VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INSTITUTAS
AVIACIJOS TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

Rytis Čigas

ORLAIVIO PROPELERIO TRIUKŠMO MAŽINIMO TYRIMAS
AIRCRAFT PROPELLER NOISE REDUCTION STUDY

Baigiamasis magistro darbas

Orlaivių pilotavimo studijų programa, valstybinis kodas 601H41001
Aeronautikos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2025

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INSTITUTAS
AVIACIJOS TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

_____
(Parašas)

_____
(Vardas, pavardė)

_____
(Data)

Rytis Čigas

ORLAIVIO PROPELERIO TRIUKŠMO MAŽINIMO TYRIMAS
AIRCRAFT PROPELLER NOISE REDUCTION STUDY

Baigiamasis magistro darbas

Orlaivių pilotavimo studijų programa, valstybinis kodas 601H41001
Aeronautikos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas doc. dr. Vytautas Rimša _____ _____
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

Lietuvių kalbos konsultantė lekt. Angelika Petrėtienė _____ _____
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

Vilnius, 2025

Aeronautikos inžinerijos studijų kryptis

Orlaivių pilotavimo studijų programa, valstybinis kodas 601H41001

TVIRTINU
Katedros vedėjas

_____
(Parašas)

_____
(Vardas, pavardė)

_____
(Data)

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO UŽDUOTIS

…….....Nr. .....
Vilnius

Studentui (ei) .....…….....Ryčiui Čigui.....….....….....
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: Orlaivio propelerio triukšmo mažinimo tyrimas (angl. *Aircraft propeller noise reduction study*)

patvirtinta 201…m. ……..…… d. dekano potvarkiu Nr. …….

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 201…m. ……..…… d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

1. Atlikti mokslinės literatūros susijusios su darbo tema analizę.
2. Baigtinių tūrių metodu ištirti priežastis ir parametrus turinčius įtakos orlaivio propelerio triukšmui.
3. Atlikti propelerių geometrijos pakeitimus pagal nustatytus metodus literatūros analizėje.
4. Propelerius su pakeista geometrija ištirti naudojant baigtinių tūrių metodą, ir atlikti fizinius eksperimentus
5. Pateikti darbo išvadas ir rekomendacijas

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

.....
.....
.....
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Vadovas ..... doc. dr. Vytautas Rimša
(Parašas) (Moksl. laipsnis/pedag.vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

……..
(Parašas)
Rytis Čigas
(Vardas, pavardė)
……..…....
(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Antano Gustaičio aviacijos institutas
Aviacijos technologijų katedra

ISBN ISSN
Egz. sk. ……..
Data ….-….-….

Vientisosios studijų programos **Orlaivių pilotavimas** magistro baigiamasis darbas

Pavadinimas	**Orlaivio propelerio triukšmo mažinimo tyrimas**
Autorius	**Rytis Čigas**
Vadovas	**doc. dr. Vytautas Rimša**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe atliekamas orlaivio propelerio triukšmo mažinimas, pritaikant propelerio mentės dalies išpjovimus, kurie yra nustatomi pagal anksčiau vykdytus mokslinius darbus. Atliekami skaitiniai ir eksperimentiniai tyrimai, propeleriui sukantis esant mažiems ir dideliems apsisukimo greičiams, triukšmo tipams ir triukšmo susidarymui nustatyti. Pagaminami propeleriai testavimui realiomis sąlygomis. Rezultatai parodo geriausią išpjovimų tipą, jų efektyvumą. Pateikiamos atlikto baigiamojo darbo išvados ir rekomendacijos.

Darbą sudaro 6 dalys: įvadas, literatūros analizė, orlaivio propelerio triukšmo skaitinė ir eksperimentinė metodologija, orlaivio propelerio išpjovimų tyrimas, išvados ir rekomendacijos, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 66 p. teksto be priedų, 47 iliustracijos, 8 lentelės, 32 bibliografiniai šaltiniai.

Reikšminiai žodžiai: periodinis triukšmas, plačiajuostis triukšmas, bendras garso slėgio lygis, programa *Ansys Fluent*, propelerių išpjovimai.

Vilnius Gediminas Technical University
Antanas Gustaitis' aviation institute
Department of Aviation Technologies

ISBN ISSN
Copies No.
……

Integrated Studies **Aircraft Piloting** study programe Master Graduation Thesis.

Title	**Aircraft propeller noise reduction study**
Author	**Rytis Čigas**
Academic supervisor	**doc. dr. Vytautas Rimša**

Thesis language Lithuanian

Annotation

The final master thesis deals with the reduction of aircraft propeller noise by means of cutouts in the propeller blade section, which are determined from previous research work. Numerical and experimental investigations of the propeller at low and high speeds are carried out to determine the types of noise and noise generation. Propellers are produced for testing under realistic conditions. The results show the best type of cutouts, their efficiency. Conclusions and recommendations of the final work carried out are presented.

Structure: introduction, literature analysis, aircraft propeller noise numerical and experimental methodology, aircraft propeller cutout study, conclusions and suggestions, references.

Thesis consist of: 66 p. text without appendixes, 47 pictures, 8 tables, 32 bibliographical entries.

Keywords: periodic noise, broadband noise, overall sound pressure level, program *Ansys Fluent*, propeller cut outs

Vilniaus Gedimino technikos universiteto egzaminų sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo bei gynimo organizavimo tvarkos aprašo 2011–2012 m. m.
2 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Rytis Čigas 20210119
(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)
Antano Gustaičio aviacijos institutas
(Fakultetas)
Orlaivių pilotavimas, OPfakau-20
(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)

SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

20 m. _____ d.
(Data)

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas (projektas) tema „Orlaivio propelerio triukšmo mažinimo tyrimas“

patvirtintas 2____ m. _____d. dekano potvarkiu Nr. _____ , yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe (projekte) pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.
Parenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą (projektą), mane konsultavo mokslininkai ir specialistai Vytautas Rimša

Mano darbo (projekto) vadovas docentas daktaras Vytautas Rimša

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą (projektą) nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).

_____ RYTIS ČIGAS
(Parašas) (Vardas ir pavardė)

TURINYS

TURINYS 7
SANTRUMPŲ SĄRAŠAS 8
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS 8
LENTELIŲ SĄRAŠAS 11
ĮVADAS 12
1. MOKSLO DARBUOSE TAIKOMI TRIUKŠMO MAŽINIMO BŪDAI 13
1.1 Garsas ir jo supratimas 13
1.2 Kompiuterinė aeroakustika 16
1.3 Triukšmo tipai ir priežastis 18
1.3.1 Periodinis triukšmas 18
1.3.2 Plačiajuostis triukšmas 20
1.4 Propelerio triukšmo mažinimo būdai 24
1.5 Pirmojo skyriaus išvados 33
2. ORLAIVIO PROPELERIO TRIUKŠMO SKAITINĖ IR EKSPERIMENTINĖ METODOLOGIJA 34
2.1 Pagrindiniai triukšmo aspektai 34
2.2 Tyrimo skaitinio eksperimento metodologija 36
2.3 Garso matavimo schema ir propelerių išpjovimai 38
2.3.1 Laike nekintantis sprendinys 39
2.3.2 Laike kintantis sprendinys 41
2.4 Eksperimentinio bandymo metodologija 44
2.4.1 Propelerių gamybos procesas 45
2.4.2 Bešepetėlinio variklio stendas 47
2.4.3 F2D Kovinio modelio tyrimas 49
2.4 Antro skyriaus išvados 50
3. ORLAIVIO PROPELERIO IŠPJOVIMŲ TYRIMAS 51
3.1 Skaitiniai tyrimai 51
3.2 Eksperimentiniai tyrimai 57
3.3 Skyriaus išvados 63
IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS 64
LITERATŪROS SĄRAŠAS 66

SANTRUMPŲ SĄRAŠAS

F2D – kordiniai koviniai modeliai

FFT – greitoji Furjė transformacija (angl. *Fast fourier transform*)

FW-H – Ffowscs Williams ir Hawkings lygtis

MPD – mentės praleidimo dažnis

MRF – judanti atskaitos sistema

NN – standartinis propeleris, naudojamas F2D koviniuose modeliuose

PISO – slėgio ir greičio jungties sistema

RANS – Reynoldso vidutinės Navier-Stokes lygtys

URANS – nestabilios Reynoldso vidutinės Navier-Stokes lygtis

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Garso laukas ir jo regionai (sudaryta autoriaus pagal Ray, 2010)..... 13

1.2 pav. Triukšmo skalė (dBA) (Hutchinson, Du & Ahmad, 2020)..... 15

1.3 pav. Orlaivio triukšmo šaltiniai (sudaryta autoriaus, 2025)..... 15

1.4 pav. Mišrūs metodai skaitinėms simuliacijoms, aeroakustinių mechanizmų atsiradimui ir sklidimui (Manoha, Redonnet & Caro, 2010)..... 16

1.5 pav. Aerodinaminio triukšmo tipai (sudaryta autoriaus pagal Marte and Kurtz, 1970) ... 18

1.6 pav. Propelerio periodinio triukšmo charakteristikos (sudaryta pagal Hubbard, 1991) 19

1.7 pav. Periodinio triukšmo komponentai: kairėje – mentės storio sukuriamas triukšmas: dešinėje – menčių apkrovos sukuriamas triukšmas (sudaryta pagal Akiwate et al., 2021)..... 19

1.8 pav. Plačiajuosčio triukšmo komponentai (sudaryta pagal Akiwate et al., 2021) 20

1.9 pav. Plačiajuosčio triukšmo charakteristikos (sudaryta pagal Hubbard, 1991) 21

1.10 pav. Originalaus ir optimizuoto propelerio sūkuringumo pasiskirstymo palyginimas (Yu et al., 2020)..... 22

1.11 pav. Sūkuringumo laukai esant skirtingiems Reinoldso skaičiam:..... 23

a) $\boldsymbol{Re\infty = 103}$, b) $\boldsymbol{Re\infty = 2 * 104}$ (Russo, Ostieri & Tognaccini, 2018) 23

1.12 pav. (a) Erelio ir pelėdos plunksnų palyginimas;..... 24

(b) Pelėdos plunksnos priekis iš arti (Wei et al., 2020) 24

1.13 pav. Sraigto formos įtakos triukšmui vertinimas (Wei et al., 2020) 25

1.14 pav. Tyrimo schema. Mikrofonas pastatytas ant trikojo, kad būtų išvengta stendo vibracijų (Štorch et al., 2016)..... 26

1.15 pav. Skirtingų propelerių geometrija (a) bazinis; (b) pusiau plokščio antgalio; (c) ketvirtadalis plokščio antgalio; (d) kvadratinis (Lee et al., 2019)..... 27

1.16 pav. Mikrofonų išdėstymas realaus tyrimo metu, (Sudaryta pagal Lee et al., 2019)..... 27

1.17 pav. Bazinis 9450S propeleris ir propeleris su išpjovimu, kartu su išpjovimo matmenimis (Gu et al., 2024) 30
1.18 pav. Realaus eksperimento matavimo išdėstymo schema (Gu et al., 2024) 30
1.19 pav. Trijų propelerio sukeliamų triukšmų spektras esant dažniams nuo 0 Hz iki 50000 Hz su 6000 apsisukimų per minutę greičiu (Gu *et al.*, 2024) 32
2.1 pav. Orlaivio propelerio geometrija, naudota baigtinių tūrių simuliacijoje (sudaryta autoriaus, 2025) 36
2.2 pav. Orlaivio propelerio geometrija, naudota baigtinių tūrių simuliacijoje: (a) laukas kuriame sukasi propeleris; (b) terpė, kurioje vyksta simuliacija (mėlynai pažymėtas terpės ir lauko susikirtimas) (sudaryta autoriaus, 2025) 37
2.3 pav. Simuliacijos erdvės tinklelis, zona, kurioje sukasi propeleris, kartu su zona, kurioje vyksta visas aptekėjimas (sudaryta autoriaus, 2025) 37
2.4 pav. Oro srauto tekėjimas, naudotas tyrime (sudaryta autoriaus, 2025) 38
2.5 pav. Nepjaustyto propelerio akustinė galia esant 3000 apsisukimų per minutę greičiui (Sudaryta autoriaus, 2025) 40
2.6 pav. Propelerio įpjovimų schema (sudaryta autoriaus, 2025) 40
2.7 pav. Triukšmo imtuvų išdėstymo schema (sudaryta autoriaus, 2025) 42
2.8 pav. Triukšmo sklidimas propelerio x-ašyje (sudaryta autoriaus, 2025) 44
2.9 pav. Triukšmo sklidimas propelerio y-ašyje (Sudaryta autoriaus, 2025) 44
2.10 pav. Propelerio forma naudota gamyboje (sudaryta autoriaus, 2025) 45
2.11 pav. Stiklo siūlų propelerio gamybos schema (sudaryta autoriaus, 2025) 45
2.12 pav. Pagamintas stiklo siūlų propeleris (sudaryta autoriaus, 2025) 46
2.13 pav. Siūlų sudėjimo schema (sudaryta autoriaus, 2025) 46
2.14 pav. Eksperimentinio tyrimo schema (sudaryta autoriaus, 2025) 47
2.15 pav. Garso matuoklis SAUTER SU 130 (sudaryta autoriaus, 2025) 48
2.16 pav. F2D kovinis modelis (sudaryta autoriaus, 2025) 49
3.1 pav. Propelerių simuliacijų turbulentinė kinetinė energija (sudaryta autoriaus, 2025) 53
3.2 pav. Triukšmas susidarantis propelerių galiukuose (sudaryta autoriaus, 2025) 54
3.3 pav. Nestabilus triukšmas oktavų juostoje propelerio galiukuose (sudaryta autoriaus, 2025) 55
3.4 pav. Nestabilus triukšmas oktavų juostoje 6 propelerių skersmens atstumu (sudaryta autoriaus, 2025) 55
3.5 pav. 5 įpjovimų sukeliamas triukšmas ties 30 000 apsisukimų per minutę (sudaryta autoriaus, 2025) 56
3.6 pav. Išpjaustyti propeleriai (sudaryta autoriaus, 2025) 57

3.7 pav. Eksperimentinio matavimo stendo schema ir stendo nuotrauka (sudaryta autoriaus, 2025) 57
3.8 pav. Skaitinis ir eksperimentinis triukšmas X-ašyje (sudaryta autoriaus, 2025) 58
3.9 pav. Skaitinis ir eksperimentinis triukšmas X-ašyje (sudaryta autoriaus, 2025) 58
3.10 pav. Triukšmo tendencija X-ašyje esant 3000 apsisukimų per minutę (sudaryta autoriaus, 2025) 59
3.11 pav. Triukšmo tendencija Y-ašyje esant 3000 apsisukimų per minutę (sudaryta autoriaus, 2025) 60
3.12 pav. Skirtingų propelerių triukšmas (sudaryta autoriaus, 2025) 60
3.13 pav. Skirtingų propelerių triukšmas (sudaryta autoriaus, 2025) 61
3.14 pav. Propelerio lūžis (sudaryta autoriaus, 2025) 61
3.15 pav. Skaitinio ir eksperimentinio tyrimo propelerio triukšmas esant 30000 apsisukimų per minutę (sudaryta autoriaus, 2025) 62

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Oktavų ir vienos trečiosios oktavų centro dažniai (Veggeberg, 2008) 14
1.2 lentelė $\boldsymbol{\Delta LAeq}$ (dBA) gauti duomenys skirtingų išpjautų propelerių esant skirtingiems trečio mikrofono sukimosi greičiams (Lee et al., 2019). 28
1.3 lentelė. $\boldsymbol{\Delta LAeq}$ (dBA) gauti duomenys skirtingų išpjautų propelerių esant skirtingiems ketvirto mikrofono sukimosi greičiams (Lee et al., 2019). 29
2.1 lentelė Validacijai sudaryto tinklelio duomenys 38
2.2 lentelė Išpjovimai tyrimui 41
2.3 lentelė Pagamintų propelerių stiklo siūlų kiekiai 47
3.1 lentelė Propelerių tinkleliai ir jų parametrai 51
3.2 lentelė Propelerių parametrai laike nekintančiame sprendinyje 52

ĮVADAS

Problema

Orlaivio propeleris yra viena iš pagrindinių triukšmą skleidžiančių dalių orlaivyje. Triukšmas kenkia žmogaus sveikatai, didėjantis dronų ir kitų skraidančių objektų poreikis gali turėti nenumatytų pasekmių žmonių sveikatai.

Aktualumas

Europos Sąjungos reglamentai nustatantys triukšmą, tampa vis griežtesni ir autonominių orlaivių poreikis vis didėja. Sumažinus triukšmą, autonominių orlaivių panaudojimas būtų mažiau apribotas. Trūksta tyrimų, susijusių su propeleriais, kurie sukasi sūkiais, kurie yra virš 15 000 apsisukimų per minutę.

Tyrimų objektas

Orlaivio propelerio skaitinė ir fizinė analizė

Tikslas

Sumažinti orlaivio propelerio skleidžiamą triukšmą, ištirti kurie parametrai turi daugiausiai įtakos orlaivio propelerio garsui, juos optimizuoti.

Darbo uždaviniai

1. Atlikti mokslinės literatūros, susijusios su darbo tema, analizę.
2. Baigtinių tūrių metodu ištirti priežastis ir parametrus turinčius įtakos orlaivio propelerio triukšmui.
3. Atlikti propelerių geometrijos pakeitimus pagal nustatytus metodus literatūros analizėje.
4. Propelerius su pakeista geometrija ištirti taikant baigtinių tūrių metodą ir atlikti fizinius eksperimentus.
5. Pateikti darbo išvadas ir rekomendacijas.

Taikoma metodika

Orlaivio propelerio mentės triukšmo mažinimas naudojant *CFX*, *FLUENT*, baigtiniai tūrius, eksperimentinį bandymą.

1. MOKSLO DARBUOSE TAIKOMI TRIUKŠMO MAŽINIMO BŪDAI

1.1 Garsas ir jo supratimas

Triukšmas apibrėžiamas kaip nepageidaujamas garsas (Hede & Bullen, 1981). Garsas (arba triukšmas) yra slėgio variacijų arba svyravimų rezultatas, elastinėje terpėje (oras, vanduo, kietieji kūnai), sukuriamas vibruojančių paviršių arba turbulentinio skysčių aptekėjimo (Hansen, 2001). Kadangi garsas ir triukšmas yra tas pats slėgio svyravimų reiškinys, vienam žmogui tai gali būti garsas, o kitam žmogui tai gali būti triukšmas (Hansen, 2001). Visas garsas, sklindantis iš orlaivio, tyrimo metu yra laikomas kaip triukšmas.

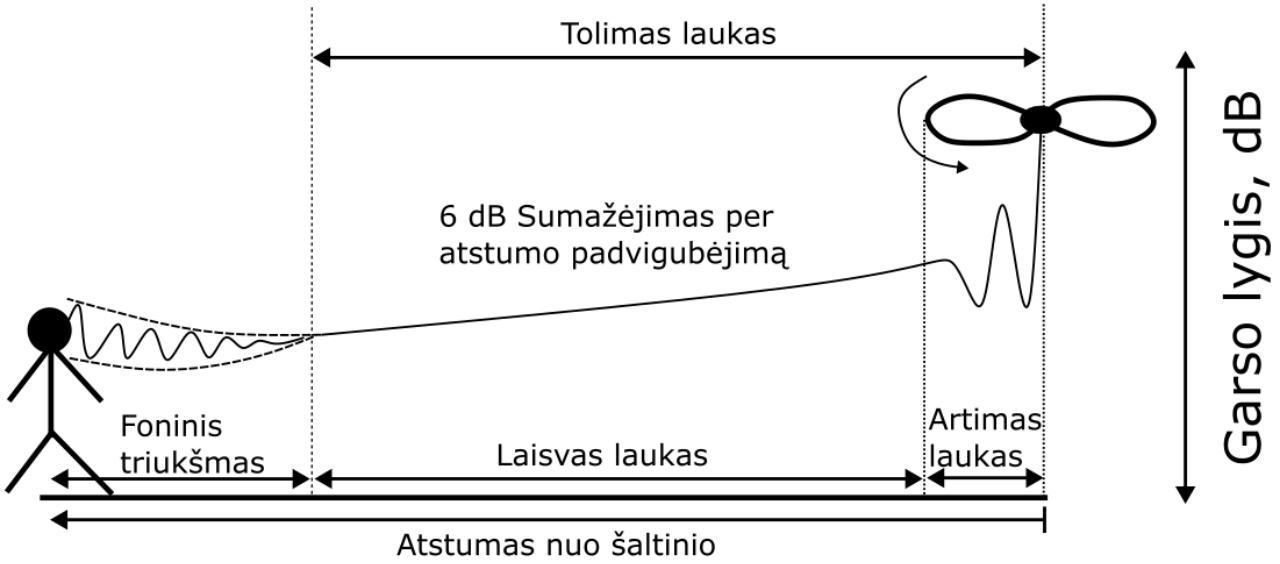
Žmogus jaučia garsą tarp 0 dB ir 140 dB, o girdėjimo dažnis teoriškai yra tarp 20 Hz ir 20000 Hz, teoriškai žmogaus ausis geriausiai girdi tarp 500 Hz ir 5000 Hz (Hansen, 2001). Literatūroje yra išskiriami 3 pagrindiniai garso laukai (1.1 pav.):

Artimas laukas – tai garso laukas, esantis arti garso šaltinio, jo dydis yra atstumas nuo šaltinio iki vieno bangos ilgio arba tris kartus didesnis už didžiausią garso šaltinio matmenį (Hansen, 2001).

Laisvas laukas – jame garsas sklinda laisvai ir pasiskirsto tolygiai. Garso lygis šiame lauke sumažėja maždaug kas 6 dB po kiekvieno esamo atstumo padvigubėjimo, iki kol yra pasiekiamas bendras aplinkos garsas (Ray, 2010).

Tolimas laukas – apibrėžia lauką, kur garso bangos yra stabilios ir sklinda tolygiai, šio lauko dažnis priklausomas ir dažniausiai yra nuo dviejų iki keturių pagrindinių šaltinio matmenų (plotis ir aukštis žiūrint į šaltinį) nuo triukšmo šaltinio (Ray, 2010).

Oktavų juostų būdas yra vienas iš būdų nagrinėti kylantį triukšmą. Visas girdimas dažnių



1.1 pav. Garso laukas ir jo regionai (sudaryta autoriaus pagal Ray, 2010)

spektras gali būti padalijamas į 8 arba 24 dažnių juostas (Veggeberg, 2008). Nors tiksliausias šaltinis nagrinėti suprantamą garsą yra žmogaus ausis, 1/3 oktavų juostos būdas yra artimiausias

žmogiškajam garso supratimui (Veggeberg, 2008). Naudojant oktavų juostas yra galimybė skirtingų dažnių triukšmus suskirstyti ir išrinkti mums aktualiausią nagrinėjimui.

1.1 lentelė. Oktavų ir vienos trečiosios oktavų centro dažniai (Veggeberg, 2008)

ISO Juostos numeris	Oktavų juostos centras (Hz)	1/3 Oktavos juostos centras (Hz)
11,12,13	16	12.5, 16, 20
14,15,16	31.5	25, 31, 40
17,18,19	63	50, 63, 80
20,21,22	125	100, 125, 160
23,24,25	250	200, 250, 315
26,27,28	500	400, 500, 630
29,30,31	1000	800, 1000, 1250
32,33,34	2000	1600, 2000, 2500
35,36,37	4000	3150, 4000, 5000
38,39,40	8000	6300, 8000, 10000
41,42,43	16000	12 500, 16 000, 20 000

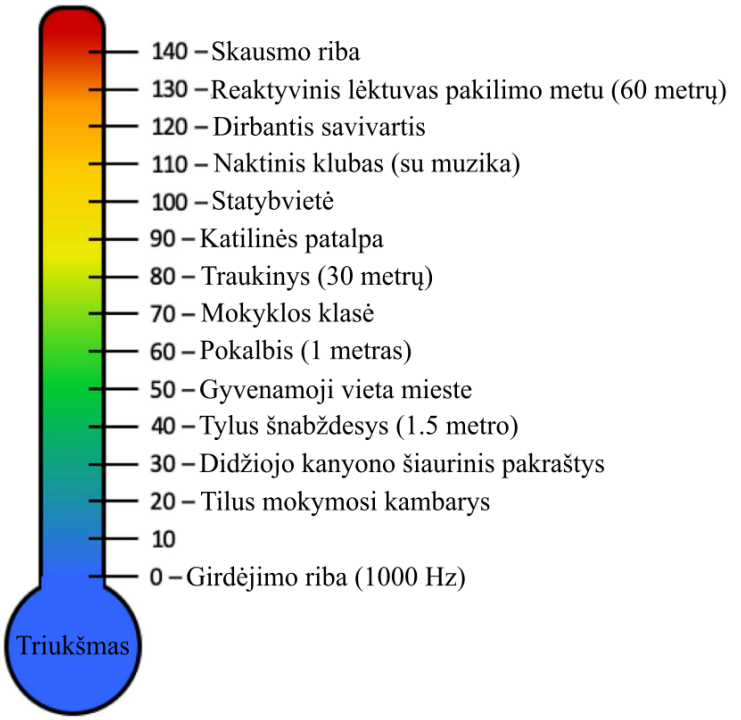
Propelerių keliamas garsas yra didelė problema, augant dronų ir orlaivių su propeleriais rinkai ir paklausai. Viena iš jų yra triukšmo tarša, kuri kenkia žmonių sveikatai ir žaloja aplinką bei gamtą. Propelerių gamintojai stengiasi gaminti kiek įmanoma efektyvesnius propelerius, o triukšmas, keliamas iš orlaivių, yra dažniausiai ties leidžiamais tarptautiniais limitais.

DHC-8 orlaivio reikalavimai Europos sertifikuotojo (EASA.IM.A.191, 2022) parodo, kad maksimalus triukšmas, kylantis iš orlaivio pakilimo metu, yra 94 EPNdB, nusileidimo metu 98 EPNdB. Tarptautinė civilinės aviacijos organizacijos (ICAO Annex 16 volume 1, 2008) rekomendavimu, maksimalaus pakilimo svorio (34000 kg) orlaivių pagamintų iki 1985 metų, maksimalus triukšmas nusileidimo metu neturėtų būti didesnis nei 98 EPNdB ir 96 EPNdB kilimo metu.

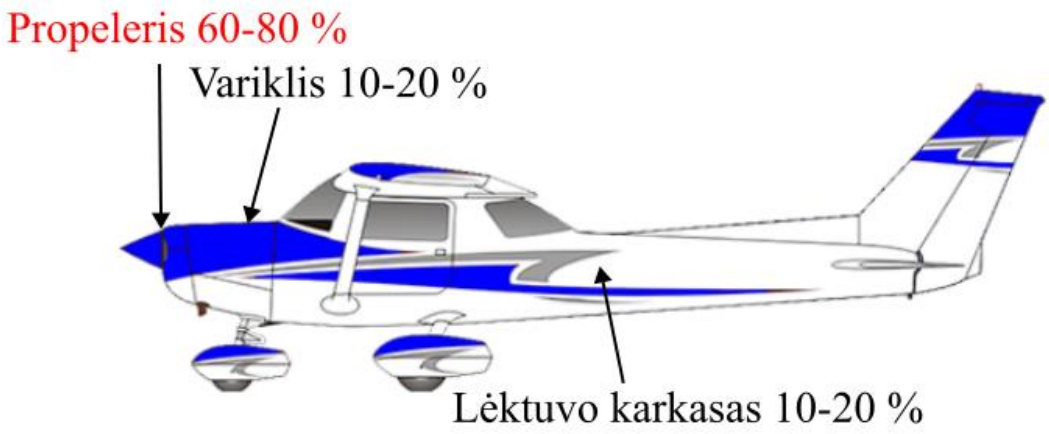
Nusileidimo metu Europos sertifikuotojas yra sugriežtinęs triukšmo lygį nusileidimo metu 2 EPNdB. Orlaivis, kuris leidžiasi, dažniausiai naudoja tik dalį savo variklio, vadinasi, pagrindinis triukšmas kyla iš propelerių. Jeigu šie reikalavimai būtų sugriežtinti ir toliau, galimybė eksploatuoti orlaivį galėtų būti labai sumažinta.

Triukšmas daro didelį neigiamą poveikį žmonių sveikatai, pagal (Ising & Kruppa, 2004), triukšmas, kuris išgirstamas, yra išskirstomas, kaip neuronus aktyvuojantis ir suvokiamas. Suvokiamas triukšmas yra juntamas miegant, arba pasyviai klausantis. Ilgalaikis triukšmo poveikis sukelia daugybę sveikatos problemų, tokių kaip trumpalaikės atminties praradimas, stresas, klausos

suprastėjimas, kraujagyslių ir širdies ligos, kognityvinių įgūdžių suprastėjimas, psichologinės sveikatos problemos. Šie negatyvūs triukšmo aspektai įvyksta nepriklausomai nuo amžiaus ar kognityvinių sugebėjimų. Triukšmo skalė bendru garso slėgio lygiu pavaizduota 1.2 pav.



1.2 pav. Triukšmo skalė (dBA) (Hutchinson, Du & Ahmad, 2020)



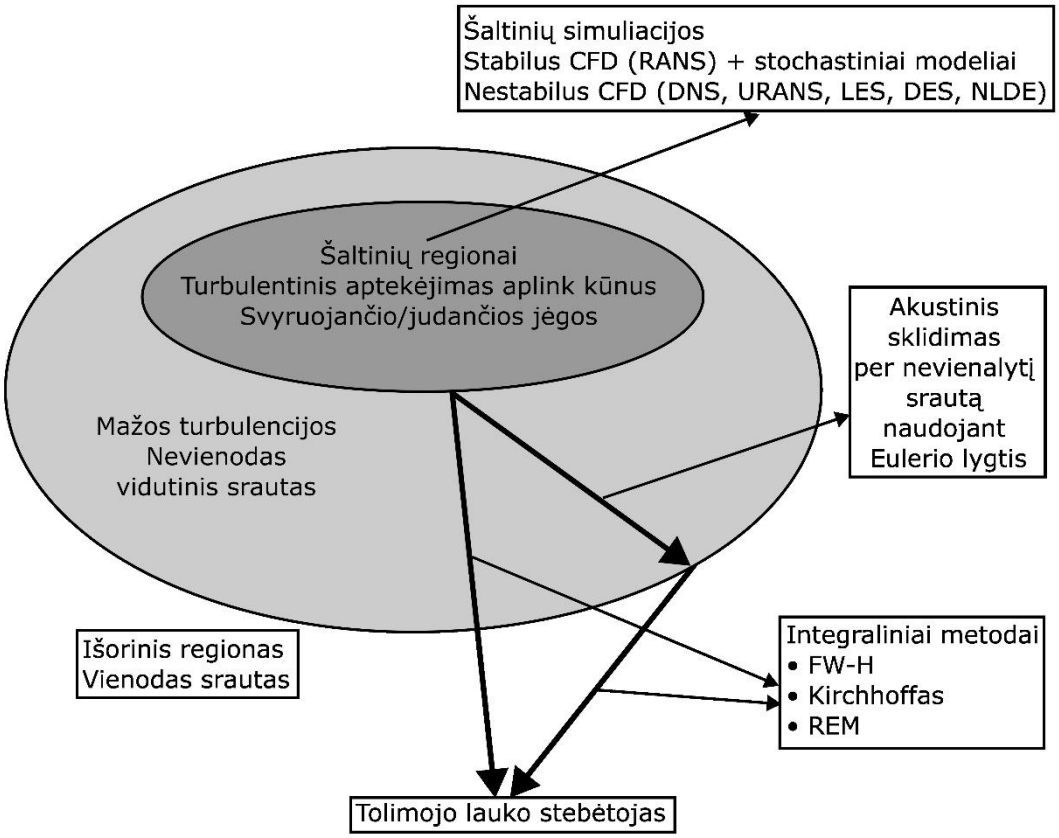
1.3 pav. Orlaivio triukšmo šaltiniai (sudaryta autoriaus, 2025)

Orlaivio sukeliamas triukšmas procentais, pagal Oerlemans (2009), ir Smith (1989), rodo, kad orlaivyje susidarantis triukšmas yra labiausiai girdimas ties varikliu ir propeleriais ir sudaro apie 60–80 %, viso triukšmo kurį sukelia orlaivis (1.3 pav.), likęs triukšmas atsiranda dėl variklio ir jo išmetamųjų dujų, ir lėktuvo karkaso kuris sudaro triukšmą dėl jam kylančių apkrovų ir oro srauto aptekėjimo.

1.2 Kompiuterinė aeroakustika

Kompiuterinė aeroakustika yra mokslo sritis, kuri nagrinėja garsus, kylančius iš orlaivio komponentų, taikant baigtinių elementų metodus garsui ištirti. Visi aeroakustiniai mechanizmai, susiję su fizikos fluidų dinamika, ir teoriškai gali būti išsprendžiami naudojant Navier-Stokes lygtis, nuo triukšmo, sklindančio šalia garso šaltinio, iki triukšmo, suprantamo iš klausytojo, esančio toliau nuo garso šaltinio (Manoha et al., 2010). Naudojant kompiuterinę aeroakustiką yra galimybė ištestuoti įvairių orlaivio komponentų parametrus ir jas veikiančias jėgas nesukuriant realaus propelerio modelio taip taupant resursus ir laiką, galimybė tirti sistemas, kurių eksperimentai būtų sudėtingi arba neįmanomi (pvz., labai didelių sistemų), ir turėti praktiškai neribotą detalumo lygį (Versteeg-Malalasekera, 1995).

Yra du pagrindiniai būdai triukšmui, kurį sukelia propeleris, apskaičiuoti. Pirmasis yra naudojant tiesiogines skaitines simuliacijas, išreikštas iš Navier-Stokes lygčių, kurios aprašo skysčių tekėjimą, tai leidžia apskaičiuoti aptekėjimo parametrus ir taip išreikšti triukšmą (Yao et al., 2022), šis būdas reikalauja daug kompiuterinių resursų ir laiko, todėl dažniausiai nerekomenduojamas.



1.4 pav. Mišrūs metodai skaitinėms simuliacijoms, aeroakustinių mechanizmų atsiradimui ir sklidimui (Manoha, Redonnet & Caro, 2010)

Antrasis būdas būtų mišrusis metodas, kai aptekėjimas ir akustiniai parametrai yra skaičiuojami skirtingomis lygtimis ir skaitinėmis technikomis, pirma panaudojant BEM, tada suvedant parametrus į akustinį sprendiklį (Yao et al., 2022).

Mišriojo metodo taikymas yra dažnesnis kompiuterinėje aeroakustikoje dėl fizinių parametrų, tokių kaip tankis, greitis, slėgis išskirstymo į aerodinaminius kintamuosius (skaitiškai išsprendžiamus naudojant tradicinius baigtinius tūrius) ir aeroakustinius kintamuosius, kuriuos galima apskaičiuoti naudojant aerodinamines skaičiuokles (1.4 pav.) (Manoha et al., 2010).

Daugeliu praktinių atvejų aerodinaminis laukas bus laikomas laikui nepriklausomu, tai reiškia, kad taikymo požiūriu paprasčiausiai nebus atsižvelgta į galimą akustinių bangų grįžtamąją reakciją į aerodinaminį lauką (Manoha et al., 2010).

BEM programa *Ansys Fluent* turi galimybę nagrinėti aeroakustines problemas naudojant keturis skirtingus modelius. Pirmasis naudojant pirmąjį būdą ir skaičiuojant tiesiogiai iš Navier-Stokes ir RANS, pagal *Ansys Fluent* naudojimo instrukcijas, šis metodas būtų tinkamas vietiniam triukšmui susidarančiam šalia propelerio, nustatyti ir nustatant hidrodiniamį slėgiui nustaatyti. Tačiau šis būdas neleidžia simuliuoti rezonanso ir grįžtamojo ryšio fenomenų (Baker, 2024). Kiti trys metodai naudoja mišrius metodus akustiniams parametrams apskaičiuoti.

Antrasis metodas būtų naudojant FW-H integralus, kurie yra pagrįsti Li‘s akustine analogija (Williams & Hawkings, 1969). Šio metodo artimojo lauko garsas yra apskaičiuojamas iš URANS formulių, LES simuliacijų arba hibridinio RANS-LES modelių priklausomai nuo pasirinkto aptekėjimo ir savybių, kurios yra norimos skaičiuoti. *Ansys Fluent* yra naudingas, kad turi galimybę pasirinkti kelis šaltinių paviršius ir imtuvus, ir atlikti akustinius skaičiavimus kartu su aptekėjimo skaičiavimais. Garso signalai gali būti gaunami naudojant FFT ir suteikia galimybių gauti garso slėgio lygį ir galios spektrą (Baker, 2024).

Trečiasis metodas yra pagal bangų formulę ir yra hibridinis metodas, skirtas simuliuoti mažo Macho greičio aptekėjimus, nespūdus aptekėjimo modelis naudojamas garso šaltiniams apskaičiuoti, o garso sklidimui naudojama diferencialinė bangų lygtis. *Ansys Fluent* naudoja akustines perturbacijos lygtis pagal prielaidą, kad aptekėjimas yra pastovaus tankio (Ewert & Schröder, 2004). Šio metodo privalumai yra paprastesnis hibridinių aeroakustinių simuliacijų dėl to, nes simuliacijos aptekėjimas ir garso sklidimas naudoja tą pačią aplinką ir tinklelį (Baker, 2024).

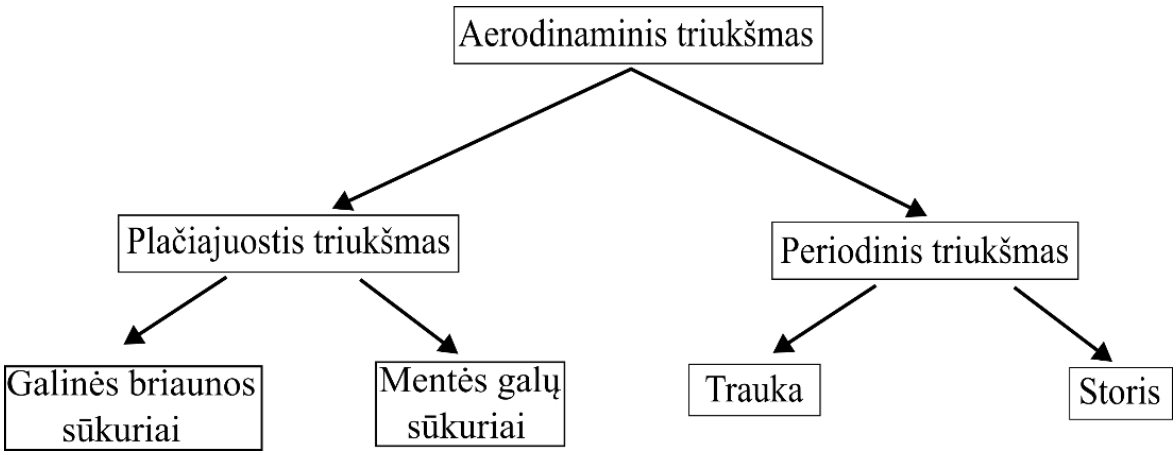
Ketvirtasis metodas yra naudojamas su plačiajuosčio triukšmo šaltinio modeliais ir yra skirtas turbulentinio aptekėjimo triukšmo skaičiavimams, kadangi triukšmas neturi išskirtinių tonų, ir garso energija nuolat pasiskirsto skirtinguose dažniuose. Programa naudojama Proudman‘s formulė, reaktyvinio triukšmo šaltinio modelis, šaltinio sąlygos linijinėse Eulerio lygtyse ir šaltinio sąlygos Lilley’s lygtyse. Naudojantis šaltinio modeliais, galima sužinoti tikslius parametrus, sukeliančius triukšmą, tačiau šie modeliai nenuspėja garsų ties imtuvu. Šio modelio privalumas yra tai, kad jam nereikalinga sueitis su skysčių dinamikos lygtimis ir reikalingas tik tipinis RANS modelis. Šis modelis yra naudingas norint įvertinti skirtumus tarp eksperimentinio ir skaitinio tyrimo. Tai parodytų

vidutinį greičio lauką, turbulentinę kinetinę energiją (k) ir išsisklaidymo greitį. Šis metodas taip pat reikalauja mažiausiai kompiuterio resursų (Baker, 2024).

Priklausomai nuo tiriamo propelerio triukšmo tipo galima vykdyti įvairias simuliacijas, taikant literatūroje naudojamus triukšmo mažinimo principus, taip vykdant tyrimą naudojant baigtinius tūrius.

1.3 Triukšmo tipai ir priežastis

Aerodinaminis triukšmas gali būti nusakomas kaip garsas, kuris atsiranda tiesiogiai dėl kieto kūno judėjimo aplink skystą terpę (Marte & Kurtz, 1970). Judėjimas vyksta fluidų aplinkoje. Orlaivio propelerio triukšmas gali būti tiriamas baigtinių elementų metodais.



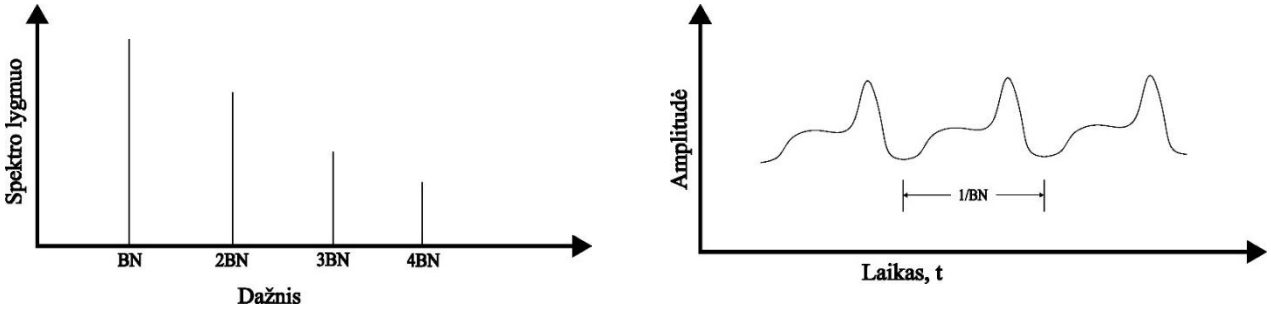
1.5 pav. Aerodinaminio triukšmo tipai (sudaryta autoriaus pagal Marte and Kurtz, 1970)

Aerodinaminis triukšmas yra skirstomas į plačiajuostį (angl. *Broadband*) ir toninį / periodinį (angl. *Tonal/Periodic*) (1.5 pav.). Kadangi triukšmas skaičiuojamas logaritmiškai, net ir kelių decibelų pokytis gali lemti didelį triukšmo sumažėjimą.

1.3.1 Periodinis triukšmas

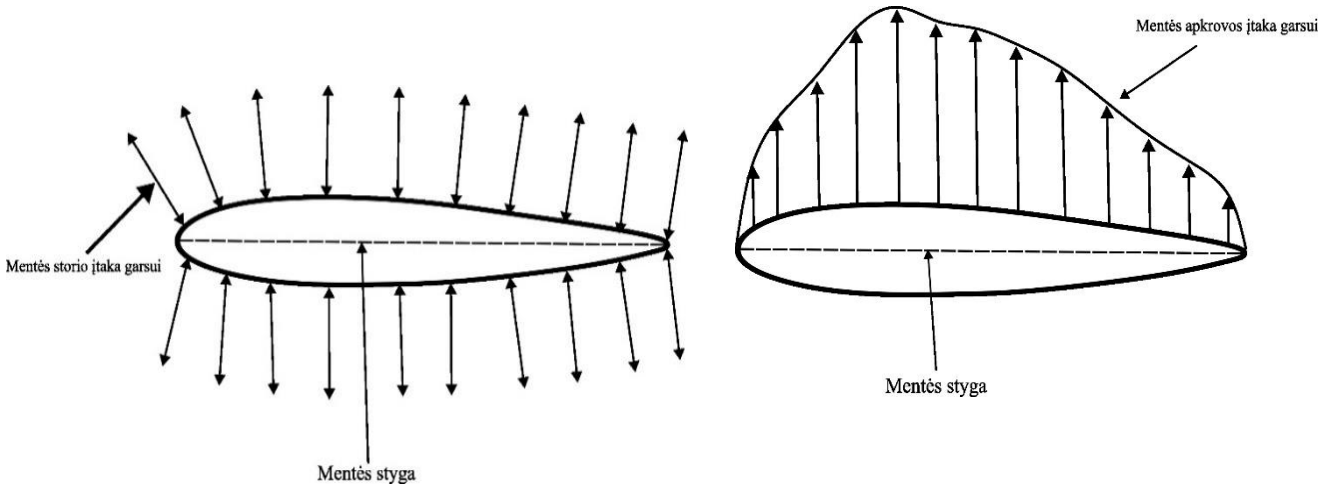
Periodinis triukšmas yra visas garsas, kuris atskiriamas pagal dažnius, atsirandančius harmonikose propelerio mentės prasisukimo metu (menčių kiekis padaugintas iš apsisukimo dažnio) (Made & Kurtz, 1970).

Šio triukšmo laiko charakteristiką galima pavaizduoti impulse, kuris kartojasi pastoviu dažniu. Jeigu idealus propeleris su *B* menčių veikia pastoviame greityje *N*, atsirandantis propelerio garsas bus dažnis *BN*. Mentės apsisukimo periodas yra *1/BN*. Atsirandantis impulsas nėra visiškai sinusoidinis, dėl to atsiranda daug harmonikų. Pirma harmonika pagrindinė, antra harmonika atsiranda dvigubai pagrindinio dažnio (1.6 pav.) (Hubbard, 1991).



1.6 pav. Propelerio periodinio triukšmo charakteristikos (sudaryta pagal Hubbard, 1991)

Periodinis triukšmas (1.7 pav.) ikigarsiniame greityje menčių galuose turi du pagrindinius komponentus: apkrovos ir storio triukšmas. Propeleris, kuris sukasi, turi slėgio pasiskirstymą, kuris yra pastovus propelerio rėmuose ir sukasi kartu su propeleriu. Klausytojui propelerio fazės skiriasi dėl propelerio sukimosi. Garsas, sukuriamas šios svyruojančios jėgos slėgio lauko, yra vadinamas apkrovos triukšmu, kuris dažniausiai būna dvipolis.



1.7 pav. Periodinio triukšmo komponentai: kairėje – mentės storio sukuriamas triukšmas: dešinėje – menčių apkrovos sukuriamas triukšmas (sudaryta pagal Akiwate et al., 2021)

Propelerio mentės apibrėžtas storis judina oro elementą, sukantį diską ties mentės praleidimo dažniu (angl. *Blade passing frequency*), šis procesas yra vienpolis. Esant lėtam propelerio greičiui apkrovos triukšmas yra didesnis negu storio triukšmas. Esant dideliam mentės galų greičiui, storio garsas tampa svarbesnis. Kai yra artimas garso greitis (angl. *transonic*), ir trečias kvadrapolinis triukšmas patampa svarbus (Akiwate et al., 2021).

Teorinis Gutino darbas buvo supaprastintas iki tinkamos formos inžineriniam panaudojimui (Marte & Kurtz, 1970), iš kurios gaunama periodinio triukšmo formulė:

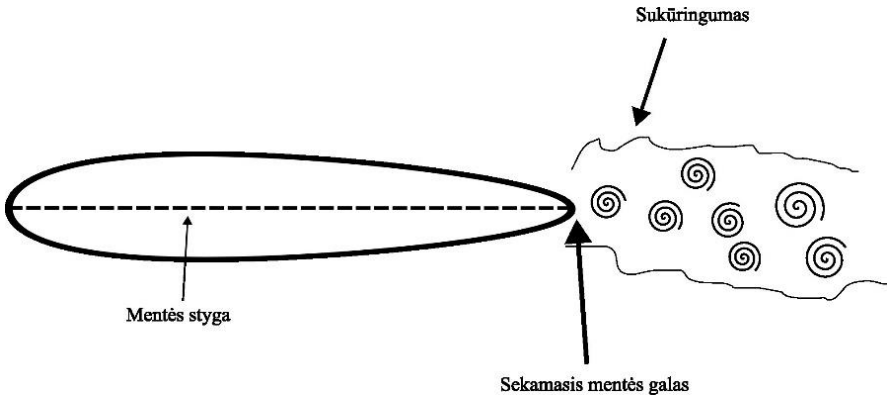
$$p_m = \frac{169.3mBRM_t}{SA}\left[\frac{0.76P_h}{M_t^2} - Tcos\theta\right]J_{mB}(x) \quad (1.1)$$

Čia: p – garso slėgio lygis (SPL) *dynes/cm^2*, m – harmonijos eilės tvarka, S – atstumas nuo propelerio stebulės iki stebėtojo, *ft*, R – propelerio spindulys, *ft*, A – propelerio disko plotas, ft^2, T – trauka, *lb*, B – menčių kiekis, M_t – menčių galų macho skaičius, J_{mB} – besselio laipsnio funkcija mB, x – beselio funkcijos argumentas 0.8 $M_t mB \sin 0$, θ – kampas nuo priekinės ašies iki stebėtojo.

Formulė pagrįsta įprasto propelerio, kuris sukasi vidutiniais greičiais, pirmomis harmonikomis. Tokiomis aplinkybėmis pirmiau minėtos išraiškos sprendinių kvadratinių šaknų sumos suma m = 1,2,3,4 duos tinkamą, apytikslį, traukos ir sukimo momento komponentų bendro garso slėgį (Marte & Kurtz, 1970).

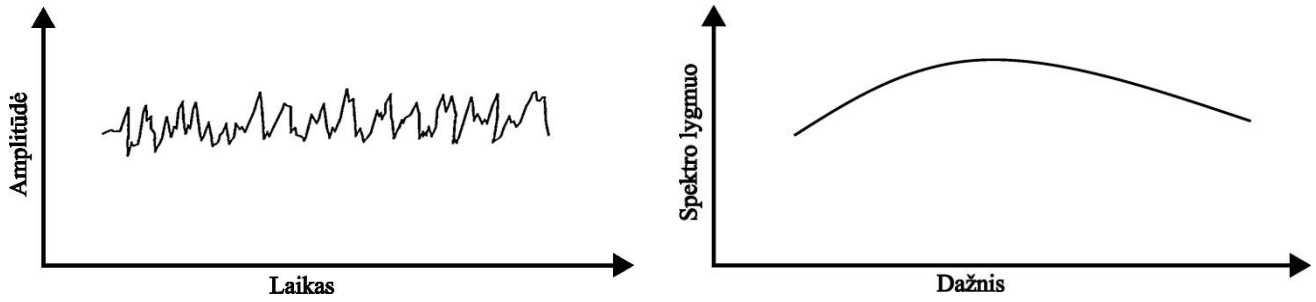
1.3.2 Plačiajuostis triukšmas

Plačiajuostis triukšmas (1.8 pav.) propeleryje yra triukšmas, atsirandantis dėl turbulentinio sluoksnio sąveikos su rotoriaus mentės sukamuoju galu. Tonai skamba propelerio profilio harmonikų dažniuose, šis triukšmas turi didesnį spektrą (Akiwate et al., 2021).



1.8 pav. Plačiajuosčio triukšmo komponentai (sudaryta pagal Akiwate et al., 2021)

Plačiajuostis triukšmas yra atsitiktinis pagal tai, kaip atsiranda ir turi visų dažnių komponentus (1.9 pav.). Dažnių spektras yra nuolatinis, tačiau gali būti ‘forma‘ šiam spektrui dėl to, nes ne visi dažniai turi tokią pačią amplitudę.



1.9 pav. Plačiajuosčio triukšmo charakteristikos (sudaryta pagal Hubbard, 1991)

Formulė, kuri buvo sukurta Hubbard (1991), yra dažniausiai naudojama apskaičiuoti sūkurio (angl. *Vortex*) garsą, atsižvelgiant į garso slėgio lygį.

$$SPL = 10log\frac{kA_b(V_{0.7})^6}{10^{-16}}\ (dB\ at\ 300\ ft\ ) \qquad (1.2)$$

Čia: $\mathrm{k} -$ proporcianalumo konstanta, $\mathrm{A_b} -$ propelerio mentės plotas, $\mathrm{V_{0.7}} -$ greitis ties 0.7 skersmeniu, SPL – garso slėgio lygis.

Literatūroje nagrinėjamo plačiajuosčio triukšmo labiausiai išskiriamas parametras yra sūkuringumas (angl. *Vorticity*). Kadangi plačiajuostis triukšmas susidaro iš sukūrių, kurie atsiranda mentei sukantis, tai išnagrinėti yra aktualu.

Yu et al. (2020), atliko orlaivio propelerio aerodinaminių ir aeroakustinių parametrų optimizaciją. Pirma buvo sukurtas geometrinės deformacijos modelis kontrolei. Antra, norint gauti pavyzdžius, yra atliekama lotyniškojo hyperkubo atranka (angl. *Latin hypercube sampling*) ir sukuriamas dinaminis tinklelis. Propelerio modelis ir duomenys buvo paiimti iš minėtų autorių.

Kadangi nenorima gadinti propelerio aerodinaminių savybių, propelerio skerspjūvio ilgis nėra keičiamas, storis keičiamas ne daugiau nei 15 %, galinės mentės storis taip pat nebuvo keičiamas. Autorių pasirinktas optimizavimo parametras buvo sūkuringumas. Optimizacijai buvo pasirinktas formos optimizacijos metodas. Bendra propelerio garso spektrinė tankio funkcija apskaičiuojama pagal visas kampines B propelerio menčių padėtis darant prielaidą, kad juostiniai šaltiniai yra visiškai nesusiję.

$$S_{pp}(x,\omega) = \frac{B}{2\pi}\int_0^{2\pi}\frac{\omega_e(\psi)}{\omega}S_{pp}^{\Psi}(x,\omega_e)d\psi \qquad (1.3)$$

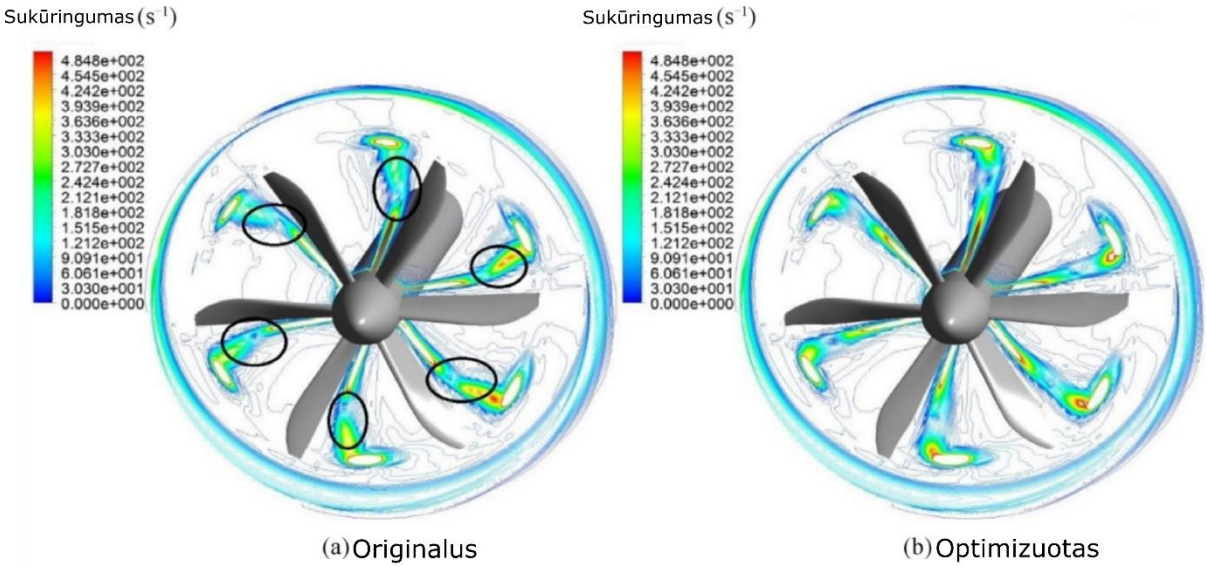
Po tolimojo triukšmo spektro funkcijos, ji yra paverčiama į garso slėgio spektrinę funkciją naudojant šią formulę:

$$\boldsymbol{SPL}(x,\omega) = 10\lg\left(\frac{4S_{pp}(x,\omega)}{4.10^{-10}}\right) \quad (1.4)$$

Čia: $\omega_e(\psi)$ – pataisymo dažnis, S_{pp} – spektrinis tankis.

Parinktas profilis buvo NACA0012 su stygos ilgiu 0,6096 m, mentės ilgiu 0,46 m, aptekėjimo greitis 69,5 m/s ir 38,6 m/s

Pagrindinis skirtumas, kuris yra išskiriamas tyrime tarp originalaus propelerio ir optimizuoto, yra stygos ilgis ir apkrovos pasiskirstymas stygoje. Didžiausias Yu et al (2020), išskiriamas skirtumas tarp propelerių yra stygos pasiskirstymas.



1.10 pav. Originalaus ir optimizuoto propelerio sūkuringumo pasiskirstymo palyginimas (Yu et al., 2020)

Optimizuotas propeleris turi mažiau sūkuringumo (1.10 pav.). Apskaičiuotos garso slėgio vertės parodo garso sumažėjimą 5 dB. Vidutinis bendras garso slėgis nukrito iš 83,30 dB iki 78,23 dB, maksimalus bendras garso slėgis iš 80,08 dB iki 75,13 dB, efektyvumas neturėjo didelių pokyčių, kaip ir traukos koeficientas (Yu et al., 2020). Šis tyrimas mums leidžia suprasti, kad plačiajuostis triukšmas gali būti sumažintas naudojant sūkuringumą, kaip parametrą ir mažinant jį, siekiant sumažinti bendrą orlaivio propelerio triukšmą.

Kadangi dauguma šaltinių nagrinėja sūkurius yra svarbu į juos atkreipti dėmesį. Pagal Powell, (1995), nehomogeninės bangos lygtį slėgio trikdžiams galima užrašyti:

$$\blacksquare^2 p = -\frac{\partial^2(\rho u_i u_j)}{\partial y_i \partial y_j} \quad (1.5)$$

Čia $\blacksquare = [\frac{\partial^2}{\partial_i^2} - \frac{\left(\frac{1}{c^2}\right)d^2}{\partial t^2}]$ – d'Alemberto bangų operatorius, c – garso greitis, ρ – skysčio tankis ir u_i yra i-krypties greitis (i=1,2 arba 3)

Šią lygtį galima pasiversti į

$$\blacksquare^2 p = -\frac{\rho\partial}{\partial y_j\left\{u_j\zeta_{ji} + \frac{\partial}{\partial y_i\left(\frac{u^2}{2}\right)}\right\}} \tag{1.6}$$

Čia $\zeta_{ji} = \frac{\partial u_i}{\partial y_j} - \frac{\partial u_j}{\partial y_i}$ yra sūkuringumas, išraiška pirmą kartą panaudota Powell (1961b), alternatyva šiai formulei yra:

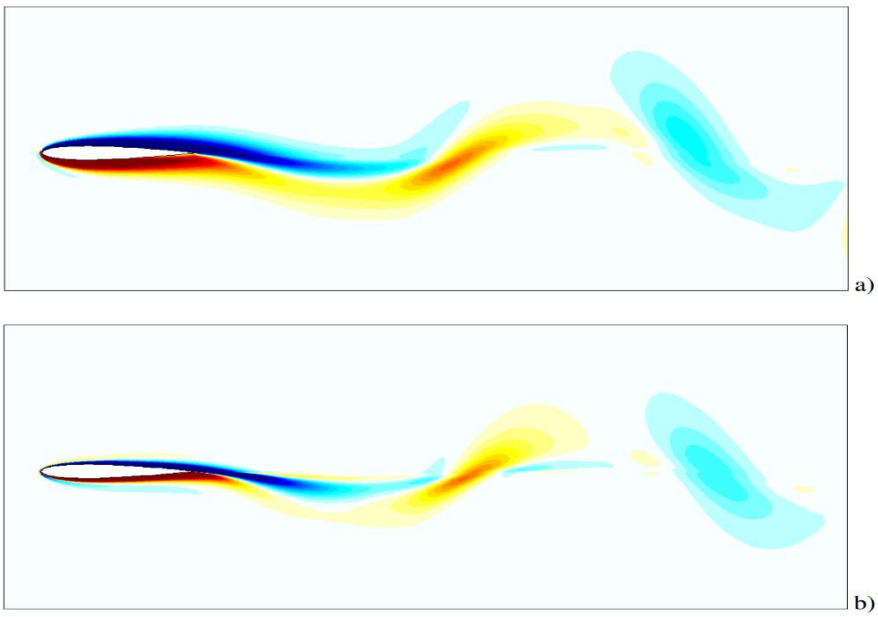
$$\blacksquare^2 p = \rho\nabla * \left\{(u_\wedge\zeta) - \nabla\left(\frac{u^2}{2}\right)\right\} \tag{1.7}$$

Kur sūkuringumas pagal Powell (1995), ir aprašomas

$$\zeta = curl\, u = \nabla_\wedge \quad u \tag{1.8}$$

Divergentinis šaltinio narys sukuria pagrindinį dipolinį lauką ir pateikia labai svarbų rezultatą: jeigu nėra sūkurio – nėra ir garso (Powell, 1995).

Svarbus sūkuringumo elementas yra išskiriamas Russo et al. (2018), kur atliktas tyrimas parodė, kad sūkuringumas gali priklausyti nuo Reinoldso skaičių (1.11 pav.).

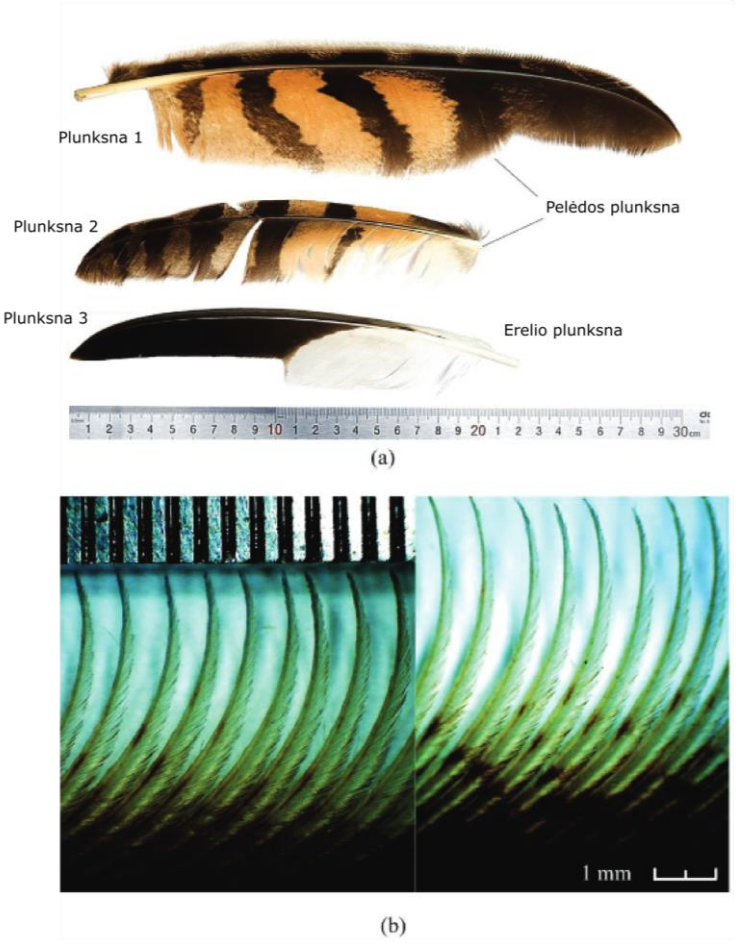


1.11 pav. Sūkuringumo laukai esant skirtingiems Reinoldso skaičiam:
a) $\boldsymbol{R_{e\infty} = 10^3}$, b) $\boldsymbol{R_{e\infty} = 2 * 10^4}$ (Russo, Ostieri & Tognaccini, 2018)

Reinoldso skaičių padidėjimo metu traukos koeficientas padidėja, galios koeficientas sumažėja arba įvyksta abu (Deters et al., 2014). Tai leidžia daryti prielaidą, kad mažinant sūkuringumą, didėtų ir efektyvi propelerio trauka.

1.4 Propelerio triukšmo mažinimo būdai

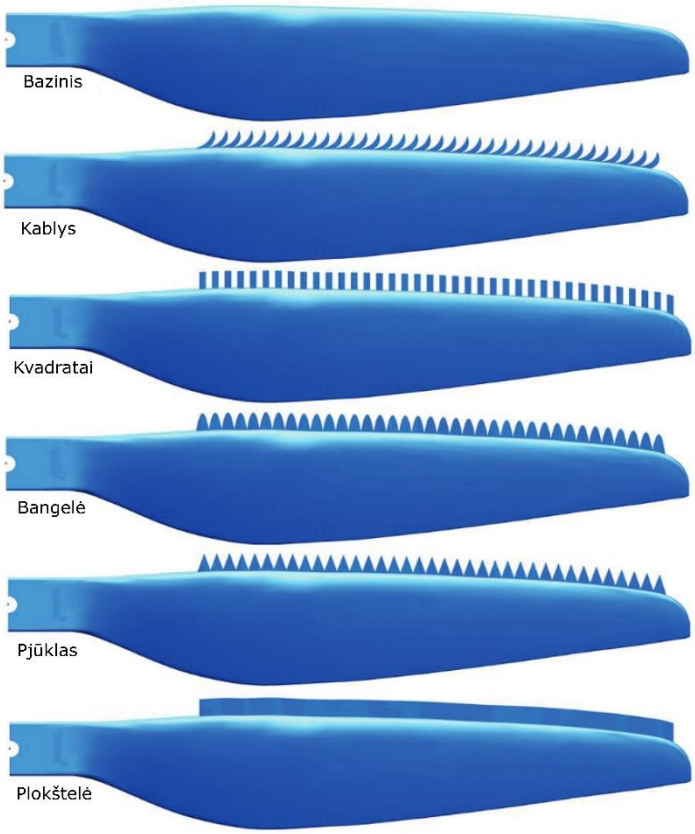
Daugiau nei 80 metų vienas iš pagrindinių įkvėpimo šaltinių mokslininkams yra gamtos tyliausias skraidytojas – pelėda (Jaworski & Peake, 2020). Pelėdos skrydis yra labai tylus dėl jos plunksnų priekinių ir galinių galūnių unikalios geometrijos. Nors buvo atlikta daug tyrimų studijuojant pelėdų sparnų priekį, dizainų, taikytų propelerių triukšmu mažinti, nėra daug (Wei et al., 2020). Pelėdos sparnų priekis unikalus savo kablio forma (1.12 pav.), palyginus su erelio plunksna, kuri yra lygi, (a) palyginimas devintos ir dešimtos pelėdos plunksnų su erelio plunksna, (b) su mikronų kamera nufotografuotas priekinis pelėdos plunksnos galas, rodantis 0,5 mm tarpus tarp plunksnų.



1.12 pav. (a) Erelio ir pelėdos plunksnų palyginimas;
(b) Pelėdos plunksnos priekis iš arti (Wei et al., 2020)

Wei et al. (2020) tyrimas, kuriame buvo atlikta priekinės propelerio briaunos analizė ir įtaka garsui, nustatė tinkamiausius priekinės briaunos formos tipus propelerio garsui ir traukai. Autoriai pasirinko atlikti BEM ir realius tyrimus. BEM tyrime buvo panaudotos stabilios RANS formulės ir $k-\omega$ šlyties įtempių pernešimo turbulencijos modeliai. Propelerio priekiui buvo parinkti 6 skirtingi pjūviai (1.13 pav.) ir pridėti prie P17 x 5,9 propelerio.

Autorių atlikta simuliacija parodė, kad plokštelės pridėjimas sudarė didžiausią traukos kiekį 4,88 %, lyginant su baziniu propeleriu, tačiau padidino triukšmą, pjūklo tipo propelerio priekis buvo 3,53 %, didesnis palyginus su pradiniu propeleriu. Kvadratų formos ir bangelės formos trauka buvo 3,27 %, ir 3,06 %, kablio formos propeleris nors ir būdamas panašiausias į pelėdos sparną, prarado 3,51 % savo traukos.



1.13 pav. Sraigto formos įtakos triukšmui vertinimas (Wei et al., 2020)

Tyrimas taip pat parodė, kad garso sumažėjimas kablio formos propeleryje yra vidutiniškai 1,04 dB ir 2,27 dB didžiausias. Didžiausias sumažėjimas įvyko pjūklo formos propeleryje, kuriame didžiausias buvo 4,18 dB ir vidutinis 2,43 dB (Wei et al., 2020).

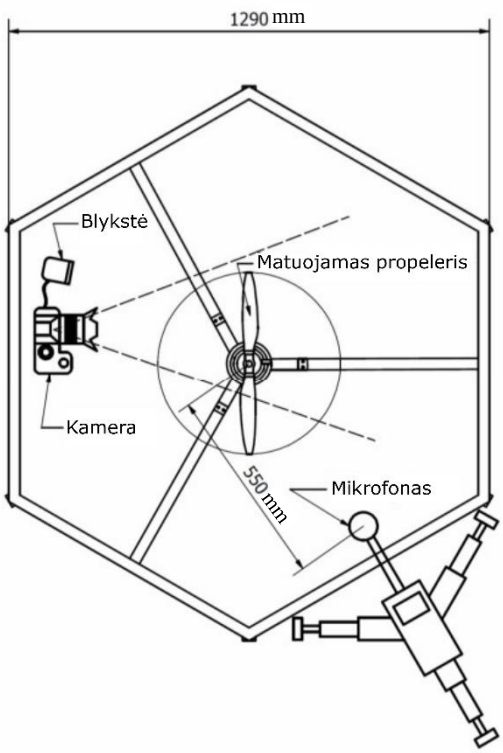
Kadangi yra matomas traukos ir garso ryšis, yra būtina išskirti pagrindinius parametrus, kurie daro įtaką traukai. Kadangi propeleris veikia pagal trečiąjį Niutono dėsnį, kiekvienas veiksmas turi atoveiksmį – propelerio trauka priklauso nuo masės (propelerio atveju – oro) pratekėjimo pro propelerį ir greičio pasikeitimų per traukos sistemą (Spakovszky, 2007).

Pagal Spakovszky (2007) pagrindiniai parametrai paveikiantys propelerio efektyvumą, yra: tankis – oro tankis, kuriame yra naudojamas propeleris. Didesnis tankis – didesnis ir efektyvumas.

Kalbant apie propelerio sukimosi greitį, kuo didesnis greitis – tuo didesnis propelerio efektyvumas. Tačiau tai galioja tik iki garso greičio ribos. Pasiekus garso greičio ribą, greičio efektyvumas yra prarandamas.

Kalbant apie paviršiaus plotą – didelis propelerio skersmuo ir propelerio menčių kiekis didina efektyvumą. Problema yra, kad didinant iki tam tikro kiekio yra pasiekiamas garso greitis menčių galuose.

Atliktas realus eksperimentas Štorch et al. (2016), kuriame buvo stengiamasi rasti sąryšį tarp triukšmo, našumo ir geometrijos mažų orlaivių propelerių. Pagrindiniai autorių pasirinkti propelerio parametrai yra jo skersmuo ir propelerio žingsnis, kuris efektyviausias esant 70 %, viso propelerio spindulio. Autoriai pasirinko žingsnį tarp 40 %, ir 90 %. Tyrimui buvo pasirinktas stendas, kurio viduryje yra propeleris su šalia pastatyta kamera ir mikrofonu (1.14 pav.)



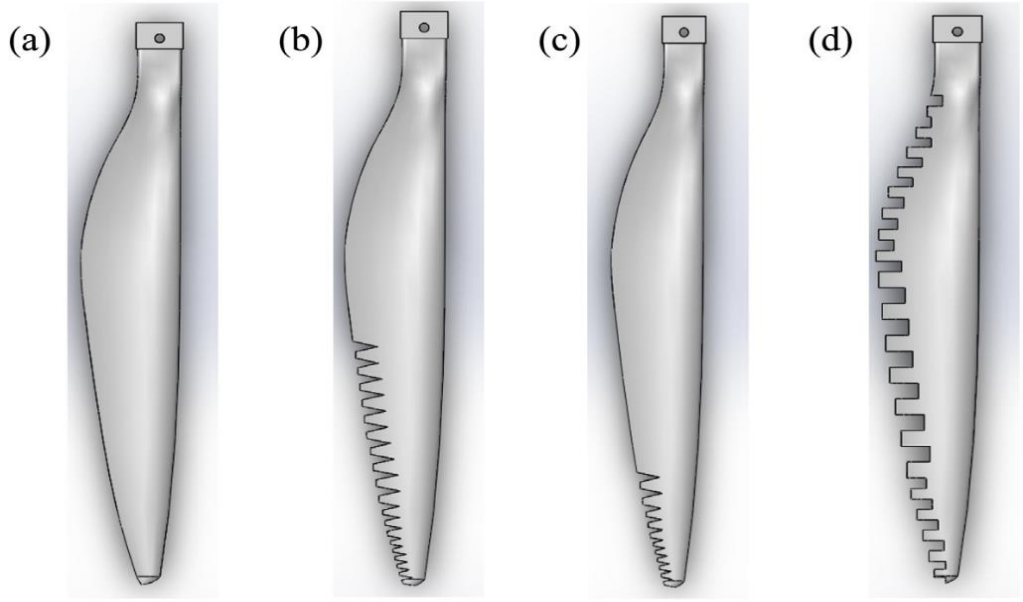
1.14 pav. Tyrimo schema. Mikrofonas pastatytas ant trikojo, kad būtų išvengta stendo vibracijų (Štorch et al., 2016)

Tyrimas išskiria aeroelastinę deformaciją, kuri įvyksta dėl apkrovų propelerio. Menčių sukimas nėra apskaičiuojamas, o mentės lenkimas, priklausantis nuo propelerio medžiagos ir propelerio konstrukcijos, yra pastebimas tarp 0,5 %, ir 4 %, propelerio galo spindulio, propelerio lenkimas turi žymiai mažesnę reikšmę propelerio našumui negu sukimas (Štorch et al., 2016).

Didžiausia garso amplitudė yra stebima ties bangų praleidimo dažniu. Traukos galia apskaičiuota pagal formulę $P_T = \sqrt{\frac{(F_T)^3}{2\rho A}}$, F_T – yra trauka, A – propelerio disko plotas. Didžiausią

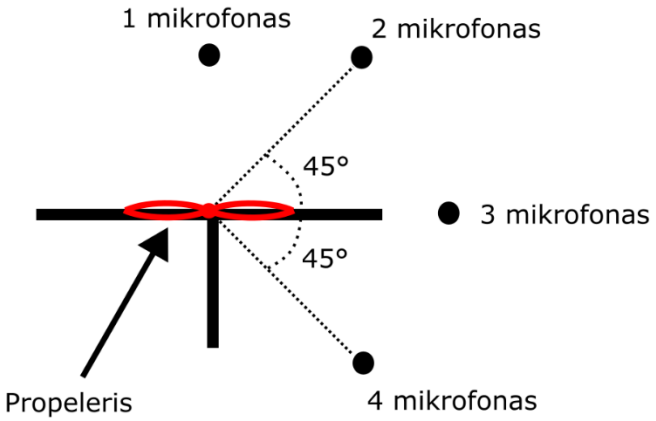
įtaką propelerio garsui pasirinktų propelerių tyrimas išskiria veleno galia. Taip pat yra patvirtinama kad aerodinaminis efektyvumas turi esminį vaidmenį mažinant triukšmą, (Štorch et al., 2016).

Dar vienas būdas optimizuoti propelerio skleidžiamą garsą yra propelerio mentės galo geometrijos keitimas pritaikant pelėdos plunksnos principus (1.12 pav.). Kadangi mentės galas yra pagrindinė vieta kur atsiranda sūkuringumas, optimizavus jį susidarytų mažiau triukšmo. Empirinis tyrimas (Lee et al., 2019) su 4 skirtingais išpjaustymais (1.15 pav.) buvo atliktas norint nustatyti galinio išpjaustymo efektyvumą mažinant triukšmą.



1.15 pav. Skirtingų propelerių geometrija (a) bazinis; (b) pusiau plokščio antgalio; (c) ketvirtadalis plokščio antgalio; (d) kvadratinis (Lee et al., 2019)

Minėtame tyrime (Lee et al., 2019) buvo pritaisyti 4 mikrofonai. 1 mikrofonas buvo statmenai propeleriui į viršų, 2 mikrofonas 45° propeleriui į viršų, 3 mikrofonas propelerio šone, 4 mikrofonas 45° propeleriui į apačią (1.16 pav.).



1.16 pav. Mikrofonų išdėstymas realaus tyrimo metu, (Sudaryta pagal Lee et al., 2019)

Tyrimo (Lee et al., 2019) metu buvo pasirinkta matuoti garso dažnį nuo 120 Hz iki 12,000 Hz su intervalu 45 Hz. Matavimai buvo atlikti tris kartus ir gautų duomenų vidurkis naudotas atliekant skaičiavimus. Įpjovimo pokytis IL buvo skaičiuojamas pagal (1.9) formulę, čia SPL – garso slėgio lygis:

$$IL = SPL_{bazinė\ mentė} - SPL_{Įpjauta\ mentė} \tag{1.9}$$

Lygiavertis SPL (LA_{eq}) apskaičiuotas atsižvelgiant į triukšmo pasiskirstymą kiekvienam dažniui, kuris išreiškiamas:

$$LA_{eq} = 10 * \log\left(\sum_{i=1}^{n} t_i 10^{\frac{SPL_i}{10}}\right) \tag{1.10}$$

Dalis laiko periodo t_i kur triukšmas turi garso lygi SPL_i, po apskaičiavimo LA_{eq} sumažinimas (ΔLA_{eq}) gaunamas pagal formulę:

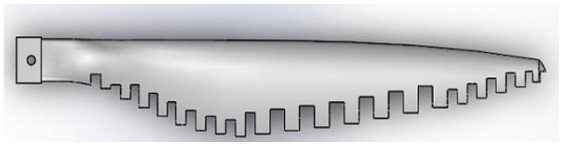
$$\Delta LA_{eq} = LA_{eq(bazinė\ mentė)} - LA_{eq(išpjauta\ mentė)} \tag{1.11}$$

Traukos praradimas (ΔT) ($T_b\ ir\ T_I\ išpjautos\ mentės\ ir\ bazinės\ trauka$) skaičiuojamas:

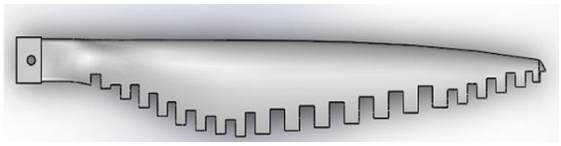
$$\Delta T = \frac{T_b - T_s}{T_0} \tag{1.12}$$

Kadangi skrendantis orlaivis yra aukščiau už stebėtoją, aktualiausios mikrofonų pozicijos yra trečia ir ketvirta.

1.2 lentelė ΔLA_{eq} (dBA) gauti duomenys skirtingų išpjautų propelerių esant skirtingiems trečio mikrofono sukimosi greičiams **(Lee et al., 2019)**.

Sukimosi greitis (rpm)	**1500**	**2000**	**2500**	**3000**	**Bendras**
 Ketvirtadalis plokščio antgalio	1,1	1,2	1,5	2,0	1,4
 Pusiau plokščio antgalio	1,1	0,5	1,4	1,2	1,1
 Kvadratinio	0,1	1,5	1,2	0,9	1,0

1.3 lentelė. ΔLA_{eq} (dBA) gauti duomenys skirtingų išpjautų propelerių esant skirtingiems ketvirto mikrofono sukimosi greičiams **(Lee et al., 2019)**.

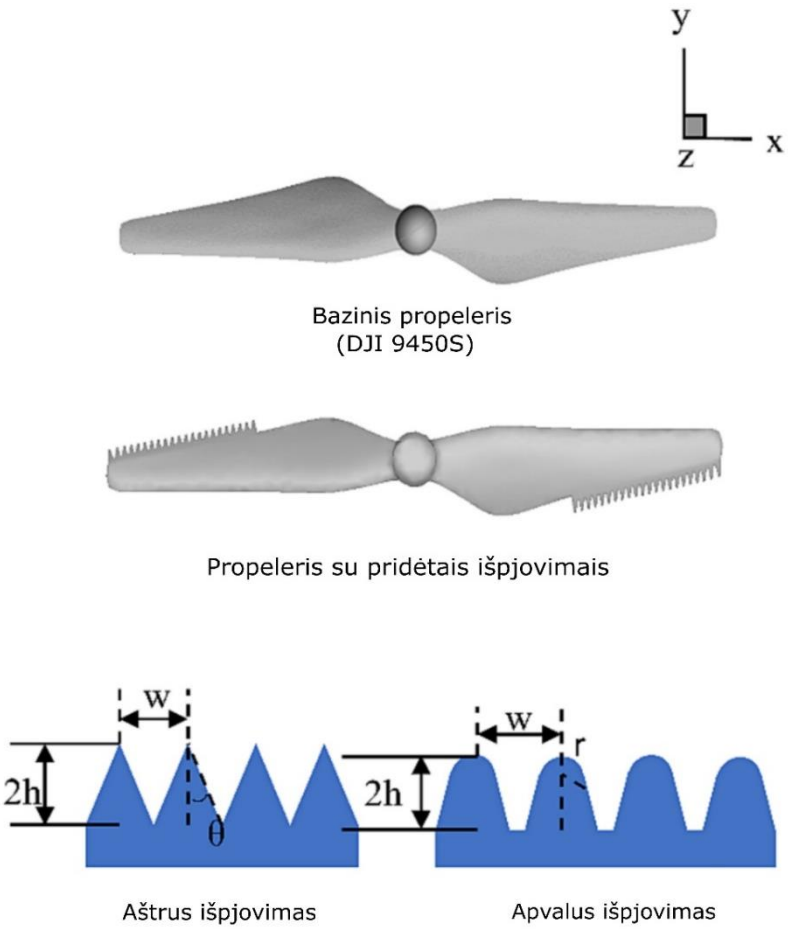
Sukimosi greitis (rpm)	**1500**	**2000**	**2500**	**3000**	**Bendras**
 Ketvirtadalis plokščio antgalio	0,5	0,8	0,2	-0,6	0,2
 Pusiau plokščio antgalio	2,4	1,7	0,1	5,4	2,6
 Kvadratinio	0,4	2,4	0,1	-1,1	0,5

Eksperimento metu apskaičiuotas traukos praradimas pusiau plokščio antgalio išpjovimo propelerio atveju mažėja didėjant propelerio greičiui, ir bendrai praranda 23,8 %, savo traukos. Kvadratinis išpjovimas praranda vidutiniškai 40,6 % savo traukos ir ketvirtadalio plokščio antgalio išpjovimo propeleris praranda vidutiniškai 15,3 % savo turimos pradinės traukos, tačiau šių išpjovimo tipų propeleriai neturi jokios linijinės sąsajos su sukimosi greičiu. Traukos praradimas atsiranda dėl mentės ploto praradimo (Lee et al., 2019). Mokslininkai išskiria, kad efektyviausias propeleris buvo pusiau plokščio antgalio, nes jis buvo geras esant visoms pozicijoms ir sukimosi greičiams. Jo bendras garso sumažėjimas buvo 5,8dBA.

Kadangi propelerio paviršiaus ploto praradimas atima didelį kiekį jo traukos, kitas būdas mažinti garsą, neprarandant traukos, yra pridėti išpjovimus prie esančios propelerio dalies. Viename iš mokslinių straipsnių (Gu et al., 2024), naudojantis LES simuliacija baigtinių tūrių aplinkoje ir Lighthill akustine analogija, yra palyginamas skaitinis modelis ir realūs eksperimentiniai rezultatai.

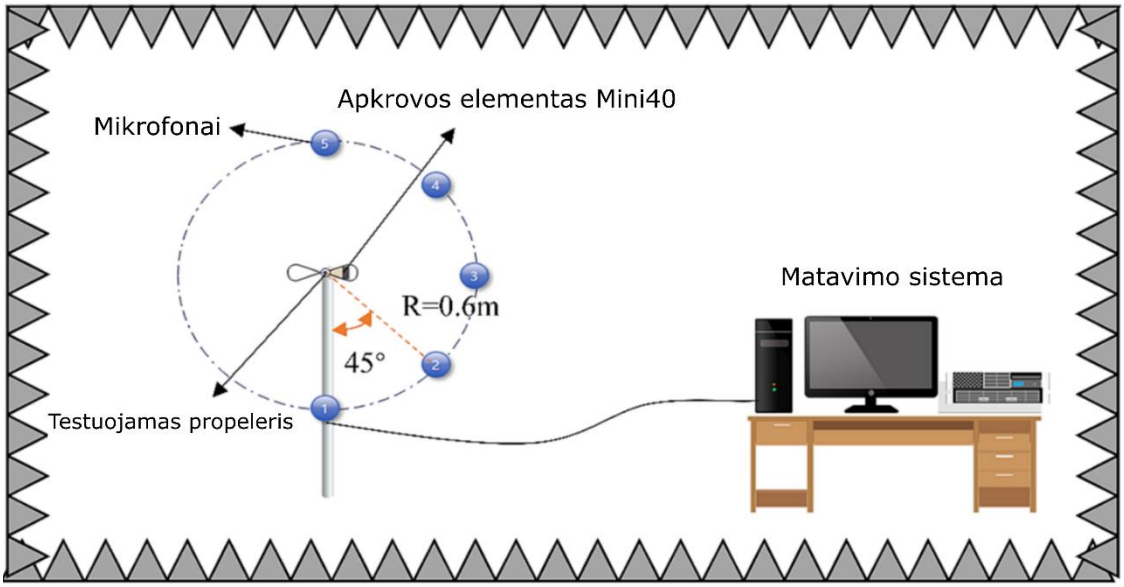
Baigtinių tūrių simuliacijos tikslas yra išryškinti pakeistos geometrijos propelerio mechanizmus, mažinančius triukšmą, lyginant propelerio galų sūkurius.

Trijų dimensijų propelerio modelis DJI 9450S buvo sukurtas naudojant formos skenavimo technologiją (propelerio skersmuo 24 cm) ir išpjaustymai pridėti prie propelerio geometrijos (1.17 pav.)



1.17 pav. Bazinis 9450S propeleris ir propeleris su išpjovimu, kartu su išpjovimo matmenimis (Gu et al., 2024)

Simuliacijose pasirinktas aukštis 2 h = 6mm, išpjovimo dažnis $\lambda = w/2h$ = 1,2.



1.18 pav. Realaus eksperimento matavimo išdėstymo schema (Gu et al., 2024)

Validacijai tyrimo autoriai (Gu et al., 2024) pasirinko realų eksperimentą (1.18 pav.), kurio centre yra propeleris ir aplink jį 5 mikrofonai, kiekvienas iš jų kas 45° nuo statmeniausio propeleriui. Analoginis signalas gautas kas 100 kHZ .

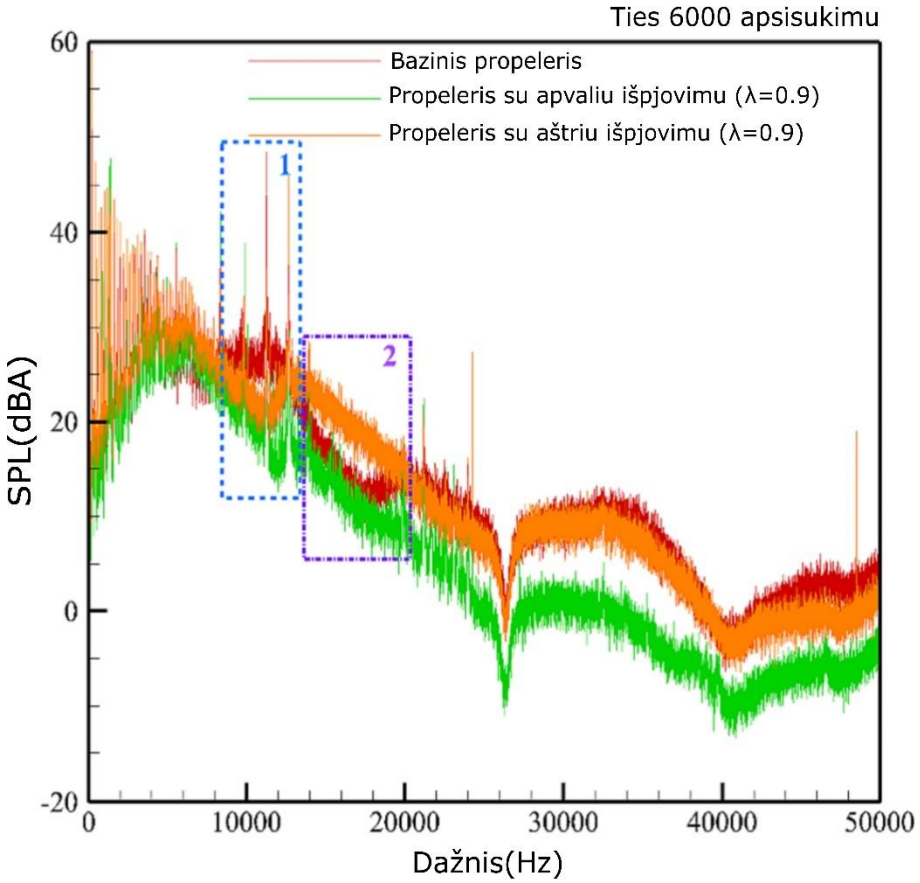
Gautos įtampos galio spektogramos buvo pakeistos į galios spektogramą ir išreikštos kaip p'/p_{ref}, p_{ref} reiškia svyruojanti akustinį slėgį ir yra $p_{ref} = 20\ \mu Pa$. Reikšmės pakeistos į decibelus ir pritaikytos prie laiko, tai sudaro garso slėgio lygio spektrą, aprašytą kaip SPL(f). Bendro garso slėgio lygiui gauti buvo naudojama formulė:

$$OASPL = 10lg \int_0^{f_{upper}} 10^{0.1SPL(f)} \quad (1.13)$$

f_{upper} yra ribinis garso slėgis, OASPL yra bendras garso slėgio lygis

Tyrimo (Gu et al., 2024) metu buvo pastebėta, kad propeleriui sukantis ties 6000 apsisukimų per minutę, tarp 8000–12000 Hz, plačiajuostis triukšmas propeleriuose su išpjovimais turi „įdubą“, o bazinis propeleris turi iškilimą, tai gerokai sumažina propelerių su išpjovimais triukšmą (1.19 pav.). Šį reiškinį mokslininkai paaiškina, kaip propelerio didelių sūkurių suskaldymą. Propelerio su aštriais išpjovimais sukeliamas plačiajuostis triukšmas tarp 1000–20000 Hz yra daug didesnis (1.19 pav.), kas, mokslininkų nuomone, yra dėl sūkurių sustiprėjimo ir padidėjimo esant šiems dažniams.

Apibendrindami tyrimą (Gu et al., 2024) autoriai išskiria, kad apvalaus išpjovimo propeleris, turintis 0,9 išpjovimo dažnį ir spindulį 0,3 mm, turi optimaliausią akustiką. Tokio propelerio maksimalus triukšmo sumažėjimas yra 4,4 dBA kai trauka t = 350 g. Optimalus dizainas gali pasiekti 63,69 % triukšmo sumažėjimo ir padidinti tik 4,8 %, energijos suvartojimo (Gu et al., 2024).



1.19 pav. Trijų propelerio sukeliamų triukšmų spektras esant dažniams nuo 0 Hz iki 50000 Hz su 6000 apsisukimų per minutę greičiu (Gu *et al.*, 2024)

Apibendrinant galima teigti, kad tinkamiausias būdas atlikti triukšmo mažinimą yra propelerio geometrijos keitimas panaudojant principus, kuriais pasižymi pelėdos plunksnos, stengiantis sumažinti triukšmą, kylantį iš propelerio, nekeičiant jo parametrų ir validuoti atliekant empirinius eksperimentus.

Moksliniai darbai, išnagrinėti šiame skyriuje, padeda suformuluoti metodiką, kuria naudojantis bus galimybė atlikti tolesnius tyrimus, susijusius su propelerio triukšmu.

1.5 Pirmojo skyriaus išvados

1. Atlikta literatūros analizė parodo, kad baigtinių tūrių metodas yra geras būdas atlikti sudėtingus aeroakustinius skaičiavimus. *Ansys Fluent* programa turi visus reikiamus įrankius atlikti reikiamą aeroakustinę analizę. Sūkuringumo mažinimas yra tinkamas būdas sumažinti esamą propelerio periodinį triukšmą. Triukšmo nagrinėjimas turėtų būti atliktas išskiriant skirtingus garso supratimo laukus tikslesnei analizei.
2. Atliekant geometrijos keitimus, yra galimybė ne tik sumažinti propelerio triukšmą, bet ir kai kuriais atvejais įgauti papildomos propelerio traukos. Empirinis tyrimas yra tinkamas baigtinių tūrių gautiems rezultatams validuoti.
3. Verta paminėti, kad atliekant išpjovimus tikėtinas propelerio traukos sumažėjimas, taip pat skaitinių metodų tikslumas naudojant baigtinių tūrių programas nėra iki galo ištirtas, todėl vien tik skaitiniais bandymais nevertėtų pasitikėti.

2. ORLAIVIO PROPELERIO TRIUKŠMO SKAITINĖ IR EKSPERIMENTINĖ METODOLOGIJA

Šiame skyriuje yra aprašomi metodai pasitelkiant pirmajame skyriuje atrinktus triukšmo mažinimo būdus pagrindiniai triukšmo aspektai, skaitinė metodologija, pačių propelerių gamyba ir pasirinkta propelerio triukšmo eksperimentinė metodologija.

2.1 Pagrindiniai triukšmo aspektai

Kaip ir buvo išskirta pirmajame skyriuje, pagrindinės dvi triukšmo rūšys yra periodinis ir plačiajuostis, pagal Zhang et al. (2023), pagrindinė triukšmo rūšis yra plačiajuostis. Taip pat išskiriama, kad aptinkant periodinį triukšmą FW–H metodai gali būti netikslūs, ir yra rekomenduojamas atskiras periodinio triukšmo modelis.

Svarbiausias aspektas yra išsiskirti esamas triukšmo susidarymo vietas ir jų sklidimo faktorius. Išskiriami triukšmai (Akiwate et al., 2021), kur periodinis triukšmo šaltinis išreiškiamas:

$$S(r)_{mo} = i\rho c_0 \boldsymbol{k_m} b U_r \Psi_V \tag{2.1}$$

$$S(r)_{dL} = \frac{dL}{dr} = \frac{1}{2}\rho {U_r}^2 C_L \int_{-\frac{c}{2}}^{\frac{2}{2}} \exp\{ik_x X\}\, F(X) dX \tag{2.2}$$

$$S(r)_{dD} = \frac{dD}{dr} = \frac{1}{2}\rho U_r^2 C_D \tag{2.3}$$

$S(r)_{mo}$ – lygtis parodo impulso svyravimus sukeliančius garsą, tai yra storio garsas ir jis yra vienpolis

$S(r)_{dL}$ – lygtis parodo greičio gradientą, tai yra apkrovos garsas ir jis dvipolis

$S(r)_{dD}$ – lygtis parodo pasipriešinimą, tai yra ir periodinio ir plačiajuosčio triukšmo sudėtis ir jis yra dvipolis.

Periodinio triukšmo sklidimas išreikštas formulėmis:

$$D_{vM} = \int_{r_h}^{R_t} J_v(k_m r sin\theta) dz \tag{2.4}$$

$$D_{vL} = \int_{r_h}^{R_t} \{ik_m cos\theta\ sin\alpha + \frac{i}{r} v\ cos\alpha\} J_v(k_m r\ sin\theta) dz \tag{2.5}$$

$$D_{vD} = \int_{r_h}^{R_t} \{ik_m cos\theta\ cos\alpha + \frac{i}{r} v\ sin\alpha\} J_v(k_m r\ sin\theta) dz \tag{2.6}$$

Čia: D_{vM} – storio garso vienpolis šaltinio garso sklidimas erdvėje,

D_{vL} – traukos jėgų dvipolis šaltinio garso sklidimas erdvėje,

D_{vD} – pasipriešinimo jėgų dvipolis šaltinio garso sklidimas erdvėje,

Plačiajuosčio triukšmo šaltinis išreikštas:

$$\mathcal{L}^{TE}\left(k_r, K_{X,v}, \kappa_v\right) = \frac{1}{c_j/2} \int_{-c_j/2}^{c_j/2} g^{TE}\left(X, k_r, K_{X,v}, M_{r_j}\right) e^{i\kappa_v (X + \frac{c_j}{2})}\, dX \tag{2.7}$$

$$SS_{qq}(k_r, K_{X,v}) = \frac{1}{\pi} l_r(K_{X,v}U_c, k_r)\boldsymbol{\phi_{pp}}(K_{X,v}U_c) \quad (2.8)$$

Čia: $\mathcal{L}^{TE}(k_r, K_{X,v}, \kappa_v)$ – sekamojo mentės garso perkėlimo lygtis triukšmui nustatyti

$SS_{qq}(k_r, K_{X,v})$ – kvadrupolinių šaltinių garso spektrinio dažnio lygtis, kuri aprašo periodinį sekamos mentės turbulencijos triukšmą

Plačiajuosčio triukšmo sklidimas išreikštas formulėmis:

$$D_v(\theta, \alpha, \omega) = \int_{r_j - \frac{\Delta r}{2}}^{r_j + \frac{\Delta r}{2}} (k_0 \cos\theta \sin\alpha + \frac{v}{r}\cos\alpha)^2 J_v^2(k_0 r \sin\theta) dr \quad (2.9)$$

$D_v(\theta, \alpha, \omega) -$ integralas, parodantis periodinio triukšmo sklidimą erdvėje

Svarbiausi aspektai, kurie yra aktualus mūsų atliekamam tyrimui, yra k_m, kuris parodo mentės praleidimo dažnį, kuris yra pagrindinis triukšmo šaltinis dažniuose ir ϕ_{pp} yra tiesiogiai susijęs su turbulentine kinetine energija per Goody (2004), modelį ir išreiškiamas formule:

$$\phi_{pp} \propto k * f^{-n} \quad (2.10)$$

Čia: ϕ_{pp} – galios spektrinis tankis, k – turbulentinė kinetinė energija, f – dažnis, $n -$ spektrinis nuolydis.

Eksperimentinių tyrimų metu šiuos parametrus atskirai išskirti būtų per sudėtinga, tačiau atliekant skaitinius tyrimus, šie duomenys lengvai pasiekiami baigtinių tūrių programoje, ir juos išskirti ir nagrinėti galimybė yra.

Iš šių parametrų atsiranda garso slėgio lygio periodinio triukšmo formulė:

$$SPL_{Tonal} = 10log_{10}(\frac{\overline{P_m^2}}{P_{ref}^2}) \quad (2.11)$$

Ir plačiajuosčio triukšmo formulė:

$$SPL_{BB}(r_0, \theta, \omega) = 10log_{10}(\frac{2bw\, SS_{pp}^{TE}(r_0, \theta, \omega)}{p_{ref}^2}) \quad (2.12)$$

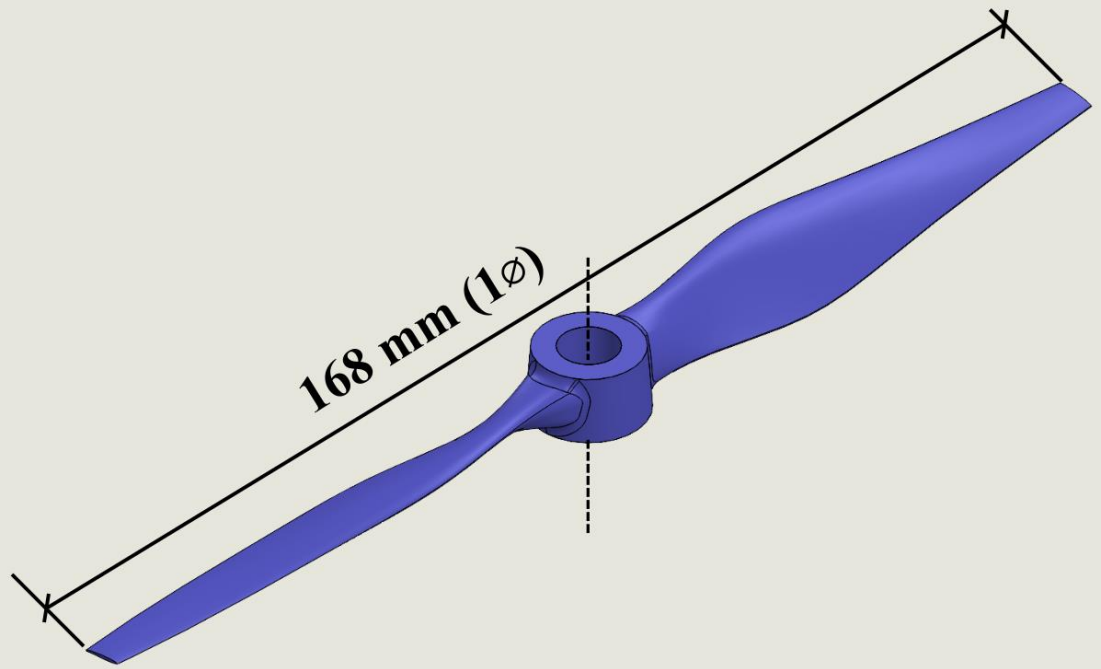
Čia: $\overline{P_m^2}$ –mentės praleidimo dažnio garso slėgis, SS_{pp}^{TE} – akustinio slėgio tolimo lauko galios spektrinis tankis.

Šios formulės bus naudojamos pačioje programoje gauti ir lyginti triukšmus, kadangi šie dydžiai yra lyginami ir su eksperimentiniais tyrimais, bus galimybė išskirti skirtingą propelerio sukeliamą triukšmą.

2.2 Tyrimo skaitinio eksperimento metodologija

Norint nustatyti orlaivio propelerio keliama triukšmą yra svarbu nustatyti parametrus ir sukurti tinkamą lauką baigtinių tūrių erdvėje. Kadangi pasirinkta baigtinių tūrių metodologija reikalauja kompromiso tarp tikslumo ir kompiuterinių išteklių pasiskirstymo, yra svarbu sudaryti tinkamą geometriją bei tinklelį kuris sugebėtu atlikti skaičiavimus be didelių rezultatų pokyčių tarp skirtingų parametrų.

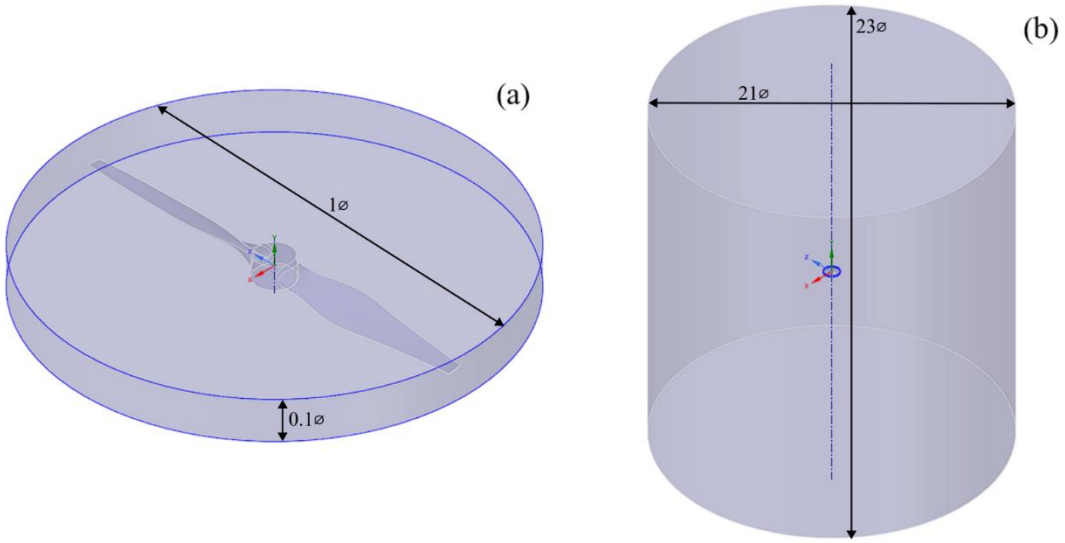
Dviejų menčių propelerio geometrija (2.1 pav.) buvo pasirinkta pagal turimą propelerio formą, tam kad validacija atliktų bandymų būtų tikslesnė, su propelerio ilgiu 168 mm ir storiu 9 mm.



2.1 pav. Orlaivio propelerio geometrija, naudota baigtinių tūrių simuliacijoje (sudaryta autoriaus, 2025)

Pati propelerio geometrija buvo optimizuota siekiant turėti kiek įmanoma mažiau plokštumų (propeleris su 16 plokštumų), vidinė propelerio tvirtinimo skylė buvo užpildyta, kitas propelerio galas nupjautas, visa tai atlikta tam, kad simuliacijų metu butų taupomi kompiuteriniai ištekliai.

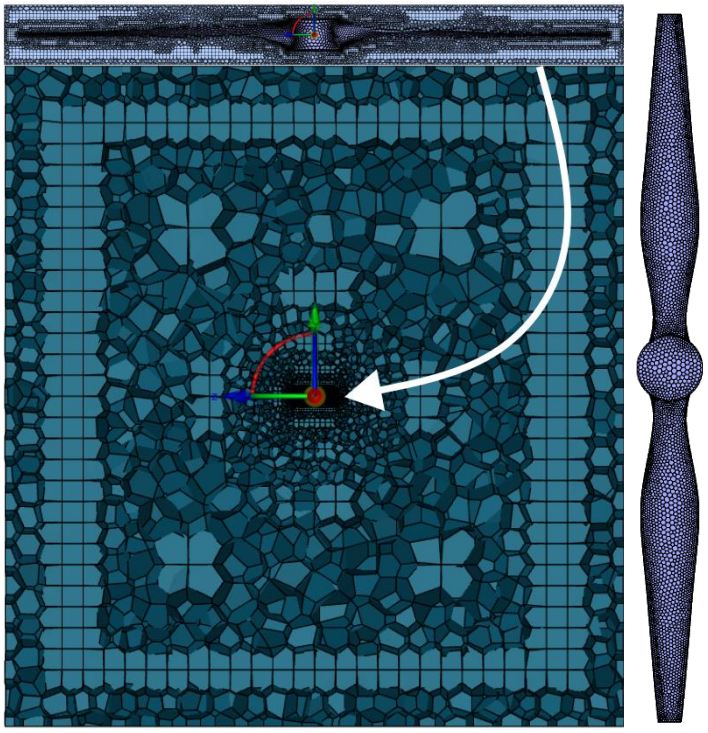
Kadangi skaitinis propelerio tyrimas atliktas baigtinių tūrių programa, A*nsys Fluent* propeleris yra įstatomas į erdvę, kurioje sukasi (2.2 pav. A), ir erdvę, kurioje vyksta aptekėjimas (2.2 pav. B), pati propelerio geometrija yra pašalinama iš tyrimų erdvės tam, kad būtų sudaromos sąlygos tinkamam aptekėjimui, taupant kompiuterinius išteklius.



2.2 pav. Orlaivio propelerio geometrija, naudota baigtinių tūrių simuliacijoje: (a) laukas kuriame sukasi propeleris; (b) terpė, kurioje vyksta simuliacija (mėlynai pažymėtas terpės ir lauko susikirtimas) (sudaryta autoriaus, 2025)

1⌀ = 177 mm, 0,1⌀ = 17 mm, 21⌀ = 3770 mm, 23⌀ = 4000 mm.

Propelerio tinkleliui sudaryti buvo pasirinkta naudoti *poly–hexcore* tinklelio tipą, kuris atitinka *hexcore* tinklelio tipą, tačiau sumažina celių kiekį (Wróblewski et al., 2024), kuris dėl turimos studentinės versijos programinės įrangos negali viršyti 1 milijono celių. Propelerio erdvė, kurioje jis sukasi, yra sudaryta tankesnė negu aptekamoji erdvė, taip pat sudarytas pereinamasis sluoksnis tarp propelerio sienų ir aptekėjimo srauto tikslesniam skaičiavimui (2.3 pav.).



2.3 pav. Simuliacijos erdvės tinklelis, zona, kurioje sukasi propeleris, kartu su zona, kurioje vyksta visas aptekėjimas (sudaryta autoriaus, 2025)

Sudarytas pirminis tinklelis yra pakankamai tikslus norint sudaryti pirminius duomenis ir patvirtinti pasirinktą metodą su literatūroje pateiktais, tinklelio duomenys pateikti 2.1 lentelėje. Ortogonali kokybė 0 yra pati prasčiausia, šoninis nuokrypis neturėtų viršyti 0,85. Tinklelio celių kiekis 413918.

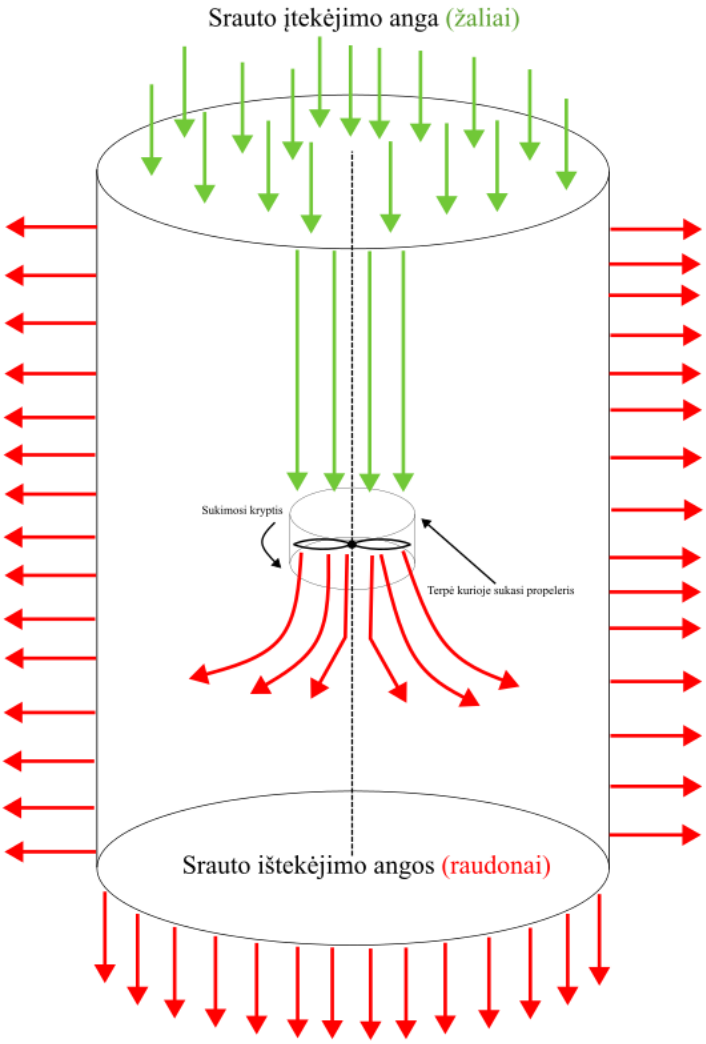
2.1 lentelė Validacijai sudaryto tinklelio duomenys

	Maksimumas	Minimumas	Vidutinis
Ortogonali kokybė	1	0,41	0,98
Šoninis nuokrypis	0,59	5,4e-09	0,02

Šie duomenys leidžia nustatyti, kad tinklelis yra labai tikslus ir tinkamas atlikti validaciją triukšmui nustatyti.

2.3 Garso matavimo schema ir propelerių išpjovimai

Kadangi propelerio triukšmas susidaro iš skirtingų apkrovos ir aptekėjimo faktorių, yra svarbu susidaryti tinkamą aplinką baigtinių tūrių erdvėje, kad būtų atlikti tikslūs matavimai. Baigtinių tūrių erdvės įtekėjimo ir ištekėjimo angos pavaizduotos 2.4 pav., kartu su propeleriu.



2.4 pav. Oro srauto tekėjimas, naudotas tyrime (sudaryta autoriaus, 2025)

Šis srauto įtekėjimo ir ištekėjimo nustatymas leidžia simuliuoti propelerį tokiomis sąlygomis, kuriomis jis susidurtų sukdamasis (įtekėjimas per propelerio priekį).

2.3.1 Laike nekintantis sprendinys

Periodinio triukšmo atsiradimas įvyksta dėl apkrovų propelerio struktūrai. Mentės praleidimo dažnis (angl. *Blade passing frequency*) yra vienas pagrindinių komponentų kuris susidaro iš sukimosi greičio ir kiekio propelerio menčių (Miljković, Ivošević & Bucak, 2012) ir išreikštas:

$$MPD = \frac{N_R N_B}{60} \tag{2.13}$$

Čia: MPD= mentės praleidimo dažnis (Hz), N_R= propelerio sukimosi greitis (apsisukimais per minutę), N_B= propelerio menčių kiekis.

Kadangi šis triukšmas nepriklauso nuo srauto aptekėjimo, jam nėra būtinas laike kintantis sprendinys (angl. *Transient solution*), tai leidžia prieš atliekant plačiajuosčio triukšmo matavimus išsimatuoti esantį periodinį triukšmą pagal Junger (2019).

Zhou & Fattah (2017) atliktas tyrimas, nustatė, kad propeleris, kuris sukasi 2700 apsisukimų per minutę greičiu, propelerio mentės praleidimo dažnis ties pirma harmonika turėjo 10 daugiau dB negu kitos harmonikos.

Atlikus tyrimą laike nekintančiame sprendinyje (angl. *Stationary solution*), buvo naudotas SST k–omega turbulentinis modelis, propelerio greitis 3000 apsisukimų per minutę, slėgio ir greičio jungtis buvo naudota SIMPLEC.

Ansys Fluent programos privalumas yra galimybė atlikti aptekėjimo tyrimus laike nekintančiame sprendinyje dėl integruoto plačiajuosčio triukšmo modelio. Nors aptekėjimas laike neįvyksta, atlikti skaičiavimai leidžia išreikšti aptekėjimo triukšmą akustine galia naudojant Proudmano (Lilley, 1993) formulę:

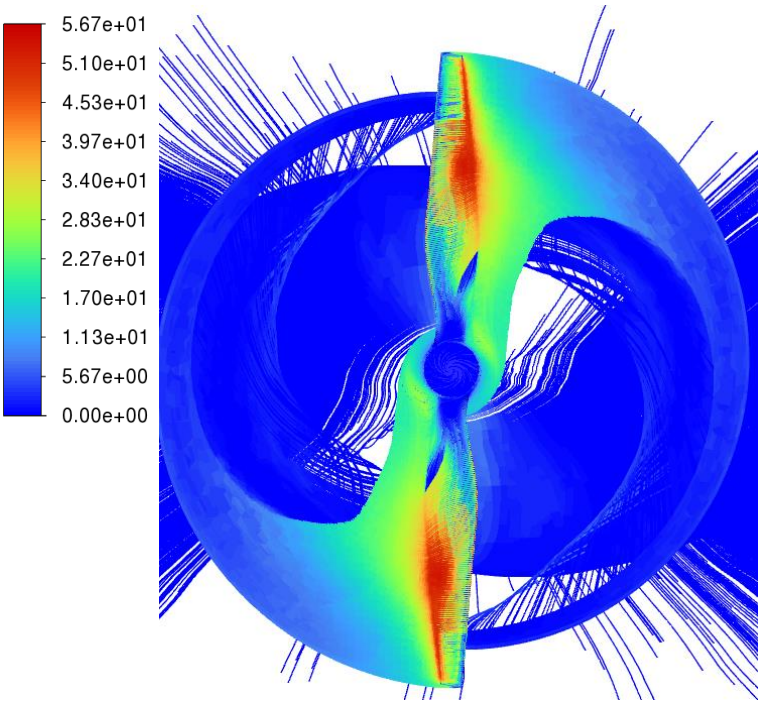
$$L_p = 10 \log \left(\frac{P_A}{P_{ref}}\right) \tag{2.14}$$

Čia: L_P – akustinė galia (dB), P_{ref} – etaloninė akustinė galia (nustatoma programoje $10^{-12} W/m^3$) kur P_A yra apskaičiuojama pagal formulę:

$$P_A = \alpha \rho_0 \left(\frac{u^3}{l}\right) \frac{u^5}{a_0^5} \tag{2.15}$$

Čia: u – turbulentinis greitis, l – turbulentinis ilgis, a_o – garso greitis, α – modelio konstanta.

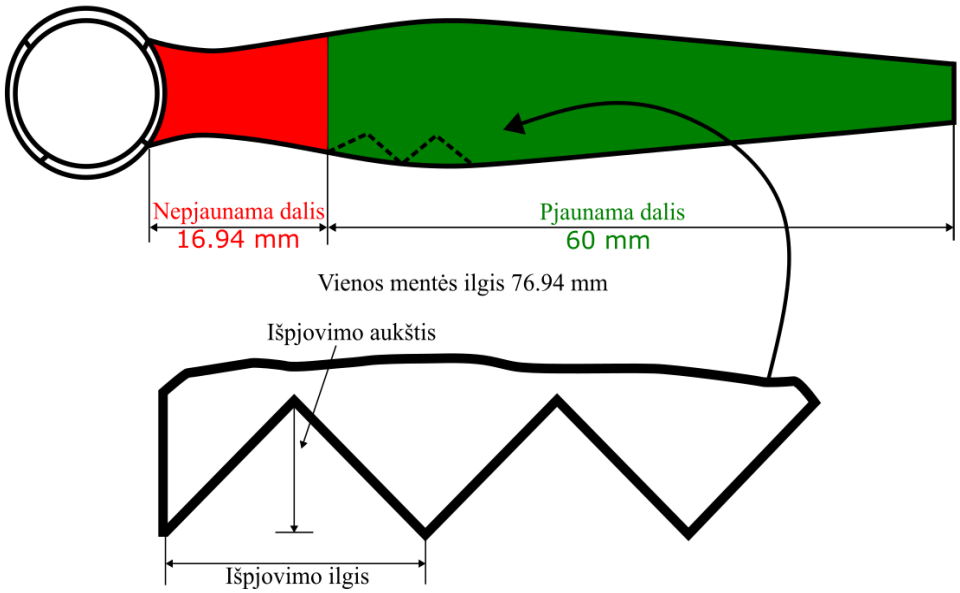
Naudojantis šiuo modeliu yra galimybė rasti pirminį periodinį triukšmą kuris atitinka 56,7 dB akustinės galios savo maksimaliose vietose (2.5 pav) ir parodo tinkamiausia vietą literatūros analizėje aprašytiems išpjovimams atlikti.



2.5 pav. Nepjaustyto propelerio akustinė galia esant 3000 apsisukimų per minutę greičiui (Sudaryta autoriaus, 2025)

Raudonos vietos propeleryje parodo didžiausią susidariusį sukūringumo triukšmą esančioje arčiausiai propelerio mentės galiukų. Pirminis akustinės galios rezultatas, atliktas nekintančio laike sprendinio, parodo pagrindines vietas kur periodinis triukšmas turi galimybę susidaryti, tai leidžia lengviau nuspręsti pagrindines išpjovimų vietas.

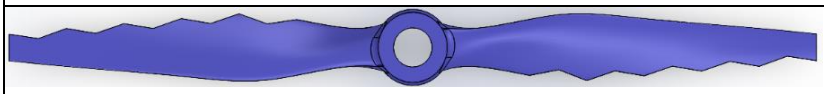
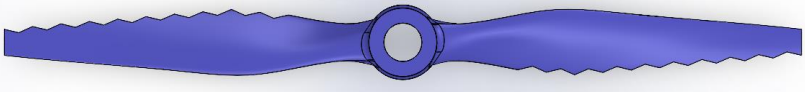
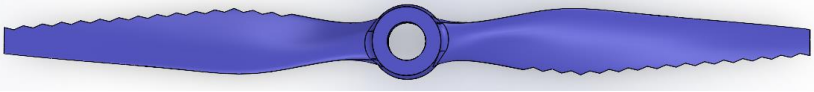
Išpjovimų vietos buvo pasirinktos naudojantis Gu et al. (2024) ir Lee et al.(2019) moksline literatūra, pasirenkant išpjovimus nepjaunant pirmų 16,94 mm esančiu propelerio stebulės ir sudarant išpjovimų aukštį ir ilgį, tam, kad propelerio išpjovimai būtų standartizuoti (2.6 pav.).



2.6 pav. Propelerio įpjovimų schema (sudaryta autoriaus, 2025)

Tokie išpjovimai lengviau atliekami negu kvadratinės, ar apvalios formos, taip užtikrinant skirtingų pjovimų vientisumą. Pagrindiniai pjūviai ir jų parametrai pavaizduoti 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė Išpjovimai tyrimui

Išpjovimų kiekis	Išpjovimų ilgis	Išpjovimų aukštis
 5	12 mm	1.5 mm
 10	6 mm	1 mm
 15	4 mm	0.66 mm

Tokie išpjovimo tipai leidžia tinkamai išanalizuoti susidariusijį triukšmą ir patikrinti išpjovimų įtaką.

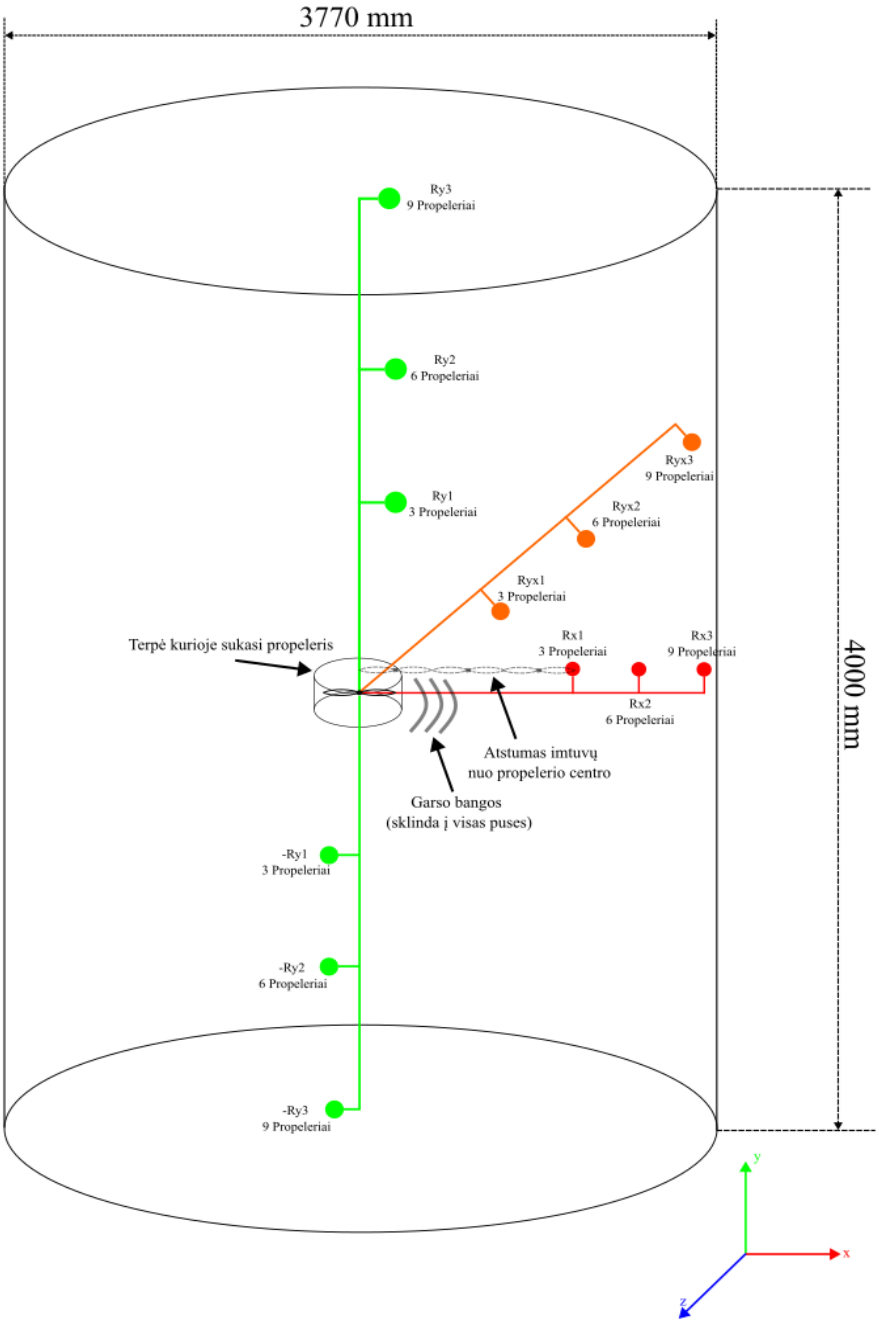
2.3.2 Laike kintantis sprendinys

Laike kintantis sprendinys skiriasi tuo, kad skaičiavimas vykdomas, kai aptekėjimas vyksta per laiko intervalą. Plačiajuostis triukšmas atsiranda dėl atsiradusių sūkurių ir šių sūkurių sklidimo terpėje, šiam triukšmui nustatyti reikalingas laike kintantis sprendinys.

Pagal Menter, (2021), DES (angl. *Detached eddy simulations*), modelis yra kombinacija RANS (angl. *Reynolds avaraged navier stokes*) ir LES (angl. *Large eddy simulations*) modelių, kur arti propelerio sienų esantis aptekėjimas skaičiuojamas tiksliu RANS modeliu, o tolimesnis oro tekėjimas skaičiuojamas LES modeliu.

Skaičiuojant plačiajuostį triukšmą modelį pasirenkamas DES, o RANS modelį SST k–omega (kuris buvo naudojamas skaičiuojant laike nekintantį sprendinį), o slėgio ir greičio jungtis yra pakeičiama į PISO algoritmą dėl jo didesnio tinkamumo laike kintančiam sprendiniui.

Ansys fluent programos suteikiamas Ffowcs–Williams ir Hawkings akustinis modelis validacijai bus naudojamas, nustatant propelerį kaip pagrindinį triukšmo šaltinį ir nurodant garso imtuvus kurie matuos simuliacijos metu atsiradusį garsą (2.6 pav.).



2.7 pav. Triukšmo imtuvų išdėstymo schema (sudaryta autoriaus, 2025)

Toks imtuvų išdėstymas buvo parinktas tam, kad būtų nustatytas garso sklidimas pagrindinėse triukšmo sklidimo ašyse, ir galimybe palyginti su jau atliktais skaitiniais ir eksperimentiniais tyrimais.

Simuliacijoje naudotas MRF (angl. *Moving reference frame*) modelis, propelerio greitis paliktas tas pats 3000 apsisukimų per minutę, laiko žingsnio dydis buvo parinktas naudojant Nyquist–Shannon atrankos teoremą (Por, van Kooten & Sarkovic, 2019), pagal kurią galima išreikšti reikalingą laiko žingsnį neprarandant duomenų:

$$\triangle t \leq \frac{1}{2f_{max}} \tag{2.16}$$

$\triangle t$ = laiko žingsnio dydis, f_{max} = maksimalus skaičiuojamas dažnis.

Dažnis parinktas simuliacijose buvo 12000 Hz, dėl žmogaus klausos spektro, laiko žingsnis buvo apskaičiuotas 0,00004167 esant mažiems sūkiams o ties dideliais sūkiai dažnis buvo parinktas 20000 Hz, kuris atitinka 2.5e-05 laiko žingsnį

Nustatant triukšmą laike kintančiame sprendinyje yra naudojama FW–H lygtis kurį išreikšta iš Navier–Stokes lygčių kurios aprašo skysčių judėjimą terpėje. Programos naudojama lygtis:

$$\frac{1}{a_0^2}\frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \nabla^2 p' = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j}\{T_{ij}H(f)\} \tag{2.17}$$

$$-\frac{\partial}{\partial x_i}\{\left[P_{ij}n_j + \rho u_i(u_n - v_n)\right]\delta(f)\} \tag{2.18}$$

$$+\frac{\partial}{\partial t}\{[\rho_0 v_n + \rho(u_n - v_n)]\delta(f)\} \tag{2.19}$$

Čia u_i – skysčio greičio komponentė x_i kryptimi, u_n – skysčio greičio komponentė normalizuota paviršiui f = 0, v_i – paviršiaus greičio komponentė x_i kryptimi, v_n – paviršiaus greičio komponentė normalizuota paviršiui, $\delta(f)$ – *dirac* deltos funkcija, $H(f)$ – *heaviside* funkcija.

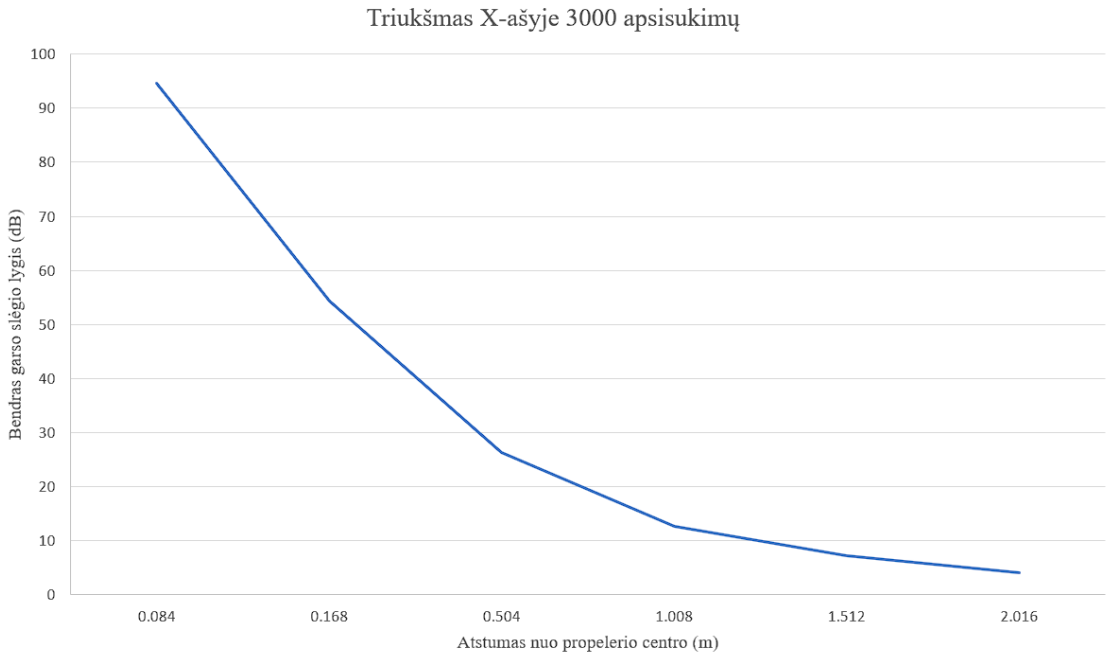
Naudodamasi šią bangų lygtimi programa išreiškia p' garso slėgį tolimajame lauke, kuris suteikia galimybę apskaičiuoti bendrą garso slėgio lygį:

$$OASPL = 20 * Log10(\frac{\sqrt{\bar{p}^2}}{0.00002}) \tag{2.20}$$

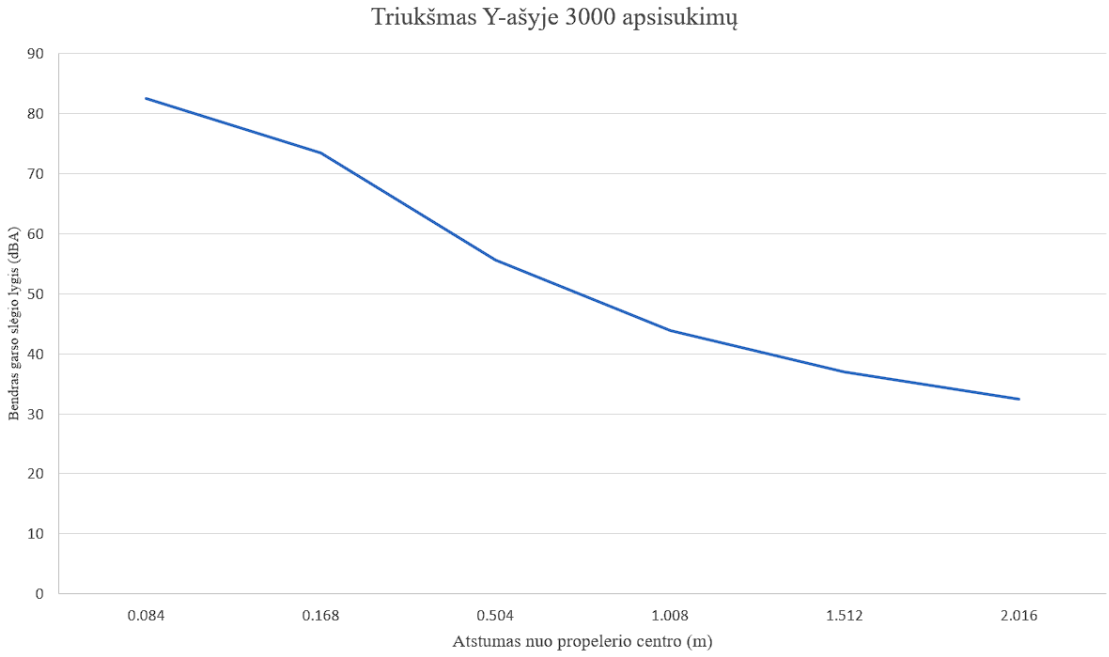
Čia $\bar{p}$ – yra slėgių vidurkis, 0.00002 – atskaitos slėgis.

Laike kintanti simuliacija ties 3000 apsisukimų per minutę parodo 0,137 N bendrą propelerio sukeliamą jėgą. Akustiniai duomenys, gaunami iš atliktos simuliacijos, parodo, kad x–ašyje (propelerio šone) (2.8 pav.) susidarantis triukšmas didesnis šalia propelerio, tačiau atstumas triukšmui turi žymiai didesnę įtaką negu triukšmui, kuris sklinda y–ašyje (už propelerio) (2.9 pav.), kur triukšmas yra tolygiau pasiskirstęs per atstumą nuo propelerio.

X ašyje maksimali propelerio triukšmo vertė prie pat propelerio galų 94,6 dB, minimali 4 dB 2 metrai nuo propelerio ašies, y–ašyje susidariusio triukšmo maksimali vertė 82,5 dB, minimali 32 dB.



2.8 pav. Triukšmo sklidimas propelerio x-ašyje (sudaryta autoriaus, 2025)



2.9 pav. Triukšmo sklidimas propelerio y-ašyje (Sudaryta autoriaus, 2025)

Tyrimo tendencija parodo, kad propelerio triukšmas, susidaręs pirminiuose skaičiavimuose, labiau atitinka realias sąlygas y–ašyje, negu x–ašyje, ir propelerio triukšmas toliau negu 1 metras stabilizuojasi nepriklausomai nuo triukšmo matavimo ašies.

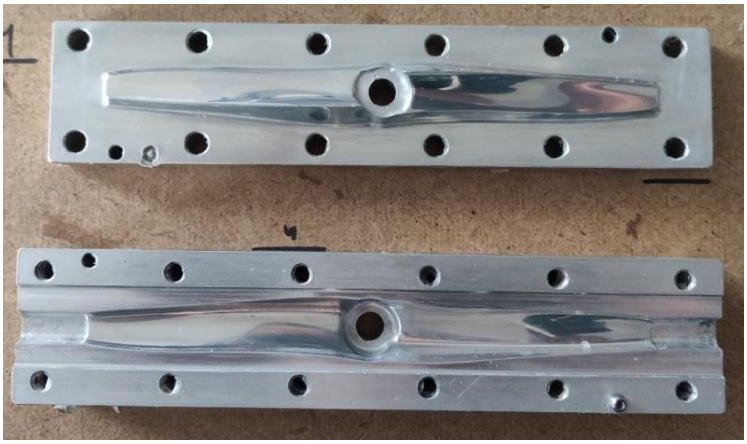
2.4 Eksperimentinio bandymo metodologija

Eksperimentinį bandymą buvo nuspręsta atlikti naudojant stiklo epoksido propelerio gamybos būdą, eksperimentą vykdyti pasitelkiant F2D kovinį modelį ir papildomą eksperimentinį tyrimą

pasitelkiant elektrinio bešepetėlio variklio stendą. Šis pasirinkimas buvo atliktas dėl galimybės ištestuoti propelerį esant didelių apkrovų ir greičių esant realioms sąlygoms, ir ištestuoti propelerio sukeliamą triukšmą esant mažai variklio triukšmo įtakai.

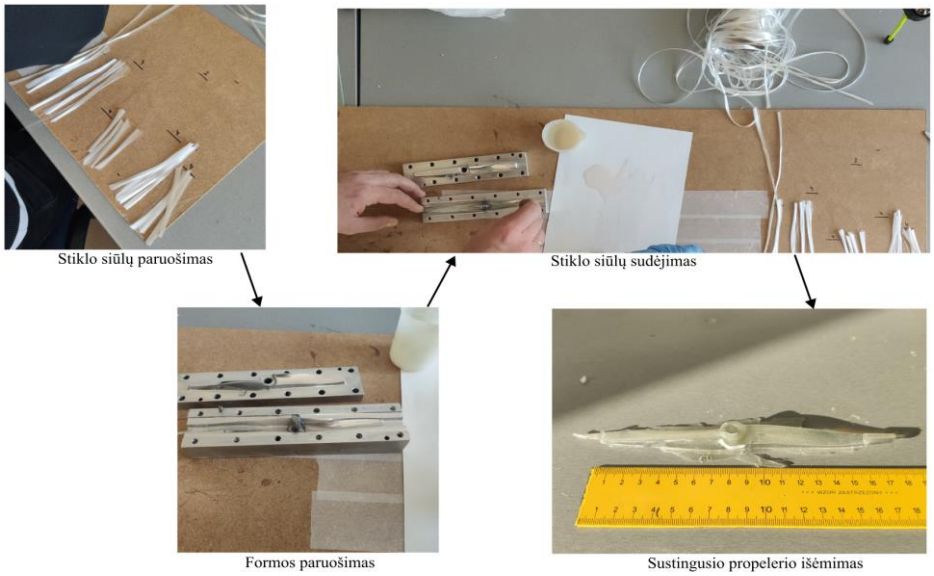
2.4.1 Propelerių gamybos procesas

Propelerio gamybai buvo pasirinkta naudoti stiklo siūlus ir epoksido dervą, įstatant į frezuotą testuojamo propelerio formą (2.10 pav.), tai leidžia propelerio plokštumoms išlaikyti vientisumą ir sudaro galimybę apdirbti kraštines pagal poreikius.



2.10 pav. Propelerio forma naudota gamyboje (sudaryta autoriaus, 2025)

Išvalius formą ir ištepus ją padengiamuoju vašku, stiklo siūlai buvo ištepami epoksido ir kietiklio mišiniu ir sudedami į formą. Forma buvo suspaudžiama ir paliekama 24 valandas sustingti, tuomet propeleris buvo išimamas iš formos. Gamybos schema pavaizduota 2.11 pav.



2.11 pav. Stiklo siūlų propelerio gamybos schema (sudaryta autoriaus, 2025)

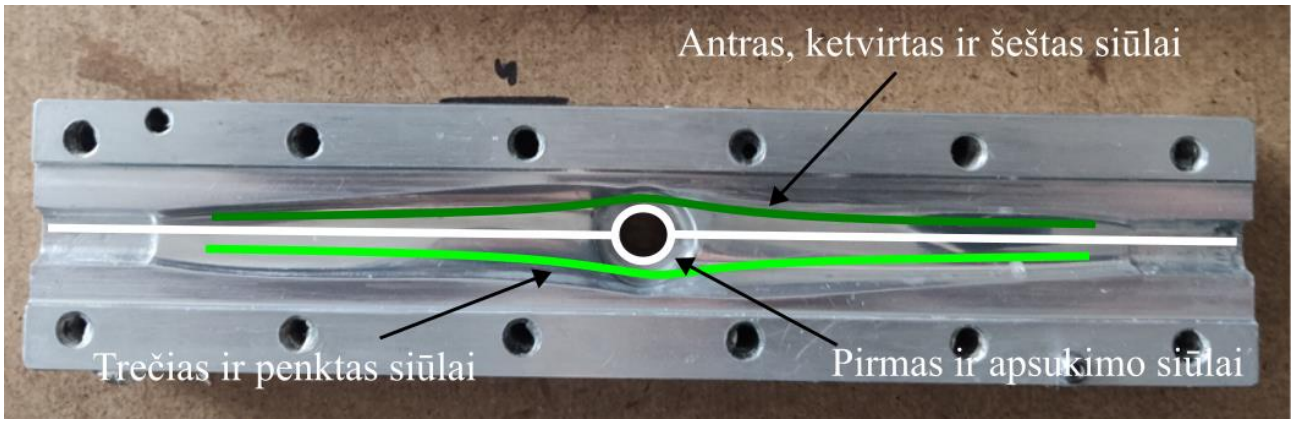
Išimtis propelerio galiukai buvo nupjaunami, šoninis epoksidas pašalinamas ir propeleris šlifuojamas kol visos pusės buvo tolygios, galutinis propeleris (2.11 pav.) buvo balansuojamas stengiantis sulyginti svorį abiejose propelerio pusėse.



2.12 pav. Pagamintas stiklo siūlų propeleris (sudaryta autoriaus, 2025)

Iš viso buvo pagaminti 9 propeleriai su skirtingais siūlų kiekiais, keičiant siūlų kiekį priklausomai nuo prieš tai pagaminto propelerio užtikrinant, kad naudojama forma tinkamai susispaustų iš dviejų pusių, tačiau paliekant pakankamai siūlų, kad susidarytų vientisas propelerio paviršius.

Atpjauti siūlai buvo sudedami kartu, kad sudarytų didesnį storį, kuris būtų įdedamas į turimą formą, pirmas siūlas buvo įstatomas per visą ilgį centre praskiriant siūlą aplink įstatyta kaištį, antras iki šešto siūlai buvo statomi išilgai, dedant siūlo vidurį ties kaiščiu į viršu, kol kitas siūlas buvo dedamas taip pat tik į apačia nuo kaiščio (2.11 pav.).



2.13 pav. Siūlų sudėjimo schema (sudaryta autoriaus, 2025)

Pirmuose 3 pagamintuose propeleriuose buvo pastebėta, kad dėl per didelio siūlų kiekio, formai neužsidarant, epoksidas ištekėdavo iš formos. Todėl buvo priimtas sprendimas keisti dedamų siūlų kiekius sumažinant siūlų kiekį 4 propelerio gamybos procese, o nuo 5 propelerio atsisakant 6 siūlo.

Propelerių siūlų ilgio, įdėjimo numerio, ir propeleriuose naudotą siūlų kiekį galima pamatyti 2.3 lentelėje. Pirmo, antro ir trečio propelerių apsisukimo siūlas buvo apsukamas po 3 kartus aplink kaištį, nuo 4 propelerio visi apsukimai aplink kaištį buvo atliekami po 2 kartus.

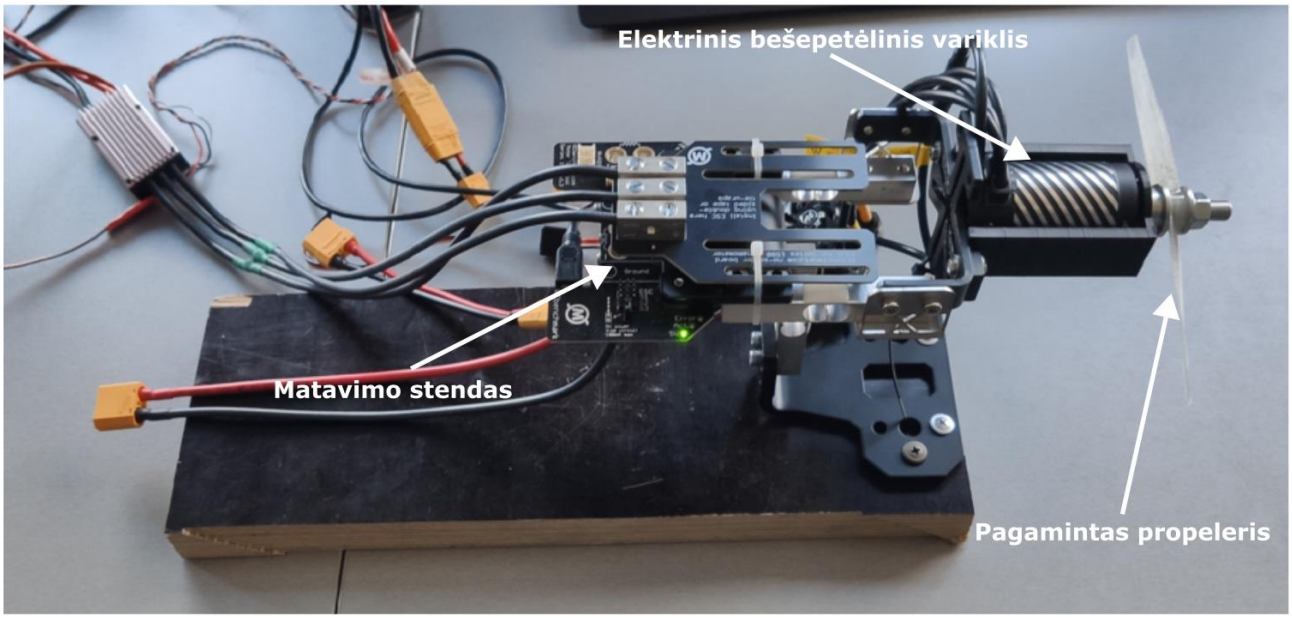
2.3 lentelė Pagamintų propelerių stiklo siūlų kiekiai

		Propeleriuose naudotų siūlų kiekis				
Siūlų įdėjimo eilė	Siūlų ilgiai	1–3 Propeleriai	4 Propeleris	5 Propeleris	6–7 Propeleriai	8–9 Propeleriai
Pirmas	19,5 cm	2	2	2	2	2
Antras	14,5 cm	4	3	3	3	3
Trečias	12,5 cm	4	4	4	4	3
Ketvirtas	10,5 cm	4	3	3	3	3
Penktas	8,5 cm	4	4	4	3	3
Šeštas	6,5 cm	4	4	–	–	–
Apsukimo siūlas	29,25 cm	1	1	1	1	1

Tyrimui pasirinkti geriausi propeleriai pjovimui pagal atliktą literatūros analizę–6, 7 ir 8, propeleris. Taip pat buvo pasirinktas 4, kuris nebuvo pjaustomas. Kiti propeleriai nebuvo naudoti tyrime.

2.4.2 Bešepetėlinio variklio stendas

Norint palyginti skaitinius duomenis kartu su eksperimentiniais buvo atliktas tyrimas naudojant pagamintą propelerį, pritvirtintą prie elektrinio bešepetėlio variklio EZRUN 3665 ir matavimo stendo (2.7 pav.), tyrimas ant stendo buvo parinktas dėl galimybės apskaičiuoti propelerio triukšmą skirtinguose sūkių diapazonuose.



2.14 pav. Eksperimentinio tyrimo schema (sudaryta autoriaus, 2025)

Kadangi sūkių sensorius buvo netinkamas šiam varikliui, dėl pagrindinio korpuso, tyrimo metu sukimosi greitis buvo skaičiuojamas garso matavimo priemonėmis, ir programine įranga „RCbenchmark“, kuria pagalba buvo valdomas variklis.

Pirminiai variklio testavimai parodė, kad variklis veikia ir sugeba išsukti propelerį, elektrinis greičio valdiklis ties 1563–1569 verte rodė apie 3000 propelerio apsisukimų per minutę, propelerio trauka 2 sekundes buvo vidutinė 0,167 N. Pirminiuose skaitiniuose tyrimuose buvo 0,137 N, tai yra apie 20 %, nors tai gali atrodyti daug, reikia atminti, kad skaitiniuose tyrimuose propeleris nėra veikiamas variklio, tvirtinimo, aplinkos, atmosferos sąlygos yra tobulos, tad 20 %, yra tinkamas skirtumas triukšmo matavimam ant šio stendo.

Eksperimentiniuose tyrimuose naudojamas garso matuoklis SAUTER SU 130 (2.13 pav.), pagal gamintojo instrukcijas (Sauter GmbH, 2020), matuoklio matavimo diapazonas yra tarp 30–130 dB, matuoklio tikslumas yra 3 %, nuo jo maksimalios matavimo vertės, kas yra apie 0,13 dB, kadangi matavimų žingsnis yra 0,1 dB, paklaida atliktuose matavimuose yra apie 0,1 dB.

Pirminiuose tyrimuose buvo patikrinta vėjo slopintuvo įtaka matavimams, kuri yra apie 1 dB, tai neturi didelės įtakos mūsų matavimam ir tyrimo metu vėjo slopintuvas yra uždedamas, kad sumažinti įtaka žmonių kvėpavimo ir matavimo vietovės slėgių pokyčių įtaką triukšmo matavimuose.



2.15 pav. Garso matuoklis SAUTER SU 130 (sudaryta autoriaus, 2025)

2.4.3 F2D Kovinio modelio tyrimas

F2D kovinio modelio (2.14 pav.) tyrimas buvo pasirinktas norint palyginti atsiradusį triukšmą, ties dideliais sūkiais (apie 27 000–30 000 apsisukimų per minutę) ir patikrinti propelerio sukeliamą triukšmą realiomis sąlygomis. Kadangi modelis yra kordinis (pritvirtintas prie lyno), yra galimybė pamatuoti propelerio triukšmą keičiantis stebėtojo kampui.



2.16 pav. F2D kovinis modelis (sudaryta autoriaus, 2025)

Užvedus variklį planuojama matuoti propelerio triukšmą tokia pačia schema kaip ir stendo tyrime, tada paleidus modelį pamatuoti triukšmą, kuris sklinda stebėtojui esant šone. Taip pat norima išmatuoti triukšmą, kuris atsiranda tolimoje erdvėje (daugiau negu 50 m.), skrydžiui pasirenkamas laukas, esantis užmiestyje, kad įtakos nedarytų miesto garsai (automobiliai, kaimyno barnis su žmona, kiti orlaiviai).

Tyrimo metu bus patikrinama, kaip triukšmas kinta nuo atstumo, bus palyginami propeleriai, nustatomas triukšmas, kurį jaučia žmogus, valdantis kovinį modelį.

2.4 Antro skyriaus išvados

1. Šiame skyriuje buvo aptarta metodologija, kuri bus taikoma tyrimo metu, išskirti pagrindiniai parametrai, į kuriuos bus kreipiamas dėmesys. Sudaryta darbų eiga baigtinių tūrių erdvėje. Parinktas propelerių išpjovimo būdas, atlikti pirminiai skaičiavimai baigtinių tūrių aplinkoje, kurie parodė propelerių išpjovimų tinkamumą tyrimui. Pagal parinktus išpjovimus buvo pagaminti propeleriai, kurie bus naudojami tyrimui.
2. Parinkti metodai tyrimams leis lengviau nustatyti susidarantį skirtingą triukšmą ir jo priklausomybę nuo įvairių faktorių.

3. ORLAIVIO PROPELERIO IŠPJOVIMŲ TYRIMAS

Šioje dalyje aprašomas atliktas baigiamojo magistro darbo tyrimas, kurio metu yra ištiriami literatūros analizėje išskirti propelerio išpjaustymai, aprašomi atlikti jų skaitiniai ir eksperimentiniai tyrimai, pateikiamos tendencijos tarp skirtingų tyrimų, pagrindiniai triukšmo aspektai.

3.1 Skaitiniai tyrimai

Skaitiniai tyrimai kaip ir buvo aprašyta antrajame skyriuje, pirmiausia atliekami ties 3000 apsisukimų per minutę greičiu, laike nekintančiu sprendiniu. Nepjaustytas, 5, 10 ir 15 išpjovimų propeleriai sukeliami į baigtinių tūrių erdvę ir jiems sudaromi skirtingi tinkleliai dėl skirtingos propelerių geometrijos, visos geometrijos buvo sudarytos tais pačiais principais ir metodikomis, kurios aprašytos antrajame skyriuje. Tinklelio parametrai pavaizduoti 3.1 lentelėje:

3.1 lentelė Propelerių tinkleliai ir jų parametrai

Propeleris	Celių kiekis	Šoninis nuokrypis	Ortogonali kokybė
Nepjautas 	413918	Vidutinis = 0,02 Maksimalus = 0,59	Vidutinė = 0,97 Minimali = 0,41
5 išpjovimai 	922307	Vidutinis = 0,02 Maksimalus = 0,60	Vidutinė = 0,98 Minimali = 0,40
10 išpjovimų 	806080	Vidutinis = 0,02 Maksimalus = 0,62	Vidutinė = 0,98 Minimali = 0,38
15 išpjovimų 	796865	Vidutinis = 0,02 Maksimalus = 0,70	Vidutinė = 0,98 Minimali = 0,29

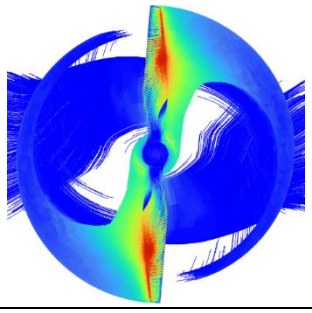
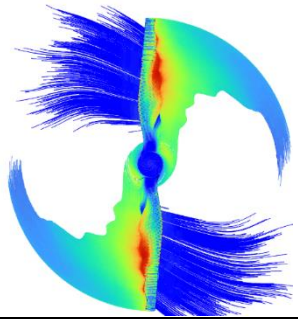
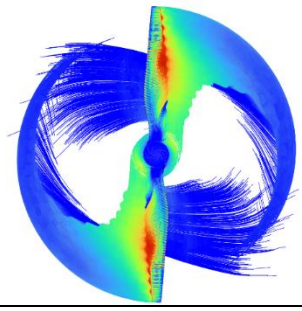
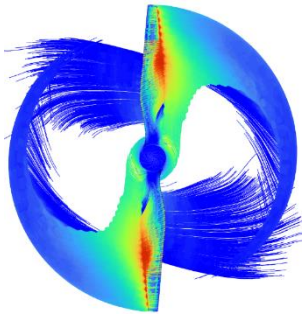
Propelerių celių kiekis, matomas iš 1 lentelės padidėja dvigubai, o šoninis nuokrypis ir ortogonali kokybė stipriai nepasikeičia, kadangi maksimalus turimos licencijos turimų celių kiekis negali viršyti 1 048 576 celių, galimybė naudoti tankesnį tinklelį išpjaustytiems propeleriams nėra galima.

Atliekant skaitinį tyrimą reikėtų paminėti, kad kiekvienam išpjovimui reikalingas skirtingas tinklelis, o pati erdvė, kurioje sukasi propeleris, taip pat galėtų būti keičiama pagal poreikį, priklausomai nuo kompiuterinių resursų ir turimos licencijos.

Kitas svarbus aspektas yra propelerio Y+ reikšmė, pagal kurią matuojamas atstumas nuo pirmojo tinklelio langelio iki paviršiaus. Mūsų tyrimų metu Y+ reikšmė neviršija 2,28 vertės.

Iš atlikto laike nekintančio sprendinio, naudojant integruota plačiajuosčio triukšmo modelį, buvo gauti skirtingų išpjovimų garso galios lygiai, ir traukos parametrai, kurie surašyti 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė Propelerių parametrai laike nekintančiame sprendinyje

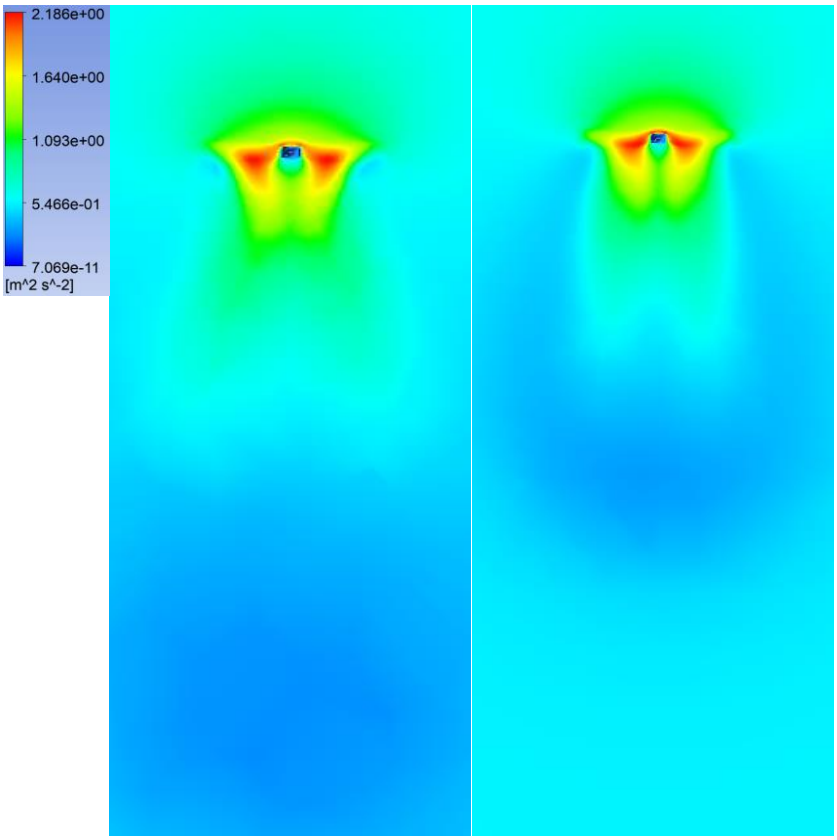
Propeleriai	Garso galios lygis (dB)	Trauka (N)
Nepjautas 	56,7 (Propeleris sukeliantis didžiausia triukšmą)	0,137 (Propeleris turintis daugiausiai traukos)
5 išpjovimai 	52,7 (Propeleris sukeliantis mažiausia triukšmą)	0,103 (Propeleris sukeliantis mažiausiai traukos)
10 išpjovimų 	54,4 (Triukšmo sumažėjimas yra mažesnis negu 5 įpjovimų propelerio)	0,119 (Traukos sumažėjimas yra mažesnis negu 5 įpjovimų propelerio)
15 Išpjovimų 	56,2 (Triukšmas sumažėjimas nereikšmingas palyginus su nepjautu)	0,122 (Traukos sumažėjimas nereikšmingas palyginus su nepjautu)

Iš gautų duomenų yra matomas ženklus akustinės galios lygio ir traukos kritimas 5 išpjaustymų propelerio, propelerio triukšmas sumažėja 60 %, arba 4 dB, kas atitinka Gu et al. (2024),

trikampių išpjaustymų triukšmo kritimą, kuris buvo 4,4 dB, traukos sumažėjimas įvyksta 24,8 % tai kas atitinka Lee et al. (2019) išpjaustytų propelerių traukos sumažėjimą, kuris buvo 23,8 %.

10 ir 15 išpjovimų propeleriuose matomas sumažėjimas nėra toks ženklus kaip 5 išpjaustymų propeleriuose. 15 išpjovimų propeleris išlaiko beveik pradinį triukšmą, tačiau ir traukos sumažėjimas daug mažesnis.

Turbulentinės kinetinės energijos susidarymas (3.1 pav.) yra tokios pat maksimalios vertės atžvilgiu, tačiau jos pasiskirstymas y–ašyje yra siauresnis 5 išpjovimų propelerio.

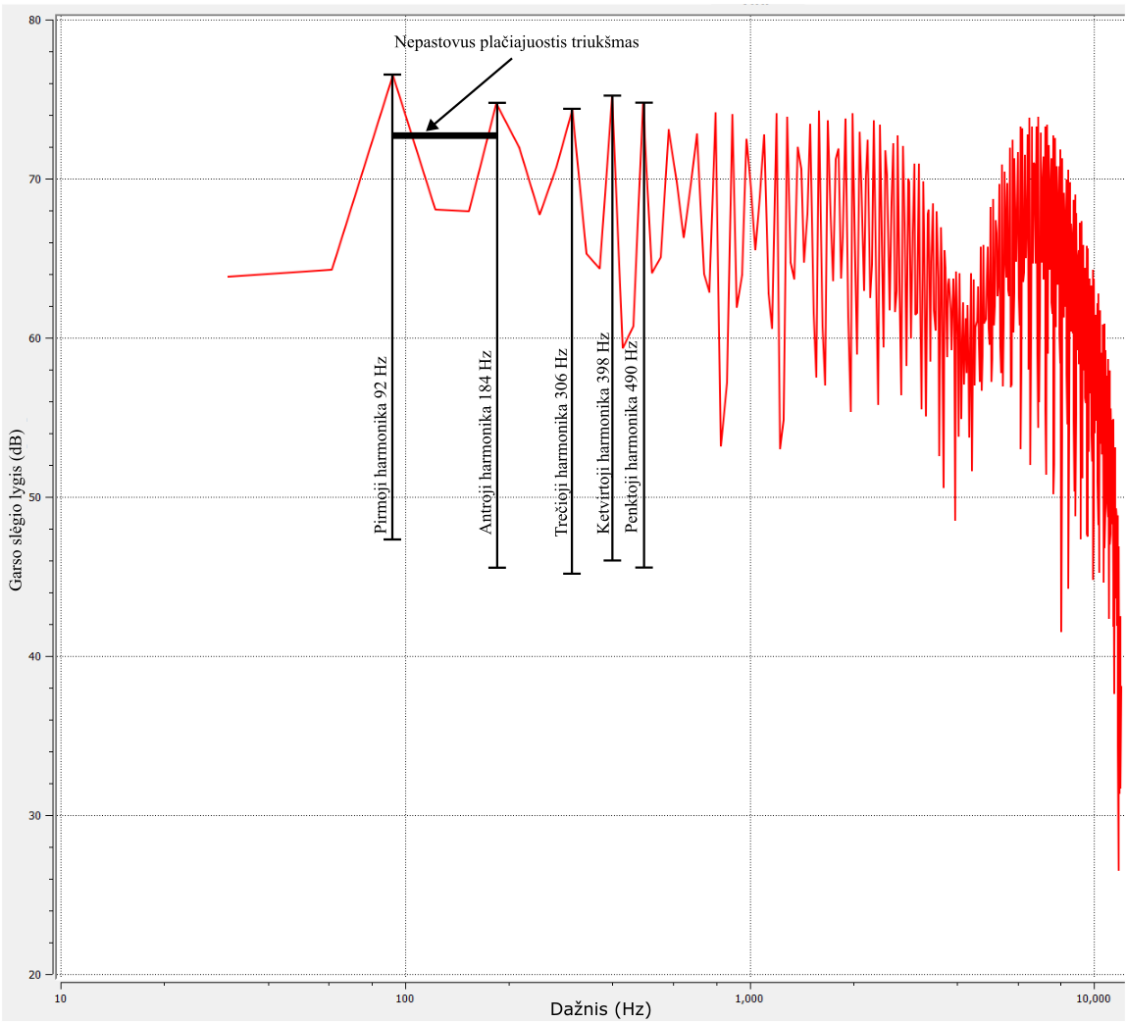


3.1 pav. Propelerių simuliacijų turbulentinė kinetinė energija (sudaryta autoriaus, 2025)

Šis turbulencijos kinetinės energijos pasiskirstymas yra viena iš triukšmo sklidimo X ir Y ašyse priežasčių. Propeleris sukurdamas didesnį turbulentinį srautą už propelio leidžia sklisti triukšmui didesnį atstumą, kas leidžia teigti, kad propelerio apgaubimas būtų tikslingas triukšmo slopinimo būdas.

Orlaiviuose, kuriuose yra keleiviai, šis turbulentinis oro srautas apteka orlaivį, ir gali turėti didesnę įtaką triukšmui pačiame orlaivyje, pavyzdžiui, sraigtasparnyje.

Laike kintančių simuliacijų rezultatai skirti atpažinti mentės praleidimo dažnį ir nustatyti bendro garso slėgio lygį esant skirtingiems apsisukimams ir dažniams. Panaudojus Furje transformaciją turimam propeleriui yra matomos (3.2 pav.) mentės praleidimo dažnio harmonikos ties 92 Hz, nors tai neatitinka teorinio mentės praleidimo dažnio, kuris apskaičiuotas yra 100 Hz, kitos harmonikos įvyksta kas 92 Hz, tai atitinka teorinę medžiagą.

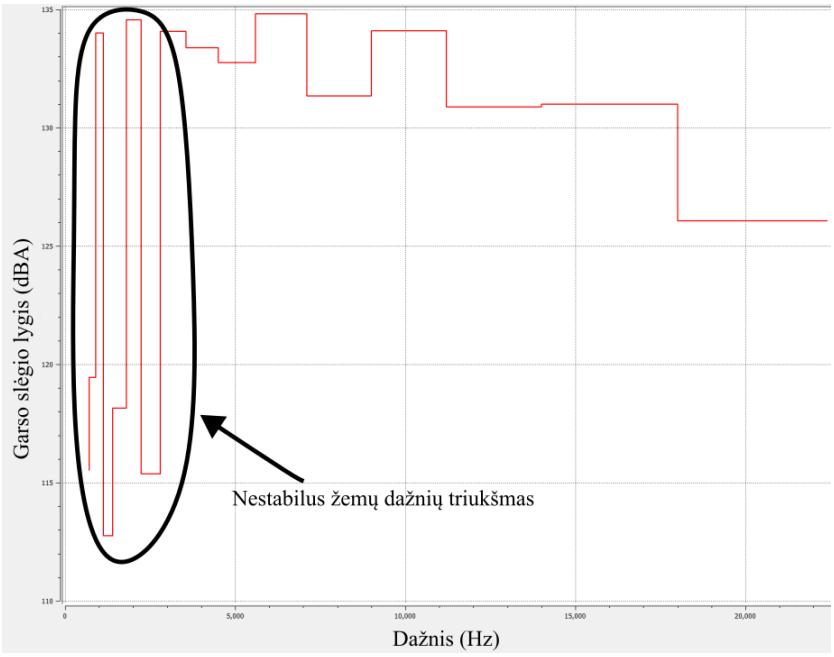


3.2 pav. Triukšmas susidarantis propelerių galiukuose (sudaryta autoriaus, 2025)

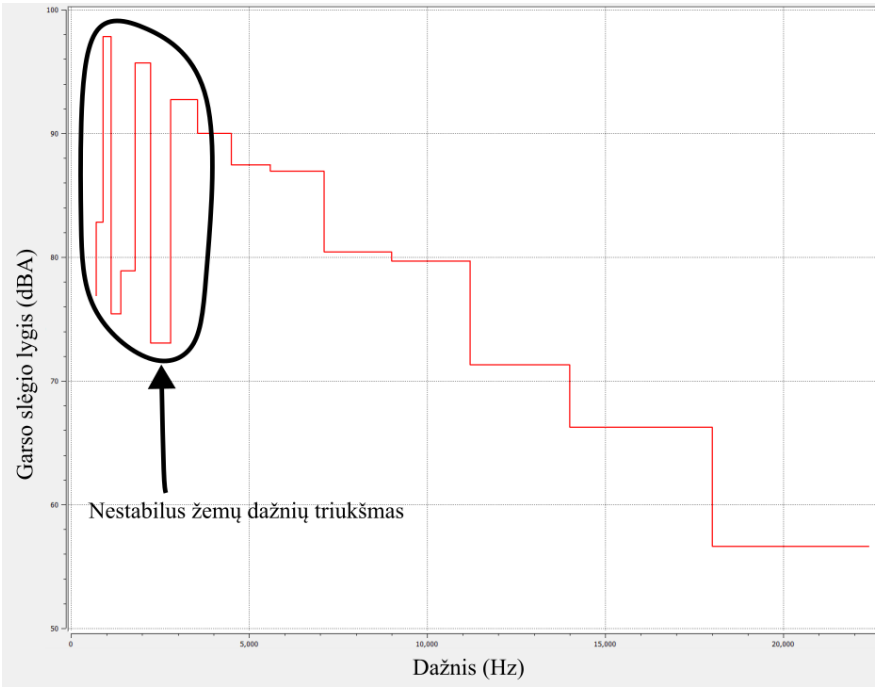
Iš šio garso slėgio lygio ir dažnio grafiko taip pat matyti nepastovus plačiajuostis triukšmas kuris keičia skirtingų harmonikų išsidėstymą.

Verta paminėti, kad ties 5000 Hz matomas triukšmo sumažėjimas, kuris paaiškinamas formule $SS_{qq}(k_r, K_{X,v})$, yra tikėtina, kad propeleriui prasisukus atsiradusios neigiamo slėgio zonos sumažina triukšmą.

Atliktos visų skirtingų išpjovimų skaitinės simuliacijos ties 30000 apsisukimų per minutę parodė, kad panaudojus 1/3 oktavas yra pastebimas nestabilus triukšmas arti propelerio (3.3 pav.). Šis triukšmas daro įtaką mažiau oktavų juostų negu tolimesnis (3.4 pav.), prie pat propelerio esančiame imtuve nestabilus triukšmas siekia iki 3000 Hz, tolimesniame šis triukšmas siekia apie 4500 Hz. Tai padaro triukšmą skardesnį ir labiau girdimą arti propelerio.



3.3 pav. Nestabilus triukšmas oktavų juostoje propelerio galiukuose (sudaryta autoriaus, 2025)

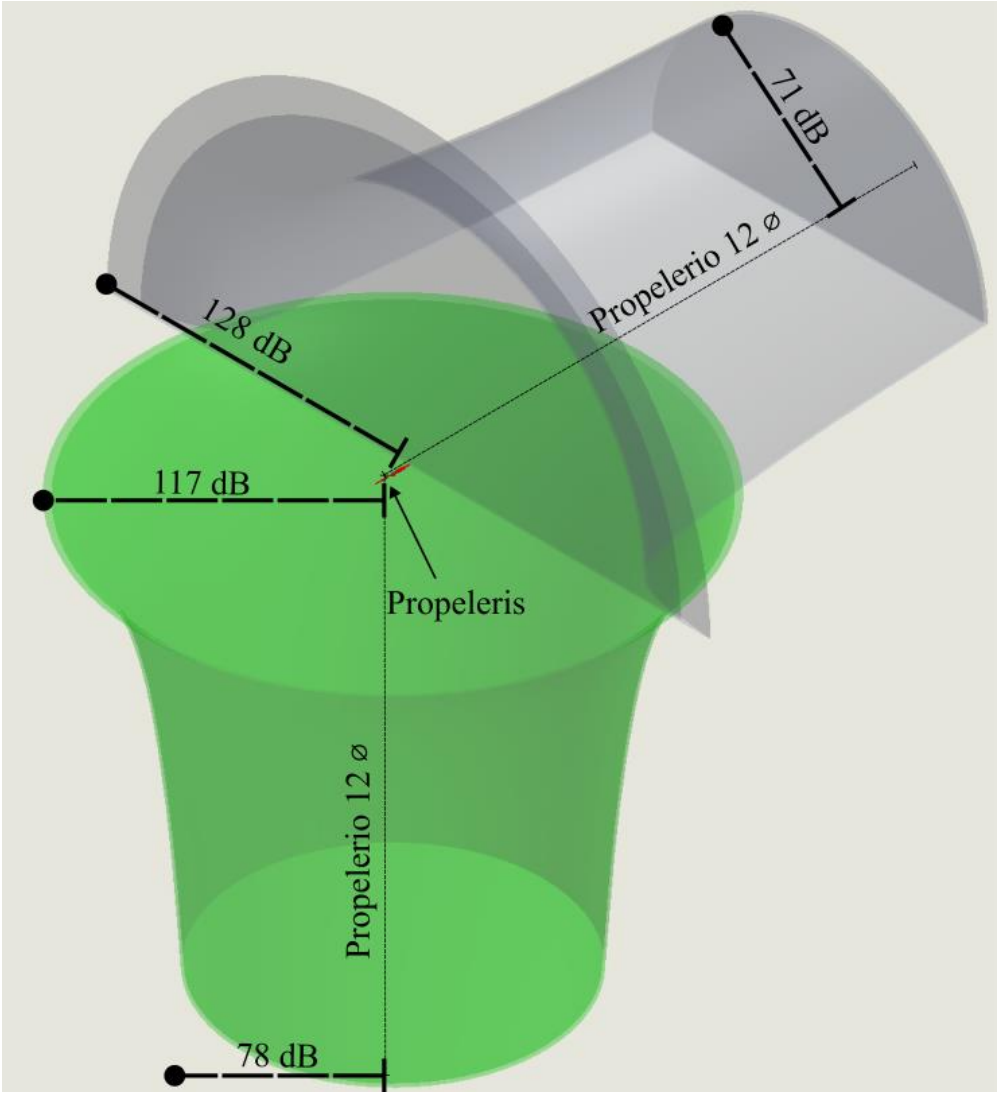


3.4 pav. Nestabilus triukšmas oktavų juostoje 6 propelerių skersmens atstumu (sudaryta autoriaus, 2025)

Šis nestabilus triukšmas nuo propelerių išpjovimų nesikeičia, pats triukšmas yra sumažėjęs, tačiau nestabilus triukšmas išlieka nepakeitęs dažnių.

Prieš tai darytuose skaičiavimuose 5 išpjovimų propeleris mažina triukšmą visuose atstumuose labiau negu kiti išpjovimai, tai vyksta ir 30 000 apsisukimų skaitinėse simuliacijose (3.5 pav.), galima matyti, kad didelių greičio propelerio šone vyraujantis triukšmas šalia yra 11 dB arba net 254 %, didesnis negu po propeleriu esantis triukšmas.

Tolimesniuose taškuose yra matomas stipresnis triukšmas už propelerio yra 7 dB arba 124 %. Tai leidžia daryti prielaidą, kad periodinis triukšmas yra labiau aktualus ties arti propelerio šono, o plačiajuostis triukšmas aktualesnis už propelerio



3.5 pav. 5 įpjovimų sukeliamas triukšmas ties 30 000 apsisukimų per minutę (sudaryta autoriaus, 2025)

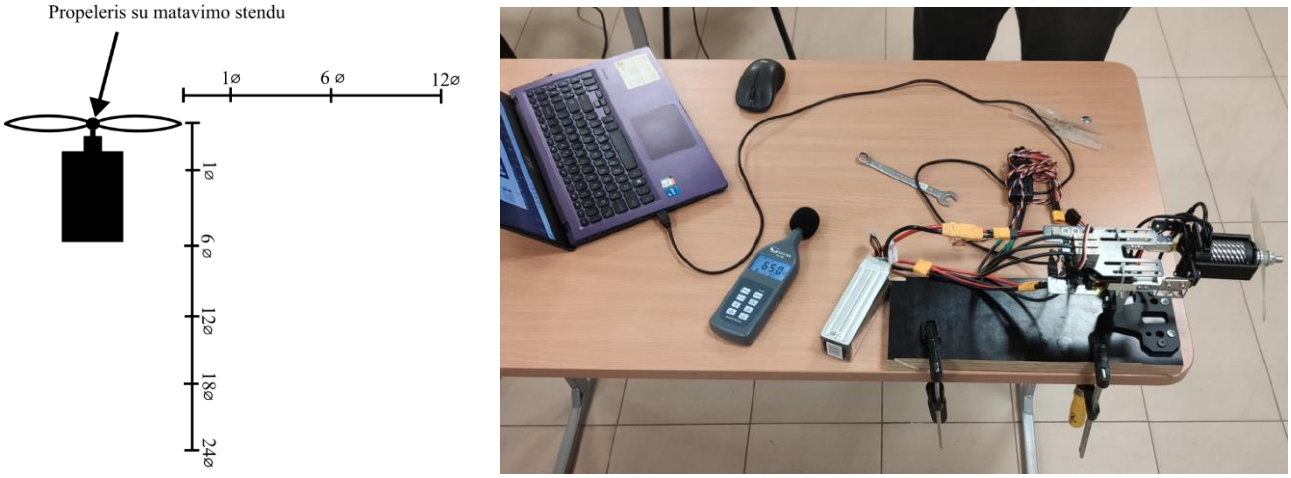
3.2 Eksperimentiniai tyrimai

Eksperimentiniai tyrimai buvo pradėti išpjaustant propelerių geometriją (3.6 pav.) pagal antroje darbo dalyje parinktus išpjovimus, svarbu pabrėžti, kad prieš atliekant išpjaustymus propeleriai buvo balansuojami.



3.6 pav. Išpjaustyti propeleriai (sudaryta autoriaus, 2025)

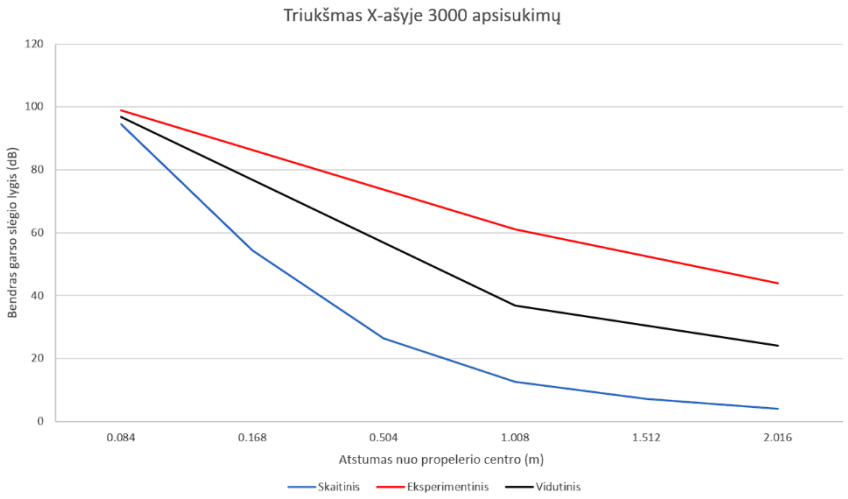
Eksperimento (3.7 pav.) matavimo metu pasirinkti taškai buvo x ir y ašyje dėl didžiausios tendencijos triukšmui skirtis šiose ašyse. Matavimo taškai buvo parinkti išmatavus atstumą nuo propelerio centro ašies, kas metrą nuo propelerio (kas yra 6 propelerio skersmenys). Garso metras tyrimo metu buvo laikomas rankose, propelerio sukimosi ašyje arti propelerio nebuvo paviršių kurie galėtu daryti įtaką tyrimo rezultatams.



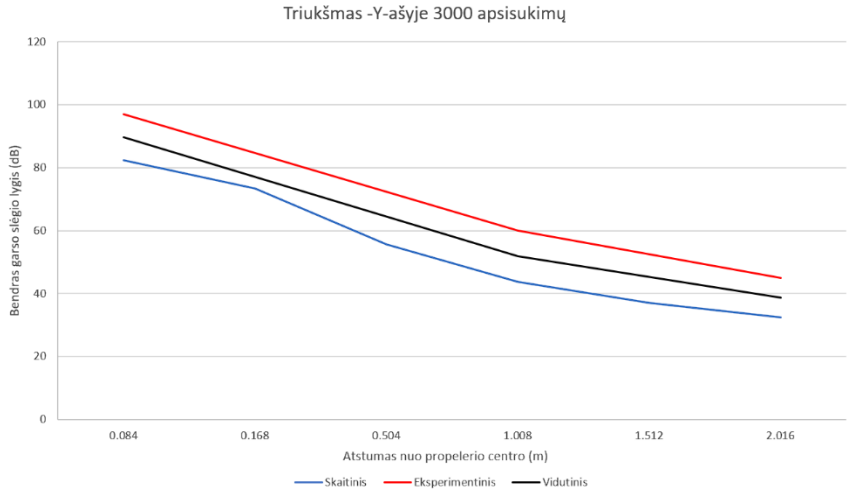
3.7 pav. Eksperimentinio matavimo stendo schema ir stendo nuotrauka (sudaryta autoriaus, 2025)

Norint įvertinti skirtumus tarp eksperimentinio ir skaitinių tyrimų, duomenys iš abiejų yra suvedami ir išvedama bendro garso slėgio lygio grafikas X–ašyje (Šone propelerio) (3.8 pav.) ir -Y–ašyje (už propelerio) (3.9 pav.). Pastebimas labai didelis triukšmo skirtumas tarp skaitinių ir eksperimentinių bandymų ypatingai X–ašyje, tačiau tendencija lyginant tarp triukšmu yra panaši. Tikėtina, kad skaitinių tyrimų metu triukšmas yra labiau išskirstytas į plačiajuostį ir periodinį, eksperimentinių tyrimų metu triukšmas labiau maišosi tarpusavyje ir sudaro bendra spektrą.

Didžiausia vertė šalia propelerio eksperimentiniuose tyrimuose išlieka tarp 99–97 dB, tarp vieno ir dviejų metrų skirtumas tarp skirtingų ašių triukšmo yra minimalus 1–2 dB. Tolimesnio triukšmo skirtumas yra didesnis tarp 3–4 dB, kas parodo, kad triukšmas, kurį sukelia turbulencija, yra toliau nešamas savo ašyje. Yra tikėtina, kad stendas turi įtakos triukšmo sklidimui, sumažindamas triukšmą tolimesnėse vietose, sulaikydamas dalį turbulencijos.



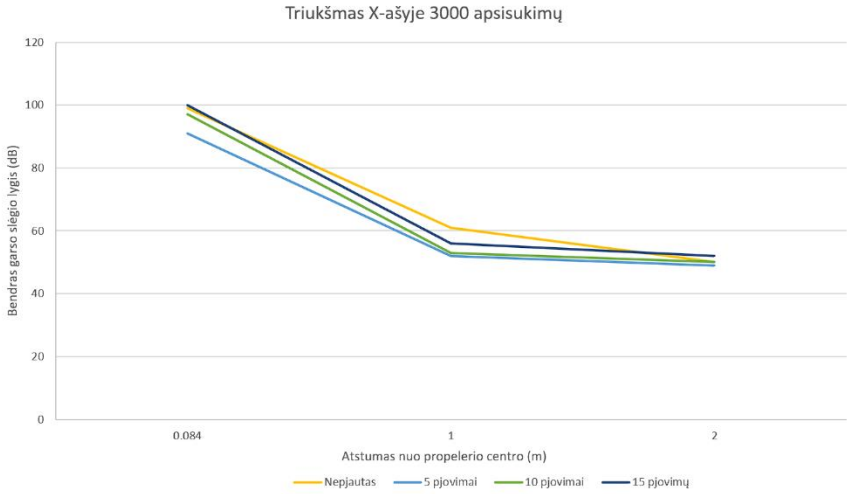
3.8 pav. Skaitinis ir eksperimentinis triukšmas X-ašyje (sudaryta autoriaus, 2025)



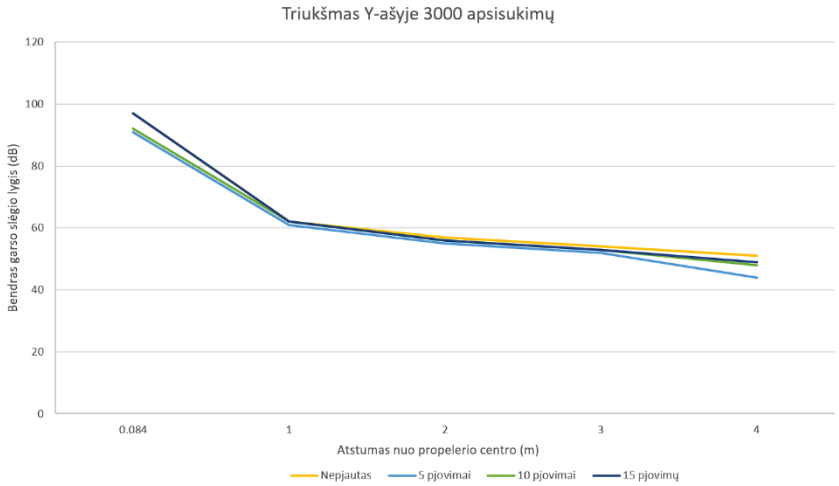
3.9 pav. Skaitinis ir eksperimentinis triukšmas X-ašyje (sudaryta autoriaus, 2025)

Lyginant eksperimento metu ištestuotus propelerius su išpjovimais, yra galimybė įvertinti, kiek realiomis sąlygomis yra garso sumažėjimo, priklausomai nuo skirtingų išpjovimų. Pagal eksperimentinius tyrimus, kaip ir skaitiniuose, geriausiai pasirodė 5 pjovimų propeleris X-ašyje (3.10 pav.), kurio triukšmas šalia propelerio 91 dB, o nepjaustyto 99 dB, tai yra 151 %, triukšmo sumažėjimo, reiktu pabrėžti, kad atliekant tyrimus 5 išpjaustymų propeleris fiziškai girdėjosi kaip tylesnis, tačiau nėra galimybės šio triukšmo išreikšti dažniais, tam kad nustatyti pagrindinius dažnius sukeliančius triukšmą. Triukšmas didesniuose atstumuose 5 išpjovimų propelerio išlieka mažesnis tačiau ties 6 propelerio diametrais (1 metras), triukšmas labiau priartėja prie kitų propelerių, vienas iš aspektų yra propelerio perėjimas iš artimo lauko į laisvą lauką kur triukšmas yra mažiau juntamas žmogui.

Y–ašyje (3.11 pav.) propelerio triukšmui išpjovimų įtaka yra mažesnė, tačiau 5 įpjovimų propeleris, yra mažiausiai skleidžiantis triukšmą. Taip pat reikia pabrėžti, kad 15 išpjovimų propeleris ties tam tikrais atstumais susilygina su neišpjauto propelerio triukšmu.

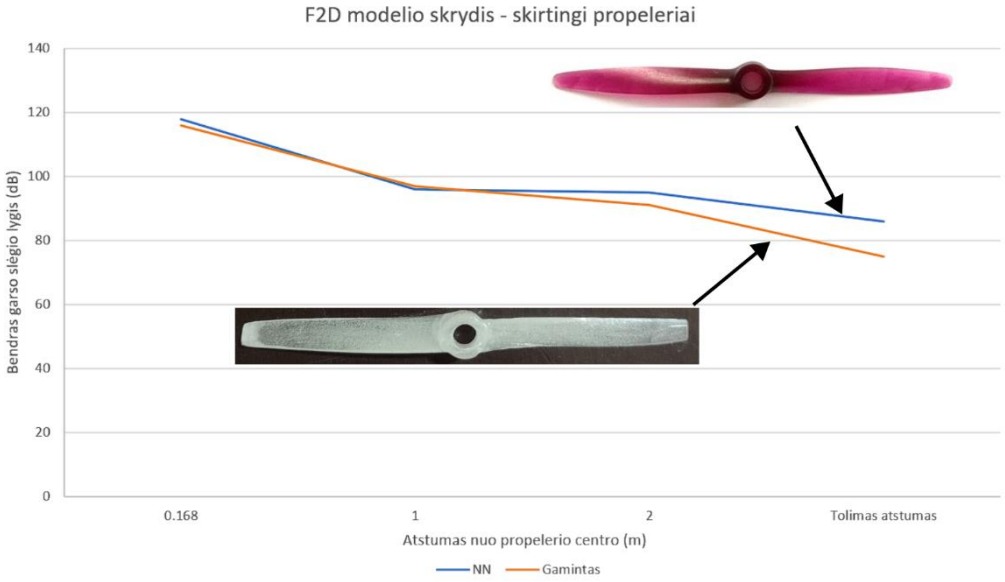


3.10 pav. Triukšmo tendencija X-ašyje esant 3000 apsisukimų per minutę (sudaryta autoriaus, 2025)



3.11 pav. Triukšmo tendencija Y-ašyje esant 3000 apsisukimų per minutę (sudaryta autoriaus, 2025)

F2D modelio tyrimo metu buvo išbandytas propelerio triukšmas eksperimentinėmis sąlygomis, kai modelis neskraido, atlieka figūras, arba skraido ratais. Pirmiausiai buvo matuotas NN propeleris, kuris yra lyginamas kartu su gamintu propeleriu (3.12 pav.). Propelerio garsui skirtingi propeleriai įtakos neturi iki 2 metrų, toliau negu 2 metrai yra pastebimas gaminto propelerio pranašumas sukelti mažesnį triukšmą, tačiau šis fenomenas gali įvykti dėl skirtingo mentės išstatymo kampo, paviršiaus ploto ir daugybės kitų techninių priežasčių kurios nėra aptariamos mūsų tyrime.



3.12 pav. Skirtingų propelerių triukšmas (sudaryta autoriaus, 2025)

Modelis skrydžio metu buvo matuojamas iš dviejų pozicijų (3.13 pav.), pirmoje pozicijoje buvo matuojamas triukšmas, kuris įvyksta praskrendant modeliui aplinkui, antroje pozicijoje buvo matuojamas triukšmas modeliui atliekant figūras, antroje pozicijoje stovėtų žmogus valdantis modelį.



3.13 pav. Skirtingų propelerių triukšmas (sudaryta autoriaus, 2025)

Foninis triukšmas užfiksuotas matavimų metu buvo 48 dB, pirmoje pozicijoje triukšmas didžiausias praskridimo metu 86 dB, tolimiausioje pozicijoje 67 dB. Antroje pozicijoje išmatuotas triukšmas buvo 87 dB, figūros ir skridimas ratu triukšmui įtakos nedarė. Buvo išmatuotas triukšmas 60 metrų nuo pirmos matavimo pozicijos, triukšmas sumažėjo 18 dB.

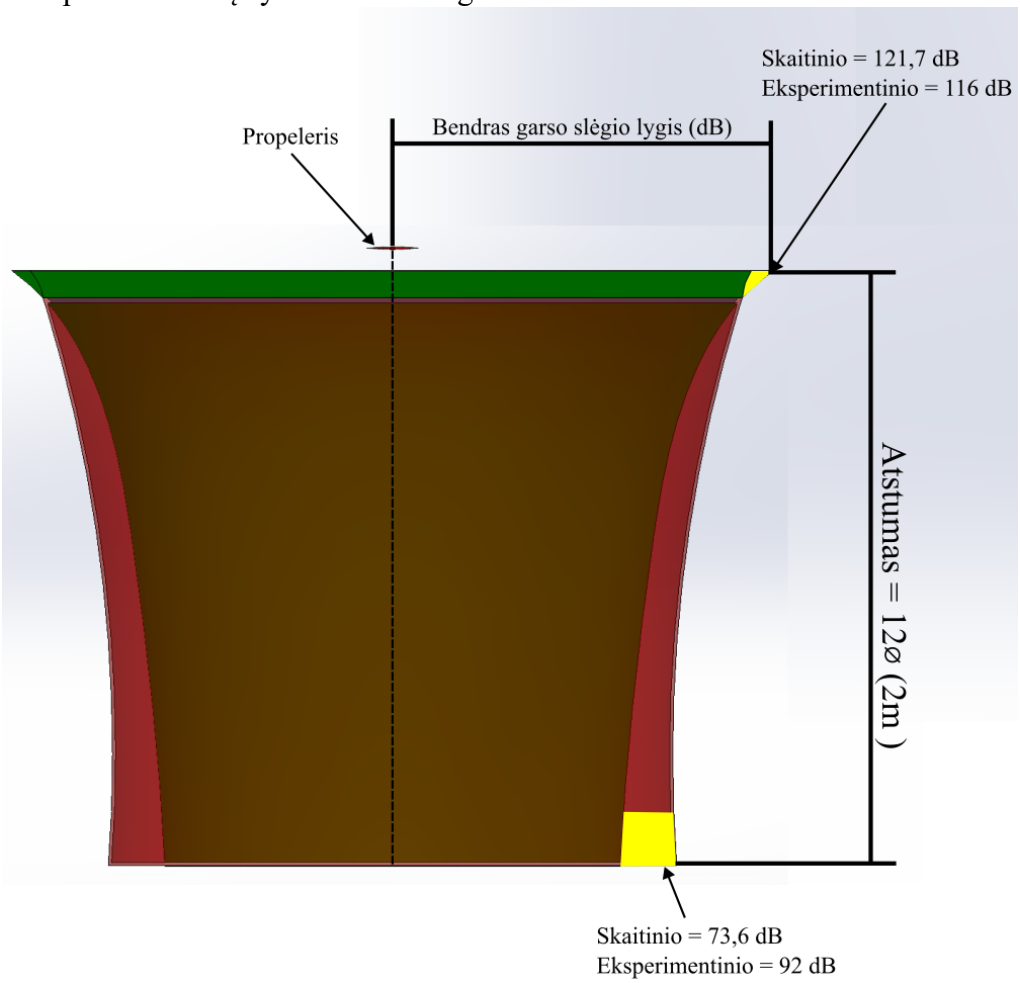
Pamatavus nepjauto propelerio skleidžiamą garsą po skrydžio buvo pastebėtas propelerio įlūžimas (3.14 pav.) ties ašimi, dėl šios priežasties buvo nuspręsta nematuoti propelerių su išpjovimais naudojant F2D modelį.



3.14 pav. Propelerio lūžis (sudaryta autoriaus, 2025)

Antroje pozicijoje ištirtas triukšmas parodo, kad triukšmas labiau keičiasi nuo atstumo negu nuo propelerio pozicijos ir atstumas yra svarbesnis triukšmo mažėjimo faktorius negu triukšmo kampas.

F2D kovinio modelio eksperimentinio tyrimo gauti propelerių rezultatai, palyginti su skaitinėmis simuliacijomis (3.15 pav.), parodo, kad maksimalaus triukšmo skirtumas šalia propelerio yra 5,7 dB, o tolimiausiame taške skirtumas siekia 18,4 dB, tai parodo, kad skaitinė simuliacijų erdvė yra ypač sterili ir slopina triukšmą žymiai labiau negu reali erdvė.



3.15 pav. Skaitinio ir eksperimentinio tyrimo propelerio triukšmas esant 30000 apsisukimų per minutę (sudaryta autoriaus, 2025)

Apibendrinant galima teigti, kad skaitiniai eksperimentai yra tinkami stebėti tendenciją triukšmo mažėjimo, tačiau yra netikslus nustatant tikslų triukšmą išdėstytuose taškuose, ir eksperimentiniai bandymai yra reikalingi eksperimentinio triukšmo nustatymui. Triukšmas, kuris susidaro už propelerio, taip pat parodo, kad turbulencija mažina triukšmo slopimą kuris įvyksta dėl didėjančio atstumo.

3.3 Skyriaus išvados

1. Šiame skyriuje buvo aprašyti atlikti skaitiniai ir eksperimentiniai tyrimai, pastebėtos vyraujančios triukšmo tendencijos, išskirti periodiniai ir plačiajuosčiai triukšmai. Išskirtas mažiausiai triukšmo sukeliantis propeleris, palygintas geriausias 5 išpjovimų propeleris kartu su nepjautu propeleriu. F2D kovinio modelio skrydis sulygintas su skaitiniais tyrimais.
2. Nustatyta, kad tiksliausias triukšmo matavimas yra fizinis ir skaitinis tinkamas triukšmo kritimo tendencijos nustatymui.

IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS

Šiame moksliniame darbe buvo ištirtas propelerio sukeliamas triukšmas, sudaryta metodologija propelerių triukšmui tirti naudojant baigtinių tūrių programas ir eksperimentinius bandymus. Remiantis literatūros analize, gautais skaitiniais ir eksperimentiniais rezultatais, yra pateikiamos tokios išvados:

1. Atlikus mokslinės literatūros analizę, buvo išskirti pagrindiniai orlaivio propelerio garsą sudarantys triukšmai – plačiajuostis ir periodinis. Buvo nustatytas vienas pagrindinių triukšmo mažinimo būdų – orlaivio sekamosios mentės dalies geometrijos išpjovimas
2. Atliktas skaitinis propelerių tyrimas, kurio metu buvo nustatytas logaritminis garso galios lygio sumažėjimas, 4 dB (60 %), tai buvo 5 įpjovimų propelerio lyginant su nepjautu, bendras maksimalios vertės garso lygio sumažėjimas buvo 8 dB (151 %), 15 išpjovimų propeleris triukšmo nesumažino, 10 įpjovimų propelerio triukšmas sumažėjo 2 dB (26 %).
3. Buvo išskirtas periodinis ir plačiajuostis triukšmai, skaitinio tyrimo metu buvo pastebėta, kad triukšmas, kuris yra labiau priklausomas nuo turbulencijos, mažėja mažiau dėl atstumų pokyčių.
4. Atliktas eksperimentinis elektrinio bešepetėlio variklio tyrimas, kuriame pastebėta, kad skaitinio tyrimo metu triukšmas, esantis propelerio šone, patiria daug didesnį sumažėjimą dėl atstumo. Tačiau lyginant skaitinius ir eksperimentinius tyrimus, dėl didėjančio atstumo nuo propelerio, triukšmo mažėjimas yra panašus.
5. Atliktas F2D kovinio modelio skrydis, kurio metu buvo ištestuotas skirtingų propelerių triukšmas, dėl nepjauto propelerio mechaninio lūžio, buvo priimtas sprendimas netestuoti išpjautų propelerių. Išmatuota, kad 60 metrų nuo propelerio triukšmas sumažėja 18 dB (87 %), orlaivio pozicija žmogui stovint centre triukšmui įtakos neturi.
6. Skrydžio ir skaitinės reikšmės ties 30 000 apsisukimų per minutę, panašios, kur triukšmas didžiausias 5,7 dB (93 %) skirtumas, 12 ⌀ nuo propelerio ašies centro triukšmo skirtumas 16,4 dB (732 %).

Taip pat pateikiamos rekomendacijos tolesniems tyrimams, susijusiems su propelerio triukšmu naudojantis šio darbo metodologija:

1. Rekomenduojama ištirti medžiagos parinkimo įtaką triukšmui, tikrinti, kaip skirtingos medžiagos daro įtaką triukšmo susidarymui ir sklidimui, palyginti skirtingų propelerių gamybos būdus.

2. Parinkti skirtingus išpjovimus ir keisti išpjovimo metodiką ir tikrinti, kaip tai daro įtaką triukšmo susidarymui.
3. Atlikti tyrimus, susijusius su aplinkos faktorių įtaka triukšmui. Įvertinti atmosferos slėgį, drėgnumo kiekį ore, atlikti tyrimus labai triukšmingoje aplinkoje ir labai tylioje aplinkoje.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

Akiwate, D. C., Parry, A. B., Joseph, P., & Paruchuri, C. C. (2021, August 2). On the balance between the tonal and broadband noise of uninstalled propellers. *AIAA AVIATION 2021 FORUM*. AIAA AVIATION 2021 FORUM, VIRTUAL EVENT. https://doi.org/10.2514/6.2021-2308

Baker, T. J. (2024). *Fluent User's Guide*.

Deters, R. W., Ananda Krishnan, G. K., & Selig, M. S. (2014, June 16). Reynolds Number Effects on the Performance of Small-Scale Propellers. *32nd AIAA Applied Aerodynamics Conference*. 32nd AIAA Applied Aerodynamics Conference, Atlanta, GA. https://doi.org/10.2514/6.2014-2151

Ewert, R., & Schröder, W. (2004). On the simulation of trailing edge noise with a hybrid LES/APE method. *Journal of Sound and Vibration*, *270*(3), 509–524. https://doi.org/10.1016/j.jsv.2003.09.047

Goody, M. (2004). Empirical Spectral Model of Surface Pressure Fluctuations. *AIAA Journal*, *42*(9), 1788–1794. https://doi.org/10.2514/1.9433

Gu, Y., Song, F., Bai, H., Wu, J., Liu, K., Nie, B., Wang, L., Zhang, Z., & Lu, Z. (2024). Numerical and experimental studies on the owl-inspired propellers with various serrated trailing edges. *Applied Acoustics*, *220*, 109948. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2024.109948

Hansen, P. C. H. (2001). *FUNDAMENTALS OF ACOUSTICS*.

Hede, A. J., & Bullen, R. B. (1981). Human Perception and Reaction to Noise. *Architectural Science Review*, *24*(3), 58–64. https://doi.org/10.1080/00038628.1981.9696469

Hubbard, H. H. (1991). *NASA Langley Research Center Hampton, Virginia*.

Ising, H., & Kruppa, B. (2004). *Health Effects caused by Noise: Evidence in the Literature from the Past 25 Years*.

Jaworski, J. W., & Peake, N. (2020). Aeroacoustics of Silent Owl Flight. *Annual Review of Fluid Mechanics*, *52*(1), 395–420. https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010518-040436

Junger, C. (2019). *Computational aeroacoustics for the characterization of noise sources in rotating systems*.

Lee, H. M., Lu, Z., Lim, K. M., Xie, J., & Lee, H. P. (2019). Quieter propeller with serrated trailing edge. *Applied Acoustics*, *146*, 227–236. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.11.020

Lilley, M. (1993). *THE RADIATED NOISE FROM ISOTROPIC TURBULENCE REVISITED*.

Made, J. E., & Kurtz, D. W. (1970). *A Review of Aerodynamic Noise From Propellers, Rofors, and*

Liff Fans.

Manoha, E., Redonnet, S., & Caro, S. (2010). Computational Aeroacoustics. In R. Blockley & W. Shyy (Eds.), *Encyclopedia of Aerospace Engineering* (1st ed.). Wiley. https://doi.org/10.1002/9780470686652.eae344

Menter, F. R. (2021). *Best Practice: Scale-Resolving Simulations in Ansys CFD*.

Michael J. T. Smith (1989) *Aircraft Noise*, Cambridge university press.

Miljković, D., Ivošević, J., & Bucak, T. (2012). *TWO VS. THREE BLADE PROPELLER - COCKPIT NOISE COMPARISON*.

Oerlemans, S. (2009). *Detection of aeroacoustic sound sources on aircraft and wind turbines* [University of Twente]. https://doi.org/10.3990/1.9789080634398

Por, E., van Kooten, M., & Sarkovic, V. (2019). *Nyquist–Shannon sampling theorem*.

Powell, A. (1995). Why do Vortices Generate Sound ? *Journal of Mechanical Design*.

Ray, E. F. (2010). *MODELING SOUND PROPAGATION*.

Russo, L., Ostieri, M., & Tognaccini, R. (2018, June 25). Thrust Extraction from Vorticity Fields in Steady and Unsteady Flows. *2018 Applied Aerodynamics Conference*. 2018 Applied Aerodynamics Conference, Atlanta, Georgia. https://doi.org/10.2514/6.2018-3967

Spakovszky. (2007, December 4). *Thermodynamics*. https://web.mit.edu/16.unified/www/FALL/thermodynamics/

Štorch, V., Nožička, J., Brada, M., Gemperle, J., & Suchý, J. (2016). Measurement of noise and its correlation to performance and geometry of small aircraft propellers. *EPJ Web of Conferences*, *114*, 02112. https://doi.org/10.1051/epjconf/201611402112

Su, S. (2020). *Instruction Manual Digital Sound Level Meter*.

Versteeg, H. K, Malalasekera, W. (1995). An introduction to Computational Fluid Dynamics.

Wei, Y., Xu, F., Bian, S., & Kong, D. (2020). Noise Reduction of UAV Using Biomimetic Propellers with Varied Morphologies Leading-edge Serration. *Journal of Bionic Engineering*, *17*(4), 767–779. https://doi.org/10.1007/s42235-020-0054-z

Williams, J. E. F., & Hawkings, D. L. H. R. (1969). Sound Generation by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, *264*(1151), 321–342.

Wróblewski, A., Macek, A., Bansiewicz, A., & Wodecki, J. (2024). Comparison of Hexcore and Poly-Hexcore computational meshes in the aspect of air flow modeling based on the actual

geometry of mining excavations. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1295*(1), 012007. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1295/1/012007

Yao, H.-D., Huang, Z., Davidson, L., Niu, J., & Chen, Z.-W. (2022). Blade-Tip Vortex Noise Mitigation Traded-Off against Aerodynamic Design for Propellers of Future Electric Aircraft. *Aerospace*, *9*(12), 825. https://doi.org/10.3390/aerospace9120825

Yu, P., Peng, J., Bai, J., Han, X., & Song, X. (2020). Aeroacoustic and aerodynamic optimization of propeller blades. *Chinese Journal of Aeronautics*, *33*(3), 826–839. https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.11.005

Zhang, Y., Zhao, L., Zhao, T., Liu, L., & Xu, L. (2023). Aeroacoustics Analysis of Propeller Blades. *Journal of Physics: Conference Series*, *2569*(1), 012026. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2569/1/012026

Zhou, T., & Fattah, R. (2017). *Tonal Noise Characteristics of Two Small-Scale Propellers*.