nesudėtingoms vietinės reikšmės operacijoms atlikti. Pritaikant skirtingus valdymo būdus galima padidinti baterijos veikimo laiką ir užtikrinti pavestų orlaiviui užduočių vykdymą. Tokį tyrimą atliko mokslininkai de Alteriis'is ir kt. [4], kurie panaudoję paprastą, parduotuvėje nupirktą droną, sudarė skrydžio planą ir jį įgyvenimo praktikoje, valdydami skraidyklę rankiniu būdu. Vėliau buvo apmokytas neuroninis tinklas, kuris pagal duotus skrydžio plano taškus įvertindavo galimus nukirsti taškus tiesiosiose. Modeliuojant neuroninį tinklą ir analizuojant gautą informaciją, nustatytas nežymus apie 1 sekundės, priklausomai nuo apskristų ratų skaičiaus, bendras skrydžio laiko sumažėjimas. Tai įrodo, kad neuroninio tinklo generuoto skrydžio plano naudojimas leidžia taupyti bepilotio orlaivio skrydžio laiką ir prailginti baterijos įkrovimo laiką.

Dronai, turintys keturių sraigčių konstrukciją, į orą gali pakilti vertikalčiai, o turint galios resursų, norimam aukščiui pasiekti nebūtinai didelis greitis. Tačiau kaip ir bet kokią skraidantį objektą ore veikia trikdys – vėjas. Buvo atliktas tyrimas [5], kuriame naudotas „AirSim“ atvirojo kodo treniruoklis. Treniruoklyje atlikti bandomieji skrydžiai su keturių sraigčių konstrukcijos dronais: 24 skrydžiuose buvo simuliuojami 8-ių skirtingų krypčių vėjai dvejuose dimensijose, ir matuojamas jų poveikis skraidyklei. Drono skrydžiui parinktas 54 km/h greitis, nustatytas galutinis skrydžio taškas ir skirtingi vėjo greičiai. Vėjui sukurti naudota „Unreal Engine Editor“ programa. Pasiekus galutinį tašką fiksuotas skrydžio laikas, kuris lygintas su teoriškai apskaičiuotu skrydžio laiku. Šie palyginimai pateikti 1 lentelėje.

1 lentelė. Vėjo įtaka skrydžio laikui [5]

Vėjo kryptis	Apskaičiuotas laikas, s	Modeliavimo laikas, s	Skirtumas, s
1	40,00	48,33	8,33
2	49,26	58,00	8,74
3	89,44	102,00	12,56
4	162,40	176,00	13,60
5	200,00	213,67	13,67
6	162,40	176,00	13,60
7	89,44	102,67	13,23
8	49,26	57,33	8,07

Įvertinus 1 lentelėje tyrėjų gautus duomenis, matyti, kad vėjo įtaką skrydžio laikui, lyginant duomenys gautus modeliuojant ir realiomis sąlygomis, skiriasi apie nuo 10 iki 20 proc., nes treniruoklyje dronas neskrenda tiesia trajektorija bei pastoviu greičiu.

1.1.3. Šešių sraigčių bepilotis orlaivis

Kadangi nėra apibrėžta kiek variklių gali turėti bepilotočiai orlaiviai, kitoje labai paplitusioje skraidyklių konstrukcijoje naudojami 6 varikliai. Norint išsiaiškinti šios konstrukcijos privalumus, sukurtas eksperimentinis dronas [6]. Atliekant bandymus nustatyta, kad heksakopteriai, lyginant su keturių sraigčių sistema, turi keletą pranašumų. Pirma, dėl dviejų papildomų variklių jie stabilesni nei kvadrakopteriai. Tai padaro juos tinkamesnius operacijoms, kurios reikalauja tikslaus valdymo ir manevringumo. Be to, jie gali pernešti sunkesnius kroviniai ir / arba ant jų gali būti sumontuotos didesnės bei galingesnės kameros. Galiausiai, jie gali skristi greičiau, nes dėl didesnio variklių skaičiaus pasižymi didesne galia, taip pat turi potencialo skraidinti didesnės talpos baterijas, kurių svoris proporcingai priklauso nuo jų talpos. Tačiau šeši varikliai sukuria, priklausomai nuo variklių galingumo, dar didesnę oro turbulenciją [7].

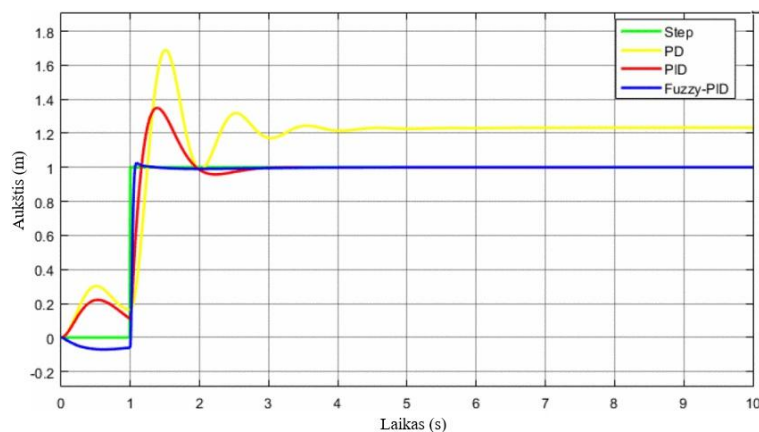
1.1.4. Aštuonių sraigčių bepilotis orlaivis

Apžvelgus dažniausiai sutinkamus keturių ir šešių sraigčių bepilotočius orlaivius, būtina paminėti ir aštuonių sraigčių dronų modifikaciją. Mokslininkų atliktame tyrime [7] buvo vertinta šešių sraigčių sukuriama oro turbulencija, tuo tarpu [8] šaltinyje analizuota aštuonių sraigčių drono konstrukcija: keturi sraigčiai išdėstyti įprastai, o kiti keturi simetriškai apversti jiems iš apačios. Tyrimo rezultatai parodė, kad nors ir sukuriami apie 20 procentų didesnė pakilimo jėga, tačiau gali atsirasti vibracijos išbalansuojančios sraigtes [8]. Toks variklių išdėstymas taip pat didina sukuriama oro turbulenciją po bepilotočiu orlaiviu. Būtina paminėti, kad kuo didesnis variklių skaičius, tuo tikslesnis ir stabilesnis bepilotočio orlaivio skrydis [9].

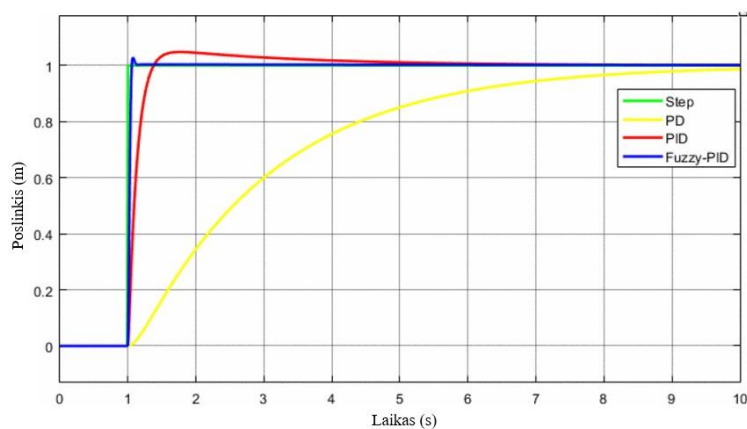
1.2. Bepilotočių orlaivių valdymo metodai

Valdymo metodo parinkimas itin svarbus projektuojant bepilotę skraidyklę. Skraidymo objektui, veikiamam įvairių trukdžių, tokių kaip vėjo intensyvumas ir kt., reikalingas stabilizavimas, kurį užtikrina valdymo sistemos, numatančios galimą nuokrypį ir kompensuojančios jį priešingos krypties variklio akceleracija. Mokslininkai [10] „MATLAB“ / „Simulink“ terpėje atliko modeliavimą, kuriame naudodami tris skirtingus valdymo būdus ir bandė stabilizuoti įėjimo signalą „Step“. Pirmasis valdymo būdas – naudojant PD reguliatorių – generuojamas išėjimo signalas, kuris

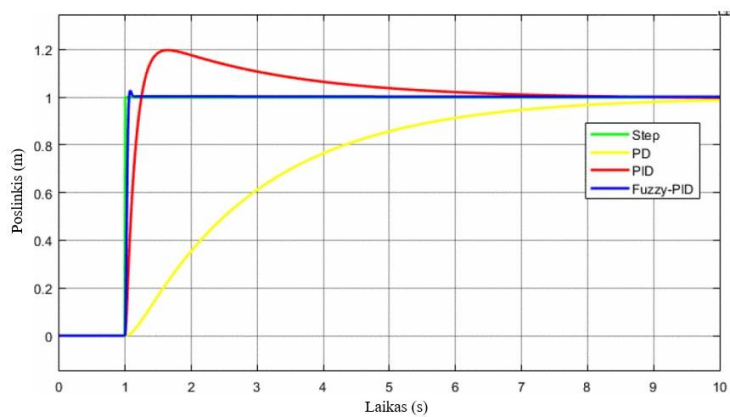
kompensuoja neatitikimus, atsirandančius išėjimo signalė. Signalų generavimas vyksta, kai reguliatorius yra parametriškai optimizuojamas. Tam naudojamos dvi grandys „P“ – proporcinė ir „D“ – diferencijuojanti. Kiti du naudoti reguliavimo būdai: PID ir „Fuzzy-PID“. PID – tai metodas, kuris panašus į PD, bet turi tris grandis, atsiranda trečioji „I“ – integruojanti. „Fuzzy-PID“ – tai metodas, kai į standartinę PID kontroliavimo metodiką įtraukiama „Fuzzy“ logika. Atliekant tyrimą ištirta drono valdymo kontrolė: aukščio, vertimosi į šonus ir pirmyn-atgal, esant neapibrėžtumui ir nestabilumui. Gauti rezultatai parodė kiekvienos reguliavimo sistemos pranašumus ir trūkumus (žr. 2, 3, 4, 5 pav.).



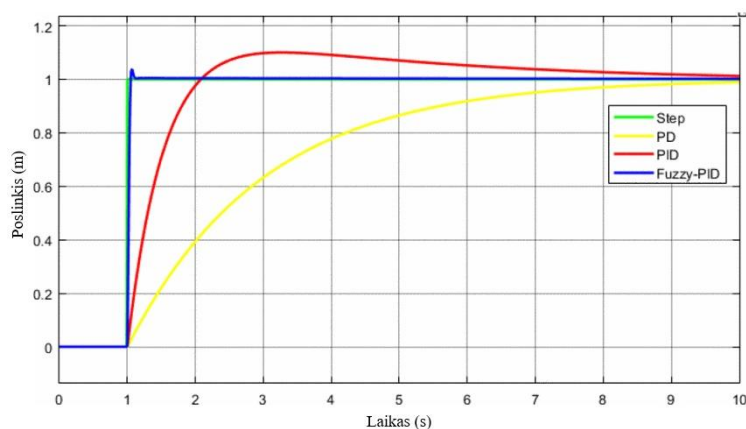
2 pav. Aukščio kontrolė [10]



3 pav. Vertimosi į šonus kontrolė [10]



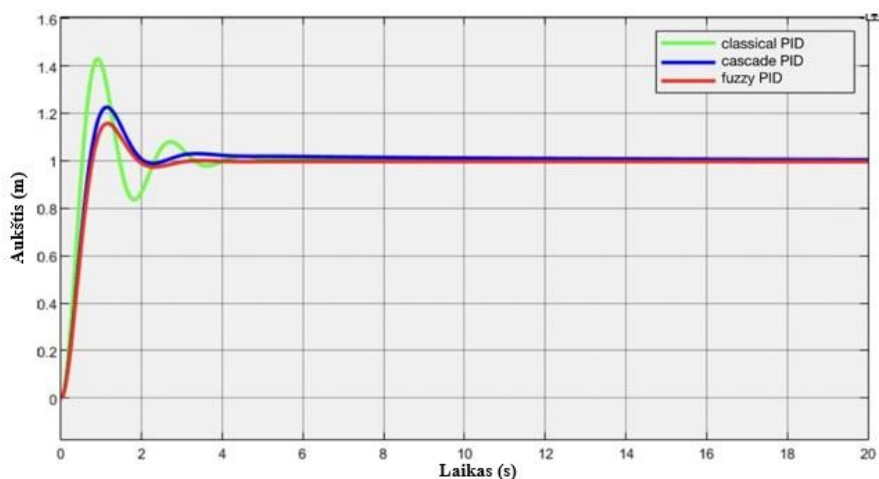
4 pav. Vertimosi pirmyn-atgal kontrolė [10]



5 pav. Sukimosi aplink savo ašį kontrolė [10]

Šiuose paveiksluose (žr. 2, 3, 4, 5 pav.) mėlyna spalva pažymėtas „Fuzzy-PID“, raudona spalva – PID ir geltona spalva – PD valdymo metodai, o žalia spalva pažymėta linija, kur užduota 1 metro riba. Matyti, kad geriausiai sistema stabilizuota, naudojant „Fuzzy-PID“ reguliavimo logiką, t. y. per greičiausią laiką ir su mažiausiu perreguliavimu bei nuokrypiais, lyginant su PID ar PD metodais [11]. Reikia pažymėti, kad vertimosi į šoną funkciją taip pat gerai stabilizavo PID valdymo metodas, kuris vis dar naudojamas daugeliuose šiuolaikiniuose skrydžio valdikliuose. Pasirenkant bėpiločių orlaivių valdymo metodą, būtina atlikti valdymo sistemų pateikiamų duomenų analizę ir juos įvertinti diagnostiniais tikslais.

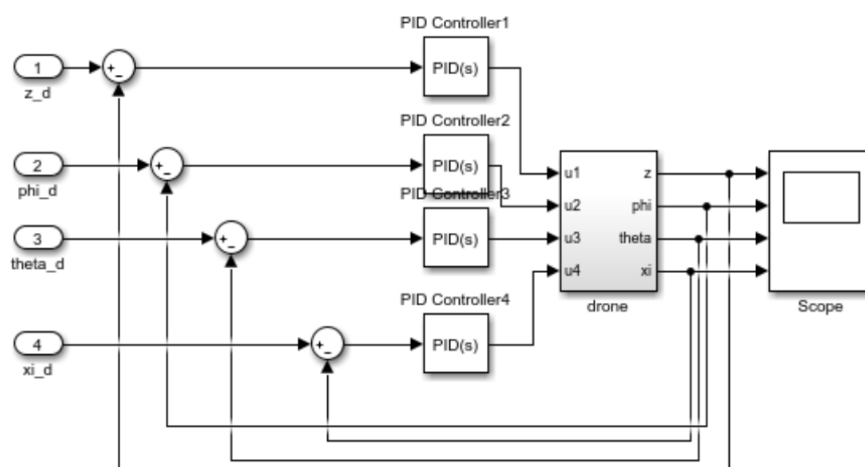
Mokslininkas [12] atliko PID ir „Fuzzy PID“ valdymo būdų tyrimą kai dronų skraidymo aplinkoje atsiranda papildomas trikdys – vėjas. Aukščio kontrolės tyrimo rezultatai pateikti 6 paveiksle.



6 pav. Aukščio kontrolės vertinimas, esant vėjui [12]

„Fuzzy PID“ reguliatorius užduotą 1 metro aukštį pasiekia per 3 sekundes (raudonos spalvos kreivė, žr. 6 pav.), maksimalus perreguliavimas siekia 1,15 m. „Classical PID“ (žalios spalvos kreivė, žr. 6 pav.) reguliatorius 1 metro aukštį pasiekia per 4 sekundes, o maksimalus perreguliavimas M_p siekia 1,4 m, t. y. M_p 22 proc. didesnis nei „Fuzzy PID“ reguliatoriaus. „Cascade PID“ (mėlynos spalvos kreivė, žr. 6 pav.) reguliatorius – per 20 s su maksimaliu 1,2 m perreguliavimu, t. y. beveik 7 kartus didesnis laikas lyginant su „Fuzzy PID“ reguliatoriumi. Lyginant 2 ir 6 paveiksluose pateiktus grafikus matyti, kad naudojant „Fuzzy PID“ reguliatorių gaunamas mažiausias perreguliavimas, ir sistema nusistovi greičiausiai.

Vienas iš plačiausiai naudojamų dronų valdymo būdų – PID reguliatorius ir jo parametrų keitimas, siekiant grįžtamojo ryšio reikšmės „privedimo“ prie norimos. Plataus naudojimo PID reguliavimo sistemos tinkamumas ir patikimumas kuriamai sistemai gali būti įvertintas, analizuojant virtualų „MATLAB“ programos „Simulink“ terpe sukurtą modelį [13] (žr. 7 pav.).



7 pav. PID valdymo modelis [13]

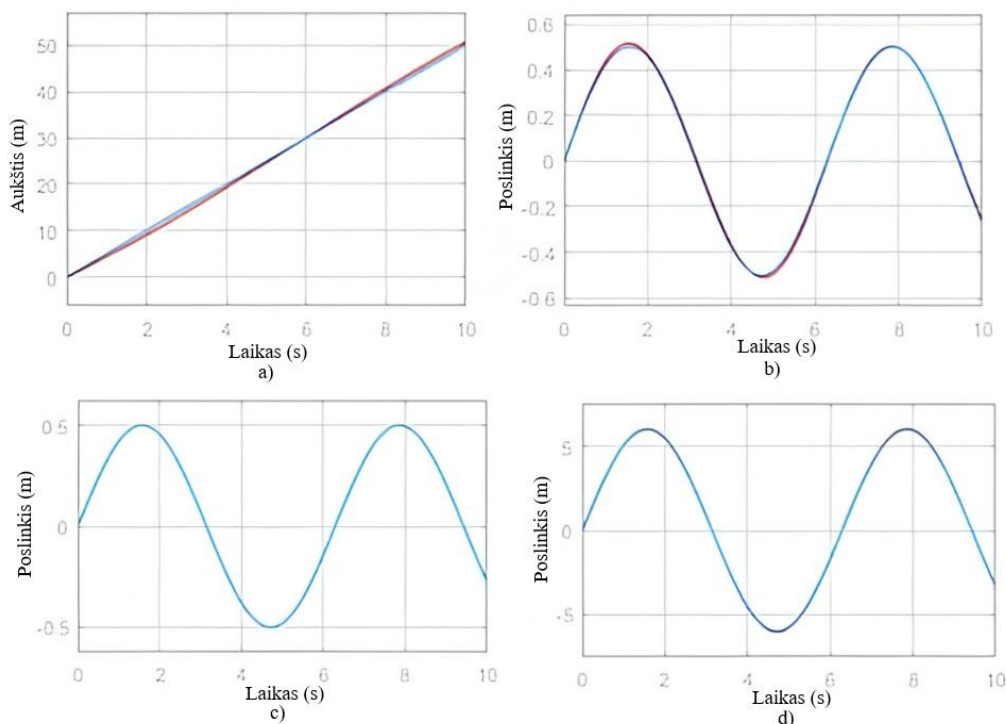
Šiame modelyje PID reguliatoriumi yra kompensuojamos norimo gauti kampo (laipsniais) reikšmės: „z_d“, „phi_d“, „theta_d“, „xi_d“. Bloke „drone“ suvedamos fizinės drono savybės, kurios pateiktos 2 lentelėje [13].

Iš 2 lentelės matyti, kad bendra drono masė 800 gramų. Tai standartinis 4 variklių bepilotis orlaivis, kurio svoris neviršija 1 kilogramo. Pirmuoju tyrimu siekta nustatyti, kokios PID reguliatoriaus reikšmės gaunamos, kai sistemos neveikia jokie išoriniai veiksniai. 8 paveiksle pateikti 4 grafikai, kuriuose analizuotos keturios pagrindinės skrydžio trajektorijos: aukštyn, pasisukimas, pasivertimas į šonus ir pasivertimas pirmyn-atgal [13].

2 lentelė. Bepilotės skraidyklės modelio duomenys [13]

Parametras	Simbolis	Reikšmė	Mat. vienetas
Masė	$M(^*)$	0,8	kg
Sferinio centro masė	m_1	0,5	kg
Rankos masė	m_2	0,04	kg
Variklio masė	m_3	0,05	kg
Sferinio centro kampas	R	0,06	m
Rankos matmenys	$L \times a \times a$	$0,1 \times 0,03 \times 0,03$	m
Variklio kampas	r	0,03	m
Inercija x ašyje	I_{xx}	0,0047	kg.m ²
Inercija y ašyje	I_{yy}	0,0047	kg.m ²
Inercija z ašyje	I_{zz}	0,0088	kg.m ²
Variklio konstanta	K_f	1,8	-
Variklio konstanta	K_M	0,325	-

Mėlyna linija (žr. 8 pav.) vaizduoja norimą gauti rezultatą, o raudona – gautą rezultatą. Didžiausias apie 4 proc. nuokrypis matomas, kai orlaivis pasiekia 10 metrų aukštį. Taip pat nuokrypį iki 1 proc. galima matyti ir pasivertime į priekį-atgal, o pasivertime į šonus ir posūkiuose PID reguliatorius optimizavo signalą taip, kad gauta ir norima reikšmės sutapo [13].



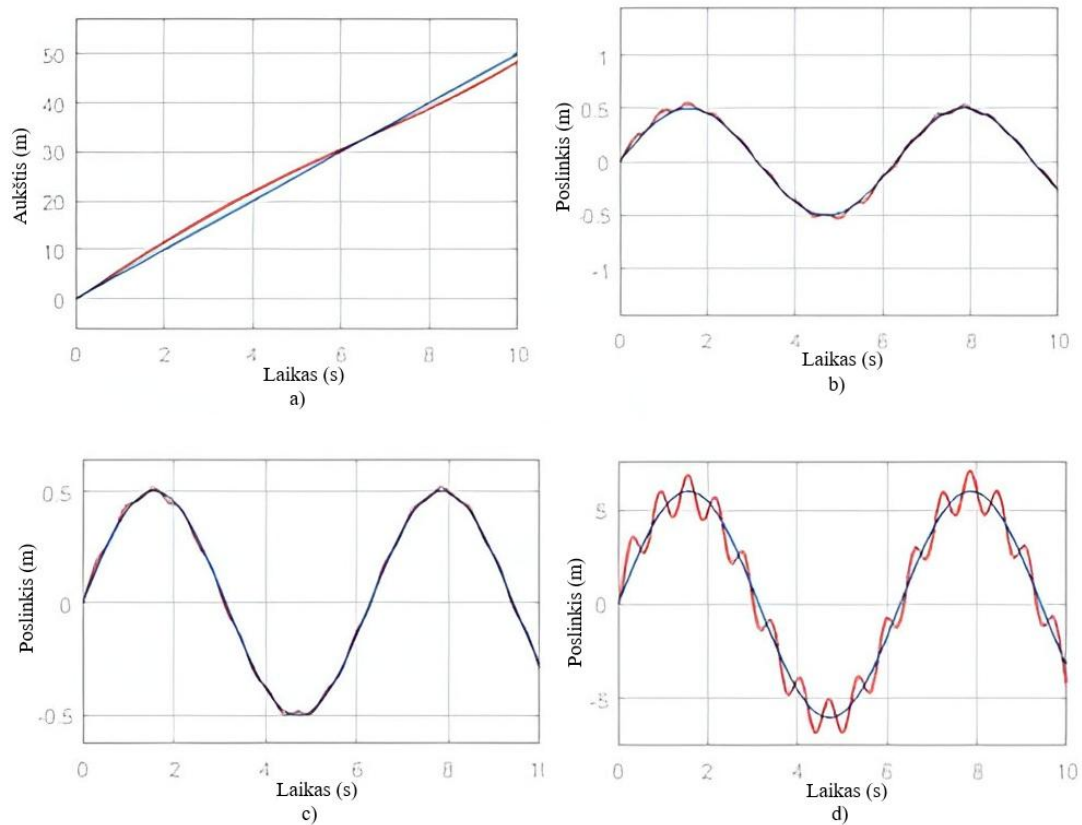
8 pav. PID valdymo metodo rezultatai [13]: a) pakilimas į aukštį; b) pasisukimas į šonus; c) pasivertimas pirmyn-atgal; d) pasivertimas į šonus

Antruoju tyrimu vertinta vėjo, oro sąlygų ir kitokių išorinių veiksnių, pavyzdžiui, triukšmo, įtaka drono skrydžio trajektorijos tikslumui. Vertintos tos pačios trajektorijos (žr. 9 pav.): aukštn, pasisukimas, pasivertimas į šonus ir pasivertimas pirmyn-atgal [13].

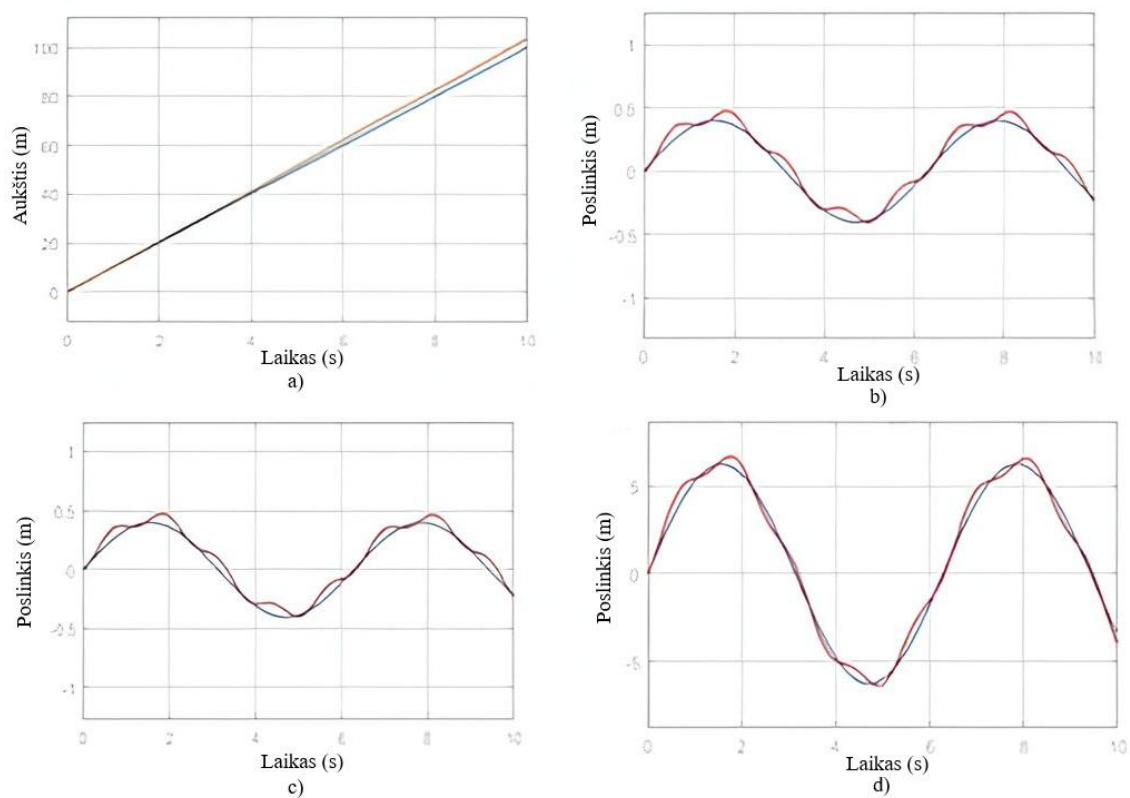
9 paveiksle matyti, kad triukšmas turi įtakos visoms analizuotoms trajektorijoms. Sunkiausiai stabilizuotas drono pasisukimas į šonus.

Autoriai taip pat išbandė „Backstepping“ stabilizavimo metodą [14], naudojamą dinaminių sistemų netiesiniam valdymui ir stabilizavimui (žr. 10 pav.) užtikrinti. Šis metodas pasiekiamas rekursyviai stabilizuojant sistemos kilmę, kurioje kontrolės procesas baigiasi, kai įvertinama galutinė išorinė kontrolė [13]. Tirta metodo trūkumas – reikalingi papildomi matematiniai skaičiavimai.

Trečiame eksperimente kaip išorinis trikdys analizuotas tik triukšmas. Gauti rezultatai (žr. 10 pav.) rodo, kad naudojant „Backstepping“ stabilizavimo būdą, dronui į 100 metrų aukštį per 10 sekundžių pakelti ir jo skrydžiui stabilizuoti, pasiektas 2 proc. nuokrypis. Visos kitos skrydžio trajektorijos turėjo apie 10 proc. nuokrypius [13]. Įvertinus abiem valdymo metodais gautus duomenis galima teigti, kad PID stabilizavimo metodas drono vertimosi į šonus metu turi mažesnius (keleto milimetrų) nuokrypius, o „Backstepping“ metodas su mažesniais nuokrypiais stabilizuoja pakylimą į aukštį ir pasisukimus į šonus.

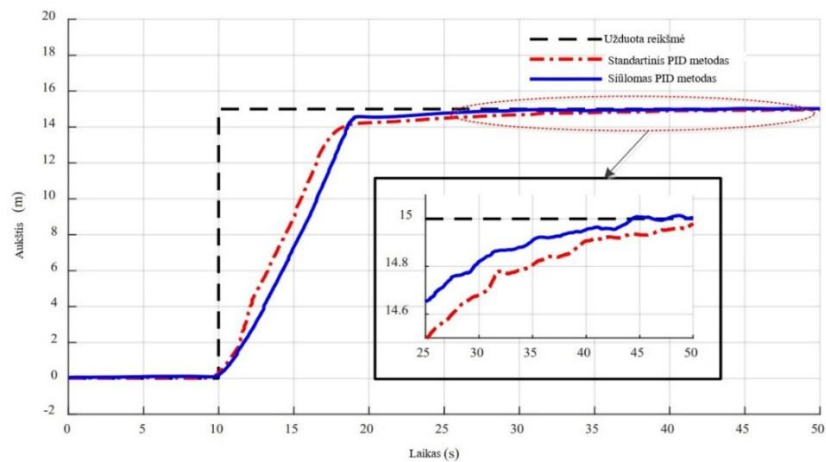


9 pav. PID valdymo metodo rezultatai, esant triukšmui [13]: a) pakilimas į aukštį; b) pasisukimas į šonus; c) pasivertimas pirmyn-atgal; d) pasivertimas į šonus

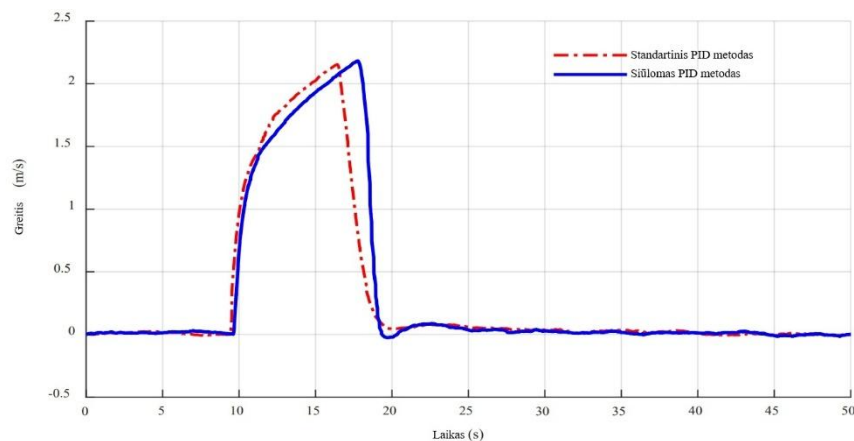


10 pav. „Backstepping“ valdymo metodo rezultatai, esant triukšmui [13]: a) pakilimas į aukštį; b) pasisukimas į šonus; c) pasivertimas pirmyn-atgal; d) pasivertimas į šonus

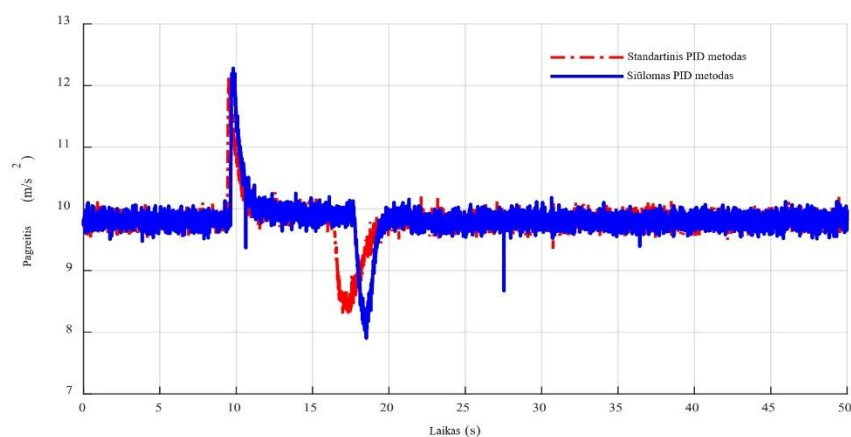
Norint pagerinti PID reguliatoriaus, naudojamo skrydžio valdikliuose dronams stabilizuoti, parametrus mokslininkai [15] sukūrė savo skrydžio valdiklį, kuris naudoja *Leapunuvo* teoriją skraidyklei stabilizuoti (žr. 11, 12, 13 pav.).



11 pav. Pasiektas aukštis [15]



12 pav. Pasiektas greitis [15]

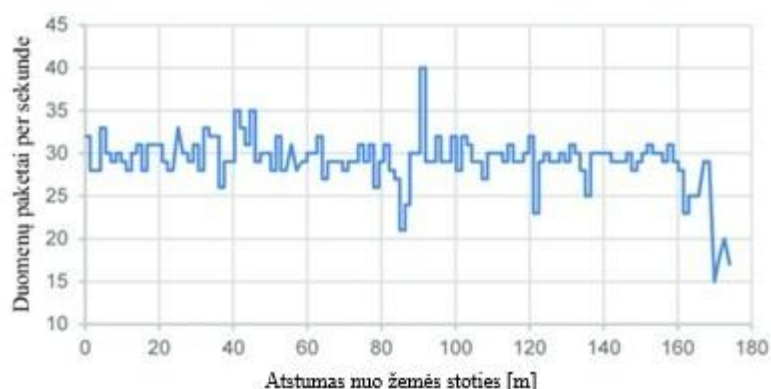


13 pav. Pasiakta akceleracija [15]

Apibendrinus grafikuose (žr. 11, 12, 13 pav.) pateiktus duomenis, galima teigti, kad naujas bepilotės skraidyklės skrydžio stabilizavimo metodas, lyginant su įprastu PID reguliavimo būdu, leidžia greičiau pasiekti užduotą aukštį (žr. 11 pav.) – į 15 metrų aukštį dronas pakilo 7 s greičiau.

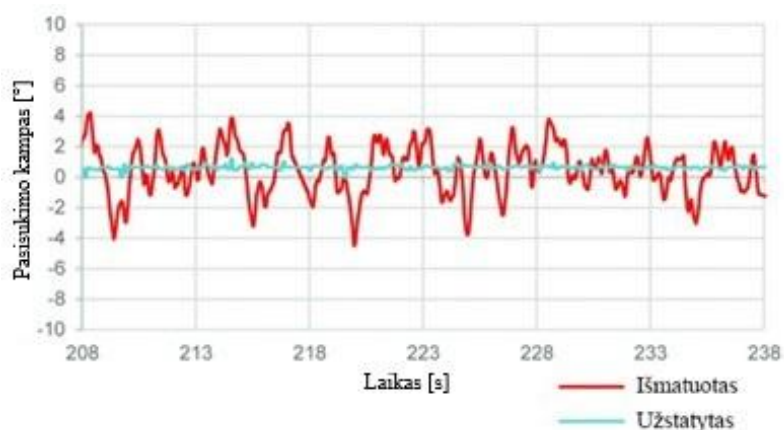
Kiekvieną bepilotį orlaivį reikia paruošti skrydžiui, t. y. sudaryti skrydžio planą, suprogramuoti skraidyklės valdymo plokštę, ištestuoti drono valdymą radijo bangų valdikliu. Mokslininkai atliko tyrimą [16], kuriame 14 bepiločių orlaivių operatorių bandė valdyti kūnų judesiais. Šiam tyrimui naudotas komercinis „Bebob 2“ dronas su 14 megapikselių kamera, kurio maksimalus galimas skrydžio laikas 25 minutės. Skraidyklė turi atvirojo kodo sistemą, todėl jos kamera naudota žmogaus judesiams, kurie ją valdo, užfiksuoti. Ši informacija „Wi-Fi“ ryšiu buvo perduodama į kompiuterį, kuriame *OpenPose* programa buvo apdorojami žmogaus kūno judesiai, o naudojant *Python* programavimo kalbą aprašomi nurodymai skraidyklei atlikti tam tikrą judesį. Siekiant užtikrinti saugumą, t. y. kad dronas nesužalotų žmonių, pakylimas ir nusileidimas atlikti valdymo pultu. Kai visi 14 tyrime dalyvavusių žmonių atliko valdymo judesiais bandymus, atlikta jų apklausa, siekianti įvertinti šios funkcijos galimybes ir trūkumus. Respondentai atsakė, kad valdymas judesiais – tai inovatyvus ir lengvas procesas, tačiau veiksmų atlikimo vėlavimas buvo nuo 1 iki 1,8 sekundės. Tai kėlė baimę, kad bepilotis orlaivis gali būti sudaužytas arba skristi per arti operatoriaus. Geriausiai įvertintos valdymo funkcijos buvo „į kairę“, „į dešinę“, „fiksuoti nuotrauką“, o blogiausiai – „suktis pagal laikrodžio rodyklę“, „suktis prieš laikrodžio rodyklę“ ir „kilti aukštin“. Blogiausią įvertinimą lėmė tai, kad šios komandos reikalavo pakelti rankas į viršų, kas po kurio laiko tapo varginančiu veiksmu. Įvertinus šio tyrimo rezultatus galima teigti, kad ši valdymo technologija turėtų būti tobulinama, siekiant saugumo, o taip pat reikėtų rasti galimybes panaikinti vėlavimą ir įrengti atskirą kamerą, kuri būtų naudojama piloto judesiams fiksuoti.

Kitas alternatyvus bepilotės skraidyklės valdymo būdas – vietoje standartinio radijo bangų valdymo pulto naudoti „Wi-Fi“ technologiją. Tyrėjai [17] taikydami šią technologiją įvertino maksimalų atstumą, kuriuo nuo valdymo įrenginio gali nutolti dronas ir reakcijos laiką, kurį jis galima pasiekti. Tyrimui naudoti: savarankiškai tyrėjų suprojektuotas ir pagamintas bepilotis orlaivis bei kompiuteris „Wi-Fi“ ryšiui skleisti. Vykdam realų skrydį matuotas gaunamų informacijos paketų per sekundę kiekis, priklausomai nuo atstumo iki kontroliuojančio įrenginio. Maksimalus pasiektas nuotolis – 300 metrų, tačiau įvertinus skrydžio metu gautus duomenis (žr. 14 pav.) nustatyta, kad 150 metrų atstumas yra saugiausias, kai skraidyklė gali skristi be reakcijos laiko trikdžių.

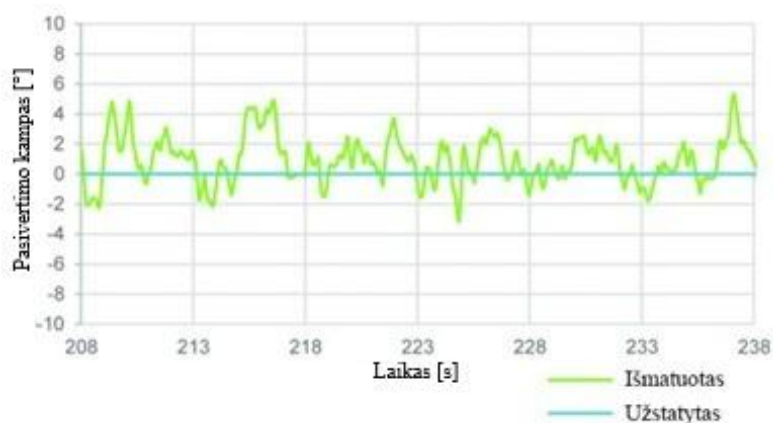


14 pav. Tinkamo skrydžio atstumo matavimas [17]

Atliekant šį tyrimą taip pat matuotas drono stabilizavimo reakcijos laikas, kai atliekamos pasisukimo ir apsisvertimo veiksmas. Šie bandymai leido iširti sukurtą stabilizavimo algoritmą. Gauti rezultatai pateikti grafikuose (žr. 15, 16 pav.).



15 pav. Pasisukimo reakcijos laikas [17]



16 pav. Pasivertimo reakcijos laikas [17]

Vertindami gautus duomenis, mokslininkai padarė prielaidą, kad reakcijos laikas siekia 200 milisekundžių, t. y. sukurtas algoritmas demonstruoja konkurencingus rezultatus. Tyrimai [18] rodo, kad, pavyzdžiui, naudojant „NodeMCU“ mikrovaldiklį su „Wi-Fi“ ryšiu ir esant 14 metrų atstumui nuo jo iki valdymo įrenginio, galima pasiekti 90–99 proc. užduotos pozicijos nustatymo tikslumą.

1.2.1. Papildoma įranga ir energijos šaltiniai

Skrydžio valdikliuose montuojama visa reikalinga įranga bepilotei skraidyklei stabilizuoti, sekti, valdyti ir kitas papildomas funkcijas, kurios jai leidžia būti autonomiškai, atlikti. Drono skrydžio duomenys gaunami iš įvairių jutiklių, įskaitant giroskopą, akcelerometrą, magnetometrą, barometrą. Navigacijai taip pat naudojami GPS sistemos ir impulsų pločio moduliacijos signalų duomenys, kurie identifikuoja skraidyklės pozicijas skrydžio metu. Mokslininkai [19] atliko tyrimą, kuriame naudojo dviejų skirtingų dydžių dronus su juose įdiegta vienoda „PixHawk“ skrydžio valdymo sistema. Ši sistema naudoja GPS signalą drono autonomiškumui užtikrinti ir nustatytam skrydžio plano vykdyti. Papildomai sukurti kvadrato ir apskritimo formos skrydžio takai. Paleidus dronus į vienodą 10 metrų aukštį vykdyti užduotį, buvo stebimi GPS koordinačių nukrypimai nuo skrydžio takų. Abu orlaiviai buvo pajėgūs atlikti du eksperimentinius bandymus, t. y. autonominius bandomuosius skrydžius stačiakampe ir apskrita trajektorijomis. Rezultatai rodo, kad orlaivio skrydžio platumos ir ilgumos vidutinė kvadratinė paklaida didesniai bepiločiai orlaiviui siekia $6,79 \times 10^{-10} \text{ km}^2$ ir $1,45 \times 10^{-8} \text{ km}^2$ – mažajam, kurio rėmas du kartus mažesnis už didelio orlaivio. Įvertinus šiuos skaičius, galima teigti, kad mažesnio drono skrydžio trajektorija tikslesnė.

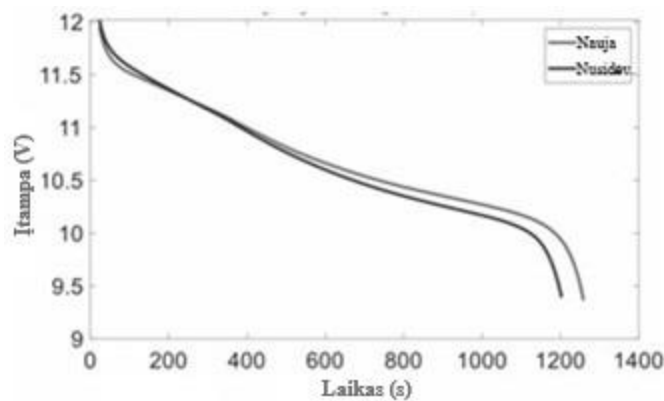
Kadangi bepiločiuose orlaiviuose naudojamos tik ličio-jonų baterijos, svarbu parinkti tinkamą jų dydį, nes tai daro įtaką skrydžio laikui. Kuo didesnės talpos baterija naudojama, tuo jos bendras svoris didesnis, o tai reiškia, kad ir varikliai apkrauti stipriau. Vadinasi, reikiamam skrydžio greičiui pasiekti bus sugaišta daugiau laiko nei naudojant mažesnės talpos bateriją. Dar vienas būdas skrydžio laikui prailginti – saulės energijos panaudojimas. Autoriai atliko mokslinį tyrimą [20], kuriame naudojo droną su saulės moduliais. Mokslininkai pirmiausia įvertino skrydžio laiką, naudojant 2 200 mAh talpos bateriją, kurios įtampa 11,1 V, o iškrovos greitis 30 C. Ši baterija skrendant tolygiu greičiu nuo 100 proc. iki 8 proc. išsikrovė per 767 sekundes. Dronas neakceleruodamas veikė pakilimo vietoje. Pritvirtinus saulės modulius ir prijungus juos prie baterijos įkrovimo sistemos, testas buvo pakartotas. Šiuo atveju skrydžio laikas pailgėjo iki 823 sekundžių (įvertinus 10 sekundžių paklaidą, kuri galėjo atsirasti dėl matavimo elektroniniu laikrodžiu netikslumų). Darytina išvada, kad skrydžio laikas naudojant saulės energiją padidėja apie 7 procentus.

Baterijos būna įvairių talpų, dydžių, formų, jos gali turėti skirtingas įtampas ir išsikrovimo greičius. Didelės talpos baterijos pasižymi dideliais matmenimis ir svoriu, kaip, pvz., 900 mAh baterija sveria 69 g, o 3 300 mAh baterija – 252 g. Atliktas tyrimas, siekiant išsiaiškinti, ar skirtingos baterijų įtampos turi įtakos maksimaliai keliamajai galiai [21]. Tyrėjai sukūrė droną ir, naudodami skirtingų įtampų baterijas, atliko realius skrydžius su skirtingo svorio kroviniais, norėdami įsitikinti, ar skraidyklė gali tokį svorį pakelti. Bandymais patvirtinta, kad baterijos įtampą gali padidinti bepiločio orlaivio keliamoji galia. Pirmuosiuose skrydžiuose buvo naudota 14,8 V įtampos ličio-jonų baterija, į orą pakeltas krovinys, kurio svoris nuo 1 470 iki 1 490 g. Toliau buvo testuota 19,5 V įtampos baterija, kuri sąlygojo 2 230–2 260 g svorio krovinio pakėlimą į orą, o tuo tarpu 22,2 V baterija pakėlė 3 130–3 150 g masės krovinį. Įvertinę šią informaciją tyrėjai nurodė, kad naudojant aukštesnės įtampos baterijas galima ne tik gabenti didesnę krovinių, bet ir pasiekti ilgesnį skrydžio laiką.

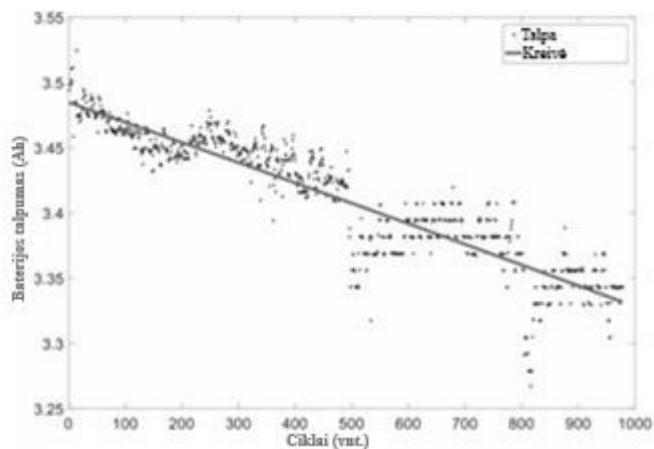
Norint suprasti kaip kraunasi ir sekti kiek ilgai tarnaus bepiločio orlaivio baterija, tikslinga įdiegti sistemą, gebančią stebėti tikslų baterijos įkrovos lygį ir jos nusidėvėjimą. Norint sukurti tokią sistemą, mokslininkai atliko tyrimą, kuriuo metu sukūrė sistemą pavadinimu „DroneBox“ [22]. Ši sistema geba vienu metu krauti 5 dronus, o jiems nusileidus, atlikti automatinį krovimą. Tyrime buvo naudotos 5 standartinės „DJI Mavic 3 Enterprise RTK“ orlaivio ličio-jonų baterijos, kurių įtampa 11,4 V ir talpa 3 830 mAh. Siekiant įvertinti laiką, per kurį atsiranda baterijos nusidėvėjimas, atlikta 980 pilnų baterijos iškrovimo ir įkrovimo ciklų. Saugumo lygiui užtikrinti baterijos iškrautos iki 9,4 V įtampos. Krovimo cikluose baterijos krautos 3,8 A srove (iki 13 V), krovimui naudota tolygi srovė, krovimo pabaigoje ji nukrisdavo iki 300 mA. Atliekant šiuos testus nustatyta, kad baterija laikoma nusidėvėjusia tuomet, kai praranda 5 proc. savo talpos, tad baterijai praradus 5,2 proc. talpos, patikimumo testas buvo stabdomas. 17 paveiksle pateiktas naujos ir senos baterijų išsikrovimo grafikai.

Galima matyti, kad senos baterijos įtampa nukrenta iki 9,4 V per trumpesnę laiką, o tai reiškia, kad nusidėvėjusi baterija turi neigiamą įtaką drono skrydžio laikui. 18 paveiksle parodyta kaip baterijos talpa krenta didėjant įkrovimo ciklams.

Grafike (žr. 18 pav.) matomi taškai simbolizuoja krovimo ciklą. Tendencija rodo, kad baterijos talpa mažėja, tolygiai didėjant įkrovimo ciklams. Yra ciklų, kurie bateriją įkrovė iki 3 350 mAh dar tik įpusėjus tyrimui. Kiekvienas drono skrydžio laikas gali būti skirtingas, nes baterija visada yra įkraunama iki skirtingos talpos ir savo maksimumą pasiekia iki pirmų 20 įkrovimų.



17 pav. Naujos ir senos baterijų išsikrovimo lygio palyginimas [22]



18 pav. Baterijos talpos kritimas didėjant įkrovimo ciklams [22]

Mokslininkai Pain'as ir Mueller'is [23] norėdami prailginti skrydžio laiką, sukūrė sistemą, leidžiančią skrydžio metu pakeisti pagrindinio drono bateriją, taip užtikrinant ilgesnį jo „buvimą“ ore ir jam „nurodytą“ užduočių įgyvendinimą. Kadangi baterijos pakeitimas vykdomas skrydžio metu, t. y. ore, visiškai jos išjungimas neįmanomas, būtent dėl to trumpą laiką dvi baterijos turi būti sujungtos nuosekliai. Toks jungimas įmanomas turint bent 0,2 V skirtumą tarp sujungiamų baterijų, t. y. jis gali būti vykdomas tarp išsikrovusios (3,0 V/celei) ir pasikrovusios (4,2 V/celei) baterijų. Mokslininkai šią problemą išsprendė prie kiekvienos iš baterijų nuosekliai prijungę papildomus diodus, kad srovė nebtekėtų jau į išsikrovusią bateriją. Automatizuoti baterijų pakeitimo ore procesą tyrėjams nepavyko, todėl jos buvo keičiamos rankiniu būdu. Eksperimente naudota 2S 0,8 Ah ličio-jonų pakaitinė baterija ir 3S 1,5 Ah ličio-jonų pagrindinio drono baterija. Skrydžio metu keisdami skraidyklės baterijas į naujas, pakrautas, tyrėjai 57 min. prailgino skrydžio laiką, kuris galėjo būti ir dar ilgesnis, jei būtų turimas didesnis pakrovimo elementų kiekis. Šis tyrimas įrodė, kad automatizavus baterijų ore pakeitimo sistemą, galima prailginti skrydžio laiką ilgas misijas vykdančioms orlaiviams.

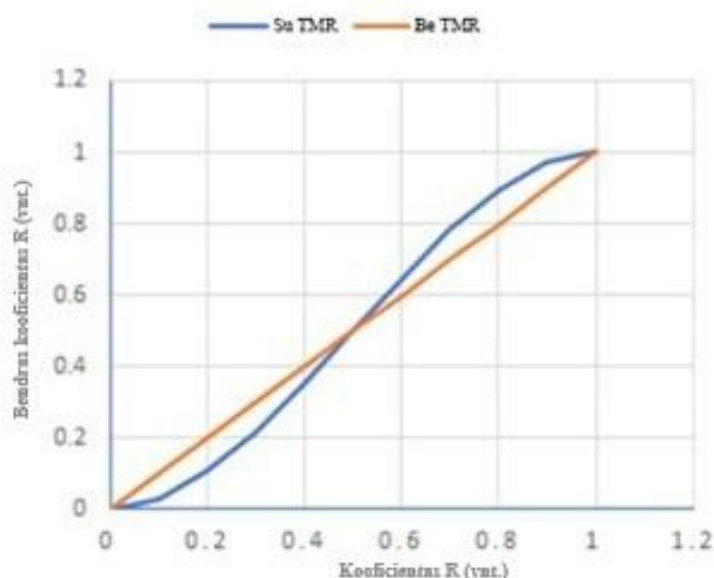
1.3. Bepiločių orlaivių diagnostika

Dauguma valdiklių skrydžio metu įsirašo tam tikrus duomenis, reikalingus skrydžio analizei atlikti ir drono judėjimui stebėti. Šie duomenų įrašai priklauso nuo bepilotės skraidyklės tipo, skrydžio sudėtingumo ar operacijos tikslo. Svarbiausi yra šie duomenys [24]:

- GPS generuojami duomenys: platuma ir ilguma, aukštis, drono greitis;
- elgsena ir orientacija: pasivertimai į šonus, pirmyn-atgal ar pasisukimai;
- baterijos informacija: įtampa, srovė, talpos likutis ir temperatūra;
- įvairūs skrydžio režimai ir komandos;
- jutiklių informacija: giroskopo ir akcelerometro duomenys;
- valdymo įvesties informacija;
- skrydžio įvykių sekimo duomenys;
- kameros ar krovinio duomenys;
- komunikacijos duomenys;
- aplinkos informacija: temperatūra, vėjas.

Visi šie duomenys gali būti panaudoti sėkmingoms operacijoms su bepiločiais orlaiviais vykdyti, kad skrydžiai turėtų mažiau nuostolių, susijusių su skrydžio laiku, gedimais ar nepavykusiais pakylimais.

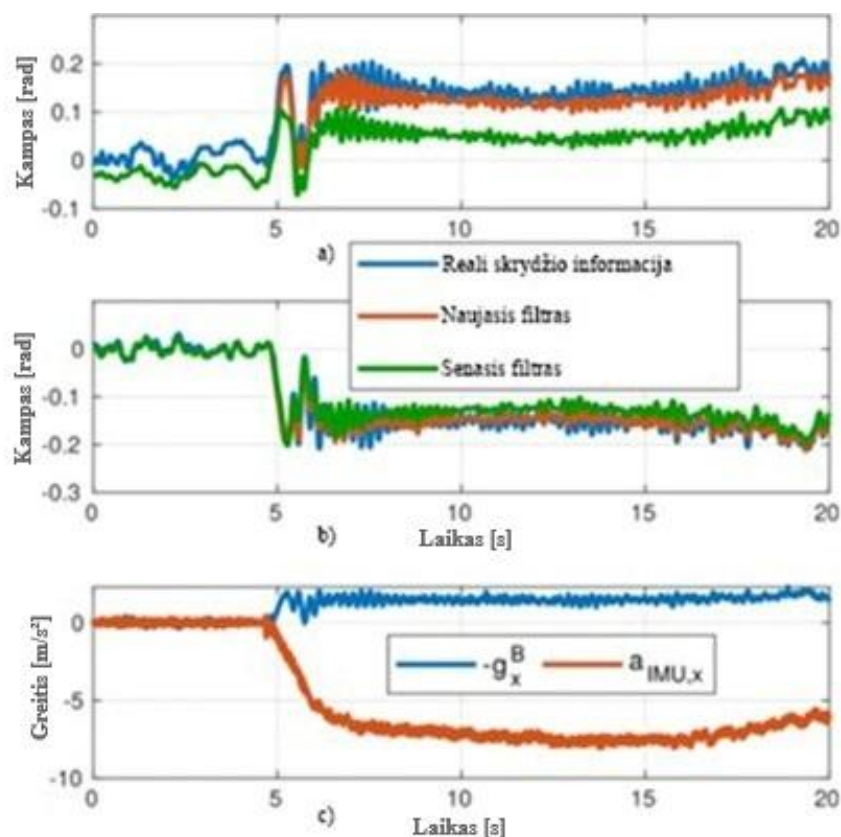
Dronų skrydžio metu gali sugesti jų valdiklyje esantys komponentai, tokie kaip GPS, giroskopas, akcelerometras ir kt. Visi šie elementai turi savo tarnavimo laiką. Siekiant užtikrinti, kad tokie gedimai nepakenktų skrydžiui, į elektroniką diegiamos pagalbinės sistemos, tokios kaip trigubo režimo pertekliaus (angl. *triple modular redundancy*, TMR) sistema [24], kuri padeda laiku kompensuoti sugedusio komponento prarastą signalą. Sistemoje veikia trys blokai, kurie sukuria galutinį signalą ir siunčia jį į balsavimo (angl. *voter*) bloką. Šis blokas analizuoja atskirų sistemos elementų siunčiamus signalus: jei vienas iš elementų sugenda, kiti kompensuoja gedimą ir jį paslepia, taip įgyvendinamas nenutraukiamas skrydžiui reikalingų komponentų darbas. Gali nutikti taip, kad sutriks paties balsavimo bloko darbas, todėl ir jam galima pritaikyti TMR sistemą. 19 paveiksle pateiktas atskirų sistemų su TMR ir be jo palyginimas. 19 paveiksle *R* raide žymimas patikimumas. Raudona linija vizualizuoja modulio patikimumo kitimą be TMR sistemos, o mėlyna linija – su TMR sistema.



19 pav. Sistemos su TMR ir be TMR patikimumo palyginimas [24]

Galima matyti, kad modulio su TMR sistema patikimumas nėra pastovus, tai nutinka dėl įvairių komponentų nevienodos kokybės. Galima daryti išvadą – reikia naudoti kokybiškus, didesnę patikimumą turinčius komponentus [24].

Bepiločių skraidyklių sistemose naudojami „PixHawk“ skrydžio valdikliai, neturintys įdiegto klaidų nustatymo ir izoliavimo įtaiso, ir visa tai atlieka per aparatinės ir programinės įrangos dubliavimą – tai pasyvios formos klaidų toleravimo sistema [24]. Klaidų toleravime dubliavimas pasireiškia, kaip tų pačių komponentų, sistemų ar posistemų naudojimas, siekiant išvengti kritinių gedimų. Komponentų dubliavimas taip pat skirstomas į aktyvų, pasyvų ir hibridinį. Klasifikacija priklauso nuo drono komponentų ar programinės įrangos. Aktyviame komponentų dubliavime papildomi sistemos komponentai veikia lygiagrečiai su pagrindiniais sistemos komponentais. Tokią TMR sistemą dažnai naudoja šiuolaikinėje aviacijoje skraidantys lėktuvai ir bepiločiai orlaiviai, siekiant užtikrinti skrydžio patikimumą ir saugumą. DJI komerciniai orlaiviai naudoja ją savo „Matrice“ modeliuose [25]. Šiuose modeliuose turi būti užtikrintas saugumas, nes be papildomos įrangos šie dronai sveria 10 kilogramų, todėl gedimo atveju gali pridaryti žalos ne tik aplinkai, bet ir žmonėms. Kitas labai svarbus skrydžio kokybę užtikrinantis veiksnys – sklandus bepiločio orlaivio komponentų darbas. Blogiausia kas gali įvykti skrydžio metu – tai variklių gedimai, kuomet prarandama valdymo kontrolė. Tyrėjai [26] sukūrė bepilotės skraidyklės valdymo modelį, kuriame naudotos dvi vaizdo kameros: paprasta ir įvykių, aukščiau nuo žemės jutiklis, akcelerometras ir giroskopas. Eksperimente buvo vertintos keturių sraigčių orlaivio galimybės skristi tik su trimis varikliais. Pirmiausia tirtas duomenų analizavimo algoritmo veikimas. Grafikuose (žr. 20 pav.) pateiktas paprasto ir tyrėjų sukurto nevaldomą sukimąsi eliminuojančio filtro palyginimas [26].



20 pav. Skrydžio duomenų palyginimas naudojant naująjį filtrą ir duomenys iš IMU jutiklio [26]

Viršutiniame grafike (žr. 20 pav. a) analizuotas veiksmas – „pasivertimas į šonus“. Raudonos spalvos linija iliustruoja rezultatus, gautus taikant naująjį filtrą, o žalios spalvos linija – įprastą filtrą. Rezultatai vertinami teigiamai tuomet, kai žalios ir raudonos spalvų kreivės priartėja prie mėlynos spalvos kreivės, nusakantios realius skrydžio duomenis. Antrajame grafike (žr. 20 pav. b) vertintas veiksmas – „pasivertimas pirmyn-atgal“. Naudojant abu filtrus gautos kreivės priartėjo prie tikrojo

skrydžio duomenys vaizduojančios kreivės. Paskutiniame grafike (žr. 20 pav. c) pateikti duomenys iš IMU akselerometro, matuojančio realaus drono gravitacinį pokytį, ir iš jutiklio. Tyrimai rodo, kad, stabilizuojant vieno variklio gedimą atsiranda įcentrinis pagreitis, todėl duomenys iš akselerometro nesutampa su realia skrydžio informacija.

Mokslininkai taip pat lygino pačios bepilotės skraidyklės turimą ir papildomai naudojamą įvykių vaizdo kameras [26], siekdami nustatyti, kurios iš jų duomenys apsprendžia geresnį stabilizavimo rezultatą juos apdorojant skrydžio valdiklyje, ir kurios užtikrina saugų sugedusios, t. y. be vieno variklio, skraidyklės grįžimą į nusileidimo vietą.

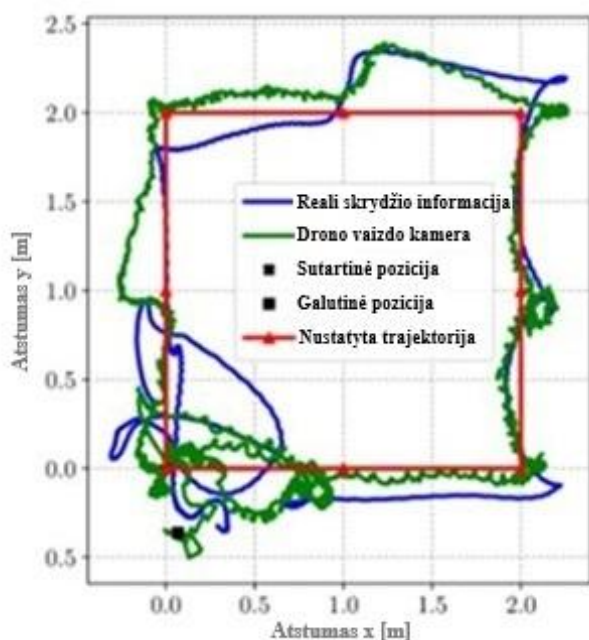
Tyrimas atliktas gerai apšviestoje uždaroje patalpoje. Buvo sudarytas 2 metrų kvadrato formos skrydžio kelias, kuriame dronas judėjo su trimis varikliais, ir įvertinti įrenginio vaizdo ir įvykių kamerų vaizdai, atliekant stabilizavimo užduotis.

Galima matyti, kad naudojant skirtingų kamerų duomenis ir analizuojant aplinką gaunant informaciją iš jutiklių, įmanoma užtikrinti sklandų avarinį sugedusio bepiločio orlaivio nusileidimą.

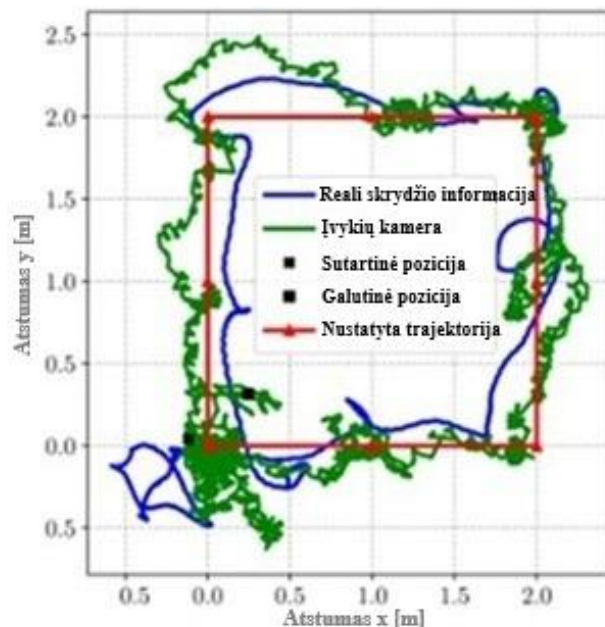
Paveiksluose (žr. 21, 22 pav.) mėlyna spalva pažymėtas realus drono skridimo kelias, žalia spalva – kameromis užfiksuota judėjimo trajektorija, tašku ir kvadratu pažymėtos starto ir pabaigos pozicijos, raudonos spalvos linija parodo numatytą skrydžio planą.

Apibendrinus rezultatus galima teigti, kad naudojant įvykių kamerą geriau stabilizuojami dideli nukrypimai, o tiesioje skrydžio trajektorijoje geresnį stabilizavimo rezultatą formuoja bepilotės skraidyklės vaizdo kamera.

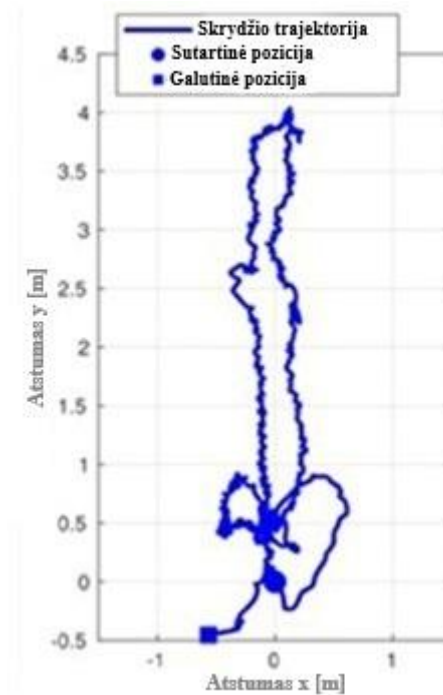
Kitame etape testas atliktas lauko sąlygomis, užduotis sugedusiam bepiločiam orlaiviui – nuskristi 4 metrus pirmyn ir atgal. Šio skrydžio rezultatai pateikti 23 paveiksle.



21 pav. Skrydžio kelias su bepiločio orlaivio vaizdo kamera [26]



22 pav. Skrydžio kelias su bepiločio orlaivio įvykių kamera [26]



23 pav. Skrydžio metu gauti testavimo duomenys [26]

23 paveiksle galima matyti, kad bepilotis orlaivis naudodamas papildomas kameras gali su 3 varikliais nuskristi užduotą 4 metrų distanciją pirmyn ir atgal. Darytina išvada, kad bepiločiuose orlaiviuose įrengus papildomas saugos priemones, galima padidinti jų skrydžio patikimumą.

Šiame skyriuje aprašyti skirtingi bepiločių orlaivių konstrukciniai variantai ir skraidyklės skrydžio trajektorijai stabilizuoti dažniausiai naudojami valdymo metodai: PID, „Fuzzy PID“. Toliau eksperimentinėje dalyje bus naudojamas keturių sraigčių dronas su PID stabilizavimo algoritmu.

2. Bepilotės skraidyklės panaudojimas skirtinguose žmogaus kasdieninio gyvenimo srityse

Toliau analizuojant mokslinius šaltinius bus bandoma nustatyti, ar bepilotis orlaivis tiek teoriškai, tiek praktiškai gali būti naudojamas oro užterštumui matuoti.

2.1. Siuntų pristatymas ir žemės ūkis

Dronai naudojami tokiose srityse kaip karyba, agronomijos pramonė, filmų industrija ir kasdieniniame žmogaus gyvenime, tačiau yra vietų, kur skraidyklių pritaikymas vyksta lėčiau nei norėtųsi. Viena iš vystytinų sferų – siuntinių pristatymas. Susiduriama su problema – mažieji dronai negali nešti didelio svorio, nes dėl papildomos apkrovos trumpėja jų skrydžio laikas. Mokslininkai tyrimuose [27,28] nustatė kokią įtaką gabenamo produkto svoris turi skrydžio laikui. Tyrimui naudotas tyrėjų sukurtas orlaivis, kurio masė – 800 gramų be krovinio, gabenamo krovinio svoris iki 300 gramų. Pateiktoje lentelėje (žr. 3 lentelę) pateiktas tyrėjų nustatytas krovinio svorio ir skrydžio laiko santykis.

Nustatyta, kad esant maksimaliam 300 gramų krovinio svoriui, skrydžio laikas sutrumpėja dvigubai. Šie tyrimai atskleidė, kad būtina ieškoti galimybių skrydžio laikui pagerinti, nedidinant pačio drono dydžio, nekeičiant variklių galingumo ir baterijų talpos. Vienas iš sprendimo būdų – saulės modulių naudojimas, kai vykdant prekių pristatymą lygiagrečiai vykdomas ir baterijos krovimas.

3 lentelė. Krovinio svorio santykis su skrydžio laiku [27]

Krovinio svoris (gramai)	Skrydžio laikas (minutės)
0	25
100	20,80
150	18,03
200	15,80
250	14,37
300	13,30

Bepiločiai orlaiviai taip pat labai plačiai naudojami agronomijoje. Skrydžio metu gali būti atliekami tokie veiksmai, kaip pesticidų purškimas, darbuotojų ar augalų priežiūra. Tyrėjai [29] bepiločiu orlaiviu, skridusiu virš ananasų plantacijos, ją fotografavo. Vėliau tos nuotraukos buvo apdorojamos taip, kad, jas patamsinus ar paryškinus, matytųsi, kuris ananasas nesunokęs. Ananasų atpažinimas vykdytas naudojant „OpenCV“ neuroninį tinklą, gautas 95 proc. tikslumas. Manoma, kad dar geriau ištobulinta ši sistema galėtų padėti ūkininkams įvertinti auginamų augalų būklę.

Didelė dalis naujų, komercinių dronų turi sekimo funkciją, tačiau ji naudojama tik pramoginiams tikslams, siekiant atlikti stabilų ir nepertraukiamą nustatyto taikinio fotografavimą ar filmavimą. Šią funkciją panaudojo ir išbandė mokslininkai [30]. Tyrėjai sukūrė naują bepilotės skraidyklės aptikimo sistemą, kurioje papildomai panaudojo kamerą ir GPS jutiklį. Bepilotė skraidyklė su tyrėjų sukurtu valdymo algoritmu, analizuodama kameros nuotrauką ir įvertindama GPS duomenis, identifikavo įsibrovėlio bepilotį orlaivį, sekė jį ir nustatė jo tikslią buvimo vietą. Tokia sistema gali padėti apsaugoti uždraustas skrydžio zonas, karinius objektus ar kitus saugomus valstybinės reikšmės pastatus.

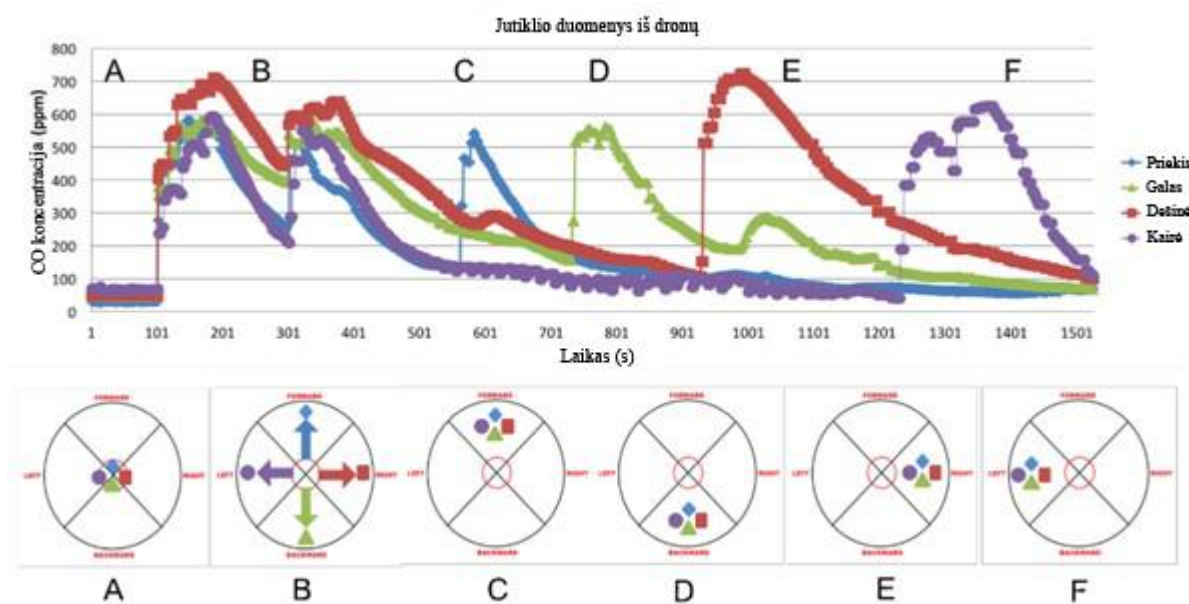
Šaltinio autoriai [31] naudojo šešių variklių droną augalų biomasei laukuose stebėti. Pasitelkdami bepiločio orlaivio kamerą, tyrėjai atliko bandomuosius skrydžius, nufotografavo laukuose augančius augalus ir apdorojo gautas nuotraukas, išryškindami daugiau biomasės turinčius plotus.

Mokslininkai [32] atliko tyrimą, kuriame 4 žmonių komanda su trimis bepiločiais orlaiviais per vieną dieną pasodino 10 ha miško plotą. Šiuo eksperimentu įrodyta, kad dronai gali būti puiki pagalbinė priemonė situacijose, kai žmonėms atlikti darbus yra sudėtinga, tačiau būtina nepamiršti, kad ilginiui vis tiek daroma žala gamtai.

2.2. Kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių koncentracijos matavimas

Tyrėjai atliko nuodingų ore esančių medžiagų matavimus, naudojant dronų būrį [33]. Tyrimo rezultatai gali būti pritaikyti gelbėjimo tarnybų veikloje, kad atvykus į įvykio vietą, pradžioje būtų įvertintas aplinkos užterštumas. Matavimams atlikti sukurta sistema (žr. 24 pav.), susidedanti iš išmaniųjų platformų, jutiklių ir pačių skraidyklių.

Dronai su GPS ir „MQ135“ oro kokybės jutikliais naudojami, norint realiu laiku sekti kur ir kokia kryptimi juda nuodingų dujų sankaupos. Ši informacija bevieliu ryšiu gali būti perduodama į serverį ir analizuojama. Gauti rezultatai pavaizduoti 24 paveiksle.

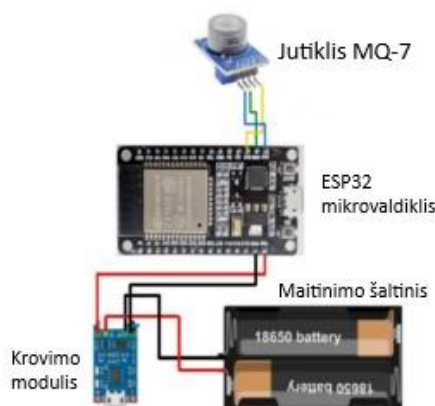


24 pav. Nuodingų dujų matavimo rezultatai, priklausomai nuo dronų būrio išsidėstymą erdvėje [33]

„A“, „B“, „C“, „D“, „E“, „F“ raidėmis sužymėtos skirtingos būryje esančių bepiločių skraidyklių išsidėstymo kombinacijos. Grafike (žr. 24 pav.) galime matyti, kaip skirtingose vietose esantys orlaiviai su dujų jutikliais matuoja judančių dujų sankaupas. Geriausi rezultatai pasiekti tuomet, kai dronų būrys išsidėstęs viduryje dujų sankaupos arba kiekvienas būrio dronas savo pozicijose nutolęs nuo centro. Šie rezultatai tiksliausi, nes visi bepiločiai orlaiviai fiksuoja dujų koncentraciją, iš šių duomenų gali nuspręsti kaip slenka kenksmingos medžiagos.

Mokslininkai [34] atliko CO dujų matavimo tyrimus, naudodami komercinį droną ir jų pačių sukurta matavimo sistemą, sudarytą iš CO dujų jutiklio „MQ-7“, ESP32 mikrovaldiklio ir ličio-jonų maitinimo šaltinio su pakrovimo moduliui. Sistema pavaizduota 25 paveiksle.

Programinis kodas sukurtas „Arduino IDE“ programos aplinkoje, o rezultatai atvaizduoti naudojant „ThingSpeak“ atvirąją platformą. Matavimai dronu vykdyti skirtingu dienos metu, t. y. 7, 11 ir 15 valandomis, kiekvieną valandą po 3 matavimus. Pagal išmatuotą CO koncentraciją buvo įvertinta oro kokybė (žr. 4 lentelę).



25 pav. CO dujų matavimo sistema [34]

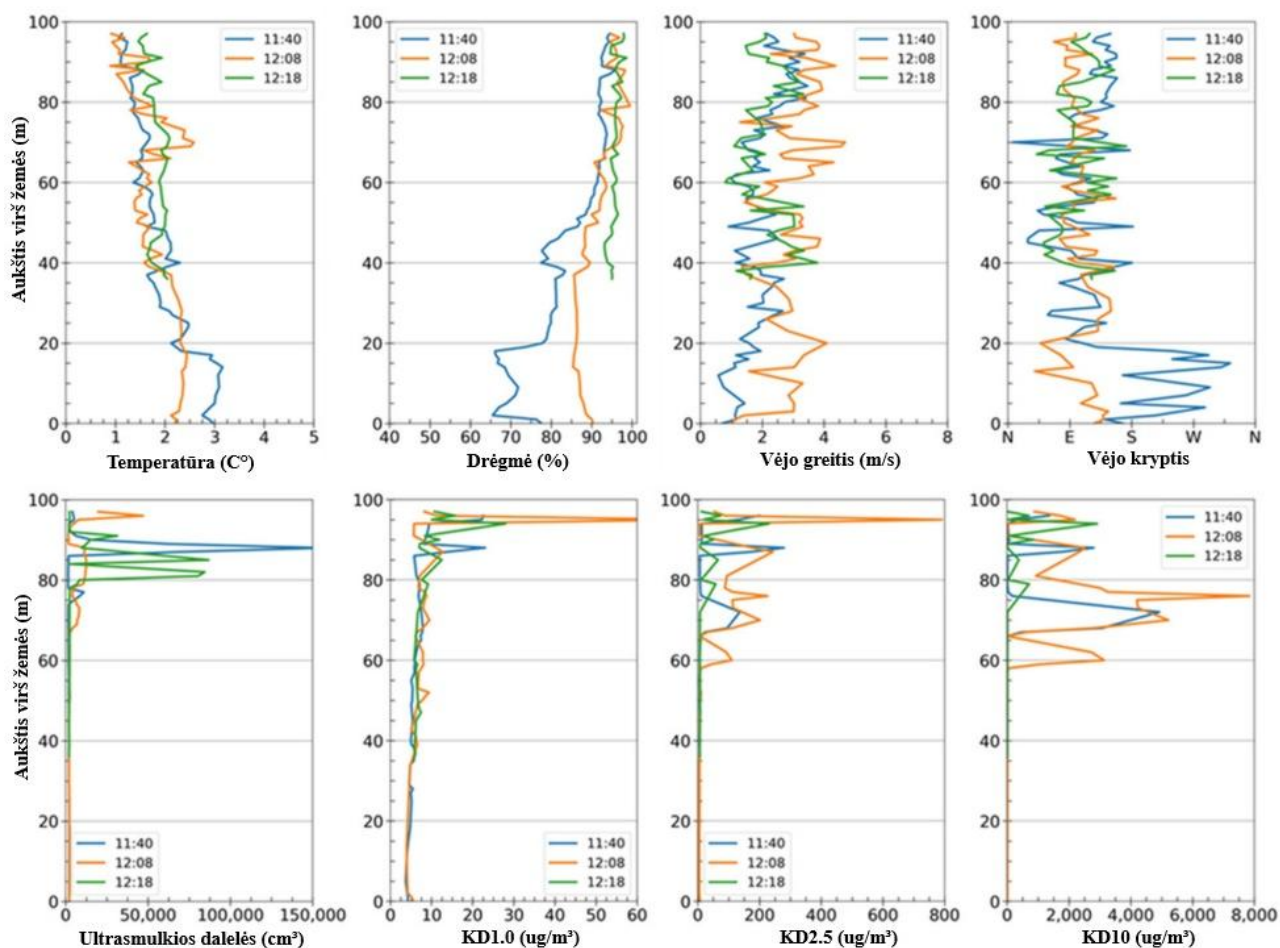
4 lentelė. CO dujų matavimo rezultatai skirtingu laiku ir skirtingame aukštyje [34]

Laikas (val.:min.)	CO koncentracija (ppm) aukštyje			Oro kokybė
	0 metrų	2 metrai	5 metrai	
07:00	88,56	73,17	67,75	Vidutinė
	89,35	72,10	68,28	
	86,48	70,87	68,58	
11:00	67,16	56,87	43,79	Vidutinė (2 m) Gera (5 m)
	66,18	56,30	45,06	
	65,93	55,23	43,99	
15:00	48,16	41,94	33,53	Gera
	48,14	41,64	32,36	
	50,48	40,27	30,90	

Įvertinus 4 lentelėje pateiktus duomenis, galima teigti, kad tiek dienos metas, tiek aukštis, kuriame matuojamos kenksmingos dujos, daro įtaką rezultatams. Ryte oro užterštumas CO dujomis 0 m aukštyje buvo didžiausias ir siekė apie 87 ppm, tuo tarpu 2 m ir 5 m aukštyje koncentracija sumažėjo apie 20 proc. Geriausia oro kokybė buvo 15 val.: CO koncentracija 0 m aukštyje siekė apie 49 ppm, o 5 m aukštyje – iki 32 ppm. Mokslininkai padarė išvada, kad šis pokytis yra dėl to, kad ryte žmonės aktyviau naudoja transporto priemones.

Moksliniame straipsnyje [35] nagrinėjama teršalų, pvz.: CO₂, NO_x ir kietųjų dalelių, koncentracijos matavimo bepiločiais orlaiviais galimybė. Tyrimas aktualus, nes didelių elektrinių kamino taršą sunku išmatuoti ir įvertinti, o standartiniai stacionarūs matavimo metodai neleidžia tiksliai įvertinti teršalų pasiskirstymo vertikalioje ir horizontalioje erdvėje. Eksperimentiniai skrydžiai vykdyti bepiločiu orlaiviu su integruotais CO₂, NO_x, SO₂ ir kietųjų dalelių jutikliais, atskira GPS sistema, leidžiančia nustatyti tikslią matavimo vietą, aukštį ir duomenų registravimo modulių, kuris realiu laiku fiksuoja jutikliais gaunamus duomenis. Siekiant įvertinti kietųjų dalelių pasiskirstymą

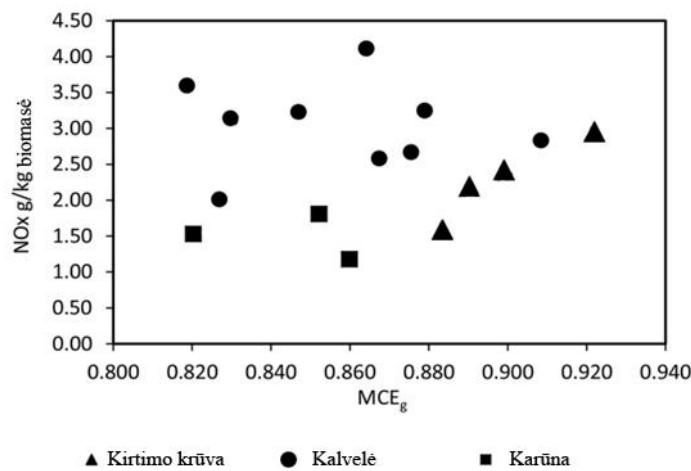
priklausomai nuo vėjo greičio, matavimai buvo atlikti prie veikiančios elektrinės skirtinguose aukščiuose (nuo 1 iki 100 metrų), skirtingomis oro sąlygomis (t. y. esant skirtingoms temperatūroms, drėgmei, vėjo greičiui ir vėjo kryptiai). Siekiant sumažinti atsitiktinių paklaidų poveikį matavimo rezultatams, tas pat tyrimas kartotas kelis kartus, o gauti duomenys analizuoti naudojant statistinius modelius. Atlikus skrydį virš elektros gamybos pastato kamino gauti duomenys pateikti 26 paveiksle.



26 pav. Kietųjų dalelių matavimai virš elektrinės kamino [35]

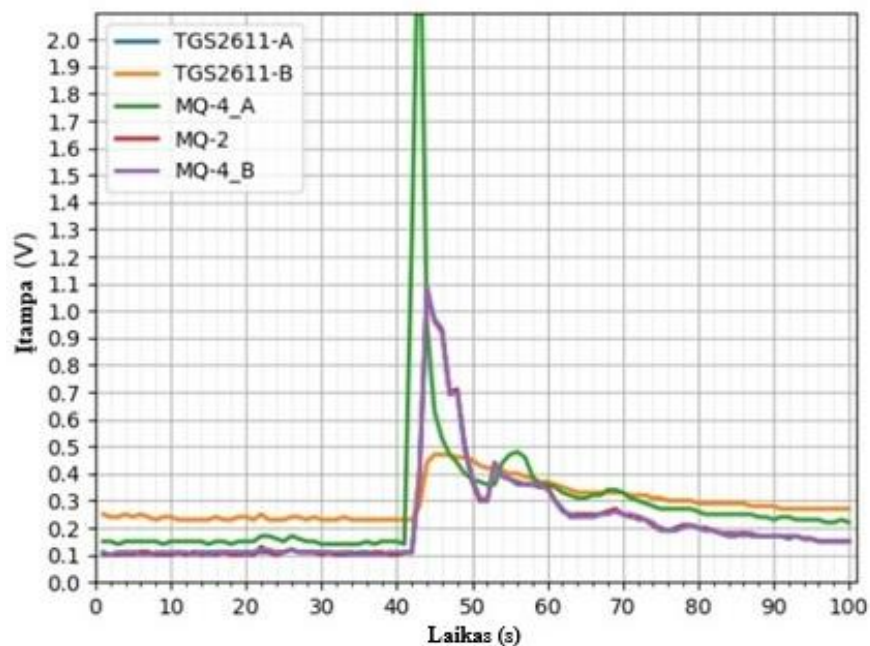
Oranžinės spalvos kreivė (žr. 26 pav.) vaizduoja matavimus, atliktus 12:08 val. Būtent šiuo laiku užfiksuoti didžiausi kietųjų dalelių kiekiai (KD1 iki $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$, KD2,5 iki $800 \mu\text{g}/\text{m}^3$, KD10 iki $8\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ir didžiausias vėjo greitis, kuris siekė 4 m/s. Darytina išvada, kuo intensyvesnis vėjas, tuo kietosios dalelės greičiau pasiekia jutiklius.

Dar vienoje mokslinėje publikacijoje [36] aprašytas tyrimas, kuriame bepiločio orlaivio sistema naudota, duomenis apie emisiją, analizuojant laukinius gaisrus Fishlake nacionaliniame miške, Jutoje, JAV, surinkti. Šiame tyrime bepilotis orlaivis su kenksmingų dujų matavimo įranga, matavo gaisro metu išsiskiriančius teršalus, tokius kaip dūmai, kietosios dalelės ir kenksmingos NO_x dujos. Rezultatai pateikė grafike (žr. 27 pav.), kuriame pavojingos zonos pažymėtos trikampaiais, apskritimais ir kvadratais. NO_x koncentracija pavojingose vietose svyravo nuo $1,20 \text{ g}/\text{kg}$ iki $4,25 \text{ g}/\text{kg}$. Toks matavimo metodas, t. y. panaudojant bepilotį orlaivį, gali būti taikomas taršos mažinimo strategijoms ir aplinkosaugos iniciatyvoms įgyvendinti.



27 pav. Miško gaisrų metu išsiskiriančių kenksmingų medžiagų matavimai bepiločiu orlaiviu [36]

Aplinkoje taip pat svarbu matuoti bespalves ir bekvapės metano dujas, todėl tyrėjai [37] sukūrė matavimo prietaisą su trimis skirtingais jutikliais MQ-2, MQ-4 ir TG2611. Šiam prietaisui gabenti naudojamas Belgijos kompanijos sukonstruotas bepilotis orlaivis. Prie drono virve buvo primontuotas matavimo prietaisas ir atliekami numatyti skrydžiai. Matavimų rezultatai pateikti 28 paveiksle.



28 pav. Metano dujų matavimai [37]

Paveiksle (žr. 28 pav.) nuo 40 sek. matomi įtampos šuoliai ir yra metano dujų koncentracija ore. Mokslininkai konvertavo įtampos reikšmės į tikslią metano dujų vertę, todėl šis grafikas gali tik iliustruoti ar jutikliai matuoja koncentraciją ir kuris jutiklis fiksuoja didesnę matavimo tikslumą. Kitame tyrime [38] kenksmingų medžiagų koncentracijai matuoti naudota įranga su įdiegtu garsiniu signalu, kuris įsijungia tuomet, kai dujų kiekis viršija normą, kas leidžia nuspręsti, kurioje vietoje būtina atlikti nuodugnesnius tyrimus.

Atlikta mokslinių šaltinių analizė patvirtino, kad bepilotės skraidyklės galima pritaikyti kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių koncentracijos ore matavimo įrangai nešti, todėl toliau eksperimentinėje dalyje bus nagrinėjami skirtingi matavimo įrangos tvirtinimo būdai ir matavimų technikos.

3. Eksperimentinė dalis

Šio skyriaus pagrindinis tikslas – suprojektuoti sistemą, reikalingą kenksmingoms dujoms (CO, O₃, SO₂, NO) ir kietosioms dalelėms (KD) bepiločiu orlaiviu matuoti:

- bepilotis orlaivis;
- nešiojamasis kompiuteris;
- programinė įranga.
- matavimo prietaisas su dujų ir kietųjų dalelių jutikliais;
- specialiai suprojektuotas ir pagamintas matavimo prietaiso laikiklis, kuris tvirtinamas prie skraidyklės ir užtikrina stabilų matavimo prietaiso ir gaubto poziciją skrydžio metu;
- specialiai suprojektuotas ir pagamintas gaubtas, apsaugantis nuo propelerių keliamos turbulencijos, kuri turi įtakos dujų ir kietųjų dalelių matavimams;
- Specialiai suprojektuotas ir pagamintas jutiklių uždengimas su įmontuotu reguliuojamo srauto ventiliatoriumi, kenksmingoms medžiagoms per anglies pluošto vamzdelį įtraukti;

Tyrimų objektas – bepilotis orlaivis su kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių matavimo prietaisu.

3.1. Reikalavimai skrydžiams

Išsiaiškinus bepiločių skraidyklių mechaninės dalies ir elektroninės įrangos ypatumus, jų panaudojimo galimybes ir diagnostinius metodus, būtina apibrėžti pagrindines skraidymo dronais taisykles, kuriomis turi vadovautis, bet kuris bepilotį orlaivį leidžiantis ar jį pilotuojantis žmogus. Europos sąjungos patvirtintas ir Lietuvoje galiojantis taisyklės galima rasti Transporto kompetencijų agentūros tinklalapyje [38].

Taisyklėse yra apibrėžiama kas yra „pilotas“, o dronai suskirstyti į klases nuo „C0“ iki „C6“. Klasės numeris priklauso nuo maksimalaus skraidyklės svorio ir aukščio, kuriame ji gali skristi. Kiekvienas orlaivis turi būti užregistruotas ir priskirtas tam tikrai klasei. Pavyzdžiui, „C0“ klasei priskiriamos lengvesnės nei 250 g su kroviniu bepilotės elektrinės skraidyklės. Šios klasės dronus pilotuojantiems operatoriams nebūtina laikyti specialaus egzamino, tačiau kiekvienas naudotojas turi išsiimti pažymėjimą-leidimą, suteikiantį individualų piloto numerį (kodą), kuris užkljuojamas matomoje skraidyklės korpuso vietoje. Leidimo išdavimas kainuoja 11 eurų. Atsitikus įvykiui, atsakomybė už bet kokią nusižengimą taikoma drono savininkui. Yra griežtai reglamentuotos skrydžiams tinkamos ir draudžiamos zonos bei kategorijos: atviroji, specialioji ir sertifikuotoji. Šios kategorijos apibrėžia kokių žinių, egzaminų ar netgi papildomų leidimų gali reikėti skrydžiams vykdyti. Šios taisyklės galioja visoje Europos sąjungoje ir yra aprašytos įstatymuose [39].

Kadangi eksperimentinėje dalyje bus naudojamas komercinis bepilotis orlaivis pagamintas iki atsirandant bepiločių orlaivių klasifikavimui, jis neturi „C1“ žymėjimo lipduko. Šio lipduko neturėjimas leidžia bepiločiu orlaiviu skraidyti tik 3 kategorijoje, kuri neleidžia skraidyti tankiai apgyvendintose teritorijose. Norint išvengti nesklandumų, skrydžiai atlikti uždaroje teritorijoje, įvertinant aplinką, skrydžio aukščius ir nesukeliant pavojaus aplinkiniams.

3.2. Tiriamos medžiagos

CO (anglies monoksidas) – bespalvės, bekvapės ir beskonės dujos, kurios toksiškos žmonėms ir gyvūnams. Jos susidaro degimo proceso metu, kai kuras dega esant nepakankamam deguonies kiekiui.

O₃ (ozonas) – dujos, sudarytos iš trijų deguonies atomų molekulių. Jis natūraliai randamas Žemės atmosferoje, pasižymi stipriu specifiniu kvapu, kuris dažnai juntamas po žaibo išlydžio arba prie ozonatorių. Šios dujos toksiškos ir randamos truposferos sluoksnyje.

SO₂ (sieros dioksidas) – bespalvės, aštraus kvapo reaktyvios dujos, kurios susidaro deginant sieros turinčias medžiagas. Šios dujos yra vienos iš pagrindinių oro teršalų, keliančių pavojų aplinkai ir žmonių sveikatai.

NO₂ (azoto dioksidas) – rudos spalvos, aštraus kvapo, toksiškos dujos, priklauso azoto oksidų grupei. Jos yra vienas iš pagrindinių oro teršalų, atsirandančių deginant iškastinį kurą ir vykstant pramoniniams procesams.

KD (kietosios dalelės) – smulkios kietųjų ir skystųjų medžiagų dalelės, suspenduotos ore. Jos yra viena iš pagrindinių oro taršos sudedamųjų dalių ir kelia grėsmę tiek žmogaus sveikatai, tiek aplinkai. Skirstomos į stambiausias, smulkiausias ir ultra smulkias daleles. Smulkiosios ir stambiosios kietosios dalelės dažnai stebimos analizuojant oro kokybę.

3.3. Fizinė įranga

3.3.1. Bepilotis orlaivis „DJI Mavic 3 Enterprise RTK“

Tyrimams atlikti pasirinktas „DJI Mavic 3 Enterprise RTK“ bepilotis orlaivis. Šis įrenginys paruoštas skrydžiui be papildomos įrangos sveria 915 gramų. Jame įmontuota 15,4 V, 5 000mAh baterija, idealiomis oro sąlygomis skrydžio laikas siekia 45 min., o sklandant vienoje pozicijoje – 38 min. Šis dronas priskiriamas „C2“ klasei, į kurią patenka iki 4 kilogramų bepilotės skraidyklės, todėl laikantis taisyklių su šiuo įrenginiu galima skristi virš tankiai gyvenamų teritorijų. 5 lentelėje pateikti bepiločio orlaivio „DJI Mavic 3 Enterprise RTK“ techniniai parametrai.

5 lentelė. Bepiločio orlaivio „DJI Mavic 3 Enterprise“ techninė specifikacija

Svoris (su propeleriais, be priedų)	915 gramų
Matmenys	
Sulankstytas	221 × 96,3 × 90,3 mm
Išskleistas	347,5 × 283 × 107,7 mm
Įstrižainės atstumas	380,1 mm
Maksimalus kilimo greitis	
Įprastas režimas	6 m/s
Sportinis režimas	8 m/s
Maksimalus nusileidimo greitis	
Įprastas režimas	6 m/s
Sportinis režimas	6 m/s
Maksimalus skrydžio greitis (jūros lygio aukštyje, be vėjo)	
Įprastas režimas	15 m/s
Sportinis režimas	Pirmyn – 21 m/s, į šonus – 20 m/s, atgal – 19 m/s
Maksimali atsparumo vėjui greitis	12 m/s
Maksimalus kilimo aukštis virš jūros lygio	6 000 m (be papildomo krovinio)
Maksimali skrydžio trukmė (be vėjo)	45 min.

Maksimali sklandymo ore trukmė (be vėjo)	38 min.
Maksimalus skrydžio atstumas	32 km
Maksimalus pasvirimo kampas Įprastas režimas Sportinis režimas	30° 35°
Maksimalus kampinis greitis	200 °/s
GNSS	GPS + „Galileo“ + „BeiDou“ + „GLONASS“ („GLONASS“ palaikomas tik su RTK moduliu)
Stabilumo tikslumas	Vertikalus: ±0,1 m (su vaizdo sistema), ±0,5 m (su GNSS), ±0,1 m (su RTK) Horizontalus: ±0,3 m (su vaizdo sistema), ±0,5 m (su aukšto tikslumo pozicionavimo sistema), ±0,1 m (su RTK)
Darbinės temperatūros diapazonas	Nuo -10 °C iki 40 °C (nuo 14 °F iki 104 °F)
Vidinė atmintis	Nėra
Variklio modelis	2008
Propelerių modelis	9453F propeleriai „Enterprise“ modeliams
Signalinė lemputė	Integruota į orlaivį
Klasė	„C2“ (ES)

Skrydžiams vykdyti reikalingas „A2“ kategorijos teorijos egzaminas, kuris laikomas Transporto kompetencijų agentūroje.

3.3.2. Kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių matavimo prietaisais

Kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių matavimo prietaisas susideda iš penkių jutiklių, „Raspberry PI Zero W“ mikrovaldiklio, „LiPO SHIM“ maitinimo bloko, leidžiančio visai sistemai naudoti ličio-jonų bateriją. Matavimo prietaiso be baterijos svoris – 275,81 gramai. Šiame projekte naudojama viena „ICR18 650“ ličio-jonų baterija, kurios talpa 1 600 mAh, o svoris 42 gramai. Dujų matavimams panaudoti „Winsen“ įmonės ZE03 tipo elektrocheminiai jutikliai (žr. 6 lentelę).

6 lentelė. Elektrocheminių ZE03 jutiklių techninė specifikacija

Matuojamos dujos	CO, O ₃ , SO ₂ , NO ₂ , NH ₃ , O ₂ , H ₂ S, CL ₂ , HF
Matavimo ribos	Nuo 0 iki 1 000 ppm (priklausomai nuo matuojamų dujų)
Darbinė įtampa	5 ± 0,1 V (DC)
Darbinė srovė	<5 mA
Išeinamieji duomenys	UART išėjimas
	Analoginė įtampa
Veiknumas	2 metai
Veikimo aplinka	Temperatūra -20 ~ +50 °C
	Drėgmė 15–90 % RH (be kondensato)

Kietosioms dalelėms matuoti taikytas tos pačios „Winsen“ įmonės lazerinis jutiklis ZH03B. 7 lentelėje pateikiama šio jutiklio techninė specifikacija.

7 lentelė. Lazerinio kietųjų dalelių jutiklio ZH03B techninė specifikacija

Aptinkamų dalelių diametras	0,3–10 µm
Tinkami režiai	0–1 000 µg/m ³
Matavimo intervalas	1 sekundė
Stabilizacijos laikas po įjungimo	30 sekundžių
Išeiga	UART išėjimas (3,3 V įtampa)
	PWM išėjimas (3,3 V įtampa)
Darbinė įtampa	4,9~5,5 V (DC)
Darbinė srovė	<120 mA
Veikimo aplinka	Temperatūra -10 ~ +50 °C
	Drėgmė 0–80 % RH (be kondensato)
Veiksnumas	>10 000 valandų

„Raspberry PI Zero W“ mikrovaldiklis, turintis „Wi-Fi“ modulį, naudojamas ryšiui tarp matavimo įrangos ir kompiuterio su programine įranga užtikrinti. 8 lentelėje pateikti mikrovaldiklio techniniai parametrai.

8 lentelė. Mikrovaldiklio „Raspberry PI Zero W“ techninė specifikacija

Komponentas	Specifikacija
Procesorius	BCM2835, ARM, vienas branduolys, 1 GHz
Operatyvioji atmintis (RAM)	512 MB
Atminties jungtis	microSD
Vaizdo išvestis	mini HDMI jungtis
Kameros jungtis	Yra
Belaidis ryšys	„Wi-Fi“, 802.11 b/g/n
Bluetooth	„Bluetooth 4.1“ ir „Bluetooth Low Energy“
USB jungtys	2 × micro USB jungtys
Maitinimo jungtis	1 × maitinimo jungtis
USB host jungtis	1 × USB Host jungtis (angl. <i>on-the-go</i> , OTG)

„LiPO SHIM“ modulis reikalingas nepertraukiamam matavimo prietaiso maitinimui nuo ličio-jonų baterijos užtikrinti. 9 lentelėje pateikta šio modulio techninė specifikacija.

9 lentelė. Modulio „LiPO SHIM“ techninė specifikacija

Komponentas	Specifikacija
Maitinimo šaltinis	„LiPo“ arba „LiIon“ akumuliatoriai (vienos celės, 3.7 V nominali įtampa)
Įtampos keitiklis	TPS61232 („Boost“ konverteris)
Įvesties įtampa	2,7–5,5 V
Išvesties įtampa	5 V DC (stabilizuota, „Raspberry Pi“ tinkama įtampa)

Didžiausia srovė	Iki 2,1 A
Efektyvumas	Iki 95 % (priklausomai nuo įvesties įtampos ir apkrovos)
Baterijos įkrovimas	Integruotas įkroviklis su „MicroUSB“ jungtimi
LED indikatoriai	Įkrovimo būseną ir maitinimo šaltinio indikatoriai
Saugumo funkcijos	Apsauga nuo per didelės srovės, per didelės / žemos įtampos
Perjungimas tarp šaltinių	Automatinis perjungimas tarp baterijos ir USB įvesties
Matmenys	Mažas, suderinamas su „Raspberry Pi GPIO“ (SHIM dizainas)
Suderinamumas	„Raspberry Pi Zero“, 3B, 3B+, 4B ir kiti modeliai
Darbinė temperatūra	Nuo -40 °C iki +85 °C (priklausomai nuo baterijos ir aplinkos sąlygų)

29 paveiksle pateiktas suprojektuoto įrenginio vaizdas.



29 pav. Kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių matavimo prietaisas

Šis dėžutės dizainas (žr. 29 pav.) yra kompaktiškas, todėl lengvai pritaikomas atliekant skirtingo tipo matavimus.

3.3.3. Nešiojamas kompiuteris „LENOVO YOGA Slim 6 14IAP8“ su programine įranga

Matavimo prietaiso rodmenims stebėti naudojamas „LENOVO YOGA Slim 6 14IAP8“ nešiojamas kompiuteris su „Windows 11“ operacine sistema. Šio kompiuterio techniniai duomenys pateikti 10 lentelėje.

10 lentelė. Kompiuterio „LENOVO YOGA Slim 6 14IAP8“ techniniai duomenys

Kategorija	Specifikacijos
Procesorius	„Intel Core“ i7-1260P, 12 branduolių, dažnis 2,1GHz.
Vaizdo plokštė	„Intel Iris Xe Graphics DirectX“ 12,1
Ekranas ir jo raiška	„WUXGA OLED“ 1920 × 1200
Operatyvioji atmintis	16GB LPDDR5-4800
Vidinė atmintis	M.2 2280 SSD 512GB
Baterija	60 Wh
„Wi-Fi“	„Wi-Fi“® 6, 802.11ax 2 × 2 „Wi-Fi“®

„Bluetooth“	„Bluetooth“® 5.2, M.2 kortelė
Kamera	FullHD 1080p

Prisijungimui prie kompiuterio naudota „MobaXterm“ programa, leidžianti sukurti ryšį tarp vietiniame tinkle esančių įrenginių ir stebėti jų teikiamą informaciją, taip pat nusiųsti komandines eilutes, skirtas mikroprocesoriui valdyti.

3.3.4. Oro sąlygų matavimo prietaisais „Extech instruments“ 45160

Norint realiu laiku skrydžio metu nustatyti oro sąlygas, t. y. temperatūrą, drėgmę, vėjo greitį, naudotas „FLIR“ kompanijos „Extech Instruments“ 45160 matavimo prietaisais. Šiuo prietaisu buvo matuotas ir vėjo greitis, kurį sukuria bepiločio orlaivio sraigčiai. Prietaiso techninė specifikacija pateikta 11 lentelėje.

11 lentelė. Oro sąlygų matavimo prietaiso „Extech instruments“ 45160 techninė specifikacija

Kategorija	Specifikacijos
Oro greitis	Diapazonas: 0,4–30 m/s, 1,4–108 km/h, 0,9–67 mph, 0,8–58,3 kn.
Oro greičio tikslumas	±3 % nuo 0 iki 3 937 fpm; ±4 % virš 3 937 fpm
Drėgmė	Diapazonas: 10–95 % RH
Drėgmės tikslumas	±4 % RH nuo 10 % iki 70 % RH; ±5,2 % RH virš 70 %
Temperatūra (termistorius)	Diapazonas: 0–50 °C; tikslumas: ±1,2 °C
Temperatūra (tipas „K“)	Diapazonas: -100 – +1 300 °C; tikslumas ±1 %, o rodmenų – +1 °C
Oro greičio matavimo įrenginys	Mažos trinties vėjinio rato jutiklis
Drėgmės matavimo įrenginys	Plonasluoksnis talpinis jutiklis
Termometro įrenginys	Aplinkos temperatūros matavimams naudojamas termistorius
Kiti funkcionalumai	Min. / Max., „Data Hold“, automatinis išjungimas, baterijos ir perviršio indikacijos
Baterija	9 V baterija
Matmenys	156 × 60 × 33 mm
Svoris	95 g
Vėjinio rato skersmuo	24 mm

Šis prietaisas tinkamas keliems parametrams matuoti.

3.3.5. Infraraudonųjų spindulių temperatūros matavimo prietaisais „Raytek MiniTemp MT“

Bepilotės skraidyklės variklių temperatūrai matuoti naudotas infraraudonųjų spindulių temperatūros matavimo prietaisais su lazeriniu taikikliu, kuris gali tiksliai ir greitai išmatuoti tam tikrame taške susidariusią temperatūrą. Šio prietaiso techniniai parametrai pateikti 12 lentelėje.

12 lentelė. Temperatūros matavimo prietaiso „Raytek MiniTemp MT“ techninė specifikacija

Komponentas	Specifikacija
Temperatūros matavimo diapazonas	-18 °C iki 400 °C
Tikslumas	±2 % arba ±2 °C, priklausomai nuo to, kas yra didesnis; nuo -18 °C iki -1 ± 3°C
Pakartojamumas	±2 % nuo rodmens arba ±2 °C (±3 °F), priklausomai nuo to, kas yra didesnis
Reagavimo laikas	500 ms, 95 % atsakas
Spektrinė atsaka	7–18 μm
Emisijos koeficientas	Iš anksto nustatytas 0,95
Lazerio klasė	II
Atstumas iki taško dydžio santykis	8:1
Įprastas atstumas iki tikslo (taško)	Iki 1,5 m
Laikymo funkcija	Taip (7 sekundžių laikymas)
Apšvietimas	Apšviestas LCD ekranas
Temperatūros rodymas	Pasirenkama °C arba °F
Papildomos funkcijos	Nėra
Aplinkos sąlygos	Veikimo temperatūra: 0 °C iki 50 °C; santykinė drėgmė 10 % iki 95 % RH (be kondensacijos)
Maitinimas	9 V šarminė arba NiCd baterija (įtraukta); baterijos veikimo laikas 12 valandų
Matmenys	152 × 101 × 38 mm
Svoris	227 g

Šis prietaisas turi galimybę per atstumą išmatuoti pasirinktos vietos temperatūrą net iki 400 °C per.

3.4. Matavimo su gaubtu metodas

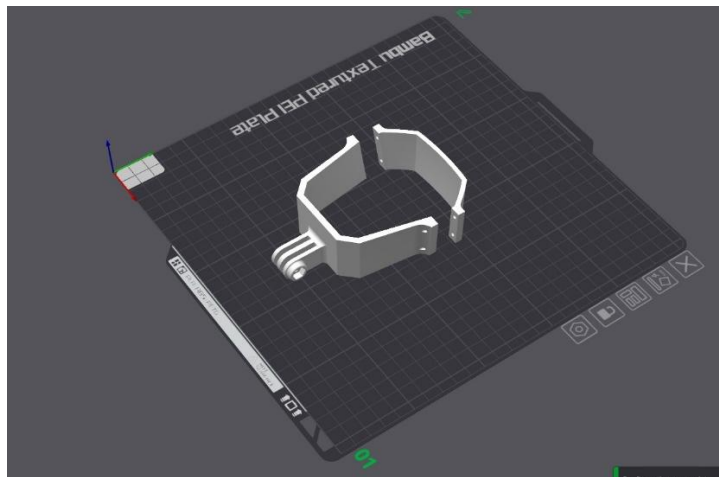
3.4.1. Papildomi konstrukciniai elementai

3.4.1.1. Laikiklis

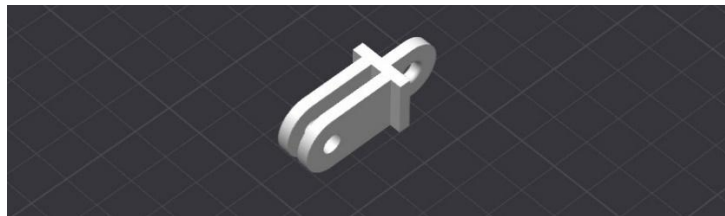
Norint prie „DJI Mavic 3 Enterprise RTK“ bepiločio orlaivio tinkamai sumontuoti matavimo įrangą ir gaubtą, 3D spausdintuvu atspausdintas specialus laikiklis. Jis tinkamas kamerai arba virvei laikyti. Laikiklis pritaikytas prie skraidyklės korpuso išlinkimų, siekiant geresnių aerodinaminių savybių. Jo 3D brėžinys pateiktas 30 paveiksle.

Kadangi eksperimentiniai tyrimai bus vykdomi tiek drėgname ore, tiek šviečiant saulei, detalės spausdintos iš PETG tipo plastiko, pasižyminčio atsparumu UV spinduliams ir drėgmei, lengvumu bei stiprumu jį lenkiant. Naudotas „BambuLab“ kompanijos pagamintas plastikas ir jį sukurtas 3D spausdintuvas „BambuLab P1S“.

Papildomai suprojektuotas ir atspausdintas laikiklis (žr. 31 pav.), prie kurio buvo pririšta 6 mm, 2 m ilgio nailoninė virvė. Virvė pasirinkta kaip alternatyva standžiai jungčiai. Taip pat buvo pagamintas matavimo prietaiso laikiklis (žr. 32 pav.).



30 pav. Laikiklis skirtas bepiločiam orlaiviui



31 pav. Laikiklis skirtas virvei pririšti



32 pav. Laikiklis skirtas virvei ir įrangai prisukti

Laikikliai suprojektuoti taip, kad būtų sunaudota kuo mažiau plastiko, siekiant neapsunkinti bendros konstrukcijos.

3.4.1.2. Gaubtas

Siekiant apsaugoti matavimo prietaisą nuo drono sraigtų sukuriamos oro turbulencijos, sukurtas ir pritaistas gaubtas, kuriam gaminti naudotos plastikinės detalės, siekiant užtikrinti mažesnę konstrukcijos svorį ir apkrovą.

Šios detalės buvo paimtos iš vaikiško žaidimų rinkinio. Tai plastmasiniai kubeliai (žr. 33 pav.), į kuriuos įsistato plastmasinės tuščiavidurės lazdelės (žr. 34 pav.).

Detales sujungus, suformuotas 65 × 65 cm ploto gaubtas, kuris papildomai uždengtas polietilenine plėvele (žr. 35 pav.).



33 pav. Plastmasinis kubelis iš žaislinio rinkinio



34 pav. Plastmasinė tuščiavidurė lazdelė iš žaislinio rinkinio

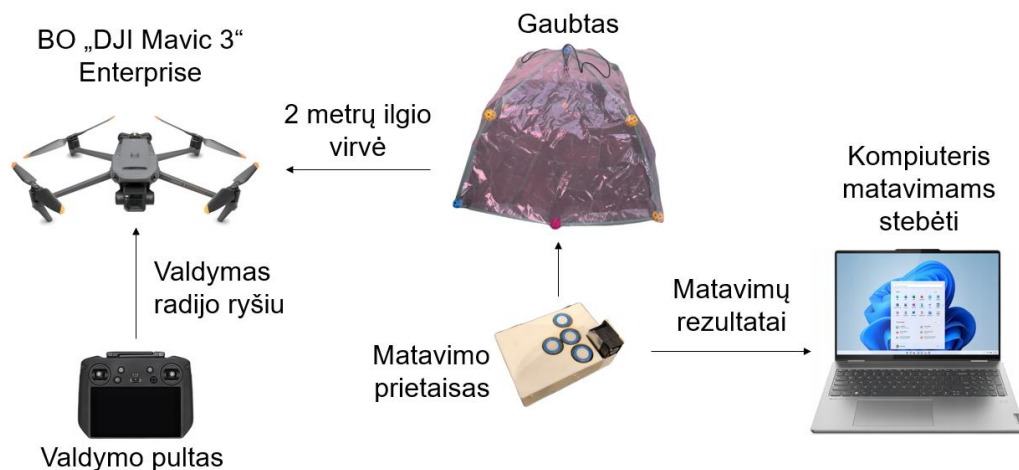


35 pav. Gaubtas matavimo įrangai apsaugoti

Bendras visų laikiklių, virvės ir gaubto svoris su matavimo įranga yra 605 gramai.

3.4.2. Struktūrinė schema

Eksperimentinės sistemos, naudojant matavimo su gaubtu metodą, schema pateikta 36 paveiksle.



36 pav. Eksperimentinės sistemos schema, naudojant matavimo su gaubtu metodą

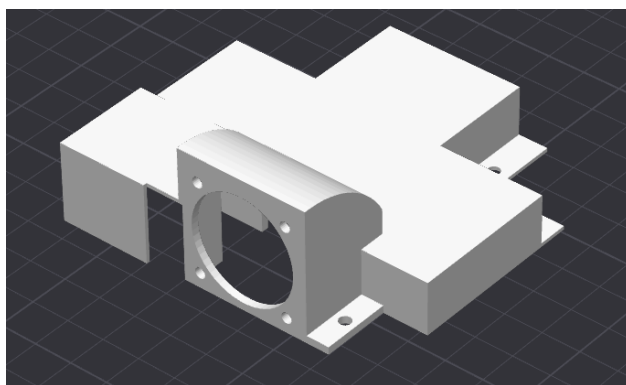
Panaudotas radijo ryšiu per pultą valdomas bepilotis orlaivis. Prie orlaivio laikiklio prikabinta 2 metrų virvė, ant kurios galo pritvirtintas matavimo prietaisas, kuris papildomai uždengtas gaubtu. Matavimo rezultatai išvedami į kompiuterį.

3.5. Matavimo per vamzdelį metodas

3.5.1. Papildomi konstrukciniai elementai ir įranga

Norint sumažinti bepiločio orlaivio variklių temperatūrą, kenksmingos dujos gali būti ventiliatoriumi per specialų vamzdelį įtraukiamos į matavimo įrenginį, kuris pritvirtintas bepiločio orlaivio viršuje.

Šiam metodui naudojamas tas pats kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių matavimo įrenginys, tačiau suprojektuotas ir 3D spausdintuvu atspausdintas matavimo įrenginio uždengimas (žr. 37 pav.), tam, kad kenksmingos medžiagos pasiektų tik matavimams naudojamus jutiklius.

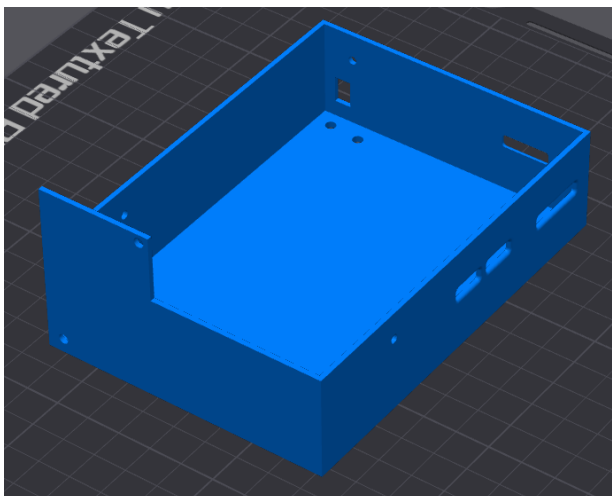


37 pav. Matavimo įrenginio uždengimo konstrukcija

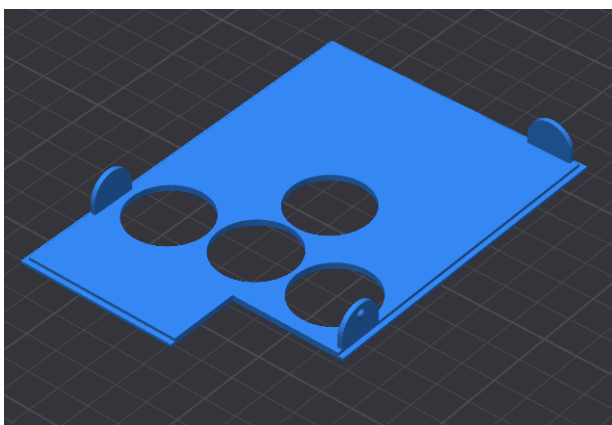
Šis uždengimas (žr. 37 pav.) pilnai dengia visus keturis elektrocheminius kenksmingų dujų jutiklius ir vieną kietųjų dalelių lazerinį jutiklį. Jis prisisuka prie matavimo įrenginio penkiais M3 × 6 mm varžtais.

Papildomai suprojektuota ir atspausdinta dėžė su dangteliu (žr. 38 ir 39 pav.) matavimo įrangai montuoti. Prie uždengimo konstrukcijos prisukamas 25 × 25 × 10 mm dydžio ventiliatorius (žr. 40

pav.), kurio įtampa reguliuojama 5–8 V režiuose, o sukimosi greitis – 13 000–14 500 apsisukimo per minutę diapazone. Ventilatorius naudojamas, tam, kad vamzdelyje, per kurį bus sutraukiami iš kamino išeinantys dūmai, būtų sukurtas oro srautas.



38 pav. Dėžė matavimo įrangai montuoti



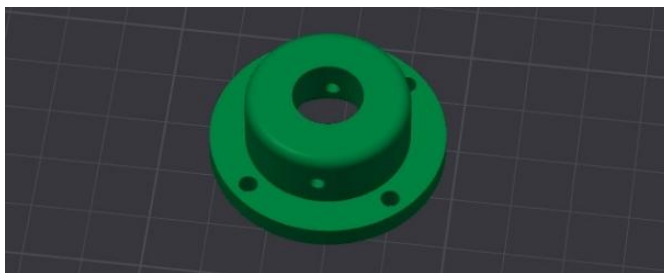
39 pav. Dėžės dangtelis



40 pav. Ventilatorius, naudojamas oro srautui vamzdelyje sukurti

Prie ventilatoriaus papildomai suprojektuotas, atspausdintas ir prisuktas perėjimas (žr. 41 pav.) į anglies pluošto 12 mm skersmens vamzdelį, kuris turi 10 mm skersmens vidinę ertmę, vamzdelio

ilgis – 700 mm. Toks vamzdelis (žr. 42 pav.) parinktas dėl nedidelio svorio, jis nenusveria matavimų įrangos žemyn.

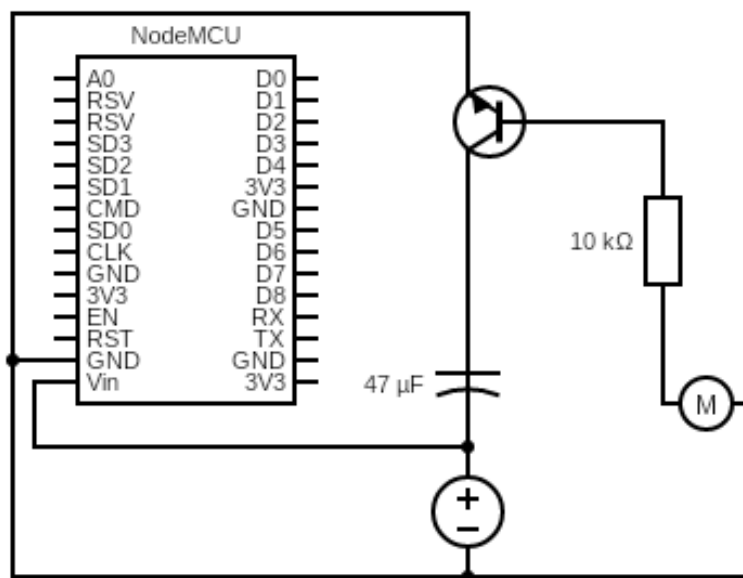


41 pav. Perėjimas iš ventiliatoriaus į anglies pluošto vamzdelį



42 pav. Anglies pluošto vamzdelis

Norint kuo geriau įvertinti kenksmingų dujų, per vamzdelį patenkančių į matavimo įrenginį, koncentraciją, įgyvendintas ventiliatoriaus greičio reguliavimas. Greičiui reguliuoti parinkti elektronikos komponentai (žr. 13 lentelę) ir pagal nubraižytą schemą (žr. 43 pav.) sulituota grandinė (žr. 44 pav.).

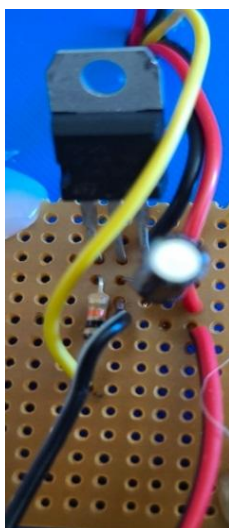


43 pav. Ventiliatoriaus valdymo elektrinė schema

13 lentelė. Elektronikos komponentai greičio valdymo schemai

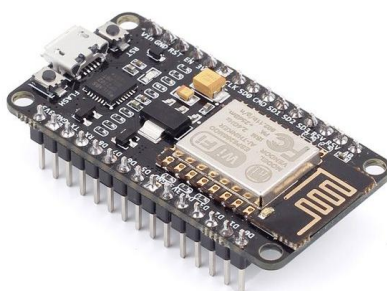
Mikrovaldiklis „LoLin NodeMCU“ ESP8266
Tranzistorius TIP120
10 k Ω varža
47 nF kondensatorius

Norint pašalinti įtampos trikdžius, atsiradusius dėl naudojamų TIP120 tranzistorių, naudoti 47 nF dydžio kondensatoriai, o 10 k Ω varža leidžia sumažinti paleidimo srovę valdymo kontakte.



44 pav. Sulituota ventiliatoriaus greičio reguliavimo schema

Greičiui per „Wi-Fi“ ryšį reguliuoti pasirinktas „LoLin NodeMCU“ ESP8266 mikrovaldiklis (žr. 45 pav.).



45 pav. „LoLin NodeMCU“ ESP8266 mikrovaldiklis

Mikrovaldiklio techniniai parametrai pateikti 14 lentelėje.

14 lentelė. „LoLin NodeMCU“ ESP8266 mikrovaldiklio techniniai parametrai

Mikrovaldiklis	ESP-8266 32-bit
Modelis	„Clone LoLin“
Dydis	58 mm × 32 mm
Tarpai tarp įvesčių	27,94 mm
Greitis	80 MHz

USB to Serial	CH340G
USB jungtis	Micro USB
Veikimo įtampa	3,3 V
Įėjimo įtampa	4,5–10 V
Įrašymo atmintis/SRAM	4 MB / 64 KB
Skaitmeniniai I/O kanalai	11
Analoginiai kanalai	1
ADC režiai	0–3,3 V
UART/SPI/I2C	1 / 1 / 1
„Wi-Fi“	802.11 b/g/n
Temperatūros režiai	-40 – +125 °C

Mikrovaldiklis pasirinktas dėl programavimo paprastumo ir lengvo suderinamumo su „Android“ operacine sistema veikiančiomis programomis. Mikrovaldiklyje naudotas maitinimo įvesties kanalas, žemės kanalas ir D5 skaitmeninis įvesties kanalas, per kurį reguliuojamas greitis (žr. 43 pav.). Greičio valdymui įgyvendinti naudotas programinis kodas, generuojamas mobilojoje „Android“ aplikacijoje, sukurtoje „MIT App Inventor“ programavimo aplinkoje. Programos vaizdas pateiktas 46 paveiksle.



46 pav. Sukurtos „Android“ programėlės vaizdas telefone

Programos viršuje (žr. 46 pav.) yra slankiojantis rutuliukas, leidžiantis reguliuoti ventiliatoriaus greitį, matomą žemiau įvesties lauko. Įvesties lauke būtina įrašyti vietiniame tinkle prisijungusio ESP8266 mikrovaldiklio IP adresą ir paspausti mygtuką „Siųsti“. Atlikus šiuos veiksmus į mikrovaldiklį nusiunčiama paleidimo komanda, kuri įjungia ventiliatorių nustatytu greičiu, ir vyksta dūmų per vamzdelį traukimo procesas. Bendras matavimo įrangos svoris 402 gramai.

3.5.2. Struktūrinė schema

Eksperimentinės sistemos, naudojant matavimo su vamzdeliu metodą, schema pateikta 47 paveiksle.



47 pav. Eksperimentinės sistemos schema, naudojant matavimo su vamzdeliu metodą

Panaudotas radijo ryšiu per pultą valdomas bepilotis orlaivis. Ant orlaivio esančio laikiklio pritvirtintas matavimo prietaisas. Ventiliatorius, kuris skirtas oro srautui įtraukti, valdomas išmaniuoju įrenginiu „Android“ programėle per „Wi-Fi“ ryšį. Matavimo rezultatai „Wi-Fi“ ryšiu perduodami į pagrindinį kompiuterį.

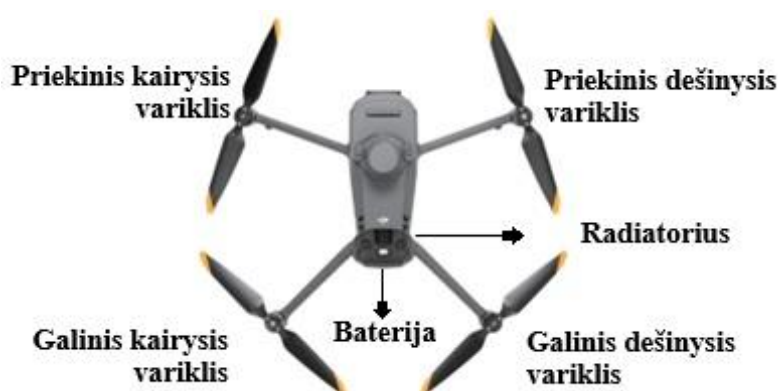
4. Tiriamoji dalis

4.1. Svorio įtaka variklių ir radiatoriaus temperatūroms

Siekiant ištestuoti suprojektuotas sistemas, atlikti keli bandomieji skrydžiai. Siekiami uždaviniai: nustatyti, ar metoduose naudojamos įrangos svorį gali pakelti bepilotis orlaivis; iširti kokią įtaką svoris turi dronui ir kitai įrangai; išsiaiškinti kaip veikia matavimo sistema ir kaip ji gali būti valdoma.

Pirmieji skrydžiai vykdyti uždaroje patalpoje, t. y. sporto salėje. Tai didelė erdvė, kurioje palaikoma pastovi temperatūra ir nėra vėjo. Išmatuoti tokie aplinkos parametrai: 18 °C temperatūra, 35 proc. drėgmė ir 0 m/s vėjo greitis. Tokia aplinka yra tinkama erdvė bandomiesiems skrydžiams vykdyti, nes ji nedarys jokios įtakos bepiločio orlaivio stabilumui, kuris gali pakenkti skrydžio laikui ar tiesiog jo gebėjimui pakelti skirtingo svorio įrangą. Pirmaisiais skrydžiais sporto salėje buvo vertinama bepiločio orlaivio galimybė pakelti skirtingo svorio įrangą. Matavimo įrangos apsaugotos gaubtu pakilimas į orą buvo sklandus, tačiau skrydžio metu pastebėtas bepiločio orlaivio nukrypimas nuo užduotos pozicijos. Tuo tarpu dronas, vykdamas kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių matavimus per vamzdelį, kylant į orą pasvyra, tačiau tik pakilęs – išlygina savo judėjimo trajektoriją.

Toliau atliekant bandomuosius skrydžius siekta įvertinti, kokią įtaką keliamas svoris turi drono variklių, radiatoriaus ir baterijos temperatūroms. Bandymuose naudotas infraraudonųjų spindulių temperatūros matuoklis „Raytek MiniTemp MT“. Lazerinis taikiklis leido išmatuoti, koks visų keturių variklių, radiatoriaus ir baterijos temperatūros pokyčius po 5 min. skrydžio. Pirmiausia, matavimai atlikti neskrendančiam bepiločiam orlaiviui, siekiant įvertinti visų komponentų pradinę temperatūrą. Po to atlikti trys skrydžiai po 5 min., vienas jų be įrangos, kiti du – naudojant skirtingo svorio įrangą: 605 gr. (matavimo su gaubtu metodas) ir 402 gr. (matavimo per vamzdelį metodas). Toliau matuota taškų, kurių išdėstymas pateiktas 48 paveiksle, temperatūra. Matavimų rezultatai pateikti 15 lentelėje.



48 pav. Bepiločio orlaivio „DJI Mavic 3 Enterprise RTK“ variklių ir radiatoriaus išdėstymas

Varikliai po 5 min. skrydžio su 605 gramų matavimų įranga įkaista dvigubai daugiau, lyginant su temperatūros reikšmėmis, gautomis vykdant skrydį be įrangos. Analizuojant skrydį su 402 gramų matavimų įranga, matyti, kad priekiniai varikliai įkaista 50 procentų daugiau nei vykdant skrydžius be papildomos įrangos, o galinių variklių temperatūra nesikeičia. Šie temperatūros pokyčiai rodo, kad matavimų įranga sukuria papildomą apkrovą varikliams, dėl ko jie gali perkaisti. Įvertinus duomenis pateiktus 15 lentelėje ir informaciją aprašytą šaltinyje [41], patvirtinta, kad įrangos svoris daro įtaką variklių temperatūrai. Kuo mažesnis drono nešamos įrangos svoris, tuo mažesnė apkrova varikliams.

15 lentelė. Svorio įtaka variklių ir radiatoriaus temperatūroms

Sąlygos	Priekinis kairysis variklis, °C	Priekinis dešinysis variklis, °C	Galinis kairysis variklis, °C	Galinis dešinysis variklis, °C	Baterija, °C	Radiatorius, °C
Neskrendant	15,6	15,6	15,6	15,6	18,2	18,2
Skrydis be įrangos	40,1	39,2	31,1	33,8	35,8	42,3
Skrydis su įranga (matavimo per vamzdelį metodas) (402 gr.)	60,8	61,4	32,8	30,8	38,2	37,8
Skrydis su įranga (matavimo su gaubtu metodas) (605 gr.)	91,8	92,2	63,2	64,4	42,2	41,4

Būtina paminėti, kad aukštos darbinės variklių temperatūros mažina variklio našumą, nes padidėja elektrinė variklio varža ir variklyje esantis magnetas gali demagnetizuotis.

4.2. Oro turbulencijos priklausomybė nuo krovinio svorio

Kai jau žinoma, bepilotis orlaivis gali pakelti skirtingo svorio įrangą, tačiau reikia įvertinti kokią įtaką ji daro skrydžio charakteristikoms. Vykdam tolimesnius skrydžius buvo matuota vėjo turbulencija, kurią sukuria bepilotis orlaivis. Oro turbulencija priklauso nuo to, kaip greitai sukasi drono sraigčiai, o šiam greičiui įtakos turi valdymas, t. y. bet koks poslinkis ore arba bet kokia atsiradusi apkrova: smarkus vėjas ar papildomas svoris. Kadangi kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių matavimai bus atliekami bepilotį orlaivį laikant vienoje pozicijoje virš kamino, oro turbulencijos matavimai atlikti laikant droną toje pačioje altitudėje (matuoklis 2 metrai žemiau bepiločio orlaivio), nes būtent taip bus montuojama įrangą matavimams su gaubtu atlikti.

Bepilotis orlaivis nenukrypdamas nuo užduotos altitudės pakilo į orą, su „Extech instruments“ 45160 prietaisu buvo išmatuota jo sraigtų sukurta vėjo turbulencija. Gautas rezultatas – 7,2 m/s (žr. 49 pav.). Siekiant įvertinti kokią įtaką svoris turi sukeliama oro turbulencijai, tokie pat matavimai buvo atlikti naudojant du analizuojamus metodus – su gaubtu ir per vamzdelį. Taikant pirmąjį matavimų metodą išmatuota 9,1 m/s oro turbulencija (žr. 50 pav.).

Matyti (žr. 50 pav.), kad vėjas daro įtaką gaubtui, dėl ko jis blaškomas į visas puses. Tuo tarpu gaubto nestabilumas daro įtaką pačios bepilotės skraidyklės stabilumui, kadangi tai jai papildomas trikdys, t. y. didesnė apkrova varikliams.

Naudojant matavimų per vamzdelį metodą išmatuota 8,4 m/s oro turbulencija (žr. 51 pav.). Gauta beveik 8 procentų mažesnė reikšmė, lyginant su metodu naudojant gaubtą. Vienas iš šio matavimo metodo privalumų – vėjas atsiradęs po bepiločiu orlaiviu visai sistemai yra nereikšmingas, nes dūmai į matavimo įrangą patenka per vamzdelį.

Oro turbulencijos priklausomybė nuo krovinio svorio pavaizduota grafike (žr. 52 pav.).



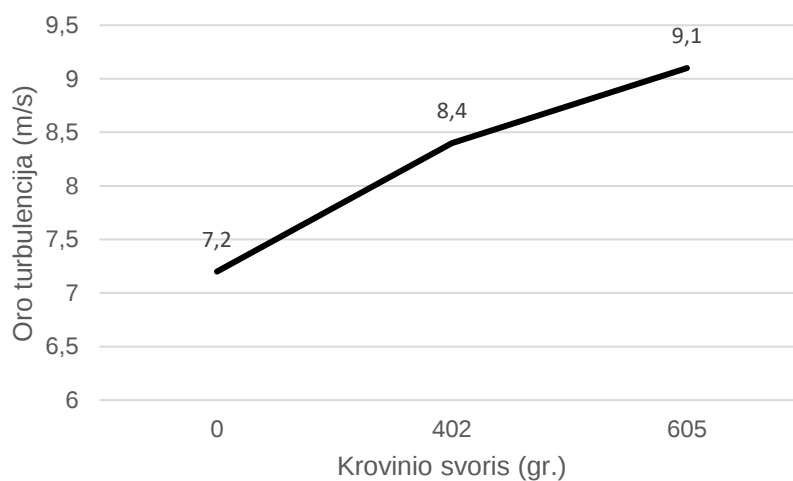
49 pav. Išmatuota oro turbulencijos reikšmė be matavimo įrangos



50 pav. Išmatuota oro turbulencijos reikšmė, taikant matavimo su gaubtu metodą



51 pav. Išmatuotos oro turbulencijos reikšmė, taikant matavimo per vamzdelį metodą



52 pav. Oro turbulencijos priklausomybė nuo krovinio svorio

Pažymėtina, kad didesnis krovinio svoris sukelia didesnę oro turbulenciją, nes varikliams tenka didesnė apkrova. Oro turbulenciją galima sumažinti, didinant variklio galingumą arba naudojant kitokio tipo sparnuotę. Projekte naudojamam bepiločiam orlaiviui „DJI Mavic 3 Enterprise“ galimybės atlikti konstrukcinius pokyčius nėra.

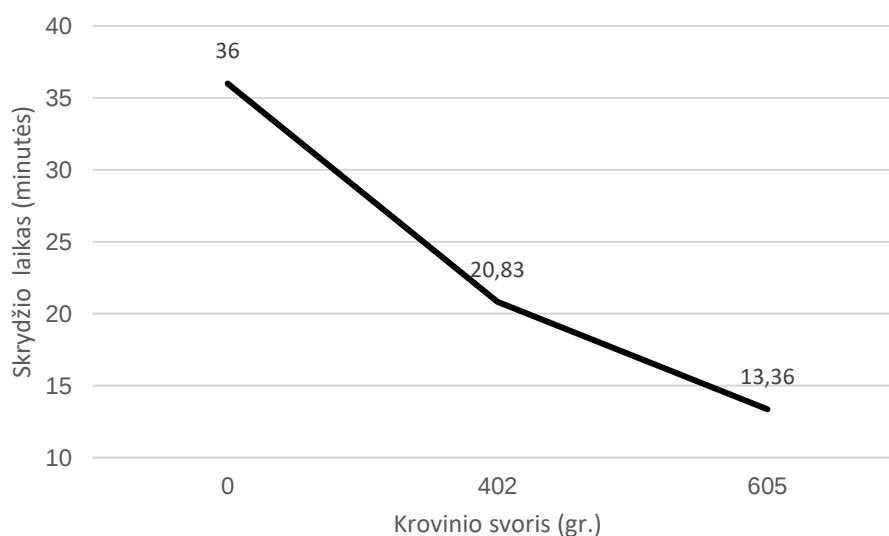
4.3. Svorio įtaka skrydžio laikui

Toliau buvo matuotas maksimalus skrydžio laikas, kai bepilotis orlaivis neapkrautas, tam, kad vėliau būtų galima nustatyti kokią įtaką skrydžio laikui turi skirtingo svorio įranga. Norint įvertinti kokią įtaką bepiločio orlaivio keliamas svoris turi skrydžio laikui, sporto salėje, kurioje nėra vėjo, atlikti trys skrydžiai po 9 min. Skrydžiuose naudotas dronas su pilnai pakrautomis baterijomis. Po 9 min. skrydžio vertintas baterijos įkrovimo lygis ir išskaičiuotas orlaivio pilnas skrydžio laikas. 16 lentelėje pateikti tyrimo rezultatai.

16 lentelė. Svorio įtaka skrydžio laikui

Krovinio svoris (gramai)	Skrydžio laikas (minutės)
0	36
402	20,83
605	13,36

53 paveiksle pateikta skrydžio laiko priklausomybė nuo skraidinamos įrangos svorio.



53 pav. Skrydžio laiko priklausomybės nuo skraidinamos įrangos svorio grafikas

Apibendrinus 16 lentelėje ir 53 paveiksle pateiktą informaciją matyti, kad bepiločio orlaivio su papildomu matavimams skirtu gaubtu (605 gr.) skrydžio laikas sutrumpėjo 63 proc. Norint neprarasti tiek daug skrydžio laiko, reikėtų mažinti bendrą sistemos svorį, taip pat turbulenciją į gaubtą, kuri didina pasipriešinimą ir sukelia skraidyklės nestabilumą. Turbulencija gali būti sumažinta: 1) pakeitus sraigtus; 2) parinkus kitą matavimo metodą, kai matavimo įranga montuojama virš bepiločio orlaivio sraigčių. Atliekant matavimus per vamzdelį (402 gr.) skrydžio laikas sutrumpėjo 42 proc. Tai leidžia vienu orlaivio pakilimu atlikti didesnę kiekį matavimų, taip pat rečiau krauti drono bateriją, taip prailginant jos tarnavimo laiką. Lyginant gautus rezultatus su teorinėmis mokslininkų išvalgomis [27]

galima teigti, kad skrydžio laikas gali būti sumažintas didinant variklių keliamąją galią ir baterijos dydį. Matyti, kad mokslininkų tirtas 800 gramų bepilotis orlaivis 50 proc. skrydžio laiko prarado dėl papildomo 300 gramų svorio (krovinio) kėlimo į orą. Tuo tarpu šiame projekte naudotas 900 gramų bepilotis orlaivis apie 50 proc. skrydžio laiko prarado į orą keldamas 402 gramų krovinį. Galima teigti, kad kuo galingesnis bepilotis orlaivis, tuo didesnę krovinio svorį jis gal kelti.

4.4. Aukščio pokyčio priklausomybė nuo įrangos svorio

Siekiant įvertinti bepiločiam orlaiviui perduodamą apkrovą ir jo galimybę išlaikyti savo poziciją ore naudojant skirtingus matavimo metodus (su gaubtu ir vamzdeliu), atlikta skrydžio trajektorijos analizė. Šiuo eksperimentu buvo vertinamas bepiločio orlaivio aukščio padėties pokytis 4 metrų aukštyje per 3 minutes skrydžio laiko. Atlikti trys skirtingi skrydžiai sporto salėje: be matavimo įrangos ir su matavimo įranga: matavimas su gaubtu (605 gr.) ir per vamzdelį (402 gr.). 17 lentelėje pateikti drono altitudės reikšmių pokyčiai.

Įvertinus 17 lentelėje pateiktus duomenis matyti, kad matavimo su gaubtu metodas sukelia didesnę apkrovą bepiločiam orlaiviui, kadangi svaidomas gaubtas neleidžia PID reguliatoriui atlikti tinkamo skraidyklės stabilizavimo.

17 lentelė. Aukščio pokyčio priklausomybė nuo įrangos svorio

	Pradinis aukštis (m)	Aukštis po 3 minučių
Be svorio	4	4
Matavimo su gaubtu metodas (605 gr.)	4	6
Matavimo per vamzdelį metodas (402 gr.)	4	4

Būtina pastebėti, kad bepilotis orlaivis esant primontuotam prie jo gaubtui dažnai nuslinkdavo keletą centimetrų į šoną, neišlaikydamas savo pozicijos. Darytina prielaida, kad matavimo per vamzdelį metodas turėtų būti tinkamesnis matavimo būdas, tačiau norint įvertinti abiejų metodų matavimų tikslumą, būtina atlikti realius kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių matavimus su skirtinga matavimo įranga.

4.5. Kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių matavimai

Sekantys skrydžiai vykdyti realiomis oro sąlygomis lauke, atliekant kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių matavimus virš kamino. Eksperimentai buvo atliekami Panevėžio mieste Nemuno gatvėje. Oro užterštumo matavimai vykdyti virš kamino, dūmai į kurį patenka iš kietojo kuro katilo „KALVIS PR2-SN“. Šio katilo techninė specifikacija pateikta 18 lentelėje. Būtina pabrėžti, kad kamino sistemoje nenaudojami jokie filtrai.

Pradžioje atliekant eksperimentinius skrydžius tikrinta galimybė matavimo rezultatus perduoti „Wi-Fi“ ryšiu. Pirmiausia, prieš skrydį programinėje įrangoje „MobaXterm“ atliktas kompiuterio ir matavimo prietaiso virtualus sujungimas. Jis vykdytas SSH (tinklų protokolas, įgyvendinantis nuotolinę operacinės sistemos valdymą ir komandų vykdymą) metodu per IP adresą jungiantis iš kompiuterio į prietaisą. Toliau įgyvendinta autorizacija, kad būtų pasiekti duomenys esantys matavimo įrenginio valdiklyje. Sėkmingai prisijungus įvykdytas bandomasis skrydis ir ekrane stebėta jutiklių teikiama informacija (žr. 54 pav.), gaunama 1 sekundės intervalais. Visų jutiklių matavimo rodmenys buvo įrašomi į automatiškai kiekvieną kartą paleidus įrenginį sukuriamą „MS Excel“ failą.

Toliau atlikti matavimai, tiriant kenksmingas dujas ir kietąsias daleles virš taršos objekto. Eksperimento eiga – užkurtas kietojo kuro katilas, degintos skirtingos medžiagos (eglių mediena, baldinės atliekos) ir stebėti matavimų rezultatai.

18 lentelė. Kietojo kuro katilo „KALVIS PR2-SN“ techninė specifikacija

Galingumas	11 kW
Naudojamas kuras	Malkos, durpių, pjuvenų briketai
Apšildomas tūris	12–20 m ³
Pakuros tūris	28 l
Malkų ilgis	35 cm
Išoriniai katilo kamino matmenys	130 mm
Akmenų kiekis, kg	65 kg
Minimali kamino trauka	8 Pa
Matmenys AxPxl	850 × 510 × 810 mm
Svoris	87 kg



54 pav. Matavimo rezultatų pavyzdys „MobaXterm“ programinėje įrangoje

Siekiant nustatyti ar vykdant bandomuosius matavimus bepiločio orlaivio įranga teisingai išmatavo kenksmingų dujų kiekį virš kamino, gauti duomenys lyginti su matavimais atliktais be drono rankiniu būdu. Teršalų kiekis matuotas prie pat kamino ir atsitraukus nuo jo rankoje laikant kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių matavimo įrenginį (žr. 55 pav.). Rezultatai pateikti 19 lentelėje.

Rankinius būdu nustatytos CO dujų ir visų dydžių kietųjų dalelių maksimalios reikšmės (žr. 19 lentelę). 55 paveiksle galima matyti, kad matavimo įranga laikyta saugiu apie 30–40 centimetrų atstumu nuo išmetamosios angos, kadangi išmetamų dūmų temperatūra gali pakenkti įrangai. Šis atstumas bus išlaikomas naudojant matavimo su gaubtu ir per vamzdelį metodus.



55 pav. Matavimas laikant įrangą rankoje

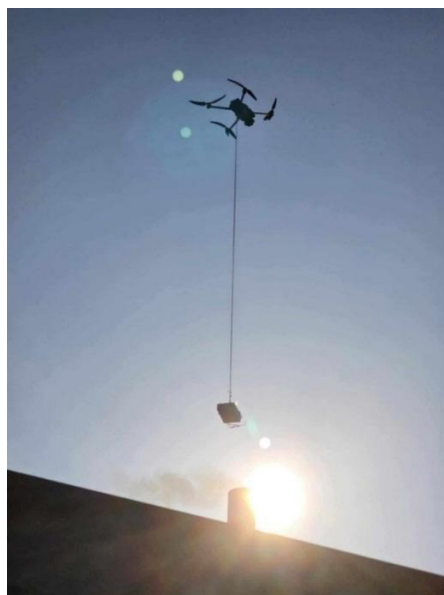
19 lentelė. Kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių matavimų rankiniu būdu rezultatai

Dujos	Rodmenys aplinkoje	Rodmenys dūmuose
SO ₂	0	2,8 ppm – 7,336 mg/m ³
CO	0	200 ppm – 360 mg/m ³ (maks.)
NO ₂	0,4 ppm – 0,753 mg/m ³	3,1 ppm – 5,834 mg/m ³
PM1.0	7	1000 (maks.)
PM2.5	9	1000 (maks.)
PM10	10	1000 (maks.)

Toliau sistema buvo pilnai paruošta matavimams su gaubtu vykdyti, tačiau pirmame bandyme pats gaubtas uždėtas nebuvo (žr. 56 pav.). Šio skrydžio rezultatai pateikiami 20 lentelėje.

20 lentelė. Kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių matavimų rezultatai, naudojant matavimo su gaubtu metodą, bet neuždėjus paties gaubto

Dujos	Rodmenys aplinkoje	Rodmenys dūmuose
SO ₂	0	0
CO	0	28 ppm – 32,077 mg/m ³
NO ₂	0,2 ppm – 0,376 mg/m ³	0,3 ppm – 0,565 mg/m ³
PM1.0	10	10
PM2.5	13	13
PM10	14	14



56 pav. Matavimas, naudojant matavimo su gaubtu metodą, bet neuždėjus paties gaubto

Atlikti eksperimentiniai tyrimai įrodė, kad matavimo įrangą prikabinus prie virvės be apsauginio gaubto, sunku išmatuoti kenksmingas dujas ir kietąsias daleles, nes sraigtų sukeltas vėjas (apie 8 m/s) nupučia dūmus nuo įrangos. Gautus rezultatus lyginant su rezultatais, gautais vykdant matavimus rankiniu būdu, matyti, kad nei CO dujos, nei kietosios daleles nepasiekė prieš tai išmatuotų reikšmių, todėl tolimesniuose bandymuose naudotas apsauginis gaubtas, uždengiantis matavimo įrangą nuo tiesioginio vėjo ir leidžiantis dūmams iš kamino lengviau pasiekti jutiklius. Kadangi drono skrydžio trajektorija naudojant matavimo su gaubtu metodą yra nestabili, buvo išlaikytas apie 90–100 centimetrų atstumas iki kamino angos, siekiant išvengti galimo atsitrenkimo į ją (žr. 57 pav.). Matavimų rezultatai pateikti 21 lentelėje.

Iš 21 lentelėje pateiktų duomenų matyti, kad rezultatai gauti taikant matavimo su gaubtu metodą atitinka rezultatus, gautus atliekant matavimus rankiniu būdu, tad galima teikti, kad toks matavimo būdas yra galimas. Kietųjų dalelių jutiklis pasiekė savo maksimalias reikšmes. CO jutiklio parodymai leidžia identifikuoti, kada yra deginamos atliekos, o kada švari mediena.



57 pav. Matavimas naudojant matavimo su gaubtu metodą

21 lentelė. Kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių matavimų rezultatai, naudojant matavimo su gaubtu metodą

Dujos	Be dūmų	Mediena (spygliuotis)	Atliekos
SO ₂	0	0	1,4 ppm – 3,668 mg/m ³
CO	0	92 ppm – 165,601 mg/m ³	200 ppm – 360 mg/m ³ (maks.)
NO ₂	0,4 ppm – 0,753 mg/m ³	2,2 ppm – 4,14 mg/m ³	0,6 ppm – 1,129 mg/m ³
PM1.0	8	1 000 (maks.)	1 000 (maks.)
PM2.5	10	1 000 (maks.)	1 000 (maks.)
PM10	11	1 000 (maks.)	1 000 (maks.)

Mokslininkų [37] vykdytame tyrime matavimo įrangai pritvirtinti taip pat buvo naudojama virvė, tačiau jų eksperimentuose nebuvo vertinta po bepiločiu orlaiviu atsiradusi oro turbulencija, todėl šiame projekte atlikti papildomi tyrimai, susiję su oro turbulencijos prie matavimo įrangos mažinimu.

Norint pašalinti oro srauto įtaką gaubtui, buvo atlikti matavimai naudojant matavimo per vamzdelį metodą (žr. 58 pav.), t. y. keičiant ventiliatoriaus greitį keičiamas ir „įtraukiamo“ oro srautas.

Vamzdelio galas buvo „įkištas“ tiesiai į iš kamino rūkstančius dūmus, bepilotis orlaivis išlaikytas vienoje pozicijoje, mobiliojoje programėlėje pasirinkta 1 000 impulsų pločio moduliacijos reikšmė, kuri įjungia maksimalų įtraukimo ventiliatoriaus greitį. Matavimas vykdytas 10 sekundžių. Per šį laiką dūmai per vamzdelį buvo įtraukiami į matavimo ertmę, kurioje išsidėstę visi jutikliai. Gauti matavimo rezultatai pateikti 22 lentelėje.



58 pav. Matavimas naudojant matavimo per vamzdelį metodą

22 lentelė. Kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių matavimų rezultatai, naudojant matavimo per vamzdelį metodą

Dujos / dalelės	Nevyksta traukimas	Mediena (spygliuotis)	Atliekos
SO ₂	0	0	0,8 ppm – 2,096 mg/m ³
CO	0	67 ppm – 76,756 mg/m ³	200 ppm – 360 mg/m ³ (maks.)
NO ₂	0,4 ppm – 0,753 mg/m ³	0,4 ppm – 0,753 mg/m ³	0,4 ppm – 0,753 mg/m ³
PM1.0	6	9	690
PM2.5	8	12	963
PM10	9	13	1 000 (maks.)

Įvertinus 22 lentelėje pateiktus duomenis matyti, kad oro taršą matuojant per vamzdelį, kai sukuriamas skirtingas oro srautas, gautos kenksmingų dujų vertės sutampa su matavimų rezultatais, gautais naudojant matavimo su gaubtu metodą, tačiau kietųjų dalelių koncentracija sumažėjo, t. y. jutiklis neišmatavo PM1.0 ir PM2.5 dydžio maksimalių reikšmių. Įrodyta, kad analizuojant dūmus, susidarančius krosnį kūrenant švaria mediena – jutiklio rodmenys nepakinta, o analizuojant dūmus, susidarančius kūrenant medienos atliekomis – jutiklio rodmenys didėja, bet nepasiekia maksimalių reikšmių. Norint įsitikinti kokią įtaką reguliuojamo greičio ventiliatorius turi visai sistemai, atlikti matavimai, kuriuose ventiliatoriaus greitis sumažintas iki 50 proc. ir 25 proc., atitinkamai sumažėjo oro srautas. Bandymų rezultatai parodė, kad šie veiksmai didelės įtakos matavimo duomenims neturėjo (gautos reikšmės artimos 22 lentelėje pateiktoms reikšmėms), nes sistemoje sumontuotas tik 5 V maitinimo šaltinis, todėl nebuvo galimybių sumontuoti galingesnio ventiliatoriaus, kuris suktųsi didesniu greičiu, esamoje bepiločio orlaivio konstrukcijoje. Rekomenduojama, naudojant galingesnį ventiliatorių ir nagrinėjant jo tiekiamo oro srautą, greitį mažinti 50 ar / ir 75 procentais.

Išvados

1. Išnagrinėtos skirtingos bepiločių orlaivių konstrukcijos: vieno sparno, keturių, šešių ir aštuonių sraigčių. Nors vieno sparno konstrukcija ir pasižymi dvigubai ilgesniu skrydžio laiku, bet daugiasraigčiai bepiločiai orlaiviai universalesni. Taip pat nustatyta, kad „Fuzzy-PID“ valdymo stabilizatoriai užtikrina 2–3 kartus mažesnę užduotos pozicijos paklaidą ir trumpesnę stabilizavimo laiką lyginant su PID reguliatoriais. Projekte naudotas keturių sraigčių „DJI Mavic 3 Enterprise“ komercinis bepilotis orlaivis, galintis nenutrūkstamai skristi 36 min. ir turintis 800 gr. keliamąją galią.
2. Mokslinių šaltinių analizė parodė, kad dronai gali būti naudojami kenksmingoms dujoms ir kietosioms dalelėms esančioms ore matuoti. Bepilotėmis skraidyklėmis matavimus galima atlikti žmogui sunkiai arba visai nepasiekiamose vietose, pavyzdžiui virš aukštai esančių kaminų. Mokslinėje literatūroje kenksmingoms medžiagoms matuoti naudotas bepiločių orlaivių būrys. Taip pat išnagrinėtas atvejis, kai matavimų įranga buvo tvirtinama ant virvės pritaisytos prie orlaivio korpuso. Tyrimai taip pat atskleidė, kad matavimo įrangą būtina apsaugoti ar kitaip uždengti nuo vėjo. Šios mokslininkų įžvalgos toliau buvo analizuojamos ir šio projekto eksperimentinėje ir tiriamojoje dalyse.
3. Eksperimentinę sistemą sudarė bepilotis orlaivis „DJI Mavic 3 Enterprise RTK“, kenksmingų dujų ir kietųjų dalelių matavimo sistema (keturi kenksmingų dujų elektrocheminiai jutikliai ZE03, lazerinis kietųjų dalelių jutiklis ZH03B ir „RaspBerry Pi Zero“ mikrovaldiklis), nešiojamas kompiuteris „LENOVO YOGA Slim 6 14IAP8“ su programine įranga, oro sąlygų „Extech instruments“ 45160 ir infraraudonųjų spindulių temperatūros „Raytek MiniTemp MT“ matavimo prietaisai. Projekte analizuoti su metodai: matavimo su gaubtu ir per vamzdelį. Metodams įveikinti suprojektuotos ir 3D spausdintuvu atspausdintos reikalingos detalės (laikikliai, gautas, dėžė ir kt.) bei parinkta papildoma įranga (ventiliatorius). Matavimo su gaubtu metodu įgyvendinti matavimų įranga buvo prikabinta ant drono su dviejų metrų virve ir uždengta gaubtu, siekiant apsaugoti orlaivį nuo oro turbulencijos ir vėjo. Matavimo per vamzdelį metodu įgyvendinti matavimo įranga pritvirtinta ant drono korpuso viršaus, uždengiant jutiklius specialia konstrukcija, o dūmus įtraukiant reguliuojamo greičio ventiliatoriumi per anglies pluošto vamzdelį.
4. Atlikti tyrimai leido įvertinti bepiločio orlaivio galimybes gabenti 605 ir 402 gramų svorio įrangą. Nustatyta, kad kuo didesnis prie bepilotės skraidyklės pritvirtintos matavimo įrangos svoris, tuo:
a) 3 kartus mažesnis skrydžio laikas; b) variklių temperatūrą artima kritinei, t. y. 92 °C; c) didesnė oro turbulencija drono apačioje (9,1 m/s). Naudojant matavimo per vamzdelį metodą galima pašalinti vėjo įtaką matavimo rezultatams, o ventiliatoriaus užtikrina, kad jutikliai nepasiektų savo maksimalių matuojamų reikšmių.

Literatūros ir informacinių šaltinių sąrašas

1. HASAN, K. M., ABDULLAH-AL-NAHID, ABDUL, MD. ALIM, A., MD. MANIRUZZAMAN, RAHAMAN, G. M. A., MD. AHSAN, S. S. H. NEWAZ, S. Design and Development of an aircraft type multi-functional autonomous drone. *IEEE Region 10 Symposium (TENSYP)* [interaktyvus]. Dhaka, Bangladesh, 2020, 734–737 [žiūrėta 2024-04-22]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1109/TENSYP50017.2020.9230929>.
2. HASAN, K. M., HASAN, M. T., NEWAZ, S. H. S., ABDULLAH-AL-NAHID, AHSAN, M. S. Design and development of an autonomous pesticides spraying agricultural drone. *IEEE Region 10 Symposium (TENSYP)* [interaktyvus]. Dhaka, Bangladesh, 2020, 811–814 [žiūrėta 2024-04-22]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1109/TENSYP50017.2020.9230754>.
3. OKULSKI, M., LAWRYNCZUK, M. A Small UAV optimized for efficient long-range and VTOL missions: An experimental tandem-wing quadplane drone. *Applied Sciences* [interaktyvus]. 2022, 12, 7059 [žiūrėta 2024-04-30]. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/app12147059>.
4. CONTE, C., DE ALTERIIS, G., SCHIANO LO MORIELLO, R., ACCARDO, D., RUFINO, G. Drone trajectory segmentation for real-time and adaptive time-of-flight prediction. *Advances in Deep Learning for Drones and Its Applications* [interaktyvus]. Switzerland: MDPI, 2021, 5(62), [žiūrėta 2024-04-22]. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/drones5030062>.
5. IDA, M., NISHIKAWA, H., KONG, X., TANIGUCHI, I., TOMIYAMA, H. A quadcopters flight simulation considering the influence of wind. *International SoC Design Conference (ISOCC)* [interaktyvus]. Yeosu, Korea (South), 2020, 334–335 [žiūrėta 2024-04-22]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1109/ISOCC50952.2020.9333107>.
6. KUMAR, A., BARJATVA, T. K., VERMA, V., SINGH, S. R., AGRAWAL, A. Design and development of fire fighting hexacopter drone. *International Conference on Electrical, Electronics, Communication and Computers (ELEXCOM)* [interaktyvus]. Roorkee, India, 2023, 1–6 [žiūrėta 2024-04-22]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1109/ELEXCOM58812.2023.10370585>.
7. LEY, Y., CHENG, M. Aerodynamic performance of a hex-rotor unmanned aerial vehicle with different rotor spacing. *Measurement and Control* [interaktyvus]. 2020, 53(3–4), 711–718 [žiūrėta 2025-05-12]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1177/0020294019901313>.
8. LEY, Y., LIN, R. Effect of wind disturbance on the aerodynamic performance of coaxial rotors during hovering. *Measurement and Control* [interaktyvus] 2019, 52(5–6), 665–674 [žiūrėta 2025-05-12]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1177/0020294019834961>.
9. ELHESASY, M., KHADER, R., DIF, T. N., KAMRA, M. M., OKASHA, M., ALNUAIMI, S. K. Experimental identification of the translational dynamics of a novel two-layer octocopter. *Drones* [interaktyvus]. 2024, 8, 286 [žiūrėta 2025-05-12]. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/drones8070286>.
10. KHANDAIT, R., KUMAR, V., BHURSE, V., TIWARI, V., KHUBALKAR, S. Quadcopter control using different controllers. *International Conference on Intelligent Controller and Computing for Smart Power (ICICCSP)* [interaktyvus]. Hyderabad, India, 2022, 1–6 [žiūrėta 2024-04-22]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1109/ICICCSP53532.2022.9862416>.
11. MELO, AG., ANDRADE, FAA., GUEDES, IP., CARVALHO, GF., ZACHI, ARL., PINTO, MF. Fuzzy gain-scheduling PID for UAV position and altitude controllers. *Sensors* [interaktyvus]. 2022, 22(6), 2173 [žiūrėta 2024-04-22]. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/s22062173>.

12. GUI, Y. Comparison of several PID controls for quad-rotor UAV under wind disturbance. *Applied and Computational Engineering* [interaktyvus]. China, 5, 139–145 [žiūrėta 2025-05-12]. Prieiga per: <https://doi.org/10.54254/2755-2721/5/20230549>.
13. IMANE, B. B., RAZIKA, B., RABIA, B., MOUSSA, H., ABDELLAH, K., ALGER, D. Simulation of robust controllers for disturbance rejection in quadcopter. *19th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices* [interaktyvus]. Algeria, Setif: IEEE, 2022, 586–594 [žiūrėta 2024-04-29]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1109/SSD54932.2022.9955870>.
14. GHAFAR, M. K., FADHEL, S. F., ARIF, N. E. Application of the generalized backstepping control method for lotka-volterra prey-predator system with constant time delay. *Journal of Physics: Conference Series (3rd International Conference on Mathematics and Applied Science (ICMAS 2022))* [interaktyvus]. Iraq, Baghdad: IOPScience, 2022, 2322 [žiūrėta 2024-04-30]. Prieiga per: [doi:10.1088/1742-6596/2322/1/012012](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2322/1/012012).
15. XUAN-MUNG, N., HONG, S. K. Improved altitude control algorithm for quadcopter unmanned aerial vehicles. *Applied Sciences* [interaktyvus]. 2019, 9, 2122 [žiūrėta 2024-04-30]. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/app9102122>.
16. YAM VIRAMONTES, B. A., MERCADO-RAVELL, D. Implementation of a natural user interface to command a drone. *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)* [interaktyvus]. Athens, Greece, 2020, 1139–1144 [žiūrėta 2024-04-22]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1109/ICUAS48674.2020.9213995>.
17. WALISZKIEWICZ, M., WOJTOWICZ, K., ROCHALA, Z. Experimental method of controller tuning for quadcopters. *IEEE 5th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)* [interaktyvus]. Turin, Italy, 2019, 165–170 [žiūrėta 2024-04-22]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1109/MetroAeroSpace.2019.8869573>.
18. HARRINGTON, P., NG, W. P., BINNS, R. Autonomous drone control within a Wi-Fi network. *12th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)* [interaktyvus]. Porto, Portugal, 2020, 1–6 [žiūrėta 2025-05-12]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1109/CSNDSP49049.2020.9249585>.
19. PRIANDANA, K., HAZIM, M., KUSUMOPUTRO, B. Development of autonomous UAV quadcopters using pixhawk controller and its flight data acquisition. *International Conference on Computer Science and Its Application in Agriculture (ICOSICA)* [interaktyvus]. Bogor, Indonesia, 2020, 1–6 [žiūrėta 2024-04-22]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1109/ICOSICA49951.2020.9243289>.
20. KUMAR PHANDEN, R., CHHABRA, J., SINGH SIKARWAR, B., ARORA, K., ASAWA, K., DAS, S. An experimental study on the flight time of quadcopter using solar energy. *Materialstoday: Proceedings* [interaktyvus]. Amsterdam: Elsevier, 2021, 38, 269–273 [žiūrėta 2024-04-22]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.199>.
21. PUTRA, A. B. N. R., MIZAR, M. A., MASEK, A. B., NAGARI, P. M., HABIBI, M. A., SUBANDI, M. S. The hybrid technology of quadcopter spreader drone with crystal fertilizer as an unmanned aerial vehicles innovation. *7th International Conference on Electrical, Electronics and Information Engineering (ICEEIE)* [interaktyvus]. Malang, Indonesia, 2021, 1–5 [žiūrėta 2024-04-22]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1109/ICEEIE52663.2021.9616700>.
22. ADDABBO, T., DE MURO, S., FALASCHI, G., FORT, A., LANDI, E., MORETTI, R., MUGNAINI, M., NICOLELLI, F., PARRI, L., TANI, M., TESEI, M., VIGNOLI, V. An automatic battery recharge and condition monitoring system for autonomous drones. *IEEE*

- International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT* [interaktyvus]. Roma, Italy, 2020, 1–5 [žiūrėta 2024-04-22]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1109/MetroInd4.0IoT48571.2020.9138314>.
23. PAIN, K. P., MUELLER, M. W. Flying batteries: In-flight battery switching to increase multirotor flight time. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* [interaktyvus]. Paris, France, 2020, 3510–3516 [žiūrėta 2024-04-22]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1109/ICRA40945.2020.9197580>.
 24. WEI-HENG, K. Drone flight controller reliability analysis within EU standardizatio. *Degree Project in School of Electrical Engineering and Computer Science* [interaktyvus]. Sweden: Aerit, 2023 [žiūrėta 2024-05-01]. Prieiga per: <https://kth.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1820239&dswid=4518>.
 25. DJI MATRICE 600 PRO. *Specification* [interaktyvus]. 2023 [žiūrėta 2024-05-06]. Prieiga per internetą: <https://www.dji.com/lt/support/product/matrice600-pro>.
 26. SUN, S., CIOFFI, G., DE VISSER, C., SCARAMUZZA, D. Autonomous quadrotor flight despite rotor failure with onboard vision sensors: Frames vs Events *IEEE Robotics and Automation Letters* [interaktyvus]. Switzerland, 2021, 6(2), 580–587 [žiūrėta 2024-04-30]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1109/LRA.2020.3048875>.
 27. HAQUE, M. R., MUHAMMAD, M., SWARNAKER, D., ARIFUZZAMAN, M. Autonomous quadcopter for product home delivery. *International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology* [interaktyvus]. Dhaka, Bangladesh, 2014, 1–5 [žiūrėta 2024-04-22]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1109/ICEEICT.2014.6919154>.
 28. WIBOWO, A. Assessments of heavy lift UAV quadcopter drone to support COVID-19 vaccine cold chain delivery for indigenous people in remote areas in South East Asia. *Health Systems and Quality Improvements*, edRxiv [interaktyvus]. 2021. Prieiga per: <https://doi.org/10.1101/2021.01.09.21249494>.
 29. JOSE, A., BHUVANENDRAN, C., THOMAS, D., GEORGE, D. E. Farm-copter: Computer vision based precision agriculture. *4th International Conference on Computer, Communication and Signal Processing (ICCCSP)* [interaktyvus]. Chennai, India, 2020, 1–6 [žiūrėta 2024-04-22]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1109/ICCCSP49186.2020.9315239>.
 30. HUSODO, A. Y., JATI, G., ALFIANY, N., JATMIKO, W. Intruder drone localization based on 2D image and area expansion principle for supporting military defence system. *IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (Comnetsat)* [interaktyvus], Makassar, Indonesia [interaktyvus]. 2019, 35–40 [žiūrėta 2024-04-22]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1109/COMNETSAT.2019.8844103>.
 31. JANNOURA, R., BRINKMANN, K., UTEAU, D., BRUNS, C., JOERGENSEN, R. G. Monitoring of crop biomass using true colour aerial photographs taken from a remote controlled hexacopter. *Biosystems Engineering* [interaktyvus]. 2015, 129, 341–351 [žiūrėta 2024-04-30]. ISSN 1537-5110. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.11.007>.
 32. AGHAI, M., MANTEUFELL-ROSS, T. Enhancing direct seeding efforts with unmanned aerial vehicle (UAV) “swarms” and seed technology. *Tree Planters’ Notes* [interaktyvus]. 2020, 63(2) [žiūrėta 2025-05-12] Prieiga per: <https://rng.net/publications/tpn/63-2/enhancing-direct-seeding-efforts-with-unmanned-aerial-vehicle-uav-201cswarms201d-and-seed-technology>.
 33. SEIBER, C., NOWLIN, D., LANDOWSKI, B., TOLENTINO, M. E. Tracking hazardous aerial plumes using IoT-enabled drone swarms. *IEEE 4th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*

- [interaktyvus]. Singapore, 2018, 377–382 [žiūrėta 2024-04-30]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1109/WF-IoT.2018.8355118>.
34. TRISNANTI, S. P., YANTIDEWI, M., DETA, A. U. Carbon monoxide (CO) level measurement using internet of things (IoT) based drone with NodeMCU ESP32. *Protek: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro* [interaktyvus]. Jakarta, 2024, 11(3), 214–219 [žiūrėta 2025-02-28]. Prieiga per: <https://doi.org/10.33387/protk.v11i3.6237>.
 35. SAMAD, A., ALVAREZ FLORES, D., CHOURDAKIS, I., VOGT, U. Concept of using an unmanned aerial vehicle (UAV) for 3D investigation of air quality in the atmosphere – Example of measurements near a roadside. *Novel Developments in Mobile Monitoring of Air Pollution* [interaktyvus]. Atmosphere, 2022, 13, 665 [žiūrėta 2025-03-05]. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/atmos13050663>.
 36. AURELL, J., GULLET, B., HOLDER, A., KIROS, F., MITCHELL, W., WATTS, A., OTTMAR, R. Wildland fire emission sampling at Fishlake National Forest, Utah using an unmanned aircraft system. *Atmospheric Environment* [interaktyvus]. 2021, 247 [žiūrėta 2025-03-05]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118193>.
 37. MONTOYA, J. M., OLSSON, A., MARTENSSON, S. G., CHILO, J. Drone gas concentration measurement system for landfills. *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)* [interaktyvus]. Dubrovnik, Croatia, 2020, 1–5 [žiūrėta 2025-05-12]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1109/I2MTC43012.2020.9129192>.
 38. RAMESH, K. B., SARAN, S. Drone-based aerial surveillance and real-time hazardous gas leakage detection system with power BI dashboard integration for enhanced environmental safety 6th International Conference on Mobile Computing and Sustainable Informatics (ICMCSI) [interaktyvus]. Goathgaun, Nepal, 2025, 541–547 [žiūrėta 2025-05-12]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1109/ICMCSI64620.2025.10883127>.
 39. *Bendra informacija apie dronų klases, žymėjimus, kategorijas* [interaktyvus]. 2024 [žiūrėta 2024-12-10]. Prieiga per: <https://tka.lt/katalogas/bendra-informacija-2/#tab-11>.
 40. *Commission Delegated Regulation (EU) 2019/945 of 12 March 2019 on Unmanned Aircraft Systems and on Third-country Operators of Unmanned Aircraft Systems* [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2024-12-10] Prieiga per: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2019/945/oj.
 41. DEISENROTH, D. C., OHADI, M. Thermal management of high-power density electric motors for electrification of aviation and beyond. *Energies* [interaktyvus]. 2019, 12, 3594 [žiūrėta 2025-05-20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/en12193594>.
 42. ZHANG, J., CAMPBELL, J. F., SWEENEY, II, D. C., HUPMAN, A. C. Energy consumption models for delivery drones: A comparison and assessment. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* [interaktyvus]. 2021, 90, 102668 [žiūrėta 2025-05-20]. ISSN 1361-9209. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102668>.