



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Horizontalaus matavimo stendo kūrimas ir panaudojimas propelerių savybių tyrimui

Baigiamasis magistro studijų projektas

Andrius Karaliūnas

Projekto autorius

Prof. habil. dr. Algimantas Fedaravičius

Vadovas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Horizontalaus matavimo stendo kūrimas ir panaudojimas propelerių savybių tyrimui

Baigiamasis magistro studijų projektas
Aeronautikos inžinerija (6211EX024)

Andrius Karaliūnas

Projekto autorius

**Prof. habil. dr. Algimantas
Fedaravičius**

Vadovas

Doc. Dr. Darijus Pagodinas

Recenzentas

Kaunas, 2019



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

(Fakultetas)

Andrius Karaliūnas

(Studento vardas, pavardė)

Aeronautikos inžinerija 6211EX024

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Baigiamojo projekto pavadinimas“

AKADEMINIO SAŽNINGUMO DEKLARACIJA

20 ____ m. _____ d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Andriaus Karaliūno**, baigiamasis projektas tema „Horizontalaus matavimo stendo kūrimas ir panaudojimas propelerių savybių tyrimui.“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Studijų programa – Aeronautikos inžinerija 6211EX024

Magistrantūros studijų baigiamojo projekto užduotis

Studentui Andriui Karaliūnui

1. Baigiamojo projekto tema:

Horizontalaus matavimo stendo kūrimas ir panaudojimas propelerių savybių tyrimui.

Research of propeller performance using developed horizontal test stand.

2. Projekto tikslas:

Sukonstruoti ir pagaminti matavimo stendą bei su juo atlikti įvairių konfigūracijų bepiločių orlaivių propelerių savybių tyrimus

3. Projekto uždaviniai:

1. atlikti analizę apie pagrindinius nepilotuojamų orlaivių propelerių aspektus;
2. atlikti žinomų bepiločių orlaivių propelerių matavimo stendų analizę;
3. suprojektuoti bei pagaminti matavimo stendą, kuris būtų pritaikytas tirti iki 300 mm skersmens propelerius;
4. atlikti propelerio medžiagos tamprumo modulio įtakos traukos savybėms tyrimą;
5. atlikti palyginamąjį tyrimą tarp gumburėlinio propelerio ir įprastos formos propelerio;
6. atlikti palyginamąjį tyrimą tarp plyšinio propelerio ir įprastos formos propelerio;
7. atlikti horizontalaus matavimo stendo ekonominius skaičiavimus.

4. Projekto aprašomosios dalies struktūra:

Teorinė dalis, tiriamoji dalis, ekonominė dalis, išvados.

5. Projekto konsultantai:

Asistentas Martynas Lendraitis

Baigiamojo projekto autorius Andrius Karaliūnas 2017.11.02
(vardas, pavardė, parašas, data)

Baigiamojo projekto vadovas Algimantas Fedaravičius
(vardas, pavardė, parašas, data)

Krypties studijų programos vadovas Janina Jablonskytė
(vardas, pavardė, parašas, data)

Andrius Karaliūnas. Horizontalaus matavimo stendo kūrimas ir panaudojimas propelerių savybių tyrimui. Magistro baigiamasis projektas vadovas Prof. habil. dr. Algimantas Fedaravičius; Kauno technologijos universitetas, mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis: Aeronautikos inžinerija (E14), Inžinerijos mokslai (E).

Reikšminiai žodžiai: propeleriai, matavimo stendas, gumburėlinis, plyšinis, tamprumo modulio įtaka.

Kaunas, 2019. 124 p.

Santrauka

Dėl ypač sparčiai didėjančio bepiločių orlaivių – multikopterių populiarumo, atsirado didelis poreikis kurti bei tobulinti jų propelerius. Vartotoją pasiekiantys propeleriai turi praeiti analitinių skaičiavimų, projektavimo, gamybos, bei bandymų (tyrimų) etapus. Paskutinis, tyrimų, etapas reikalingas, kad būtų patvirtinti skaičiavimų rezultatai bei būtų nustatomos tikrosios propelerio charakteristikos. Šiam etapui įgyvendinti reikalinga specializuota, skrydžio sąlygas imituojanti, matavimo įranga. Kadangi multikopterių skrydžio greitis yra mažas, jų propelerius galima tirti stacionariame (nejudančiame) oro sraute. Tai galima padaryti naudojant matavimo stendą. Dažniausiai tokio tipo įranga yra vienetinės gamybos bei specialios paskirties.

Šio darbo tikslas yra suprojektuoti bei pagaminti matavimo stendą, kuris yra skirtas mažo skersmens (iki 300mm) propeleriams tirti. Visų pirma, darbe aprašomi pagrindiniai nepilotuojamų orlaivių propelerių aspektai, t.y., kaip jie klasifikuojami, kokios jų geometrinės ir kinematinės charakteristikos bei kaip apskaičiuojamas propelerio naudingumo koeficientas. Būtent šios išraiškos buvo naudojamos tolimesniems skaičiavimams atlikti. Darbe atliekama žinomų bepiločių orlaivių propelerių matavimo stendų analizė bei aprašomi įvairūs tyrimai atlikti naudojant šiuos stendus.

Šiame darbe aprašomas matavimo stendas buvo projektuojamas naudojant programinę įrangą „Solidworks“. Projektavimo eiga bei visos atliktos revizijos yra aprašomos tiriamojoje šio darbo dalyje. Matavimo stendo gamybai reikalinga dokumentacija, t.y., detalių sąrašas, surinkimo bei darbo brėžiniai yra pateikiami 1, 2, 3 prieduose. Pagaminus horizontalų matavimo stendą, su juo buvo atliekami tyrimai. Bandymų metu, kiekvienas propeleris buvo tiriamas tris kartus, jog būtų mažesnė atsitiktinių klaidų tikimybė.

Propelerio standumo įtakos jo naudingumo koeficientui tyrime, nustatyta, kaip nuo propelerio medžiagos tamprumo modulio priklauso jo išvystomos charakteristikos. Atlikus palyginamąjį tyrimą, tarp gumburėlinio propelerio ir įprastos formos propelerio, buvo nustatyta, kokią įtaką propelerio sukuriams charakteristikoms turi ant mentės priekinės briaunos sudaryti gumburėliai. Atlikus palyginamąjį tyrimą tarp plyšinio propelerio ir įprastos formos propelerio, buvo nustatyta ar sukurtas plyšinis propeleris turi pranašumų prieš įprastos formos propelerį.

Ekonominėje darbo dalyje yra pateikiamos visų matavimo stende naudotų elementų kainos (skaičiuotos 2018m. gegužės mėnesio įkainiais). Taip pat, galutinė gamybos kaina yra palyginama su panašaus tipo matavimo stendų kainomis.

Andrius Karaliūnas. Research of propeller performance using developed horizontal test stand. Master's Final Degree Project supervisor Prof. habil. dr. Algimantas Fedaravičius; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area: Aeronautical Engineering (E14), Engineering science (E).

Keywords: propellers, measuring stand, protuberant propeller, slotted propeller, tensile modulus influence.

Kaunas, 2019. 124.

Summary

The rapidly growing popularity of small unmanned aircrafts such as multicopters, has created a great demand to develop and improve the propellers that they are using. The propellers that reaches consumers must go through the analytical calculation, design, validation and production phases. During the evaluation phase it is required to validate the results of the analytical calculations and determine the actual propeller characteristics. To accomplish this, specialized measuring equipment which can recreate real flight conditions are used. Because the flight speed of the multicopters are usually low, their propellers can be tested in a stationary air flow. This can be done using a measuring stand.

The purpose of this work is to design and produce the measuring stand for small diameter (up to 300 mm) propellers. The work describes the main aspects of unmanned aircraft propellers: how they are classified, what are their geometrical and kinematical characteristics and how their efficiency is calculated. These expressions were used for further calculations. The analysis of the propeller measuring stands on the market and various studies performed using these stands are described.

The measurement stand described in this work was designed using the “Solidwroks” software. The design process and all of the revisions of the design are described in the research part of this work. The documentation required to produce the measuring stand (work drawings, assembly drawings and part list) is provided in the annexes.

Designed measuring stand was used to perform several studies on different propellers. The effects of material tensile modulus to the overall efficiency of propeller was performed, suggesting that stiffer propeller will be 5% more efficient. Protuberated propeller was compared to the conventional one, showing that it creates 15% less trust force, and 7% less torque. Also slotted propellers was compared to the conventional one, showing no significant advantages (39% less overall efficiency). Each propeller was tested three times to reduce the chance of errors.

In the economic part of the work the prices of all the elements used in the measurement stand were calculated (calculated according to the prices of May 2018). Also, the final cost of production was compared to the prices of measurement stands which are on the marked.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Įvadas.....	10
1. Literatūros apžvalga	12
2. Projektinė dalis	32
3. Tyrimai su horizontaliu matavimo stendu	43
4. Ekonominė dalis.....	57
Išvados	63
Literatūros sąrašas	64
Informacijos šaltinių sąrašas	66
Priedai.....	67

Lentelių sąrašas

1 lentelė. PLA plastiko mechaninės savybės	44
2 lentelė. PETG plastiko mechaninės savybės.....	45
3 lentelė. Vidutinės tyrimo rezultatų reikšmės. Traukos savybių bei naudingumo koef. priklausomybė nuo propelerių medžiagos bei darbo režimų.....	46
4 lentelė. Vidutinės tyrimo rezultatų reikšmės. Traukos savybių bei naudingumo koef. priklausomybė nuo propelerių tipo bei darbo režimų.	50
5 lentelė. Vidutinės tyrimo rezultatų reikšmės. Traukos savybių bei naudingumo koef. priklausomybė nuo propelerių tipo bei darbo režimų.	55
6 lentelė. Nestandartinių gaminių kainos.	58
7 lentelė. Standartinių gaminių kainos.	59
8 lentelė. Kitų gaminių kainos	60
9 lentelė. Horizontalaus matavimo stendo gamybos kainos dedamosios	61

Paveikslų sąrašas

1 pav. Propelerio mentės profilis; b – styga; c_{max} – didžiausias storis; f_{max} – didžiausias kreivumas; φ – tvirtinimo kampas [1]	14
2 pav. Propelerio menčių formos; 1 – ovali; 2 – stačiakampė; 3 – kardo formos [1]	14
3 pav. Pagrindinės propelerio kinematinės charakteristikos [3]	15
4 pav. Skirtingi mentės elementai [7]	16
5 pav. Mentės elementų greičių trikampis [1]	17
6 pav. Aerodinaminės jėgos, atsirandančios dėl srauto aptekėjimo mentimi [1]	18
7 pav. Aerodinaminės jėgos atsirandančios dėl srauto aptekėjimo mentimi [1]	19
8 pav. Srauto tekejimas atvirame kanale [5]	20
9 pav. Traukos sistemoje atsirandantys nuostoliai [5]	20
10 pav. Vertikalaus tipo matavimo stendas [26]	22
11 pav. Horizontalaus tipo matavimo stendas [27]	23
12 pav. Horizontalaus tipo matavimo stendas su deformuojama sija (a) bei su sija atlikti simuliacijos rezultatai (b) [12]	23
13 pav. Horizontalaus tipo matavimo stendas [24]	24
14 pav. Matavimo stendas. a) tiriamos nepilotuojamo orlaivio savybės; b) tiriamos propelerio savybės [4]	25
15 pav. Žemės efekto įtakos traukos jėgai tyrimo rezultatai [4]. Čia r – propelerio spindulys, h – atstumas nuo pagrindo iki propelerio.	26
16 pav. Matavimo stendas [5]	27
17 pav. Rezultatų kreivės: a) traukos priklausomybė nuo variklio apsisukimų; b) propelerių naudingumo koeficientas [5]	27
18 pav. Propelerio tvirtinimo būdai: a) traukiantysis; b) stumiantysis; c) stumiantysis; d) traukiantysis [5]	28
19 pav. Oro srauto užlinkimas sparno galuose [7]	28
20 pav. Atviras propeleris (kairė) ir kanalinis propeleris (dešinė) [8]	29
21 pav. Tyrimo metu naudota įranga [8]	29
22 pav. Tyrimo rezultatai. Sukuriamos traukos priklausomybė nuo variklio galios [8]	30
23 pav. Tyrimo rezultatai. Keliamosios jėgos ir pasipriešinimo jėgos santykis kintant atakos kampui [9]	31
24 pav. Horizontalaus matavimo stendo struktūrinė schema	33
25 pav. Matavimo stendo elementai; a) standartinis profilis; b) kampainis	33
26 pav. Matavimo stendo fragmentai; a) horizontalaus matavimo stendo rėmas; b) rėmo tvirtinimo mazgas	34
27 pav. Matavimo stendo fragmentas	34
28 pav. Propelerio bei el. variklio tvirtinimo mazgas	35
29 pav. Suprojektuoto matavimo stendo CAD modelis	36
30 pav. Kampainio ruošinio (išklotinės) rinkmena.	36
31 pav. Matavimo stende naudoti elektronikos elementai; a) „Arduino UNO“ mikrovaldiklis [23]; b) „Racerstar BR2830 1300KV“ trifazis elektros variklis [22]; c) optinis jutiklis [22]; d) OLED ekranas [22]; e) 10Ohm daugiasūkis potenciometras [23]; f) svorio jutiklis [23]; g) Variklio valdiklis [22] 37	37
32 pav. Variklio valdymo sistema su grįžtamuoju ryšiu	37
33 pav. Nauja variklio valdymo schema	38

34 pav. Stovas lazeriniui tachometrui; a) bendras stovo vaizdas; b) priartintas tachometro laikiklio vaizdas; c) tachometro laikiklio pjūvio vaizdas	39
35 pav. Sukimo momento matavimo mazgas (revizija C); a) bendras vaizdas; b) pjūvio vaizdas...	40
36 pav. Rėmo ir medinio pagrindo tvirtinimo mazgas (revizija A)	40
37 pav. Apsaugos elementai; a) apsauginis stiklas; b) vaizduojama tinkama ir netinkama traukos jėgos veikimo kryptis; c) apsauga nuo rėmo apvertimo	41
38 pav. Apsauginiai akiniai.....	42
39 pav. Galutinis horizontalaus matavimo stendo modelis.....	42
40 pav. Horizontalaus tipo matavimo stendas.....	42
41 pav. Pagaminti propeleriai. Juodos spalvos gamintas iš PETG plastiko, sidabrinės spalvos gamintas iš PLA plastiko	44
42 pav. Detalės gamybos būdai naudojant 3D spausdinimo technologiją [20]	44
43 pav. Tyrimo rezultatai. Propelerių sukuriamų traukos jėgų priklausomybė nuo apsisukimų skaičiaus per minutę	47
44 pav. Tyrimo rezultatai. Propelerių sukuriamų sukimo momentų priklausomybė nuo apsisukimų skaičiaus per minutę	47
45 pav. Tyrimo rezultatai. Propelerių naudingumo koef. priklausomybė nuo apsisukimų skaičiaus per minutę	48
46 pav. a) Gumburėlinis propeleris; b) oro srauto tekėjimas gumburėlinio propelerio fragmentu [20]	48
47 pav. Tyrime naudoti elementai; a) propelerio mentė; b) menčių ir stebulės surinkimo mazgas; c) gumburėlinis propeleris (kairė), įprastinės formos propeleris (dešinė).....	49
48 pav. Tyrimo rezultatai. Propelerių sukuriamų traukos jėgų priklausomybė nuo apsisukimų skaičiaus per minutę	51
49 pav. Tyrimo rezultatai. Propelerių sukuriamų sukimo momentų priklausomybė nuo apsisukimų skaičiaus per minutę	51
50 pav. Tyrimo rezultatai. Propelerių naudingumo koeficientų priklausomybė nuo apsisukimų skaičiaus per minutę	52
51 pav. Propelerių vaizdas iš viršaus. Gumburėlinis propeleris vaizduojamas mėlyna spalva, įprastos formos propeleris vaizduojamas pilka spalva.....	52
52 pav. Broniaus Oškinio sukurtas sklandytuvas su plyšiniu sparnu BRO-20 [28]	53
53 pav. Plyšinio propelerio kompiuterinis modelis	53
54 pav. Suprojektuotas įprastos formos propelerio modelis	54
55 pav. Tyrimo rezultatai. Propelerių sukuriamų traukos jėgų priklausomybė nuo apsisukimų skaičiaus per minutę	54
56 pav. Tyrimo rezultatai. Propelerių sukuriamų sukimo momentų priklausomybė nuo apsisukimų skaičiaus per minutę	56
57 pav. Tyrimo rezultatai. Propelerių naudingumo koeficientų priklausomybė nuo apsisukimų skaičiaus per minutę	56
58 pav. Horizontalus matavimo stendas „RCbenchmark Series 1585 Thrust Stand and Dynamometer“ [24]	61
59 pav. Horizontalus matavimo stendas „Turnigy Thrust Stand“ [25].....	62

Įvadas

Bepiločių orlaivių naudojimas įvairiose civilinėse ir karinėse srityse nepaliaujamai dažnėja. Vienas sparčiausiai populiarėjančių bepiločių orlaivių tipas yra multikopteriai. Jie, dėl techninių charakteristikų bei unikalių dizaino savybių, yra puikiai tinkami pastatų ar įrenginių techninės būklės stebėjimui, prekių ar daiktų transportavimui, gelbėjimo bei žvalgybos užduotims (stebėjimas realiu laiku), pasėlių stebėjimui ir t.t.

Skrendantį orlaivį veikia ir jį stabdo didelės slėgio ir trinties pasipriešinimo jėgos. Didesnis skrydžio greitis iššaukia didesnes pasipriešinimo jėgas. Orlaivį, taip pat, veikia svorio jėga, kuri nepriklausomai nuo skrydžio greičio, visada veikia pastoviu dydžiu ir kryptimi (jos dydis priklauso tik nuo orlaivio masės). Propelerio paskirtis yra sukurti traukos jėgą, kuri nugalėtų trinties, slėgio pasipriešinimo jėgas bei svorio jėgą ir leistų orlaiviui skristi pagal reikiamą trajektoriją, išlaikant užduotą aukštį bei kinematinis ir dinaminis skrydžio parametrus (greitį, pagreitį ir kt.). Propeleris yra sukamas orlaivio jėgainės. Paprastai nepilotuojamų orlaivių jėgainė yra elektros variklis, rečiau stūmoklinis variklis. Literatūroje yra įprasta rašyti, jog sraigto mentė yra lyg besisukantis sparnas, t.y., jų veikimo principas yra beveik analogiškas. Besisukdamas propeleris sukuria slėgių skirtumą tarp viršutinės ir apatinės mentės dalies. Būtent šis slėgių skirtumas ir sukuria traukos jėgą.

Aviacijoje dauguma skaičiavimų, atliekamų projektavimo eigoje, vėliau turi būti patvirtinti bandymais. Ne išimtis yra ir orlaivių propeleriai. Tai yra daroma dėl to, jog būtų įsitikinta skaičiavimų teisingumu. Dauguma bandymų bei tyrimų atliekama su pilotuojamų orlaivių propeleriais (arba su jų modeliais) ir tik sąlyginai maža dalis bandymų bei tyrimų yra atliekama su bepiločių orlaivių propeleriais. Dažniausiai tyrimai, yra atliekami naudojant matavimo stendą, kuris veikia judančiame sraute. Judantį srautą sukuria aerodinaminis vamzdis. Tokią įrangą brangu įsigyti bei išlaikyti. Ji reikalauja kvalifikuoto operatoriaus.

Fiksuoto sparno lėktuvų (pilotuojamų ir bepiločių) skrydžio greitis yra didelis, todėl tokio tipo orlaivių ar jų propelerių tyrimams geriausiai tinka būtent matavimo stendai veikiantys judančiame oro sraute (oro srautas yra sukuriamas norint imituoti realias orlaivio skrydžio sąlygas).

Multikopterių skrydžių parametrai yra unikalūs tuo, jog jų greitis paprastai yra mažas (taip pat, ilgą laiką jie praleidžia kabėjimo režime). Kadangi greitis yra mažas, oro srautas, aptekantis bepilotį orlaivį, mažai veikia jo skrydžio parametrus. Dėl šių priežasčių multikopterių propelerius tikslingiau tirti su statinio bandymo matavimo stendu (stendas veikiantis stacionariame, t.y., nejudančiame sraute). Naudojant tokio tipo matavimo stendą yra nustatoma propelerio sukuriama traukos jėga bei sukimo momentas, kai nėra, papildomo, aptekančiojo oro srauto.

Darbo tikslas – sukonstruoti ir pagaminti matavimo stendą ir su juo atlikti įvairių konfigūracijų bepiločių orlaivių propelerių savybių tyrimus.

Darbo uždaviniai:

1. atlikti analizę apie pagrindinius nepilotuojamų orlaivių propelerių aspektus;
2. atlikti žinomų bepiločių orlaivių propelerių matavimo stendų analizę;
3. suprojektuoti bei pagaminti matavimo stendą, kuris būtų pritaikytas tirti iki 300 mm skersmens propelerius;
4. atlikti propelerio medžiagos tamprumo modulio įtakos traukos savybėms tyrimą;

5. atlikti palyginamąjį tyrimą tarp gumburėlinio propelerio ir įprastos formos propelerio;
6. atlikti palyginamąjį tyrimą tarp plyšinio propelerio ir įprastos formos propelerio.
7. apskaičiuoti horizontalaus matavimo stendo gamybos kainą.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Propelerių apžvalga

Propelerio paskirtis yra sukurti traukos jėgą, kuri nugalėtų susidariusį pasipriešinimą ir leistų orlaiviui skristi pagal reikiamą trajektoriją, išlaikant užduotą aukštį bei kinematinis ir dinaminis skrydžio parametrus (greitį, pagreitį ir kt.). Propelerių yra įvairių dydžių, formų bei konstrukcijų. Nepilotuojamuose orlaiviuose paprastai naudojami mediniai arba plastikiniai propeleriai. Multikopteriuose dažniau naudojami plastikiniai propeleriai. Jie gaminami naudojant plastiko liejimo technologiją. Kiekvienam propelerio modeliui yra sukuriama liejimo forma, kuri yra tvirtinama į liejimo mašiną. Toks detalių gamybos būdas yra ypač našus, todėl plastikinių propelerių kaina yra mažesnė nei metalinių ar medinių.

Paprastai civiliniuose nepilotuojamuose orlaiviuose naudojami fiksuoto žingsnio propeleriai (išskyrus sraigtasparnių modeliuose). Pastovaus žingsnio propeleriai, tai tokie propeleriai, kurių pastatymo kampas ant stebulės, skrydžio metu, yra nekeičiamas. Plačiau apie šio tipo propelerius aprašoma sekančiuose skyriuose.

Propeleriai yra parenkami pagal orlaivio bei jo jėgainės charakteristikas. Mažo žingsnio ir mažo skersmens propeleriai naudojami didelio skrydžio greičio orlaiviuose. Lėtesni orlaiviai naudoja didesnio žingsnio ir didesnio skersmens propelerius, kurie sukasi gerokai lėčiau. Būtent tokie propeleriai, dėl didelio išvystomo sukimo momento, naudojami su elektrinėmis jėgainėmis.

1.1.1. Propelerių klasifikavimas

Pastovaus žingsnio propeleriai yra patys pigiausi ir dažniausiai naudojami nepilotuojamuose orlaiviuose. Jie yra klasifikuojami pagal [1][6]:

1. pagaminimo medžiaga – plastikiniai, mediniai, metaliniai;
2. propelerio skersmenį (100 mm, 120 mm, 140 mm ir t.t.);
3. stebulės skylės skersmenį (2 mm, 3 mm, 4 mm ir t.t.);
4. sukimosi kryptį – kairinis arba dešininis.
5. menčių skaičių – 2, 3, 4 ir t.t.;
6. sukiamos traukos jėgos kryptį – traukiantieji arba stumiantieji.

Propelerio konfigūracija parenkama pagal orlaivio tipą, svorį, technines charakteristikas ir t.t.. Skirtingi propeleriai išvysto skirtingas charakteristikas, bet bendru atveju jie visi turi atitikti šiuos reikalavimus [1][6]:

1. išvystyti reikiamą trauką apskaičiuotiems skrydžių režimams;
2. būti kiek galima lengvesni;
3. būti pakankamai standūs (jog skrydžio metu deformuotųsi leistinose ribose);
4. turėtų kuo mažesnę giroskopinę ir reaktyvinę momentą;
5. lengvas pakeičiamumas arba remontas;
6. specialūs reikalavimai (pvz. skleidžiamo garso dydis).

1.1.2. Propelerio geometrinės ir kinematinės charakteristikos

Pagrindinės propelerio geometrinės charakteristikos yra šios: menčių tvirtinimo kampas ir jų forma, propelerio skersmuo. Didžiausią įtaką turinti geometrinė charakteristika yra propelerio skersmuo D . Literatūroje šis parametras apibūdinamas taip: „skersmuo skritulio, kurį nubrėš besisukančio sraigto mentės“ [1].

Propelerio skersmuo yra parenkamas pagal šiuos parametrus: reikalinga traukos jėga skirtingais darbo režimais, didžiausias galimas propelerio mentės viršūnės greitis (turi įtakos propelerio sukuriama triukšmo lygiui bei traukos charakteristikoms, taip pat svarbu, jog viršūnės greitis neviršytų viršgarsinio greičio, nes, dėl oro spūdumo, stipriai išaugtų pasipriešinimo jėga), propelerio svoris. Jeigu propelerio sukimosi ašis yra horizontali arba artima horizontaliai, taip pat svarbus atstumas nuo žemės iki sukimosi ašies (tai apriboja maksimalų galimą propelerio dydį) [2][6].

Propelerio mentės viršūnės greitis yra apskaičiuojamas pagal formulę [2]:

$$V_{max} = \sqrt{V_{\infty}^2 + (\pi ND)^2} \quad (1)$$

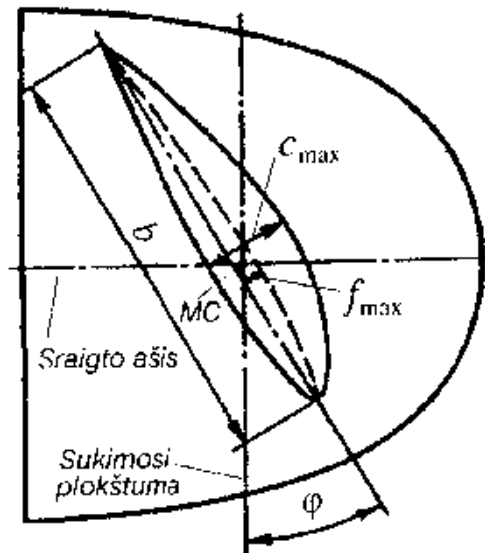
Norint gauti nedimencinį dydį (Macho skaičių), naudojama ši formulė [2]:

$$M_{max} = M_{\infty} \sqrt{1 + (C_p/C_T)^2} \quad (2)$$

Kaip jau ir buvo minėta, didelis mentės galo greitis, labai stipriai veikia triukšmo lygį. Paprastai yra stengiamasi, jog bepiločių orlaivių propelerių mentės viršūnės greitis neviršytų 250 m/s (0,75 Macho skaičiaus).

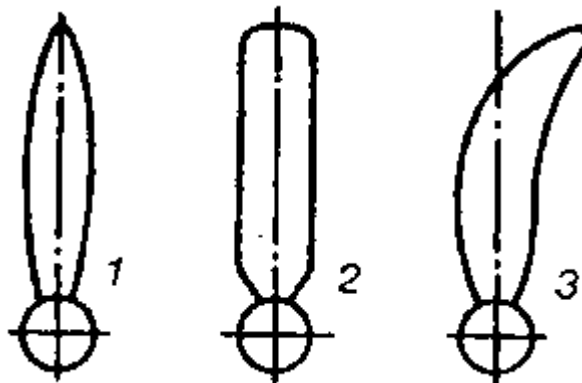
Sraigto profilis tai paviršius, gautas kertant mentę plokštuma, statmena jos išilginei ašiai [1]. Mentės profilio charakteristikos yra analogiškos orlaivio sparno charakteristikoms (1 pav.). Paprastai didžiausias nepilotuojamų orlaivių propelerių mentės plotis yra jos viduryje (apie 10% propelerio skersmens). Santykinis storis kinta per visą mentės ilgį. Prie stebulės jis yra didžiausias (apie 25%), vidurinėje dalyje apie 13%, o galuose – apie 5% [1][6].

Viena iš svarbiausių propelerio geometrinių charakteristikų yra mentės pastatymo kampas. Šis dydis nurodo kampą tarp mentės stygos ir sraigto sukimosi plokštumos. Kadangi skirtingų jos taškų (išilgine kryptimi) linijinis greitis skiriasi (nuo sukimosi ašies toliau esančių taškų linijinis greitis yra didesnis), pastatymo kampai taip pat skiriasi. Jie prie mentės galų yra gerokai mažesni negu prie stebulės [2][3].



1 pav. Propelerio mentės profilis; b – styga; c_{\max} – didžiausias storis; f_{\max} – didžiausias kreivumas; φ – tvirtinimo kampas [1]

Yra trys pagrindinės menčių formos: ovali, stačiakampė ir kardo formos. Jos vaizduojamos 2 pav.



2 pav. Propelerio menčių formos; 1 – ovali; 2 – stačiakampė; 3 – kardo formos [1]

Kiti ypač svarbūs propelerio parametrai yra: žingsnis, slydimas, eiga, greičio koeficientas. Visi šie parametrai apibūdina propelerio mechaninį judėjimą ore. Geometrinis propelerio žingsnis yra teorinis atstumas (propelerio sukimosi ašyje), kurį kietoje terpėje propeleris nueitų per viena pilną apsisukimą (3 pav.). Kadangi propeleriai veikia nekietoje terpėje, tikrasis jų nueitas atstumas nuo teorinio skiriasi, jis vadinamas – sraigto eiga (3 pav.).

Propelerio žingsnis gali būti apskaičiuotas pagal formulę [7]:

$$H = 2\pi r \cdot \operatorname{tg}\varphi, \quad (3)$$

Čia r – propelerio spindulys, mm,

H – propelerio žingsnis, mm.

φ – tvirtinimo kampas, °.

Sraigto eiga gali būti apskaičiuota pagal formulę [7]:

$$Ha = \frac{V}{n}, \quad (4)$$

Čia Ha – sraigto eiga, mm,

V – skrydžio greitis, m/s,

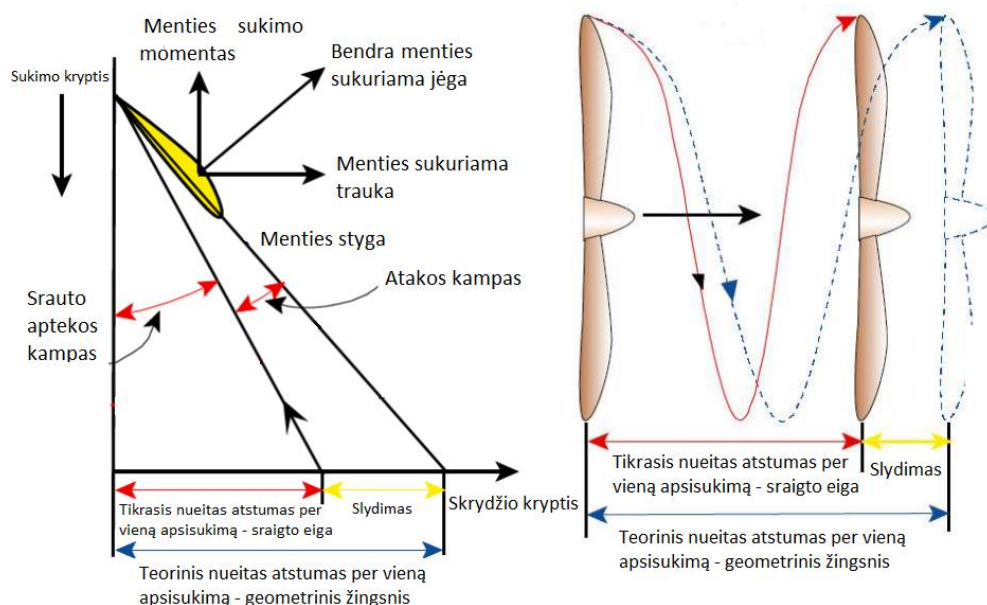
n – propelerio apsisukimai, aps/min.

Skirtumas tarp geometrinio propelerio žingsnio ir jo tikrosios eigos vadinamas propelerio slydimu (3 pav.). Jis atsiranda dėl skrydžio metu esančio pasipriešinimo ir dėl iš dalies mažo oro tankio. Kuo darbinės aplinkos tankis yra didesnis, tuo slydimas mažesnis. Pavyzdžiui, laivų propelerių slydimas yra mažesnis, nes vandens tankis yra gerokai didesnis negu oro. Propelerio slydimas gali būti apskaičiuotas pagal formulę [1]:

$$S = H - Ha, \quad (5)$$

Greičio koeficientas, tai dydis, nusakantis santykį tarp sraigto eigos ir jo skersmens. Jis gali būti apskaičiuotas pagal formulę [1]:

$$\lambda = \frac{Ha}{D} = \frac{V}{nD}, \quad (6)$$

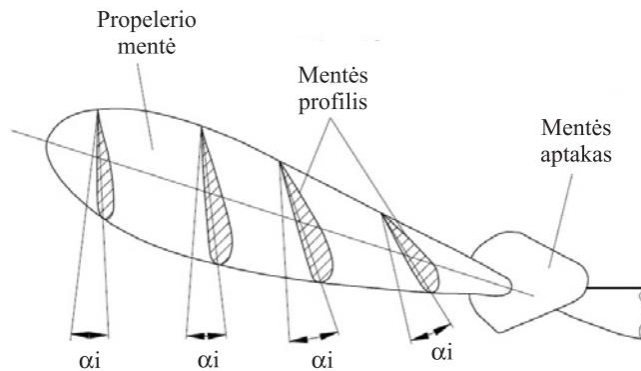


3 pav. Pagrindinės propelerio kinematinės charakteristikos [3]

1.1.3. Oro sraigto mentės elementų atakos kampai ir greičiai

Kaip ir buvo rašyta anksčiau, dėl skirtingo taškų greičio (link mentės galo taškų greitis didėja) skirtingos mentės plokštumos dirba skirtingais atakos kampais. Kadangi greitis per visą jos ilgį kinta, turi kisti ir darbinės plokštumos, t.y., propeleris turi būti kreivinės formos. Norint nagrinėti mentės

veikimą, reikia ją išskaidyti į elementus. Šie elementai gaunami kertant mentę plokštumą, statmena propelerio sukimosi plokštumai (4 pav.) [7][11].



4 pav. Skirtingi mentės elementai [7]

Orlaiviui skrendant, kiekvienas mentės elementas juda sudėtingai, t.y., jis turi ir linijinį judėjimą (orlaivio judėjimo kryptimi) ir sukamąjį judėjimą. Jos apskritiminį greitį galima apskaičiuoti pagal formulę [1]:

$$V_u = 2\pi r n, \quad (7)$$

Čia r – elemento spindulys, m,

n – propelerio apsisukimai, aps/min.

Bendro, suminio propelerio mentės elemento greitis yra apskaičiuojamas sekančiai [1]:

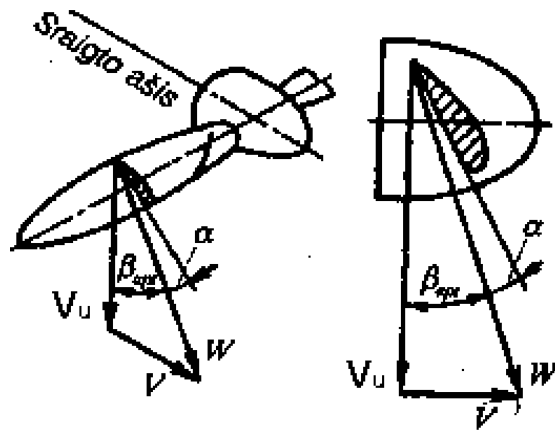
$$W = \sqrt{V_u^2 + V^2} = \sqrt{(2\pi r n)^2 + V^2}, \quad (8)$$

Propelerio mentės elemento atakos kampas – kampas tarp mentės stygos ir suminio greičio vektoriaus W (5 pav.). Jis dar gali būti apskaičiuojamas taip [1]:

$$\alpha = \varphi - \beta_{apt}, \quad (9)$$

Čia φ – mentės tvirtinimo kampas, °,

β_{apt} – srauto aptakos kampas, °.



5 pav. Mentės elementų greičių trikampis [1]

Srauto aptekos kampas nurodo kampą tarp suminio greičio ir sukimosi plokštumos. Jis priklauso nuo greičio koeficiento λ ir elemento spindulio r .

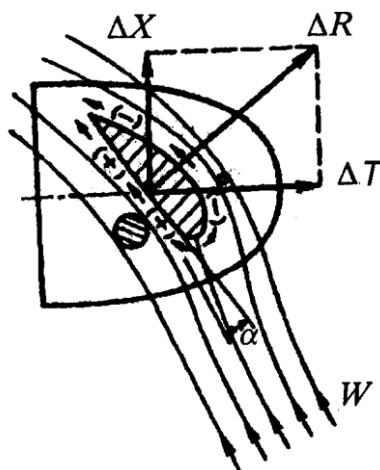
$$\beta_{apt} = \frac{\lambda}{\pi r}, \quad (10)$$

Kaip matyti 5 pav. mentės elementų atakos kampas priklauso nuo pastatymo kampo φ , linijinio greičio V ir apskritiminio greičio V_u . Šio darbo atveju, propeleris bus tvirtinamas prie matavimo stendo, todėl linijinio greičio reikšmė bus lygi nuliui, t.y., atakos kampas α bus lygus pastatymo kampui φ [1][10].

Pastatymo kampas nurodo, kaip atitinkamo mentės elemento styga yra orientuota sukimosi plokštumos atžvilgiu arba, kaip rašoma literatūroje, tai yra „kampas tarp mentės elemento stygos ir srauto sukimosi plokštumos“ [1].

1.1.4. Propelerio pasipriešinimas

Oro srautas, aptekėdamas propelerio mentėmis, sukuria visą aerodinaminę jėgą ΔR (6 pav.). Ši jėga yra visa propelerio traukos ΔT ir visa propelerio pasipriešinimo jėgos ΔX vektorinė suma. Pasipriešinimo jėga atsiranda dėl trinties mentės pasienio sluoksnyje ir dėl slėgių skirtumo priekinėje ir nuolydžio briaunoje [7][10].



6 pav. Aerodinaminės jėgos, atsirandančios dėl srauto aptekėjimo mentimi [1]

Kadangi skirtingi mentės elementai dirba skirtinguose greičio režimuose, gaunamos aerodinaminės jėgos taip pat skiriasi. Paprastai traukos ir pasipriešinimo jėgos išsidėto taip, kaip pavaizduota 7 pav. Norint apskaičiuoti visą mentės traukos jėgą (arba visą jos pasipriešinimo jėgą) reikia sudėti visų mentės elementų traukos jėgas (arba pasipriešinimo jėgas). Jeigu norima gauti propelerio traukos jėgą (arba pasipriešinimo) reikia mentės traukos jėgą (arba pasipriešinimo) padauginti iš menčių skaičiaus propeleryje. Verta paminėti, jog kuo daugiau menčių propeleris turi, tuo, paprastai, jo naudingumo koeficientas mažėja. Formulė, pagal kurią galima nustatyti visą propelerio traukos jėgą [13][3]:

$$P = C_{Pment} \frac{PV^2}{2} W \cdot i, \quad (11)$$

Formulė, pagal kurią galima nustatyti visą propelerio pasipriešinimą [1]:

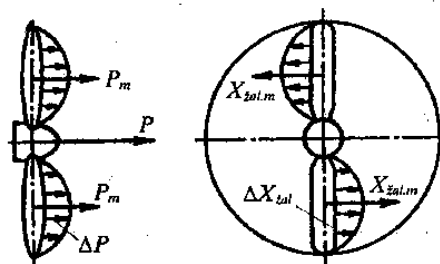
$$X = X_{Pment} \frac{PV^2}{2} W \cdot i, \quad (12)$$

Čia C_{Pment} – mentės traukos koeficientas (nurodomas gamintojo arba nustatomas aerodaminiam vamzdyje),

X_{Pment} – mentės pasipriešinimo sukimui koeficientas (nurodomas gamintojo arba nustatomas aerodaminiam vamzdyje);

i – menčių skaičius,

W – suminis greitis, m/s.



7 pav. Aerodinaminės jėgos atsirandančios dėl srauto aptekėjimo mentimi [1]

1.1.5. Naudingumo koeficiento skaičiavimas

Nepilotuojamų orlaivių traukos sistema dažniausiai susideda iš: energijos šaltinio (akumulatoriaus), ESC (variklio valdymo sistema), elektrinio variklio (dažniausiai trifazio) ir propelerio. Kaip ir buvo minėta anksčiau, elektros variklis elektros energiją verčia į mechaninę energiją, kuri perduodama į variklio veleną. Variklio ir ESC (valdymo sistemos) bendras naudingumo koeficientas yra apskaičiuojamas pagal formulę[5][3]:

$$\eta_{\text{variklio+ESC}} = \frac{\omega Q}{UI} = \eta_{\text{variklio}} * \eta_{\text{ESC}}, \quad (13)$$

Čia ω – kampinis greitis, rad/s,

Q – sukimo momentas, N/m,

U – įtampa, V,

I – srovė, A.

Šiame darbe aprašomame matavimo stende, variklio sukuriamas kampinis greitis bus matuojamas lazeriniu tachometru, o sukimo momentas – tenzorezistoriumi. Įtampa bei srovė bus matuojama ties energijos šaltiniu. Propelerio naudingumo koeficientas bus skaičiuojamas taip [5][3]:

$$\eta_{\text{propelerio}} = \frac{P_i}{P_{\text{mech}}} = \frac{T^{(3/2)}}{Q\omega\sqrt{2\rho A}}, \quad (14)$$

Čia T – propelerio sukuriama traukos jėga, N,

A – propelerio brėžiamo apskritimo plotas, m²,

P_i – gaunama propelerio galia, W,

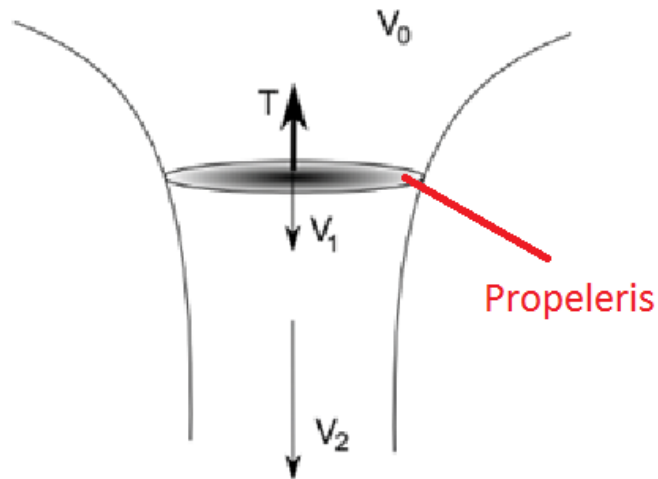
P_{mech} - reikiama variklio galia, W.

Gaunama propelerio galia P_i , apskaičiuojama pagal formulę [5]:

$$P_i = T \cdot V_1 \quad (15)$$

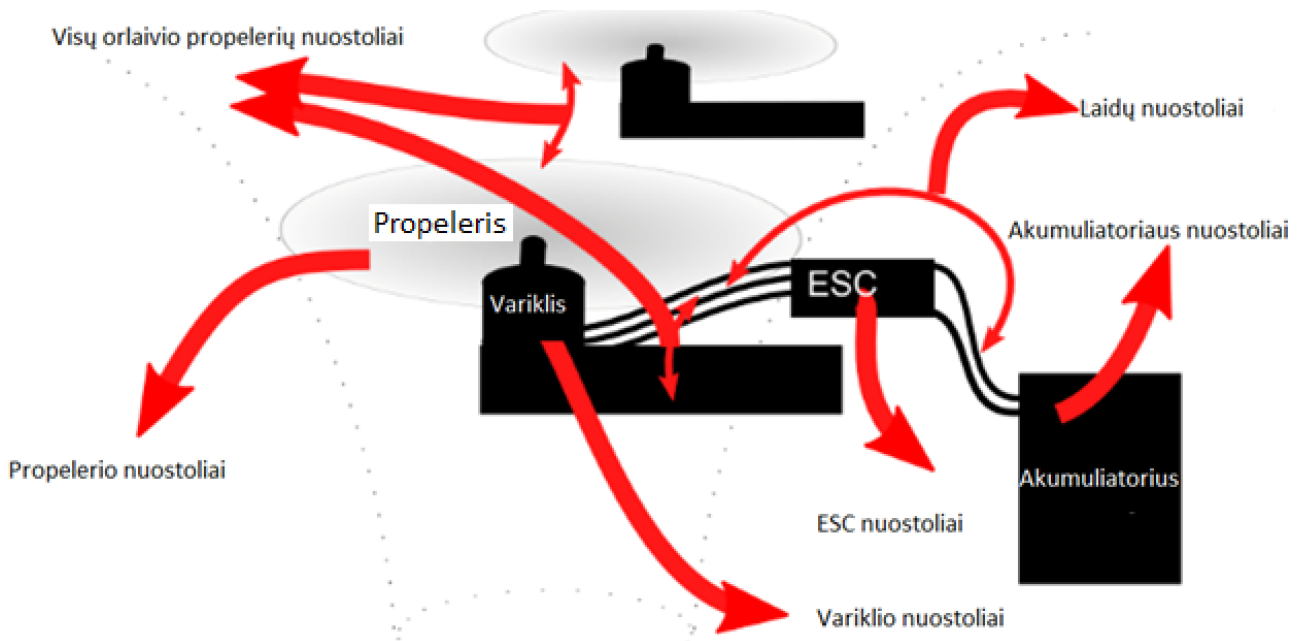
Čia V_1 – srauto greitis už propelerio, m/s.

Kadangi matavimo stende, propeleris išilgai ašies nejuda, t.y., srauto greitis prieš propelerį V_0 bus lygus nuliui (8 pav). Matavimo stende yra numatyta galimybė propelerį dėti į atvirą kanalą (jis apribotų tūrį, kuriame tekėtų srautas). Tokiu atveju atsirastų greitis V_2 , jis, teoriškai, turėtų būti didesnis negu V_1 [5][16].



8 pav. Srauto tekejimas atvirame kanale [5]

Norint apskaičiuoti traukos sistemos naudingumo koeficientą, reikia įvertinti visus atsirandančius nuostolius. 9 pav. vaizduojama, kuriuose elementuose atsiranda energijos nuostoliai (šiluminiai nuostoliai akumuliatoriuje, variklyje, ESC, laiduose bei nuostoliai atsirandantys dėl propelerio ar stendo konstrukcijos netobulumo) [5][18].



9 pav. Traukos sistemoje atsirandantys nuostoliai [5]

1.2. Žinomų bepiločių orlaivių propelerių matavimo stendų analizė

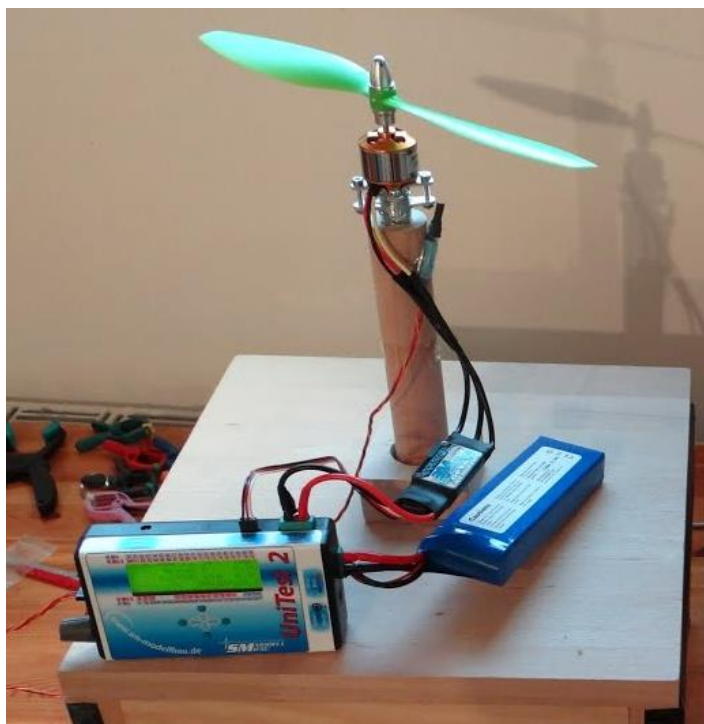
Aviacijoje dauguma skaičiavimų atliekamų projektavimo eigoje vėliau turi būti patvirtinti bandymais. Ne išimtis yra ir orlaivių propeleriai. Jiems tirti naudojami įvairūs matavimo stendai bei aerodinaminiai vamzdžiai. Svarbu, jog turima įranga galėtų kuo tiksliau atkartoti įrenginio eksploatavimo sąlygas.

Orlaivių, kurių skrydžio greitis yra didelis (pvz. fiksuoto sparno bepiločiai orlaiviai), propeleriai turėtų būti tiriami aerodinaminiam vamzdyje.

Multikopterio tipo bepiločių orlaivių skrydžio greitis paprastai būna mažas, jie dažnai skrenda kabėjimo režime. Šio tipo bepiločių orlaivių propeleriai gali būti tiriami statiškai, be pridėtinio oro srauto, t.y., su matavimo stendu, o ne aerodinaminio vamzdyje. Šiame skyriuje aprašomi matavimo stendai, kurie naudojami statiniams tyrimams atlikti. Tokio tipo matavimo stendai yra skirstomi pagal propelerio pastatymo kampą – vertikalaus arba horizontalaus tipo.

1.2.1. Vertikalaus tipo

Vertikalaus tipo – šio tipo matavimo stendai turi vertikaliai pritvirtintą propelerį, t.y., jo sukuriamas oro srautas yra vertikalios krypties (10 pav.). Šio tipo matavimo stendo didžiausias privalumas yra paprasta konstrukcija bei maža kaina. Propeleris gali būti tiesiogiai arba per velenėlį prijungtas prie variklio. Variklis yra tvirtinamas prie rėmo, o rėmas tvirtinamas ant jutiklio (pvz. svarstyklių). Propelerio sukuriama keliamoji jėga visą konstrukciją veiks vertikalia kryptimi, kuri bus nukreipiama į viršų arba į apačią (priklausomai nuo propelerio orientacijos). Įjungus variklį, propeleriui sukantis keliamoji jėga prisidės arba atsiims iš jutiklį veikiančios svorio jėgos. Pagal jėgos pokytį galima nustatyti kokia yra keliamoji jėga. Propelerio sukuriamas sukimo momentas bei apsisukimų skaičius per minutę nėra matuojami [14][17].

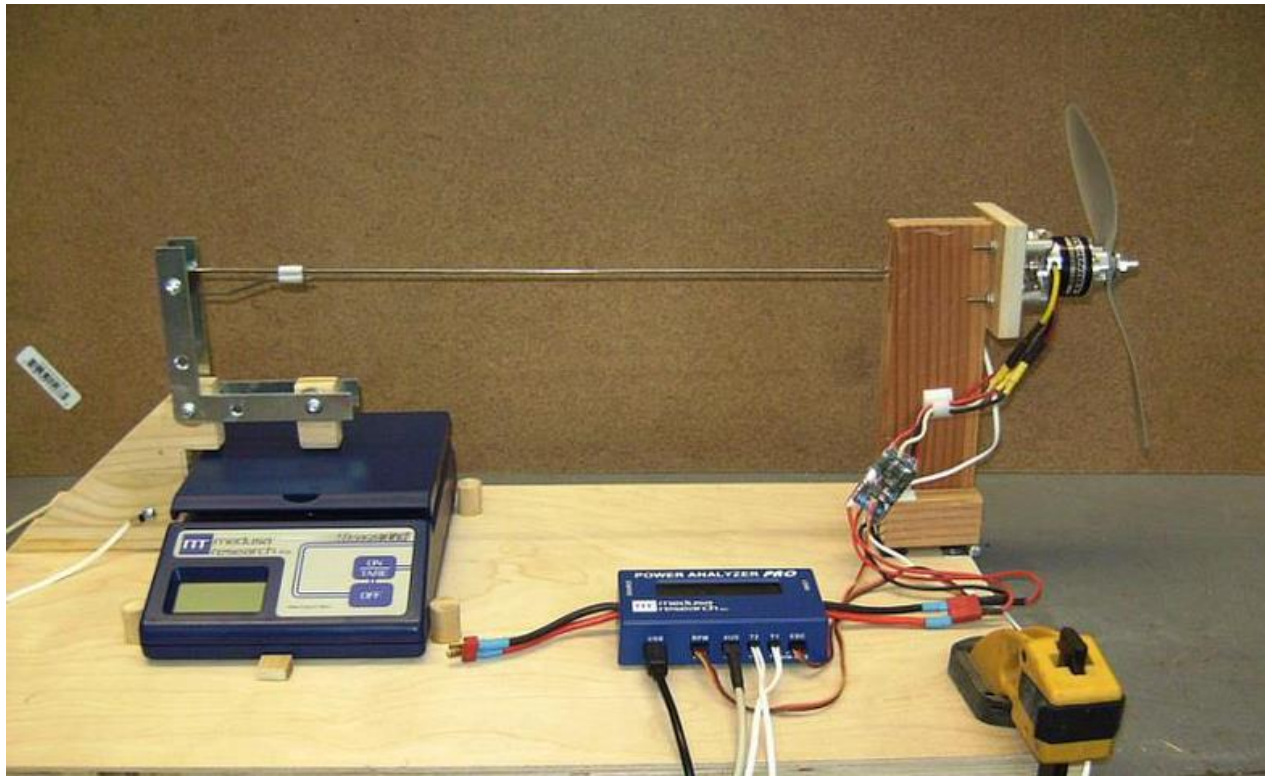


10 pav. Vertikalaus tipo matavimo stendas [26]

Didžiausias tokio matavimo stendo trūkumas yra tas, kad matavimams turi įtakos susidaręs žemės efektas. Norint išvengti žemės efekto, sudėtingėja matavimo stendo konstrukcija. Reikia naudoti ilgas velenėlius, kurie atitolintų propelerį nuo žemės arba stendo pagrindo. Dėl ilgo veleno gali atsirasti mušimas, todėl reikalingi dideliu atstumu vienas nuo kito išdėstyti guoliai.

1.2.2. Horizontalaus tipo

Horizontalaus tipo - šio tipo matavimo stendai turi horizontaliai pritvirtintą propelerį, t.y., jo sukuriamas srautas teoriškai yra horizontalios krypties (11 pav.). Ši konstrukcija yra nežymiai sudėtingesnė nei vertikalaus tipo matavimo stendo konstrukcija. Kadangi propelerio srautas yra nukreipiamas nuo matavimo stendo, žemės efektas neturi įtakos matavimo rezultatams. Šiai konstrukcijai nereikalingi ilgi velenėliai, todėl neatsiranda mušimo, atstumai tarp guolių gali būti maži [17].

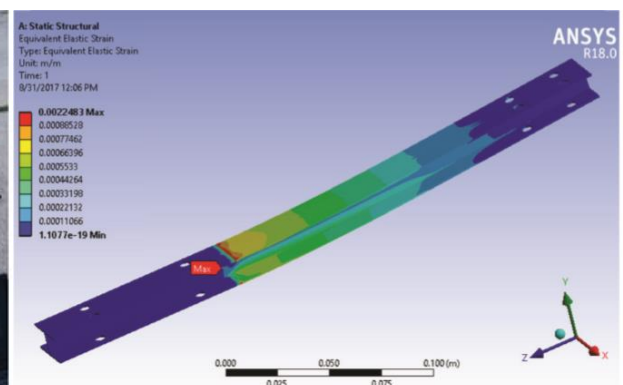


11 pav. Horizontalaus tipo matavimo stendas [27]

Papildomai horizontalaus tipo matavimo stendai gali būti skirstomi pagal jų konstrukciją, naudojamus jutiklius ir t.t.. Veikimo principas tarp skirtingų jų tipų išlieka labai panašus. Besisukantis propeleris sukuria horizontalia kryptimi veikiančią traukos jėgą, bei priešingai propelerio sukimosi kryptiai – sukimo momentą. 12 pav. a vaizduojamas matavimo stendas, kuriame keliamoji jėga apskaičiuojama pagal tenzorezistorių parodymus [12] (propelerio sukimo momentas nėra matuojamas). Propeleriui sukantis, atsiradusi keliamoji jėga deformuoja siją, todėl prie jos pritvirtintuose, tenzorezistoriuose pakinta įtampa. Atlikus skaičiavimus bei simuliacijas (12 pav. b) sužinomos sijos deformacijos prie atitinkamų jėgų. Pagal įtampos pokytį galima apskaičiuoti sijos deformaciją. Žinodami deformacijos dydį galime nustatyti traukos jėgą [12].



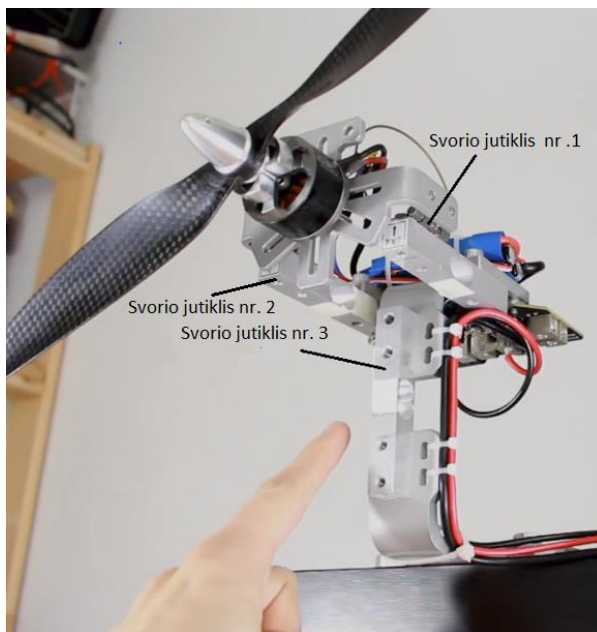
a)



b)

12 pav. Horizontalaus tipo matavimo stendas su deformuojama sija (a) bei su sija atlikti simuliacijos rezultatai (b) [12]

13 pav. vaizduojamas matavimo stendas, kuriuo galima nustatyti propelerio sukuriamą traukos jėgą bei sukimo momentą. Matavimams atlikti naudojami standartiniai svorio jutikliai (su tenzorezistoriumi). Propelerio sukuriamas sukimo momentas yra nustatomas pagal svorio jutiklių (nr. 1 ir nr. 2) deformaciją (13 pav.). Traukos jėga nustatoma pagal svorio jutiklio (nr. 3) deformaciją (13 pav.) [24].



13 pav. Horizontalaus tipo matavimo stendas [24]

Tokio matavimo stendo veikimo principas yra labai panašus į [12] šaltinyje naudotą stendą. Pagrindinis skirtumas yra tas, jog, šiuo atveju, traukos jėgos dydis yra nustatomas pagal svorio jutiklio deformaciją, o ne rėmo elemento. Tokios matavimo schemos privalumas – galima tiksliau išmatuoti deformacijas.

Verta paminėti, jog dauguma šiame skyriuje aprašytų matavimo stendų yra pagaminti tam tikrų universitetų studentų ar mokslininkų. Gamybai reikalinga dokumentacija (detalių sąrašas, darbo bei surinkimo brėžiniai) nėra pateikiami, todėl aprašytų matavimo stendų, atkartoti ir pagaminti neįmanoma. Taip pat, visi matavimo stendai yra pritaikyti tirti tik tam tikrų parametrų propeleriams. Techninės charakteristikos nėra pateikiamos, todėl nėra aišku ar aprašomi matavimo stendai tiks šio darbo tyrimams. Tik [24] šaltinyje pateiktas matavimo stendas yra gaminamas bei parduodamas (Jungtinėse Amerikos Valstijose). Taip pat yra pateikiamos jo techninės charakteristikos. Tokio matavimo stendo kaina yra gan didelė – 695 doleriai arba apie 622 eur. (papildomai kainuoja ir atsiuntimas į Lietuvą bei maito ir PVM mokesčiai). Dėl šių priežasčių nuspręsta projektuoti bei pagaminti savo matavimo stendą. Visi šiai įrangai keliami reikalavimai bei projektavimo ir gamybos eiga yra aprašoma šio darbo 2 skyriuje.

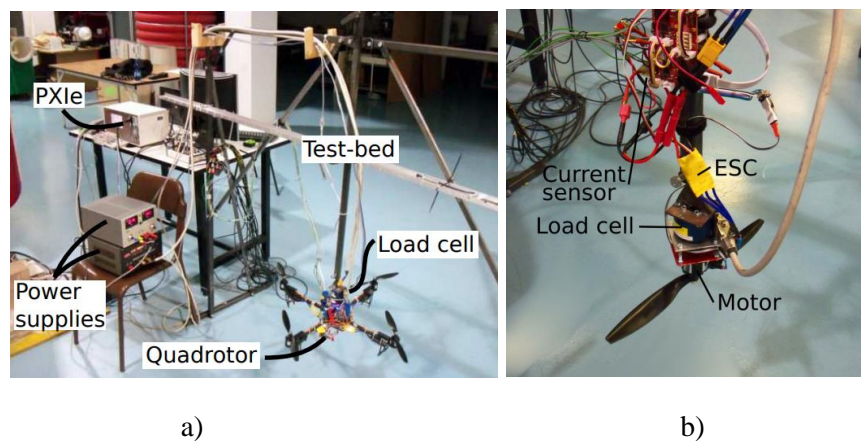
1.3. Praktinių pavyzdžių su matavimo stendais analizė

Šiame skyriuje bus aprašinėjami tyrimai atlikti naudojant matavimo stendus.

1.3.1. Žemės efektas.

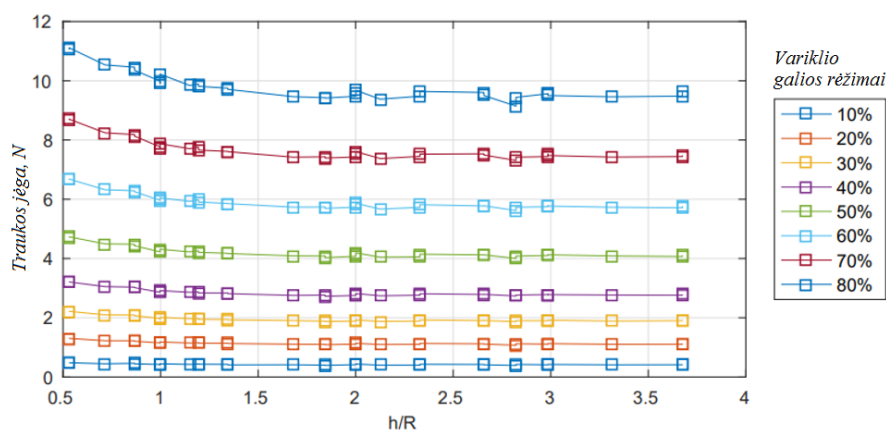
Žemės efektas aprašo propelerio traukos padidėjimą (nekeičiant variklio galios), kai orlaivis skrenda arti žemės. Iki šiol atlikta daug tyrimų, kurie aprašo žemės efekto įtaką pilotuojamų orlaivių (ypač sraigtasparnių) skrydžio savybėms. To paties negalima pasakyti apie nepilotuojamus orlaivius. Kadangi, dėl technologijų tobulėjimo bei stipriai sumažėjusios kainos, nepilotuojami orlaiviai labai stipriai populiarėja, atsiranda vis didesnis poreikis tokių tyrimų atlikimui.

[4] šaltinyje aprašomo tyrimo metu buvo nustatytos propelerio sukuriama traukos jėgos reikšmės, kai jos veikia žemės efekto zonoje. Tyrimui atlikti buvo pagamintas matavimo stendas (14 pav.). Stendo veikimo principas gan paprastas: propelerio sukuriama traukos jėga deformuoja apkrovos elementą ant kurio yra jutiklis (tenzorezistorius). Pagal jutiklio parodymus buvo nustatoma, kokią traukos jėgą sukuria propeleris. Taip pat buvo matuojami variklio apsisukimai (naudojant tachometrą) bei variklio sunaudojama elektros srovė. Variklis, įvairiais galios režimais, propelerį suko skirtinguose aukščiuose [4].



14 pav. Matavimo stendas. a) tiriamos nepilotuojamo orlaivio savybės; b) tiriamos propelerio savybės [4]

Bandymo rezultatai (15 pav.) parodė, jog žemės efekto įtaka didėja augant variklio apsisukimams. Aiškų propelerio traukos padidėjimą buvo matomas, kai variklio galia siekė 50 arba daugiau procentų. Iš rezultatų galima daryti išvadą, jog žemės efektas pasireiškia $\frac{h}{R} < 2.5$ zonoje [4], čia R – propelerio spindulys, h – atstumas nuo pagrindo iki propelerio [4].

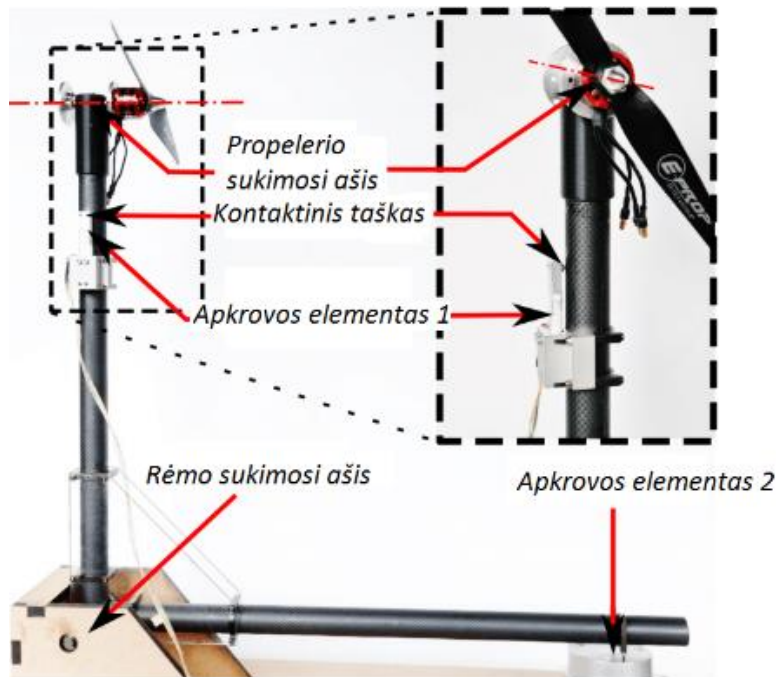


15 pav. Žemės efekto įtakos traukos jėgai tyrimo rezultatai [4]. Čia R – propelerio spindulys, h – atstumas nuo pagrindo iki propelerio.

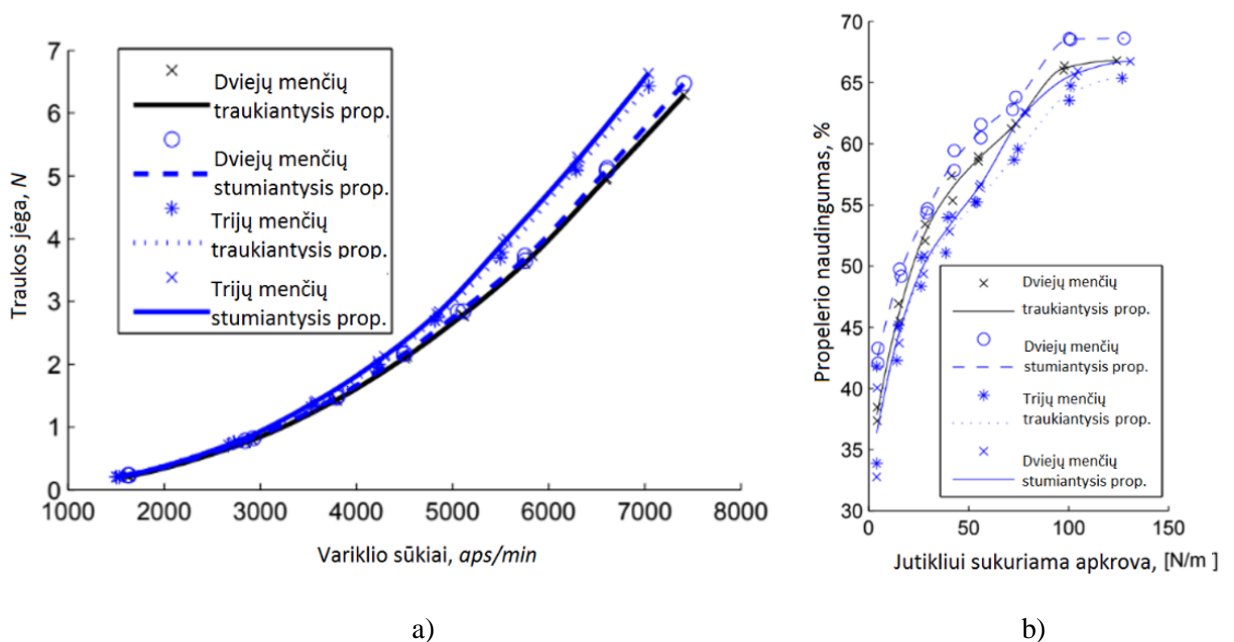
1.3.2. Menčių skaičiaus ant propelerio įtaka traukos jėgai ir naudingumo koeficientui.

Dažniausiai nepilotuojami orlaiviai eksploatuojami su dviejų menčių propeleriais. Nepaisant to, yra gamintojų kurie siūlo analogiškus propelerių modelius, su trimis arba daugiau menčių. [5] šaltinyje aprašomo tyrimo metu, buvo lyginami vienodo modelio propeleriai su skirtingais menčių kiekiais. Naudoti propeleriai - Graupner 9x5E prop [5] trijų bei dviejų menčių modeliai. Jie buvo tvirtinami ant DJI 2212/920KV trifazio variklio veleno (variklis valdomas su ESC). Maitinimo šaltinis – 11,1V akumuliatorius. Tyrimo metu patalpoje esantis slėgis, temperatūra bei oro drėgnumas taip pat buvo įvertinti. Matavimas buvo atliktas naudojant matavimo standą (16 pav.). Jo veikimo principas toks: traukos jėga, veikianti propelerio sukimosi ašies kryptimi, lenkia visą rėmą per jo sukimosi ašį. Rėmas šią jėgą perduoda į apkrovos elementą 2 (jautiklį su tenzorezistoriumi). Propelerio sukuriamas sukimo momentas nustatomas matuojant rėmo poslinkį, t.y., apkrovos elementas 1 yra deformuojamas per kontaktinį tašką (16 pav.).

Tyrimo metu, variklio apsukos kito nuo 1500 aps/min iki beveik 8000 aps/min. Iš rezultatų (17 pav. a) matoma, jog trijų menčių propeleris sukūrė didesnę trauką negu dviejų menčių propeleris prie tokių pačių variklio apsisukimų. Aiškus traukos jėgos skirtumas prasideda nuo maždaug 4000 aps/min. Kadangi lėčiau besisukdamas propeleris sukuria mažesnę triukšmą, trijų menčių propeleris eksploatacijos metu bus tylsnis. Nepaisant didesnės traukos, trijų menčių propelerio naudingo koeficientas buvo gautas vidutiniškai 4% mažesnis negu dviejų menčių (17 pav. b).



16 pav. Matavimo stendas [5]

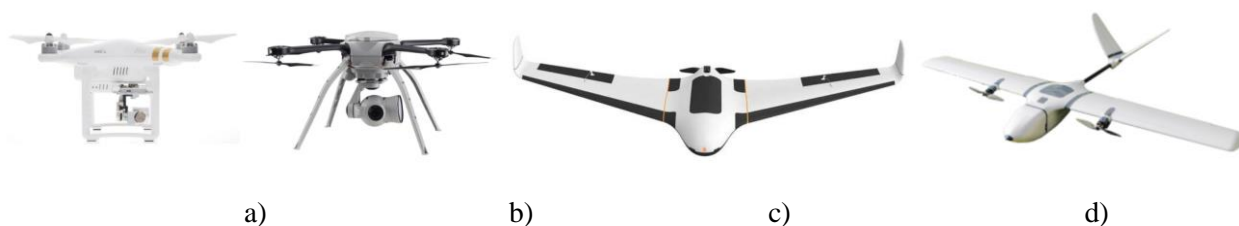


17 pav. Rezultatų kreivės: a) traukos priklausomybė nuo variklio apsisukimų; b) propelerių naudingumo koeficientas [5]

1.3.3. Traukiančiojo ir stumiančiojo propelerių palyginimas

Ant nepilotuojamų orlaivių propeleriai gali būti montuojami įvairiai (18 pav.). Fiksuoto sparno orlaiviuose propeleris gali būti dedamas sparno (arba orlaivio) priekyje arba gale. Priekyje esantys propeleriai paprastai yra traukiantieji (dar kitaip vadinami traukiamaisiais sraigtais), o propeleriai esantys už sparno paprastai yra vadinami stumiančiais. Sukasparniuose (pvz. multikopteriuose)

orlaiviuose propeleris gali būti dedamas virš laikančio rėmo arba žemiau jo. Jeigu propeleris tvirtinamas žemiau laikančio rėmo jis vadinamas stumiančiuoju, o jeigu jis tvirtinamas virs laikančio rėmo – traukiančiuoju [7][5].

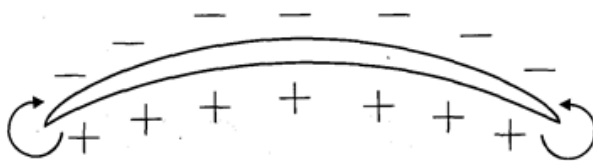


18 pav. Propelerio tvirtinimo būdai: a) traukiantysis; b) stumiantysis; c) stumiantysis; d) traukiantysis [5]

[5] šaltinyje aprašomo tyrimo metu, buvo nustatyta kaip skiriasi sukuriama traukos jėga bei naudingumo koeficientas nuo propelerio tvirtinimo būdo. Darbui atlikti buvo naudojama prieš tai aprašyta įranga (16 pav.). 17 pav. b vaizduojamas propelerio naudingumo koeficientas. Iš rezultatų galima daryti išvadą, kad visais atvejais didesnis naudingumo koeficientas gaunamas prie didesnių traukos jėgos reikšmių. Taip pat galima daryti išvadą, jog stumiančiųjų propelerių naudingumo koeficientas yra didesnis, nei traukiančiųjų (apie 3 % nuo 25 N/m iki 120 N/m sukimo momento diapazone). 17 pav. a vaizduojama sukuriamos traukos jėgos priklausomybė nuo variklio apsisukimų. Iš šių rezultatų galima daryti išvadą, jog stumiantieji propeleriai sudaro šiek tiek didesnę traukos jėgą negu traukiantieji prie tokių pačių apsisukimų [5].

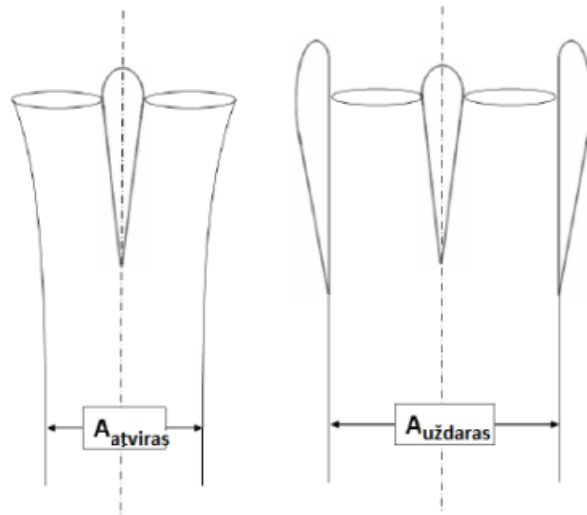
1.3.4. Kanalinio propelerio ir atviro propelerio palyginimas

Fiksuoto sparno orlaiviui skrendant, viršutinėje sparno dalyje, dėl didesnio oro srauto greičio, atsiranda oro išretėjimas (žemo slėgio zona). Kadangi oro slėgis apatinėje sparno dalyje yra didesnis, atsiranda keliamoji jėga nukreipta į žemo slėgio sritį – sparno keliamoji jėga. Kadangi orlaivio sparnas nėra begalinio ilgio, sparno galuose oro srautas iš aukštos slėgio zonos bando pereiti į žemo slėgio zoną (19 pav.). Šis efektas sukelia oro srauto sūkurius sparno galuose, didelį triukšmą bei energijos nuostolius. Dar kitaip jis vadinamas – indukcinio pasipriešinimu [19][7].



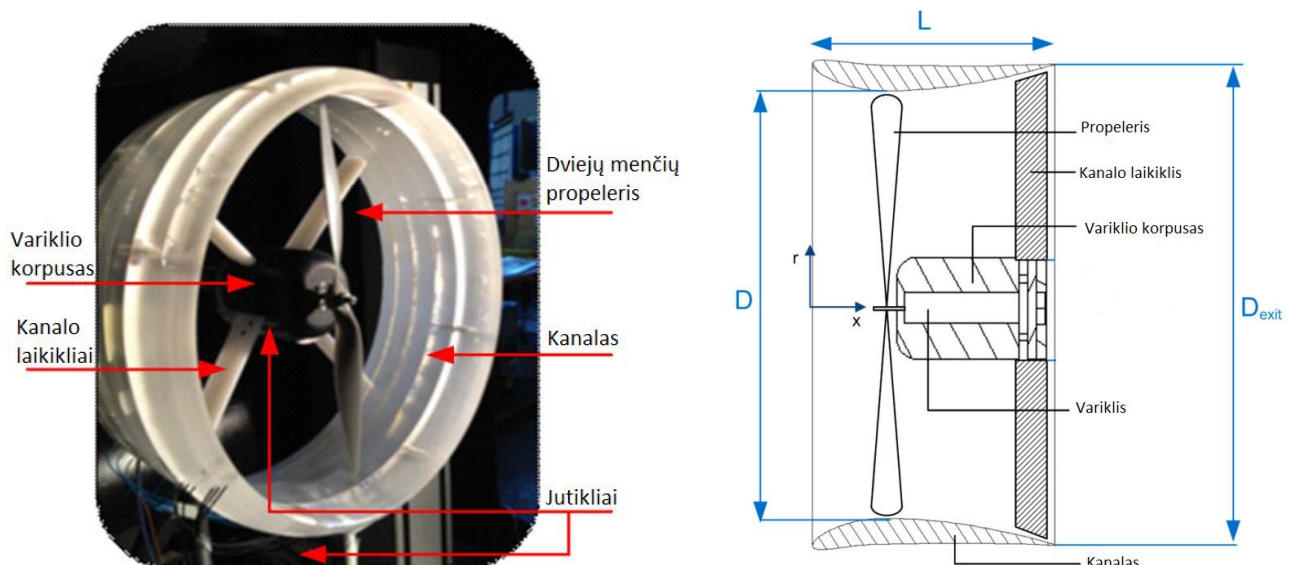
19 pav. Oro srauto užlinkimas sparno galuose [7]

Šis reiškinys pasireiškia ir veikiant propeleriui, t.y., dėl slėgių skirtumo virš mentės ir žemiau jos, galuose atsiranda oro srauto užlinkimas ir sūkuriai. Verta paminėti, jog besisukdamas propeleris sukuria ir papildomą išcentrinę jėgą, kuri oro srautą stumia link mentės galo, t.y., dar labiau padidina indukcinį pasipriešinimą. Norint sumažinti energijos nuostolius dėl indukcinio pasipriešinimo galima naudoti šiuos būdus: mentės galuose sumažinti traukos jėgą (nulinis atakos kampas), užlenkti mentės galą, naudoti kanalinis propelerius. Būtent kanalinis propeleris imituoja „begalinio sparno“ idėją. Taip pat, kanalinis propeleris yra saugesnis, nes propeleris sukasi uždareme žiede (20 pav.). Jeigu kanalo skerspjūvio forma yra atitinkanti aerodinaminį profilį, jis gali sukurti papildomą keliamąją jėgą (tam tikros kanalo vietos gali veikti kaip sparnas) [19][8].



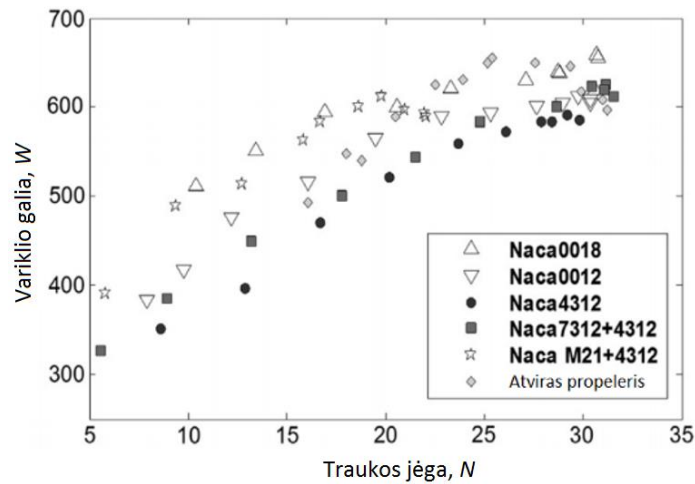
20 pav. Atviras propeleris (kairė) ir kanalinis propeleris (dešinė) [8]

[8] šaltinyje aprašomo darbo metu, buvo tiriama ar kanalinis propeleris išgauna geresnes aerodinamines savybes negu paprastas atviras propeleris. Darbui atlikti buvo pagaminta speciali įranga, ji vaizduojama 21 pav. Taip pat buvo panaudotas Stambulo technikos universiteto turimas aerodinaminis vamzdis. Verta paminėti, jog aprašomo tyrimo metu, buvo bandomi (ir lyginami) penki skirtingi propelerio kanalai. Kiekvieno propelerio kanalo skerspjūvio forma atitinka tam tikrą aerodinaminį profilį.



21 pav. Tyrimo metu naudota įranga [8]

Tyrimo rezultatai vaizduojami 22 pav. Galios ir traukos santykis naudojant NACA7312+4312 profilį yra apie 15% mažesnis negu atviro propelerio, t.y., naudojant tą pačią variklio galią yra gaunama didesnė traukos jėga. Naudingumo koeficientas stipriai priklausė nuo kanalui naudojamam aerodinaminio profilio. Profiliai NACA0018, NACA M21+4312 naudingumo koeficientą sumažino, t.y., naudojant kanalus su šiais aerodinaminiais profiliais, varikliui reikėjo išvystyti didesnę galią, norint pasiekti tokią pačią traukos jėgą kaip su atviru propeleriu [8].

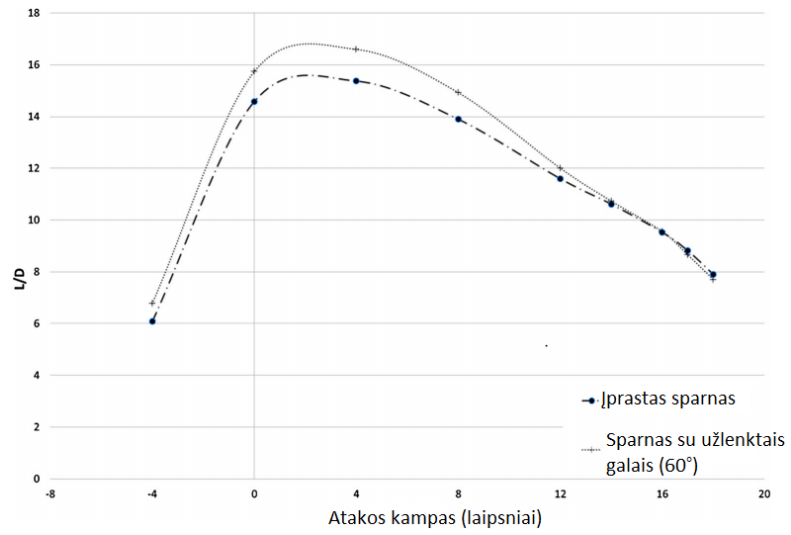


22 pav. Tyrimo rezultatai. Sukuriamos traukos priklausomybė nuo variklio galios [8]

1.3.5. Propelerių menčių su užlenktais galiukais „Q-tips“ savybių tyrimas

Užlenkti menčių galiukai (dar vadinami „Q-Tips“) praktikoje dažniausiai naudojami norint sumažinti propelerio sukuriamą triukšmą. Jų veikimo principas yra labai panašus į kanalinio propelerio, t.y., užlenkti menčių galai sukuria barjerą, kuris sumažina tikimybę oro srautui, menčių galuose, pereiti iš aukšto slėgio srities į žemą. Teoriškai, tokia menčių forma turėtų sumažinti induktyvųjį pasipriešinimą. Kadangi su tokio tipo propeleriais atlikta mažai tyrimų, bus pateikti darbai, kuriuose buvo tiriami lėktuvo sparnai [9].

[9] šaltinyje aprašomo tyrimo metu, buvo lyginamos penkių skirtingų sparnų aerodinaminės savybės. Pirmasis sparnas buvo įprastos formos, sekantys keturi turėjo tam tikru kampu užlenktus galus ($90^\circ, 70^\circ, 60^\circ, 50^\circ$). Visų sparnų aerodinaminiai profiliai buvo vienodi. Geriausi rezultatai buvo pasiekti su penktuoju sparnu, kurio galai buvo užlenkti 60° . 23 pav. vaizduojami rezultatai, kuriuose penktas sparnas lyginamas su pirmuoju. L/D („Lift / Drag“) nurodo santykį tarp keliamosios jėgos ir pasipriešinimo jėgos. Kaip matome iš rezultatų, sparnas su užlenktais galais pasiekia geresnius aerodinaminius rodiklius. Aprašomame darbe nustatyta, jog buvo pasiektas 10% naudingumo koeficiento padidėjimas [9].



23 pav. Tyrimo rezultatai. Keliamosios jėgos ir pasipriešinimo jėgos santykis kintant atakos kampui [9]

2. Projektinė dalis

Atlikus žinomų matavimo stendų analizę buvo pasirinkta konstruoti horizontalaus tipo matavimo stendą. Tokio tipo stendai, dėl savo konstrukcijos turi mažiausią rezultatų iškraipymą dėl žemės efekto įtakos. Pagrindiniai reikalavimai keliami matavimo stendui yra šie:

1. besisukančio propelerio sukuriamos traukos jėgos matavimas;
2. apsisukimų skaičiaus matavimas;
3. lengvas propelerių pakeičiamumas;
4. lengvas stendo transportavimas;
5. Iš dalies maža kaina;
6. paprastas aptarnavimas.

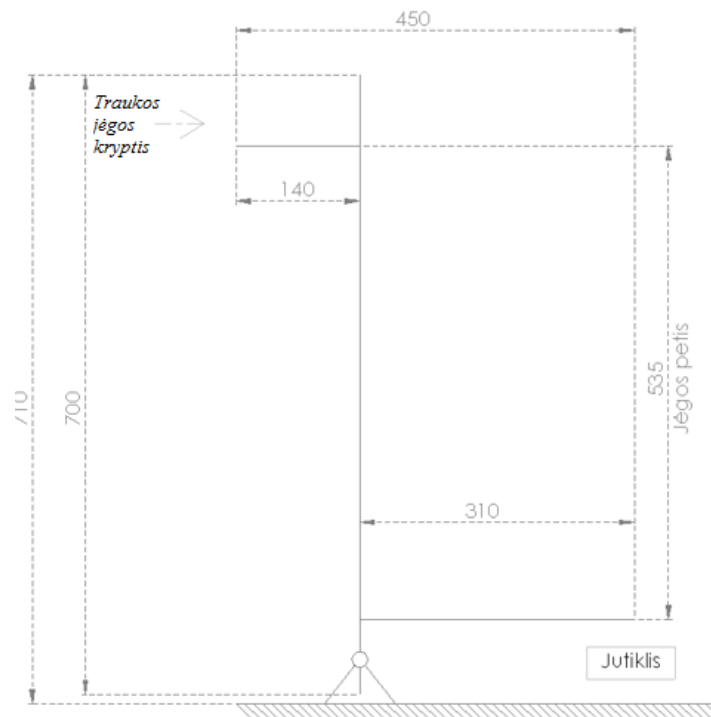
Šis matavimo stendas yra pritaikytas statiniams tyrimams atlikti. Tokio tipo tyrimai yra aktualiausi mažo skrydžio greičio bepiločių orlaivių propeleriams (pvz. multikopteriams).

Atlikus pirmuosius bandymus buvo nuspręsta pridėti sukimo momento matavimo bloką. Apie šias revizijas plačiau aprašoma 2.3 skyriuje.

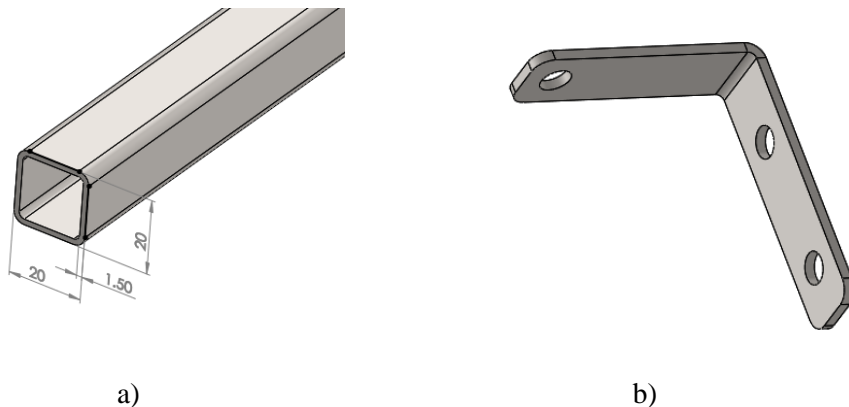
2.1. Matavimo stendo mechaninės dalies projektavimas

Prieš pradėdant projektuoti mechaninę stendo dalį, pirma yra sudaroma struktūrinė jo schema (24 pav.). Schemoje yra nurodoma kokių gabaritų yra projektuojamas stendas (450 mm x 710 mm), nurodoma kurioje vietoje yra dedamas propeleris ir kokia kryptimi veiks keliamoji (traukos) jėga. Taip pat yra nurodoma, per kokio ilgio petį jėga persiduos jutikliui (535 mm).

Projektavimas pradėdamas nuo rėmo konstrukcijos, nes ji yra apibrėžta struktūrinėje schemoje (24 pav.). Kadangi propelerio sukuriamos jėgos yra iš dalies mažos, rėmo profiliai parenkami kuo lengvesni bei pigesni. Jį sudaro vienodi (dėl technologiskumo bei paprastumo) standartiniai profiliai (medžiaga - plienas ISO S355JR) 20 mm x 20 mm x 1.5 mm (25 pav. a).



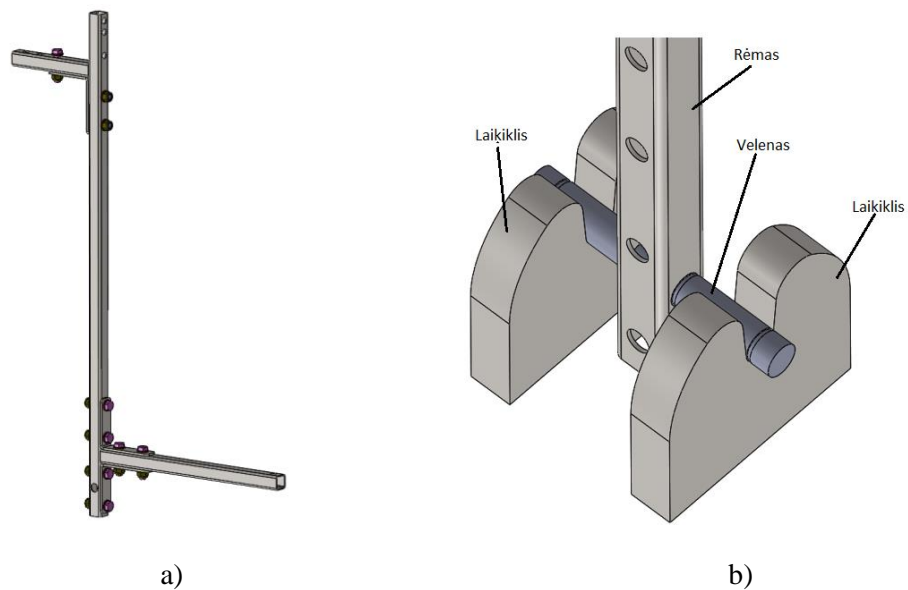
24 pav. Horizontalaus matavimo stendo struktūrinė schema



25 pav. Matavimo stendo elementai; a) standartinis profilis; b) kampainis

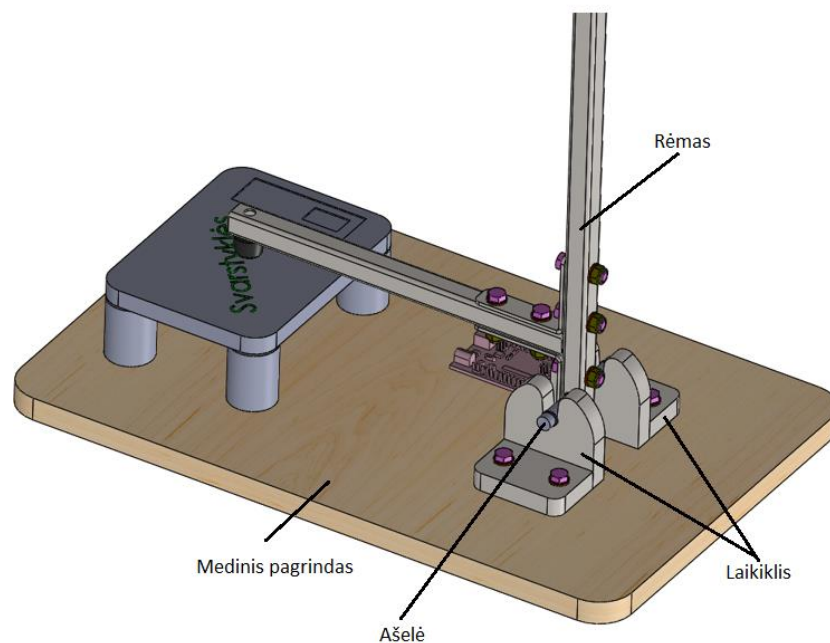
Atskiri rėmo profiliai tvirtinami išardomomis jungtimis (varžtais, poveržlėmis, veržlėmis) tam, kad transportavimo metu stendą būtų galima lengvai išardyti. Parinkta (išardoma) konstrukcija garantuoja lengvesnį tobulinimą, taisymą bei transportavimą. Tvirtinimui tai pat naudojami iš ISO 235JR plieno pagaminti kampainiai (25 pav. b). Rėmas, kartu su visais tvirtinimo elementais, vaizduojamas 26 pav. a.

Toliau projektuojamas rėmo tvirtinimo prie pagrindo mazgas. Kaip nurodyta struktūrinėje schemoje (24 pav.), rėmo apačia yra jungiama prie pagrindo svyruojančiu elementu. Tvirtinimas parenkamas atviras, t.y., rėmas gali būti paprastai įstatomas į laikiklį ir lengvai iš jo išimamas (26 pav. b).



26 pav. Matavimo stendo fragmentai; a) horizontalaus matavimo stendo rėmas; b) rėmo tvirtinimo mazgas

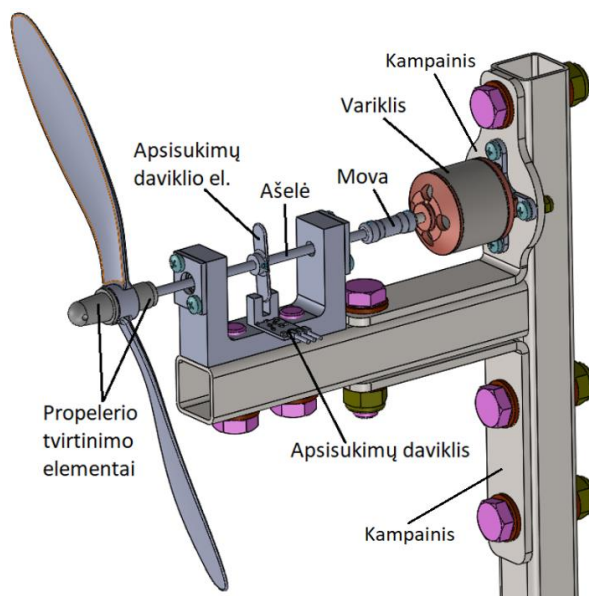
Velene sudaromos įpjovos į kurias įdėti tvirtinimo žiedai. Jie reikalingi, jog velenas neišsimautų iš rėmo ir laikiklio. Prie laikiklių privirinamos papildomos auselės, t.y., tvirtinimo elementai (27 pav). Kadangi stendo pagrindui nėra keliami dideli tikslumo reikalavimai, jis yra gaminamas iš medžio. Rėmo laikiklis su privirintais tvirtinimo elementais yra prisukamas prie medinio pagrindo varžtais (27 pav).



27 pav. Matavimo stendo fragmentas

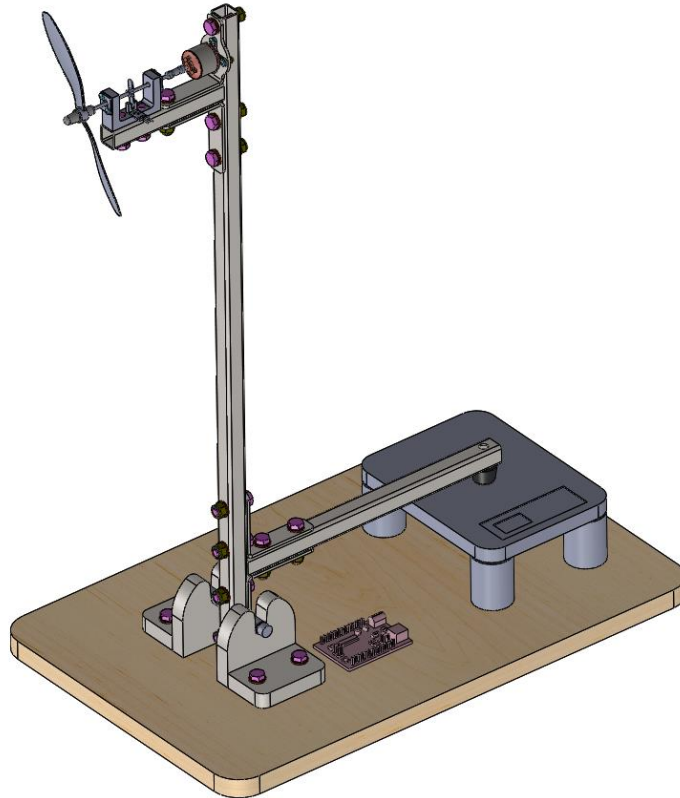
Toliau projektuojamas variklio bei propelerio tvirtinimas. El. variklis prie rėmo yra pritvirtintas kampiniu. Kadangi siekiama, jog matavimo stendas būtų lengvai tobulinamas bei modifikuojamas, propeleris prie variklio jungiamas ne tiesiogiai, o per papildomą velenėlį. Jis su variklio velenu yra sujungtas standartine mova. Velenas įtvirtinamas riedėjimo guoliuose, kad būtų kuo mažesnis

mušimas. Guoliu laikiklyje taip pat numatyta vieta, kur yra tvirtinamas apsisukimų daviklis. Kad daviklis veiktų tinkamai, reikia ant velenėlio pritvirtinti papildomą elementą (28 pav.). Jis tvirtinamas kaip mova – standartiniais DIN 914 M2 dydžio sraigtais be galvutės. Propeleris prie velenėlio tvirtinamas standartinėmis jungtimis. Visi standartiniai elementai yra nurodyti detalių sąrašė, šio darbo 1 priede. 28 pav. vaizduojamas šioje pastraipoje aprašytas surinkimo mazgas.

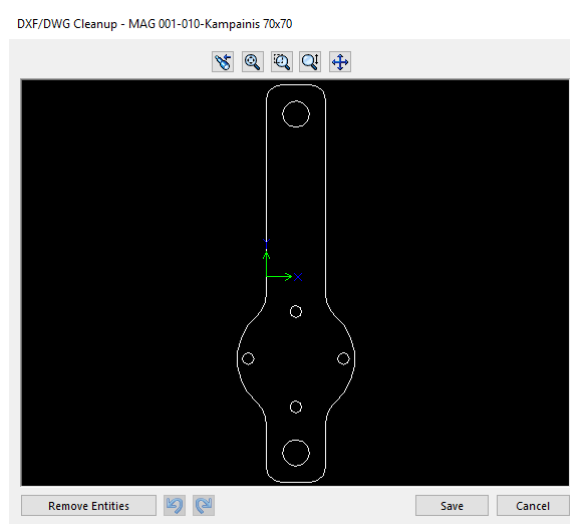


28 pav. Propelerio bei el. variklio tvirtinimo mazgas

Suprojektavus visus šiuos elementus yra gaunamas galutinis horizontalaus matavimo stendo modelis (29 pav.). Toliau sekė darbo ir surinkimo brėžinių bei detalių sąrašo sudarymas. Tam tikri elementai (arba jų ruošiniai) buvo pjaunami su lazerio pjovimo staklėmis, todėl buvo būtina paruošti pjovimo rinkmenas (30 pav.) (angl. files). Visa reikiama dokumentacija šio matavimo stendo gamybai (darbo ir surinkimo brėžiniai, detalių sąrašas bei ruošinių rinkmenos) pateikiama šio darbo 1, 2, 3 prieduose.



29 pav. Suprojektuoto matavimo stendo CAD modelis

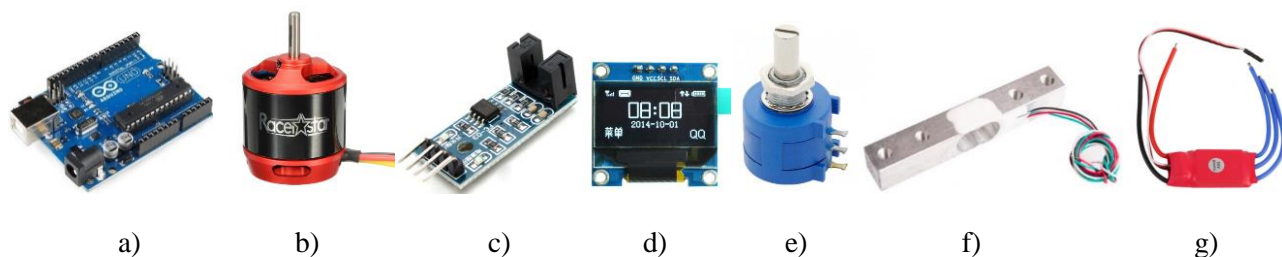


30 pav. Kampainio ruošinio (išsklotinės) rinkmena.

2.2. Matavimo stendo elektroninės dalies projektavimas

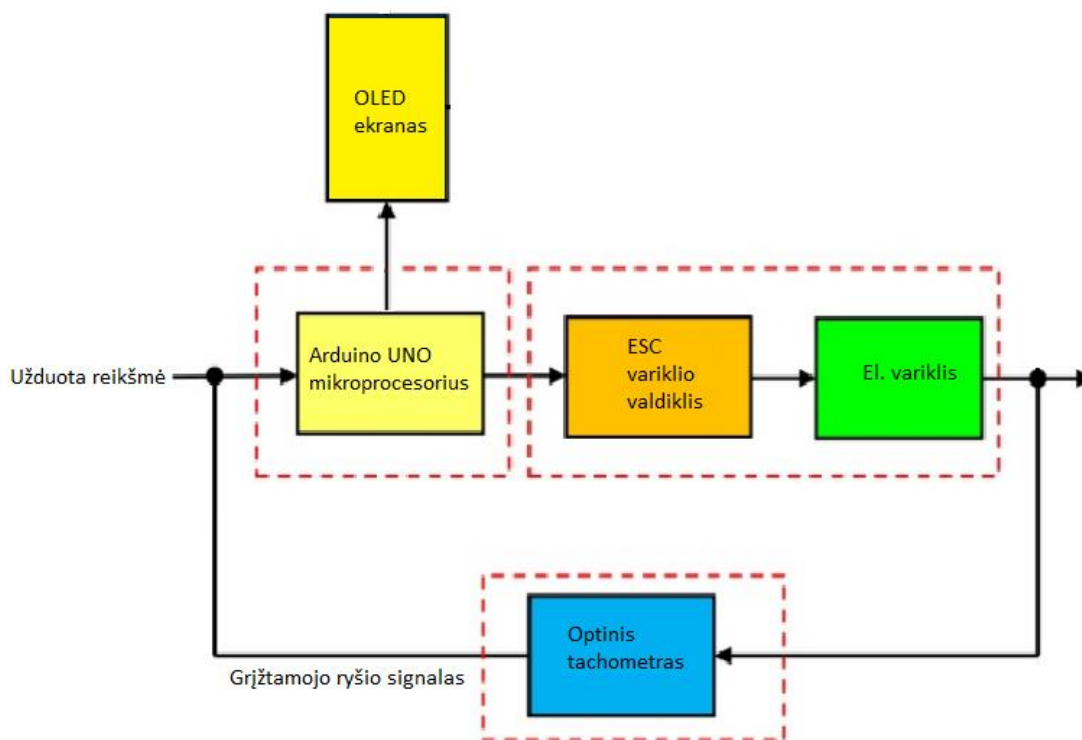
Matavimo stendui buvo pasirinkta naudoti atviro kodo sistemą „Arduino“. Tokios sistemos pagrindinis privalumas yra tai, jog į ją iš dalies lengva integruoti įvairius jutiklius bei jų sistemas. Pagrindiniai elementai naudoti matavimo stendo elektrinei daliai yra vaizduojami 31 pav. Traukos

jėgos matavimui yra naudojamos svarstyklės. El. variklis yra maitinamas iš 11.1V, 14.8V, 19.5V akumuliatorių (priklausimo nuo propelerio dydžio).



31 pav. Matavimo stende naudoti elektronikos elementai; a) „Arduino UNO“ mikrovaldiklis [23]; b) „Racerstar BR2830 1300KV“ trifazis elektros variklis [22]; c) optinis jutiklis [22]; d) OLED ekranas [22]; e) 100Ohm daugiasūkis potenciometras [23]; f) svorio jutiklis [23]; g) Variklio valdiklis [22]

Pirmajame matavimo stendo dizaine, variklio valdymui panaudota schema yra su grįžtamoju ryšiu (32 pav.). Uždavus tam tikrą variklio sūkių per minutę skaičių valdymo sistema savarankiškai juos pasiekia. Optinis tachometras realiu laiku matuoja variklio apsisukimus ir siunčia jų reikšmę į mikrovaldiklį. Jeigu išsiųsta reikšmė yra mažesnė nei užduotoji, mikrovaldiklis padidina variklio galią (arba atvirkščiai). Tachometro užfiksuotos reikšmės taip pat rodomos OLED ekrane, todėl stendo operatorius žino kokiais sūkiiais dirba variklis. Programoje buvo nustatytos galimos variklio apsisukimų paklaidos (± 50 aps/min).



32 pav. Variklio valdymo sistema su grįžtamoju ryšiu

2.3. Pirmieji bandymai ir revizijos

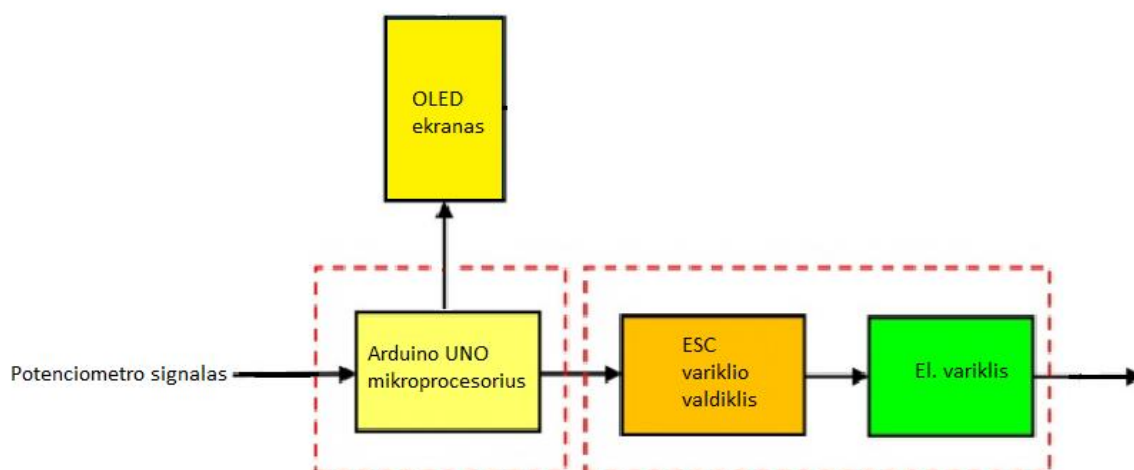
Pagaminus bei įsigijus visas reikiamas detales matavimo stendas buvo surinktas ir išbandytas. Interaktyvi nuorodą į vaizdo įrašą, kuriame vaizduojamas pirmasis bandymas (prototipas) nurodoma 4 priede.

Mechaninė stendo dalis veikė tinkamai, t.y., propeleris sukosi sklandžiai, vibracijų bei veleno mušimo nebuvo. Elektroninės dalies elementai taip pat veikė tinkamai, t.y., svarstyklių rodmenys prie pastovių apsisukimų rodė nusistovėjusią reikšmę (jeigu stendas skleistų vibracijas, svarstyklių reikšmės nenustovėtų), variklio valdymas su potenciometru veikė tinkamai.

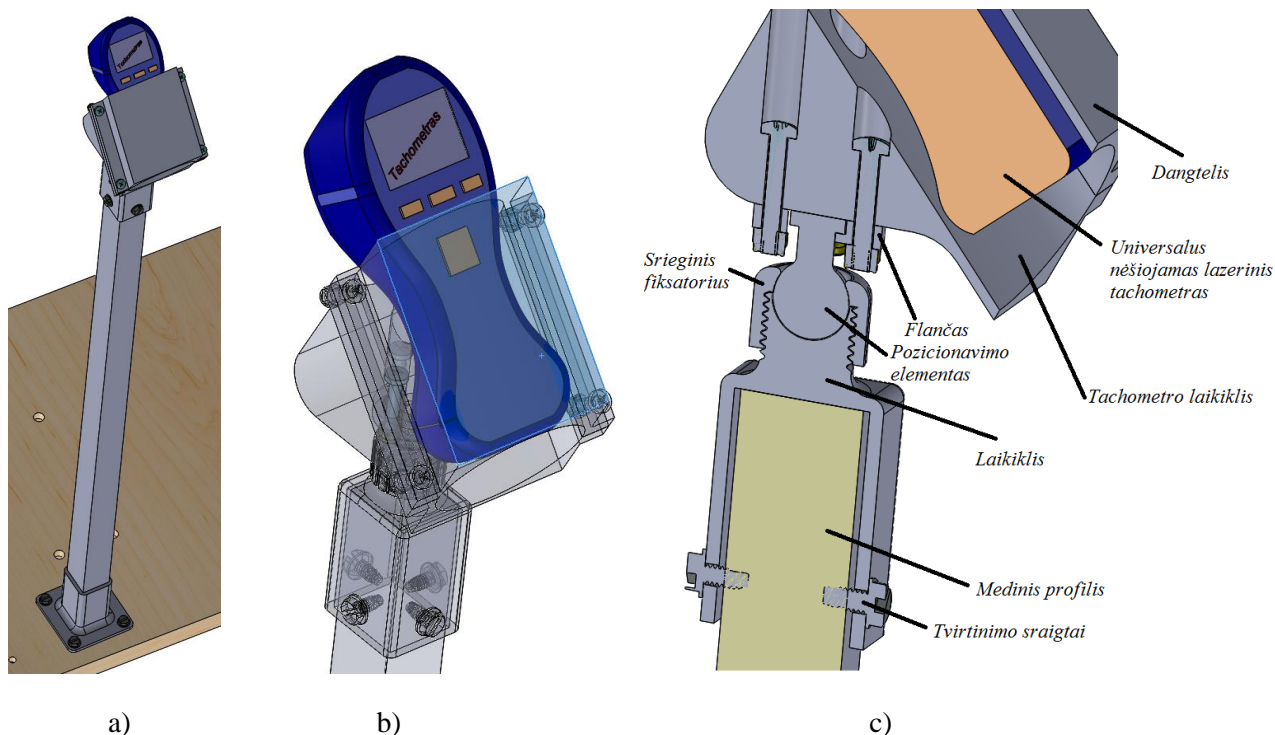
Kadangi pirminis modelis veikė taip kaip buvo numatyta, buvo pradėta surinkinėti elektroninė dalis, kuri yra atsakinga už variklio valdymą su grįžtamuju ryšiu (32 pav.).

2.3.1. Variklio valdymo schemos keitimas.

Pradėjus bandymus su pilnai surinktu matavimo stendu buvo susidurta su problema – variklio apskos nenusistovėdavo prie užduotos reikšmės. Variklio valdymo programoje buvo nustatytos galimos variklio apsisukimų paklaidos (± 50 aps/min). Paaiškėjo, jog optinio jutiklio paklaidos yra per didelės tokiems tiksliams sūkių reguliavimams. Dėl šios priežasties buvo nuspręsta naudoti paprastesnį variklio apsisukimų valdymo būdą, t.y., naudoti daugiasūkį potenciometrą (31 pav. e). Nauja valdymo schema vaizduojama (33 pav.). Variklio valdymo programa yra nurodoma 5 priede. Šiuo atveju OLED ekranas rodo potenciometro rodmenis. Variklio apsisukimus buvo nuspręsta matuoti su išoriniu lazeriniu tachometru. Šiam tikslui suprojektuotas universalus stovas, kuriame galima tvirtinti įvairių modelių nešiojamus lazerinius tachometrus (34 pav. a). Stovas suprojektuotas taip, jog užfiksavus tachometrą būtų galima lengvai reguliuoti jo poziciją. Atsukus fiksatorių (34 pav. c) yra atlaisvinamas pozicionavimo elementas kuris per flanšą yra sujungtas su tachometro laikikliu (34 pav. c). Nustačius reikiamą prietaiso poziciją, srieginis fiksatorius yra užveržiamas.



33 pav. Nauja variklio valdymo schema



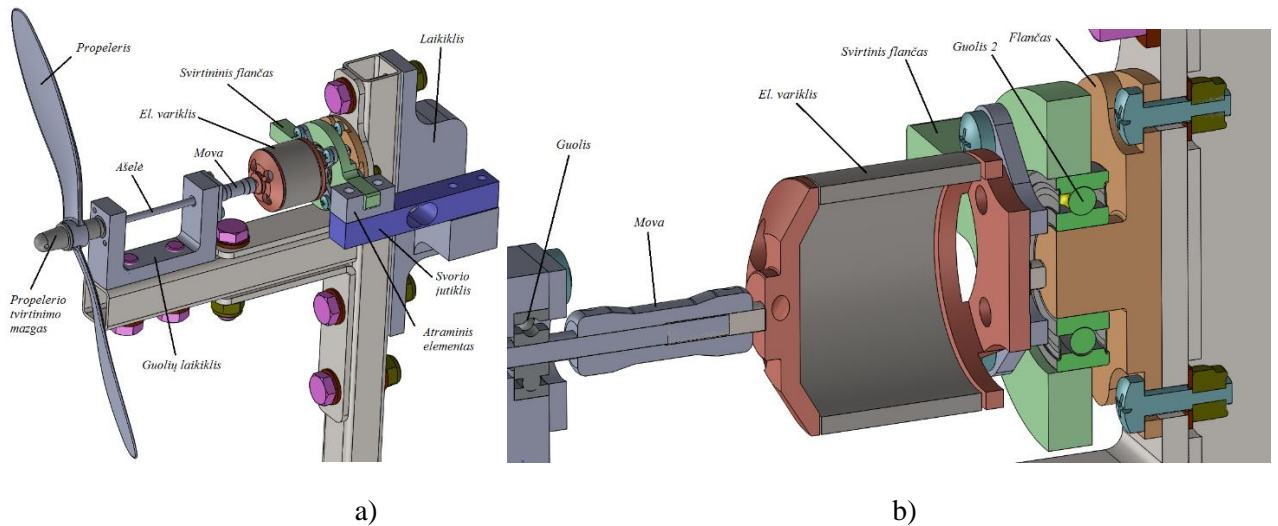
34 pav. Stovas lazeriniui tachometrui; a) bendras stovo vaizdas; b) priartintas tachometro laikiklio vaizdas; c) tachometro laikiklio pjūvio vaizdas

Norint, jog lazerinis tachometras veiktų tinkamai, labai svarbu gerai nustatyti jo poziciją, t.y., jutiklis turi būti nukreiptas statmenai į matuojamą paviršių. Tokia stovo konstrukcija užtikrina ne tik geras tachometro pozicionavimo galimybes bet ir saugų darbą.

2.3.2. Sukimo momento matavimo mazgas.

Darbo eigoje buvo nuspręsta į matavimo stendą pridėti sukimo momento matavimo bloką. Šis sprendimas buvo priimtas dėl to, jog norint nustatyti propelerio naudingumo koeficientą prie tam tikrų apsukų, reikia žinoti jo sukuriamą sukimo momentą.

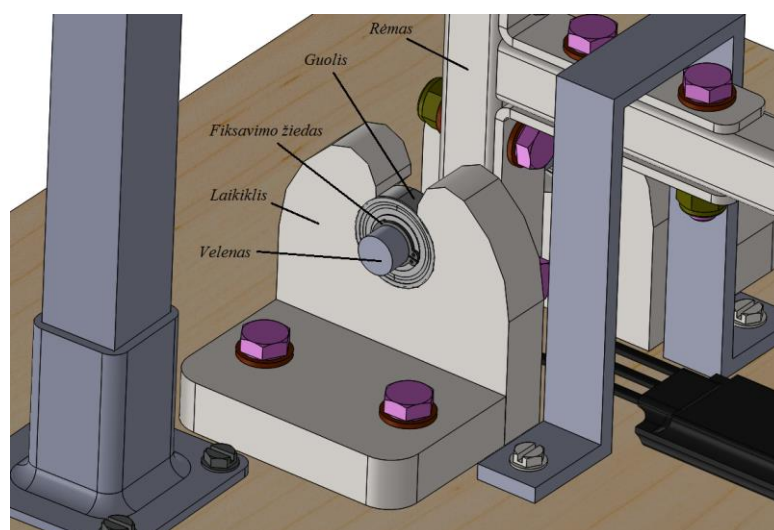
Galutinis mazgas vaizduojamas 35 pav. a, b. Susidaręs sukimo momentas iš variklio perduodamas į svirtinį flanšą, kuris, atitinkama jėga, veikia svorio jutiklį. Svorio jutiklyje gautas signalas yra sustiprinamas ir perduodamas į „Arduino UNO“ mikrovaldiklį. Jėgos matavimui buvo sukurta programa (ji nurodoma 6 priede), kuri naudoja standartines „Arduino“ bibliotekas.



35 pav. Sukimo momento matavimo mazgas (revizija C); a) bendras vaizdas; b) pjūvio vaizdas

Pridėjus sukimo momento matavimo mazgą, visa stendo konstrukcija tapo mažiau stabili. Pirmajame stendo dizaine el. variklis prie rėmo buvo tvirtinamas varžtais (28 pav.), todėl variklis buvo įtvirtintas standžiai bei nejudamai. Toks tvirtinimo būdas garantavo, jog vibracijos bus minimalios arba jų nebus visai. Įdėjus sukimo momento matavimo mazgą, variklis prie rėmo tvirtinamas per guolį. Pirmieji mazgų prototipai (iš viso jų buvo trys) naudojo ne riedėjimo guolius, o slydimo. Šie dizainai nepasitvirtino, nes dėl didelio tarpo tarp judančių detalių, vibracijos buvo tokios didelės, jog veikimo metu atsiverždavo bei iškrisdavo movos bei kitų elementų varžtai. Šiai problemai spręsti buvo projektuota bei gaminta visa eilė pakeitimų bei revizijų.

Panaudojus aukštos kokybės riedėjimo guolius sukimo momento bei rėmo ir medinio pagrindo tvirtinimo mazguose, vibracijas pavyko beveik visiškai panaikinti. Gamybos metu būtina užtikrinti, jog guoliai (35 pav. b ir 36 pav.) būtų surinkti su nedidele arba vidutine įvarža. Jeigu ši sąlyga nebus tenkinama, darbo metu standą vis tiek veiks labai aukšto dažnio bei mažos amplitudės vibracijos.



36 pav. Rėmo ir medinio pagrindo tvirtinimo mazgas (revizija A)

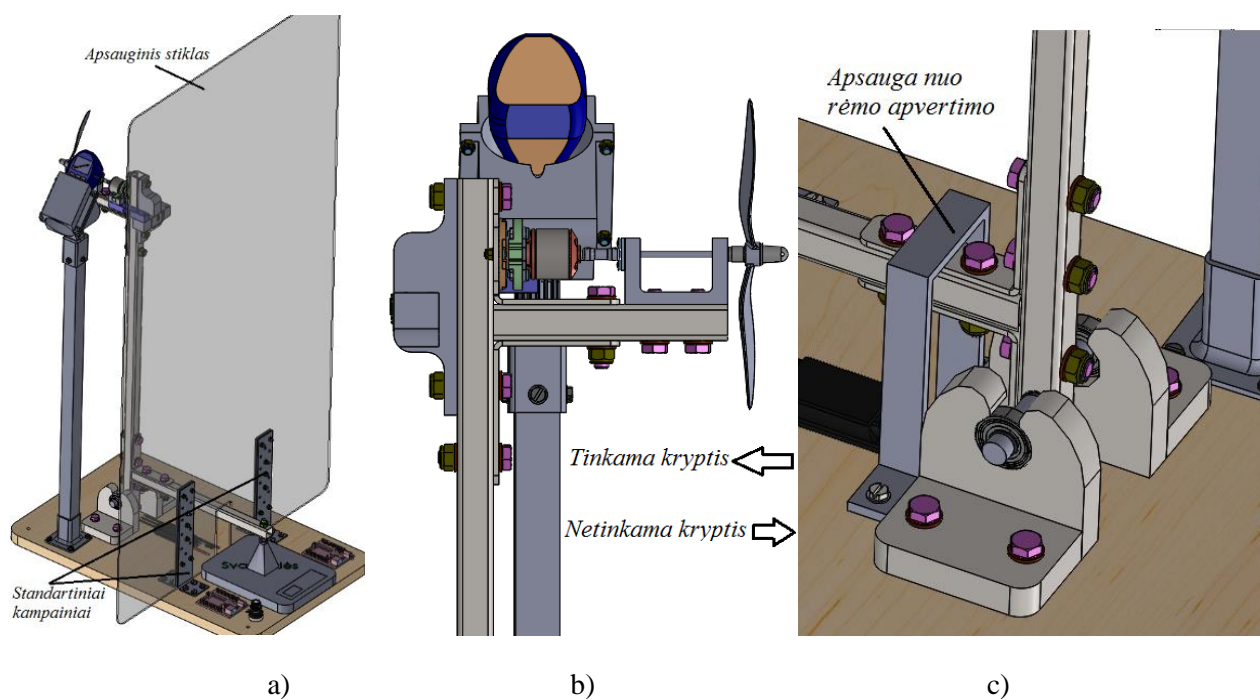
2.4. Su darbo sauga susiję pakeitimai

Po pirmųjų stendo bandymų buvo aišku, jog būtina padidinti darbo saugumą. Tai yra ypač aktualu kai dirbama su propeleriais, kurie yra pagaminti naudojant 3D spausdinimo technologiją. Detalės, pagamintos naudojant šią technologiją, lūžimo metu suyra į smulkias bei aštrias skeveldras. Dėl šios priežasties buvo nuspręsta matavimo stende naudoti apsauginį stiklą.

Dėl mažos kainos ir paprasto apdirbimo buvo pasirinkta naudoti 3mm storio organinį stiklą. Jis prie medinio pagrindo tvirtinamas su standartiniais metaliniais kampiniais (37 pav. a). Taip pat, matavimo stendo veikimo metu būtina naudoti apsauginius akinius (38 pav.).

Bandymu metu buvo pastebėta, kad operatoriui sumaišius propelerio fiksavimo pusę bei sukimosi kryptį (sukimosi kryptį galima keisti priklausomai nuo propelerio tipo) galima situacija, jog susidariusi traukos jėga stendo rėmą atkels nuo svarstyklių (37 pav. b). Tokiu atveju rėmas su didele jėga, sukdamasis per guolius, trenksis į medinį pagrindą (galimai sugadindamas dalį matavimo stendo dalių bei sukeldamas pavojų šalia esantiems žmonėms). Norint išvengti tokios situacijos buvo suprojektuota bei pagaminta apsauga nuo netyčinio stendo rėmo apvertimo (37 pav. c).

2.5. Galutinis horizontalaus matavimo stendo dizainas



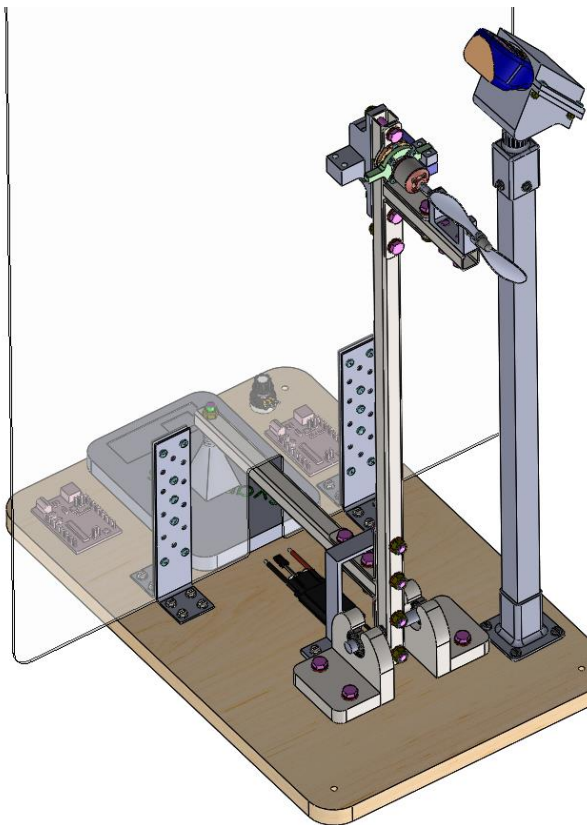
37 pav. Apsaugos elementai; a) apsauginis stiklas; b) vaizduojama tinkama ir netinkama traukos jėgos veikimo kryptis; c) apsauga nuo rėmo apvertimo



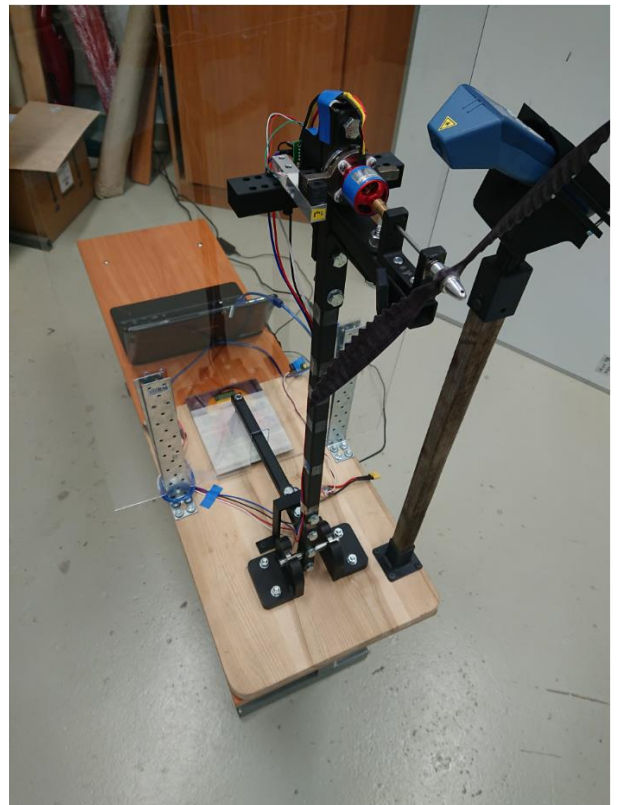
38 pav. Apsauginiai akiniai

Atlikus visas šiame skyriuje aprašytas revizijas bei pakeitimus, buvo nuspręsta, jog matavimo stendas yra pabaigtas ir yra tinkamas eksploatacijai. Šio darbo 1, 2, 3 prieduose yra pateikiama visa reikiama dokumentacija aprašomo matavimo stendo gamybai bei jo surinkimui. Šią dokumentaciją sudaro: darbo brėžiniai, surinkimo (bendro vaizdo) brėžiniai bei detalių sąrašas.

Galutinis horizontalaus matavimo stendo modelis yra vaizduojamas 39 pav.



39 pav. Galutinis horizontalaus matavimo stendo modelis



40 pav. Horizontalaus tipo matavimo stendas

40 pav. vaizduojamas pilnai surinktas horizontalus matavimo stendas. 7 priede, dėl aiškesnio vaizdo, šis pav. yra pateikiamas padidintas.

3. Tyrimai su horizontaliu matavimo stendu

Šiame skyriuje aprašyti tyrimai, atlikti su šio darbo autoriaus suprojektuotu bei pagamintu horizontaliu matavimo stendu. Propeleriams pagaminti naudoti plastikai yra nurodomi prie atitinkamo tyrimo. Naudotos staklės – „Prusa i3 MK3“. Programinis kodas staklių valdymui buvo sukurtas naudojant „Slic3r Prusa Edition“ programinę įrangą. Gamybos režimas (kokybės nustatymas) – „fine“.

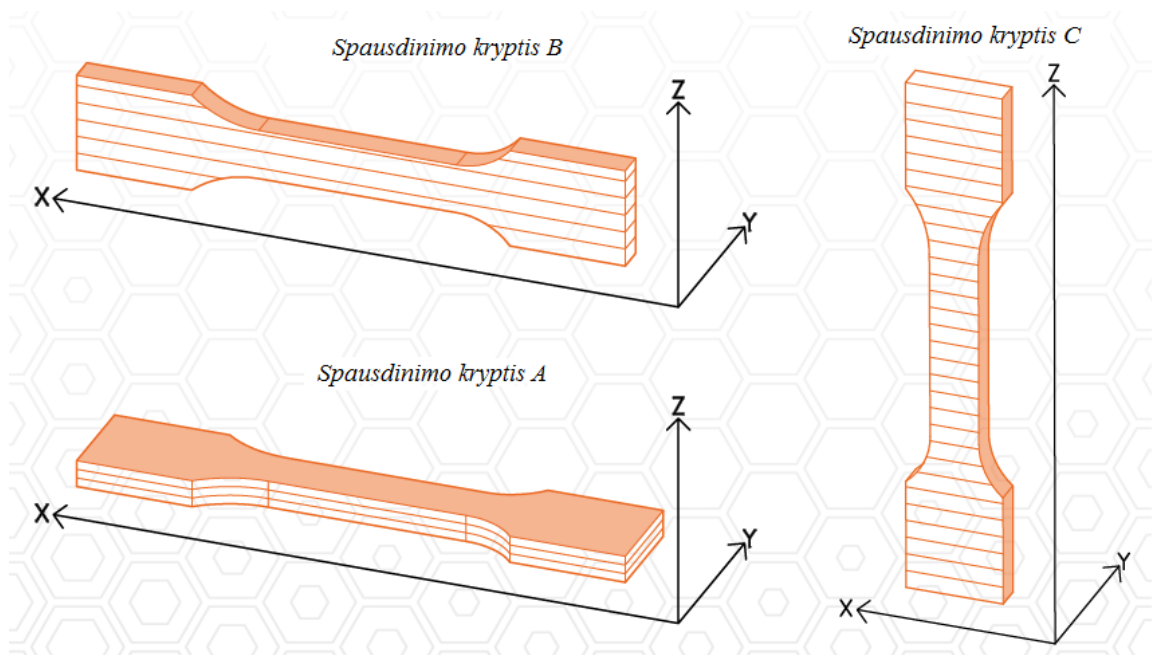
3.1. Medžiagos tamprumo modulio įtaka propelerio traukos savybėms.

Šio tyrimo tikslas yra nustatyti kokią įtaką traukos savybėms turi medžiagos, iš kurios pagamintas propeleris, tamprumo modulis. Tamprumo modulis apibūdina medžiagos pasipriešinimą tampriajai tempimo (arba gniuždymo) deformacijai. Kaip buvo rašyta 1 skyriuje, besisukdamas propeleris sukuria slėgių skirtumą tarp viršutinės ir apatinės mentės dalių. Būtent šis slėgių skirtumas ir sukuria traukos jėgą. Propelerį aptekantis oro srautas veikia mentę tam tikra jėga, kuri bando „ištiesinti propelerį“, t.y., pakeisti jo geometriją (sumažinti atakos kampą). Taip pat, besisukančią mentę veikia didelė išcentrinė jėga, kuri taip pat keičia jos geometriją. Medžiagos tamprumo modulis yra svarbi mechaninė charakteristika. Jeigu jis per mažas, susidariusios jėgos gali taip stipriai pakeisti propelerio menčių geometriją, jog pasikeis jų traukos savybės bei sumažės naudingumo koeficientas [15].

Šiam tyrimui, naudojant 3D spausdinimo technologiją, buvo pagaminti du vienodos geometrijos propeleriai (41 pav.). Abiem propeleriams gaminti naudoti plastikai yra to pačio gamintojo – „Prusament“. Vienas propeleris buvo gamintas iš „PLA Galaxy Silver“ polilaktido (toliau, PLA) plastiko, kitas iš „PETG Jet Black“ polietileno tereftalato glikolio (Toliau, PETG) plastiko. „Prusament“ gamintojas pateikia kiekvienos medžiagos pagrindines mechanines (nustatytas pagal ISO 179-1) bei fizikines charakteristikas. Sertifikatai yra pateikiami šio darbo 8 bei 9 priede. Verta paminėti, jog viena iš 3D spausdinimo technologijos savybių yra ta, jog pagamintos detalės gaunamos anizotropinės, t.y., mechaninės savybės įvairiomis kryptimis yra skirtingos. „Prusament“ pateikiamuose sertifikatuose yra nurodomos standartinio bandinio mechaninės savybės trimis spausdinimo kryptimis (41 pav.). Šiuo atveju propeleriai pagaminti naudojant B metodą (42 pav.).



41 pav. Pagaminti propeleriai. Juodos spalvos gamintas iš PETG plastiko, sidabrinės spalvos gamintas iš PLA plastiko



42 pav. Detalės gamybos būdai naudojant 3D spausdinimo technologiją [20]

1 lentelė. PLA plastiko mechaninės savybės

Mechaninė savybė	Spausdinimo kryptis, A	Spausdinimo kryptis, B	Spausdinimo kryptis, C
Tamprumo modulis, GPa	2.2 ± 0.1	2.4 ± 0.1	2.3 ± 0.1
Stiprumo riba, MPa	50.8 ± 2.4	59.3 ± 1.9	37.6 ± 4.0
Pailgėjimas prie takumo ribos, %	2.9 ± 0.3	3.2 ± 0.1	1.9 ± 0.3

2 lentelė. PETG plastiko mechaninės savybės

Mechaninė savybė	Spausdinimo kryptis, A	Spausdinimo kryptis, B	Spausdinimo kryptis, C
Tamprumo modulis, GPa	1.5 ± 0.1	1.5 ± 0.1	1.4 ± 0.1
Stiprumo riba, MPa	47 ± 2	50 ± 1	30 ± 5
Pailgėjimas prie takumo ribos, %	5.1 ± 0.7	5.1 ± 0.7	2.5 ± 1.4

Tamprumo modulio skirtumas (procentine išraiška) tarp PLA ir PETG yra apskaičiuojamas:

$$\frac{a-b}{b} \cdot 100\% = (2.4 - 1.5)/1.5 \cdot 100\% = 56.25\% \quad (16)$$

Čia a – PLA plastiko tamprumo modulis, GPa,

b – PETG plastiko tamprumo modulis, GPa.

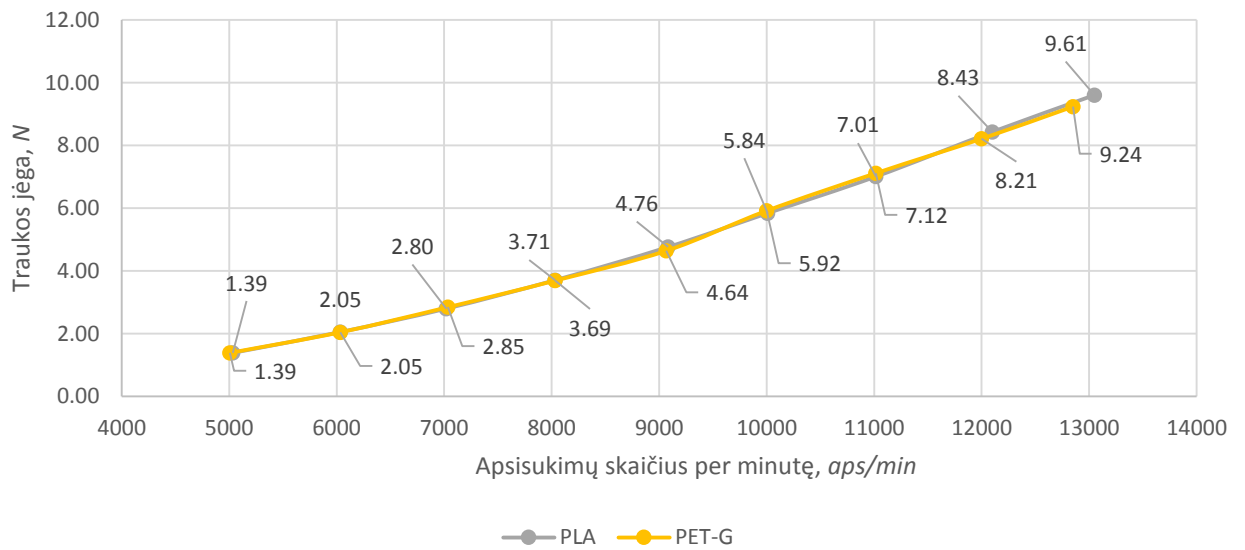
Iš skaičiavimų matyti, jog PLA plastikas yra apie 56 % standesnis nei PETG plastikas.

Kiekvienas propeleris buvo tiriamas tris kartus, jog būtų mažesnė klaidų tikimybė. Propeleriai buvo sukami nuo vidutiniškai 5000 aps/min iki 13000 aps/min. Tyrimo metu buvo matuojama propelerių sukuriama traukos jėga, sukimo momentas bei apsisukimų skaičius. 10 priede pateikti visi šio tyrimo rezultatai. 3 lentelėje pateikiamos apskaičiuotos vidutinės tyrimo rezultatų reikšmės. Oro tankis prie 20° laipsnių temperatūros (pagal Celsijaus skalę) yra 1.204 kg/m³. Abiejų propelerių apskritimo plotas – 0,03 m². 43 pav. vaizduojamame grafike nurodoma, kaip kinta propelerių sukuriama traukos jėga, kintant apsisukimų skaičiui per minutę. Iš šio grafiko galima daryti išvadą, kad sukuriamos traukos jėgos reikšmės, nepaisant skirtingų propelerių medžiagų tamprumo modulių, yra ypač artimos (skirtumas apie 1.5 %). 44 pav. vaizduojamame grafike nurodoma, kaip kinta propelerių sukuriami sukimo momentai, kintant apsisukimų skaičiui per minutę. Iš rezultatų galima daryti išvadą, kad viršijus 8000 aps/min, propeleris pagamintas iš PLA (didesnio tamprumo modulio) plastiko, sukuria apie 3% mažesnę sukimo momentą, negu propeleris pagamintas iš PETG (mažesnio tamprumo modulio) plastiko.

3 lentelė. Vidutinės tyrimo rezultatų reikšmės. Traukos savybių bei naudingumo koef. priklausomybė nuo propelerių medžiagos bei darbo režimų.

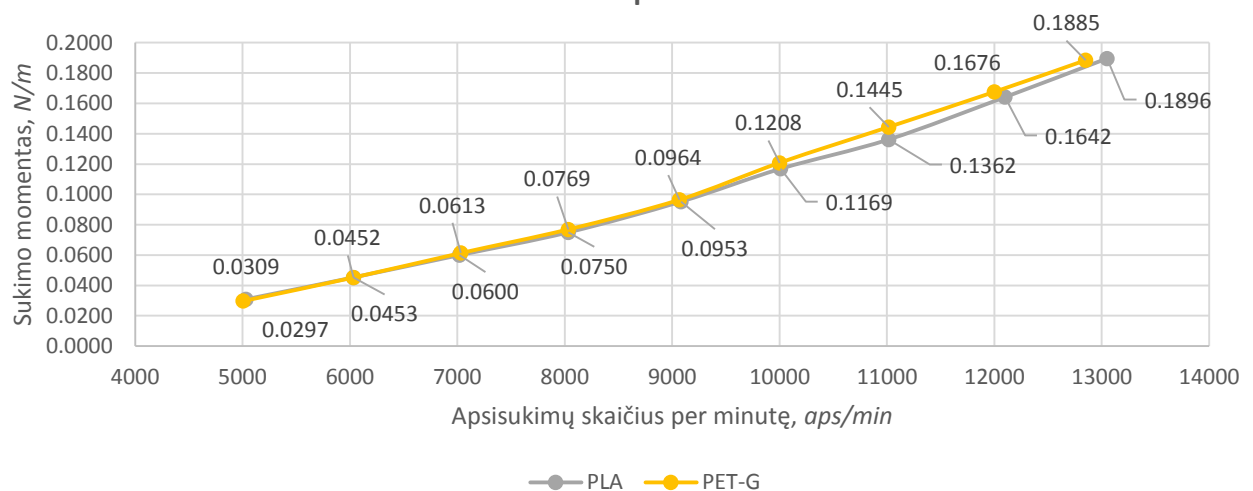
Eil. Nr.	Propeleris	Svarstyklių rodmenys, g	Jėgos jutiklio rodmenys, g	Tachometro rodmenys w, aps/min	Propelerio traukos jėga T, N	Propelerio sukimo momentas Q, N/m	Propelerio naudingumo koef.
1	Propeleris pagamintas naudojant PLA plastiką	296.33	105.00	5033.33	1.39	0.03	0.2798
		437.67	154.00	6033.33	2.05	0.05	0.2854
		596.67	204.00	7020.00	2.80	0.06	0.2946
		790.33	255.00	8033.33	3.71	0.07	0.3140
		1015.00	324.00	9083.33	4.76	0.10	0.3180
		1245.00	397.67	10010.00	5.84	0.12	0.3194
		1493.33	463.33	11016.67	7.01	0.14	0.3272
		1796.67	558.33	12100.00	8.43	0.16	0.3265
		2046.67	645.00	13050.00	9.61	0.19	0.3184
2	Propeleris pagamintas naudojant PETG plastiką	296.33	101.00	5006.67	1.39	0.03	0.2891
		436.00	153.67	6033.33	2.05	0.05	0.2837
		606.33	208.67	7033.33	2.85	0.06	0.2914
		787.00	261.67	8033.33	3.69	0.08	0.2996
		989.33	328.00	9066.67	4.64	0.10	0.3020
		1261.00	411.00	10000.00	5.92	0.12	0.3105
		1516.33	491.33	11016.67	7.12	0.14	0.3063
		1750.00	570.00	12000.00	8.21	0.17	0.3060
		1968.00	641.00	12850.00	9.24	0.19	0.3038

Traukos jėgų priklausomybė nuo apsisukimų skaičiaus per min.



43 pav. Tyrimo rezultatai. Propelerių sukuriamų traukos jėgų priklausomybė nuo apsisukimų skaičiaus per minutę

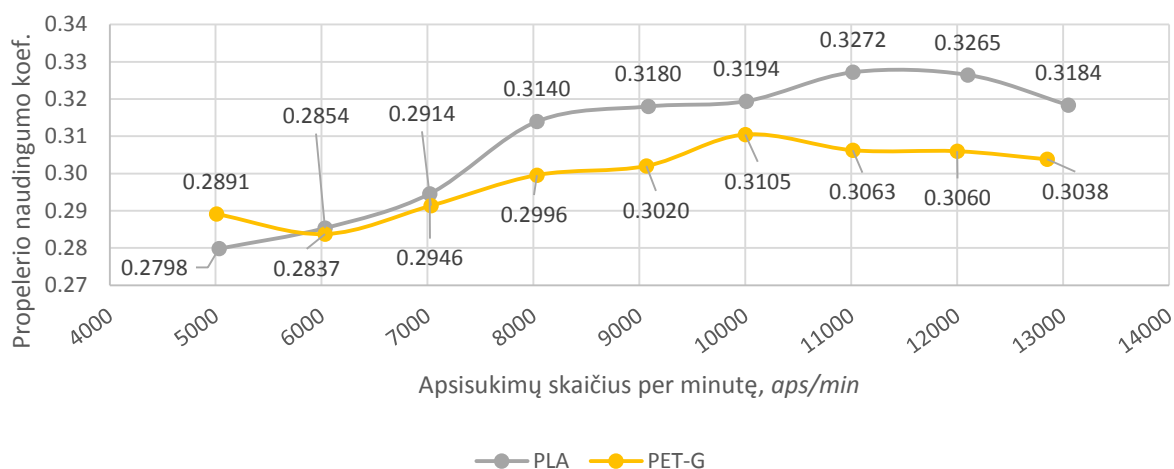
Sukimo momentų priklausomybė nuo apsisukimų skaičiaus per min.



44 pav. Tyrimo rezultatai. Propelerių sukuriamų sukimo momentų priklausomybė nuo apsisukimų skaičiaus per minutę

45 pav. grafike vaizduojama kaip kinta propelerių naudingumo koeficientai, kintant apsisukimų skaičiui per minutę. Iš rezultatų galima daryti išvadą, jog esant sąlyginai mažiems variklių sūkiams (iki 7000 *aps/min*), skirtumas tarp propelerių yra ypač mažas (beveik nepastebimas).

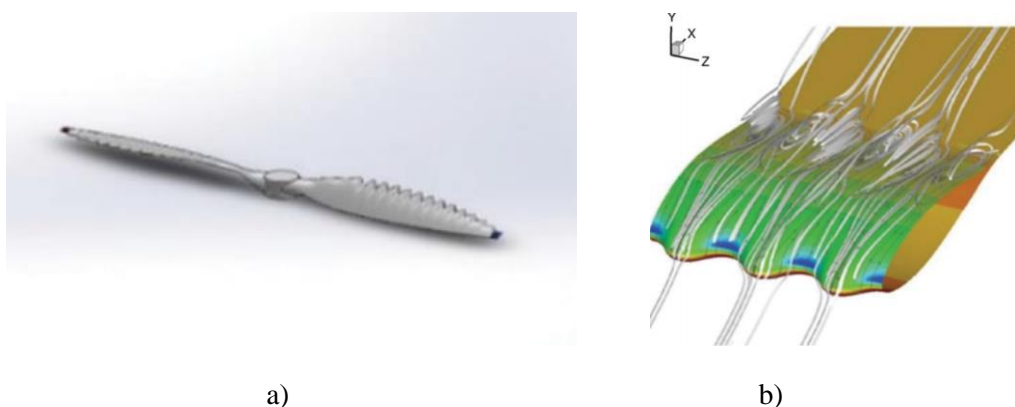
Propelerio naudingumo koef. priklausomybė nuo apsisukimų skaičiaus per min.



45 pav. Tyrimo rezultatai. Propelerių naudingumo koef. priklausomybė nuo apsisukimų skaičiaus per minutę. Sūkiams padidėjus virš 7000 *aps/min* propeleris, pagamintas iš didesnį tamprumo modulį turinčio PLA plastiko sukuria šiek tiek mažesnę (apie 3 %) sukimo momentą bei išvysto 5 % didesnį naudingumo koeficientą.

3.2. Palyginamasis tyrimas tarp gumburėlinio propelerio ir įprastos formos propelerio.

Šio tyrimo tikslas yra ištirti mentės priekinės briaunos sukuriama turbulentinio srauto įtaką propelerio naudingumo koeficientui bei traukos savybėms. Turbulentinis oro srautas buvo sukurtas naudojant gumburėlinį propelerį (46 pav. a). Tai yra toks propeleris, kurio menčių priekinėse briaunose yra oro srauto kryptį keičiantys gumburėliai (46 pav. b). Tokio tipo propeleriai yra naudojami orlaiviuose, laivuose, elektronikos aušintuvuose ir t.t. Yra žinoma, jog dėl gumburėlinio efekto, srauto atplyšimas nuo mentės yra pavėlinamas (nes pasienio sluoksnio energija yra sustiprinama gumburių sukeltų sūkurių) ir būtent dėl to pasikeičia (pagerėja) mentės aerodinaminės savybės. Gumburėliai taip pat sumažina oro srauto tekėjimą išilgai mentės bei mažina indukcinį pasipriešinimą [20].



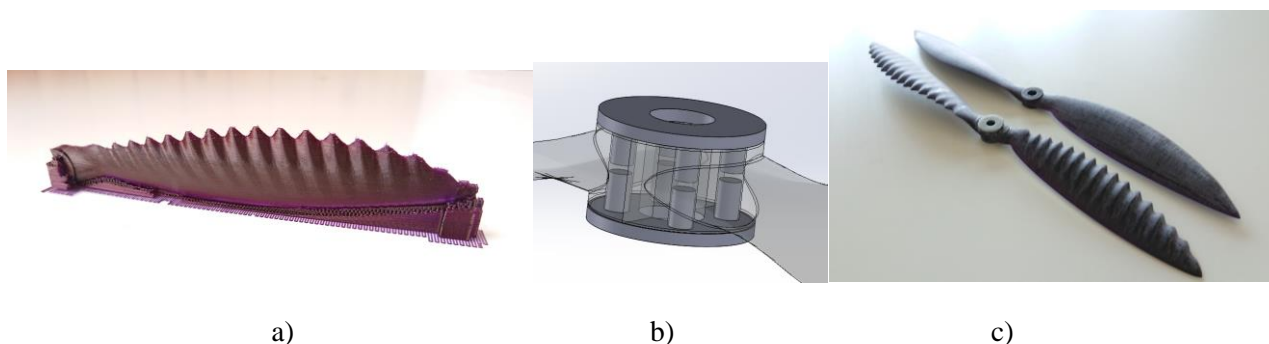
46 pav. a) Gumburėlinis propeleris; b) oro srauto tekėjimas gumburėlinio propelerio fragmentu [20]

[20] šaltinyje aprašomo tyrimo metu, buvo lyginami įvairūs gumburėliniai propeleriai su analogiškų geometrinių parametrų (skersmeniu bei žingsniu) įprastais propeleriais. Visi tyrimai buvo atliekami

naudojant programinę įrangą „SolidWorks Flow Simulation Premium“. Propeleriai nebuvo gaminami ir nebuvo bandomi su matavimo stendu ar aerodinaminiu vamzdžiu, t.y., buvo apsiribojama teoriniais skaičiavimais bei simuliacijomis. Atlikus tyrimą buvo nustatyta, jog 10 colių (254 mm) skersmens ir 4,7 colių (119.38 mm) žingsnio gumburėlinis propeleris buvo apie 10% efektyvesnis nei analogiškų geometrinių parametrų įprastas propeleris. Taip pat buvo nustatyta, jog gumburėlinis propeleris sukurdavo apie 10% didesnę traukos jėgą bei apie 8 % mažesnę sukimo momentą prie tokių pačių darbinių režimų, kaip ir įprastas propeleris [20].

Šio tyrimo tikslas buvo pagaminti [20] šaltinyje aprašomus propelerius (gumburėlinį ir įprastos formos) ir juos iširti naudojant matavimo stendą. Gautus matavimo rezultatus palyginti su [20] šaltinio autoriaus nurodytais rezultatais.

Propeleriai buvo pagaminti naudojant „Prusament Premium PLA Mystic Brown“ PLA plastiką. Šio plastiko sertifikatas su nurodytomis mechaninėmis ir fizikinėmis charakteristikomis pateikiamas 8 priede. Gumburėlinio propelerio mentys buvo gaminamos atskirai (47 pav. a) ir sujungiamos su įdėtinio elementu (47 pav. b). Toks gamybos būdas buvo parinktas, kad būtų užtikrinta menčių gumburėlių kokybė. Surinktas mazgas buvo suklijuotas klėjais „SUPER MOMENT LIQUID“. Įprastos formos propeleris buvo gaminamas kaip vientisa detalė. Abu propeleriai buvo papildomai apdirbti su šlifavimo popieriu komplektu (grūdelių dydis – 60, 100, 400, 800). 47 pav. c vaizduojami pilnai pagaminti bei apdirbti propeleriai.

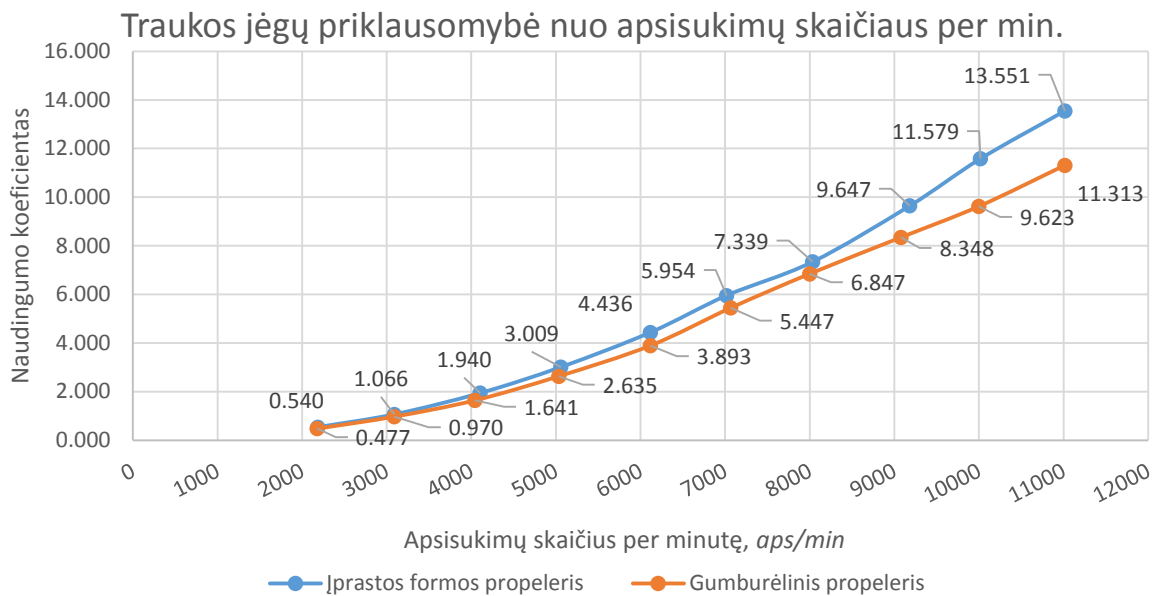


47 pav. Tyrime naudoti elementai; a) propelerio mentė; b) menčių ir stebulės surinkimo mazgas; c) gumburėlinis propeleris (kairė), įprastinės formos propeleris (dešinė)

Kaip ir anksčiau aprašytame tyrime, kiekvienas propeleris buvo tiriamas tris kartus, jog būtų mažesnė klaidų tikimybė. Propeleriai buvo sukami nuo vidutiniškai 2000 aps/min iki 11000 aps/min. Tyrimo metu buvo matuojama propelerių sukuriama traukos jėga, sukimo momentas bei apsisukimų skaičius. 11 priede pateikti visi šio tyrimo rezultatai. 4 lentelėje pateikiamos apskaičiuotos vidutinės tyrimo rezultatų reikšmės. Oro tankis prie 20° laipsnių temperatūros (pagal Celsijaus skalę) yra 1.204 kg/m³. Abiejų propelerių apskritimo plotas – 0,051 m². 48 pav. vaizduojamame grafike nurodoma kaip kinta propelerių sukuriama traukos jėga, kintant apsisukimų skaičiui per minutę.

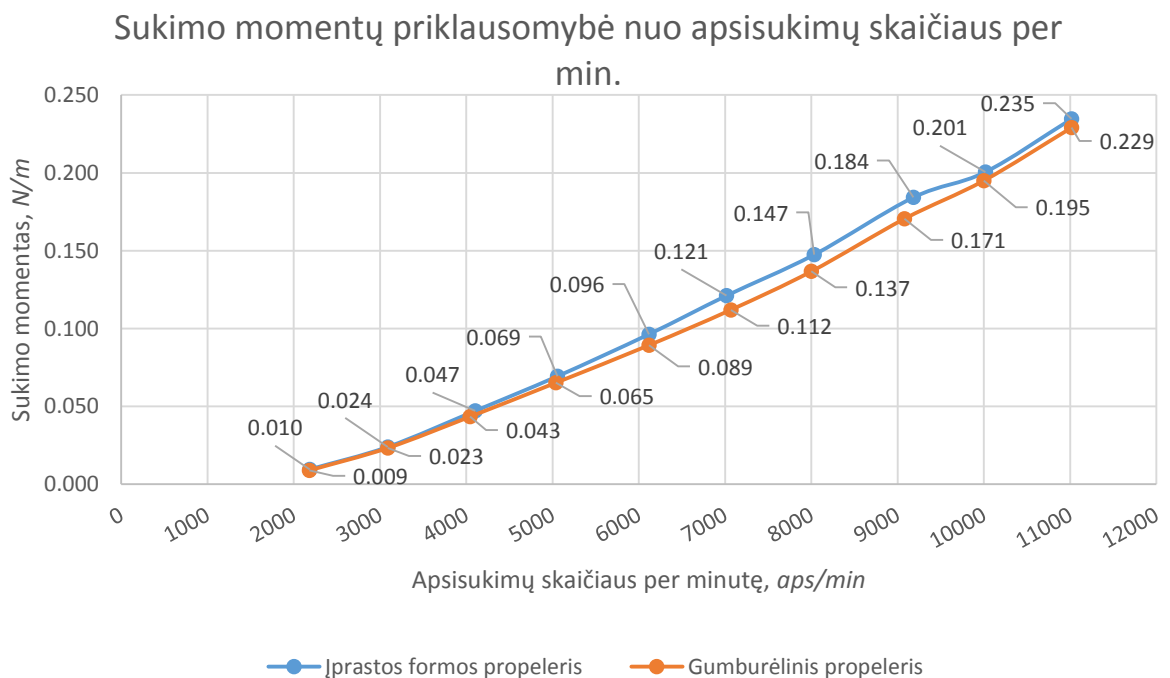
4 lentelė. Vidutinės tyrimo rezultatų reikšmės. Traukos savybių bei naudingumo koef. priklausomybė nuo propelerių tipo bei darbo režimų.

Eil. Nr.	Propeleris	Svarstyklių rodmenys, g	Jėgos jutiklio rodmenys, g	Tachometro rodmenys w, aps/min	Propelerio traukos jėga T, N	Propelerio sukimo momentas Q, N/m	Propelerio naudingumo koef.
1	Įprastos formos propeleris	115.000	32.667	2186.67	0.540	0.010	0.308
		227.000	81.667	3090.00	1.066	0.024	0.241
		413.333	160.333	4103.33	1.940	0.047	0.228
		641.000	236.000	5056.67	3.009	0.069	0.242
		945.000	327.667	6116.67	4.436	0.096	0.258
		1268.333	412.000	7016.67	5.954	0.121	0.278
		1563.333	501.667	8033.33	7.339	0.147	0.273
		2055.000	626.667	9183.33	9.647	0.184	0.288
		2466.667	682.000	10016.67	11.579	0.201	0.319
		2886.667	798.000	11016.67	13.551	0.235	0.314
2	Gumburėlinis propeleris	101.667	30.333	2180.00	0.477	0.009	0.277
		206.667	79.333	3090.00	0.970	0.023	0.217
		349.667	147.667	4043.33	1.641	0.043	0.205
		561.333	221.667	5036.67	2.635	0.065	0.220
		829.333	303.667	6116.67	3.893	0.089	0.239
		1160.333	381.000	7066.67	5.447	0.112	0.273
		1458.667	465.000	8000.00	6.847	0.137	0.274
		1778.333	580.000	9080.00	8.348	0.171	0.268
		2050.000	663.333	10000.00	9.623	0.195	0.253
		2410.000	779.000	11016.67	11.313	0.229	0.247



48 pav. Tyrimo rezultatai. Propelerių sukuriamų traukos jėgų priklausomybė nuo apsisukimų skaičiaus per minutę

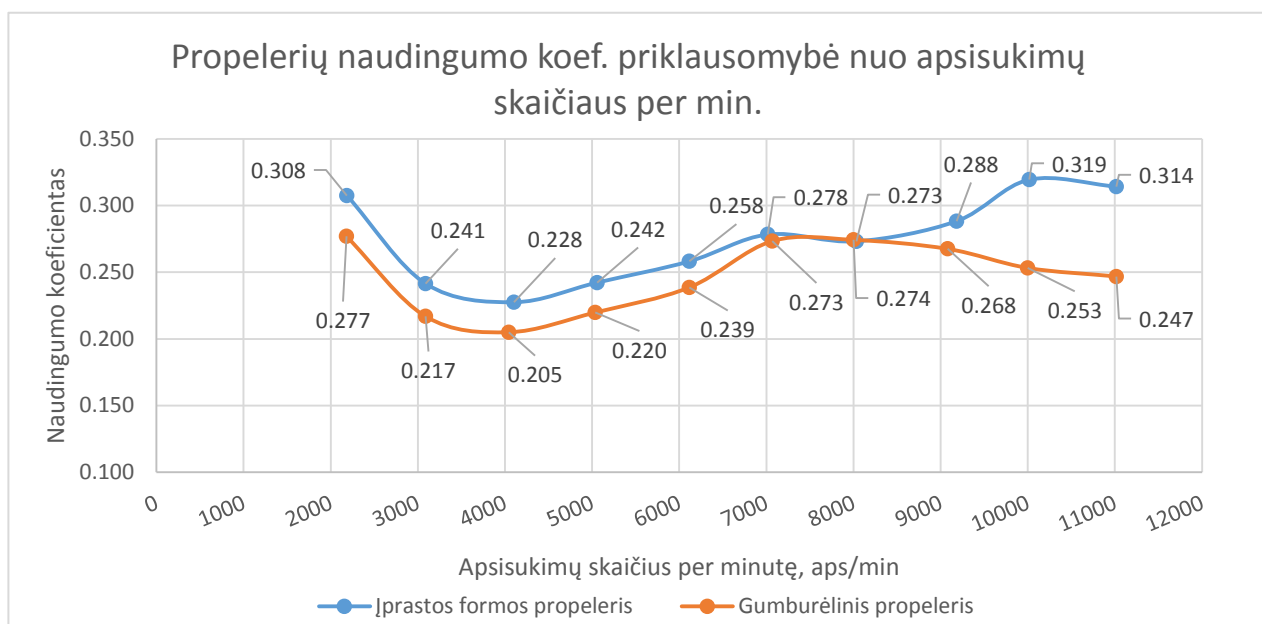
Iš 48 pav. vaizduojamų rezultatų matyti, jog įprastos formos propeleris, visame sūkių diapazone, sukuria didesnę traukos jėgą negu gumburėlinis propeleris (vidutiniškai apie 15 %). Didžiausias skirtumas tarp traukos jėgų pasiekiamas, kai propelerio sūčiai viršija 8000 aps/min.



49 pav. Tyrimo rezultatai. Propelerių sukuriamų sukimo momentų priklausomybė nuo apsisukimų skaičiaus per minutę

Iš 49 pav. vaizduojamų rezultatų matyti, kad gumburėlinis propeleris sukuria mažesnę (vidutiniškai apie 7 %) sukimo momentą visame sūkių diapazone. Galima daryti išvadą, jog šis propeleris sukuria

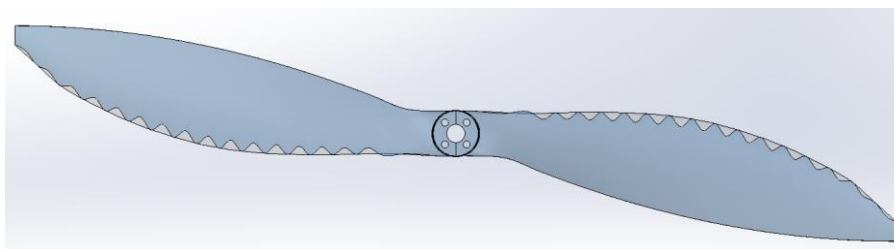
mažesnes pasipriešinimo jėgas. Ženklus sukimo momento skirtumas matomas nuo 6000 aps/min iki 10000 aps/min.



50 pav. Tyrimo rezultatai. Propelerių naudingumo koeficientų priklausomybė nuo apsisukimų skaičiaus per minutę

50 pav. grafike vaizduojama kaip kinta propelerių naudingumo koeficientai, kintant apsisukimų skaičiui per minutę. Iš rezultatų galima daryti išvadą, jog įprastos formos propeleris yra efektyvesnis prie daugumos darbo režimų. Galima išskirti diapazoną nuo 7300 aps/min iki 8200 aps/min, kuriame abiejų propelerių naudingumo koeficientas yra beveik vienodas.

Reikia pabrėžti, jog dėl [20] šaltinio autoriaus parinktos propelerių projektavimo specifikos, gumburėlinis propeleris turi šiek tiek mažesnę mentės projekcijos plotą. (51 pav.). Taip yra dėl to, jog gumburėliai ant propelerio buvo sudaryti išpjaunant tam tikros formos dalis iš įprasto propelerio modelio, t.y., įprastos formos propeleris buvo išpjaustomas naudojant komanda „Lofted cut“. Padidinus gumburėlinio propelerio menčių projekcijų plotus, jis turėtų sukurti didesnę traukos jėgą (dėl to padidėtų ir naudingumo koeficientas).



51 pav. Propelerių vaizdas iš viršaus. Gumburėlinis propeleris vaizduojamas mėlyna spalva, įprastos formos propeleris vaizduojamas pilka spalva

Pagal [20] šaltinyje pateikiamus duomenis, gumburėlinis propeleris sukuria mažesnę pasipriešinimo jėgą bei didesnę traukos jėgą prie visų variklio darbo režimų lyginat su įprastos formos propeleriu. Šio darbo rezultatai parodė, jog gumburėlinis propeleris sukūrė mažesnę (apie 7 %) sukimo momentą ir mažesnę traukos jėgą (apie 15 %) negu įprastos formos propeleris. Todėl šio tyrimo rezultatai tik

dalinai patvirtina [20] šaltinio autoriaus atliktų tyrimų rezultatus. Reikėtų pabrėžti, jog propeleriams parinkta gamybos technologija (3D spausdinimas) nėra idealiai tinkama dėl sąlyginai didelio paviršiaus šiurkštumo (nors propeleriai buvo šlifuojami po pagaminimo). Teoriniuose skaičiavimuose tiriama ideali propelerio geometrija, t.y., tiek jo forma tiek paviršiaus šiurkštumas yra toks, koks nustatytas parametruose. Dėl šių priežasčių galimi tam tikri neatitikimai.

3.3. Palyginamasis tyrimas tarp plyšinio propelerio ir įprastos formos propelerio.

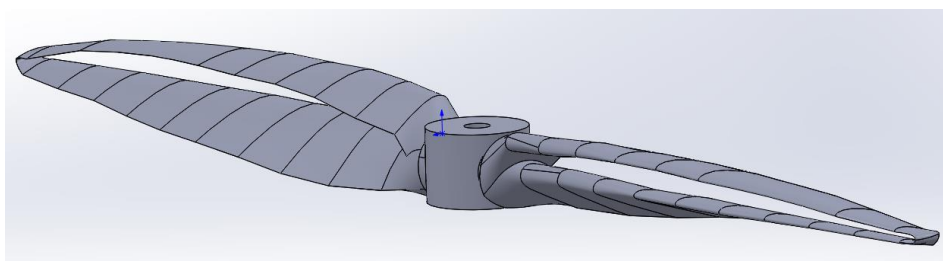
Šio tyrimo tikslas pagaminti plyšinį propelerį ir jį palyginti su įprastos formos propeleriu. Kaip ir buvo minėta 1 skyriuje, įprasta rašyti, jog sraigto mentė yra lyg besisukantis sparnas, t.y., jų veikimo principas yra beveik analogiškas. Todėl plyšinį propelerį sąlyginai galima palyginti su plyšiniu sparnu. Tokio tipo sparnus dar 1977 metais savo orlaiviuose (sklandytuvuose BRO-20) pradėjo naudoti inžinierius – konstruktorius Bronius Oškinis (52 pav.) [28].



52 pav. Broniaus Oškino sukurtas sklandytuvas su plyšiniu sparnu BRO-20 [28]

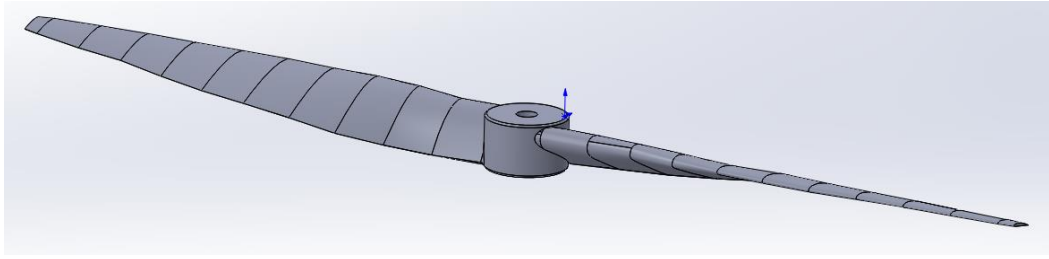
Plyšinis sparnas, dėl savo didelės keliamos jėgos, užtikrino unikalias sklandytuvo skrydžio charakteristikas (mažas skrydžio greitis). Reikia pabrėžti, jog tokio tipo sparnas sukurdavo ir didelę pasipriešinimo jėgą, todėl jo aerodinaminė kokybė nebuvo didelė.

Šiam tyrimui naudotas plyšinis propeleris buvo projektuotas naudojant standartinius NACA aerodinaminius profilius [29]. Viršutinė mentė buvo perslinkta per 29 % stygos ilgio (5,7 mm) nuo apatinės mentės į priekį, kad būtų sudarytas aerodinaminių plokštumų perdengimas. Plyšys tarp menčių buvo kintantis per visą menčių ilgį, bet vidutiniškai siekė 35 % viršutinės mentės stygos ilgio (6,9 mm). Plyšinis propeleris vaizduojamas 53 pav.



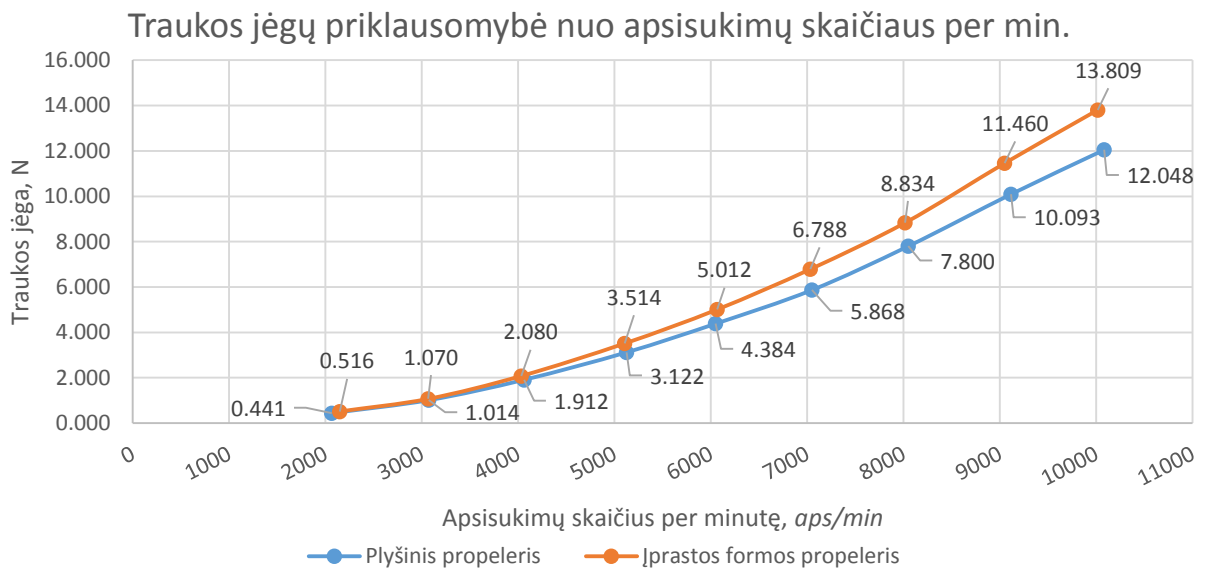
53 pav. Plyšinio propelerio kompiuterinis modelis

Įprastos formos propeleris projektuotas naudojant plyšinio propelerio modelį, t.y., panaikintos viršutinės mentys, bei pakeista menčių galo forma. Suprojektuotas įprastos formos propeleris vaizduojama 54 pav.



54 pav. Suprojektuotas įprastos formos propelerio modelis

Propeleriai buvo pagaminti naudojant „Prusament Premium PLA Mystic Brown“ PLA plastiką. Šio plastiko sertifikatas su nurodytomis mechaninėmis ir fizikinėmis charakteristikomis pateikiamas 8 priede. Kaip ir anksčiau aprašytame tyrime, kiekvienas propeleris buvo tiriamas tris kartus, jog būtų mažesnė klaidų tikimybė. Propeleriai buvo sukami nuo vidutiniškai 2000 aps/min iki 10000 aps/min. Tyrimo metu buvo matuojama propelerių sukuriama traukos jėga, sukimo momentas bei apsisukimų skaičius. 12 priede pateikti visi šio tyrimo rezultatai. 5 lentelėje pateikiamos apskaičiuotos vidutinės tyrimo rezultatų reikšmės. Oro tankis prie 20° laipsnių temperatūros (pagal Celsijaus skalę) yra 1.204 kg/m³. Abiejų propelerių apskritimo plotas – 0,062 m². 55 pav. vaizduojamame grafike nurodoma kaip kinta propelerių sukuriama traukos jėga kintant apsisukimų skaičiui per minutę.



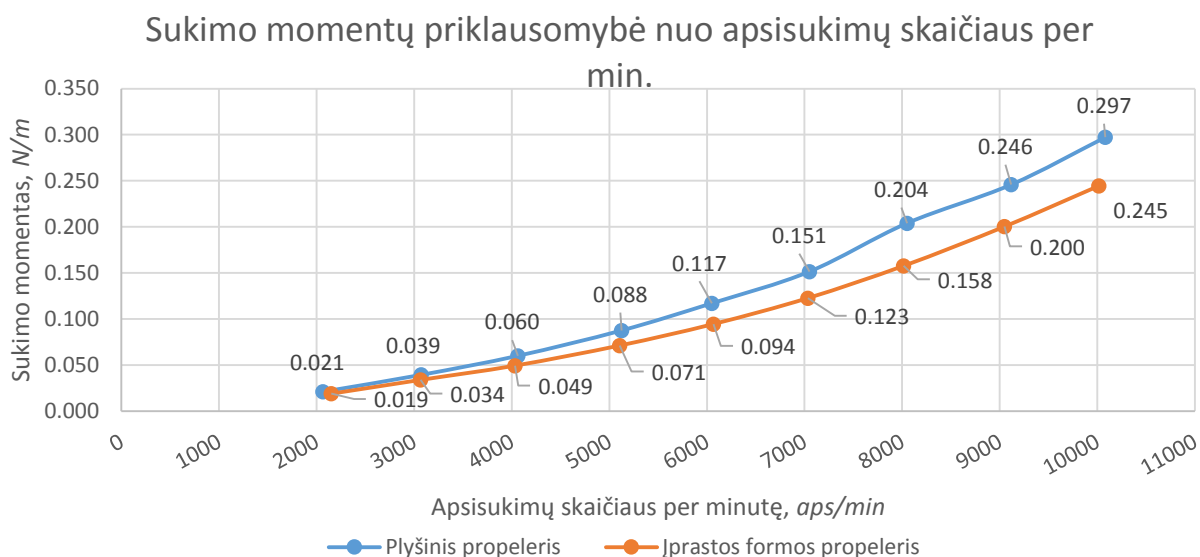
55 pav. Tyrimo rezultatai. Propelerių sukuriamų traukos jėgų priklausomybė nuo apsisukimų skaičiaus per minutę

Iš 55 pav. pateiktų rezultatų galima matyti, jog abiejų propelerių sukuriama traukos jėga yra labai panaši iki 4000 aps/min. Viršijus šias apsakas įprastos formos propeleris sukuria didesnę traukos jėgą negu plyšinis propeleris (apie 14%).

56 pav. vaizduojamame grafike nurodoma kaip kinta propelerių sukuriamas sukimo momentas, kintant apsisukimų skaičiui per minutę. Iš rezultatų galima daryti išvadą, kad visame sūkių diapazone plyšinis propeleris sukuria didesnę (vidutiniškai 23%) sukimo momentą, negu įprastos formos propeleris. Šio rezultato buvo galima tikėtis, nes plyšinis propeleris dėl prasto oro srauto pratekėjimo (plyšys stabdo srauto tekėjimą), sukuria didesnę pasipriešinimo jėgą, lyginant su įprastos formos propeleriu.

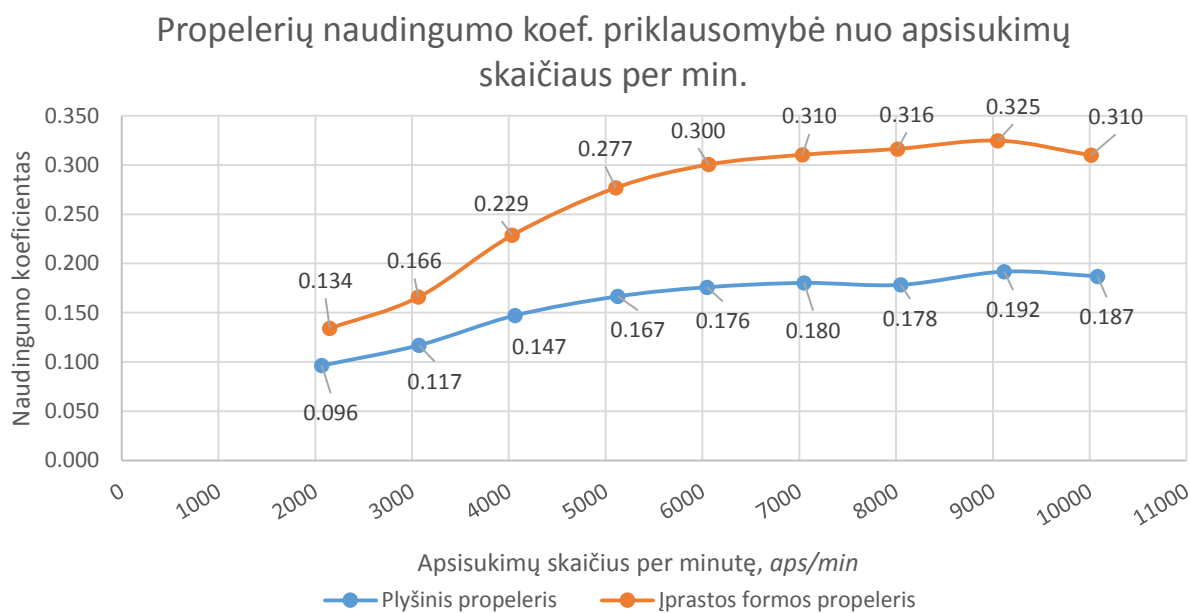
5 lentelė. Vidutinės tyrimo rezultatų reikšmės. Traukos savybių bei naudingumo koef. priklausomybė nuo propelerių tipo bei darbo režimų.

Eil. Nr.	Propeleris	Svarstyklių rodmenys, g	Jėgos jutiklio rodmenys, g	Tachometro rodmenys w, aps/min	Propelerio traukos jėga T, N	Propelerio sukimo momentas Q, N/m	Propelerio naudingumo koef.
1	Plyšinis propeleris	94.000	71.333	2066.67	0.441	0.021	0.096
		216.000	133.667	3073.33	1.014	0.039	0.117
		407.333	204.000	4063.33	1.912	0.060	0.147
		665.000	297.667	5126.67	3.122	0.088	0.167
		934.000	398.000	6050.00	4.384	0.117	0.176
		1250.000	515.000	7050.00	5.868	0.151	0.180
		1661.667	693.667	8050.00	7.800	0.204	0.178
		2150.000	836.000	9116.67	10.093	0.246	0.192
		2566.667	1011.000	10083.33	12.048	0.297	0.187
2	Įprastos formos propeleris	110.000	64.000	2150.00	0.516	0.019	0.134
		228.000	115.000	3066.67	1.070	0.034	0.166
		443.000	167.667	4033.33	2.080	0.049	0.229
		748.667	242.000	5106.67	3.514	0.071	0.277
		1067.667	321.333	6066.67	5.012	0.094	0.300
		1446.000	417.000	7033.33	6.788	0.123	0.310
		1882.000	536.333	8016.67	8.834	0.158	0.316
		2441.333	681.333	9050.00	11.460	0.200	0.325
		2941.667	831.667	10016.67	13.809	0.245	0.310



56 pav. Tyrimo rezultatai. Propelerių sukuriamų sukimo momentų priklausomybė nuo apsisukimų skaičiaus per minutę

57 pav. grafike vaizduojama kaip kinta propelerių naudingumo koeficientai, kintant apsisukimų skaičiui per minutę. Iš rezultatų galima daryti išvadą, jog plyšinis propeleris yra vidutiniškai 39 % mažiau efektyvus nei įprastos formos propeleris. Toks rezultatas daugiausiai priklauso nuo didelio propelerio sukuriamo pasipriešinimo.



57 pav. Tyrimo rezultatai. Propelerių naudingumo koeficientų priklausomybė nuo apsisukimų skaičiaus per minutę

Atsižvelgiant į gautus rezultatus, akivaizdu, kad, norint juos pagerinti, suprojektuotą plyšinį propelerį reikia toliau tobulinti. Toks propeleris turėtų sukurti didelę keliamąją jėgą, esant mažiems variklio sūkiams. Kaip jau buvo minėta, iš rezultatų matyti, kad esant mažiems variklio sūkiams, abiejų propelerių sukuriama traukos jėga yra beveik vienoda.

4. Ekonominė dalis

Šiame skyriuje yra apskaičiuota bei nurodyta, tiriamajam darbui naudoto, horizontalaus matavimo stendo kaina. Stendą sudaro trys elementų grupės. Pirmoji grupė yra nestandartiniai gaminiai. Šios grupės elementai yra patys brangiausi, nes jie reikalauja mechaninio apdirbimo. Ruošiniai buvo gaminami su juostinio pjovimo, bei lazerinio pjovimo staklėmis. Detalėms pagaminti buvo naudojamos programinio valdymo tekinimo bei frezavimo staklės, universalios šlifavimo staklės bei programinio valdymo elektroerozinės staklės. Lankstiniai buvo formuojami su programinėmis lenkimo staklėmis. Netikslios skylės standartiniuose profiliuose buvo gręžiamos su rankinėmis gręžimo staklėmis. Dviem stendo elementams buvo reikalingas suvirinimas elektros lanku (MIG). Antroji elementų grupė sudaryta iš standartinių (DIN, ISO) detalių. Tai yra varžtai, veržlės, poveržlės, guoliai, fiksaciniai žiedai ir t.t. Trečioji elementų grupė yra papildomos detalės. Tai yra tokios detalės, kurios nepriskiriamos prie standartinių gaminių, bet taip pat, nėra gaminamos (mikrovaldikliai, elektros varikliai, ESC valdikliai, įvairūs jutikliai ir t.t.).

Šiame skyriuje nebus aprašinėjamos detalių gamybos technologijos, bet bus pateiktos faktinės atskirų detalių kainos (skaičiuotos 2018m. gegužės mėnesį, t.y., tada kada buvo gaminamas matavimo stendas).

4.1. Nestandartinių gaminių kainos

Nestandartinių gaminių kainą sudaro ruošinio bei mechaninio apdirbimo kaina. Kiekvienas įrengimas turi nustatytą valandinį įkainį, todėl skirtingos operacijos, priklausomai nuo staklių bei apdirbimo laiko, kainuoja skirtingai. Visos šiame darbe naudotos nestandartinės detalės, kurioms buvo reikalingas mechaninis apdirbimas, gaminamos įmonėje „LITTEC“. Valandiniai įkainiai yra:

1. programinio valdymo tekinimo staklės – 20 eur/h;
2. programinio valdymo frezavimo staklės – 30 eur/h;
3. universalios šlifavimo staklės – 15 eur/h;
4. programinio valdymo elektroerozinės staklės – 30 eur/h;
5. šaltkalviški darbai (šiuo atveju suvirinimas bei netikslių skylių gręžimas standartiniuose profiliuose) – 15 eur/h.

Verta paminėti, jog dauguma nestandartinių detalių buvo galima gaminti naudojant universalias tekinimo bei frezavimo stakles, kurių valandinis įkainis yra mažesnis nei programinio valdymo staklių. Naudoti programines stakles buvo pasirinkta todėl, nes įmonėje, kurioje dirba šio darbo autorius, universalių tekinimo ir frezavimo staklių nėra.

Tam tikros detalės buvo gaminamos naudojant 3D spausdinimo technologiją. Detalės kaina tokiu atveju skaičiuojama pagal medžiagos išėigą. Paprastai, vienas gramas medžiagos išėigos kainuoja 0.20 eur. Brėžiniuose (šio darbo 3 priede) yra nurodyta, kurios detalės buvo gaminamos naudojant 3D spausdinimo technologiją. Spausdinimo parametrai – 20% užpildas, sienelės sudaro du išoriniai perimetrai, kokybė buvo parinkta kintanti priklausomai nuo detalės formų. 6 lentelėje pateikiamas nestandartinių detalių sąrašas su faktinėmis kainomis.

6 lentelė. Nestandartinių gaminių kainos.

Eil. Nr.	Žymėjimas	Pavadinimas	Kiekis	Vieneto kaina, eur	Bendra kaina, eur
1	MAG 001-001	Medinis padas	1	10	10
2	MAG 001-002	Ašėlės laikiklis	2	20	40
3	MAG 001-003	Tvirtinimo el.	2	15	30
4	MAG 001-004	Profilis L300	1	5	5
5	MAG 001-005	Profilis L130	1	5	5
6	MAG 001-006	Profilis L700	1	20	20
7	MAG 001-007	Ašelė	1	10	10
8	MAG 001-008	Kampainis 70x80	2	4	8
9	MAG 001-009	Kampainis 70x80	1	4	4
10	MAG 001-010	Kampainis 70x70	1	4	4
11	MAG 001-011	Guolių laikiklis	1	40	40
12	MAG 001-012	Guolių dangtelis	2	2	4
13	MAG 001-013	Aukščio kompensatorius	1	3.2	3.2
14	MAG 001-014	Tarpinė	5	0.2	1
15	MAG 001-015	Flanšas	1	30	30
16	MAG 001-016	Flanšas	1	30	30
17	MAG 001-017	Apsauga	1	4.2	4.2
18	MAG 001-018	Laikiklis	1	6.8	6.8
19	MAG 001-019	Atraminis elementas	1	0.5	0.5
20	MAG 001-020	Apsauginis stiklas	1	15	15
21	MAG 001-021	Dangtelis	1	5.6	5.6
22	MAG 001-022	Tachometro laikiklis	1	8.4	8.4
23	MAG 001-023	Flanšas	1	0.2	0.2
24	MAG 001-024	Pozicionavimo elementas	1	0.2	0.2
25	MAG 001-025	Srieginis fiksatorius	1	0.8	0.8
26	MAG 001-026	Laikiklis	1	4	4
27	MAG 001-027	Profilis	1	3	3
28	MAG 001-028	Laikiklis	1	3.6	3.6
29	MAG 001-029	Propeleris	1	2	2
				Bendra kaina, eur	298.5

4.2. Standartinių gaminių kainos

Standartiniai gaminiai gali būti perkami vienetais arba pakuotėmis (lieka detalių perteklius). Šiuo atveju, kaina skaičiuojama įmituojant, jog standartiniai gaminiai yra perkami vienetais, t.y., tik tiek, kiek jų reikia.

7 lentelė. Standartinių gaminių kainos.

Eil. Nr.	Pavadinimas	Kiekis	Vieneto kaina, eur	Bendra kaina, eur
1	Sraigtas DIN 914 - M2 x 3	2	0.05	0.1
	Sraigčiai DIN 7985			
2	M3 x 6	4	0.02	0.08
3	M3 x 10	8	0.03	0.24
4	M4 x 14	14	0.03	0.42
5	M4 x 16	4	0.03	0.12
6	M4 x 25	8	0.03	0.24
7	Sraigtas DIN 571 - M5 x 25	26	0.13	3.38
	Sraigčiai DIN 933			
8	M8 x 30	2	0.28	0.56
9	M8 x 35	11	0.30	3.3
10	M8 x 40	5	0.33	1.65
11	Sraigtas ISO 4762 - M8 x 80	1	0.45	0.45
	Veržlės DIN 985			
12	M3	4	0.05	0.2
13	M4	26	0.04	1.04
14	M8	17	0.12	2.04
15	Veržlė DIN 439 - M3	4	0.05	0.2
	Poveržlės DIN 125			
16	M3	4	0.02	0.08
17	M8	32	0.02	0.64
18	Žiedas fiksavimo DIN 471 - 12 x 1	4	0.25	1
19	Riedėjimo guolis DIN 623 SKF 12mm	2	5.28	10.56
20	Riedėjimo guolis DIN 623 SKF 10mm	1	5.09	5.09
21	Riedėjimo guolis DIN 623 SKF 3mm	2	2.5	5
Bendra kaina, eur				36.39

4.3. Kitų gaminių kainos

Kaip ir buvo minėta, tokios detalės, kurios yra nepriskiriamos prie standartinių gaminių, bet taip pat, nėra gaminamos (pvz. mikrovaldikliai, elektros varikliai, ESC valdikliai, įvairūs jutikliai ir t.t.) yra priskiriamos prie „kitų gaminių“ kategorijos. Šių gaminių kainos nurodytos 8 lentelėje. Norint sumažinti šiame darbe aprašomo horizontalaus matavimo stendo gamybos kainą, galima tam tikrus gaminius parinkti pigesnius (pvz. ESC valdiklį, el. variklį, „Arduino UNO R3“ ir t.t.). Svarbu, jog atskiri elementai būtų tarpusavyje suderinami ir jų techninės charakteristikos būtų tinkamos tyrimui.

8 lentelė. Kitų gaminių kainos

Eil. Nr.	Pavadinimas	Kiekis	Pardavėjas	Vieneto kaina, eur	Bendra kaina, eur
1	Mova 3mm x 3.17mm	1	AUTOTOOLHOME	0.5	0.5
2	Svorio Jutiklis 1kg - AN0400	1	Anodas	5.7	5.7
3	Mikrovaldiklis Arduino UNO R3 - A000066	2	Anodas	9	18
4	Potenciometras 10K Ohm daugiasūkis - 8827	1	Anodas	3.2	3.2
5	HX711 Svorio jutiklių modulis - AN0223	1	Anodas	3	3
6	El. variklio valdiklis (ESC) - Hobbywing Pro 40A	1	RCDALYS	16	16
7	Guminė kojėlė - K0575.02501755	4	KIPP	0.8	3.2
8	Lazerinis tachometras - 6125-010	1	MONARCH	-	-
9	Kampainis180x40x40x2	4	Senukai	0.9	3.6
10	Svarstyklės Aurora AU4300	1	Aurora	10	10
11	Ašėlė WB-003080	1	FCKP	3	3
12	OLED ekranas - 0.96" 128x64px	1	Anodas	9.9	9.9
13	El. Variklis - Racerstar BR2830 1300KV	1	Anodas	10	10
14	Variklio laikiklis	1	Anodas	4	4
15	Propelerio laikiklio įvorė	1			
16	Užspaudžiama propelerio ašis	1			
17	Propelerio užveržimo veržlė	1			
				Bendra kaina, eur	90.1

4.4. Galutinė horizontalaus matavimo stendo kaina

Galutinę horizontalaus matavimo stendo gamybos kainą sudaro nestandartinių gaminių, standartinių gaminių ir kitų gaminių kainų suma. Bendra galutinė stendo gamybos kaina pateikiama 9 lentelėje.

9 lentelė. Horizontalaus matavimo stendo gamybos kainos dedamosios

Eil. Nr.	Elementų tipas	Kaina, eur
1	Nestandartiniai gaminiai	298.5
2	Standartiniai gaminiai	36.39
3	Kiti gaminiai	90.1
Horizontalaus matavimo stendo gamybos kaina, eur		424.99

Galutinė horizontalaus matavimo stendo gamybos kaina – 424.99 eur. Verta paminėti, jog projektavimo kaina nėra įtraukta į šią sumą. Inžinerinėse įmonėse valandinis konstruktoriaus įkainis yra apie 25 – 30 eur. Šio stendo projektavimui buvo užtrunkta apie 40 valandų, todėl projektavimo kaina, užsakius paslaugą įmonėje, siektų apie 1100 eur.

4.5. Kainų palyginimas

Rinkoje galima rasti įvairių matavimo stendų skirtų tyrimams su bepiločių orlaivių propeleriais atlikti. Keletą jų buvo nurodyti teorinėje šio darbo dalyje (1.2 skyriuje). Vienas populiariausių matavimo stendų yra „RCbenchmark“ gamintojo „Series 1585 Thrust Stand and Dynamometer“ modelis (58 pav.). Šis matavimo stendas pasižymi tuo, jog, nors ir yra kompaktiškas, turi galimybę matuoti propelerio traukos jėgą, sukimo momentą bei propelerio apsisukimus [24]. Tokio matavimo stendo kaina – 695 doleriai arba apie 622 eur. (papildomai kainuoja ir atsiuntimas į Lietuvą).



Series 1580/1585 Thrust Stand and Dynamometer

\$ 695.00 USD

SKU PKYB

The Series 1580/1585 is a thrust stand and dynamometer tailored for designers of UAVs, drones and other propulsion systems using brushless motors. It features a USB interface and powerful software for automated control and data-logging.

This tool measures both thrust and torque and is rated for motors and propellers generating thrusts of up to 5 kgf (11 lbf). For more propulsion, have a look at our [Series 1780](#).

The Series 1580 has an electrical power measurement limit at 35 V and 45 A continuous, the load measurement has a limited sample rate of 8 Hz.

58 pav. Horizontalus matavimo stendas „RCbenchmark Series 1585 Thrust Stand and Dynamometer“ [24]

Dar vienas populiarus matavimo stendas yra – „Turnigy Thrust Stand“ (59 pav.). Tai yra pigus matavimo stendas skirtas matuoti tik propelerio sukuriamai traukos jėgai. Sukimo momento ar apsisukimų šis matavimo stendas nematuoja. Didelis šio matavimo stendo privalumas yra tas, jog visi gauti tyrimo rezultatai realiu laiku yra vaizduojami integruotame ekrane. Šiuo metu šis matavimo stendas kainuoja apie 78 eur. Reikia pabrėžti, jog į kaina nėra įskaičiuotas elektros variklis, ESC valdiklis bei baterija [25]. Papildomai šie elementai gali kainuoti apie 40 eur.



59 pav. Horizontalus matavimo stendas „Turnigy Thrust Stand“ [25]

Šio darbo autoriaus suprojektuoto matavimo stendo gamybos kaina (424.99 eur.) yra gerokai mažesnė už tokias pačias funkcijas atliekantį „RCbenchmark Series 1585 Thrust Stand and Dynamometer“ matavimo stendą (apie 700 eur.).

Matavimo stendas „Turnigy Thrust Stand“ su papildomais elementais (elektros variklis, ESC valdiklis bei baterija), nors ir yra pigesnis (kaina apie 120 eur.), bet atlieka mažiau funkcijų, t.y., negali matuoti propelerio sukuriamo sukimo momento bei propelerio apsukų. Neturint šių duomenų negalima nustatyti propelerio naudingumo koeficiento, o tai yra viena svarbiausių propelerio charakteristikų. Įvertinus tai, galima daryti išvadą, jog suprojektuoto bei pagaminto matavimo stendo kaina yra konkurencinga.

Išvados

1. Šiame darbe išnagrinėti pagrindiniai nepilotuojamų orlaivių propelerių aspektai, t.y., kaip jie klasifikuojami, kokios yra propelerių geometrinės ir kinematinės charakteristikos, kaip nustatomi atakos kampai bei kaip skaičiuojamas propelerio naudingumo koeficientas (kai jis veikia stacionariame oro srauto lauke). Teorinėje darbo dalyje taip pat buvo išanalizuoti įvairūs matavimo standai. Nustatyti pagrindiniai jų privalumai bei trūkumai. Toliau aprašyti tyrimai atlikti su įvairiais matavimo standais.
2. Suprojektuotas bei pagamintas matavimo stendas yra pritaikytas tirti iki 300 mm skersmens propelerius. Panaudota elektronika leidžia vienu metu matuoti propelerio sukuriamą traukos jėgą, sukimo momentą bei variklio sūkių skaičių. Matavimo stendo konstrukcija užtikrina greitą propelerių pakeičiamumą, lengvą stendo transportavimą bei priežiūrą.
3. Atlikus propelerio medžiagos tamprumo modulio įtakos jo naudingumo koeficientui tyrimą, buvo nustatyta, jog propeleris pagamintas iš didesnį tamprumo modulį turinčio PLA plastiko (2,4 GPa) pasiekė vidutiniškai 5% didesnį naudingumo koeficientą negu tokios pačios geometrijos propeleris pagamintas iš mažesnį tamprumo modulį turinčio PETG (1,5 GPa) plastiko.
4. Atlikus palyginamąjį tyrimą tarp gumburėlinio propelerio ir įprastos formos propelerio buvo nustatyta, jog įprastos formos propeleris, visame sūkių diapazone, sukuria didesnę traukos jėgą negu gumburėlinis propeleris (vidutiniškai apie 15 %). Nepaisant to, gumburėlinis propeleris sukuria mažesnę (vidutiniškai apie 7 %) sukimo momentą visame sūkių diapazone. Galima daryti išvadą, jog šis propeleris sukuria mažesnes pasipriešinimo jėgas. Įprastos formos propeleris yra efektyvesnis prie daugumos darbo režimų. Galima išskirti diapazoną nuo 7300 aps/min iki 8200 aps/min, kuriame abiejų propelerių naudingumo koeficientas yra beveik vienodas.
5. Atlikus palyginamąjį tyrimą tarp plyšinio propelerio ir įprastos formos propelerio buvo nustatyta jog abiejų propelerių sukuriama traukos jėga yra labai panaši iki 4000 aps/min. Viršijus šias apskukas įprastos formos propeleris sukuria didesnę (apie 14 %) traukos jėgą, negu plyšinis propeleris. Plyšinis propeleris buvo vidutiniškai 39 % mažiau efektyvus nei įprastos formos propeleris. Toks rezultatas daugiausiai priklauso nuo didelio plyšinio propelerio sukuriamo pasipriešinimo.
6. Ekonominėje darbo dalyje buvo apskaičiuota horizontalaus matavimo stendo gamybos kaina. Ji susideda iš trijų detalių grupių kainų sumos: nestandartiniai gaminiai – 298.5 eur., standartiniai gaminiai – 36.39 eur., kiti gaminiai – 90.1 eur. Bendra matavimo stendo gamybos kaina – 424.99 eur.

Literatūros sąrašas

1. AKULAVIČIUS, Pranas ir A. SKURDENIS. Aerodinamika ir skrydžių dinamika: mokymo priemonė. Vilnius: Rosma, 2000. ISBN: 9986-00-290-7
2. DUMITRACHE, Alexandru ir kt. Design and analysis methods for UAV rotor blades. Scientific research and education in the air force. Politehnica University of Bucharest. Bucharest, Romania, 2017,12 p. [žiūrėta 2018-06-20] ISSN: 22473173 Prieiga per:https://www.researchgate.net/publication/319384839_DESIGN_AND_ANALYSIS_METHODS_FOR_UAV_ROTOR_BLADES
3. XIANG, Song ir kt. An improved propeller design method for the electric aircraft. Aerospace Science and Technology., 2018. 6 p. [žiūrėta 2018-06-20]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1270963818300270?via%3Dihub>
4. BERNARD, D. D. C. ir kt. Ground effect analysis for a quadrotor platform. Politecnico di Milano, 2017. 19 p. [žiūrėta 2019-03-22]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/318826703_Ground_effect_analysis_for_a_quadrotor_platform
5. THEYS, B. ir kt. Influence of propeller configuration on propulsion system efficiency of multi-rotor Unmanned Aerial Vehicles. KU Leuven, Leuven, Belgium, 2017. 7 p. [žiūrėta 2019-03-22]. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7502520>
6. WILLIAMS, C. L. and P. L. WHELAN. Breaking The Propeller Performance Barrier. Whelan & Williams Industries Inc., Dallas, 2017. 16 p. [žiūrėta 2019-04-22]. Prieiga per: <http://whelanwilliamsinc.com/uploads/1/0/9/8/109874282/whelanwilliamspropellerpaper8-2017.pdf>
7. BRUČAS, Domantas. Propeleriai: mokomoji knyga. Vilnius: Technika, 2012. 92 p.
8. YILMAZ, S., D. ERDEM and M. S. KAVSAOGLU. Performance of a ducted propeller designed for UAV applications at zero angle of attack flight: An experimental study. Istanbul Technical University, 34469, Istanbul, Turkey, 2015. 11 p. [žiūrėta 2019-04-21]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/278049591_Performance_of_a_ducted_propeller_designed_for_UAV_applications_at_zero_angle_of_attack_flight_An_experimental_study
9. PANAGIOTOU, P., P. KAPAROS, K. YAKINTHOS. Winglet design and optimization for a MALE UAV using CFD. Aristotle University of Thessaloniki, Greece, 2014. 16 p. [žiūrėta 2019-03-11]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1270963814001825>
10. PAKNYŠ, Leopoldas. Transporto priemonių aerodinamikos pagrindai. Mokomoji knyga. Kaunas: Technologija, 1999. 141 p.
11. RUTKAY, B. D. A Process for the Design and Manufacture of Propellers for Small Unmanned Aerial Vehicles. Carleton University Ottawa, Ontario, 2014. 274 p.
12. SERBEZOV, Vladimir, Stamen DIMITROV and Konstantin RANGELOV. Mobile test stand for evaluation of electric power plants for unmanned aircraft. Department of Aeronautics, Technical University. Sofia, Bulgaria, 2017. 4 p. [žiūrėta 2019-02-07]. Prieiga per:https://www.researchgate.net/publication/320916084_Mobile_test_stand_for_evaluation_of_electric_power_plants_for_unmanned_aircraft
13. ADKINS, Charles N. and Robert H. LIEBECK. Design of Optimum Propellers. Douglas Aircraft Company, Long Beach, California, 1994. 7 p. [žiūrėta 2019-02-08]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/245434341_Design_of_optimum_propellers

14. BRANDS, John B. and Micheal S. SELIG. Propeller performance data at low Reynolds numbers. University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, USA, 2012. 18 p. [žiūrēta 2019-03-17].
Prieiga per:
https://www.researchgate.net/publication/267785394_Propeller_Performance_Data_at_Low_Reynolds_Numbers
15. D'ANGELO, S., BERARDI, F. and MINISCI, E. Aerodynamic performances of propellers with parametric considerations on the optimal design. 2002. 320 p.
16. XIANG, Song ir kt.. An improved propeller design method for the electric aircraft. Aerospace Science and Technology, 2018. 78 p.
17. BREZINA, Aron J. and Scott K. THOMAS. Measurement of static and dynamic performance characteristics of small electric propulsion systems. Department of Mechanical and Materials Engineering Wright State University Dayton, Ohio, USA, 2013. 35 p.
18. GATTI, Mauro, Fabrizio GIULETTI and Matteo TURCI. Maximum endurance for battery-powered rotary-wing aircraft. Università di Bologna. Forlì, Italija. 2014. 7 p. [žiūrēta 2019-03-17].
Prieiga per:
https://www.researchgate.net/publication/277818196_Maximum_endurance_for_battery-powered_rotary-wing_aircraft?enrichId=rgreq-ff30ccb6d61f4601292bef111834353a-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI3NzgxODE5NjtBUzo2MDA3NzUwMzQxNDI3MjBAMTUyMDI0NzgzODUyMw%3D%3D&el=1_x_2&_esc=publicationCoverPdf
19. David Lee WALL. Optimum Propeller Design for Electric UAVs. Auburn University, Auburn, Alabama, USA, 2012. 147p.
20. BUTT, Fahad Rafi and Tariq TALHA. Numerical Investigation of the Effect of Leading-Edge Tubervles on Propeller Performance. National University of Science and Technology, Rawalpindi 4600, Pakistan, 2019m, 15p. . [žiūrēta 2019-03-07]. Prieiga per:
<https://arc.aiaa.org/doi/full/10.2514/1.C034845>

Informacijos šaltinių sąrašas

21. Programinė įranga „JavaProp“. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2019-01-20]. Prieiga per internetą: https://www.mh-aerotools.de/airfoils/javaprop.htm?fbclid=IwAR32WELvhPh0hYuArzwsyBiU2_km9smDEqZYj8HAC05s3ozSExd8gJMNU3A
22. Matavimo standui naudototi elementai bei rašto darbe naudoti jų pav. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2018-05-06]. Prieiga per internetą: <https://www.aliexpress.com/>
23. Matavimo standui naudototi elementai bei rašto darbe naudoti jų pav. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2018-05-06]. Prieiga per internetą: <https://www.anodas.lt/>
24. Pardavinėjami matavimo standai. [Žiūrėta 2018-05-16]. Prieiga per internetą : <https://www.rcbenchmark.com/dynamometer-series-1520/#features>
25. Matavimo standui naudototi elementai bei rašto darbe naudoti jų pav. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2018-05-06]. Prieiga per internetą: https://hobbyking.com/en_us/turnigy-thrust-stand-and-power-analyser-v2.html
26. Rašto darbe naudotas pav. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2019-03-12]. Prieiga per internetą: <https://i.ytimg.com/vi/D-eBnXrWJYw/maxresdefault.jpg>
27. Horizontalus matavimo stendas. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2019-01-12]. Prieiga per internetą: - <http://www.itsqv.com/QVM/index.php?title=DIY - Motor and Prop Test Bench>
28. Informacija apie Broniaus Oškinio sklandytuvus bei juose naudotus plyšinius sparnus [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2019-04-20]. Prieiga per internetą: <http://www.vgc.lt/puslapiai/oskinio-sklandytuvai.html?vars/action/viewArticle/nID/62>
29. Darbe naudoti NACA profiliai. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2019-02-20]. Prieiga per internetą: <http://airfoiltools.com/>

Priedai

- 1 PRIEDAS. Detalių sąrašas.**
- 2 PRIEDAS. Bendro vaizdo (surinkimo) brėžiniai.**
- 3 PRIEDAS. Darbo brėžiniai.**
- 4 PRIEDAS. Pirmasis, prototipinis, horizontalaus matavimo stendo bandymas.**
- 5 PRIEDAS. Variklio valdymo programa („Arduino“ sistemoje).**
- 6 PRIEDAS. Sukimo momento matavimui naudota programa („Arduino“ sistemoje).**
- 7 PRIEDAS. Pilnai surinkto horizontalaus matavimo stendo nuotrauka.**
- 8 PRIEDAS. PLA plastiko sertifikatas su nurodytomis mechaninėmis ir fizikinėmis charakteristikomis.**
- 9 PRIEDAS. PETG plastiko sertifikatas su nurodytom mechaninėm ir fizikinėm charakteristikom.**
- 10 PRIEDAS. Standumo įtakos propelerio traukos savybėms tyrimo rezultatai.**
- 11 PRIEDAS. Palyginamojo tyrimo tarp gumburėlinio propelerio ir įprastos formos propelerio rezultatai.**
- 12 PRIEDAS. Palyginamojo tyrimo tarp plyšinio propelerio ir įprastos formos propelerio rezultatai.**

1 PRIEDAS. Detalių sąrašas.

FORMATAS	ZONA	POZICIJA	ŽYMĖJIMAS	PAVADINIMAS	SKAIČIUS	PASTABA			
				<u>DOKUMENTACIJA</u>					
A4			MAG 001-000AR	Aiškinamasis raštas					
A3			MAG 001-000BV	Bendras vaizdas					
				<u>DETALĖS</u>					
A4		1	MAG 001-001	Medinis padas	1				
A4		2	MAG 001-002	Ašelės laikiklis	2				
A4		3	MAG 001-003	Tvirtinimo el.	2				
A4		4	MAG 001-004	Profilis L300	1				
A4		5	MAG 001-005	Profilis L130	1				
A4		6	MAG 001-006	Profilis L700	1				
A4		7	MAG 001-007	Ašelė	1				
A4		8	MAG 001-008	Kampainis 70x80	2				
A4		9	MAG 001-009	Kampainis 70x80	1				
A4		10	MAG 001-010	Kampainis 70x70	1				
A4		11	MAG 001-011	Guolių laikiklis	1				
A4		12	MAG 001-012	Guolių dangtelis	2				
A4		13	MAG 001-013	Aukščio kompresatorius	1				
A4		14	MAG 001-014	Tarpinė	5				
A4		15	MAG 001-015	Flanšas	1				
A4		16	MAG 001-016	Flanšas	1				
Atsakinga žinyba MIDF		Techninis vadovas		Dokumento tipas Detalių sąrašas		Dokumento statusas Mokomasis			
Savininkas KTU		Ruošė Andrius Karaliūnas		Antraštė Matavimo stendas		MAG 001-000			
		Tvirtino Algimantas Fedaravičius				Laida A	Data 2018-04-18	Kalba lt.	Lapas 1/4

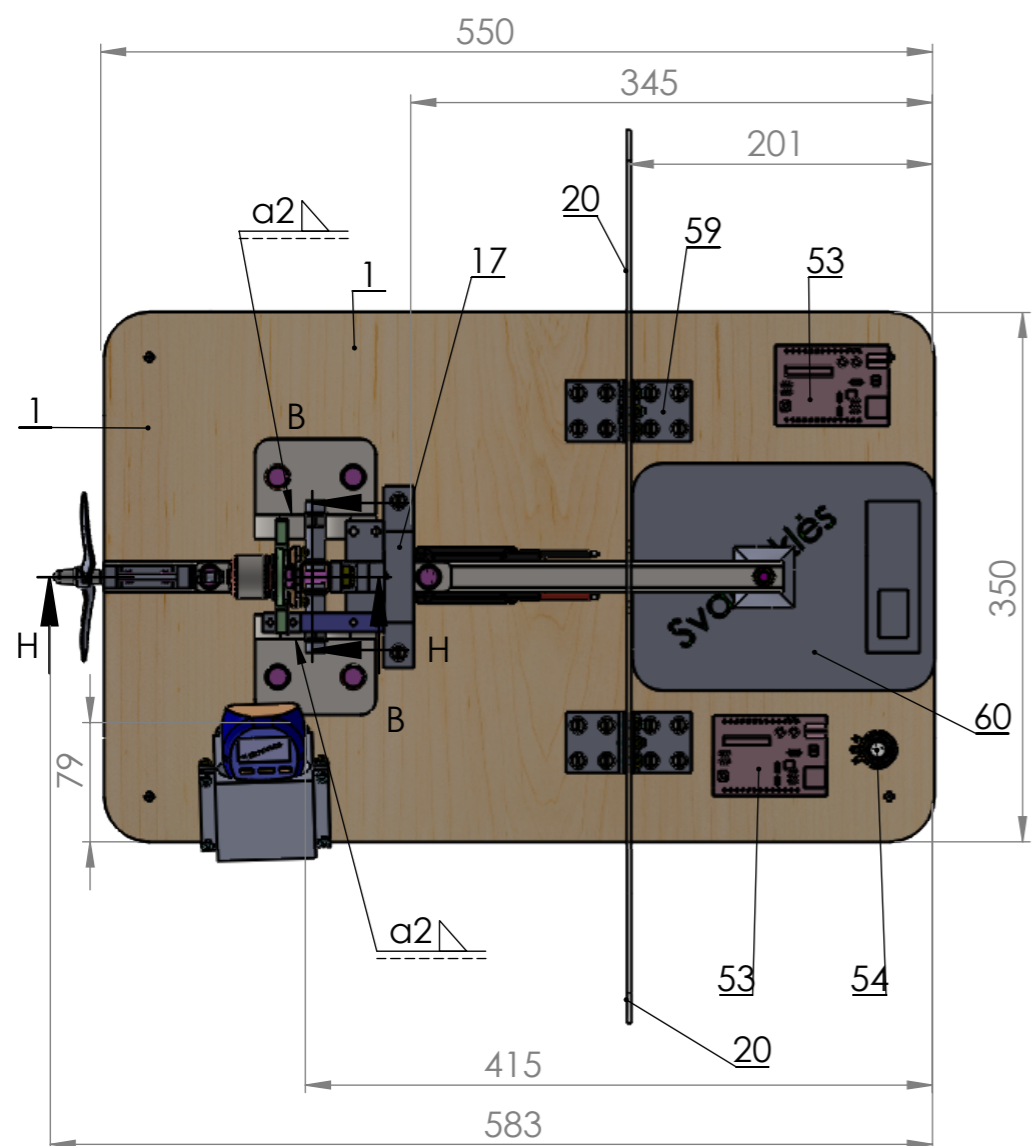
FORMATAS	ZONA	POZICIJA	ŽYMĖJIMAS	PAVADINIMAS	SKAIČIUS	PASTABA			
A4		17	MAG 001-017	Apsauga	1				
A4		18	MAG 001-018	Laikiklis	1				
A4		19	MAG 001-019	Atraminis elementas	1				
A4		20	MAG 001-020	Apsauginis stiklas	1				
A4		21	MAG 001-021	Dangtelis	1				
A4		22	MAG 001-022	Tachometro laikiklis	1				
A4		23	MAG 001-023	Flanšas	1				
A4		24	MAG 001-024	Pozicionavimo elementas	1				
A4		25	MAG 001-025	Srieginis fiksatorius	1				
A4		26	MAG 001-026	Laikiklis	1				
A4		27	MAG 001-027	Profilis	1				
A4		28	MAG 001-028	Laikiklis	1				
A4		29	MAG 001-029	Propeleris	1				
				<u>STANDARTINIAI GAMINIAI</u>					
		30		Sraigtas DIN 914 - M2 x 3	2				
				Sraigtai DIN 7985					
		31		M3 x 6	4				
		32		M3 x 10	8				
		33		M4 x 14	14				
		34		M4 x 16	4				
Atsakinga žinyba MIDF		Techninis vadovas		Dokumento tipas Detalių sąrašas		Dokumento statusas Mokomasis			
Savininkas KTU		Ruošė Andrius Karaliūnas		Antraštė Matavimo stendas		MAG 001-000			
		Tvirtino Algimantas Fedaravičius				Laida A	Data 2018-04-18	Kalba lt.	Lapas 2/4

FORMATAS	ZONA	POZICIJA	ŽYMĖJIMAS	PAVADINIMAS	SKAIČIUS	PASTABA			
		35		M4 x 25	8				
		36		Sraigtas DIN 571 - M5 x 25	26				
				Sraigtai DIN 933					
		37		M8 x 30	2				
		38		M8 x 35	11				
		39		M8 x 40	5				
		40		Sraigtas ISO 4762 - M8 x 80	1				
				Veržlės DIN 985					
		41		M3	4				
		42		M4	26				
		43		M8	17				
		44		Veržlė DIN 439 - M3	4				
				Poveržlės DIN 125					
		45		M3	4				
		46		M8	32				
		47		Žiedas fiksavimo DIN 471 - 12 x 1	4				
Atsakinga žinyba MIDF		Techninis vadovas		Dokumento tipas Detalių sąrašas		Dokumento statusas Mokomasis			
Savininkas KTU		Ruošė Andrius Karaliūnas		Antraštė Matavimo stendas		MAG 001-000			
		Tvirtino Algimantas Fedaravičius				Laida A	Data 2018-04-18	Kalba lt.	Lapas 3/4

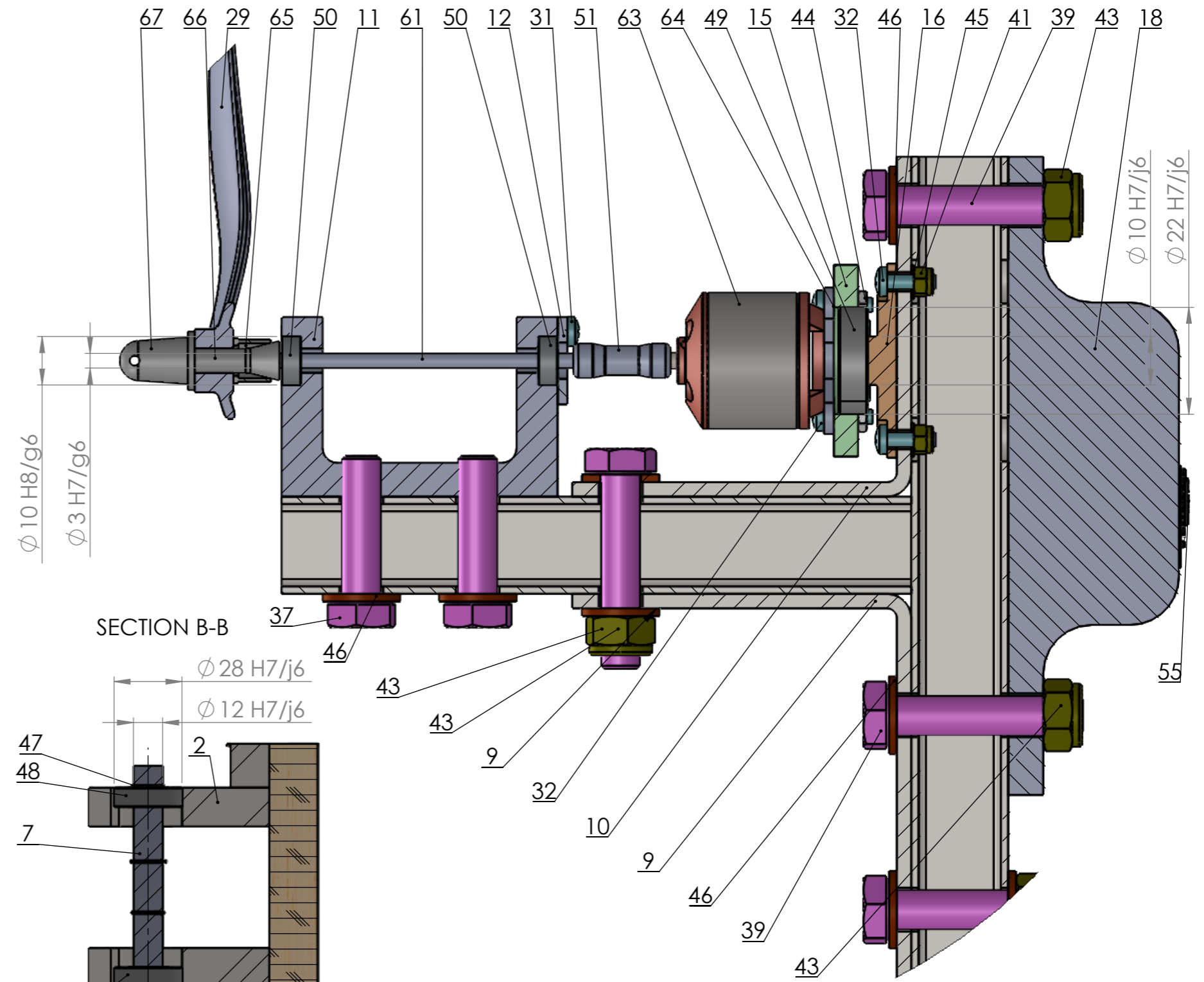
FORMATAS	ZONA	POZICIJA	ŽYMĖJIMAS	PAVADINIMAS	SKAIČIUS	PASTABA
		48		Riedėjimo guolis DIN 623 SKF 12mm	2	
		49		Riedėjimo guolis DIN 623 SKF 10mm	1	
		50		Riedėjimo guolis DIN 623 SKF 3mm	2	
				<u>KITI GAMINIAI</u>		
		51		Mova 3mm x 3.17mm	1	AUTOTOOL HOME
		52		Svorio Jutiklis 1kg - AN0400	1	Anodas
		53		Mikrovaldiklis Arduino UNO R3 - A000066	2	Anodas
		54		Potenciometras 10K Ohm daugiasūkis - 8827	1	Anodas
		55		HX711 Svorio jutiklių modulis - AN0223	1	Anodas
		56		El. variklio valdiklis (ESC) - Hobbywing Pro 40A	1	RCDALYS
		57		Guminė kojėlė - K0575.02501755	4	KIPP
		58		Lazerinis tachometras - 6125-010	1	MONARC H
		59		Kampainis 180x40x40x2	4	Senukai
		60		Svarstyklės Aurora AU4300	1	Aurora
		61		Ašėlė WB-003080	1	FCPK
		62		OLED ekranas - 0.96" 128x64px	1	Anodas
		63		El. Variklis - Racerstar BR2830 1300KV	1	Anodas
		64		Variklio laikiklis	1	
		65		Propelerio laikiklio įvorė	1	Komplektas ANODAS AN1000kV
		66		Užspaudžiama propelerio ašis	1	
		67		Propelerio užveržimo veržlė	1	

Atsakinga žinyba MIDF	Techninis vadovas	Dokumento tipas Detalių sąrašas	Dokumento statusas Mokomasis	
Savininkas KTU	Ruošė Andrius Karaliūnas	Antraštė Matavimo stendas	MAG 001-000	
	Tvirtino Algimantas Fedaravičius		Laida A	Data 2018-04-18
			Kalba lt.	Lapas 4/4

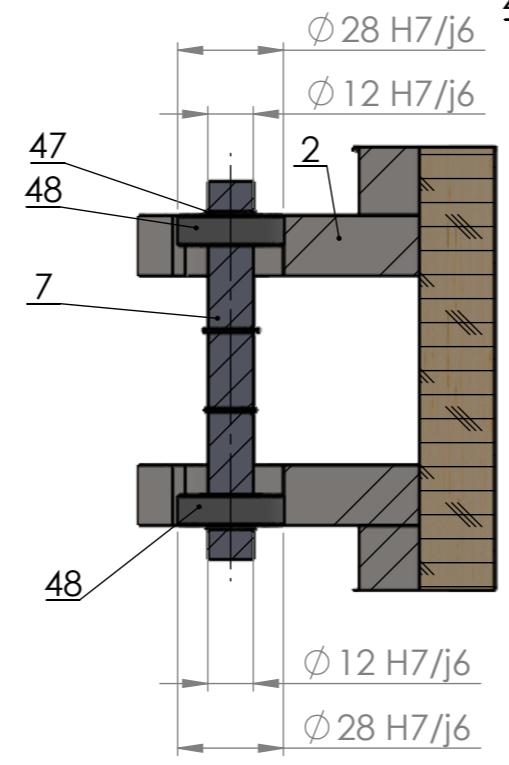
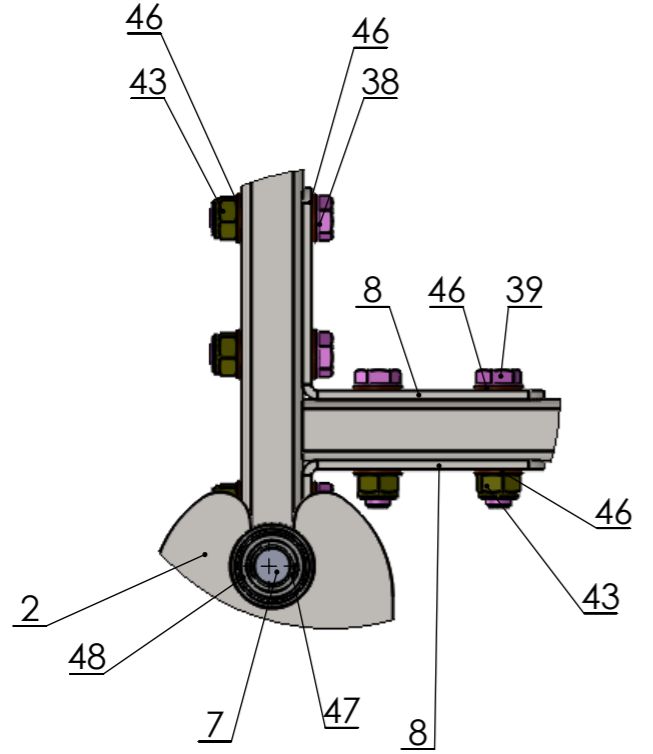
2 PRIEDAS. Bendro vaizdo (surinkimo) brėžiniai.



DETAIL I SCALE 1 : 1

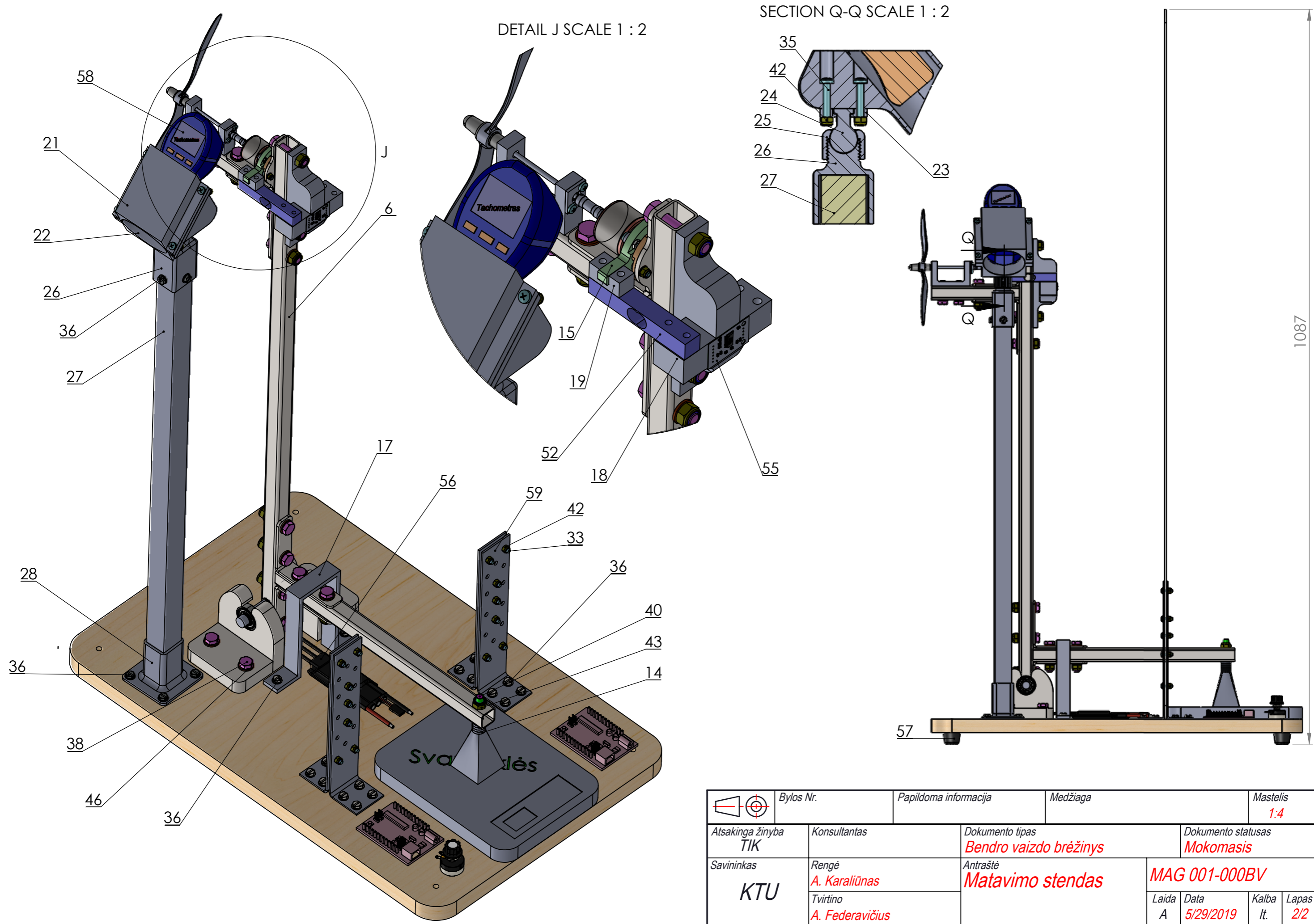


DETAIL C



1. Tachometro laikiklis (poz. nr. 28) prie pagrindo (poz. nr. 1) tvirtinami surinkimo metu DIN 571 M5 x 25 sraigtais.
2. Apsauginio stiklo laikikliai (poz. nr. 59) prie pagrindo (poz. nr. 1) tvirtinami surinkimo metu DIN 571 M5 x 25 sraigtais.
3. Apsauga dėl netyčinio stendo rėmo apvertimo (poz. nr. 17) tvirtinama surinkimo metu DIN 571 M5 x 25 sraigtais.
4. Tachometro padėtis nustatoma surinkimo metu naudojant pozicionavimo elementą (poz. nr. 24)

Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga	Mastelis
Atsakinga žinyba TIK	Konsultantas	Dokumento tipas Bendro vaizdo brėžinys	Dokumento statusas Mokomasis
Savininkas KTU	Rengė A. Karaliūnas Tvirtino A. Federavičius	Antraštė Matavimo stendas	MAG 001-000BV
		Laida A	Data 5/29/2019 Kalba lt. Lapas 1/2



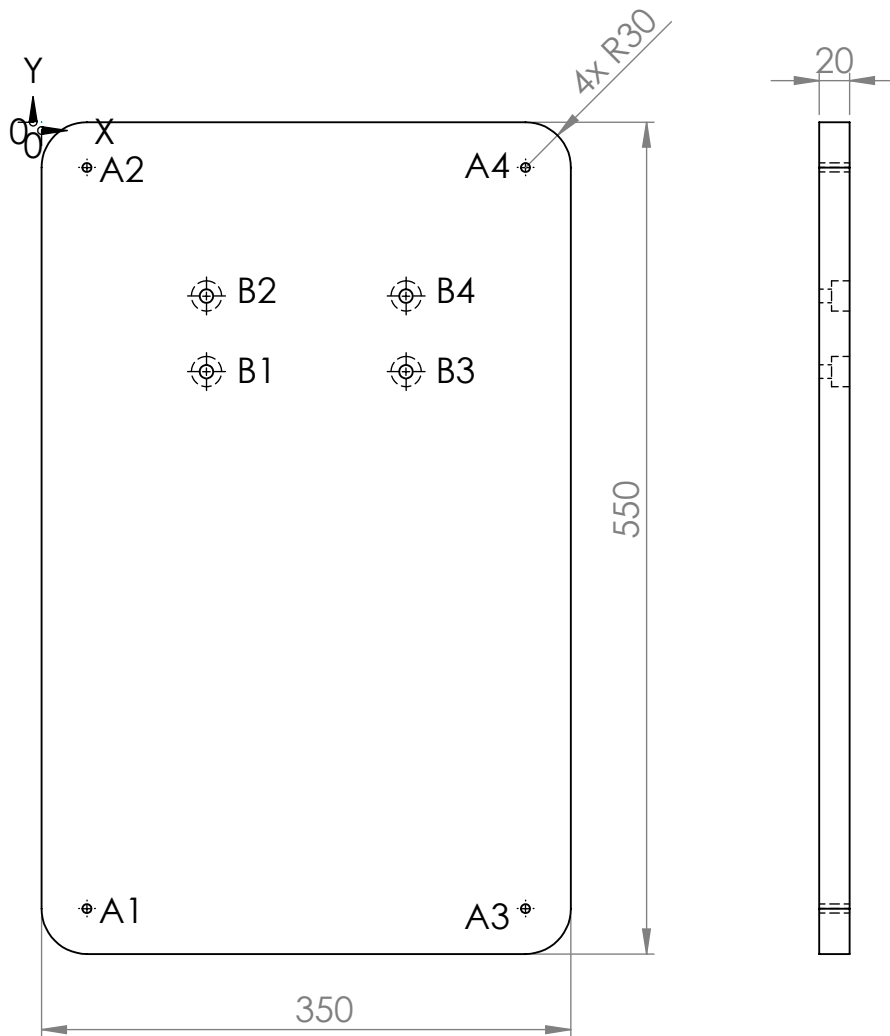
DETAIL J SCALE 1 : 2

SECTION Q-Q SCALE 1 : 2

1087

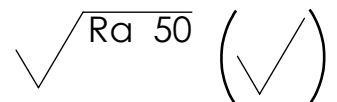
	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga	Mastelis 1:4
Atsakinga žinyba TIK	Konsultantas	Dokumento tipas Bendro vaizdo brėžinys	Dokumento statusas Mokomasis	
Savininkas KTU	Rengė A. Karaliūnas Tvirtino A. Federavičius	Antraštė Matavimo stendas	MAG 001-000BV	
		Laida A	Data 5/29/2019	Kalba lt. Lapas 2/2

3 PRIEDAS. Darbo brėžiniai.

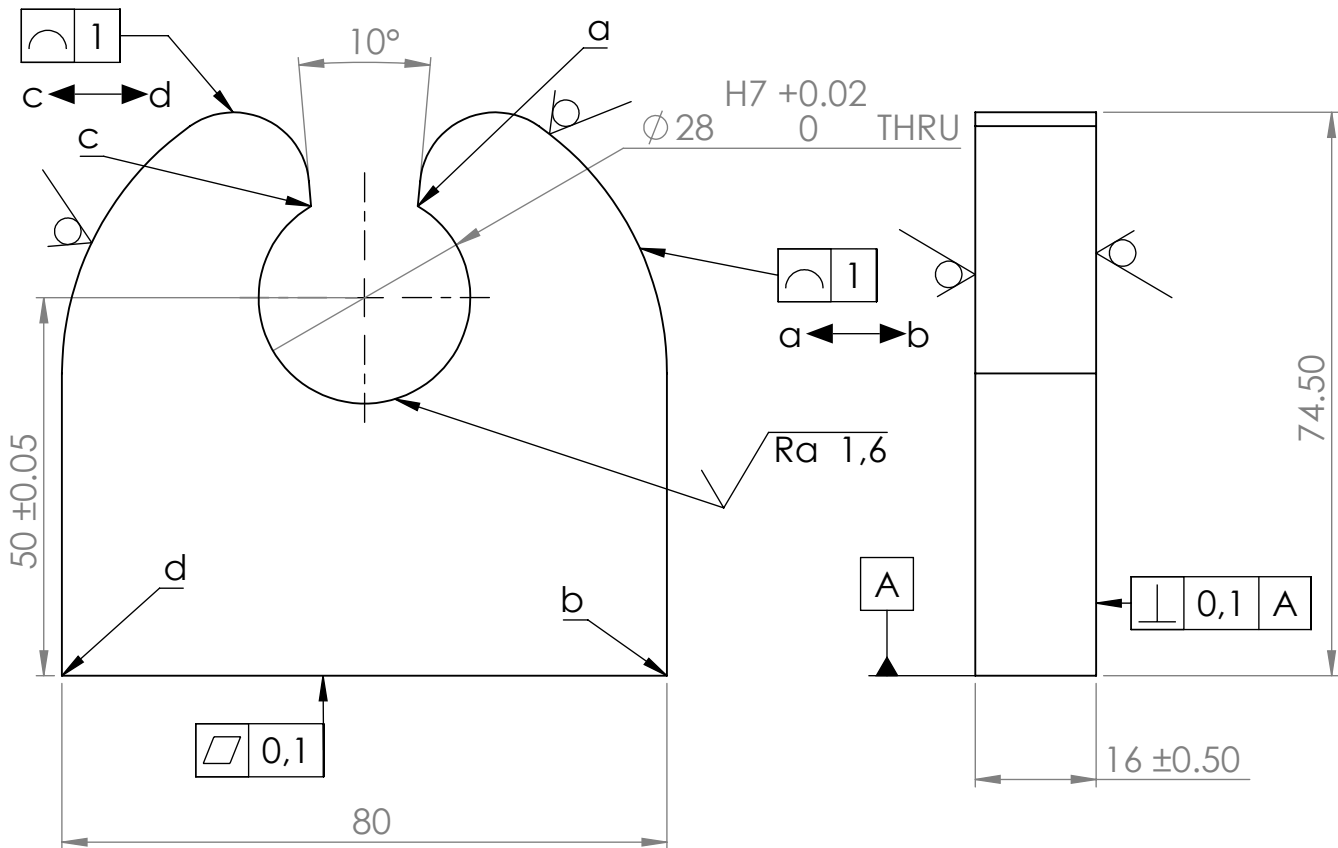


TAG	X LOC	Y LOC	SIZE
A1	30	-520	Ø 6 ∇ 27.50
A2	30	-30	
A3	320	-520	
A4	320	-30	
B1	109	-165	Ø 9 THRU ALL ┌┐ Ø 20 ∇ 12
B2	109	-115	
B3	241	-165	
B4	241	-115	

1. *Nenurodytos matmenų ribinės nuokrypos pagal LST EN 22768 - V.*
2. *Nenurodyti suapvalinimo spinduliai R=2,0 mm.*



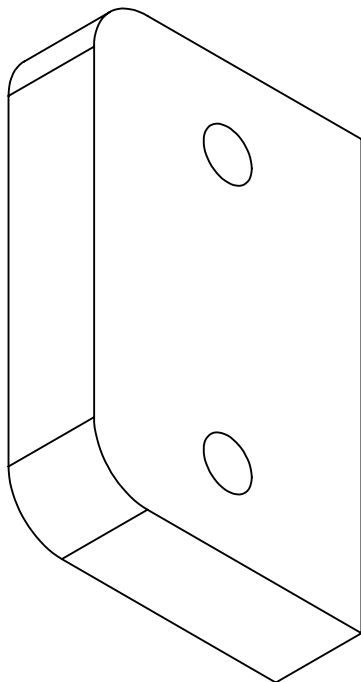
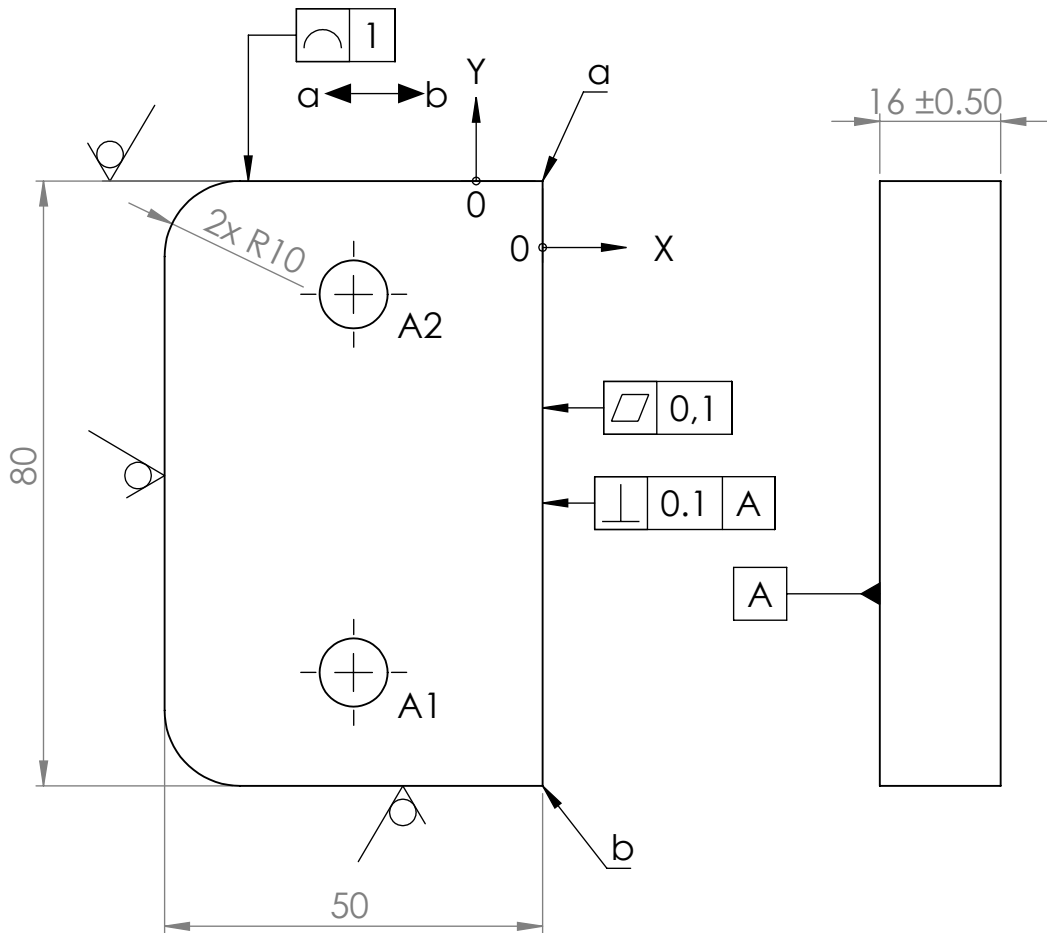
	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga <i>Medienos drožlių plokštė (MDP)</i>	Mastelis <i>1:5</i>
Atsakinga žinyba TIK	Konsultantas	Dokumento tipas <i>Detalės brėžinys</i>	Dokumento statusas <i>Mokomasis</i>	
Savininkas KTU	Rengė <i>A. Karaliūnas</i>	Antraštė Medinis padas	MAG-001-001	
	Tvirtino <i>A. Federavičius</i>		Laida <i>A</i>	Data <i>5/29/2019</i>
			Kalba <i>lt.</i>	Lapas <i>1/1</i>



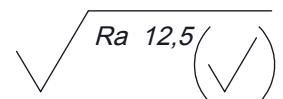
1. *Nenurodytos matmenų ribinės nuokrypos pagal LST EN 22768 - m.*
2. *Nenurodyti suapvalinimo spinduliai R=1,0 mm.*

$\sqrt{Ra\ 12,5}$ (✓)

	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga <i>Plienas S355JR LST EN 10083-1</i>	Mastelis <i>1:1</i>
Atsakinga žinyba TIK	Konsultantas	Dokumento tipas <i>Detalės brėžinys</i>	Dokumento statusas <i>Mokomasis</i>	
Savininkas KTU	Rengė <i>A. Karaliūnas</i>	Antraštė Ašelės laikiklis	MAG-001-002	
	Tvirtino <i>A. Federavičius</i>		Laida <i>A</i>	Data <i>5/29/2019</i>
			Kalba <i>lt.</i>	Lapas <i>1/1</i>

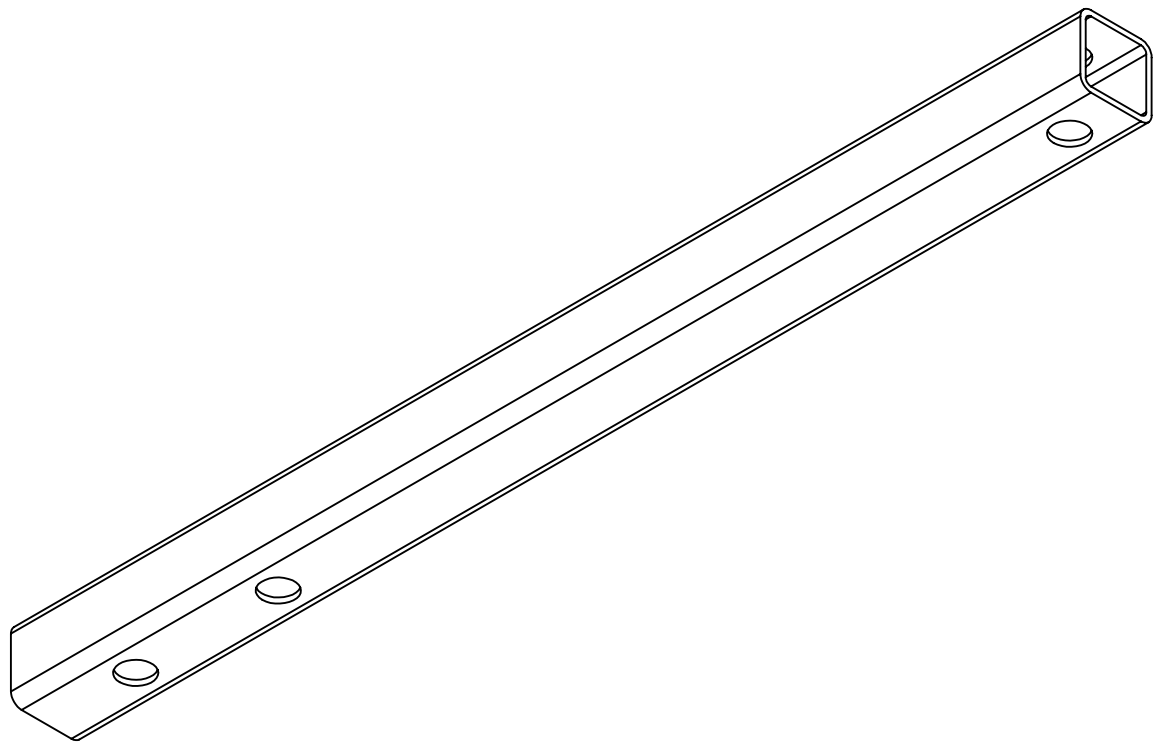
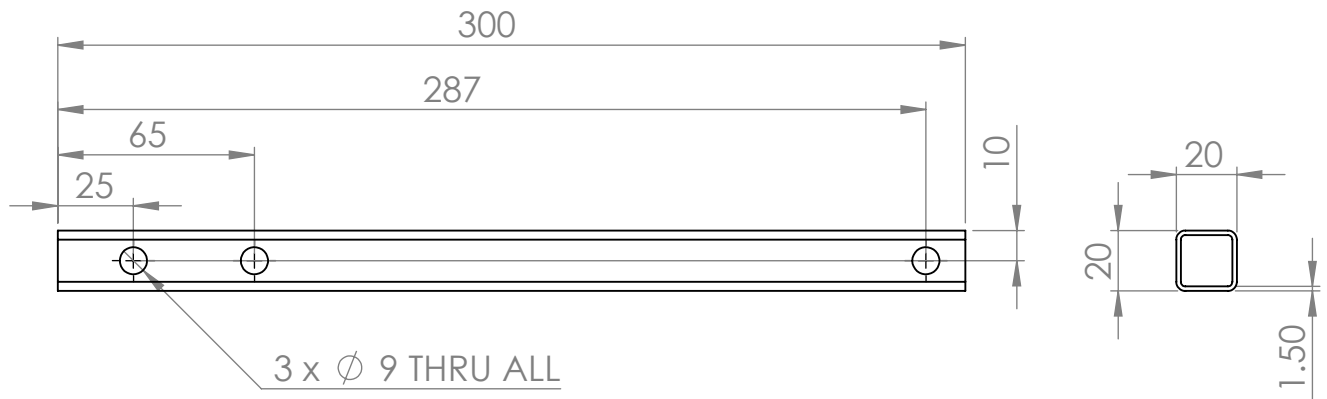


TAG	X LOC	Y LOC	SIZE
A1	-25	-65	Ø 9 THRU ALL
A2	-25	-15	Ø 9 THRU ALL

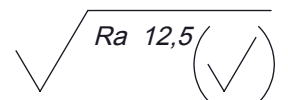


1. *Nenurodytos matmenų ribinės nuokrypos pagal LST EN 22768 - m.*
2. *Nenurodyti suapvalinimo spinduliai R=1,0 mm.*

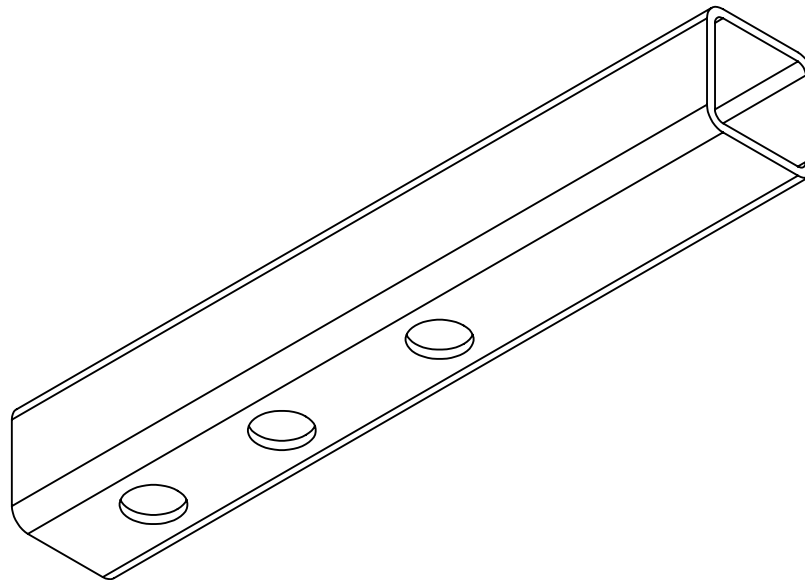
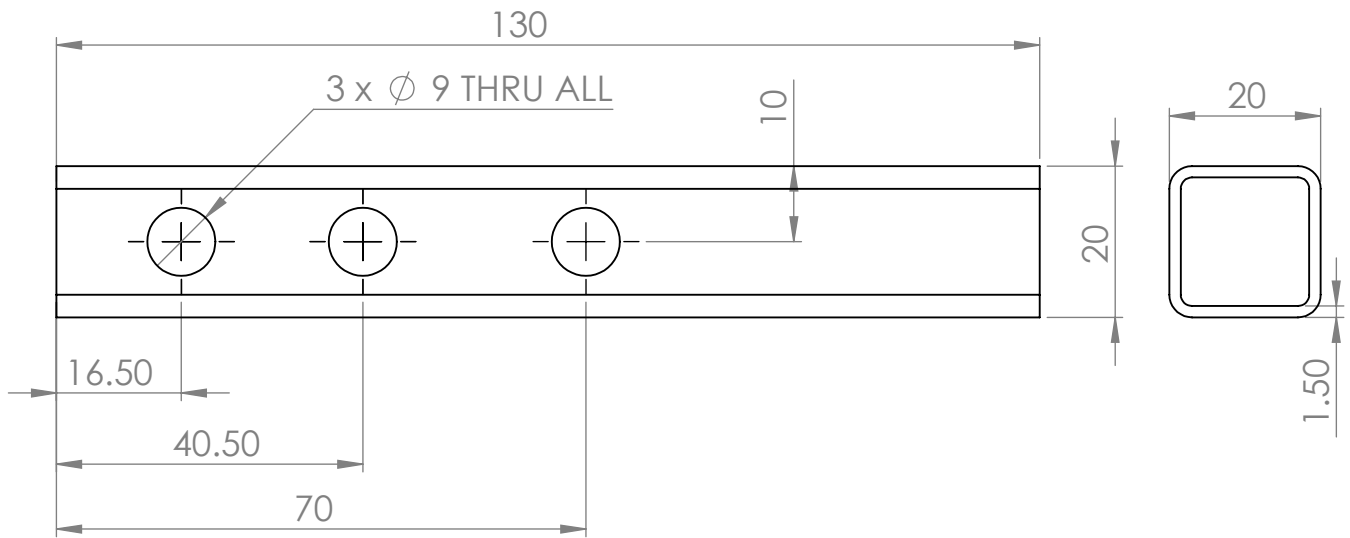
	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga <i>Plienas S355JR LST EN 10083-1</i>	Mastelis <i>1:1</i>
Atsakinga žinyba TIK	Konsultantas	Dokumento tipas <i>Detalės brėžinys</i>	Dokumento statusas <i>Mokomasis</i>	
Savininkas KTU	Rengė <i>A. Karaliūnas</i>	Antraštė Tvirtinimo el.	MAG-001-003	
	Tvirtino <i>A. Federavičius</i>		Laida <i>A</i>	Data <i>5/29/2019</i>
			Kalba <i>lt.</i>	Lapas <i>1/1</i>



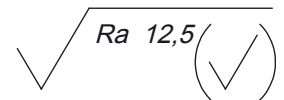
1. *Nenurodytos matmenų ribinės nuokrypos pagal LST EN 22768 - m.*
2. *Nenurodyti suapvalinimo spinduliai R=1,0 mm.*
3. *Gaminti iš standartinio profilio 20mm x 20mm x 1.5mm.*



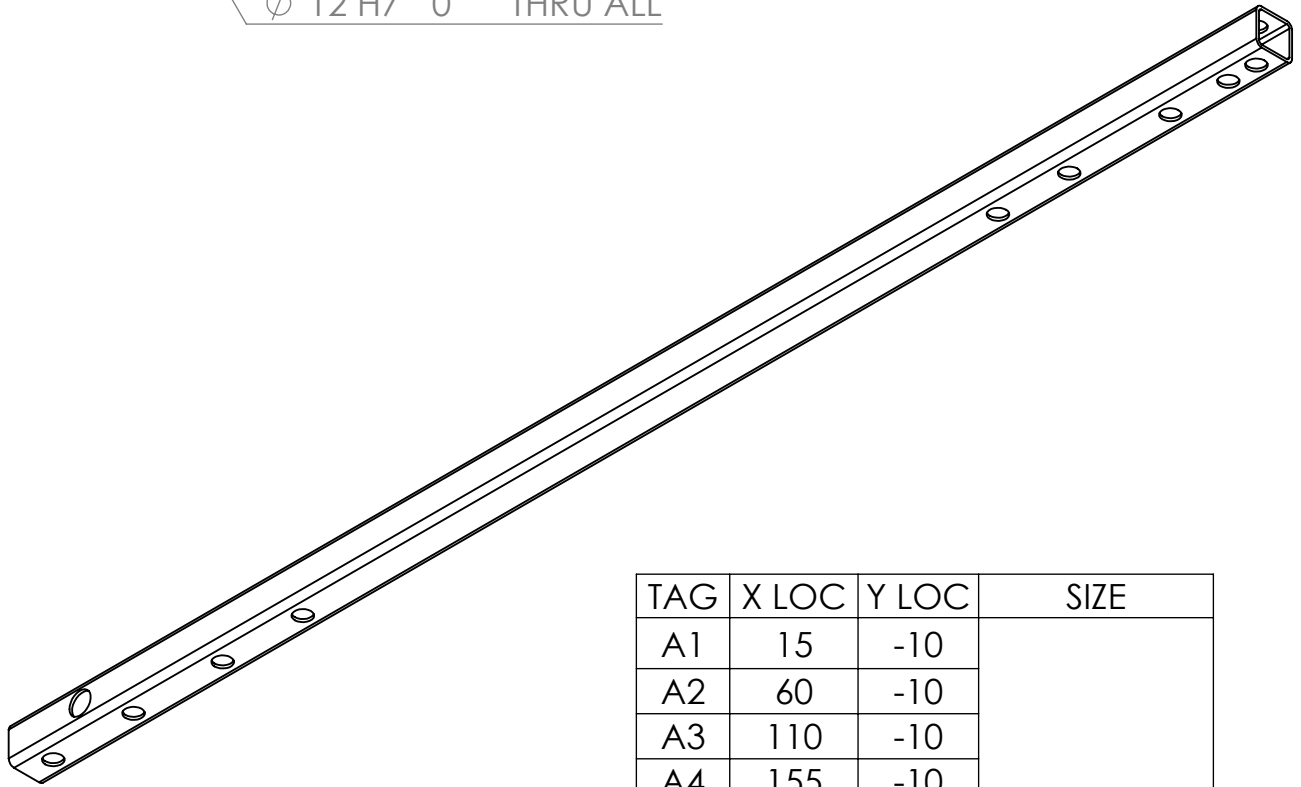
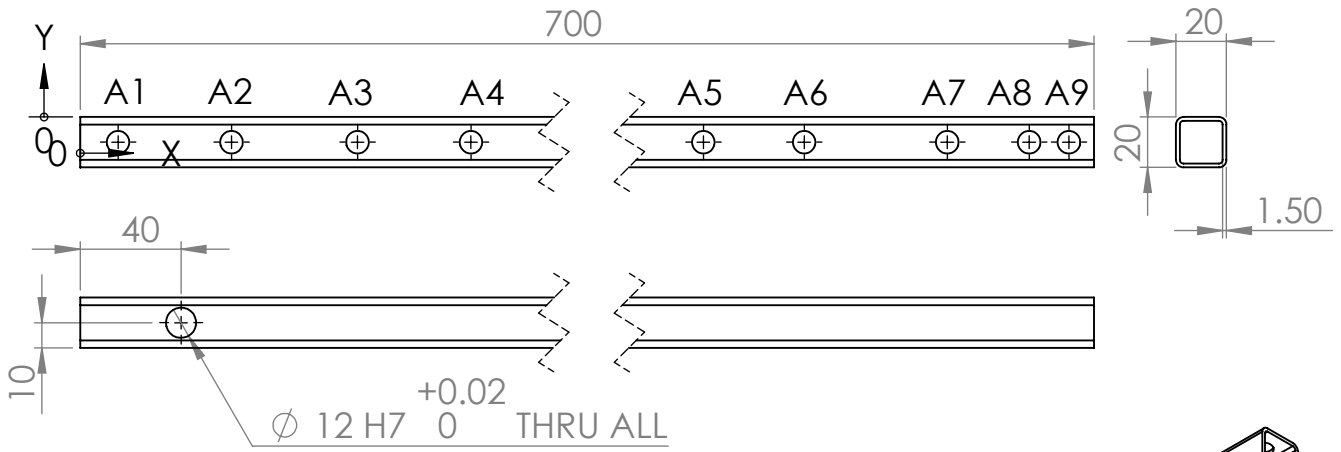
	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga <i>Plienas S355JR LST EN 10083-1</i>	Mastelis <i>1:2.5</i>
Atsakinga žinyba TIK	Konsultantas	Dokumento tipas <i>Detalės brėžinys</i>	Dokumento statusas <i>Mokomasis</i>	
Savininkas KTU	Rengė <i>A. Karaliūnas</i>	Antraštė Profilis L300	MAG-001-004	
	Tvirtino <i>A. Federavičius</i>		Laida <i>A</i>	Data <i>6/3/2019</i>
			Kalba <i>lt.</i>	Lapas <i>1/1</i>



1. *Nenurodytos matmenų ribinės nuokrypos pagal LST EN 22768- m.*
2. *Nenurodyti suapvalinimo spinduliai R=1,0 mm.*
3. *Gaminti iš standartinio profilio 20mm x 20mm x 1.5mm.*

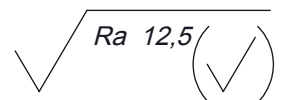


	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga <i>Plienas S355JR LST EN 10083-1</i>	Mastelis <i>1:1</i>
Atsakinga žinyba TIK	Konsultantas	Dokumento tipas <i>Detalės brėžinys</i>	Dokumento statusas <i>Mokomasis</i>	
Savininkas KTU	Rengė <i>A. Karaliūnas</i>	Antraštė Profilis L130	MAG 001-005	
	Tvirtino <i>A. Federavičius</i>		Laida <i>A</i>	Data <i>6/3/2019</i>
			Kalba <i>lt.</i>	Lapas <i>1/1</i>



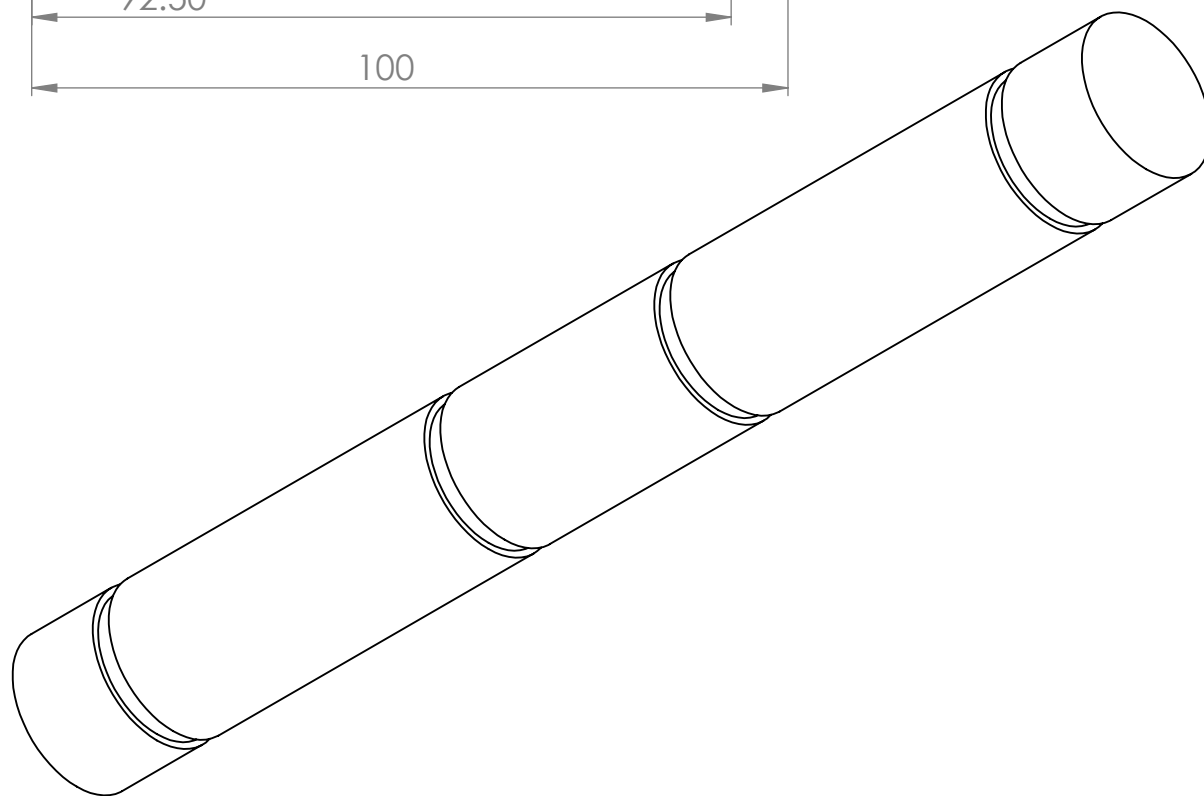
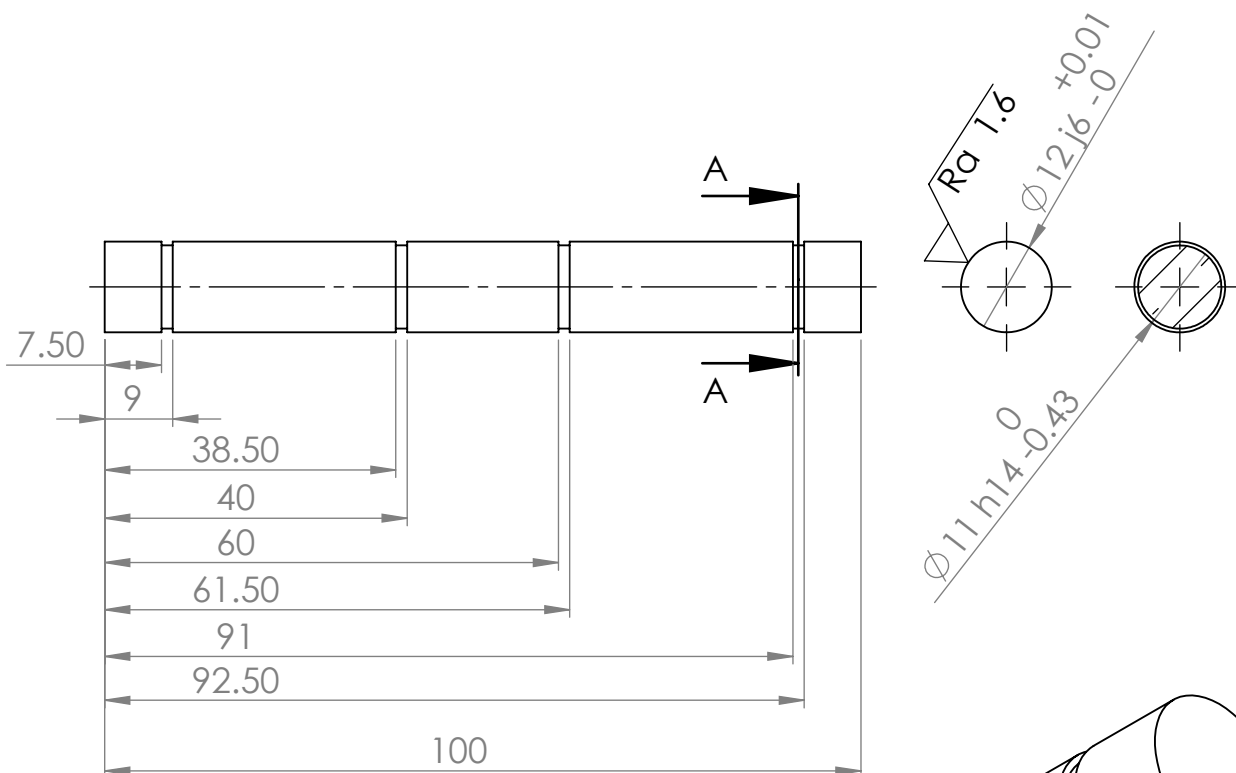
TAG	X LOC	Y LOC	SIZE
A1	15	-10	$\phi 9$ THRU ALL
A2	60	-10	
A3	110	-10	
A4	155	-10	
A5	545	-10	
A6	585	-10	
A7	641.75	-10	
A8	674.25	-10	
A9	690	-10	

1. *Nenurodytos matmenų ribinės nuokrypos pagal LST EN 22768 m.*
2. *Nenurodyti suapvalinimo spinduliai $R=1,0$ mm.*
3. *Gaminti iš standartinio profilio 20mm x 20mm 1.5mm*



	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga <i>Plienas S355JR LST EN 10083-1</i>	Mastelis <i>1:3</i>
Atsakinga žinyba TIK	Konsultantas	Dokumento tipas <i>Detalės brėžinys</i>	Dokumento statusas <i>Mokomasis</i>	
Savininkas KTU	Rengė <i>A. Karaliūnas</i>	Antraštė Profilis L700	MAG 001-006	
	Tvirtino <i>A. Federavičius</i>		Laida <i>A</i>	Data <i>5/29/2019</i>
			Kalba <i>lt.</i>	Lapas <i>1/1</i>

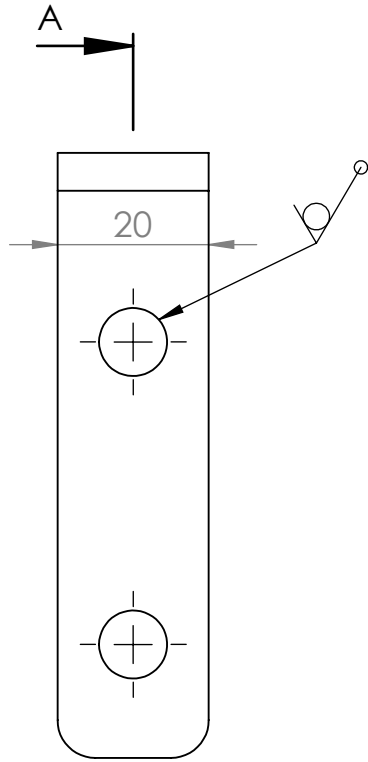
SECTION A-A


 $\sqrt{Ra\ 12,5}$

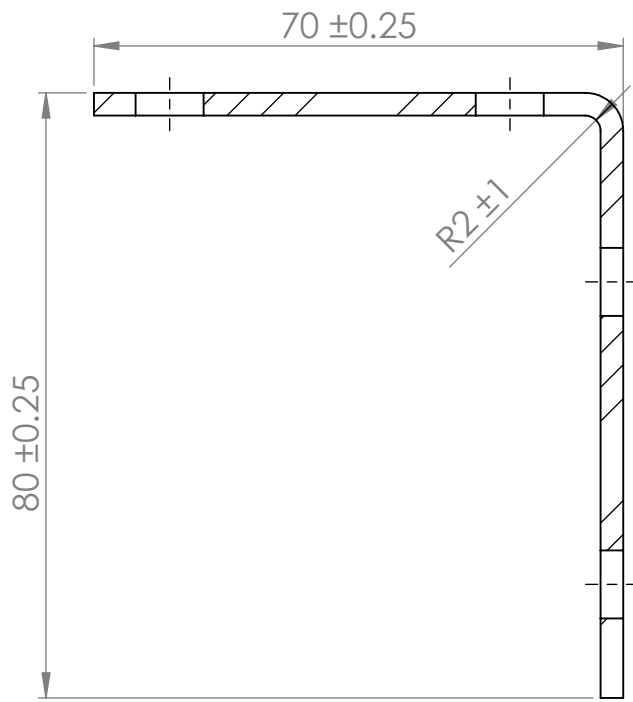
1. *Nenurodytos matmenų ribinės nuokrypos pagal LST EN 22768 m.*
2. *Nenurodyti suapvalinimo spinduliai $R=1,0$ mm.*

	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga <i>Plienas S355JR LST EN 10083-1</i>	Mastelis <i>1:1</i>
Atsakinga žinyba TIK	Konsultantas	Dokumento tipas <i>Detalės brėžinys</i>	Dokumento statusas <i>Mokomasis</i>	
Savininkas KTU	Rengė <i>A. Karaliūnas</i>	Antraštė Ašėlė	MAG 001-007	
	Tvirtino <i>A. Federavičius</i>			
			Kalba <i>lt.</i>	Lapas <i>1/1</i>

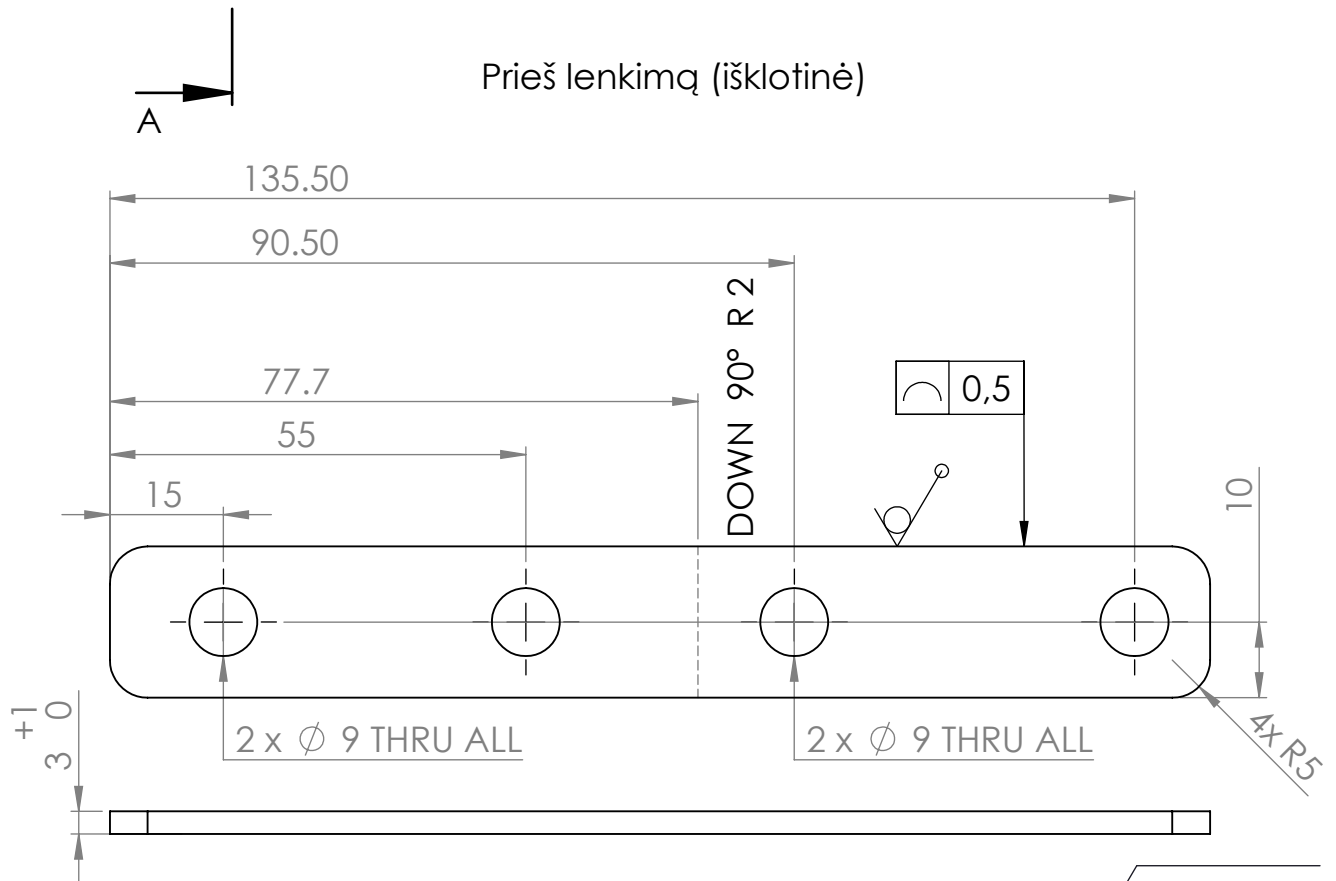
Po lenkimo



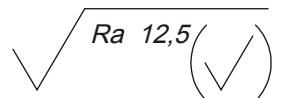
SECTION A-A



Prieš lenkimą (išsklotinė)



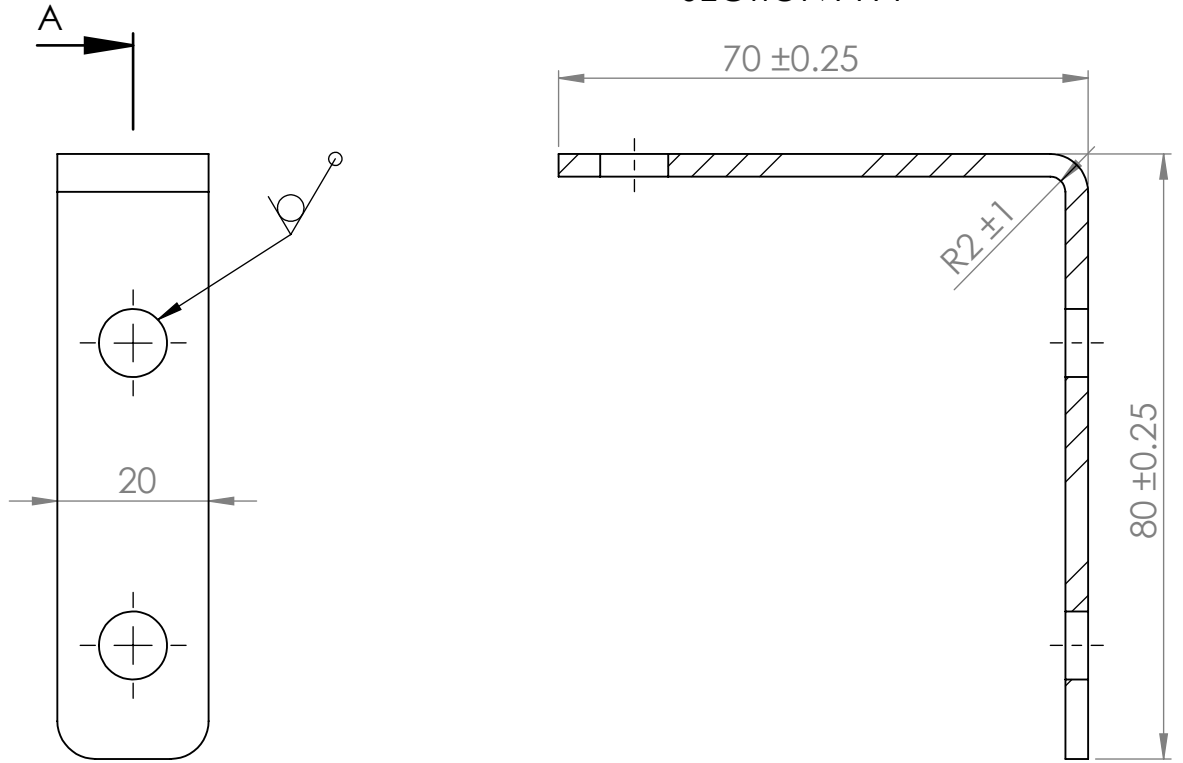
1. *Nenurodytos matmenų ribinės nuokrypos pagal LST EN 22768 - c.*
2. *Nenurodyti suapvalinimo spinduliai R=1,0 mm.*



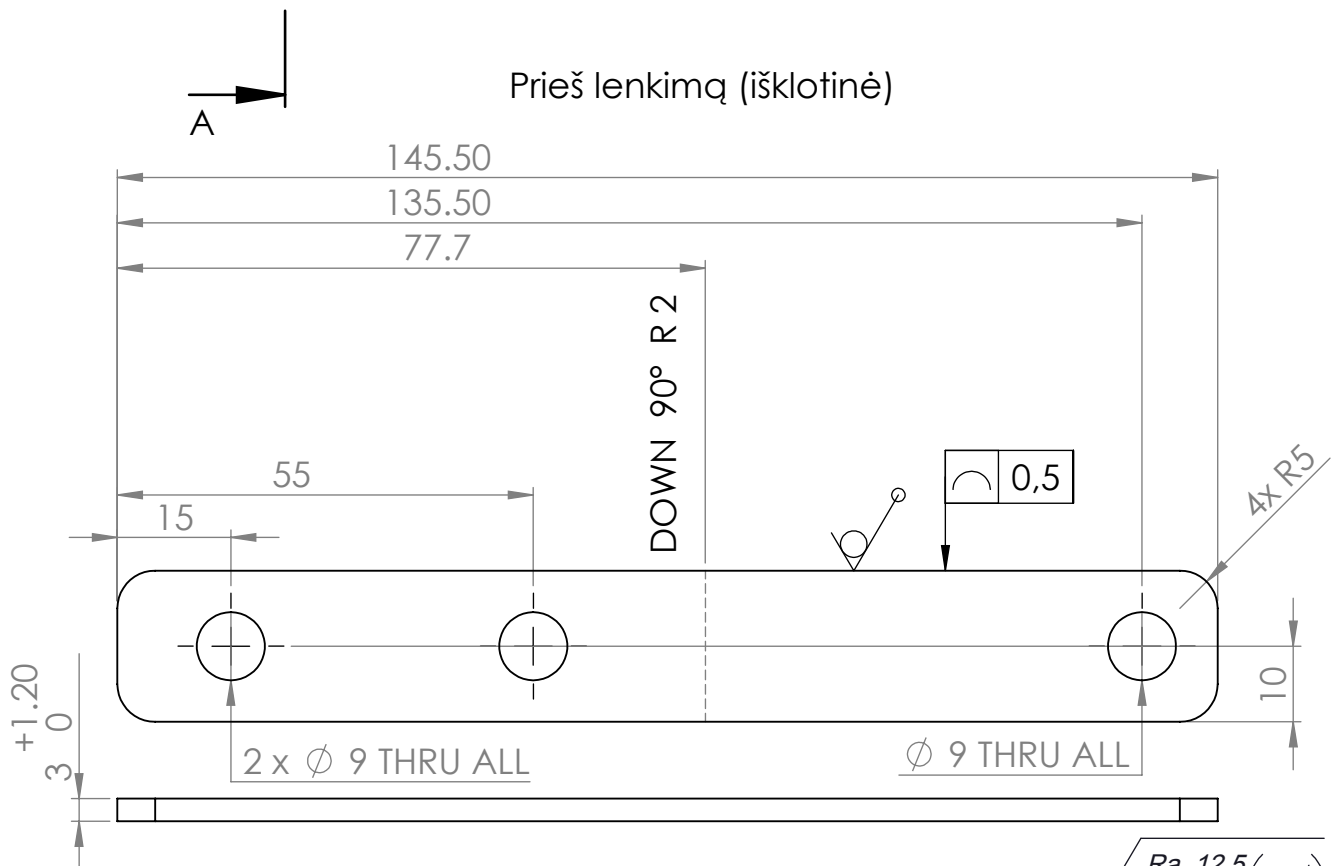
	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga <i>Plienas S355JR LST EN 10083-1</i>	Mastelis <i>1:1</i>
Atsakinga žinyba TIK	Konsultantas	Dokumento tipas <i>Detalės brėžinys</i>	Dokumento statusas <i>Mokomasis</i>	
Savininkas KTU	Rengė <i>A. Karaliūnas</i>	Antraštė Kampainis 70x80	MAG 001-008	
	Tvirtino <i>A. Federavičius</i>		Laida <i>A</i>	Data <i>5/29/2019</i>
			Kalba <i>lt.</i>	Lapas <i>1/1</i>

Po lenkimo

SECTION A-A



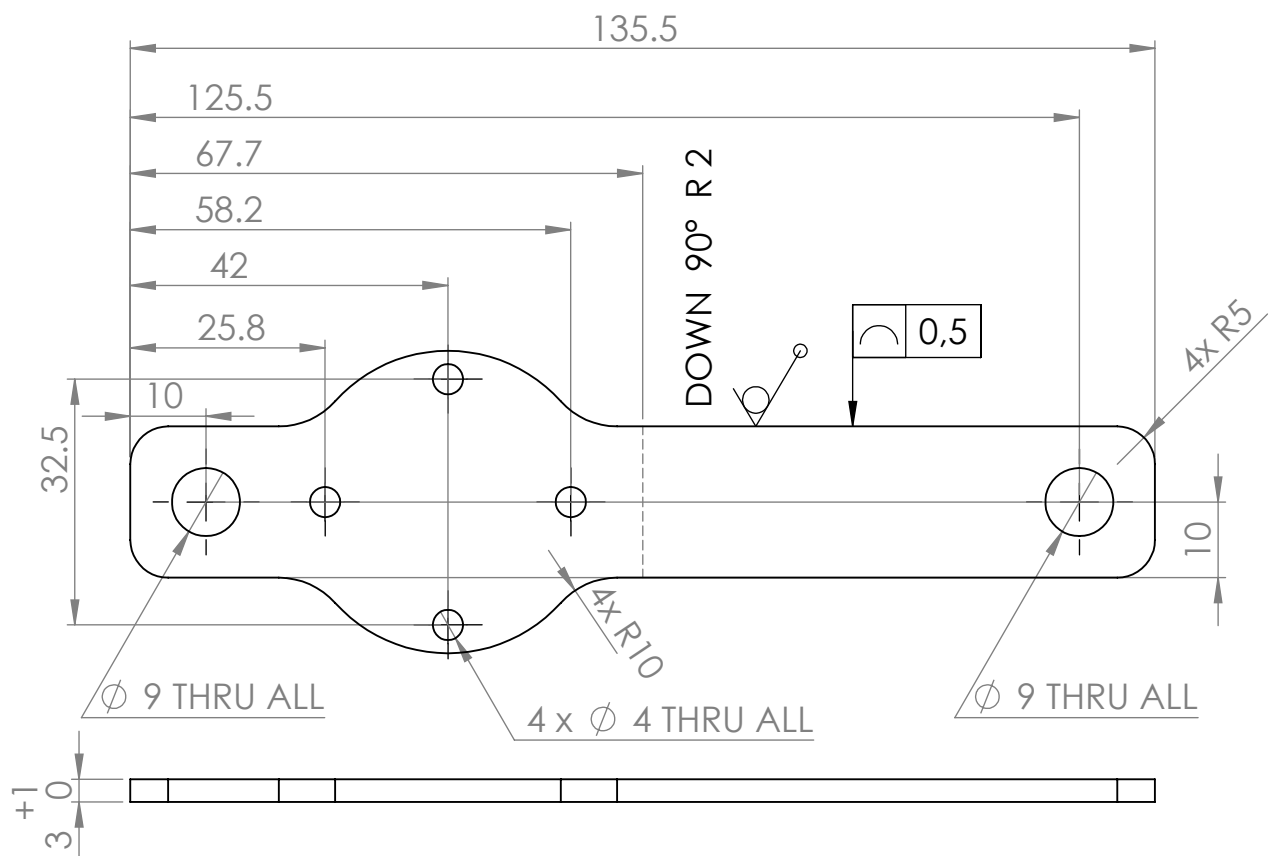
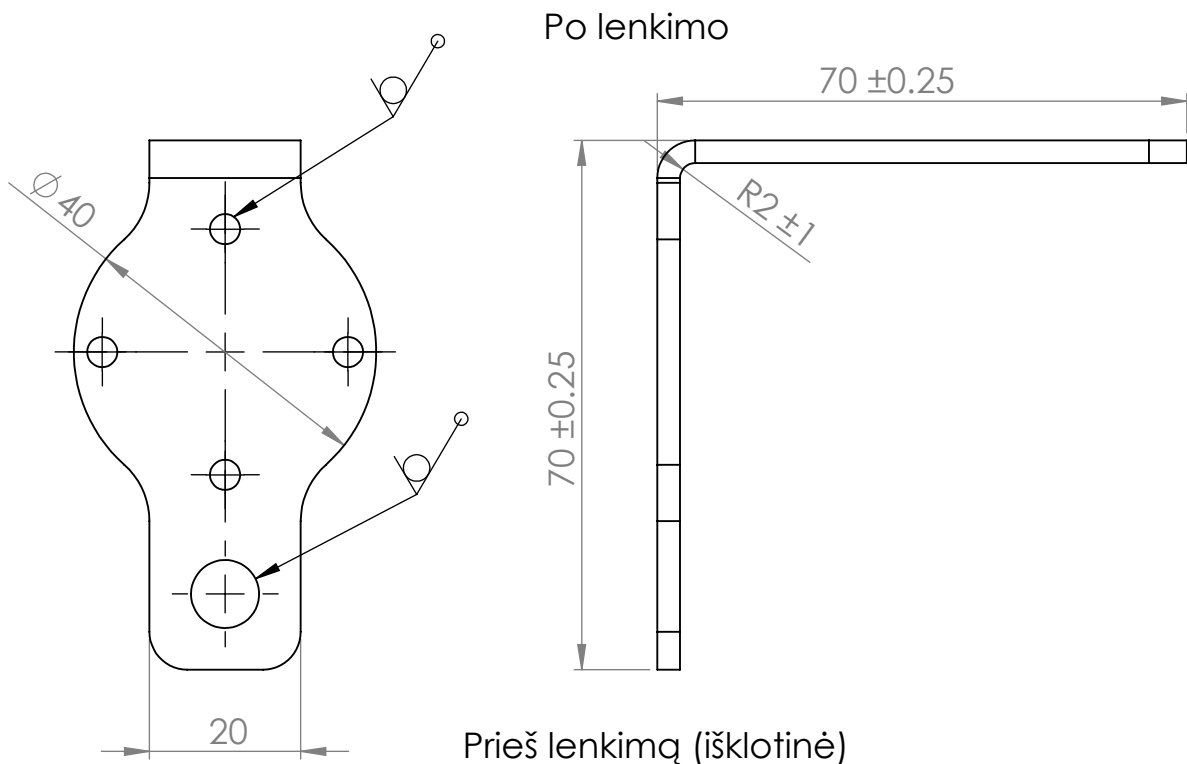
Prieš lenkimą (išsklotinė)



1. *Nenurodytos matmenų ribinės nuokrypos pagal LST EN 22768 - c.*
2. *Nenurodyti suapvalinimo spinduliai R=1,0 mm.*

✓ Ra 12,5 (✓)

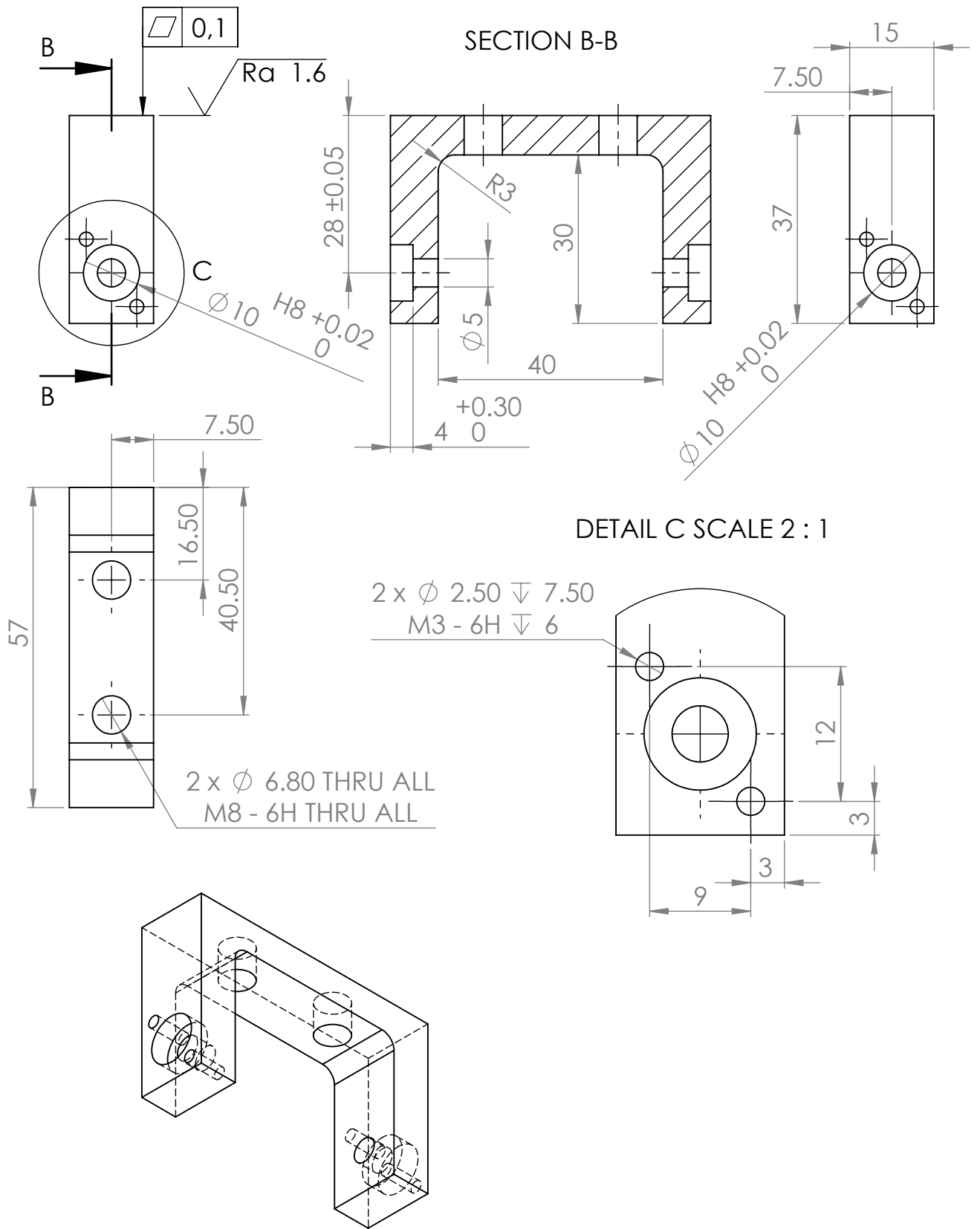
	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga <i>Plienas S355JR LST EN 10083-1</i>	Mastelis <i>1:1</i>
Atsakinga žinyba TIK	Konsultantas	Dokumento tipas <i>Detalės brėžinys</i>	Dokumento statusas <i>Mokomasis</i>	
Savininkas KTU	Rengė <i>A. Karaliūnas</i>	Antraštė Kampainis 70x80	MAG 001-009	
	Tvirtino <i>A. Federavičius</i>		Laida <i>A</i>	Data <i>5/29/2019</i>
			Kalba <i>lt.</i>	Lapas <i>1/1</i>



1. *Nenurodytos matmenų ribinės nuokrypos pagal LST EN 22768 - c.*
2. *Nenurodyti suapvalinimo spinduliai R=1,0 mm.*

$\sqrt{Ra\ 12,5}$ (✓)

	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga <i>Plienas S355JR LST EN 10083-1</i>	Mastelis <i>1:1</i>
Atsakinga žinyba TIK	Konsultantas	Dokumento tipas <i>Detalės brėžinys</i>	Dokumento statusas <i>Mokomasis</i>	
Savininkas KTU	Rengė <i>A. Karaliūnas</i>	Antraštė Kampainis 70x70	MAG 001-010	
	Tvirtino <i>A. Federavičius</i>			
			Kalba <i>lt.</i>	Lapas <i>1/1</i>

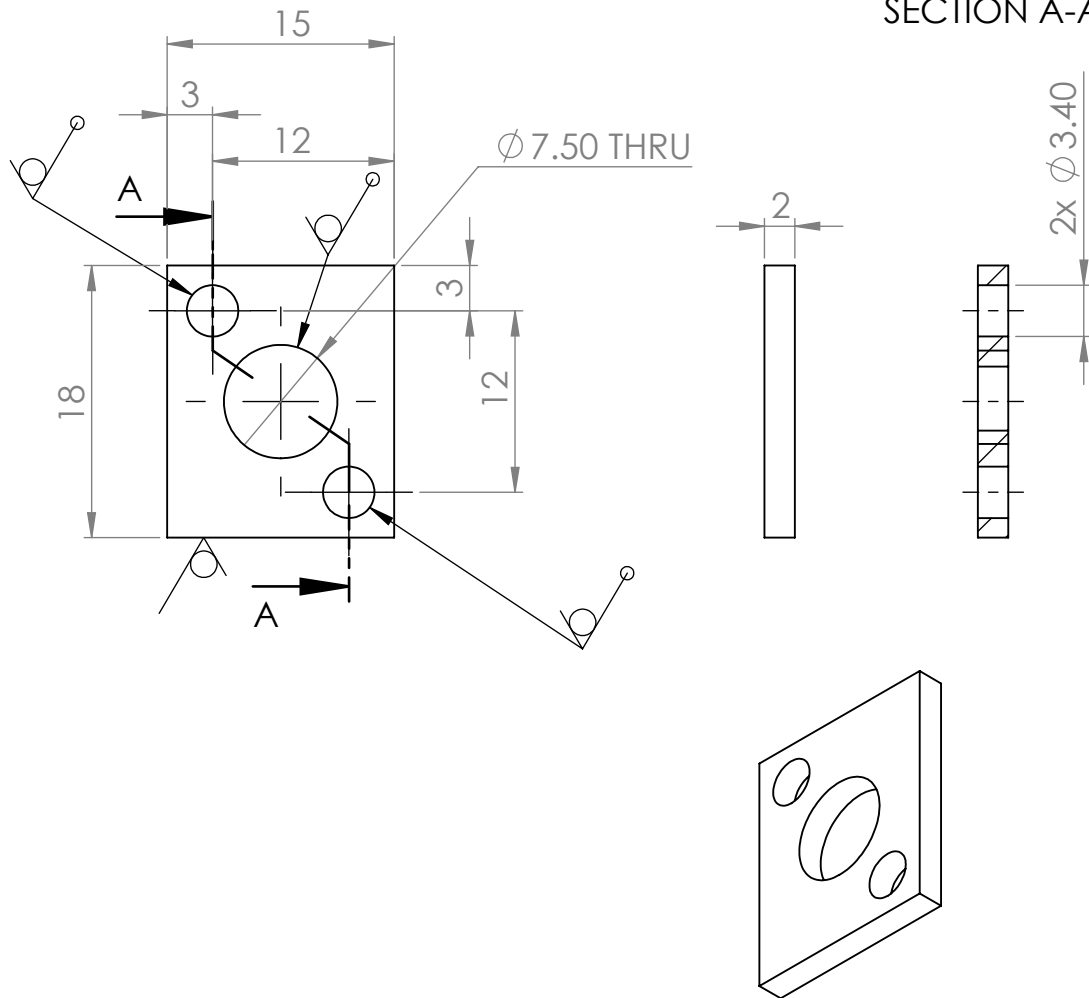


1. *Nenurodytos matmenų ribinės nuokrypos pagal LST EN 22768 - m.*
2. *Nenurodyti suapvalinimo spinduliai R=1,0 mm.*

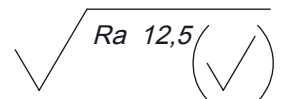
$\sqrt{Ra\ 6,3}$ (✓)

	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga <i>Plienas S355JR LST EN 10083-1</i>	Mastelis <i>1:1</i>
Atsakinga žinyba TIK	Konsultantas	Dokumento tipas <i>Detalės brėžinys</i>	Dokumento statusas <i>Mokomasis</i>	
Savininkas KTU	Rengė <i>A. Karaliūnas</i>	Antraštė Guolių laikiklis	MAG 001-011	
	Tvirtino <i>A. Federavičius</i>			
			Kalba <i>lt.</i>	Lapas <i>1/1</i>

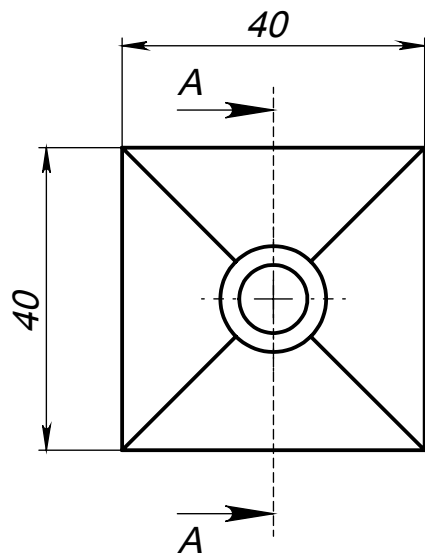
SECTION A-A



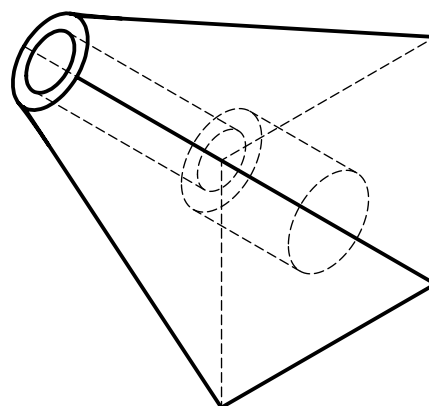
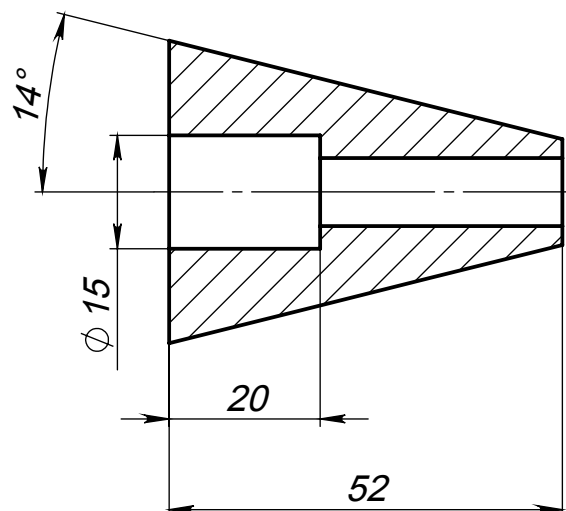
1. *Nenurodytos matmenų ribinės nuokrypos pagal LST EN 22768 - c.*
2. *Nenurodyti suapvalinimo spinduliai $R=1,0$ mm.*



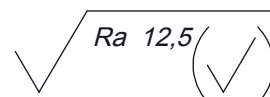
	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga <i>Plienas S355JR LST EN 10083-1</i>	Mastelis <i>2:1</i>
Atsakinga žinyba TIK	Konsultantas	Dokumento tipas <i>Detalės brėžinys</i>	Dokumento statusas <i>Mokomasis</i>	
Savininkas KTU	Rengė <i>A. Karaliūnas</i>	Antraštė Guolių dangtelis	MAG 001-012	
	Tvirtino <i>A. Federavičius</i>		Laida <i>A</i>	Data <i>5/29/2019</i>
			Kalba <i>lt.</i>	Lapas <i>1/1</i>



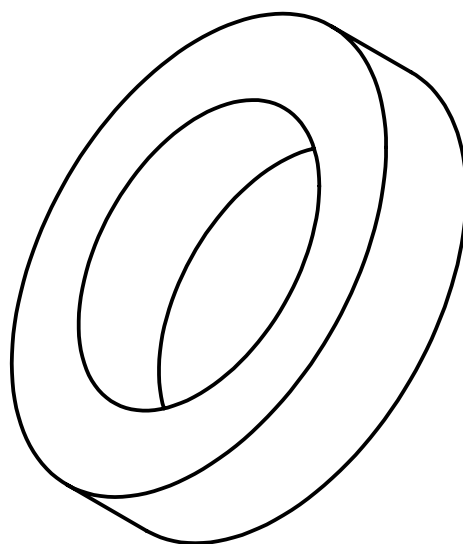
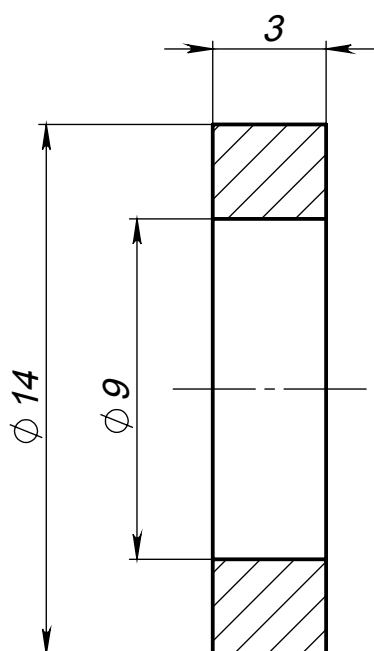
SECTION A-A



1. Nenurodytos matmenų ribinės nuokrypos pagal LST EN 22768 - c.
2. Nenurodyti suapvalinimo spinduliai $R=1,0$ mm
3. Numatyta, jog detalė bus gaminama naudojant 3D spausdinimo technologija.



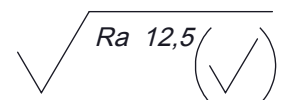
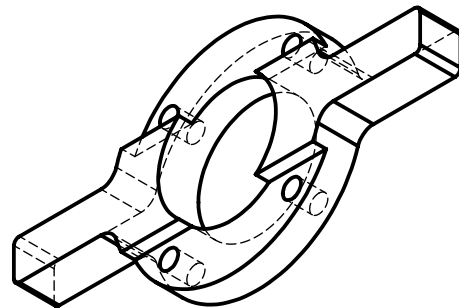
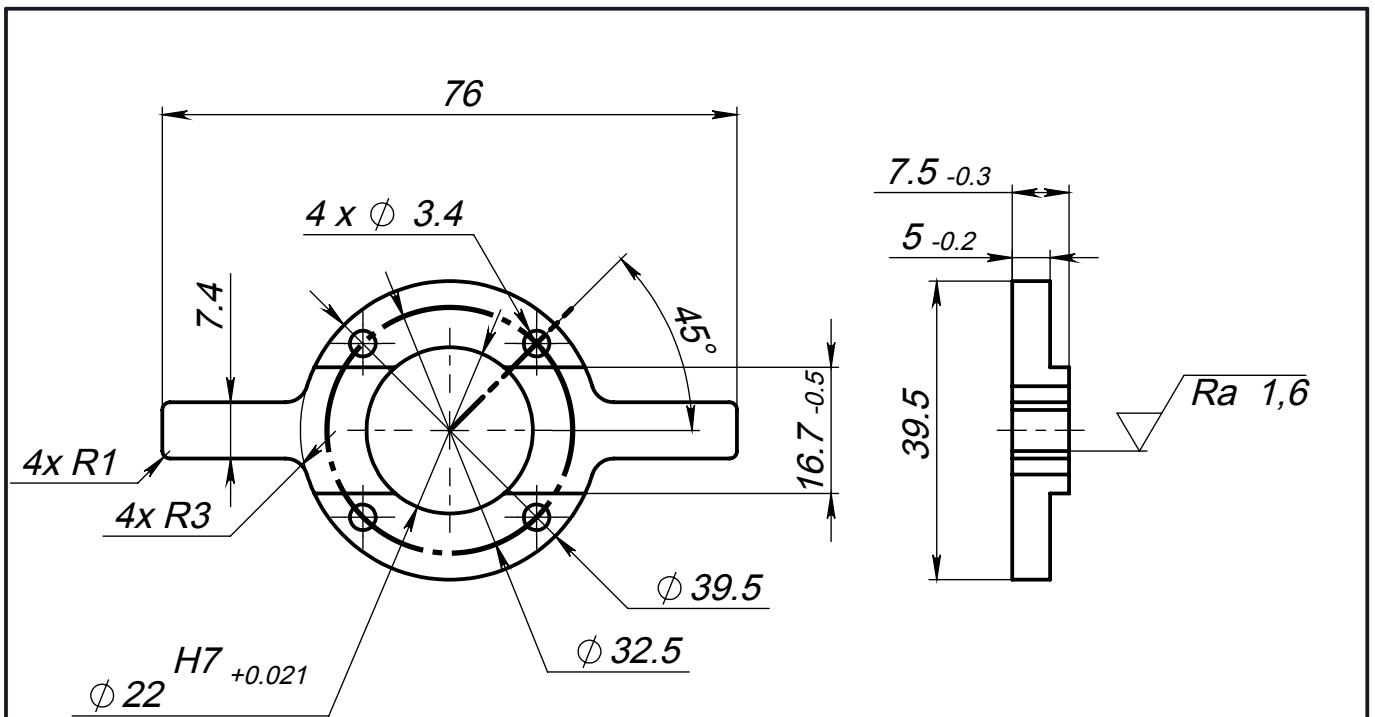
	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga Plastikas PET-G	Mastelis 1:1
Atsakinga žinyba TIK	Konsultantas	Dokumento tipas Detalės brėžinys	Dokumento statusas Mokomasis	
Savininkas KTU	Rengė A. Karaliūnas	Antraštė Aukščio kompensatorius	MAG 001-013	
	Tvirtino A. Federavičius		Laida A	Data 5/29/2019



1. *Nenurodytos matmenų ribinės nuokrypos pagal LST EN 22768 - c.*
2. *Nenurodyti suapvalinimo spinduliai $R=1,0$ mm.*
3. *Numatyta, jog detalė bus gaminama naudojant 3D spausdinimo technologiją.*

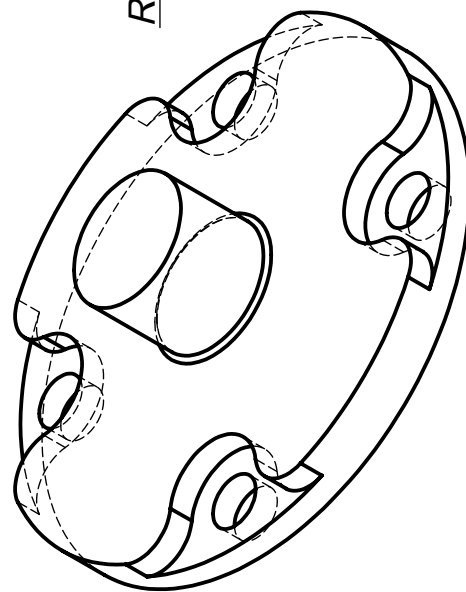
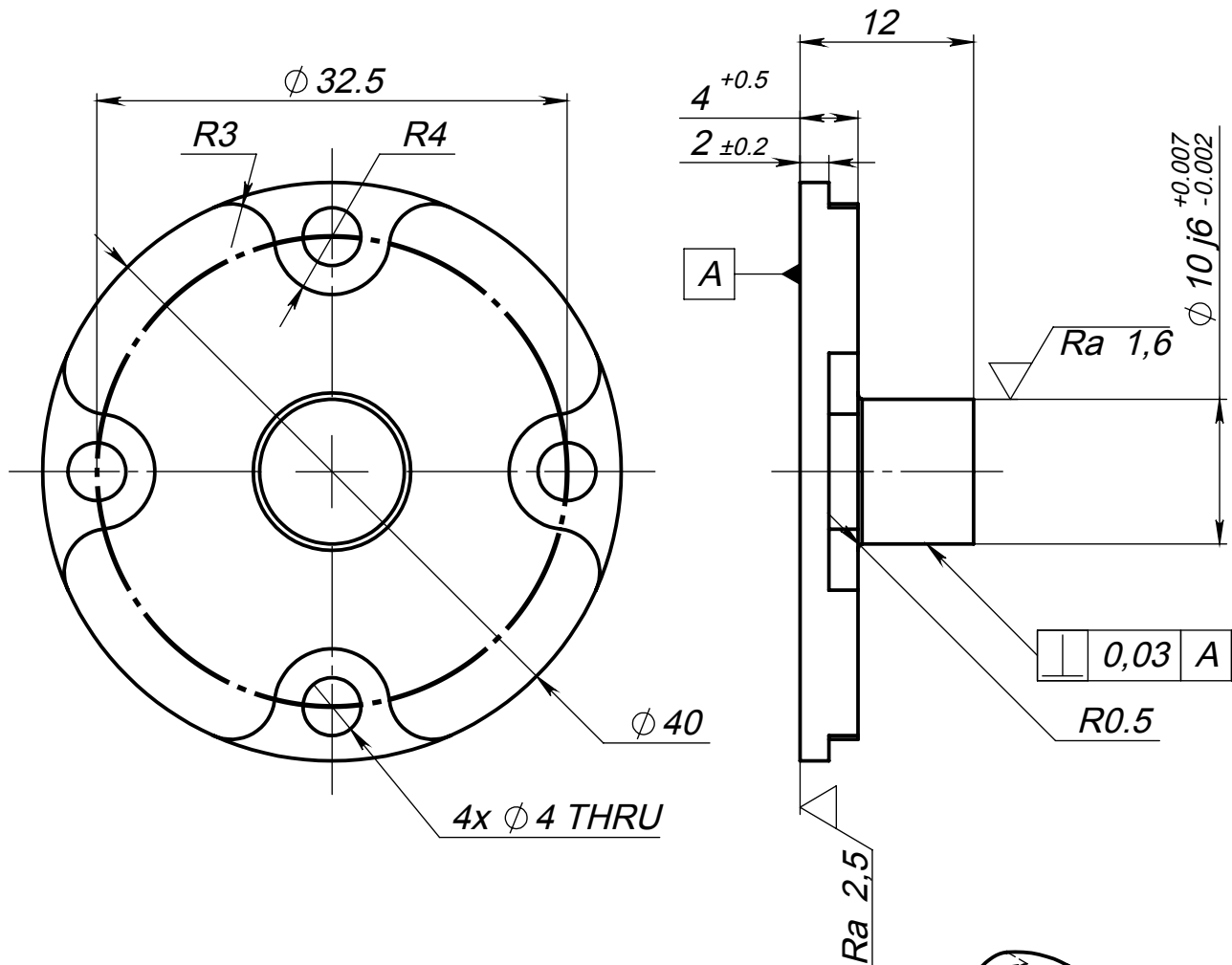
$\sqrt{Ra\ 12,5}$ (✓)

	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga <i>Plastikas PET-G</i>	Mastelis <i>5:1</i>
Atsakinga žinyba TIK	Konsultantas	Dokumento tipas <i>Detalės brėžinys</i>	Dokumento statusas <i>Mokomasis</i>	
Savininkas KTU	Rengė <i>A. Karaliūnas</i>	Antraštė Tarpinė	MAG 001-014	
	Tvirtino <i>A. Federavičius</i>			
			Kalba <i>lt.</i>	Lapas <i>1/1</i>



1. Nenurodytos matmenų ribinės nuokrypos pagal LST EN 22768 - c.
2. Nenurodyti suapvalinimo spinduliai $R=1,0$ mm.

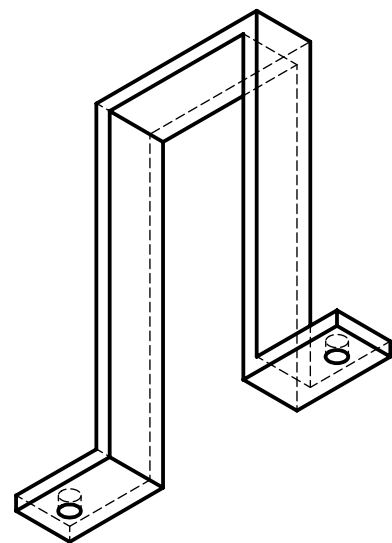
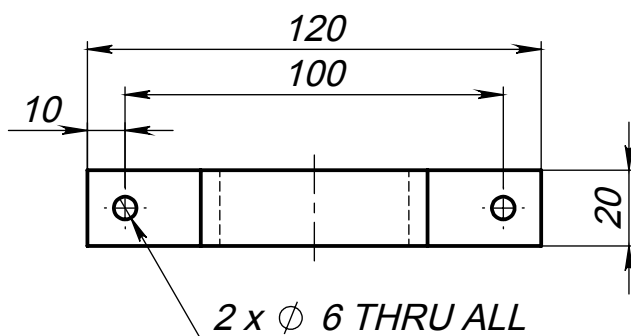
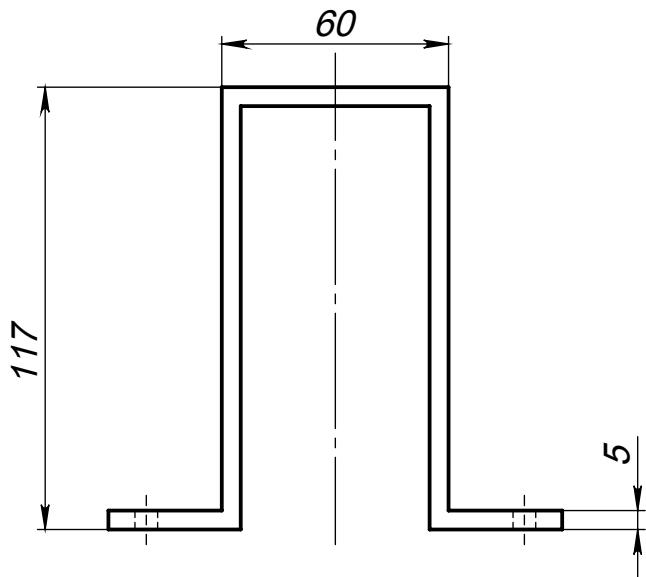
	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga <i>Plienas S355JR LST EN 10083-1</i>	Mastelis <i>1:1</i>
Atsakinga žinyba TIK	Konsultantas	Dokumento tipas <i>Detalės brėžinys</i>	Dokumento statusas <i>Mokomasis</i>	
Savininkas KTU	Rengė <i>A. Karaliūnas</i>	Antraštė Flanšas	MAG 001-015	
	Tvirtino <i>A. Federavičius</i>			
			Kalba <i>lt.</i>	Lapas <i>1/1</i>



√ Ra 12,5 (✓)

1. *Nenurodytos matmenų ribinės nuokrypos pagal LST EN 22768 - c.*
2. *Nenurodyti suapvalinimo spinduliai R=1,0 mm.*

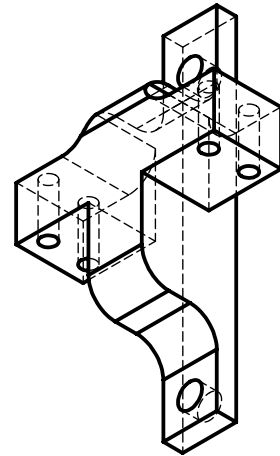
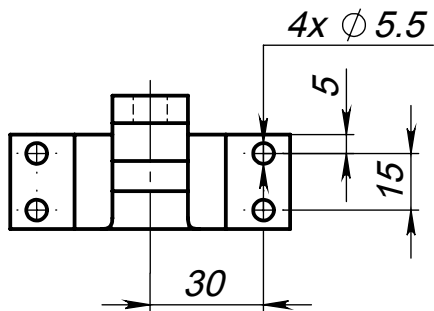
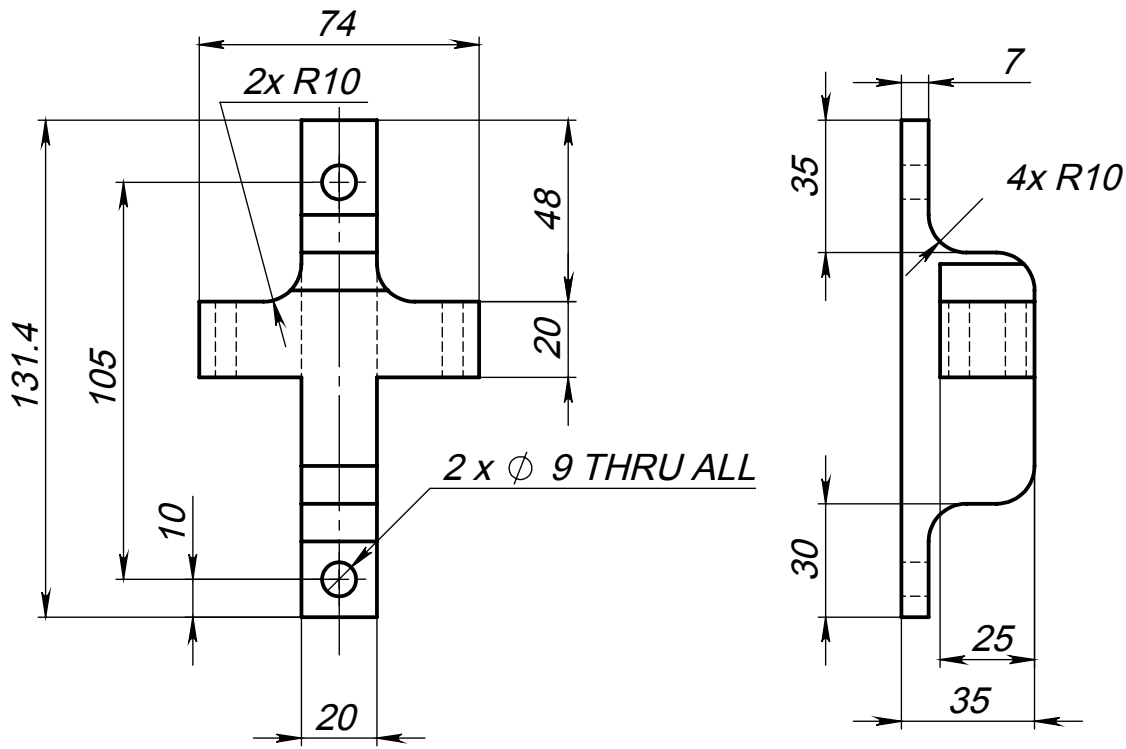
	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga <i>Plienas S355JR LST EN 10083-1</i>	Mastelis <i>2:1</i>
Atsakinga žinyba TIK	Konsultantas	Dokumento tipas <i>Detalės brėžinys</i>	Dokumento statusas <i>Mokomasis</i>	
Savininkas KTU	Rengė <i>A. Karaliūnas</i>	Antraštė Flanšas	MAG 001-016	
	Tvirtino <i>A. Federavičius</i>			
			Kalba <i>lt.</i>	Lapas <i>1/1</i>



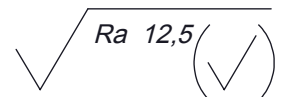
$\sqrt{Ra\ 12,5}$ (✓)

1. *Nenurodytos matmenų ribinės nuokrypos pagal LST EN 22768 - c.*
2. *Nenurodyti suapvalinimo spinduliai $R=1,0\text{ mm}$.*
3. *Numatyta, jog detalė bus gaminama naudojant 3D spausdinimo technologiją.*

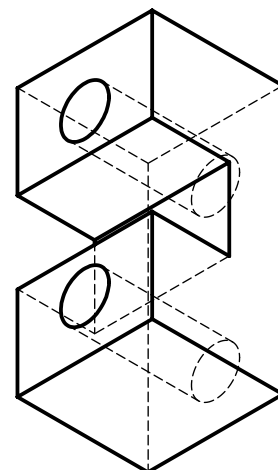
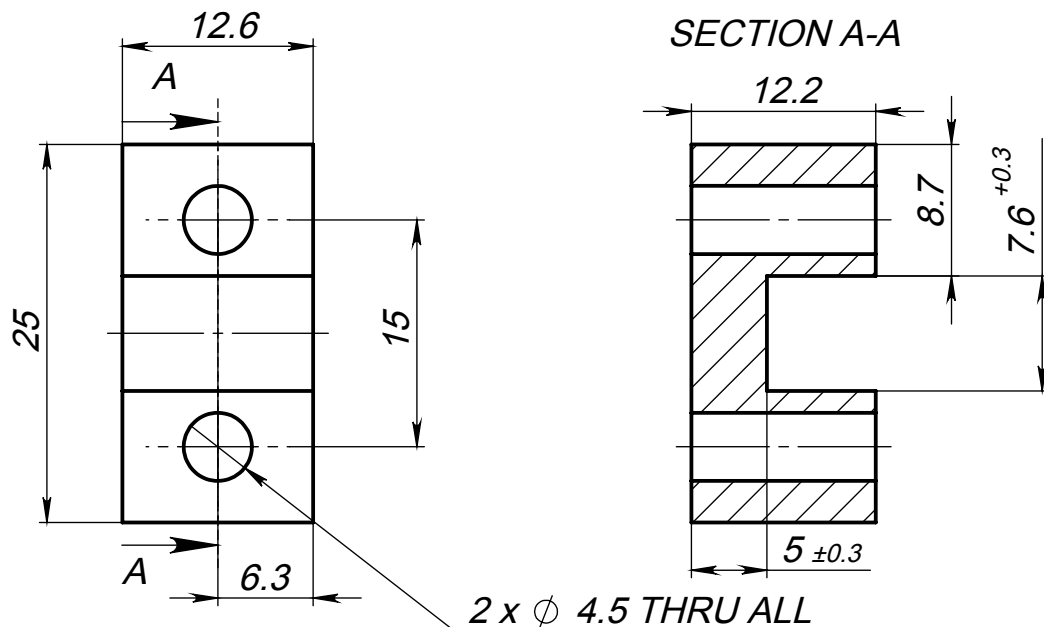
	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga <i>Plastikas PET-G</i>	Mastelis <i>1:2</i>
Atsakinga žinyba TIK	Konsultantas	Dokumento tipas <i>Detalės brėžinys</i>	Dokumento statusas <i>Mokomasis</i>	
Savininkas KTU	Rengė <i>A. Karaliūnas</i>	Antraštė Apsauga	MAG 001-017	
	Tvirtino <i>A. Federavičius</i>			
			Kalba <i>lt.</i>	Lapas <i>1/1</i>



1. *Nenurodytos matmenų ribinės nuokrypos pagal LST EN 22768 - c.*
2. *Nenurodyti suapvalinimo spinduliai R=1,0 mm.*
3. *Numatyta, jog detalė bus gaminama naudojant 3D spausdinimo technologiją.*

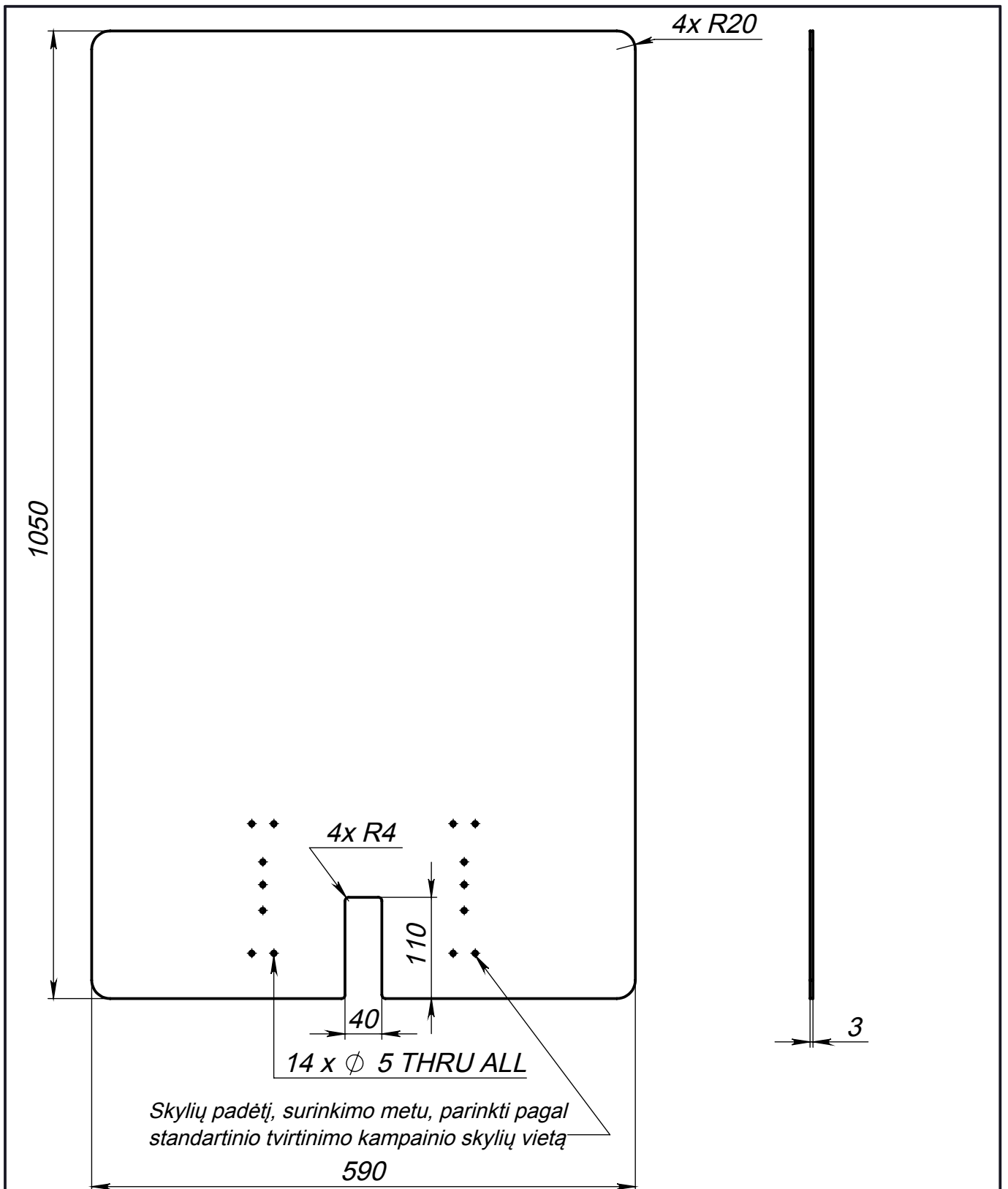


	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga <i>Plastikas PET-G</i>	Mastelis <i>1:2</i>
Atsakinga žinyba <i>TIK</i>	Konsultantas	Dokumento tipas <i>Detalės brėžinys</i>	Dokumento statusas <i>Mokomasis</i>	
Savininkas <i>KTU</i>	Rengė <i>A. Karaliūnas</i>	Antraštė <i>Laikiklis</i>	MAG 001-018	
	Tvirtino <i>A. Federavičius</i>			
			Kalba <i>lt.</i>	Lapas <i>1/1</i>



1. *Nenurodytos matmenų ribinės nuokrypos pagal LST EN 22768 - c.*
2. *Nenurodyti suapvalinimo spinduliai $R=1,0$ mm.*

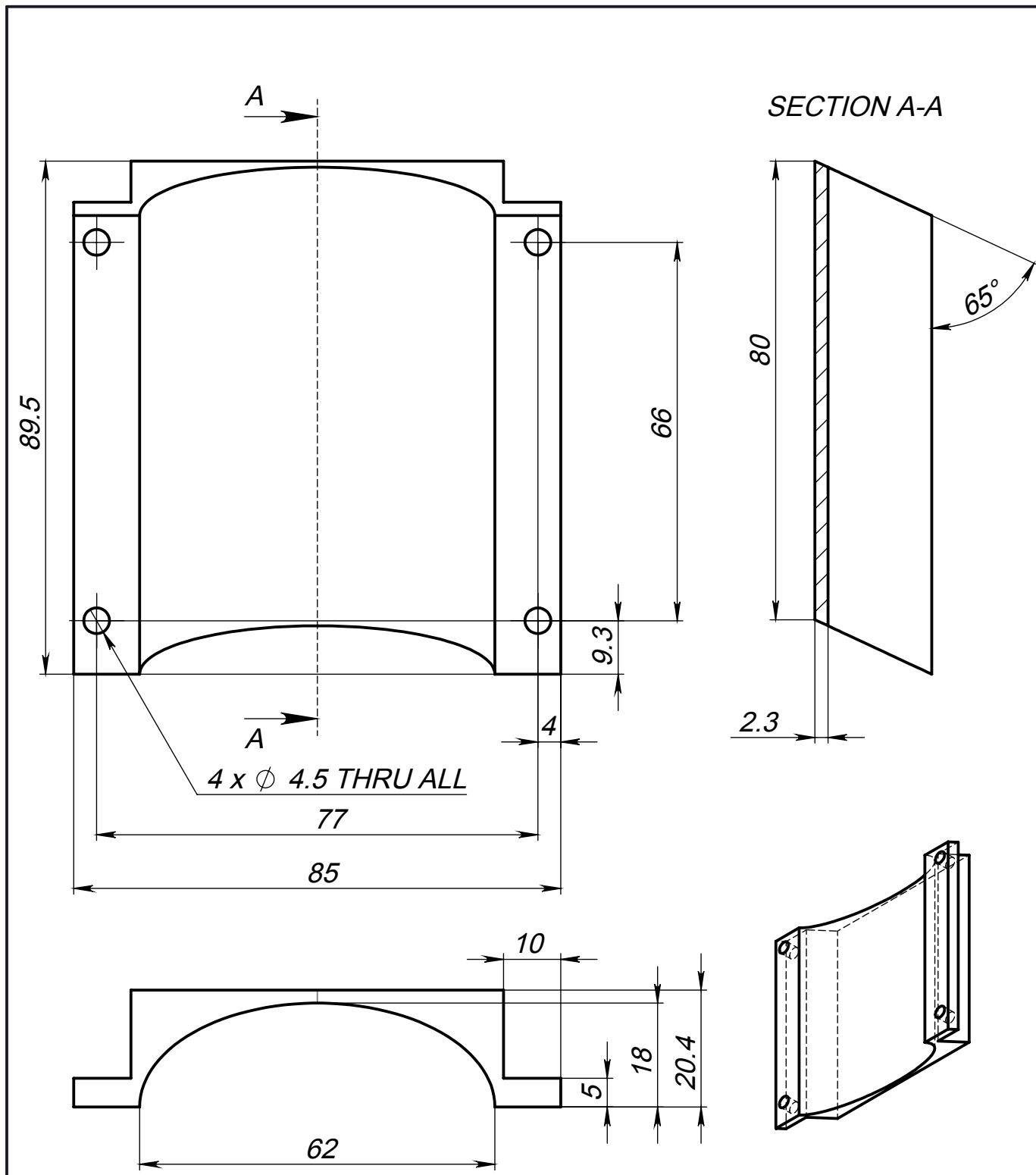
	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga <i>Plastikas PET-G</i>	Mastelis <i>2:1</i>
Atsakinga žinyba TIK	Konsultantas	Dokumento tipas <i>Detalės brėžinys</i>	Dokumento statusas <i>Mokomasis</i>	
Savininkas KTU	Rengė <i>A. Karaliūnas</i>	Antraštė Atraminis elementas	MAG 001-019	
	Tvirtino <i>A. Federavičius</i>			
			Kalba <i>lt.</i>	Lapas <i>1/1</i>



1. Nenurodytos matmenų ribinės nuokrypos pagal LST EN 22768 - c.
2. Nenurodyti suapvalinimo spinduliai $R=1,0$ mm.

$\sqrt{Ra\ 12,5}$ (✓)

	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga Organinis stiklas - AKRYLON POLYCASA	Mastelis 1:6
Atsakinga žinyba TIK	Konsultantas	Dokumento tipas Detalės brėžinys	Dokumento statusas Mokomasis	
Savininkas KTU	Rengė A. Karaliūnas	Antraštė Apsauginis stiklas	MAG 001-020	
	Tvirtino A. Federavičius		Laida A	Data 5/29/2019
			Kalba lt.	Lapas 1/1

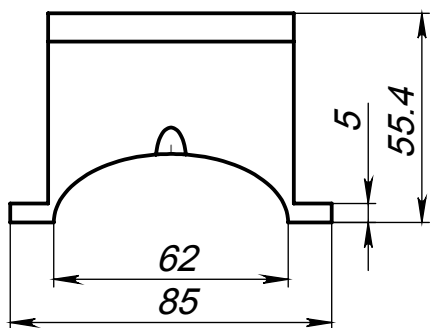
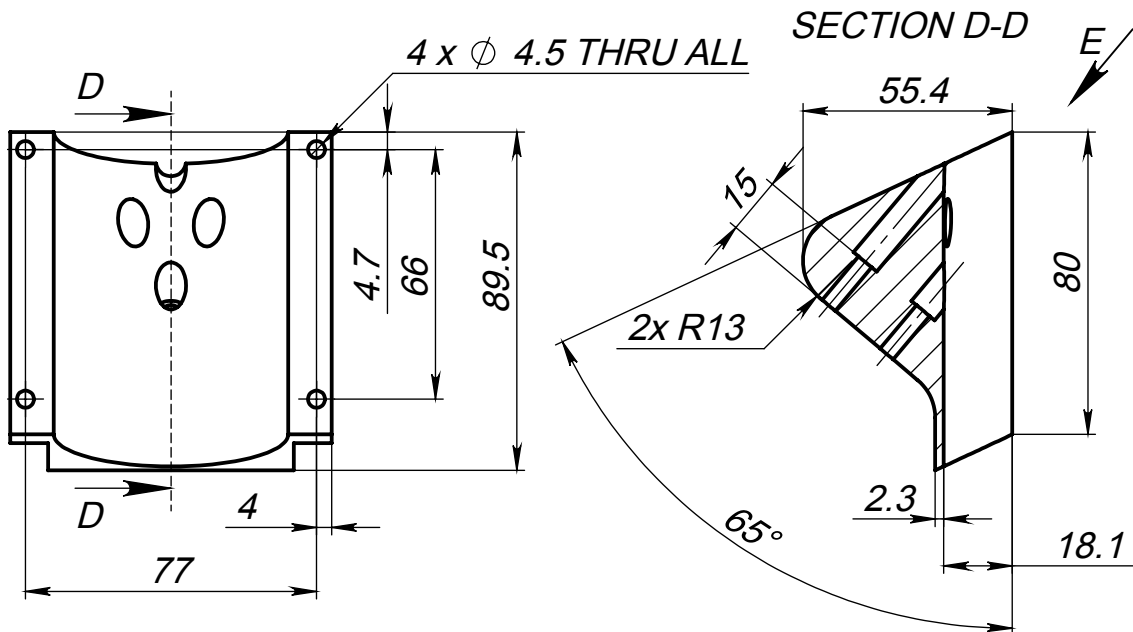


SECTION A-A

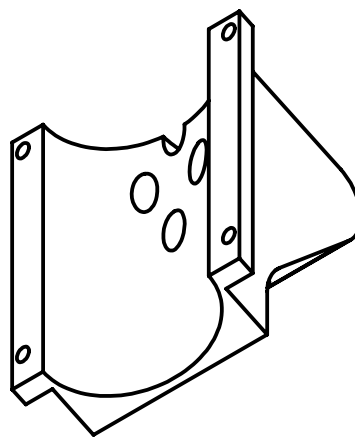
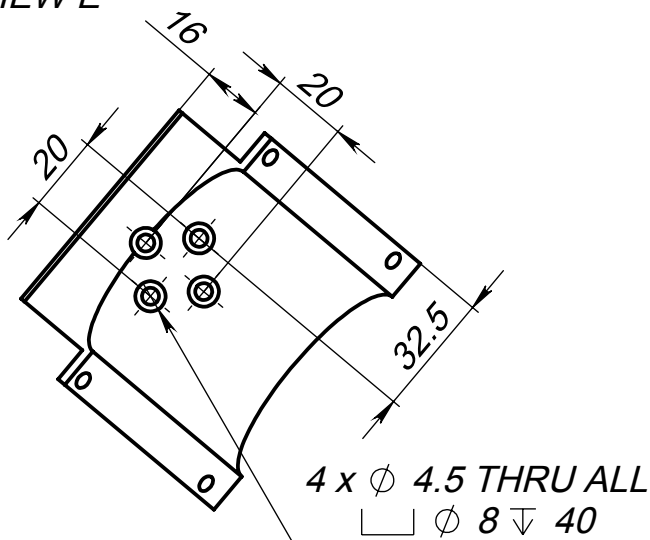
1. *Nenurodytos matmenų ribinės nuokrypos pagal LST EN 22768 - c.*
2. *Nenurodyti suapvalinimo spinduliai R=1,0 mm.*
3. *Numatyta, jog detalė bus gaminama naudojant 3D spausdinimo technologiją.*

√ Ra 12,5 (✓)

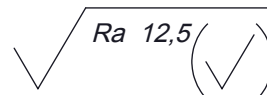
	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga <i>Plastikas PET-G</i>	Mastelis <i>1:1</i>
Atsakinga žinyba <i>TIK</i>	Konsultantas	Dokumento tipas <i>Detalės brėžinys</i>	Dokumento statusas <i>Mokomasis</i>	
Savininkas <i>KTU</i>	Rengė <i>A. Karaliūnas</i>	Antraštė <i>Dangtelis</i>	MAG 001-021	
	Tvirtino <i>A. Federavičius</i>			
			Kalba <i>lt.</i>	Lapas <i>1/1</i>



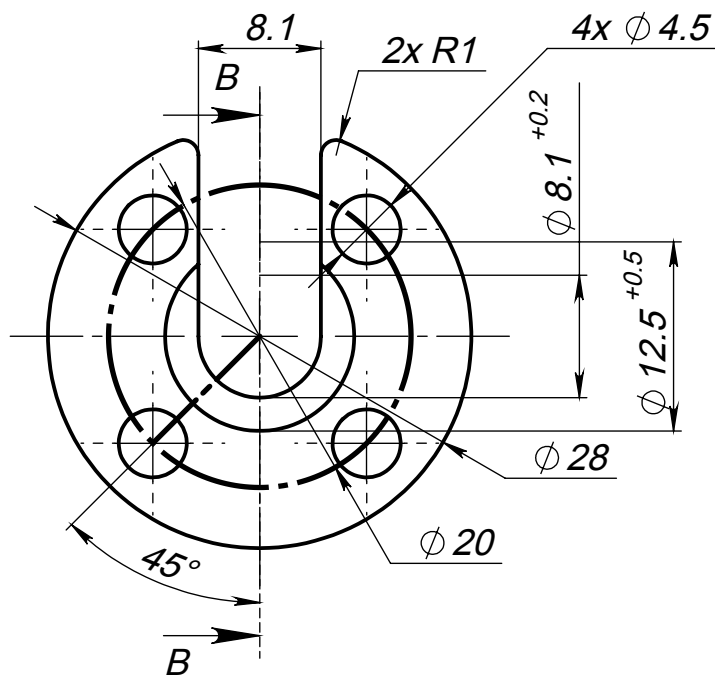
VIEW E



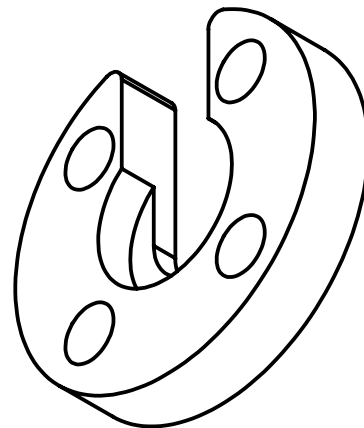
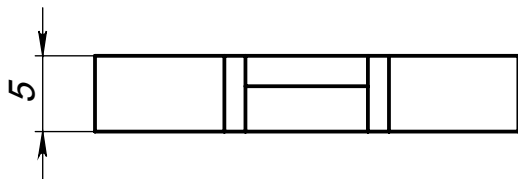
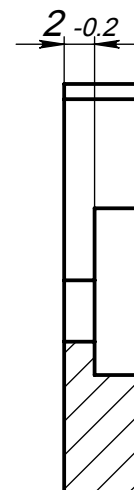
1. *Nenurodytos matmenų ribinės nuokrypos pagal LST EN 22768 - c.*
2. *Nenurodyti suapvalinimo spinduliai $R=1,0$ mm.*
3. *Numatyta, jog detalė bus gaminama naudojant 3D spausdinimo technologiją.*



	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga <i>Plastikas PET-G</i>	Mastelis <i>1:2</i>
Atsakinga žinyba <i>TIK</i>	Konsultantas	Dokumento tipas <i>Detalės brėžinys</i>	Dokumento statusas <i>Mokomasis</i>	
Savininkas <i>KTU</i>	Rengė <i>A. Karaliūnas</i>	Antraštė <i>Tachometro laikiklis</i>	MAG 001-022	
	Tvirtino <i>A. Federavičius</i>		Laida <i>A</i>	Data <i>5/29/2019</i>
			Kalba <i>lt.</i>	Lapas <i>1/1</i>



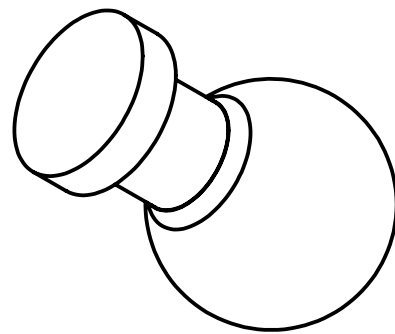
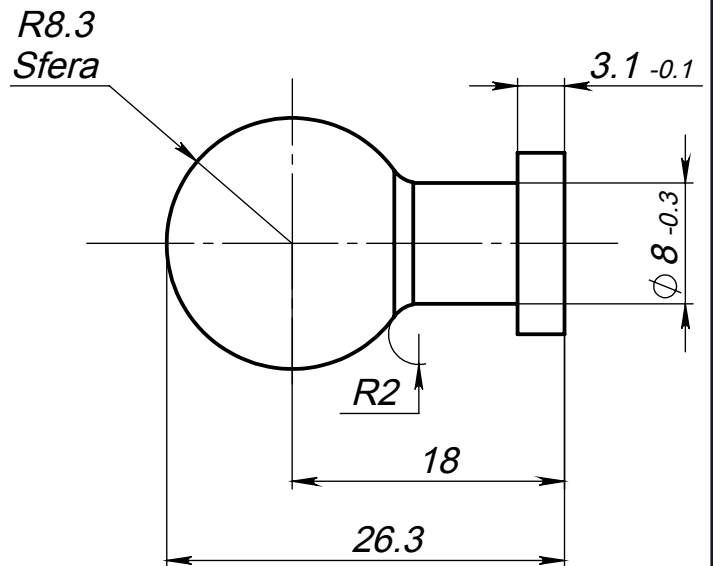
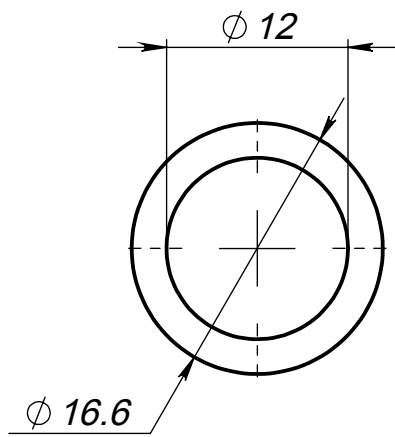
SECTION B-B



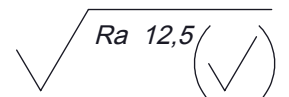
$\sqrt{Ra\ 12,5}$ (✓)

1. *Nenurodytos matmenų ribinės nuokrypos pagal LST EN 22768 - c.*
2. *Nenurodyti suapvalinimo spinduliai $R=1,0$ mm.*

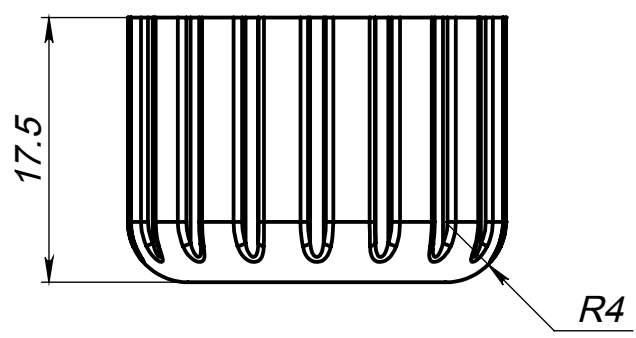
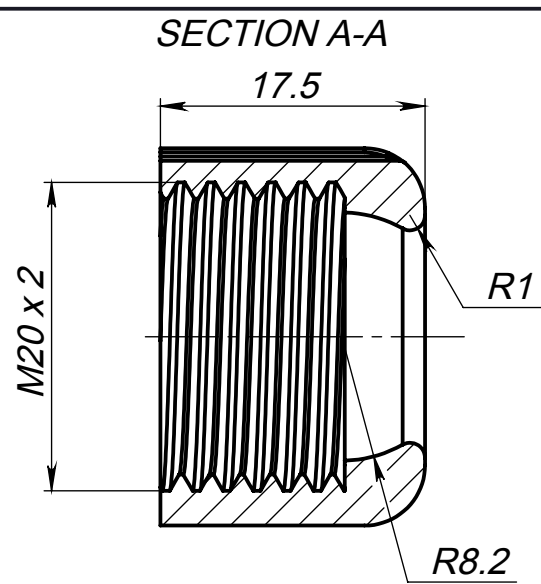
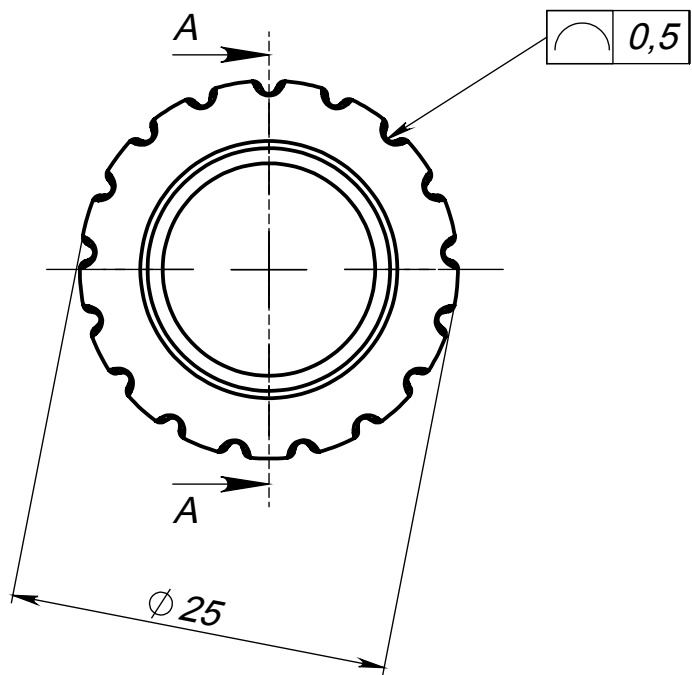
	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga <i>Plastikas PET-G</i>	Mastelis <i>2:1</i>
Atsakinga žinyba TIK	Konsultantas	Dokumento tipas <i>Detalės brėžinys</i>	Dokumento statusas <i>Mokomasis</i>	
Savininkas KTU	Rengė <i>A. Karaliūnas</i>	Antraštė Flanšas	MAG 001-023	
	Tvirtino <i>A. Federavičius</i>			
			Kalba <i>lt.</i>	Lapas <i>1/1</i>



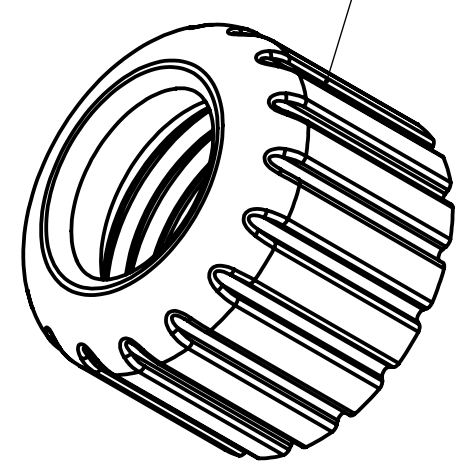
1. *Nenurodytos matmenų ribinės nuokrypos pagal LST EN 22768 - c.*
2. *Nenurodyti suapvalinimo spinduliai $R=1,0$ mm.*
3. *Numatyta, jog detalė bus gaminama naudojant 3D technologiją.*



	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga <i>Plastikas PET-G</i>	Mastelis <i>2:1</i>
Atsakinga žinyba TIK	Konsultantas	Dokumento tipas <i>Detalės brėžinys</i>	Dokumento statusas <i>Mokomasis</i>	
Savininkas KTU	Rengė <i>A. Karaliūnas</i>	Antraštė Pozicionavimo elementas	MAG 001-024	
	Tvirtino <i>A. Federavičius</i>		Laida <i>A</i>	Data <i>5/29/2019</i>
			Kalba <i>lt.</i>	Lapas <i>1/1</i>



Gaminti pagal 3D modelį

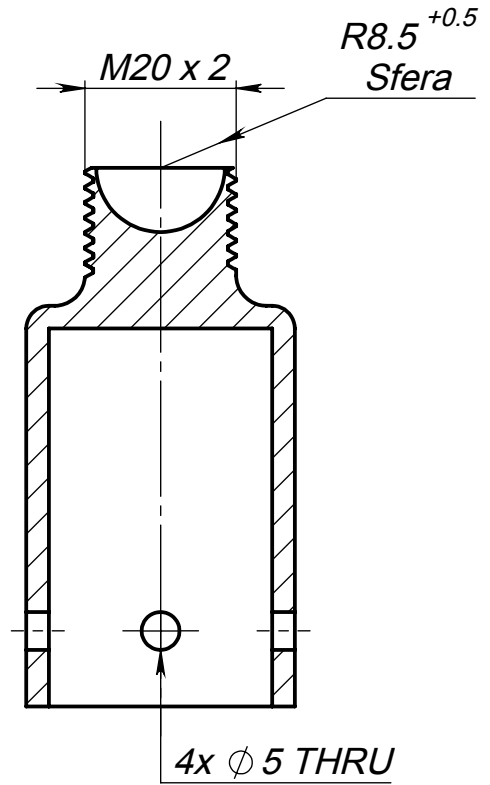
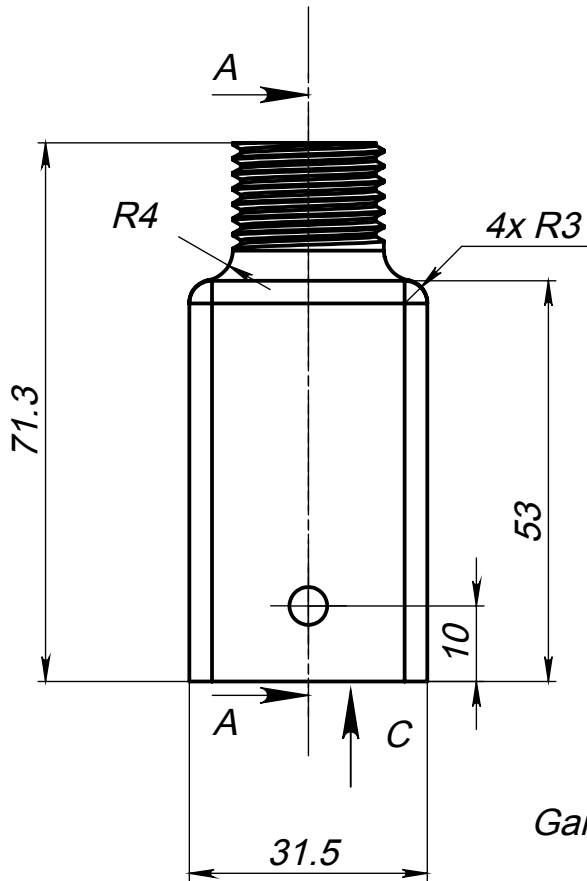


1. Nenurodytos matmenų ribinės nuokrypos pagal LST EN 22768 - c.
2. Nenurodyti suapvalinimo spinduliai $R=1,0$ mm.
3. Numatyta, jog detalė bus gaminama naudojant 3D spausdinimo technologiją.

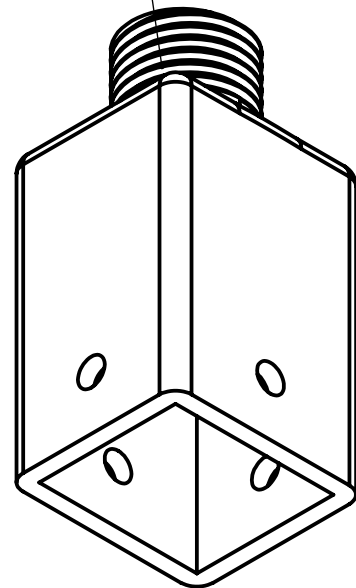
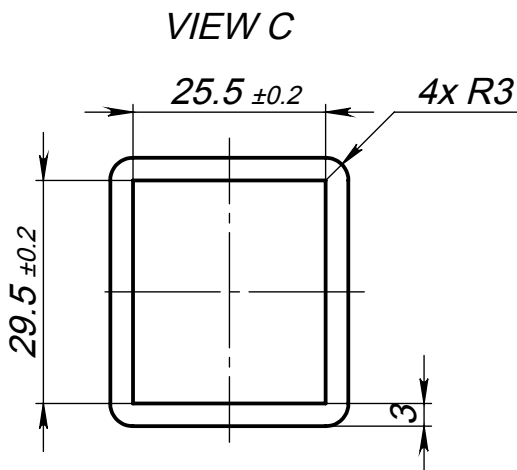
$\sqrt{Ra\ 12,5}$ (✓)

	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga <i>Plastikas PET-G</i>	Mastelis <i>2:1</i>
Atsakinga žinyba TIK	Konsultantas	Dokumento tipas <i>Detalės brėžinys</i>	Dokumento statusas <i>Mokomasis</i>	
Savininkas KTU	Rengė <i>A. Karaliūnas</i>	Antraštė Srieginis fiksatorius	MAG 001-025	
	Tvirtino <i>A. Federavičius</i>			
			Kalba <i>lt.</i>	Lapas <i>1/1</i>

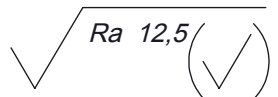
SECTION A-A



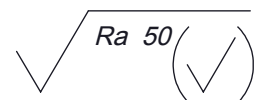
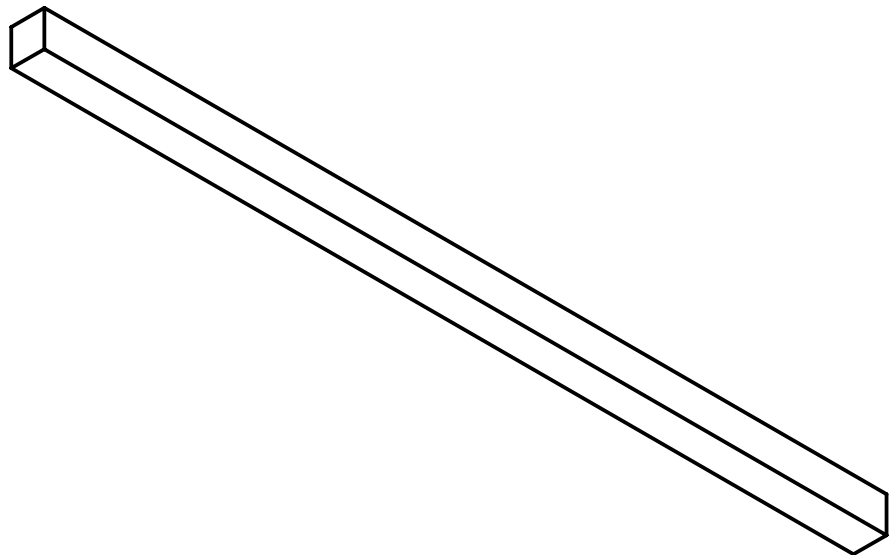
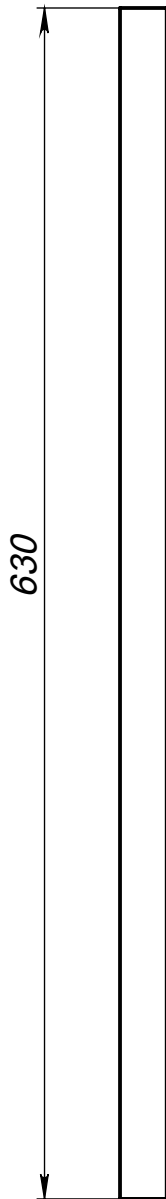
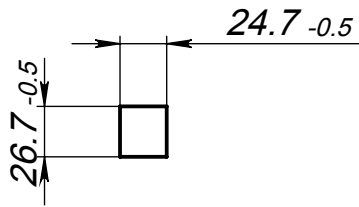
Gaminti pagal 3D modelį



1. *Nenurodytos matmenų ribinės nuokrypos pagal LST EN 22768 - c.*
2. *Nenurodyti suapvalinimo spinduliai R=1,0 mm.*
3. *Numatyta, jog detalė bus gaminama naudojant 3D spausdinimo technologiją.*

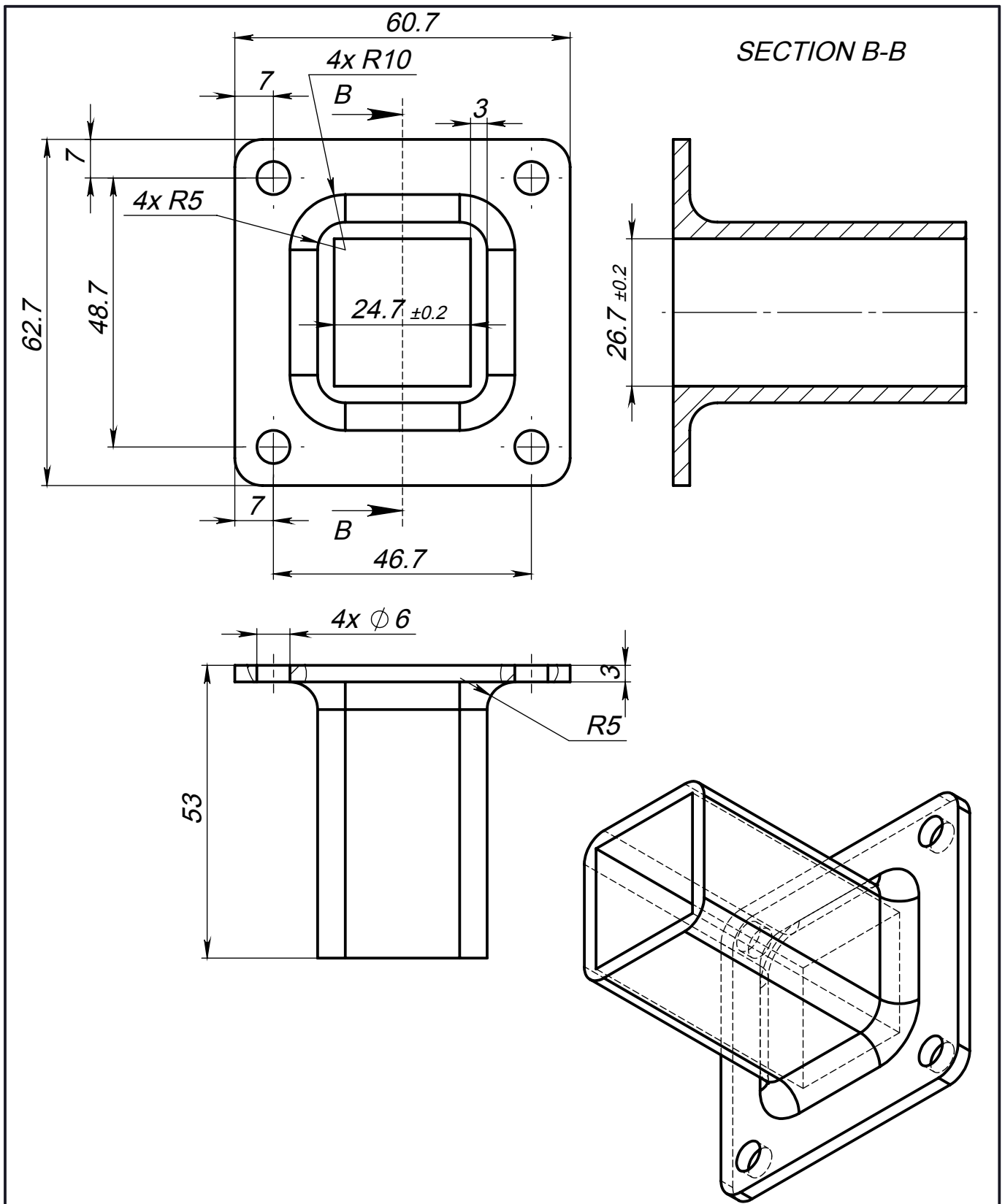


	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga <i>Plastikas PET-G</i>	Mastelis <i>1:1</i>
Atsakinga žinyba TIK	Konsultantas	Dokumento tipas <i>Detalės brėžinys</i>	Dokumento statusas <i>Mokomasis</i>	
Savininkas KTU	Rengė <i>A. Karaliūnas</i>	Antraštė Laikiklis	MAG 001-026	
	Tvirtino <i>A. Federavičius</i>			
			Kalba <i>lt.</i>	Lapas <i>1/1</i>



1. *Nenurodytos matmenų ribinės nuokrypos pagal LST EN 22768 - c.*
2. *Nenurodyti suapvalinimo spinduliai $R=1,0$ mm.*

	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga <i>Medis (tipas nesvarbus)</i>	Mastelis <i>1:4</i>
Atsakinga žinyba TIK	Konsultantas	Dokumento tipas <i>Detalės brėžinys</i>	Dokumento statusas <i>Mokomasis</i>	
Savininkas KTU	Rengė <i>A. Karaliūnas</i>	Antraštė Medinis profilis	MAG 001-027	
	Tvirtino <i>A. Federavičius</i>		Laida <i>A</i>	Data <i>5/29/2019</i>
			Kalba <i>lt.</i>	Lapas <i>1/1</i>



SECTION B-B

1. *Nenurodytos matmenų ribinės nuokrypos pagal LST EN 22768 - c.*
2. *Nenurodyti suapvalinimo spinduliai R=1,0 mm.*
3. *Numatyta, jog detalė bus gaminama naudojant 3D spausdinimo technologiją*

√ Ra 12,5 (✓)

	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga <i>Plastikas PET-G</i>	Mastelis <i>1:1</i>
Atsakinga žinyba <i>TIK</i>	Konsultantas	Dokumento tipas <i>Detalės brėžinys</i>	Dokumento statusas <i>Mokomasis</i>	
Savininkas <i>KTU</i>	Rengė <i>A. Karaliūnas</i>	Antraštė <i>Laikiklis</i>	MAG 001-028	
	Tvirtino <i>A. Federavičius</i>			
			Kalba <i>lt.</i>	Lapas <i>1/1</i>

4 PRIEDAS. Pirmasis, prototipinis, horizontalaus matavimo stendo bandymas.

Pirmasis, prototipinis, horizontalaus matavimo stendo bandymas. [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: <https://www.youtube.com/watch?v=5KVAjTWuAuM>

5 PRIEDAS. Variklio valdymo programa („Arduino“ sistemoje).

Variklio valdymo programa („Arduino“ sistemoje).

```
#include <Servo.h> //accesses the Arduino Servo Library
#include <SPI.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>
#define OLED_RESET 4
Adafruit_SSD1306 display(OLED_RESET);
#define NUMFLAKES 10
#define XPOS 0
#define YPOS 1
#define DELTAY 2
#define LOGO16_GLCD_HEIGHT 16
#define LOGO16_GLCD_WIDTH 16
static const unsigned char PROGMEM logo16_glcd_bmp[] =
{
  B00000000, B11000000,
  B00000001, B11000000,
  B00000001, B11000000,
  B00000011, B11100000,
  B11110011, B11100000,
  B11111110, B11111000,
  B01111110, B11111111,
  B00110011, B10011111,
  B00011111, B11111100,
  B00001101, B01110000,
  B00011011, B10100000,
  B00111111, B11100000,
  B00111111, B11110000,
  B01111100, B11110000,
  B01110000, B01110000,
  B00000000, B00110000
}
;
#if (SSD1306_LCDHEIGHT != 64)
#error("Height incorrect, please fix Adafruit_SSD1306.h!");
#endif
//-----code for RPM-----
// Variables will change:
Servo myservo; // creates servo object to control a servo
int val = 10; // variable to read the value from the analog pin
int valold = 0;
const int potPin = A0;
long timeold = 0;
int greitis = 10000 ;// nurodomas norimas sukimosi greitis
void setup() {
  myservo.attach(9);
  Serial.begin(9600);
  display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C);
  updateDisplayMsg("Preparing.");
  do
  {
    myservo.writeMicroseconds(700);
    // val = 800;
  }
  while (millis() <= 5000);
  updateDisplayMsg("Prepared!");
  Serial.println("Prepare completed!");
}
void loop() {
  long duration = millis() - timeold;
  if ( duration >= 1000) {
```

```

    val = analogRead(A0);
    timeold = millis();
    int motorVal = 700 + (val / 1) ;
    if (motorVal != valold) {
        valold = motorVal;
        myservo.writeMicroseconds(motorVal);
        Serial.println(motorVal);
    }

    updateDisplay(motorVal);
}

//Dont burn CPU
delay(1);
}
int valLen;
int displayWidth = 128;
int letterWidth = 18;
void updateDisplay(int rpm) {
    //—————update display—————
    display.clearDisplay();
    // text display tests
    display.setTextSize(1);
    display.setTextColor(WHITE);
    display.setCursor(30, 0);
    display.println("CircuitMagic");
    display.setTextColor(BLACK, WHITE);
    // 'inverted' text
    //display.println(3.141592);
    display.setTextSize(2);
    display.setTextColor(WHITE);
    display.setCursor(45, 20);
    display.println("Speed");
    display.setCursor((displayWidth / 2) - (letterWidth / 2 * valLen), 42);
    display.setTextSize(2);
    display.println(rpm);
    // display.println(0xDEADBEEF, HEX);
    display.display();
    //—————
}
void updateDisplayMsg(char msg[ ]) {
    display.clearDisplay();
    // text display tests
    display.setTextSize(1);
    display.setTextColor(WHITE);
    display.setCursor(30, 0);
    display.println("CircuitMagic");
    display.setTextColor(BLACK, WHITE);
    // 'inverted' text
    //display.println(3.141592);
    display.setTextSize(2);
    display.setTextColor(WHITE);
    display.setCursor(45, 20);
    display.println("Speed");
    display.setCursor((displayWidth / 2) - (letterWidth / 2 * valLen), 42);
    display.setTextSize(1);
    display.println(msg);
    // display.println(0xDEADBEEF, HEX);
    display.display();
}

```

6 PRIEDAS. Sukimo momento matavimui naudota programa („Arduino“ sistemoje).

Sukimo momento matavimui naudota programa („Arduino“ sistemoje).

```
#include "HX711.h"

HX711 cell (7,8);

void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

long val=0;
float count=0;

void loop(){
  count=count+1;

  //val=((count-1)/count)*val+(1/count)*cell.read();
  //val=0.5*val + 0.5*cell.read();

  val=cell.read();

  //Serial.println(val+142030);
  Serial.println((val+142030) / 873.40f);

  //Serial.println(val);

  //-----

  //zero -142030 ---> naudota kalibravimui
  //zero2=183480 ---> naudota kalibravimui
  //13101-15g arba 87340 - 100g ----> ----> naudota kalibravimui

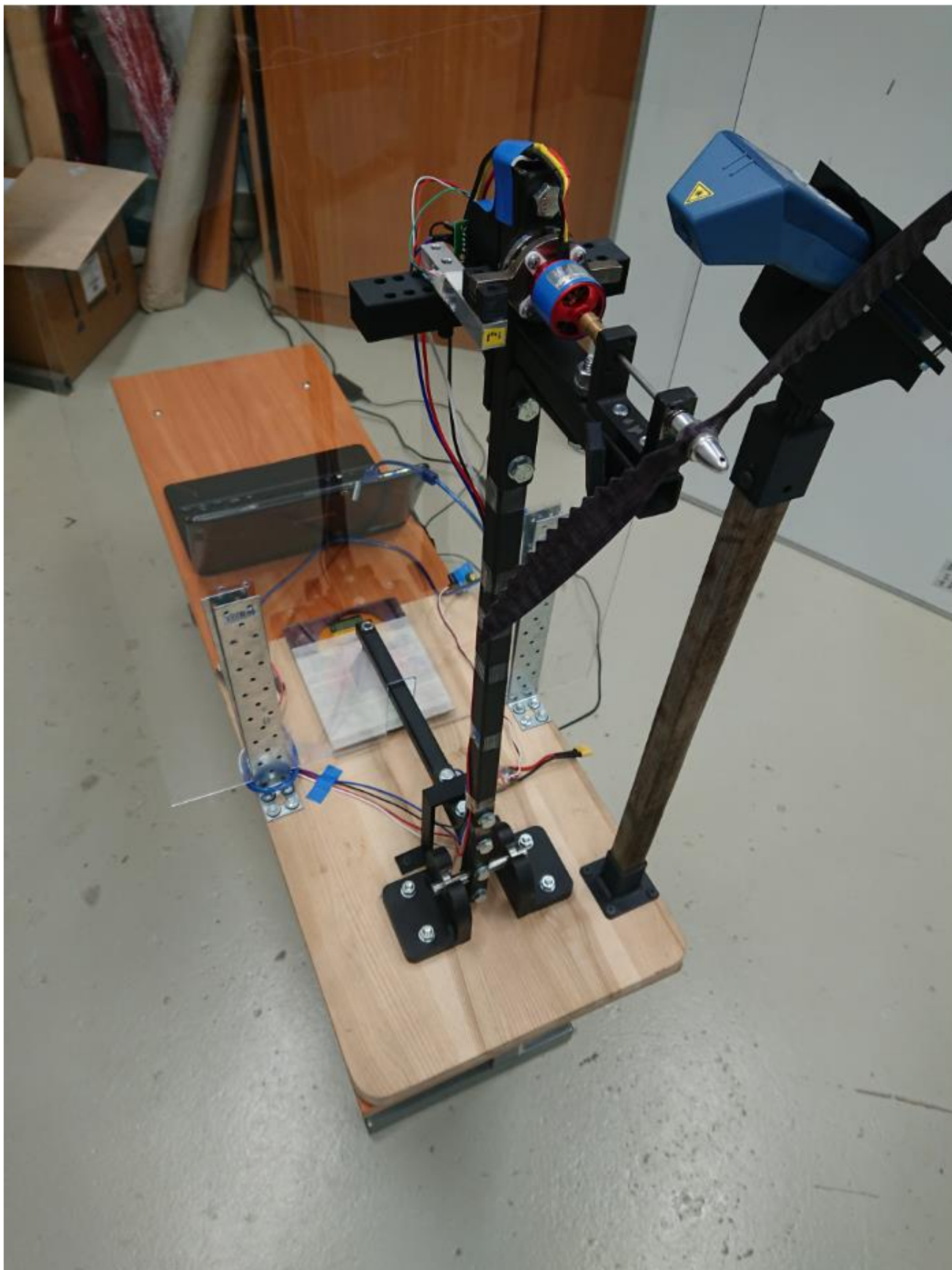
  //-----

  //https://www.youtube.com/watch?v=nGUpzwEa4vg ---> vaizdo medžiaga, kurioje nurodoma kaip
  atlikti kalibraciją.

  //-----

}
```

7 PRIEDAS. Pilnai surinkto horizontalaus matavimo stendo nuotrauka.



8 PRIEDAS. PLA plastiko sertifikatas su nurodytomis mechaninėmis ir fizikinėmis charakteristikomis.

TECHNICAL DATA SHEET

Prusament PLA by Prusa Polymers



PLA is the most commonly used filament. It's biodegradable, easy to print, and very strong. The perfect choice for printing large objects thanks to its low thermal expansion (little to no warping) and for printing tiny parts because of its low melting temperature.

APPLICATIONS:

Concept models, functional prototypes, low-wear toys, etc.

NOT SUITABLE FOR:

Long term outdoor usage because of low temperature resistance (up to 60 °C).

POST-PROCESSING:

Wet sanding. Without water you'll quickly start heating the plastic by friction, it will melt locally and make it hard to keep sanding.

IDENTIFICATION:

Trade name	Prusament PLA
Chemical name	Polylactic Acid
Usage	FDM 3D printing
Manufacturer	Prusa Polymers, Prague, Czech Republic

RECOMMENDED PRINT SETTINGS:

Nozzle Temperature [°C]	210 ± 10
Heatbed Temperature [°C]	40-60
Print Speed [mm/s]	up to 200

TYPICAL MATERIAL PROPERTIES:

Physical Properties	Typical Value	Method
Peak Melt Temperature [°C]	145-160	ISO 11357
Glass Transition Temperature [°C]	55-60	ISO 11357
MFR [g/10min] ⁽¹⁾	10.4	ISO 1133
MVR [cm ³ /10min] ⁽¹⁾	9.4	ISO 1133
Specific Gravity [g/cm ³]	1.24	ISO 1183
Moisture Absorption 24 hours [%] ⁽²⁾	0.3	Prusa Polymers
Moisture Absorption 7 days [%] ⁽²⁾	0.3	Prusa Polymers
Moisture Absorption 4 weeks [%] ⁽²⁾	0.3	Prusa Polymers
Heat Deflection Temperature (0,45 MPa) [°C]	55	ISO 75
Tensile Yield Strength Filament [MPa]	57.4 ± 0.4	ISO 527-1

⁽¹⁾ 2,16 kg; 210 °C | ⁽²⁾ 28 °C; humidity 37 %

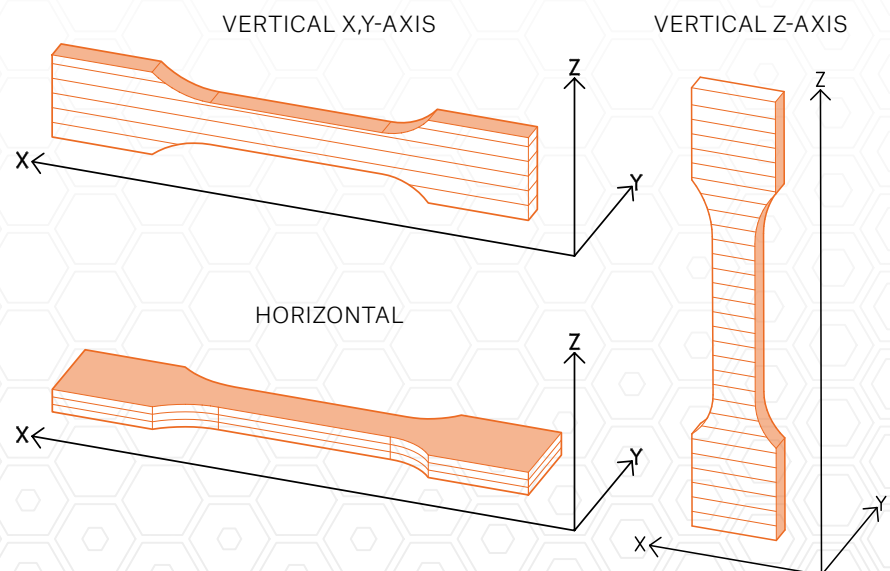
MECHANICAL PROPERTIES OF PRINTED TESTING SPECIMENS⁽³⁾:

Property / print direction	Horizontal	Vertical X,Y-Axis	Vertical Z-Axis	Method
Tensile Modulus [GPa]	2,2 ± 0,1	2,4 ± 0,1	2,3 ± 0,1	ISO 527-1
Tensile Yield Strength [MPa]	50,8 ± 2,4	59,3 ± 1,9	37,6 ± 4,0	ISO 527-1
Elongation at Yield Point [%]	2,9 ± 0,3	3,2 ± 0,1	1,9 ± 0,3	ISO 527-1
Impact Strength Charpy ⁽⁴⁾ [kJ/m ²]	12,7 ± 0,7	13,7 ± 0,7	5,0 ± 1,4	ISO 179-1

⁽³⁾ Original Prusa i3 MK3 3D printer was used to print testing specimens. Slic3r Prusa Edition 1.40.0 was used to create G-codes with following settings: Prusa PLA Filament; Print settings 0,20mm FAST (layers 0,2mm); solid layers Top: 0 Bottom: 0; Infill 100% Rectilinear, infill print speed 200mm/s; extruder temperature 215°C all layers; bed temperature 60°C all layers; other parameters set to default | ⁽⁴⁾ Charpy Unnotched, edgewise direction of blow according to ISO 179-1

DISCLAIMER

The results presented in this data sheet are just for your information and comparison. Values are significantly dependent on print settings, operators experiences and surrounding conditions. Everyone have to consider suitability and possible consequences of printed parts usage. Prusa Polymers can not carry any responsibility for injures or any loss caused by using of Prusa Polymers material.



9 PRIEDAS. PETG plastiko sertifikatas su nurodytomis mechaninėmis ir fizikinėmis charakteristikomis.

TECHNICAL DATA SHEET

Prusament PETG by Prusa Polymers



PETG is one of the most commonly used filaments. It is an excellent choice for printing mechanically stressed parts. Compared to PLA, it is more heat resistant, more flexible and less brittle.

APPLICATIONS:

The typical use of PETG is printing functional and mechanical parts. Thanks to good layer adhesion it is also suitable for waterproof prints.

NOT SUITABLE FOR:

Not suitable for tiny parts

POST-PROCESSING:

When post-processing PETG, it's possible to use both dry and wet sanding.

IDENTIFICATION:

Trade name	Prusament PETG
Chemical name	Copolyester
Usage	FDM 3D printing
Diameter	1.75 ± 0.02 mm
Manufacturer	Prusa Polymers, Prague, Czech Republic

RECOMMENDED PRINT SETTINGS:

Nozzle Temperature [°C]	250 ± 10
Heatbed Temperature [°C]	80 ± 10
Print Speed [mm/s]	up to 200

TYPICAL MATERIAL PROPERTIES:

Physical Properties	Typical Value	Method
Specific Gravity [g/cm ³]	1.27	ISO 1183
Moisture Absorption 24 hours [%] ⁽¹⁾	0.2	Prusa Polymers
Moisture Absorption 7 days [%] ⁽¹⁾	0.3	Prusa Polymers
Moisture Absorption 4 weeks [%] ⁽¹⁾	0.3	Prusa Polymers
Heat Deflection Temperature (0,45 MPa) [°C]	68	ISO 75
Tensile Yield Strength Filament [MPa]	46 ± 1	ISO 527

⁽¹⁾ 30 °C; humidity 30 %

MECHANICAL PROPERTIES OF PRINTED TESTING SPECIMENS⁽²⁾:

Property / print direction	Horizontal	Vertical X,Y-Axis	Vertical Z-Axis	Method
Tensile Yield Strength [MPa]	47 ± 2	50 ± 1	30 ± 5	ISO 527-1
Tensile Modulus [GPa]	1.5 ± 0.1	1.5 ± 0.1	1.4 ± 0.1	ISO 527-1
Elongation at Yield Point [%]	5.1 ± 0.1	5.1 ± 0.1	2.5 ± 0.5	ISO 527-1
Impact Strength Charpy ⁽³⁾ [kJ/m ²]	NB(C) ⁽⁴⁾	NB ⁽⁴⁾	5 ± 1	ISO 179-1

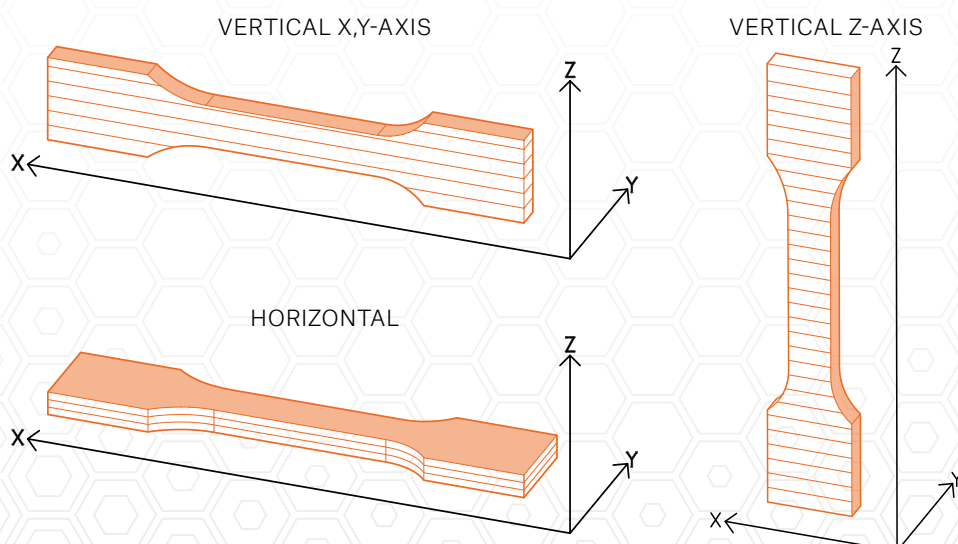
⁽²⁾ Original Prusa i3 MK3 3D printer was used to make testing specimens. Slic3r Prusa Edition 1.40.0 was used to create G-codes with following settings: Prusa PETG Filament; Print settings 0,20mm FAST (layers 0,2mm); solid layers Top:0 Bottom:0; Infill 100% Rectilinear, infill print speed 100mm/s; extrusion multiplier 1.07; extruder temperature 260°C all layers; bed temperature 90°C all layers; other parameters set default

⁽³⁾ Charpy unnotched - Edgewise direction of blow according to ISO 179-1

⁽⁴⁾ NB (no break); C (complete break) in brackets second most frequent type of failure > 1/3

DISCLAIMER

The results presented in this data sheet are just for your information and comparison. Values are significantly dependent on print settings, operators experiences and surrounding conditions. Everyone have to consider suitability and possible consequences of printed parts usage. Prusa Polymers can not carry any responsibility for injures or any loss caused by using of Prusa Polymers material.



10 PRIEDAS. Standumo įtakos propelerio traukos savybėms tyrimo rezultatai.

Eil. Nr.	Propeleris	Svarstyklių rodmenys, g	Jėgos jutiklio rodmenys, g	Tachometro rodmenys w, aps/min	Propelerio traukos jėga T, N	Propelerio sukimo momentas Q, N/m	Propelerio naudingumo koef.
1	Propeleris pagamintas naudojant PLA plastiką	295.00	110.00	5050.00	1.3848	0.03	0.263929466
		440.00	160.00	6050.00	2.0654	0.05	0.275894203
		592.00	207.00	7000.00	2.7790	0.06	0.287642525
		792.00	260.00	8000.00	3.7178	0.08	0.310072575
		1010.00	330.00	9050.00	4.7411	0.10	0.310998619
		1240.00	400.00	10000.00	5.8208	0.12	0.315872236
		1500.00	460.00	11050.00	7.0413	0.14	0.330716374
		1800.00	575.00	12300.00	8.4496	0.17	0.312445821
		2050.00	660.00	13100.00	9.6231	0.19	0.310637926
2	Propeleris pagamintas naudojant PLA plastiką	297.00	105.00	5050.00	1.3942	0.0309	0.279314136
		436.00	152.00	6050.00	2.0467	0.0447	0.286463761
		590.00	201.00	7060.00	2.7696	0.0591	0.292224199
		780.00	255.00	8050.00	3.6615	0.0750	0.307075213
		1025.00	324.00	9100.00	4.8116	0.0953	0.322061131
		1225.00	400.00	10030.00	5.7504	0.1176	0.309230361
		1480.00	470.00	11000.00	6.9474	0.1382	0.318669830
		1800.00	560.00	12000.00	8.4496	0.1646	0.328835278
		2060.00	645.00	13000.00	9.6701	0.1896	0.322653724
3	Propeleris pagamintas naudojant PLA plastiką	297.00	100.00	5000.00	1.3942	0.0294	0.296212641
		437.00	150.00	6000.00	2.0514	0.0441	0.293709886
		608.00	204.00	7000.00	2.8541	0.0600	0.303784828

Eil. Nr.	Propeleris	Svarstyklių rodmenys, g	Jėgos jutiklio rodmenys, g	Tachometro rodmenys w, aps/min	Propelerio traukos jėga T, N	Propelerio sukimo momentas Q, N/m	Propelerio naudingumo koef.
		799.00	250.00	8050.00	3.7507	0.0735	0.324730587
		1010.00	318.00	9100.00	4.7411	0.0935	0.320961149
		1270.00	393.00	10000.00	5.9616	0.1155	0.333236028
		1500.00	460.00	11000.00	7.0413	0.1352	0.332219630
		1790.00	540.00	12000.00	8.4026	0.1588	0.338176526
		2030.00	630.00	13050.00	9.5292	0.1852	0.321908107
4	Propeleris pagamintas naudojant PETG plastiką	298.00	100.00	5020.00	1.3989	0.0294	0.296523827
		435.00	150.00	6030.00	2.0420	0.0441	0.290244656
		608.00	212.00	7060.00	2.8541	0.0623	0.289836933
		803.00	271.00	8050.00	3.7694	0.0797	0.301819340
		1000.00	333.00	9050.00	4.6942	0.0979	0.303630997
		1245.00	417.00	10000.00	5.8443	0.1226	0.304829427
		1520.00	510.00	11000.00	7.1352	0.1499	0.305661992
		1800.00	585.00	12000.00	8.4496	0.1720	0.314782488
		1920.00	634.00	12500.00	9.0129	0.1864	0.307178977
5	Propeleris pagamintas naudojant PETG plastiką	291.00	103.00	5000.00	1.3660	0.0303	0.278914551
		441.00	161.00	6070.00	2.0701	0.0473	0.274209335
		600.00	210.00	7040.00	2.8165	0.0617	0.287656267
		784.00	264.00	8000.00	3.6803	0.0776	0.300759323
		1003.00	333.00	9050.00	4.7083	0.0979	0.304998361
		1287.00	423.00	10000.00	6.0414	0.1244	0.315839447
		1500.00	504.00	11050.00	7.0413	0.1482	0.301844309

Eil. Nr.	Propeleris	Svarstyklių rodmenys, g	Jėgos jutiklio rodmenys, g	Tachometro rodmenys w, aps/min	Propelerio traukos jėga T, N	Propelerio sukimo momentas Q, N/m	Propelerio naudingumo koef.
		1730.00	585.00	12000.00	8.1210	0.1720	0.296599873
		1996.00	659.00	13000.00	9.3696	0.1937	0.301197218
6	Propeleris pagamintas naudojant PETG plastiką	300.00	103.00	5000.00	1.4083	0.0303	0.291953423
		432.00	151.00	6000.00	2.0279	0.0444	0.286771733
		611.00	209.00	7050.00	2.8682	0.0614	0.296596028
		774.00	262.00	8030.00	3.6333	0.0770	0.296164856
		965.00	324.00	9000.00	4.5299	0.0953	0.297469449
		1251.00	412.00	10000.00	5.8724	0.1211	0.310761828
		1529.00	503.00	11050.00	7.1774	0.1479	0.311257542
		1720.00	561.00	12000.00	8.0740	0.1649	0.306610823
		1988.00	651.00	13000.00	9.3321	0.1914	0.303067347

11 PRIEDAS. Palyginamojo tyrimo tarp gumburėlinio propelerio ir įprastos formos propelerio rezultatai.

Eil. Nr.	Propeleris	Svarstyklių rodmenys, g	Jėgos jutiklio rodmenys, g	Tachometro rodmenys w, aps/min	Propelerio traukos jėga T, N	Propelerio sukimo momentas Q, N/m	Propelerio naudingumo koef.
1	Įprastos formos propeleris	116.00	33.00	2200.00	0.5445	0.01	0.306583483
		228.00	82.00	3100.00	1.0703	0.02	0.241282106
		410.00	159.00	4070.00	1.9246	0.05	0.228550745
		641.00	236.00	5060.00	3.0090	0.07	0.242115679
		950.00	328.00	6150.00	4.4595	0.10	0.258603762
		1260.00	411.00	7000.00	5.9147	0.12	0.276958275
		1570.00	501.00	8000.00	7.3699	0.15	0.276515930
		2060.00	627.00	9200.00	9.6701	0.18	0.288764534
		2460.00	681.00	10000.00	11.5477	0.20	0.319193427
		2880.00	796.00	11000.00	13.5193	0.23	0.314471556
2.00	Įprastos formos propeleris	109.00	31.00	2110.00	0.5117	0.01	0.309951675
		231.00	83.00	3120.00	1.0844	0.02	0.241537003
		420.00	162.00	4170.00	1.9716	0.05	0.226997595
		641.00	236.00	5050.00	3.0090	0.07	0.242595116
		935.00	326.00	6050.00	4.3891	0.10	0.258251488
		1280.00	414.00	7050.00	6.0086	0.12	0.279527079
		1590.00	505.00	8100.00	7.4638	0.15	0.276132598
		2040.00	625.00	9150.00	9.5762	0.18	0.287040072
		2485.00	685.00	10050.00	11.6651	0.20	0.320576252
		2905.00	803.00	11050.00	13.6367	0.24	0.314369042

Eil. Nr.	Propeleris	Svarstyklių rodmenys, g	Jėgos jutiklio rodmenys, g	Tachometro rodmenys w, aps/min	Propelerio traukos jėga T, N	Propelerio sukimo momentas Q, N/m	Propelerio naudingumo koef.
3	Įprastos formos propeleris	120.00	34.00	2250.00	0.5633	0.01	0.306132067
		222.00	80.00	3050.00	1.0421	0.02	0.241511617
		410.00	160.00	4070.00	1.9246	0.05	0.227122303
		641.00	236.00	5060.00	3.0090	0.07	0.242115679
		950.00	329.00	6150.00	4.4595	0.10	0.257817732
		1265.00	411.00	7000.00	5.9382	0.12	0.278608471
		1530.00	499.00	8000.00	7.1821	0.15	0.267082236
		2065.00	628.00	9200.00	9.6935	0.18	0.289355008
		2455.00	680.00	10000.00	11.5243	0.20	0.318688742
		2875.00	795.00	11000.00	13.4958	0.23	0.314047507
4	Gumburėlinis propeleris	98.00	30.00	2160.00	0.4600	0.01	0.266724247
		205.00	79.00	3100.00	0.9623	0.02	0.213520903
		350.00	143.00	4030.00	1.6430	0.04	0.202422774
		560.00	213.00	5050.00	2.6288	0.06	0.219487327
		835.00	288.00	6100.00	3.9197	0.08	0.244684118
		1140.00	366.00	7100.00	5.3514	0.11	0.263885929
		1465.00	453.00	8000.00	6.8770	0.13	0.275655485
		1770.00	554.00	9040.00	8.3087	0.16	0.264898863
		2020.00	652.00	10000.00	9.4823	0.19	0.248072057
		2400.00	772.00	11050.00	11.2661	0.23	0.245547589
5	Gumburėlinis propeleris	94.00	27.00	2130.00	0.4413	0.01	0.282323353
		207.00	79.00	3120.00	0.9717	0.02	0.215264405

Eil. Nr.	Propeleris	Svarstyklių rodmenys, g	Jėgos jutiklio rodmenys, g	Tachometro rodmenys w, aps/min	Propelerio traukos jėga T, N	Propelerio sukimo momentas Q, N/m	Propelerio naudingumo koef.
		348.00	140.00	4030.00	1.6336	0.04	0.204990707
		566.00	216.00	5000.00	2.6569	0.06	0.222125941
		828.00	294.00	6100.00	3.8868	0.09	0.236682817
		1177.00	366.00	7100.00	5.5251	0.11	0.276836692
		1440.00	443.00	8000.00	6.7596	0.13	0.274693520
		1795.00	558.00	9000.00	8.4261	0.16	0.269785349
		2070.00	658.00	10000.00	9.7170	0.19	0.254992857
		2380.00	770.00	11000.00	11.1722	0.23	0.244219544
6	Gumburėlinis propeleris	113.00	33.00	2300.00	0.5304	0.01	0.281951416
		208.00	77.00	3130.00	0.9764	0.02	0.221747295
		351.00	140.00	4030.00	1.6477	0.04	0.207647154
		558.00	213.00	5060.00	2.6194	0.06	0.217881105
		825.00	294.00	6120.00	3.8727	0.09	0.234628390
		1164.00	360.00	7030.00	5.4640	0.11	0.279556783
		1471.00	458.00	8050.00	6.9052	0.13	0.272618950
		1770.00	550.00	9000.00	8.3087	0.16	0.268011291
		2060.00	649.00	10000.00	9.6701	0.19	0.256657834
		2450.00	776.00	11100.00	11.5008	0.23	0.250820377

13 PRIEDAS. Palyginamojo tyrimo tarp plyšinio propelerio ir įprastos formos propelerio rezultatai.

Eil. Nr.	Propeleris	Svarstyklių rodmenys, g	Jėgos jutiklio rodmenys, g	Tachometro rodmenys w, aps/min	Propelerio traukos jėga T, N	Propelerio sukimo momentas Q, N/m	Propelerio naudingumo koef.
1	Plyšinis propeleris	95.00	58.00	2050.00	0.4459	0.02	0.114161732
		215.00	114.00	3020.00	1.0093	0.03	0.134234111
		420.00	190.00	4070.00	1.9716	0.06	0.163170979
		705.00	287.00	5180.00	3.3094	0.08	0.184581858
		989.00	381.00	6050.00	4.6426	0.11	0.197802184
		1320.00	497.00	7000.00	6.1963	0.15	0.202080060
		1780.00	690.00	8000.00	8.3557	0.20	0.199438005
		2150.00	835.00	9100.00	10.0925	0.25	0.192329905
		2550.00	1005.00	10050.00	11.9702	0.30	0.186893906
2	Plyšinis propeleris	99.00	62.00	2050.00	0.4647	0.02	0.113612008
		225.00	123.00	3050.00	1.0562	0.04	0.131882090
		425.00	195.00	4070.00	1.9950	0.06	0.161834596
		685.00	282.00	5050.00	3.2155	0.08	0.184549284
		1005.00	388.00	6050.00	4.7177	0.11	0.198966054
		1350.00	505.00	7100.00	6.3372	0.15	0.202799986
		1830.00	710.00	8150.00	8.5904	0.21	0.198325095
		2140.00	834.00	9100.00	10.0456	0.25	0.191218634
		2610.00	1025.00	10150.00	12.2519	0.30	0.187883156
3	Plyšinis propeleris	88.00	94.00	2100.00	0.4131	0.03	0.061304712
		208.00	164.00	3150.00	0.9764	0.05	0.085125092
		377.00	227.00	4050.00	1.7697	0.07	0.116720769

Eil. Nr.	Propeleris	Svarstyklių rodmenys, g	Jėgos jutiklio rodmenys, g	Tachometro rodmenys w, aps/min	Propelerio traukos jėga T, N	Propelerio sukimo momentas Q, N/m	Propelerio naudingumo koef.
		605.00	324.00	5150.00	2.8400	0.10	0.130736790
		808.00	425.00	6050.00	3.7929	0.12	0.130945244
		1080.00	543.00	7050.00	5.0697	0.16	0.135913839
		1375.00	681.00	8000.00	6.4545	0.20	0.137193629
		2160.00	839.00	9150.00	10.1395	0.25	0.191696669
		2540.00	1003.00	10050.00	11.9233	0.29	0.186166089
4	Įprastos formos propeleris	104.00	48.00	2150.00	0.4882	0.01	0.150656303
		225.00	93.00	3000.00	1.0562	0.03	0.177331778
		440.00	138.00	4000.00	2.0654	0.04	0.245107687
		740.00	199.00	5070.00	3.4737	0.06	0.292484960
		1068.00	268.00	6050.00	5.0134	0.08	0.315561277
		1423.00	353.00	7000.00	6.6798	0.10	0.318457586
		1936.00	472.00	8050.00	9.0880	0.14	0.328652655
		2400.00	597.00	9000.00	11.2661	0.18	0.320787189
2855.00	737.00	10000.00	13.4019	0.22	0.303430111		
5	Įprastos formos propeleris	115.00	50.00	2200.00	0.5398	0.01	0.164350515
		232.00	88.00	3050.00	1.0891	0.03	0.193004067
		455.00	138.00	4050.00	2.1359	0.04	0.254565755
		755.00	203.00	5100.00	3.5441	0.06	0.293745490
		1075.00	271.00	6100.00	5.0463	0.08	0.312557961
		1445.00	355.00	7050.00	6.7831	0.10	0.321737213
		1875.00	456.00	8000.00	8.8016	0.13	0.326260181

FORMATAS	ZONA	POZICIJA	ŽYMĖJIMAS	PAVADINIMAS	SKAIČIUS	PASTABA
		48		Riedėjimo guolis DIN 623 SKF 12mm	2	
		49		Riedėjimo guolis DIN 623 SKF 10mm	1	
		50		Riedėjimo guolis DIN 623 SKF 3mm	2	
				<u>KITI GAMINIAI</u>		
		51		Mova 3mm x 3.17mm	1	AUTOTOOL HOME
		52		Svorio jutiklis 1kg - AN0400	1	Anodas
		53		Mikrovaldiklis Arduino UNO R3 - A000066	2	Anodas
		54		Potenciometras 10K Ohm daugiasūkis - 8827	1	Anodas
		55		HX711 Svorio jutiklių modulis - AN0223	1	Anodas
		56		El. variklio valdiklis (ESC) - Hobbywing Pro 40A	1	RCDALYS
		57		Guminė kojėlė - K0575.02501755	4	KIPP
		58		Lazerinis tachometras - 6125-010	1	MONARC H
		59		Kampainis 180x40x40x2	4	Senukai
		60		Svarstyklės Aurora AU4300	1	Aurora
		61		Ašėlė WB-003080	1	FCPK
		62		OLED ekranas - 0.96" 128x64px	1	Anodas
		63		El. Variklis - Racerstar BR2830 1300KV	1	Anodas
		64		Variklio laikiklis	1	
		65		Propelerio laikiklio įvorė	1	Komplektas ANODAS AN1000kV
		66		Užspaudžiama propelerio ašis	1	
		67		Propelerio užveržimo veržlė	1	

Atsakinga žinyba MIDF	Techninis vadovas	Dokumento tipas Detalių sąrašas	Dokumento statusas Mokomasis	
Savininkas KTU	Ruošė Andrius Karaliūnas	Antraštė Matavimo stendas	MAG 001-000	
	Tvirtino Algimantas Fedaravičius		Laida A	Data 2018-04-18
			Kalba lt.	Lapas 4/4

Eil. Nr.	Propeleris	Svarstyklių rodmenys, g	Jėgos jutiklio rodmenys, g	Tachometro rodmenys w, aps/min	Propelerio traukos jėga T, N	Propelerio sukimo momentas Q, N/m	Propelerio naudingumo koef.
		2457.00	608.00	9000.00	11.5336	0.18	0.326271125
		2970.00	755.00	10000.00	13.9418	0.22	0.314271296
6	Įprastos formos propeleris	111.00	89.00	2200.00	0.5211	0.03	0.087556577
		227.00	130.00	3030.00	1.0656	0.04	0.127282823
		434.00	178.00	4000.00	2.0373	0.05	0.186153667
		751.00	242.00	5100.00	3.5253	0.07	0.244450741
		1060.00	306.00	6050.00	4.9759	0.09	0.273274426
		1470.00	403.00	7050.00	6.9005	0.12	0.290802967
		1835.00	487.00	8050.00	8.6139	0.14	0.293931584
		2467.00	610.00	9000.00	11.5806	0.18	0.327188759
		3000.00	765.00	10100.00	14.0826	0.22	0.311756895