



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

**Bepiločio orlaivio skrydžio energinės sistemos, naudojant
pjezo elementus, tyrimas**
Baigiamasis magistro projektas

Monika Rimkuvienė
Projekto autorė

Doc. Saulius Japertas
Vadovas

Kaunas, 2023



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Bepiločio orlaivio skrydžio energinės sistemos, naudojant pjezo elementus, tyrimas

Baigiamasis magistro projektas
Aeronautikos inžinerija (6211EX024)

Monika Rimkuvienė

Projekto autorė

Doc. Saulius Japertas

Vadovas

Doc. Rolandas Makaras

Recenzentas

Kaunas, 2023



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Monika Rimkuvienė

Bepiločio orlaivio skrydžio energinės sistemos, naudojant pjezo elementus, tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

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

Monika Rimkuvienė

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kaunas technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Išduota studentui (-ei) – Monikai Rimkuvienei

1. Projekto tema

Bepiločio orlaivio skrydžio energinės sistemos, naudojant pjezo elementus, tyrimas

(Lietuvių kalba)

Research of UAV Flight Energy System with Use of Piezo Elements

(Anglų kalba)

2. Projekto tikslas ir uždaviniai

Tikslas: Ištirti pjezo elementų įtaką orlaivio skrydžio energijos sistemai.

Uždaviniai:

1. Atlikti aviacijoje taikomų alternatyvių atsinaujinančios energijos šaltinių analizę.
2. Atlikti pjezo elementų trūkumų ir privalumų analizę.
3. Pasirinkti bepiločio orlaivio, kurio skrydžio energijos sistemą bus siekiama patobulinti, tipą.
4. Įvertinti, remiantis moksliniais šaltiniais, pasirinktų pjezo elementų tipo įtaką orlaivio aerodinaminėms savybėms.
5. Įvertinti pjezo elementų įtaką orlaivio skrydžio energijos sistemai.

3. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos

Siekiami nustatyti ar pasirinkti tirti pjezo elementai geba daryti reikšmingą įtaką bepiločio orlaivio energijos sistemai. Įvertinti, ar virpesių generuojamos energijos pakaktų įkrauti esančią orlaivio komplektacijoje arba alternatyvią bateriją. Įvertinti, remiantis moksliniais šaltiniais bei stebėjimais, ar pasirinktų tirti pjezo elementai, skrydžio sąlygomis, daro reikšmingą įtaką orlaivio aerodinaminėms savybėms.

4. Papildomi reikalavimai projektui, ataskaitai ir jos priedams

„Netaikoma“

Projekto autorė

Monika Rimkuvienė

(Vardas, Pavardė)

2023-02-14

(Data)

Projekto vadovas

Doc. Saulius Japertas

(Vardas, Pavardė)

2023-02-14

(Data)

Krypties studijų
programų vadovas

Doc. Saulius Japertas

(Vardas, Pavardė)

2023-02-14

(Data)

Rimkuvienė, Monika. Bepiločio orlaivio skrydžio energinės sistemos, naudojant pjezo elementus, tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. Saulius Japertas; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: vibracijos energijos gavyba; energijos gavybos matavimo grandinė; bepiločio orlaivio energijos sistema; PVDF pjezoelektrinė medžiaga.

Kaunas, 2023. 52 p.

Santrauka

Populiariausias alternatyvus, švarios energijos šaltinis bepiločiams orlaiviams yra saulės baterijos. Tuo tarpu vibracinė energija ir jos taikymas gali būti laikomi naujove. Svarbu pastebėti, kad pjezo elementai laikomi „mikro“ energijos generatoriais, taigi, tinkami smulkiosios elektronikos poreikiams tenkinti. Teigiama savybė – tokių lengvumas, o orlaivio energijos sistemoje kiekvienas papildomas gramas yra svarbus. Šiame darbe siekta išsiaiškinti ar polivinilideno fluorido pjezo juostelės, kurios yra lanksčios, atsparios ultravioletinei spinduliuotei ir tinka eksploatuoti dideliame temperatūrų diapazone, tvirtinant jas ant orlaivio sparnų, dėl sukeltos aptekancio oro srauto vibracijos pagamintų tiek energijos, kad galėtų sustiprinti orlaivio energijos sistemą ir, galbūt, prisidėti prie skrydžio trukmės ilginimo.

Tuo tikslu šiame darbe buvo paruošta energijos gavybos matavimo grandinė, susidedanti iš pjezo elementų, diodų tiltelio ir kondensatoriaus, kurio potencialų skirtumas buvo matuojamas. Iš mokslinių šaltinių žinoma, kad efektyviam juostelių darbui sraute reikalingas tam tikras didelis srauto greitis. Taigi, standinis ir praktinis (skrydis) bandymai atlikti prie skirtingų srauto greičių. Sugeneruotos energijos poveikio orlaivio energijos sistemai vertinimas vyko skaičiuojant, ar pjezo elementų sugeneruotos energijos pakaktų įkrauti alternatyvią bateriją.

Standinio ir praktinio bandymų metu įvertinta, kad elementai negeneruoja pakankamai energijos, kad papildoma baterija galėtų būti pakrauta. Elementų grupės, tvirtintos ant orlaivio sparnų veidrodiniu principu, netolygiai vibruoja ir negalima tiksliai įvertinti elementų kiekio, kuris gebėtų teikti pakankamai energijos alternatyviai baterijai maitinti. Tačiau nustatyta, kad skrydžio metu kintant orlaivio atakos kampui ir esant netolygioms kitoms skrydžio sąlygoms sugeneruotas suminis srovės stipris buvo 30 kartų didesnis nei standinio bandymo metu. Elementai nedaro įtakos orlaivio masei (padidino vos apie 34 gramus), o kad kurie darbai (pvz., [44]) antrina teigdami, jog nedidelių matmenų elektrodas nedaro įtakos aerodinaminėms sparno savybėms.

Atsižvelgus į tai kas išdėstyta, galima daryti prielaidą, kad pjezo elementai turi perspektyvą tapti bepiločio orlaivio hibridinės energijos sistemos dalimi. Energijos sistemos tobulinimui svarbu pasirinkti tinkamą orlaivio ir jo energijos sistemų konfigūraciją.

Rimkuvienė, Monika. Research of UAV Flight Energy System with Use of Piezo Elements. Masters's Final Degree Project / supervisor Assoc. Prof. Saulius Japertas; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: vibration energy harvesting; energy harvesting interface circuit; unmanned air vehicle energy system; PVDF piezoelectric material.

Kaunas, 2023. 53 p.

Summary

The most researched, alternative, green energy source for UAV (Unmanned Aerial Vehicles) – Photovoltaic elements. On the other hand, vibration energy harvesting could be seen as a new energy harvesting way. Worth attention is that Piezo elements on general are considered as a low-power energy source for micro devices. Strong point of the elements, considering applications in aviation – low weight. The main question raised, can VEH (vibration energy harvester) based on PVDF (polyvinylidene fluoride) piezoelectric materials, that are flexible, resistant to ultraviolet radiation and high temperatures range, when fixed on UAV wings, harvest enough energy to charge battery and even increase the flight endurance during a flight.

For this reason, energy harvesting circuit, consisting of piezo elements, single-phase bridge rectifiers, capacitors was built. The scientific literature suggested, that for the effective vibration energy harvesting, specific high speed values are required. Therefore, multiple experiments (laboratory conditions and actual flight) were conducted in various speeds. The effect of energy harvested, was evaluated with calculations on weather, theoretically, it could charge a battery in use, or smaller alternative battery.

During experiments mentioned above, it was concluded, that in this case, piezo elements could not harvest enough energy to charge batteries in use. Furthermore, pairs of elements, that were fixed parallel, on the wings of an UAV, gave completely different output energy, therefore cannot be evaluated exact number of elements required, to harvest specific energy amount in need. Nevertheless, during an experimental flight in dynamic flight conditions (varying angle of attack, speed, etc.) overall generated current was 30 times higher than in laboratory conditions. Also, piezo elements did not make any significant difference on UAV's weight (in this case, the weight of built system was 34 grams), to add up, other scientific researches [44] suggested that small parameter piezo elements do not make a significant difference to UAV aerodynamic properties.

Considering all above, it is safe to say that piezo elements – perspective UAV energy source for hybrid energy system. For effective energy harvesting, hybrid energy system with piezo elements ought to be in right configuration as an UAV it self.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Santrumpų ir terminų sąrašas	10
Įvadas.....	11
1. Darbo aktualumas	13
1.1. Tarptautinės civilinės aviacijos organizacijos taršos mažinimo gairės	13
1.2. Federalinės aviacijos administracijos Aviacijos poveikio klimato kaitai mažinimo planas	13
2. Darbo naujumas, tikslas	15
3. Literatūros analizė.....	16
3.1. Perdirbtas kuras ir biokuras	16
3.2. Saulės energija.....	17
3.2.1. Solar Impulse 2.....	17
3.2.2. Bepiločiai orlaiviai, sekantys paros ciklą	19
3.2.3. Mažas bepilotis orlaivis	20
3.3. Vėjo energija	22
3.4. Virpesių generuojama energija	23
3.5. Vandenilis.....	26
4. Pjezo elementai	28
4.1. Veikimo principas	28
4.2. Pjezo elementų privalumai ir trūkumai	29
5. Tyrimo metodas	31
5.1.1. Orlaivio tipas	31
5.1.2. Orlaivio eksploatacinės galimybės	32
5.1.3. Tyrimo priemonės	33
5.1.4. Principinė energijos konvertavimo ir matavimo schema	36
5.1.5. Eksperimentinis bandymas	38
5.1.6. Skrydis.....	41
5.2. Aerodinaminės savybės	43
5.2.1. Energijos kaupimo galimybės	44
6. Darbo apibendrinimas, rezultatų aptarimas	47
Išvados	49
Literatūros sąrašas	50

Lentelių sąrašas

1 lentelė. <i>Solar Impulse 2</i> orlaivio ir skrydžio parametrai	18
2 lentelė. Tiriama orlaivio pagrindiniai parametrai [12]	19
3 lentelė. Tiriama orlaivio parametrai	20
4 lentelė. Saulės elemento C-60 charakteristikos	21
5 lentelė. Ribinės tyrimo sąlygos.....	31
6 lentelė. Pasirinkto orlaivio charakteristikos.....	32
7 lentelė. Pjezo elemento charakteristikos.....	34
8 lentelė. Stendinio bandymo pagrindiniai rezultatai, po 30 minučių.....	41
9 lentelė. Skrydžio rezultatai	43

Paveikslų sąrašas

1 pav. Prognozuojama CO ₂ emisija iki 2050-ųjų [4].....	14
2 pav. Solar Impulse 2	17
3 pav. Sparno grafinis atvaizdavimas (viršuje) ir eksperimento atlikimo standas (apačioje) [18]....	21
4 pav. „Kitekraft“ aitvaras – orlaivis [14]	22
5 pav. Pjezo elemento vėliava [15].....	24
6 pav. Besisukantis pjezo elektros generatorius [22]	24
7 pav. Elemento įtampos priklausomybė nuo laiko ir patiriamas nuovargis [38]	26
8 pav. Karinės paskirties, vandeniliu varomas „Ion Tiger“ bepilotis orlaivis [20]	27
9 pav. Pjezo elemento ir aerodinaminio paviršiaus standas [15].....	28
10 pav. Pjezo elemento virpesių energijos, bifurkacinė diagrama [23].....	29
11 pav. Orlaivis ir pagrindiniai matmenys	31
12 pav. Orlaivio komplektacijoje esanti baterija ir pakrovėjas	32
13 pav. Galios pasiskirstymo diagrama	33
14 pav. Pjezo juostelė (kairėje) ir schema (dešinėje) [24].....	34
15 pav. Pagrindinė naudota įranga [29, 39, 45–47].....	36
16 pav. Trijų pjezo elementų sugeneruota kintama elektros srovė. Arduino IDE programos langas	36
17 pav. Energijos konvertavimo ir matavimo schema	37
18 pav. Matavimo atlikimo eiga.....	37
19 pav. Bandymų schemas „A“ (kairėje) ir „B“ (dešinėje) variantai.....	39
20 pav. Kondensatoriaus potencialų skirtumo kitimas per laiką. „A“ (kairėje) ir „B“ (dešinėje)....	39
21 pav. Kondensatoriaus sukauptas krūvis per laiką. „A“ (kairėje) ir „B“ (dešinėje)	40
22 pav. Srovės stiprio kitimas per laiką. „A“ (kairėje) ir „B“ (dešinėje)	40
23 pav. Elementų grandinė (kairėje) ir orlaivis paruoštas skrydžiui (dešinėje)	41
24 pav. Kondensatoriaus potencialų skirtumo kitimas per laiką. Skrydžio duomenys	42
25 pav. Kondensatoriaus sukauptas krūvis per laiką. Skrydžio duomenys	42
26 pav. Srovės stiprio kitimas per laiką. Skrydžio duomenys.....	42
27 pav. Laidų sancaupa	43

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

NATO – Šiaurės atlanto sutarties organizacija.

Bifurkacijos diagrama - dinaminėms sistemoms rodo galimus ilgo laiko tarpo sistemos kintamuosius kaip bifurkacijos parametro funkciją. Ji paprastai naudojama pavaizduoti stabilius sprendinius nepertraukiama linija ir nestabilius punktyrine linija.

Įvadas

Dvidešimt pirmajame amžiuje bepiločiai orlaiviai (toliau – BO) užima vis didesnę dalį oro erdvės. Didelis dėmesys skiriamas bepiločių sistemų panaudojimui ten, kur reikia greitos informacijos arba žmogui fiziškai prieiti yra pavojinga, bet tikimasi pasiekti norimą efektą. Taikymo sritys yra labai plačios [49]. Civiliniame sektoriuje: fotografavimui iš oro, pesticidų purškimui, krovinių perskraidinimui, ugnies gesinimui, upių vagų stebėjimui, paieškos ir gelbėjimo užduotims (angl. *Search and rescue, SAR*). Kariniame sektoriuje: pasienio zonų stebėjimui, atakoms iš oro, skubių logistinių paketų mūšio rajone gabenimui, laivų vedimui/ lydėjimui ir panašiai. Įvairūs bepiločiai orlaiviai, operuojantys skirtinguose aukščiuose ir nuotoliuose, atlieka specifines funkcijas bei pasižymi būtent jiems būdingomis stiprybėmis bei silpnybėmis. Šiuo metu yra begalės nuotoliniu būdu valdomų orlaivių, klasifikuojamų pagal struktūrą, dydį, skrydžio aukštį, nuotolį, paskirtį. Bendrai pagal dydį BO skirstoma į: labai mažus bepiločius orlaivius (mikro ir nano), mažus (mini), vidutinio dydžio, didelius [1]. Pagal nuotolį ir skrydžio laiką: labai pigūs artimo nuotolio (skrydžio trukmė iki 45 min., maksimalus nuotolis iki 5 km), artimo nuotolio (iki 6 val., iki 50 km), trumpojo nuotolio (iki 12 val., iki 150 km), vidutinio nuotolio (daugiau nei 12 val., iki 650 km), didelio išvermingumo (iki 36 val, iki 300 km, 9 km aukštyje) [1].

BO panaudojimo ir pritaikomumo augimas ateityje – nekvestionuojamas. Tačiau išvermingai sistemai reikalingas didelis galios tankis ir nepertraukiamas energijos tiekimas, kurį dažniausiai užtikrina iškastinio kuro pagrindu veikiantys vidinio degimo varikliai arba, elektriniuose orlaiviuose baterijos. Vidaus degimo varikliai pasižymi didele mase, gabaritais, taip pat yra triukšmingi, kelia vibracijas, palieka šiluminį pėdsaką yra taršūs [49]. Išmetamosios dujos prisideda prie aplinkos taršos, šitnamio efektą sukeliančių dujų (angl. *Green - House – Gas, GHG*) emisijos problemos. Be to, po 2020 metų COVID-19 pandemijos, kai kuriam laikui buvo bemaž visiškai sustabdyta komercinės aviacijos bei kito transporto rūšių pramonė ir judėjimas, pastebėta, kad kone 90 % visos pasaulio taršos sudaro iškastiniu kuru varomos transporto priemonės [7]. Nors elektriniai bei hibridiniai - elektriniai varikliai prisideda prie didelės masės, vibracijų, triukšmo ir taršos mažinimo problemų sprendimo, ypač tobulėjant ličio pagrindo baterijų technologijoms [49], bet to negana. Iškastinio kuro naudojimas turi būti stabdomas ne tik dėl išgaliojusių griežtų tarptautinių tvarkų ar bendrijų standartų. Žaliosios (atsinaujinančios arba iš perdirbtų žaliavų) energijos naudojimas šiuolaikiniame pasaulyje, turi tapti sąmoningo kasdienio vartojimo išraiška. Nauji energijos šaltiniai transporto sektoriuje turi būti atsinaujinantys, ekologiški, patogiai prieinami ir įperkami [7]. Tam reikalingi pažangūs technologiniai sprendimai.

Skirtingu tempu, tačiau netaršios ar mažiau taršios transporto priemonės konceptas darosi aktualus ir civiliniame, ir kariniame transporto sektoriuose. Neaplenkiamas aviacijos sektorius, kur aviaciniai degalai tam tikra prasme yra orlaivio suplanuoto maršruto įgyvendinimo saugumo garantas, tad alternatyvūs energijos tiekimo sprendimai privalo atitikti patikimumo kriterijų.

Tarptautinė civilinės aviacijos organizacija (angl. *International Civil Aviation Organisation, ICAO*) (toliau - ICAO), įkurta Jungtinių tautų dar 1994 metais, išleido „Tarptautinės aviacijos anglies dioksido kompensavimo ir mažinimo schemą“ arba kitaip, išmetamo anglies dvideginio mažinimo iniciatyvą (angl. *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation, CORSIA*) (toliau - CORSIA).

Iniciatyva pasirašyta šalių narių 2016 metais ir pradėta vykdyti 2021 metais [4]. CORSIA vykdoma trimis fazėmis: pilotinė/ bandomoji fazė (2021–2023 m.), pirmoji fazė (2024–2026 m.), antroji fazė (2027–2035 m.) [3]. Pirmosiose dvejose fazėse dalyvavimas savanoriškas (2021–2026 m.). Nuo 2027 metų dalyvavimas bus apibrėžtas 2018 metų ICAO pajamų tonkilometriui suvestinės (2018 RTK) duomenimis [3, 5]. 2023 m. kovo mėnesio duomenimis, CORSIA iniciatyvoje dalyvauja 115 šalių narių, tarp jų ir Lietuva, o nuo 2024 m. sausio mėnesio 1 dienos prisijungs dar keturios šalys [3].

Jungtinių Amerikos valstijų (toliau - JAV) Federalinė aviacijos administracija (angl. *Federal Aviation Administration, FAA*) (toliau - FAA) 2021 metų birželio mėnesį išleido Aviacijos poveikio klimato kaitai mažinimo planą (angl. *2021 Aviation Climate Action Plan*) [4]. Tai aviacijos pramonės emisijos mažinimo planas, apimantis oro uostų infrastruktūrą, senų orlaivių nebenaudojimą, elektrifikaciją, iš perdirbtos biomasės ar maisto atliekų pagamintų degalų (angl. *Sustainable Aviation Fuels, SAF*) (toliau - SAF) naudojimą, mokslinių tyrimų paramą bei tarptautines CO₂ emisijos mažinimo iniciatyvas. Šiuo įsipareigojimu FAA siekia ne tik iki 2050 metų padaryti pokyčius šalyje, bet ir įpareigoti aviacijos srities partnerius visame pasaulyje.

Taigi, šiandien energijos gavybos technologijos plečiasi ir tobulėja. Pažangios medžiagos, struktūros, sistemos perdirba panaudotas medžiagas į elektros energiją, kuri gali būti tiekiamą vartotojui bei sistemai arba kaupiama. Potencialūs šaltiniai yra saulės, vėjo, šiluminė energija, taip pat biomasė, cheminė, vibracinė energijos ir kita [38].

Šio darbo tikslas: ištirti vibracinės energijos (pjezo elementų) įtaką orlaivio skrydžio energijos sistemai.

Uždaviniai:

1. Atlikti aviacijoje taikomų alternatyvių atsinaujinančios energijos šaltinių analizę.
2. Atlikti pjezo elementų trūkumų ir privalumų analizę.
3. Pasirinkti bepiločio orlaivio, kurio skrydžio energijos sistemą bus siekiama patobulinti, tipą.
4. Įvertinti, remiantis moksliniais šaltiniais, pasirinktų pjezo elementų tipo įtaką orlaivio aerodinaminėms savybėms.
5. Įvertinti pjezo elementų įtaką orlaivio skrydžio energijos sistemai.

1. Darbo aktualumas

Naujausios ICAO, FAA, NATO tvarkos apibūdina Europos ir bendrijos šalių tikslus bei pagrindines veiklos, tyrimų kryptis artimiausiais dešimtmečiais. Toliau verta panagrinėti tvarkas, kurios ilgainiui taps eksploataciniais reikalavimais daugeliui skirtingų kategorijų orlaivių.

1.1. Tarptautinės civilinės aviacijos organizacijos taršos mažinimo gairės

Tarptautinės civilinės aviacijos organizacijos „Tarptautinės aviacijos anglies dioksido kompensavimo ir mažinimo schemos“ iniciatyva sudaryta iš trijų fazių. Tai schema, lanksčiai pritaikyta visų šalių interesams, siekiant sumažinti metinę CO₂ emisiją, keičiant įprastus aviacinius degalus, pripažintais ICAO.

Pirmose dvejose fazėse vykdomas CO₂ išmetamo kiekio per metus stebėjimas. Tam naudojami CO₂ emisijos stebėjimo ir raportų teikimo įrankiai (angl. *CO₂ Estimation and Reporting Tool, CERT*), parengti ICAO. Nuo 2021 – 2035 metų, metinė emisija neturi viršyti 50 000 tonų. Esant ne didesnei nei 10 000 tonų emisijai, orlaivio operatorius gali eksploatuoti orlaivį be jokių apribojimų. Viršijus nurodytą emisijos tonų metinę ribą, naudojamos skaičiuoklės, kuriomis remdamasis operatorius ICAO pateikia ekologiškų degalų kiekius, kurie patenkintų orlaivio ir jo skrydžio energijos poreikius, bei atitiktų CORSIA iniciatyvos kriterijus. Tokiu atveju tolesnėje, antroje iniciatyvos fazėje, būtų įtraukta gamybos pramonė, kuri tikslingai gamintų ir tiektų degalus skirtingam orlaivių operatoriui [6]. Tinkamų CORSIA degalų alternatyvos: pagaminti iš maisto produktų ar maisto gamybos atliekų bei sumažinto anglies kiekio aviaciniai degalai [3].

1.2. Federalinės aviacijos administracijos Aviacijos poveikio klimato kaitai mažinimo planas

FAA 2021 metų birželio mėnesį išleistame Aviacijos poveikio klimato kaitai mažinimo plane, nusakomas veiklos tikslas: artima nuliui šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisija (anglies dioksido (CO₂), diazoto oksido (N₂O), metano (CH₄)) iš JAV aviacijos sektoriaus iki 2050 metų [4].

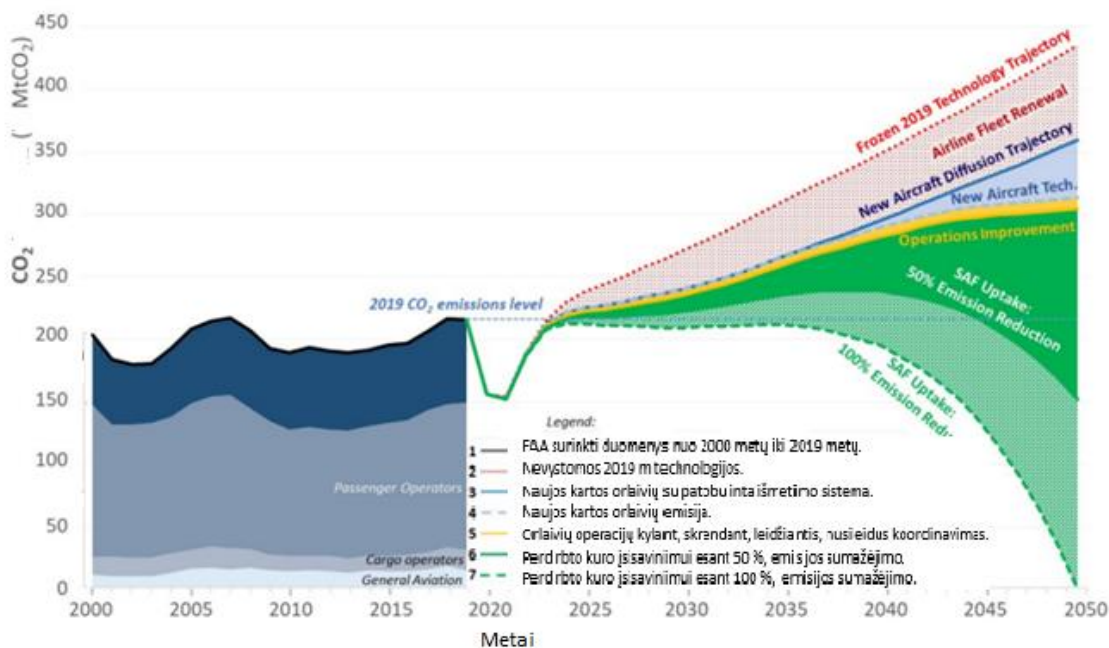
Patikslinama, kad JAV aviacijos sektorius apima [4]:

1. šalies viduje vykstančius skrydžius,
2. tarptautinius skrydžius, t.y. skrydžius tarp dviejų skirtingų ICAO narių,
3. JAV teritorijoje esančius oro uostus.

Plane apžvelgtos dedamosios, kurios daro įtaką CO₂ emisijai, kaip:

1. Naujų technologiškai pažangių orlaivių kūrimas. Nauja mažo fiuzeliažo skersmens orlaivių karta turėtų pasirodyti 2030-aisiais, o didelio skersmens – 2040-aisiais. Didelis dėmesys skiriamas orlaivio varikliui. SAF panaudojimo efektyvumas, būtų technologinės orlaivių kūrimo pažangos rodiklis. Siekiama, kad jau 2030-aisiais degalų panaudojimo efektyvumas (atitinkamai CO₂ emisiją sumažėtų) išaugtų 30 % [4].
2. Orlaivio eksploatacijos efektyvumo gerinimas. Skrydžių valdymo centrų oro erdvės valdymas. Didėjant oro transporto srautams, visų skrydžio fazėms (riedėjimas, kilimas, kruizinis skrydis, tūpimas) reikia teisingų sprendimų, nes kiekvienas orlaivio užlaikymas reiškia perteklinę oro taršą.
3. Perdirbtų degalų naudojimas. Perdirbtas degalai - gaminami iš augalų ir maisto produktų, jo gamybos atliekų. JAV Baltieji rūmai nurodė nuo 2021 metų rugsėjo iki 2030-ųjų metų padidinti

perdirbtų degalų gamybą mažiausiai iki 3 milijardų galonų (apie 11,3 milijardų litrų) per metus [4]. Perdirbti degalai, kurie 100 % pakeistų įprastinius, sumažintų CO₂ emisiją iki nulio (žr. 1 pav.) [4]. Priešingu atveju, kaip matyti šiame paveikslėlyje, neatnaujinant orlaivio technologijų, nei bendrai aviacijos infrastruktūros, operavimo ir valdymo, nenaudojant SAF, anglies dvideginio emisija iki 2050-ųjų, prognozuojama, išaugtų dvigubai.



1 pav. Prognozuojama CO₂ emisija iki 2050-ųjų [4]

Kiti punktai:

4. Lyderystė ir sprendimų priėmimas.
5. Oro uostų prisitaikymas prie žaliajo kurso.
6. Naujų bendrųjų tausojančių tvarkų JAV įgalinimas.

Taigi, didžiosios pasaulio aviacijos bendrijos siekia sumažinti aviacijos kuriamą pasaulio taršos dedamąją. Šis darbas skirtas tirti atsinaujinančio energijos šaltinio įtaką skrydžio energijos sistemai.

2. Darbo naujumas, tikslas

Transporto sektoriuje, žvelgiant į dekarbonizacijos tikslus, siekis yra nulinė anglies dvideginio emisija per artimiausius dešimtmečius. Sprendimai apima elektrines baterijas, vandenilinį kurą, skystą perdirbtą kurą. Atsižvelgiant į tai, kad baterijos yra apribotos savo talpos bei su galia augančiu svoriu, galima teigti, kad įprastos baterijos energijos pakaktų nedidelių greičių bei nedidelio naudingo krovinio orlaivio reikmėms keliems šimtams mylių [4]. Vis dar utopinis modelis – absoliutus švarios energijos pakaitalas komerciniam skrydžiui. Tad reikalingi pažangūs technologiniai sprendimai, didinantys orlaivio skrydžio efektyvumą bei mažinantys taršą (išmetamųjų dujų, triukšmo kiekius, atpažinimo terminiu būdu galimybes ir kita).

Šiuo metu pasaulyje populiarūs ir aktyviai tiriami bei svarstomi įvairūs konceptai, kaip padidinti nedidelio svorio bepiločio orlaivio skrydžio efektyvumą naudojant saulės, vėjo ar virpesių kuriamą energiją.

Šio darbo tikslas – naudojant bepilotį orlaivį, iširti pjezo elementų įtaką, orlaivio skrydžio energijos sistemai.

3. Literatūros analizė

Šiame skyriuje aptariamos iškastinio kuro alternatyvos bei įvairios mokslinių tyrimų įžvalgos. Bus atsižvelgiama į nagrinėjamas tyrimų kryptis, aptariamus iššūkius, išvadas. Atkreipiamas dėmesys į kiekvieno iš aptariamų atsinaujinančių energijos šaltinių ar technologijų pagrindines savybes, taikymo sudėtingumą.

3.1. Perdirbtas kuras ir biokuras

Perdirbtas kuras, remiant tarptautinėms organizacijoms, jau yra komercinės aviacijos rinkoje. Oro linijos „Virgin Atlantic“ 2008 metų vasario mėnesį atliko pirmą pasaulyje skrydį be keleivių, naudojant perdirbtus degalus (toliau – SAF). Tai buvo praktinis tokio energijos šaltinio patikimumo rodiklių testavimas ir įvertinimas. KLM oro linijos 2011 metų birželio 29 d. atliko pirmąjį komercinį skrydį su keleiviais maršrutu Amsterdamas – Paryžius, kurio metu orlaivis buvo varomas įprastinių ir perdirbtų degalų mišiniu, santykiu 50/50 %. Skrydis atliktas gabenant 171 keleivį, orlaiviu Boeing 737-800. SAF tapo plačiau naudojamu 2011 – 2015 metais, kai tokiu pat santykiu maišytu kuru 22 skirtingų aviacijos įmonių buvo atlikta per 2500 komercinių keleivinių skrydžių. Biokurui pagaminti naudotos: braivelio (angl. *jatropha*), kepimo aliejaus, sėjamosios judros (angl. *camelina*) ir cukranendrių žaliavos. Tačiau, 2019 metais SAF poreikis bendroje aviacinių degalų apyvartos statistikoje buvo mažiau nei 1 % [8].

Galima daryti prielaidą, kad tokia maža dalis SAF viso sunaudojamo aviacinių degalų kontekste tapo paskata Monrealyje ICAO būstinėje įvykti pirmajam ICAO inventorizacijos seminarui. Jo metu iškelti 2050 metų tvaraus aviacinių degalų panaudojimo tikslai (seminaras – SAFS2019). Bendra statistika tokia: vidutinė pasaulinė metinė SAF gamyba 2013 – 2015 metų laikotarpiu buvo 0,29 milijonų litro. 2016 – 2018 metų laikotarpiu, metinis gaminamų degalų kiekis padidėjo iki 6,45 milijonų litrų. Stebint tendencijas, numatyta, kad metinė SAF gamybos vertė sieks 6,5 Mt (8 bilijonų litrų) iki 2032 metų [8].

Remiantis 2021 metų duomenimis, paskelbtais darbe [8], tik keturios įmonės – *NESTE*, *Lanzatech*, *World Energy* ir *Gevo* – dabar gamina SAF. Tačiau stebimas susidomėjimas ir investavimas į augmeniją bei įrengimus. Artimiausiu laiku, tai yra iki 2023 metų, Olandijos įmonė „SkyNRG“, kuri specializuojasi aviacinių degalų gamyboje, tikisi gamybą išauginti iki 450 kilo-tonų per metus [8]. Įmonė internetiniame puslapyje [9] pateikia ateities siekius, t.y. atitinkamai jau 900 kilo tonų kuro iki 2027 metų bei platesnį žaliavų spektrą: žaliasis vandenilis bei atsinaujinančios dujos (metano dujos) [9].

Perdirbtų degalų šaltiniai yra agrokultūros ar miškininkystės atliekos, komunalinės atliekos, arba maisto atliekos bei po maisto gamybos atlikę produktai (panaudotas kepimo aliejus, gyvulinės kilmės taukai). Taip pat gamybos žaliavomis yra aliejai (kukurūzų, sojų pupelių, rapsų, palmių) bei augalai: cukranendrės, cukriniai runkeliai, kukurūzų burbuolės, tuopos mediena ir vainikas, įprastame sode augančios žolės – sidabražolė arba drambliažolė (angl. *miscanthus*) ir rykštinė sora (angl. *Switchgrass*) bei palmių riebalų rūgščių distiliatas [6].

Aviacinių degalų gavyba iš dumblių, naudojant dirbtinio intelekto optimizavimo metodus, pateikiama Zafaro Saido ir bendraautorių straipsnyje [7]. Tyrimo metu įeigos (koncentratas) ir išeigos produktai vertinti naudojantis kintamųjų variacijos metodu (angl. *Analysis of Variance, ANOVA*) ir naudotas prognostiniu modeliu *Neuro-Fuzzy* logika (angl. *Adaptive Neuro-fuzzy Inference System, ANFIS*).

Išigos produkto ir degalų koreliacijai nustatyti naudotas MORSM metodas (angl. *Multi-Objective Response Surface Methodology*). Naudojantis geriausių parametrų kriterijumi (angl. *desirability approach*) ir darbinėje degalų temperatūros aplinkoje, išgautas 91 % degalų panašumas. Įvertinta, kad iš dumblių galima išgauti kurą, cheminėmis ir fizikinėmis savybėmis, labai artimą aviaciniams komerciniams orlaiviams naudojamam A-1 tipo degalams, pagal ASTM D1655 protokolą (ASTM D1655: *Standard Specification for Aviation Turbine Fuels*) [7].

Kolkas, išgaunamas SAF savo chemine sudėtimi nėra tolygus įprastam aviaciniam kurui. Taigi, SAF naudojamas orlaiviuose maišant (angl. *Drop-in SAF*) atitinkamu santykiu su įprastiniu kuru tam, kad susidarytų reikalingi parafinų, olefinų ir aromatinių medžiagų kiekiai. Maksimalus pasiektas santykis – 50 % [8].

Tačiau šalia privalumų, SAF turi ir trūkumų. Jų kaina yra didesnė nei iškastinio kuro pagrindo degalų. Ji priklauso nuo žaliavos gavybos (dažniausiai augalija ir atliekos pasižymi nevienodomis savybėmis dėl to kinta ir gamybos procesas) ir gaminimo proceso. Vidutinė SAF iš palmių aliejaus kaina \$3,78 – 5,23/gal, tuo tarpu įprastinių degalų kaina už galoną \$1,89/gal [8]. Taigi, sudėtinga išgavimo technologija leidžia konkuruoti tik kelioms didžiosioms įmonėms visoje rinkoje, o SAF tenkina didžiosios aviacijos degalų poreikius tik iš dalies. Be to, didesnė kaina operatoriams ilgainiui taps neišvengiama dėl privalomų tenkinti ICAO ir FAA reguliacijų.

3.2. Saulės energija

Saulės energijos (šiluminės) panaudojimas, fotovoltiniai elementai, yra pakankamai gerai išvystyta tema. Naujausios idėjos apima ne vien orlaivių skrydžius, tačiau ir išmaniojo miesto konceptą, kurio infrastruktūra leistų miesto erdvėse įkurti orlaivių pakrovimo stoteles ir sukaupiamą saulės energiją panaudoti bepiločiams orlaiviams pakrauti [2]. Ypač BO poreikis išaugo COVID-19 pandemijos metu, kai skraidantys robotai buvo naudoti bekontakčiam maisto, medikamentų, testavimo priemonių gabenimui ir pristatymui. Palyginus su elektriniais automobiliais, emisija mažesnė 35 % [2]. Tam, kad emisija taptų nulinė, svarbu žinoti koks yra skrydžio nuotolis bei energijos suvartojimas tam tikromis sąlygomis, o tai lemia pasirinktas skrydžio maršrutas.

3.2.1. Solar Impulse 2

Išskirtinis vien fotonų energijos varomo orlaivio, pagaminto iš ultra lengvų pažangių medžiagų skrydis, įvyko 2015 metų liepos mėnesį ir truko penkias dienas bei penkias naktis (maršrutas Japonija - Havajai).



2 pav. Solar Impulse 2

Idėja gimė Šveicarijoje ir buvo įvykdyta Bertrandas Piccardas ir André Borschbergas ir jų komandos, orlaiviu „Solar Impulse 2“ [10] (žr. 2 pav.).

Sparnų ilgis kaip Boeing 747 Jumbo Jet, orlaivio masė – įprasto šeimos automobilio, galia – nedidelio motociklo Daugiau orlaivio ir skrydžio parametrų (žr. 1 lentelę). „Solar Impulse 2“ didžiausias tokio mažo svorio orlaivis kada pagamintas.

Lengvą svorį lėmė anglies pluošto (masė 25 g/m² – 3 kartus lengvesnis už popierių) ir korinės struktūros alveolių putos. Šių dviejų sluoksnių kompozitas naudotas viso fiuzeliažo, piloto kabinos ir sparnų su fiuzeliažu jungiamosios dalies gamyboje.

1 lentelė. *Solar Impulse 2* orlaivio ir skrydžio parametrai

Charakteristika, matavimo vienetas	Vertė
Pilotai	1
Sparnų ilgis (m)	72
Orlaivio masė (kg)	2300
Saulės elementų skaičius	17 248
Propelerių su baterijomis skaičius	4
Viso sugeneruota energijos nuo Abu Dabi iki Abu Dabi (kWh)	11 655
Maksimalus skrydžio orlaiviu laikas (pilotas - André Borschbergas)	117 val. 56 min
Maksimalus pasiektas aukštis (ft)	28 000
Vidutinis greitis (km/h)	75
Maksimalus pasiektas žemės greitis (km/h)	216
Degalų sunaudojimas (l)	0

Sparnų korpusas sudarytas iš anglies pluošto plokštelių (angl. *ribs*), sutvirtintų kas puse metro ir apvilkta fotovoltinių elementų sluoksniu. Viso 17 248 monokristalinio siličio celių, kurių kiekviena 135 μm storio, dengia sparnų paviršių. Per vieną saulėtą dieną 269,5 m² fotovoltinių elementų ploto surenkama 340 kWh energijos. Sparnus dengia plona polimero derva, kuri apsaugo elementus nuo drėgmės bei sutvirtina sparnus.

Energijos kaupimo ir saugojimo sistemos taip pat buvo suprojektuotos siekiant kuo mažesnių energijos nuostolių. Naudotos 260 Wh/kg talpos ličio baterijos. Baterijos sumontuotos keturiose variklio nacelėse su įkrovimo slenksčių ir temperatūros valdymo sistema. Bendra jų masė siekia 633 kg, arba kiek daugiau nei ketvirtadalį viso orlaivio svorio. Tam, kad kuo efektyviau išnaudoti energiją, pilotas sekė paros skrydžio ciklą keisdamas skrydžio aukštį (dienos metu orlaivio kruizinis aukštis 8500 m, o tamsiu paros metu - 1500 m).

Motoro vidutinė galia (24 valandų laikotarpyje) 15 arklio galių, o maksimali 70 arklio galių (keturi 17,5 ag bešepetėliniai varikliai). Varikliai montuoti po sparnais ir turi ribotuvą, kuris apriboja 4 m skersmens dviejų ašmenų sraigto sukimosi greitį iki 525 sūk/min. Visos sistemos efektyvumas yra 94%, tai yra energijos vartojimo efektyvumo rekordas. Orlaivis gali išvystyti greitį nuo 36 km/h (20 mazgų) iki 140 km/h (77 mazgų). Jūros lygyje: minimalus greitis 45 km/h (20 mazgų) ir maksimalus greitis 90 km/h (49 mazgų). Didžiausiame aukštyje: nuo 57 km/h (31,5 mazgų) iki 140 km/h (77 mazgų).

Saulės elementų efektyvumas buvo 23%, o variklių – 97%. (Įprasto tokio variklio nuostoliai – iki 70%).

3.2.2. Bepiločiai orlaiviai, sekantys paros ciklą

Airbus 2021 metų spalio 11 dieną atliko naujojo orlaivio koncepto, orientuoto į gynybos pramonę, tęstinį skrydį. Bepilotis „Zephyr“, saulės energija varomas orlaivis – didelio aukščio skrydžio platforma (angl. *High Altitude Platform System, HAPS*) [11]. Orlaivio skrydžio aukštis – stratosfera. Tikslas – parodyti orlaivio galimybes ateities rinkos (karyboje, tai žemės, oro, kosmoso, vandens domenų panaudojimas) poreikiams bei stebėjimo/žvalgybos duomenų rinkimo galimybių demonstravimas. Orlaivio konstrukcijos detalių įmonė nepateikia. Tačiau, informaciniame šaltinyje pateikiamose vizualizacijoje galima matyti, kad išlieka toks pats konstrukcijos principas kaip ir aukščiau aptarto orlaivio – didelis sparnų ilgis ir paviršiaus plotas, kurio reikia fotovoltiniams elementams. Skirtumas - nesant piloto ir jo kabinos, nedidelio skersmens fiuzeliažas. Nepaisant to, orlaivis atliko 36 dienas skrydžio stratosferoje užduočių; tapo vieninteliu specifinėje bepiločių klasėje, vykdęs skrydžius 76 100 pėdų (kiek daugiau nei 23 km) aukštyje; sėkmingai atliko skrydžius JAV oro erdvėje; atliko stebėjimo užduotis ir išbandė specifinę „Zephyr“ stebėjimo sistemą OPAZ (angl. *Observation system for Zephyr*); testavimo ciklo metu, įvykdė viso 2435 valandas skrydžio, bendrai mažuose aukščiuose ir stratosferoje.

Didelio aukščio nedidelės ištvermės (angl. *High Altitude Low Endurance, HALE*) orlaivis tapo platforma ir dar vienam orlaivio energijos sistemos tobulinimo, tyrimui [12]. Tiriamas skrydžio trajektorijos optimizavimo kriterijus, pasitelkus pastiprinto mokymosi (angl. *Reinforcement learning, RL*) metodą (metodas grįstas neuroniniu tinklu ir gebėjimu atlikti sprendimus, apdorojant didelius sudėtingų duomenų kiekius ir įgyvendinti užduotą komandą iki galo) (toliau - RL). Remiantis skrydžio ir aplinkos informacija, neuroninio tinklo valdiklis apskaičiuoja variklio galios, atakos ir posvyrio kampų efektyvius dydžius, pagrįstus energijos maksimizavimu. Buvo lyginamas pastovios būsenos (angl. *Static state, SS*) skrydžio trajektorijos strategija (pastovus greitis, aukštis) valdiklio ir pastiprinto mokymo valdiklio efektyvumas. Orlaivio pagrindiniai parametrai pateikti 2 lentelėje.

2 lentelė. Tiriama orlaivio pagrindiniai parametrai [12]

Parametras, matavimo vnt.	Apibūdinimas	Vertė
m, kg	Bendra orlaivio masė	142
R_{max} , km	Skrydžio trajektorijos maksimalus spindulys	5
S, m ²	Sparnų paviršiaus plotas	28
S_{pv} , m ²	Fotovoltinių elementų paviršiaus plotas	20,4
$E_{b,max}$, kWh	Maksimali baterijos energija	24
P_{acc} , kWh	Avionikos elementų galia	0,4
η_{mot}	Motora efektyvumas	0,9
η_{prop}	Propelerio efektyvumas	0,82
η_{MPPT}	Maksimalaus galios taško sekimo įrenginio efektyvumas	0,95
η_{PV}	Fotovoltinių elementų panelės efektyvumas	0,3
t_a , s	Apskritimonės trajektorijos laiko matas	3,5

RL trajektorijos apribojimai skaičiuojami pagal Markovo sprendimo procesą (angl. *Markov Decision Process, MDP*), kuris apibūdinamas kintamaisiais. Tikslas – rasti geriausią atlygio funkcijos poziciją π , kurį gaunama kintamųjų reikšmių keitimu. Kintant aplinkos sąlygoms, generuojamas vis naujas konkretus siekis. Atlygio funkcija susideda iš trijų momentų, kurių kiekvienas skatina RL valdiklį

siekti abstraktaus tikslo. Prieš patekiant saulei, orlaivis turėtų būti visiškai įkrautas saulės energija, kol vėl galės priimti fotonų energiją. Pasirinkta kritinė baterijos įkrovos vertė 95 % (angl. *State of Charge, SOC*), kuri rodo likusią baterijos įkrovos kiekį, lyginant su pilnai įkrautos baterijos verte. Antras momentas – orlaivis saulės energijos perteklių turėtų paversti gravitacine potencialia energija. Trečias momentas – orlaivis turėtų išsaugoti kiek įmanoma daugiau baterijos energijos po saulėlydžio, kad palaikytų skrydį prieš kitos dienos saulėtekį.

Metodo pagrįstumas buvo įvertintas modeliuojant skrydį 5 km spindulio trajektorija, nuo atskaitos taško. Orlaivis erdvėje judėjo pagal iš anksto suprogramuotą saulės judėjimo trajektorijos modelį. Rezultatai parodė, kad po vieno diena-naktis ciklo, RL valdiklio baterijos energija padidėjo 31 %. Palyginus su pastovios būsenos skrydžio trajektorijos strategija (pastovus greitis, aukštis) valdiklio energija padidėjo tik 17 %.

3.2.3. Mažas bepilotis orlaivis

Svarstant apie mažus (mini) bepiločius orlaivius, energijos sistemos efektyvumas pasiekiamas ne sekant saulės ciklą, tačiau įvertinus tam tikrus eksploatavimo kriterijus ir didinant saulės elementų kiekį. Kaip rašoma Karthiko Reddžio [18] straipsnyje, kuriame mini klasės orlaiviui ant sparnų suprojektuoti fotovoltiniai elementai, atsižvelgiant į orlaivio eksploatavimo geografinę vietovę, saulės energijos surinkimo ir baterijų charakteristikas (baterijų veikimui įtaką daro aplinkos temperatūra), naudingą apkrovą ir orlaivio dizaino parametrus.

3 lentelė. Tiriama orlaivio parametrai

Apibūdinimas	Vertė, matavimo vnt.
Bendra orlaivio masė	2 kg
Naudingoji masė	0,5 kg
Skrydžio aukštis	30-50 m
Vidutinis oro tankis	1,22 kg/m ³
Dangaus giedrumo faktorius	0,9 (1 – giedras dangus)
Pakilimo tako ilgis	Nėra, paleidžiamas ranka

Tyrimo metu siekta ne pailginti atstumą, tačiau padidinti skrydžio laiką nuo minučių iki valandų eilės nekeičiant orlaivio masės. Orlaivis naudojo 3S baterijas (3 LiPo baterijos sujungtos nuosekliai). Lengva konstrukcija iš balsa medienos ir anglies pluošto [18]. Orlaivio pagrindiniai parametrai pateikti 3 lentelėje.

Vertinant 3S akumulatoriaus įkrovimą, reikia pastovaus nuolatinės srovės įkrovimo šaltinio, kurio įtampa apie 12,4 V. Parinkti monokristaliniai fotovoltiniai elementai „Sun power C-60“ (žr. 4 lentelę), kurių vienos celės efektyvumas buvo 22 %, o tai daug našiau nei dauguma silicio pagrindu pagamintų saulės elementų, kurių efektyvumas yra 15 % [18]. Ant sparnų vidurinės dalies tvirtintos dvi juostos po 12 elementų. Sprendimas pagrįstas tuo, kad viena juosta reikalautų didinti sparnų ilgį, tuomet reiktų tvirtesnės struktūros ir išaugtų orlaivio masė. Sparno tvirtinimas yra statmenas fiuzeliažo išilginei ašiai.

Pasirinkus sparno dizainą, aerodinaminis paviršius parinktas naudojantis XFLR5 programine įranga (skrydžio ir aerodinaminių charakteristikų analizė prie žemų Reinoldso skaičių). Atsižvelgta į geriausią keliamosios ir pasipriešinimo jėgų koeficientų santykio reikšmę.

4 lentelė. Saulės elemento C-60 charakteristikos

Apibūdinimas	Vertė, matavimo vnt.
Saulės elemento masė	0,008 kg
Ilgis x plotis	0,125 m x 0,125 m
Vieno saulės elemento plotas	0,0150 m ²
Efektyvumas	22%
Palaikoma įtampa	0,57 V
Palaikomas srovės stipris	5,37 A

Toliau atliekant skaičiavimus, nustatyta reikalinga variklio traukos galia tolygiam skrydžiui palaikyti (15,6 W) pagal (1) formulę, ir tikrasis, didesnis galios poreikis, atsižvelgiant į baterijos efektyvumą ir nuostolius pagal (2) formulę.

$$P_{reikalinga} = T \cdot V = 15,6 \text{ W}; \quad (1)$$

čia T – variklio trauka, W; V – kruizinis greitis m/s.

$$\frac{P_{reikalinga \text{ kruiziniam greičiui}}}{\text{Baterijos-traukos efektyvumas}} + P_{kita} = 40,11 \text{ W}; \quad (2)$$

čia baterijos – traukos efektyvumas – elektronikos, baterijos, propelerio efektyvumų vidurkis; P_{kita} – nuostoliai (2 W).

Fotoelementų generuojama orlaiviui reikalinga galia 631,4 W/m² pagal (3) formulę.

$$\frac{\text{Pilnutinė reikalinga baterijų galia}}{(\text{elemento įkrovimo efektyvumas} \times \text{Fotovoltinių elementų paviršiaus plotas})} = 631,4 \text{ W/m}^2 \quad (3)$$

Toliau vertinama pilnutinė fotovoltinės sistemos energija, nuostoliai pagal (4) formulę ir iki skrydžio – natūrali dienos šviesos šviesa balandžio, gegužės mėnesiais, nes nuo to priklauso elementų įkrovimo efektyvumas.

$$Ex_{pv} = Ex_{elec} + Ex_{therm}; \quad (4)$$

čia Ex_{pv} – pilnutinė fotovoltinio elemento energija; Ex_{elec} – elektrinė energija; Ex_{therm} – šiluminiai nuostoliai.



3 pav. Sparno grafinis atvaizdavimas (viršuje) ir eksperimento atlikimo standas (apačioje) [18]

Bandymo lauko sąlygomis metu (žr. 3 pav.) nustatyta, kad orlaivis tik iš saulės elementų pagamintos energijos gali skristi daugiau nei 6 valandas, priešingai, tik baterijų varomas – 50 minučių [18].

Taigi skrydžio trukmė ir bendrai energijos sistemos ištvermė padidėjo daugiau nei penkiomis valandomis.

Įvardytas ir neigiamas bandymo aspektas - elementai kaista ir prastėja energijos pernešimo našumas. Labai svarbi yra aplinkos temperatūra.

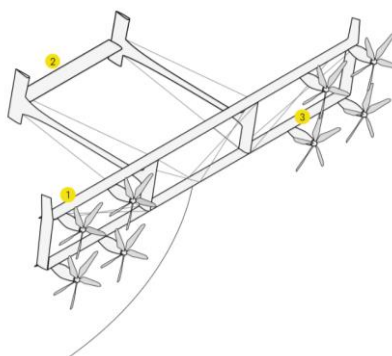
3.3. Vėjo energija

Vėjo energijos gamybos technologija skirstoma į dvi pagrindines kategorijas: vėjo malūnus ir oro srauto aptekos sukeltų vibracijų [15]. Vėjo malūnų atveju, besisukančios mentys verčia vėjo energiją į mechaninę ir tuomet besisukantis velenas, sujungtas su generatoriumi, konvertuoja mechaninę į elektros energiją. Vėjo jėgainės (kaip ir saulės) sukuria kW ar MW eilės galią ir vadinama makro energijos gamybos sistema. Tokia sistema kuria naudą, kai yra didelių matmenų. Tuo tarpu, oro aptekos sistemos gamina energiją dėl aerodinaminio nestabilumo sukeltų reiškinų ir efektas nėra apribotas didelių matmenų. Oro aptekos sukeltų vibracijų atveju, generuojama mW ar μ W eilės galia ir tai yra mikro energijos gamybos šaltinis [40].

Remiantis naujausiais Tarptautinės atsinaujinančios energetikos agentūros duomenimis (angl. *International Renewable Energy Agency, IRENA*), pasauliniai įrengti vėjo energijos gamybos pajėgumai sausumoje ir jūroje per pastaruosius du dešimtmečius išaugo beveik 75 kartus – nuo 7,5 gigavatų (GW) 1997 m. iki maždaug 564 GW 2018 m. Vėjo elektrinių elektros gamyba nuo 2009 m. iki 2013 m. padvigubėjo, o 2016 m. vėjo energija sudarė 16% visos elektros, pagamintos naudojant atsinaujinančius energijos šaltinius [13].

Populiarėjanti vėjo energetika tapo akstinu Miuncheno įmonės „Kitekraft“ vadovams sukurti nedidelį aitvarą - orlaivį [14] (žr. 4 pav.).

Orlaivis gali būti paleidžiamas ir sausumoje, ir virš vandens. Jo paskirtis – generuoti energiją ir pakeisti įprastas vėjo jėgaines. Aitvarai užimtų mažesnę plotą nei jėgainės, nes neužima žemės ploto. Jie laikosi ore - užprogramuoti skristi taip vadinama „aštuoneto“ forma bei turi spiečiaus intelektą [14]. Jų gamybai naudojamas aliuminis, kuris gali būti daug lengviau perdirbtas nei medžiagos, naudojamos statyti įprastas jėgaines (anglies ar stiklo pluoštas).



4 pav. „Kitekraft“ aitvaras – orlaivis [14]

4 pav. žymėjimai 1, 2, 3 žymėjimai:

1. Kontroliniai paviršiai. Viršutinis ir apatinis sparnas turi ne vieną kontrolės paviršių ir išlaiko stabilumą. Sparnų forma stačiakampė. Medžiaga - aliuminis.
2. Aukščio vairas. H formos uodega stabilizuoja orlaivį net į gūsinguose vėjuose.
3. Sutvirtinimo lynai. Nedidelio svorio lynai sutvirtina struktūrą. Rotoriai fiksuoto žingsnio, anglies pluošto mentės, optimizuotos maksimaliai galiai generuoti, sukeltant minimalų triukšmą. Tvirtas bešepetėlis nuolatinės srovės variklis/ generatorius užtikrina patikimą ilgą laiką veikimą. Elektronika užtikrina orlaivio stabilizavimą ir energijos generavimą.
4. Vieno taško tvirtinimas suteikia visišką aitvaro sukimosi valdymo laisvę, kad būtų užtikrintas optimalus energijos surinkimo efektyvumas ir stabilumas. Elektromechaninis diržas susideda iš Kevlaro šerdies, veikiančios kaip mechaninis apkrovos nešiklis, ir elektros kabelių, besisukančių aplink šerdį. Skrydžio metu, rotorių sugeneruota energija kabeliu siunčiama į antžeminę stotį, kruana baterijas.

Aitvaro – orlaivio energijos sistemos efektyvumas priklauso nuo vėjo stiprumo, tačiau patiriama nemažai energijos nuostolių, siekiant stabilizuoti orlaivį ir laikytis spiečiuje, ypač audringu oru. Tai specifinės paskirties, atsinaujinančios energijos jėgainė – orlaivis.

3.4. Virpesių generuojama energija

Virpesių (vibracinė) energija yra priskiriama prie atsinaujinančių energijos išteklių [15]. Pjezoelektrinė medžiaga, tai tokia medžiaga, kuri generuoja elektros energiją, kai yra paveikiama kuria nors kryptimi mechanškai. Medžiagų pavyzdžiai: berlinitas, kaulas, baltymai, kristalai (kvarcas), aliuminio nitridas, švino cirkonatas-titanatas ar aplinkai nešvarūs, bešviniai nanogeneratoriai su cinko nanovamzdeliais [16, 40]. Medžiagos tipai: kristalai, polimerai, keramika ir plonos juostelės [40].

Pjezoelektrikai turi du darbo mechanizmus: teigiamą (angl. *Positive Piezoelectric Effect*) ir atvirkštinį (angl. *Inverse Piezoelectric Effect*). Teigiamas mechanizmas – kai mechaninis poveikis sugeneruoja elektrinį impulsą, o atvirkštinis – kai paveikus tokią medžiagą elektros srove, ji keičia savo formą (maksimaliai 4 % deformavimosi) [16].

Bendrai vibracinė energija pagal pjezo elementų elgseną sraute gali būti skirstoma į penkias dideles grupes [15]: virpėjimo (angl. *flutter*), sukurių sukelta vibracija (angl. *vortex – induced – vibration*, VIV), šuoliavimo (angl. *galloping*), žadinančią šuoliavimo (angl. *wake – galloping*) ir hibridinės srovės (angl. *hybrid – type flow – induced*) vibracijas.

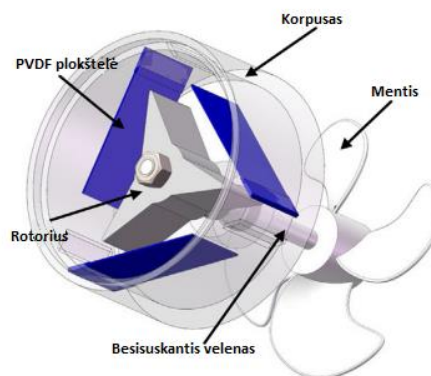
Pjezo elementai taikomi labai plačiame spektre, nuo industrinių sistemų, medicinos įrangos iki buitinių prietaisų, vaikų žaislų [37]. Pavyzdžiui karyboje, naudojami hidrofonuose, įvairiuose sonaruose, balistinei ir seisminei veiklai fiksuoti, transporto sferoje transporto priemonių žymėjimui, eismo reguliavimui ir kita [37]. Oro srauto aptekos sukeltai vibracinei, energijai konvertuoti, tyrėjai [15] siūlo skirtingas struktūras, pavyzdžiui, pjezo elemento vėliavą (žr. 5 pav.). Pasitelkiant bepiločius orlaivius, skrydžio metu orlaivį aptekantis srautas ar sparnų patiriamos vibracijos, kurios deformuoja mikroelektronikos (MEMS) elementą, gali gaminti elektros energiją. Pjezo elektrinis efektas tyrėjus domina dėl priemonių nedidelės kainos, didelio galios tankio savybių, paprastumo ir nedidelių elektromechanikos elementų matmenų [15]. Tačiau, dėl siauros darbo juostos ir nedidelės galios generavimo, vis dar atliekami tyrimai, o taikymas nepaplitęs.



5 pav. Pjezo elemento vėliava [15]

Yutingo Dai'o [17] aprašo tyrimą, kurio metu tirtas sparno modelis, ir vėjo gūsių sukurtos elastingos deformacijos, kitaip – efektyvi fluido - struktūros interakcija. Virpesių energija verčiama į elektros per makro - skaidulų kompozitinį jutiklį (MFC 8507-P1 laminatą) (angl. *Macro-Fiber Composite, MFC*). Duomenims apdoroti naudoti skaičiuojamosios fluidų dinamikos (angl. *Computational Fluid Dynamics, CFD*) ir skaičiuojamosios struktūros dinamikos (angl. *Computational Structure Dynamics, CSD*) metodai. Duomenys lyginti ir su gautais aerodinaminiam vamzdyje. Vertinta šių parametrų įtaka energijos generavimui: oro srauto kitimo dažnio, amplitudės, laisvo srauto ir pasiektų virpesių modų. Tyrimo išvadose pateikiama, kad energijos generavimui įtaką daro ir orlaivio konstrukcija. Apverstos „V“ formos (angl. *swept back*) konstrukcija padidina energijos generavimąsi artimose orlaivio smukos kampui (angl. *stall*) skrydžio sąlygose. Taip pat teigiama, kad energijos gavybai tinka tiek gūsių, tiek laisvo laminarinio srauto sukeltos vibracijos. Daugiau energijos išgaunama didinant orlaivio skrydžio greitį. Tačiau, reikia elgtis atsargiai prie kritinio virpesių dažnio (angl. *Critical Flutter Speed*) greičio, nes jį pasiekus kūnas gali deformuotis (pirmoji deformacijos moda), bet tuo pačiu, priartėjus prie kūno savitojo vibracinio dažnio, išgaunama maksimali energija.

Darbe [22] atlikti tyrimai vėjo energijos vertimui elektros energija pjezo plokštei veikiant ne sraute, o integravus ją į rotorius sistemą (žr. 6 pav.). Besisukantis rotorius per veleną perduoda mechaninę sukimosi energiją sukimo elementui (angl. *turntable*), kuris kontaktuoja su polivinilideno fluoro plokštelėmis (toliau - PVDF), taip sistema generuoja daugiau energijos nei nesant plokštelių.



6 pav. Besisukantis pjezo elektros generatorius [22]

PVDF yra labai nereaktyvus termoplastinis fluoropolimeras, vinilideno fluoro polimeras. Jis taip pat žinomas kaip KYNAR® (Arkema) arba HYLAR® (Solvay Solexis). Termoplastinis polimeras

naudojamas ten, kur reikia ypatingo medžiagų skaidrumo (neužterštumo), stiprumo, atsparumo skystiems cheminiams reagentams, dideliems temperatūrų skirtumams, taip pat, degant - nedidelis dūmingumas.

Virpesiai gali būti išgaunami pasikartojančiu mechaniniu poveikiu į jutiklį arba laisvame sraute (aerodinamiame vamzdyje arba lauko sąlygomis) arba sukeliant konkretaus dažnio, periodo virpesius mechanine laboratorine įranga. Toliau verta kiek detaliau apžvelgti, kokie yra gaunami PVDF pjezo elementų energijos kiekiai ir panaudojimo galimybes skirtingomis sąlygomis.

Virpesių energiją orlaivio skrydžio metu galima išgauti tvirtinant pjezo juosteles ant judančios virpesių paveikiamos standžios konstrukcijos, pavyzdžiui sparno. Dunnmon et al. [15] 2011 metais atliko tyrimą, kuriame aprašo aptekant 27 m/s greičio oro srautui sugeneravę 2,5 mW galios virpesių energijos, maksimali varža 10 kΩ, energijos efektyvumas 17 %.

Ekaperimento, atlikto darbe [38], metu vibracinei energijai generuoti naudotos pjezo juostelės, kurių paviršius ir katodas su anodu dengti sidabrinu rašalu tam, kad padidinti laidumą. Juostelių generatorius pakrovė 22 V ir 0,022 F talpos ultrakondensatorių iki 5 V per 24 min. Įkrovimo galia, apskaičiuojama pagal (5) formulę:

$$W_C = \frac{C \cdot \Delta U^2}{2}; \quad (5)$$

čia C – kondensatoriaus talpa, F; U – įtampa, V.

Taip pat nustatyta, kad palyginus vienos pjezo juostelės ir penkių juostelių generuojamą įtampą, pastaruoju atveju maksimali įtampa buvo 10,4 V, o išėjimo galia buvo 0,304 mW, tai yra įkrovimo galia 11,69 kartų didesnė negu vienos juostelės atveju. Pasak autorių, toks energijos generatorius puikiai tiktų nedidelių galių reikalaujančiai elektronikai. Kaip pavyzdys, sukauptos elektros energijos pakako įžiebtį 60 mW šviesos diodo lemputę (angl. *Light Emitting Diode, LED*), kuri išsilaikė įžiebta apie 5 sekundes arba išlaikyti įjungtą Bluetooth technologijos 3 mW galios radijo dažnio (angl. *radio frequency, RF*) įtaisą 37 sekundes, skaičiavimų pavyzdys pagal (6) formulę [38]:

$$\left[\begin{array}{l} W'_C = \frac{C \cdot \Delta U^2}{2} = 0,5 \cdot 0,022 \cdot (5 - 1,8)^2 J = 0,11264 J; \\ \Delta t_{RF_min} = \frac{w'_C}{P_{max}} = \frac{0,11264 J}{3 mW} \approx 37 s; \end{array} \right. \quad (6)$$

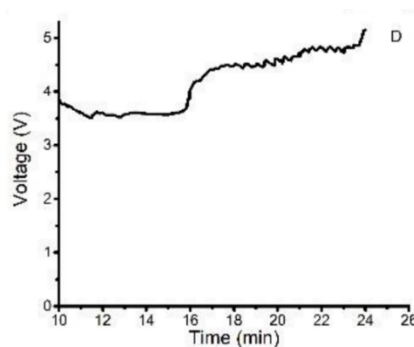
Laiko apskaičiavimui padaryta prielaida, kad mikro elektronikos darbo galios P svyruoja nuo 0,3 – 3 mW, kai perduoda 10 bitų/s.

Palyginus su naudojama pjezo keramika, PVDF medžiagos charakterizuojamos [38] geru dažnių prisitaikymu, lankstumu, mažu elektriniu impedansu. Taigi, tai patvarios medžiagos, tinkančios virpesių energijos generavimui. Tačiau, PVDF medžiagos turi žemą išėjimo galią ir energijos konversijos efektyvumą, prastas adheazines savybes, o tai daro įtaką dielektrinėms ir pjezoelektrinėms energijos generavimo savybėms. PVDF gembė – vėjo aptekos vibracinės energijos generatorius – kurio matmenys $79,86 \times 19,67 \times 0,12 \text{ mm}^3$ prie 4~14 m/s srauto greičio sukūrė maksimalią 18,6 V įtampą ir 1,3 μW galią.

Tam, kad pamatyti vėliavos tipo pjezo elemento elgseną sraute, atliktas eksperimentinis tyrimas aerodinamiame vamzdyje, kurio autoriai [44] ne tik atliko skaičiavimus, bet ir nubrėžė bifurkacijos

diagramą remiantis Limituotų oscilacijų ciklu (virpesių amplitudė ir dažnis yra nekintami dydžiai). Tirta pjezo elemento, tvirtinamo ant sparno, elgsena sraute. Tačiau sparnas nenaudotas, nes padaryta prielaida, jog nedidelių matmenų elektrodas nedaro įtakos aerodinaminėms sparno savybėms. Bandymo sąlygos: atakos kampas 20° ; srauto greitis 15 m/s; varža 98 k Ω . Sugeneruota galia 7 μ W.

Be to, pjezo elementai vibracijų metu patiria nuovargį, kurio metu įkrovimo sparta beveik nekinta. Po kurio laiko, vidiniai energijos generavimo mechanizmai toliau aktyviai generuoja krūvį [38] (žr. 7 pav.). Tai tarsi uždelstas veikimas, kurį verta atpažinti.



7 pav. Elemento įtampos priklausomybė nuo laiko ir patiriamas nuovargis [38]

Nepaisant to, kad pjezo elementai generuoja mikro eilės galios kiekius, jų atsparumas aplinkos sąlygoms, nedidelė masė ir matmenys, paprastas tvirtinimas bei nežymi įtaka sparno aerodinaminėms savybėms, daro juos patrauklius tolesniems tyrimams ir naudingiausio taikymo būdo paieškoms.

3.5. Vandenilis

Naudojant vandenilį kaip aviacinį kūrą, būtų pašalinta dauguma šiltnamio efektą sukeliančių dujų, įskaitant visus anglies pagrindu išmetamus teršalus, suodžius ir sieros oksidus [19]. Pagrindiniai šalutiniai vandenilio produktai degimo procese yra vandens garai (H_2O) ir azoto oksidai (NO_x). Azoto oksidai susiję su smogo, rūgštinio lietaus, kietųjų dalelių bei ozono sluoksnio susidarymu. Tačiau, degant vandeniliui, išmetamų NO_x dalelių kiekis yra labai mažas, palyginti su tuo, kuris išsiskiria degant žibalui [19]. Tokiam pat energijos kiekiui tiekti, reikalingas keturis kartus didesnis LH_2 tūris nei žibalo [19]. Tačiau nepaisant to, vandeniliu varomi orlaiviai yra efektyvesni ir jų eksploatacijos sąnaudos mažesnės nei orlaivių, varomų žibalu [19]. Paprastai naudojant vandenilį kaip reaktyvinį kūrą, reikia keisti ir orlaivio, ir variklių konstrukciją. Skystas vandenilis (LH_2) turi būti laikomas labai žemoje temperatūroje, todėl tam tinkamos tik hermetiškos talpyklose, o ne sparnai, kurie yra riboto tūrio LH_2 talpinti ir kurių negalima tinkamai izoluoti. Atsižvelgiant į didžiulius vandenilio degalų bakų tūrio reikalavimus, orlaivio konstrukciją reikia modifikuoti konstruojant sunkesnę fiuzeliažą, kuriame ir talpinami kompozitiniai slėgiui atsparūs bakai.

Atsisakant bakų, kitas variantas yra vandeniliniai kuro elementai. Pagrindinis kuro elementų privalumas – leidžia pailginti BO misijos laiką ir atstumą, užtikrina tylų ir patikimą veikimą, sumažina ličio akumuliatoriaus įkrovimo ir transportavimo kliūtis [19]. Protonų mainų membranos kuro elementai, taip pat žinomi kaip polimerinių elektrolitų membraniniai kuro elementai (angl. *Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC*) (toliau – PEMFC), kurie puikiai tinka BO taikymui, gali veikti žemoje temperatūroje (30 - 100 $^\circ$ C) [20].

2005 m. „AeroVironment“ sukūrė pirmąjį kuro elementų BO [19]. Lėktuvas, kurio sparnų ilgis 15 m, buvo varomas PEMFC varomąja sistema ir sugebėjo skristi daugiau nei vieną valandą naudodamas tik suskystintą vandenilį. Po to 2006 m. Bradley ir kt. [19] suprojektavo ir išbandė kuro elementais varomą BO naudojant suslėgtą vandenilį. Orlaivis, kurio bendra masė 16,4 kg ir sparnų ilgis 6,58 m, buvo varomas 500 W PEMFC. Galima teigti, kad įvykdytas progresas bepiločių orlaivių skrydžio trukmė ilginime: nuo „AeroVironment“ 25 minučių trukmės skrydžio 2003 metais labai mažu (mikro) BO „Hornet“ iki 48 valandų trukmės skrydžio 2013 metais, žvalgybiniu kariniu dronu „Ion Tiger“ [20] (žr. 8 pav.).



8 pav. Karinės paskirties, vandeniliu varomas „Ion Tiger“ bepilotis orlaivis [20]

Vis dėl to tokia technologija turi ir trūkumų. Vandenilio panauda kaip kuro reikalauja sudėtingų cheminių reakcijų bei kuro elementų formavimo, tinkamų laikymo sąlygų hermetiškoje žemų temperatūrų aplinkoje bei pakankamai stiprios orlaivio fiuzeliažo konstrukcijos bakams išlaikyti. Didelių orlaivių atveju taip pat turėtų būti keičiama ir oro uostų infrastruktūra, saugumo reikalavimai, pačių orlaivių dizainas.

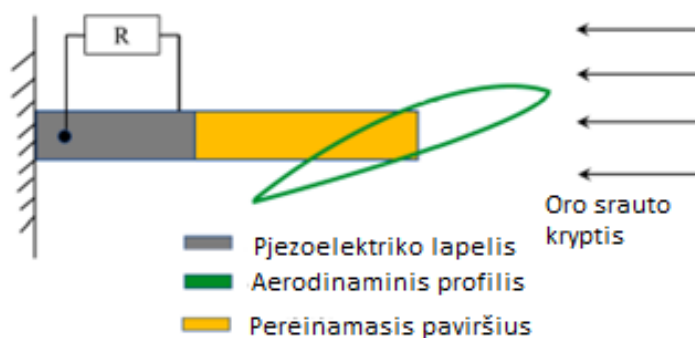
4. Pjezo elementai

Tyrimo pagrindinė priemonė – pjezo element juostelės. Šiame aprašomas jų veikimo principas ir pagrindinės savybės veikiant oro sraute. Išskiriami privalumai ir trūkumai, įvardyti mokslinėje literatūroje.

4.1. Veikimo principas

Pjezo elemento deformacijos metu sugeneruojama kintama elektros srovė ir tai – savaime besigeneruojančios energijos tipas, kuris atsiranda, kai susideda aerodinaminės ir struktūrinės savybės. Kai aeroplastiškumo savybės tampa didesnėmis už oro klampos jėgą, kūnas vibruoja vis didėjančia amplitude. Paprastai pjezo elementams pakanka mechaninės jėgos impulso tam, kad būtų sukeltas elektrinis atsakas.

Virpesių energijos generavimo pavyzdinis standas (žr. 9 pav.) ir vertimo elektros energija schema galėtų susidėti iš standaus aerodinaminio profilio, vyriais sujungto su laisvuoju sijos galu. Oro srautui veikiant į profilį, atsiradę virpesiai deformuoja pjezo elementą, kuris kuria elektrinius impulsus [15].



9 pav. Pjezo elemento ir aerodinaminio paviršiaus standas [15]

Judėjimą sraute apibrėžia Bifurkacijos diagrama (angl. *Bifurcation diagram*). Virpėjimo (angl. *flutter*) judesys susijęs su lenkimo ir įstrižine kūno vibracijomis (angl. *Bending and torsional vibration*) dideliuose oro srauto greičiuose.

Nelinijinė dinaminė sistema apibūdinama pagal (7) išraišką:

$$\dot{x}(t) = f(x(t); \alpha); \quad (7)$$

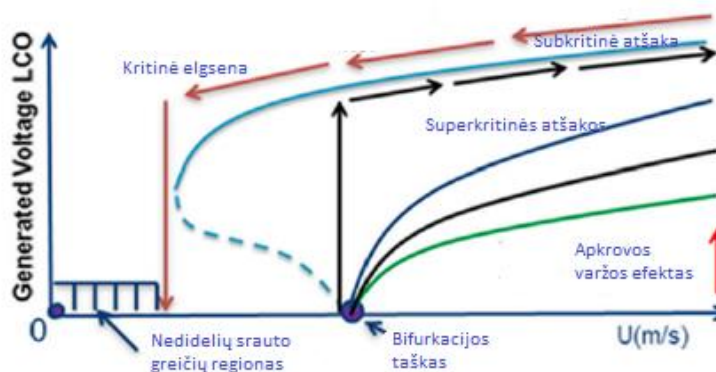
čia \dot{x} - vibracijų generuojamo parametro išvestinė laike; α - bifurkacijos parametras x ašyje.

Bifurkacinėje diagramoje \dot{x} atitinka generuojamą įtampą, o α atitinka srauto greitį.

Didėjant srauto greičiams, vibracijos amplitudė didėja atitinkamai, o tai sukelia stipresnes mechanines deformacijas bei generuojamos energijos kiekį nepaisant to, kad didėja grėsmė struktūros destrukcijai.

10 pav. pateikta diagrama rodo, kad energija pradeda generuoti pasiekus tam tikrą greičio vertę – srauto perėjimo iš laminarinio į turbulentinį srautą. Tai – Bifurkacinis taškas. Superkritinės atšakos – stabilus virpesių (įtampos) generavimas, didinant oro srauto greitį. Subkritinė atšaka, jos punktyrinė

dalis – nestabilus virpesių generavimas, galintis sutapti su sparno vibracijos savuoju dažniu ir sukelti sparno destrukciją. Subkritinė atšaka vėliau pereina į stabilų virpesių generavimo etapą.



10 pav. Pjezo elemento virpesių energijos, bifurkacinė diagrama [23]

Pjezo elemento elgsena aerodinaminio paviršiaus ir fluido terpės sistemoje aprašoma formule (8) [33].

Apibendrinant galima pasakyti, kad elementui sraute virpant per silpnai energija efektyviai negeneruojama. Virpant per stipriai – virpesių dažniams sutapus su orlaivio savituoju dažniu, orlaivis gali patirti deformaciją.

$$C_p \dot{V} + \frac{V}{R} + \theta \dot{h} = 0; \quad (8)$$

čia C_p – pjezoelektrinio sluoksnio talpa; \dot{V} – skersinės įtampos išvestinė pagal laiką; V – skersinė įtampa; R – varža; θ – elektromechaninio efektyvumo dydis; \dot{h} – deformacija pagal laiką normalės kryptimi.

Taigi, svarbu bendra elementų talpa, deformacijos koeficientai ir grandinės varža bei įtampa.

4.2. Pjezo elementų privalumai ir trūkumai

Šiame poskyryje bus įvertinami pagrindiniai mokslinėje literatūroje įvardijami pjezo elementų privalumai bei trūkumai. Taip pat bus atliekamas palyginimas su kitais populiariais elementų tipais – fotovoltiniais, bei analizuojamos jų eksploataavimo galimybės ir pritaikomumas.

Lyginant su gerai išsirtais saulės elementais, pjezo elementai neturi perkaitimo galimybės (mažesnę įtaką aplinkos sąlygos). Taip pat veikimui nereikalauja saulės šviesos kiekio (atsižvelgiant į vidutinio klimato zoną Lietuvoje). Pjezo elementai gali būti integruoti į orlaivio sraigto sistemą arba plokštelės (juostelės) gali būti tvirtinamos ant fiksuoto sparno/ orlaivio korpuso. Tvirtinimo būdas nesudėtingas ir gali būti modifikuojamas priklausomai nuo sparno formos (turbulencijos susidarymo vietos). Taip pat pasižymi greitu elektriniu atsaku [35] ir yra lengvi.

Būtent PVDF pjezo juostelės, mikrometrų storio elementai, kurie bus naudojami tyrimo metu, išsiskiria tokiais privalumais [37]:

- Platus darbinio dažnio spektras – 0,001 Hz iki 10^9 Hz.

- Platus dinaminis spektras – 10^{-8} iki 10^6 psi.
- Žemas akustinis impedansas – artimas vandens, žmogaus kūno audiniams.
- Didelis elastinis suderinamumas.
- Didelė išėjimo įtampa – 10 kartų didesnė nei pjezo keramikos.
- Didelis dielektrinis stipris – atlaiko $75 \text{ V}/\mu\text{m}$ elektrinio lauko poveikį, kai tuo tarpu keramika depoliarizuojasi.
- Didelis mechaninis atsparumas – nuo 10^9 iki 10^{10} N/m^2
- Stabilumas ir atsparumas drėgmei ($< 0,02 \%$ drėgmės sugertis), daugumai cheminių reagentų, oksidantų ir intensyviai ultravioletinei, branduolinei spinduliuotei.
- Gali būti tvirtinami/ klijuojami ant paviršių paprastais klijais.

Neigiamas aspektas tas, kad PVDF pjezo elementai vertinami kaip pakankamai silpnas elektromechaninis energijos perdavėjas, palyginus su keraminiais pjezo aktyviais ypač rezonanso ar mažo veikimo dažnio sąlygomis [37]. Pažeidus polimerinę juostelės apsaugą, padidėja jautrumas elektromagnetinei spinduliuotei. Turi maksimalią ribotą veikimo ir sandėliavimo temperatūrą $135 \text{ }^\circ\text{C}$, o $100 \text{ }^\circ\text{C}$ – nerekomenduotina. Taip pat, generuojama energija tinkama tik nedidelių galių smulkiajai elektronikai [38]. Pasižymi didesne, nei fotovoltiniai elementai, kaina [35]. Pastebėtina, kad skrydžiui reikalingi dideli greičiai arba didelės galios impulsai, o tai veda į ribotą pritaikomumą.

5. Tyrimo metodas

Aukščiau atlikta literatūros analizė apie atsinaujinančius energijos šaltinius, taikomus aviacijoje – saulės energiją, vandenilį, vėjo energiją, perdirbtą kurį, parodė, kad dažnu atveju tos technologijos reikalauja sudėtingų cheminių reakcijų atlikimo bei chemijos reagentų žinių. Taip pat reikalauja specifinių talpyklų parengimo arba netgi infrastruktūros ir įrenginių. Tuo tarpu pjezo elementus gali įsigyti kiekvienas tyrėjas ir jų panaudojimas nereikalauja gilių specifinių žinių ar specialių naudojimo sąlygų. Taigi, šio tyrimo metu pasirinkta tirti, kokią įtaką bepiločio orlaivio energijos sistemai daro atsinaujinančios – virpesių - energijos šaltinis bepiločio orlaivio energijos sistemai.

Iškeliamos ribinės sąlygos tyrimui atlikti (žr. 5 lentelė).

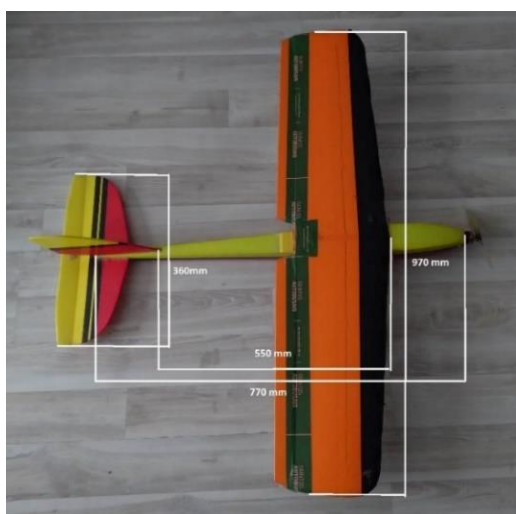
5 lentelė. Ribinės tyrimo sąlygos

Orlaivis	Mažų bepiločių orlaivių (angl. <i>small</i>) kategorija, skrydis iki 45 minučių. Fiksuoto, neišlenkto sparno. Maitinimo šaltinis: LiPo 1300 mAh baterija.
Pjezo elementai	Pailgi, tinkami tvirtinti ant sparno, su integruotais laidais. Tinkami eksploatuoti lauko sąlygomis. Kaina – iki 20 Eur už vnt.
Tyrimo sąlygos	Standinis ir praktinis bandymai. Vertinami eksperimentiniai duomenys.

Pjezo juostelėms pasirinkti, atlikta skirtingų gamintojų produktų apžvalga internetiniuose šaltiniuose ir pjezo elementų savybių vertinimas mokslinėje literatūroje [38, 40]. Galutinė elementų paieška susiaurinta pasirinkus polimerinių (PVDF) pjezo juostelių tipą. Tokios juostelės pasižymi mažesniu svoriu ir bent 3 kartus mažesniu elektrodo storiu, nei keramikinės. Taip pat, tinkamos polimero lankstumas savybės (mažas Jungo modulis), palyginus su keramika ar kompozitinėmis medžiagomis, o tai reikalinga siekiant generuoti virpesių energiją, juostelėms sraute veikiant netvarkingai be pavojaus sulūžti. Kriterijai, nulėmę konkrečių polimerinių juostelių įsigyjimą – kaina ir prieinamumas (tiekėjo sandėlio vieta Europos sąjungoje).

5.1.1. Orlaivio tipas

Pasirenkamas fiksuoto sparno orlaivis. Radijo bangomis valdomas lietuvių gamintojo modelis, vadinamas „putinukas“ (žr. 11 pav.).



11 pav. Orlaivis ir pagrindiniai matmenys

Orlaivio sparnas simetrinis, neišlenktas, tad tinka efektyviam virpesių energijos generavimui [33]. Tačiau sparno struktūrinė medžiaga nepasižymi plastiškumu.

Papildomos charakteristikos, kaip sparnų paviršiaus plotas, stabilizatoriaus paviršiaus plotas, proilgis, apskaičiuojamos naudojantis klasikinėmis sparno formulėmis sparno konstrukcijai skaičiuoti [25] ir pateikiami lentelėje (žr. 6 lentelė).

6 lentelė. Pasirinkto orlaivio charakteristikos

Apibūdinimas	Vertė, matavimo vnt.
Sparnų ilgis, <i>b</i>	970 mm
Proilgis, <i>AR</i>	4,7
Šakninė styga, galinė styga, <i>c</i>	230 mm, 180 mm.
Masė	apie 300 g
Liemens ilgis, orlaivio ilgis	550 mm, 770 mm
Propeleris	Dviejų menčių, plastikinis, galia 7-9 V, skersmuo 180 mm
Variklis	EMAX CF2805 2840kv 29g bešepetėlinis variklis [26]
Baterija	1300 mAh. Li-Po 7,4 V
Uodegos ilgis	360 mm
Udegos šakninė styga, galinė styga	145 mm, 60 mm.
Skrydžio laikas	iki 30 min.

Sparnų plotas tinkamas ant jo tvirtinti pjezo juosteles. Fiuzeliažas turi vietos, kurioje galima dėti bateriją ar papildomas elektronikos detales, skersmuo $d=55$ mm. Fiuzeliažo tuščioji ertmė uždengiama sparno plokštuma.

5.1.2. Orlaivio eksploatacinės galimybės

Esamos komplektacijos ir parametrų orlaivio maksimalus skrydžio laikas, atlikus skrydžius anksčiau - 30 minučių.



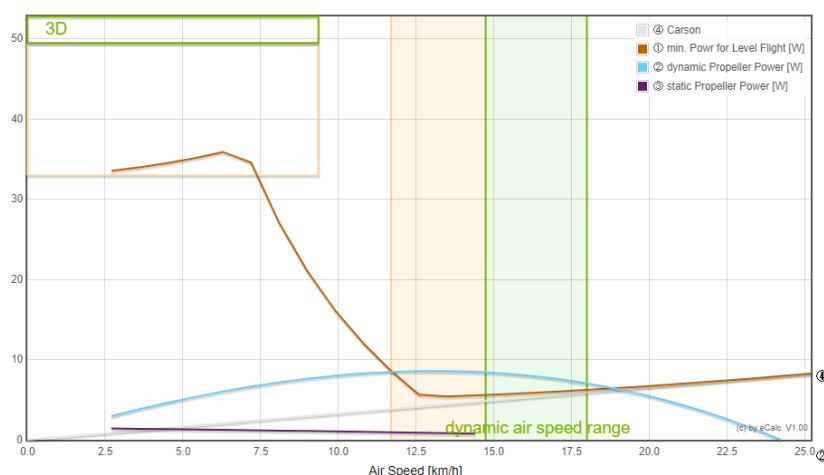
12 pav. Orlaivio komplektacijoje esanti baterija ir pakrovėjas

Naudojama baterija „Turnigy“ 2S 20C [42]: talpa 1300 mAh, įtampa 7,4 V, Matmenys 73 x 35 x 17 mm.

Baterijos pakrovėjas „Turnigy“ 2S/3S [43]. Identifikuoja baterijos visiško iškrovimo būseną prie 4,18 V - 4,20 V. Pilnai įkrautos baterijos statusas tarp celių varijuoja per mažiau nei 20 mV.

Panaudojus internete prieinamą orlaivio parametrų skaičiavimo sistemą „E-calc“ [32], įvertinamos orlaivio skrydžio charakteristikos bei apskaičiuoti greičiai (prie normalių aplinkos sąlygų, 25 °C). Gautis vertės: kruizinis greitis 24 km/val, maksimalus greitis 18 km/val, aukštėjimo greitis 17 km/val, smukos greitis 15-19 km/val.

Aptarti dydžiai ir papildoma informacija, atvaizduojami galios pasiskirstymo diagramoje (žr. 13 pav.). Čia x ašis – greitis (km/val.), o y ašyje galia (W). Ruda linija rodo kokios galios reikia norint orlaivį palaikyti pastoviam aukštyje. Rudos ir pilkos susikirtimo vieta – maksimalus greitis. Violetinė rodo propelerio statinę galią (pakankama išlaikyti orlaivį tolygiame skrydyje), tačiau orlaivis nėra pajėgus atlikti 3D skrydžio sąlygų (aerobatinės skrydžio charakteristikos). Šviesiai mėlyna reiškia dinaminę propelerio galią. Jos susikirtimas su ruda - smukos greičio reikšmė.



13 pav. Galios pasiskirstymo diagrama

Programa esamos konfigūracijos orlaiviui ir žinomo maksimalaus skrydžio laikui, orlaivio energijos sistemai tobulinti rekomenduoja didesnės nei esama talpos bateriją, tačiau likę parametrai tenkina skrydžio laiko poreikį. Programoje įvedami tokie duomenis, kaip skrydžio greitis, trukmė (rasta grafike), orlaivio masė, sparnų ilgis ir paviršiaus plotas, orlaivio tipas, baterijos charakteristikos, aplinkos sąlygos (oro temperatūra ir pakilimas nuo jūros lygio), variklio bazinė informacija (kiekis, menčių kiekis ir skersmuo).

„E-calc“ rekomendacijose ne tik didesnės talpos bateriją, tačiau ir nurodoma, kad elektronika padidins orlaivio svorį, apie 50 gramų. Svarstant apie skrydžio energijos sistemos ištvėmės didinimą, įvestas 15 minučių ilgesnis maksimalus skrydžio laikas ir konceptualiai orlaivio masė su visa elektronika ir didesne baterija padidėtų beveik 150 gramų. Taigi, įprastu atveju skrydžio laiko pailginimas tiesiogiai siejasi su svorio padidėjimu. Toliau norint didinti skrydžio greitį ir kt., reiktų keisti orlaivio dizainą ir, atitinkamai, keistųsi orlaivio aerodinaminės savybės.

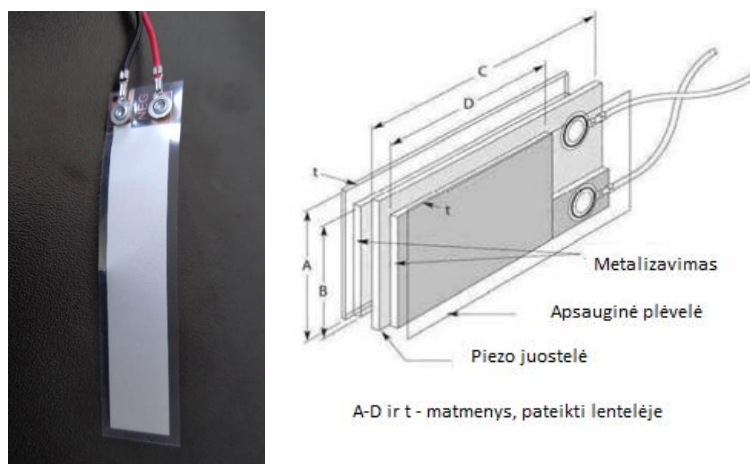
Toliau nagrinėjamas konceptas, kaip stipriai nekeičiant esamų orlaivio charakteristikų, galima patobulinti skrydžio energijos sistemą, naudojant pjezo elementus.

5.1.3. Tyrimo priemonės

Toliau bus pateikiamos tyrimui naudotos priemonės, jų energijos konvertavimo ir matavimo schema, duomenų rinkimo bei analizės metodai.

5.1.3.1. Pjezo juostelės

Pagal iškeltas ribines sąlygas, rastas tinkamiausias pjezo juostelių variantas, „TE Conectivity“ gamintojo elementai [24] – ploni pjezo vibracijų sensoriai (žr. 14 pav.). Taip pat gali būti taikomi trumpalaikiams mechaniniams poveikiams fiksuoti, kaip: tiesioginio kontakto sensorius, epizodinio kontakto sensorius (fiksuoja laiką), įvykių skaičiavimas.



14 pav. Pjezo juostelė (kairėje) ir schema (dešinėje) [24]

Elektrodo juostelės – sidabrinio rašalo (angl. *silver ink*) pagrindu, pasižymi geru elektriniu ir šiluminiu laidumu bei atsparumu didelei įtampa.

Elektrodai izoliuoti PVDF polimeriniame apvalkale. Pritvirtinti kniedėmis laidai suteikia galimybę iškart taikyti elementą bendroje elektronikos sistemoje. Elementų gamintojas pateikia charakteristikas (žr. 7 lentelė).

7 lentelė. Pjezo elemento charakteristikos

Apibūdinimas, matavimo vnt.	Vertė
Storis, μm plokštelės; elektrodo	40; 28;
Plotis, mm Plokštelės; elektrodo	16; 12
Ilgis, mm Plokštelės; Elektrodo	73; 62
Talpa, nF	2,78
Masė, g	8,198
Impedansas, $M\Omega$	Minimalus 1, rekomenduojamas 10 ir daugiau
Generuojama įtampa, V	Nuo 10^{-3} iki 100
Laikymo temperatūra, $^{\circ}\text{C}$	Nuo - 40 iki + 70
Eksploatavimo temperatūra, $^{\circ}\text{C}$	Nuo 0 iki 70

Juostelių kainos nuo 18,86 Eur už vieneta. Projekte naudojama 4 vienetai juostelių.

Keletą žodžių apie pjezo charakteristikas [33]. Puasono koeficiento reikšmė apibūdina medžiagos gebėjimą deformuotis skirtingomis kryptimis. Kuo didesnis Jungo modulis, tuo stipresnis medžiagos atsparumas deformacijai. Kuo didesnis santykinis laidumas, tuo didesnė tikimybė surišti krūvį, tuo didesnė vidinė talpa ir elementas lėčiau išsikrauna. Įtampos konstanta, tai pjezo medžiagos sugeneruoto elektrinio lauko kiekis, gauto mechaninio streso atžvilgiu. Dielektriniai nuostoliai apibūdinami kaip srovės lūžio greitis poliarizacijos metu. Taip pat tankis, tūrio varža, mechaninis atsparumas atitinkamai apibūdina lengvumą, gyvybingumą, varžą.

Pjezo juostelės būtų tvirtinamos ant orlaivio sparnų, valdančiųjų plokštumų. Tokiu būdu būtų užtikrintas pastovus juostelės judėjimas didžiausio srauto intensyvumo vietoje. Tvirtinant ant sparno $\frac{3}{4}$ atstumu nuo sparno priekinės kraštinės yra tikimybė, kad nors tai ir turbulentinio srauto teorinis pradžio taškas, tačiau plonos juostelės gali priglusti prie paviršiaus ir judėjimas nebus užtikrintas. Be to daroma prielaida, kad tvirtinimas ant valdančiųjų plokštumų nepadarys didelės įtakos aerodinamikai, nes sparno kraštas užtikrintai yra turbulentinio srauto veikimo vieta.

5.1.3.2. Elektronika, baterija

Tam, kad būtų galima matuoti pjezo elemento kuriamos įtampos vertę, tiek standinio ir praktinio (skrydžio) bandymų metu tiek elemento testavimo ar baterijos įkrovimo lygmens nustatymo užduotims, naudotos šios priemonės ir programinė įranga:

- Arduino Uno mikrovaldiklis [28], naudojamas nuskaityti įeigos duomenis iš sensoriaus (pjezo elemento) ir perduoti apdorojamus duomenis į LCD ekraną ar kitą duomenų kaupimo/apdorojimo programą.
- I2C LCD ekrano valdiklis [27] – valdiklis, leidžiantis naudojantis mažiau sąsajų, naudotis ir valdyti LCD ekraną (įrangos testavimui).
- Skystų kristalų indikatorius 16x2 be apšvietimo [30] – skirtas grandinės testavimo, įrenginio bandymo metu atvaizduoti reikalingus duomenis (įrangos testavimui).
- Rezistorius – 2 vienetai, 1 MΩ 5 % 0,25 W [31] (įrangos testavimui).
- Microsoft excel *Data Stream* papildinys – apdoroti duomenims tiesiai iš mikrovaldiklio Arduino (įrangos testavimui).
- ARDUINO IDE aplinka – programuoti mikrovaldiklį (įrangos testavimui).
- Srovės sensoriaus ACS712 modulis [39] – modulis, matuojantis išeinančios srovės stiprį. Skirtas kintamos ir nuolatinės srovės stipriui nustatyti. Matavimo ribos nuo -20 iki +20 A. Konvertavimo santykis konkrečiam modeliui 100 mV per A (įrangos testavimui) (žr. 15 pav.).
- Maža, alternatyvi energijos sistemos baterija - įtampa 3,7 V, talpa 150 mAh, matmenys: 26 x 12 x 7 mm. Išsikrovimo riba 3 V. Įkrovimo riba 4,2 V. Įkrovimo slenkstis 0,01 C. Maksimali krovimo srovė 0,15 A [41] (teoriniam įkrovimo galimybių vertinimui).

Atlikus įrangos testavimą ir įvertinus elementų kuriamos galios bei srovės tipo charakteristikas ir komponentų poreikį, išskirta ir žemiau išvardinta pagrindinė reikalinga įranga (žr. 15 pav.).

- Oro ir aplinkos rankinis matuoklis Kestrel 4000 [29]. Matuojama: vėjo greitis (maksimalus ir vidutinis), aplinkos drėgnumas. Duomenys bus renkami standinio bandymo metu, o praktinio skrydžio metu, naudojami artimiausios meteorologinės stoties duomenys.
- FLUKE multimetras – kondensatoriaus įtampai matuoti. Matavimo paklaida nuolatinei įtampai 0,3 % + 1 [47].

- Kondensatoriai – 2 vienetai, 22 μF 160 V ir 22 μF 100 V [45].



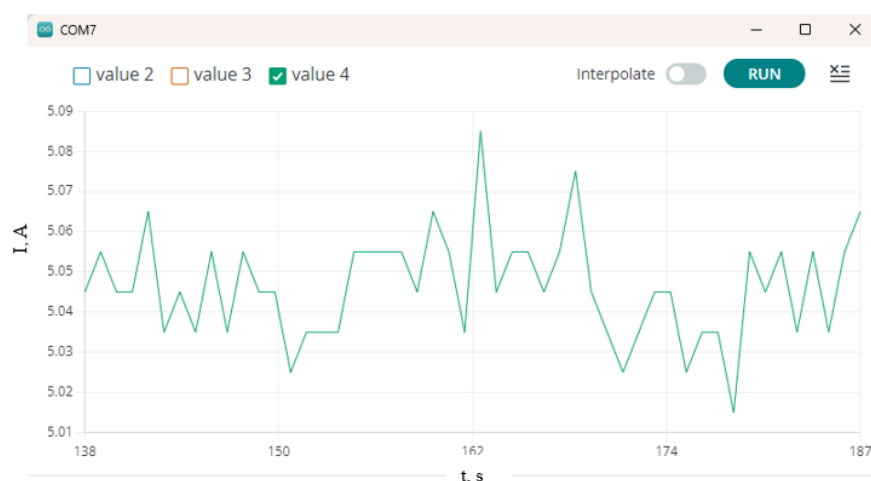
15 pav. Pagrindinė naudota įranga [29, 39, 45–47]

- Diodų tilteliai - vienos fazės, maksimali įtampa 400 V, apkrovos srovė 1 A, maksimali srovė 50 A [46].
- Litavimo įranga ir priedai.

5.1.4. Principinė energijos konvertavimo ir matavimo schema

Naudojant ACS712 modulį, bei Arduino IDE aplinką, gauti duomenys apie kintamos srovės stiprio dydį. Pjezo elementai generuoja kintamą elektros srovę.

Vykdamas įrangos testavimą, sujungus nuosekliai tris pjezo elementus, dirbtinai ventiliatoriaus sukurtame 3,92 m/s sraute, fiksuotas kintamos srovės stipris apie 5 mA. Kintamos srovės elgsena atvaizduoda Arduino IDE aplinkoje sugeneruotame grafike (žr. 16 pav.).

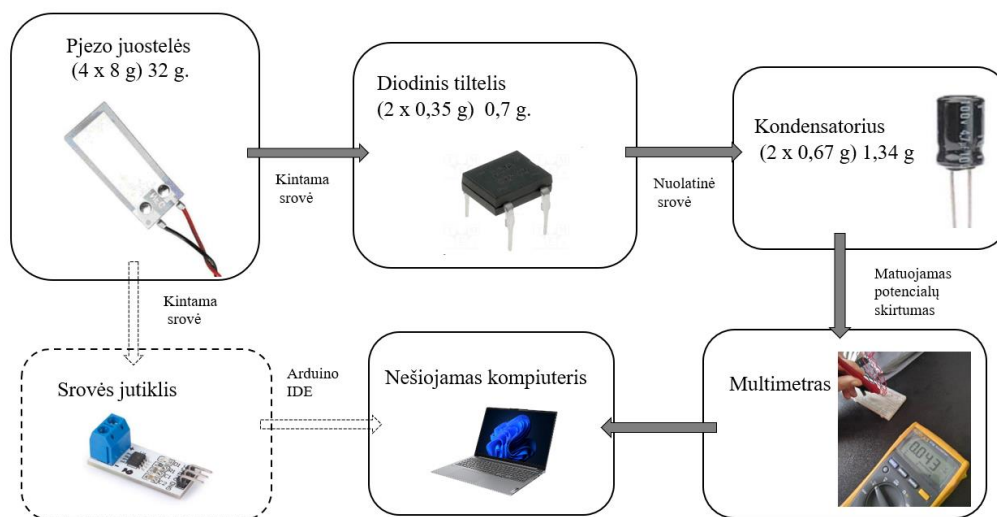


16 pav. Trijų pjezo elementų sugeneruota kintama elektros srovė. Arduino IDE programos langas

Kintamoji elektros srovė tam, kad būtų gaunami ir apdorojami matavimams tinkami duomenys, turi būti paversta į nuolatinę. Tam reikia papildomos įrangos (elektronikos modulių) arba sudėtingesnių

Arduino IDE programinės įrangos kodų bei papildomų duomenų, pavyzdžiui virpesių dažnio. Kadangi negalima įvertinti virpesių dažnio, nes jis yra nepastovus ir nenuspėjamas, naudojamo prietaiso pagalba dėl trūkstamų duomenų įtampa nenustatoma. Neturint įtampos reikšmių, negalima konvertuoti kintamos į nuolatinę srovę.

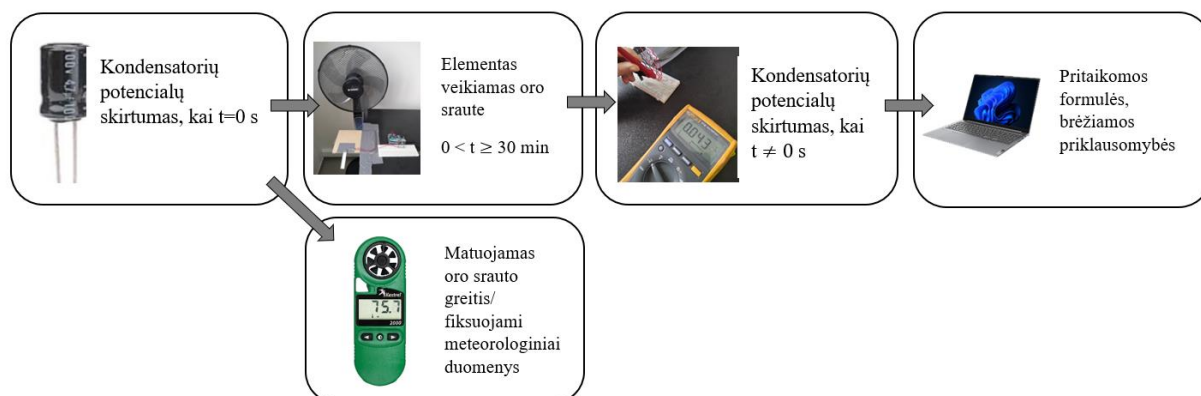
Tam tikrų duomenų (virpesių dažnio) šiame darbe negalima nustatyti, tad pasirinkta kitokia matavimo metodika. Energijos konvertavimo ir matavimo schemoje naudojamas diodinis tiltelis, skirtas kintamai srovei išlyginti bei kondensatorius, kurį elementai virpant sraute įkraus (žr. 17 pav.).



17 pav. Energijos konvertavimo ir matavimo schema

Eksperimentinis bandymas bus atliekamas prie skirtingų srauto greičių, kuriuos geba sugeneruoti ventiliatorius (vidutinis 3,92 m/s ir 4,3 m/s). Testuojamas vieno, dviejų, keturių elementų gebėjimas įkrauti kondensatorių matuojant kondensatoriaus sukauptą įtampą, kas dvi minutes iki 30 minučių. Praktinio bandymo metu parinkti tokie laiko intervalai matavimams atlikti: 5, 15, 20, 30 minučių. Aplinkos sąlygos fiksuojamos iš artimiausios meteorologinės stoties (www.windy.com).

Eksperimentinio bandymo ir praktinio skrydžio metu, matavimai ir duomenų analizė bus vykdomi tokia pačia matavimo atlikimo eiga (žr. 18 pav.).



18 pav. Matavimo atlikimo eiga

Visų pirma, fiksuojama kondensatoriaus potencialų skirtumo vertė iki srauto poveikio pradžios, nes vykdant pakartotinius bandymus kondensatorius gali būti pilnai neišsikrovęs. Toliau, elementai veikiami ventiliatoriaus arba oro srauto lauko sąlygomis, vibruoja sraute. Po tam tikro laiko matuojamas kondensatoriaus potencialų skirtumas. Duomenys fiksuojami, pritaikomos formulės ir brėžiamos įtampos, krūvio, srovės stiprio priklausomybės nuo laiko.

Po kiekvieno laiko tarpo įtampos matuokliu bus patikrinamas kondensatoriaus įkrovimo statusas bei brėžiama priklausomybė. Tuomet, naudojantis formulėmis, nustatomas srovės stipris. Naudojamų elementų dviejų grandinių apytikslė masė 34,04 g (4 vnt. elementų su laidais, 2 vnt. diodinių tiltelių, 2 vnt. kondensatorių).

Skaičiavimams atlikti naudojamos (5), (9), (10) formulės: kondensatoriaus talpos formulė:

$$C=Q/U; \quad (9)$$

čia C – kondensatoriaus talpa (F); Q – sukauptas krūvis (C); U – potencialų skirtumas (V).

Apskaičiavus krūvį Q , apskaičiuojame srovės stiprį I .

$$I=dQ/dt; \quad (10)$$

čia I – srovės stipris (A); t – laikas, kurį kraunamas kondensatorius (s).

Įkrovimo galia apskaičiuojame pagal (5) formulę.

Atsižvelgiant į sugeneruotos srovės dydį, galią, bus galima įvertinti ar srovė geba pakrauti pagrindinę orlaivį maitinančią bateriją bei mažesnę, alternatyviam naudojimui skirtą bateriją.

Baterijų įkrovimo slenkstis (*angl. Cut off range*) apskaičiuojamas [51]:

$$I=C \cdot Er; \quad (11)$$

čia I - įkrovimo/iškrovimo srovė; C reitingas – nurodo srovės stiprį, kai baterija įkraunama arba iškraunama; Er – energijos reitingas / talpa, ampervalandėmis (Ah).

Kai žinoma, kad pagrindinės baterijos: maksimalus įkrovimas $2C$ (20 A per 30 minučių); iškrovimas: $20C$ (200 A per 3 minutes).

Įkrovimas $I=2 \cdot 1,3=3,6$ A, o iškrovimas $I=20 \cdot 1,3=36$ A.

Alternatyvios papildomos baterijos: įkrovimas $0,5 C$ (5 A per dvi valandas), slenkstis $0,01 C$ (1 A per 100 valandų). Iškrovimas $0,2 C$ (2 A per 5 valandas).

Įkrovimas $I=0,5 \cdot 0,15=0,075$ A, slenkstis $I=0,01 \cdot 0,15=1,5$ mA, o iškrovimas $I=0,2 \cdot 0,15=0,03$ A

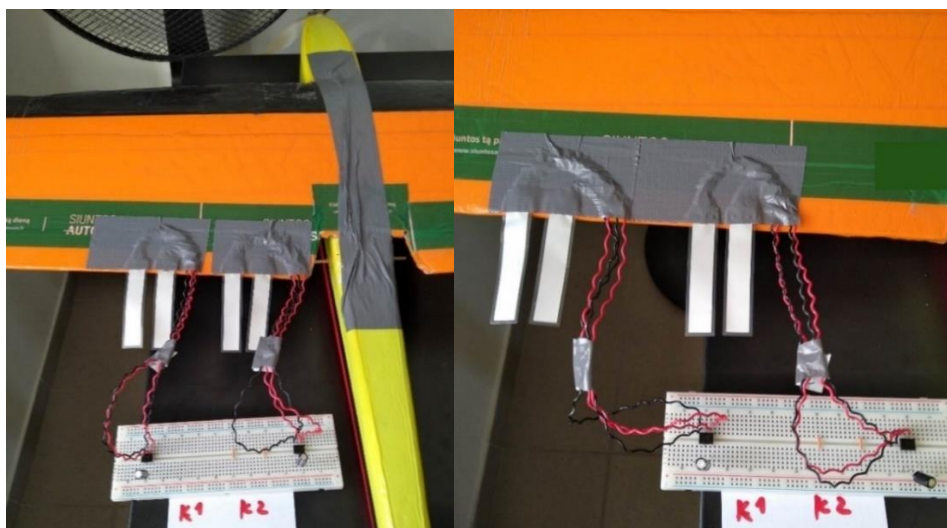
5.1.5. Eksperimentinis bandymas

Srautui sukurti pasitelktas paprastas ventiliatorius. Tinklelio plačiausia vieta 0,01 m, tad srautas nėra ištiesinamas, kaip aerodinaminiam vamzdyje.

Visų pirma, siekta išsiaiškinti, prie kokio srauto greičio, turimomis sąlygomis, elementai veikia efektyviausiai. Testavimas atliktas keičiant vienos juostelės padėtį. Išsiaiškinta, kad viena juostelė negeba generuoti pakankamai energijos, kad kondensatorius būtų įkraunamas. Atsižvelgta į

mažiausią išsikrovimo spartą skirtingais atvejais ir į vizualius duomenis - vizualiai pastebimas juostelės virpesių susilpnėjimas (tikėtina, juostelės virpesių dažnis tampa artimu sparno savajam virpesių dažniui). Toliau nuspręsta atlikti bandymus su ne mažiau nei dvejomis juostelėmis.

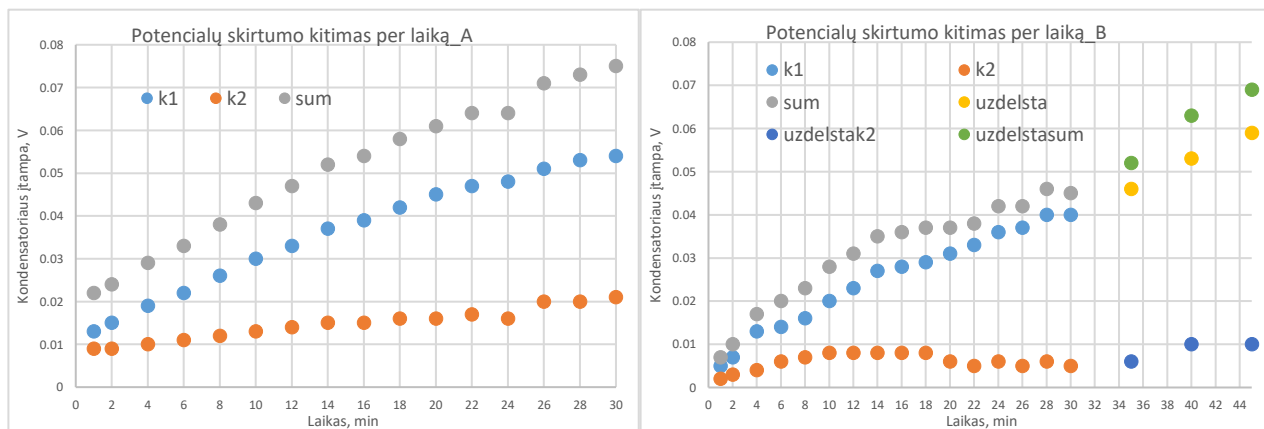
Eksperimentinis bandymas atliekamas sujungus pjezo elementus poromis, dvejomis tvirtinimo schemoms „A“ (juostelių išdėstymas arti fiuzeliažo) ir „B“ (juostelių išdėstymas sparno viduryje) (žr. 19 pav.). Scemoje yra dvi elementų grupės po dvi juosteles, kur kairiau esanti grupė atitinka k1 poziciją, o dešiniau - k2. Naudojami du kondensatoriai (po vieną elementų grupei). Duomenys analizuojami atskirai (k1, k2) ir jų suma.



19 pav. Bandymų schemas „A“ (kairėje) ir „B“ (dešinėje) variantai

Schemas „A“ atveju, vidutinis srauto greitis apie 3,92 m/s. Schema „B“ – viena elementų grupė perkelta arčiau sparno krašto, taip pat padidintas vidutinis srauto greitis iki 4,3 m/s. Pažymėtina, kad padidinus srauto greitį, viena elementų grupė išliko toje pat pozicijoje. Tai sudaro galimybę patikrinti kokią įtaką energijos generavimui daro elementų vieta ant sparno ir padidintas srauto greitis.

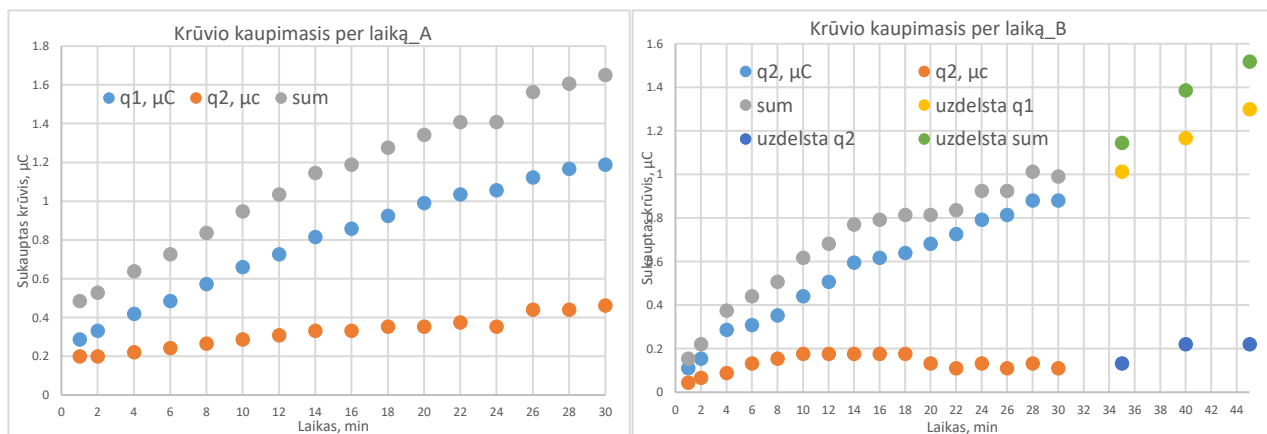
Taigi, atlikus veiksmus pagal numatytą matavimo atlikimo eigą, pateikiamos potencialų skirtumo, krūvio, srovės stiprio priklausomybės nuo laiko (žr. 20 pav.).



20 pav. Kondensatoriaus potencialų skirtumo kitimas per laiką. „A“ (kairėje) ir „B“ (dešinėje)

Per 30 minučių „A” schemos, keturi elementai sukūrė 75 mV įtampą; antruoju atveju, per 30 minučių, krūvio kaupimas nusistovėjo ir sugeneruota 45 mV. Po to, kai srautas sustabdomas, įtampa didėja palaipsniui (nuo 45 mV, 30 – ają minutę iki 69 mV, 45 – ają minutę).

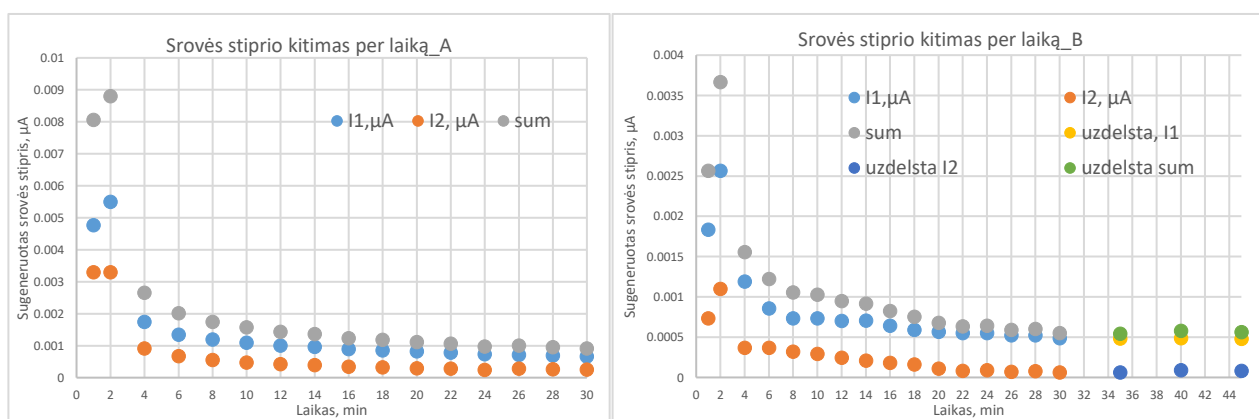
Toliau, apskaičiuojamas krūvio kaupimas. Per 30 minučių „A” atveju, krūvio kaupimas nusistovėjo ir sukaupta 1,65 μC (žr. 21 pav.).



21 pav. Kondensatoriaus sukauptas krūvis per laiką. „A” (kairėje) ir „B” (dešinėje)

„B” atveju, per 30 minučių, krūvio kaupimas nusistovėjo ir sukaupta 0,99 μC . Matoma, kad elementų grupės skirtingai veikia sraute. Po to, kai srautas sustabdomas, krūvis didėja palaipsniui (nuo 0,99 μC 30 – ają minutę iki 1,5 μC 45 – ają minutę).

Tuo tarpu suminis srovės stipris „A” schemeje, matavimo pradžioje siekė 0,008 μA , o matavimo pabaigoje 0,0009 μA (žr. 22 pav.). Srovės kitimo sparta per dvi minutes, bandymo metu k1 grupės 0,007 μA , o k2 grupės 0,003 μA .



22 pav. Srovės stiprio kitimas per laiką. „A” (kairėje) ir „B” (dešinėje)

„B” schemeje, matavimo pradžioje suminis srovės stipris siekė 0,0027 μA , o matavimo pabaigoje 0,0006 μA . Vidutinė srovės kitimo sparta per dvi minutes, bandymo metu k1 elementų grupės 0,005 μA , o k2 grupės 0,0007 μA .

Krovimo galia „A” atveju $W=0,0000111 \mu\text{W}$, o „B” atveju $W=0,0000075 \mu\text{W}$.

Duomenys palyginimui, pateikti lentelėje (žr. 8 lentelė). Tamsesne pilka spalva pažymėtos vertės elementų grupės, kurios pozicija, skirtingais atvejais, išliko fiziškai nepakeista.

8 lentelė. Stendinio bandymo pagrindiniai rezultatai, po 30 minučių

	Krūvis, μC	Max U1, mV	Max U2, mV	U, Suma, mV	Max I1, μA	Max I2, μA	I, Suma, μA	Min I1, μA	Min I2, μA	I, Suma, μA	Galia, μW
Schema A, 3,92 m/s	1,65	54	21	75	0,005	0,003	0,008	0,0007	0,0003	0,0009	0,0000111
Schema B, 4,3 m/s	0,99	40	5	45	0,002	0,001	0,003	0,0005	0,0001	0,0006	0,0000075

Apibendrinant, „A” atveju, sugeneruotas krūvis 1,6 kartus didesnis nei „B”. Suminis srovės stipris „A” atveju 2,6 karto didesnis nei „B” atveju.

Našiau energiją generavo „A” schema, o joje – toliau nuo fiuzeliažo esanti elementų grupė (k1).

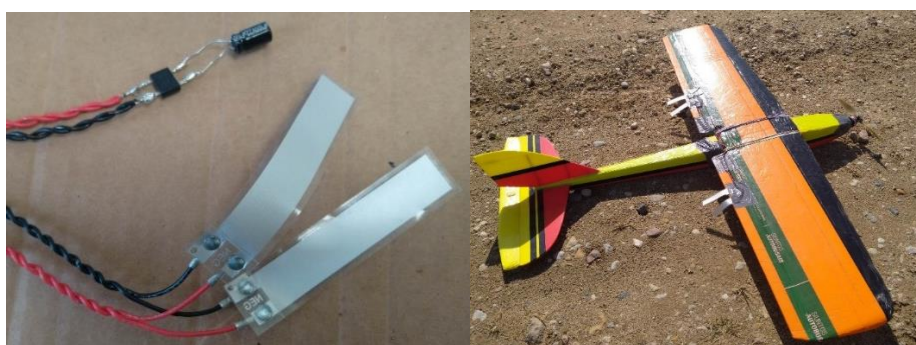
Vertinant srauto greičio įtaką, žinoma, kad vienos elementų grupės pozicija nebuvo keista („A” ssehmoje pozicija k1, atitinka „B” schemos poziciją k2). Srovės kitimo sparta kas dvi minutes skiriasi, „A” schemos 0,007 μA o „B” schemos 0,0007 μA - sumažėjo 10 kartų. Taigi, geresnius rezultatus elementai parodė prie vidutinio (3,92 m/s) srauto greičio.

Turimi duomenys rodo, kad esamomis sąlygomis turimos alternatyvios baterijos (slenkstis $I=0,01 \cdot 0,15=1,5$ mA) įkrauti elementai negeba. Maksimali keturių elementų generuojamo srovės suma 0,008 μA daug kartų mažesnė nei baterijos įkrovimo slenkstis.

5.1.6. Skrydis

Atliekamas elementų litavimas ir multimetru funkcionalumo patikrinimas. Dvi matavimo grandinės paruošiamos tvirtinimui ant orlaivio sparno (žr. 23 pav.). Elementai tvirtinami pagal „A” schemos k1 poziciją, kurioje gautos geriausios eksperimentinės vertės.

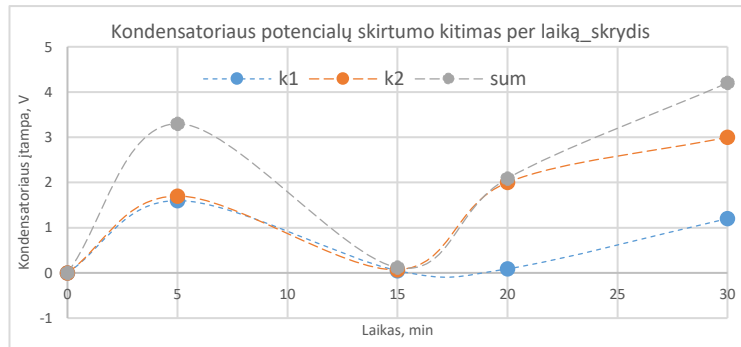
Atliekamas skrydis skirtingos trukmės intervalais: 10, 20, 25 ir 30 min. Pagrindinė orlaivio baterija buvo įkraunama iš naujo kelis kartus, pagal poreikį.



23 pav. Elementų grandinė (kairėje) ir orlaivis paruoštas skrydžiui (dešinėje)

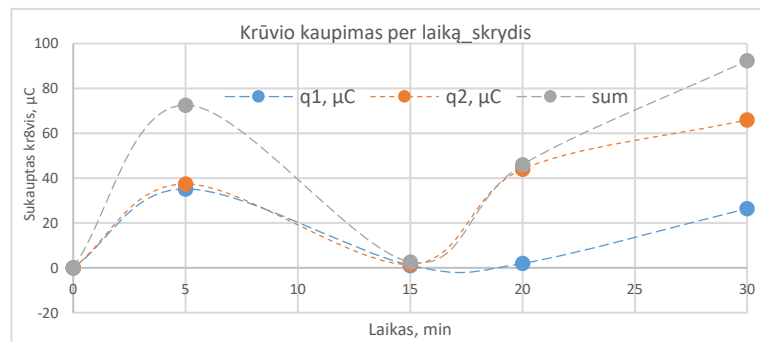
Oro sąlygos vietovėje bandymo metu: vėjo greitis 0-1 m/s, gūšiai 4 m/s, temperatūra 17 °C, giedra. Esant puikioms oro sąlygoms ir nestipriems gūšiams, orlaivis galėjo išvystyti pakankamai didelius greičius. Atitinkamai, manevruojant ilgą laiką, kito atakos, posvyrio, pokrypio kampai.

Ant kairiojo sparno (iš piloto perspektyvos) esantys elementai, atitinka poziciją k1, o ant dešiniojo sparno – „k2”.



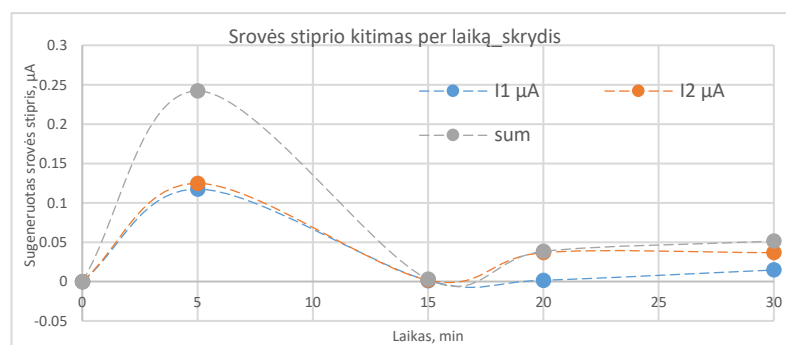
24 pav. Kondensatoriaus potencialų skirtumo kitimas per laiką. Skrydžio duomenys

Per 30 minučių „A” schemeje, keturi elementai sukūrė 4,2 V įtampą (žr. 24 pav.). Po 15 minučių, matavimas parodė artimas nuliui vertes. Vėliau, 20-ąją ir 30-ąją minutėmis, potencialų skirtumas augo, tačiau nevienodai k1 ir k2 elementų grupėse. Paveikslėliuose (24 pav., 25 pav., 26 pav.) skirtingu laiko momentu fiksuoti duomenys sujungti punktyrine linija. Ši linija rodo vieną iš galimų energijos kitimo per laiką tendencijų. Taip pat linija leidžia paprasčiau pateikti ir suprasti juostelių energijos augimo ir kritimo tendencijas šio eksperimento metu.



25 pav. Kondensatoriaus sukauptas krūvis per laiką. Skrydžio duomenys

Per 30 minučių suminė sukaupto krūvio reikšmė 92,4 μC (žr. 25 pav.).



26 pav. Srovės stiprio kitimas per laiką. Skrydžio duomenys

Tuo tarpu suminis srovės stipris matavimo pradžioje siekė 0,242 μA , o matavimo pabaigoje 0,051 μA (žr. 26 pav.). Didžiausia srovės stiprio kitimo sparta, stebėta per pirmąsias penkias skrydžio minutes, atitinkamai k1 pozicijoje buvo 0,117 μA , o k2 pozicijoje – 0,125 μA .

Skrydžio duomenys pateikiami 9 lentelėje.

9 lentelė. Skrydžio rezultatai

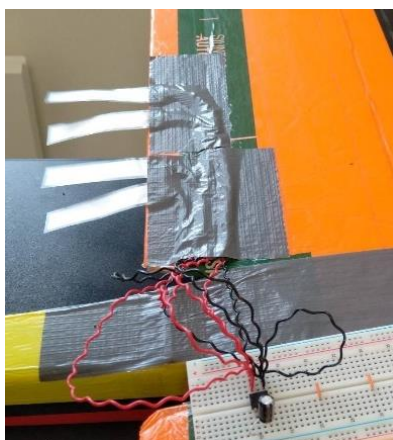
	Krūvis, μC	Max U_1 , V	Max U_2 , V	U , Suma, V	Max I_1 , μA	Max I_2 , μA	I , Suma, μA	Min I_1 , μA	Min I_2 , μA	I , Suma, μA	Galia, μW
Schema „A“	92,4	1,2	3	4,2	0,117	0,125	0,242	0,015	0,037	0,051	0,011

Turimi duomenys rodo, kad esamomis sąlygomis, turimos alternatyvios baterijos (slenkstis $I=0,01 \cdot 0,15=1,5 \text{ mA}$) įkrauti elementai negeba. Maksimali keturių elementų generuojamo srovės suma $0,242 \mu\text{A}$ yra 6000 kartų mažesnė nei baterijos įkrovimo slenkstis.

5.2. Aerodinaminės savybės

Stendinių bandymų ir pirmųjų po įrangos testavimo atliktų bandymų metu pastebėta, kad tvirtinant ant sparno aštuonis laidus kartu lipnia juosta susidaro laidų sankaupa (žr. 27 pav.). Ji gali veikti kaip turbulizatorius, kuris turbulentinį srautą stumia žemyn ir slopina juostelių vibraciją.

Po juostelių vibracijos sraute sumažėjimo stebėjimo nuspręsta atlikti dar vieną identišką bandymą, tik tvirtinant elementus grupėmis po du, taip sumažinant laidų sankaupos dydį. Pakeitus laidų tvirtinimo vietas (stendinis bandymas „A“ ir „B“ schemas), vizualaus juostelių slopinimo toliau nebestebima. Iš visų surinktų duomenų daroma prielaida, kad didžiausią įtaką rezultatams sukelia didesnis srauto greitis, o ne elementų tvirtinimo vieta ar būdas.



27 pav. Laidų sankaupa

Įvertinami ne tik praktiniai stebėjimai bandymų metu, tačiau ir išvalgos mokslinėje literatūroje. Autoriai [33] nurodo, kad tinkamiausias vibracinės energijos generavimui sparnas yra simetrinis, neišlenktas, nes didesnis sparno išlenkimas lemia mažesnę sugeneruotą pjezo elementais energiją ir greičiau pasiekiamas pavojingų virpesių (angl. flutter) greitis. Kiti autoriai [44] analizuoja pjezo elemento, tvirtinamo ant sparno elgsena sraute. Tačiau, sparnas nenaudotas, nes padaryta prielaida, jog nedidelių matmenų elektrodas nedaro įtakos aerodinaminėms sparno savybėms. Bandymo metu, geriausi rezultatai fiksuoti prie 20 laipsnių atakos kampo. Nepaisant to, kad elementai nekeičia sparno aerodinaminių savybių, tačiau sparno konstrukcijoje gali lemti pjezo elementų veikimą sraute dėl sparno vibracijų efektyvumą. Pavyzdžiui, konkretus atvejis nagrinėtas [17], kai apverstos „V“ formos sparno konstrukcija padidina energijos generavimąsi, kai pasiektas atakos kampas artimas kritiniam

atakos kampui. Be to autoriai teigia, kad daugiau energijos išgaunama didinant orlaivio skrydžio greitį. Tinkami tiek gūsių tiek laminarinio srauto sukelti virpesiai. Taigi, nors pats elektrodas nedaro reikšmingos įtakos aerodinaminėms savybėms, sparno forma, atakos kampas ir skrydžio greitis gali žymiai prie rezultatų prisidėti.

5.2.1. Energijos kaupimo galimybės

Energijos sistemos bepiločiams orlaiviams gali būti trijų rūšių [49]:

- a) pasyvios,
- b) pusiau aktyvios,
- c) aktyvios.

Pasyviosios sistemos konstrukcija susideda iš dviejų skirtingų energijos šaltinių tiesiogiai veikiančių į maitinimo šaltinį be jokio išorinio aktyvaus valdiklio. Tuo tarpu pusiau aktyvi konstrukcija susideda iš dviejų skirtingų energijos šaltinių su aktyviu energijos perjungimo valdikliu ar įtampos/galios keitikliu. Bent vieno iš energijos šaltinių įkrovimo/iškrovimo būseną turi būti pasyviai kontroliuojamas (pavyzdžiui, valdiklis suprogramuotas perjungti vieną ar kitą energijos šaltinį, padarant jį pagrindiniu esant nustatytai kritinei baterijos ar šaltinio vertei). Aktyvios sistemos atveju, abu energijos šaltiniai turi būti nuolatos stebimi ir valdomi jungikliais ar įtampos/galios konverteriu. Aktyvios sistemos atveju galima efektyviai išnaudoti turimus energijos šaltinius (koreliuoja su fotovoltinių elementų paros ciklo sekimo algoritmais), tačiau valdiklis ir išmaniosios sistemos prideda papildomos masės orlaivio konstrukcijoje. Teigiama, kad a) ir b) pavyzdžio sistemos tinkamiausios labai mažų ir mažų kategorijų BO.

Atliktas tyrimas parodo, kad esant tinkamoms slygoms, elementai gali generuoti vis daugiau energijos. Tačiau, reikalinga pasirinkti tinkamų matmenų talpos pjezo elementus. Bet to reikia optimizuoti orlaivio konfigūraciją pagal BO naudojimo tikslus. Žinomi optimizavimo kriterijai [49]: kaina, masė, dydis, efektyvumas, ištvermingumas (eksploatavimo laikas).

Pasirinktas šiame darbe orlaivis priklauso mažų BO kategorijos, nedidelio skrydžio laiko, o jo esama paskirtis – pramoginė.

Kiekvienas iš aukščiau paminėtų otimizavimo kriterijų, daro tam tikrą įtaką konkrečiu atveju tirtai sistemai su pjezo elementais.

- Kaina – pilnos komplektacijos orlaivio su valdymo pultu kaina 189 eurai [26]. 4 elementų kaina apie 80 eurų. Energijos sistemos tobulinimas, sudaro beveik pusę orlaivio kainos, tad kaip priedas, pakankamai brangus.
- Masė – elementų sistema nedaro įtakos orlaivio masei. Vertinant, kad hibridinėje sistemoje elementai turėtų įkrauti atskirą bateriją, masė padidėtų iki 100 g (pagrindinės LiPo baterijos svoris 81 g [42]).
- Dydis – įtakos nedaro.
- Efektyvumas – sistema integruojama į orlaivį iki skrydžio, vietos fiuzeliaže pakanka, tvirtinimas nesudėtingas.
- Ištvermingumas - reikalauja platesnio įvertinimo.

Sistamai (orlaiviui), kuriai reikia nuolatinės nepertraukiamos srovės, pjezo elementai nėra tinkamiausias variantas dėl pastebimo jų netolygaus krovimo ciklo. Elementams pasiekti didelės įtampas reikia laiko. Taigi, pjezo elementai galėtų būti hibridinės energijos sistemos BO dalimi. Vieno iš tyrimų autoriai [48] tyrė energijos sistemos, susidarančios iš dviejų pakartotinai įkraunamų baterijų (angl. *rechargable*), galimybę. Elektrinė grandinė sudaryta iš diodų tiltelio, kondensatorius, nikelio hidrido baterijos (savybės [49]: didelė iškrovimo talpa, palatus temperatūros spektras, draugiškos aplinkai). Dirbtinėmis mechaninėmis pastovaus dažnio ir amplitudės sinusoidinės vibracijomis deformuojant keraminius pjezo elementus, per 30 minučių buvo įkrauta 40 mAh talpos baterija. Tos energijos, pakaktų veikti rankiniam laikrodžiui “*Casio LW22H*” dvejus metus.

Taigi, kolkas energijos sistemos tobulinimui, naudojant pjezo elementus, palankiausia galėtų būti hibridinė sistema su ličio jonų (toliau – LiPo) baterija. Tokia baterija gali būti įkrauta įprastu būdu arba vibracinės energijos pagalba. Ličio baterijos pasižymi stokiomis avybėmis [49]: ilgas eksploatacijos laikas, nedidelis svorio-talpos santykis, draugiškos aplinkai. Renkantis hibridinei sistemai ličio bateriją, verta atsižvelgti į galios arba energijos tankio parametrus. Galios tankis lemia didesnes pagreičio galimybes ir didesnę pernešamą krovinį (angl. *payload*), o energijos tankis užtikrina skrydžio ištvermę, BO vykdant žvalgybines ar panašias užduotis, kai nereikalaujama gabenti krovinį [49]. Toliau, tenkinti specifiniams poreikiams, svarbi baterijos cheminė sudėtis. Pavyzdžiui Ličio anglies fosfato baterijų savybėms pagerinti galima atlikti tokius patobulinimus [49]: silicio-anglies anodas padidina ličio baterijų specifinę energiją, o Li-Ni-Co-Mn-O katodas pagerina specifinę galią. Naudojant kietą elektrolitą su nanografeno priemaišomis baterijos katode, galima pasiekti geresnes eksploatacines savybes žemose temperatūrose. Optimizuojant specifinės paskirties orlaivio energijos sistemą (pavyzdžiui žvalgybinio) pagal ištvermingumo kriterijų, galima rasti tinkamiausią LiPo bateriją sistemai su geromis energijos tankio savybėmis.

Toliau, verta atsižvelgti į elektrinės grandinės elementus. Tradicinis kondensatorius turi didelį galios tankį, greitą energijos atsaką ir mažą energijos tankį, tad tokioje sistemoje reikia baterijos su pagerintomis energijos tankio savybėmis. Tradicinė ličio baterija, turi geresnes energijos tankio savybes, ir pasitarnauja kopimo ir pagreičio atvejais, taigi tokia hibridinė sistema patenkintų abi energijos poreikio sritis. Ličio baterijos ir kondensatoriaus sistema, slopina greitus energijos šuolius ir užtikrina baterijos ištvermę. Kaip pavyzdžiui parodyta [49], hibridiniai – elektriniai varikliai, susidedantys iš vidinio degimo variklio ir ličio baterijų yra elementariausias subalansuotos hibridinės sistemos pavyzdys. Baterijos ir atsinaujinančio nenutrūkstamos energijos šaltinio pavyzdys BO yra fotovoltiniai elementai. Kaip ir pjezo elementai, fotovoltiniai turi žemus galios parametrus (angl. *low power performance*), dėl to tokie elementai turi būti hibridinėje sistemoje kartu su ličio baterija. Autoriai [49] nesvarsto fotovoltinių elementų, kaip pagalbinių energijos šaltinio. Priešingai, tai gali būti pagrindinis šaltinis, kol LiPo baterija naudojama kaip pagalbini arba lygiavertis.

Netolimoje ateityje net ir tobulintas ličio baterijas gali pakeisti druskos jonų baterijos. Paprastesnis išgavimas ir draugiškesnis šaltinis aplinkai jau dabar sukėlė susidomėjimą ir baterijos užsakomos JAV aviacijos įmonių [50].

Taigi, ličio baterija, įprastai garantuoja 10-20 minučių nepertraukiamo energijos tiekimo ir šiai dienai yra sutinkama beveik kiekviename komerciniame bepilotyje. Ištobulinus konfigūraciją, galima pasiekti ir kelis kartus ilgesnį laiką. Tačiau konkrečiu atveju, pramoginiam skrydžiui ir ypač nedidelio svorio orlaiviui, pjezo elementų sistema yra nepalanki kainos atžvilgiu. Lengvam, fiksuoto sparno

bepiločiui žvalgybiniam orlaiviui, kuris fiuzeliaže turėtų vietos papildomai baterijai talpinti, pjezo elementų sistema gali būti svarstytna, kaip hibrldinio energijos šaltinio variantas.

6. Darbo apibendrinimas, rezultatų aptarimas

Pjezo efekto generuojama energija tinka nedidelių galių reikalaujančiai elektronikai. Privalumai – veikti aukštų įtampų sąlygomis. Kiti svarbūs parametrai – dydis, vidinė varža, rezonansinis dažnis, judėjimo modų skaičius, apkrovimo galia ir galios tankis. Tačiau šiame darbe šie parametrai neanalizuoti. Šiame darbe vertinta ar pjezo elementai geba generuoti aukštas įtampas nestabiliomis lauko sąlygomis, priešingai nei sukūr palankią aplinką specialia laboratorine įranga.

Atsižvelgiant į mokslinius šaltinius, kuriuose naudota panaši tyrimo metodika, kai pjezo juostelės dėl virpesių sugeneruotos energijos, įkrovė kondensatorių [38]. Ultrakondensatorius 22 V – 0,022 F talpos įkrautas iki 5 V per 24 min. Palyginimui, šio eksperimento metu maksimaliai įkrautas 100 V – 22 μF kondensatorius iki 4,2 V per 30 minučių. Taip pat buvo pastebėta, kad palyginus vienos pjezo juostelės ir penkių juostelių generuojamą įtampą, pastaruoju atveju maksimali įtampa, įkrovimo galia 11,69 kartų didesnė negu vienos juostelės atveju. Tačiau šiame darbe atlikto bandymo metu nepastebėta tendencija, kai vienos ir kelių juostelių krovimo galia didėtų tolygiai ar kartais.

Autoriai [38] lygina pjezo keramikos ir PVDF elementus. Pastarieji - patvarios medžiagos, tinkančios virpesių energijos generavimui. Turi žemą išėjimo galią ir energijos konversijos efektyvumą, prastas adhezinės savybes, o tai daro įtaką dielektrinėms ir pjezoelektrinėms energijos generavimo savybėms. PVDF gembė – vėjo aptekos vibracinės energijos generatorius – kurio matmenys $79,86 \times 19,67 \times 0,12 \text{ mm}^3$ prie 4~14 m/s srauto greičio sukūrė maksimalią 18,6 V įtampą ir 1,3 μW galią. Iš to galime pastebėti, jog didesnių matmenų ir elektrodų storio elementai atitinkamai generuoja didesnes galias nei mažų (šio tyrimo atveju, elektrodo ilgio ir pločio matmenys buvo apie 20 % mažesni).

Svarbu, kad standinio ir praktinio bandymų atvejais, elementų grupių, kurios buvo tvirtinamos veidrodiniu principu, duomenys skyrėsi. Dėl to, nors matoma tendencija, kad elementai gali generuoti vis daugiau energijos, negalima apskaičiuoti konkretaus reikalingų elementų skaičiaus, tam tikram energijos poreikiui generuoti (ar įkrauti alternatyviai baterijai). Galbūt įtaką daro pačių elementų kokybė.

Be to, pjezo elementai vibracijų metu patiria nuovargį, kurio metu įkrovimo sparta beveik nekinta. Po kurio laiko, vidiniai energijos generavimo mechanizmai toliau aktyviai generuoja krūvį [38]. Tai sunkiai nuspėjama ir nepageidaujama elgsena, jei norima naudoti virpesių sugeneruotą energiją tiesiogiai įkrauti orlaivį maitinančią bateriją. Šio bandymo metu, tikėtina, pastebėtas toks reiškinys, kai tam tikru momentu kondensatorius buvo visiškai iškrautas, o po didesnio laiko tarpo energija intensyviai augo. Kadangi elementai tam tikrą laiko tarpą negeneravo energijos (tikėtina dėl rezonansinio dažnio ar nuovargio efekto) ir visiškai iškrovė kondensatorių, tad netiktų tapti pagrindiniu energijos šaltiniu orlaiviui skrydžio metu.

Palyginus eksperimentinius standinį ir praktinį (skrydis) bandymus pagal sukauptą suminį energijos kiekį per 30 minučių, matoma, kad srovės stipris, antruoju atveju 30 kartų didesnis nei pirmuoju. Abiem atvejais, aplinkos įtaka (vėjo greitis, temperatūra) panašūs ir daro minimalią įtaką. Tačiau praktinio skrydžio metu galėjo būti išvystytas daug didesnis greitis, negu teoriškai apskaičiuota, be to, palankūs gūšiai ir kintantis eleronų atakos kampas, taip pat galėjo daryti įtaką virpesių generavimui.

Apsvarstyta, kad lengvam, fiksuoto sparno, profesionaliam bepiločiam orlaiviui, kuris vykdytu žvalgybines užduotis ir fiuzeliaže turėtų vietos papildomai baterijai talpinti, specialiai parinkta pjezo

(PVDF) juostelių sistema ir LiPo baterija gali būti svarstyta kaip hibridinio energijos šaltinio variantas. Orlaivyje esant daugiau nei vienai LiPo baterijai, pirmajai po kurio laiko išsikrovus iki numatytos ribos, ją įkrauti pradėtų pjezo elementai. Energijos sistema – pusiau aktyvi. Hibridinės sistemos rezultatas – padidinta skrydžio ištvermė, nedarant žymios įtakos bendram orlaivio masės padidėjimui, nepaliekant šiluminio pėdsako ir nesant didesniai nei orlaivio variklis triukšmo pėdsakui.

Išvados

1. Literatūros analizė parodė, kad įvertinta, jog pjezo juostelės, kaip mikro energijos gavybos šaltinis, turi perspektyvų taikymui aviacijoje, tačiau reikalauja tolimesnių tyrimų. Pjezo elementai, galėtų būti naudojami kaip pusiau aktyvios arba aktyvios hibridinės sistemos su patobulinta ličio baterija dalis. Tokiu būdu, galėtų padidinti bepiločio orlaivio energijos sistemos išsvermę, nepaliekant padidinto šiluminio pėdsako.
2. Nustatyta, kad pjezo juostelių grupės, nepriklausomai nuo tvirtinimo vietos ar srauto greičio, netolygiai generavo energiją, be to elementų krovimo sparta tam tikram laikui buvo nuslopusi. Taigi, nėra galimybės apskaičiuoti konkretaus juostelių kiekio poreikio tam tikros elektronikos sistemos nepertraukiamam maitinimui palaikyti.
3. Nustatyta, kad dėl patogesnių tvirtinimo galimybių, pjezo juostelių tipo sistemai tinkamiausias yra fiksuoto sparno orlaivis.
4. Nustatyta, kad aerodinaminės savybės daro svarią įtaką elementų veikimui. Skrydžio metu, reikia didelių skrydžio greičių ir (ar) manevravimo ar atakos kampų pokyčių (skrydžio metu sugeneruotas suminis srovės stipris 30 kartų didesnis nei standinio eksperimento metu). Oro srauto sukeltos juostelių deformacijos garantuoja greitą elektrinį atsaką, o kintantis srauto greitis neleidžia energijos gavybos efektui užstrigti bifurkaciniame taške, kai elektrinis atsakas sustabdomas.
5. Nustatyta, kad konkretaus, pjezo juostelių tipo elementai, negeba per 30 minučių įkrauti teoriniam įkrovimo galimybių vertinimui pasirinktos baterijos. Keturių elementų skrydžio metu generuojamo srovės stiprio suma yra 0,242 μA , o tai 6000 kartų mažiau nei baterijos įkrovimo slenkstis (1,5 mA). Tad keturių pjezo juostelių įtaka orlaivio skrydžio energijos sistemai yra nežymi.
6. Atlikti tyrimai ir literatūros analizė leidžia manyti, kad panaudojus naujausių technologijų maitinimo elementus bei parinkus pjezo elementų tipą ir (ar) kiekį bei tvirtinimo konfigūraciją, pjezo elementai, netolimoje ateityje, gali tapti viena iš alternatyvų baterijų įkrovimui skrydžio metu.

Literatūros sąrašas

1. Geospatial Applications of Unmanned Aerial Systems. Classification of the Unmanned Aerial Systems [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2022-11-13]. Prieiga per: <https://www.e-education.psu.edu/geog892/node/5>
2. Mo ElSayed, Ahmed Foda, Moataz Mohamed, Autonomous drone charging station planning through solar energy harnessing for zero-emission operations [interaktyvus]. 2022, 86, [žiūrėta 2023-03-01]. Prieiga per doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104122>
3. ICAO. ENVIRONMENT. Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSA) [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2023-04-26]. Prieiga per: [Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation \(CORSA\) \(icao.int\)](https://www.icao.int/CarbonOffsettingandReductionSchemeforInternationalAviation(CORSA)/)
4. United States 2021 Aviation Climate Action Plan [interaktyvus]. 2021 [žiūrėta 2022-06-28]. Prieiga per: https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2021-11/Aviation_Climate_Action_Plan.pdf
5. 2018 International Total (Scheduled and Non-Scheduled) [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2022-06-29]. Prieiga per: [RTK https://www.icao.int/sustainability/Documents/RTK%20ranking/International%20RTK%20rankings_2018_SIDS_LDC_LLDC.pdf](https://www.icao.int/sustainability/Documents/RTK%20ranking/International%20RTK%20rankings_2018_SIDS_LDC_LLDC.pdf)
6. ICAO. ENVIRONMENT. CORSA [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2022-06-29]. Prieiga per: <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSA/Pages/CORSA-communication.aspx>
7. Zafar Said, Tuan Hai Nguyen, Prabhakar Sharma, Multi-attribute optimization of sustainable aviation fuel production-process from microalgae source [interaktyvus]. 2022, 324, Part C [žiūrėta 2022-06-02]. Prieiga per doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124759>
8. Md Fahim Shahriar, Aaditya Khanal. The current techno-economic, environmental, policy status and perspectives of sustainable aviation fuel (SAF) [interaktyvus]. 2022, 324, [žiūrėta 2022-06-02]. Prieiga per doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124905>
9. SKYNRG. SkyNRG is a global leader in SAF since 2009 [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2022-06-09]. Prieiga per: <https://skynrg.com/about-us/>
10. SolarImpulse Foundation. Historical Flight [interaktyvus]. 2016 [žiūrėta 2022-08-01]. Prieiga per: <https://aroundtheworld.solarimpulse.com>
11. Airbus. Airbus Zephyr Solar High Altitude Platform System (HAPS) reaches new heights in its successful 2021 summer test flights [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2022-08-01]. Prieiga per: <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2021-10-airbus-zephyr-solar-high-altitude-platform-system-haps-reaches-new>
12. Wenjun NI, Ying BI, Di WU, Xiaoping MA. Energy-optimal trajectory planning for solar-powered aircraft using soft actor-critic. Chinese Journal of Aeronautics [interaktyvus]. 2022, 35, 10, 337-353, [žiūrėta 2021-07-31]. Prieiga per doi: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2021.11.009>
13. International Renewable Energy Agency, IRENA, Wind energy. 2011 – 2022 [žiūrėta 2022-08-29]. Prieiga per: <https://www.irena.org/wind>

14. Interesting Engineering. High-flying kites could power your home with wind energy [interaktyvus]. 2021 [žiūrėta 2022-08-29]. Prieiga per: <https://www.kitekraft.de/technology>
15. Xiaoqing Ma, Shengxi Zhou, A review of flow-induced vibration energy harvesters. Energy Conversion and Management [interaktyvus]. 2022, 254 [žiūrėta 2022-09-09]. Prieiga per doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115223>
16. Greenage. Piezoelectric Materials [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2022-09-10]. Prieiga per: <https://www.thegreenage.co.uk/>
17. Yuting Dai, You Wu, Chao Yang. Numerical study on gust energy harvesting with an efficient modal based fluid-structure interaction method. Aerospace and Science Technology [interaktyvus]. 2021, 116, [žiūrėta 2022-09-10]. Prieiga per doi: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.106819>
18. Karthik Reddy B, Aneesh Poondla. Performance analysis of solar powered Unmanned Aerial Vehicle. Renewable Energy [interaktyvus]. 2017, 20-29, [žiūrėta 2022-09-15]. Prieiga per doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.008>
19. Ahmad Baroutajia, Tabbi Wilberforceb, Mohamad Ramadanc. Comprehensive investigation on hydrogen and fuel cell technology in the aviation and aerospace sectors. Renewable and Sustainable Energy Reviews [interaktyvus]. 2019, 106, 31-40, [žiūrėta 2022-09-15]. Prieiga per doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.022>
20. Andrew Gong, Dries Verstraete. Fuel cell propulsion in small fixed-wing unmanned aerial vehicles: Current status and research needs. International Journal of Hydrogen Energy [interaktyvus]. 2017, 42, 21311-21333, [žiūrėta 2022-09-15]. Prieiga per doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.06.148>
21. Naval Technology. Ion Tiger UAV [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2022-09-16]. Prieiga per: <https://www.naval-technology.com/projects/ion-tiger-uav/>
22. Jiantao Zhang, Zhou Fang, Chang Shu. A rotational piezoelectric energy harvester for efficient wind energy harvesting. Sensors and Actuators A: Physical [interaktyvus]. 2017, 262, 123-129, [žiūrėta 2022-09-16]. Prieiga per doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.05.027>
23. Huidong Li, Chuan Tian, and Z. Daniel Deng. Energy harvesting from low frequency applications using piezoelectric materials. Applied Physics Reviews [interaktyvus]. 2014, 1, 041301, [žiūrėta 2022-09-16]. Prieiga per doi: <https://doi.org/10.1063/1.4900845>
24. Mouser Electronics. 1-1003744-0 [interaktyvus]. 2023 [žiūrėta 2023-02-20]. Prieiga per: <https://eu.mouser.com/ProductDetail/Measurement-Specialties/1-1003744-0?qs=tiyUwePmMSwca2dEApA7CA%3D%3D>
25. Airfield Models – Formulas. Straight and Tapered Wing Area [interaktyvus]. 2003 [žiūrėta 2022-11-04]. Prieiga per: https://www.airfieldmodels.com/information_source/math_and_science_of_model_aircraft/formulas/straight_tapered_and_delta_wing_area.htm
26. Putinukas.lt. EMAX CF2805 2840kv 29g bešepetėlinis variklis Area [interaktyvus]. 2009 - 2011 [žiūrėta 2022-11-05]. Prieiga per: <https://putinukas.lt/index.php/krautuvely/atsargines-dalys/varikliai/bell-tipo/emax-cf2805-2840kv-29g-be%20C5%A1epet%C4%97linis-variklis-aviamodeliavimas>

27. ANODAS electronics. I2C LCD ekrano valdiklis [interaktyvus]. 2023 [žiūrėta 2023-02-28]. Prieiga per: <https://www.anodas.lt/i2c-lcd-ekrano-valdiklis>
28. ARDUINO. Arduino Uno Rev3 [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2022-12-09]. Prieiga per: <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3?selectedStore=eu>
29. Kestrel Instruments. Kestrel 4000 Weather and Environmental Meter [interaktyvus]. 2023 [žiūrėta 2023-02-28]. Prieiga per: <https://kestrelinstruments.com/kestrel-4000-weather-environmental-meter-with-bluetoothr-classic-in-orange-1>
30. Lemona electronics. Skystų kristalų indikatorius 16x2 be pašvietimo [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2023-02-28]. Prieiga per: <https://www.lemona.lt/skystu-kristalu-indikatorius-16x2-be-pasvietimo.html>
31. Modulis24.lt Elektronika visiems. Rezistorius 1MΩ 5% 0.25W [interaktyvus]. 2023 [žiūrėta 2023-02-28]. Prieiga per: <https://modulis24.lt/elektronikos-komponentai/309-rezistorius-1m-5-025w.html>
32. E-CALC. Reliable electric drive simulations [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2022-12-09]. Prieiga internete: <https://www.ecalc.ch/index.htm>
33. Abdessattar Abdelkefi and Abdullah O Nuhait. Modeling and performance analysis of cambered wing-based piezoaeroelastic energy harvesters. Smart Mater. Struct [interaktyvus]. 2013, 22, 095029, [žiūrėta 2022-12-15]. Prieiga per doi: [doi:10.1088/0964-1726/22/9/095029](https://doi.org/10.1088/0964-1726/22/9/095029)
34. Voltaic Systems. Small solar panels. [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2022-12-16]. Prieiga per: <https://voltaicsystems.com/small-solar-panels/>
35. Piezo Direct. Custom Piezo Ceramics. Piezo Plates and Blocks [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2022-12-16]. Prieiga per: <https://piezodirect.com/piezo-plates-and-blocks/>
36. Robu.in. Your Ideas Our Parts. nterfacing of Piezoelectric Sensor with Arduino [interaktyvus]. 2023 [žiūrėta 2023-03-02]. Prieiga per: <https://robu.in/interfacing-of-piezoelectric-sensor-with-arduino/>
37. Measurement Specialities. Piezo Film Sensors. Technical Manual. [interaktyvus]. 2021, P/N 1005663-1 REV B 02 APR 99, 8-9, 15, 35-36, 58-59, [žiūrėta 2022-03-15]. Prieiga per: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Flex/MSI-techman.pdf> //
38. Bo Wang, Dun Lan, Fanyang Zeng. Vibration Energy Conversion Power Supply Based on the Piezoelectric Thin Film Planar Array. Sensors [interaktyvus]. 2022, 22, 8506, [žiūrėta 2023-03-09]. Prieiga per doi: <https://doi.org/10.3390/s22218506>
39. Lemona electronics. Current sensor ACS712 module - 20 A. [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2023-03-13]. Prieiga per: <https://www.lemona.lt/current-sensor-acs712-module-20-a-wpse323.html>
40. [Anwesa Mohanty*](#), [Suraj Parida](#), [Rabindra Kumar Behera](#), [Vibration energy harvesting: A review](#) [interaktyvus]. 2019, 9, 4, 1930001, , [žiūrėta 2023-03-20]. Prieiga per doi: [10.1142/S2010135X19300019](https://doi.org/10.1142/S2010135X19300019)
41. ECKSTEIN Komponente. LiPo Battery Lithium-Ion Polymer Battery 3.7V 150mAh with JST-PHR-2 Connector LP402025. [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2023-03-16]. Prieiga per:

<https://eckstein-shop.de/LiPo-Battery-Lithium-Ion-Polymer-Battery-37V-150mAh-with-JST-PHR-2-Connector-LP402025-EN>

42. HobbyKing.com. Turnigy 1300mAh 2S 20C Lipo Pack. [interaktyvus]. 2023, [žiūrėta 2023-03-21]. Prieiga per: <https://hobbyking.com/en-us/turnigy-1300mah-2s-20c-lipo-pack.html?store=en-us>
43. Manualslib. Turnigy 2S/3S User Manual. [interaktyvus]. 2023, [žiūrėta 2023-03-21]. Prieiga per: <https://www.manualslib.com/manual/752650/Turnigy-2s-3s.html#manual>
44. Hassan Elahi, Marco Eugeni and Paolo Gaudenzi. Piezoelectric Aeroelastic Energy Harvesting. [interaktyvus]. 2022, ISBN 978-0-12-823968-1, 223-246, [žiūrėta 2023-03-21]. Prieiga per doi: <https://doi.org/10.1016/C2020-0-01123-0>
45. Lemona electronics. Elektrolitinis kondensatorius 22uF 100V 105° 6.3x11.2mm. [interaktyvus] 2023, [žiūrėta 2023-04-02]. Prieiga per: <https://www.lemona.lt/Files/Instrukcijos/Pdf/RDF0000C1276.pdf>
46. TME Electronic Components. DC COMPONENTS single-phase bridge rectifiers (DIP package) [interaktyvus] 2023, [žiūrėta 2023-04-02]. Prieiga per: https://www.tme.eu/html/EN/dc-components-single-phase-bridge-rectifiers-dip-package/ramka_13162_EN_pelny.html
47. FLUKE. Fluke 77 IV Digital Multimeter [interaktyvus]. 2023 [žiūrėta 2023-03-31]. Prieiga per: <https://www.fluke.com/en/product/electrical-testing/digital-multimeters/fluke-77-iv#>
48. Henry A. Sodano and Daniel J. Inman. Generation and Storage of Electricity from Power Harvesting Devices. Journal of Intelligent Material Systems and Structures [interaktyvus]. 2005, 16, 1, [žiūrėta 2023-04-16]. Prieiga per doi: [10.1177/1045389X05047210](https://doi.org/10.1177/1045389X05047210)
49. Chunwu Xiao a, Bin Wang a,* , Dan Zhao b , Chaohui Wang. Comprehensive investigation on Lithium batteries for electric and hybrid-electric unmanned aerial vehicle applications. Thermal Science and Engineering Progress [interaktyvus]. 2023, 38, 101677, [žiūrėta 2023-04-21]. Prieiga per doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101677>
50. CISION. PER Newswire. United Airlines Invests in Battery-Maker Natron Energy With Eye Toward Further Electrifying Ground Operations [interaktyvus]. 2022, [žiūrėta 2023-04-21]. Prieiga per: <https://www.prnewswire.com/news-releases/united-airlines-invests-in-battery-maker-natron-energy-with-eye-toward-further-electrifying-ground-operations-301689521.html>
51. Power Sonic. Thrusted Battery Solutions. What is a Battery C Rating [interaktyvus]. 2023, [žiūrėta 2023-04-20]. Prieiga per: <https://www.power-sonic.com/blog/what-is-a-battery-c-rating/>