VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INSTITUTAS

AVIACINĖS MECHANIKOS KATEDRA

Timofej Dmitruk

BEPILOČIO ORO TAIKINIO AERODINAMINIŲ CHARAKTERISTIKŲ EKSPERIMENTINIS TYRIMAS

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF UNMANNED AERIAL TARGET

Baigiamasis magistro darbas

Aviacijos mechanikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H42001
Aviacinės mechanikos specializacija
Aeronautikos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2016

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INSTITUTAS
AVIACINĖS MECHANIKOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

_____
(Parašas)

_____
(Vardas, pavardė)

_____
(Data)

Timofej Dmitruk

BEPILOČIO ORO TAIKINIO AERODINAMINIŲ CHARAKTERISTIKŲ EKSPERIMENTINIS TYRIMAS

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF UNMANNED AERIAL TARGET

Baigiamasis magistro darbas

Aviacijos mechanikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H42001
Aviacinės mechanikos specializacija
Aeronautikos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas _____ _____ _____
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

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

Vilnius, 2016

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS FAKULTETAS

AVIACINĖS MECHANIKOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

_____
(Parašas)

_____
(Vardas, pavardė)

_____
(Data)

Aeronautikos inžinerijos studijų kryptis

Aviacinės mechanikos studijų programa, valstybinis kodas 621H42001

Aviacinės inžinerijos specializacija

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS

…….....Nr. .....

Vilnius

Studentui Timofejui Dmitruk
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: „Bepiločio oro taikinio aerodinaminių charakteristikų eksperimentinis tyrimas“

patvirtinta 2014m. ……..…… d. dekano potvarkiu Nr. …….

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2016m. ……..…… d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

1. Sudaryti bepiločio oro taikinio skaitinį modelį.
2. Ištirti jo aerodinamines ir skrydžio charakteristikas.
3. Ištirti propelerių charakteristikas.
4. Atlikti eksperimentinius bandymus.
5. Išanalizuoti ir įvertinti gautus rezultatus ir parašyti darbo išvadas.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

……

.....

.....

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

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

Užduotį gavau

……..
(Parašas)

……..
(Vardas, pavardė)

……..…....
(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Antano Gustaičio aviacijos institutas
Aviacinės mechanikos katedra

ISBN ISSN
Egz. sk. .....
Data .....-.....-.....

Antrosios pakopos studijų **Aviacijos mechanikos inžinerijos** programos magistro baigiamasis darbas

Pavadinimas	**Bepiločio oro taikinio aerodinaminių charakteristikų eksperimentinis tyrimas**
Autorius	**Timofej Dmitruk**
Vadovas	**Domantas Bručas**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjamas oro taikinio OT-1 modelis su skirtingais propeleriais. Visi modelio apskaičiuoti parametrai buvo lyginami su eksperimentiškai pamatuotais parametrais. Su CATIA kompiuterine programa buvo sudarytas tiriamojo OT-1 modelis. Darbe buvo analizuojamos esamo orlaivio OT-1 aerodinaminės charakteristikos, naudojantis kompiuterine programa ANSYS ir trijų skirtingų propelerių parametrai, naudojantis kompiuterine programa „PropCalc“. Atsižvelgiant į orlaivio pasipriešinimo kreivę ir propelerių parametrus, sudaryti bendri modelio parametrai, kurie išbandyti eksperimentiškai. Tyrimų rezultatai buvo lyginami, įvertinant tyrimo paklaidą. Darbo pabaigoje pateikiamos išvados.

Darbo apimtis – 57 p. teksto be priedų, 66 paveikslai, 3 lentelės, 28 bibliografiniai šaltiniai.

Prasminiai žodžiai: bepilotis orlaivis, propeleris, pasipriešinimas, charakteristikos, skersmuo, propelerio žingsnis, mentės pasukimo kampas, trauka, galia, maksimalus greitis.

Vilnius Gediminas Technical University
Antanas Gustaitis' Aviation Institute
Department of Aviation Mechanics

ISBN ISSN
Copies No. .....
Date .....-.....-.....

Master Degree Studies **Aviation Mechanics Engineering** study programme Master Graduation Thesis

Title **Experimental Analysis of Aerodynamic Characteristics of Unmanned Aerial Target**

Author **Timofej Dmitruk**

Academic supervisor **Domantas Bručas**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

The final thesis analysis OT-1 model with different propellers. All calculated parameters were compared with the experimentally measured parameters. The test OT-1 model was made up with CATIA program. The aerodynamic characteristics of unmanned aerial target OT-1 were analyzed using a program ANSYS and the parameters of three different propellers were analyzed using the PropCalc program. Common model parameters were created a and were tested experimentally. The results were compared and evaluated test error. All information summarized and produced conclusion.

Thesis consists of: 57 p. text without appendixes, 66 pictures, 3 tables, 28 bibliographical entries.

Keywords: unmanned aircraft, propeller, resistance, characteristics, diameter, pitch propeller, blade angle, thrust, power, maximum speed.

Vilniaus Gedimino technikos universiteto egzaminų sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo bei gynimo organizavimo tvarkos aprašo
2 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Timofej Dmitruk, 20064464
(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)
Antano Gustaičio aviacijos institutas
(Fakultetas)
Aviacijos mechanikos inžinerija, AMfm-14
(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2016 m. gegužės 17 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Bepiločio oro taikinio aerodinaminių charakteristikų eksperimentinis tyrimas“ patvirtintas 2016 m. balandžio 13 d. dekano potvarkiu Nr. 70ai, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Parenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: doc. dr. Domantas Bručas. Mano darbo vadovas doc. dr. Domantas Bručas.

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

(Parašas) Timofej Dmitruk
(Vardas ir pavardė)

TURINYS

PAVEIKSLŲ IR LENTELIŲ SĄRAŠAS 8

ĮVADAS 12

1. NAGRINĖJAMOS TEMOS LITERATŪROS APŽVALGA 14

1.1. Sparnas 14

1.2. Svarbiausi greičiai 16

1.3. Propeleris 17

1.4. Stabilumas ir pavaldumas 18

2. BEPILOČIO PIRMINIAI DUOMENYS 20

2.1. Sparno profilis 21

2.2. Propeleris 22

3. AERODINAMINIŲ CHARAKTERISTIKŲ SKAIČIAVIMO METODAI 25

3.1. XFLR5 programos metodo aprašymas 26

3.2. ANSYS programos aprašymas 27

3.3. CATIA programos aprašymas 28

3.4. PROPCALC programos aprašymas 28

4. BEPILOČIO ORLAIVIO *OT-1* ANALIZĖ 29

4.1. Variklis 33

4.2. Propeleris FIALA 24“ 33

4.3. Propeleris 28“x10 39

4.4. Propeleris 20“x23 41

4.5. Propelerių tarpusavio analizė 44

5. PRAKTINĖ DALIS 49

5.1. Propelerio 20“x23 gamyba 49

5.2. Bandymai 51

6. REZULTATAI 53

IŠVADOS 55

LITERATŪROS SĄRAŠAS 56

PAVEIKSLŲ IR LENTELIŲ SĄRAŠAS

Paveikslai

1 pav. Bepilotis orlaivis OT-1 (*Up&Above...*) ... 12
2 pav. Sparno profilio forma (Lasauskas 2008) ... 14
3 pav. Sparno tvirtinimo kampas (Lasauskas 2008) ... 15
4 pav. Sparno horizontaliosios projekcijos parametrai (Lasauskas 2008) ... 15
5 pav. Skersinio V-kampas (Lasauskas 2008) ... 15
6 pav. Tipinė lėktuvo keliamosios jėgos koeficiento priklausomybė nuo atakos kampo iki didelių atakos kampų reikšmių (Lasauskas 2010) ... 16
7 pav. Propelerio naudingumo koeficiento priklausomybė nuo greičio: 1 – mažas žingsnis; 2 – didelis žingsnis (Lasauskas 2008) ... 18
8 pav. OT-1 bepilotis CATIA programoje (išvestas iš CATIA programos) ... 20
9 pav. OT-1 bepilotis ANSYS programoje (išvestas iš ANSYS programos) ... 20
10 pav. N22 profilis (išvestas iš XFLR5 programos) ... 21
11 pav. Profilio N22 keliamosios jėgos priklausomybė nuo atakos kampo (išvestas iš XFLR5 programos) ... 22
12 pav. FIALA 24“ propeleris (nufotografuotas vaizdas) ... 23
13 pav. FIALA 24“ propeleris *PropCalc* programoje (išvestas iš *PropCalc* programos) ... 23
14 pav. CLARK-Y profilis (išvestas iš XFLR5 programos) ... 24
15 pav. Profilio CLARK-Y keliamosios jėgos priklausomybė nuo atakos kampo (išvestas iš XFLR5 programos) ... 24
16 pav. Bepiločio orlaivio OT-1 modelis su varikliu (išvestas iš CATIA programos) ... 29
17 pav. Bepiločio skaičiavimo sistema ANSYS programoje (išvestas iš CATIA programos) ... 29
18 pav. Bepilotis ANSYS programoje (išvestas iš ANSYS programos) ... 30
19 pav. Bepilotis ANSYS programoje, BEM tinklas (išvestas iš ANSYS programos) ... 30
20 pav. Bepilotis ANSYS programoje, POST CFX (išvestas iš ANSYS programos) ... 30
21 pav. Skaičiavimo nustatymai esant 2,8^{o} atakos kampui ANSYS programoje (išvestas iš ANSYS programos) ... 32
22 pav. Skaičiavimo rezultatai esant 2,8^{o} atakos kampui ANSYS programoje (išvestas iš ANSYS programos) ... 32
23 pav. OT-1 bepiločio orlaivio pasipriešinimo kreivė (sudaryta darbo autoriaus) ... 32

24 pav. OT-1 bepiločio orlaivio atakos kampo priklausomybė nuo greičio (sudaryta darbo autoriaus) 32
25 pav. OT-1 bepiločio orlaivio aerodinamės kokybės priklausomybė nuo atakos kampo (sudaryta darbo autoriaus) 32
26 pav. DLE 110 dvitaktis benzininis variklis (*DLE 110...*) 33
27 pav. FIALA 24“ propelerio mentelė *PropCalc* programoje (išvestas iš *PropCalc* programos) .. 34
28 pav. FIALA 24“ propelerio mentės išmatuoti geometriniai parametrai (sudaryta darbo autoriaus) 34
29 pav. FIALA 24“ propelerio charakteristikos esant 7500 aps/min (išvestas iš *PropCalc* programos) 35
30 pav. Propelerio trauka esant 30 m/s kreiseriniam greičiui (sudaryta darbo autoriaus) 35
31 pav. Propelerio efektyvumas esant 30 m/s kreiseriniam greičiui (sudaryta darbo autoriaus) 36
32 pav. OT-1 bepiločio orlaivio pasipriešinimo ir propelerio FIALA kreivės (sudaryta darbo autoriaus) 36
33 pav. Propelerių mentės atakos kampas (sudaryta darbo autoriaus) 37
34 pav. OT-1 bepiločio orlaivio pasipriešinimo, išmatuoto ir 24“x16 propelerių kreivės (sudaryta darbo autoriaus) 37
35 pav. Propelerių efektyvumo kreivės esant 7500 aps/min (sudaryta darbo autoriaus) 38
36 pav. Propelerio 28“x10 mentė *PropCalc* programoje (išvestas iš *PropCalc* programos) 39
37 pav. Propelerio 28“x10 charakteristikos esant 7500 aps/min (išvestas iš *PropCalc* programos) 39
38 pav. OT-1 bepiločio orlaivio pasipriešinimo ir propelerio 28“x10 kreivės (sudaryta darbo autoriaus) 40
39 pav. Propelerio efektyvumas esant 30 m/s kreiseriniam greičiui (sudaryta darbo autoriaus) 40
40 pav. Propelerio efektyvumas esant 30 m/s kreiseriniam greičiui (sudaryta darbo autoriaus) 41
41 pav. Propelerio 20“x23 mentė *PropCalc* programoje (išvestas iš *PropCalc* programos) 42
42 pav. Propelerio 20“x23 charakteristikos esant 7500 aps/min (išvestas iš *PropCalc* programos) 42
43 pav. OT-1 bepiločio orlaivio pasipriešinimo ir propelerio 20“x23 kreivės (sudaryta darbo autoriaus) 42
44 pav. Propelerio efektyvumas esant 30 m/s kreiseriniam greičiui (sudaryta darbo autoriaus) 43
45 pav. Propelerio trauka esant 30 m/s kreiseriniam greičiui (sudaryta darbo autoriaus) 43
46 pav. Propelerių mentės atakos kampas (sudaryta darbo autoriaus) 44
47 pav. Dviejų menčių 28“x10, 20“x23 ir FIALA 24“x16 propelerių traukos palyginimas esant 7500 aps/min (sudaryta darbo autoriaus) 44

48 pav. Dviejų menčių 28“x10, 20“x23 ir FIALA 24“x16 propelerių traukos palyginimas (sudaryta darbo autoriaus) ... 45
49 pav. Dviejų menčių 28“x10, 20“x23 ir FIALA 24“x16 propelerių traukos palyginimas esant 30 m/s kreiseriniam greičiui (sudaryta darbo autoriaus) ... 45
50 pav. Dviejų menčių 28“x10, 20“x23 ir FIALA 24“x16 propelerių traukos palyginimas esant 30 m/s kreiseriniam greičiui (sudaryta darbo autoriaus) ... 46
51 pav. Dviejų menčių 28“x10, 20“x23 ir FIALA 24“x16 propelerių galios palyginimas esant 7500 aps/min (sudaryta darbo autoriaus) ... 46
52 pav. Dviejų menčių 28“x10, 20“x23 ir FIALA 24“x16 propelerių galios palyginimas esant 30 m/s kreiseriniam greičiui (sudaryta darbo autoriaus) ... 47
53 pav. Dviejų menčių 28“x10, 20“x23 ir FIALA 24“x16 propelerių efektyvumo palyginimas esant 30 m/s kreiseriniam greičiui (sudaryta darbo autoriaus) ... 47
54 pav. Dviejų menčių 28“x10, 20“x23 ir FIALA 24“x16 propelerių efektyvumo palyginimas esant 7500 aps/min (sudaryta darbo autoriaus) ... 48
55 pav. Dviejų menčių 28“x10, 20“x23 ir FIALA 24“x16 propelerių efektyvumo palyginimas esant 30 m/s kreiseriniam greičiui (sudaryta darbo autoriaus) ... 49
56 pav. Propeleris 20“x23 CATIA programoje (išvestas iš CATIA programos) ... 49
57 pav. Mediena 20“x23 propelerio gamybai (nufotografuotas vaizdas) ... 49
58 pav. 20“x23 propeleris frezavimo metu (nufotografuotas vaizdas) ... 50
59 pav. Išfrezuotas 20“x23 propeleris (nufotografuotas vaizdas) ... 50
60 pav. Jėgos matuoklis (nufotografuotas vaizdas) ... 51
61 pav. Statinės traukos matavimas (nufotografuotas vaizdas) ... 51
62 pav. Dviejų menčių 20“x23, 24“x16 ir 28“x10 propeleriai (nufotografuotas vaizdas) ... 52
63 pav. Apskaičiuota ir išmatuota trauka esant maksimaliems apsisukimams (sudaryta darbo autoriaus) ... 53
64 pav. Apskaičiuota ir išmatuota trauka esant 5000 aps/min (sudaryta darbo autoriaus) ... 53
65 pav. Apskaičiuotų ir išmatuotų duomenų skirtumas (sudaryta darbo autoriaus) ... 53
66 pav. Apskaičiuotas ir išmatuotas maksimalus greitis (sudaryta darbo autoriaus) ... 54

Lentelės

1 lentelė. Bepiločio oro taikinio OT-1 duomenys (sudaryta darbo autoriaus) 13
2 lentelė. Bepiločio oro taikinio OT-1 geometriniai duomenys (sudaryta darbo autoriaus) 21
3 lentelė. Traukos matavimo rezultatai (sudaryta darbo autoriaus)..... 52

ĮVADAS

Krašto apsaugos oro gynybos pratybose yra simuliuojamos įvairios situacijos, bandoma inscenizuoti priešą. Šiuolaikiniai orlaiviai yra labai brangūs. Siekiant sumažinti išlaidas, kurios yra skirtos pratybų metu imituoti oro taikinius, yra naudojami bepiločiai orlaiviai. Tai sumažina riziką netekti pilotų ir sumažina eksploatavimo išlaidas.

Nuotoliniu būdu valdomi bepiločiai lėktuvai yra pritaikomi ir naudojami įvairiais tikslais. Lietuvoje šią paslaugą teikia FLYEYE ir KMTI. Jų pilotuojami bepiločiai lėktuvai pritaikomi žemės ūkyje, energetikoje, naftos gavyboje, infrastruktūriniuose bei apsaugos sprendimuose, miškininkystėje (http://space-lt.eu/bepilociai-lektuvai/). Bepiločių orlaivių rinka vis didėja, o gaminant orlaivį reikia atsižvelgti į daugelį parametrų ir poreikių.

Pradiniame koncepciniame (angl. *conceptual design*) orlaivio projektavimo etape parenkami pirminiai orlaivio masės, geometrijos parametrai. Techniniame projektavimo etape (angl. *project/preliminary design*) pradedamas formos, geometrijos tobulinimas (3 D modeliai) bei stabilumo – pavaldumo analizė, skrydžio modeliavimas.

Esminė problema: projektavimo etape (skaitinio bepiločio orlaivio modelio) paskaičiuotos charakteristikos skiriasi nuo realaus modelio charakteristikų.

Projektavimas yra gana sudėtingas procesas, tad norint išanalizuoti skaičiavimo paklaidas realaus orlaivio skrydžio parametrų atžvilgiu reikia ištirti pagaminto orlaivio skrydžio charakteristikas.

Oro taikinys OT-1 (1 pav.) padeda sutaupyti lėšas priešlėktuvinės gynybos mokymuose imituojant skraidantį aparatą. Bepilotis oro taikinys yra pastebimas radarais ir atlieka suprogramuotą skrydį 20 km spinduliu. Bepiločio oro taikinio duomenys pateikti 1 lentelėje.

1 pav. Bepilotis orlaivis OT-1 (*Up&Above*...)

1 lentelė. Bepiločio oro taikinio OT-1 duomenys

Ilgis	2 m
Sparno mostas	2 m
Aukštis	0.5 m
Maksimali masė (Takeoff)	23 kg (standartinis 18 kg)
Naudingas krovinys	8 kg (standartinis 3 kg)
Kreiserinis greitis	150 km/h
Maksimalus greitis	250 km/h
Maksimalus vėjo intensyvumas	20 m/s
Veiklos aukštis	200–4000 m
Skrydžio trukmė	30–60 min.
Bendras skrydžio atstumas	70–150 km
Variklis	0,0001 m^3 dviejų stūmoklių
Skrydžio kontrolė	Visai automatinis / stabilizuotas rankinis / rankinis
Pakėlimas	Katapulta / važiuoklės ratai, automatinis / rankinis
Tūpimas	Su parašiutu / ant pilvo, automatinis / rankinis

Baigiamojo magistro darbo tema: bepiločio oro taikinio aerodinaminių charakteristikų eksperimentinis tyrimas. Šiame darbe buvo naudojamasi oro taikinio OT-1 modeliu su skirtingais propeleriais. Visi modelio paskaičiuoti parametrai buvo lyginami su eksperimentiškai pamatuotais parametrais. Su CATIA kompiuterine programa buvo sudarytas tiriamojo OT-1 modelis. Darbe buvo analizuojamos orlaivio OT-1 aerodinaminės charakteristikos, naudojantis kompiuterine programa ANSYS ir trijų skirtingų propelerių parametrai, naudojantis kompiuterine programa *PropCalc*. Tokiu būdu buvo pailgintas visų reikalingų skaičiavimų laikas, bet išvengta klaidos galimybė. Paskaičiuota OT-1 modelio pasipriešinimo kreivė. Tiriamieji propeleriai lyginti tarpusavyje. Atsižvelgiant į orlaivio pasipriešinimo kreivę ir propelerių parametrus, sudaryti bendri modelio parametrai, kurie išbandyti eksperimentiškai. Tyrimų rezultatai buvo lyginami, įvertinant tyrimo paklaidą. Darbo pabaigoje pateikiamos išvados ir siūlymai, kuriuos būtų galima tobulinti atliekant daugiau tyrimų ir eksperimentų.

Darbo tikslas – ištirti reikiamus skaičiavimo metodus, išanalizuoti esamo lėktuvo modelį, palyginti propelerių paskaičiuotus parametrus, gauti bendrus modelio parametrus, palyginti apskaičiuotus rezultatus su pamatuotais eksperimento metu, suformuluoti išvadas.

1. NAGRINĖJAMOS TEMOS LITERATŪROS APŽVALGA

Bepiločiai orlaiviai yra maži skraidantys aparatai, jų skrydis gali būti valdomas iš anksto užprogramuota valdymo programa arba valdomas operatoriaus iš valdymo centro. Bepilotis orlaivis – orlaivis be įgulos, kurį galima valdyti nuotoliniu būdu arba kurio skrydis valdomas automatiškai, taip pat laisvojo skridimo orlaivis (*Bepiločių*, ... 2014). Labiausiai paplitusi bepiločių orlaivių naudojimo sritis yra karinė. Bepiločiai orlaiviai yra gerai pritaikyti JAV gynybos sektoriuje. JAV kariuomenės bepiločių orlaivių rinka per pastarąjį dešimtmetį labai išaugo, o bepiločiai orlaiviai įrodė savo vertę įvairiose operacijose visame pasaulyje (*U. S. Military*, ... 2014). Šioje srityje bepiločiai orlaiviai naudojami, nes turi daug privalumų, lyginant juos su pilotuojamais orlaiviais, jų eksploatacinės išlaidos mažesnės, neprarandama žmogiškųjų išteklių avarijos ar orlaivio puolimo atveju, bepiločiai orlaiviai sunkiau pastebimi ir daug kitų, nuo užduoties priklausančių privalumų.

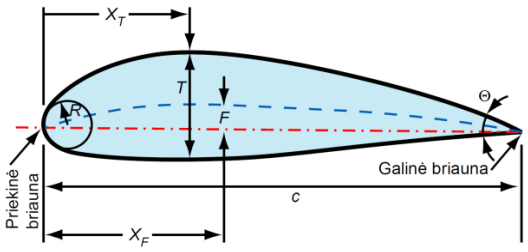
Inovaciniai sprendimai UAV gamybos procese yra viena iš mokslinių tyrimų tendencijų šioje srityje, turinčių tiesioginę įtaką nepilotuojamų orlaivių skrydžio efektyvumui. Aerodinaminės koncepcijos nukreiptos į UAV, nors ir išimtas žmogus kaip komponentas – perkrovos koeficiento ribą, bet vis dar yra priklausomos nuo rezultatų (aerodinaminių koeficientų plūdrumo – Cz ir pasipriešinimo – Cd) x (Prisacariu 2012).

1.1. Sparnas

Sparnas – viena svarbiausių lėktuvo dalių. Jis sukelia keliamąją jėgą, būtiną atsverti sunkio jėgai ir inercinėms jėgoms, kai lėktuvas atlieka manevrus. Sparnas taip pat reikalingas lėktuvo skersiniam pastovumui ir pavaldumui palaikyti (Merkys 2012).

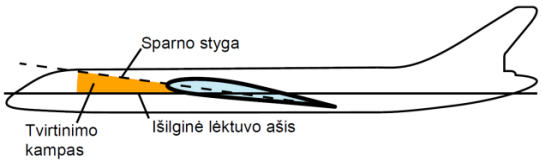
Pagrindiniai sparno parametrai:

1. *Sparno profilis.* Kontūras, gaunamas sparną perkirtus plokštuma, lygiagrečia simetrijos plokštumai, vadinamas sparno profiliu (Lasauskas 2008). Tipinė sparno forma parodyta 2 pav.



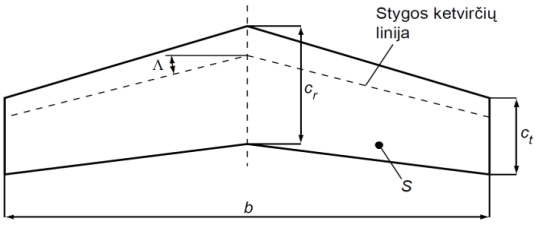
2 pav. Sparno profilio forma (Lasauskas 2008)

2. *Atakos ir tvirtinimo kampai*. Kampas tarp laisvojo srauto krypties ir sparno profilio stygos vadinamas atakos kampu, o kampas tarp išilginės lėktuvo ašies ir sparno stygos prie liemens vadinamas sparno tvirtinimo kampu (Lasauskas 2008). 3 pav. parodyta schema.



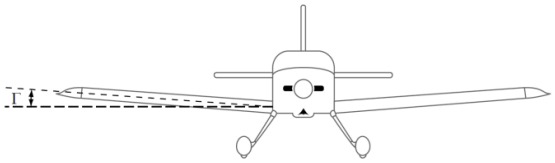
3 pav. Sparno tvirtinimo kampas (Lasauskas 2008)

3. *Sparno horizontaliosios projekcijos geometriniai parametrai*, kurie parodyti 4 pav. Atstumas nuo vieno sparno galo iki kito sparno galo statmenai lėktuvo simetrijos plokštumai yra sparno mostas *b*. Sparno dalis prie liemens vadinama sparno pagrindu. Sparno styga prie liemens vadinama sparno pagrindo styga c_r . Sparno styga sparno gale vadinama sparno galo styga c_t . Sparno horizontaliosios projekcijos plotas vadinamas sparno plotu ir žymima raide *S*. Sparno plotą padalijus iš sparno mosto gaunama vidutinė geometrinė sparno styga c_g. Sparno mosto ir vidutinės geometrinės stygos santykis yra sparno proilgis, jis žymimas raide *A*. Sparno proilgį taip pat galima gauti sparno mosto kvadratą padalijus iš sparno mosto (Lasauskas 2008).



4 pav. Sparno horizontaliosios projekcijos parametrai (Lasauskas 2008)

4. *Skersinio „V“ kampas*. Jeigu sparnas nuo sparno pagrindo, einant prie sparno galo, kyla aukštyn, tai kampas tarp sparno plokštumos ir horizontaliosios plokštumos vadinamas skersinio „V“ kampu (Lasauskas 2008). 5 pav. parodyta schema.



5 pav. Skersinio V-kampas (Lasauskas 2008)

1.2. Svarbiausi greičiai

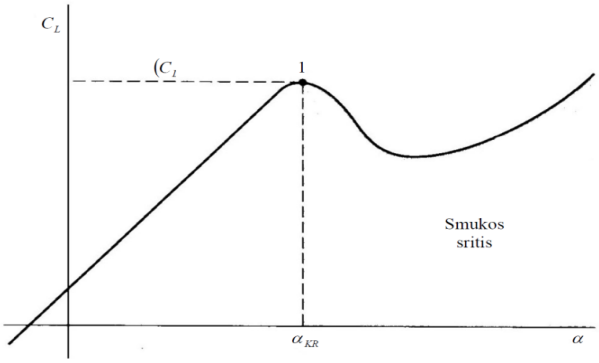
Bepiločio orlaivio skrydžio greitis priklauso nuo orlaivio aerodinaminių charakteristikų. Bet koks orlaivis turi kelis svarbiausius greičius, t. y. minimalųjį, maksimalųjį, naudingiausią, ekonomiškiausią. Minimalus bepiločio orlaivio greitis, jei orlaivis nenaudoja papildomų keliamosios jėgos sudarymo priemonių (raketiniai varikliai, vertikalioje plokštumoje veikiantys sraigtai), yra ribojamas orlaivio aerodinamikos ir sparno apkrovos. Maksimalų orlaivio greitį riboja aerodinaminės, konstrukcinės bei orlaivio jėgainės charakteristikos. Naudingiausias skrydis yra esant maksimaliai aerodinaminei kokybei. Skrydis, esant maksimaliai kokybei, nėra optimalus skrydžio laiko atžvilgiu, tačiau šiame rėžime reikiama trauka yra mažinama. Ekonomiškiausias skrydžio greitis yra tas, kur santykis reikalingos traukos su skrydžio greičiu yra minimalus. Priklausomai nuo sparno profilio ir Reinoldso skaičiaus, yra tam tikras optimalus sparno atakos kampas, kuriam esant pasiekiama maksimali aerodinaminė kokybė. Taip pat yra tam tikras sparno atakos kampas, kuriam esant pasiekiamas ekonomiškiausias skrydis. Be to, nuo sparno profilio priklauso ir maksimalus skrydžio greitis.

Kai sparno atakos kampas didelis, tai sparno priekinės dalies viršuje slėgis labai sumažėja. Iki galinės briaunos slėgis vėl turi sugrįžti beveik iki laisvo srauto statinio slėgio. Srautas prie pat paviršiaus pasienio sluoksnyje yra praradęs dalį savo kinetinės energijos dėl trinties, nebegali nugalėti didėjančio slėgio srauto kryptimi ir atitrūksta nuo sparno paviršiaus. Atitrūkus srautui, labai pasikeičia slėgio pasiskirstymas sparno paviršiuje. Keliamoji jėga mažėja, pasipriešinimas didėja – prasideda sparno smuka (Lasauskas 2010). Tipinė lėktuvo keliamosios jėgos koeficiento priklausomybė nuo atakos kampo iki didelių atakos kampų reikšmių parodyta 6 pav.

Didėjant aukščiui, tikrasis orlaivio smukos greitis didėja.

Didėjant santykinei sparno įkrovai (arba orlaivio svoriui), lėktuvo smukos greitis didėja.

Didėjant maksimaliam keliamosios jėgos koeficientui, lėktuvo smukos greitis mažėja.



6 pav. Tipinė lėktuvo keliamosios jėgos koeficiento priklausomybė nuo atakos kampo iki didelių atakos kampų reikšmių (Lasauskas 2010)

Turima (aktyvi) trauka yra lėktuvo jėgainės sukuriama trauka. Pagrindinė lėktuvo jėgainės paskirtis – sukurti patikimą ir efektyvią *trauką*, kuri varytų lėktuvą. Turima jėgainės trauka priklauso tik nuo jėgainės ir iš esmės neturi nieko bendro su lėktuvo sklandmeniu. Teiginiai apie reikiamą trauką ir turimą trauką iš tikrųjų yra nevisiškai tikslūs, nes visada egzistuoja aerodinaminis ryšys tarp sklandmens ir jėgainės. Jėgainė, sumontuota sklandmenyje, sukuria aerodinaminę sąveiką, kuri turi įtakos ir jėgainės traukai, ir sklandmens pasipriešinimui. Įprastiniuose mažų greičių lėktuvuose ši sąveika paprastai yra silpna, tačiau šiuolaikiniuose transgarsiniuose ir viršgarsiniuose lėktuvuose ji yra svarbi (Lasauskas 2010).

Propeleris, besisukdamas ore, sukuria aerodinamines jėgas. Šių jėgų atstojamoji skrydžio kryptimi yra propelerio trauka. Propelerių, kuriuos suka stūmokliniai varikliai, trauka ir yra lėktuvo turima trauka.

Didžiausia trauka yra tada, kai greitis lygus nuliui (*statinė trauka*). Didėjant greičiui, trauka mažėja. Kai skrydžio greitis artėja prie garso greičio, propelerio trauka mažėja labai sparčiai.

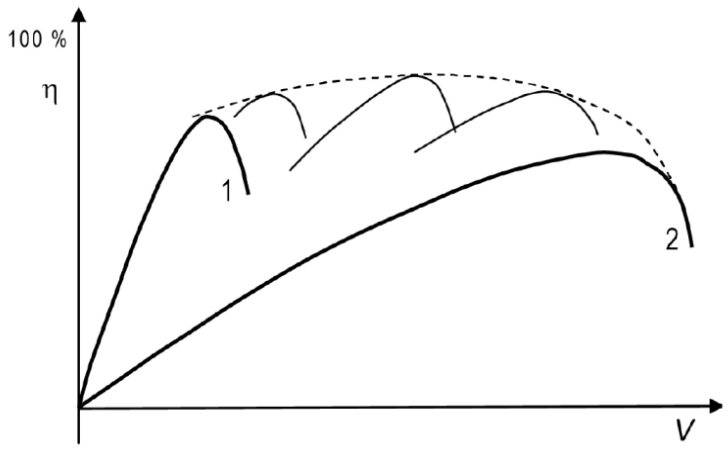
Maksimalus greitis:

- didėja, kai didėja santykinė trauka, santykinė sparno apkrova ir skrydžio aukštis;
- mažėja, kai didėja pasipriešinimo poliarės.

1.3. Propeleris

Sraigto efektyvumas yra svarbus propeleriui būdingas bruožas, atsirandantis dėl propelerio rotacijos ore. Jis atsako į klausimą, kiek efektyvi yra variklio galia (tiekiamas galingumas arba stabdymo galingumas), panaudota išgaunant traukos jėgą (gamybinis pajėgumas).

Dėl bet kokio duoto β, propelerio efektyvumas iš pradžių pakyla iki didžiausios reikšmės ir tada laipsniškai mažėja. Taip yra todėl, kad propeleris sukurtas tik tam tikriems apsisukimams per minutę ir *V*, todėl kiekvienos mentės profilio dalies atakos kampas yra maksimaliai aerodinamiškai efektyvus. Propelerio naudingumo koeficiento priklausomybė nuo greičio pateikta 7 pav.



7 pav. Propelerio naudingumo koeficiento priklausomybė nuo greičio: 1 – mažas žingsnis; 2 – didelis žingsnis (Lasauskas 2008)

Optimalus efektyvumas yra mažesnis nei vienetas. Taip yra todėl, kad tam tikras tiekiamas galingumas yra prarandamas propeleryje dėl:

1. paviršiaus trinties ir slėgio pasipriešinimo, esančio menčių elementuose arba įvorėje;
2. sukeliamų apsisukimų dėl artėjančio oro srauto;
3. viršutinių mentės dalių sūkurio formavimo;
4. besiartinančio srauto sukeliamos turbulencijos;
5. prarasto spūdumo dėl aukštų, ikigarsinių Macho skaičių, sukeliančių neįmanomas propelerio darbo sąlygas (Bručas 2012).

1.4. Stabilumas ir pavaldumas

Leidinyje (Jeffery, *et al.* 2008) pateikta lėktuvo pavaldumo ir stabilumo analizės santrumpa, panaudojant J 2 universalų įrankių paketą. Stabilumo analizė buvo sudaryta iš:

1. išilginio statinio stabilumo analizės, horizontalaus skrydžio atakos kampo analizės, aukštumos vairo darbinių padėčių analizės, esant įvairiems skrydžio greičiams ir aukščiams;
2. išilginio dinaminio stabilumo analizės;
3. šoninio dinaminio stabilumo analizės.

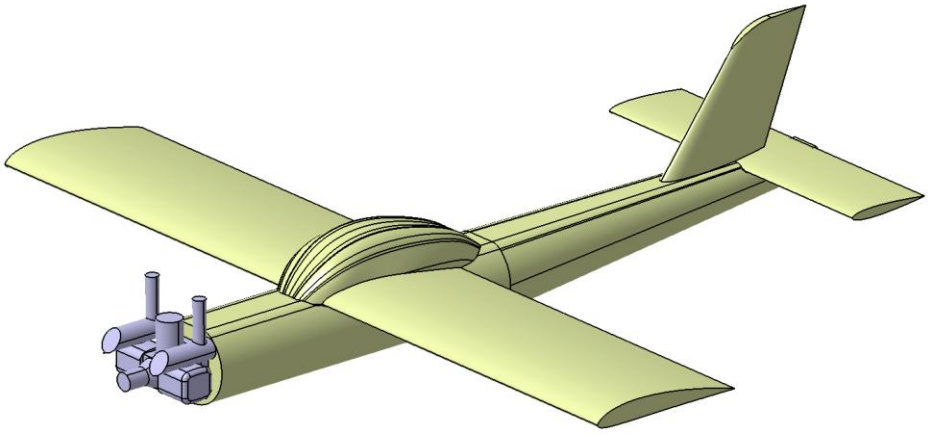
J 2 programa buvo įvesti masių ir inercijos duomenys, kurie reikalingi skaičiuoti viso lėktuvo masę, inercines jėgas, masės centrą.

Geometrijos modeliavimas. Lėktuvo stabilumo, pavaldumo dinaminei analizei reikalinga geometrijos įvestis. Sparnas suskirstytas į dalis, kurios turi 2 D keliamosios jėgos, pasipriešinimo, momento charakteristikas konkrečiam skerspjūvio profiliui. 2 D charakteristikos randamos JavaFoil, XFoil arba iš eksperimento duomenų. 3 D keliamosios jėgos koeficientas randamas koreguojant 2 D C_L. Buvo pristatomas sparno modelis su skersai suskirstytomis aerodinaminėmis juostomis. Kiekviena juosta apibrėžiama profiliu, jo pastatymo kampu, aerodinaminiu centru. Kiekviena skersinė juosta turi savo padėtį sparno atžvilgiu, o juostų keliamosios jėgos prieaugis, įtakojantis suminį momentą, atskaitomas masės centro atžvilgiu. Susumavus visų juostų įtaką, visam sparnui gaunami išvestiniai aerodimaniniai koeficientai (C_L, C_D, C_M). Stabilizatoriaus plokštuma pateikiama analogiškai sparnui, tačiau dėl skaičiavimų logoritmo supaprastinimo galima tik visa plokštuma judančio stabilizatoriaus konfigūracija. Koeficientai suprantami kaip kiekvienos juostos vietinio atakos kampo funkcijos ir priklauso nuo stabilizatoriaus pastatymo kampo. Kilis nusakomas analogiškai.

Aerodinaminė analizė naudojant XFLR5 programą, kuri yra pagrindinė jos užduotis, suteikia gerą atspirties tašką atliekant netiesinio modelio modeliavimą. Nors įvestas modelis yra netikslus, bet tai pirmiausia paveikia tik traukos reikalavimus įvertinti ir pagerinti skrydžio duomenis iš slydimo bandymų (Kotikalpudi 2013).

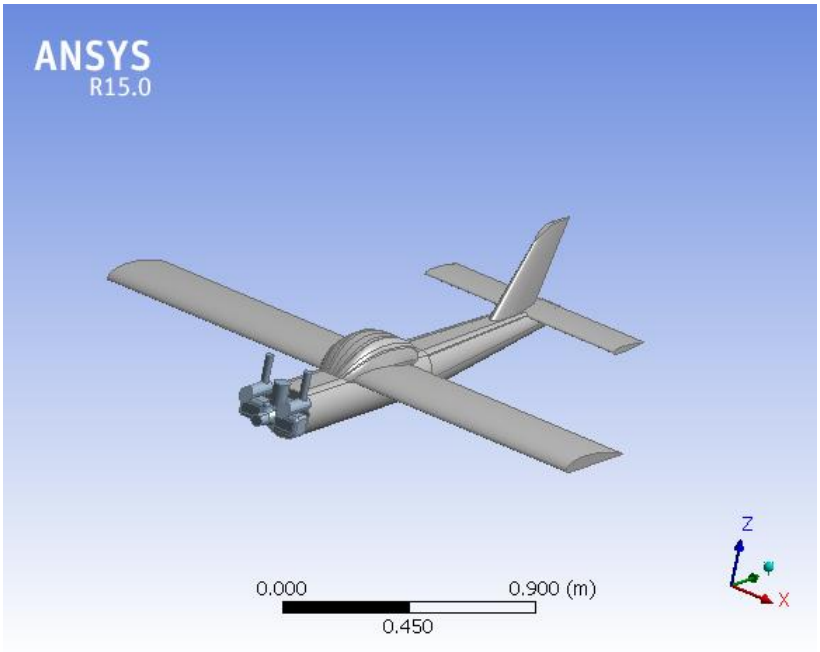
2. BEPILOČIO PIRMINIAI DUOMENYS

CATIA programa sudarytas bepiločio skaitinis modelis, vizualizacija pateikta 8 pav.



8 pav. OT-1 bepilotis CATIA programoje

Bepiločio skaitinis modelis buvo įkeltas į ANSYS programą, vizualizacija pateikta 9 pav.



9 pav. OT-1 bepilotis ANSYS programoje

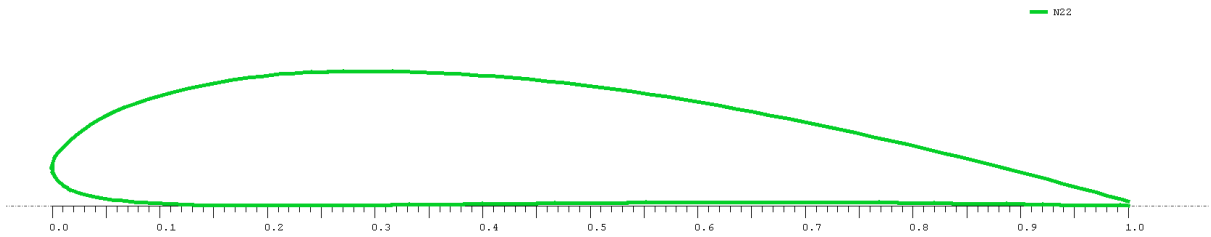
Buvo paimti pagrindiniai duomenys – tai sparno ir stabilizatoriaus geometriniai bei formos parametrai, kurių duomenys pateikti 2 lentelėje.

2 lentelė. Bepiločio oro taikinio OT-1 geometriniai duomenys

Sparno mostas, m	2
Strėliškumo kampas, °	0
Sparno plotas, m^2	0,76
Sparno pagrindo styga, m	0,38
Sparno galo styga, m	0,38
Masės centro vieta, m	0,08
Sparno profilis	N22
Stabilizatoriaus mostas, m	0,82
Stabilizatoriaus strėliškumo kampas, °	0
Stabilizatoriaus plotas, m^2	0,164
Stabilizatoriaus pagrindo styga, m	0,2
Stabilizatoriaus galo styga, m	0,2
Stabilizatoriaus profilis	NACA0012
Atstumas nuo sparno iki stabilizatoriaus priekinių briaunų, m	1,22

2.1. Sparno profilis

Bepiločio orlaivio sparno profilis yra N22, pavaizduotas 10 pav.



10 pav. N22 profilis

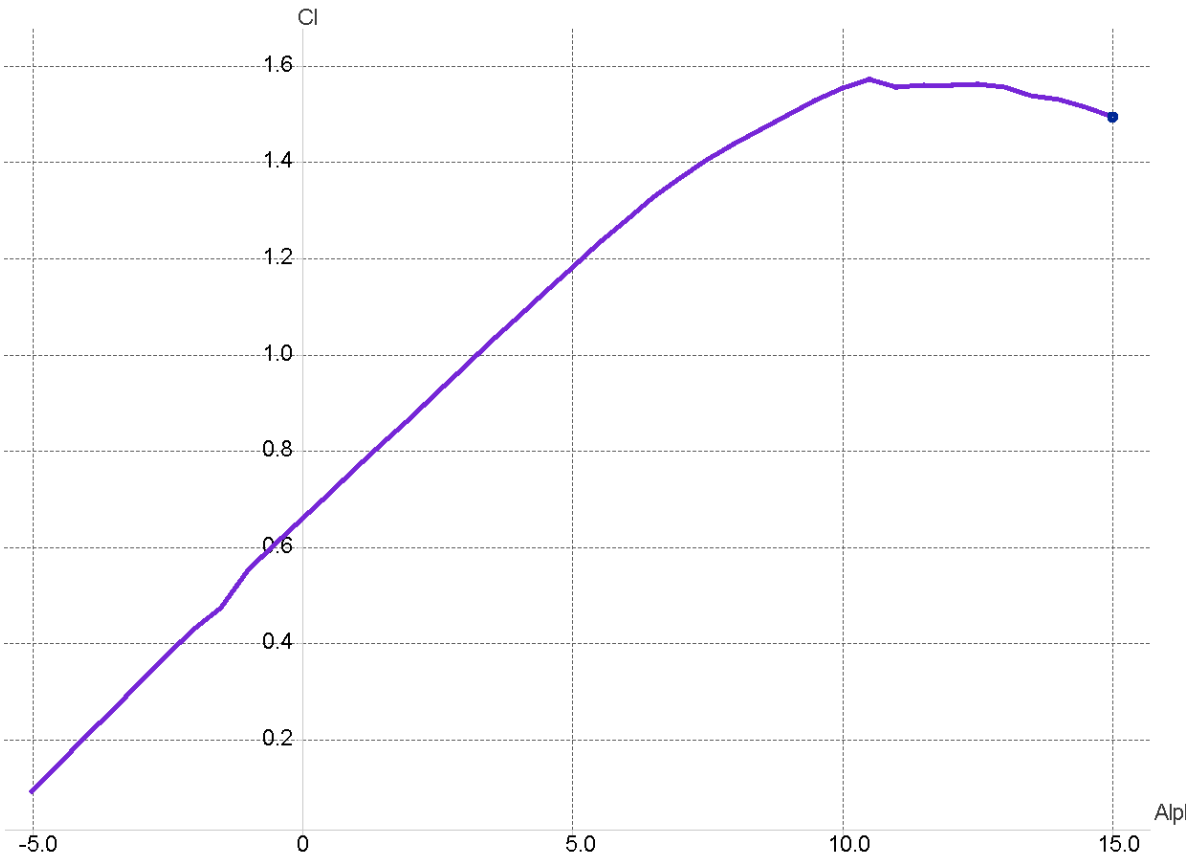
Didžiausias profilio santykinis storis *t* yra 12,4 %, kai profilio stygos ilgis 30 %. Profilio storis – tai didžiausio įbrėžto apskritimo skersmuo, jis žymimas raide *T*, taigi santykinis storis yra lygus profilio storiui, padalintam iš profilio stygos *c* (Lasauskas 2002):

$$t = \frac{T}{c} \tag{1}$$

Didžiausias santykinis gaubtumas yra 4 %, kai profilio stygos ilgis 40 %. Profilio gaubtumu vadinamas didžiausias pakilimas virš stygos, jis žymimas raide *F*, taigi santykinis gaubtumas *f* yra lygus (Lasauskas 2002):

$$f = \frac{F}{c} \tag{2}$$

Išanalizavus N22 profilį programa XFLR5, gaunamas maksimalus keliamosios jėgos koeficientas *CL* = 1,54, kai atakos kampas α = 11°. Keliamosios jėgos priklausomybė nuo atakos kampo pavaizduota 11 pav.



11 pav. Profilio N22 keliamosios jėgos priklausomybė nuo atakos kampo

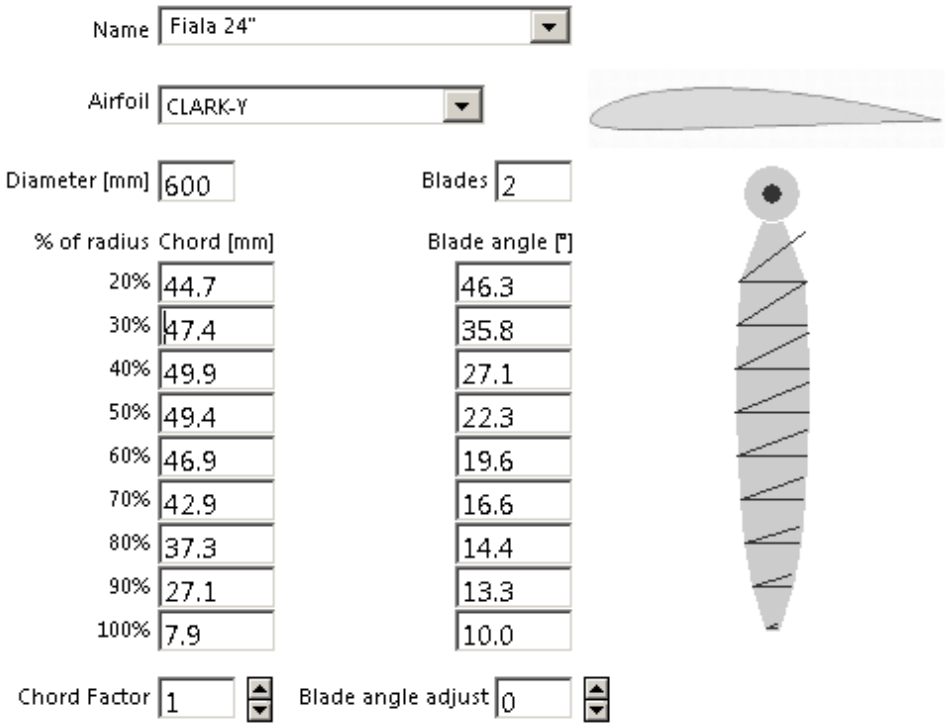
2.2. Propeleris

Turimas dviejų menčių FIALA 24“ propeleris, jis pavaizduotas 12 pav. Mentė padalijama į 9 atkarpas, kur išmatuota jos styga, storis, atakos kampas ir profilio forma. Pagal šiuos parametrus sudaromas skaitinis propelerio modelis *PropCalc* programoje ir apskaičiuojamos propelerio

charakteristikos, tokios kaip trauka, galia, efektyvumas naudojamų skrydžių diapazuose. Tuo tarpu bus paskaičiuotas vienas iš pagrindinių propelerio parametrų – tai propelerio žingsnis.

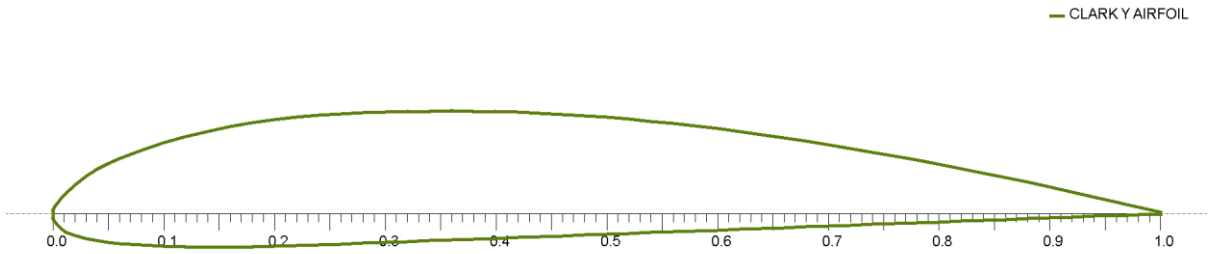
12 pav. FIALA 24“ propeleris

Išmatavus visus esamo propelerio matmenis, buvo sukurtas *PropCalc* programoje FIALA 24“ propeleris, jis parodytas 13 pav. Profilis yra panašus į CLARK-Y profilį ir pavaizduotas 14 pav. FIALA 24“ propeleris yra dviejų menčių propeleris, pagamintas iš medžio.



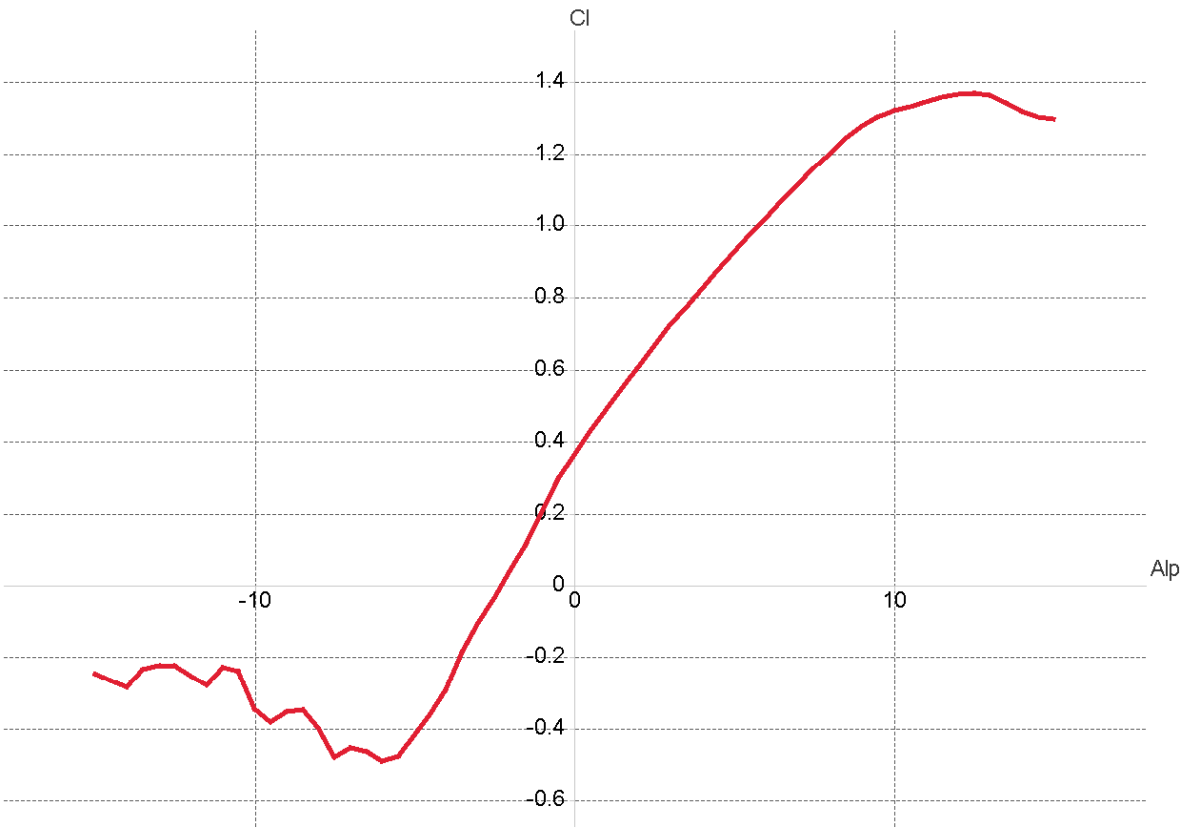
13 pav. FIALA 24“ propeleris *PropCalc* programoje

Didžiausias profilio santykinis storis *t* yra 11,7 %, kai profilio stygos ilgis 28 %. Didžiausias santykinis gaubtumas yra 3,4 %, kai profilio stygos ilgis 42 %.



14 pav. CLARK-Y profilis

Išanalizavus CLARK-Y profilį programa XFLR5, gaunamas maksimalus keliamosios jėgos koeficientas CL = 1,38, kai atakos kampas α = 12,9°. Keliamosios jėgos priklausomybė nuo atakos kampo pavaizduota 15 pav.



15 pav. Profilio CLARK-Y keliamosios jėgos priklausomybė nuo atakos kampo

3. AERODINAMINIŲ CHARAKTERISTIKŲ SKAIČIAVIMO METODAI

Norėdami tinkamai apskaičiuoti profilių aerodinamines charakteristikas, turime naudoti esamus greitus ir efektyvius skaičiavimo metodus. Greitas modeliavimo metodas leidžia sutaupyti laiko ir pinigų. Profilio analizės tyrinėjimo metodai klampiajame sraute gali būti skirstomi į tris grupes (Drela 1990):

- Navier-Stokes metodai;
- Zoniniai sąveikaujantieji (tarp klampaus ir neklampaus srauto) metodai;
- Nesąveikaujantieji neklampieji su pasienio sluoksniu metodai.

Nesąveikaujantieji neklampieji su pasienio sluoksniu metodai yra labai greiti, tačiau naudodami juos skaičiavimams, negalime nustatyti ir įvertinti klampiojo išstūmimo efekto, esant srauto atitrūkimui nuo profilio sienelių. Tai turi įtakos nustatant keliamąją jėgą ir formos pasipriešinimą.

Taip pat šie metodai netinka, kai yra profilio srauto aptekėjimas su atitrūkimu; aptekėjimas yra artimas garso greičiui ar mažam Reinoldso skaičiui. Esant tokioms sąlygoms yra naudojami Navier-Stokes arba Zoniniai sąveikaujantieji metodai, kuriais naudojantis įmanoma tiksliai atkurti klampaus išstūmimo mechanizmo fiziką (Drela 1990).

Navier-Stoker metodai išstūmimo efektą modeliuoja tiksliai ir neatsižvelgiant į klampaus sluoksnio storį. Bet Navier-Stokes metodai (Maksymiuk & Pulliam 1987) reikalauja daugybę kartų didesnių skaičiavimo išteklių nei zoniniai metodai ir yra per lėti, kad būtų pritaikomi projektavimo uždavinių sprendimui. Dažniausiai Navier-Stokes metodai naudojami tik kai tiriami profiliai, turintys daugiaelemenčius jėgos didinimo elementus (užsparnius, priešsparnius).

XFLR5 programa naudoja zoninius sąveikaujančius metodus. Šiuose metoduose išstūmimo efektas išoriniam neklampiajam aptekėjimui yra artimas išstumiamo kūno ar išpūtimo pro paviršių modeliui. Zoniniai sąveikaujantieji ir nesąveikaujantieji neklampieji su pasienio sluoksniu metodų modeliai atkuria teisingą plono pasienio sluoksnio išstūmimo efektą (Lighthill 1958) ir praktikoje paprastai yra gana tikslūs.

Jau seniai buvo įrodyta (Holst 1988), kad Navier-Stokes metodai nėra geresni už zoninius sąveikaujančius metodus, nes klampiojo aerodinamikos sprendinio tikslumas priklauso nuo turbulencijos modelio. Taigi naudojant šiuolaikinius kompiuterius zoninių metodų aerodinaminiam sprendimui skaičiuoti užtenka keleto minučių ar net sekundžių rezultatui gauti, o naudojant Navier-Stokes lygtis, reiktų keleto valandų ar net dienų.

3.1. XFLR5 programos metodo aprašymas

XFLR5 programa naudoja XFOIL programos veikimo principus, bet ji yra daug paprastesnė ir priimtinesnė dėl to, kad turi visiems vartotojams lengviau suprantamą sąsają. Buvo atliktas modifikavimas iš originalaus XFOIL *Fortran* programavimo kalbos kodo į *C/C++* programavimo kalbos kodą. XFLR5 programos profilių analizės algoritmai yra identiški XFOIL programai (XFLR5 programa).

Programa naudoja 3 metodus aerodinaminių charakteristikų skaičiavimui:

1. Keliančiosios linijos.
2. Sūkurių tinklelio.
3. 3D plokštelių.

Šios programos kodas turi 5 skirtingas paprogrames:

1. (MDES) profilių kūrimo pilnas atvirkštinis šablonas.
2. (QDES) profilių kūrimo maišytas atvirkštinis šablonas.
3. (OPER) profilių tiesioginės analizės šablonai.
4. Sparno, liemens ir viso lėktuvo projektavimas bei analizė.
5. Du tiesioginio modeliavimo būdai, kurie yra labai patogūs, norint kurti naujus profilius ir palyginti juos, naudojant B-splines metodą.

Skaičiavimai bus atlikti naudojant keliančiosios linijos metodą klampiajame sraute. Programoje šis metodas veikia netiesinės keliančiosios linijos metodo principu, kuris paremtas dokumentu „NACA Technical Note 1269“. Hipotezė, kuria grindžiama yra teorija, kad keliantysis sparnas gali būti pakeistas keliančiąja linija ir sūkurių prieaugis išilgai sparno mojo tęsiasi už sparno tiesiomis linijomis laisvojo oro srauto kryptimi. Šių besidriekiančių sūkurių jėga yra proporcinga keliamosios jėgos dydžio kitimui išilgai sparno mojo. Besidriekiantys sūkuriai paprastai generuoja jėgą laisvojo srauto greičio kryptimi. Efektyvus atakos kampas kiekvienoje sparno dalyje skiriasi nuo geometrinio atakos kampo indukciniu atakos kampo dydžiu ir yra susijęs su keliamosios jėgos pasiskirstymu (angl. *distribution*) indukuoto atakos kampo atžvilgiu. Indukcinio atakos kampo tangentas yra indukuoto greičio santykis su laisvojo srauto greičiu. Be to efektyvus atakos kampas yra susijęs su pjūvio keliamosios jėgos koeficientu pagal dviejų dimensijų duomenis sparno profilio pjūviui. Abu ryšiai tuo pat metu turi būti patenkinti skaičiuojant keliamosios jėgos pasiskirstymą sparne. Jei pjūvio keliamosios jėgos kreivės yra tiesinės, šios priklausomybės gali būti išreikštos viena lygtimi, kuri gali būti apskaičiuota analitiškai. Tačiau , jei pjūvio keliamosios jėgos kreivės yra ne tiesinės, ypač esant dideliems atakos kampams, analitiškai apskaičiuoti neįmanoma, tada yra

naudojamas šis metodas tol, kol viena keliamosios jėgos aproksimacija yra randama kaip tinkama išspręsti uždaviniui, tenkinanti prieš tai apskaičiuotas priklausomybes (McCormick 1995).

3.2. ANSYS programos aprašymas

„ANSYS® WorkBench 15.0“ – programa, skirta sistemoms analizuoti (atliekami kietų ir skystų kūnų, dujų bei elektromagnetinių laukų statiniai ir dinaminiai skaičiavimai) baigtinių elementų metodu. Ši programinė įranga yra galinga, bet lengvai naudojama. Programa naudoja mazgo projektą ir leidžia išbandyti įvairius projekto variantus, bei optimizuoti gaminį, naudojantis grįžtamaisiais ryšiais. Taip išvengiama gamybos klaidų, gamybinių sutrikimų ir inžinerinio perprojektavimo (Ansys WorkBench 14).

Modulis yra visiškai integruotas ANSYS CFX į skaičiavimo aplinką ANSYS Workbench - platforma, kuri sujungia visus inžinerinių modeliavimų ANSYS įrankius. Prisitaikant prie geometrijos, leidžia vartotojui atlikti bet kokius veiksmus – nuo standartinės analizės skysčio arba dujų srauto į sudėtingų sąveikaujančių sistemų apdorojimą (Ansys WorkBench 14).

ANSYS DesignModeler modulis yra specialiai sukurtas, siekiant sukurti savo pasirengimo modeliavimo geometriją. Tai visiškai parametrizuota aplinka ir ja paprasta naudotis. Turi tiesioginį ir tarpinį santykius su visais didžiaisiais CAD paketais. Ji teikia daug technologinių sprendimų vienoje vietoje. Tai leidžia pasirinkti tinkamiausią būdą statyti tinklelį, taikant nuoseklų požiūrį sulieti ant kiekvieno iš surinkimo dalių (Ansys WorkBench 14).

Modulio ANSYS CFX širdis yra pažangi algebrinė Multigrid Solver technologija. Su šia technologija rezultatai yra tikslesni per trumpesnį laiko tarpą (Ansys WorkBench 14).

Žemiau yra vienas iš svarbiausių fizinių modelių modulyje ANSYS CFX – tai turbulencija. ANSYS CFX kreipia ypatingą dėmesį į pažangių turbulencinių modelių kūrimą. Modulis ANSYS CFX suteikia reikšmingų naujovių modeliuojant pasienio sluoksnį. Dar įdiegti bendri RANS modeliai: K-j, k-CO, BPV, aukšto Reynoldso modelis, kuris yra iš didelių sūkurių (les-modelio), bei izoliuotų sūkurių modelis (DES-modelis). Šie pokyčiai apima SST-modelio plėtrą, pavyzdžiui, perėjimą iš laminarinio į turbulentinį srautą (modelis Menter, Langtry, Menter-Langtry Y-6 modelis ™) ir naują skalę prisitaikančio Simulation ™ (SAS) modelio (Ansys WorkBench 14).

3.3. CATIA programos aprašymas

CATIA (Kompiuterinis Erdvinis Interaktyvus taikymas) – CAD / CAM / CAE komercinės programinės įrangos paketas. Programa yra parašyta C ++ programavimo kalba. CATIA leidžia kurti 3D dalis, 3D eskizus, SHEETMETAL, kompozitinius, formuotus ir kaltus įrankius. Programinė įranga suteikia pažangias technologijas kuriant paviršius. Ji numato priemones, siekiant užbaigti produkto apibrėžtumą, įskaitant funkcinius nuokrypius (CATIA programa).

3.4. PROPCALC programos aprašymas

PropCalc apskaičiuoja propelerio charakteristikas, tokias kaip trauka, galia bei efektyvumas naudojamų skrydžių diapazonuose, su tam tikra užduota geometrija. *PropCalc* programoje integruota duomenų bazė, kurią sudaro profilio poliarė ir geometriniai visų propelerio menčių duomenys (Chung 2007).

PropCalc buvo sukurtas naudojant „Practical Extraction and Report Language“ (PERL) and „Toolkit“ (Tk). Vartotojas gali keisti ir plėsti duomenų bazę. Visi duomenys yra redaguojami, tad *PropCalc* gali būti naudojama tiek tiriant, tiek projektuojant propelerius (*PropCalc* programa).

PropCalc programoje rodomi sekantys grafikai:

• traukos [N], galios naudojimo P [W] ir sraigto efektyvumas Eta per greitį V [metrai per sekundę];

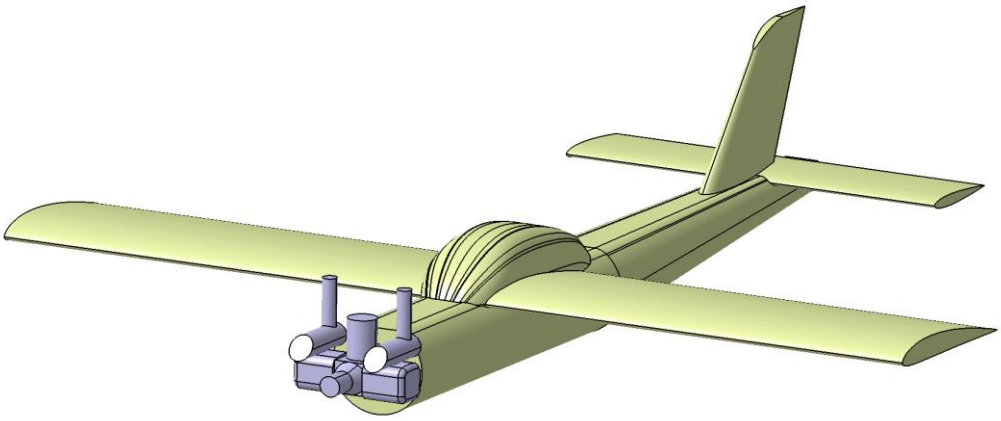
• realaus efektyvumo, kuris būtų pasiektas, jeigu nėra kliūčių, per santykinį J dydį; santykinė norma apibrėžiama kaip j = 60 / aps * v / D D = skersmuo [m];

• matmens mažesnės traukos koeficientas $_{C, T}$ ir jos sudedamosios dalys Cl ir CD per J; "cl" yra keliamosios jėgos koeficientas ir "cd" pasipriešinimo koeficientas.

• mažos energijos koeficientas C_P ir jos dalys Cl-und CD per J.

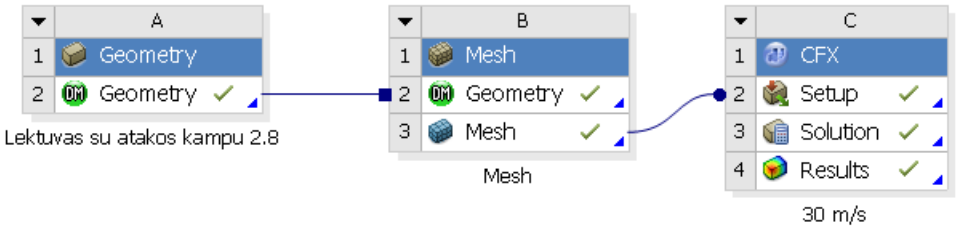
4. BEPILOČIO ORLAIVIO *OT-1* ANALIZĖ

Išmatavus visus bepiločio orlaivio matmenis, su CATIA programa buvo braižoma jo geometrija. Siekiant palengvinti skaičiavimą, bepiločio geometrija buvo supaprastinta. Buvo padarytas supaprastintas variklio modelis ir sujungtas su bepiločiu. Bepiločio orlaivio OT-1 modelis su varikliu pavaizduotas 16 pav.



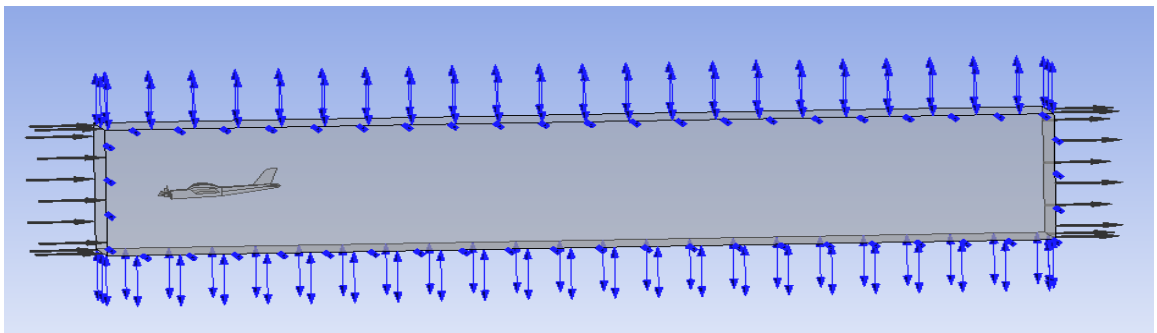
16 pav. Bepiločio orlaivio OT-1 modelis su varikliu

„ANSYS® WorkBench 15.0“ – programa, skirta sistemoms analizuoti (atliekami kietų ir skystų kūnų, dujų bei elektromagnetinių laukų statiniai ir dinaminiai skaičiavimai) baigtinių elementų metodu. Tam reikalinga tiriamojo objekto geometrija, todėl OT-1 bepilotis lėktuvas braižomas CATIA programa.



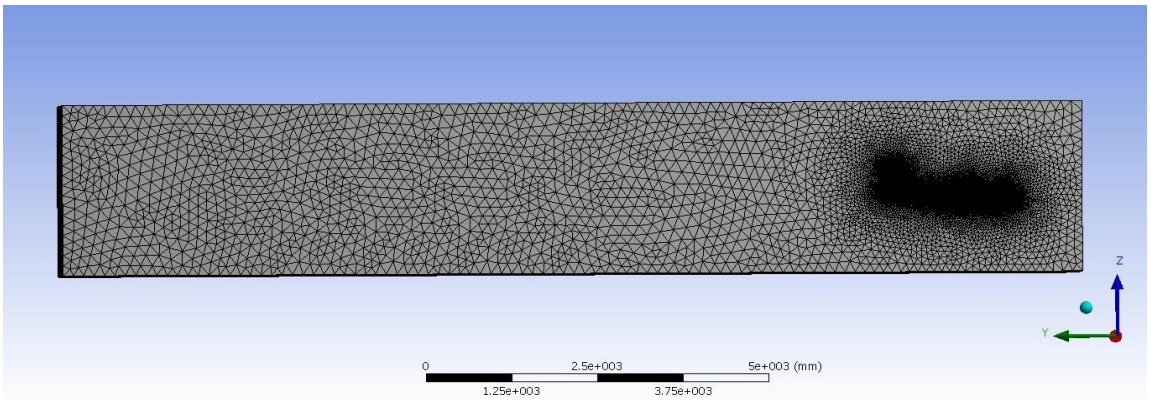
17 pav. Bepiločio skaičiavimo sistema ANSYS programoje

Lėktuvo modelis buvo įkeltas į ANSYS programą. Bepiločio skaičiavimo sistema programoje parodyta 17 pav. Programoje padarytas aerodinaminis stačiakampio formos vamzdis (15 m ilgio, 2,5 m aukščio ir 3,5 m pločio). Kadangi lėktuvas yra simetrinis išilgai vertikalios plokštumos atžvilgiu, buvo nupjauta bepiločio viena pusė. Įvestos kraštinės sąlygos. Srautas juda pro aerodinaminį vamzdį pasirinktu greičiu. Bepilotis ANSYS programoje pavaizduotas 18 pav.



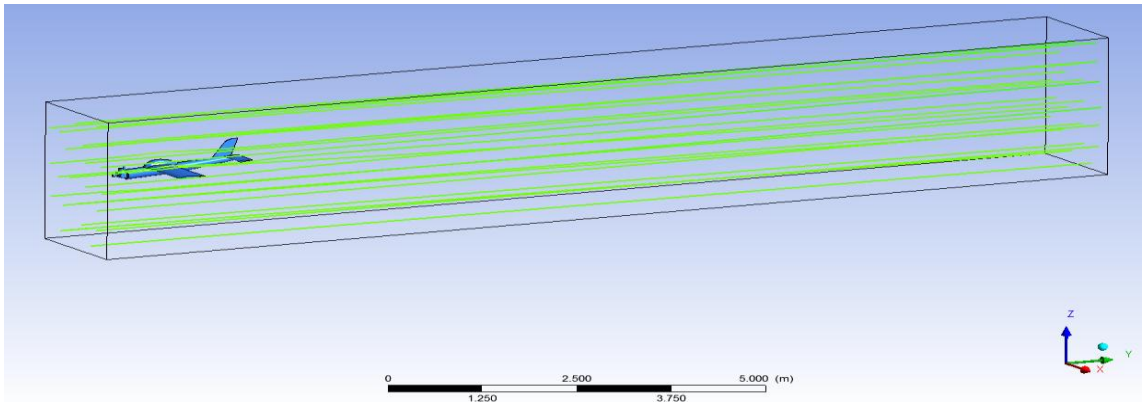
18 pav. Bepilotis ANSYS programoje

Buvo sukurtas tinklas iš 6 916 362 elementų, jis pavaizduotas 19 pav.



19 pav. Bepilotis ANSYS programoje, BEM tinklas

Srautas, judantis pro aerodinaminį vamzdį pasirinktu greičiu ir trajektorija, pavaizduotas 20 pav.



20 pav. Bepilotis ANSYS programoje, POST CFX

Jėgos, veikiančios lėktuvo geometriją, – pasipriešinimas ir keliamoji jėga – buvo apskaičiuotos skirtingais greičiais. Kadangi keliamoji jėga priklauso nuo atakos kampo, tai bandymo būdu skirtingais greičiais buvo parinkti atakos kampai. Skaičiavimo nustatymai esant 2,8^{o} atakos kampui ANSYS programoje pateikti 21 pav., o skaičiavimo rezultatai esant 2,8^{o} atakos kampui – 22 pav.

Domain	Boundaries	
Default Domain	**Boundary - Inlet**	
	Type	INLET
	Location	Inlet
	Settings	
	Flow Regime	Subsonic
	Mass And Momentum	Normal Speed
	Normal Speed	3.0000e+01 [m s^-1]
	Turbulence	Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
	Boundary - Wall	
	Type	OPENING
	Location	Wall
	Settings	
	Flow Direction	Normal to Boundary Condition
	Flow Regime	Subsonic
	Mass And Momentum	Opening Pressure and Direction
	Relative Pressure	0.0000e+00 [Pa]
	Turbulence	Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
	Boundary - Outlet	
	Type	OUTLET
	Location	Outlet
	Settings	
	Flow Regime	Subsonic
	Mass And Momentum	Average Static Pressure
	Pressure Profile Blend	5.0000e-02
	Relative Pressure	0.0000e+00 [Pa]
	Pressure Averaging	Average Over Whole Outlet
	Boundary - Symtr	
	Type	SYMMETRY
	Location	F272.266

21 pav. Skaičiavimo nustatymai esant 2,8° atakos kampui ANSYS programoje

Table 5. Boundary Flows for CFX

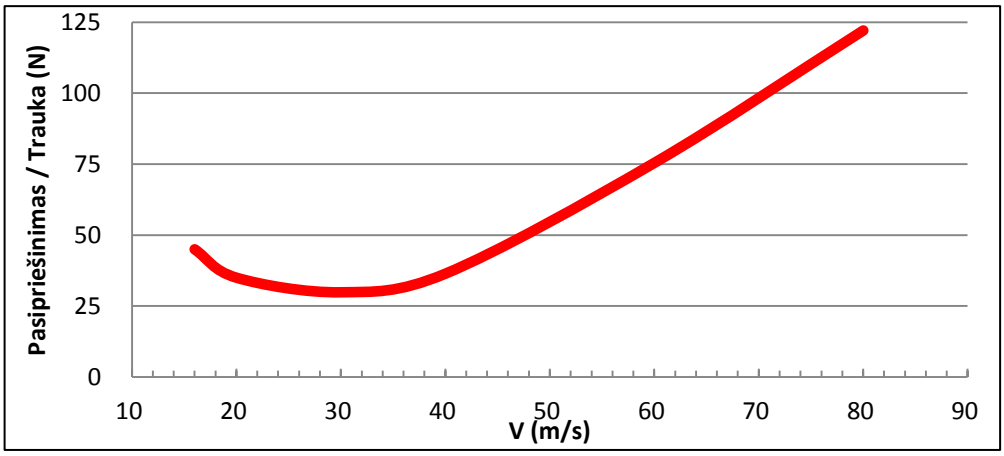
Location	Type	Mass Flow	Momentum		
			X	Y	Z
Default Domain Default	Boundary	0.0000e+00	-1.7769e+01	-1.4927e+01	-1.2656e+02
Inlet	Boundary	1.5737e+02	-5.9570e-06	4.7305e+03	-5.2133e-08
Outlet	Boundary	-1.4133e+02	1.6310e+01	-3.9468e+03	1.0273e+02
Symtr	Boundary	0.0000e+00	6.9437e+00	2.6112e-12	4.7322e-11
Wall	Boundary	-1.6041e+01	-5.4524e+00	-7.6888e+02	2.3834e+01

Table 6. Forces and Torques for CFX

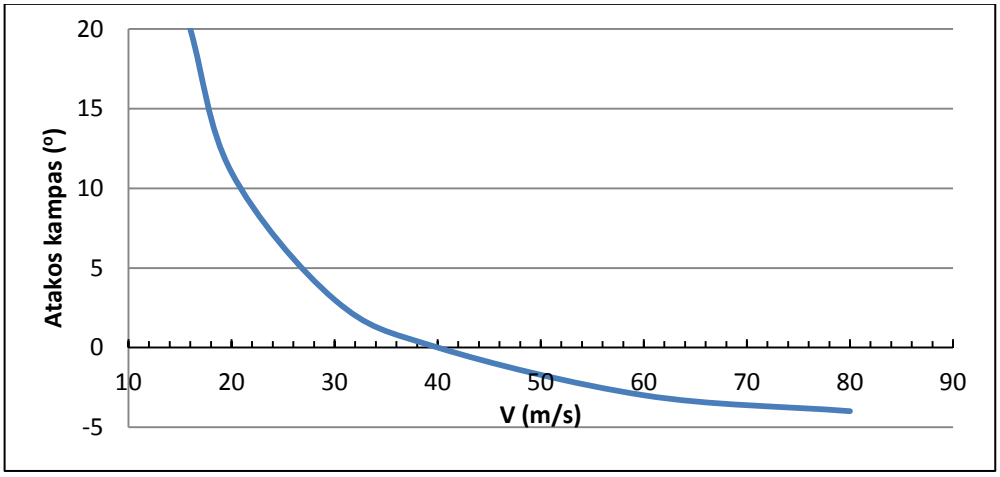
Location	Type	X	Y	Z
Default Domain Default	Pressure Force	1.7837e+01	1.2582e+01	1.2666e+02
	Viscous Force	-6.7775e-02	2.3447e+00	-9.7722e-02
	Total Force	1.7769e+01	1.4927e+01	1.2656e+02

22 pav. Skaičiavimo rezultatai esant 2,8° atakos kampui ANSYS programoje

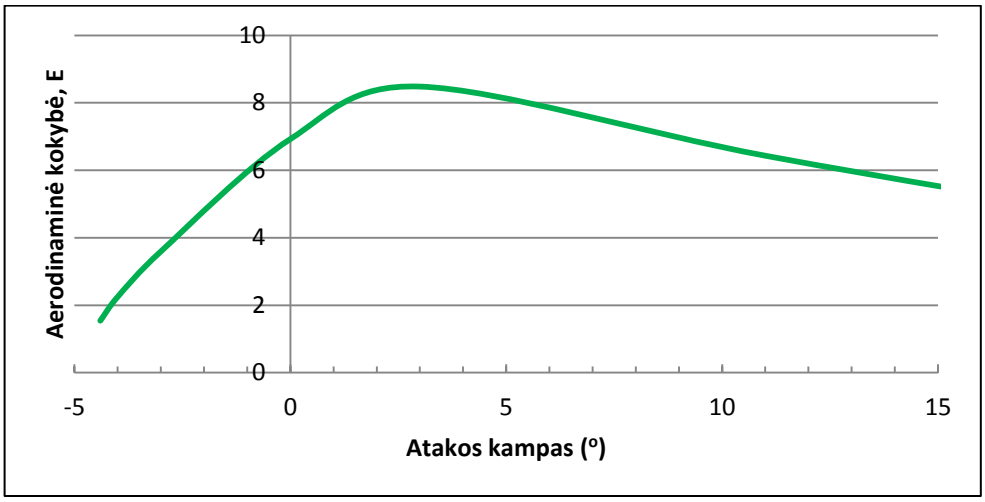
Iš gautų duomenų sudarytos pasipriešinimo (žr. 23 pav.), atakos kampo priklausomybė nuo greičio (žr. 24 pav.) ir aerodinamės kokybės priklausomybė nuo atakos kampo (žr. 25 pav.) kreivės. Lėktuvo minimalus pasipriešinimas yra 29,8 N esant 30 m/s greičiui. Maksimali kokybė – 8,4 esant 30 m/s greičiui ir 2,8^{o} laipsnių atakos kampui.



23 pav. OT-1 bepiločio orlaivio pasipriešinimo kreivė



24 pav. OT-1 bepiločio orlaivio atakos kampo priklausomybė nuo greičio



25 pav. OT-1 bepiločio orlaivio aerodinamės kokybės priklausomybė nuo atakos kampo

4.1. Variklis

Turimas dvitaktis benzininis vidaus degimo variklis DLE 110, jis pavaizduotas 26 pav.

Galingumas: 8,94 kW / 7500 rpm.

Maksimalios apsukos: 7500 rpm.

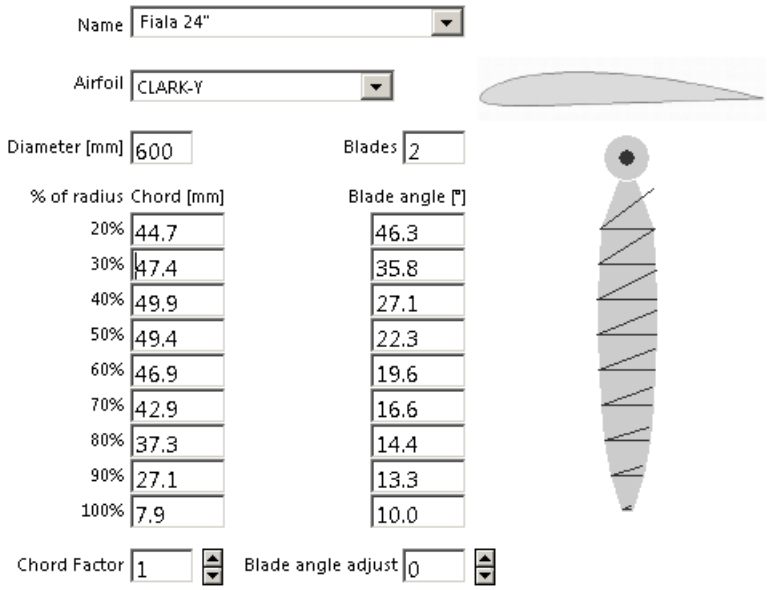
Svoris: 2,9 kg.

26 pav. DLE 110 dvitaktis benzininis variklis (*DLE 110*...)

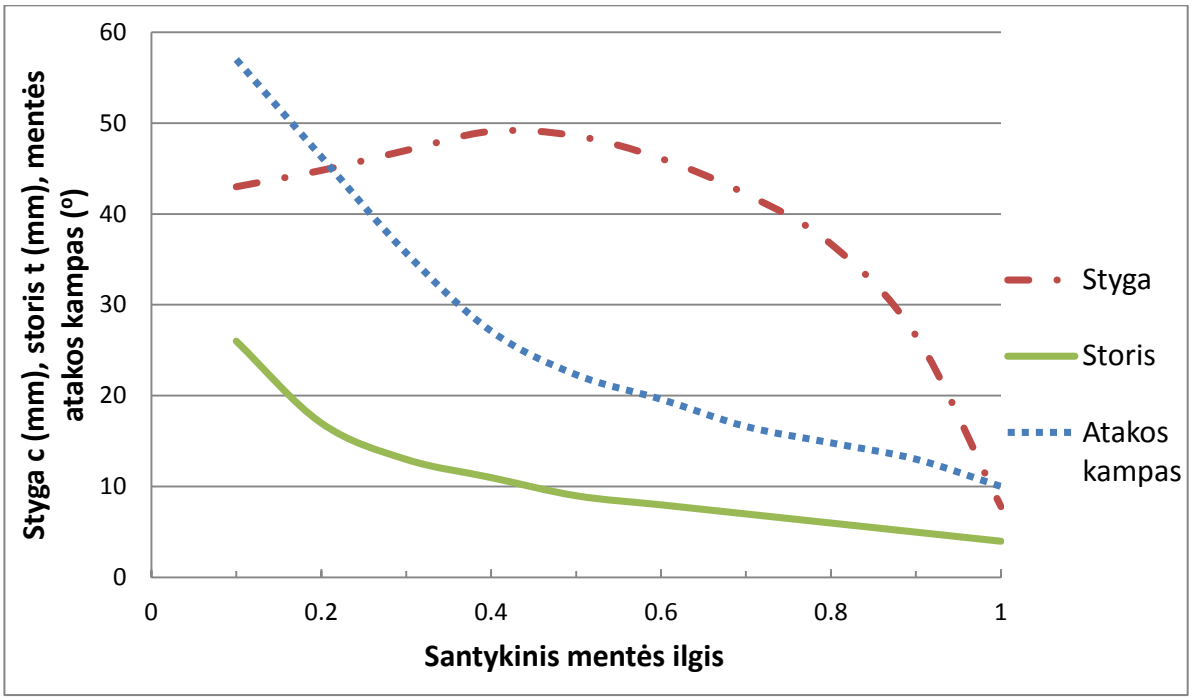
4.2. Propeleris FIALA 24“

Propelerio mentė padalijama į 9 atkarpas, kur išmatuota jos styga, storis, atakos kampas ir profilio forma. Pagal šiuos duomenis sudaromas skaitinis propelerio modelis *PropCalc* programoje. Pasirenkamas CLARK-Y profilis. Buvo įvestas stygos ilgis, atakos kampas, propelerio skersmuo ir menčių skaičius. Propeleris *PropCalc* programoje pavaizduotas 27 pav. Su programa apskaičiuotos propelerio charakteristikos – trauka, galia, efektyvumas naudojamų skrydžių diapazonuose.

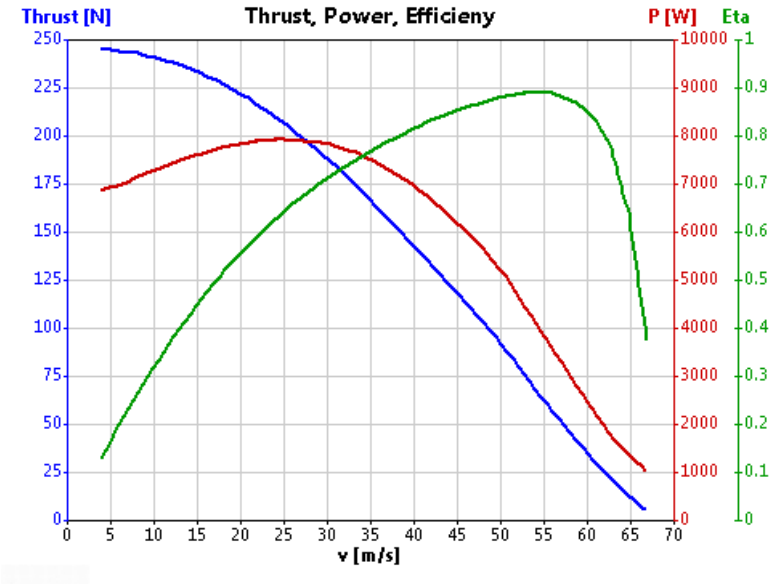
28 pav. yra pateiktas stygos ilgis, mentės storis ir mentės atakos kampas esant skirtingiems santykiniams mentės ilgiams.



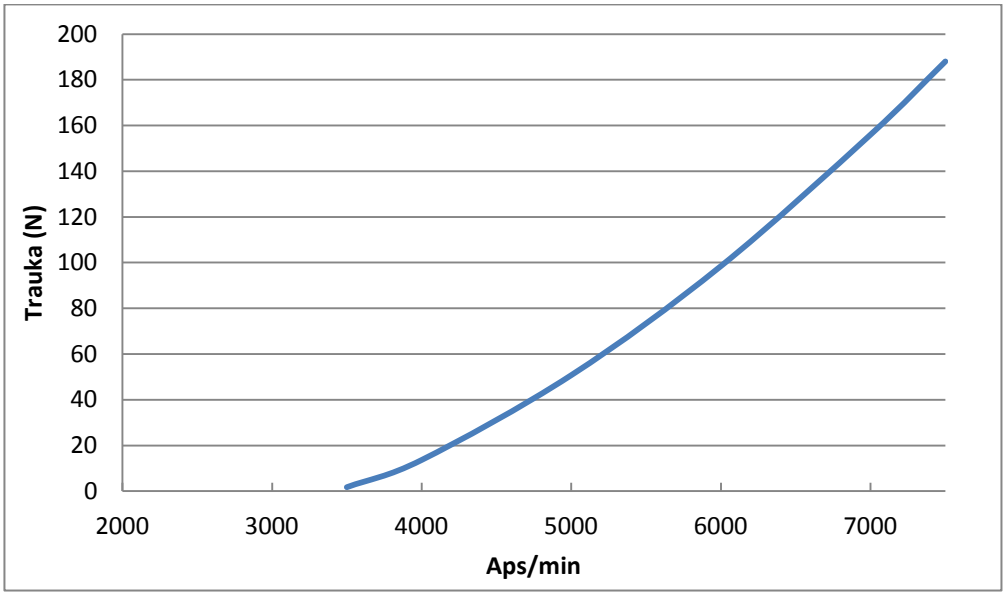
27 pav. FIALA 24“ propelerio mentė *PropCalc* programoje



28 pav. FIALA 24“ propelerio mentės išmatuoti geometriniai parametrai

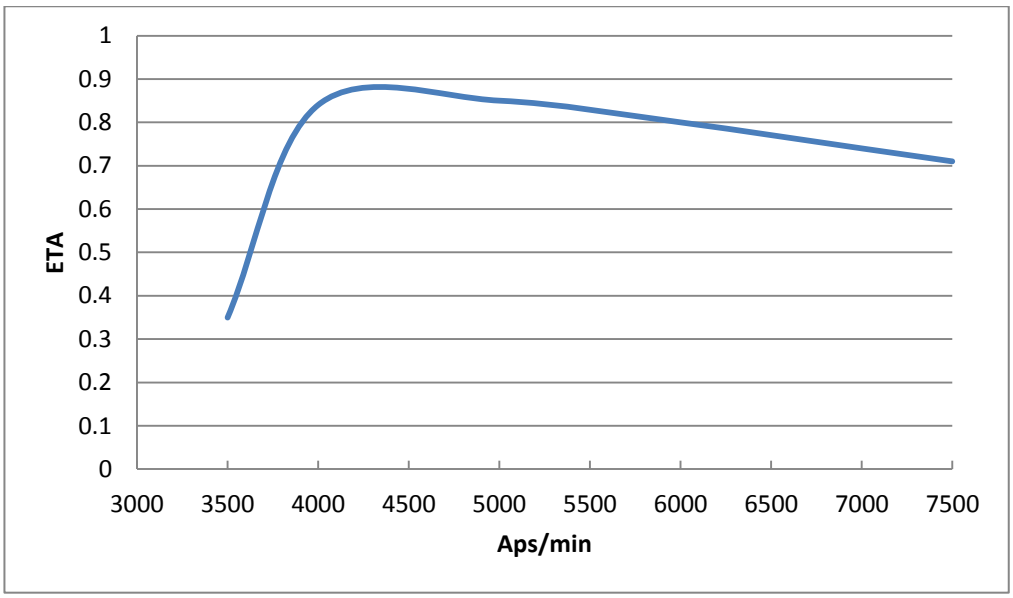


29 pav. FIALA 24“ propelerio charakteristikos esant 7500 aps/min



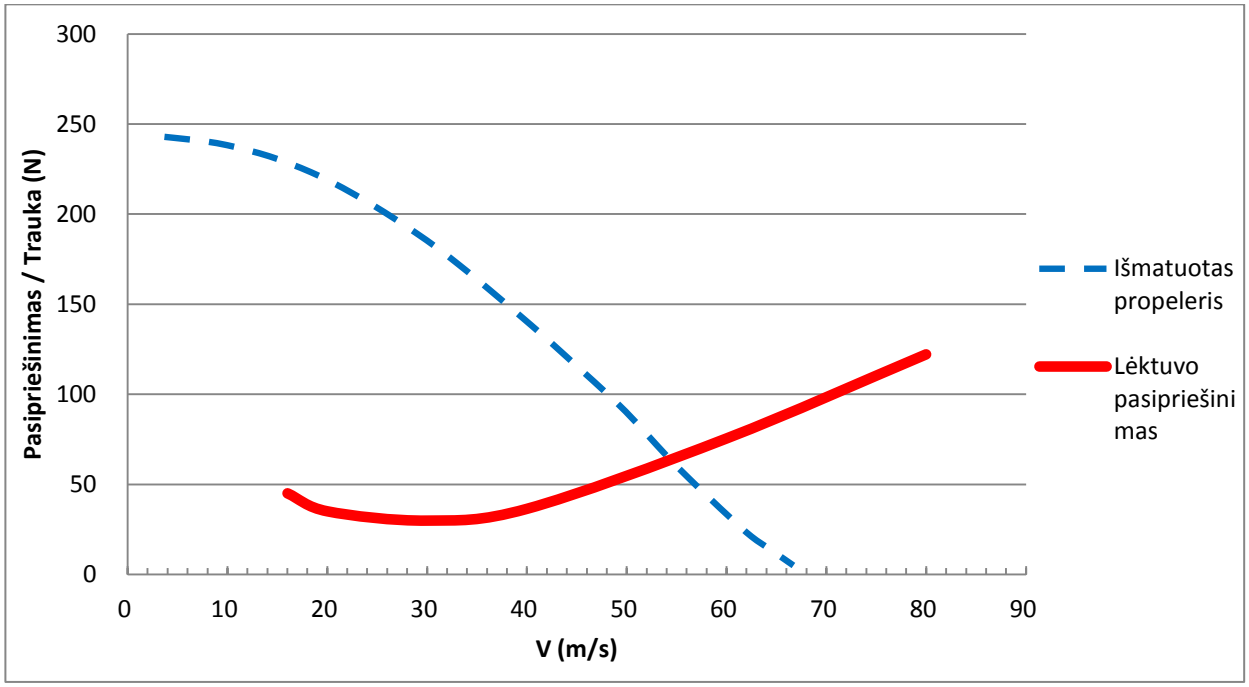
30 pav. Propelerio trauka esant 30 m/s kreiseriniam greičiui

Maksimalių apsukų metu propeleris sukuria 187,2 N trauką, jo galia siekia 7848,8 W, efektyvumo koeficientas yra 0,71 skrendant 30 m/s greičiu. Startuojant propeleris sukuria iki 245 N trauką esant 7500 aps/min. Propelerio charakteristikos esant 7500 aps/min parodytos 29 pav., o propelerio trauka esant 30 m/s kreiseriniam greičiui – 30 pav. Propelerio efektyvumas esant 30 m/s kreiseriniam greičiui pavaizduotas 31 pav.



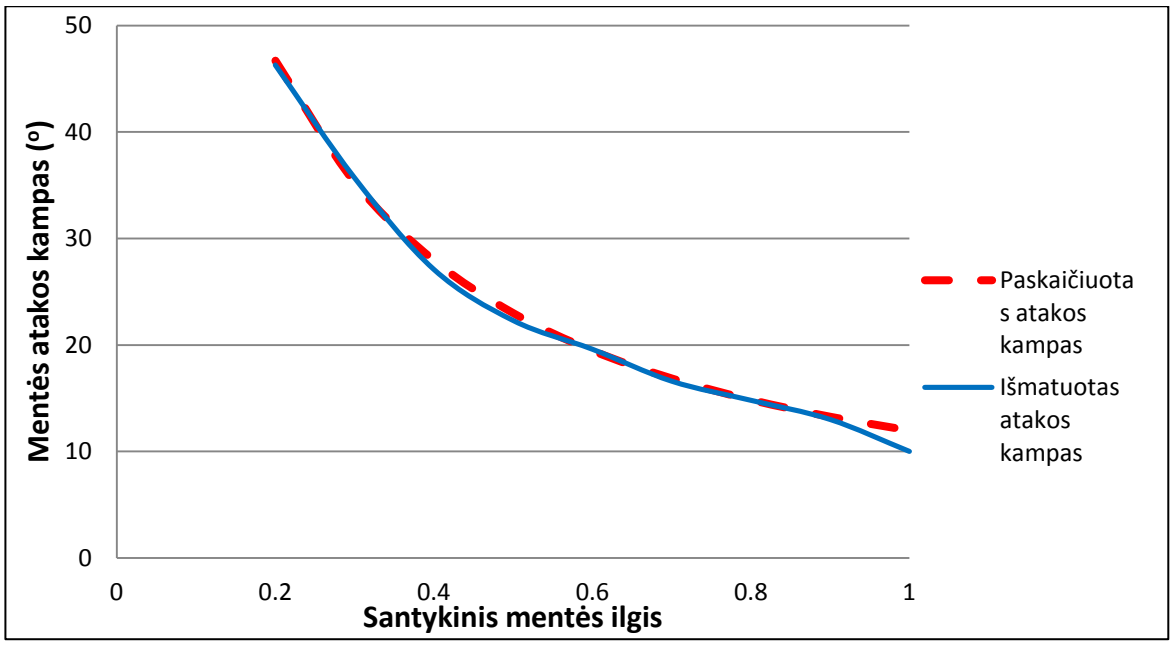
31 pav. Propelerio efektyvumas esant 30 m/s kreiseriniam greičiui

Bepiločio lėktuvo pasipriešinimo ir propelerio traukos kreivių susikirtimo taškas yra maksimalus greitis. Jis yra 54,8 m/s. OT-1 bepiločio orlaivio pasipriešinimo ir išmatuoto propelerio kreivės pavaizduotos 32 pav.

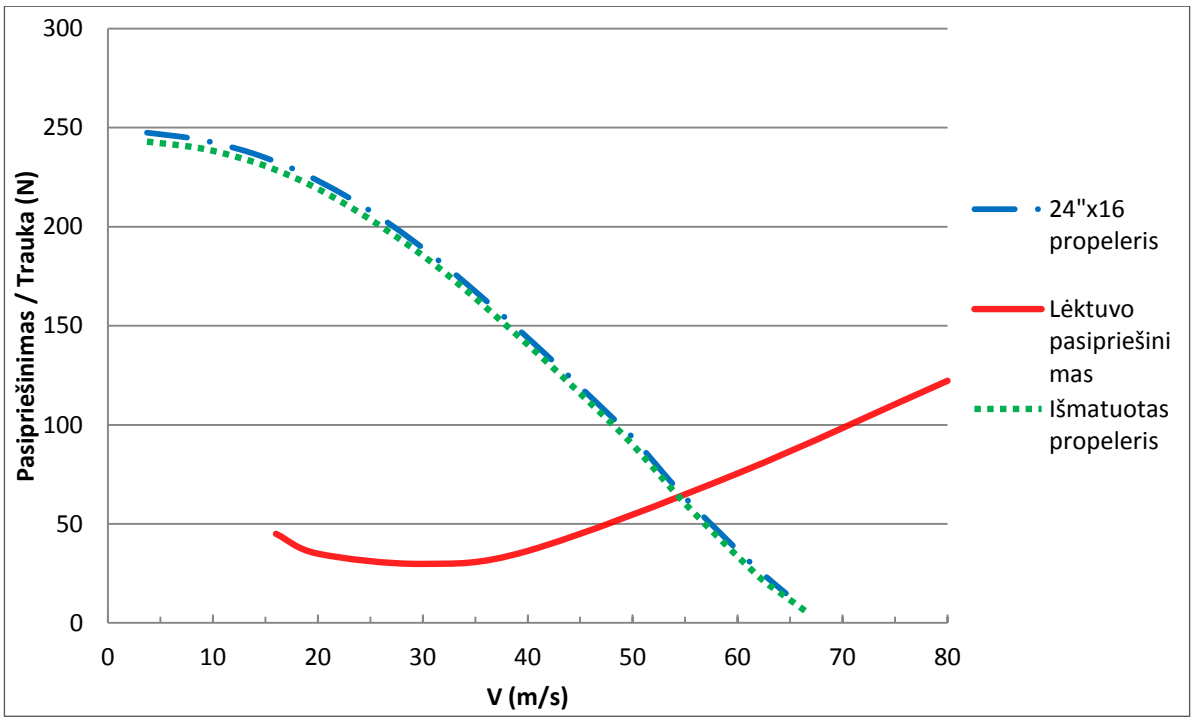


32 pav. OT-1 bepiločio orlaivio pasipriešinimo ir išmatuoto propelerio kreivės

Išmatuoto propelerio bei 24 colių skersmens propelerio ir 16 colių žingsnio menčių atakos kampai iki 0,9 santykinės mentės ilgio yra panašūs, o nuo 0,9 iki 1 – skiriasi. Propelerių mentės atakos kampas parodytas 33 pav.



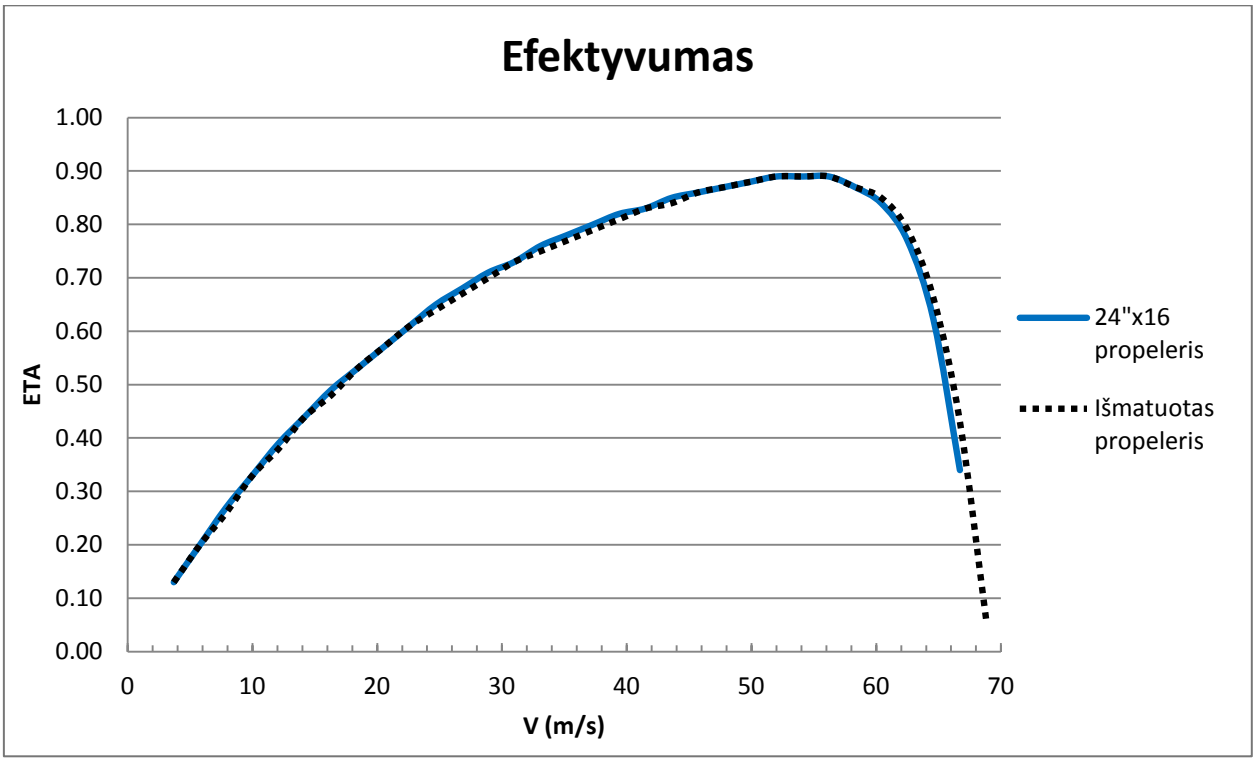
33 pav. Propelerių mentės atakos kampas



34 pav. OT-1 bepiločio orlaivio pasipriešinimo, išmatuoto ir 24“x16 propelerių kreivės

Išmatuoto propelerio ir 24“x16 propelerio traukos keivės yra panašios, skiriasi tik 2-4 N per visą greičių diapazoną. Maksimali statinė trauka su 24“x16 propeleriu siekia beveik iki 250 N. Propelerių traukos keivės su orlaivio pasipriešinimo kreive susikirtimo taškai beveik nesiskiria. Maksimalus greitis su 24“x16 propeleriu yra 55,5 m/s. Bepiločio orlaivio pasipriešinimo, išmatuoto ir 24“x16 propelerių kreivės parodytos 34 pav.

Propelerių efektyvumo kreivės yra panašios. Maksimalus abiejų propelerių efektyvumas siekia 0,88 nuo 51 iki 56 m/s diapazone. Propelerių efektyvumo kreivės esant 7500 aps/min pavaizduotos 35 pav.



35 pav. Propelerių efektyvumo kreivės esant 7500 aps/min

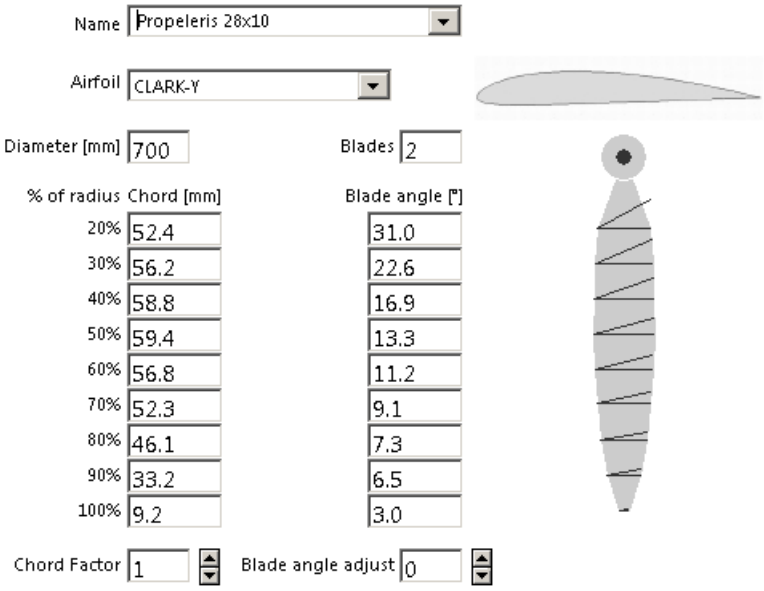
Gautos matavimo paklaidos parodė, kad propelerio matavimas atliktas pakankamai tikslus, todėl toliau visuose palyginimuose naudosim išmatuotus propelerio duomenis ir vadinsime jį 24“x16 propeleriu.

Norint padidinti maksimalų greitį, reikia keisti variklį arba propelerį. Padidinti variklio maksimalias apsukas arba padidinti galingumą yra brangiau nei pagaminti kitą propelerį. Padidinti maksimalų greitį galima keičiant propelerio parametrus – skersmenį, žingsnį ir profilį. Parinksime keletą variantų ir sulyginsime tarpusavyje keičiant skersmenį ir žingsnį, o profilį paliksime tokį patį. Visus variantus nagrinėsime kaip propelerius, pagamintus iš medžio.

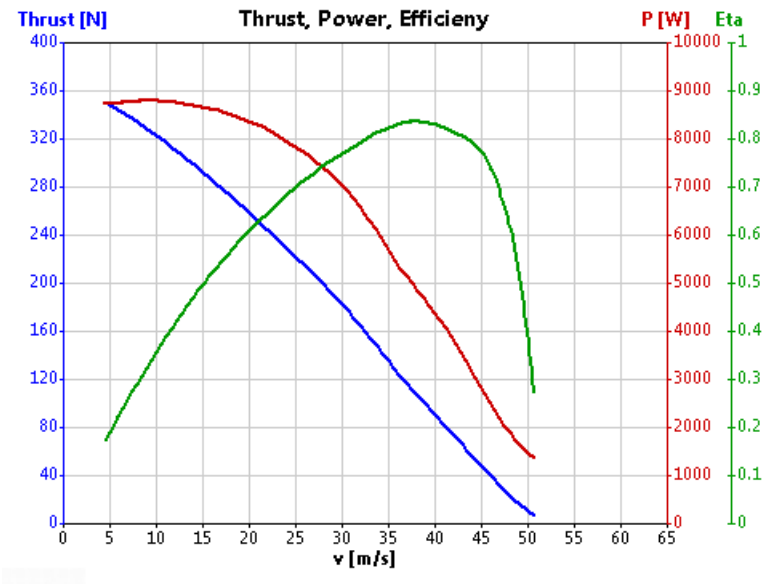
Išanalizuosime viena propelerį didesnio skersmens ir mažesnio žingsnio, taip pat mažesnio skersmens ir didesnio žingsnio.

4.3. Propeleris 28“x10

Propeleris yra dviejų menčių – didesnio skersmens (28 colių) ir mažesnio žingsnio (10 colių). Buvo įvestas stygos ilgis, atakos kampas, propelerio skersmuo ir menčių skaičius. Propelerio 28“x10 mentė *PropCalc* programoje parodyta 36 pav. Su *PropCalc* programa apskaičiuotos propelerio charakteristikos.

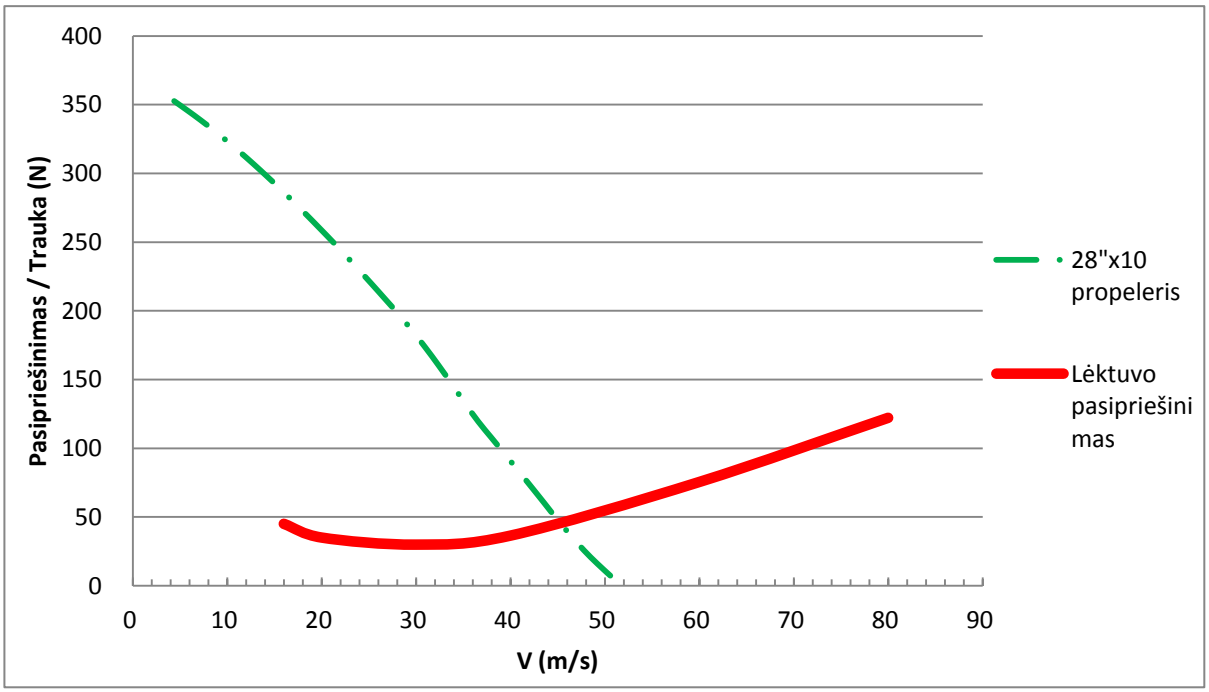


36 pav. Propelerio 28“x10 mentė *PropCalc* programoje



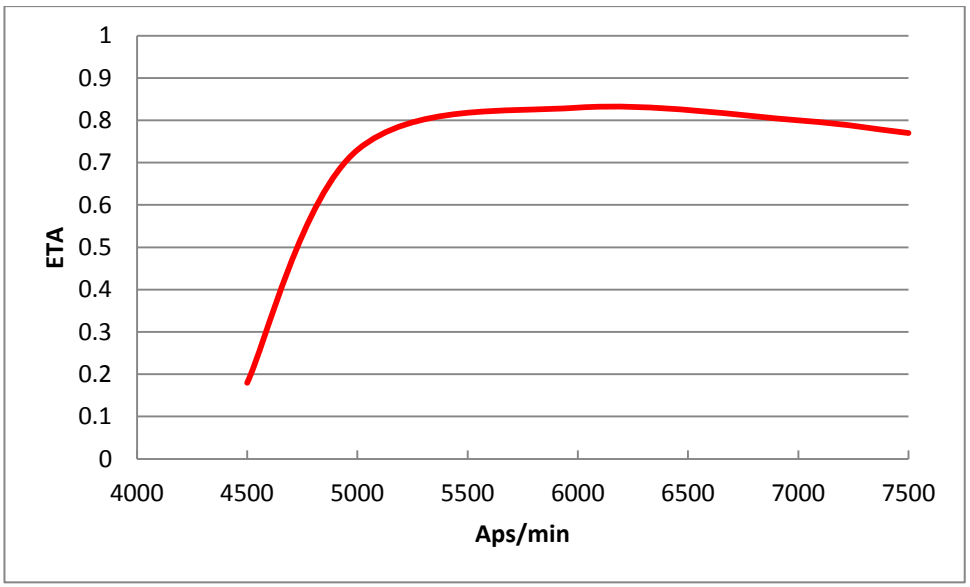
37 pav. Propelerio 28“x10 charakteristikos esant 7500 aps/min

Propelerio 28“x10 charakteristikos esant 7500 aps/min pavaizduotos 37 pav. Esant 7500 aps/min propeleris sukuria maksimalią statinę trauką – 360 N, maksimalią galią sukuria esant 8 m/s – 8890 W, o didžiausias efektyvumas yra esant 37 m/s greičio – 0,83.



38 pav. OT-1 bepiločio orlaivio pasipriešinimo ir propelerio 28“x10 kreivės

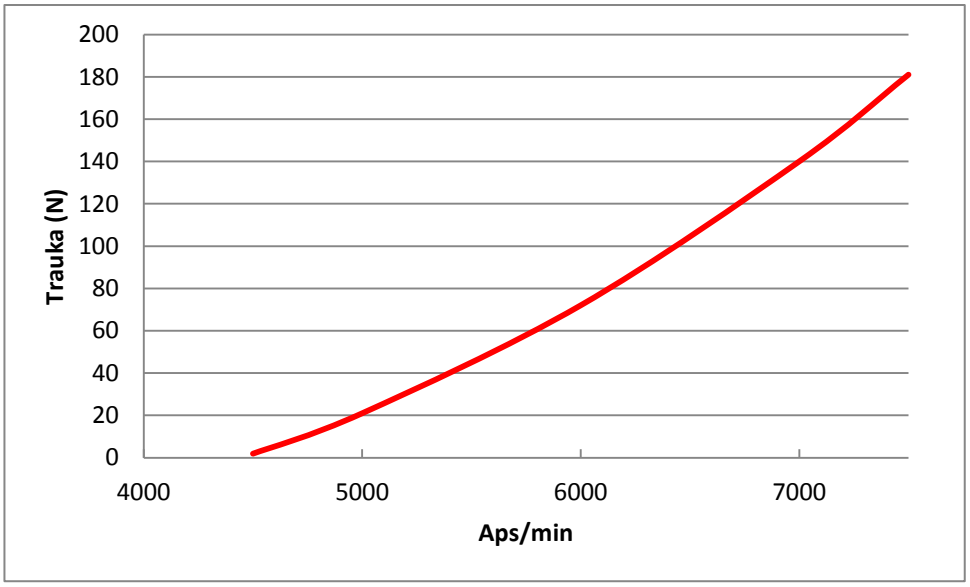
Maksimalus greitis sumažėjo nuo 54,8 m/s iki 45 m/s, bet žymiai padidėjo jo statinė trauka – nuo 245 N iki 360 N. Esant mažiems greičiams (30 m/s) trauka beveik nepasikeitė. Bepiločio orlaivio pasipriešinimo ir propelerio 28“x10 kreivės parodytos 38 pav.



39 pav. Propelerio efektyvumas esant 30 m/s kreiseriniam greičiui

Propelerio efektyvumas esant 30 m/s kreiseriniam greičiui parodytas 39 pav. Propelerio maksimalus efektyvumas yra 0,83 esant 6000 - 6300 aps/min diapazone, skrendant 30 m/s greičiu. Efektyvumas virš 0,8 yra plačiame diapazone – nuo 5400 iki 7000 aps/min. Esant 7500 aps/min propelerio efektyvumas sumažėja iki 0,77.

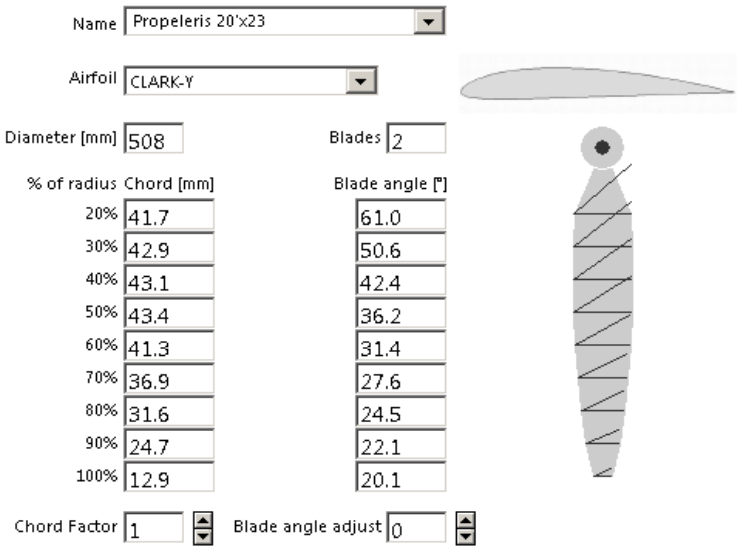
Trauka beveik tiesiškai priklauso nuo apsisukimų ir skrendant 30 m/s greičiu maksimali trauka yra 181 N. Propelerio efektyvumas esant 30 m/s kreiseriniam greičiui parodytas 40 pav.



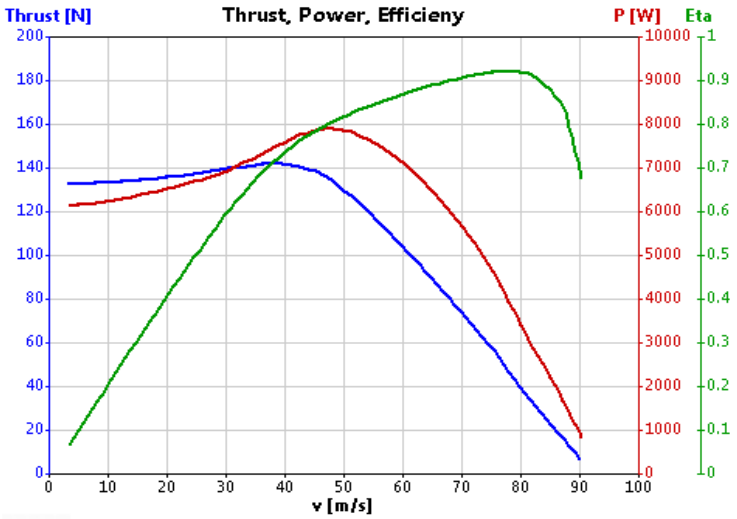
40 pav. Propelerio efektyvumas esant 30 m/s kreiseriniam greičiui

4.4. Propeleris 20“x23

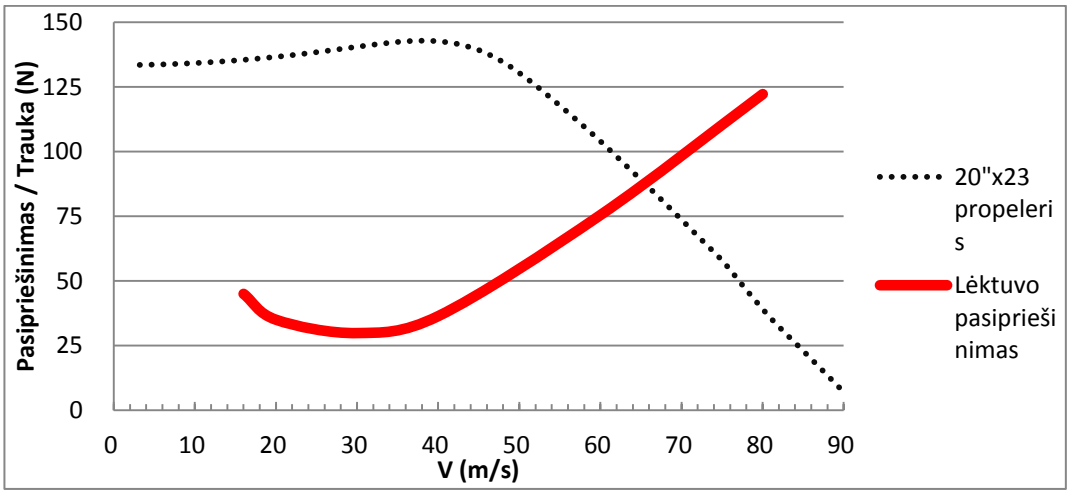
Propeleris yra dviejų menčių 20 colių skersmens (mažesnio skersmens ir didesnio žingsnio nei 24“x16 propeleris) ir 23 colių žingsnio. Buvo įvesti propelerio parametrai ir su programa paskaičiuotos propelerio charakteristikos. Propelerio 20“x23 mentė *PropCalc* programoje pavaizduota 41 pav.



41 pav. Propelerio 20“x23 mentė *PropCalc* programoje

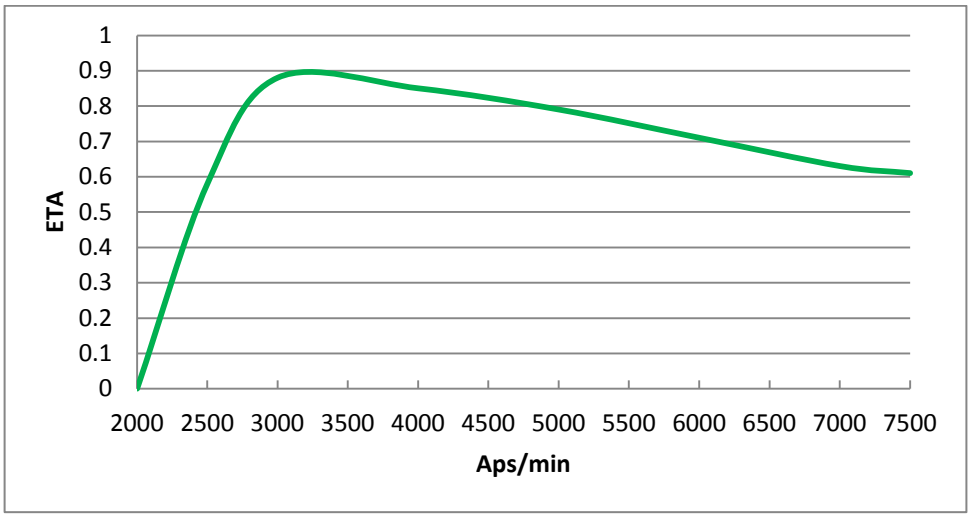


42 pav. Propelerio 20“x23 charakteristikos esant 7500 aps/min

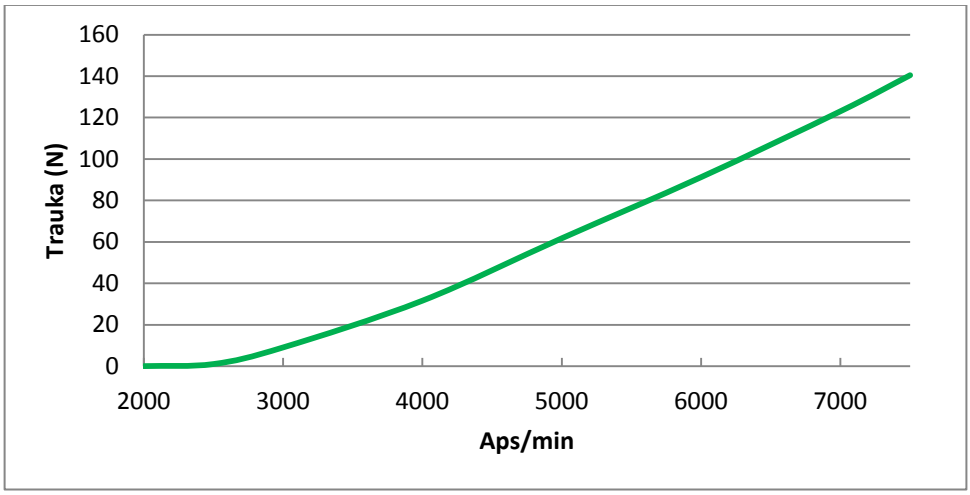


43 pav. OT-1 bepiločio orlaivio pasipriešinimo ir propelerio 20“x23 kreivės

Propelerio 20“x23 charakteristikos esant 7500 aps/min parodytos 42 pav. Maksimalus greitis su 20“x23 propeleriu yra 66 m/s. Mažuose greičiuose (30 m/s) jo trauka yra pakankamai gera – 139 N. Esant 7500 aps/min propeleris sukuria maksimalią trauką, esant 38 m/s – 142 N, maksimalią galią sukuria esant 47 m/s – 7950 W, o didžiausias efektyvumas išlieka esant dideliems greičiams (esant 78 m/s greičiui – 0,92). Startuojant su šiuo propeliumi trauka siekia 130 N. OT-1 bepiločio orlaivio pasipriešinimo ir propelerio 20“x23 kreivės pavaizduotos 43 pav.



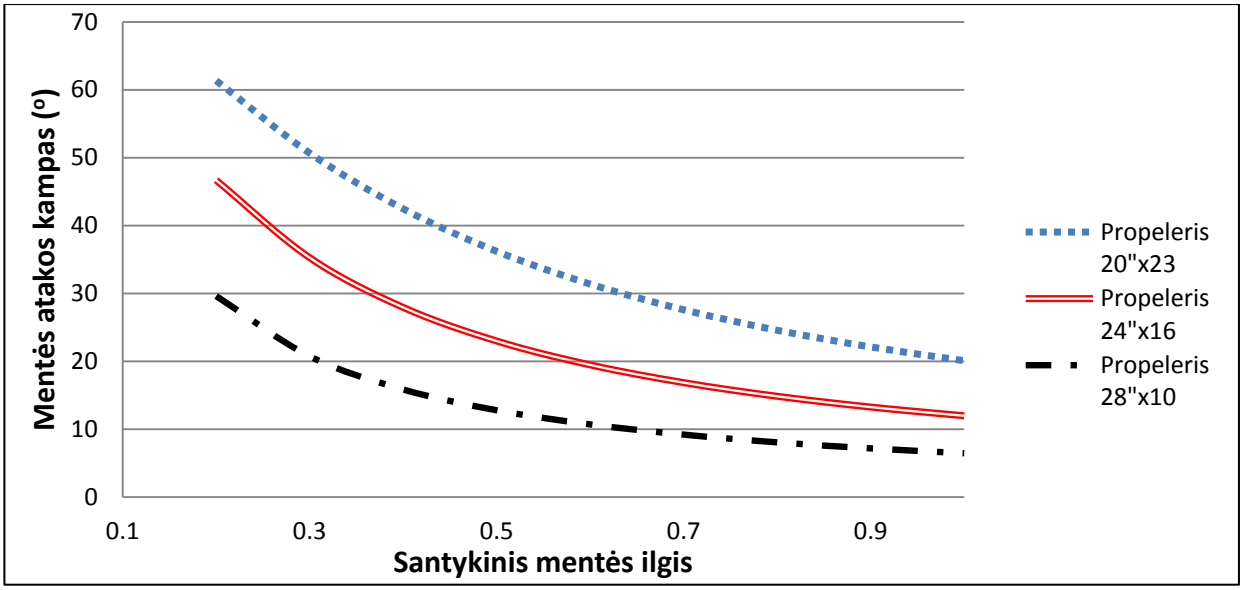
44 pav. Propelerio efektyvumas esant 30 m/s kreiseriniam greičiui



45 pav. Propelerio trauka esant 30 m/s kreiseriniam greičiui

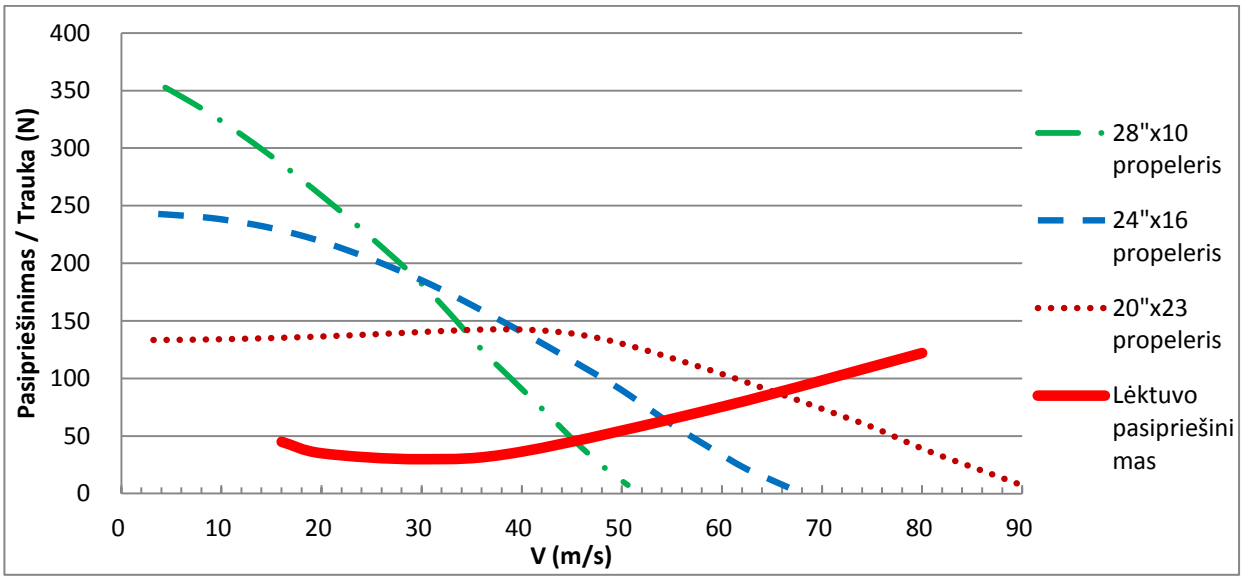
Skrendant 30 m/s greičiu ir esant 3250 aps/min, propelerio maksimalus efektyvumas yra 0,89. Esant 7500 aps/min propelerio efektyvumas sumažėja iki 0,61. Trauka beveik tiesiškai priklauso nuo apsisukimų, o skrendant 30 m/s greičiu maksimali trauka yra 139 N. Propelerio efektyvumas esant 30 m/s kreiseriniam greičiui parodytas 44 pav., o propelerio trauka esant 30 m/s kreiseriniam greičiui – 45 pav.

4.5. Propelerių tarpusavio analizė



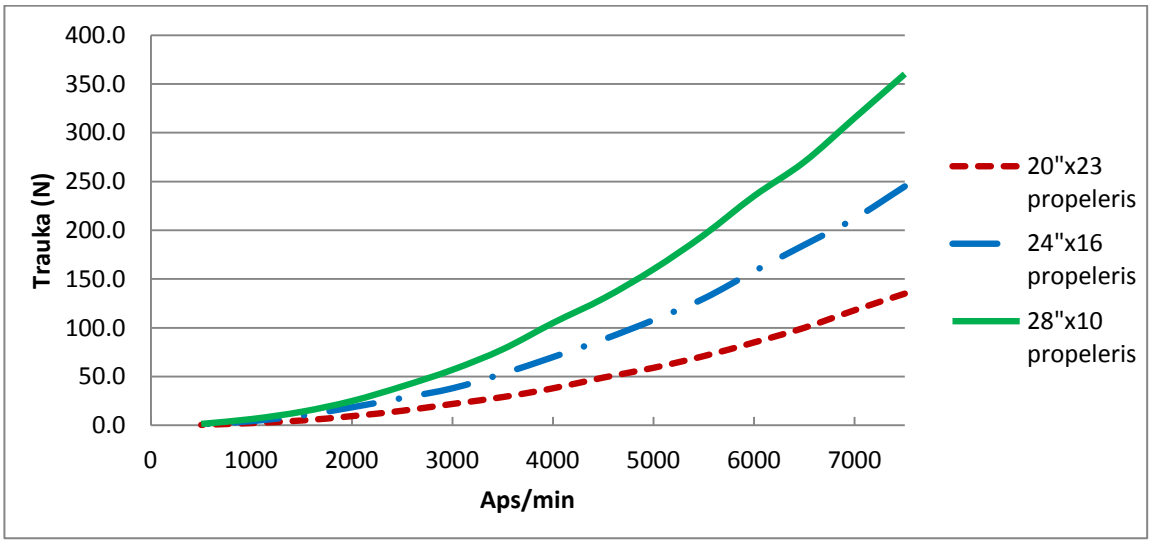
46 pav. Propelerių mentės atakos kampas

Kiekvieno propelerio mentės atakos kampai pateikti 46 pav. Esant 7500 aps/min ir skrendant mažais greičiais (30 m/s), daugiausiai traukos sukuria FIALA 24“x16 ir 28“x10 propeleriai – apie 180 N. Didžiausią statinę trauką sukuria 28“x10 propeleris – 360 N. Toks propeleris išvysto daugiausiai traukos iš visų propelerių – maksimalių apsisukimų metu iki 30 m/s greičio. Skrendant daugiau nei 40 m/s greičiu daugiausia traukos sukuria 20“x23 propeleris. Norint išvystyti didžiausią greitį geriausia naudoti dviejų menčių 20“x23 propelerį. Propelerių traukos palyginimas esant 7500 aps/min pavaizduotas 47 pav.

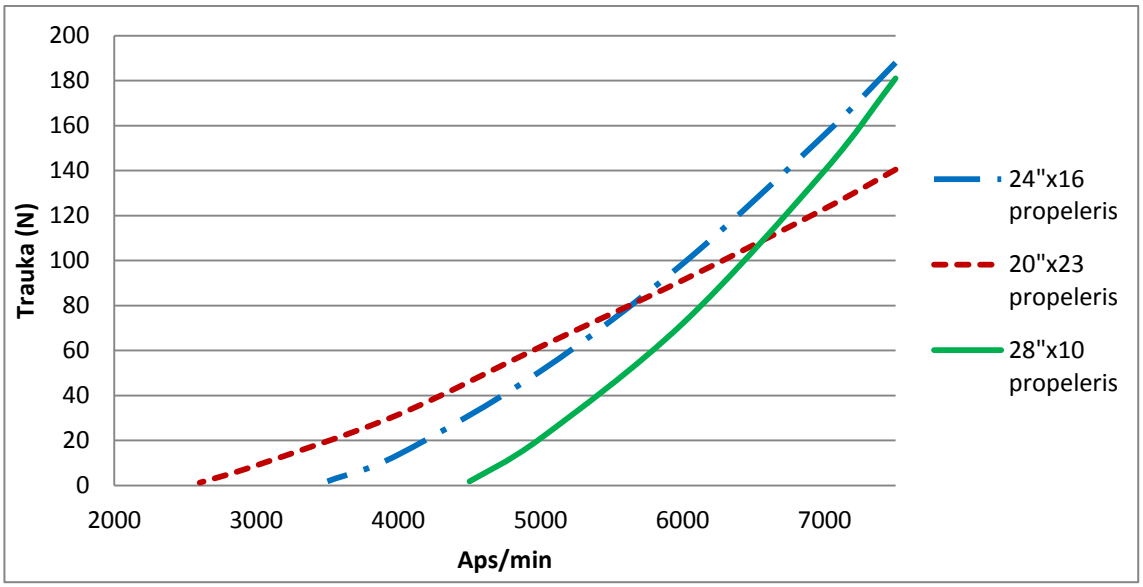


47 pav. Dviejų menčių 28“x10, 20“x23 ir FIALA 24“x16 propelerių traukos palyginimas esant 7500 aps/min

Kiekvieno propelerio statinės traukos priklausomybė nuo apsisukimų pavaizduota 48 ir 49 pav.

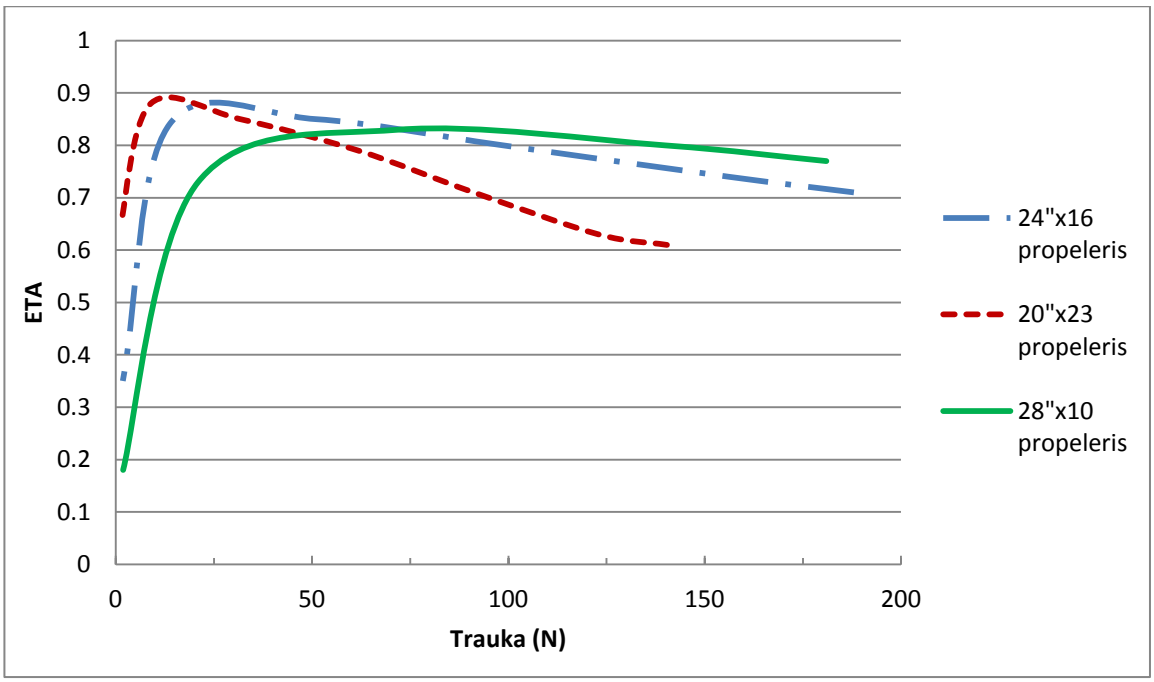


48 pav. Dviejų menčių 28“x10, 20“x23 ir FIALA 24“x16 propelerių traukos palyginimas



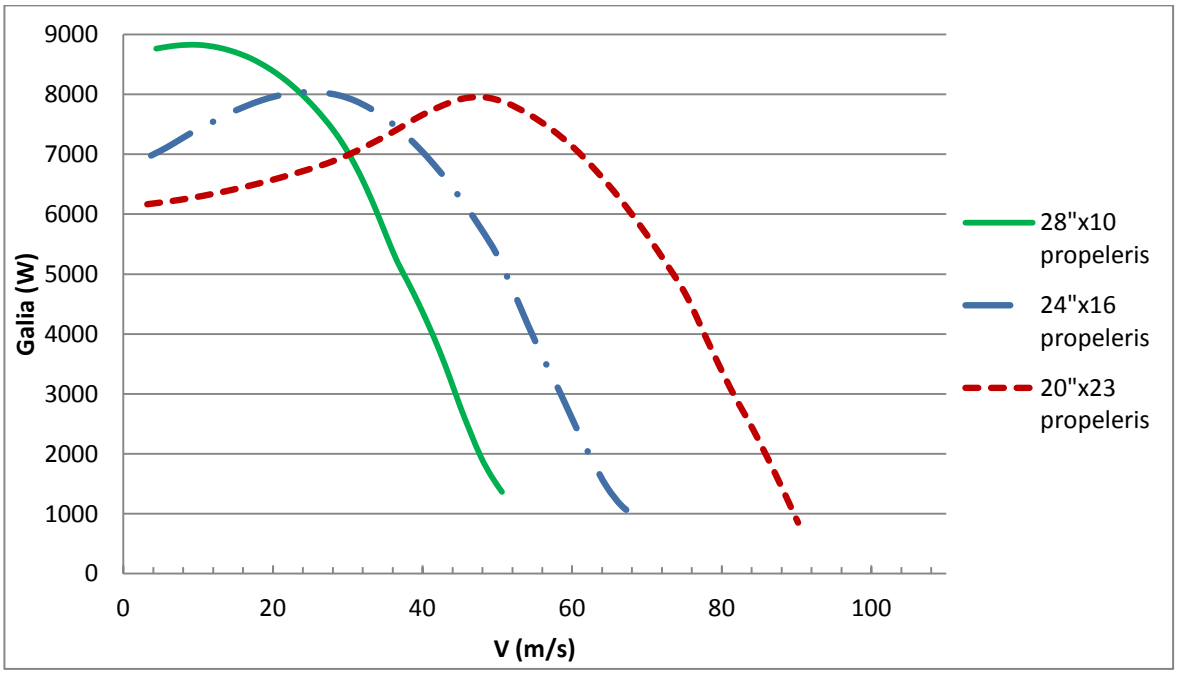
49 pav. Dviejų menčių 28“x10, 20“x23 ir FIALA 24“x16 propelerių traukos palyginimas esant 30 m/s kreiseriniam greičiui

Kuo daugiau propeleriai sukuria traukos, tuo jų efektyvumas staigiau didėja iki maksimalios reikšmės ir toliau mažėja. Nors propelerio 28“x10 efektyvumo maksimali reikšmė yra mažiausia, bet, didėjant traukai, efektyvumo reikšmė išlieka stabilesnė. Trijų propelerių traukos palyginimas esant 30 m/s kreiseriniam greičiui pateiktas 50 pav.



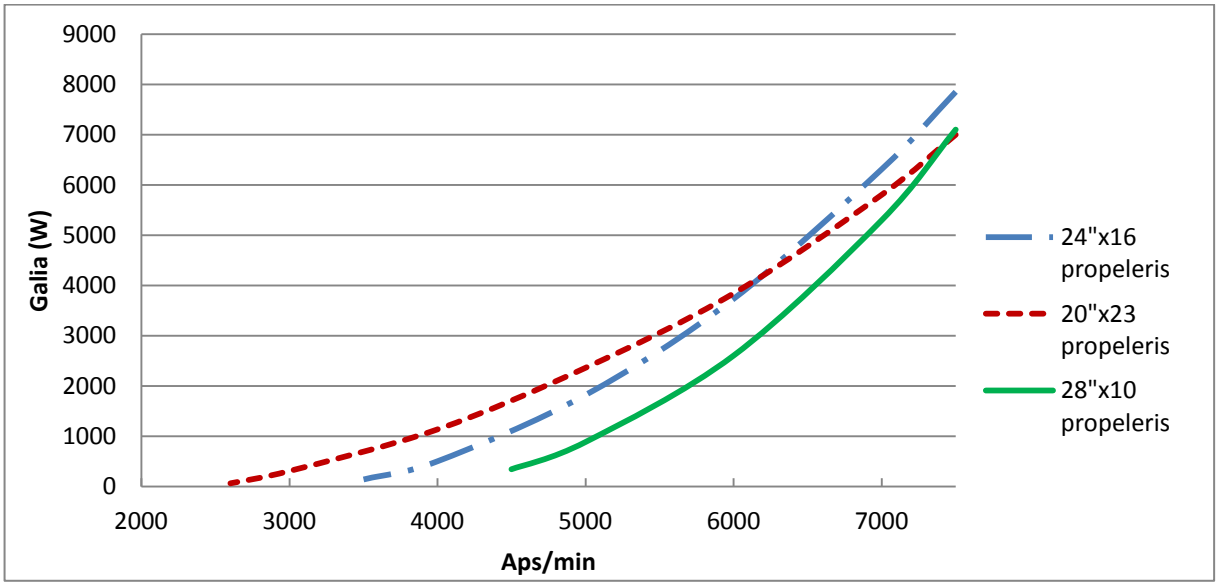
50 pav. Dviejų menčių 28“x10, 20“x23 ir FIALA 24“x16 propelerių traukos palyginimas esant 30 m/s kreiseriniam greičiui

Galingiausias propeleris yra dviejų menčių – 28“x10 propeleris. Toks propeleris gali išvystyti iki 8870 W galią, esant greičiui – 10 m/s. O mažiausia maksimalios galios reišmė yra 7980 W esant 48 m/s greičiui su 20“x23 propeleriu. Trijų propelerių galios palyginimas esant 7500 aps/min pavaizduotas 51 pav.



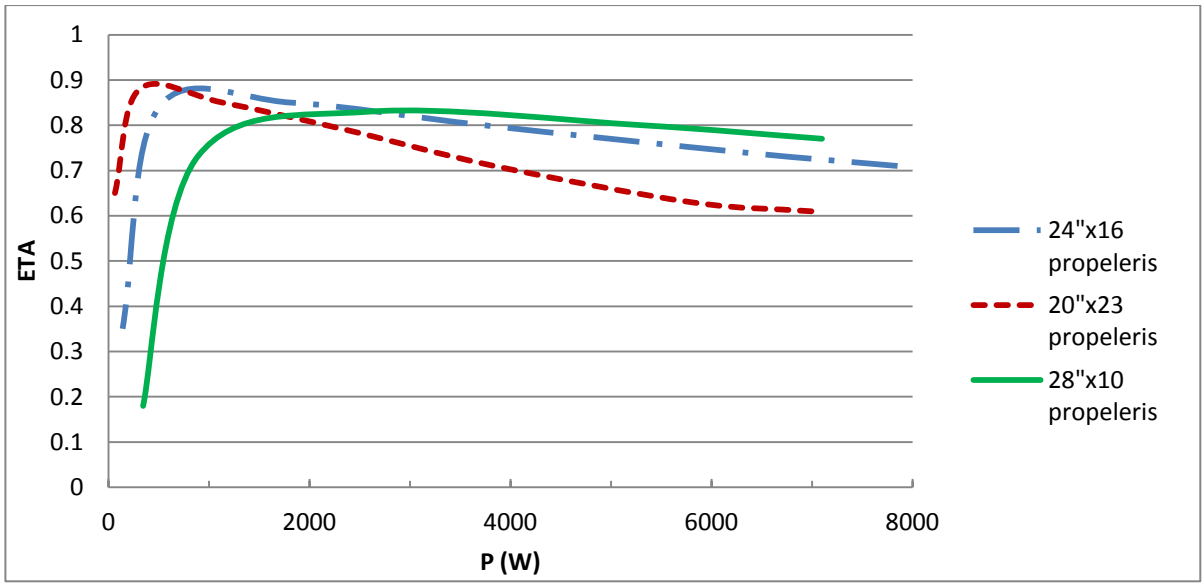
51 pav. Dviejų menčių 28“x10, 20“x23 ir FIALA 24“x16 propelerių galios palyginimas esant 7500 aps/min

Visų trijų propelerių galios kreivės didėja priklausomai nuo apsisukimų. Esant 6200 aps/min 24“x14 ir 20“x23 propelerių galios reikšmės yra panašios, o maksimalios ir minimalios reikšmės skiriasi. Propelerių galios palyginimas esant 30 m/s kreiseriniam greičiui pateiktas 52 pav.

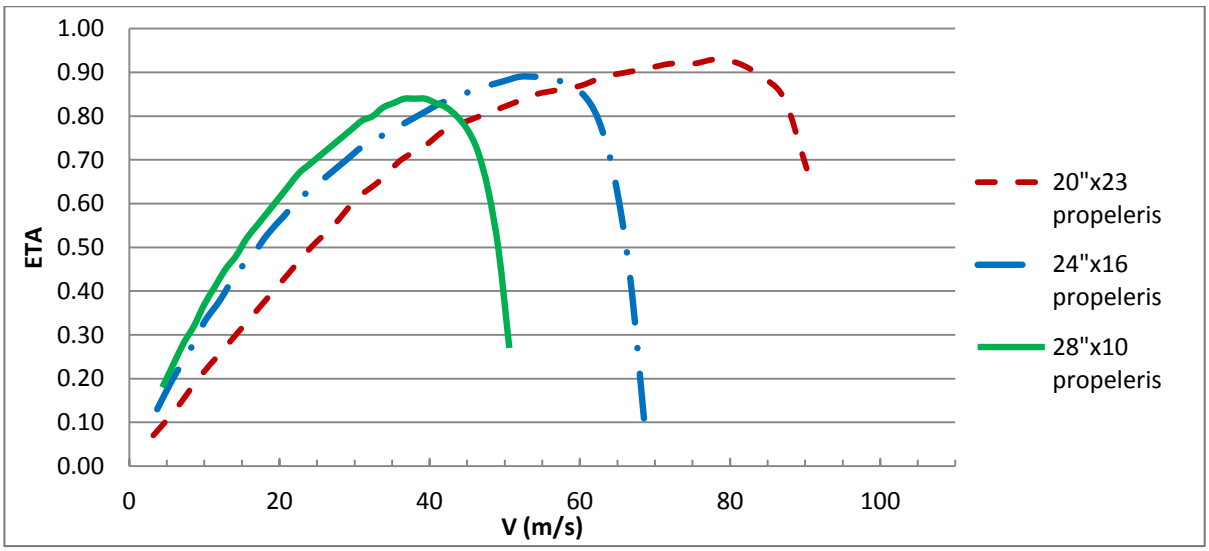


52 pav. Dviejų menčių 28“x10, 20“x23 ir FIALA 24“x16 propelerių galios palyginimas esant 30 m/s kreiseriniam greičiui

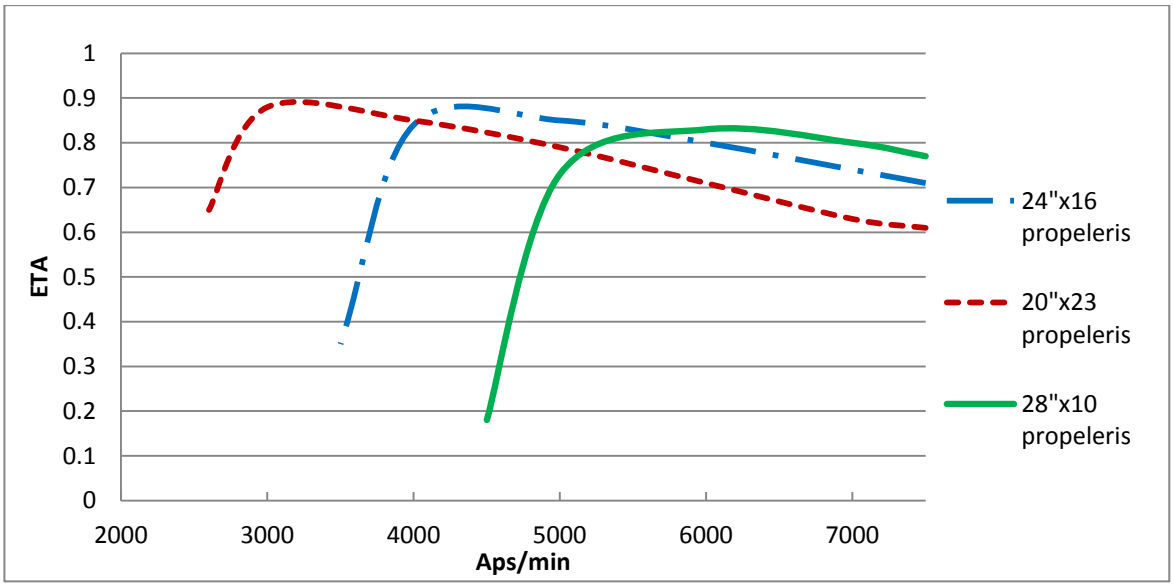
Propelerių efektyvumo priklausomybė nuo galios esant 30 m/s kreiseriniam greičiui pavaizduota 53 pav.



53 pav. Dviejų menčių 28“x10, 20“x23 ir FIALA 24“x16 propelerių efektyvumo palyginimas esant 30 m/s kreiseriniam greičiui



54 pav. Dviejų menčių 28“x10, 20“x23 ir FIALA 24“x16 propelerių efektyvumo palyginimas esant 7500 aps/min



55 pav. Dviejų menčių 28“x10, 20“x23 ir FIALA 24“x16 propelerių efektyvumo palyginimas esant 30 m/s kreiseriniam greičiui

Esant maksimaliems apsisukimams (7500 aps/min), skrendant maksimaliu greičiu, efektyviausias yra 20“x23 propeleris, kurio efektyvumas yra 0,9, kai greitis 66 m/s. Tačiau, norint skristi mažuose greičiuose (iki 40 m/s), efektyviausias yra 28“x10 propeleris, kurio efektyvumas yra 0,83 esant 37 m/s greičiu. Trijų propelerių efektyvumo palyginimas esant 7500 aps/min pateiktas 54 pav.

Esant 30 m/s greičiui ir 3200 aps/min, 20“x23 propelerio efektyvumas pasiekia maksimumą – 0,88; didėjant apsisukimams, tiesiškai mažėja iki 0,61. 28“x10 propelerio efektyvumo maksimali reikšmė yra mažiausia, bet, didėjant apsisukimams, efektyvumo reikšmė išlieka stabilesnė. Propelerių efektyvumo palyginimas esant 30 m/s kreiseriniam greičiui pateiktas 55 pav.

5. PRAKTINĖ DALIS

Buvo suprojektuotas dviejų menčių 20“x23 propeleris. Visa propelerio geometrija iš programos *PropCalc* buvo perkelta į CATIA programą. Sukurtas propelerio modelis, kuris buvo bandomas pagaminti. Propeleris 20“x23 CATIA programoje pavaizduotas 56 pav.

56 pav. Propeleris 20“x23 CATIA programoje

5.1. Propelerio 20“x23 gamyba

Propeleris buvo frezuojamas naudojant automatines 4 ašių pjovimo stakles CNC FC2912, kurios dirba su CAD kompiuterine programa. Buvo paruošta mediena ir įstatyta į stakles. Mediena propelerio gamybai parodyta 57 pav., o 20“x23 propeleris frezavimo metu pavaizduotas 58 pav.

57 pav. Mediena 20“x23 propelerio gamybai

58 pav. 20“x23 propeleris frezavimo metu

59 pav. Išfrezuotas 20“x23 propeleris

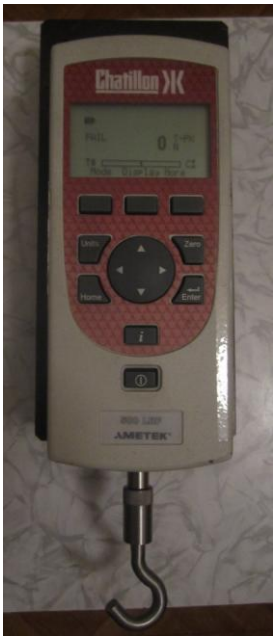
Dėl paklaidų gamybos procese propeleris gautas šiurkštaus paviršiaus ir nesubalansuotas. Viena mentė gauta plonesnė, kita storesnė. Išfrezuotas propeleris parodytas 59 pav. Frezavimo metu viena mentė skilo. Propelerio buvo neįmanoma pataisyti nei rankiniu būdu, nei su staklėmis. Patiems gaminti propelerį tapo sudėtinga, todėl nuspręsta nusipirkti.

Buvo užsakytas 21 colio skersmens ir 23 colio žingsnio propeleris. Jis buvo uždėtas ant bepiločio ir buvo atlikti bandomieji skrydžiai.

5.2. Bandymai

Jėgos matuokliai yra skirti matuoti jėgą, kuri fizikoje yra apibrėžiama kaip veiksmas, atliekamas su kūnu, siekiant pakeisti jo ramybės arba tiesiaeigio tolygaus judejimo būseną. Veikiant jėgai kūnas keičia savo judėjimo kryptį, greitį arba yra deformuojamas. Jėga yra matuojama niutonais (N) (1).

„Chatillon DFE-500“ jėgos matuokliu (žr. 60 pav.) buvo matuojama statinė trauka. Siekiant sumažinti svorį statinės traukos matavimo metu, bepilotis orlaivis buvo dalinai išardytas ir pritvirtintas ant vežimėlio. Statinės traukos matavimas pavaizduotas 61 pav.



60 pav. Jėgos matuoklis

61 pav. Statinės traukos matavimas

62 pav. Dviejų menčių 20“x23, 24“x16 ir 28“x10 propeleriai

Su trimis propeleriais (žr. 62 pav.) buvo matuojama statinė trauka esant maksimaliems apsisukimams ir 5000 aps/min. Kiekvieno propelerio maksimalūs apsisukimai buvo skirtingi. Atsižvelgiant į skirtingus maksimalius apsisukimus, buvo patikslinta propelerių apskaičiuota trauka esant konkretiems apsisukimams. Traukos matavimo rezultatai pateikti 3 lentelėje.

3 lentelė. Traukos matavimo rezultatai

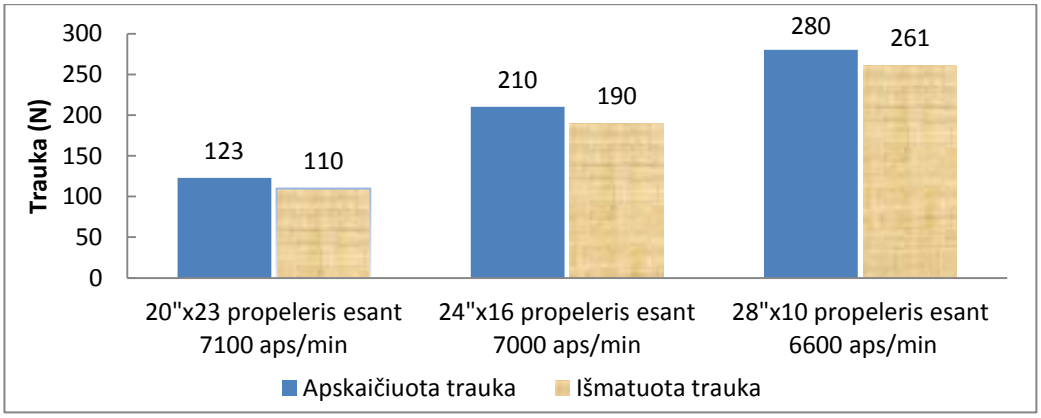
Statinė trauka esant konkretiems apsisukimams	Propeleris 20“x23	Propeleris 24“x16	Propeleris 28“x10
Statinė trauka esant maksimaliems apsisukimams (N)	110 (7100 aps/min)	190 (7000 aps/min)	261 (6600 aps/min)
Statinė trauka esant 5000 aps/min (N)	62	104	152

Praktiniame bandyme nebuvo atsižvelgiama į vežimelio ratų trinties nuostolius, į liemens sukimo momentą, propelerių atstumą nuo žemės paviršiaus bei oro temperatūrą. Taip pat nebuvo atsižvelgta į matavimo prietaisų tikslumą.

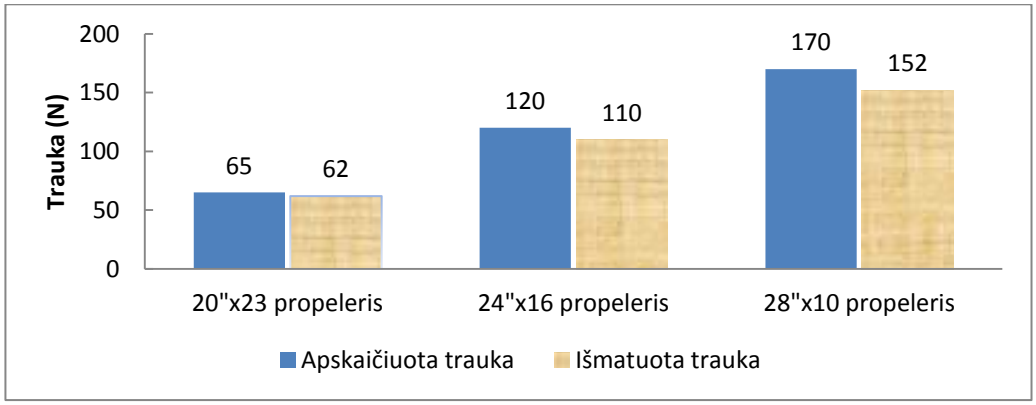
Bandomojo skrydžio metu buvo apytiksliai nustatytas maksimalus greitis. Maksimalus skrydžio greitis su 24“x16 propeleriumi yra 53 m/s. Praktiniame bandyme nebuvo atsižvelgta į matavimo prietaisų tikslumą, vėjo greitį bei oro temperatūrą.

6. REZULTATAI

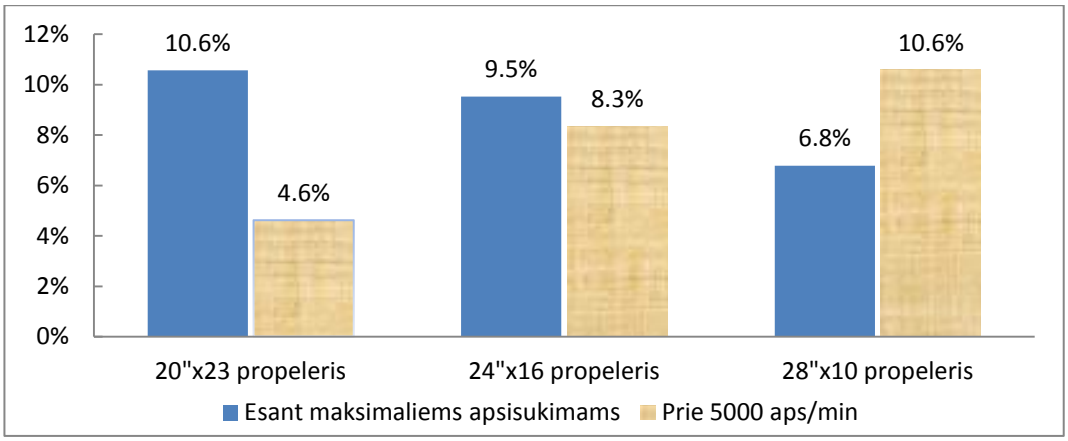
Teorinių traukos skaičiavimų gauti rezultatai nesutampa su praktiniais. Apskaičiuotų ir išmatuotų duomenų palyginimas pateiktas 63, 64 ir 65 pav. Taip yra todėl, kad praktiniame bandyme nebuvo atsižvelgiama į vežimelio ratų trinties nuostolius, liemens sukimo momentą, propelerių atstumą nuo žemės paviršiaus bei oro temperatūrą. Taip pat nebuvo atsižvelgta į matavimo prietaisų tikslumą. Tačiau šie duomenys yra iš dalies panašūs, jų skirtumas yra ne daugiau nei 10,6 %.



63 pav. Apskaičiuota ir išmatuota trauka esant maksimaliems apsisukimams

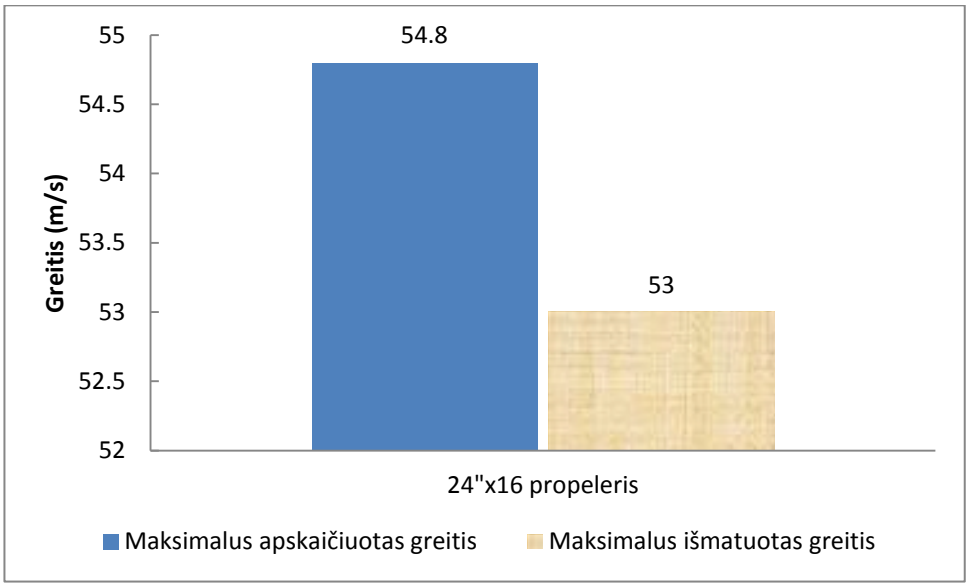


64 pav. Apskaičiuota ir išmatuota trauka esant 5000 aps/min



65 pav. Apskaičiuotų ir išmatuotų duomenų skirtumas

Maksimalaus greičio teorinių skaičiavimų gauti rezultatai taip pat nesutampa su praktiniais. Apskaičiuoto ir išmatuoto maksimalaus grečio palyginimas pateiktas 66 pav. Išmatuotas maksimalus greitis yra apytikslis. Praktiniame bandyme nebuvo atsižvelgta į matavimo prietaisų tikslumą, vėjo greitį bei oro temperatūrą. Tačiau duomenys yra panašūs, jų skirtumas yra 3,3 %.



66 pav. Apskaičiuotas ir išmatuotas maksimalus greitis

IŠVADOS

1. Atlikta bepiločio oro taikinio skaitinio modelio analizė. Minimalus pasipriešinimas yra 29,8 N esant 30 m/s greičiui, maksimali aerodinaminė kokybė siekia 8,4 esant 30 m/s greičiui ir esant 2,8^{o} laipsnių atakos kampui. Kylant greičiui, eksponentiškai kyla ir lėktuvo pasipriešinimo kreivė.

2. Atlikta išmatuoto propelerio ir apskaičiuoto mentės atakos kampo propelerio analizė. Menčių atakos kampų skirtumas yra ne daugiau nei 0,3^{o} nuo 0 iki 0,9 propelerio santykinės mentės ilgio, o nuo 0,9 iki 1 – skirtumas iki 2°. Maksimalios traukos kreivės skiriasi tik 2-4 N per visą greičių diapazoną. Propelerių traukos kreivių su orlaivio pasipriešinimo kreive susikirtimo taškai skiriasi 0,7 m/s. Propelerių efektyvumo kreivės yra panašios.

3. Atlikta oro taikinio analizė su trimis skirtingais propeleriais. Skrendant iki 30 m/s greičiu efektyviausia naudoti 28‘x10 propelerį. Statinė trauka esant maksimaliems apsisukimams yra 280 N ir maksimalus greitis 45 m/s. Didžiausias maksimalus greitis pasiektas su 20‘x23 propeleriu yra 66 m/s, statinė trauka esant maksimaliems apsisukimams – 123 N.

4. Atlikti eksperimentiniai bandymai su trimis propeleriais. Skirtumas tarp teorinių traukos skaičiavimų gautų rezultatų ir praktikinių bandymų yra ne daugiau nei 10,6 %. Skirtumas tarp maksimalaus greičio teorinių skaičiavimų gauto rezultato ir praktinio yra 3,3 %.

5. Remiantis gautais skaičiavimais ir atliktu tyrimu, galima teigti, kad pakeitus propelerį 24“x16 į propelerį 20“x23, bepiločio oro taikinio maksimalus skrydžio greitis padidėja apie 20 %.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

Jeffery, J.; Docksey, P. 2008. *Cost benefits of aerodynamic data generation techniques for aircraft stability and control analysis using the J 2 Universal Tool Kit*. 2008-01-2254, 21 p.

Kotikalpudi, A., *et al.* 2013. *Aerodynamic Analysis using XFLR-5.* Aerospace Engineering and Mechanics University of Minnesota, 1-12 p.

Lasauskas, E. 2008. *Skrydžio principai*: Mokomoji knyga**.** Vilnius: Technika.

Lasauskas, E. 2010. *Lėktuvo aerodinamika*: Paskaitų konspektas. Vilnius: Technika.

Lasauskas, E. 2002. *Sparno profilių aerodinamika*: Laboratorinių darbų metodikos nurodymai. Vilnius: Technika.

Bručas, D. 2012. *Propeleriai*: Mokomoji knyga. Vilnius: Technika.

Merkys, B. 2012. *Orlaivių konstrukcijos*: Mokomoji knyga. Vilnius: Technika.

Bazaras, D., *et al.* 2010. *Magistro baigiamasis darbas*: Metodikos nurodymai. Vilnius: Technika.

Bepiločių orlaivių naudojimo taisyklės. [interaktyvus]. 2014. Civilinės aviacijos administracija. Prieiga per internetą: <http://www3.lrs.lt/pls/inter3/dokpaieska.showdoc_l?p_id=464794&p_tr2=2>

U.S. Military Unmanned Aerial Vehicles (UAV). [interaktyvus]. 2014. Market Forecast 2013-2018. [žiūrėta 2014 gruodžio 26]. Prieiga per internetą: <http://www.marketresearchmedia.com/?p=509>

Prisacariu V.; Circiu I.; Boscoianu M. 2012. Flying wing aerodynamic analysis. *Henri Coanda Air Force Academy* 1: 31-35 p.

Chung, H. 2007. An Enhanced Propeller Design Program Based on Propeller Vortex Lattice Lifting Line Theory. *Masters Thesis*, Massachusetts Institute of Technology, 34-41 p.

Drela, M. 1990. *Elements of Airfoil Design Methodology*. Cambridge: Massachusetts Institute of technology.

Lighthill, M. 1958. On Displacement Thickness. *Journal of Fluid Mechanics,* 383- 392 p.

Maksymiuk, C.; Pulliam, T. 1987. Viscous transonic airfoil workshop results using ARC-2D. *Aerospace Sciences Meeting, 25th*.

Holst, T. 1988. Viscous transonic airfoil workshop compendium of results. *Journal of Aircraft* 25(12).

McCormick, B. 1995. Aerodynamics, Aeronautics, and Flight Mechanics. *John Willey and sons* 2.

Sivells, J.; Robert, H. 1947. Method for calculating wing characteristics by lifting line theory using nonlinear section lift data [interaktyvus]. *NACA Technical Note 1269*. [žiūrėta 2015 gegužės 20 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a801339.pdf>

Ragauskas, U.; Brucas, B. 2013. Bepiločių orlaivių taikymo Lietuvos kariuomenės oro taikiniams imituoti tyrimas. *Aviacijos Technologijos* 1(2): 67-69.

Ansys WorkBench 14 manual : <http://www.gobookee.net/ansys-workbench-14-user-manual/>

Lietuvos kosmoso asociacija <http://space-lt.eu/bepilociai-lektuvai/>

PropCalc programa <http://www.drivecalc.de/PropCalc/>

PropCalc manual <http://www.drivecalc.de/PropCalc/PCHelp/Help.html>

XFLR5 programa <http://www.xflr5.com/xflr5.htm>

Jėgos matuoklis <http://www.svarstykles.com/jegos-matuokliai>

CATIA programa <https://es.wikipedia.org/wiki/CATIA>

DLE 110, Available from Internet: <http://g02.a.alicdn.com/kf/HTB175T0IpXXXXX4XXXXq6xXFXXXe/DLE120-120CC-Gasoline-engine-model-aircraft-120cc-enginee-remote-aircraft-model-fixed-wing-aircraft-model.jpg>

Up&Above, Available from Internet: <http://upnabove.com/>