



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INSTITUTAS

AVIACIJOS TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

Arnas Diktanas

PROPELERIO IR VARIKLIO SĄVEIKOS SKAITINĖ ANALIZĖ
NUMERICAL ANALYSIS OF PROPELLER AND ENGINE MATCHING

Baigiamasis magistro darbas

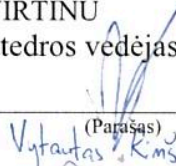
Orlaivių pilotavimo studijų programa, valstybinis kodas 601H41001

Aeronautikos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2020

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INSTITUTAS
AVIACIJOS TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas


(Parašas)
Vytautas Kimsa
(Vardas, pavardė)
2020-05-11
(Data)

Arnas Diktanas

PROPELERIO IR VARIKLIO SĄVEIKOS SKAITINĖ ANALIZĖ
NUMERICAL ANALYSIS OF PROPELLER AND ENGINE MATCHING

Baigiamasis magistro darbas

Orlaivių pilotavimo studijų programa, valstybinis kodas 601H41001

Aeronautikos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

doc. dr. Eduardas Lasauskas

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



(Parašas)

2020-05-15

(Data)

Konsultantas

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

(Parašas)

(Data)

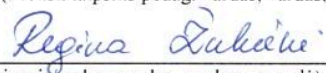
Konsultantas

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

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas


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


(Parašas)

2020-05-11

(Data)

Vilnius, 2020

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INSTITUTAS
AVIACIJOS TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

Aeronautikos inžinerijos studijų kryptis

Orlaivių pilotavimo studijų programa, valstybinis kodas 601H41001

TVIRTINU
Katedros vedėjas

Vytautas Rimša

(Vardas, pavardė)

2019-09-25

(Data)

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS**

.....2019-09-25 Nr. 4.....
Vilnius

Studentui **Arnui Diktanui**

.....
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: **PROPELERIO IR VARIKLIO SĄVEIKOS TYRIMAS**

patvirtinta 2020 m. kovo 12..... d. dekanu potvarkiu Nr. 66ai.....

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2020 m. birželio 2..... d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Išanalizuoti mokslinę literatūrą apie propelerių ir elektros variklių sąveiką;

Išanalizuoti propelerių charakteristikas;

Išanalizuoti elektros variklių parametrus;

Apskaičiuoti propelerio APC Slow Flyer 11x4.7 ir elektros variklio sąveikos parametrus;

Suformuluoti darbo išvadas;

Darbo rezultatus pristatyti mokslinėje konferencijoje.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

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

Vadovas

.....
(Parašas)

doc. dr. Eduardas Lasauskas

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

Užduotį gavau

.....
(Parašas)

..... Arnas Diktanas.....

(Vardas, pavardė)

2019-09-25

(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas Antano Gustaičio aviacijos institutas Aviacijos technologijų katedra	ISBN Egz. sk. Data-.....-.....
Vientisosios studijų Orlaivių pilotavimo programos magistro baigiamasis darbas	
Pavadinimas	Propelerio ir variklio sąveikos skaitinė analizė
Autorius	Arnas Diktanas
Vadovas	Eduardas Lasauskas
Kalba: lietuvių	
Anotacija Baigiamajame magistro darbe tiriama propelerio ir variklio sąveika. Apžvelgiamos bendros teorinės žinios apie šiuos komponentus, detaliau aptariama propelerio judesio kiekio teorija, analizuojami šiuolaikiniai moksliniai darbai, kuriuose buvo atlikti panašūs tyrimai. Naudojantis XFOIL ir QPROP programomis atliekama pasirinktos propelerio APC Slow Flyer 11x4,7 ir variklio T-MOTOR AT2317 KV880 kombinacijos charakteristikų skaitinė analizė. Gauti duomenys palyginami su kituose šaltiniuose pateikiamais eksperimentiniais duomenimis, apdorojami ir naudojami propelerio ir variklio sistemos efektyvumui įvertinti. Papildomas dėmesys skiriamas mentės profilio poliarės aproksimavimui. Rezultatai pateikiami grafikuose. Patvirtinama hipotezė, kad praktinės propelerio charakteristikos viršija teorines. Parodoma, kad pasirinkta propelerio ir variklio kombinacija yra efektyvi, tačiau neišnaudojama potenciali propelerio galia. Darbą sudaro 6 dalys: įvadas, propelerio ir variklio apžvalga, propelerio ir variklio sąveikos tyrimo metodika, propelerio ir variklio sąveikos tyrimas, išvados ir rekomendacijos, literatūros sąrašas. Darbo apimtis – 73 p. teksto be priedų, 42 iliustr., 8 lent., 43 bibliografiniai šaltiniai. Atskirai pridedami darbo priedai.	
Prasminiai žodžiai: bepilotis orlaivis, propeleris, variklis, motoras, propelerio judesio kiekio teorija, skaitinė analizė, efektyvumas.	

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

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

Arnas Diktanas, 20153896

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Antano Gustaičio aviacijos institutas

(Fakultetas)

Orlaivių pilotavimas, OPfau-15

(Studijų programa, akademinė grupė)

**BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA**

2020 m. gegužės 20 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Propelerio ir variklio sąveikos skaitinė analizė“ patvirtintas 2020 m. kovo 12 d. dekanato potvarkiu Nr. 66ai, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Mano darbo vadovas docentas daktaras Eduardas Lasauskas.

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



(Parašas)

Arnas Diktanas
(Vardas ir pavardė)

TURINYS

TURINYS	7
SANTRUMPŲ SĄRAŠAS	8
ILIUSTRACIJŲ SĄRAŠAS	8
LENTELIŲ SĄRAŠAS	10
ĮVADAS	11
1. PROPELERIO IR VARIKLIO APŽVALGA	12
1.1. Bendros žinios apie propelerį	12
1.2. Propelerio galia.....	14
1.3. Propelerio judesio kiekio teorija.....	15
1.4. Pagrindinių propelerio teorijų taikymas praktikoje.....	20
1.5. Bendros žinios apie nuolatinės srovės elektros variklį.....	26
1.6. Propelerio ir variklio sąveika	27
1.7. Specifiniai bepiločio orlaivio propelerio ir variklio derinimo aspektai	30
1.8. Skyriaus išvados	35
2. PROPELERIO IR VARIKLIO SĄVEIKOS TYRIMO METODIKA	36
2.1. Propeleris ir jo geometrija	36
2.2. Programos XFOIL aprašas	37
2.3. Programos QPROP aprašas	38
2.3.1. Propelerio failas.....	39
2.3.2. Variklio failas	40
2.3.3. QPROP galimybės.....	40
3. PROPELERIO IR VARIKLIO SĄVEIKOS TYRIMAS	42
3.1. Reinoldso skaičiaus nustatymas	42
3.2. Profilio MA409 aerodinaminių charakteristikų aproksimavimas	45
3.3. Tinkamiausio aproksimacijos modelio radimas	49
3.4. Fiktyvaus propelerio įvedimas	53
3.5. Propelerio ir variklio sąveikos analizė	56
IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS	70
LITERATŪROS SĄRAŠAS	71
PRIEDAI.....	74

SANTRUMPŲ SĄRAŠAS

BEMT – angl. *Blade Element Momentum Theory*.

CFD – angl. *Computational Fluid Dynamics*.

RANS – angl. *Reynolds-averaged Navier-Stokes equations*.

UAV – angl. *Unmanned Aerial Vehicle*.

ILIUSTRACIJŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Propelerio mentės dydžiai ir pjūvio kampai (Sudaryta autoriaus, 2020).....	12
1.2 pav. Propelerio disko vientisumas (angl. <i>propeller disk solidity</i>) (Sudaryta autoriaus, 2020)	15
1.3 pav. Propelerio disko pjūvis ir pro jį judančio oro srauto charakteristikos (Sudaryta autoriaus, 2020)	17
1.4 pav. Tangentinės jėgos taikant skirtingas skaičiavimo teorijas (Sun ir kt., 2016)	25
1.5 pav. Principinė nuolatinės srovės elektros variklio grandinė (Drela, 2007a)	26
1.6 pav. Naudingumo koeficiento η priklausomybė nuo apsukų skaičiaus n per minutę prie skirtingų elektrinio motoro įtampų. Teorinių ir eksperimentinių rezultatų palyginimas	30
1.7 pav. Propelerio APC Slow Flyer 11x4,7 praktiniai naudingumo koeficientai prie skirtingų sūkių kintant propelerio santykinei eigai (UIUC, 2015)	32
1.8 pav. Propeleris APC Slow Flyer 11x4,7 (UIUC, 2015)	32
1.9 pav. Propelerio ir variklio naudingumo koeficientai (η_{prop} , η_{var}) bei trauka T prie tam tikrų sūkių n (Drela, 2005)	33
1.10 pav. Idealizuota aerodinaminio profilio poliarė (ištiesinė linija) ir jos aproksimacija parabole (punktyrinė linija)	34
2.1 pav. Propelerio APC Slow Flyer 11x4,7 geometrija (UIUC, 2015).....	37
2.2 pav. Aerodinaminio profilio MA409 atvaizdas	38
2.3 pav. Pradinis programos QPROP langas	41
3.1 pav. Profilio MA409 keliamosios jėgos koeficiento priklausomybė nuo atakos kampo (ištiesinė linija) ir jos kreivės aproksimacija (punktyrinė linija).....	46
3.2 pav. Profilio MA409 pasipriešinimo koeficiento priklausomybė nuo keliamosios jėgos koeficiento (ištiesinė linija) ir trys jos aproksimacijos (kitos linijos)	47
3.3 pav. Propelerio APC Slow Flyer 11x4,7 Reinoldso skaičiai išilgai mentės prie fiksuotų apsukų statinės traukos atveju	49

3.4 pav. Propelerio APC Slow Flyer 11x4,7 naudingumo koeficiento priklausomybė nuo santykinės eigos, kai apskukos lygios 4003 per minutę	50
3.5 pav. Propelerio APC Slow Flyer 11x4,7 traukos koeficiento priklausomybė nuo santykinės eigos, kai apskukos lygios 4003 per minutę	51
3.6 pav. Propelerio APC Slow Flyer 11x4,7 galios koeficiento priklausomybė nuo santykinės eigos, kai apskukos lygios 4003 per minutę	52
3.7 pav. Fiktyvaus propelerio traukos koeficiento priklausomybė nuo santykinės eigos, kai apskukos lygios 4003 per minutę	54
3.8 pav. Fiktyvaus propelerio galios koeficiento priklausomybė nuo santykinės eigos, kai apskukos lygios 4003 per minutę	55
3.9 pav. Fiktyvaus propelerio naudingumo koeficiento priklausomybė nuo santykinės eigos, kai apskukos lygios 4003 per minutę	55
3.10 pav. Reikalinga įtampa ir galia naudojant variklį T–MOTOR AT2317 KV880 statinės traukos atveju.....	57
3.11 pav. Propelerio trauka ir galia, kai variklio T–MOTOR AT2317 KV880 įtampa $U = 2 V$	58
3.12 pav. Propelerio trauka ir galia, kai variklio T–MOTOR AT2317 KV880 įtampa $U = 4 V$	58
3.13 pav. Propelerio trauka ir galia, kai variklio T–MOTOR AT2317 KV880 įtampa $U = 6 V$	59
3.14 pav. Propelerio trauka ir galia, kai variklio T–MOTOR AT2317 KV880 įtampa $U = 8 V$	59
3.15 pav. Propelerio trauka ir galia, kai variklio T–MOTOR AT2317 KV880 įtampa $U = 10 V$	60
3.16 pav. Propelerio trauka ir galia, kai variklio T–MOTOR AT2317 KV880 įtampa $U = 12 V$	60
3.17 pav. Propelerio trauka ir galia, kai variklio T–MOTOR AT2317 KV880 įtampa $U = 14,8 V$	61
3.18 pav. Naudingumo koeficientai, kai variklio T–MOTOR AT2317 KV880 įtampa $U = 2 V$	62
3.19 pav. Naudingumo koeficientai, kai variklio T–MOTOR AT2317 KV880 įtampa $U = 4 V$	62
3.20 pav. Naudingumo koeficientai, kai variklio T–MOTOR AT2317 KV880 įtampa $U = 6 V$	63

3.21 pav. Naudingumo koeficientai, kai variklio T–MOTOR AT2317 KV880 įtampa $U = 8 V$	63
3.22 pav. Naudingumo koeficientai, kai variklio T–MOTOR AT2317 KV880 įtampa $U = 10 V$	64
3.23 pav. Naudingumo koeficientai, kai variklio T–MOTOR AT2317 KV880 įtampa $U = 12 V$	64
3.24 pav. Naudingumo koeficientai, kai variklio T–MOTOR AT2317 KV880 įtampa $U = 14,8 V$	65
3.25 pav. Naudingumo koeficientai, kai skrydžio greitis $v = 1 m/s$	66
3.26 pav. Naudingumo koeficientai, kai skrydžio greitis $v = 2 m/s$	66
3.27 pav. Naudingumo koeficientai, kai skrydžio greitis $v = 5 m/s$	67
3.28 pav. Naudingumo koeficientai, kai skrydžio greitis $v = 10 m/s$	67
3.29 pav. Naudingumo koeficientai, kai skrydžio greitis $v = 20 m/s$	68

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Skaitinių metodų turbulentiniam oro srautui tirti rezultatų palyginimas (Ehrich ir kt., 2018).....	24
2.1 lentelė. QPROP propelerio failo aprašas	39
2.2 lentelė. QPROP variklio failo aprašas	40
3.1 lentelė. Įvairių faktorių, darančių įtaką būdingam tiriamo propelerio Reinoldso skaičiui, apibendrinimas	43
3.2 lentelė. QPROP, PropCalc, UIUC rezultatų palyginimas.....	52
3.3 lentelė. QPROP fiktyvaus propelerio ir UIUC rezultatų palyginimas.....	56
3.4 lentelė. Pagrindinės variklio T–MOTOR AT2317 KV880 specifikacijos (T–MOTOR, 2020a)	57
3.5 lentelė. Pagrindinių variklių T–MOTOR AT2317 KV880 ir T–MOTOR AT5230–B KV200 charakteristikų ir kainos palyginimas (T–MOTOR, 2020a, 2020b).....	69

IVADAS

Šiuolaikinėje aviacijoje vis svarbesnę vietą užima bepiločiai orlaiviai (angl. *UAV – Unmanned Aerial Vehicles*). Jie atveria ne tik plačias jų panaudojimo galimybes, bet ir specifinę tyrimų nišą. Iki šiol daugiausiai buvo tyrinėjami dideli izoliuoti propeleriai ir vidaus degimo ar kiti masyvūs varikliai. Tuo tarpu bepiločiams orlaiviams būdingiausi maži propeleriai ir žemo galingumo elektros varikliai. Abu šie agregatai pasižymi išskirtinėmis savybėmis. Nėgana to, egzistuoja specifiniai šios sistemos suderinamumo aspektai, kurie nėra pakankamai ištyrinėti. Taigi mūsų darbo:

- **tyrimų objektas** – propelerio ir variklio sistema;
- **aktualumas** – plintant bepiločiams orlaiviams tenka naujai įvertinti propelerio ir variklio derinimo problemą, nes maži propeleriai pasižymi išskirtinėmis savybėmis;
- **problema** – trūksta mokslinių darbų, kuriuose skaitinės analizės metodu būtų ištirtos pasirinktos propelerio ir variklio kombinacijos charakteristikos;
- **tikslas** – atlikti pasirinktos propelerio ir variklio kombinacijos charakteristikų skaitinę analizę.

Atsižvelgdami į iškeltą darbo tikslą, keliame tokius **darbo uždavinius**:

1. Atlikti mokslinės literatūros darbo tema analizę.
2. Aptarti ir patikrinti skaičiavimo metodiką.
3. Rasti pasirinktos variklio ir propelerio kombinacijos charakteristikas.
4. Suformuluoti išvadas ir siūlymus.

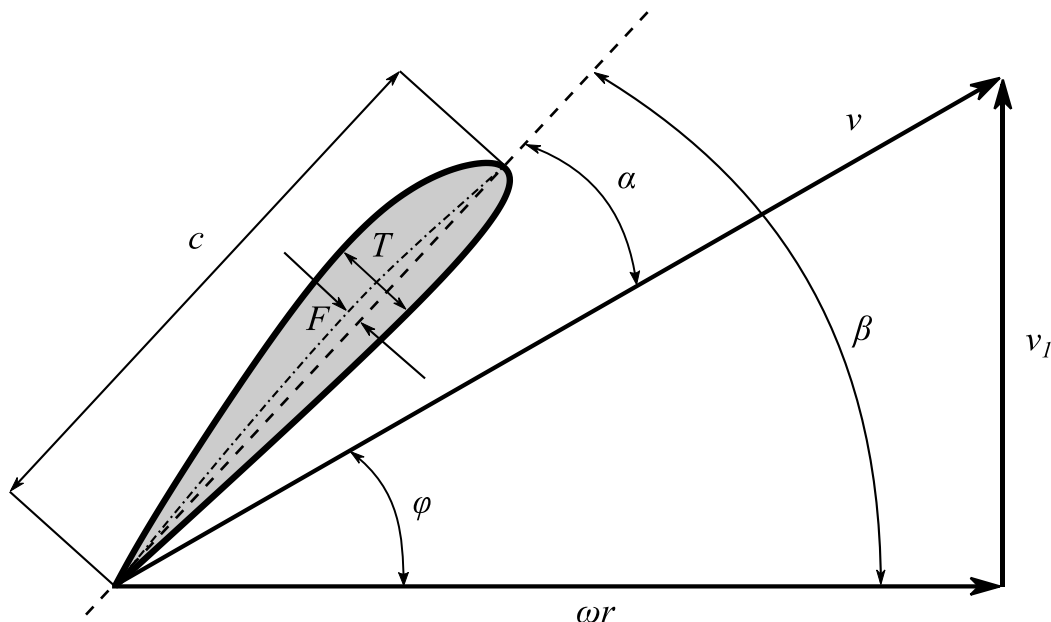
Taikoma metodika – atliekami skaičiavimai XFOIL ir QPROP programomis.

1. PROPELERIO IR VARIKLIO APŽVALGA

Šioje literatūros apžvalgoje aptariamos bendros teorinės žinios apie propelerį, detaliau supažindinama su judesio kiekio teorija, tiriančia pro propelerį tekančio oro srauto charakteristikas. Apžvelgiami šiuolaikiniai moksliniai darbai, kuriuose taikoma arba tobulinama minėta teorija. Aiškinama, kad remiantis judesio kiekio teorija randami pagrindiniai propelerio veikimą apibūdinantys dydžiai, tarp jų ir naudingumo koeficientas. Atkreipiamas dėmesys, kad projektuojant propelerį svarbu ne tik siekti kiek įmanoma didesnio jo efektyvumo, bet ir suderinti propelerio bei variklio darbą. Plačiau nagrinėjami būdai, kuriais tiriama šių agregatų sąveika. Pastebima, kad bepiločių orlaivių propeleriai pasižymi žemais Reinoldso skaičiais. Aptariamos tolesnės darbo gairės.

1.1. Bendros žinios apie propelerį

Propeleris yra prietaisas, kuris mechaninę energiją paverčia trauka. Kita vertus, propeleris taip pat gali būti traktuojamas kaip besisukantis sparnas, kurio keliamoji jėga nukreipta horizontalia kryptimi. Toliau pateikiamas propelerio mentės pjūvis, pagrindiniai jo dydžiai ir kampai (1.1 pav.).



1.1 pav. Propelerio mentės dydžiai ir pjūvio kampai (Sudaryta autoriaus, 2020)

Punktyrine linija pažymėta styga c (angl. *chord*), punktyrais-taškeliais – vidurinė profilio linija (angl. *mean camber line*). T – maksimalus profilio storis (angl. *maximum thickness*), F – profilio

gaubtumas (angl. *maximum camber*). Kaip matome, daugelis propelerio charakteristikų yra glaudžiai susijusios su sparno charakteristikomis, todėl mentės pjūvio dydžiai čia detaliau nenagrinėjami. Šiuo atveju daugiau dėmesio atkreipsime į mentės pjūvio kampus.

Kaip matyti iš 1.1 pav., nagrinėjant propelerį susiduriama su dviem skirtingais greičiais: linijiniu, žymimu ωr , kur ω – kampinis greitis, o r – propelerio spindulys, ir skrydžio v_1 , kuris yra ne kas kita, kaip lėktuvo skrydžio greitis. Šiuos greičio vektorius sudėję gauname atstojamąjį vektorių v oro srauto atžvilgiu. Tokia vektorių sistema yra vadinama greičio vektorių trikampiu (angl. *velocity triangle*).

Iš aerodinamikos žinome, kad kampas tarp oro srauto ir sparno (mentės) stygos yra vadinamas atakos kampas α (angl. *angle of attack*). Laikydami, kad mentės pjūvio kampas β (angl. *blade angle*) yra pastovus, gauname, kad mentės atakos kampas keičiasi priklausomai nuo anksčiau nagrinėtų greičio vektorių dydžių. Prie tam tikro kampo β didėjant lėktuvo greičiui v_1 , atakos kampas α mažėja (taip pat, kaip ir lėktuvo sparno atakos kampas), o greičiui v_1 mažėjant, atakos kampas α didėja. Tačiau propelerio linijinio greičio įtaka atakos kampui yra priešinga: didindami propelerio spindulį ar sūkių skaičių (taigi didindami linijinį greitį), atakos kampą sumažinsime ir atvirkščiai.

Laikydami, kad kampas tarp oro srauto ir propelerio sukimosi plokštumos yra φ (angl. *helix angle* arba *angle of advance*), gauname tokią išraišką:

$$\beta = \varphi + \alpha. \quad (1.1)$$

Žinodami, kad nuo sparno ar mentės atakos kampo priklauso daugelis kitų aerodinaminių charakteristikų, šioje vietoje tiesiog pažymime, koks svarbus yra greičių vektorių trikampio vaidmuo analizuojant propelerio veikimą.

Jeigu atakos kampas yra lygus nuliui, propeleris per vieną apsisukimą įveikia atstumą, kuris vadinamas veiksminguoju žingsniu (angl. *effective pitch*). Didėjant atakos kampui prie veiksmingojo žingsnio pridedamas slydimas (angl. *slip*) ir taip yra gaunamas geometrinis žingsnis (angl. *geometric pitch*) – teorinis atstumas, kurį vieno apsisukimo metu įveikia propeleris.

Siekiant pagerinti propelerio efektyvumą prie tam tikrų skrydžio ir linijinio greičio kombinacijų, sraigto mechanizmas projektuojamas taip, kad kampą β būtų galima keisti. Pirmieji kintamo žingsnio propeleriai turėjo tik kelias tokias padėtis, tarkime, vieną, skirtą kilimo fazei, kai propeleris sukasi greitai, o lėktuvo greitis yra sąlygiškai mažas, ir kitą, skirtą kreiserinei fazei, kai lėktuvo greitis yra artimas maksimaliam, o propeleris sukasi lėčiau. Vis dėlto šiuolaikiniai mechanizmai propelerio žingsnį keičia automatiškai priklausomai nuo atakos kampo. Tokiu būdu propeleris dirba efektyviai platesniame greičių diapazone.

Kitos propelerio charakteristikos, kaip mentės susukimas, propelerio metamo srauto įtaka skrydžio mechanikai, jėgos, veikiančios propelerį šioje dalyje detaliau nenagrinėjamos. Šiame skyrelyje tik supažindiname su pagrindinėmis sąvokomis, susijusiomis su propelerio veikimu, ir parodėme, kokia svarbi propelerio efektyvumui yra jo judėjimo greičių sąveika.

1.2. Propelerio galia

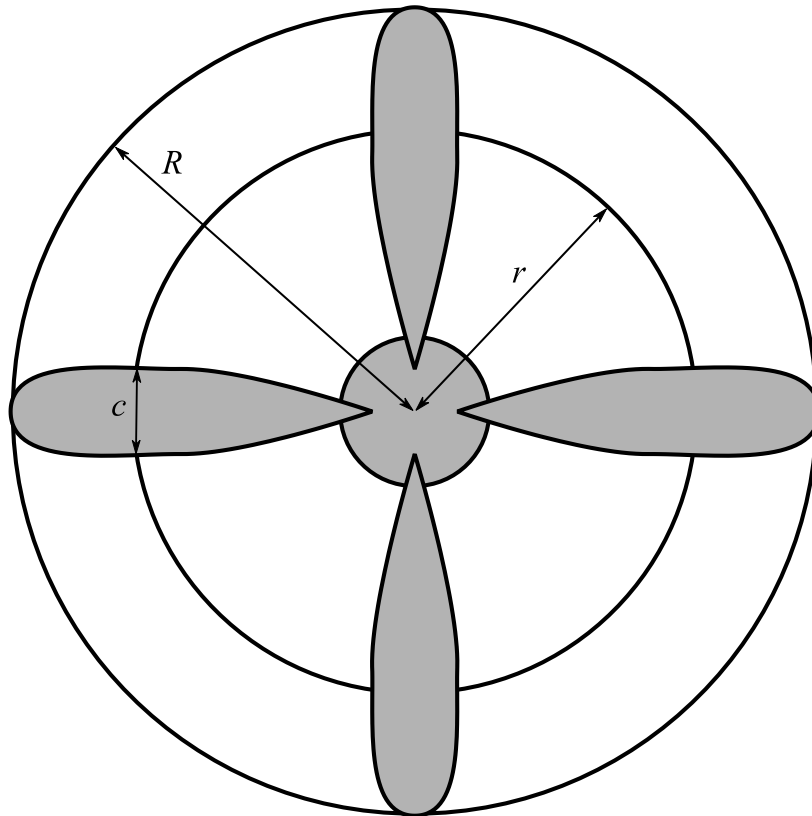
Praeitame skyrelyje daugiausiai dėmesio sutelkėme į propelerio mentės pjūvį ir su juo susijusius dydžius. Išsiaiškinome, kad propelerio efektyvumas priklauso ne tik nuo mentės aerodinaminio profilio dydžių, bet ir nuo mentės judėjimo dinamikos vertikalioje bei horizontalioje plokštumoje. Dabar atidžiau pažvelgsime į propelerį kaip į plokštumoje išsidėsčiusį kūną, aptarsime, kaip jis sugeria variklio galią ir ją paverčia trauka.

Nesunku įsitikinti, kad vienas paprasčiausių būdų padidinti trauką yra padidinti propelerio sūkių skaičių. Deja, šis skaičius yra ribojamas ne tik dėl galimo greičių vektorių disbalanso (kaip matyti iš praeito skyrelio brėžinio, didelės apsukos prie mažo lėktuvo judėjimo greičio lems per didelį atakos kampą), bet ir dėl menčių mechaninių savybių. Didesnis sukimosi greitis reiškia ir didesnę kūno apkrovą, o ribotas medžiagos tvirtumas gali tapti lemiamu veiksniu projektuojant propelerį. Taip pat svarbu suvokti, kad tostant nuo propelerio sukimosi ašies mentės judėjimo greitis didėja ir gali pasiekti viršgarsinį, kuomet dėl smūginių bangų ypač padidėja pasipriešinimas ir sumažėja aerodinaminio profilio efektyvumas. Net jei mentės ilgio neribotume dėl aerodinaminių priežasčių, per didelis propeleris gali būti tiesiog nepraktiškas vertinant sparno ar lėktuvo nosies aukštį virš žemės.

Dar vienas būdas padidinti propelerio trauką yra pridėti papildomų menčių. Tokiu atveju patogiau įvesti propelerio disko vientisumo sąvoką (angl. *propeller disk solidity*). Ji apibrėžiama kaip propelerio menčių užimamo ploto ir viso propelerio disko ploto santykis k :

$$k = \frac{nc}{2\pi r}, \quad (1.2)$$

čia n – propelerio menčių skaičius; c – stygos ilgis nurodytu atstumu r nuo propelerio sukimosi ašies, m . Paprastai imamas dydis $r = 0,7R$, žr. 1.2 pav.



1.2 pav. Propelerio disko vientisumas (angl. *propeller disk solidity*) (Sudaryta autoriaus, 2020)

Kaip matyti iš (1.2) formulės, propelerio vientisumas didėja pridėjant papildomas mentes ar pailginant jų stygas. Nuo propelerio vientisumo tiesiogiai priklauso ir jo sugeriamą galia, todėl galima daryti išvadą, kad propelerio disko užpildymas menčių plotu didina jo išvystomą trauką. Kita vertus, nustatyta, kad didžiausias veiksmingas menčių skaičius yra 5 (Bručas, 2012). Kitu atveju gretimų menčių metami sūkoriai sujaukia oro srautą taip stipriai, kad bendras propelerio efektyvumas stipriai krenta. Išimtis – į priešingas puses besisukantys ant vienos ašies užmauti (angl. *contra-rotating*) propeleriai.

1.3. Propelerio judesio kiekio teorija

Norint tiksliau įvertinti propelerio efektyvumą, tenka ieškoti teorijos, kuri nustatytų propelerio suvartojamos galios ir sukuriamos traukos santykį. Viena jų – propelerio judesio kiekio teorija (angl. *propeller momentum theory*). Pagrindinis jos principas – propelerį pakeisti disku, kuris turi begalę menčių.

Įsivaizduokime, kad anksčiau minimas diskas yra patalpinamas į oro tunelį. Praeituose skyriuose atkreipėme dėmesį, kad propelerio veikimo principas iš esmės nesiskiria nuo sparno

veikimo principo, todėl galime teigti, kad priekinėje disko pusėje (atsuktoje į oro srautą) oro slėgis yra sumažėjęs, o užpakalinėje disko pusėje – padidėjęs. Kitaip tariant, nagrinėjame traukiančiojo propelerio modelį, t.y. lėktuvas juda prieš oro srautą. Tačiau taip pat turime suvokti, kad tam tikru atstumu prieš diską ir už jo oro slėgis bus lygus statiniam oro slėgiui (tokį orą pavadinsime nesujauktu). Gauname, kad srauto judėjimo kryptimi oro slėgis mažėja, kol pasiekia propelerio diską, tada staigiai padidėja, o už jo vėl krenta.

Iš Bernulio lygties žinome, kad pilnutinis oro ar skysčio slėgis yra pastovus ir lygus statinio bei dinaminio slėgio sumai:

$$p_s + p_d = p_s + \frac{\rho v^2}{2} = p_t = \text{const}, \quad (1.3)$$

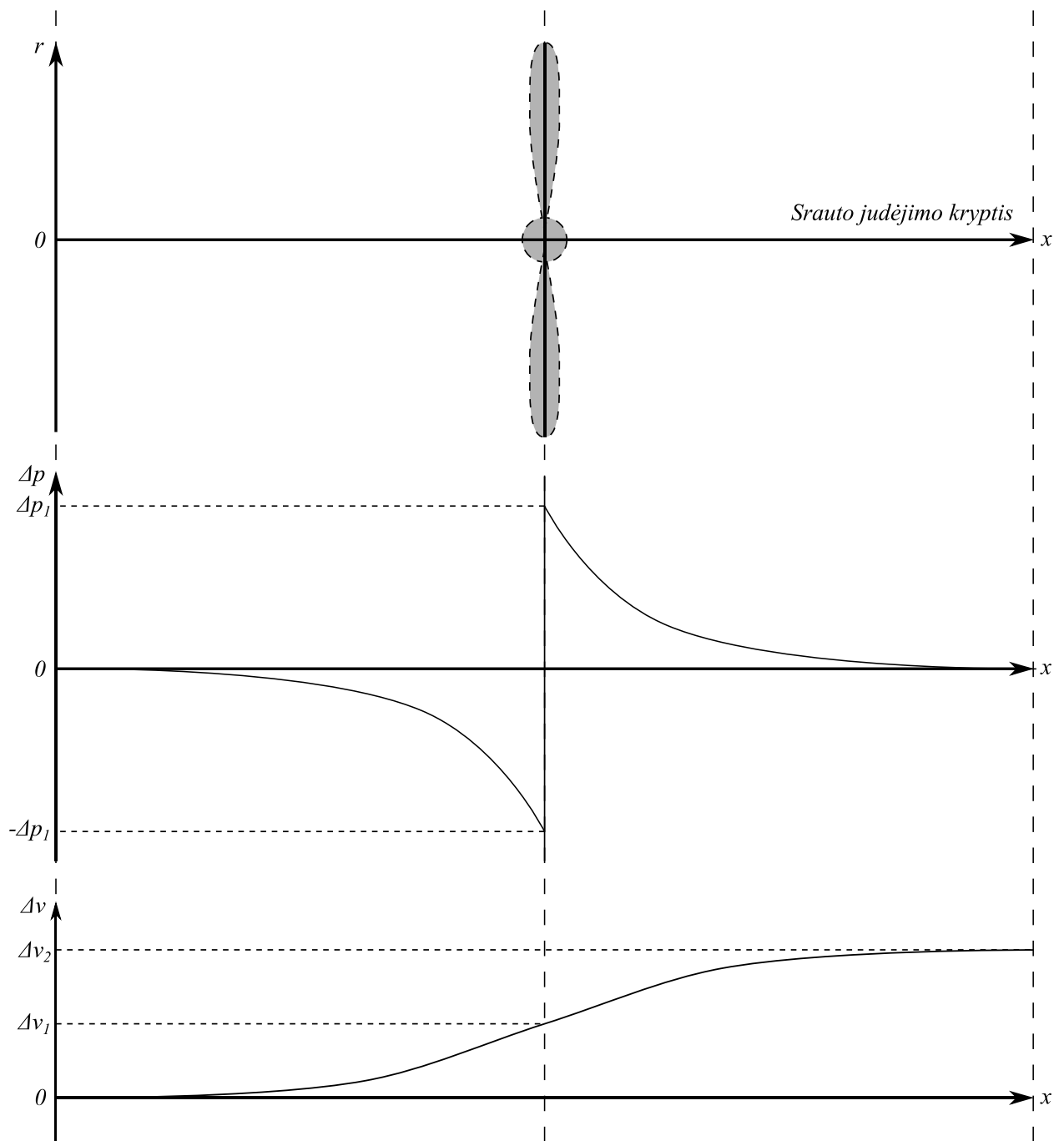
čia p_s – statinis slėgis, Pa; p_d – dinaminis slėgis, Pa; p_t – pilnutinis slėgis, Pa; ρ – tankis, kg/m^3 ; v – greitis, m/s .

Čia pat pažymėsime, kad toliau nagrinėjamame pavyzdyje greitį v laikome nesujaukto oro srauto greičiu, o p – nesujaukto oro srauto statiniu slėgiu.

Matome, kad mažėjant statiniam slėgiui, dinaminis slėgis (taigi, greitis) didėja ir atvirkščiai. Reiškia, jei teigiame, kad statinis oro slėgis mažėja tiek link propelerio disko, tiek už jo srauto kryptimi, dinaminis slėgis, taigi ir paties srauto greitis nuolat didėja. Šie ryšiai schematiškai pavaizduoti 1.3 pav.

Prieš toliau nagrinėdami duotas išraiškas, dar kartą atkreipkime dėmesį, kad propelerio judesio kiekio teorija remiasi gana drastiškomis prielaidomis, kurias apibendrinsime taip:

- oras yra nespūdas;
- ties propelerio disku statinis slėgis staigiai keičiasi, tačiau šio pokyčio priežastis nesiaiškinama;
- oro srauto greitis yra pastovus viso propelerio disko atžvilgiu. Kitaip tariant, žvelgdami iš viršaus į apačią į propelerio disko šoninį vaizdą schemoje, greičio skirtumų nerandame.



1.3 pav. Propelerio disko pjūvis ir pro jį judančio oro srauto charakteristikos (Sudaryta autoriaus, 2020)

Paskutinė prielaida ypač svarbi tuo, kad judesio kiekio teoriją paverčia ašine (angl. *axial momentum theory*), nes visi oro srauto greičio pokyčiai toliau nagrinėjami tik centrinės ašies x atžvilgiu, nekreipiant dėmesio į paties disko sukimąsi. Šis supaprastinimas leidžia palengvinti skaičiavimus ir suprantamiau paaiškinti pačią teorijos esmę.

Tarkime, kad oro masė m , pratekanti pro propelerio diską per laiką t , lygi:

$$m = \rho S(v + \Delta v_1)t, \quad (1.4)$$

čia S – propelerio disko plotas, m^2 , r – propelerio disko spindulys, m .

Judesio kiekis p randamas srauto masę padauginus iš srauto greičio pokyčio:

$$p = m(v + \Delta v_2 - v) = m\Delta v_2. \quad (1.5)$$

Sujungę (1.4) ir (1.5) formules gauname:

$$p = \rho St(v + \Delta v_1)\Delta v_2. \quad (1.6)$$

Žinodami, kad:

$$p = Ft, \quad (1.7)$$

čia F – jėga, N , iš (1.6) lygties gauname tokią išraišką:

$$F = \rho S(v + \Delta v_1)\Delta v_2. \quad (1.8)$$

Kadangi darbas A :

$$A = Fvt, \quad (1.9)$$

tai trauką padauginę iš oro srauto greičio ties propelerio disku ir laiko gausime darbą A (masę m žinome iš (1.4) formulės):

$$A = m\Delta v_2 \cdot (v + \Delta v_1). \quad (1.10)$$

Tačiau taip pat darbui A bus lygus oro srauto kinetinės energijos pokytis:

$$A = \Delta E_K. \quad (1.11)$$

Tuomet:

$$A = \frac{1}{2}m(v + \Delta v_2)^2 - \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m(2v\Delta v_2 + \Delta v_2^2) = \frac{1}{2}m\Delta v_2(2v + \Delta v_2). \quad (1.12)$$

Sulyginę (1.10) ir (1.12) bei suprastinę gauname:

$$\Delta v_1 = \frac{1}{2}\Delta v_2. \quad (1.13)$$

Čia prieiname prie pirmos svarbios išvados: oro srauto greičio padidėjimas prieš propelerio diską yra lygus oro srauto greičio padidėjimui už propelerio disko.

Toliau ieškosime propelerio naudingumo koeficiento η . Žinome, kad naudingumo koeficientas yra lygus naudingo darbo A_N ir viso atlikto darbo A_V arba atitinkamai galių N_N ir N_V santykiui:

$$\eta = \frac{A_n}{A_v} = \frac{N_n}{N_v}. \quad (1.14)$$

Kadangi:

$$N = Fv, \quad (1.15)$$

tai:

$$\eta = \frac{Fv}{F(v + \Delta v_1)} = \frac{v}{v + \Delta v_1} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta v_1}{v}} = \frac{1}{1 + k}, \quad (1.16)$$

kur k yra apibrėžiamas kaip ašies interferencinis veiksnys (angl. *axial flow factor*).

Šioje vietoje prieiname prie antros svarbios išvados: propelerio naudingumo koeficientas didėja, kai oro srauto pagreitėjimas ties propelerio disku mažėja.

Žvelgdami į (1.16) formulę aiškiai matome, kad ji yra logiška: jeigu lėktuvo judėjimo greitis v lygus nuliui, tai ir naudingumo koeficientas η lygus nuliui. Tuo tarpu didėjant lėktuvo greičiui, naudingumo koeficientas taip pat didėja.

1.4. Pagrindinių propelerio teorijų taikymas praktikoje

Iš pirmo žvilgsnio propelerio judesio kiekio teorija atrodo pernelyg primityvi. Kaip jau minėta anksčiau, ji pradedama prielaidomis, kurios, panašu, neturėtų teikti rezultatų, panašių į tuos, kurie gaunami atliekant bandymus realiomis sąlygomis. Negana to, pati teorija atrasta dar XIX a. pabaigoje, kai aviacija dar tik žengė pirmuosius žingsnius. Tačiau nesunku įsitikinti, kad judesio kiekio teorija, taikoma kartu su naujesnėmis teorijomis, yra nepamainoma net ir šiuolaikiniuose propelerių tyrimuose.

Čekų mokslininkai (Pavel ir kt., 2018) aprašė tam tikrą metodiką, leidžiančią apskaičiuoti aerodinamines sparno ir propelerio sąveikos charakteristikas. Akcentuojama, kad tokių aerodinaminių uždavinių sprendimas užima daug laiko, nes kiekvienu tiriamu atveju (tarkime, keičiantis sparno atakos kampui) reikia generuoti naują oro srauto tėkmės simuliaciją. Tuo tarpu propelerio judesio kiekio teorija, taikoma su mentės elementų teorija, leidžia iš karto aproksimuoti ašinių, tangentinių greičių, traukos vertes. Negana to, aprašomas ir sukuriuoto srauto (angl. *slipstream*), kylančio nuo propelerio, modelis.

Skaičiavimo laiko taupymas pabrėžiamas ir darbuose, kuriuose tiriamos kitos propelerių savybės, tarkime, sukuriai (Tang ir kt., 2018). Darbe pateikiamas 12 žingsnių algoritmas, kuriuo aprašomas tiriamas aerodinaminis modelis. Iš pradžių, be abejo, apibrėžiami pagrindiniai paties propelerio dydžiai, jo veikimo sąlygos. Antras žingsnis – oro srauto greičių skaičiavimas, kuris sėkmingai atliekamas taikant būtent judesio kiekio teoriją ir Leishman–Beddoes dinaminį smukos modelį.

Apskritai sukuriai yra neišsenkantis tyrimų šaltinis – su sukuriais kovojama, bet jų praktiškai neįmanoma sumažinti taip, kad visai neliktų aerodinaminių nuostolių. Prieš keletą metų rimčiau pradėta svarstyti dėžės tipo (angl. *box wing*) sparno idėja, teigiama, kad tokia konstrukcija gerokai sumažintų kuro sąnaudas (Somerville ir kt., 2016). Panašią mintį galima įgyvendinti ir kuriant propelerius. Vienas įdomiausių šiuolaikinių tyrimų, susijęs su propelerių dizainu, yra dėžės tipo propelerio (angl. *boxprop propeller*) sukurių energijos analizė (Capitao Patrao ir kt., 2018). Pagrindinė autorių idėja – dviejų galais sujungtų menčių propeleris, skirtas greitam skrydžiui. Tyrimo pabaigoje prieinama gana drastiškų išvadų:

- dėžės tipo propelerio menčių galai praktiškai nesukelia oro srauto sukuriavimo;
- toks propeleris didesnę dalį traukos sukuria ties menčių šaknimis;
- tokio propelerio efektyvumas stipriai padidėja jį naudojant kartu su priešinga kryptimi besisukančiu propeleriu, užmautu ant tos pačios ašies.

Negana to, darbe pastebima, kad dėžės tipo propeleris turi ir dar vieną svarbų privalumą – jis mechanškai tvirtesnis.

Mechaninės propelerių savybės nagrinėjamos ir kituose darbuose, pavyzdžiui, tiriamas propelerio elementų medžiagų nuovargis, kylantis dėl kūno vibracijų ir manevravimo (Dubbioso ir kt., 2017). Čia taip pat atliekamos kompiuterinės simuliacijos esant skirtingiems propelerio darbo režimams, tik daugiau dėmesio skiriama rezultatų, gautų naudojant Reinoldso suvidutintais Navjė-Stokso lygtis (angl. *RANS – Reynolds-averaged Navier-Stokes equations*), ir rezultatų, gautų taikant paprastesnes propelerių teorijas (judesio kiekio bei mentės elementų), palyginimui. Nors išvadose pabrėžiama, kad sukurių, kylančių manevruojant, modeliavimas tikslesnis taikant RANS simuliacijas, vis dėlto atkreipiamas dėmesys, kad jungtinė judesio kiekio ir mentės elementų teorija (angl. *BEMT – Blade Element Momentum Theory*) teikia panašius rezultatus tiriant propelerio šonines jėgas. Panašūs tyrimai atliekami ir kitame bendra autorių darbe, kuriame vėlgi susikoncentruojama ties rezultatų, gaunamų naudojant Kompiuterinės skysčių dinamikos (angl. *CFD – Computational Fluid Dynamics*) programinę įrangą, ir apskaičiuojamų paprastesnėmis teorijomis, įvertinimu (Ortolani ir kt., 2018). Tačiau čia labiau pabrėžiama CFD ir BEMT priemonių sintezė, o aiškus kurio nors modelio pranašumas išvadose neišskiriamas. Tiesa, šioje vietoje svarbu atkreipti dėmesį, kad anksčiau minimuose darbuose tiriami ne lėktuvų, o jūrų laivų propeleriai, todėl nemažai dėmesio skiriama kavitacijos reiškiniams, o pati mentės elementų teorija modifikuojama siekiant ją pritaikyti tiriant apkrovas ne tik prie skirtingų Reinoldso skaičių, bet ir vykstant kavitacijai. Kita vertus, nors oro ir vandens charakteristikos bei jų įtaka propelerio darbui žymiai skiriasi, metodologiniai tyrimų pastebėjimai, ypač susieti su propelerių teorijomis, gali teikti vertingų įžvalgų abiejų tipų tyrimams.

Taip pat reikia nepamiršti, kad dirbant su teorijomis, skirtomis analizuoti propelerio veikimą, negalima apsiriboti pačių propelerių tyrimais. Struktūros, kurioms taikomos judesio kiekio ar mentės elementų teorijos, apima ir kai kurias variklių dalis, tarkime, kompresorius, turbinas. Imdami vandenį kaip jų veikimo terpę (apie vandens ir oro panašumą rašyta anksčiau), galime pasiekti tokias tyrimų sritis, kaip technologijas energijai išgauti iš vandenynų srovių (Lam ir kt., 2015). Vis dėlto net ir čia vandenynų srovių sukurius siūloma modeliuoti pasikliaujant teoriniais laivų propelerių darbais, o pagrindinis metodas, kuriuo apskaičiuojami srautų greičiai yra ašinė judesio kiekio teorija. Verta atkreipti dėmesį, kad šio darbo autoriams pakanka naudotis būtent ašine minėtos teorijos versija, kur gaunamas traukos koeficientas C_F :

$$C_F = \frac{F}{\rho n^2 d^4}, \quad (1.17)$$

čia F – trauka, N ; n – turbinos disko apsisukimų skaičius per sekundę; d – turbinos disko skersmuo, m .

Kaip minėta anksčiau, teorijos išplėtimas įtraukiant rotacinį veiksnių reikalautų perėjimo prie diferencialinių lygčių, tačiau net ir taikydami paprastesnę teorijos versiją darbo autoriai daro išvadą, kad skaitinės srautų analizės rezultatai iš esmės atitiko praktinių eksperimentų rezultatus.

Kita vertus, kol vieni mokslininkai džiaugiasi gautais tyrimų rezultatais taikant bendrąsias propelerinių teorijas, kiti susiduria su sunkumais dėl tiriamų terpių charakteristikų. Pastebėta, kad plačiausiai žinomi tyrimų metodai netinka dirbant su neniutoniniais skysčiais (Reviol, Kluck, & Böhle, 2018). Neniutoniniai skysčiais pasireiškia savybėmis, nebūdingomis įprastiems niutoniniams skysčiams, pavyzdžiui, neniutoniniai skysčiai gali sukietėti veikiant tam tikroms jėgoms. Kitaip tariant, neniutoniniai skysčiai neturi jiems pastovaus klampumo (angl. *viscosity*) koeficiento. Atkreipiamas dėmesys, kad jungtinė judesio kiekio ir mentės elementų teorija neniutoniniams skysčiams niekada oficialiai ir nebuvo naudota, todėl norint pradėti tokios terpės tyrimą tenka išspręsti tris pagrindines problemas:

- naujai apibrėžti aerodinaminių paviršių charakteristikas. Duomenų bazėse randami dydžiai paprastai yra gauti atliekant tyrimus su oru, tuo tarpu skysčiai, juo labiau neniutoniniai, analizėse nenaudojami;
- apskaičiuoti tinkamus Reinoldso skaičius. Kadangi Reinoldso skaičius yra tiesiogiai susijęs su medžiagos klampumu, nepastovus klampumas reiškia ir nepastovų Reinoldso skaičių;
- rasti tikslią pratekančio skysčio masę. Kaip matėme anksčiau, judesio kiekio teorija iš pačių pagrindų yra srauto masės ir jo greičio sandauga. Nepastovus skysčio judėjimas iš esmės neleidžia taikyti ir pačios teorijos.

Darbo autorių rastas sprendimas – kinematinėmis lygtimis apibrėžiamos naujos propelerinių formos. Siūlomo algoritmo privalumas – visi srautų dydžiai, randami tiriant įprastus propelerius, lygiagrečiai apskaičiuojami judesio kiekio teorijos rėmuose. Kitame panašiam bendraautorių darbe jau žengiama toliau ir pasinaudojus jungtine judesio kiekio ir mentės elementų teorija apskaičiuojamos propelerinių maišytuvų charakteristikos, tarp jų ir galios suvartojimas (Reviol, Kluck, Etringer ir kt., 2018). Abiejuose darbuose džiaugiamasi skaitiniais rezultatais, pabrėžiamas jų artumas eksperimentiniams rezultatams.

Grįždami prie straipsnių, susijusių su propelerinių struktūrų veikimu ore, pastebėsime, kad mokslinėje literatūroje plačiai analizuojamos vėjo jėgainės. Štai japonų mokslininkai atkreipia dėmesį į visuomenėje kylantį vis didesnį susidomėjimą atsinaujinančiais energijos šaltiniais, mato perspektyvą tokių jėgainių plėtroje tiek urbanizuotose vietovėse, tiek regionuose, tačiau atkreipia

dėmesį į mažą energijos generavimo efektyvumą, technikos neatsparumą besikeičiančiai vėjo kryptiai ir jo stiprumui, kelia jėgainių keliamo triukšmo problemą (Nishi ir kt., 2016). Ypač akcentuojama, kad projektuojant mažas jėgaines, veikiančias prie žemų Reinoldso skaičių, tenka ribotas aerodinaminių medžiagų pasirinkimas. Siekiama parengti metodiką, kuri leistų konstruoti efektyvesnes vėjo jėgaines. Tiesa, panašūs tyrimai vykdomi ir siekiant plėsti hidro jėgaines, tačiau čia žengiama dar toliau – orientuojamasi į potvynius ir atoslūgius, kurių energijos potencialas iki šiol lieka neišnaudojamas. Problemų kelia ne tik tokie reiškiniai kaip kavitacija, kurią jau minėjome anksčiau, bet ir kai kurie srauto sąveikos su propelerio konstrukcija niuansai. Tarkime, naudojant du priešinga kryptimi besisukančius sraigtus, iš judesio kiekio teorijos taikymo sunku nuspėti, kaip sąveikaus priekinės ir užpakalinės mentės (Huang & Kanemoto, 2015). Dėl šios priežasties pirmenybė skiriama CFD programinei įrangai.

Vertingą analizę, susijusią su CFD taikymu oro srautams tirti ir palyginti su apskaičiuotais rezultatais neseniai atliko ir vokiečių mokslininkai (Ehrich ir kt., 2018). Tiesa, čia pagrindinis dėmesys skiriamas turbulentiniam srautui, tenkančiam galingoms vėjo jėgainėms. Darbe naudojami trys skaitiniai metodai: dviejų tipų CFD simuliacijos, angliskai vadinamos *blade resolved* ir *actuator line based*, ir jungtinė judesio kiekio ir mentės elementų (angl. *BEM – Blade Element Momentum*) simuliacija. Gauti rezultatai apibendrinami 1.1 lentelėje. Galima daryti išvadą, kad tyrimo metodo pasirinkimas ir gaunamų paklaidų įvertinimas turi būti glaudžiai susijęs su pasirinktu tyrimo objektu.

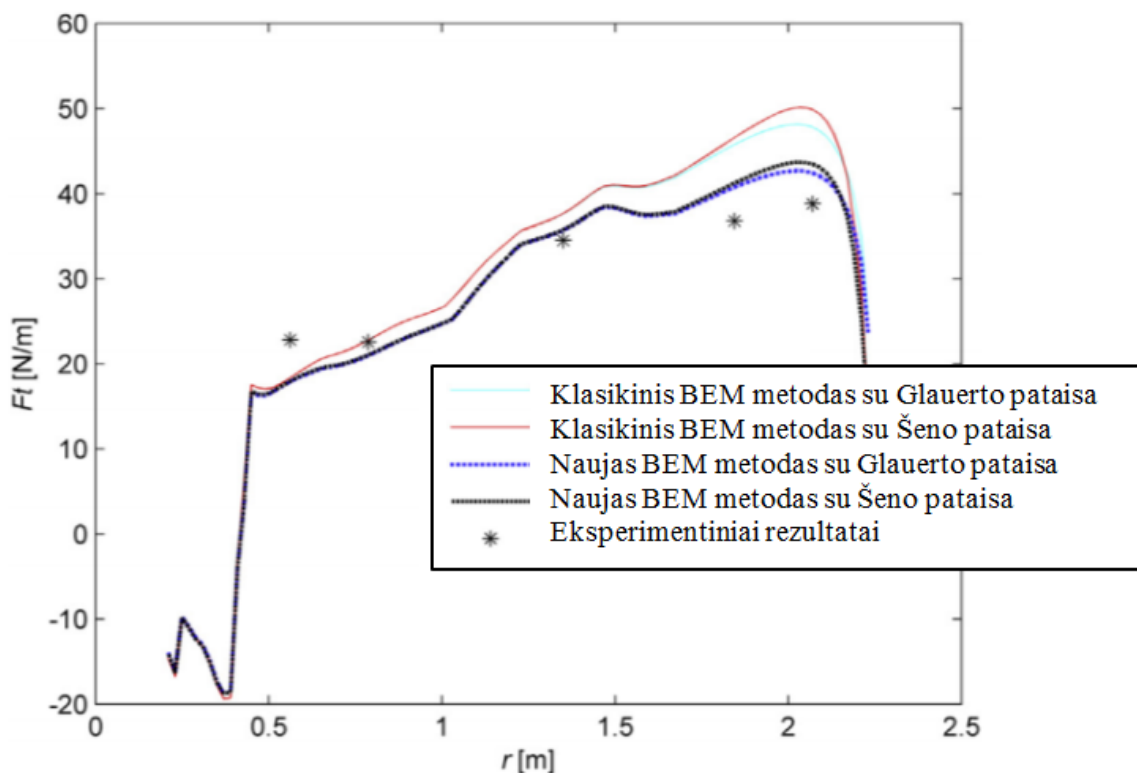
Kita vertus, nors ašinių ir tangentinių jėgų apskaičiavimo rezultatai naudojantis BEM teorija yra tikslūs tik mentės viduriui, nereiškia, kad pati BEM teorija yra netinkama kitoms mentės pozicijoms analizuoti. Pastebėta, kad klasikinis BEM metodas nepakankamai įvertina aerodinamines jėgas, veikiančias mentės šaknį ir perversina jėgas, veikiančias mentės galą (Sun ir kt., 2016). Todėl minimai teorijai taikomi patobulinimai, vadinami Glauerto ir Šeno mentės galo pataisomis (angl. *Glauert's and Shen's tip corrections*). Tuomet atlikus skaičiavimus modifikuojama pati BEM teorija. Pastebima, kad pataisos iš tiesų leidžia gauti tikslesnius rezultatus, o pagrindinė to priežastis – atsižvelgiama į slėgio kritimą dėl sūkurinio srauto ir į radialinę sukimosi greičio komponentę. 1.4 pav. pateikiami gauti grafiniai tangentinių jėgų rezultatai taikant skirtingas teorijas. Iš jų aiškiai matyti, kad naujas BEM metodas, taikant bet kurią pataisą, pranašesnis už klasikinį.

Įvairios BEMT metodo pataisos naudojamos ir atliekant medžiagų nuovargio tyrimus. Atkreipiamas dėmesys, kad CFD metodas labai brangus, o jo taikymas užima daug laiko (Zhang ir kt., 2018). Dėl to BEMT metodą siūloma taikyti kartu su baigtinių elementų (angl. *finite element*) metodu. Pagrindinis privalumas – lengvai apskaičiuojamos apkrovų reikšmės, trūkumas – gaunami netikslumai lyginant su realiais rezultatais.

1.1 lentelė. Skaitinių metodų turbulentiniam oro srautui tirti rezultatų palyginimas (Ehrich ir kt., 2018)

		CFD blade resolved	CFD actuator line based	BEM
Ašinės jėgos	Mentės šaknyje	Rezultatai skiriasi		
	Mentės viduryje	Rezultatai panašūs		
	Mentės gale	Rezultatai skiriasi		
Tangentinės jėgos	Mentės šaknyje	Rezultatai skiriasi		
	Mentės viduryje	Rezultatai panašūs		
	Mentės gale	Rezultatai skiriasi		
Jėgų standartiniai nuokrypiai		Maži	Maži	Dideli
Jėgos spektrinis tankis		Labai priklauso nuo tiriamo taško pozicijos		
Jėgos integralinis tankis	Žemi dažniai	Rezultatai panašūs		
	Aukšti dažniai	Rezultatai skiriasi		
Nuovargis		0,4 % tarpusavio nuokrypis		16 % nuokrypis
Trauka		22 % nuokrypis	Atskaitos taškas	29 % nuokrypis

Kituose darbuose, kuriuose tiriamos vėjo jėgainės, koncentruojamasi ties specifiniais jų modeliais, pavyzdžiui, Magnuso turbina. Jos veikimo principas – Magnuso efektas, kuris keliamąją jėgą generuoja dėl slėgių skirtumų dviejose cilindro pusėse šiam sukantis oro sraute. Aiškinama, kad tokios jėgainės gali būti naudojamos esant skirtingiems vėjo greičiams, o jų charakteristikos apskaičiuojamos naudojantis mums gerai žinoma jungtine judesio kiekio ir mentės elementų teorija (Luo ir kt., 2011). Tačiau vėliau atkreiptas dėmesys, kad ši teorija neįvertina besisukančio cilindro pasipriešinimo (Richmond-Navarro ir kt., 2017). Pasiūlytas problemos sprendimo būdas – matematinis modeliavimas ir simbolinė regresija (angl. *symbolic regression*), kuris leidžia tiksliau apskaičiuoti maksimalų galios koeficientą ir kitų bedimensinių parametrų, tokių kaip mentės galų greičio santykių, įtaką. Vis dėlto pastebima, kad norint pasiūlyti platesnį Magnuso jėgainės pritaikymą urbanizuotoje aplinkoje, reikia išsamiau ištirti galimybes padidinti maksimalų galios koeficientą.



1.4 pav. Tangentinės jėgos taikant skirtingas skaičiavimo teorijas (Sun ir kt., 2016)

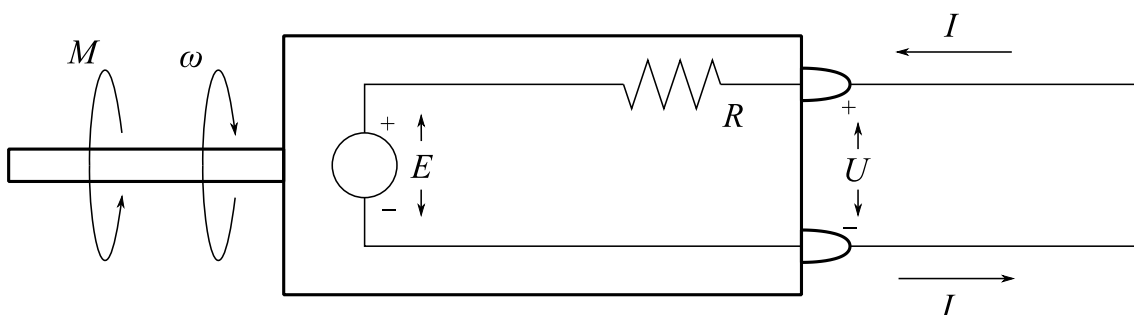
Analizuojant vėjo jėgainių efektyvumą generuojant energiją, pastebima, kad trūksta sisteminio požiūrio į realias tokių jėgainių veikimo sąlygas. Pastebima, kad atliekama daug teorinių tyrimų darant prielaidą, kad tokių jėgainių parkas veikia idealiomis sąlygomis, t.y. nesvarstomi oro srauto nuostoliai ir slėgio kritimas tarp priešvėjinės ir užpakalinės parko pusės (Nishino, 2018). Nishino siūlo įprastą judesio kiekio teoriją išplėsti taip, kad būtų apimtas skaitinis atmosferos modelis. Parodoma, kad tokie teoriniai apskaičiavimai iš esmės sutampa su CFD analizės rezultatais.

Apibendrinami galime teigti, kad pagrindinės propelerių teorijos yra plačiai taikomos šiuolaikiniuose moksliniuose tyrimuose. Vienas pagrindinių jų pranašumų – paprastai apskaičiuojamos oro ar vandens srauto, tekančio pro propelerį, charakteristikos. Gauti dydžiai tuomet naudojami sprendžiant sudėtingesnes inžinerines problemas: modeliuojant vėjo jėgaines, kuriant hidroenergijos generatorius, vertinant sūkurinių srovių poveikį sistemoms ir pan. Dauguma tokių tyrimų reikalauja papildomų teorijų modifikacijų, todėl stengiamasi rasti bendrą metodiką, leidžiančią išspręsti tam tikrą inžinerinį uždavinį. Metodika laikoma patikima, kai ja remiantis gaunami rezultatai koreliuoja su eksperimentiniu būdu gaunamais rezultatais.

1.5. Bendros žinios apie nuolatinės srovės elektros variklį

Ankstesniuose skyreliuose gana plačiai aprašėme propelerį, daugiausiai dėmesio skirdami jo veikimo charakteristikoms ir iš to kylančioms inžinerinėms problemoms. Tuo tarpu antrasis šio darbo tyrimo objekto narys – variklis – kol kas liko nepalietas. Tačiau verta pažymėti, kad šiame tyrime variklis mus domina tik pradiniais parametrais ir savo veikimo rezultatais. Vėliau, metodinėje dalyje, bus matyti, kad ir skaitinis variklio aprašymas yra gerokai mažiau komplikotas, negu skaitinis propelerio aprašymas. Kitaip tariant, paties variklio veikimo niuansai darbe nedetalizuojami.

Elektros variklis yra prietaisas, kuris elektros energiją paverčia mechanine energija. Šiame darbe naudojamas nuolatinės srovės elektros variklis. Toliau pateikiamas principinis tokio variklio modelis (1.5 pav.), pagrindiniai parametrai ir jų sąryšiai.



1.5 pav. Principinė nuolatinės srovės elektros variklio grandinė (Drela, 2007a)

Schemoje E – variklio saviindukcinė elektrovara (angl. *back electromotive force*), V ; U – gnybtų įtampa, V ; R – variklio varža, Ω ; I – variklio srovė, A ; ω – kampinis greitis, rad/s ; M – sukimo momentas, Nm .

Idealiu atveju elektrinė galia P lygi mechaninei galiai N :

$$P = UI = N = Fv = M\omega, \quad (1.18)$$

čia F – jėga, N ; v – greitis, m/s .

Įvedame variklio konstantą k , nurodančią, kaip variklio saviindukcinė elektrovara susieta su variklio sukimosi greičiu (kitai tariant, kaip greitai variklis suksis be apkrovos prie tam tikros įtampos):

$$k = \frac{\omega}{E}. \quad (1.19)$$

Atkreiptinas dėmesys, kad minėta konstanta neturi nieko bendra su variklio galingumu. Toliau:

$$U = \frac{\omega}{k} + IR. \quad (1.20)$$

Įvedę variklio tuščios veikos srovę i gauname tokią variklio sukimo momento išraišką:

$$M = \frac{I - i}{k}. \quad (1.21)$$

Iš anksčiau išvardintų formulių:

$$I = \frac{Uk - \omega}{Rk}; \quad (1.22)$$

$$M = \frac{Uk - \omega - iRk}{Rk^2}; \quad (1.23)$$

$$N = (I - i)(U - IR) = \frac{Uk\omega - \omega^2 - iRk\omega}{Rk^2}; \quad (1.24)$$

$$\eta = \frac{N}{P} = \left(1 - \frac{i}{I}\right) \left(1 - \frac{IR}{U}\right) = \frac{Uk\omega - \omega^2 - iRk\omega}{U^2k^2 - Uk\omega}. \quad (1.25)$$

Kaip matome, variklio naudingumo koeficientas priklauso nuo jo sukimosi greičio ir gnybtų įtampos. Be šių dydžių, tiksliai naudingumo koeficiento vertei rasti pakanka žinoti pastovius variklio parametrus R , i ir k .

1.6. Propelerio ir variklio sąveika

Gana plačiai apžvelgėme naujausius tyrimus, atliekamus su propeleriais ir jų sistemomis, ypač daug dėmesio skyrėme judesio kiekio teorijos pritaikymui aerodinaminiams ar hidrodinaminiams uždaviniams spręsti. Vis dėlto norime atkreipti dėmesį, kad sunku rasti mokslinių darbų, kuriuose būtų plačiau nagrinėjama propelerio ir variklio sąveikos problema. Apskritai svarba derinti propelerio ir variklio darbą pabrėžta jau seniai (Woodward III, 1976). Šis autorius atkreipė dėmesį, kad pagrindinis tokio derinimo uždavinys: pasiekti optimalią kuro ir traukos konversiją prie tam tikrų technikos darbo režimų. Iš esmės toks derinimas prasideda propelerio ir variklio apsukų analize. Tikslas – priversti propelerį tolygiai absorbuoti visą variklio pagaminamą energiją. Paprastai tam

sudaromos kreivės, kuriose matomos darbinės variklio ir propelerio charakteristikos ir techniniai parametrai reguliuojami taip, kad tam tikri kreivių taškai sutaptų ar būtų norimoje pozicijoje. Vis dėlto toks derinimas yra sudėtingas, nes tiek propeleris, tiek variklis turi savo darbo režimų limitus, o ir patys darbo režimai kinta ne tik priklausomai nuo, tarkime, lėktuvo judėjimo greičio, bet ir nuo oro pasipriešinimo, poreikio sukti papildomus agregatus (pavyzdžiui, generatorių). Jeigu naudojame kintamo žingsnio propelerį (žr. 1.1 skyrelį), pats propelerio ir variklio derinimas tampa paprastesnis. Kita vertus, pats automatinės žingsnio kontrolės mechanizmo įrenginys yra brangus, sudėtingas, todėl kartais visai nepageidaujamas kuriant mažesnius orlaivius. Tuo tarpu Woodward toliau nagrinėja propelerio ir variklio derinimo aspektus, skirtus laivų inžinieriams, taigi aeronautikoje konkretūs pavyzdžiai sunkiai pritaikomi.

Kiek sudėtingesnės inžinerinės problemos sprendžiamos ir vėliau. Akcentuojama, kad variklis ir propeleris tinkamai sąveikauti turi ne tik įprastais darbo režimais, bet ir nestandartinėmis sąlygomis (Stapersma & Woud, 2005). Tačiau ir šių mokslininkų darbe diskutuojama apie jūrų laivų variklių ir propelerių sistemas, daugiausiai dėmesio skiriant dyzeliniams vidaus degimo ir dujų turbininiams varikliams. Kituose darbuose papildomai atsižvelgiama ir į kavitacijos, vibracijų problemas, ieškoma būdų optimizuoti degimo sistemą laivui plaukiant tam tikromis oro sąlygomis (Marques ir kt., 2018). Čia pat autorius užsimena, kad apskritai darbų, tiriančių variklio ir propelerio sąveiką, gali trūkti dėl menko variklių modelių, tinkančių optimizavimo problemoms spręsti, pasirinkimo. Taip pat pastebima, kad kiekvienas variklis turi būti kalibruojamas atskirai, ir bendra sistemų optimizavimo metodika yra vargiai įmanoma.

Vis dėlto Prancūzijos mokslininkai yra parašę darbą, kuris gali tapti puikiu atspirties tašku planuojant savo tyrimą. Jame apibendrinamos jau ne hidroinžinerinės žinios, o kalbama apie konkretaus propelerio ir variklio derinimą (Bronz ir kt., 2012). Nėgana to, pati metodika orientuojama į bepiločių orlaivių (angl. UAV – *Unmanned Aerial Vehicles*) – energijos suvartojimo optimizavimą. Kadangi šiuo metu bepiločiai orlaiviai sparčiai populiarėja, o jų teikiamos galimybės vertinamos ne tik siaurame technologų ar entuziastų būryje, bet ir plačiojoje visuomenėje, mes neabejojame tokių tyrimų aktualumu ir perspektyvomis.

Minėtame darbe akcentuojama, kad pagrindinis jo tikslas nėra tik nubrėžti gaires, kurios padėtų rasti tinkamą variklio ir propelerio kombinaciją. Darbo įžangoje atkreipiamas dėmesys, kad net ir radus tokią kombinaciją dažnai trūksta tinkamo jos įvertinimo bepiločiam orlaiviui dirbant skirtingais skrydžio režimais. Tarkime, randamas geras variklio ir propelerio suderinamumas kreiseriniam skrydžiui, tačiau pamirštama apie pakilimo, nusileidimo dalį ar, tarkime, skrydį dideliu greičiu. Dėl šios priežasties pasiūloma programa QOPTIMIZER, kuri žinomus skaičiavimo algoritmus pritaiko skirtingoms bepiločio orlaivio misijos fazėms. Šios fazės apibrėžiamos tokiais kintamaisiais:

F – trauka, N ; v – greitis, m/s ; ρ – tankis, kg/m^3 ; t – laikas, s .

Reikia atkreipti dėmesį, kad laikas t imamas tik kaip svartinis koeficientas, kuriuo įvertinama, kuri misijos dalis yra svarbesnė už kitą.

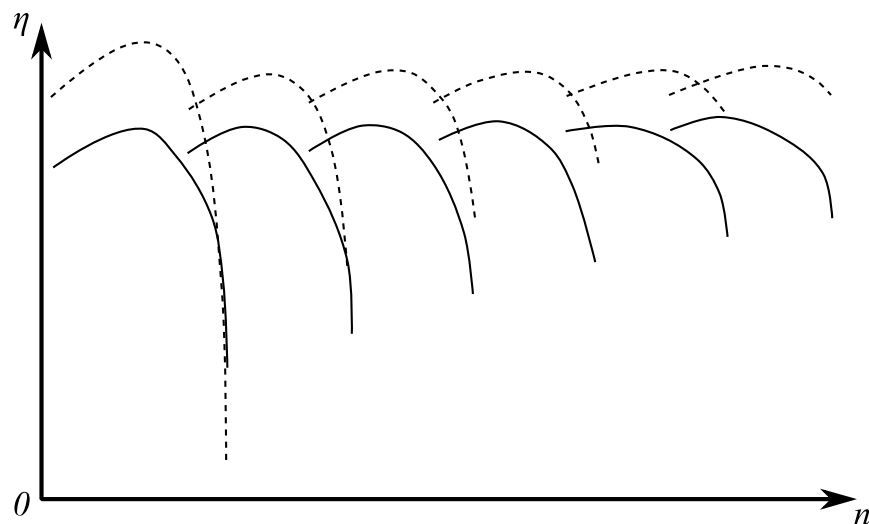
Pati programa QPOPTIMIZER įkomponuoja kitas programas QPROP ir QMIL, skirtas propelerio ir variklio ar vėjo malūno veikimo charakteristikų analizei. Viena iš šių programų naudojama ir mūsų darbe, todėl jos plačiau aprašytos metodikos skyriuje.

Kita vertus, programa QPOPTIMIZER nėra viešai prieinama, jos mes nenaudosime, tačiau verta išsiaiškinti jos veikimo principus. Pasak darbo autorių, programa teikia galimybę sukurti naują propelerio dizainą pagal pasirinktą motorą. Patys motorai ir propeleriai apibrėžiami nurodant jų charakteristikų koeficientus. Įvesties metu taip pat nurodomos misijos charakteristikos (žr. aukščiau). Tuomet programa QMIL sugeneruoja propelerio dizainą, pagal jį suranda galimas motoro ir propelerio kombinacijas ir jas siunčia programai QPROP. Pastaroji gautas kombinacijas išanalizuoja ir pritaiko misijos reikalavimams. Galų gale rezultatai siunčiami į filtrą, kuris pašalina tam tikrus rezultatus pagal anksčiau nurodytas sąlygas, pavyzdžiui, atmeta propelerius su pernelyg mažu ar pernelyg dideliu santykinio proilgiu (angl. *aspect ratio*).

Verta atkreipti dėmesį, kad nagrinėjamame darbe tiek motorų, tiek propelerių charakteristikos randamos dviem būdais: teoriniu ir eksperimentiniu. Vienas gautų rezultatų pavyzdinis eskizas – naudingumo koeficiento η priklausomybė nuo apsukų skaičiaus n per minutę prie skirtingų motoro įtampų – pateiktas 1.6 pav. Punktyrinėmis linijomis vaizduojami teoriniai skaičiavimų rezultatai, ištisinėmis linijomis – praktiškai išmatuoti dydžiai. Kaip ir galima tikėtis, teorinis variklio efektyvumas viršija tikrąjį. Kita vertus, pastebėta, kad teorinio motoro charakteristikų modelio paklaida – apie 5 %, todėl toks skaičiavimo algoritmas tinka norint rasti preliminarų motorą.

Toliau darbe aprašomas konkretus pavyzdys, kaip pasirinktam bepiločiam orlaiviui pritaikomas propeleris. Propelerio aerodinaminis profilis taip pat optimizuojamas, pagaminamas, o gauta variklio ir propelerio kombinacija išbandoma praktiškai. Gautas realaus efektyvumo dydis – 50 %, teoriškai apskaičiuotas efektyvumas – 59,5 %. Šis skirtumas paaiškinamas trimis pastebėjimais:

- teoriniuose skaičiavimuose neįvertinamas 95 % siekiantis maksimalus greičio valdiklio (angl. *speed controller*) efektyvumas;
- atliekant propelerio bandymus oro tunelyje nenaudojamas realus bepiločio orlaivio fiuzeliažas, todėl negalima tiksliai įvertinti oro sraigto aptako (angl. *spinner*) slėgio pasipriešinimo (angl. *pressure drag*);
- praktiškai pagamintas propelerio modelis gali skirtis nuo teorinio modelio.



1.6 pav. Naudingumo koeficiento η priklausomybė nuo apskukų skaičiaus n per minutę prie skirtingų elektrinio motoro įtampų. Teorinių ir eksperimentinių rezultatų palyginimas

Tyrimas užbaigiamas pabrėžiant, kad sukurta programa QOPTIMIZER tinka bepiločių orlaivių kūrimui ar modifikavimui, tačiau teoriniai variklio ir propelerio efektyvumo apskaičiavimai maždaug 5-10 % lenkia eksperimentiniu būdu gautus rezultatus. Kadangi aprašytame darbe propeleris pritaikomas varikliui, bet ne atvirkščiai, išeina, kad gautas propelerio modelis dėl minėtų rezultatų neatitiktis jau nėra optimalus. Patenkama į begalinį ciklą, kuriame tobulinamas propelerio dizainas, bet dėl įvairių skaičiavimo ir gamybos trūkumų jis vis tiek nėra pakankamai efektyvus.

Kituose darbuose, kuriuose tiriamas variklio ir propelerio derinimas, labiau susikoncentruojama ties variklio parametrų analize eksperimentiniu būdu, pavyzdžiui, pasirinkus du variklių tipus, nuolatinės srovės ir trifazį indukcinį, praktiniais eksperimentais nustatomas sukimo momento ir kitų elektrinių charakteristikų, tokių kaip grandinės įtampa ar statoriaus apvijos srovės stipris (angl. *field current*), santykis (Koenhardono ir kt., 2017). Pastebima, kad nuolatinės srovės variklio sukimo momentas tiesiogiai koreliuoja su jo sukimosi greičiu, o grafiškai tokia kreivė panaši į parabolę. Vis dėlto būtina pabrėžti, kad tokiam tyrimui variklis iš esmės tiriamas kaip izoliuotas agregatas, todėl vertingų įžvalgų propelerio ir variklio kombinacijos analizei jau nerandame.

1.7. Specifiniai bepiločio orlaivio propelerio ir variklio derinimo aspektai

Kaip matėme praeitame skyrelyje, propelerio ir variklio derinimo problema yra gana sena. Ji pirmiausiai iškilo konstruojant jūrų laivus, vėliau persikėlė ir į aviaciją. Tačiau pastarosios technologinė pažanga, ypač bepiločių orlaivių išpopuliarėjimas, verčia pažvelgti į šiuolaikines propelerio ir variklio derinimo problemas.

Grįžtant prie propelerio parametrų analizės, verta pabrėžti, kad itin didelę reikšmę tyrimų rezultatams turi tipinis propelerio Reinoldso skaičius Re , parodantis inercinių ir klampos jėgų terpėje santykį:

$$Re = \frac{lv}{\sigma}, \quad (1.26)$$

čia l – kūno (propeleryje – mentės stygos) ilgis, m ; v – judėjimo greitis, m/s ; σ – terpės kinematinės klampos koeficientas, m^2/s .

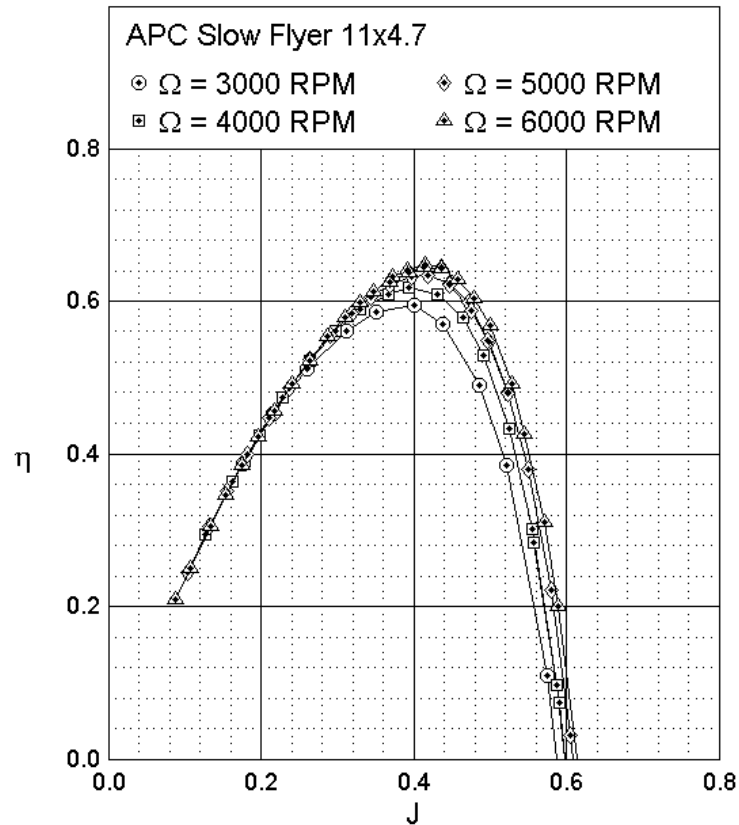
Tuo tarpu:

$$\sigma = \frac{\mu}{\rho}, \quad (1.27)$$

čia μ – terpės dinaminės klampos koeficientas, $Pa \cdot s$; ρ – terpės tankis, kg/m^3 .

Kaip matome iš (1.26) formulės, Reinoldso skaičius (taigi, inercinės jėgos) didėja ilgėjant propelerio mentės stygai (taigi, ir didėjant pačiam propeleriui) ir judėjimo greičiui. Kinematinės klampos koeficientas savo ruožtu priklauso nuo terpės tankio, temperatūros.

Akivaizdu, kad tipinis Reinoldso skaičius bepiločiams orlaiviams yra mažas – paprastai žemiau 100 000 (Deters ir kt., 2014). Pasak šio darbo autorių, aerodinaminiai paviršiai, veikiantys prie žemų Reinoldso skaičių, pasižymi išskirtinėmis charakteristikomis: mažėjant Reinoldso skaičiui (ypač žemiau 100 000), mažėja ir sukuriamą keliamąją jėgą, tačiau didėja pasipriešinimas. Dar žemas Reinoldso skaičius apsunkina propelerio charakteristikų radimą, tačiau dažniausiai, mažėjant Reinoldso skaičiui, mažėja traukos koeficientas, trauka, bet nežymiai didėja propelerio galia. Apibendrinus, mažėjant Reinoldso skaičiui mažėja propelerio efektyvumas (J. Brandt & Selig, 2011) Kitaip tariant, Reinoldso skaičius lemia aerodinaminio paviršiaus charakteristikas, o jos daro įtaką propelerio charakteristikoms. Anksčiau minėtame darbe pateikiama daug šiuos teiginius patvirtinančių pavyzdžių; panašių propelerių tyrimų rezultatai pateikiami ir kitose to paties universiteto mokslininkų publikacijose ar duomenų bazėse, žr. 1.7 pav.



1.7 pav. Propelerio APC Slow Flyer 11x4,7 praktiniai naudingumo koeficientai prie skirtingų sūkių kintant propelerio santykinei eigai (UIUC, 2015)

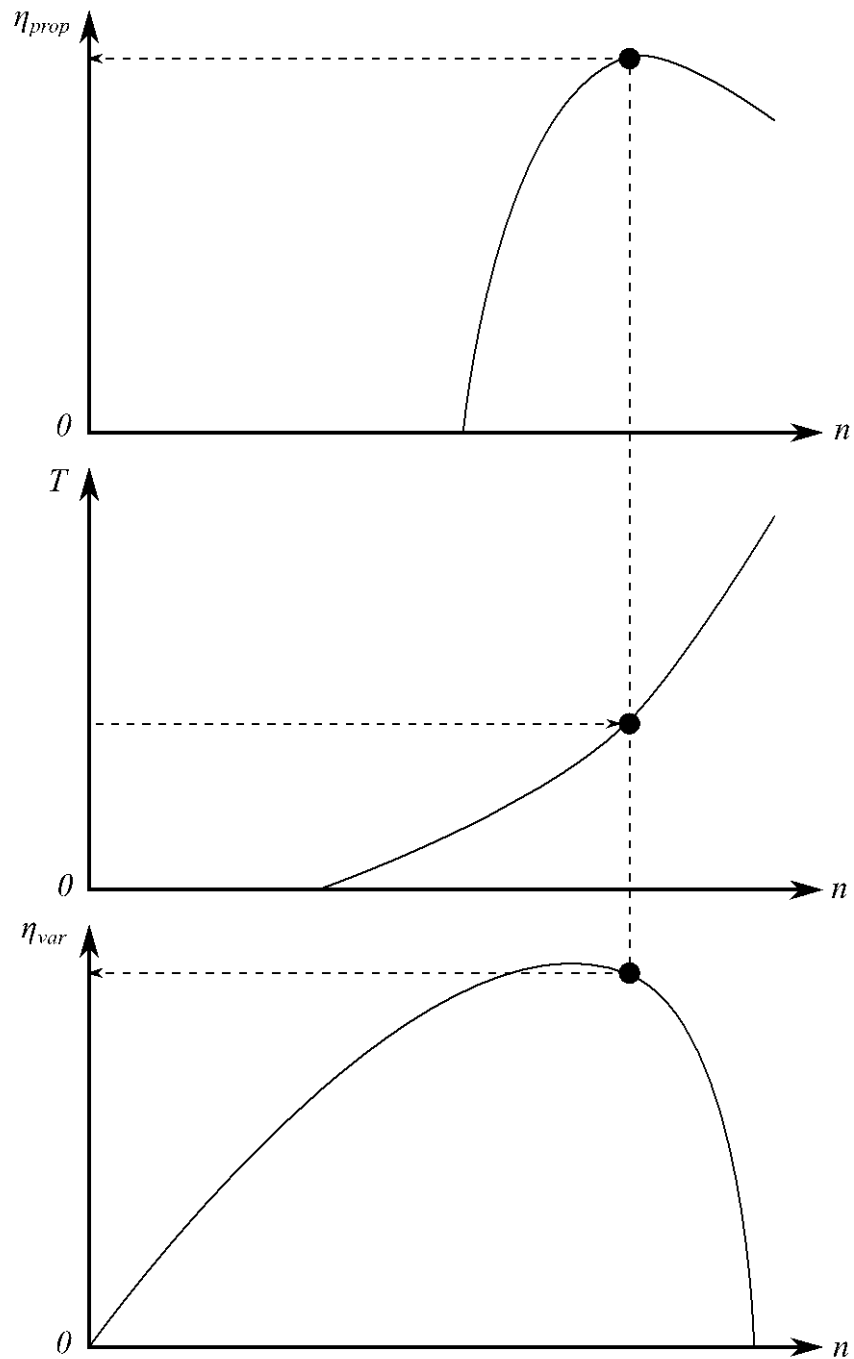
1.7 pav. pateikiami propelerio APC Slow Flyer 11x4,7 oro tunelyje išmatuoti naudingumo koeficientai η prie skirtingų sūkių (taigi, ir prie skirtingo Reinoldso skaičiaus) kintant propelerio santykinei eigai J (angl. *advance ratio*), žr. (1.28). Tokiu pat principu pateikiami ir traukos bei galios koeficientai C_T ir C_P . Rezultatai pateikiami pritaikius papildomas korekcijas (Selig & Ananda, 2015).



1.8 pav. Propeleris APC Slow Flyer 11x4,7 (UIUC, 2015)

$$J = \frac{v}{nd'} \quad (1.28)$$

čia v – propelerio skrydžio greitis, m/s ; n – propelerio sūkių skaičius, d – propelerio skersmuo, m .



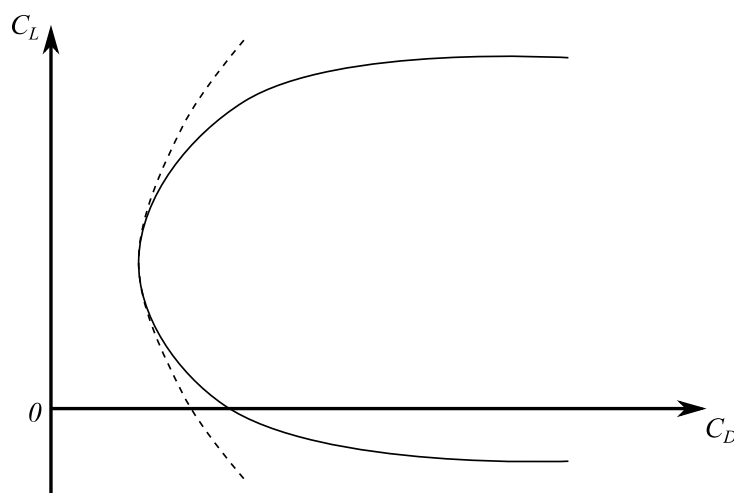
1.9 pav. Propelerio ir variklio naudingumo koeficientai (η_{prop} , η_{var}) bei trauka T prie tam tikrų sūkių n (Drela, 2005)

Propeleris APC Slow Flyer 11x4,7 (1.8 pav.) yra naudojamas kuriant bepiločius orlaivius Vilniaus Gedimino technikos universitete Antano Gustaičio aviacijos institute. Apskritai APC Slow Flyer propelerius turintys bepiločiai orlaiviai naudojami plačiai: jais vykdomos pastatų apžiūros misijos (Roca ir kt., 2013; Sánchez-Aparicio ir kt., 2014), tiriamas reljefas (Barreiro ir kt., 2014). Todėl manome, kad tokio propelerio pasirinkimas tyrimui yra pagrįstas, o rezultatai – perspektyvūs.

Kaip matome iš (1.28) formulės, žinodami propelerio santykinę eigą, galime lengvai nustatyti jo greitį. Tai reiškia, kad 1.7 pav. galime rasti begalybę propelerio judėjimo greičių, kuriems prie tam tikro sūkių skaičiaus yra išmatuotas naudingumo koeficientas. Deja, šioje vietoje eksperimentų rezultatai ir baigiasi. Viena vertus, lieka nežinomi rezultatai prie kitų propelerio sūkių. Kita vertus, tiriamas izoliuotas propeleris, todėl lieka neaišku, kaip jis veiks kombinacijoje su tam tikru varikliu. Tuo tarpu propelerio ir variklio derinimas vyksta nagrinėjant naudingumo koeficientus ne prie santykinės eigos, o būtent prie sūkių, žr. 1.9 pav.

Negana to, praktinės propelerių charakteristikos, ypač traukos ir galios koeficientai, viršija charakteristikas, gautas teoriniu būdu, o tokios anomalijos priežasčių dar prieš 15 metų mokslininkai aiškiai apibrėžti negalėjo (J. B. Brandt, 2005).

Naujesniuose tyrimuose, kuriuose naudojamosi propelerio ir variklio sąveiką analizuojančiomis programomis (QPROP, QMIL ar prieš tai aprašytame QOPTIMIZER vedinyje), taip pat lieka spragų. Vienas keblumų, kurį stengiasi apeiti QOPTIMIZER programos kūrėjai – mentės aerodinaminio profilio poliarės aproksimavimas. Iš penkių aerodinaminių profilių (BE-50, GOE-417a, BW-3, CR-001, GM-15) pasirenkamas būtent BE-50 (Bronz ir kt., 2012). Priežastis – ne tik pagaminimo paprastumas, bet ir charakteristikų nuspėjamumas, jų kitimo pastovumas, žr. 1.10 pav. Reiškia, nurodoma metodika tinkama tik idealizuotomis poliarėmis pasižyminčių profilių tyrimui.



1.10 pav. Idealizuota aerodinaminio profilio poliarė (ištisinė linija) ir jos aproksimacija parabole (punktyrinė linija)

1.8. Skyriaus išvados

Išnagrinėję literatūrą įvykdėme pirmąjį išsikeltą darbo uždavinį. Apibendrindami galime daryti tris svarbias išvadas:

1. Trūksta darbų, kuriuose tiriamas ne izoliuotas propeleris, o propelerio ir variklio kombinacija, jos charakteristikos.
2. Tiksliai neišaiškinta, kodėl praktinis propelerio efektyvumas viršija teorinius lūkesčius.
3. Neaptarti netolygių aerodinaminių profilių poliarių aproksimavimo ypatumai.

Tolesniame darbe bus vykdomi kiti darbo uždaviniai, ieškoma atsakymų į iškeltus klausimus.

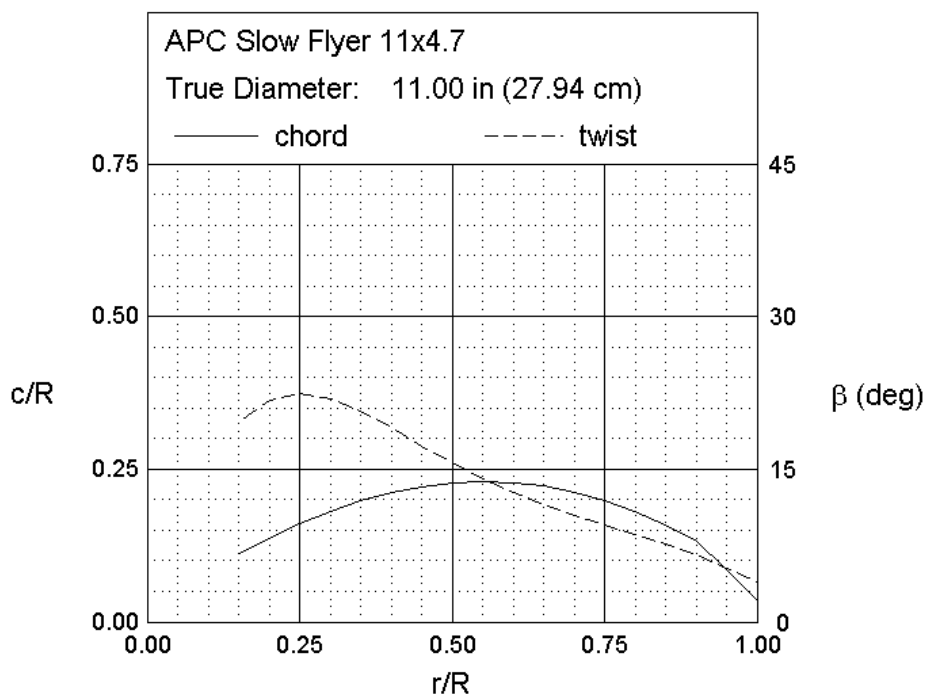
2. PROPELERIO IR VARIKLIO SĄVEIKOS TYRIMO METODIKA

2.1. Propeleris ir jo geometrija

Tiriant propelerio sąveiką su varikliu, tenka naudotis duomenimis, apibūdinančiais propelerio charakteristikas. Dalį tokių duomenų paprastai pateikia gamintojas, pavyzdžiui, bendrovės „Advance Precision Composites“ („APC“) interneto puslapyje galima rasti daugelį failų su teoriniais propelerių charakteristikų skaičiavimų rezultatais (APC, 2020a). Rašoma, kad šie rezultatai gaunami taikant sūkurių teoriją, o konkretaus aerodinaminio profilio trauka ir pasipriešinimas apskaičiuojamas naudojantis NASA Transgarsinių aerodinaminių profilių analizės kompiuterine programa (angl. *NASA Transonic Airfoil Analysis Computer Program*) (APC, 2020b). Tokie rezultatai puikiai tinka norint palyginti propelerių charakteristikas. Kita vertus, norint įvertinti konkretaus propelerio ir variklio sąveiką nepakanka naudotis šiais duomenimis dėl tam tikrų priežasčių:

- propelerio charakteristikos apskaičiuotos tik gana dideliais darbinio režimų intervalais (pavyzdžiui, prie 2000 ir 3000 sūkių per minutę) – norint gauti tarpinius rezultatus tenka interpoliuoti, tačiau net ir tokių tarpinių rezultatų gavimas nėra tinkamas dirbant su dauguma programų, kurios reikalauja pradinių įvesties duomenų, pavyzdžiui, propelerio aerodinaminio profilio poliarės aproksimacijos kvadratine funkcija;
- nėra žinomas programos, kuri naudota skaičiavimams, kodas – nelieta galimybės tirti ar patobulinti skaičiavimų metodą, pavyzdžiui, palyginti, kaip propelerio charakteristikos kinta įvairiomis atmosferos sąlygomis;
- nėra pateikiama propelerio mentės geometrija – vėlgi neturima pradinių duomenų, reikalingų darbui su kitomis programomis, pavyzdžiui, keliamosios jėgos koeficiento įvairiuose mentės pjūviuose.

Norint rasti mentės geometriją, ją galima tirti fotogrametriniu būdu – nuskenuotos mentės atvaizdas apdorojamas kompiuteriu. Kita vertus, galima pasikliauti kitų mokslininkų atliktais matavimais. Tarkime, Ilinojaus universitetas Urbanoje-Šampeinėje (angl. *UIUC – University of Illinois at Urbana-Champaign*) pateikia gana tikslią mūsų pasirinkto propelerio APC Slow Flyer 11x4,7 geometriją (UIUC, 2015), žr. 2.1 pav.



2.1 pav. Propelerio APC Slow Flyer 11x4,7 geometrija (UIUC, 2015)

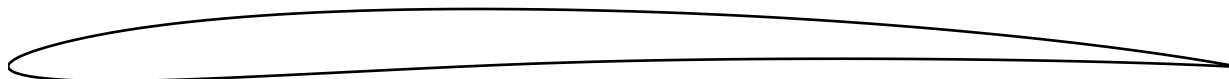
Deja, lieka neaiškus šio propelerio mentės aerodinaminis profilis. Vis dėlto dauguma viešai prieinamų programų, skirtų propelerio analizei, turi savo duomenų bazes, pavyzdžiui, PropCalc 3.0 (Schenk, 2020) mūsų pasirinktam propeleriui naudoja aerodinaminį profilį MA409. Atskirai šis profilis yra aprašytas tiek minėtoje programoje, tiek kituose viešai prieinamuose šaltiniuose (Airfoil Tools, 2020). Šiais duomenimis ir naudosimės tolesniame darbe.

2.2. Programos XFOIL aprašas

Darbai su propelerio ir variklio sąveikos analizės programomis reikia išmanyti ne tik propelerio geometriją, bet ir pagrindines mentės aerodinamines charakteristikas. Joms rasti naudosimės programa XFOIL 6.99. Tai Masačusetso technologijos instituto (angl. *MIT – Massachusetts Institute of Technology*) mokslininkų Marko Drellos ir Haroldo Youngreno sukurta programa, skirta ikigarsinių izoliuotų aerodinaminių profilių analizei ir dizainui (Drela & Youngren, 2013).

Visų pirma, į programą įkeliami pasirinkto aerodinaminio profilio MA409 geometrija (Airfoil Tools, 2020). Paprastai profilis papildomai apdorojamas automatine funkcija PANE arba sudėtingesne funkcija PPAR, leidžiančia naudotojui dalį parametrų nurodyti rankiniu būdu. Pagrindinis tokio apdorojimo tikslas – kuo tiksliau ir tolygiau profilį aproksimuoti plokštelėmis. Tokiu būdu programa skaičiuoja tiksliau. Kita vertus, Airfoil Tools pateikia pakankamai glotnų

profilį, vadinamą MA409 *smoothed* (žr. 2.2 pav.), todėl papildomas glotninimas iš esmės nėra būtinas. Be to, atlikus daugelį bandymų pastebėta, kad patikimiausiai programa skaičiuoja nenaudojant papildomų funkcijų arba profilio geometriją keičiant minimaliai. Kitais atvejais gautos poliarės kreivė yra grubesnė arba programa išvis neskaičiuoja charakteristikų prie tam tikrų profilio atakos kampų. Taip pat pažymime, kad aerodinaminio profilio charakteristikos nėra šio darbo tyrimo objektas, todėl detalesnis XFOIL gautų charakteristikų palyginimas čia nepateikiamas.



2.2 pav. Aerodinaminio profilio MA409 atvaizdas

Toliau naudojantis operacijų skilties OPER funkcija ITER padidinamas atliekamų iteracijų skaičius iki 100. Toks didelis pakartojimų skaičius leidžia gauti dar patikimesnius rezultatus.

Dar vienas veiksnys, darantis didelę įtaką skaičiavimų tikslumui – Reinoldso skaičius. Jau minėta anksčiau, kad maži propeleriai, naudojami daugumai nedidelių bepiločių orlaivių, pasižymi išskirtinai mažais Reinoldso skaičiais (1.7 skyrelis). Šiam tyrimui pasirenkamas dydis yra 75000. 3.1 skyrelyje parodoma, koku pagrindu šis skaičius pasirenkamas.

Tuomet funkcijomis PACC ir ASEQ randamos ir į tekstinį failą sukeliamos pagrindinės profilio aerodinaminės charakteristikos. Dalį tokių charakteristikų pateikia ir Airfoil Tools, tačiau ten Reinoldso skaičių ir atakos kampų pasirinkimas yra ribotas, be to, skaičiavimai atlikti naudojant senesnę XFOIL versiją (6.96). Tuo tarpu mes naudojame naujausią XFOIL versiją 6.99, taip pat pasirenkame labai platų bei smulkiai suskirstytą atakos kampų diapazoną (nuo -10° iki 10° kas $0,1^\circ$). Tekstinis duomenų saugojimo formatas pasirenkamas vietoje grafinio atvaizdavimo funkcijos PPLO dėl poreikio vėliau tokius duomenis apdoroti programa MICROSOFT OFFICE EXCEL 2016.

2.3. Programos QPROP aprašas

Ištyrus pagrindines aerodinaminio profilio charakteristikas, galima pereiti prie propelerio ir jo kombinacijos su varikliu analizės. Šiam tikslui naudosimės dar viena Marko Drellos programa QPROP 1.22, skirta propelerio ir variklio sąveikos charakteristikų nustatymui (Drela, 2007b).

2.3.1. Propelerio failas

Iš pradžių paruošiamas tekstinis propelerio duomenų failas. Jis susideda iš keliolikos eilučių, kurios detalios paaiškinamos 2.1 lentelėje:

2.1 lentelė. QPROP propelerio failo aprašas

Eilutės numeris	Duomenys	Pastabos
1	Propelerio pavadinimas	
2	N ; R	N – propelerio menčių skaičius; R – mentės ilgis coliais. Pastarasis duomuo neprivalomas. Jei šis nenurodomas – programa mentės ilgį skaičiuoja iš paskutinės failo eilutės duomenų.
3	C_{L0} ; C_{LA}	Tiesinės funkcijos $C_L(\alpha) = C_{LA} \cdot \alpha + C_{L0}$ koeficientai. C_{L0} atitinka keliamosios jėgos koeficientą, kai $\alpha = 0$. C_{LA} parenkamas taip, kad aerodinaminio profilio priklausomybė $C_L(\alpha)$ būtų kuo tiksliau atvaizduojama tiese. Paprastai minėtą tašką galima pasirinkti taip, kad tiesė ir kreivė susikirstų ties kritinio atakos kampo C_L reikšme. Atkreiptinas dėmesys, kad čia atakos kampas matuojamas radianais.
4	C_{Lmin} ; C_{Lmax}	Atitinkamai minimalus ir maksimalus aerodinaminio profilio keliamosios jėgos koeficientas.
5	C_{D0} ; C_{D2u} ; C_{D2l} ; C_{LCD0}	Parabolių $C_D(C_L) = C_{D0} + C_{D2u} \cdot (C_L - C_{LCD0})^2$ ir $C_D(C_L) = C_{D0} + C_{D2l} \cdot (C_L - C_{LCD0})^2$ koeficientai. C_{D0} atitinka minimalaus aerodinaminio profilio pasipriešinimo koeficientą. C_{LCD0} – keliamosios jėgos koeficientas prie C_{D0} . C_{D2u} ir C_{D2l} parenkami taip, kad aerodinaminio profilio poliarė būtų kuo tiksliau atvaizduojama dviem parabolės šakomis. C_{D2u} atitinka parabolės šaką $C_L > C_{LCD0}$ regione, o C_{D2l} atitinka parabolės šaką $C_L < C_{LCD0}$ regione.
6	Re_{ref} ; Re_{exp}	Re_{ref} – Reinoldso skaičius, prie kurio yra apskaičiuota aerodinaminio profilio poliarė. Re_{exp} – koeficientas, naudojamas 5-toje lentelės eilutėje aprašytos parabolės išplėstinėje formoje $C_D(C_L, Re) = (C_{D0} + C_{D2u} \cdot (C_{Lmax} - C_{LCD0})^2) \cdot \frac{Re}{Re_{ref}}^{Re_{exp}}$ arba $C_D(C_L, Re) = (C_{D0} + C_{D2l} \cdot (C_{Lmin} - C_{LCD0})^2) \cdot \frac{Re}{Re_{ref}}^{Re_{exp}}$. Re_{ref} randamas apibendrinus kelių poliarių duomenis arba imama standartinė siūloma vertė (Drela, 2006).
7, 8	r_{fac} ; c_{fac} ; β_{fac} ; r_{add} ; c_{add} ; β_{add}	Ankstesnėse lentelės eilutėse pateiktų dydžių konvertavimo į SI sistemos dydžius koeficientai. Tarkime, kad r_{SI} , c_{SI} , β_{SI} atitinkamai yra dydžiai r , c , β , išreikšti SI sistemos vienetais. Tuomet $r_{SI} = r \cdot r_{fac} + r_{add}$; $c_{SI} = c \cdot c_{fac} + c_{add}$; $\beta_{SI} = (\beta \cdot \beta_{fac} + \beta_{add}) \cdot \frac{\pi}{180}$.
9 ir toliau	r ; c ; β	Propelerio mentės geometrijos aprašas, kur r – atstumas nuo mentės šaknies coliais; c – mentės profilio stygos ilgis coliais r atstumu nuo mentės šaknies; β – mentės susukimas laipsniais r atstumu nuo mentės šaknies.

Taip pat yra galimas ir išplėstinis propelerio failas, kuomet pasirinktinai prie 9-tos ir tolesnių eilučių duomenų nurodomi papildomi koeficientai, atitinkantys nurodytuosius 3-6-tose eilutėse. Toks propelerio aprašymas reikalingas tais atvejais, kai skiriasi mentės aerodinaminiai profiliai įvairiose mentės vietose.

2.3.2. Variklio failas

Toliau paruošiamas tekstinis variklio duomenų failas. Jis susideda iš kelių eilučių, kurios paaiškinamos 2.2 lentelėje:

2.2 lentelė. QPROP variklio failo aprašas

Eilutės numeris	Duomenys	Pastabos
1	Variklio pavadinimas	
2	Motoro tipas	Šiame darbe naudojama vienintelė skaitinė reikšmė – 1, kuri nurodo nuolatinės srovės variklį be šepetėlių arba su šepetėliais.
3	R	Variklio varža omais.
4	i	Variklio tuščios veikos (angl. <i>no-load</i>) srovė amperais.
5	k	Santykis $\frac{n}{U}$, kur n – sukiai per minutę, U – įtampa voltais. Paprastai variklio gamintojas šį santykį pateikia kaip konstantą.

Kaip ir propelerio, variklio failas taip pat gali būti išplėstinis. Tokiu atveju pateikiama daugiau variklio parametrų.

2.3.3. QPROP galimybės

Programa QPROP gali būti naudojama įvairiais būdais. Paprasčiausias iš jų – apskaičiuoti charakteristikas išilgai mentės, pavyzdžiui, keliamosios jėgos ir pasipriešinimo koeficientus, Reinoldso ir Macho skaičius, efektyvumą, sukurius. Tokiu atveju pakanka nurodyti skrydžio greitį ir propelerio apsukas. Vietoje to gali būti nurodoma trauka, sukimo momentas, srovė, paduodama varikliui, ar variklio galia. Papildomai gali būti nurodomas propelerio žingsnis, jei jis nelygus nuliui. Kitas programos QPROP naudojimo būdas – viso propelerio charakteristikų, tokių kaip traukos ir galios koeficientų, skaičiavimas. Tokiu atveju nurodomi parametrų intervalai: skrydžio greičiai ir

propelerio sūkliai. Jeigu pridedama dar ir įtampa, skaičiuojamos propelerio ir variklio kombinacijos charakteristikos.

Programa QPROP, kaip ir XFOIL, veikia komandų principu, kurios rašomos vadinamajame DOS lange (angl. *Disk Operating System*). 2.3 pav. pavaizduotas pradinis programos langas.

```
QPROP usage:
% qprop propfile motorfile Vel Rpm [ Volt dBeta Thrust Torque Amps Pele ]   (single-point)
% qprop propfile motorfile Vel1,Vel2,dVel Rpm ["]                          (multi-point 1-parameter sweep over Vel, Rpm set)
% qprop propfile motorfile Vel1,Vel2,dVel 0 Volt ["]                       (multi-point 1-parameter sweep over Vel, Volt set)
% qprop propfile motorfile Vel1,Vel2,dVel Rpm1,Rpm2,dRpm ["]              (multi-point 2-parameter sweep over Vel and Rpm)
% qprop propfile motorfile runfile                                         (multi-point, via file specification)
Run with default inputs? Y
```

2.3 pav. Pradinis programos QPROP langas

Svarbu tai, kad skaičiavimus vykdyti galima įvairiomis terpės charakteristikomis – *qcon.def* faile saugomos pagrindinės oro konstantos: tankis, dinaminė klampa, garso greitis.

QPROP programos kodas remiasi klasikine judesio kiekio ir mentės elementų teorija, įskaitant plėtinius (Drela, 2006). Ypač pažangus propelerio modelis – atsižvelgiama į propelerio saviindukciją, sūkurius. Tokiu pat principu veikia ir programa QMIL, tik čia skiriasi nežinomi parametrai – iš pageidaujamų charakteristikų galima sukurti propelerio modelį.

3. PROPELERIO IR VARIKLIO SĄVEIKOS TYRIMAS

3.1. Reinoldso skaičiaus nustatymas

1.7 skyriuje aptarėme Reinoldso skaičiaus reikšmę mažų propelerių tyrimams. Pirmasis mūsų tyrimo žingsnis yra nustatyti tipinį APC Slow Flyer 11x4,7 propelerio Reinoldso skaičių, kuris bus naudojamas mentės profilio poliarei gauti. Kaip matome iš (1.26) lygties, Reinoldso skaičius priklauso nuo propelerio mentės stygos ilgio, kinematinės klampos koeficiento ir judėjimo greičio. Pastarąjį vertinsime kaip vektorinę linijinio ir skrydžio greičio sumą. Verta atkreipti dėmesį, kad čia nėra skaičiuojamas *vidutinis* Reinoldso skaičius. Vidurkį būtų galima išvesti tik pakankamai siaurai apibrėžus propelerio veikimo modelį, tarkime, kinematinės klampos koeficientą ir judėjimo greitį laikant konstantomis. Tokiu atveju kalbėtume apie Reinoldso skaičiaus vidurkį išilgai mentės. Tuo tarpu šiame tyrime ieškome tik *būdingo* Reinoldso skaičiaus įvertindami, kaip plačiai kinta vieni ar kiti jam įtaką darantys parametrai. Šie parametrai apibendrinami 3.1 lentelėje.

Oro dinaminės ir kinematinės klampos koeficientus lengviausia apskaičiuoti viešai prieinama skaičiuokle (Engineering ToolBox, 2020). Jūros lygyje:

$$\text{kai } t = -89\text{ }^{\circ}\text{C, tai } \mu = 1,238 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}; \sigma = 6,44 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}; \quad (3.1)$$

$$\text{kai } t = 15\text{ }^{\circ}\text{C, tai } \mu = 1,789 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}; \sigma = 1,461 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}; \quad (3.2)$$

$$\text{kai } t = 58\text{ }^{\circ}\text{C, tai } \mu = 1,99 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}; \sigma = 1,867 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}. \quad (3.3)$$

11 km aukštyje:

$$\text{kai } t = 15\text{ }^{\circ}\text{C, tai } \sigma = 3,899 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}. \quad (3.4)$$

Toliau apskaičiuosime Reinoldso skaičių standartinėms kitų parametrų vertėms. Kai $n = 4000$, tai ties $0,7R$ linijinis greitis:

$$v = 0,1397 \cdot 0,7 \cdot 2\pi \cdot \frac{4000}{60} \approx 40,96 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right). \quad (3.5)$$

3.1 lentelė. Įvairių faktorių, darančių įtaką būdingam tiriamo propelerio Reinoldso skaičiui, apibendrinimas

Parametras	Parametro ekstremumai	Parametro standartinė vertė	Pastabos
Temperatūra t	$-89 - 58\text{ }^{\circ}\text{C}$ Apytiksliai žemiausia ir aukščiausia Žemėje fiksuota temperatūra.	$15\text{ }^{\circ}\text{C}$ Tarptautinės standartinės atmosferos temperatūra ties menamu jūros lygiu.	Nuo temperatūros priklauso dinaminės klamos koeficientas.
Oro tankis ρ	$0,36391 - 1,225\text{ kg/m}^3$ Tarptautinės standartinės atmosferos oro tankis 11 km aukštyje ir ties menamu jūros lygiu.	$1,225\text{ kg/m}^3$	Nuo oro tankio priklauso kinematinės klamos koeficientas.
Mentės stygos ilgis d	$0,0154664 - 0,032131\text{ m}$ Atitinkamai $0,15R$ (mentės šaknis) ir $0,55R$ (plačiausia mentės vieta), kur R – mentės spindulys.	$0,0297561\text{ m}$ $0,7R$ (standartinė vertė), kur R – mentės spindulys.	Imami matavimų rezultatai (UIUC, 2015).
Sūčiai per minutę n	$2000 - 18000$	4000	Imami gamintojo dydžiai (APC, 2020a) ir tipinis matavimų dydis (UIUC, 2015).
Skrydžio greitis v_1	$0 - 50\text{ m/s}$	7 m/s	Imamos PropCalc apskaičiuotos galimos vertės prie minimalių, maksimalių ir tipinių sūčių.

Vektorinė linijinio ir skrydžio greičių suma:

$$v_{sum} = \sqrt{40,96^2 + 7^2} \approx 41,55 \left(\frac{m}{s}\right). \quad (3.6)$$

Tuomet:

$$Re_{stand} = \frac{41,55 \cdot 0,0297561}{1,461 \cdot 10^{-5}} \approx 84625. \quad (3.7)$$

Papildomai panagrinėkime Reinoldso skaičius ekstremaliais atvejais. Itin mažo Reinoldso skaičiaus galime tikėtis statinės traukos atveju, tirdami mentės šaknį retame / karštame ore prie žemų sūkių:

$$Re_{ekstr1} = \frac{0,1397 \cdot 0,15 \cdot 2\pi \cdot 2000 \cdot 0,0154664}{60 \cdot 3,899 \cdot 10^{-5}} \approx 1741. \quad (3.8)$$

Didelio Reinoldso skaičiaus galime tikėtis tirdami pakankamai plačią mentės kraštinę dalį šaltame ore prie aukštų sūkių, propeleriui skriejant dideliu greičiu:

$$Re_{ekstr2} = \frac{\sqrt{\left(\frac{0,1397 \cdot 0,7 \cdot 2\pi \cdot 18000}{60}\right)^2 + 50^2 \cdot 0,0297561}}{6,44 \cdot 10^{-6}} \approx 882475. \quad (3.9)$$

Galime matyti, kad žymiausią įtaką Reinoldso skaičiui daro kinematinės klampos koeficientas. Jei (3.9) lygtyje aprašytos sąlygos būtų atkartojamos jau standartinėje temperatūroje, tuomet Reinoldso skaičius sumažėtų daugiau nei dvigubai:

$$Re_{ekstr2stand} = \frac{\sqrt{\left(\frac{0,1397 \cdot 0,7 \cdot 2\pi \cdot 18000}{60}\right)^2 + 50^2 \cdot 0,0297561}}{1,461 \cdot 10^{-5}} \approx 388990. \quad (3.10)$$

Žymų Reinoldso skaičiaus sumažėjimą duotų ir drastiškas sūkių sumažinimas – žemiausias, prie kurių turime praktinius tyrimų rezultatus (UIUC, 2015):

$$Re_{stand2} = \frac{0,1397 \cdot 0,7 \cdot 2\pi \cdot 2000 \cdot 0,0297561}{60 \cdot 1,461 \cdot 10^{-5}} \approx 41714. \quad (3.11)$$

Kaip matome, Reinoldso skaičiai gali varijuoti stipriai, tačiau, kaip prieš tai jau atkreipėme dėmesį, čia tik ieškome būdingo Reinoldso skaičiaus. Propelerio charakteristikų kitimas prie skirtingų Reinoldso skaičių nėra mūsų tyrimo objektas, todėl, remdamiesi teoriniais pastebėjimais (Deters ir kt., 2014), laikysime tinkama tolesniam tyrimui pasirinkti Reinoldso skaičių, lygų 75000.

3.2. Profilio MA409 aerodinaminių charakteristikų aproksimavimas

2.2 skyrelyje aprašėme, kaip programa XFOIL gaunamos aerodinaminio profilio charakteristikos. 2.3.1 skyrelyje išvardinome, kokie dydžiai mums yra reikalingi darbui programa QPROP. Paaiškėjo, kad reikia aproksimuoti charakteristikų kreives. Šiame skyrelyje aptarsime, kokie yra tokio aproksimavimo ypatumai.

3.1 pav. pateikiama keliamosios jėgos koeficiento priklausomybė nuo atakos kampo. Kaip minėta 2.1 lentelės 3-ioje eilutėje, kreivė aproksimuojama funkcija:

$$C_L(\alpha) = C_{LA} \cdot \alpha + C_{L0}, \quad (3.12)$$

čia C_{L0} – keliamosios jėgos koeficientas, kai $\alpha = 0$; C_{LA} – funkcijos koeficientas.

Tikslus C_{L0} dydis randamas iš XFOIL rezultatų lentelės, o C_{LA} ieškomas taip:

$$C_{LA} = \frac{C_{Lmax} - C_{L0}}{\alpha_{krit}}, \quad (3.13)$$

čia C_{Lmax} – maksimali keliamoji jėga, α_{krit} – kritinis atakos kampas, *rad*. Tikslūs dydžiai randami iš XFOIL rezultatų lentelės.

Taigi:

$$C_L(\alpha) = 6,21559 \alpha + 0,2107. \quad (3.14)$$

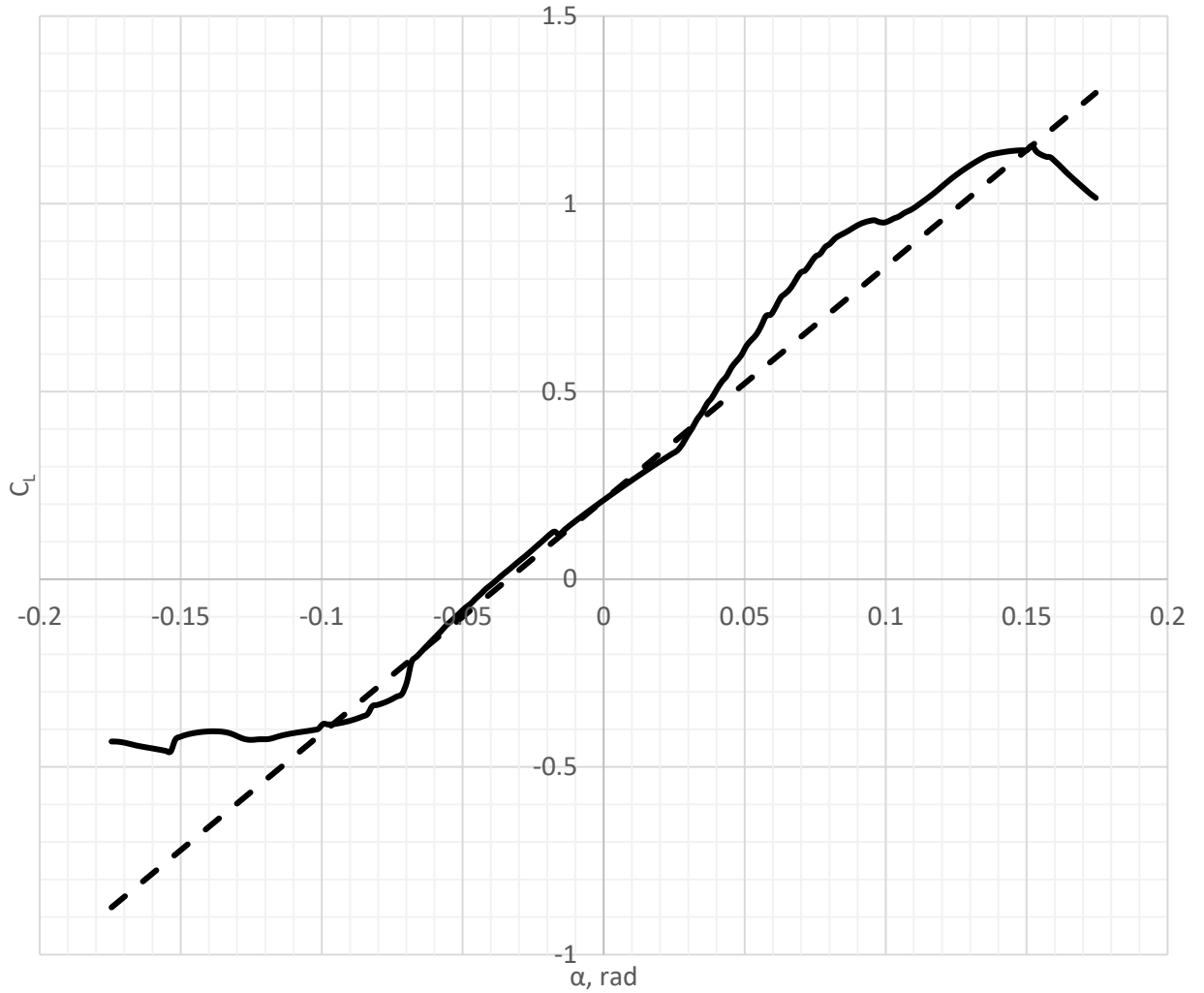
Manome, kad tiesės koeficientus galima imti nesutampančius su anksčiau nurodytais kreivės taškais. Tokie atvejai būtų priimtini, kai, pavyzdžiui, kreivėje nėra aiškiai išreikšto α_{krit} arba tiesė labai nutolsta nuo realaus kreivėje matomo minimalaus keliamosios jėgos koeficiento C_{Lmin} . Mūsų atveju gauta tiesė yra artima kreivei, todėl laikome, kad papildomos manipuliacijos nereikalingos.

Visiškai kitokia situacija susidaro aproksimuojant profilio poliarę, t.y. keliamosios jėgos koeficiento ir pasipriešinimo koeficiento santykį. Kaip minėta 2.1 lentelės 5-toje eilutėje, kreivės aproksimuojama dviem funkcijomis:

$$C_D(C_L) = C_{D0} + C_{D2u} \cdot (C_L - C_{LCD0})^2, \quad (3.15)$$

$$C_D(C_L) = C_{D0} + C_{D2l} \cdot (C_L - C_{LCD0})^2, \quad (3.16)$$

čia C_{Lmin} – minimalus keliamosios jėgos koeficientas; C_{Lmax} – maksimalus keliamosios jėgos koeficientas; C_{D0} – minimalaus pasipriešinimo koeficientas; C_{LCD0} – keliamosios jėgos koeficientas prie C_{D0} ; C_{D2u} ir C_{D2l} – funkcijų koeficientai.



3.1 pav. Profilio MA409 keliamosios jėgos koeficiento priklausomybė nuo atakos kampo (išsistinė linija) ir jos kreivės aproksimacija (punktyrinė linija)

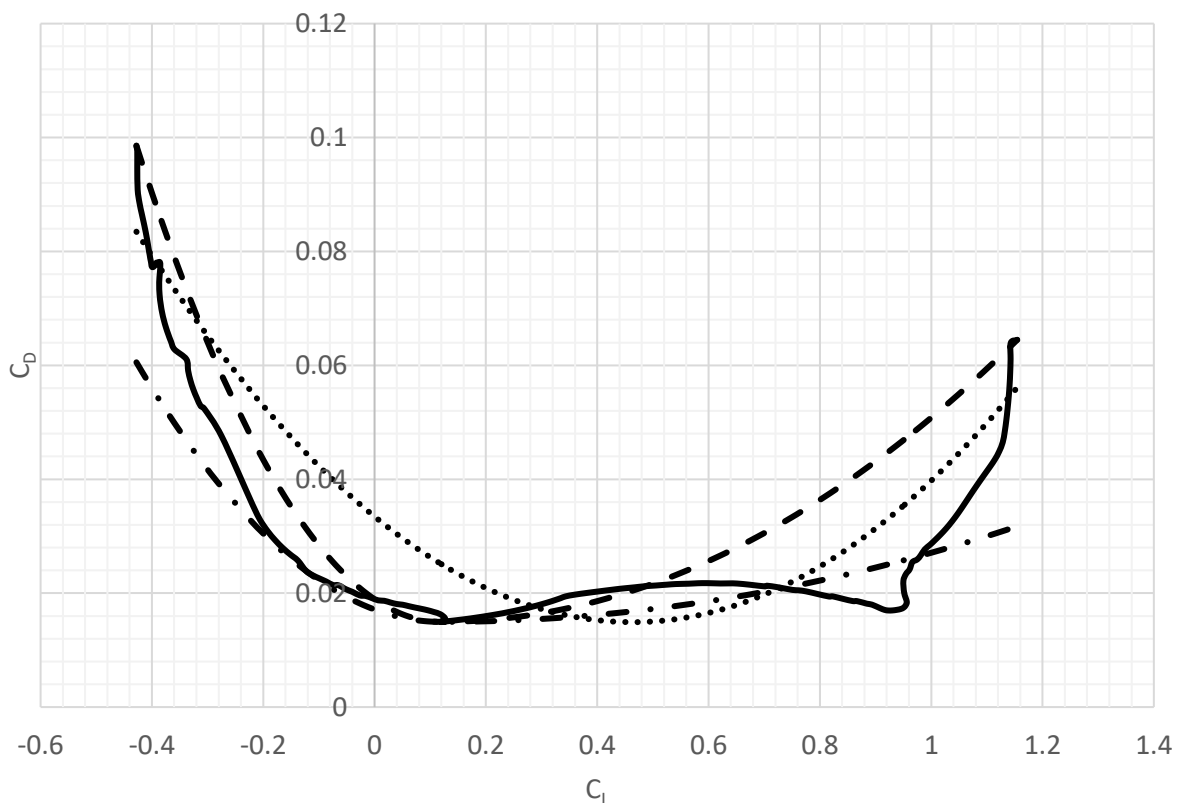
Pastarieji randami taip:

$$C_{D2u} = \frac{C_{DCLmax} - C_{D0}}{(C_{Lmax} - C_{LCD0})^2}, \quad (3.17)$$

$$C_{D2l} = \frac{C_{DCLmin} - C_{D0}}{(C_{Lmin} - C_{LCD0})^2}, \quad (3.18)$$

čia C_{DCLmax} – pasipriešinimo koeficientas prie maksimalaus keliamosios jėgos koeficiento, C_{DCLmin} – pasipriešinimo koeficientas prie minimalaus keliamosios jėgos koeficiento.

Verta dar kartą pabrėžti, kad, pasak Drellos, visi minėti dydžiai ne skaičiuojami iš poliarės, o randami (angl. *read off*) aproksimacinę kreivę vaizdžiai pridėjus prie poliarės. Kitaip tariant, nurodyti dydžiai tėra orientaciniai ir gali būti šiek tiek keičiami, nes aproksimacijos tikslas – ne atitikti poliarę keliuose pasirinktuose ekstremumuose, o kuo tiksliau ją atvaizduoti daugelyje taškų. Kadangi, kaip matoma iš 3.2 pav., profilio MA409 poliarė nėra tolygi (stebimas pakankamai žymus pasipriešinimo koeficiento padidėjimas prie vidutinių keliamosios jėgos koeficientų), kyla keblumų norint poliarę atvaizduoti vos dviem parabolės šakomis. Nei Drela, nei kiti mokslininkai nepateikia rekomendacijų, kaip nestandartinės poliarės turi būti aproksimuojamos, todėl šiame darbe naudojamos trys poliarės aproksimacijos, pateikiamos 3.2 pav. Patogumo dėlei, priešingai nei įprastose poliarėse, abscisių ašis skiriama keliamosios jėgos koeficientui.



3.2 pav. Profilio MA409 pasipriešinimo koeficiento priklausomybė nuo keliamosios jėgos koeficiento (ištininė linija) ir trys jos aproksimacijos (kitos linijos)

3.2 pav. pateikiamos poliarės ribos – atitinkamai minimalus ir maksimalus keliamosios jėgos koeficientas, randamas iš XFOIL rezultatų lentelės. Kadangi į rezultatų lentelę yra įtraukti ypač maži

ir ypač dideli atakos kampai, minėtiems koeficientams priskiriami artimiausi ordinačių ašiai ekstremumai. Kitaip tariant, XFOIL randa, pavyzdžiui, dar mažesnę keliamosios jėgos koeficientą prie ekstremaliai mažų atakos kampų, tačiau prieš tai mažėjant atakos kampui keliamosios jėgos koeficientas arba būna stabilus, arba net didėja – šie atvejai ignoruojami. Toliau aprašomos poliarės aproksimacijos darbe vadinamos pirmąja, antrąja ir trečiąja.

I-oji poliarės aproksimacija 3.2 pav. žymima punktyru. Tai artimiausia siūlomam Drelos modeliui aproksimacija. Privalumai: sutampa parabolų šakų ir poliarės taškai, kur $C_L = C_{Lmin}$, $C_L = C_{Lmax}$ ir $C_L = C_{LCD0}$. Trūkumai: parabolų šakos nutolsta nuo poliarės kituose grafiko regionuose, ypač, kai $C_L > C_{LCD0}$. I-osios poliarės aproksimacijos kairioji bei dešinioji šakos atitinkamai aprašomos tokiomis funkcijomis:

$$C_D(C_L) = 0,279437C_L^2 - 0,0666177C_L + 0,0189304, \quad (3.19)$$

$$C_D(C_L) = 0,0462C_L^2 - 0,0110141C_L + 0,0156164. \quad (3.20)$$

II-oji poliarės aproksimacija žymima punktyrais ir taškais. Tai taip pat Drelos modeliui artima aproksimacija. Privalumai: tiksliausiai atvaizduojama centrinė poliarės dalis, parabolų šakos ilgai nenutolsta nuo poliarės ir sutampa, kur $C_L = C_{LCD0}$. Trūkumai: labai netiksliai aproksimuojami aukšto pasipriešinimo koeficiento regionai. II-osios poliarės aproksimacijos kairioji bei dešinioji šakos atitinkamai aprašomos tokiomis funkcijomis:

$$C_D(C_L) = 0,15232C_L^2 - 0,0363131C_L + 0,0171243, \quad (3.21)$$

$$C_D(C_L) = 0,01564C_L^2 - 0,00372858C_L + 0,0151822. \quad (3.22)$$

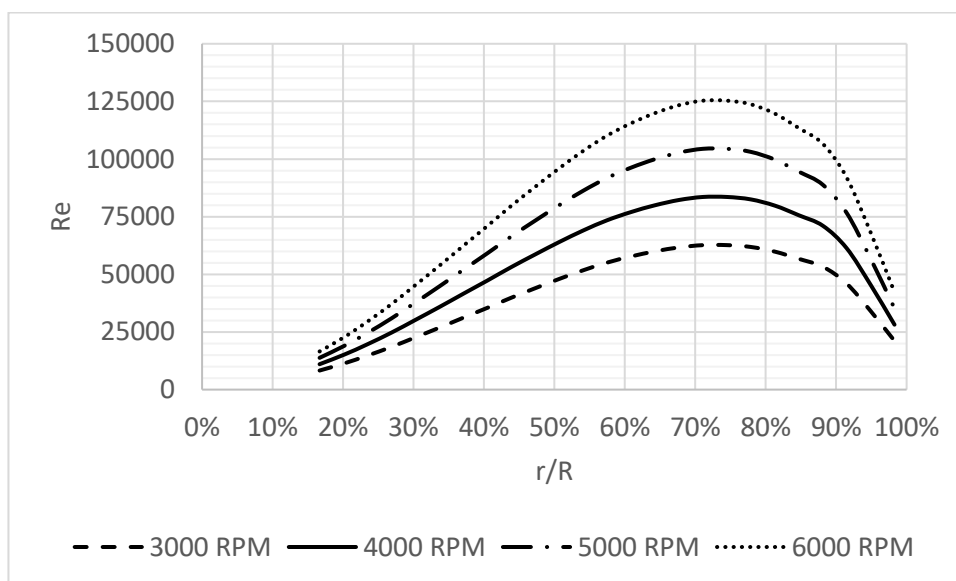
III-oji poliarės aproksimacija žymima taškais. Tai labiausiai nuo Drelos modelio nutolusi aproksimacija. Privalumai: tiksliausiai atsižvelgiama į dviejų mažiausio pasipriešinimo koeficientų padėtį, ji suvidurkinama ir perkeliama į poliarės vidurinę dalį, gana tiksliai atvaizduojamos dalys, kur $C_L = C_{Lmin}$ ir $C_L = C_{Lmax}$. Trūkumai: parabolės šakos žymiai nutolsta nuo poliarės kituose grafiko regionuose. III-osios poliarės aproksimacija aprašoma tokia funkcija:

$$C_D(C_L) = 0,0863C_L^2 - 0,08C_L + 0,03345. \quad (3.23)$$

Kaip matome, III-ojoje aproksimacijoje naudojamos ne parabolų šakos, o viena parabolė.

3.3. Tinkamiausio aproksimacijos modelio radimas

Praeitame skyrelyje radome funkcijas, kuriomis aproksimuojamos profilio MA409 aerodinaminės charakteristikos. Norint toliau vykdyti tyrimą, reikia išsiaiškinti, kurio aproksimavimo modelio teikiami rezultatai labiausiai atitinka eksperimentinius. Pastaruosius, kaip minėta anksčiau, teikia Ilinojaus universitetas Urbanoje-Šampeinėje (UIUC, 2015). Kadangi eksperimentai yra atlikti tik su tam tikrais propelerio sūkliais, iš pradžių išsiaiškinsime, kurie sūkliai duoda Reinoldso skaičių, artimiausią mūsų pasirinktam (75000). Tokiu atveju palyginimas bus tiksliausias. 3.3 pav. pateikiami programa QPROP suskaičiuoti Reinoldso skaičiai išilgai propelerio APC Slow Flyer 11x4,7 mentės prie fiksuotų apskukų statinės traukos atveju. Atkreiptinas dėmesys, kad norint sužinoti Reinoldso skaičių nėra svarbu, kuri aproksimacija naudojama programoje aprašant propelerį, nes, kaip matėme iš (1.26), Reinoldso skaičius nepriklauso nuo dydžių, randamų profilio poliarėje.

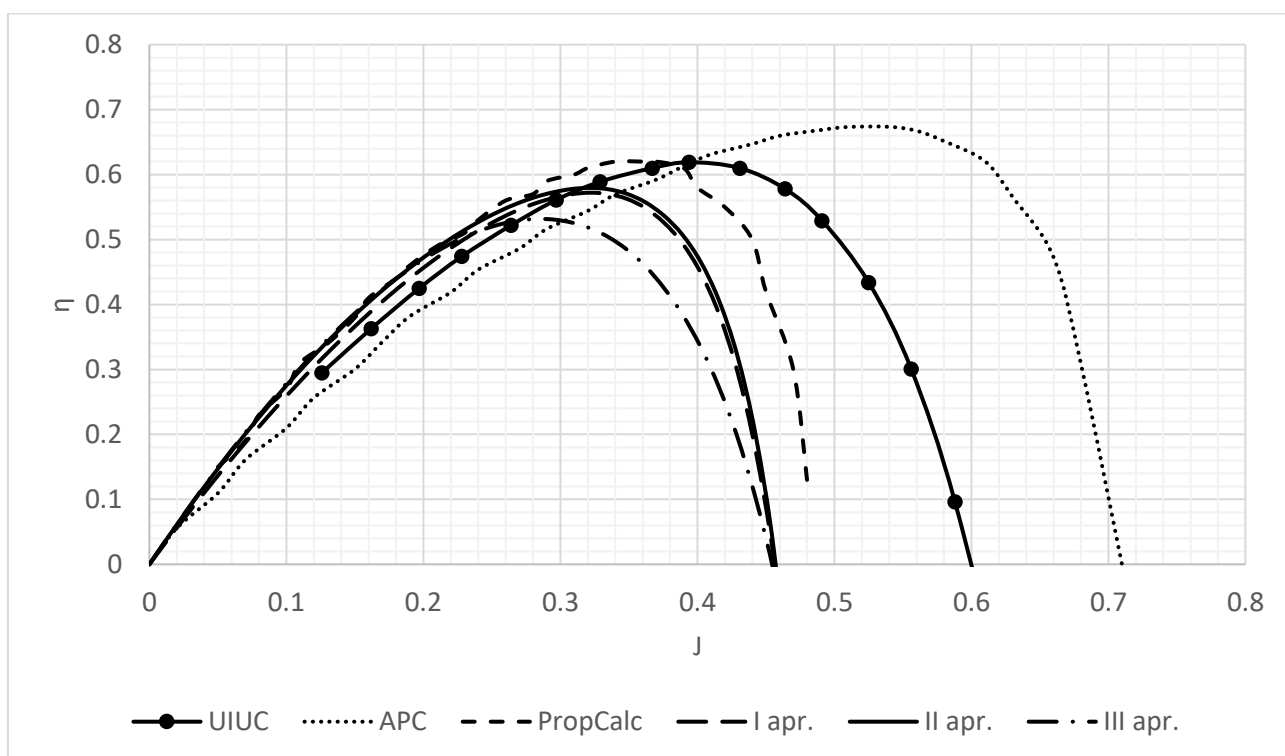


3.3 pav. Propelerio APC Slow Flyer 11x4,7 Reinoldso skaičiai išilgai mentės prie fiksuotų apskukų statinės traukos atveju

Kaip matome iš 3.3 pav., mūsų pasirinktas Reinoldso skaičius labiausiai būdingas, kai propeleris sukasi 4000 apskukų per minutę greičiu.

3.4 pav. pateikiama propelerio naudingumo koeficiento priklausomybė nuo santykinės eigos. Praktiniai (UIUC) rezultatai žymimi taškais, sujungtais linijomis. Taškai rodomi ten, kur prie tam tikrų parametrų buvo atliekami matavimai. Šiuos taškus žinoti svarbu, nes matavimai ne visuomet atliekami tolygiai, pavyzdžiui, nėra pamatuotas naudingumo koeficientas, kai $J < 0,12$. Kitomis

linijomis žymimi įvairiomis programomis gauti rezultatai, kurie, kaip matome, žymiai skiriasi. Įdomu tai, kad nuo praktinių dydžių labai nutolę paties gamintojo pateikiami skaičiavimai. Be to, APC vieninteliai pateikia skaičiavimus, kurie aiškiai *viršija* praktinius dydžius. Rezultatus, artimiausius praktiniams, pateikia programa PropCalc – tikėtina, kad šios programos skaičiavimo modelis remiasi ankstesnėje darbo dalyje aptartomis pataisomis. Kita vertus, norint pagrįsti šią prielaidą, reikėtų atlikti išsamų rezultatų palyginimą, nes patys programos kūrėjai taikomos metodikos neaprašo. Tuo tarpu QPROP skaičiavimai naudingumo koeficientą pateikia mažesnę, nei realų, tačiau žymesnis skirtumas pastebimas tik prie didesnės santykinės propelerio eigos. Apskritai didžiausi naudingumo koeficiento neatitikimai randami ten, kur naudingumo koeficientas mažėja.

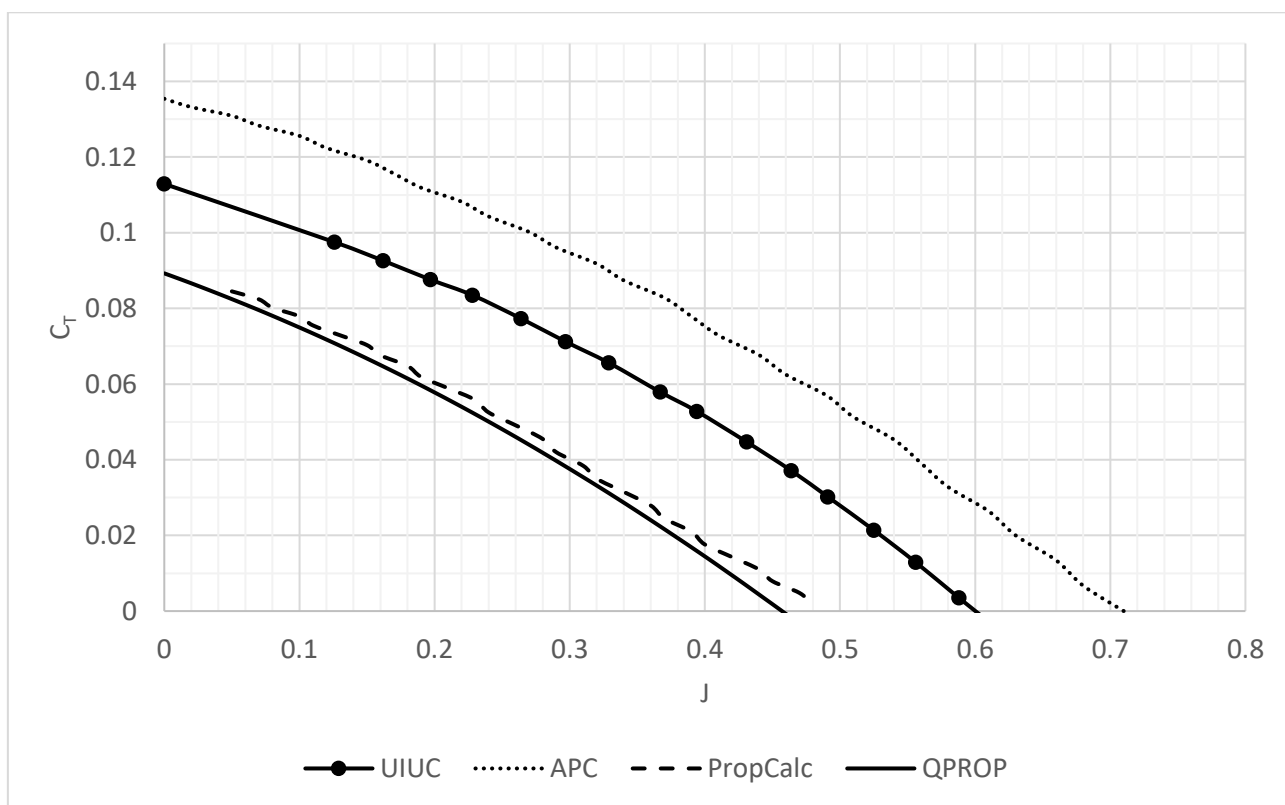


3.4 pav. Propelerio APC Slow Flyer 11x4,7 naudingumo koeficiento priklausomybė nuo santykinės eigos, kai apsakos lygios 4003 per minutę

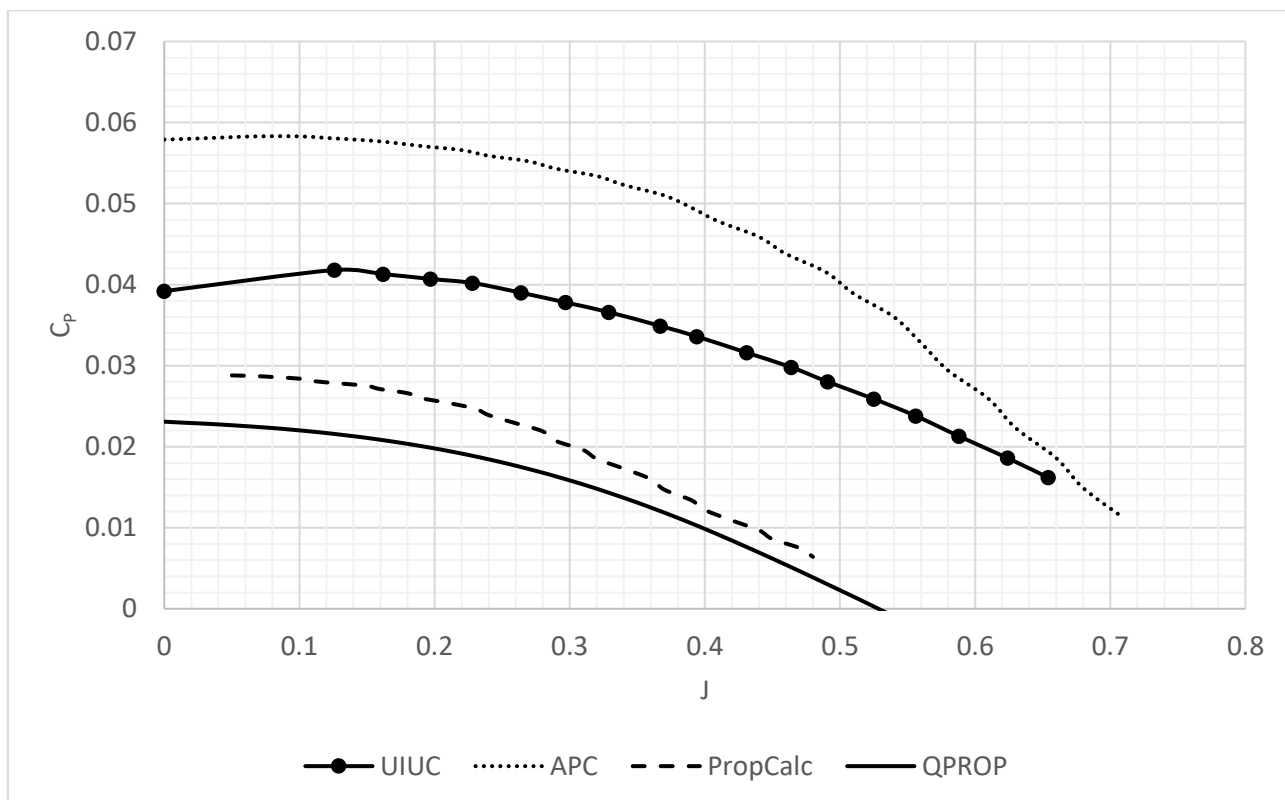
Vertindami rezultatų skirtumus tarp QPROP naudojamų aerodinaminio profilio poliarės aproksimacijų pastebime, kad tiksliausi rezultatai gaunami naudojant II-ąją aproksimaciją. Tiesa, ši kreivė beveik sutampa su I-osios aproksimacijos kreive. Netiksliausi rezultatai gauti naudojant III-ąją aproksimaciją. Galima daryti išvadą, kad aproksimuojant netipines profilių poliarses pakanka naudotis Drelas nurodytu dviejų parabolų šakų metodu, papildomos manipuliacijos poliare, tokios kaip mažiausio pasipriešinimo taškų vidurkinimas, nereikalingas. Kita vertus, panašios I-osios ir II-osios aproksimacijų kreivės sufleruoja, kad poliarės aproksimavimas yra antrinės reikšmės (verta

prisiminti, kaip stipriai skiriasi šių parabolų šakos 3.2 pav., kai $C_L > C_{LCD0}$). Svarbiausia yra apskritai pakankamai tiksliai įvertinti mentės geometriją.

Papildomai naudodamiesi II-ąja aproksimacija palyginsime praktinius ir teorinius traukos bei galios koeficientų skaičiavimų duomenis. Pastarieji pateikiami atitinkamai 3.5 pav. ir 3.6 pav. Kaip matome, tendencija kartojasi: APC gerokai pervertina propelerio charakteristikas, o PropCalc ir QPROP jas įvertina nepakankamai. Viena vertus, žymus teorinių ir eksperimentinių rezultatų nesutapimas sufleruotų trūkumus taikomuose metoduose. Kita vertus, QPROP ir PropCalc rezultatai beveik sutampa, tuo pat metu iš dalies patvirtindami Brandto išvadas (J. B. Brandt, 2005).



3.5 pav. Propelerio APC Slow Flyer 11x4,7 traukos koeficiento priklausomybė nuo santykinės eigos, kai apsukos lygios 4003 per minutę



3.6 pav. Propelerio APC Slow Flyer 11x4,7 galios koeficiento priklausomybė nuo santykinės eigos, kai apskukos lygios 4003 per minutę

Verta pabrėžti, kad ankstesnėse pastraipose aptarti pastebėjimai buvo papildomai patikrinti keičiant pradinius duomenis, pavyzdžiui, XFOIL programoje pakartotinai glotninant aerodinaminį profilį ar profilio poliarei gauti naudojant iki 2,5 karto didesnę Reinoldso skaičių. Taip pat analogiški skaičiavimai atlikti prie kitų propelerio sūkių. Esminiai skirtumai pastebėti nebuvo. 3.2 lentelėje pateikiamos svarbesnės anksčiau aptartų grafikų skaitinės išraiškos.

3.2 lentelė. QPROP, PropCalc, UIUC rezultatų palyginimas

Dydis	Atvejis	QPROP reikšmė	PropCalc reikšmė (skirtumas nuo QPROP reikšmės)	UIUC reikšmė (skirtumas nuo QPROP reikšmės)
η	Maksimali vertė	0,5795	0,62 (+6,99 %)	0,619 (+6,82 %)
	Santykinis žingsnis, prie kurio pasiekama maksimali vertė	0,321877	0,355 (+10,29 %)	0,394 (+22,41 %)
C_T	Vertė prie statinės traukos	0,0893	0,09 (+0,78 %)	0,1129 (+26,43 %)
C_P	Vertė prie statinės traukos	0,0231	0,029 (+25,54 %)	0,0392 (+69,7 %)

Tikslios vertės iš ankstesnės lentelės randamos atitinkamų programų rezultatų lentelėse arba ekstrapoliuojamos iš grafikų.

3.4. Fiktyvaus propelerio įvedimas

Remiantis UIUC pateikiama teorija, kai dydžiai J , C_T , C_P yra žinomi, propelerio trauka T , galia P ir naudingumo koeficientas η gali būti apskaičiuojami atitinkamai pagal tokias formules:

$$T = C_T \rho n^2 d^4; \quad (3.24)$$

$$P = C_P \rho n^3 d^5; \quad (3.25)$$

$$\eta = \frac{J C_T}{C_P}, \quad (3.26)$$

čia ρ – terpės tankis, kg/m^3 ; n – sūkių skaičius per sekundę; d – skersmuo, m .

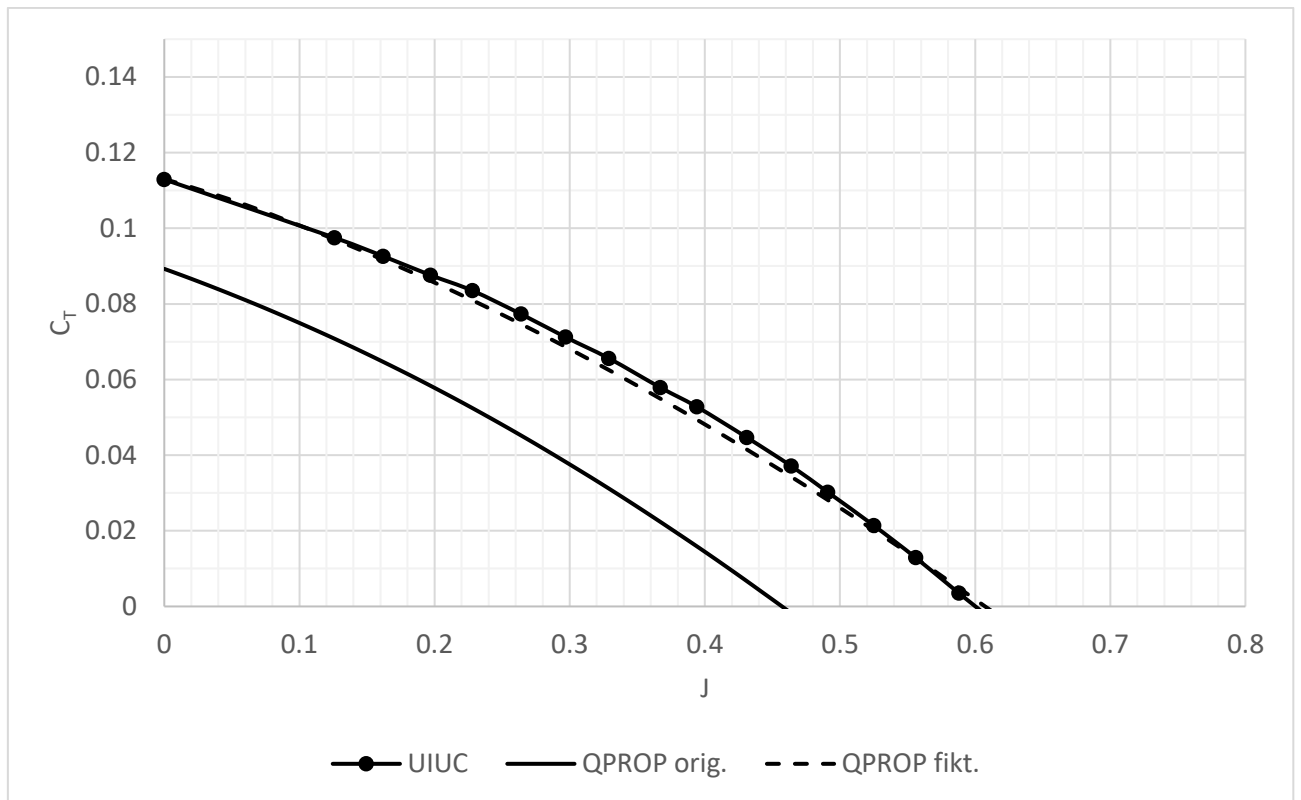
Vertinant propelerio ir variklio sąveikos charakteristikas, atskaitos tašku paprastai tampa reikalinga trauka (1.9 pav.). Deja, praeitame skyrelyje pastebėjome, kad teorinės propelerio charakteristikos, įskaitant koeficientus C_T ir ypač C_P , yra nutolusios nuo realių. Vadinasi, norint tęsti analizę, tenka įsivesti fiktyvų propelerio modelį, kurio charakteristikos sutaptų su minėtomis praktinėmis. Šiam tikslui pasiekti reikia atlikti manipuliacijų seriją QPROP propelerio faile. Keisti propelerio geometrijos negalime, nes tokiu atveju keistųsi ir kitos propelerio savybės. Tačiau galima pakeisti su aerodinaminiu profiliu susijusius koeficientus C_{L0} , C_{LA} , C_{D0} , C_{LCD0} . Šiuo atveju keičiasi jau anksčiau analizuota keliamosios jėgos priklausomybė nuo atakos kampo ir pajuda parabolį, kuria buvo aproksimuota profilio poliarė, viršūnės. Tokioms manipuliacijoms atlikti galima sukurti programinį kodą, kuris naudodamas ciklus ir palyginimus rastų tinkamiausią koeficientų kombinaciją, arba koeficientus galima pakeisti rankiniu būdu. Pastaruoju atveju funkcijos (3.14), (3.21) ir (3.22) atitinkamai virsta funkcijomis:

$$C_L(\alpha) = 5,15 \alpha + 0,545; \quad (3.27)$$

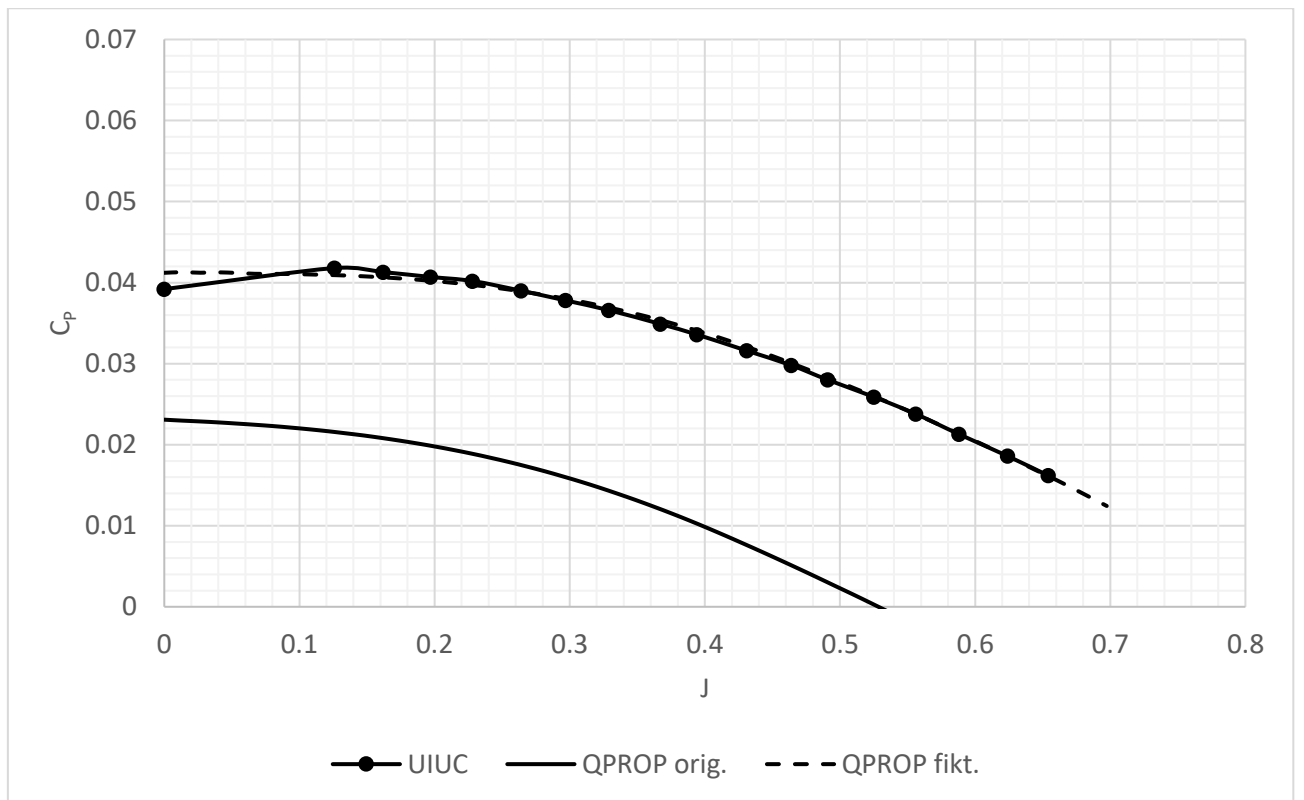
$$C_D(C_L) = 0,15232 C_L^2 - 0,0883456 C_L + 0,0648101; \quad (3.28)$$

$$C_D(C_L) = 0,01564 C_L^2 - 0,0090712 C_L + 0,0533153. \quad (3.29)$$

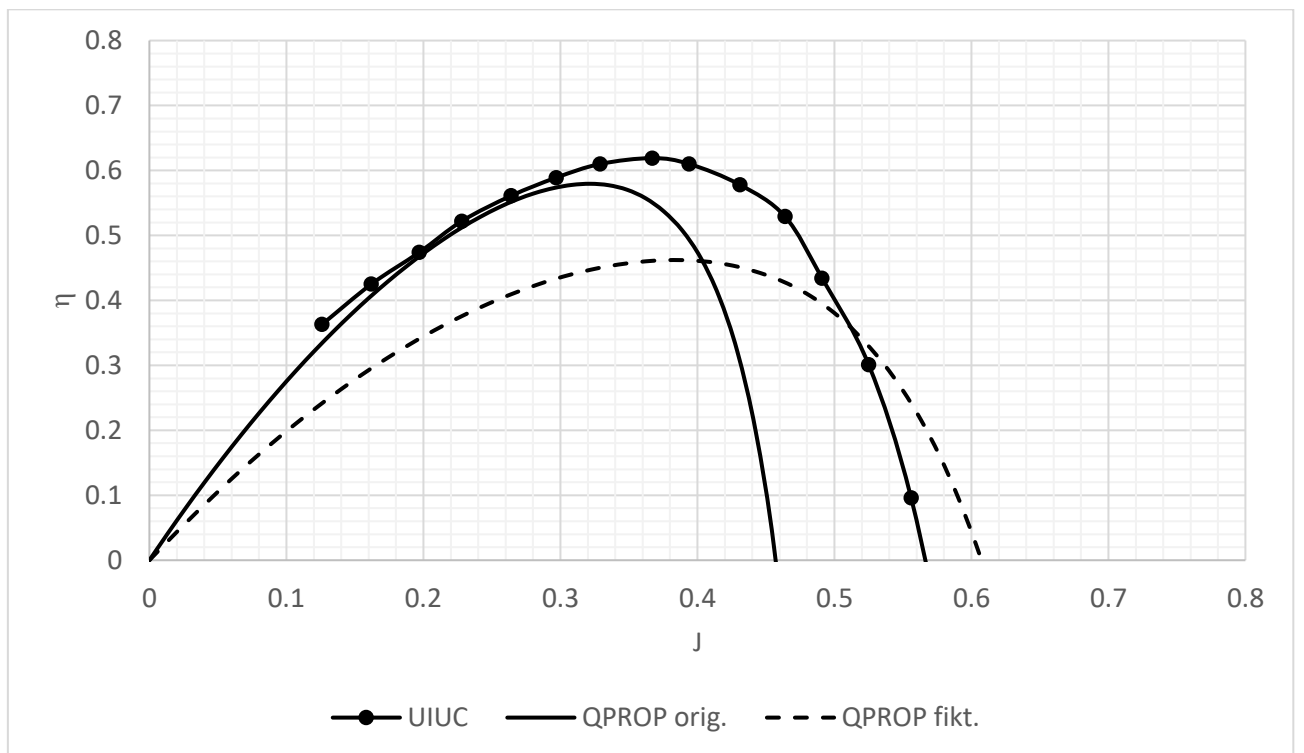
Tuo tarpu 3.5 pav., 3.6 pav. ir 3.4 pav. vaizduotos priklausomybės atrodo taip:



3.7 pav. Fiktyvaus propelerio traukos koeficiento priklausomybė nuo santykinės eigos, kai apskukos lygios 4003 per minutę



3.8 pav. Fiktyvaus propelerio galios koeficiento priklausomybė nuo santykinės eigos, kai apsukos lygios 4003 per minutę



3.9 pav. Fiktyvaus propelerio naudingumo koeficiento priklausomybė nuo santykinės eigos, kai apsukos lygios 4003 per minutę

Pastebime, kad sutapdinus C_T ir C_P kreives, atsiranda žymus η pokytis tarp originalaus ir fiktyvaus propelerio. Tai paaiškinsime tuo, kad QPROP propelerio efektyvumą skaičiuoja ne iš koeficientų, o iš traukos ir galios rezultatų:

$$\eta = \frac{vT}{P}, \quad (3.30)$$

čia v – skrydžio greitis, m/s ; T – propelerio trauka, N ; P – propelerio galia, W .

Detalią skaičiavimo metodiką yra aprašęs pats Drela (Drela, 2006).

Palyginame kai kurias gautas skaitines išraiškas:

3.3 lentelė. QPROP fiktyvaus propelerio ir UIUC rezultatų palyginimas

Dydis	Atvejis	QPROP reikšmė	UIUC reikšmė (skirtumas nuo QPROP reikšmės)
η	Maksimali vertė	0,462	0,619 (+33,98 %)
	Santykinis žingsnis, prie kurio pasiekama maksimali vertė	0,388935	0,394 (+1,3 %)
C_T	Vertė prie statinės traukos	0,113	0,1129 (–0,09 %)
C_P	Vertė prie statinės traukos	0,04121	0,0392 (–4,88 %)

Tikslios vertės iš ankstesnės lentelės, kaip ir 3.2 lentelės atveju, randamos atitinkamų programų rezultatų lentelėse arba ekstrapoliuojamos iš grafikų.

Šiame skyrelyje aptartas fiktyvaus propelerio modelis toliau bus naudojamas tiriant propelerio ir variklio sąveiką.

3.5. Propelerio ir variklio sąveikos analizė

Ankstesniuose skyreliuose tirdami propelerio charakteristikas, programos QPROP įvestyje nenaudojome parametrų, susijusių su varikliu. Tai reiškia, kad iki šiol skaičiavimai buvo atliekami izoliuotam propeleriui. Nuo dabar bus tiriama propelerio ir variklio kombinacija.

Tyrimas atliekamas su nuolatinės srovės elektros varikliu T–MOTOR AT2317 KV880. Būtent šis variklis Vilniaus Gedimino technikos universitete Antano Gustaičio aviacijos institute yra

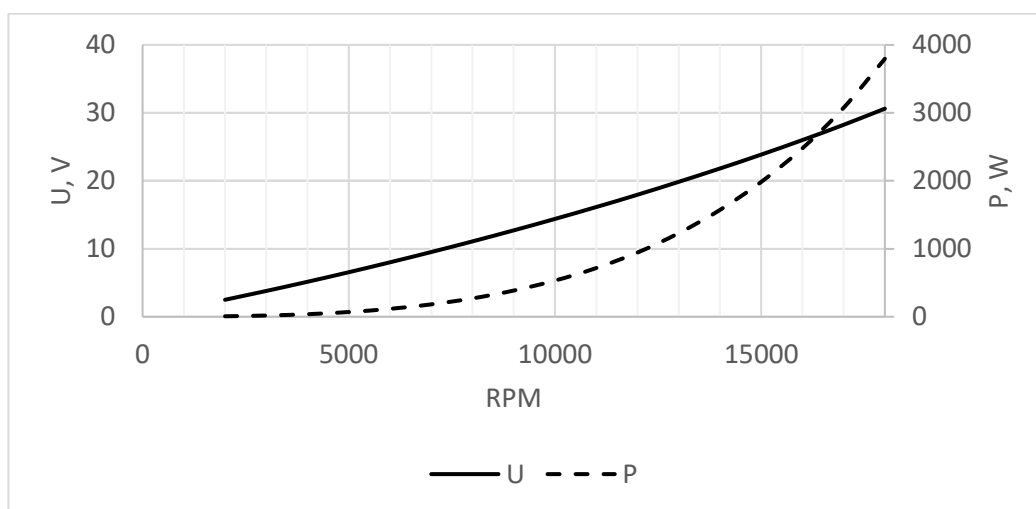
naudojamas derinyje su APC Slow Flyer propeleriais. Toliau pateikiamos pagrindinės pasirinkto variklio specifikacijos:

3.4 lentelė. Pagrindinės variklio T-MOTOR AT2317 KV880 specifikacijos (T-MOTOR, 2020a)

Tuščios eigos srovė	0,9 A
Maksimali galia (3 min)	350 W
Svoris	79 g
Vidinė varža	82 mΩ
Vardinė įtampa (angl. <i>rated voltage</i>)	7,4– 14,8 V
Maksimali srovė (angl. <i>peak current</i>) (3 min)	25 A

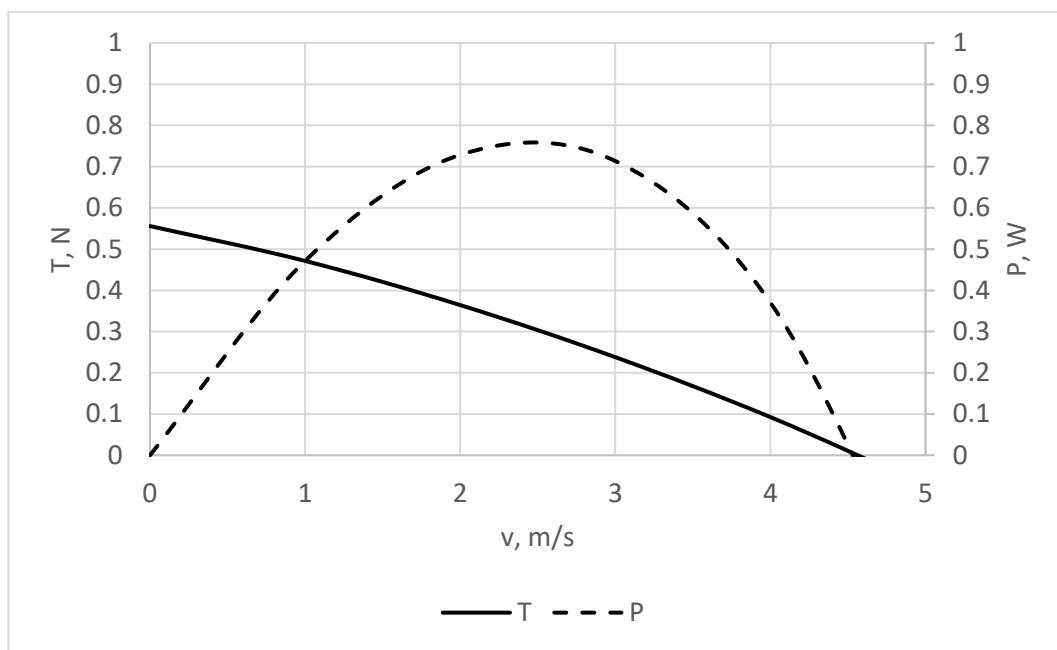
Dalis šių specifikacijų įrašytos į QPROP variklio failą. Kintamasis, kurį naudojame QPROP komandose – įtampa.

APC Slow Flyer 11x4,7 propelerio sūkių intervalas, nurodomas gamintojo, yra 2000–18000 (APC, 2020b). 3.10 pav. pateikiamas reikalingos įtampos ir galios grafikas šių sūkių intervale naudojant T-MOTOR AT2317 KV880 variklį statinės traukos atveju. Iš 3.4 lentelės matome, kad mūsų pasirinktas variklis gali teikti maksimalią 350 W galią ir 14,8 V įtampą. Iš 3.10 pav. matome, kad galimus pasiekti sūkius limituos mūsų pasirinkto variklio galia. Iš QPROP rezultatų 350 W galia bus pasiekama, kai variklio sūkliai bus lygūs 8720 per minutę. Kita vertus, tuo metu viršijamas maksimalios srovės limitas, lygus 25 A. Pastarasis pasiekiamas, kai variklio sūkliai lygūs 8112 per minutę. Tada variklio įtampa bus 11,268 V, galia 281,6 W, o variklis veiks 78,86 % naudingumu. Propeleris tuo metu generuoja 14,64 N statinę trauką. Atkreiptinas dėmesys, kad dinaminės traukos atveju reikalinga variklio galia mažėja, taigi statinės traukos atvejis mums yra kritinis.

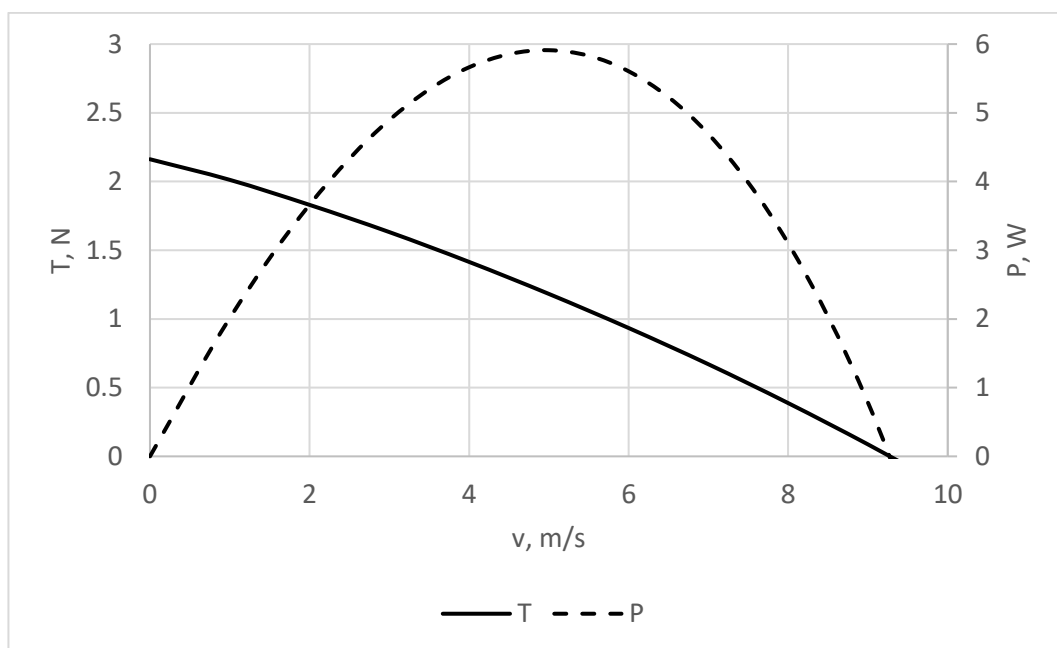


3.10 pav. Reikalinga įtampa ir galia naudojant variklį T-MOTOR AT2317 KV880 statinės traukos atveju

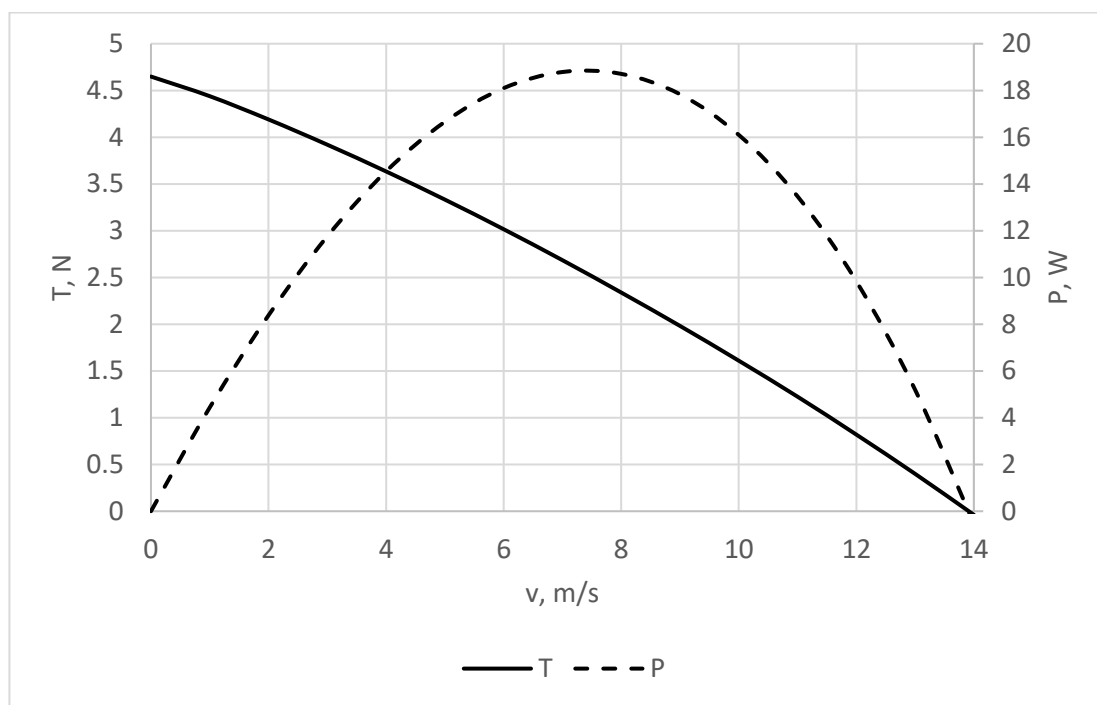
Panagrinėsime, kokią trauką ir galią sukuria propeleris prie skirtingų variklio įtampų. 3.11 pav. – 3.17 pav. pateikiami naudingumo koeficientų grafikai atitinkamai prie 2 V – $14,8\text{ V}$ įtampų. 3.16 pav. ir 3.17 pav. grafikai pateikiami tik nuo tam tikro greičio, nes prie mažesnio greičio sūkius limituoja maksimali variklio srovė arba galia (prisiminkime, kad statinės traukos atveju srovė pasiekia 25 A anksčiau, negu išvystoma 350 W galia).



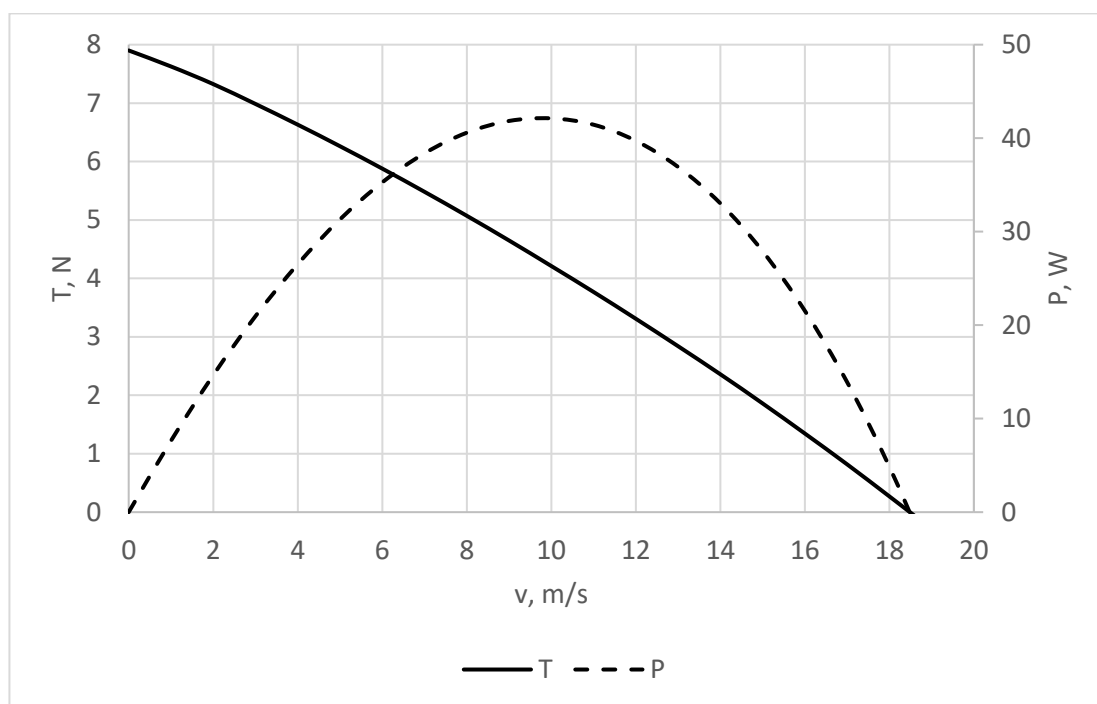
3.11 pav. Propelerio trauka ir galia, kai variklio T-MOTOR AT2317 KV880 įtampa $U = 2\text{ V}$



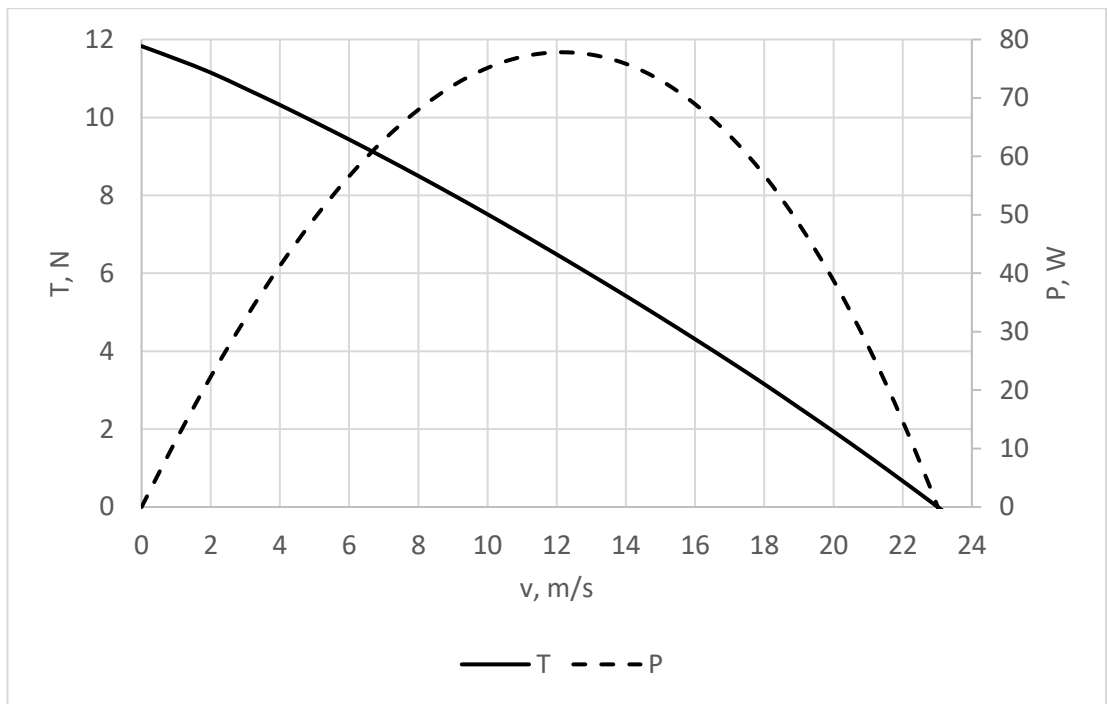
3.12 pav. Propelerio trauka ir galia, kai variklio T-MOTOR AT2317 KV880 įtampa $U = 4\text{ V}$



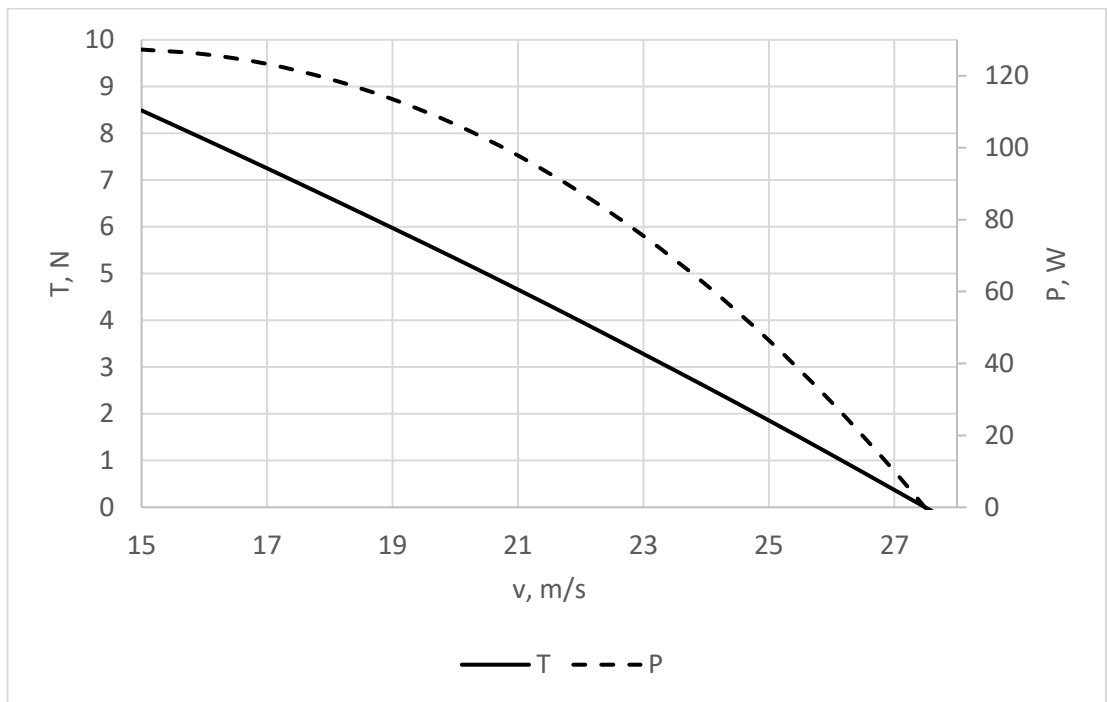
3.13 pav. Propelerio trauka ir galia, kai variklio T–MOTOR AT2317 KV880 įtampa $U = 6\text{ V}$



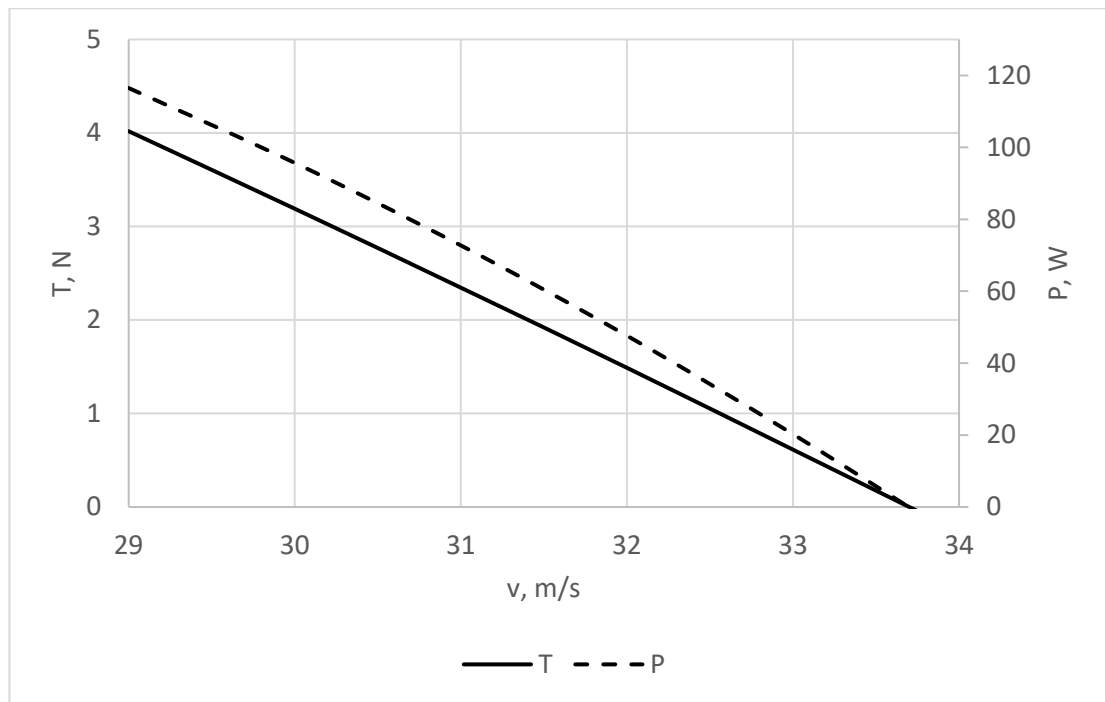
3.14 pav. Propelerio trauka ir galia, kai variklio T–MOTOR AT2317 KV880 įtampa $U = 8\text{ V}$



3.15 pav. Propelerio trauka ir galia, kai variklio T–MOTOR AT2317 KV880 įtampa $U = 10\text{ V}$

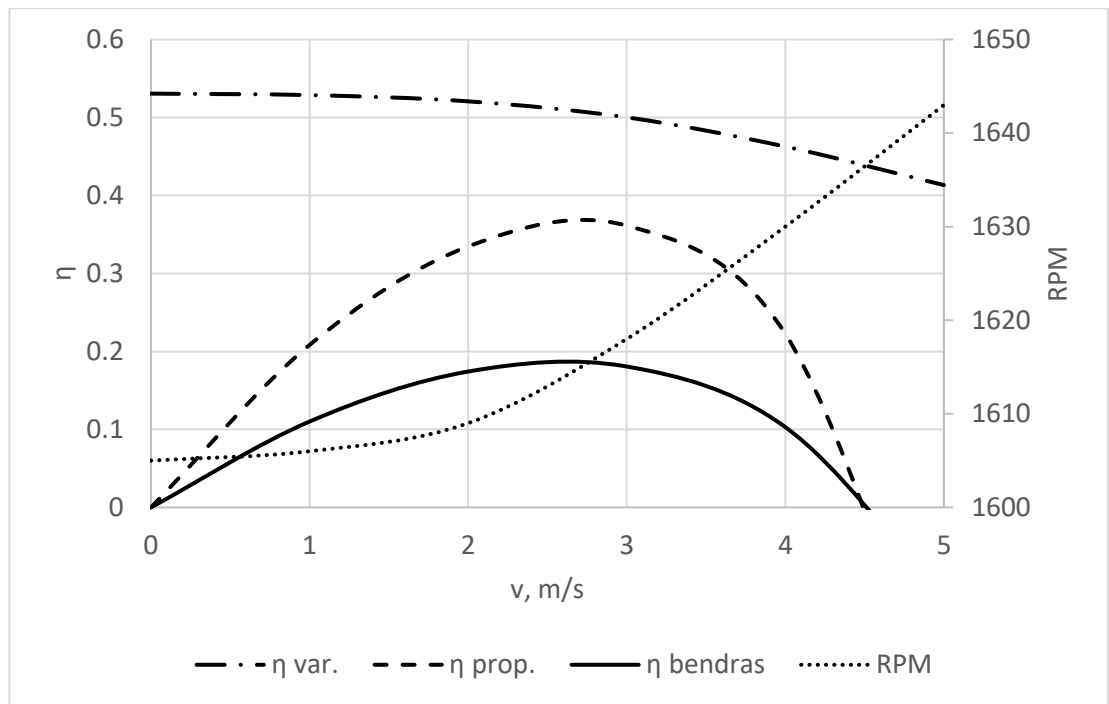


3.16 pav. Propelerio trauka ir galia, kai variklio T–MOTOR AT2317 KV880 įtampa $U = 12\text{ V}$

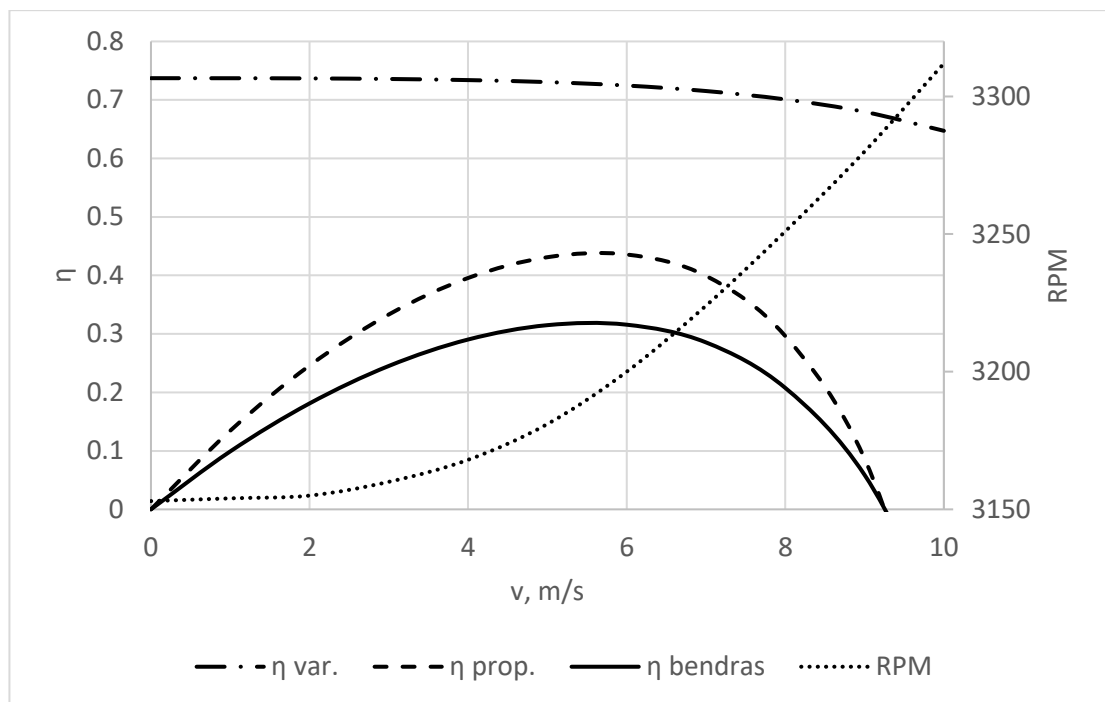


3.17 pav. Propelerio trauka ir galia, kai variklio T–MOTOR AT2317 KV880 įtampa $U = 14,8 V$

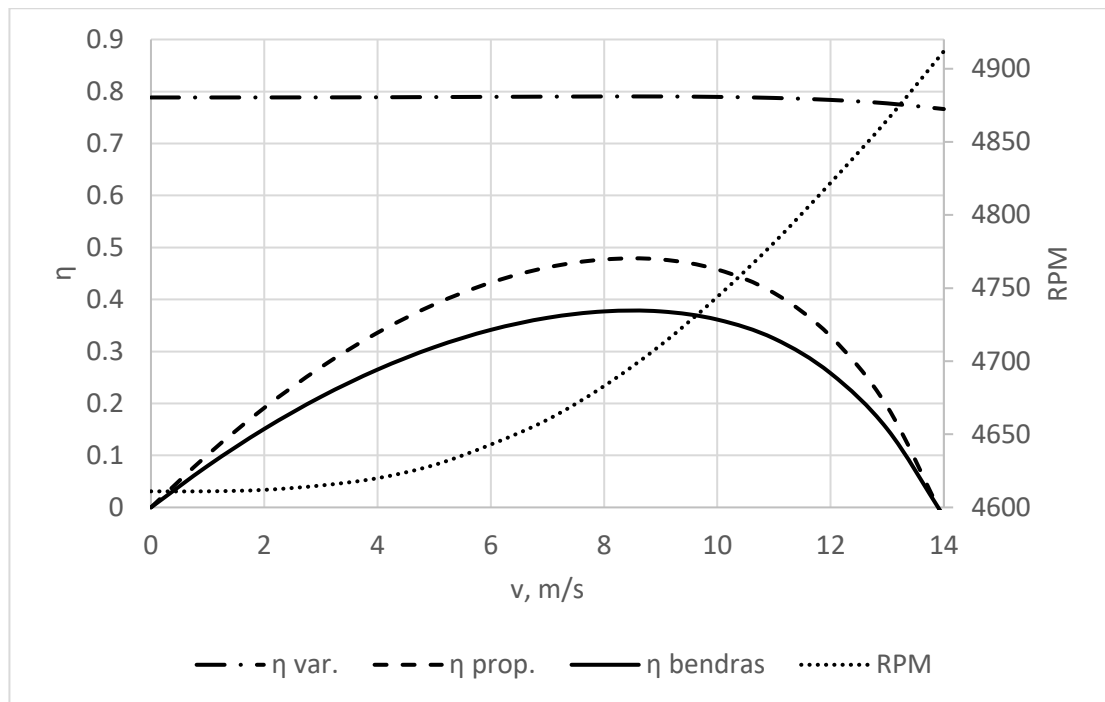
Toliau apžvelgsime, koks prie tų pačių įtampų yra pasirinktos propelerio ir variklio kombinacijos efektyvumas (3.18 pav. – 3.24 pav.). Paveiksluose papildomai vaizduojamos ir apsukos. Kaip matyti, nuo maždaug $4 V$ įtampos variklis pasiekia aukštą naudingumo koeficientą, kuris siekia apytiksliai $0,8$, ir kinta nežymiai tiek didėjant įtampai, tiek didėjant skrydžio greičiui. Tuo tarpu maksimalus propelerio naudingumo koeficientas, o tuo pat metu ir visos sistemos maksimalus naudingumo koeficientas, didėja kylant variklio įtampai, taigi ir propelerio sūkiams. Minėtu atveju intervalas, kuriame propelerio ar sistemos naudingumo koeficientas yra aukštas, plečiasi. Taip pat didėja skrydžio greitis, prie kurio pasiekiami aukšti naudingumo koeficientai. Iš QPROP rezultatų taip pat galime daryti išvadą, kad maksimalus teorinis tiesaus skrydžio greitis, kurį įmanoma išvystyti naudojant šią propelerio ir variklio kombinaciją, yra $33,7 m/s$, o tuo metu pasiekiami sūkių greičiai yra 11780 per minutę.



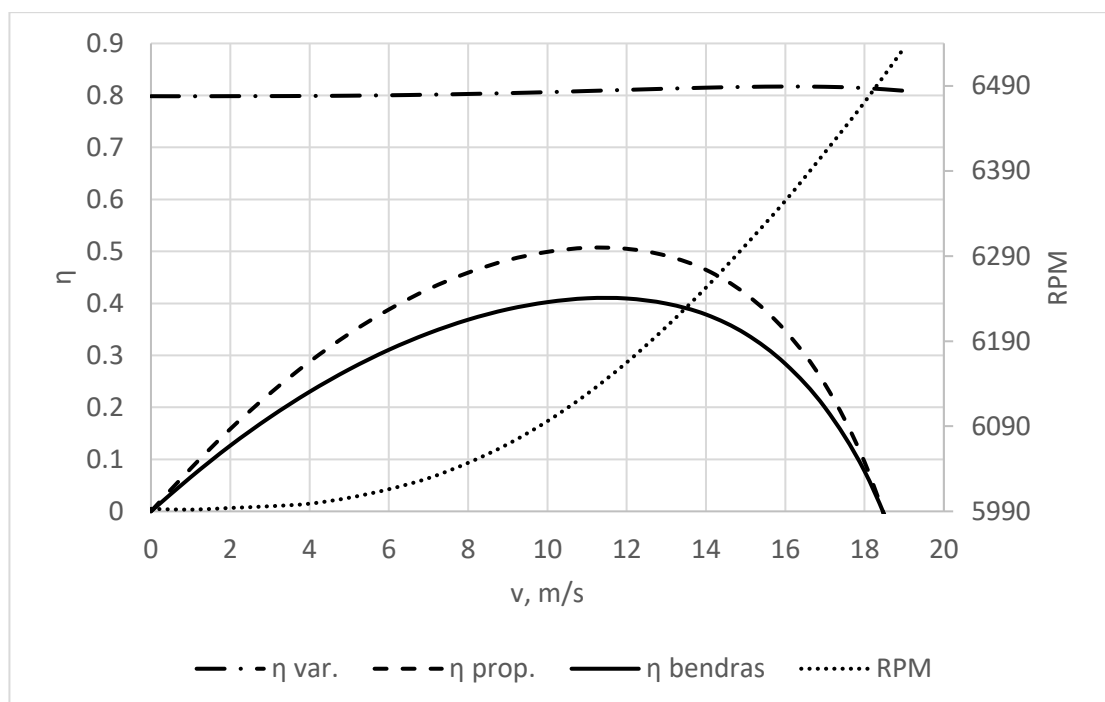
3.18 pav. Naudingumo koeficientai, kai variklio T-MOTOR AT2317 KV880 įtampa $U = 2\text{ V}$



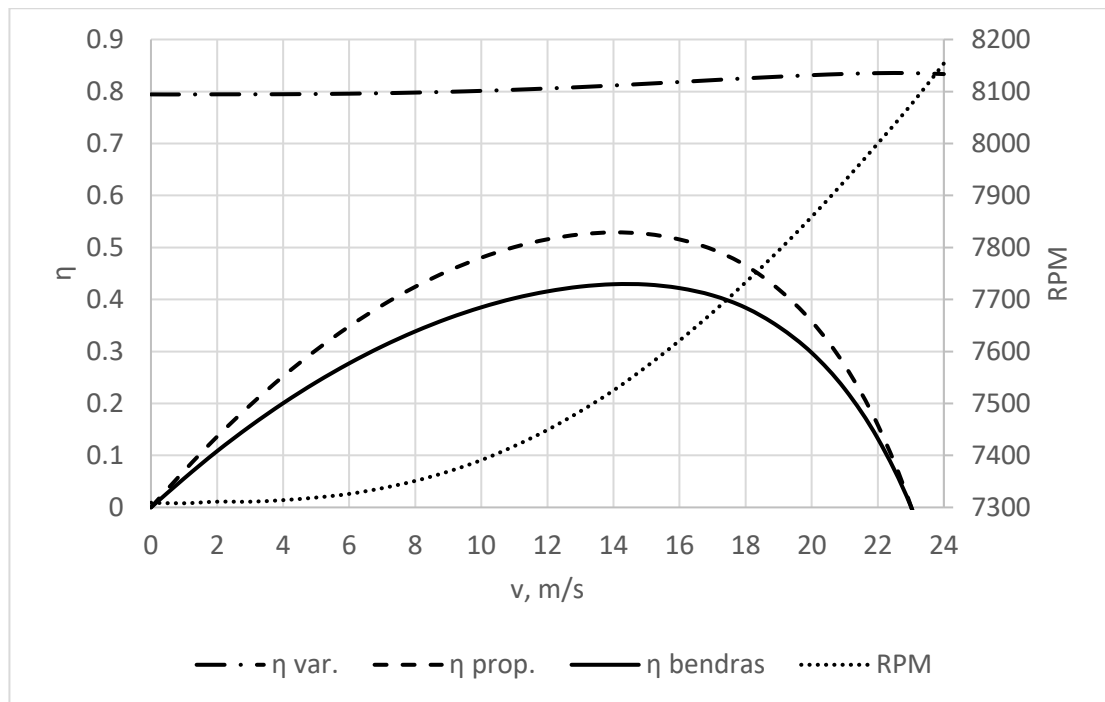
3.19 pav. Naudingumo koeficientai, kai variklio T-MOTOR AT2317 KV880 įtampa $U = 4\text{ V}$



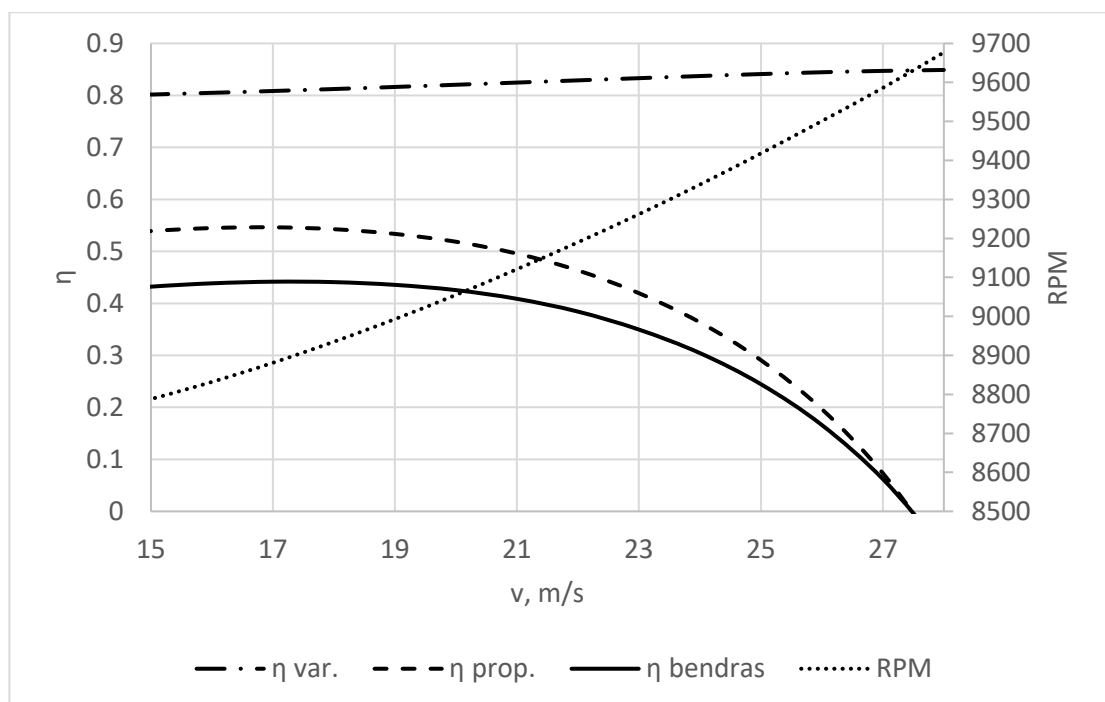
3.20 pav. Naudingumo koeficientai, kai variklio T-MOTOR AT2317 KV880 įtampa $U = 6V$



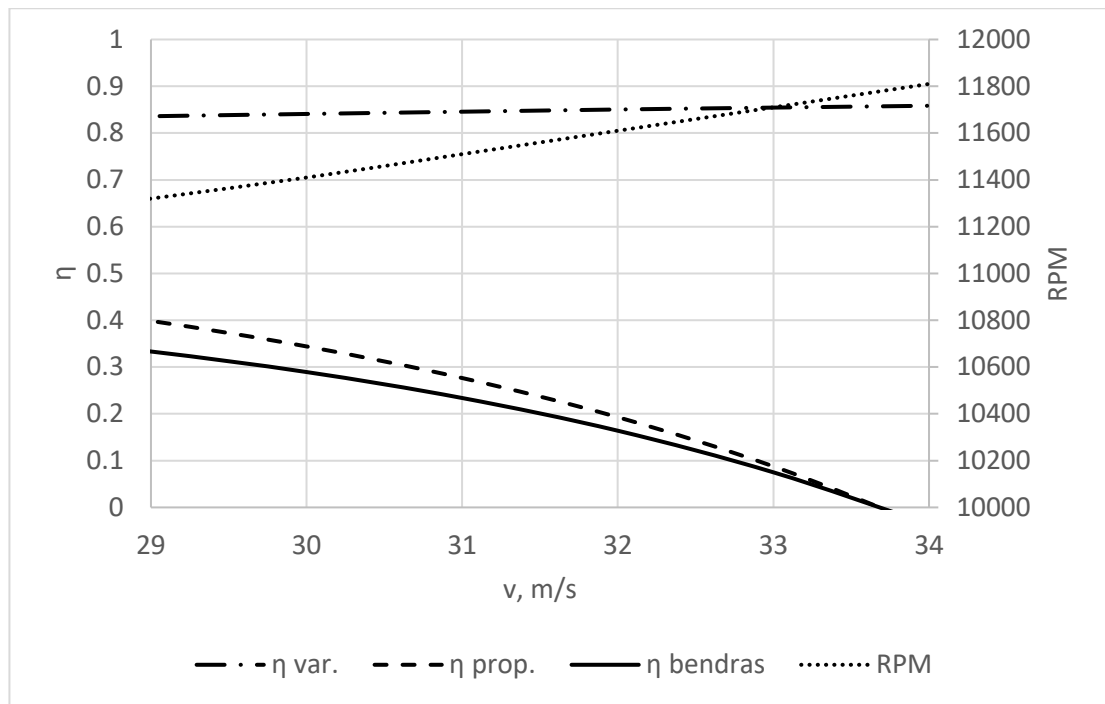
3.21 pav. Naudingumo koeficientai, kai variklio T-MOTOR AT2317 KV880 įtampa $U = 8V$



3.22 pav. Naudingumo koeficientai, kai variklio T-MOTOR AT2317 KV880 įtampa $U = 10\text{ V}$

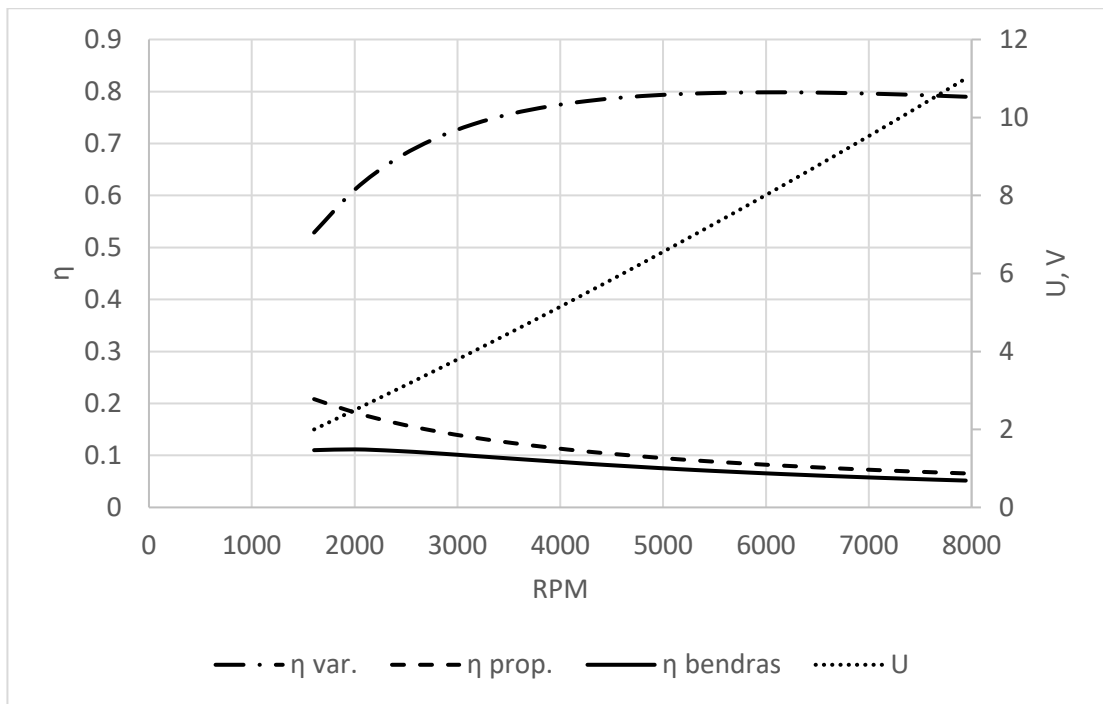


3.23 pav. Naudingumo koeficientai, kai variklio T-MOTOR AT2317 KV880 įtampa $U = 12\text{ V}$

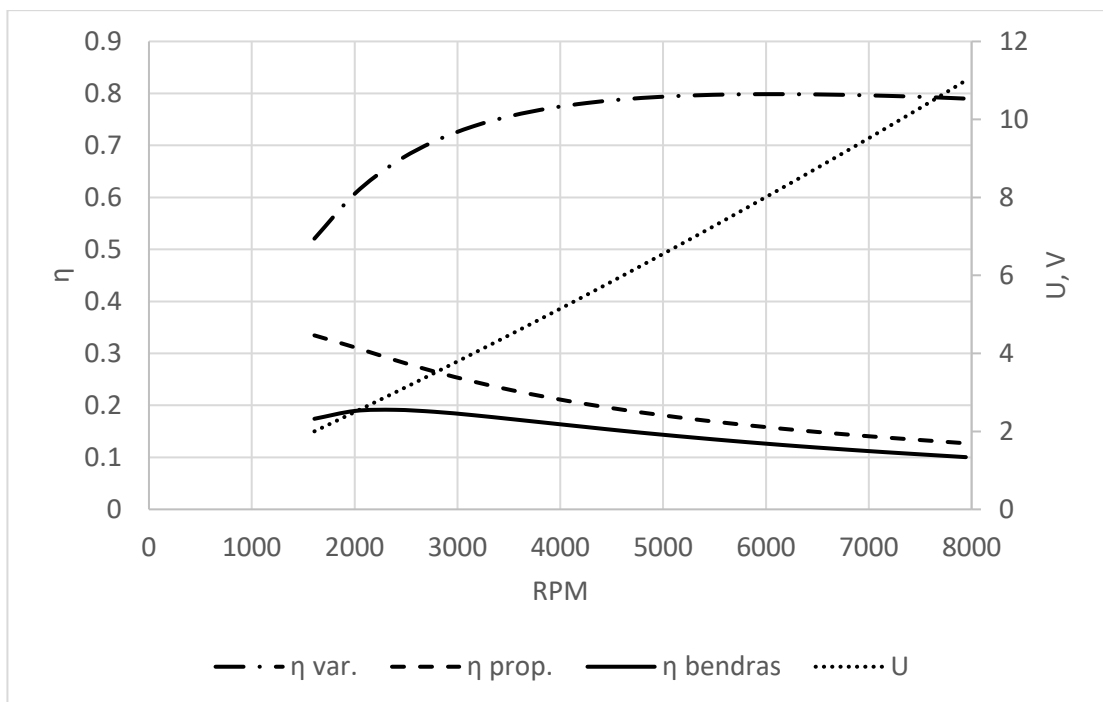


3.24 pav. Naudingumo koeficientai, kai variklio T-MOTOR AT2317 KV880 įtampa $U = 14,8 V$

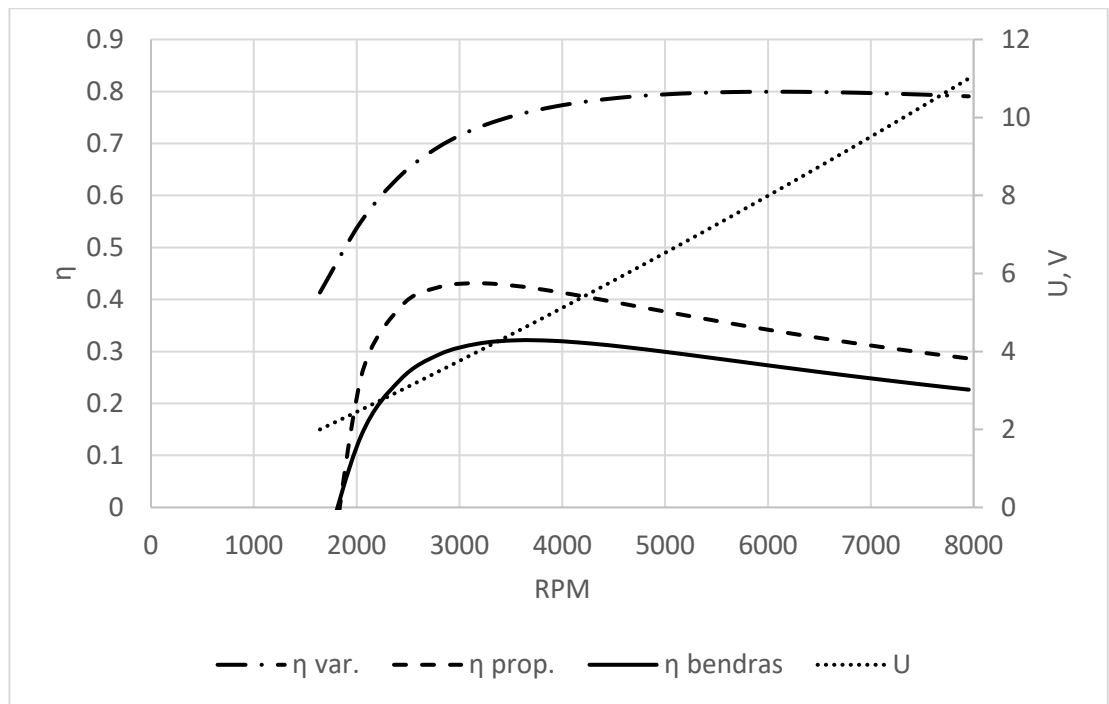
Dabar palyginsime, kaip propelerio ir variklio efektyvumas kinta esant pastoviam skrydžio greičiui. 3.25 pav. – 3.29 pav. pateikiami naudingumo koeficientų grafikai atitinkamai prie $1 m/s - 20 m/s$ greičių. Pastebėjimai panašūs, kaip ir iš grafikų, kur abscisių ašyje pažymėtas greitis: mūsų tiriamas variklis yra labai efektyvus itin plačiuose sūkių intervaluose. Didėjant skrydžio greičiui, didėja ir būdingi sūkliai, tačiau trumpėja jų režis – visus grafikus riboja pasiekiamą maksimali galima variklio srovė.



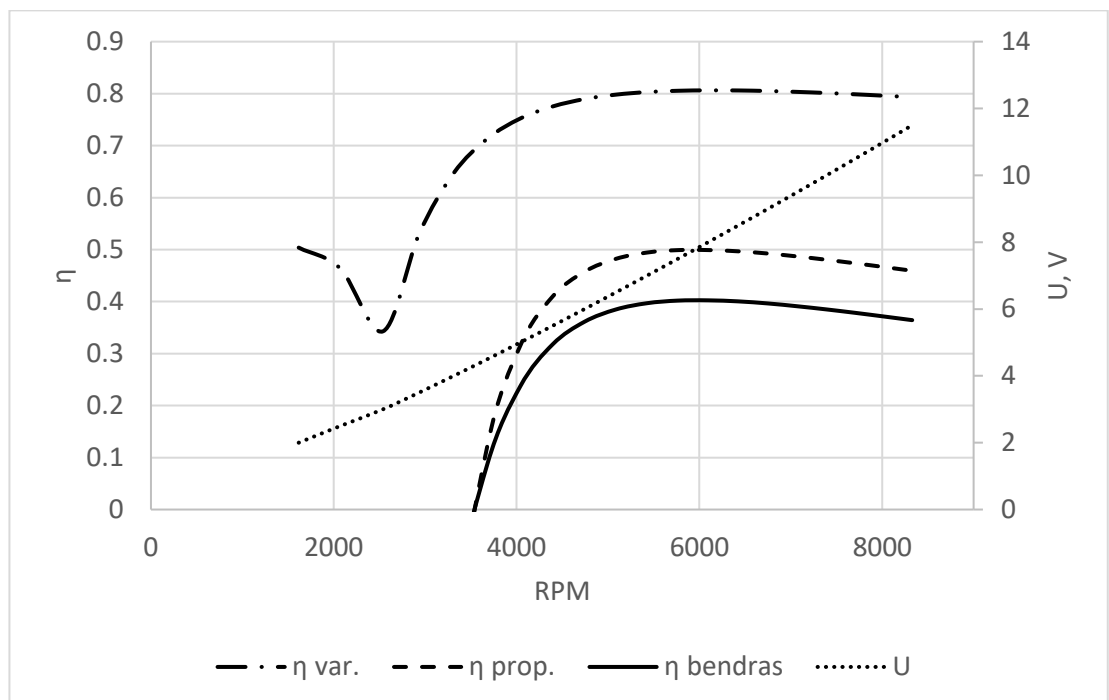
3.25 pav. Naudingumo koeficientai, kai skrydžio greitis $v = 1 \text{ m/s}$



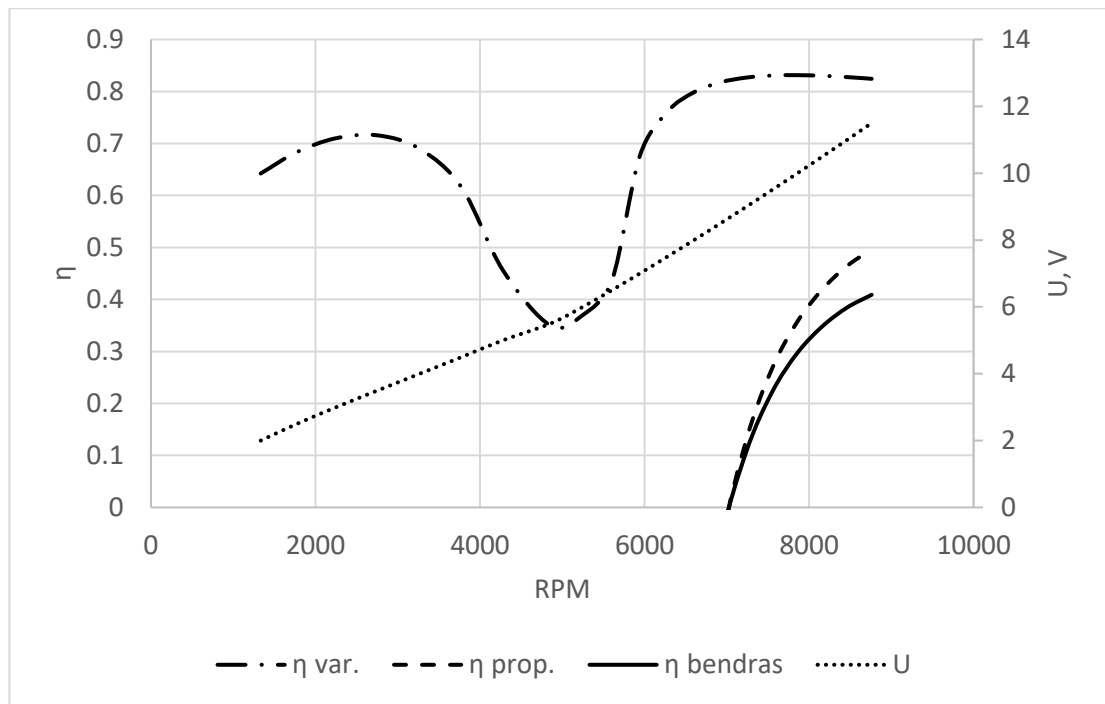
3.26 pav. Naudingumo koeficientai, kai skrydžio greitis $v = 2 \text{ m/s}$



3.27 pav. Naudingumo koeficientai, kai skrydžio greitis $v = 5 \text{ m/s}$



3.28 pav. Naudingumo koeficientai, kai skrydžio greitis $v = 10 \text{ m/s}$



3.29 pav. Naudingumo koeficientai, kai skrydžio greitis $v = 20 \text{ m/s}$

Apibendrinami surinktus duomenis galime daryti išvadą, kad propeleris APC Slow Flyer 11x4,7 su varikliu T-MOTOR AT2317 KV880 sąveikauja gana efektyviai. Maksimalus visos sistemos efektyvumas siekia 44,5 %. Jis pasiekiamas prie didžiausios galimos variklio srovės (25 A), kai variklio įtampa lygi 12,7 V, o skrydžio greitis yra 18,5 m/s. Didžiausia efektyvumo dedamoji – efektyvus variklis, beveik visais darbiniais režimais išvystantis apie 80 % efektyvumą. Kita vertus, pastebėjome, kad neišnaudojamos visos propelerio galimybės: gamintojo nurodyti maksimalūs galimi sūkliai yra 18000 per minutę, o mūsų pasiekiami sūkliai tėra 8112 statinės traukos atveju ir 11780 dinaminės traukos atveju. Taip pat statinės traukos atveju negalima varikliui duoti maksimalios įtampos – tekanti srovė dėl per didelės apkrovos viršija maksimalią leistiną. Taigi statinės traukos atveju įtampa neturėtų viršyti 11,268 V. Vis dėlto propelerio APC Slow Flyer 11x4,7 kombinacija su galingesniu varikliu nebūtinai leistų efektyviau išnaudoti šių agregatų galimybes – efektyvus variklis dideliems skrydžio greičiams ir didelėms apsakoms būtų neefektyvus mažiems skrydžio greičiams ir mažoms apsakoms. Tokią tendenciją galima pastebėti palyginant 3.18 pav. ir 3.19 pav. efektyvumo kreives. Taip pat reikia atminti, kad galingesnis variklis daugiau sveria, jo energijos sąnaudos irgi žymiai išauga. Iš 3.10 pav. matyti, kad statinės traukos atveju, kai propelerio sūkliai lygūs 18000 per minutę, sukuriama galia lygi beveik 4 kW. Norint absorbuoti tokią galią, reikalingas panašaus maksimalaus galingumo variklis. T-MOTOR gamintojas produkcijoje turi kitą mūsų tirtos serijos variklį AT 5230-B KV200, pastarojo charakteristikų palyginimas pateikiamas toliau.

3.5 lentelė. Pagrindinių variklių T-MOTOR AT2317 KV880 ir T-MOTOR AT5230-B KV200 charakteristikų ir kainos palyginimas (T-MOTOR, 2020a, 2020b)

Tuščios eigos srovė	0,9 A	2,7 A
Maksimali galia (3 min)	350 W	3500 W
Svoris	79 g	610 g
Vidinė varža	82 mΩ	22 mΩ
Vardinė įtampa (angl. <i>rated voltage</i>)	7,4– 14,8 V	22,2– 44,4 V
Maksimali srovė (angl. <i>peak current</i>) (3 min)	25 A	75 A
Kaina	39,99 USD	199 USD

Kaip matome, 10 kartų galingesnio variklio svoris padidėja beveik 8 kartus, kaina – 5 kartus. Ar investicija į papildomą galią atperka nuostolius, patiriamus dėl didelio svorio, išsiaiškinti turėtų jau pačių bepiločių orlaivių projektuotojai.

IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS

Darbe atlikta propelerio APC Slow Flyer 11x4,7 ir nuolatinės srovės elektros variklio T-MOTOR AT2317 KV880 charakteristikų skaitinė analizė. Padarytos tokios išvados:

1. Propelerio APC Slow Flyer 11x4,7 ir variklio T-MOTOR AT2317 KV880 sistema yra efektyvi, tačiau neišnaudojama potenciali propelerio galia. Norint įvertinti, ar verta minėtą propelerį derinti su galingesniu varikliu, reikia atlikti ne tik tokios kombinacijos charakteristikų analizę, bet ir platesnį bepiločio orlaivio tyrimą.
2. Gamintojas APC pateikia teorines produkto charakteristikas, akivaizdžiai viršijančias realias ar kitais būdais apskaičiuotas teorines.
3. Pasitvirtino mokslininkų pastebėjimas, kad praktiniu būdu gauti propelerio charakteristikų dydžiai yra didesni nei teoriniai. Manome, kad toks skirtumas atsiranda todėl, kad teorinėse prielaidose mentės aptekėjimas yra plokščias, o iš tiesų – kreivas, taip pat prisideda išcentrinės jėgos.
4. Programa QPROP leidžia lanksčiai įvertinti teorines pasirinkto propelerio ir variklio charakteristikas. Kita vertus, QPROP kodas turi tirtinų trūkumų, nes teorinės charakteristikos žymiai nesutampa su praktinėmis.
5. Skirtingas aerodinaminio profilio poliarės aproksimavimas QPROP programoje nedaro lemiamos įtakos rezultatams. Vis dėlto kreivių aprašymas aukštesnių laipsnių polinomais arba, idealiu atveju, XFOIL ir QPROP programų kodų sintezė pagerintų skaičiavimų tikslumą.

Arnas Piltanas

LITERATŪROS SĄRAŠAS

- Airfoil Tools. (2020). *MA409 (smoothed)*. <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=ma409sm-il>
- APC. (2020a). Technical Information – Downloads. *APC Propellers*.
<https://www.apcprop.com/technical-information/file-downloads/>
- APC. (2020b). Technical Information – Performance Data. *APC Propellers*.
<https://www.apcprop.com/technical-information/performance-data/>
- Barreiro, A., Domínguez, J. M., C. Crespo, A. J., González-Jorge, H., Roca, D., & Gómez-Gesteira, M. (2014). Integration of UAV Photogrammetry and SPH Modelling of Fluids to Study Runoff on Real Terrains. *PLoS ONE*, 9(11), 1–11.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111031>
- Brandt, J. B. (2005). *Small-scale propeller performance at low speeds*. 479.
- Brandt, J., & Selig, M. (2011, sausio 4). Propeller Performance Data at Low Reynolds Numbers. *49th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*. 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando, Florida. <https://doi.org/10.2514/6.2011-1255>
- Bronz, M., Moschetta, J.-M., & Hattenberger, G. (2012). *Multi-Point Optimisation of a Propulsion Set as Applied to a Multi-Tasking MAV*. 15.
- Bručas, D. (2012). *Propeleriai*. Vilnius Gediminas Technical University.
- Capitao Patrao, A., Grönstedt, T., Avellán, R., & Lundbladh, A. (2018). Wake energy analysis method applied to the Boxprop propeller concept. *Aerospace Science and Technology*, 79, 689–700. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2018.06.018>
- Deters, R. W., Ananda Krishnan, G. K., & Selig, M. S. (2014, birželio 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>
- Drela, M. (2005). *DC Motor / Propeller Matching*. 6.
- Drela, M. (2006). *QPROP Formulation*.
http://web.mit.edu/drela/Public/web/qprop/qprop_theory.pdf
- Drela, M. (2007a). *First-Order DC Electric Motor Model*. 3.
- Drela, M. (2007b). *QPROP*. <http://web.mit.edu/drela/Public/web/qprop/>
- Drela, M., & Youngren, H. (2013). *XFOIL*. <http://web.mit.edu/drela/Public/web/xfoil/>
- Dubbioso, G., Muscari, R., Ortolani, F., & Di Mascio, A. (2017). Analysis of propeller bearing loads by CFD. Part I: Straight ahead and steady turning maneuvers. *Ocean Engineering*, 130, 241–259. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.12.004>
- Ehrich, S., Schwarz, C., Rahimi, H., Stoevesandt, B., & Peinke, J. (2018). Comparison of the Blade Element Momentum Theory with Computational Fluid Dynamics for Wind Turbine Simulations in Turbulent Inflow. *Applied Sciences*, 8(12), 2513.
<https://doi.org/10.3390/app8122513>
- Engineering ToolBox. (2020). *Engineering ToolBox*. <https://www.engineeringtoolbox.com/>
- Huang, B., & Kanemoto, T. (2015). Performance and internal flow of a counter-rotating type tidal stream turbine. *Journal of Thermal Science*, 24(5), 410–416.
<https://doi.org/10.1007/s11630-015-0803-1>

- Koenhardono, E. S., Prananda, J., & Danian, E. (2017). Analysis of Engine Propeller Matching of DC Motor as a Main Propulsion. *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*, 2(1). <https://doi.org/10.12962/j25481479.v2i1.2702>
- Lam, W.-H., Chen, L., & Hashim, R. (2015). Analytical wake model of tidal current turbine. *Energy*, 79, 512–521. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.11.047>
- Luo, D., Huang, D., & Wu, G. (2011). Analytical solution on Magnus wind turbine power performance based on the blade element momentum theory. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 3(3), 033104. <https://doi.org/10.1063/1.3588039>
- Marques, C. H., Belchior, C. R. P., & Caprace, J.-D. (2018). Optimising the engine-propeller matching for a liquefied natural gas carrier under rough weather. *Applied Energy*, 232, 187–196. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.155>
- Nishi, Y., Yamashita, Y., & Inagaki, T. (2016). Study on the rotor design method for a small propeller-type wind turbine. *Journal of Thermal Science*, 25(4), 355–362. <https://doi.org/10.1007/s11630-016-0871-x>
- Nishino, T. (2018). *Generalisation of the two-scale momentum theory for coupled wind turbine/farm optimisation*. 6.
- Ortolani, F., Dubbioso, G., Muscari, R., Mauro, S., & Di Mascio, A. (2018). Experimental and Numerical Investigation of Propeller Loads in Off-Design Conditions. *Journal of Marine Science and Engineering*, 6(2), 45. <https://doi.org/10.3390/jmse6020045>
- Pavel, H., Jan, K., & Nikola, Ž. (2018). Wing and propeller aerodynamic interaction through nonlinear lifting line theory and blade element momentum theory. *MATEC Web of Conferences*, 233, 00027. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823300027>
- Reviol, T., Kluck, S., & Böhle, M. (2018). A new design method for propeller mixers agitating non-Newtonian fluid flow. *Chemical Engineering Science*, 190, 320–332. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.06.033>
- Reviol, T., Kluck, S., Etringer, G., Wang, P., & Böhle, M. (2018). Investigation of propeller mixer for agitation of non-Newtonian fluid flow to predict the characteristics within the design process. *Chemical Engineering Science*, 191, 420–435. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.05.028>
- Richmond-Navarro, G., Calderon-Munoz, W. R., LeBoeuf, R., & Castillo, P. (2017). A Magnus Wind Turbine Power Model Based on Direct Solutions Using the Blade Element Momentum Theory and Symbolic Regression. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 8(1), 425–430. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2016.2604082>
- Roca, D., Lagüela, S., Díaz-Vilariño, L., Armesto, J., & Arias, P. (2013). Low-cost aerial unit for outdoor inspection of building façades. *Automation in Construction*, 36, 128–135. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.08.020>
- Sánchez-Aparicio, L. J., Riveiro, B., González-Aguilera, D., & Ramos, L. F. (2014). The combination of geomatic approaches and operational modal analysis to improve calibration of finite element models: A case of study in Saint Torcato Church (Guimarães, Portugal). *Construction and Building Materials*, 70, 118–129. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.106>
- Schenk, H. (2020). *Propeller Calculator*. <http://www.drivecalc.de/PropCalc/>
- Selig, M. S., & Ananda, G. (2015). *Low Reynolds Number Propeller Performance Data: Wind Tunnel Corrections for Motor Fixture Drag*. 4.

- Somerville, A., Marino, M., Baxter, G., & Wild, G. (2016). Understanding box wing aircraft: Essential technology to improve sustainability in the aviation industry. *Aviation*, 20(3), 129–136. <https://doi.org/10.3846/16487788.2016.1195076>
- Stapersma, D., & Woud, H. (2005). Matching propulsion engine with propulsor. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 4(2), 25–32. <https://doi.org/10.1080/20464177.2005.11020189>
- Sun, Z., Chen, J., Shen, W. Z., & Zhu, W. J. (2016). Improved blade element momentum theory for wind turbine aerodynamic computations. *Renewable Energy*, 96, 824–831. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.035>
- Tang, J., Hu, Y., Song, B., & Yang, H. (2018). An unsteady free wake model for aerodynamic performance of cycloidal propellers. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 232(2), 290–307. <https://doi.org/10.1177/0954410016678431>
- T–MOTOR. (2020a). *AT2317 – Specifications*. <http://store-en.tmotor.com/goods.php?id=789>
- T–MOTOR. (2020b). *AT5230–B – Specifications*. <http://store-en.tmotor.com/goods.php?id=951>
- UIUC. (2015). *UIUC Propeller Database – Volume 1*. <https://m-selig.ae.illinois.edu/props/volume-1/propDB-volume-1.html>
- Woodward III, J. B. (1976). *Matching Engine and Propeller*. The University of Michigan.
- Zhang, C., Chen, H.-P., & Huang, T.-L. (2018). Fatigue damage assessment of wind turbine composite blades using corrected blade element momentum theory. *Measurement*, 129, 102–111. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.06.045>

PRIEDAI

Profilio MA409 koordinatės					
Nr.	x	z	Nr.	x	z
1	1	0.00034	41	0.00098	-0.00302
2	0.99754	0.00094	42	0.00548	-0.00664
3	0.9907	0.00259	43	0.01338	-0.00968
4	0.98037	0.00498	44	0.02433	-0.01213
5	0.96698	0.00793	45	0.03811	-0.014
6	0.95044	0.01136	46	0.05468	-0.01527
7	0.93064	0.01521	47	0.07395	-0.0159
8	0.90775	0.01937	48	0.09576	-0.01589
9	0.88202	0.02373	49	0.11999	-0.01527
10	0.8537	0.02817	50	0.14648	-0.01416
11	0.82309	0.03261	51	0.17504	-0.01264
12	0.79048	0.03694	52	0.20549	-0.01081
13	0.75616	0.04112	53	0.2376	-0.00875
14	0.72043	0.04505	54	0.2712	-0.00653
15	0.68359	0.04869	55	0.30609	-0.00421
16	0.64594	0.05198	56	0.34204	-0.00186
17	0.60778	0.05486	57	0.37887	0.00039
18	0.56937	0.05732	58	0.41638	0.00245
19	0.53099	0.05933	59	0.45435	0.00422
20	0.49265	0.06089	60	0.49265	0.00565
21	0.45435	0.06202	61	0.53099	0.00674
22	0.41638	0.0627	62	0.56937	0.00754
23	0.37887	0.06291	63	0.60778	0.00808
24	0.34204	0.0626	64	0.64594	0.00837
25	0.30609	0.06172	65	0.68359	0.00844
26	0.2712	0.06025	66	0.72043	0.0083
27	0.2376	0.05819	67	0.75616	0.00798
28	0.20549	0.05555	68	0.79048	0.00749
29	0.17504	0.05234	69	0.82309	0.00687
30	0.14648	0.04859	70	0.8537	0.00613
31	0.11999	0.04433	71	0.88202	0.00529
32	0.09576	0.03961	72	0.90775	0.00439
33	0.07395	0.0345	73	0.93064	0.00347
34	0.05468	0.02913	74	0.95044	0.00256
35	0.03811	0.02369	75	0.96698	0.0017
36	0.02433	0.01831	76	0.98037	0.00093
37	0.01338	0.01305	77	0.9907	0.00028
38	0.00548	0.00797	78	0.99754	-0.00018
39	0.00098	0.00318	79	1	-0.00036
40	0	-0.00004			

XFOIL rezultatų lentelė, kai $Re = 75000$, $N_{crit} = 9$						
alpha	CL	CD	CDp	CM	Top_Xtr	Bot_Xtr
-10	-0.4323	0.12536	0.11925	-0.0179	1	0.0905
-9.9	-0.4325	0.12474	0.11865	-0.0187	1	0.0917
-9.8	-0.434	0.12448	0.11842	-0.0197	1	0.0928
-9.7	-0.4365	0.12453	0.11851	-0.021	1	0.0936
-9.6	-0.4396	0.12474	0.11875	-0.0223	1	0.0942
-9.5	-0.4428	0.12488	0.11894	-0.0236	1	0.0947
-9.4	-0.4454	0.12485	0.11895	-0.0247	1	0.095
-9.3	-0.4478	0.12467	0.1188	-0.0256	1	0.0952
-9.2	-0.45	0.12437	0.11854	-0.0265	1	0.0953
-9.1	-0.4523	0.12397	0.11818	-0.0272	1	0.0955
-9	-0.4547	0.1235	0.11775	-0.0278	1	0.0956
-8.9	-0.4572	0.12298	0.11727	-0.0283	1	0.0957
-8.8	-0.4591	0.12232	0.11665	-0.0292	1	0.0957
-8.7	-0.4265	0.11056	0.10475	-0.0244	1	0.099
-8.6	-0.4196	0.10849	0.10267	-0.0235	1	0.1003
-8.5	-0.415	0.1069	0.10108	-0.023	1	0.1016
-8.4	-0.4117	0.10555	0.09974	-0.0228	1	0.1029
-8.3	-0.4092	0.10431	0.09851	-0.0226	1	0.1042
-8.2	-0.4073	0.10316	0.09738	-0.0226	1	0.1056
-8.1	-0.406	0.10207	0.0963	-0.0226	1	0.107
-8	-0.4052	0.10104	0.0953	-0.0226	1	0.1084
-7.9	-0.4051	0.10008	0.09436	-0.0227	1	0.1099
-7.8	-0.4056	0.0992	0.09352	-0.0228	1	0.1114
-7.7	-0.4072	0.09846	0.09282	-0.023	1	0.113
-7.6	-0.4101	0.09793	0.09233	-0.0231	1	0.1145
-7.5	-0.415	0.09769	0.09214	-0.0233	1	0.1158
-7.4	-0.4209	0.09779	0.09231	-0.0243	1	0.1171
-7.3	-0.4256	0.09826	0.09285	-0.0274	1	0.1184
-7.2	-0.4278	0.09857	0.09319	-0.0313	1	0.1192
-7.1	-0.4275	0.0983	0.09293	-0.0345	1	0.1196
-7	-0.4263	0.09766	0.09229	-0.0373	1	0.1199
-6.9	-0.4263	0.09468	0.08937	-0.0372	1	0.1205
-6.8	-0.4256	0.09084	0.08558	-0.0332	1	0.1216
-6.7	-0.4223	0.08851	0.08327	-0.0299	1	0.1228
-6.6	-0.4183	0.08666	0.08123	-0.0272	1	0.1243
-6.5	-0.4151	0.08524	0.07982	-0.0259	1	0.1256
-6.4	-0.4123	0.08396	0.07856	-0.025	1	0.1271
-6.3	-0.4099	0.08277	0.07738	-0.0245	1	0.1286
-6.2	-0.4078	0.08161	0.07625	-0.0243	1	0.1304
-6.1	-0.4059	0.08047	0.07512	-0.0244	1	0.1323
-6	-0.4039	0.07934	0.07401	-0.0248	1	0.1344

-5.9	-0.4018	0.07822	0.0729	-0.0258	1	0.1369
-5.8	-0.3987	0.07723	0.07192	-0.0281	1	0.1405
-5.7	-0.3855	0.07808	0.07255	-0.043	1	0.1469
-5.6	-0.3869	0.07459	0.06917	-0.0406	1	0.148
-5.5	-0.3862	0.07241	0.06704	-0.0386	1	0.149
-5.4	-0.3842	0.07073	0.06541	-0.0367	1	0.1501
-5.3	-0.3817	0.06929	0.064	-0.0353	1	0.1513
-5.2	-0.3786	0.06797	0.06269	-0.0341	1	0.1528
-5.1	-0.3749	0.06669	0.06143	-0.0334	1	0.1545
-5	-0.3706	0.06544	0.06018	-0.0331	1	0.1565
-4.9	-0.3656	0.06415	0.05889	-0.0333	1	0.1592
-4.8	-0.3595	0.06281	0.05754	-0.0342	1	0.1623
-4.7	-0.3381	0.06108	0.05553	-0.045	1	0.1771
-4.6	-0.3349	0.05904	0.05353	-0.0441	1	0.1783
-4.5	-0.3307	0.05731	0.05184	-0.0433	1	0.1795
-4.4	-0.3256	0.05577	0.05032	-0.0427	1	0.181
-4.3	-0.3193	0.05427	0.04882	-0.0425	1	0.1827
-4.2	-0.3123	0.05284	0.04737	-0.0426	1	0.1849
-4.1	-0.306	0.0524	0.04692	-0.043	1	0.2116
-4	-0.2745	0.04751	0.04162	-0.0515	1	0.1703
-3.9	-0.2192	0.03553	0.02798	-0.0654	1	0.0956
-3.8	-0.2061	0.03293	0.0252	-0.0667	1	0.0946
-3.7	-0.1924	0.03093	0.02296	-0.0678	1	0.094
-3.6	-0.1786	0.0293	0.02106	-0.0687	1	0.0938
-3.5	-0.1648	0.02792	0.0194	-0.0694	1	0.0941
-3.4	-0.1514	0.02679	0.018	-0.0699	1	0.0948
-3.3	-0.1379	0.02574	0.0167	-0.0703	1	0.096
-3.2	-0.1232	0.02391	0.01471	-0.0714	1	0.0991
-3.1	-0.1113	0.02315	0.01394	-0.0717	1	0.1032
-3	-0.0994	0.0226	0.0133	-0.0718	1	0.1086
-2.9	-0.0868	0.02204	0.01259	-0.0719	1	0.115
-2.8	-0.0747	0.02143	0.01195	-0.0723	1	0.126
-2.7	-0.0649	0.02139	0.01198	-0.0722	1	0.1389
-2.6	-0.0515	0.02069	0.01115	-0.0726	1	0.1508
-2.5	-0.0397	0.02022	0.01076	-0.0727	1	0.164
-2.4	-0.0265	0.0196	0.01007	-0.073	1	0.1809
-2.3	-0.016	0.01951	0.01002	-0.073	1	0.2028
-2.2	-0.0052	0.01915	0.0098	-0.0731	1	0.2257
-2.1	0.0066	0.01874	0.00943	-0.0732	1	0.248
-2	0.0175	0.01866	0.0093	-0.0732	1	0.2716
-1.9	0.0282	0.01837	0.00918	-0.0732	1	0.2958
-1.8	0.0394	0.0181	0.00897	-0.0733	1	0.3189
-1.7	0.0503	0.01797	0.00882	-0.0733	1	0.3438
-1.6	0.0609	0.01773	0.00872	-0.0733	1	0.3698
-1.5	0.072	0.01749	0.00856	-0.0733	1	0.3973
-1.4	0.0836	0.01726	0.00824	-0.0734	1	0.4276

-1.3	0.095	0.01701	0.00811	-0.0735	1	0.4636
-1.2	0.1066	0.01669	0.00797	-0.0736	1	0.5077
-1.1	0.1184	0.01629	0.00784	-0.0736	1	0.5701
-1	0.1268	0.01553	0.00773	-0.0726	1	0.6935
-0.9	0.1192	0.01496	0.00763	-0.0685	1	1
-0.8	0.1312	0.01507	0.00749	-0.0689	1	1
-0.7	0.1419	0.01519	0.00744	-0.0691	1	1
-0.6	0.1522	0.01531	0.00743	-0.0691	1	1
-0.5	0.1622	0.01543	0.00744	-0.0692	1	1
-0.4	0.1722	0.01556	0.00747	-0.0692	1	1
-0.3	0.1819	0.0157	0.00752	-0.0692	1	1
-0.2	0.1916	0.01584	0.00758	-0.0692	1	1
-0.1	0.2012	0.01599	0.00766	-0.0691	1	1
0	0.2107	0.01614	0.00775	-0.0691	1	1
0.1	0.2201	0.0163	0.00785	-0.0691	1	1
0.2	0.2295	0.01646	0.00796	-0.069	1	1
0.3	0.2387	0.01664	0.00809	-0.069	1	1
0.4	0.2479	0.01682	0.00823	-0.069	1	1
0.5	0.2569	0.01701	0.00838	-0.0689	1	1
0.6	0.266	0.01721	0.00855	-0.0689	1	1
0.7	0.2749	0.01741	0.00872	-0.0689	1	1
0.8	0.2837	0.01763	0.00892	-0.0689	1	1
0.9	0.2925	0.01785	0.00912	-0.0688	1	1
1	0.3012	0.01809	0.00934	-0.0688	1	1
1.1	0.3098	0.01833	0.00957	-0.0688	1	1
1.2	0.3183	0.01859	0.00981	-0.0688	1	1
1.3	0.3266	0.01886	0.01007	-0.0688	1	1
1.4	0.3349	0.01914	0.01034	-0.0688	1	1
1.5	0.3431	0.01943	0.01063	-0.0688	1	1
1.6	0.3598	0.01974	0.01093	-0.0704	0.9969	1
1.7	0.3824	0.02005	0.01123	-0.0731	0.9915	1
1.8	0.4027	0.02031	0.0115	-0.0753	0.9851	1
1.9	0.4264	0.0206	0.01179	-0.078	0.9806	1
2	0.4438	0.0208	0.01202	-0.0796	0.973	1
2.1	0.4675	0.02103	0.01227	-0.0823	0.9681	1
2.2	0.4836	0.0212	0.01246	-0.0835	0.96	1
2.3	0.5057	0.02135	0.01265	-0.0858	0.9539	1
2.4	0.526	0.0215	0.01284	-0.0877	0.9478	1
2.5	0.541	0.0216	0.01299	-0.0886	0.9392	1
2.6	0.5646	0.02166	0.0131	-0.0909	0.9334	1
2.7	0.5809	0.02174	0.01322	-0.0919	0.9255	1
2.8	0.5973	0.02176	0.01344	-0.0929	0.9166	1
2.9	0.6214	0.0217	0.01346	-0.0951	0.9109	1
3	0.6371	0.02172	0.01353	-0.0958	0.9028	1
3.1	0.6513	0.02169	0.01356	-0.0962	0.8932	1
3.2	0.6744	0.02148	0.01344	-0.098	0.8868	1

3.3	0.7014	0.02119	0.01325	-0.1004	0.8823	1
3.4	0.7051	0.02131	0.01341	-0.0989	0.8692	1
3.5	0.7262	0.02101	0.01321	-0.1002	0.8618	1
3.6	0.7507	0.02057	0.01287	-0.1017	0.8564	1
3.7	0.7618	0.0205	0.01288	-0.1013	0.8461	1
3.8	0.7755	0.02031	0.01277	-0.1012	0.8357	1
3.9	0.7964	0.01984	0.01241	-0.102	0.8285	1
4	0.8164	0.01941	0.01208	-0.1026	0.8211	1
4.1	0.823	0.01944	0.01219	-0.1014	0.8069	1
4.2	0.8411	0.01901	0.01185	-0.1016	0.7974	1
4.3	0.8591	0.01861	0.01154	-0.1017	0.7877	1
4.4	0.8669	0.0186	0.01161	-0.1006	0.7722	1
4.5	0.8846	0.01815	0.01123	-0.1006	0.76	1
4.6	0.8937	0.01798	0.01111	-0.0993	0.7412	1
4.7	0.9076	0.01739	0.01047	-0.0979	0.717	1
4.8	0.916	0.01707	0.01007	-0.0959	0.6862	1
4.9	0.9228	0.01696	0.00986	-0.094	0.6526	1
5	0.9302	0.01697	0.00979	-0.0925	0.6208	1
5.1	0.9383	0.01707	0.01015	-0.0912	0.5917	1
5.2	0.9454	0.01722	0.01019	-0.0898	0.5576	1
5.3	0.9506	0.01747	0.01024	-0.0881	0.5131	1
5.4	0.9543	0.01789	0.01032	-0.0863	0.4579	1
5.5	0.9561	0.0185	0.01055	-0.0842	0.3828	1
5.6	0.9514	0.02008	0.01107	-0.0815	0.2279	1
5.7	0.95	0.02214	0.0122	-0.0795	0.1357	1
5.8	0.9545	0.02334	0.01317	-0.0781	0.1145	1
5.9	0.9612	0.02417	0.01398	-0.0771	0.1031	1
6	0.9661	0.02544	0.0151	-0.0759	0.0954	1
6.1	0.9749	0.02592	0.01568	-0.0752	0.087	1
6.2	0.9812	0.02665	0.01629	-0.0747	0.0775	1
6.3	0.9884	0.02769	0.0173	-0.0739	0.071	1
6.4	0.9978	0.02848	0.01816	-0.0733	0.0672	1
6.5	1.0073	0.02936	0.01907	-0.0727	0.0639	1
6.6	1.017	0.03031	0.02002	-0.0722	0.0614	1
6.7	1.0271	0.03138	0.0211	-0.0718	0.0594	1
6.8	1.0378	0.03265	0.02238	-0.0716	0.0579	1
6.9	1.049	0.03413	0.02391	-0.0713	0.0569	1
7	1.06	0.03571	0.02558	-0.0711	0.0563	1
7.1	1.0705	0.03726	0.02726	-0.0707	0.056	1
7.2	1.0803	0.03868	0.02882	-0.0703	0.0559	1
7.3	1.0896	0.03999	0.03028	-0.0697	0.0561	1
7.4	1.0984	0.0412	0.03167	-0.0691	0.0563	1
7.5	1.1068	0.04236	0.03303	-0.0683	0.0568	1
7.6	1.1147	0.04353	0.03443	-0.0675	0.0575	1
7.7	1.122	0.04485	0.03603	-0.0665	0.0585	1
7.8	1.1285	0.04649	0.03796	-0.0654	0.0598	1

7.9	1.1321	0.04835	0.04019	-0.0641	0.0614	1
8	1.1349	0.05033	0.04249	-0.0629	0.0631	1
8.1	1.1372	0.05236	0.04479	-0.0617	0.0647	1
8.2	1.1392	0.05443	0.04707	-0.0606	0.0663	1
8.3	1.1408	0.05654	0.04937	-0.0596	0.0678	1
8.4	1.1419	0.05872	0.05171	-0.0587	0.0692	1
8.5	1.1426	0.0611	0.05421	-0.0579	0.0707	1
8.6	1.143	0.06396	0.05715	-0.0573	0.0721	1
8.7	1.1545	0.06448	0.05792	-0.0563	0.0778	1
8.8	1.1384	0.06719	0.06116	-0.0542	0.0819	1
8.9	1.1302	0.06998	0.06417	-0.0532	0.0851	1
9	1.1251	0.07262	0.06693	-0.0524	0.0879	1
9.1	1.1221	0.07537	0.06974	-0.052	0.0907	1
9.4	1.084	0.08299	0.07792	-0.0504	0.1058	1
9.5	1.0719	0.08525	0.08023	-0.0502	0.107	1
9.6	1.06	0.08755	0.08258	-0.0505	0.1078	1
9.7	1.0484	0.08994	0.085	-0.0511	0.1084	1
9.8	1.0367	0.09263	0.08772	-0.0523	0.1091	1
9.9	1.0255	0.09556	0.09068	-0.0539	0.1098	1
10	1.0158	0.09884	0.09397	-0.0558	0.1117	1

Propelerio APC Slow Flyer 11x4,7 geometrija (UIUC, 2015)		
r/R	c/R	beta
0.15	0.112	19.64
0.2	0.137	21.81
0.25	0.16	22.45
0.3	0.181	21.88
0.35	0.198	20.73
0.4	0.211	19.14
0.45	0.221	17.3
0.5	0.227	15.58
0.55	0.23	14.06
0.6	0.228	12.71
0.65	0.222	11.53
0.7	0.213	10.47
0.75	0.199	9.53
0.8	0.181	8.63
0.85	0.158	7.71
0.9	0.132	6.61
0.95	0.084	5.28
1	0.035	3.93

Propelerio APC Slow Flyer 11x4,7 charakteristikos, kai RPM = 4000 (APC, 2020)							
V (mph)	J	Pe	Ct	Cp	PWR (Hp)	Torque (In-Lbf)	Thrust (Lbf)
0	0	0	0.1354	0.0579	0.048	0.756	1.011
1	0.02	0.0559	0.1332	0.058	0.048	0.758	0.994
2	0.05	0.1095	0.1309	0.0582	0.048	0.76	0.977
3	0.07	0.1608	0.1283	0.0583	0.048	0.761	0.958
4	0.1	0.2098	0.1256	0.0583	0.048	0.761	0.937
5	0.12	0.2563	0.1224	0.0581	0.048	0.759	0.914
6	0.15	0.3005	0.1191	0.0578	0.048	0.756	0.888
7	0.17	0.3423	0.1156	0.0575	0.048	0.751	0.862
8	0.19	0.3817	0.1119	0.0571	0.047	0.746	0.835
9	0.22	0.4188	0.1082	0.0566	0.047	0.739	0.807
10	0.24	0.4536	0.1043	0.0559	0.046	0.731	0.778
11	0.27	0.486	0.1002	0.0552	0.046	0.721	0.748
12	0.29	0.5162	0.0961	0.0543	0.045	0.71	0.717
13	0.32	0.5441	0.0918	0.0534	0.044	0.697	0.685
14	0.34	0.5694	0.0874	0.0523	0.043	0.683	0.652
15	0.37	0.5923	0.0828	0.051	0.042	0.667	0.618
16	0.39	0.613	0.0779	0.0495	0.041	0.647	0.582
17	0.41	0.6312	0.0729	0.0478	0.04	0.624	0.544
18	0.44	0.647	0.0677	0.0459	0.038	0.599	0.506
19	0.46	0.6597	0.0625	0.0438	0.036	0.572	0.466
20	0.49	0.6686	0.057	0.0415	0.034	0.542	0.426
21	0.51	0.6733	0.0513	0.0389	0.032	0.508	0.383
22	0.54	0.6735	0.0453	0.036	0.03	0.47	0.338
23	0.56	0.6674	0.0391	0.0328	0.027	0.428	0.292
24	0.58	0.6515	0.0328	0.0294	0.024	0.384	0.245
25	0.61	0.6204	0.0264	0.0259	0.021	0.339	0.197
26	0.63	0.5658	0.02	0.0223	0.019	0.292	0.149
27	0.66	0.4726	0.0134	0.0186	0.015	0.243	0.1
28.4	0.68	0.3079	0.0067	0.0149	0.012	0.194	0.05
29.4	0.71	-0.0012	0	0.0112	0.009	0.146	0

Propelerio APC Slow Flyer 11x4,7 charakteristikos, kai RPM = 4003 (UIUC, 2015)			
J	CT	CP	eta
0.126	0.0975	0.0418	0.295
0.162	0.0926	0.0413	0.363
0.197	0.0876	0.0407	0.425
0.228	0.0835	0.0402	0.474
0.264	0.0773	0.039	0.522
0.297	0.0712	0.0378	0.561
0.329	0.0656	0.0366	0.589
0.367	0.0579	0.0349	0.61
0.394	0.0528	0.0336	0.619
0.431	0.0447	0.0316	0.61
0.464	0.0371	0.0298	0.578
0.491	0.0302	0.028	0.529
0.525	0.0214	0.0259	0.434
0.556	0.0129	0.0238	0.301
0.588	0.0035	0.0213	0.096
0.624	-0.0068	0.0186	-0.228
0.654	-0.0156	0.0162	-0.632

Pavyzdinė PropCalc rezultatų lentelė (RPM = 4003)							
J	CT	CP	eta	Thr [N]	P [W]	v [m/s]	Re 0.7
0.05	0.0845	0.0288	0.15	2.808	17.9	0.9	83499
0.07	0.0824	0.0287	0.19	2.739	17.8	1.2	83515
0.08	0.0802	0.0286	0.23	2.665	17.7	1.5	83535
0.1	0.0779	0.0284	0.27	2.59	17.6	1.8	83560
0.11	0.0755	0.0281	0.31	2.508	17.4	2.1	83590
0.13	0.0729	0.0278	0.34	2.422	17.2	2.4	83624
0.15	0.0703	0.0275	0.38	2.335	17	2.7	83662
0.16	0.0676	0.0271	0.41	2.246	16.8	3	83705
0.18	0.0648	0.0266	0.44	2.152	16.5	3.3	83752
0.19	0.0619	0.026	0.46	2.056	16.1	3.6	83804
0.21	0.0589	0.0254	0.49	1.959	15.8	3.9	83860
0.23	0.0558	0.0247	0.51	1.854	15.3	4.2	83921
0.24	0.0525	0.0239	0.53	1.745	14.8	4.5	83986
0.26	0.0491	0.0229	0.56	1.631	14.2	4.8	84055
0.28	0.0455	0.0219	0.57	1.513	13.5	5.1	84129
0.29	0.042	0.0207	0.59	1.395	12.9	5.4	84207
0.31	0.0384	0.0196	0.6	1.277	12.2	5.7	84289
0.32	0.035	0.0185	0.61	1.162	11.4	6	84376
0.34	0.0315	0.0173	0.62	1.045	10.7	6.3	84467
0.36	0.0279	0.016	0.62	0.928	9.9	6.6	84563
0.37	0.0245	0.0147	0.62	0.813	9.1	6.9	84662
0.39	0.021	0.0134	0.61	0.697	8.3	7.2	84766
0.4	0.0176	0.0122	0.58	0.585	7.5	7.5	84875
0.42	0.0143	0.0109	0.55	0.475	6.7	7.8	84987
0.44	0.011	0.0097	0.5	0.366	6	8.1	85104
0.45	0.0079	0.0086	0.42	0.264	5.3	8.4	85225
0.47	0.0048	0.0075	0.3	0.161	4.7	8.7	85350
0.48	0.0018	0.0064	0.13	0.058	4	9	85479
0.5	0.0065	0.009	0.36	0.207	5.4	9.3	86947
0.52	0.0032	0.0077	0.22	0.103	4.6	9.6	87089

Pavyzdinė QPROP rezultatų lentelė (fiksuota įtampa, Dbeta = 0)																	
V (m/s)	rpm	T(N)	Q(N-m)	Pshaft(W)	Volts	Amps	effmot	effprop	adv	CT	CP	DV(m/s)	eff	Pelec	Pprop	cl_avg	cd_avg
0	5993	7.901	0.1477	92.7	8	14.5132	0.7985	0	0	1.14E-08	3.87E-11	0.3684	0	116.1	0	0.8236	0.05426
1	5992	7.627	0.1479	92.79	8	14.5283	0.7984	0.0822	0.00029	1.10E-08	3.88E-11	0.0635	0.0656	116.2	7.627	0.7937	0.05199
2	5994	7.325	0.1475	92.57	8	14.4893	0.7986	0.1583	0.00058	1.06E-08	3.86E-11	0.0312	0.1264	115.9	14.65	0.7596	0.04923
3	5996	6.985	0.1473	92.47	8	14.4722	0.7987	0.2266	0.00087	1.01E-08	3.86E-11	0.0199	0.181	115.8	20.96	0.7225	0.04865
4	5999	6.631	0.1467	92.18	8	14.421	0.799	0.2877	0.00116	9.54E-09	3.84E-11	0.0142	0.2299	115.4	26.52	0.6834	0.04808
5	6006	6.262	0.1457	91.66	8	14.33	0.7995	0.3416	0.00145	8.99E-09	3.80E-11	0.0107	0.2731	114.6	31.31	0.6425	0.04753
6	6016	5.879	0.1443	90.88	8	14.1935	0.8003	0.3882	0.00173	8.41E-09	3.75E-11	0.0084	0.3107	113.5	35.27	0.5998	0.04702
7	6029	5.482	0.1422	89.79	8	14.0057	0.8014	0.4274	0.00202	7.81E-09	3.68E-11	0.0067	0.3425	112	38.38	0.5555	0.04657
8	6047	5.072	0.1396	88.38	8	13.7611	0.8028	0.4591	0.0023	7.18E-09	3.59E-11	0.0054	0.3686	110.1	40.58	0.5098	0.04622
9	6069	4.649	0.1362	86.59	8	13.4545	0.8044	0.4832	0.00257	6.54E-09	3.48E-11	0.0044	0.3887	107.6	41.84	0.4629	0.046
10	6096	4.212	0.1322	84.39	8	13.0827	0.8063	0.4991	0.00285	5.87E-09	3.35E-11	0.0036	0.4024	104.7	42.12	0.4151	0.04603
11	6128	3.768	0.1274	81.75	8	12.6405	0.8085	0.5069	0.00312	5.20E-09	3.20E-11	0.0029	0.4098	101.1	41.44	0.3672	0.04603
12	6165	3.31	0.1218	78.65	8	12.1269	0.8107	0.505	0.00338	4.51E-09	3.02E-11	0.0024	0.4094	97.01	39.72	0.319	0.04624
13	6207	2.84	0.1155	75.1	8	11.5483	0.8129	0.4916	0.00364	3.82E-09	2.82E-11	0.0019	0.3996	92.39	36.92	0.2709	0.04687
14	6253	2.36	0.1086	71.11	8	10.9077	0.8149	0.4645	0.00389	3.13E-09	2.62E-11	0.0014	0.3786	87.26	33.03	0.2233	0.04769
15	6303	1.861	0.1011	66.73	8	10.2174	0.8164	0.4183	0.00413	2.43E-09	2.40E-11	0.0011	0.3415	81.74	27.91	0.176	0.04914
16	6355	1.346	0.0932	62.03	8	9.4889	0.8171	0.3473	0.00437	1.73E-09	2.17E-11	0.0007	0.2838	75.91	21.54	0.1295	0.05141
17	6412	0.8181	0.08469	56.87	8	8.7048	0.8166	0.2446	0.0046	1.03E-09	1.94E-11	0.0004	0.1997	69.64	13.91	0.084	0.05394
18	6471	0.27	0.07575	51.33	8	7.8805	0.8142	0.0947	0.00483	3.34E-10	1.70E-11	0.0001	0.0771	63.04	4.859	0.0393	0.05735
19	6535	-0.2858	0.0662	45.3	8	7.0006	0.8089	-0.1199	0.00505	-3.47E-10	1.46E-11	-0.0001	-0.097	56	-5.431	-0.0037	0.06075
20	6602	-0.8594	0.05605	38.75	8	6.0649	0.7987	-0.4436	0.00526	-1.02E-09	1.21E-11	-0.0004	-0.3543	48.52	-17.19	-0.0456	0.06454

NUMERICAL ANALYSIS OF PROPELLER AND ENGINE MATCHING

Arnas DIKTANAS¹, Eduardas LASAUSKAS²

¹*Department of Aviation Technologies, Antanas Gustaitis Aviation Institute, Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania*

²*Department of Aeronautical Engineering, Antanas Gustaitis Aviation Institute, Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania*

Abstract. The aim of this article is to prove that propeller and engine matching can be evaluated theoretically. An era of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) has brought new challenges to aeronautical engineers, including the necessity to adapt the airflow analysis techniques to the demands of small-scale components. A numerical analysis of propeller APC Slow Flyer 11x4.7 and engine T-MOTOR AT2317 KV880 was conducted using open source codes XFOIL and QPROP. The results were compared with a set of experimental data found in databases and further used to predict efficiency of a given propulsive system. Particular attention was paid to the airfoil drag polar approximation and to the hypothesis which states that practical propeller characteristics tend to exceed the theoretical ones. The proposed steps of the research were described and several graphs representing the findings were included. It is concluded that, although the theoretical evaluation of propeller and engine performance has its drawbacks, it can be accomplished in a relatively simple way.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle, UAV, propeller, engine, motor, QPROP, Blade Element Momentum Theory, BEMT, numerical analysis, efficiency.

Introduction

In modern aviation, Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have gained tremendous popularity. They are now widely used both for military and civil purposes. In terms of complexity, UAVs also vary from simple toy models produced for entertainment purposes to extremely sophisticated machines designed for professional applications. However, the rise of new technologies caused many engineering problems, solutions to which appear different to those applied previously. A perfect example is the propeller and engine matching problem. Although both the manned and unmanned aircraft engineers strive for finding the most efficient propeller and engine combination for a given vehicle, designing UAVs can be more demanding due to their smaller size and power. For instance, small-scale propellers operate at low Reynolds numbers which affect their aerodynamic performance. Moreover, typical UAVs implement electric motors. Their characteristics differ from those shown by piston or jet engines used for conventional aircraft. As a consequence, current methods used for propeller and engine performance predictions cannot properly cope with the tasks posed by modern UAVs. It is evident that the development of unmanned aviation has brought up new engineering issues which are yet to be resolved.

1. Theoretical overview

Propeller and engine performance can be tested practically or predicted theoretically. The latter method requires a simplified model of each component which is then used for calculations. The most popular theories which help to predict propeller characteristics are Momentum Theory and Blade Element Theory, a combination of which is usually referred to as Blade Element Momentum Theory (BEMT). It is applied in various scientific researches such as the interaction between propeller and wing (Pavel et al., 2018), the design of a propeller itself (Reviol et al., 2018; Tang et al., 2018) or the studies of wind turbines (Luo et al., 2011; Richmond-Navarro et al., 2017). Another widely used method for similar researches is Computational Fluid Dynamics (CFD). It is found to be more reliable (Ehrich et al., 2018), however, also more costly and time consuming (Zhang et al., 2018). As a compromise, BEMT theory can be improved by introducing certain corrections (Sun et al., 2016).

Electric motor characteristics can be calculated simpler. For a direct current (DC) motor it is sufficient to take only several input variables: terminal voltage, resistance and speed constant (Drela, 2007a), although the advanced model should include some additional parameters. By combining the engine and propeller models described above, the codes QPROP and QMIL were developed for propeller analysis and design by Mark Drela at Massachusetts Institute of Technology (Drela, 2006). Other scientists expanded the codes by creating the programme QOPTIMIZER (Bronz et al., 2012). Not only have they provided beneficial insights on the methodology of developing a chosen propulsive

system, but have also paid attention to the mission requirements which have to be taken into account for the system optimisation. However, the resultant performance of a tested combination revealed a slight difference from the experimental measurements. It is especially undesirable when the propeller is specifically manufactured for a given motor. Trying to improve the system characteristics would most probably incur the cost of manufacturing an enhanced propeller. A more thorough research of the difference between the real and assumed efficiency is necessary as well, especially because other sources claim that practical propeller characteristics tend to exceed the theoretical ones (J. B. Brandt, 2005). Nonetheless, airfoil BE-50 was chosen as reference by Bronz et al. due to its smoothest aerodynamic behaviour among the other candidates, avoiding possible difficulties with the remaining airfoils.

2. Methodology

In this paper, one particular combination of propeller and engine was chosen for research: APC Slow Flyer 11x4.7 (manufactured by Advanced Precision Composites ®) and T-MOTOR ® AT2317 KV880. These are generally used for various UAV constructions at Antanas Gustaitis Aviation Institute, Vilnius Gediminas Technical University. Codes XFOIL 6.99 (Drela & Youngren, 2013) and QPROP 1.32 (Drela, 2007b) were used for propeller and engine research, together with Microsoft Office Excel 2016 ® for further numerical analysis. Both XFOIL and QPROP require input data of airfoil and propeller geometry, which can be either found by means of photogrammetry or taken from public databases. In this paper, propeller geometry was taken from the propeller database of University of Illinois at Urbana-Champaign (UIUC, 2015), whereas airfoil type and its geometry data were taken as provided by PropCalc 3.0 (Schenk, 2020) and Airfoil Tools (Airfoil Tools, 2020) accordingly. In addition, UIUC propeller database provides a sufficiently large amount of experimental propeller performance data which is used further in this paper. This data is also compared with the ones provided by APC (APC, 2020) and calculated using PropCalc and QPROP. Meanwhile, main characteristics of the chosen motor are provided by the manufacturer (T-MOTOR, 2020). As an alternative, own bench tests can be carried out to test the performance.

3. Results and discussion

In the beginning, airfoil MA409 was analysed using XFOIL 6.99. Several graphs were obtained: relation between angle of attack and lift coefficient and relation between lift coefficient and drag coefficient (drag polar). The Reynolds number selected for calculations was 75,000. It corresponds to the chord position of 70% of APC Slow Flyer 11x4.7 propeller running at an approximate speed of 3,600 revolutions per minute (rpm) in a typical environment. It is also an acceptable compromise between maintaining a sufficiently high Reynolds number for efficient XFOIL calculations (lower numbers negatively impact the convergence rate) and still keeping it within the range that most of the small UAV propellers operate in (J. Brandt & Selig, 2011).

Although XFOIL provides a set of airfoil characteristics at each angle of attack, graphical approximations are necessary in order to prepare the input file of QPROP. Whereas representing the relation between angle of attack and lift coefficient as a linear function is not challenging, transformation of the drag polar into two half-parabolas causes difficulties as the original curve is not smooth. The drag polar of MA409 appeared to have two widely spaced extrema. Thus, the vertex of the approximating parabola might be selected at any extreme point or even in between. Figures 1 and 2 show the aerodynamic relations described above, incorporating several approximation models.

Afterwards, propeller efficiency was calculated using QPROP 1.32. The results include relations between propeller efficiency and its advance ratio at a fixed speed of rotation for each drag polar approximation model. The results were compared with experimental data, allowing to find the most suitable approximation for further research. Unfortunately, propeller thrust and power coefficient calculations proved that QPROP significantly underestimates these values, although the results almost fully correspond to those received by using PropCalc and somewhat confirm Brandt's conclusions (J. B. Brandt, 2005), see Figures 3-5.

To further continue the analysis, a fictional propeller was introduced by means of altering several coefficients in the input file of QPROP but leaving the propeller geometry data intact. As a result, new thrust and power coefficient graphs were obtained, closely representing the experimental data. The efficiency curve remained dissimilar though, however, the value of advance ratio at which the fictional propeller reaches its peak efficiency closely matches the experimental value, see Figures 6-8.

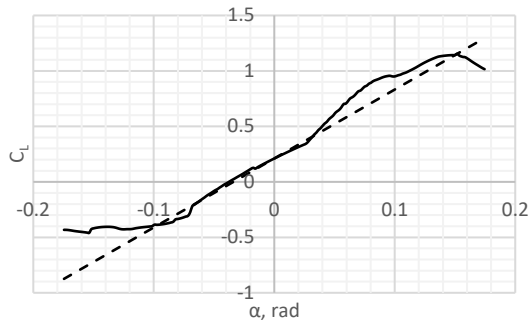


Figure 1. Relation between angle of attack (α) and lift coefficient (C_L) (solid line) and its approximation (dashed line) of airfoil MA409

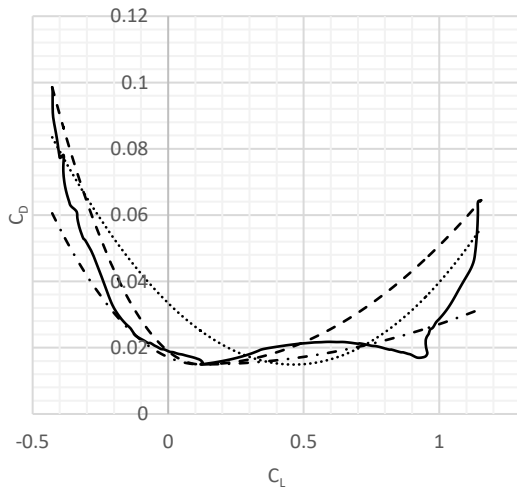


Figure 2. Relation between lift coefficient (C_L) and drag coefficient (C_D) (solid line) and its approximations (A – dashed line, B – dash-dotted line, C – dotted line) of airfoil MA409

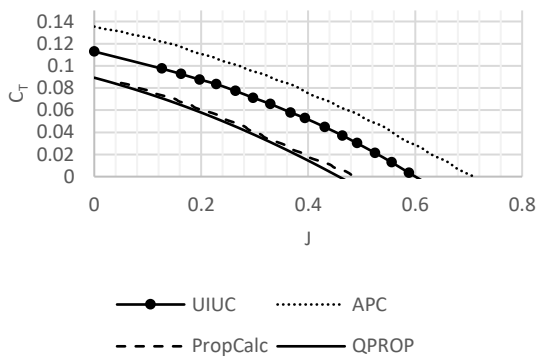


Figure 3. Relation between thrust coefficient (C_T) and advance ratio (J) of propeller APC Slow Flyer 11x4.7 when rpm = 4003 as provided by different sources

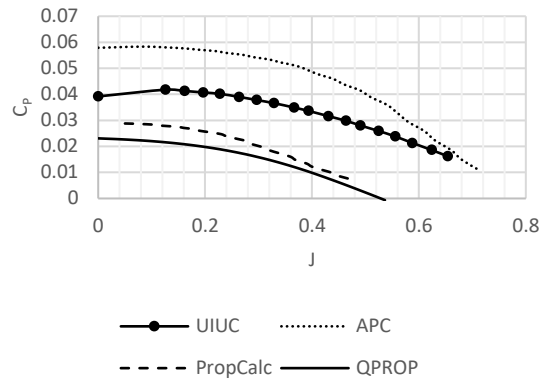


Figure 4. Relation between power coefficient (C_P) and advance ratio (J) of propeller APC Slow Flyer 11x4.7 when rpm = 4003 as provided by different sources

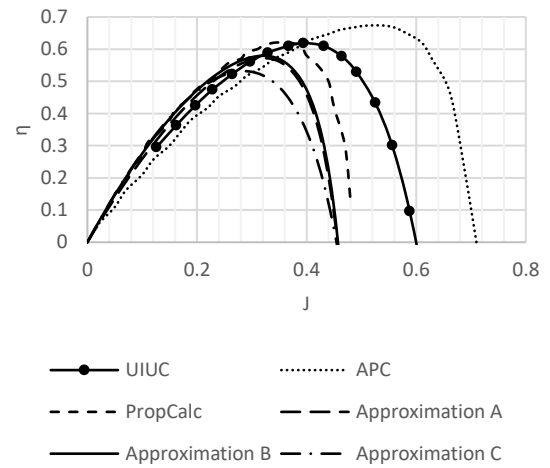


Figure 5. Relation between efficiency (η) and advance ratio (J) of propeller APC Slow Flyer 11x4.7 when rpm = 4003 as provided by different sources

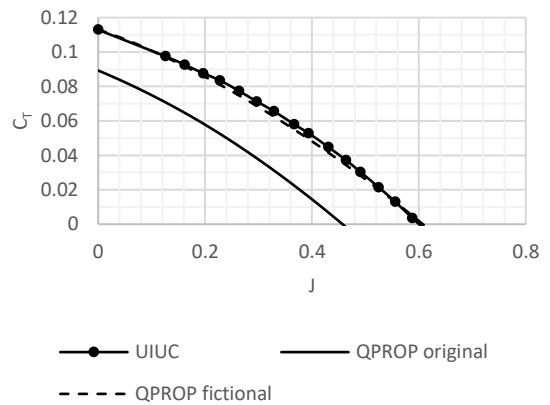


Figure 6. Relation between thrust coefficient (C_T) and advance ratio (J) of the propellers when rpm = 4003 as provided by different sources

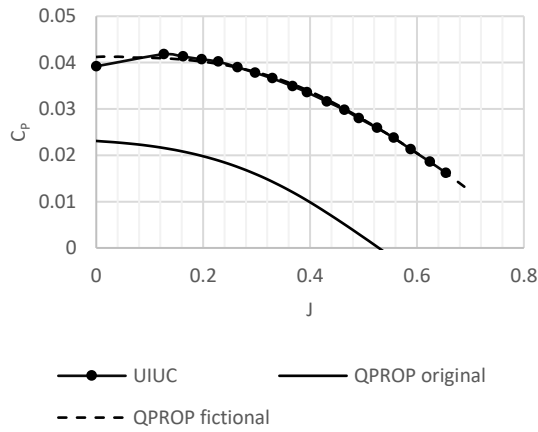


Figure 7. Relation between power coefficient (C_p) and advance ratio (J) of the propellers when rpm = 4003 as provided by different sources

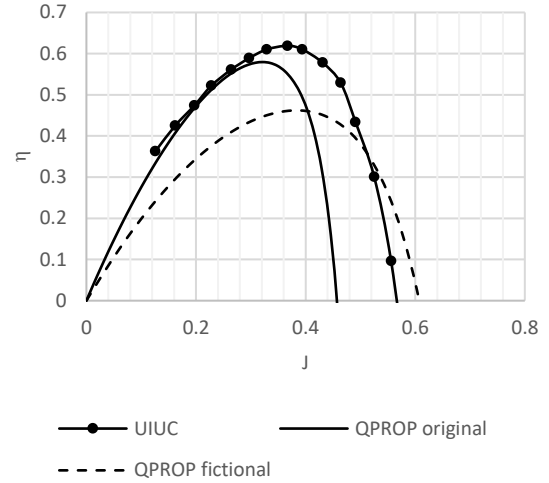


Figure 8. Relation between efficiency (η) and advance ratio (J) of the propellers when rpm = 4003 as provided by different sources

Later, a comprehensive analysis of propeller and engine performance was carried out based on the fictional propeller model described in the paragraph above. The suggested rpm range for APC Slow Flyer 11x4.7 is 2,000 to 18,000 (APC, 2020), while T-MOTOR AT2317 KV880 is limited to 350 W, 14.8 V and 25 A (T-MOTOR, 2020). By examining QPROP calculations, it appeared that the maximum achievable propeller rpm in the case of static thrust is 8112. It is limited by the maximum motor current of 25 A. In this case, the motor efficiency is 78.86 %, voltage is 11.268 V, and power is 281.6 W. Meanwhile, the maximum thrust generated by the propeller is 14.64 N. Since the required motor power drops in case of dynamic thrust, the static thrust case is the most limiting. The thrust and power curves can also be drawn for each setting of motor voltage, an example is given in Figure 9. In case of dynamic thrust, the maximum achievable propeller rpm is 11,780 at the maximum horizontal flight speed of approximately 33.7 m/s. This already suggests that the propeller is underused as it could generate more thrust at its maximum design rpm of 18,000.

Finally, the efficiency of the propeller and engine combination was examined. This includes both global efficiency and individual efficiency of each component. The graphs depicting either motor voltage or horizontal flight speed in the x-axis were obtained, i.e. the system efficiency can be calculated for fixed voltage or fixed flight speed. Several examples are given in Figures 10 and 11. It became apparent that, starting with the voltage of 4 V, the motor reaches a high coefficient of efficiency of approximately 0.8, which merely changes with increasing flight speed or with a further increase in motor voltage. Meanwhile, maximum propeller efficiency, thus, also the global efficiency increases with increasing motor voltage and propeller rpm. The flight speed interval at which the global efficiency is considerably high also expands with increasing rpm.

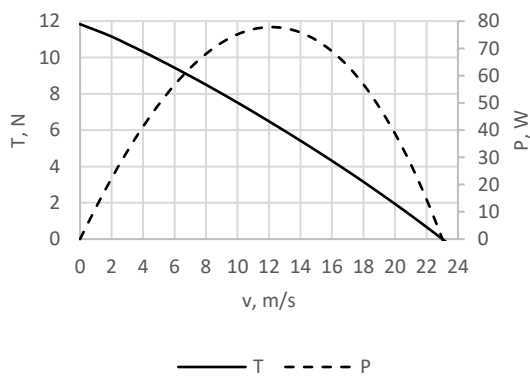


Figure 9. Predicted propeller thrust (T) and power (P), when the voltage of T-MOTOR AT2317 KV880 is 10 V

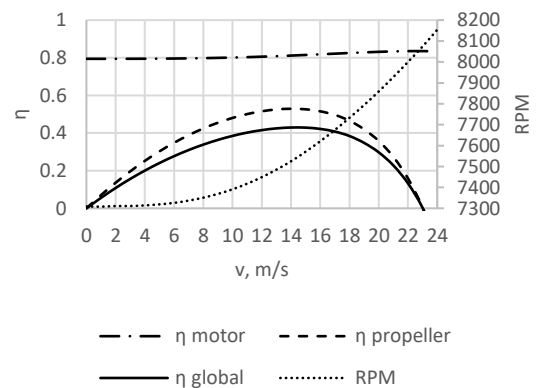


Figure 10. Predicted efficiencies (η), when the voltage of T-MOTOR AT2317 KV880 is 10 V

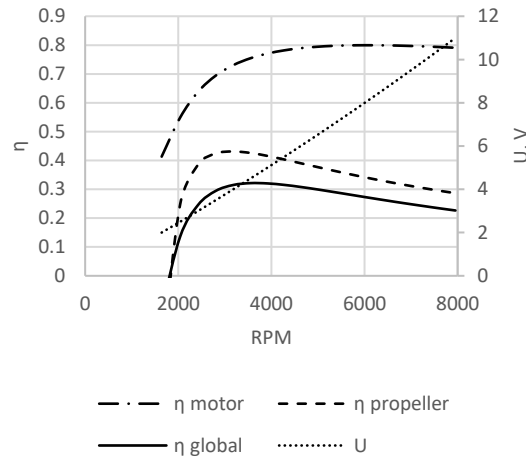


Figure 11. Predicted efficiencies (η) and motor voltage (U), when the flight speed is 5 m/s

To sum up, the global efficiency of the combination of APC Slow Flyer 11x4.7 and T-MOTOR AT2317 KV880 is quite high at all operating stages. According to the results provided by QPROP, maximum system efficiency is 44.5 %. It is reached at a flight speed of 18.5 m/s, when the motor voltage is 12.7 V and the current is 25 A. High motor efficiency is a very significant component of the global efficiency at the expense of unused propeller capabilities.

Conclusions

The performance of a combination of APC Slow Flyer 11x4.7 and T-MOTOR AT2317 KV880 was evaluated. The following conclusions were made:

1. The combination of APC Slow Flyer 11x4.7 and T-MOTOR AT2317 KV880 is efficient, however, the propeller is capable of generating significantly more thrust in combination with a more powerful engine. Nevertheless, a considerable increase in weight would also occur. Whether the power increase would outweigh the negative impact of mass increase is a more complex aerodynamic problem, the solution of which requires examining the whole UAV system.
2. Characteristics of APC Slow Flyer 11x4.7 provided by the manufacturer are too optimistic.
3. Brandt's observation regarding the predicted coefficient data falling below measurements was confirmed. This might be explained by the possibility that theoretical methods fail to correctly evaluate the influence of eccentric forces and the curvy path of the airflow around the propeller blade.
4. QPROP serves as a valuable tool in predicting propeller and engine performance, however, its code may require modifications as the provided results do not match the experimental data. More different propellers should also be examined to confirm this conclusion.
5. Precise approximation of airfoil drag polar does not significantly influence the QPROP calculations, however, choosing higher degree polynomial functions for the input would enhance the results.

Overall, the numerical analysis which was described in this paper proves that propeller and engine matching can be accomplished using relatively straightforward theoretical techniques. They allow experimenting with the chosen components at virtually no cost, taking into account several drawbacks which are yet to be overcome.

Acknowledgements

Authors thank the creators of XFOIL, QPROP, PropCalc for the openly available codes. Authors thank the APC and UIUC for their extensive databases.

Disclosure Statement

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

- Airfoil Tools. (2020). *MA409 (smoothed)*. <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=ma409sm-il>
- APC. (2020). Technical Information – Performance Data. *APC Propellers*. <https://www.apcprop.com/technical-information/performance-data/>
- Brandt, J. B. (2005). *Small-scale propeller performance at low speeds*. 479.
- Brandt, J., & Selig, M. (2011, January 4). Propeller Performance Data at Low Reynolds Numbers. *49th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*. 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando, Florida. <https://doi.org/10.2514/6.2011-1255>
- Bronz, M., Moschetta, J.-M., & Hattenberger, G. (2012). *Multi-Point Optimisation of a Propulsion Set as Applied to a Multi-Tasking MAV*. 15.
- Drela, M. (2006). *QPROP Formulation*. http://web.mit.edu/drela/Public/web/qprop/qprop_theory.pdf
- Drela, M. (2007a). *First-Order DC Electric Motor Model*. 3.
- Drela, M. (2007b). *QPROP*. <http://web.mit.edu/drela/Public/web/qprop/>
- Drela, M., & Youngren, H. (2013). *XFOIL*. <http://web.mit.edu/drela/Public/web/xfoil/>
- Ehrich, S., Schwarz, C., Rahimi, H., Stoevesandt, B., & Peinke, J. (2018). Comparison of the Blade Element Momentum Theory with Computational Fluid Dynamics for Wind Turbine Simulations in Turbulent Inflow. *Applied Sciences*, 8(12), 2513. <https://doi.org/10.3390/app8122513>
- Luo, D., Huang, D., & Wu, G. (2011). Analytical solution on Magnus wind turbine power performance based on the blade element momentum theory. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 3(3), 033104. <https://doi.org/10.1063/1.3588039>
- Pavel, H., Jan, K., & Nikola, Ž. (2018). Wing and propeller aerodynamic interaction through nonlinear lifting line theory and blade element momentum theory. *MATEC Web of Conferences*, 233, 00027. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823300027>
- Reviol, T., Kluck, S., & Böhle, M. (2018). A new design method for propeller mixers agitating non-Newtonian fluid flow. *Chemical Engineering Science*, 190, 320–332. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.06.033>
- Richmond-Navarro, G., Calderon-Munoz, W. R., LeBoeuf, R., & Castillo, P. (2017). A Magnus Wind Turbine Power Model Based on Direct Solutions Using the Blade Element Momentum Theory and Symbolic Regression. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 8(1), 425–430. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2016.2604082>
- Schenk, H. (2020). *Propeller Calculator*. <http://www.drivecalc.de/PropCalc/>
- Sun, Z., Chen, J., Shen, W. Z., & Zhu, W. J. (2016). Improved blade element momentum theory for wind turbine aerodynamic computations. *Renewable Energy*, 96, 824–831. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.035>
- Tang, J., Hu, Y., Song, B., & Yang, H. (2018). An unsteady free wake model for aerodynamic performance of cycloidal propellers. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 232(2), 290–307. <https://doi.org/10.1177/0954410016678431>
- T-MOTOR. (2020). *AT2317 – Specifications*. <http://store-en.tmotor.com/goods.php?id=789>
- UIUC. (2015). *UIUC Propeller Database – Volume 1*. <https://m-selig.ae.illinois.edu/props/volume-1/propDB-volume-1.html>
- Zhang, C., Chen, H.-P., & Huang, T.-L. (2018). Fatigue damage assessment of wind turbine composite blades using corrected blade element momentum theory. *Measurement*, 129, 102–111. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.06.045>

**VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INSTITUTAS
AVIACIJOS TECHNOLOGIJŲ KATEDRA**

Studijų sritis: Technologijos mokslai

Studijų kryptis: Aeronautikos inžinerija

Studijų programa: Orlaivių pilotavimas, valstybinis kodas 601H41001

**KATEDROS PAŽYMA
APIE BAIGIAMĄJĮ MAGISTRO DARBĄ**

2020 _____ mėn. ____ d. Nr.
Vilnius

Studentas (ė) _____ **Arnas Diktanas**
(vardas, pavardė)

Studento (ės) studijų svertinis įvertinimų vidurkis – _____ balo.

Baigiamojo darbo (tezių) tema: **PROPELERIO IR VARIKLIO SĄVEIKOS SKAITINĖ ANALIZĖ**

Baigiamasis darbas peržiūrėtas ir studentui (ei) _____ *Arnui Diktanui*

leidžiama ginti šį baigiamąjį darbą magistro laipsnio suteikimo komisijoje.

Katedros vedėjas _____
(parašas)

Vytautas Rimša, dr.
(vardas, pavardė, mokslinis laipsnis ir vardas)

**VADOVO ATSILIEPIMAS
APIE BAIGIAMĄJĮ MAGISTRO DARBĄ**

2020 gegužės 20 d.

Magistrantas baigiamajame darbe skaitiniais metodais analizavo propelerio ir elektros variklio tarpusavio sąveiką. Bepiločių orlaivių konstruktoriai šią problemą dažniausiai sprendžia bandymų ir klaidų metodu. Literatūros šia tema yra labai mažai. Todėl darbas yra vertingas ir teorine ir praktine prasme.

Baigiamąjį darbą studentas rengė nuosekliai ir sistemingai. Daug dirbo savarankiškai. Pagal gautus rezultatus parengė straipsnio rankraštį mokslo žurnalui.

Darbą siūlau vertinti puikiai (10).

Vadovas _____
(parašas)

Eduardas Lasauskas, dr, doc.
(vardas, pavardė, mokslinis laipsnis ir vardas)

SUTIKIMAS DĖL ASMENS DUOMENŲ NAUDOJIMO

2020-05-22

(Data)

Šiuo sutikimu aš, Arnas Diktanas (toliau – Duomenų subjektas) sutinku, kad Vilniaus Gedimino technikos universitetas, juridinio asmens kodas 111950243, adresas Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius (toliau – Duomenų valdytojas), tvarkytų mano asmens duomenis kitų studentų mokymosi tikslu. T. y. tvarkytų (*pažymėkite tinkamą*):

- ☐ vardą, pavardę, bakalauro baigiamąjį darbą;
- ☐ bakalauro baigiamąjį darbą, nenurodant vardo, pavardės;
- ☒ vardą, pavardę, magistro baigiamąjį darbą;
- ☒ magistro baigiamąjį darbą nenurodant vardo, pavardės.

Šiuo tikslu tvarkomų asmens duomenų Duomenų valdytojas neperduos jokiems tretiesiems asmenims, studentams su baigiamaisiais darbais bus leidžiama susipažinti vidinėje informacinėje sistemoje. Duomenų subjekto asmens duomenys šiuo tikslu bus naudojami ne ilgiau nei 5 metai.

Šiuo sutikimu Duomenų subjektas patvirtina, kad yra supažindintas su šiomis teisėmis:

- Susipažinti su savo duomenimis ir kaip jie yra tvarkomi (teisė susipažinti);
- Reikalauti ištaisyti arba, atsižvelgiant į asmens duomenų tvarkymo tikslus papildyti asmens neišsamius asmens duomenis (teisė ištaisyti);
- Savo duomenis sunaikinti arba sustabdyti savo duomenų tvarkymo veiksmus (išskyrus saugojimą) (teisė sunaikinti ir teisė „būti pamirštam“);
- Reikalauti, kad asmens duomenų valdytojas apribotų asmens duomenų tvarkymą (teisė apriboti);
- Teisė į duomenų perkėlimą (teisė perkelti);
- Nesutikti, kad būtų tvarkomi asmens duomenys, kai šie duomenys tvarkomi ar ketinami tvarkyti kitais tikslais;
- Pateikti skundą Valstybinei duomenų apsaugos inspekcijai;

Duomenų subjektas turi teisę bet kuriuo metu atšaukti savo sutikimą.

Arnas Diktanas

[Duomenų subjekto vardas, pavardė, parašas]

Duomenų valdytojo rekvizitai:

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Juridinio asmens kodas: 111950243

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius

Tel. (8 5) 274 5030

Faks. (8 5) 270 0112

El. paštas: vgtu@vgtu.lt

PVM mokėtojo kodas: LT119502413

Duomenų apsaugos pareigūno tel. (8 5) 251 2191, el. paštas: dap@vgtu.lt