



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Sunkiasvorio drono žmonių evakuacijai projektas

Baigiamasis magistro studijų projektas

Artūras Deordijaščenko

Projekto autorius

Doc. Saulius Japertas

Vadovas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Sunkiasvorio drono žmonių evakuacijai projektas

Baigiamasis magistro projektas

Aeronautikos inžinerija (6211EX024)

Artūras Deordijaščenko

Projekto autorius

Doc. Saulius Japertas

Vadovas

Doc. Vitas Grimaila

Recenzentas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Artūras Deordijaščenko

Sunkiasvorio drono žmonių evakuacijai projektas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Artūro Deordijaščenko, baigiamasis projektas tema „Sunkiasvorio drono žmonių evakuacijai projektas“ 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(-ei) *Artūriui Deordijaščenko*

1. Baigiamojo projekto tema:

Sunkiasvorio drono žmonių evakuacijai projektas

Project of Heavyweight drone for people evacuation

2. Projekto tikslas:

Suprojektuoti didelės keliamosios jėgos droną gelbėjimo operacijoms atlikti.

2. Projekto uždaviniai:

- *Išanalizuoti literatūrą, susijusią su darbo tema;*
- *Išanalizuoti programinę įrangą, tinkamą dronų projektavimui;*
- *Suprojektuoti droną, įvertinant jo fizinius ir aerodinaminius parametrus;*
- *Įvertinti preliminarius gamybos kaštus.*

3. Projekto aprašomosios dalies struktūra:

- *Dronui keliami aerodinaminiai reikalavimai ir dronų valdymas*
- *Dronų konstrukcija*
- *Programinės įrangos aprašymas*
- *Pagrindinių duomenų nustatymas ir įrangos parinkimas*
- *Kaštų skaičiavimas*
- *Aerodinaminiai bandymai*

4. Projekto konsultantai: -

Baigiamojo projekto autorius Artūras Deordijaščenko

2017.11.02

(vardas, pavardė, parašas, data)

Baigiamojo projekto vadovas doc. Saulius Japertas

(vardas, pavardė, parašas, data)

Krypties studijų programos vadovas Janina Jablonskytė

(vardas, pavardė, parašas, data)

Deordijaščenko, Artūras. Sunkiasvorio drono žmonių evakuacijai projektas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. Saulius Japertas; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: Aeronautikos inžinerija (E14), Inžinerijos mokslai

Reikšminiai žodžiai: sunkiasvoris dronas, keliamoji galia, žmonių evakuacija, jėgų tyrimas, kokybės įvertinimas

Kaunas, 2019. 53 p.

Santrauka

Baigiamajame darbe pateikiamas sunkiasvorio, didelės keliamosios galios šešių rotorių drono, skirto žmonių evakuavimui, projektavimo procesas.

Darbe apžvelgiamos projektuojamo drono techninės skrydžio bei aerodinaminės sistemos charakteristikos, kuriama ir analizuojama jo konstrukcija ir gelbėjimo procedūros.

Atsižvelgiant į vis didėjančių dronų panaudojimą ir populiarumą, jų mobilumą kuriamas dronas, skirtas žmonėms evakuoti iš kitoms transporto priemonėms sunkiai pasiekiamų vietovių.

Darbe atliktas aerodinaminių jėgų tyrimas, leidęs įvertinti skrydžio metu veikiančias apkrovas. Sudarytas drono modelis ir atlikti reikalingi techniniai skaičiavimai. Taip pat aprašytas numatomas drono darbo, evakuojant žmones, algoritmas, atlikti ekonominiai paskaičiavimai.

Deordijascenko, Arturas. *Project of Heavyweight drone for people evacuation* / supervisor doc. Saulius Japertas. The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Research area and field: Aeronautical Engineering (E14), Engineering Science

Key words: heavyweight drone, payload, people evacuation, examination of forces, quality review

Kaunas, 2019. 53 p.

Summary

This master's thesis is about the process of designing heavyweight hexacopter, which is supposed to evacuate people from dangerous places.

In this thesis technical flight properties and properties of aerodynamic system are discussed, also construction of hexacopter is created and analysed, as well as procedures of rescuing are reviewed.

While popularity and usage of drones are rapidly increasing, because of their mobility, an idea of this thesis is to create a drone, which could be helpful in rescuing people from those places, which are not accessible for other types of transport.

There is study of aerodynamic forces done while writing this thesis, which was useful to know forces acting on hexacopter during the flight. Also model of drone was created and technical calculations were done. In addition to that, all procedures of rescuing people were discussed and plan of rescuing was created and economical calculations were done.

Turinys

| | |
|--|-----------|
| Paveikslėlių sąrašas | 8 |
| Lentelių sąrašas | 9 |
| Įvadas..... | 10 |
| 1.Literatūros apžvalga | 12 |
| 1.1. Aerodinaminiai reikalavimai | 12 |
| 1.2. Kvadrokopterių valdymas ir pagrindinių charakteristikų nustatymas..... | 23 |
| 1.3. Jutikliai | 25 |
| 1.4. Programinės įrangos, skirtos aerodinaminėms charakteristikoms skaičiuoti, analizė.... | 29 |
| 1.5. Suprojektuoti bei jau naudojami dronai | 32 |
| 2.Projektinė dalis | 35 |
| 2.1. Pradinių drono duomenų nustatymas | 35 |
| 2.2. Energijos sąnaudų skaičiavimas | 37 |
| 2.3. Gamybos kaštų skaičiavimas..... | 38 |
| 2.4. Gelbėjimo algoritmas | 39 |
| 3.Eksperimentinė dalis | 41 |
| 3.1. Heksakopterio skrydžio parametrų skaičiavimas eCalc programa..... | 41 |
| 3.2. Aerodinaminių savybių tyrimas „SolidWorks“ | 45 |
| Išvados | 46 |
| Literatūros sąrašas | 47 |
| Priedai..... | 49 |
| 1 priedas. Heksakopterio korpuso detalusis brėžinys | 49 |
| 2 priedas. Turnigy RotoMax 150cc variklio detalusis brėžinys | 50 |
| 3 priedas. Sraigto detalusis brėžinys..... | 51 |
| 4 priedas. Heksakopterio surinkimo brėžinys | 52 |

Paveikslėlių sąrašas

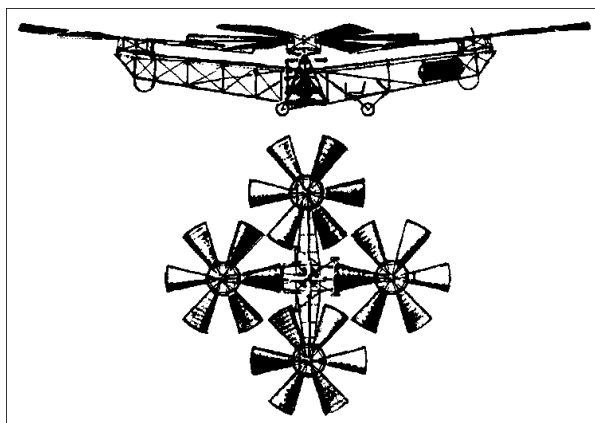
| | |
|---|----|
| 1 pav. Pirmo drono prototipas [1] | 10 |
| 1.1 pav. Kairėje - aerodinaminė sraigto analizė veikiant vėjo įtakai, dešinėje - fizinis kvadropterio modelis kabojimo režime..... | 13 |
| 1.2 pav. Supaprastintas kvadropterio modelis | 15 |
| 1.3 pav. Oro pasipriešinimo koeficiento priklausomybė nuo Reinoldso skaičiaus..... | 15 |
| 1.4 pav. Oro srovių veikimas skirtingos formos skraidančiuose kūnuose [6] | 18 |
| 1.5 pav. Aerodinamikos pagerinimas keičiant sraigčių padėtį [7]..... | 19 |
| 1.6 pav. Dronas GRIFF 300 [19] | 20 |
| 1.7 pav. Atakos kampas šiuo atveju yra α | 21 |
| 1.8 pav. Įprastinio kvadropterio galimi judėjimo variantai [10] | 23 |
| 1.9 pav. Inertinio matavimo komplekso primityvi schema [13] | 25 |
| 1.10 pav. Giroskopo sandara [14] | 26 |
| 1.11 pav. Stipruminio bandymo pavyzdys su SolidWorks | 31 |
| 1.12 pav. SKYF kvadropteris [18] | 32 |
| 1.13 pav. Griff-300 [19]..... | 33 |
| 1.14 pav. The Black Knight Transformer detalios charakteristikos [20]..... | 33 |
| 1.15 pav. The Black Knight Transformer [20]..... | 34 |
| 2.1 pav. Turnigy Rotomax 150cc variklis [21] | 36 |
| 2.2 pav. LiPo 22000 2S 7.4 V | 37 |
| 2.3 pav. Bendros baterijų talpos skaičiavimai [28] | 38 |
| 2.4 pav. Pagrindinių drono elementų sujungimo schema | 38 |
| 2.5 pav. Flir Duo Pro R kamera, naktinio ir termo matymo režimai | 38 |
| 2.6 pav. Gelbėjimo algoritmas | 40 |
| 3.1 pav. Nuotolio ir skrydžio laiko priklausomybės nuo skrydžio greičio grafikas | 42 |
| 3.2 pav. Elektros energijos naudojimo, efektyvumo, variklio apsisukimų, elektros energijos nuostolių ir variklio temperatūros priklausomybė nuo srovės stiprio | 42 |
| 3.3 pav. Maksimalaus krovinio svorio ir skrydžio laiko priklausomybė nuo aplinkos temperatūros..... | 43 |
| 3.4 pav. Maksimalaus skrydžio greičio ir keliamosios jėgos priklausomybė nuo skrydžio aukščio | 44 |
| 3.5 pav. „SolidWorks“ atliktų aerodinaminių bandymų rezultatas (angl. flow simulation) | 45 |

Lentelių sąrašas

| | |
|---|----|
| 1.1 lentelė. Dronų skirstymas [2] | 10 |
| 3.1 lentelė. „eCalc“ apskaičiuoti drono parametrai..... | 41 |
| 3.2 lentelė. Temperatūrinių bandymų su „eCalc“ rezultatai | 43 |
| 3.3 lentelė. Heksakopterio keliamosios jėgos priklausomybė nuo skridimo aukščio ir greičio | 44 |

Įvadas

Pirmas drono prototipas buvo G.A. Botezato sraigtasparnis, kuris buvo išbandytas 1922 metais ir vieno iš eksperimentinių skrydžių metu sugebėjo pakilti į 4 metrų aukštį, keldamas 450 kg krovinį. Išradėjas Georgijus Aleksandrovičius Botezatas buvo rusų kilmės amerikietis, Petrogrado technikos instituto profesorius. Vieno iš pirmųjų sraigtasparnių bandymai, kuris turėjo keturis sraigtus, prasidėjo 1922 metais. Daugiasraigė schema leido supaprastinti aparato valdymą, posūkiui buvo atliekami dėka priekinės dalies padėties pasikeitimo. Kiekvienas sraigtas buvo sudarytas iš šešių menčių. Tikslas buvo sukurti skraidantį aparatą su vertikaliu kilimu ir leidimusi [1].



1 pav. Pirmo drono prototipas [1]

Šiuo metu dronai yra sparčiai vystomi ir panaudojami įvairiausioms reikmėms: humanitarinei pagalbai teikti, saugumui užtikrinti (stebint įvairius renginius, kariniais tikslais, pasienio tarnyboje), žmonių paieškai, kaip medicininių reikmenų transportas. „Amazon“ šiuo metu bando technologiją, leidiančią dronams pakeisti kurjerius ir pristatyti krovinius kur kas greičiau negu dabar naudojamomis transporto priemonėmis. Vystymo stadijoje taip pat yra projektas, pagal kurį dronai bus naudojami organų, skirtų transplantavimui, pervežimui.

JAV Krašto apsaugos ministerija skiria penkias dronų klases, kurių skiriamieji požymiai yra masė, darbinis aukštis bei greitis. Taip pat dronai gali būti skirstomi pagal valdymo būdą į hibridinius, valdomus operatoriaus arba automatiškai valdomus [2].

1.1 lentelė. Dronų skirstymas [2]

| Grupė | Masė, kg | Darbinis aukštis, m | Greitis, mazgai |
|-------|----------|---------------------|-----------------|
| I | 0-9 | < 360 | 100 |
| II | 9-25 | < 1050 | < 250 |
| III | < 600 | < 5040 | |
| IV | > 600 | > 5040 | neapibrėžtas |
| V | | | |

Dronai su didele keliamąja jėga šiuo metu yra naujovė. Pagrindė dronai su didele keliamąja jėga yra projektuojami didelio svorio ir gabaritų kroviniams pergabenti arba žmogui, taip pat viena iš tokių dronų gamybos atšaka yra žmonių gelbėjimui bei gamtinių stichinių problemų sprendimui skirti dronai.

Darbo tikslas: suprojektuoti didelės keliamosios jėgos droną žmonių gelbėjimo operacijoms atlikti.

Uždaviniai:

- Išanalizuoti literatūrą, susijusią su darbo tema;
- Išanalizuoti programinę įrangą, tinkamą dronų projektavimui;
- Suprojektuoti droną, įvertinant jo fizinius ir aerodinaminius parametrus;
- Įvertinti preliminarinius gamybos kaštus.

Pagal šiuos iškeltus uždavinius bus išanalizuota turima literatūra, o tai atlikus – projektuojamas pasirinkto dizaino drono dizainas, atliekami aerodinaminiai skaičiavimai SolidWorks ir kitos tam tinkamos programinės įrangos pagalba bei remiantis atliktais skaičiavimais projektuojamam aparatui parenkamas reikiamas profilis.

1. Literatūros apžvalga

Šiame skyriuje apžvelgiama darbui atlikti naudojama literatūra ir nustatomos pagrindinės gairės, svarbios projektuojant droną – konstrukcijos sudedamosios dalys, projektavimui tinkama naudoti programinė įranga, navigacinę įrangą (jutiklius), kuri gali nešti dronas, bei dronų valdymo ypatybės. Be projektavimui būtinų parametrų, šioje darbo dalyje aptariami ir anksčiau sukurtų panašių savybių į kuriamą dronai, kurie jau yra taikomi praktikoje bei jų savybės. Tai naudinga siekiant sukurti realybėje galinčią egzistuoti ir veikiančią konstrukciją.

1.1. Aerodinaminiai reikalavimai

Aerodinamika aprašo pagrindinius bet kurio prietaiso skrydžio principus. Trys sukimosi ašys gana vienareikšmiškai nustato drono orientaciją erdvėje ir jo skrydžio kryptį. Tiesa, skrydžio kryptis visiškai nepriklauso nuo paties drono padėties ore. Paminėtas tris ašis yra priimta vadinti išilginiu nuokrypiu, pasvirimu (šoniniu pokrypiu) ir gyliavimu. Bet kuris dronas skrydžio metu atlieka griežtai numatytą kiekį funkcijų. Būtent šios trys ašys ir numato, kaip judės dronas. Jeigu pavyzdžiu paimti sraigtasparnį, tai pasvirimui ir gyliavimui didžiausią reikšmę turės pagrindinis sraigtas, o vairo sraigtas kompensuoja sukimosi momentą ir priklausomai nuo to, koku greičiu jis sukasi, priklauso gyliavimas. Tačiau drono (konkrečiai – kvadropterio) atveju viskas yra kitaip. Čia yra dvi sraigčių poros, kurios kiekviena sukasi skirtingomis kryptimis – viena prieš laikrodžio rodyklę, kita pagal ją. Daugeliui kvadropterių yra montuojami varikliai su nesikeičiančiu žingsniu tam, kad jų valdymas apsiribotų tik apskukų keitimu. Taigi, jeigu visi sraigčiai dirba vienodu greičiu, jie vienas kitą kompensuoja. Didinant vieno iš sraigčių sukimosi greitį šis balansas yra išardomas. Jeigu atitinkamai proporcingai sumažinti kito į kitą pusę besisukančio sraigto apsisukimus, tai tada išsaugomas nulinis gyliavimo kampas, bet pasikeis išilginio nuokrypio arba pasvirimo kampas. Jeigu didinti apsisukimus vienai porai, kuri sukasi ta pačia kryptimi, ir mažinti priešingai porai, tai gyliavimo kampas tokiu būdu yra keičiamas.

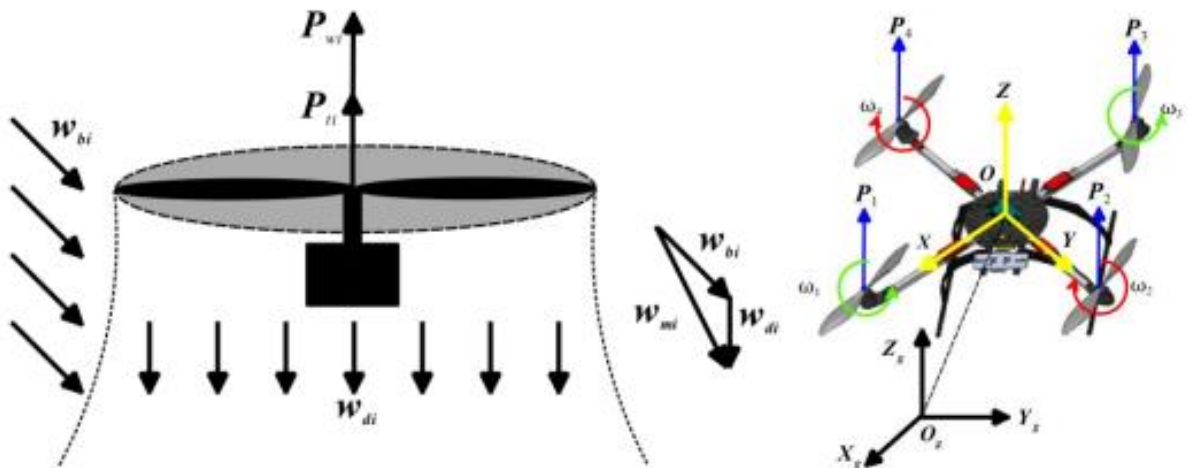
Drono variklių ir jo sraigčių valdymas vyksta su distanciniu pultu, iš kurio signalas yra siunčiamas į drono borto kompiuterį ir dar yra pridedamos būtinos giroskopo, akselerometro ir kt. korekcijos.

Projektuojant droną yra būtina atlikti visus skaičiavimus tam, kad rasti balansą tarp drono masės, jame įmontuotų variklių galingumo ir daugelio kitų faktorių. Drono charakteristikos ir parametrai glaudžiai vienas su kitu susiję. Pavyzdžiui, jeigu yra poreikis didinti skrydžio trukmę, tam reikia didesnės talpos akumulatoriaus, tačiau tuo pačiu didės ir paties drono masė, o dėl to reikės didesnių energijos sąnaudų [3].

Matematinis drono modelis

Šioje dalyje bus pateiktas matematinis drono (kvadropterio) modelis, įvertinant žemės paviršiaus efekto, vėjo įtaką bei giroskopinių momentų variklių ir sraigčių įtaką.

Aerodinaminė sraigto analizė veikiant vėjo trikdymui ir fizinis kvadrokopterio modelis kabojimo metu pavaizduoti 1.1 pav.:



1.1 pav. Kairėje - aerodinaminė sraigto analizė veikiant vėjo įtakai, dešinėje - fizinis kvadrokopterio modelis kabojimo režime

1.1 paveiksle 1-am sraigtui: w_{bi} – vėjo vektorius surištoji koordinatinių sistemoje, w_{di} – sukiamas srauto greitis, w_{mi} – gaunamas sukiamas sraigto greitis, P_{ti} – sraigto traukos jėga, P_{wi} – traukos jėga veikiant vėjui.

Traukos koeficientas:

$$C_{pi} = \frac{2P_{ti}}{\rho S_i w_i^2} \quad (1)$$

čia P_{ti} – traukos jėga;

ρ – oro tankis;

w_i – sraigto greitis;

S_i – sraigto apimamas plotas.

Traukos jėga ir sukiamas sraigto greitis užrašomi taip:

$$P_{ti} = c_{pi} \frac{w_i^2}{2} \rho S_{pi} \quad (2)$$

$$w_{di} = \sqrt{\frac{P_{ti}}{2\rho S_i}} \quad (3)$$

čia c_{pi} – traukos jėgos koeficientas;

ρ – oro tankis;

S_i – sukamojo sraigto plotas;

S_{pi} – sraigto ploto projekcija.

Gaunamas sukeliamas sraigto greitis:

$$w_{mi} = w_{di} + w_{bi} \quad (4)$$

Vieno sraigto traukos jėga esant vėjo įtakai yra apskaičiuojama taip:

$$P_{w_i} = P_{ti} + P_{wi} = 2\rho S_i w_{di} w_{mi} \quad (5)$$

Traukos jėgos santykis neįvertinant žemės traukos efekto ir papildomos traukos jėgos ir įvertinant ekrano efektą:

$$\frac{P_{gi}}{P_{ti}} = \frac{1}{1 - \left(\frac{r_i}{4h}\right)^2 \left[1 + \left(\frac{V}{w_{di}}\right)^2\right]} \quad (6)$$

čia h – skrydžio aukštis,

r_i – sraigto sukimosi skersmuo,

V – skrydžio greitis.

Rezultatyvioji kvadrokopterio traukos jėga

$$P_w = [0, 0, \sum_1^4 P_i]^T \quad (7)$$

čia $P_i = P_{ti} + P_{wi} + P_{gi}$.

Oro pasipriešinimo jėga gali būti gaunama dinaminio slėgio lygties pagalba

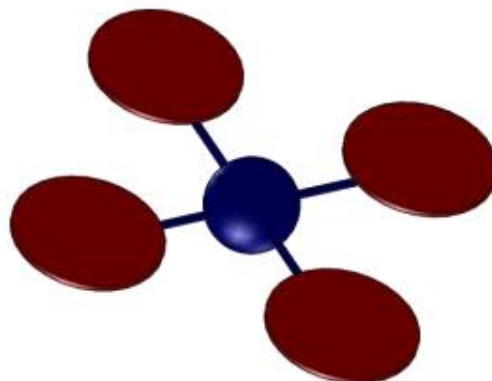
$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} = \frac{1}{2}\rho \begin{bmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_x^2 & 0 & 0 \\ 0 & w_y^2 & 0 \\ 0 & 0 & w_z^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_x \\ C_y \\ C_z \end{bmatrix} \quad (8)$$

čia $[S_x, S_y, S_z]^T$ - kvadrokopterio plotas, veikiamas vėju;

$[w_x, w_y, w_z]^T$ - vėjo greitis;

$[C_x, C_y, C_z]^T$ - pasipriešinimo koeficientas.

Kvadrokopterio menčių modelio pasipriešinimo koeficiento bei veikiamo paviršiaus apskaičiavimo procesui supaprastinti įsivaizduojame mentes plonu pusiau peršviečiamų diskų pavidale, o kvadrokopterio korpuso modelį kaip sferą su keturiais cilindrais (1.2 pav.).



1.2 pav. Supaprastintas kvadrokopterio modelis

Kvadrokopterio paviršius yra veikiamas vėju. Tai galima užrašyti taip:

$$\begin{bmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4P_s \pi r^2 \sin \eta + S_0 \\ 4P_s \pi r^2 \cos \eta + S_0 \\ 4P_s \pi r^2 \sin \eta + S_0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

čia P_s – koeficientas, kuris išreiškia sukamojo sraigto pusiaupralaidus charakteris;

η – pokrypio kampas (išreiškia tangažo ir kreno kampų derinimą);

S_0 - kvadrokopterio paviršiaus plotas, kurį veikia vėjas.

Reinoldso skaičiaus formulė:

$$R_e = \frac{\rho v_0 d}{\mu} \quad (10)$$

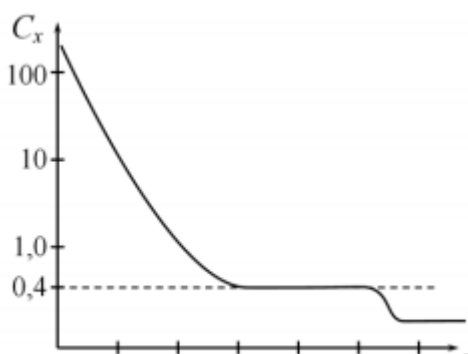
čia v_0 – aptekamumo greitis;

d – drono dydis (sferai, cilindrai ir diskui yra diametras);

μ - dinaminis oro klampumas.

Oro pasipriešinimo koeficientai C_x , C_y , C_z nėra pastovus visame aptekamumo sąlygų diapazone.

1.3 paveiksle parodyta oro pasipriešinimo koeficiento priklausomybė nuo Reinoldso skaičiaus.



1.3 pav. Oro pasipriešinimo koeficiento priklausomybė nuo Reinoldso skaičiaus.

Oro pasipriešinimo jėga P_f ir sunkio jėga G matricos formoje yra aprašomi taip:

$$P_f = [-f_x, -f_y, -f_z]^T; G = [0, 0, -mg]^T \quad (11)$$

čia m – drono masė;

g – laisvojo kritimo pagreitis.

Traukos jėga normalioje žemės koordinačių sistemoje:

$$P = [P_x, P_y, P_z]^T = RP_w + P_g + P_f \quad (12)$$

$$R(\gamma, \vartheta, \psi) = \begin{bmatrix} \cos \vartheta \cos \psi & \cos \psi \sin \vartheta \sin \gamma - \sin \psi \sin \gamma & \cos \psi \sin \vartheta \cos \gamma + \sin \psi \sin \gamma \\ \sin \psi \cos \vartheta & \sin \psi \sin \theta \sin \gamma + \cos \psi \cos \gamma & \sin \psi \sin \theta \cos \gamma - \cos \psi \sin \gamma \\ -\sin \vartheta & \cos \vartheta \sin \gamma & \cos \vartheta \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (13)$$

kur R – perėjimo matrica;

ψ, ϑ, γ – slydimo, tongažo ir kreno kampai [4].

Traukos jėga, kuri sukuriama kiekvieno iš keturių kvadrokopterio (arba mūsų projektavimo atveju šešių) variklių, lygi:

$$P_i = b \cdot \omega_i^2 \quad (14)$$

kur b – proporcingumo koeficientas;

ω_i – kampinis variklio greitis

Iš čia galima užrašyti diferencialinę lygtį, kuri aprašo drono įsibėgėjimą vertikalios ašies atžvilgiu:

$$\dot{r} = g \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} - R \cdot \frac{b}{m} \sum_{i=1}^4 \omega_i^2 \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (15)$$

Antroji diferencialinė lygtis atrodytų taip:

$$I\ddot{\Omega} = -(\dot{\Omega} \times I\dot{\Omega}) - M_G + M \quad (16)$$

čia I – inercijos matrica;

M – sukimosi momentas, perduodamas dronui;

M_G – giroskopinis momentas.

Vektorius M yra užrašomas taip:

$$M = \begin{pmatrix} Lb(\omega_2^2 - \omega_4^2) \\ Lb(\omega_1^2 - \omega_3^2) \\ d(\omega_1^2 + \omega_3^2 - \omega_2^2 - \omega_4^2) \end{pmatrix} \quad (17)$$

čia d – šoninio pasipriešinimo koeficientas;

L – peties ilgis

Giroskopiniai momentai, kurie buvo sukelti objekto su besisukančiais variklio sraigtais, užrašomi taip:

$$M_G = I_R \left[\dot{\Omega} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right] \cdot (\omega_1 - \omega_2 + \omega_3 - \omega_4) \quad (18)$$

Įvedami 4 valdymo signalai, kurie ir valdo droną:

$$u_1 = d(\omega_1^2 + \omega_3^2 + \omega_2^2 + \omega_4^2) \quad (19)$$

$$u_2 = b(\omega_2^2 - \omega_4^2) \quad (20)$$

$$u_3 = b(\omega_1^2 - \omega_3^2) \quad (21)$$

$$u_4 = d(\omega_1^2 + \omega_3^2 - \omega_2^2 - \omega_4^2) \quad (22)$$

Giroskopiniai momentai, kurie veikia droną, priklauso nuo kampinių variklių sraigčių greičių, todėl bendras valdymo vektorius atrodys taip:

$$u^t = (u_1 \quad u_2 \quad u_3 \quad u_4) \quad (23)$$

Užrašoma lygčių sistema, aprašanti pilną sistemą

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{x} = -(\cos \varphi \sin \theta \cos \psi + \sin \varphi \sin \psi) \cdot \left(\frac{u_1}{m} \right) \\ \ddot{y} = -(\cos \varphi \sin \theta \sin \psi + \sin \varphi \cos \psi) \cdot \frac{u_1}{m} \\ \ddot{z} = g - (\cos \varphi \cos \theta) \cdot \frac{u_1}{m} \\ \ddot{\varphi} = \dot{\theta} \dot{\psi} \left(\frac{I_y - I_z}{I_x} \right) - \frac{I_R}{I_x} \dot{\theta} g(u) + \frac{L}{I_x} u_2 \\ \ddot{\theta} = \dot{\varphi} \dot{\psi} \left(\frac{I_z - I_x}{I_y} \right) - \frac{I_R}{I_y} \dot{\varphi} g(u) + \frac{L}{I_y} u_3 \\ \ddot{\psi} = \dot{\theta} \dot{\varphi} \left(\frac{I_x - I_y}{I_z} \right) + \frac{1}{I_z} u_4 \end{array} \right. \quad (24)$$

Sistema pertvarkoma taip, kad nebūtų antrinių išvestinių

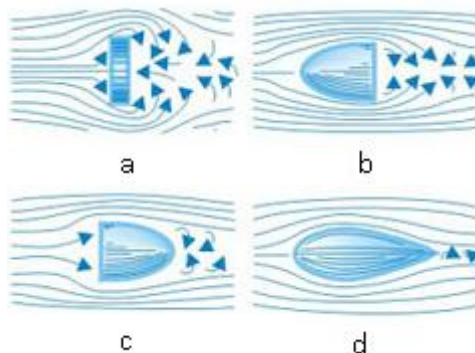
$$\dot{x} = \begin{pmatrix} -(\cos x_4 \sin x_5 \cos x_6 + \sin x_4 \sin x_6) \cdot u_1 l m \\ -(\cos x_4 \sin x_5 \cos x_6 + \sin x_4 \sin x_6) \cdot u_1 l m \\ g - (\cos x_4 \cos x_5 \cdot u_1 l m) \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \\ x_8 x_9 I_1 - \frac{I_R}{I_x} x_8 g(u) + \frac{L}{I_x} u_2 \\ x_7 x_9 I_2 - \frac{I_R}{I_y} x_7 g(u) + \frac{L}{I_y} u_3 \\ x_7 x_8 I_3 + \frac{1}{I_z} u_4 \end{pmatrix} \quad (25)$$

Ši 9 lygčių sistema aprašo sistemos dinamiką [5].

Visų jėgų, susidarančių oro srovei aptekant skrendantį kūną, suma vadinama pilnąja aerodinamine jėga \vec{R}_a . Taškas, kurį veikia pilnoji aerodinaminė jėga, vadinamas slėgio tašku. Dalis aerodinaminės jėgos, kuri yra statmena skrydžio kryptčiai (arba pratekančios srovės vektoriui) vadinama keliamąja

jėga \vec{Y}_a . Dalis aerodinaminės jėgos \vec{X}_a , kuri yra lygiagreti pratekančios oro srovės vektoriui, vadinama priekinio pasipriešinimo jėga.

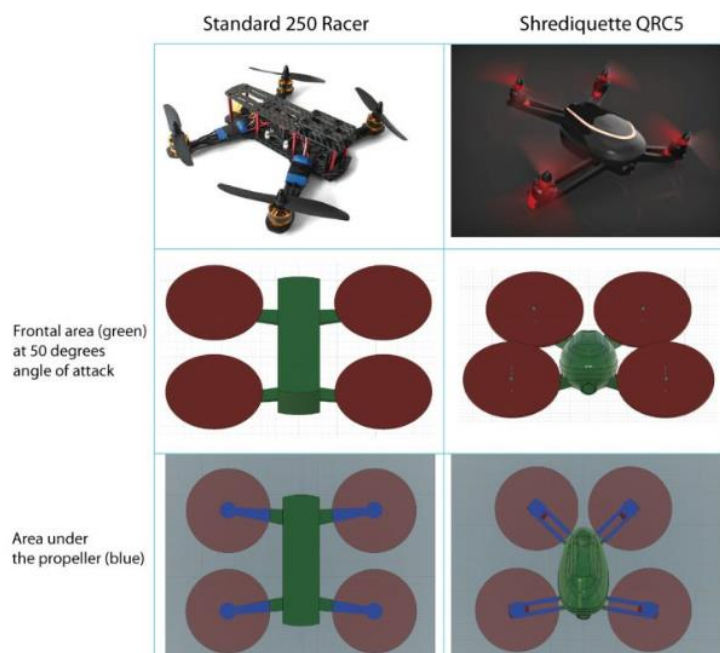
Aerodinaminės jėgas veikia skirtingi faktoriai. Oro trinties jėga pilnai realizuojasi paribio sluoksnyje. Taigi, kuo mažesnis bus aptekamojo kūno šiurkštumas, tuo ilgiau bus išsaugomas laminarinis paribio sluoksnis ir tuo bus mažesnė trinties pasipriešinimo jėga, nes mažiau bus sunaudojama energijos srautų susimaišymui paribio sluoksnyje. Taigi, projektuojant visada reikia apgalvoti apie drono dalių paviršiaus būklę.



1.4 pav. Oro srovių veikimas skirtingos formos skraidančiuose kūnuose [6]

Taip pat didelę reikšmę turi ir paties skraidančiojo kūno forma. 1.4 pav. b formos aerodinaminis pasipriešinimas yra keturis kartus mažesnis negu 1.4 pav. a. 1.4 pav. c tik ketvirtadaliu mažesnis nei 1.4 pav. a. Tuo tarpu paskutinė forma – 1.4 pav. d – turi 20 kartų mažesnę aerodinaminį pasipriešinimą, nei 1.4 pav. a [6]. Taigi, lašo forma yra labiausiai tinkama aerodinaminiam atžvilgiu. Bėda ta, jog konkrečiai kvadropteriai dažniausiai tokios formos negali turėti. Tačiau galima bandyti „pritraukti“ ją iki lašo formos keičiant pačių sraigčių buvimo vietą. Tai jau yra bandoma padaryti. Priartinant galinius sraigčius vieną prie kito gaunama iš viršaus matoma lašo forma, todėl aerodinaminis pasipriešinimas mažėja iki 40 %. Todėl automatiškai didėja ir greitis (1.5 pav. projekte yra gerinamas sportinio kvadropterio aerodinaminis pasipriešinimas), tačiau didėjant greičiui, mažėja trauka, o būtent ji ir yra labai svarbi gaminant didelės keliamosios jėgos droną. Dėl to bus būtini skaičiavimai, siekiant suderinti aerodinaminio pasipriešinimo mažinimą ir traukos didinimą. Tam reikės rasti optimalius parametrus ir būtent tai galima vadinti vienu iš darbo tikslų [7].

Patys drono sraigtai taip pat turi savo charakteristikas. Viena iš jų – sraigto menčių skaičius. Jų gali būti nuo dviejų iki penkių, tačiau norint padidinti keliamąją jėgą jų gali prireikti ir daugiau, pavyzdžiui šešių arba aštuonių. Tačiau menčių skaičiaus didinimas blogina sraigto darbą, nes atsiranda žalinga menčių tarpusavio poveikis. Šiai problemai yra sprendimas, taikomas sraigtasparniuose – yra naudojamas horizontalus, vertikalus ir ašinis šarnyrai tam, kad besisukant sraigtui mentės pasisuktų tam tikru kampu ir būtų sumažinamas neigiamas jų tarpusavio poveikis. Kadangi projektuojamas dronas planuojamas gana didelis, jame taip pat galima pritaikyti šią technologiją.



1.5 pav. Aerodinamikos pagerinimas keičiant sraigto padėtį [7]

Kitas parametras – sraigto skersmuo D . Jis yra matuojamas nuo vienos mentės pabaigos iki kitos. Skaičiavimai rodo, jog, jeigu turime tokį pat variklio galingumą ir varijuojame tik pačių menčių ilgiu, galime reguliuoti keliamąją galią. Pavyzdžiui, padidinus diametrą dukart gauname 1,59 karto didesnę keliamąją jėgą negu buvo pradinė, o padidinus penkiskart – 2,92 karto didėja keliamoji jėga. Tačiau reikia turėti omenyje, jog didinant mentes didėja ir paties drono masė, todėl keliamoji jėga nedidėja tiek daug – turint pradinę keliamąją galią 100 kg gauname 159 kg keliamosios jėgos. Reikia iš gautos keliamosios jėgos dar atimti prisidedantį svorį nuo menčių didinimo – kaip ir minėta anksčiau, visi parametrai drono konstrukcijoje yra labai glaudžiai susiję, todėl didinant vieną, būtina tikrinti ir visus kitus.

Plokštuma, kurią apima sraigtas R_{OM} – plokštuma, kurią apriboja sraigto menčių galai sukimosi metu. Šis dydis yra reikalingas tam, kad ši plokštuma gali būti laikoma kaip keliantis paviršius, atliekantis tokią pat funkciją, kokią atlieka sparnas lėktuvo konstrukcijoje turint omenyje oro klampumą ir inertiškumą, susidarantį orui pratekant per plokštumą, kurią apima sraigtas, viena bendra srove.

Apkrova, tenkanti plokštumai R_{OM} yra apskaičiuojama kaip orlaivio (šiuo atveju – heksakopterio) svoris ir heksakopterio sraigto sukimosi metu apimama plokštuma R_{OM} ir yra žymima p_{SOM} . Derėtų nepamiršti, jog apskaičiavus vieno sraigto plokštumą, būtina ją padauginti iš 6 – sraigto skaičiaus. R_{SOM} didinimas sumažina maksimalų skrydžio aukštį.

$$p_{SOM} = \frac{G}{R_{OM}} \quad (26)$$

Dar yra parametras Q – jis rodo, kokią plokštumos dalį užima menčių paviršiaus plotas lyginant su menčių apimamu plotu R_{OM} [8].



1.6 pav. Dronas GRIF 300 [19]

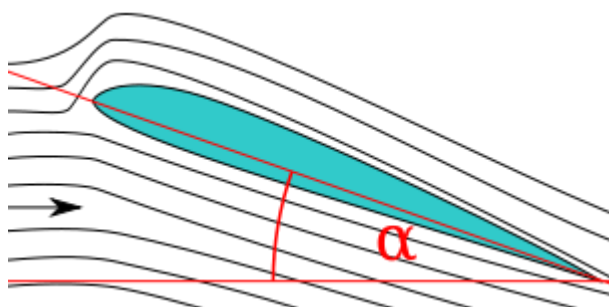
Kalbant apie bendrą drono aerodinamiką jo sraigtų formai tenka nedidelė reikšmė, palyginti su kitais parametrais, tačiau skirtumas vis tiek yra. Forma gali būti trejopa – stačiakampio, trapecijos ir mišri. Sraigtasparniuose (pvz.: Mi-8) yra naudojama stačiakampio forma, jau minėtame GRIF 300 su didele keliamąja galia – irgi stačiakampio forma.

Mentės profilis – jos skerspjūvio forma. Išilgai skerspjūvio forma gali keistis (aerodinaminis mentės sūkis). Parenkant profilio formą yra žiūrima, kad jis turėtų kuo geresnes aerodinamines savybes.

Mentės skerspjūvio atakos kampas α – kampas tarp išilginės profilio linijos ir pratekančios oro srovės ta m tikro skerspjūvio atžvilgiu. Atakos kampo dydžiu yra išreiškiamos aerodinamių jėgų koeficientų reikšmės.

Tvirtinimo kampu F vadiname kampą tarp išilginės profilio linijos ir sraigto sukimosi plokštumos. Sraigtų tvirtinimo kampas matuojamas $0,7$ spindulio atstumu nuo sraigto centro. Ši sąlyga įvesta dėl geometrinio menčių sūkio, dėl kurio visi menčių skerspjūviai turi skirtingus (mažėjančius į galą) tvirtinimo kampus. Geometrinio sūkio būtinumas aiškinamas taip: pirmiausia, į menčių galą padidėja apskritiminių greitis, vyksta netolygus induktyvių greičių pasiskirstymas, to pasekoje ir aerodinamių jėgų pasiskirstymas menčių ilgyje. Tam, kad užtikrinti tolygesnį apkrovos paskirstymą tvirtinimo kampas į galą mažėja. Antra, horizontaliai judant skrydžio metu dėl kampo didėjimo atsiranda srauto nutrūkimas menčių galuose, geometrinio sūkio buvimas stumia srauto trūkius didelio skrydžio greičio pusėn.

Anksčiau buvo įvesta plokštumos, kurią apima visas sraigto, sąvoka, ir paminėta, jog ji gali būti laikoma keliamąja plokštuma, kurios ploto vienetui tenka konkreti apkrova. Taigi, galima įvesti sraigto atakos kampą (žr. 1.7 pav.) sąvoką ir šį dydį žymėti raide A . Sraigto atakos kampą galima laikyti kampą tarp plokštumos, kurią besisukdamas apima sraigto R_{OM} ir kampo, kurį sudaro pratekanti oro srovė (arba skrydžio kampo). Jeigu oras prateka iš apačios, atakos kampas bus teigiamas, o jeigu iš viršaus – neigiamas. Kadangi dronas gali judėti ore bet kokia kryptimi, tai ir atakos kampas gali keistis nuo -180° iki 180° . Esant vertikaliai leidimuisi $A = 90^\circ$, kilimui – $A = -90^\circ$.



1.7 pav. Atakos kampas šiuo atveju yra α

Idealiuotu sraigtu yra laikomas toks sraigto, kuriam besisukant nėra atsižvelgiama į trinties nuostolius ir srovių užsisukimą už sraigto. Ašinio pratekėjimo režimu yra vadinamas toks režimas, kurio metu oro srovė yra nukreipta išilgai sraigto sukimosi ašiai. Tokiu atveju sraigto atakos kampas yra 90° laipsnių. Esant šiam režimui sraigto dirba kybant, vertikaliai kyla arba vertikaliai leidžiantis. Sraigto įtraukia orą U_1 greičiu ir išstumia jį U_2 greičiu. Šie greičiai vadinami induktyviaisiais greičiais. Jeigu srovės, kuri apteka sraigto, greitis lygus V , tai prieš sraigto jis tampa lygus $V + U_1$, o už sraigto – $V + U_2$. Oro masė, praeidama per R_{OM} įgauna pagreitį j veikiant jėgai F , kurią sudaro sraigto. Remiantis trečiuoju mechanikos dėsniu, tokio paties dydžio, tačiau priešinga jėga T oras veikia patį sraigto. T , kaip minėta anksčiau, yra keliamoji (traukos) sraigto jėga. Remiantis antruoju mechanikos dėsniu $T = m \cdot j$. Oro, kuris praeina per R_{OM} , galima nustatyti dauginant tankį iš tūrio. N. E. Žukovskis teoriškai įrodė ir eksperimentais pagrindė, jog induktyvus išstūmimo greitis dvigubai didesnis nei įtraukimo greitis ($U_1 = 0,5 \cdot U_2$). Kitaip tariant, induktyvus sraigto disko greitis lygus pusei viso greičio padidėjimo, kuris gaunamas oro srovei praeinant per sraigto. Induktyvus greitis yra nustatomas eksperimentiniu būdu ir lygus 8-15 m/s.

Iš gautos traukos jėgos formulės gauname, jog keliamoji (traukos) sraigto jėga priklauso nuo oro tankio, sraigto apimamos plokštumos ir induktyvaus oro įtraukimo greičio. Kylant skrydžio aukščiui arba kylant temperatūrai oro tankis, o tuo pačiu ir traukos jėga, mažėja. Didinant apsisukimus ir sraigto žingsnį induktyvus greitis U_1 (taip pat ir sraigto traukos jėga) kyla.

Sraigto traukos jėga gali būti gaunama ir kitu būdu. Galima sudėti aerodinamines jėgas, kurias sudaro atskiros mentės, kadangi oro srautų praėjimas per jas yra analogiškas oro praėjimui per sparną. Skirtumas tik tas, kad mentė juda ne tiesiogiai horizontaliai, o sukdamasi, todėl jos visi skerspjūviai skirtingais greičiais. Todėl aerodinaminė jėga, kurią sudaro mentė, turi būti skaičiuojama kaip aerodinaminių jėgų, veikiančių kiekvieną skerspjūvį, suma [8].

Įvorės jėga H gaunama iš horizontaliai sraigto elementus veikiančių jėgų.

$$\begin{cases} H = C_H \rho A (\Omega R_{rad})^2 \\ \frac{C_H}{\sigma a} = \frac{1}{4a} \mu \overline{C_d} + \frac{1}{4} \lambda \mu \left(\theta_0 - \frac{\theta_{t\omega}}{2} \right) \end{cases} \quad (27)$$

čia C_H – įvorės jėgos koeficientas;

ρ – oro tankis, kg/m^3 ;

A – mentės apimamas plotas, m^2 ;

R_{rad} – sraigto spindulys, m ;

Ω – mentės atakos kampo koeficientas;

σ – stiprumo koeficientas;

α – pakilimo nuolydis;

μ – mentės poslinkio koeficientas;

C_d – slydimo koeficientas;

λ – įtekančio srauto koeficientas;

θ_0 – nuolydžio koeficientas;

$\theta_{t\omega}$ – sukamasis pokrypis.

Pasipriešinimo momentas – momentas, kuris susidaro aplink sraigto ašį aerodinaminėms jėgoms veikiant sraigto elementus. Horizontalios jėgos, veikiančios sraigto, yra padauginamos iš momento peties ir integruojamos per sraigto. Pasipriešinimo momentas nurodo, kokios jėgos reikia sraigtui sukti.

$$\begin{cases} Q = C_Q \rho A (\Omega R_{rad})^2 R_{rad} \\ \frac{C_Q}{\sigma a} = \frac{1}{8a} (1 + \mu^2) \overline{C_d} + \lambda \left(\frac{1}{6} \theta_0 - \frac{1}{8} \theta_{t\omega} - \frac{1}{4} \lambda \right) \end{cases} \quad (28)$$

čia C_Q – slydimo koeficientas.

Sukimosi momentas propelereje egzistuoja orlaiviui skrendant į priekį, kai priekinė besisukančioji mentė sukuria daugiau kėlimo jėgos negu atgal besisukančioji. Skaičiuojant vykdomas integravimas kėlimo jėgos integravimas pagal visą sraigto imant duotą spindulį (ne menčių spindulį, ne sukimosi matricą R ir ne visą sukimosi momentą, kuris yra sukuriamas dėl daugelio kitų efektų) [9].

$$\begin{cases} R_m = C_{R_m} \rho A (\Omega R_{rad})^2 R_{rad} \\ \frac{C_{R_m}}{\sigma a} = -\mu \left(\frac{1}{6} \theta_0 - \frac{1}{8} \theta_{t\omega} - \frac{1}{8} \lambda \right) \end{cases} \quad (29)$$

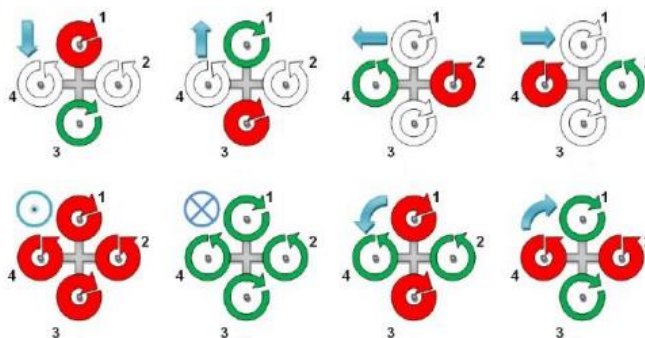
čia R_m – sukimosi momentas;

C_{R_m} – sukimosi momento koeficientas.

Šių parametų nustatymo pakankama skrydžio savybių prognozavimui ir tolesniam drono projektavimui. Dauguma formulų, taikomų kvadrokopteriu, tinka ir kito sraigčių skaičiaus dronams, pvz.: heksakopteriams.

1.2. Kvadrokopterių valdymas ir pagrindinių charakteristikų nustatymas

Kvadrokopteris yra orlaivis, kuris yra sunkesnis už orą, galintis vertikaliai kilti ir leistis (angl. *VTOL*) ir varomas keturių besusisukančių sraigčių, kurie yra išdėstyti toje pačioje plokštumoje ir eina lygiagrečiai žemės paviršiui. Kitaip, nei įprastiniai sraigtasparniai, kvadrokopteris naudoja fiksuoto žingsnio sraigtus ir reikiamas jo skridimo greitis ir trajektorija yra išgaunama varijuojant kiekvieno iš sraigčių greičiu (1.8 pav.). Įprastiniame kvadrokopterio variante, priešais esantys sraigčiai juda viena kryptimi, pavyzdžiui, pirmas ir trečias juda pagal laikrodžio rodyklę, tuo tarpu antras ir ketvirtas sukasi priešinga kryptimi (1.8 pav.). Ši sąlyga yra būtina, nes taip užtikrinama, jog sukimo momentas, kuris sukuriama vienos poros, yra priešingas tam sukimo momentui, kurį sudaro kita pora. Taip išlaikoma simetriška kvadrokopterio kontrolė ir būtent dėl šio aspekto atsiranda dar keletas reikalavimų kvadrokopterio konstrukcijai: būtina absoliuti kvadrokopterio konstrukcijos simetrija, masės centro neutralumas, t.y. masės centras turi būti visiškame plokštumos, lygiagrečios kvadrokopterio plokštumai, centre. Slenkamasis judėjimas (išskyrus aukščio pokytį) išgaunamas keičiant kažkurios iš porų greičius ir taip sudarant pasisukimo kampą. Sukamasis judėjimas ir aukščio keitimas yra išgaunamas reguliuojant visų sraigčių kampinį greitį [10].



1.8 pav. Įprastinio kvadrokopterio galimi judėjimo variantai [10]

Svoris, kvadrokopterio modelis ir konstrukcija bei energijos šaltinis yra pagrindiniai faktoriai, kurie lemia jo maksimalų kilimo aukštį, taip pat skrydžio trukmę ir atstumą bei maksimalią apkrovą. Taigi, svarbi kategorija yra apkrovos tipai. Vienas iš tipų – sensoriai (arba jutikliai). Jie gali būti įvairūs. Dažniausias jutiklis, kurį transportuoja dronas, yra kamera. Dažniausiai gamintojai kameras bei mikrofonus įmontuoja jau gamindami kvadrokopterį, tačiau tikrai ne visi kvadrokopteriai turi kameras su mikrofonais komplektacijoje. Beje, kameros gali būti paprastos ir infraraudonųjų spindulių, taip pat gali būti su naktinio matymo arba šilumos aptikimo funkcijomis. Taip pat gali būti tvirtinami biologiniai sensoriai, kurie aptinka mikroorganizmus, cheminiai jutikliai, kurie gali aptikti cheminius junginius bei matuoti jų koncentraciją, taip pat aptinka ir radioaktyvius junginius. Dar egzistuoja meteorologiniai jutikliai, kurie gali matuoti oro sąlygas – slėgį, vėją, temperatūrą, drėgmę ir pan. Dėl krovinių tipo skiriasi ir paties kvadrokopterio panaudojimo galimybės – turintys paprastą kamerą kvadrokopteriai gali būti naudojami stebėjimui, šiluminę – žmonių paieškai, cheminių elementų aptikimo galimybę turintys orlaiviai – oro taršai matuoti, meteorologinius matavimus atliekantys – orų prognozei ir t.t. Be paminėtų krovinių gali būti ir kitokie, kurie nesusiję su kokios

nors informacijos gavimu ir nėra jautikliai. Pavyzdžiui, auga susidomėjimas ir šiuo metu yra vystomi projektai dronų panaudojimui internetinių parduotuvių prekių pristatymui (pvz.: Amazon.net), taip pat dronai jau yra naudojami medicininių, karinių krovinių pervežimui bei kartais yra naudojami kaip „laikikliai“, pavyzdžiui, Wi-Fi saitvietės [11].

Šiame darbe aprašomas ir projektuojamas dronas priklauso III dronų grupei, nes yra numatyta 160-200 kg apkrova. Taigi, darbinis aukštis bus iki 5 km, greitis – iki 250 mazgų. Tokiems svoriams kelti geriausia rinkti X (keturių sraigčių), šešiakampio (šešių sraigčių) arba aštuonkampio (aštuonių sraigčių) formos korpusą, nes būtent šie korpusai pasižymi didele keliamąja jėga, stabilumu kylant, leidžiantis bei judant ore. Šiuo atveju pasirenkamas šešių sraigčių korpusas.

Orlaivio maksimalų krovinių svorį (arba keliamąją galią) – galima apskaičiuoti remiantis tokia paprasta formule:

$$m_{k\acute{e}l.} = (T * n * w) - m_{kv.} \quad (30)$$

čia T – variklio traukos jėga, gramais (verčiama iš N);

n – sraigčių skaičius, šiuo atveju 6;

w – reikiamas apsukų kiekis skrydžiui vykdyti, %

$m_{kv.}$ – orlaivio svoris, g [12].

Pagal šią formulę yra aišku, jog paties drono svoris yra vienas iš lemiamų parametrų skaičiuojant orlaivio keliamąją jėgą – kuo šis svoris didesnis, tuo keliamoji jėga mažesnė. Todėl kaip ir visoje aviacijoje, taip ir dronų projektavime stengiamasi orlaivį gaminti kuo lengvesnį, todėl konstrukcija yra lengvinama kiek įmanoma labiau, tačiau nuo to neturi mažėti konstrukcijos patvarumas (t.y. konstrukcija turi išlaikyti tiek nešamą svorį, tiek atlaikyti sraigčių sukeliamas vibracijas, tiek būti patvari vėjo ir kitų nepalankių sąlygų atveju) ir turi būti galimybė panaudoti reikiamos galios variklius. Pavyzdžiui, vienas iš panašios keliamosios galios dronų norvegų gamybos GRIFF 300 (keliamoji galia – iki 225 kg) yra pagaminta iš aliuminio, o sraigčių propeleriai – iš karbono. Karbonas sraigčių gamybai yra pasirinktas tam, kad sumažinti bendrą sraigčių masę neprarandant sraigto bendro galingumo. Nors pats dronas sveria nemažai – apie 75 kg, tačiau jis gali pakelti tris kartus už save didesnę svorį. Taigi, konstrukcijos lengvumas ir medžiagų pasirinkimas yra labai svarbu norint padidinti keliamąją galią.

Keliamosios jėgos koeficientas:

$$C_L = \frac{L}{qS} = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho u^2 S} = \frac{2L}{\rho u^2 S} \quad (31)$$

čia L – keliamoji galia;

S – paviršiaus plotas;

q – dinaminis slėgis;

u – srauto greitis;

ρ – oro tankis [12].

1.3. Jutikliai

Bekolektoriniai varikliai dažniausiai būna trifaziai. Tiesiogiai nuo nuolatinės įtampos maitinimo šaltinio jie neveikia, tad reikalingi EGR (elektroniniai greičio reguliatoriai). Jie generuoja seriją (priklausomai nuo fazių skaičiaus) aukštadažnių signalų, kurie priverčia variklio veleną sukstis. Priklausomai nuo variklio energijos suvartojimo, EGR turi turėti tam tikrą elektros laidumą.

Įprastai EGR veikia kaip galingumo reguliatorius, kuris paverčia įtampą nuo maitinimo šaltinio į trifazę maitinimą bekolektoriniams drono varikliams. Kiekvienas EGR valdomas PPM (pulse position modulation) signalais, kurie panašūs į PWM (pulse width) moduliaciją.

PPM metodas paremtas turinčių vienodą ilgį impulsų eile, kurie vienas nuo kito išdėstyti skirtinguose laikų perioduose. Šių periodų dydžiai nusako koduojamas reikšmes. Impulsų grupės susijungia į taip vadinamus framus (paketus).

LiPo maitinimo šaltiniai standartiškai turi 3.7 V išėjimo įtampą. Nuosekliai sujungiant elementus galima didinti itampą iki reikiamos.

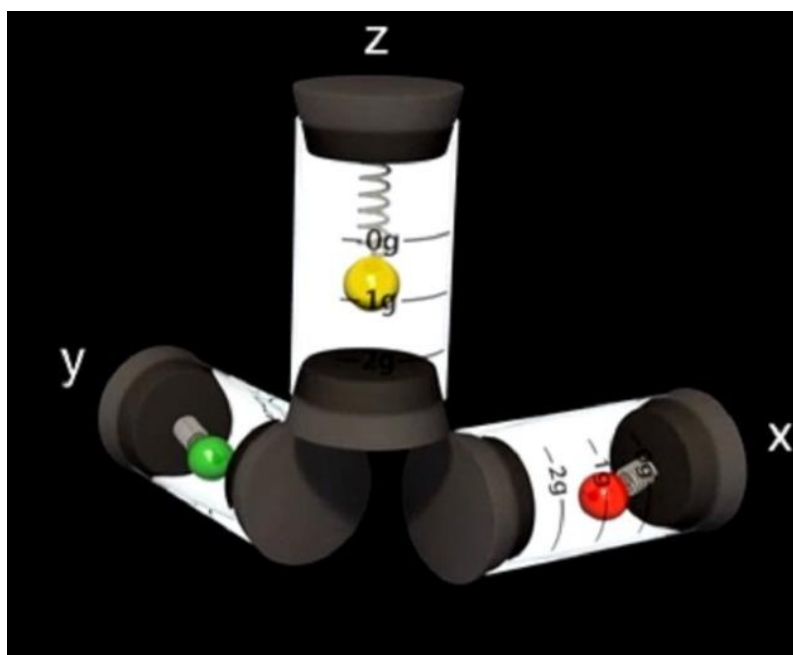
Parenkant baterijos dydį ir elementų skaičių joje reikia įvertinti, kokios talpos reikia, įvertinti, kiek elektros sunaudojo varikliai, kokį laiką norime skraidyti, kokią įtaką turės baterijos svoris visam dronui. Taip pat parenkant bateriją reikia įvertinti, kokį iškrovimo laipsnį C ji turi.

Kartu su baterijos talpa ši kintamoji nusako maksimalią elektros srovę galima gauti iš baterijos.

Maksimali srovė, kurią atiduoda maitinimo šaltinis, gali būti apskaičiuojama taip:

$$M_{to} = \text{akumulatoriaus talpa} \times \text{iškrovos lygis} \quad (32)$$

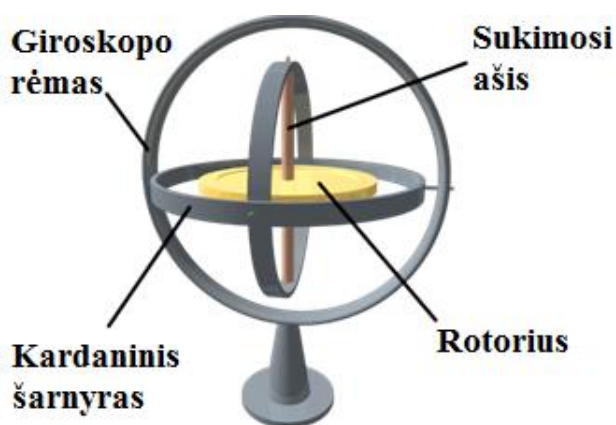
IMK (inertinio matavimo komplekso) veikimo principas – akselerometras (pagreičio jutiklis), skirtas išmatuoti pagreičio skirtumus ir gravitacijos sudedamąsias. Kadangi akselerometras turi tris matavimo ašis, mes galime naudoti jį drono esamos orientacijos aptikimui (1.9 pav.).



1.9 pav. Inertinio matavimo komplekso primityvi schema [13]

Naudojant drono konstrukcijoje tik pagreičio jutiklius, mes galėsime aparato orientaciją žemės paviršiaus atžvilgiu. Bet akcelerometras yra labai jautrus ir kartais dėl netikslių jutiklių ir dėl variklių vibracijos gali perduoti netikslius duomenis, kas gali sukelti orientacijos praradimą. Išspręsti šiai problemai naudojami giroskopiniai jutikliai. Apdirbant duomenis iš abiejų jutiklių mes galime įvertinti paklaidas, atsirandančias dėl vibracijų [13].

Giroskopas – prietaisas, naudojamas prietaiso sukimuisi nustatyti. Bendru atveju giroskopas yra bet koks greitai galintis suktis ir erdvėje keisti savo ašies kryptį kietas kūnas. Tačiau dažniausiai tai yra skridinys su ašimi, kurios kryptis laisvai kinta. Įsuktas giroskopas priešinasi įvairioms jėgoms (pvz. sunkio), kurios veikia jo ašį, ir visada stengiasi išlaikyti pusiausvyrą. Pavyzdžiui, giroskopinis kompasas turi giroskopą, kurio ašis, nukrypsta šiaurės kryptimi ją įsukus [14]. Giroskopai turi tendenciją sukaupti kurso paklaidą. Tai priveda prie to, kad sukimosi metu giroskopas tiksliai nusako kampinį greitį, bet po sustojimo nebūtinai anuliuoja savo parodymus. Dėl to geriausia naudoti dviejų tipų jutiklius.



1.10 pav. Giroskopo sandara [14]

Akselerometras – prietaisas, matuojantis pagreitį. Šiuolaikiniai akcelerometrai yra maži įtaisai, kurių viduje yra nejudanti dalis ir judanti masė. Kai atsiranda konstrukcijos judesys, masė sujuda ir kontaktai, esantys ant masės, persistumia nejudančios masės atžvilgiu ir taip yra fiksuojamas pagreitis. Pagal konstrukciją akcelerometrai skirstomi į vienikomponentinius, dvikomponentinius ir trikomponentinius. Atitinkamai jie gali matuoti pagreitį vienai, dviem arba trimis ašimis.

Akselerometras gali būti naudojamas absoliutaus linijinio pagreičio projekcijos matavimui (jeigu yra žinomas gravitacinio pagreičio dydis ir kryptis tam tikrame erdvės taške), taip pat – gretutiniams gravitacinio pagreičio matavimams (kai akcelerometras nejuda gravitacinėje erdvėje). Pirmoji savybė yra naudojama inercinių navigacinių sistemų kūrimui, kur akcelerometro gauti parodymai yra integruojami, gaunant inertinį greitį ir akcelerometrą nešančio aparato koordinates. Taigi, akcelerometrai ir giroskopai yra nepakeičiami navigacinių sistemų elementai, kurie būtini orlaivių valdymui. Antroji savybė leidžia naudoti akcelerometrus pokrypių matavimams bei gravimetrijai. Tačiau akcelerometras negali fiksuoti slydimo pagal kursą, taip, kaip fiksuoja kreno kampą ir tangažą. Tam į droną įvedamas magnetometras.

Magnetometras išmatuoja ir keičia magnetinio lauko kryptį ir dydį. Jis gali nustatyti mūsų aparato skridimo kryptį ir nustatyti, kur randasi šiaurės ir pietų laukai. Nuokrypio kampą nuo Žemės magnetinio lauko, atsižvelgiant į kampinių greičių posūkius pagal horizontalę, gautus nuo

giroskopinio jutiklio, naudojamas aptikti stabilų kurso kampą [13]. Apskritai magnetometras yra skirtas magnetinių laukų parametrų ir medžiagų magnetinių savybių matavimui. Magnetiniu lauku galima būtų vadinti elektromagnetinio lauko atsiradimą dėl judančių įkrautų dalelių ir elektromagnetinio lauko pokyčio bei sudarant jėginį poveikį judančioms įkrautoms dalelėms arba laidininkams elektros srove.

Pagrindinis fizikinis dydis – magnetinė indukcija, kuri nusako magnetinio lauko jėgų sąveika konkrečiame lauko taške. Magnetinė indukcija yra vektorinis dydis, kuris yra išreiškiamas vektoriumi \vec{B} , kuris turi kryptį, sutampančią su jėgos linija, einančia iš bet kurio lauko taško, kadangi magnetinis laukas gali būti išreikštas per magnetinės indukcijos (jėgų) linijas.

Pirmiausia, akselerometras negali atsekti tolygaus sukimosi plokštumoje statmenai vektoriui g . Jeigu kvadrokopterio pagreitį laikyti mažu lyginant su laisvojo kritimo pagreičiu g , galima gauti krieno ir tangažo kampus pagal akselerometro parodymus. Bet praktinis naudojimas parodo, kad akselerometro paklaidos kartu su vibracijomis nuo besisukančių sraigčių ir savais kvadrokopterio pagreičiais neleidžia nustatyti kampų su reikiamu tikslumu stabilizacijai. Jeigu naudoti tam tikros jėgos filtraciją signalu sutankinimui, atsiranda daviklio parodymų paklaidos, kurios trukdo savalaikiui reagavimui į skraidančio aparato padėties pokyčius. Be to, esant dideliame sutankinimui, prarandama informacija apie neženklius kampų pokyčius. Todėl stabilizacijai reikia naudoti ir akselerometrą bei giroskopą.

Stabilizacijai skirta programa gauna krieno ir tangažo kampus ir padaro variklio galingumų korekciją tam, kad nebūtų galimo nuokrypio. Tam tikslui naudojamas PID reguliatorius. PID algoritmas, kuris dydžio nuokrypio pagrindu (kuriame reikia stabilizacijos) padaro korekciją tam tikriems varikliams. Jeigu laikyti nuokrypį nuo reikiamo dydžio laiku t lygiu $e(t)$, tai 33 formulė išreiškia reikiamą korekciją.

PID reguliatorius yra grįžtamojo ryšio mechanizmas, kuris naudojamas kontrolės sistemose. PID reguliatorius skirtas nuolatiniame skirtumo tarp išmatuotos ir nustatytos pozicijos matavimui. Pagal išmatuotą skirtumą šis reguliatorius padaro korekcijas, remiantis trimis parametrais - proporciniu (P), integruojančiu (I) ir diferencijuojančiu (D). Reguliatorius kompensuoja esamą paklaidą, keičiant valdymo kintamąjį pagal 33 formulę [15]:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (33)$$

čia K_p, K_i, K_d yra koeficientai, nusakantys proporcinės, integruojančios ir diferencijuojančios paklaidos įtaką.

Giroskopas ir PID reguliatorius yra naudojami stabilizuoti drono padėtį erdvėje, mažinant arba didinant variklio apsakas. Stabilizacija vyksta trimis ašimis.

Akselerometras ir giroskopas išdėstyti ant plokštės taip, kad jų ašys būtų nukreiptos taip, kaip drono ašys. Tokiu atveju atstatomi kampai yra nuokrypiai nuo stabilumo padėties. Kad drono stabilizavimo metu neprarastų aukščio, sraigčių traukos jėgos suma turi išsisaugoti esant savavališkam nuokrypiui.

Projektuojamas dronas yra suprojektuotas su specialiu tilteliu žmogui įlipti, todėl stabilizavimo algoritmas numato prieš žmogui įlipant nukreipti droną 25 laipsnių kampu į apačią sumažinus variklių prie tilto apsisukimus ir padidinus iš priešingos pusės, taip pat žmogui lipant variklių trauka

persiduoda nuo galinių link priekinių ir išsilygina tam, kad dronas neapsiverstų žmogui lipant. Šis algoritmas yra įjungiamas operatoriaus.

Failsafe funkcija – dingus valdymo signalui dėl kliūtis arba esant dideliui nuotoliui, eterio trikdžiams arba valdymo sistemos gedimui, turi būti numatytas vienas iš šių scenarijų:

- išsaugoti paskutinius valdymo parametrus ir vykdyti juos,
- atlikti tam tikrus iš anksto užprogramuotus veiksmus

Pirmas variantas gan pavojingas ilgai apsaugai: jeigu signalo dingimo metu aparatas skrido dideliu greičiu arba pakilo labai aukštai, tai jis skris taip pat toliau ir gali nuskristi labai toli ir dingti arba padaryti žalą aplinkiniams. Todėl toks apsaugos variantas įmontuotas į skaitmeninio imtuvo logiką ir automatiškai suveikia esant trumpam kelių paketų iškritimui.

Antras variantas mažiau pavojingesnis ir labiau tinka, kai signalas dingsta ilgesniam laikui ir leidžia realizuoti skirtingus algoritmus, sumažinti nuostolį. Jos realizacija priklauso nuo drono komplektacijos:

Be GPS: Akseleratoriaus signalas nustatomas į gan greitą padėtį, bet saugią nusileidimui, kad drono nenuneštų toli oro srautai, o tūpimo metu pažeidimai būtų minimalūs. Padėties signalai nustatomi į neutralią padėtį (horizontalią), įsijungia horizonto autostabilizavimosi režimas. Aukščio palaikymo režimas (pagal barometrą) atsijungia automatiškai, arba įsijungia minimalaus aukščio palaikymo režimas, jeigu dronas pakimba ne žemiau numatyto aukščio. Jeigu yra švyturėlis, jis turi būti įjungtas. Galiausiai, kai įjungiamas Failsafe režimas, dronas turi sustoti, išsilyginti, ir sąlyginai saugiai nusileisti.

Su GPS: akseleratoriaus signalas nustatomas į kabojimo padėtį. Padėties valdymo signalai nustatomi į vidutinę padėtį (horizontalią), įsijungia horizonto autostabilizavimo režimas. Įsijungia funkcija “Grįžimas namo”. Įsijungia barometras, kontrolės programoje turi būti įrašytas aukščio parametras, ties kuriuo vyksta grįžimas prie pradinio taško ir aukščio, ant kurio dronas pakibs po sugrįžimo [16].

Kamera privalo būti drono, naudojamo žmonių gelbėjimui, sudedamoji dalis. Pirmiausia, kamera padeda valdyti droną jo nematant, antra, ji gali būti naudinga ieškant žmonių, jeigu turi naktinio matymo ir termovizoriaus funkciją. Galimai tokia kamera gali sudaryti nemažą gamybos kaštų dalį bei galimai reikalaus papildomų energijos sąnaudų, tačiau padidins drono potencialą ir tinkamumą specialioms operacijoms.

Mikrofonas reikalingas susisiekti su nukentėjusiuoju. LED ir signalizatorius leidžia indukuoti, jog dronas gauna maitinimą – LED užsidega, o signalizatorius skleidžia signalą įjungus droną.

Video siųstuvai naudojami vaizdo perdavimui iš kameros operatoriumi, kuris siųstuvo pagalba gali stebėti drono kameros matomą vaizdą realiu laiku. Video siųstuvai parenkami pagal galingumą ir duomenų perdavimo atstumą. Darbo dažniai – 1,2, 2,4, 5,8 GHz ir kiti. 25 MW galingumo video siųstuvai tinka naudoti vidaus patalpose, 200 MW tinkamas daugeliui užduočių ir 600 MW tinka tolimiems atstumams. Norint padidinti veikimo spindulį, pavyzdžiui, du kartus, eikia padidinti galingumą keturis kartus.

Radijo imtuvas skirtas priimti signalą iš operatoriaus valdomo valdymo pultelio. Į droną ateinantis signalas yra užšifruotas, todėl reikalingas dekoderis tam, kad jį atkoduoti. Energijos paskirstymo modulis (PDB) skirtas energijos naudojimui tarp jutiklių ir kitos aparatūros paskirstyti. Skrydžio kontrolieris – mechanizmas, perduodantis iš radijo imtuvo ateinantį operatoriaus pultu siunčiamą signalą į variklius ir tokiu būdu reguliuojantis variklių greitį.

OSD (On Screen Display) – leidžia matyti informaciją apie drono būklę kartu stebint ir kameros matomą vaizdą, t.y. ant kameros rodomo vaizdo uždeda „plėvelę“ su duomenimis. Inercinis matavimo sensorius (IMU) matuoja giroskopo, akselerometro ir kitų jutiklių rodmenis. Jutiklių duomenų jutiklis gauna informaciją iš visų jutiklių (iš IMU), ją sistemina ir perduoda ją PID reguliatoriui.

1.4. Programinės įrangos, skirtos aerodinaminėms charakteristikoms skaičiuoti, analizė

Projektuojant bet kokį orlaivį galima naudoti įvairią programinę įrangą ir atlikti įvairių procesų, vykstančių orlaivyje, analizę. Programoje yra suprojektuojamas norimas tikslus orlaivio modelis ir atliekama orlaivio analizė. Programų yra daug ir įvairių, vienos iš plačiausiai žinomų ir naudojamų yra XFLR5, Ansys, SolidWorks bei Xfoil.

Ansys turi daug versijų, žinomiausios – CFX ir Fluent. Ansys yra daugiau skirta sudėtingesniai projektavimui atlikti dėl to, kad turi daugiau funkcijų. Paprastiems, nedideliems skaičiavimams yra geriau naudoti Xfoil programą, kuri pati yra paprastesnė ir dirba greičiau.

Xfoil tai interaktyvi programa, skirta izoliuotų ikigarsinio greičio profilių modeliavimui bei analizei. Programa yra išleista pagal GNU General Public License, todėl ji yra nemokama ir viešai prieinama. Programos meniu yra gana lengvas, todėl susipažinti su programine įranga bei išmokti naudotis šia priemone yra nesudėtinga. Šios programos meniu turi pakankamai reikalingų funkcijų tokių kaip:

- Klampi arba neklampi analizė egzistuojančio profilio, suteikianti (leidžianti):
- Priverstinį arba laisvą perėjimą;
- Perėjimo srovėje sūkuriai (burbulai);
- Ribotas galinio krašto atskyrimas;
- Kilimo ir traukimo prognozės už CLmax ribų;
- Karman-Tsien suspaudimo korekciją;
- Fiksavimas įvairių Reinoldso bei Macho parodymus.

Profiliu modeliavimas bei redagavimas modifikuojant paviršinių greičių išdėstymą dviem būdais:

- Pilnai atvirkštinis metodas, remiantis kompleksinio atvaizdo formuluote;
- Maišytas atvirkštinis metodas, pagrindinio Xfoil skydo praplėtimas.

Aerodinaminio profilio perdarymas geometrinių parametrų interaktyvios modifikacijos būdu, tokiu kaip:

- Maksimalus storis ir išgaubimas, viršutinio taško padėtis;

- LE spindulys, TE storis;
- Išgaubimo linija pagal geometrijos specifikacijas;
- Išgaubimo linija pagal apkrovimo specifikacijos pokytį;
- Užsparnių nuokrypis;
- Tiksliai kontūro geometrija (pelės pagalba);
- Aerodinaminių profilių mišravimas;
- Aerodinaminio profilio koordinačių ir poliarės įrašymas bei skaitymas;
- Geometrijos pastatymas, slėgių paskirtymas ir daugybė poliarių [17].

Iš visų trijų paminėtų programų lengviausiai naudojama (arba labiausiai *user-friendly* (angl. *vartotojui draugiška*)) yra XFLR5 programa. Ji parašyta C++ kodu ir iš esmės remiasi paminėta Xfoil programa. Po to seka Xfoil, ir pati sunkiausia iš populiariausių yra Ansys Fluent. Ji reikalauja patirties ir įgūdžių, nes turi pakankamai nemažai funkcijų.

Xfoil ir XFLR5 puikios tuo, kad jomis galima atlikti ganėtinai paprastus skaičiavimus bei rasti uždavinių sprendimus ir tam nebūtina žinoti labai daug tiriamo objekto parametrų. Tuo tarpu dirbant su Ansys Fluent reikia atkreipti dėmesį į daug parametrų, nes vieno parametro neįrašymas-netiksclus įrašymas arba ne to skaičiavimo režimo pasirinkimas gali stipriai iškreipti rezultatus. Iš to galima daryti išvadą, jog Ansys Fluent daugumoje atvejų duos geresnius ir labiau realybę atitinkančius rezultatus, negu kitos dvi programos.

Pavyzdžiui, norint atlikti slydimo koeficiento ir kilimo koeficiento variacijos analizę nekreipiant dėmesio į statinį arba dinaminį keliamosios jėgos kritimą, galima naudoti Xfoil. Tai reiškia, jog paminėtų dviejų sąlygų įvesti net nereikės, bet programa pateiks apytikriai realybę atitinkančius duomenis. Bet norint išanalizuoti po sparnu kilimo metu susidarantį sūkurines oro sroves bei dinaminį keliamosios jėgos kritimą 2D modeliui ir 3D modeliui jau reikėtų ANSYS Fluent.

Visos šios programos gali ir yra tinkamos spręsti uždavinius, kada Reinoldso skaičius yra didelis (t.y. yra turbulencinė oro srovė). Nors dauguma naudotojų laikosi nuomonės, kad XFLR5 programa labiau tinka skaičiavimams esant žemiems Reinoldso skaičiams, tačiau naudojantis ja galima Reinoldso skaičių keisti į bet kokį skaičiuojant paribio sluoksnį. Tačiau verta atkreipti dėmesį į perėjimo tašką. Deja, nėra jokio teorinio modelio, kuris leistų tiksliai įvertinti perėjimą esant dideliame Reinoldso skaičiui, kadangi tai priklauso ne tik nuo aerodinaminio profilio formos, bet ir nuo paviršiaus šiurkštumo. Perėjimo taškas turi nedidelį poveikį kėlimo ir slydimo momentui, bet jo įtaka pasipriešinimui gali būti lemiamą. Todėl verta tą turėti omenyje. XFLR5 naudoja empirinį metodą perėjimo taško skaičiavimui, vadinamą e^N . Praktikoje šis metodas paprastai duoda tinkamus ir pakankamai tikslius rezultatus. Bet kuriuo atveju, XFLR5 tinka skaičiavimams esant bet kokiam Reinoldso skaičiui, tol, kol modelis yra savaime nesisukantis.

Kaip jau minėta ir anksčiau, tokiems pat parametrams skaičiuoti tinka ir Xfoil, bet jis yra šiek tiek sudėtingesnis, negu XFLR5. Tiek XFLR5, tiek Xfoil naudoja semianalitinį (panel) metodą analizei.

Tiek XLFR5, tiek Xfoil, tiek ANSYS Fluent analizių rezultatai priklauso nuo to, kokie skaičiavimo metodai yra parinkti. Be Panel metodo, XLFR5 dar turi VLM ir LLT metodus. Pastarieji gali skirtis ANSYS Fluent taip pat turi labai didelį spektrą analizės atlikimo režimų.

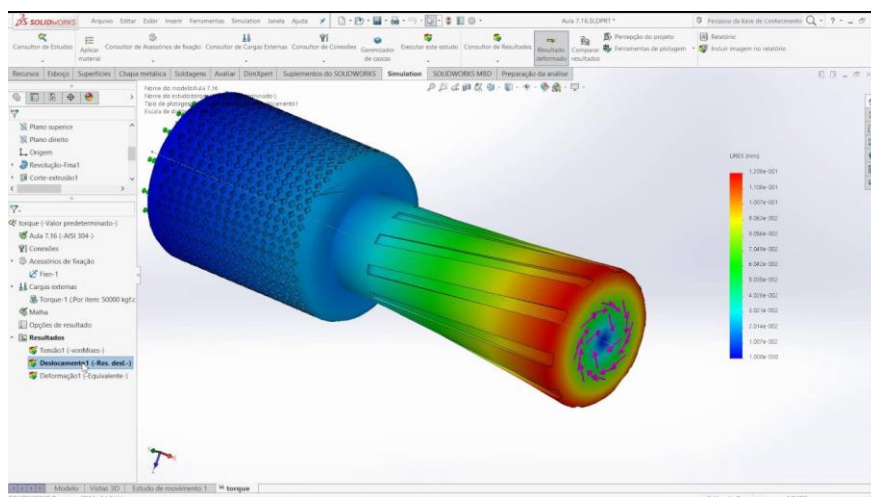
SolidWorks – kompiuterinio projektavimo programa, kuri skirta erdviniam kūnams projektuoti. Šia programa galima lengvai realizuoti sukurtas konstrukcijas virtualioje trimatėje erdvėje, atlikti detalizavimą, stiprumo bandymus ir kitus svarbius projektavimo žingsnius. Galima dirbti trijų rūšių aplinkose – Part, skirtoje kurti detalėms, Assembly, skirtoje jungti detalėms (būtent ši aplinka yra panaudojama kuriant droną) į vieną mechanizmą, bei Drawing, skirtoje dvimačių detalių vaizdams kurti.

Šio programos pliusai:

1. Paprasta vartotojui;
2. Failai gali būti naudojami ir kitose programose, pvz.: ANSYS arba SOLID CAM;
3. Kompleksinės dinaminės analizės atlikimo galimybės;
4. Galima modeliuoti kompleksines arba daugiasluksnes medžiagas;
5. Skaičiavimų rezultatai pakankamai atitinka realybę;

Trūkumai:

1. Nėra ergonomikos modulio;
2. Projektai gali būti per elementarūs pažengusiam naudotojui ir neišpildyti jo lūkesčių.



1.11 pav. Stipruminio bandymo pavyzdys su SolidWorks

Nepaisant trūkumų, SolidWorks plačiai naudojama įvairioms sudėtingoms konstrukcijomis braižyti bei jų stipruminiams bandymams atlikti. Ši programa bus naudojama ir šiame darbe.

Ecalc – elektroniniams įvairių orlaivių skaičiavimas atlikti skirta internetinė (angl. online) programa. Joje galima apskaičiuoti maksimalius skrydžio parametrus ir ar orlaivis apskritai galės su jais skristi. Galima nurodyti orlaivio planuojamą svorį, oro temperatūrą ir aplinkos slėgį, akumuliatorius, valdymo modulį, variklius ir propelerius bei išsamius jų parametrus. Tai viena tiksliausių ir

plačiausiai naudojamų programų. Tiesa, verta paminėti, jog verta yra įsigyti pilną versiją, o ne naudotis bandomąja (angl. demo) – pastarojoje aparatūros skaičius yra labai ribotas. Dar vienas minusas – patys programos kūrėjai nurodo, jog galimos iki 15 % paklaidos, kad įpareigoja projektuotoją daryti papildomą patikrinimą.

1.5. Suprojektuoti bei jau naudojami dronai

SKYF – tai pirmasis pasaulyje pramoninis krovininis dronas. Jo pagalba galima gabenti krovinius, aplaistyti laukus bei gesinti gaisrus. Šiuo metu jo naudingojo krovinio masė siekia iki 250 kg. Skrydžio nuotolis iki 350 km (su 50 kg kroviniumi), skrydžio laikas iki 8 val (su 50kg kroviniumi)

Jo pagrindiniai geometriniai parametrai: ilgis – 2200 mm, plotis 5200 mm. Paruošimas skrydžiui užtrunka apie 10 min. Maksimalus pasiekiamas greitis yra 70 km/h. Skrydžio aukštis nuo 5 iki 3000 m. Skrydžio tikslumas iki 30 cm. Kuras naudojamas benzinas A-95 [18].



1.12 pav. SKYF kvadroptelis [18]

Fiuzeliažo forma yra neaptaki vertinant pagal aerodinamikos dėsnius, nes yra kampuota ir plokščia, žiūrint iš apačios. Pagrindiniai nešantys sraigtai yra du, atsijungus vienam, lieka tik vienas, taigi, pagrindinė keliamoji galia tokiu atveju mažėja dvigubai. Sraigtai išdėstyti viršutinėje dalyje, o tai yra privalumas avarinio tūpimo metu, bet nepatogu skraidant uždaroje patalpose.

Griff-300 – tai norvegų sukurtas dronas, galintis pakelti iki 225 kg krovinį. Dronas yra su 8 propeleriais, kiekvienas iš jų sukamas atskiru varikliu. Drono svoris yra 75 kg. Dronas yra sukurtas taip, kad ant jo platformos galima tvirtinti įvairia įrangą, tokia kaip termovizoriai, kameros ir kiti. Kaip nusako gamintojas dronas gali skraidyti iki 40 minučių. Dronas valdomas distanciniu pultu, bet

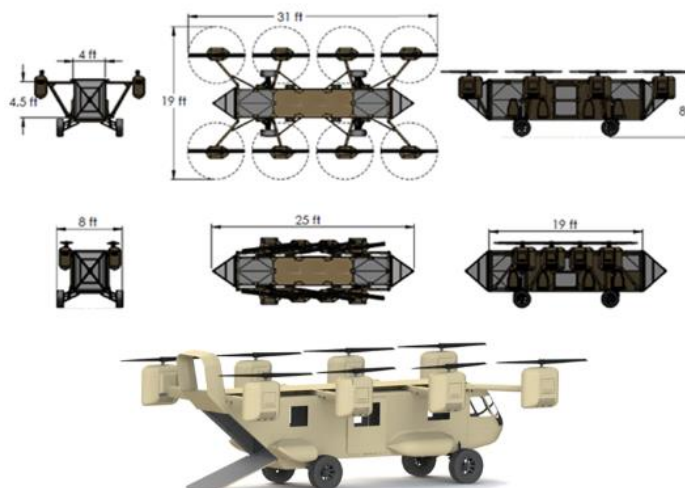
yra galimybė skraidyti su dronu stebint jo skridimo trajektoriją per kameras. Griff-300 jau gavo EASA sertifikata.



1.13 pav. Griff-300 [19]

Fiuzeliažo forma yra neaptaki pagal aerodinamikos dėsnius, kadangi yra kampuota bei plokščia iš apačios. Pagrindiniai nešantieji sraigčiai yra 8, atsijungus vienam, keliamoji jėga sumažėja 12,5 %. Sraigčiai išdėstyti viršutinėje ir apatinėje dalyje, o tai yra blogai avarinio tūpimo metu ir taip pat nepatogu skraidant uždaroje patalpoje arti lubų [19].

The Black Knight Transformer – atrodo lyg būtų iš ateities, tačiau šis dronas jau yra sukurtas Kalifornijoje. Šis dronas – sunkvežimis buvo išbandytas ir ore, ir ant žemės, jis gali ir skraidyti ir važiuoti keliais bei nelygumais, kadangi turi sustiprintą važiuoklę. Jis yra pirmasis tokio tipo dronas skirtas išgelbėti žmones arba sužeistus karius.



1.14 pav. The Black Knight Transformer detalios charakteristikos [20]

Fiuzeliažo forma taip pat yra neaptaki pagal aerodinamikos dėsnius dėl tų pačių priežasčių, kaip ir Griff 300. Sraigtai išdėstyti viršutinėje dalyje, o tai yra pliusas atliekant avarinį tūpimą, tačiau vėlgi nepatogu skraidant uždaroje patalpoje, kur yra lubos. Varikliai yra dyzeliniai, todėl kelia daugiau triukšmo. Kita vertus, jie yra galingesni, vertinant pagal variklio naudingumo koeficientą. Turi važiuoklę, todėl yra galimybė manevruoti po tūpimo. Jo vidinis tūris labai panašus į esamo sraigtasparnio UH-60 Sikorsky Black Hawk, dėl to jis gali būti naudojamas ne tik evakuacijos misijoms, bet ir krovinių gabenimui. Konstrukcija pagaminta kuo įmanoma paprastesne. Tačiau krovinių kabina yra šarvuota, tam, kad gelbėjant kareivius apsaugoti juos.



1.15 pav. The Black Knight Transformer [20]

Dronas taip pat turi įdiegtą programą, kuri automatiškai pakilus dronui į orą iš fronto linijos nusiunčia jį į 32 km nuotolį. Jeigu kareivių būrys yra mieste, kur neįmanoma nusileisti, du kariškiai pažymi drono nusileidimo zoną bei sulaukus nusileidimo atsisėda į kabiną ir rankiniu būdu važiuoja su juo, kaip su sunkvežimiu iki reikiamos vietos. Atvykus į vietą gelbėjant kariškius, kuriems reikia pagalbos viduje yra speciali medicininė įranga. Dronas padarytas iš modulių, kurie yra pigūs bei esant reikalui greitai pakeičiami. Važiuojant žeme naudojamas nepriklausomas variklis, kuris gali išvystyti iki 110 km/h. Taip pat važiuoklė bei kėbulo dugnas gali būti pakeistas pritaikytu vandeniui ir plaukti. Variklių trauka yra apie 720 kg arba iki 8 žmonių [20].

2. Projektinė dalis

2.1. Pradinių drono duomenų nustatymas

Kadangi projektuojamas dronas turi pakelti žmogų, darome prielaidą, jog drono apkrova bus lygi 80 kg. Turint omenyje, jog bus keliamas pakankamai didelis svoris, galima daryti prielaidą, jog ir dronas taip pat turės didelį svorį. Darome prielaidą, jog galutinis svoris bus $185 \text{ kg} + 10 \% \approx 203 \text{ kg}$. Į šį svorį jau yra įskaičiuotas elektroninis greičio reguliatorius, baterijos ir GPS sistemos. Kaip jau minėta, dronas bus pakankamai didelis, taigi, daroma prielaida, jog bendrai jis užims apie 7,25 kvadratinio metro.

Taigi, vienas iš svarbesnių parametrų, kaip jau minėta literatūroje prieš tai, yra traukos koeficientas. Jis skaičiuojamas traukos jėgą dalinant iš svorio. Kuo didesnis traukos koeficientas, tuo dronas yra greitesnio judėjimo. Mūsų projektuojamam dronui itin greito judėjimo nereikia, tačiau jis ir nebus visiškai lėtos reakcijos. Tokiu atveju puikiai tinka 1,8-2 traukos koeficientas.

Taigi, traukos jėgą gauname 2 karto didesnę, negu svorį. Svoris skaičiuojamas pagal elementarią formulę

$$F = m \cdot g = 203 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1991,43 \text{ N} \quad (34)$$

čia F – drono sunkio jėga;

m – drono bendra masė;

g – Žemės traukos jėga.

$$F_{tr} = 1991,43 \cdot 1,8 \text{ N} = 3584,57 \text{ N} \quad (35)$$

čia F_{tr} – traukos jėga.

Variklio keliamosios jėgos skaičiavimas pagal formulę

$$T = [\eta \cdot P^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \rho]^{0,3333}$$

$$T = [0,85 \cdot (51,8 \cdot 142,5 \cdot 0,85)^2 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 1^2 \cdot 1,22]^{0,3333}$$

$$T = [0,85 \cdot (51,8 \cdot 142,5 \cdot 0,85)^2 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 1^2 \cdot 1,22]^{0,3333} = 601,382 \text{ N}$$

$$601,382 \text{ N} = 61,303 \text{ kg} \quad (36)$$

čia T – keliamoji galia (N);

η – propelerio efektyvumas;

P – galia ant veleno (įtampa * srovė * variklio efektyvumas) (W);

R – propelerio skersmuo (m);

ρ – oro tankis $1,22 \text{ kg/m}^3$.

Pagal kėlimo svorį parenkamas variklis Turnigy ROTOMAX 150cc, kadangi tai yra galingiausias variklis, kurį pavyko rasti. Planuojant projektuoti heksakopterį su reikiama 203 kg keliamąja galia, toks variklis, kuris gali kelti 61,303 kg (601,382 N), tinka.

Variklio specifikacijos:

Maksimali naudojama įtampa: 51,8 V

Apsisukimai: 150 kV

Maksimali įtampa: 190 A

Neapkrauto įtampa: 5,2 A

Galia: 9800 W

Svoris: 2530 g

Pirmiausia yra paskaičiuojamas maksimalus sukimosi momentas, kuris gaunamas paėmus variklio galią bei elektrines charakteristikas:

$$\tau_{max} = \frac{P}{Kv \cdot V} = \frac{9800 \text{ W}}{150 \text{ Kv} \cdot 51,8 \text{ V}} * 9,549 = 12,00 \text{ Nm} \quad (37)$$

Daugyba iš 9,549 reikalinga norint gauti atsakymą Nm.



2.1 pav. Turnigy Rotomax 150cc variklis [21]

Toliau yra parenkami propeleriai. Norint apskaičiuoti apsisukimų per minutę greitį, būtina žinoti propelerių galų greitį. Kai propeleriai pasiekia greitį, lygų 85 % garso greičio (331,5 m/s), jų efektyvumas staigiai krenta ir jie pradeda užti daug garsiau, negu prieš tai. Siekiant kiek įmanoma labiau padidinti propelerių efektyvumą tuo pačiu sumažinant propelerių užimą, maksimalus jų galų greitis apskaičiuojamas būtent toks, siekiant kuo geresnių aerodinaminių drono savybių, o naudojant šio greičio reikšmę apskaičiuojamas maksimalus apsisukimų per minutę skaičius.

Propelerio galų sukimosi greitis:

$$V_{max} = 331,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0,85 = 281,76 \text{ m/s} \quad (38)$$

$$T_{max} = 0,7 * 203 \text{ kg} = 142,10 \text{ kg} \quad (39)$$

$$T_{max,prop} = \frac{142,10}{6} = 23,68 \text{ kg} \quad (40)$$

Parenkami anglies pluošto 1 metro propeleriai (H30F 1,00 m L-L-11-2). Imama, jog propelerio galai pasieks maksimalų 281.76 m/s greitį ir apskaičiuojamas maksimalus apsisukimų per minutę skaičius:

$$RPM_{max} = \frac{281,76 \cdot 60}{1 \cdot \pi} = 5383,95 \text{ apsisukimai} \quad (41)$$

Viena mentė sveria apie 880 gramų. Tam, kad padidinti keliamąją galią, bus naudojama 24 ir bendras jų svoris sieks 21,120 kg. Minėtųjų variklių bendras svoris bus 15,18 kg (vienas variklis sveria 2,53 kg, įskaitant laidus ir fiksavimo elementus).

2.2. Energijos sąnaudų skaičiavimas

Pagal gamintojo technines charakteristikas variklio maksimiai darbo įtampa 52 V. Remiantis gamintojo teikiama informacija apie srovės stiprį, kuris yra 190 A ir pridėjus 20 A kitai įrangai (jutikliams, davikliams, imtuvams ir pan.) bei norint gauti skrydžio laiką apie 15 min. reikia parinkti 208205 mAh talpos energijos šaltinį. Galima imti LiPo 22,000 2S 7,4 V Battery Pack bateriją ir paskaičiuojame, kiek baterijų lygiagrečiai reikės sujungti pagal 42 formulę.

$$n = \frac{C_{bendras}}{C_{baterijos}} \quad (42)$$

čia n – baterijų skaičius;

$C_{bendras}$ – bendra reikalinga energijos šaltinio talpa;

$C_{baterijos}$ – baterijos energijos talpa.

$$n = \frac{C_{bendras}}{C_{baterijos}} = \frac{208205}{22000} = 10$$

2S baterija turi 7,4 V įtampą, kai maksimali variklių darbinė įtampa yra 51,8 V. Tokią įtampą galima gauti sujungiant 7 baterijas nuosekliai – gaunama 51,8 V įtampa. Taigi, sujungiami 7 lygiagrečiai sujungtų 10 baterijų akumuliatoriai ir gaunama, jog naudojama 70 tokių baterijų.



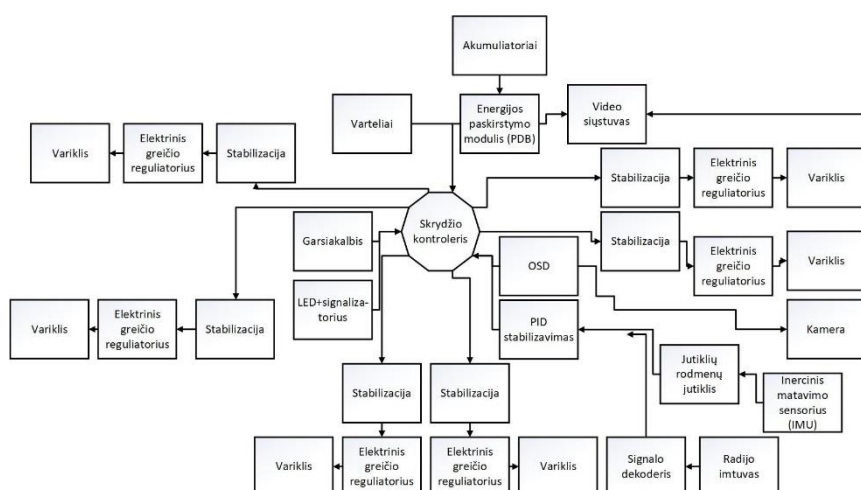
2.2 pav. LiPo 22000 2S 7.4 V

Viena baterija sveria 850 g, kartu visos jos svers 59,500 kg. Prie šio svorio reikia pridėti dar 5 % sujungiamiesiems elementams ir galutiniam variante gauname 62,475 kg.

| | |
|---------------------|---------------|
| Battery capacity | 208,205 mAh ▾ |
| Battery discharge | 85 % |
| Battery voltage | 52 V |
| All up weight (AUW) | 203 kg ▾ |
| Drone flight time | 16 min ▾ |

2.3 pav. Bendros baterijų talpos skaičiavimai [28]

Sujungti drono pagrindiniai elementai atrodys panašiai kaip 2.4 pav.



2.4 pav. Pagrindinių drono elementų sujungimo schema

2.3. Gamybos kaštų skaičiavimas

Drono gamybai bus naudojami šeši Turnigy Rotomax 150cc varikliai. Jų kaina yra 396,95 Eur už vieną, taigi už 6 vienetus kaina būtų 2381,70 Eur [21]. Aukščiau paminėta, jog bus naudojami akumulatoriai LiPo 22,000 2S 7,4V Battery Pack. Vieno vieneto kaina yra 260,89 Eur. Gamybai reikalingi 70 akumulatoriai, todėl kaina bus 18262,30 Eur [22]. Kaip jau minėta skyriuje apie jutiklius, reikalinga kamera, kuri galėtų filmuoti tiek naktiniu režimu, tiek turėtų termovizoriaus



2.5 pav. Flir Duo Pro R kamera, naktinio ir termo matymo režimai

funkciją. Tokias funkcijas turi ir didelė raiška filmuoja Flir Duo Pro R kamera. Kameros kaina – 4500 JAV dolerių, konvertuojant į eurus gaunama apie 4000 Eur [23].

Valdymo modulis parenkamas atsižvelgiant į variklių charakteristikas ir poreikius. Puikus variantas – FY-41AP-M kontroleris, turintis GPS ir ekraną vaizdo stebėjimui, taip pat – septynis skrydžio valdymo režimus, yra skrydžio stabilizavimas, kuris pasiekimas integruotu 3 ašių giroskopu, 3 ašių akselerometru, 3 ašių magnetometru ir barometriniu slėgio sensoriumi. Šis kontroleris taip pat kontroliuoja energijos sunaudojimą [24]. Jo kaina 196,7 Eur [25].

Turint omenyje, jog dronas bus naudojamas tolesniems negu įprastai nuotoliams, yra verta įtaisyti ir signalo stiprintuvą – jis didina naudojimo spindulį ir gerina signalo kokybę. Tam pasirenkame HobbyKing 2,4 GHz 2400 mW signalo stiprintuvą, kurio kaina 32,69 Eur [26].

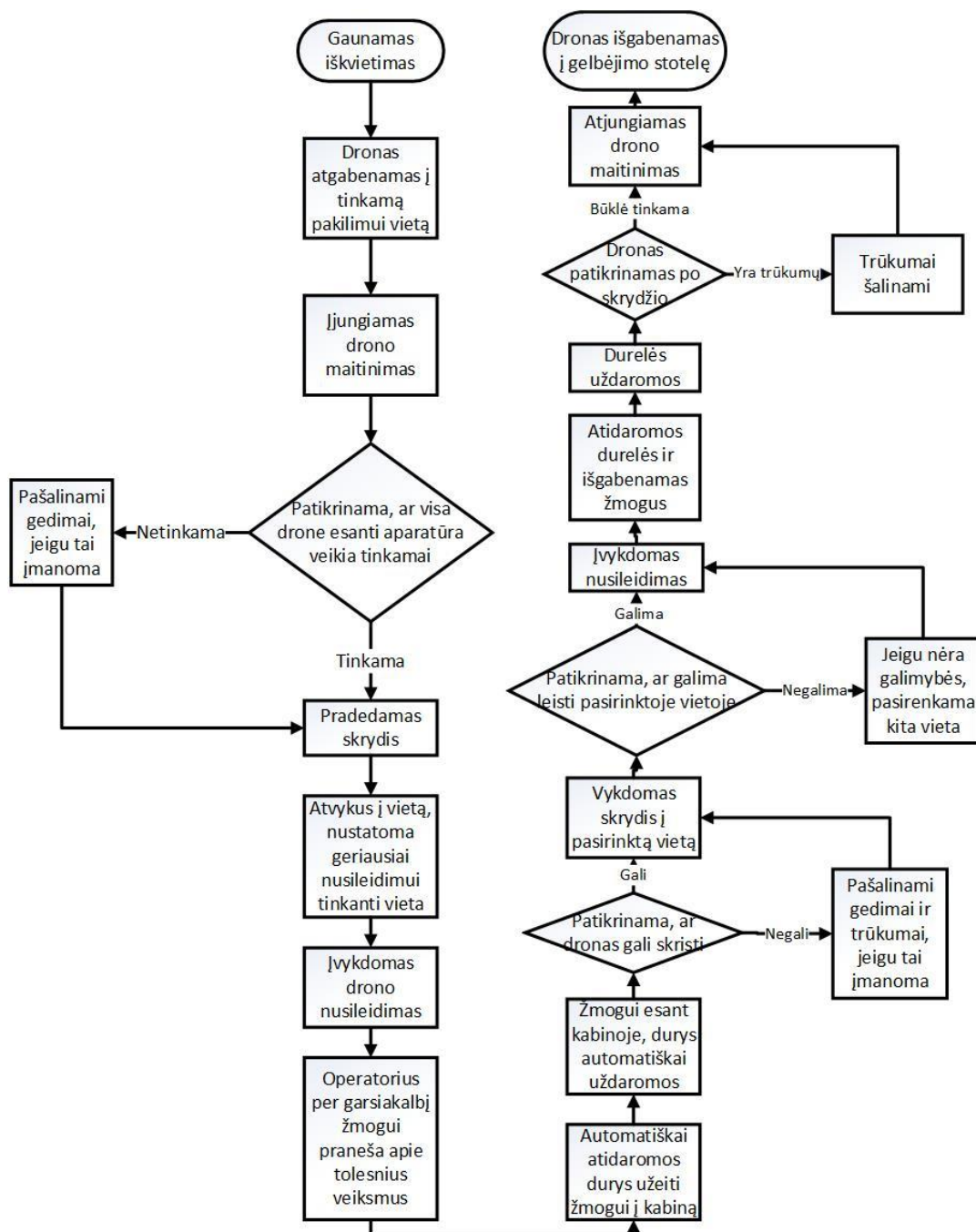
Galutinė drono kaina, imant 10 % nuo žinomų komponentų išlaidų kaip konstrukcinių elementų ir papildomų laidų sumą, gaunama 25169,25 Eur.

2.4. Gelbėjimo algoritmas

Žmogaus gelbėjimas panaudojant didelės keliamosios galios droną turėtų būti vykdyti pagal tokį algoritmą:

1. Dronas yra atgabenas į artimiausią nuo įvykio vietos tinkamą pakilimui vietą.
2. Įjungiamas drono maitinimas.
3. Patikrinama, ar visa drone esanti aparatūra veikia tinkamai.
4. Įsitikinus, jog drono techninė būklė tinkama skrydžiui ir gelbėjimo operacijai atlikti, pradedamas skrydis.
5. Dronui atvykus į gelbėjimo vietą, nustatoma geriausiai tinkanti nusileidimui vieta.
6. Įvykdomas drono nusileidimas.
7. Atidaromos durys žmogui įeiti į kabiną.
8. Gelbėjimui žmogui įėjus į kabiną, durys automatiškai užsidaro.
9. Įvykdomas drono sistemų autopatikrinimas.
10. Jeigu drono kabina yra tinkamai uždaryta ir dronas techniškai gali pakilti, dronas pakyla.
11. Grįžtama į drono pakilimo vietą ar vykdomas skrydis į kitą nustatytą vietą.
12. Patikrinama, ar galima leisti reikiamoje vietoje.
13. Įvykdomas nusileidimas.
14. Automatiškai atidaromos kabinos durelės, varikliai išjungiami, bet maitinimas lieka įjungtas, kol žmogus yra išgabenas iš kabinos.
15. Durelės uždaromos.
16. Operatorius patikrina droną po skrydžio.

- 17. Operatorius atjungia maitinimą.
- 18. Dronas išgabenamas į gelbėjimo stotelę.



2.6 pav. Gelbėjimo algoritmas

3. Eksperimentinė dalis

3.1. Heksakopterio skrydžio parametrų skaičiavimas eCalc programa

Tikslūs projektuojamo heksakopterio skrydžio parametrai nustatyti programa eCalc. Suvedus pradinius duomenis galiama buvo stebėti, ar skrydis įmanomas esant būtent tokiai konstrukcijai ir komponentų rinkiniui. Atlikus skaičiavimus, gauta, jog tinkami skrydžiui parametrai yra pateikti žemiau.

Propelerio parametrai:

- Ilgis: 1000 mm;
- Žingsnis: 6,4 in (162,6 mm).

Akumuliatorių parametrai:

- Vieno akumulatoriaus talpa 22000 mAh, visų kartu (sujungta 9) – 198000 mAh;
- Įtampa (1 vieneto): 3,7 V, viso (sujungta 7 vienetai): 25,9 V;
- Elektrinis krūvis: 45/60 C.

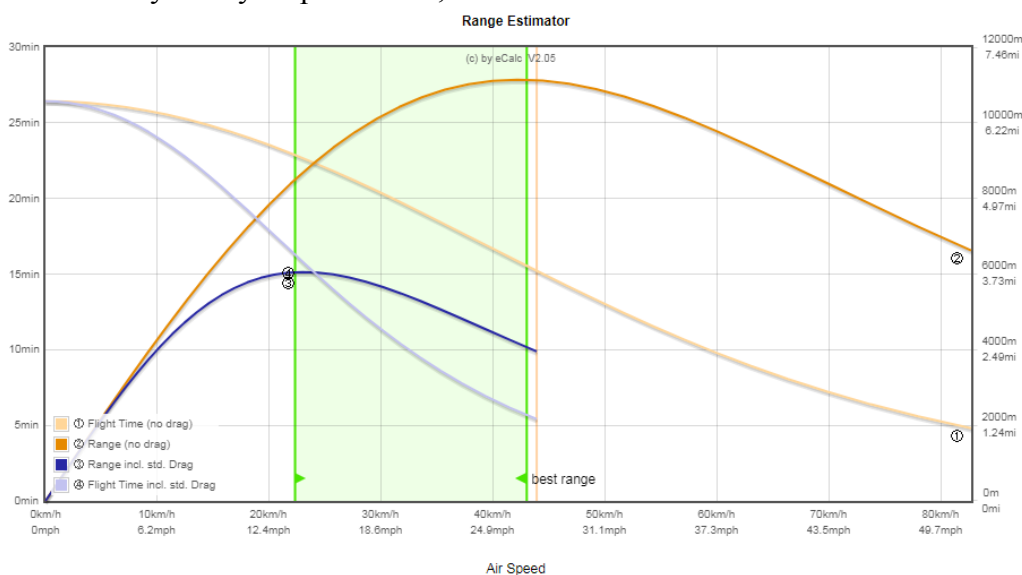
Variklių parametrai:

- Apsukos, sunaudojant 1 V (kV): 150 aps./min/V.

3.1 lentelė. „eCalc“ apskaičiuoti drono parametrai

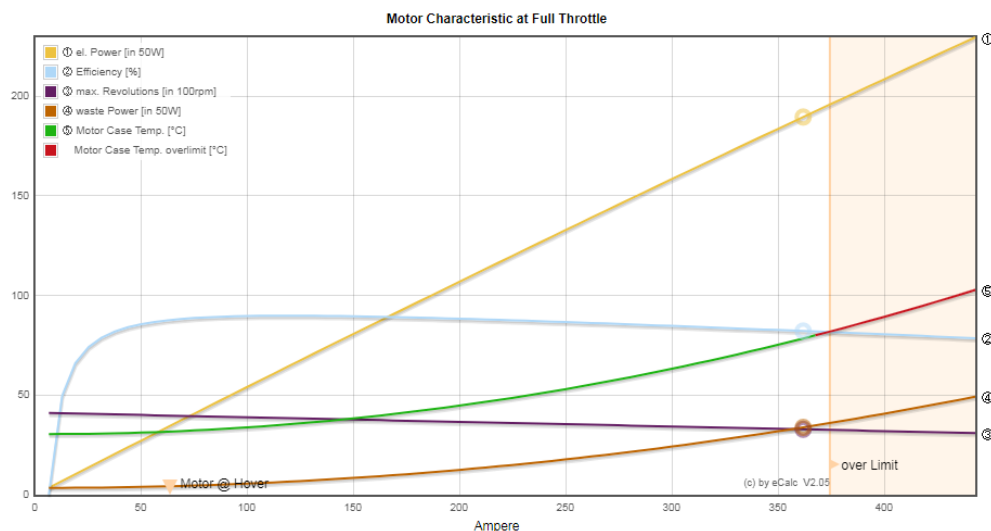
| Parametras | Reikšmė |
|---|-----------|
| Skrydžio laikas | 23,8 min |
| Traukos ir masės santykis | 3,4 : 1 |
| Apytikslis svoris | 105 kg |
| Maksimalus paviršiaus greitis | 80 km/h |
| Maksimalus vertikalus greitis | 9,4 m/s |
| Maksimalus krovinio svoris | 235 kg |
| Srovė, reikalinga kyboti ore | 382,09 A |
| Maksimali srovė | 2214,17 A |
| Apskaičiuotas sistemos efektyvumas kybant | 83,1 % |
| Apskaičiuotas efektyvumas maksimaliu pajėgumu | 78,1 % |

Iš 3.1 paveikslo galima nustatyti maksimalų drono skrydžio nuotolį, pasiekiamą tik tam tikru greičiu. Jis šiuo atveju yra 11000 m esant 45 km/h greičiui. Taip pat akivaizdu, jog didžiausia skrydžio trukmė yra orlaiviui kybant ore. Grafikas leidžia nustatyti optimalų greitį, kuris būtinas norint išlaikyti gerą atstumo ir skrydžio laiko santykį. Šis greitis yra 25 km/h. Skrendant tokiu arba žemesniu greičiu, minimalus laikas skrydžiui yra apie 22 min, o maksimalus nuotolis – 9000 m.



3.1 pav. Nuotolio ir skrydžio laiko priklausomybės nuo skrydžio greičio grafikas

Iš 3.2 grafiko matyti, jog variklio efektyvumas yra apie 80-90 %. Taip pat galima nustatyti, jog variklis darbo metu neperkaista, o elektros energijos nuostoliai nėra dideli. Atlikus skaičiavimus bei bandymus su „eCalc“ programa, galima išanalizuoti rezultatus bei palyginti juos. Baterijų kiekis apskaičiuotas ir tinkamas pagal „eCalc“ atliktus bandymus sutampa - tai reiškia, kad apskaičiuotas reikalingas baterijų kiekis atitinka iškeltus reikalavimus. „eCalc“ variklių galingumo rezultatai, apskaičiuoti pagal formules (pagal apskaičiuotą keliamąją jėgą) rodo, kad 6 varikliai turi kelti 367,818 kg, o „eCalc“ bandymo rezultatai rodo 340,180 kg. Skirtumas – 7,51 % arba 27,638 kg, kas yra „eCalc“ deklaruojamo 15 % paklaidos normos ribose. Skaičiuojant gautas skrydžio laikas – 15 min., o bandymo „eCalc“ metu kabojimo laikas siekia 26,4 min., o rekomenduojamas skrydžio laikas

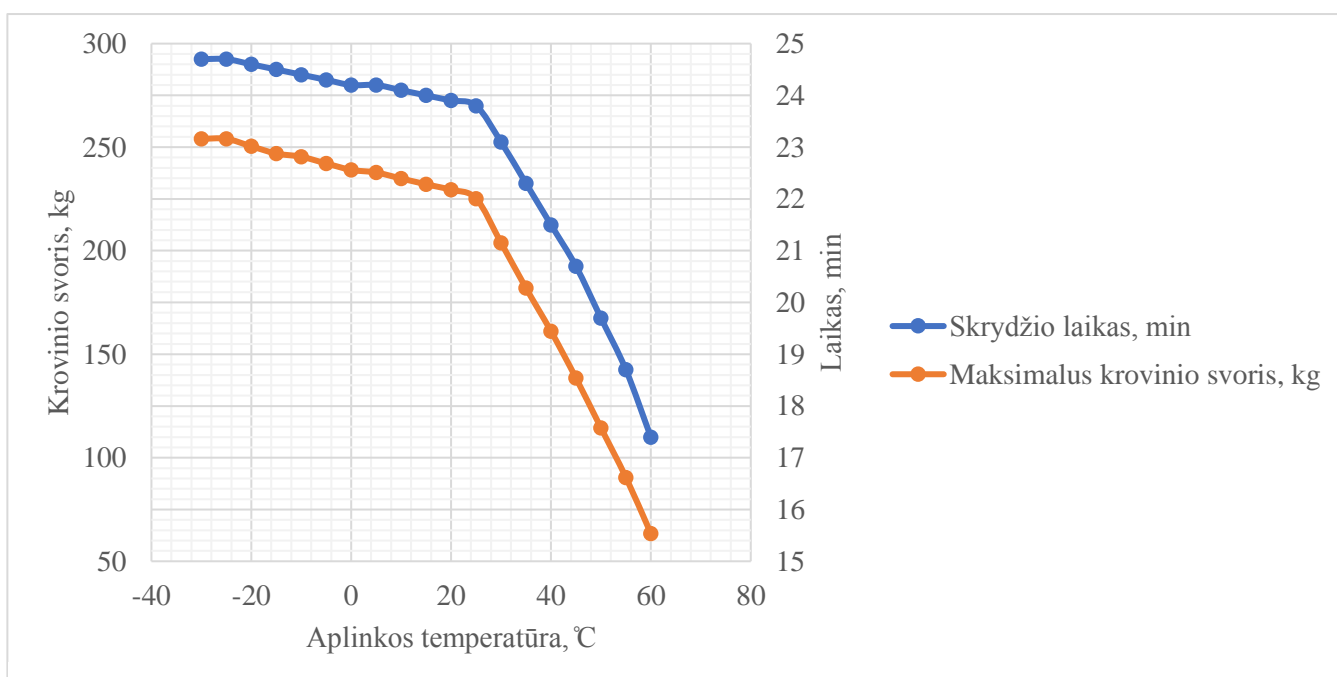


3.2 pav. Elektros energijos naudojimo, efektyvumo, variklio apsisukimų, elektros energijos nuostolių ir variklio temperatūros priklausomybė nuo srovės stiprio

priklausomai nuo oro sąlygų svyruoja tarp 15 ir 22 min., kas taip pat yra artima pirminiams skaičiavimams.

3.2 lentelė. Temperatūrinių bandymų su „eCalc“ rezultatai

| Aplinkos temperatūra, °C | Skrydžio laikas, min | Maksimalus krovinio svoris, kg |
|--------------------------|----------------------|--------------------------------|
| -30 | 24,7 | 254,034 |
| -25 | 24,7 | 254,020 |
| -20 | 24,6 | 250,398 |
| -15 | 24,5 | 246,923 |
| -10 | 24,4 | 245,362 |
| -5 | 24,3 | 242,133 |
| 0 | 24,2 | 239,030 |
| 5 | 24,2 | 237,748 |
| 10 | 24,1 | 234,853 |
| 15 | 24,0 | 232,065 |
| 20 | 23,9 | 229,381 |
| 25 | 23,8 | 225,180 |
| 30 | 23,1 | 203,822 |
| 35 | 22,3 | 181,940 |
| 40 | 21,5 | 161,103 |
| 45 | 20,7 | 138,500 |
| 50 | 19,7 | 114,452 |
| 55 | 18,7 | 90,533 |
| 60 | 17,4 | 63,441 |

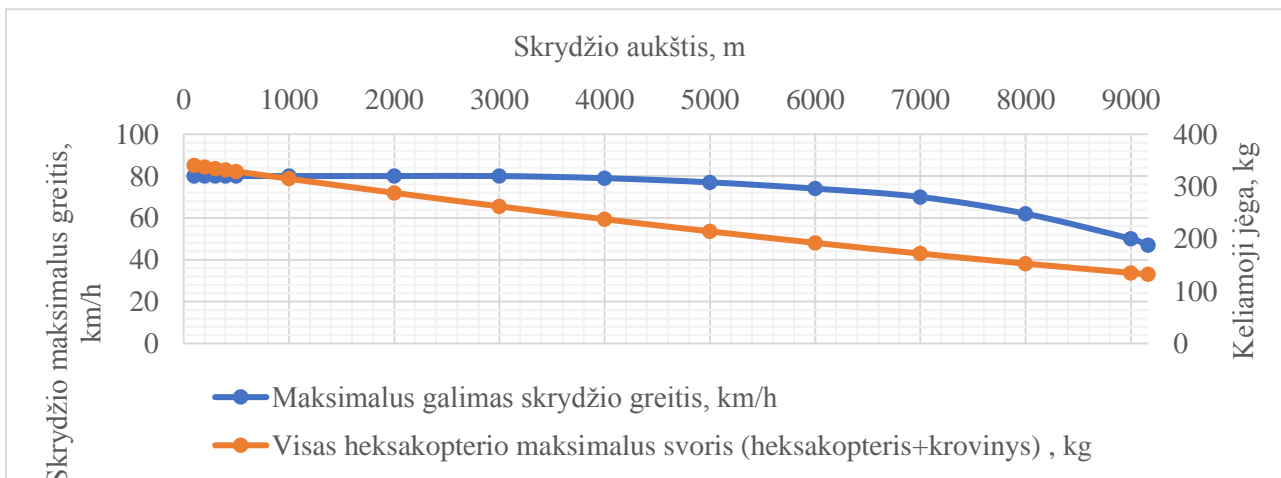


3.3 pav. Maksimalaus krovinio svorio ir skrydžio laiko priklausomybė nuo aplinkos temperatūros

Atlikus temperatūros pokyčių bandymus iš grafiko matosi, jog heksakopteris nuo -30 iki +25 °C laipsnių praranda traukos jėgą bei skrydžio laiką nespārčiai, tačiau kylant temperatūrai nuo +25 iki +55 °C laipsnių traukos jėga ir skrydžio laikas ženkliai sumažėja, o nuo +60 °C traukos jėga sumažėja iki kritinės. Esant +60 °C laipsnių temperatūrai heksakopteris gali pakelti iki 63,441 kg, kas yra per mažai žmogaus gelbėjimo operacijai. Taip pat „eCalc“ programos pagalba atlikti bandymai siekiant išsiaiškinti optimalų skridimo aukštį ir greitį. Kadangi gelbėjimo operacijos gali būti ir aukštai kalnuose, buvo atliktas keliamojo svorio bei maksimalaus greičio bandymas esant skirtingų aukščių ruožuose. Iš paveikslėlio 3.4 grafiko matosi jog maksimalus greitis nekinta iki 3000 m aukščio, o nuo 3000 m aukščio pradeda mažėti. Maksimalus svoris kuri gali pakelti bepilotis orlaivis kinta tolygiai. Pasiekus 6000 m aukštį bepilotis nebegalės skristi su žmogumi.

3.3 lentelė. Heksakopterio keliamosios jėgos priklausomybė nuo skridimo aukščio ir greičio

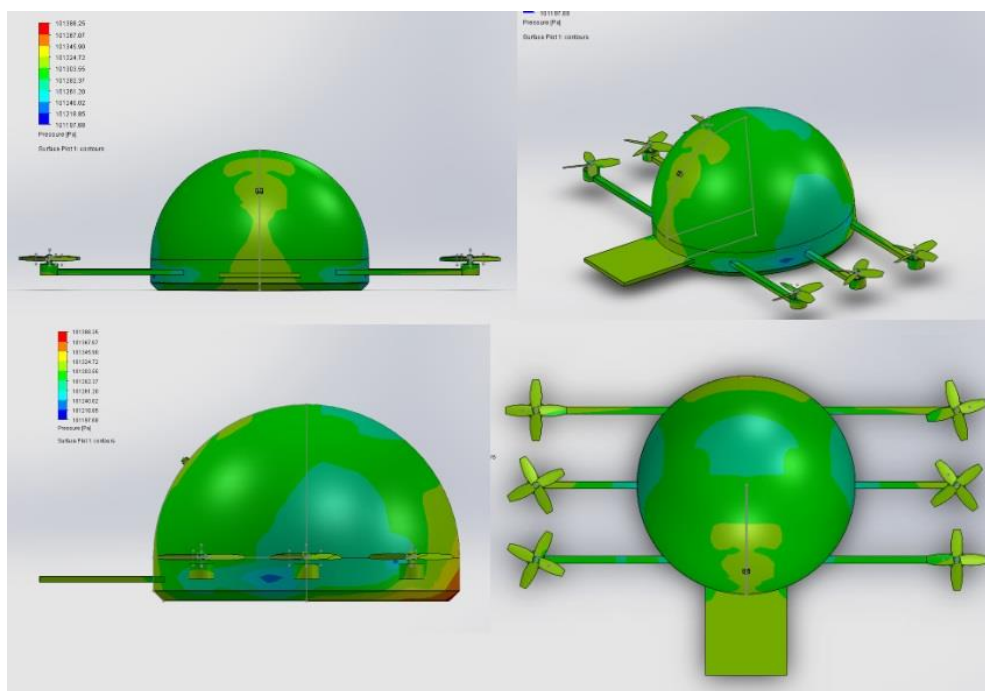
| Skrydžio aukštis, m | Maksimalus galimas skrydžio greitis, km/h | Visas heksakopterio maksimalus svoris (heksakopteris+kroviny), kg |
|---------------------|---|---|
| 100 | 80 | 340.180 |
| 200 | 80 | 337.330 |
| 300 | 80 | 334.489 |
| 400 | 80 | 331.660 |
| 500 | 80 | 328.841 |
| 1000 | 80 | 314.911 |
| 2000 | 80 | 287.897 |
| 3000 | 80 | 262.071 |
| 4000 | 79 | 237.496 |
| 5000 | 77 | 214.227 |
| 6000 | 74 | 192.309 |
| 7000 | 70 | 171.775 |
| 8000 | 62 | 152.647 |
| 9000 | 50 | 134.935 |
| 9165 | 47 | 132.148 |



3.4 pav. Maksimalaus skrydžio greičio ir keliamosios jėgos priklausomybė nuo skrydžio aukščio

3.2. Aerodinaminių savybių tyrimas „SolidWorks“

Buvo suprojektuotas preliminarus heksakopterio modelis ir atlikti aerodinaminiai bandymai „SolidWorks“ aplinkoje. Pasirinktas 25 km/h greitis. Rezultatuose matoma, jog kritinių taškų nėra. Brėžinyje matoma nupiešta pusės sferos formos kupolas, nešamas šešių sraigtų su tilteliu. Gelbėjamas žmogus įeina į kupolą suformuotu tilteliu ir ten gali saugiai būti gabenamas į saugią vietą. Tiltelio plusas – galima išdaužti langus ar pašalinti kitas mechanines kliūtis, trukdančias evakuojamam žmogui pasiekti erdvę po kupolu. Be to, ši kupolo forma yra aerodinamiškai aptaki, todėl galim tikėtis gerų aerodinaminių savybių ir lengvo drono valdymo.



3.5 pav. „SolidWorks“ atliktų aerodinaminių bandymų rezultatas (angl. flow simulation)

Išvados

1. Išnagrinėjus mokslinę literatūrą, įvertinus aerodinamines savybes ir atlikus techninius skaičiavimus pasirinktas būtent heksakopterio (šešių variklių drono) konceptas;
2. Sukurtas gelbėjimo scenarijus, pagal kurį bus vykdomos operacijos;
3. Pradinis iškeltas galimos kelti apkrovos tikslas buvo 185 kg, jis yra pasiektas netgi su rezervu – 340 kg;
4. Numatomas skrydžio laikas yra 15-22 minutės, o preliminarus numatomas skrydžio greitis – 25 km/h, todėl galima teigti, jog heksakopteris gali nuskristi apie 5,4 km-9,17 km atstumo per visą pakilimo-gelbėjimo-nusileidimo seansą, arba gali gelbėti žmogų, esantį už 2,7-4,09 km nuo pakilimo/nusileidimo vietos, jeigu ta vieta yra ten pat;
5. Skaičiavimams naudotos „eCalc“ ir „SolidWorks“ programos, kurios išnagrinėjus keletą programinių paketų buvo išrinktos kaip patogiausios ir patikimiausios;
6. Gamybos kaštai siekia 23343,02 Eur. Tai nėra didelė kaina, turint omenyje, jog pasitelktos naujausios technologijos kuriant šią transporto priemonę ir ji sutaupys didelius kaštus ateityje pakeisdamas sraigtasparnius, kurių pakėlimas kainuoja ženkliai daugiau, negu suprojektuotojo heksakopterio. Taigi, investicija greitai atsipirks.
7. Heksakopteris turės kupolo formos uždara erdvę ir ten žmogus galės saugiai būti, kol bus atgabentas į saugią vietą.

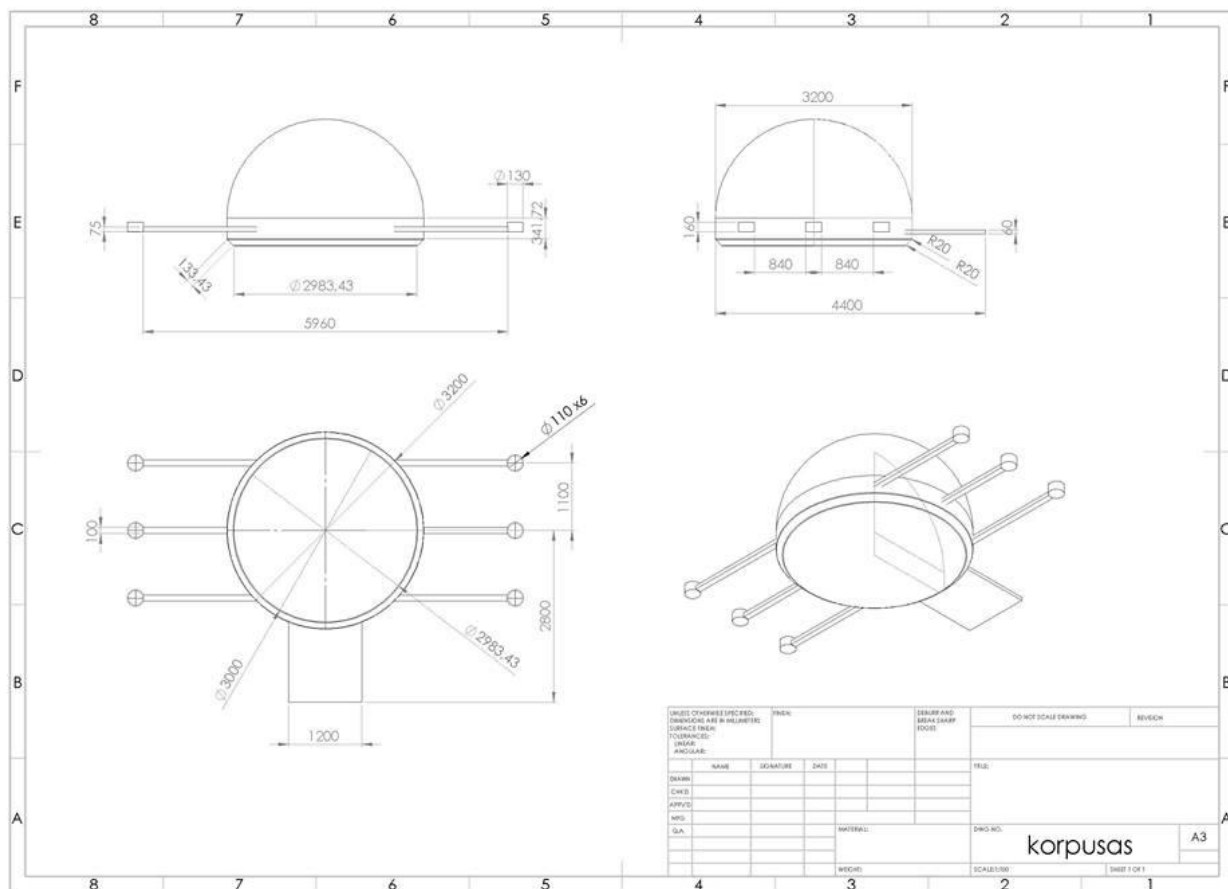
Literatūros sąrašas

- [1] „Первый квадрокоптер,“ [Tinkle]. Available: <https://geektimes.com/post/240916/>.
- [2] „Unmanned Aircraft System Airspace Integration Plan“.
- [3] „Базовые принципы полета квадрокоптера,“ [Tinkle]. Available: <http://kvadrokoptyer.com/bazovyie-printsipyi-poleta-kvadrokoptera/>.
- [4] Ч. Н. Александрович, „АВТОНОМНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТОМ КВАДРОКОПТЕРА С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ОБЛЕТА ПРЕПЯТСТВИЙ И КОМПЛЕКСНОЙ НАВИГАЦИЕЙ,“ МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н. Э. БАУМАНА, Москва, 2017.
- [5] „Я делаю свой квадрокоптер. Часть 1. Уравнения динамики,“ [Tinkle]. Available: <https://habr.com/post/183964/>.
- [6] „Аэродинамические силы,“ [Tinkle]. Available: http://oat.mai.ru/book/glava05/5_3/5_3.html.
- [7] „АЭРОДИНАМИКА ГОНОЧНЫХ МУЛЬТИКОПТЕРОВ,“ [Tinkle]. Available: <http://drone-irk.ru/?p=19729>.
- [8] „ОСНОВЫ АЭРОДИНАМИКИ НЕСУЩЕГО ВИНТА,“ [Tinkle]. Available: <http://drone-irk.ru/?p=400>.
- [9] S. BOUABDALLAH, „Design and control of quadrotors with application to autonomous flying,“ Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne, 2007.
- [10] N. d. S. Fernandes, „Design and construction of a multi-rotor with various degrees of freedom,“ Technical University of Lisbon, Lisbon, 2011.
- [11] H. N. G. B. a. B. C. Bas Vergouw, „Drone Technology: Types, Payloads, Applications, Frequency Spectrum Issues and Future Developments,“ t.m.c. assen press and the authors, The Hague, 2016.
- [12] „Simple formula about quadcopter weight calculator and thrust calculator,“ [Tinkle]. Available: <http://www.rcdronegood.com/formula-quadcopter-weight-calculator-thrust/>.
- [13] „Личный квадрокоптер (сделай себе FAN). Часть 3 — Электроника,“ [Tinkle]. Available: <http://mozgochiny.ru/electronics-2/lichnyiy-kvadrokopter-sdelay-sebe-fan-chast-3-elektronika/>.
- [14] „Giroskopas,“ Wikipedia, [Tinkle]. Available: <https://lt.wikipedia.org/wiki/Giroskopas>.
- [15] D. F. P. J. A. R. L. E. Romero, Quadcopter stabilization by using PID controllers.

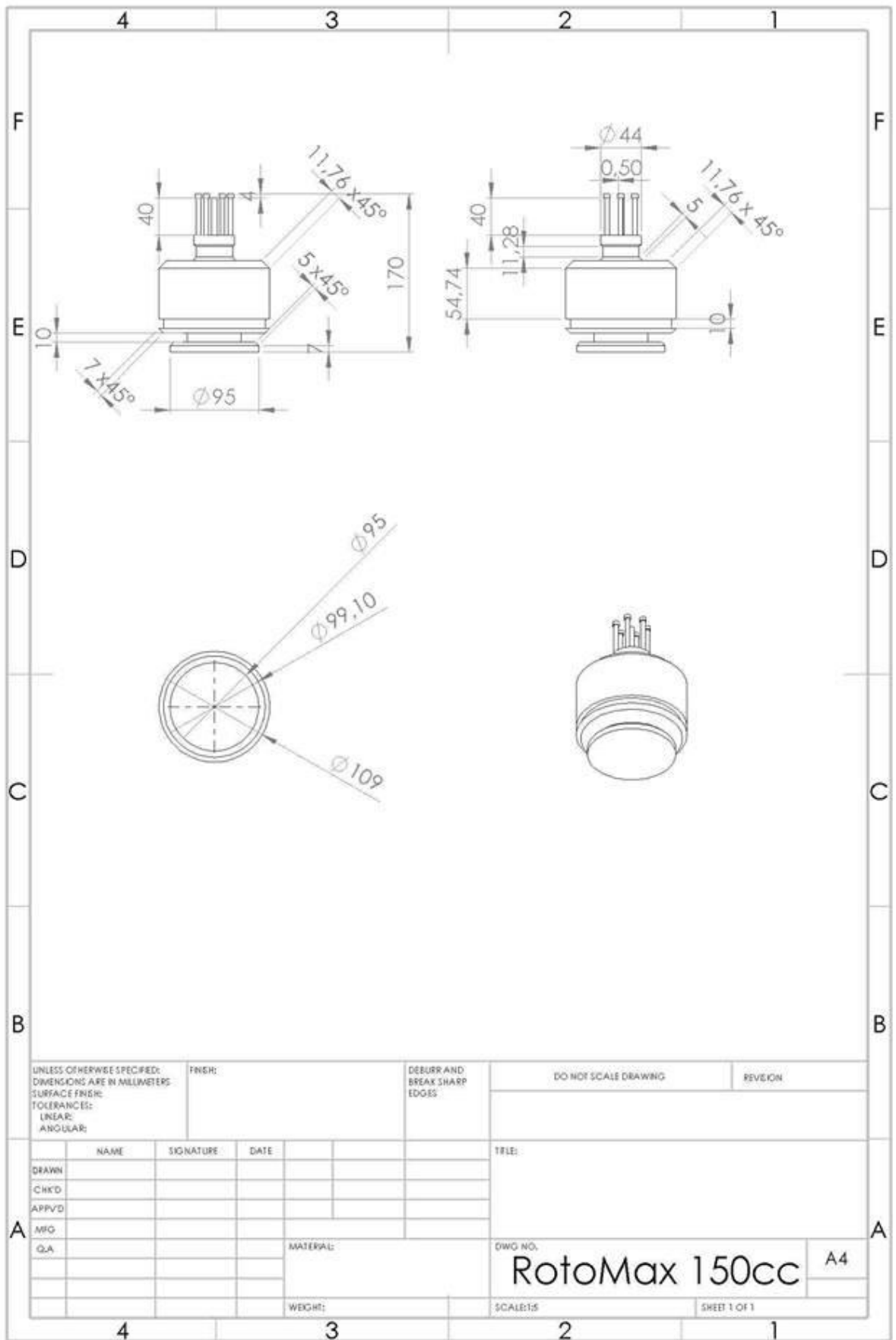
- [16] Я. В. Станиславович, Твой первый квадрокоптер: теория и практика.
- [17] „XFOIL,“ [Tinkle]. Available: <http://web.mit.edu/drela/Public/web/xfoil/>.
- [18] „SKYF,“ [Tinkle]. Available: <https://skyf.pro/ru/main/>.
- [19] „Griff-300,“ [Tinkle]. Available: <http://griffaviation.com/>.
- [20] „Black Knight Transformer,“ [Tinkle]. Available: <https://www.advancedtacticsinc.com/technology/black-knight/>.
- [21] „Turnigy Rotomax 150CC,“ HobbyKing, [Tinkle]. Available: https://hobbyking.com/en_us/turnigy-rotomax-150cc-size-brushless-outrunner-motor.html?__store=en_us.
- [22] „Turnigy 5000mAh 2s 7.4V 60C Hardcase Pack (ROAR Approved),“ HobbyKing, [Tinkle]. Available: https://hobbyking.com/ru_ru/turnigy-5000mah-2s-7-4v-60c-hardcase-pack-roar-approved.html.
- [23] „FLIR Duo® Pro R,“ Flir, [Tinkle]. Available: <https://www.flir.com/products/duo-pro-r/?model=436-0325-34-00>.
- [24] G. F. T. I. Company, „FY-41AP AutoPilot & OSD System“.
- [25] „FY-41AP-M Auto-Pilot/ Flight Controller with OSD, GPS and Power Manager,“ HobbyKing, [Tinkle]. Available: https://hobbyking.com/en_us/feiyu-tech-fy-41ap.html?__store=en_us.
- [26] „2.4Ghz 2000mW Radio Signal Booster Set,“ HobbyKing, [Tinkle]. Available: https://hobbyking.com/en_us/2-4ghz-2000mw-radio-signal-booster-set.html.
- [27] „Quadcopter Battery Calculator Flight Times,“ [Tinkle]. Available: <http://www.rcdronegood.com/quadcopter-battery-calculator-flight-times/>.
- [28] „Drone Flight Time Calculator,“ Omnica Calculator, [Tinkle]. Available: <https://www.omnicalculator.com/other/drone-flight-time>.

Priedai

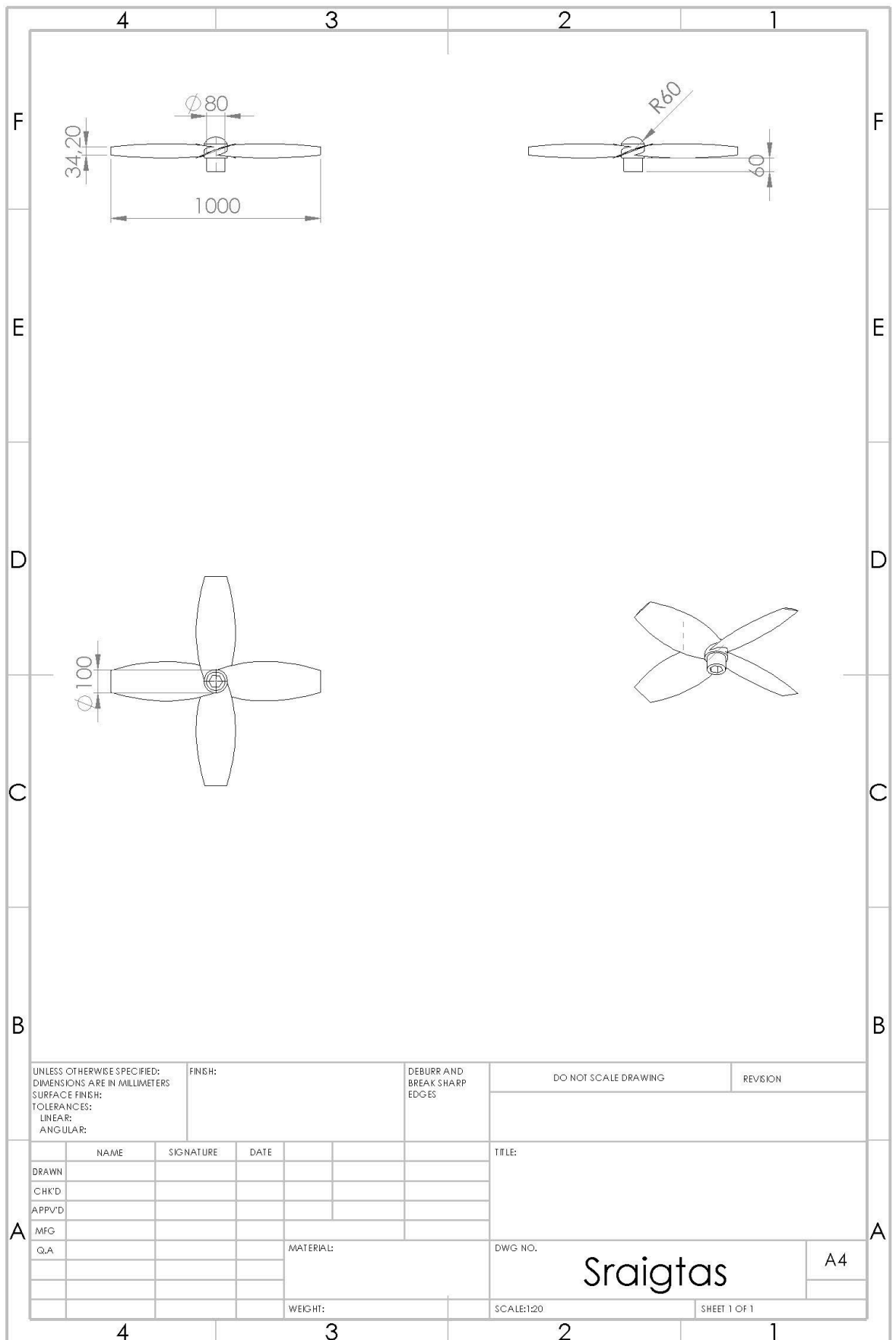
1 priedas. Heksakopterio korpuso detalusis brėzinys



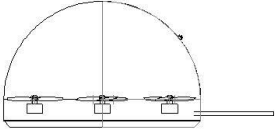
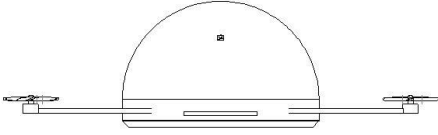
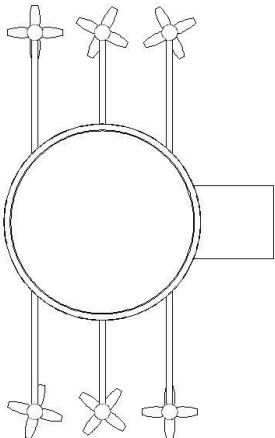
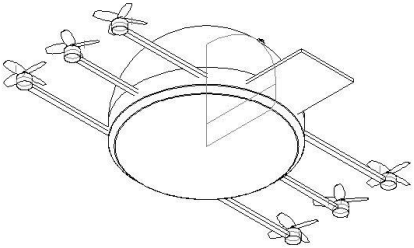
2 priedas. Turnigy RotoMax 150cc variklio detalusis brėžinys



3 priedas. Sraigto detalusis brėžinys



4 priedas. Heksakopterio surinkimo brėžinys

| | | | |
|---|--|--|------------------------------------|
| 4 | 3 | 2 | 1 |
| F |  | | F |
| E |  | | E |
| D |  |  | D |
| C | | | C |
| B | | | B |
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR: | | FINISH: | DEBURR AND BREAK SHARP EDGES |
| | | DO NOT SCALE DRAWING | REVISION |
| DRAWN | NAME | SIGNATURE | DATE |
| CHK'D | | | |
| APP'VD | | | |
| MFG | | | |
| Q.A | | | |
| | | MATERIAL: | TITLE: |
| | | WEIGHT: | DWG NO. |
| | | | Surinkimo brėžinys ^{A4} |
| | | SCALE:1:200 | SHEET 1 OF 1 |
| 4 | 3 | 2 | 1 |
| A | | | A |