



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND  
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

# **DROONI LENNUKONTROLLERI VALIMINE NANO, MIKRO JA MINI SUURUSES DROONIDELE**

## **CHOISE OF FLIGHT CONTROLLER FOR NANO, MICRO AND MINI DRONES**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Tõnis Filippov

Üliõpilaskood 0164991AAB

Juhendaja: Kristjan Pütsep, lektor

Tallinn 2021

(Tiitellehe pöördel)

## **AUTORIDEKLARATSIOON**

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneriplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....." ..... 202.....

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö esitatud nõuetele

"....." ..... 202.....

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....." .....202... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina Tõnis Filippov

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Drooni lennukontrolleri valimine nano, mikro ja mini suuruses droonidele,

mille juhendaja on Kristjan Pütsep,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

\_\_\_\_\_ (kuupäev)

---

<sup>1</sup> Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

## LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

*Autor:* Tõnis Filippov

*Lõputöö liik:* Bakalaureusetöö

*Töö pealkiri:* Drooni lennukontrolleri valimine nano, mikro ja mini suuruses droonidele

*Kuupäev:*  
17.05.2021

52 lk (*lõputöö lehekülgede arv koos lisadega*)

*Ülikool:* Tallinna Tehnikaülikool

*Teaduskond:* Inseneriteaduskond

*Instituut:* Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

*Töö juhendaja(d):* lektor Kristjan Pütsep

*Töö konsultant (konsultandid):*

*Sisu kirjeldus:*

Antud töö käsitleb lennukontrolleri valimist nano, mikro ja mini suuruses droonitele. Töös pakutakse ülevaade droonite klassifikatsioonist ja moodulitest. Töö oluline osa on lennukontrolleri funktsiooni, komponentide ja lisade kirjeldamine. Tabelites esitatakse valik lennukontrollereid nano, mikro ja mini droonitele. Lisaks antakse soovitusel, kuidas valida lennukontrollerit.

*Märksõnad:* droon, lennukontroller, mehitamata õhusõiduk, klassifikatsioon

## ABSTRACT

<i>Author:</i> Tõnis Filippov	<i>Type of the work:</i> Bachelor Thesis
<i>Title:</i> Choice of flight controller for nano, micro and mini drones	
<i>Date:</i> 17.05.2021	<i>52 pages (the number of thesis pages including appendices)</i>
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor(s) of the thesis:</i> Kristjan Pütsep	
<i>Consultant(s):</i>	
<i>Abstract:</i> <p>The thesis gives an overview of how to choose a drone flight controller for nano, micro and mini drones. Classification of drones is discussed and an overview of drone's modules is given. Important part of the thesis is an explanation of function, modules and features of flight controller. Choice of flight controllers will be given in the tables for nano, micro and mini drones. Also recommendations will be given how to choose a flight controller for an application.</p>	
<i>Keywords:</i> drone, flight controller, UAV, classification	

# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	<b>Drooni lennukontrolleri valimine nano, mikro ja mini suurustele droonidele</b>
Lõputöö teema inglise keeles:	<b>Choice of flight controller for nano, micro and mini drones</b>
Üliõpilane:	<b>Tõnis Filippov, 164991AAAB</b>
Eriala:	<b>Elektrotehnika</b>
Lõputöö liik:	<b>bakalaureusetöö</b>
Lõputöö juhendaja:	<b>Kristjan Pütsep</b>
Lõputöö kaasjuhendaja: (ettevõtte, amet ja kontakt)	
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	<b>01.09.2021</b>
Lõputöö esitamise tähtaeg:	<b>15.05.2021</b>

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendaja (allkiri)

---

Õppekava juht (allkiri)

---

Kaasjuhendaja (allkiri)

## 1. Teema põhjendus

Droon on suhteliselt uus jõuelektroonika ja elektriajami rakendus. Droonidel olevaid elektrimootoreid juhitakse lennukontrolleri abil. Lennukontrolleri valikul tuleb lähtuda jõuelektroonika ja elektriajamite nõuetest, mis omakorda sõltuvad kaalust ja tüübist. Tootmises on palju erinevaid lennukontrollereid, valik on suur ja tihti nõuab valijalt kogemust ja aega. Antud töö saab olema abistajaks nano, mikro ja mini suuruses droonide lennukontrollerite valikul. Internetis on olemas veebilehed, mis abistavad lennukontrolleri valikul, kuid puudub kokkuvõttev töö, mis keskendub erinevates kaaludes olevatele droonide lennukontrolleritele ja pakuks välja algoritmi valiku tegemiseks.

## **2. Töö eesmärk**

Töö eesmärgiks on koostada algoritm ja tabelid lennukontrolleri valiku tegemiseks vastavalt jõuelektronika ja elektriajamite nõuetele. Täpsemalt uuritakse quadcopter tüüpi droonide lennukontrollerite valikut, kuid teema on põhimõtteliselt laiendatav ka teist tüüpi droonidele.

## **3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:**

Erinevate kaaludega droonile sobivate kontrollerite võrdlus (nano, mikro ja mini).

Millised on potentsiaalsed probleemid elektrimootorite ja lennukontrolleri kokku sobimisel?

Mille poolest erinevad lennukontrollerid ja nende funktsionaalsus?

Miks valida teatud tüüpi kontroller?

## **4. Lähteandmed**

Ülesande lahendamisel plaanin kasutada peamiselt internetis leiduvaid andmeid. Andmed pärinevad erinevate tootjate kodulehtedelt ja droonide ehitamist kirjeldavatel veebilehtedelt. Teadaolevalt ei ole Tallinna Tehnikaülikoolis sarnast tööd tehtud.

## **5. Uurimismeetodid**

Tulemusteni plaanitakse jõuda kasutades andmete analüüsimist ja võrdlemist. Töös võrreldakse erinevaid lennukontrollereid, mis võiksid sobida kokku sarnaste parameetritega elektrimootoritega.

## **6. Graafiline osa**

Töös on suure olulisusega tabelid, mis võrdlevad lennukontrollerite omadusi. Olulisemaid tabeleid on kolm. Iga drooni suuruse kohta vähemalt üks. Töös on esitatud ka joonised drooni ülesehituse kohta ja lennukontrolleri põhimõtteskeem.

## **7. Töö struktuur**

Peatükid

- Droon ja drooni ehitus
- Enamlevinud andurid ja moodulid lennukontrolleritel
- Lennukontrollerite parameetrid, mille alusel teha valik
- Lennukontrollerite võrdlustabelid

- Kontrollerite valiku soovitusel ja algoritm
- Kokkuvõtte tööst.

## **8. Kasutatud kirjanduse allikad**

Peamiselt toetun interneti allikatele. Peamised allikad:

<https://dronenodes.com/drone-flight-controller-fpv/>

<https://oscarliang.com/>

<https://px4.io/>

## **9. Lõputöö konsultandid**

Puuduvad

## **10. Töö etapid ja ajakava**

Info kogumine (21.02.2021)

Teoreetilise osa kirjutamine (21.03.2021)

Võrdluse kirjutamine (11.04.2021)

Töö esimene versioon valmis (18.04.2021)

Paranduste sisse viimine (02.05.2021)

Juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine (02.05.2021)

Töölõplik versioon valmis (14.05.2021)

NB! Kõik tähtajad on antud kuupäeval kellaajaga 23:59.



# SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE .....	4
ABSTRACT .....	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE .....	6
EESSÕNA .....	10
Lühendite ja tähiste loetelu .....	11
SISSEJUHATUS .....	12
1. DROON JA DROONI EHITUS .....	14
1.1 Droon ja droonide liigitus .....	14
1.2 Droonide komponendid .....	16
1.3 Lennukontrolleri olulisus .....	18
2. ENAMLEVINUD ANDURID JA MOODULID LENNUKONTROLLERITEL .....	19
2.1 Mikrokontroller .....	19
2.2 Voolujaotusplaat (PDB) ja elektrooniline kiiruseregulaator (ESC) .....	20
2.3 Sensorid (sisendid) .....	22
2.4 Väljundid .....	24
3. LENNUKONTROLLERITE VALIKU ALUSED .....	25
3.1 Suurus ja kaal .....	25
3.2 Tarkvara .....	26
3.3 Tsükliagedus .....	28
3.4 Moodulid ja funktsionaalsus .....	29
3.5 Eesmärk .....	30
4. LENNUKONTROLLERITE VÕRDLUSTABELID .....	32
4.1 Nano drooni lennukontroller .....	32
4.2 Mikro drooni lennukontroller .....	34
4.3 Mini drooni lennukontrollerid .....	37
5. LENNUKONTROLLERI VALIKU SOOVITUSED .....	40
5.1 Nano ja mikro drooni lennukontrolleri valiku soovitused .....	40
5.2 Mini drooni lennukontrolleri valiku soovitused .....	42
KOKKUVÕTE .....	44
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	46
LISAD .....	49
Lisa 1 Tarkvara tabelis kasutatavad lühendid .....	49

## **EESSÕNA**

Lennunduse teema on töö autori jaoks südamelähedane ja seetõttu viidi autor kokku juhendajaga, kes pakkus välja lendamisega seotud teema. Seega lõputöö teema sõnastus pärineb juhendajalt.

Töö eripära tõttu on koostamiseks peamiselt kasutatud interneti allikaid. Need allikad on peamiselt entusiastide kirjutatud info teema kohta. Allikate baasilt on kokku pandud droonite kirjeldus ja kirjeldatud lennukontrollerite otstarvet ja funktsionaalsust. Võrdlus tabelite koostamisel pärineb info peamiselt tootjate veebilehtedelt. Valiku soovitused on autori poolne hinnang, kuidas valida üldiselt lennukontrollerit.

Siinkohal sooviks tänada juhendajat Kristjan Pütseppa, kes pakkus välja põneva teema ja on olnud alati abiks.

## Lühendite ja tähiste loetelu

ADB-S –Automatic Dependent Surveillance–Broadcast

AIO – All in one board

BEC –Battery Elimination Circuit. Võib olla täpsustatud: LBEC (lineaar BEC), SBEC (switching BEC), UBEC (universal BEC)

DSM2 – Digital System Multiplexer. Spektrumi raadiosaatja protokoll.

DSMX – Uuem versioon DSM2-st

EASA – European Union Aviation Safety Agency

ESC – Electronic Speed Controller

FC – Flight controller

FPV – Frist person view

GPS – Global Positioning System

IBUS – Flysky poolt tuvustatud kommunikatsiooni protokoll. Sarnane SBUS-le.

IMU – Inertial Measurement Unit

I2C - Inter-Integrated Circuit

LED - Light Emitting Diode

LiPo – Lithium Polymer Battery

MCU - Microcontroller unit

OSD - On Screen Display

PDB – Power distribution board

PID – Proportional Integral Derivative

PPM - Pulse Position Modulation

PWM – Pulse Width Modulation

RX - Radio Receiver

SBUS – Serial Bus. Võib olla tähistatud ka S-BUS, S.BUS.

SCL/SDA - Serial clock line/ serial data line. Need on osad I2C liidesest.

TBS Crossfire – kaugmaa raadiolink

TX - Transmitter

UART - Universal asynchronous receiver-transmitter

VTX – Video Transmitter

Whoop – Väike propelleri kaitsetega droon, millel on lennukontroller diagonaalis.

## SISSEJUHATUS

Mehitamata õhusõiduk ehk droon on tänapäeval laialt levinud elektriajami ja jõuelektroonika rakendus. Drooni puhul on enamasti lennust automatiseeritud ja piloodipoolseks sisendiks on liikumise suund. Seetõttu on lennu stabiilsuse tagamiseks kesksel kohal lennukontroller. See on seade, mis tunnetab sensorite abil ümbritsevat, tagab lennu stabiilsuse ja soovitud tulemuse. Seetõttu on lennukontrolleri valimine drooni ehitamise mõistes väga oluline. Õige valiku korral on drooni lennud ohutumad ja potentsiaalse majandusliku kahju tekkimise tõenäosus on väiksem.

Mehitamata õhusõidukid täidavad erinevaid ülesandeid, kusjuures mehitamata lennu katsetust on tehtud ka Marsil. Mehitamata õhusõidukeid kasutatakse luureks, pildistamiseks, filmimiseks, paki transpordiks, päästeoperatsioonidel ja lihtsalt lõbustusena. Eelnev loetelu ei ole kindlasti lõplik, kuid ilmestab antud seadmete mitmekülgset ja olulisust tänapäeva maailmas. Tulevikuvisioniks on ka personaalne transport, kus transporditavad ei oma kontrolli drooni üle. Mehitamata õhusõidukid võimaldavad erinevate ülesannete täitmist soodsamalt ja ohutumalt kui mehitatud transpordiga ja teatud ülesandeid polegi võimalik ilma drooniteta täita. Kuna droonidel on suur mõju tänapäeva maailmale, on droonitega seonduvad teemad aktuaalsed ja olulised. Üks kõige olulisemaid drooni komponente on lennukontroller. Viimase võimekusest sõltuvad suurel määral võimalikud täidetavad ülesanded.

Lennukontrollerite tootjaid on palju, valik on väga suur ja mitmekülgne. Valikus on lennukontrollerid, mis on mõeldud mänguasjadele kuni lennukontrolleriteni, mis suudavad juhtida autopiloodiga suuri lennukaid või koptereid, tagades seejuures mitmekordse tõrkekindluse. Lennukontrollerite maastikul orienteerumine on keerukas, sest tootjate vahel ei ole info standardiseeritud. Nii võib tekkida teatud lennukontrolleritest kergelt vale ettekujutus ja valik võib osutuda vääraks. Seetõttu pidas autor vajalikuks täpsustada erinevate lennukontrollerite komponentide eesmärke, et ühtlustada olemasolevat infot ja anda lugejale olulisest ülevaade. Töös käsitletakse enamlevinud lahendusi.

Töö eesmärgiks on pakkuda välja valik lennukontrollereid erinevas suuruses droonitele ja anda soovitusi, kuidas valida lennukontrollerit. Autoripoolse valiku tegemisel on lähtutud kasutajate tagasisidest ja kasutajate kättesaadavusest. Lisaks on autor pööranud tähelepanu, et pakkumises oleks erinevat tüüpi lennukontrollereid, sest erinevatele rakendustele sobivad erinevad lennukontrollerid. Antud töö tugineb peamiselt interneti materjalidele, mille hulka kuuluvad tootjate kodulehed ja entusiastide poolt kokku kogutu. Sellest lähtuvalt on töös ka praktilised soovitusel.

Peamiselt jõutakse järeltõlge analüüsimise ja võrdlemise teel. Drooni lennukontrollerite teemal on kirjutatud vähe kokkuvõtvaid töid, mis annaksid ülevaate ja konkreetseid kontrolleri valiku soovitusi. Autori arvates tuleneb senine vähene teemast kirjutamine olemasoleva teabe külluse ja killustatusega. See tähendab, et kogu infot on väga keeruline raamidesse panna ja sõnastada.

Töö esimeses osas tutvustatakse, mis on droon, kirjeldatakse töös kasutatavat klassifikatsiooni ja täpsustatakse regulatsiooni, mis on õhuruumi kasutamisel oluline. Lisaks kirjeldatakse üldiselt droonide olulisi komponente ja täpsustatakse, mis roll on lennukontrolleril. Teises osas vaadatakse täpsemalt millest koosneb lennukontroller, millised on lennukontrolleri tüübid, kirjeldatakse enamlevinud andureid ja muid olulisi komponente. Kolmandas osas täpsustatakse, mille järgi võiks lennukontrollerit valida. Täpsustatakse tarkvara võimekust, tsükliageduse olulisust ja moodulite omadusi. Samuti rõhutatakse kolmandas osas drooni eesmärgi sõnastuse olulisusele. Neljandas osas pakutakse välja valik lennukontrollereid nano, mini ja mikro droonidele. Lisatud on iga lennukontrolleri kohta lisade ja oluliste parameetrite loetelu. Viimases osas antakse lugejale soovitus, kuidas valida erinevas suuruses droonile lennukontrollerit. Vastatakse küsimusele, mida võiks ja peaks silmas pidama, et teha hea valik.

# 1. DROON JA DROONI EHITUS

## 1.1 Droon ja droonide liigitus

Droon on suhteliselt uus jõuelektroonika ja elektriajami rakendus. Droone defineeritakse erinevalt. Õigekeelsus sõnaraamatu järgi on droon mehitamata õhusõiduk, kuid antud definitsioon jätab täielikult täpsustamata drooni kaalukategooria, mõõtmed või kuidas õhusõiduk õhus püsib. Transpordiameti definitsiooni järgi on mehitamata õhusõiduk, mille pardal ei ole pilooti ning mille juhtimine toimub tehniliste abivahendite vahendusel või eelnevalt programmeeritud lennuna ilma piloodi juhtimiseta autonoomselt [1]. Mehitamata õhusõidukite hulka kuuluvad nii radio teel juhitud mudellennukid, mudelkopterid, multirootorid kui ka autonoomselt lendavad piloodita õhusõidukid kusjuures rahvapäraselt kutsutakse mehitamata õhusõidukeid ka droonideks [2]. Õigekeelsus sõnaraamatu ja Transpordiameti definitsioonid on sarnased, kuid viimane lisab olulise täpsustusena, et droon ehk mehitamata õhusõiduk on tehniliste abivahendite abil juhitud õhusõiduk, mis tähendab, et katuselt alla liuglev paberlennuk ei mahu antud definitsiooni alla.

Mehitamata õhusõidukid on väga erinevate mõõtmete ja kaaluga. Näiteks võib droon olla sama suur kui Boeing 737 või väike puldiga juhitud lennuk [3]. Seetõttu on droonide liigitamiseks palju erinevaid võimalusi. Üldiselt liigitatakse droone nende jõudluse omaduste alusel, näiteks kuulub sinna hulka kaal, tiivaulatus, tiiva koormus, lennuulatus, maksimaalne lennukõrgus, kiirus, lennuaeg ja tootmise kulukus [4]. Eelpool nimetatud on olulised parameetrid, mis pakuvad erinevaid klassifitseerimise viise, kuid mehitamata õhusõidukite liigitus on tavaliselt olukorrast lähtuv. Näiteks saab droone liigitada tõstejõu tekitamise viisi alusel fikseeritud tiivaga ja pöörleva tiivaga drooniks. Antud töös käsitletakse nelja pöörleva tiivaga ehk propelleriga droone, millele on sobilik kasutada kaalust lähtuvat kategoriseerimist. Euroopa Liidu Lennuohutusamet (EASA – European Union Aviation Safety Agency) liigitab mehitamata õhusõidukeid kaalust lähtuvalt kategooria järgi, millest lähtub drooni kasutusreeglistik. Tabel 1 esitatakse lihtsustatult ja kokkuvõtvalt EASA reeglistik *open category* kohta ehk droonide kohta, millel puudub EASA klassi tunnus [5].

Tabel 1 kirjeldatud isehitatud droone kaaluga kuni 250g võib kasutada ilma registreerimata juhul kui droon on mänguasi või droon ei ole varustatud kaameraga, kusjuures ülejäänud droonid peavad olema registreeritud ja piloot peab sooritama eksamid [5]. Töö kirjutamise hetkel ei ole Eesti Transpordiamet antud liigitust veel kinnitanud, kuna tegu on 2020 aasta alguses EASA pakutud liigitusega.

Tabel 1 EASA klassi tunnuseteta droonide liigitus ja piirangud.

Mehitamata õhusõiduk		Kasutusvaldkond	
Klass	Maksimaalne õhkutõusu mass	Alamkateooria	Kasutusvaldkonna piirangud
Iseehitautud droon	<250 g	A1, A3	Ei tohi lennata inimeste kohal, kes ei ole lendamisega seotud.
Droon	<500 g		
Droon	< 2 kg	A2, A3	Horisontaalne distants vähemalt 50m inimestest, kes pole lendamisega seotud
Droon või iseehitatud droon	< 25 kg	A3	Ei tohi lennata inimeste läheduses. Distants asustustatud alast vähemalt 150m.

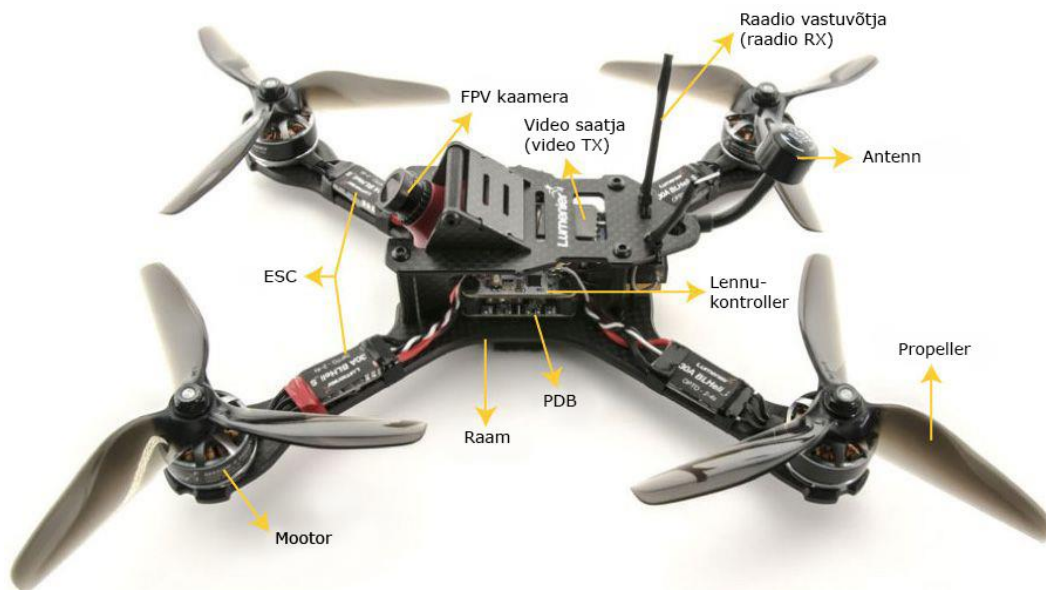
Antud töös lähtutakse Kristjan Pütsepa pakutud liigitusest, mis määrab kaalukategooriatele nimetused ja samas ühtib EASA kaalust lähtuva liigitusega. Töös kasutatav liigitus esitatakse Tabel 2. Kaalust lähtuv liigitus, mida on esitatud Tabel 1 ja Tabel 2 ei ole lõplikud, kuid suurema kaaluga droonid ei kuulu antud töö haardesse ja seetõttu jäetakse need esitamata.

Tabel 2 Antud töös kasutuses olev liigitus

Kaal	Nimetus
Kuni 250 g	Nano mehitamata õhusõiduk
250g kuni 2 kg	Mikro mehitamata õhusõiduk
Kuni 25kg	Mini mehitamata õhusõiduk

## 1.2 Droonide komponendid

Tänapäevased droonid koosnevad erinevatest komponentidest, mis on moodulitena hangitavad kaubandusvõrgust. Mooduleid võib olla erinevaid, kuid on mõned komponendid ilma milleta ei ole võimalik drooniga lennata. Antud peatükis antakse lühikene ülevaade kõige olulisematest drooni komponentidest. Tüüpilise FPV (*first person view* ehk esimese inimese vaade) drooni komponentide paigutus on toodud Joonis 1.



Joonis 1 Tüüpilise FPV drooni ühesehituse näide [6]

Drooni raam (*frame*) on alus, mille peale kinnitatakse kõik muu vajalik. Raami valitakse otstarbe ja drooni ehitamisel ettenähtud parameetrite järgi. Juhul kui soovitakse kasutada olemasolevaid komponente, on raami valikul määravaks olemasolevate propellerite, mootorite või lennukontrollerite suurused [7]. Raami valik lähtub otseselt drooni suurusest ja moodulitena müüdavad komponendid on tihti mõeldud töötama koos teatud tüüpi või suuruse raamiga.

Lennukontroller (*FC – flight controller*) on drooni aju. Lennukontrolleri põhiülesanne on juhtida drooni läbi õhu, andes juhtsignaale elektroonilisele kiiruse regulaatorile. Lennukontrolleri näol on tegemist arvutiga, kus arvutatakse piloodi ja andurite sisendite põhjal algoritmide abil vajalikud korrigeeringud, et droon liiguks ettenähtud stabiilsusega soovitud suunas [7]. Tänapäevased lennukontrollerid seovad kokku erinevad elektroonikakomponendid ja olenevalt toojast on lennukontrolleritele integreeritud erinevad moodulid, näiteks elektrijaotusplaat (PDB – *power distribution board*), elektrooniline kiiruseregulaator (ESC – *electronic speed controller*),



raadiovastuvõtja (*radio RX*), videosaatja (*video TX, VTX – video transmitter*) ja ekraani ülekate lennuinfo kuvamiseks (*OSD – on screen display*).

Tänapäeval on elektri jaotusplaadi ehk PDB olulisus vähenenud, kuna mitmed lennukontrollerid on varustatud vajaliku mooduliga [7]. Eraldiseiseva PDB näol on tegemist trükkplaadiga, millele on sageli integreeritud erinevad pingeregulaatorid. Nende abil on võimalik parandada efektiivsust ja pinge kvaliteeti võrreldes lennukontrollerile integreeritud pingeregulaatoritega. Samas võib PDB näol olla tegu trükkplaadiga, millel on ainult vasest rajad. Vajalikud pingeregulaatorid võivad olla ka integreeritud elektroonilistesse kiirusregulaatoritesse (ESC). ESC on komponent, mille abil tõlgitakse lennukontrolleri juhtsignaal mootori kiiruseks ja võimsuseks, kusjuures ESC võib olla integreeritud lennukontrollerile, kuid soovitus on jätta ESC eraldi mooduliks [7]. Integreeritud PDB ja/või ESC tähistatakse lennukontrolleril nimetuses sageli tähisega AIO-ga (*all in one*).

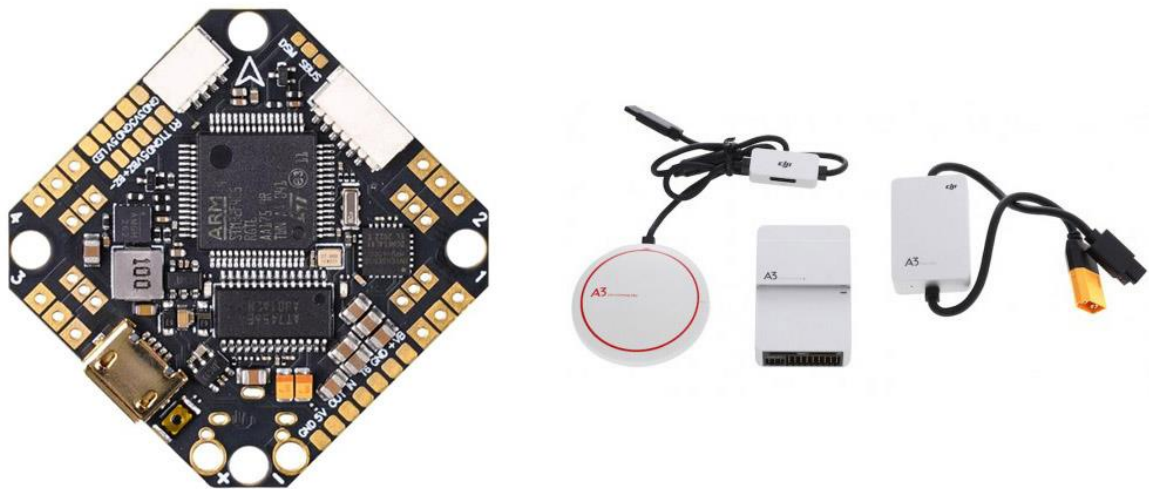
Elektrimootorid on drooni peamised energiatarbijad. Üldiselt on kasutusel harjasteta mootorid. Efektiivsuse tagamiseks on oluline kasutada mootorile sobivat propellerit, mis tekitab piisavalt tõstejõudu ja samas ei koorma liialt mootorit ega jõuelektroonikat [7]. Propelleri ja mootori kombinatsioon on otseselt seotud drooni mõõtmete, kaalu, raamitüübi ja eesmärgiga. Lennukontrolleri valik on mõjutatud mootori ja propelleri valikust, kuna sobilikuks võib osutuda AIO lennukontroller, millega võimaldatakse lihtsamat ehitust ja paremat komponentide vahelist ühilduvust.

Raadiovastuvõtja on droonide oluline komponent, mille abil võimaldatakse edastada lennukontrollerile piloodi soove [7]. Raadiovastuvõtjad kasutavad erinevaid protokolle lennukontrolleriga suhtlemiseks, kusjuures osadele lennukontrolleritele on raadiovastuvõtja integreeritud. See lihtsustab küll drooni ehitust, kuid sunnib kasutama teatud tüüpi raadiosaatjat. Raadiosaatjaga käib käsikäes FPV drooni puhul ka videosaatja, millega edastatakse pilt drooni piloodile vastavatesse prillidesse. Pildi ülesvõtmiseks kasutatakse FPV kaamerat (*FPV camera*).

Üldjuhul on nelja propelleriga drooni kõige raskem komponent aku. Tavaliselt kasutatakse liitiumpolümeerakusid, mille lühend on LiPo. LiPo akudel on suur energiatihedus ja vajadusel võimaldavad suurt voolutugevust. Aku suurus on otseselt seotud drooni kaalu, lennukauguse ja lennuajaga [7]. LiPo aku pinge tähistamiseks kasutatakse numbrit, millele järgneb täht „S“. See tähis näitab mitu aku elementi on jadamisi ühendatud, kusjuures ühe elemendi pinge on 3,7V. Näiteks aku tähisega 3S on LiPo akukomplekt, mille nimipinge on 11,1V.

### 1.3 Lennukontrolleri olulisus

Drooni lennukontroller on drooni aju. Tegu on trükkplaadiga, millel on mitmed sensorid drooni liikumise tajumiseks. Kogu anduritest saadava info tulemusena annab lennukontroller signaali mootoritele, et tagada drooni soovikohane liikumine [8]. Lennukontrolleri põhitegevuse võib jagada kolme kategooriasse: tunnetamine, kontrollimine ja kommunikatsioon [9]. Joonis 2 on esitatud kahe tüüpilise lennukontrolli pildid.



Joonis 2 Lennukontrolleri näited. Vasakul BETA FPV Toothpick F4 2-6S AIO [10] , paremal DJI A3 [11]

Kui jätta kõrvale muu funktsionaalsus on lennukontrolleri näol tegemist juhtseadmega, mis juhib läbi jõuelektronika ja elektriajamite drooni liikumist õhus. Lennukontroller on seade, mis arvutab vajaliku mootori kiiruse vastavalt PID (*proportional-integral-derivative*) algoritmile. PID algoritm on automaatjuhtimis viis, mille abil saavutatakse kiire reageerimine, aga samas summutatakse ebavajalikud võnked. Näiteks kui droonile antakse käsk saavutada teatud kõrgus, täidab droon selle käsu maksimaalse kiirusega, kuid ei lähe etteantud kõrgusest kõrgemale.

Mootorite juhtimise kõrval on lennukontrolleril muutunud üha olulisemaks muu funktsionaalsus. Olulisel kohal on tarkvara, integreeritud andurid, sisendite ja väljundite hulk. Suurem integreeritud andurite ja funktsioonide hulk lihtsustab drooni ehitamist ja parandab süsteemi ühilduvust. Mehhaanilise lihtsusega vähendatakse drooni komplekteerimisel tekkivaid vigu, kuna kasutatakse vähem juhtmeid ja vähem jootmist. Kõik lisad suurendavad lennukontrolleri hinda, seetõttu on vajalik teha lennukontrolleri valikul optimaalne otsus.

## 2. ENAMLEVINUD ANDURID JA MOODULID LENNUKONTROLLERITEL

Lennukontrolleri kõige olulisem ülesanne on teha PID arvutusi ja anda välja mootorite juhtsignaali. Lennukontrolleri protsessori kiirusest sõltub PID kalkulatsioonide kiirus, millest omakorda sõltub drooni stabiilsus. Samuti on stabiilsus mõjutatud lennukontrollerile integreeritud anduritest. Lennukontrolleri funktsionaalsuse tõstmiseks lisatakse uusi andureid ja mooduleid, kuid kõik droonid ei vaja ühesuguseid andureid. Näiteks väike mängimiseks mõeldud droon võib vajada ainult ühte güroskoopi, samas autopiloot võib vajada kolme güroskoopi, tagamaks süsteemi tõrkekindlust. Antud peatükis on välja toodud lennukontrolleri komponendid, mida tuleks kaaluda lennukontrolleri valikul.

### 2.1 Mikrokontroller

Lennukontrolleritest kasutatakse erineva arhitektuuriga mikrokontrollereid, näiteks: 8015, AVR, PIC või ARM. Arduino on AVR baasil ja on fokuseeritud kasutama MultiWii tarkvara. PIC mikrokontrollerid on toodetud Microchip'i poolt. ARM on 16/32 bitine mikrokontroller samas kui PIC ja AVR on 8/16 bitti. [12] Kõige enam kasutatakse ARM arhitektuuriga STMicroelectronics poolt toodetud STM32 mikrokontrollereid: F1, F3, F4, F7 ja H7. Antud mikrokontrollerite peamised omadused on toodud Tabel 3 [8]. STM32 tüübi saab kindlaks teha toote numbri järgi, kus täht ja number pärast STM32-e näitab mikrokontrolleri tüüpi. Näiteks Joonis 3 olev STM32F722 on antud tabelis tähisega F7.

Tabel 3 Mikrokontrollerite loetelu ja võrdlus

Mikrokontroller	Taktsagedus	Sisendid/väljundid	Mälu
F1	72MHz	2	128kB
F3	72MHz	3	256kB
F4	100-168MHz	2-5	512-1024kB
F7	216MHz	5-6	512-2048kB
H7	480MHz	5-7	128kB



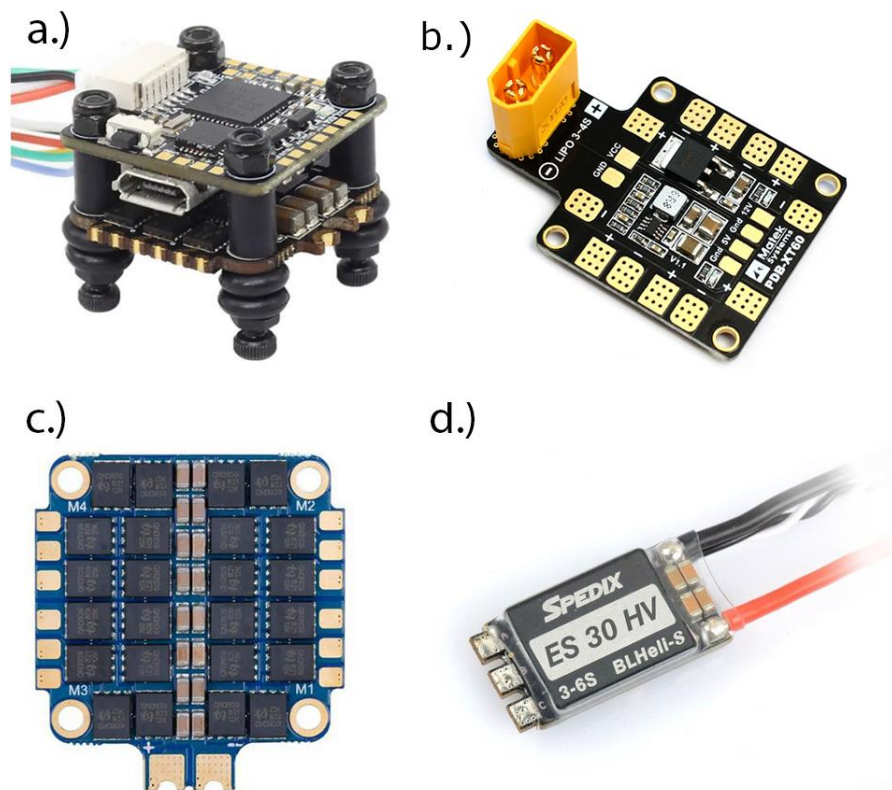
Joonis 3 STM32F722 mikrokontroller [13]

Tabel 3 esitab protsessorite kiirused, sisendite ja väljundite hulga ja mälumahu. Siinkohal tuleb täpsustada, et mälumaht on püsivara salvestamiseks. Sellesse mällu ei salvestata lennulogi. Lennulogi ehk musta kasti (*black box*) jaoks on lennukontrolleril eraldi mälu. Mälu ja kiiruse kõrval on oluline sisendite ja väljundite hulk. Kiiremad protsessorid suudavad hakkama saada rohkemate sisendite ja väljunditega, kaotamata seejuures drooni stabiilsust.

F1 ja F3 mikrokontrollerit peetakse tänapäeval liiga aeglaseks ja seetõttu kaob või on juba kadunud nende tarkvaraline tugi, seega on soovitatav nendest mikrokontrolleritest hoiduda [12]. Siinkohal tuleb lisada, et ka F1 mikrokontrolleriga lennukontroller saab siiski hakkama vajalike PID algoritmidega. Probleemiks on pigem püsivara mälumahu ja süsteeminõuete suurenemine, mis tarbib liiga suurt osa F1 ja F3 mikrokontrolleri võimekusest. Lennukontrollerite tootjad soovivad suurendada lennukontrolleri funktsionaalsust, et saavutada konkurentsieelis, vanemad mikrokontrollerid seda enam ei võimalda.

## 2.2 Voolujaotusplaat (PDB) ja elektrooniline kiiruseregulaator (ESC)

Voolujaotusplaat (PDB, Joonis 4 b) ja elektrooniline kiiruseregulaator (ESC Joonis 4 c ja d) on mõlemad jõuelektroonika komponendid. Need komponendid võivad, kuid ei pea olema integreeritud lennukontrolleri trükkplaadile. Integreerimiseks on kaks viisi: komponendid on paigaldatud lennukontrolleriga ühele trükkplaadile või on komponendid eraldi plaatidena üksteise peal (stack, Joonis 4 a). Mõlemal juhul võib lennukontrolleri nimetuses olla tähis AIO (all in one), millega näidatakse PDB ja/või ESC-i olemasolu.



Joonis 4 Erinevad lahendused. a - HGLRC FD413 stack [14]; b - Matek PDB-XT60 PDB [15]; c - iFlight Succex-E 45A 4-in-1 ESC [16]; d - üksik ESC [17]

Voolujaotusplaadi (PDB) ülesanne on jaotada elektrienergiat vajalikul pingel erinevatele drooni moodulitele. Esialgu oli tegu väga lihtsate trükkplaatidega, millel olid ainult vasest rajad. Tänapäeval on lisandunud droonidele lisaseadmeid, mis vajavad stabiilset pinget. Eriti tundlikud on videoseadmed, mida kõige enam mõjutavad häiringud mootori juhtskeemilt [18]. Sageli integreeritakse voolujaotusplaat lennukontrollerile. Väiksemate droonide korral saab lennukontrolleril olev voolujaotusmoodul suurepäraselt hakkama. Siiski, suuremate droonide korral tuleks kaaluda eraldi voolujaotusplaadi paigaldamist. Näiteks suurem droon võib tarbida täis võimsusel umbes 100A voolu, mis võib lennukontrollerile olla liig [19].

Vähem levinud lennukontrolleri osa on mootori elektronile kiirusregulaator (ESC). Erinevalt voolujaotusplaadist on ESC tihti eraldiseisev komponent. ESC on mootorist, propellerist ja aku suurusest lähtuv seade. Võib öelda, et integreeritud ESCid suudavad juhtida kuni 40A. Kui voolutarve on suurem, tuleks siiski mõelda eraldiseisvate ESCde peale. Alati ei soovitata kasutada lennukontrolleriga integreeritud ESC-i [8]. Soovitus lähtub asjaolust, et vale ühenduse korral rikneb rohkem moduleid. Näiteks valesti

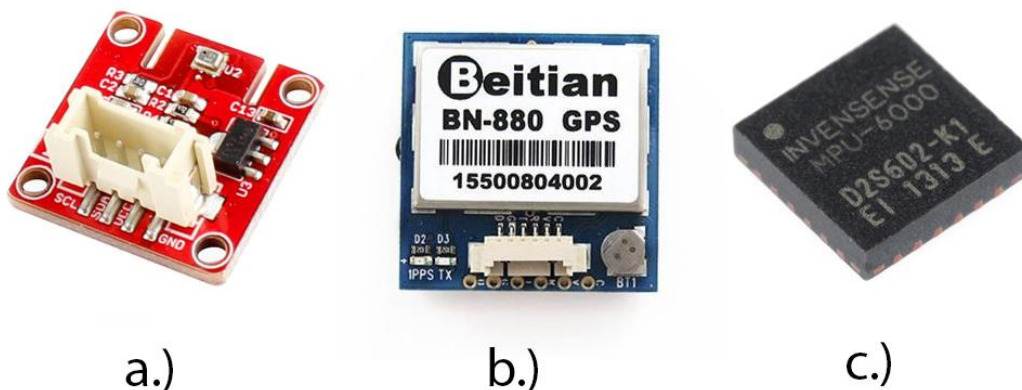
ühendatud üksiku mootori ESCi rikenemisel tuleb vahetada välja ainult üks ESC, integreeritud lahenduse puhul vajab vahetust terve lennukontroller

ESC-e on kahte tüüpi: üksik mootori ESC (Joonis 4 d) ja 4-in-1 ESC (Joonis 4 c). Esimesi on vajatakse droonile nii palju kui on mootoreid, teist on vaja üks. 4-in-1 ESC võib asendada volujaotusplaati. [8] Lisaks vajalikule volujuhtimis võimekusele tuleb silmas pidada ka drooni terviklikku ülesehitust. Seetõttu võib osutuda vajalikuks valida lennukontroller, millel on integreeritud ESC moodulid ja seeläbi vähendada juhtmete ja ühenduste arvu droonil.

## 2.3 Sensorid (sisendid)

Lennukontrolleri kõige olulisem ülesanne on PID arvutuste tegemine drooni stabiilsuse tagamiseks ja liikumiseks soovitud suunas. Ühelt poolt on lennukontrollerile sisendiks piloodi soovitud liikumise suund ja kiirus, teiselt poolt andurite väljundid. Kõikidel lennukontrolleritel on güroskoop ja kiirendusandur (Joonis 5 c). Lisaks võib olla integreeritud lennukontrollerisse baromeeter (Joonis 5 a), GPS koos kompassiga (Joonis 5 b), raadioaltimeeter ja volusensorid. Antud nimekiri ei ole kindlasti lõplik, kuid võtab kokku enamlevinud andurid.

Kõige olulisem andur on güroskoop koos kiirendusanduritega. Peamiselt kasutatakse MPU6000 ja ICM20602 güroskoope. MPU6000 on güroskoop, mis võimaldab info uuendamist taktsagedusega 8KHz, ICM20602 maksimaalselt 32KHz. Kuigi suurem taktsagedus tundub esialgu parem, on ICM20602 vastuvõtlikum mürale, samas võimaldab hästi seadistatud ICM20602 täpsemat drooni juhtimist kui MCU6000 [20]. Güroskoop ja kiirendusandurid on paigutatud ühte korpusesse ja neid nimetatakse inertsiaalseks mõõtühikute süsteemiks (IMU). Tegu on seadmega, mis mõõdab kiirendust ja nurga muutust kolmes eri suunas. Lennukontrollerile võib olla paigaldatud mitu IMU-d, et võimaldada eri tüüpi güroskoopide heade omaduste kasutamist ja/või tagamaks tõrkekindlust.



Joonis 5 Erinevad moodulid ja komponendid. a - baromeeter Crowtail BMP280 Barometer Sensor 2.0 [21]; b - Beitian BN-880 GPS ja kompassi moodul [22]; c - güroskoop IMU MPU-6000 [23]

GPS (Joonis 5 b) positsioneerimist on võimalik kasutada kahel eri viisil. Esiteks võib droon lennata eelnevalt programmeeritud teekonda, teiseks on GPS-i näol tegu drooni üles leidmist võimaldava seadmega. GPS moodulisse on sageli integreeritud ka kompass [20]. GPS koos kompassiga on oluline autopiloodi osa, tänu millele lennukontroller hindab asukohta, kõrgust maapinnast ja suudab täita ettenähtud ülesannet. Sageli on GPS moodul eraldiseisev moodul, mis ühendatakse lennukontrolleriga. Selline ühendusviis viib GPS antenni koos kompassiga mootorite magnetvälja häiringust eemale ja seetõttu paraneb navigeerimistäpsus.

Baromeetreid (Joonis 5 a) kasutatakse autonoomsete lendude sooritamiseks. Baromeeter ei ole väga täpne andur, kuid võimaldab hoida kõrgust maapinnast piisava täpsusega, et vältida kokkupõrkeid. Kui drooni ei kasutata autonoomseks lendamiseks, siis üldjuhul vajadus baromeetri järgi puudub [20]. Baromeetri ebatäpsuse tõttu ei ole võimalik sooritada kiiret autonoomset maandumist, selleks on tarvilik raadioaltimeeter. Mitmetel kallimatel lennukontrolleritel on baromeeter peal. Baromeeter on sagedamini integreeritud F7 mikrokontrolleriga lennukontrollerisse, kuna F7 on võimekam ja kallim kui F4. Samas ei välista F4 baromeetri olemasolu.

Ülejäänud lennukontrolleris olevad sensorid on vajaduspõhised. Nad suurendavad lendamise täpsust, ohutust ja võimaldavad droonil lennata autonoomselt. Näitena võib välja tuua raadioaltimeetri, transponder süsteemi (ADS-B) või dünaamilise rõhu mõõtja (*pitot tube*), mis teatud rakenduste puhul on asendamatud, kuid kallid lisad. Samuti ei pruugi olla kõik andurid integreeritud lennukontrollerile, vaid lisatavad läbi sisend- ja väljundportide. Üldjuhul kehtib reegel, et mida suurem on lennukontrolleri hind, seda rohkem on lennukontrolleril sensoreid, kuid teatud vanemaid lennukontrollereid müüakse põhjendamatult kalli hinnaga.

## 2.4 Väljundid

Lennukontrolleri kõige olulisem väljund on mootorite juhtsignaal. Väljundiks on pulsilaiusmodulatsiooniga (PWM) signaal elektroonilisele kiirusregulaatorile, mis annab vastava voolutugevuse mootoritele. AIO lennukontrolleri puhul on väljundiks mootoritele minev vool, tavalise lennukontrolleri puhul on väljundiks PWM signaal.

Lennukontrolleri üheks väljundiks on, FPV droonil, lennuparameetrite kuvamine (*OSD - on screen display*) vastavates prillides. Parameetrite hulka kuuluvad aku ping, voolu tarve, lennuaeg, kõrgus ja muu vajalik info lendamiseks. Seda kõike edastatakse videopildi lisana otse piloodi prillidesse [20]. Lennukontrolleril Matek F722-SE AIO kasutatakse OSD kiibina AT7456E kiipi. Paljudele lennukontrolleritele on antud kiip paigaldatud ja see võimaldab lisada videopildile vajalikud parameetrid. OSD-ga seotud lennukontrolleri väljundiks on videoväljund (video TX). Üldjuhul on videosaatja siiski eraldiseisev moodul, kuid leidub lennukontrollereid millele on videopildi saatja integreeritud.

Musta kasti (*black box*) funktsioon võimaldab salvestada lennuparameetrid lendamise ajal. Antud funktsioon on vajalik lennu optimeerimiseks ja konfiguratsiooni maksimaalse potentsiaali realiseerimiseks [20]. Musta kasti funktsionaalsus on lahendatud kahte eri viisi: SD kaardile salvestamine või drooni sisemisse mälusse salvestamine. Viimasel juhul on mälu maht tugevalt piiratud. Musta kasti infot kasutatakse drooni lendamise analüüsiks ja PID algoritmide parandamiseks.

Mehitamata õhusõiduki lennukontrolleri väljundiks, olenevalt tootjast, on videostabilisaatori signaal. See tähendab, et lennukontroller suudab juhtida ka kaamerale mõeldud tasapinda ja stabiliseerida seda vastavalt vajadusele. Selline funktsionaalsus on leitav kallitel ja professionaalsetel süsteemidel ja ilmestab asjaolu, et tänapäevased lennukontrollerid on võimelised täitma ka muid ülesandeid.

Olulised väljundid on veel helisignaal ja valgusti. Helisignaal (buzzer) on kasutusel peamiselt alla kukkunud drooni asukoha tuvastamiseks. Helisignaal suurendab drooni ülesleidmise tõenäosust märkimisväärselt. LED (light emitting diode) on üldiselt kasutusel töötamise indikaatorina, asukoha määramiseks ja üles leidmiseks. LED on tihti eraldi moodul, mis kinnitatakse drooni raamile, lisaks lennukontrolleril võib olla LED riba kasutamiseks ettenähtud väljund.



### 3. LENNUKONTROLLERITE VALIKU ALUSED

Lennukontrolleri peamine ühesanne on juhtida elektrimootoreid, mida tehakse lennukontrolleris PID juhtimisega. PID juhtimisega tagatakse soovitud liikumise suund ja lennu stabiilsus seega on piisav PID arvutus tihedus oluline näitaja. Tänapäeval on enamus lennukontrollerid võimelised teostama PID algoritmi piisava kiirusega ja tänu sellele on lennukontrolleri valikul muutunud väga oluliseks lisad. Lisad vähendavad droonile moodulite lisamise vajadust ja seega lihtsustavad drooni ülesehitust. Seetõttu võimaldavad lennukontrolleritel olevad lisad suurendada funktsionaalsust suurendamata ehitamise keerukust.

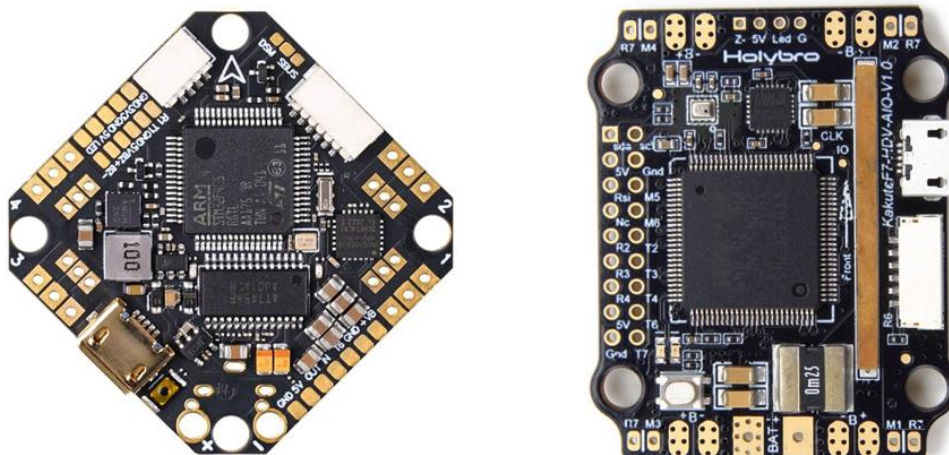
#### 3.1 Suurus ja kaal

Kui drooni ehitamise eesmärgid on paika pandud peaks sealt välja joonistuma ehitatava drooni kaal, mis on oluline suunaja lennukontrolleri valikul. Üldjuhul väiksema kaaluga droonil peaks olema kasutusel väiksem lennukontroller. Planeeritavast kaalust on otseselt sõltuvuses raami suurus, mootorid ja propellerid. Lennukontrollerite kaal algab umbes neljast grammist, kuid võib minna sadadesse grammidesse. Lennukontroller võib olla paigaldatud eraldi korpusesse nagu näiteks lennukontrolleri Pixhawk 2.1 puhul. Antud korpus suurendab kaalu ja on ainult ilusama välimuse pärast, kuid korpus ei paranda ilmastikukindlust antud lennukontrolleril [24]. Lennukontrolleri kaal on määrav siis kui valitakse liiga suure funktsionaalsusega lennukontroller näiteks nano droonile, mille puhul oleks olnud mõistlikum valida kergem lennukontroller.

Drooni raami suurusest sõltub lennukontrolleri suurus. Oluline mõõt lennukontrolleritel on paigaldamiseks kasutatavate aukude vahe. Enamlevinud paigaldus aukude vahed on esitatud Tabel 4 koos paigaldusviigiga [8]. Diagonaalis (whoop) ja rõhtsa paigutuse erinevus on toodud Joonis 6. Tabel 4 ja Joonis 6 esitatud paigaldusviisid on enamlevinud väiksemate droonide puhul. Professionaalsed lennukontrollerid kasutavad eri lahendusi, mis ei allu nii rangele suuruste süsteemile. Olenevalt toojast võivad olla kinnitusaukude vahe spetsifikatsioonis pool millimeetrit väiksemad või suuremad.

Tabel 4 Paigaldus aukude vahe ja paigaldusviis.

Akude vahe	30,5x30,5mm	20x20mm	16x16mm	25,5x25,5mm
Paigaldus viis	Rõhtne	Rõhtne	Rõhtne	Diagonaal (whoop)



Joonis 6 Vasakul on BETAFPV Toothpick F4 2-6S AIO [10] diagonaalne (whoop) paigaldusviisiga lennukontroller, paremal on Holybro Kakute F7 HDV AIO [25] rõhtsa paigaldusviisiga lennukontroller. Paigaldusviisi indikaatoriks on nool trükkplaadil.

### 3.2 Tarkvara

Lennukontrolleritele on mitmeid erinevaid tarkvarasid. Nimekiri on pikk ja kuna arengud on muutlikud antud valdkonnas, leidub mitmeid tarkvarasid, mida enam ei arendata või arendus on aeglustunud. Tarkvara on siiski ääretult oluline, kuna tarkvara võimekusest sõltub drooni stabiilsus, funktsionaalsus ja tõrketaluvus. Näiteks väikese ja odava drooni juhtsignaali kadumine ei pruugi olla suur probleem, kuid kalli drooni puhul võib tähendada alla kukkumine tuhandetesse eurodesse ulatuvat kahju. Lisaks on tarkvaral erinevad litsentsi tüübid, mis võivad seada piiranguid soovitud rakendusele. Tabel 5 on esitatud enamlevinud vabavaraliste tarkvarade nimekiri ja tarkvara poolt toetatud funktsionaalsus [26].

Kõige laialdasemalt kasutatakse hobikorras BetaFlight tarkvara. Cleanflight on välja kasvanud BetaFlight tarkvarast, mida samuti kasutatakse laialdaselt. Selle tarkvara eeliseks on lihtsustatud kood. Siiski on CleanFlight tarkvara arendus kiirus pidurdunud ja pikaajalisuse huvides tasuks kasutada BetaFlight tarkvara. ArduPilot on hobimaailmas kõige lihtsam ja töökindlam tarkvara, mida kasutada autopiloodi jaoks [27]. BetaFlight tarkvaralt on võimalik üle minna näiteks CleanFlight või INav tarkvarale, kuid selle jaoks peab olema tarkvara tugi antud lennukontrollerile. Foorumites liigub ringi mitteametliku tarkvara, millega võimaldatakse kasutada ametlikult toetamata lennukontrolleritel näiteks INAV tarkvara. Ardupilot, INAV ja PX4 on suunitletud autopiloodi rakendustele.

Tabel 5 Enamlevinud vabavaralised tarkvarad.

<b>Tarkvara</b>	<b>Autopilot</b>	<b>Kommunikatsioon</b>	<b>Tõrketaluvus</b>	<b>Lisad</b>
CleanFlight	sph, swp	sb, ib, sd, sh, pm, pw, cf, jeb, ds, xbu, fs, sp, ht, lt, ml, sl, msp	c2k, bvw	g, bm, dl, rth, hf, ts, at
BetaFlight	sph, swp	sb, ib, sd, sh, pm, pw, cf, jeb, ds, xbu, fs, sp, ht, lt, ml, sl, msp	c2l, c2k, bvw	g, bm, dl, rth, hf, ts, at
INAV	fm, swp, sph	sb, ib, sd, sh, pm, pw, cf, jeb, ds, xbu, fs, sp, ht, lt, ml, msp	c2l, c2k, bvw, c2rl	g, at, bm, dl, rth, at
ArduPilot	svnf, sph, swp	sb, pm, ds, fs, ml	ar, sw, apr, sc, c2rl, c2l, c2k, bll, gf	g, rlg, loa, bm, rth
PX4	sph, swp, fm	sb, sd, ds, fs, sp, ht, ml, ir	gf, c2k, c2l, c2rl, sc, apr	g, rth, bm, dl, rlg, loa

Automaatpilot sph: satelliidi positsiooni hoidmine; swp: punktide järgi navigeerimine; fm: jälitamine; svnf: stereovisioon navigatsioon; Kommunikatsioon sb: SBus; ib: iBus; sd: SumD; sh: SumH; pm: PPM; pw: PWM; cf: CRSF; jeb: JetiExBus; ds: DSM; xbu: XBUS; fs: FrSky; sp: SmartPort (s.port); ht: HoTT; lt: LTM; ml: MavLink; sl: SRXL; msp: Multiwii jada protokoll; ir: Iridium SBD; Tõrketaluvus ar: ADS-B tugi; c2l: C2 side kaotuse korral maandumine; c2rl: koju naasimine C2 side kadumisel; c2k: mootori toite välja lülitamine C2 side kadumisel; bvw: madala aku pinge hoiatus; apr: automaatne langevar; sw: ohulüliti mootori pingestamiseks; bll: maandumine või koju tulek madala aku pinge korral; gf: geotara; sc: käivitamisel andurite kontroll; Features g: gimbal; rth: koju naasmine; bm: aku jälgimine; dl: musta kasti funktsioon; hf: fikseeritud krusiga lendamine; ts: transponderi tugi; at: PID automaatne seadistus; rlg: sisse tõmmatava teliku tugi; loa: Lidarga takistustest hoidumine. [26]

Lisas 1 on toodud täpsustused ja lühiselgitused Tabel 5 esitatud lühendite kohta.

### 3.3 Tsükliagedus

Protsessori kõige olulisem ülesanne on täita PID algoritmi lennustabiilsuse tagamiseks. PID algoritmi täitmise sagedus on otseselt seotud mikrokontrolleri kiirusega, lisadega lennukontrolleril ja kasutatava tarkvaraga. Iga lisa, mis on lennukontrollerile lisatud, koormab mikrokontrollerit võttes enda alla teatud osa arvutusvõimsusest. PID algoritmi tsükliagedust mõõdetakse hertsides või sekundites, kui kaua võtab aega PID algoritmi sooritamise. Suurem tsüklikiirus vähendab süsteemi hilistumist [28].

Mikrokontrollerist tulenev PID algoritmi tsüklikiirus ei ole ainus muutuja, mis määrab süsteemi viiteaja pärast juhtsignaali sisendist. Viiteaega tekitavad kõik lisaseadmed ja ühendused droonil, sealhulgas mehaanilised komponendid droonil. Lennukontrollerite vaatest on kõige olulisemal kohal lennukontrolleri PID tsükliage, güroskoobi viiteaeg ja elektroonilise kiirusregulaatori ühenduse aeg. Kahte esimest suurust võib omavahelises suhtes kirjeldada näiteks 4K/2K või 8K/8K, kus esimene arv näitab güroskoobi tsükliagedust kilohertsides ja teine arv näitab lennukontrolleri tsükliagedust kilohertsides. Lennukontrollerid, mis on varustatud F3 mikroprotsessoriga, on võimelised 8kHz tsükliageduseks samas F4 võimaldab kuni 32kHz tsükliagedust. Kindlasti peaks olema güroskoobi uuendustsükli sagedus sama või suurem kui lennukontrolleri oma. [28]

Güroskoobi viiteaeg tuleb madalsagedus filtrist. Näiteks madalsagedus filter, mis on seadistatud 256Hz peale, tekitab ajalise viite 0.98ms. Samas 5Hz peale seadistatud filter tekitab 18.6ms ajalist viidet. Kuna tsükliageduse suurendamine on otseselt seotud drooni reageerimiskiirusega, võib tunduda mõistlik sättida võimalikult suur filtreerimis sagedus. Kuna madalsagedus filtri ülesanne on filtreerida välja müra güroskoobi väljundis, siis kõrgema sageduse kasutamine laseb suuremal hulgal müra väljundisse. Näiteks KISS lennukontrollerid toimivad PID tsükliagedusega 1kHz ja lendavad suurepäraselt, samas kui BetaFlight'i kasutavas lennukontrolleris on võimalik sagedus tõsta 8kHz peale [28].

Elektroonilisi kiirusregulaatoreid juhitakse pulsilaiusmodulatsiooniga (PWM), mille kiirus tekitab omakorda ajaviite kogusüsteemi. Erineva kiirusega mootorite jõuskeemi juhtsignaale nimetatakse näiteks: OneShot125, OneShot42, DShot 300, MultiShot või DShot600. Antud nimekiri ei ole lõplik. Näiteks OneShot125 tekitab ajaviite 125-250us samas OneShot42 tekitab ajaviite 42-84us. Sellest tulenevalt tuleks ka valida lennukontrolleri ja güroskoobi tsükliagedus [28]. Üldistatult võib öelda, et tänapäevaed lennukontrollerid uuemate mikrokontrolleritega võimaldavad kiiruseid, mis on suured ja pigem on oluline hakkama saada müraga. See tähendab, et drooni ehitamisel võib olla vajalik tsükliagedust vähendada ja olulisel kohal on näiteks komponentide paigaldusviis müra vähendamiseks.

### 3.4 Moodulid ja funktsionaalsus

Valiku tegemiseks on oluline eelnev eesmärkide püstitamine. Kui on vastatud küsimusele, mis moodulid on olulised antud ehituse juures, saab teadlikult teha valiku lennukontrolleri hankimiseks. Mooduleid on võimalik juurde lisada kasutades lennukontrolleri sisendeid ja väljundeid, kuid drooni ehitust võivad lihtsustada kontrolleril olemas olevad lisad.

Lennukontrollerid jagatakse kahte gruppi automaatpilot ja lennukontroller. Kahjuks antud mõisted ei ole väga täpselt defineeritud ja artiklites kasutatakse neid läbisegi. Täpsemaks definitsiooniks lennukontrollerile pakuks, et lennukontroller on seade, mis tagab õhusõiduki stabiilsuse. Automaatpilot on lennukontrolleri lisaseade, mis võimaldab autonoomset õhusõiduki liikumist. Lennukontrolleri ja automaatpiloodi erinevuseks on liikumissignaali alguspunkt, mis esimesel juhul on piloot teisel juhul elektroonika skeem. [29] Sellest lähtuvalt on oluline eesmärgistamine, kas antud drooniga soovitakse teha autonoomseid lendamisi või mitte. Autonoomset lendamist võimaldavad lennukontrollerid on üldjuhul kallimad.

Olenevalt õhusõiduki eesmärgist võib olla oluline lennukontrolleri tõrketaluvus. Tõrketaluvus saavutatakse erinevate võtetega. Näiteks on mRo Pixhawk Flight Controller (Pixhawk 1) lennukontroller varustatud STM32F427 mikrokontrolleriga, kuid lennukontrollerile on lisaks paigaldatud STM32F100 tõrkekindlust tagav mikrokontroller lisaks on paigaldatud mRo Pixhawk Flight Controller (Pixhawk 1) lennukontrolleritele kaks güroskoopi ja kaks kiirendus andurite komplekti [30]. Teine mikrokontroller ei võimalda kogu funktsionaalsust, kuid võimaldab droonil maanduda ennast kahjustamata. Dupleeritud güroskoobiga saavutatakse suurem stabiilsus ja suurem tõrkekindlus. Selline tõrkekindlus on vajalik kui droonile on paigaldatud lisaks kallid mõõtmiseseadmed, kaamerad või droon ise on kallitest komponentidest ehitatud. Komponentide dupleerimisega rikke ilmnemisel võimaldatakse ohutus kohas ohutut maandumist.

Kõik droonile paigaldatud lisaseadmed vajavad voolu, et normaalselt töötada. Kuna aku pinge ei ole konstantne vajab droon pinge regulaatorit, mille lühend on BEC (Battery Elimination Circuit). BEC võib olla lisatud lennukontrollerile, PDB-le või ESC-le. BEC'd töötavad erinevate tööpõhimõtete järgi ja on eristatav näiteks LBEC (lineaar BEC) ja SBEC (switching BEC). Viimane on suurema efektiivsusega komponent. Kõige efektiivsem lahendus on UBEC (universal BEC) [31]. Üldjuhul on tegu konkreetse ehituse juurde käiva otsusega, kust võetakse lisaseadmetele vajalik vool ja kas antud vool on vajalik võtta lennukontrollerilt või saab selle mujalt. Sama on ka otsusega, kas ESC võiks olla osa lennukontrolleri plaadist või eraldiseisev komponent.

Lennukontrolleritel on kasutusel UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) sisend ja väljund port. Sellega on võimalik ühendada lisaseadmeid lennukontrolleriga näiteks raadio vastuvõtja, telemeetria ja muud. Erinevate lennukontrollerite mikroprotsessoritega kaasneb eri hulk UART porte (Tabel 3). Suurem toetatud portide arv on seotud otseselt mikroprotsessorite arenguga ja kiirusega. Kehtib põhimõte, et isegi kui ei ole vaja pakutavat arvu UART porte on hea omada neid [8]. UART signaal võib olla inverteeritud või inverteerimata. F3 ja F7 mikroprotsessorid toetavad inverteeritud signaal, kuid F1 ja F4 ei toeta. Viimase kahe mikroprotsessori puhul tuleb kasutada inverteerimis lisa skeemi, kui soovitakse kasutada inverteeritud signaali. Kasutaja mugavuse huvides on peaaegu kõigil F4 mikroprotsessoritega olemas SBUS (serial BUS) millele on võimalik otse ühendada saatja. BetaFlight võimaldab tekitada juurde kaks virtuaalset UART porti. Virtuaalsete portide kiirus on madalam ja pordiga on seotud suurem koormus mikroprotsessorile [8].

Hoolimata asjaolust, et lennukontrolleritel on lisa sisendeid, võib uue moodulite lisamine olla keeruline. Seetõttu on soovitatav hankida lennukontroller, millel on peal juba vajalikud sensorid. Näitena võib tuua baromeetri, mida on võimalik lisada lennukontrollerile eraldi plaadina, kuid võib tekkida vajadus uue pingeregulaatori järgi, sest baromeeter võib kasutada kolme volti. Lisaks kui sensor on integreeritud lennukontrollerile on minimaalne ühilduvuse probleem. Mooduleid saab lisa, kuid tuleb olla valvas ühendusviiside ja pingete suhtes. Lennukontrollerite puhul ei ole kõik asjad standardiseeritud ja tänu sellele võivad tekkida ühilduvuse probleemid. Samuti on musta kasti funktsionaalsus, mis on võimalik lisada nii eraldi moodulina või on juba integreeritud lennukontrollerisse. Osadel lennukontrolleritel kasutatakse sisseehitatud musta kasti funktsionaalsust, kuid sellele eraldatud mälu maht võib olla väga väike. Näiteks Naze32 Full saab kasutada kuni kaks megabaiti musta kasti info alla, mis on 3-4 minutit lennu aega. Samas Naze32 Acro ei oma sellist integreeritud funktsionaalsust, seega vajab lisa moodulit ja SD kaarti. Kusjuures SD kaardi kasutamise võimalus võib olla integreeritud lennukontrollerile. Musta kasti informatsiooni abil on võimalik parendada PID algoritmi ja tagada täpsem ja drooni kiirem juhtimine [32].

### **3.5 Eesmärk**

Iga ehitamise alguses on eesmärkide seadmine. Lennukontrolleri valikust on võimatu rääkida enne, kui ehitajal ei ole selge, mida soovib drooniga saavutada. Kuna droone on väga palju erinevat tüüpi, siis sõltub ka lennukontrolleri valik ehitatava drooni tüübist. Lihtsa näitena võib tuua, et drooni propellerite hulgast lähtuvalt tuleb valida ka vastav lennukontroller, sest droonil võib olla neli, kuus või kaheksa mootorit. See

muudab lennukontrolleri mootoritele mõeldud väljundite hulka, seega tuleb valikul olla ettevaatlik.

Teine lennukontrolleri valiku kriteerium lähtub olemasolevatest asjadest. Antud kriteerium ei puuduta inimesi, kes ehitavad drooni algusest, see tähendab, et kõik jupid hangitakse vastavalt vajadusele. Samas kui omatakse mootoreid või muid mooduleid võib see mõjutada lennukontrolleri valikut. Samalaadne on olukord kui soovitakse lisada droonile funktsionaalsust või stabiilsust lennukontrolleri välja vahetamisega. See tähendab, et on olemas hulgaliselt kriteeriumeid, millele lennukontroller vastama peab. Lihtsa näitena võib tuua näiteks olemasolev raadiosaatja, mida soovitakse kasutada ka uue drooni korral.

Välimus on oluline osa, millega luuakse ehituse lihtsus ja selgus. Lennukontrollerid, koos moodulitega, on üldjuhul ühe teatud suurusega. ESC'ga lennukontrolleri komplekt paigaldatakse kas ühele plaadile või mitmele eri plaadile tehes nendest virn. Ühele plaadile paigaldamine võimaldab lihtsustada drooni välimust ja tehnilist poolt. Droonil on vähem juhtmeid ja vähem korrapäratuid asju. Korrapära on võimalik saavutada korpuste lisamisega, mis võib olla hädavajalik saavutamaks ilmastikukindlust. Üldjuhul ei ole korpustega lennukontrollid tuule ega vee kindlad, selle rolli peaks täitma drooni korpus.

Olulist rolli mängivad klemmide paigutus lennukontrolleril. Kõige lihtsam lahendus on, kui klemmid on paigaldatud suunatult sinna kus neid vajatakse. Mootori juht klemmid võivad olla paigutatud lennukontrolleri nelja eri nurka samas teise tooja lennukontrolleril on nad kõik ühel lennukontrolleri küljel. Mõlemal klemmipaigutusel on oma koht, kuid ehituse lihtsuse ja korrektsuse huvides on soovitatav läbi mõelda, kus asuvad klemmid. Kehva klemmi paigutuse tõttu veetakse juhtmed erinevatest kohtadest ja skeemil kaob ära jälgitavus, lihtsus ja on suurenenud vea tegemise oht ehitamisel.

## 4. LENNUKONTROLLERITE VÕRDLUSTABELID

Lennukontrollerite võrdlustabelites on välja toodud lennukontrollerite pakkumised ja nende lennukontrollerite omadused. Lennukontrollerite valik on tänapäeval väga suur ja seetõttu pole nimekiri lõplik ja tabelist välja jäämine ei tähenda, et lennukontroller oleks halb. Samuti ei ole pakkumised ranged. See tähendab, et nano droonile välja pakutud lennukontrollerit saab kasutada mini droonil, sest lennukontroller annab juhtsignaali, mida on võimalik võimendada. Tabelid on koostatud eeldusel, et suuremale droonile on vajalikud rohkem võimekust ja andureid, kui väiksematele. Seetõttu ei ole välistatud välja pakutud lennukontrolleri kasutamine, kas suuremal või väiksemal droonil. Võib üldistada, et mida suurem on droon seda vähem piirab valikut lennukontrolleri kaal ja mõõtmed, kuid seda rohkem piirab valikut lennukontrolleri tõrketaluvus. Nano ja mikro drooni lennukontrolleri valikuks ei ole võimalik välja pakkuda punktisüsteemi, kuna ehitajate eesmärgid on erinevad ei ole kindlat üht õiget valikut, mis tuleks välja punktisüsteemi pakkumisega.

### 4.1 Nano drooni lennukontroller

Nano drooni lennukontrolleri pakkumiste puhul on eelduseks võetud, et lennukontrollerisse oleks integreeritud voolujaotusplaat ja ESC. Kumbki neist ei ole võimas, kuid üldjuhul piisav nano drooni jaoks. Kusjuures integreeritud ESC ei välista eraldi ESC plaadi kasutust. Võib üldistada, et Tabel 6 esitatud lennukontrollerid on väiksema võimekusega ja seetõttu kasutavad üldjuhul F4 mikrokontrollerit. Suurema aukude vahe kasutamiseks paigutatakse lennukontroller nano droonitel diagonaalselt (whoop) lennusuunda, mis võimaldab jätta ruumi propelleritele ja saavutada väiksem väline drooni mõõt. Antud paigutusviisile on oluline rõhku panna, sest vale paigutuse korral ei tööta lennukontroller õigesti. Pakutavad lennukontrollerid toetavad kõik BetaFlight tarkvara.

Tabel 6 on tulbas voolujaotus on kirjeldatud lennukontrolleri võimekust voolu juhtida. Kui on kirjas ESC 13A tähendab, et lennukontrolleril on elektrooniline kiirusregulaator, mis on võimeline juhtima 13A. Kui on kirjas 5V2A tähistatakse sellega vooluregulaatori olemasolu, mille väljund pinge on 5V ja väljundvool maksimaalselt 2A. Teistes tulpades olevad tähised: tarkvara: BF: BetaFlight; Lisad: g: güroskoop; osd – ekraani ülekate (on screen display); cs: voolu andur (current sensor); bb: must kast (black box) näiteks bb 8Mb tähendab, et on 8Mb sisse ehitatud mälu; VTX: video saatja 5.8GHz



Tabel 6 Nano lennukontrollerite mikrokontrolleri, vooljaotuse, tarkvara ja lisade võrdlus

<b>Nimetus</b>	<b>Mikrokontroller</b>	<b>Voolujaotus</b>	<b>Tarkvara</b>	<b>Lisad</b>
HGLRC FD413 stack [14]	STM32F411	ESC 13A; 5V2A	BF	g, osd, SBUS, PPM, DSMX, IBUS
BetaFPV Toothpick F405 [10]	STM32F405	ESC 20A	BF	g, osd, SBUS, DSMX, toetab Frsky XM/XM+ saatjat; toetab Futaba/Flysky saatjat; TBS Crossfire saatjat/DSMX saatjat
Happymodel Crazybee F4 Lite [33]	STM32F411	ESC 5A; 5V1A	BF	g, osd, VTX, sisse ehitatud Frsky/Flysky vastuvõtja , vastuvõtja tõrketaluvus
BETAFPV F4 1S AIO [34]	STM32F411	ESC 5A	BF	g, osd, VTX, sisse ehitatud Frsky/Futaba vastuvõtja
JHEMCU GHF411 Pro 35A [35]	STM32F411	ESC 35A; 9V2A; 5V2,5A	BF, INAV	g, osd, SBUS, IBUS, DSM2, DSMX, TBS, BB 8Mb, cs

Tabel 7 Nano lennukontrolleri kinnitus viisi, kaalu, sobiliku aku ja hinna võrdlus

Nimetus	Kinnitus	Kaal	Aku	Hind (EUR)
HGLRC FD413 stack [14]	16x16mm rõhtne	9g	2-4S	34
BetaFPV Toothpick F405 [10]	26x26mm whoop	5,8g	2-4S	53
Happymodel Crazybee F4 Lite [33]	26x26mm whoop	4,5g	1S	40
BETAFPV F4 1S AIO [34]	29x29mm whoop	3,92g	1S	34
JHEMCU GHF411 Pro 35A [35]	25,5x25,5mm whoop	6,3g	2-6S	34

Tabel 6 ja Tabel 7 esitatud lennukontrollerid on valik pakutavatest, millega on võimalik täita erinevaid eesmäärke. Tabelitest ei joonistu välja ühte kindlat kontrollerit, mis on parim, kuid tabeli põhjal on võimalik teha teadlikum valik kiiremini. Näitena võib tuua Happymodel Crazybee F4, millel on sisse ehitatud Frsky/Flysky vastuvõtja. Selle põhjal võib väita, et kui antud süsteemi raadiosaatja on olemas on tegu mõistliku valikuga antud drooni suurus kategoorias. Analoogiliselt tuleks, kasutades algoritmi, teha valik ka muude parameetrite suhtes ja seejärel joonistub kasutajale välja temale kõige õigem lennukontroller.

## 4.2 Mikro drooni lennukontroller

Mikro drooni lennukontrolleri pakkumistega on võetud aluseks suurem võimekus kui nano lennukontrolleril. Antud juhul on tegu lennukontrolleritega, millel on F7 mikrokontrollerid kasutusel. Tabeli 8 ja 9 koostamisel on võetud eelduseks, et drooni ehitaja soovib kasutada rohkem lisaseadmeid ja mõnel juhul ka autopilooti. Antud lennukontrolleritel on integreeritud rohkem andureid, näiteks kaks güroskoopi või baromeeter. Näiteks Matek F722-SE AIO lennukontroller on INav tarkvara tootjate poolt soovitatud ja seetõttu on olemas hea tugi antud tarkvara kasutamiseks.

Tabel 8 Mikro drooni lennukontrolleri mikrokontrolleri, voolujaotuse, tarkvara ja lisade võrdlus

<b>Nimetus</b>	<b>Mikrokontroller</b>	<b>Voolujaotus</b>	<b>Tarkvara</b>	<b>Lisad</b>
CL Racing F7 V2.1 Dual [36]	STM32F722	5V3A; 3,3V0,25A	BF	2 x g, osd, 6xUART, bb 32Mb, BFB
Holybro Kakute F7 HDV AIO [25]	STM32F745	5V1,5A; 8V2A	BF	g, b, 6xUART, SBUS, iBus, Spektrum, Crossfire, bb TF card, PDB, SCL/SDA GPSi jaoks,
Diatone Mamba F722 APP 60A [37]	STM32F722	ESC 60A; 9V3A; 5V3A; 3,3V0,5A	BF; INAV*	g, 6xUART, SBUS, TBS, IBUS, DSM, BFB
HolyBro Kakute F7 HDV [38]	STM32F745	5V1,5A; 8V2A	BF; CF	g, b, 6xUART, SBUS, iBus, Spektrum, Crossfire, bb TF card, PDB, SCL/SDA for GPS,
Matek F722-SE AIO [39]	STM32F722	5V2A; 3,3V0,2A	BF; INAV	2 x g, b, 5xUART, bb SD card, I2C, CC, SBUS, IBUS, DSM, CS, osd

\* - lennukontrolleril on võimalik leida vajalik INAV konfiguratsiooni fail, kuid see ei ole ametlikult toetatud.

Pakutavate lennukontrollerite kasutamine nano droonil võib osutuda keeruliseks, kuna enamus neist nõuavad eraldi ESC-e, on suhteliselt suured ja rasked ja eeldavad paigutust rõhtsalt lennu suuna suhtes. Samas Tabel 9 pakutavate lennukontrollerite kasutamine mini droonidel on võimalik ja kohati õigustatud. Pakutavate lennukontrollerid võimaldavad hea manööverdusega drooni ehitamist, mis võimaldavad

kanda näiteks lisa kaamerat filmimiseks. Samas ei ole antud lennukontrollerite puhul peamine eesmärk olla hea tõrketaluvusega ja seetõttu isegi kui andurid on dubleeritud ei pruugi, tõrke tekkimisel, droon suuta maanduda ohutult. Näiteks CL Racing F7 V2.1 Dual lennukontrolleri puhul kasutab mikrokontroller mõlemat güroskoop, et tagada stabiilsus ja hea manööverdusvõime, mitte tõrkekindlus.

Tabel 8 on tulbas voolujaotus on kirjeldatud lennukontrolleri võimekust voolu juhtida. Kui on kirjas ESC 60A tähendab, et lennukontrolleril on elektrooniline kiirusregulaator, mis on võimeline juhtima 60A. Kui on kirjas 5V3A tähistatakse sellega vooluregulaatori olemasolu, mille väljund pingeline on 5V ja väljundvool maksimaalselt 3A.

Tabeli 8 tulpade selgitused: tarkvara: BF: BetaFlight; CF: CleanFlight; Lisad: g: güroskoop; osd – ekraani ülekate (on screen display); UART - Universal asynchronous receiver-transmitter; bb: must kast (black box) näiteks bb 32Mb tähendab, et on 32Mb sisse ehitatud mälu; BFB: klemmid helisignaali (buzzer) jaoks; b: baromeeter; cs: voolu andur (current sensor); PDB: voolujaotusplaat; CC: kaamera kontrollimise võimalus ehk juhib kaameratööd.

Tabel 9 Mikro drooni lennukontrolleri kinnituse, kaalu, aku ja hinna võrdlus

<b>Nimetus</b>	<b>Kinnitus</b>	<b>Kaal</b>	<b>Aku</b>	<b>Hind (EUR)</b>
CL Racing F7 V2.1 Dual [36]	30x30mm	-	Kuni 8S	42
Holybro Kakute F7 HDV AIO [25]	30,5x30,5mm	10g	Kuni 6S	35
Diatone Mamba F722 APP 60A [37]	30,5x30,5mm	30,7g	3-6S	76
HolyBro Kakute F7 HDV [38]	30,5x30,5mm	8g	Kuni 6S	32
Matek F722-SE AIO [39]	30,5x30,5mm	10g	2-8S	45

Tabel 8 ja 9 esitatud lennukontrollerid pakuvad erinevat funktsionaalsust. Tabel 8 toodud lisad on antud lennukontrolleri poolt toetatud ja on indikatsiooniks, et antud kommunikatsiooni protokolle ja lisasid kasutades ei teki olulisi ühilduvuse probleeme. Nii nagu nano lennukontrollerite puhul joonistub mikro lennukontrollerite puhul kõige õigem valik välja pärast eesmärkide ja vajalike moodulite selgeks tegemist.

### **4.3 Mini drooni lennukontrollerid**

Mini drooni lennukontrolleri peamiseks pakkumise aluseks on tõrketaluvus, funktsionaalsus ja autopiloot. Tõrketaluvus on saavutatud süsteemide dubleerimisega või kolme kordistamisega. Rikke esinemisel lülitatakse rikkis moodul välja ja ohutu lend saab jätkuda. Tabelis 10 ja 11 esitatud lennukontrolleritega on võimalik ehitada kommerts eesmärkidel toimivaid droone, mis suudavad täita iseseisvalt ülesandeid. Tegu on kallite lahendustega, millest osadel juhtudel ei ole hinnad avalikud. Droonide lennukontrollerite funktsionaalsus on väga suur ja nii mõnedki süsteemid on usaldusväärsed ja korraliku toega. Tabelis esitatud lennukontrollerite tõrketaluvus on suur, näiteks lennukontroller DJI A3 suudab kuue propellerilises seades säilitada kontrolli kuni kolme propelleri purunemisel.

DJI ja Verontel on oluline nende ökosüsteemis pakutavad moodulid. Seega ei oma otseselt tähtsust, mis tüüpi on sisend ja väljund. Lisaks Veronte 1x autopiloodi näol on tegemist lennukontrolleriga millel on väga suur funktsionaalsus. Kontrolleri juurde käivad lisad võimaldavad laia kasutust väga erinevate platvormidega. Seetõttu võib öelda, et antud tabelis olev võrdlus ei näita antud lennukontrollerit õiges valguses ja tegu on professionaalse süsteemiga, mille hankimisel tuleb igal juhul võtta ühendust tootjaga ja täpsustada rakendust. Seega võib järeldada, et kui droon täidab kriitilist ülesannet tuleks kindlasti valida DJI või Veronte lennukontroller koos vastava ökosüsteemiga.

Mini lennukontrolleri valik, mille eesmärk on suur tõrketaluvus, on keerulisem ülesanne, kui nano ja mikro drooni puhul. Kriitiliste süsteemide valikul tuleb suhelda erinevate tootjatega, kes suudavad vastavalt rakendusele ja vajalikule võimekusele pakkuda välja õige lahenduse. Suure tõrketaluvusega droonidel on kõige olulisem lennukontrolleriga kooskäiv ökosüsteem.

Selgitused Tabel 10 tulba lisad kohta. g: güroskoop; c: kompass; b: baromeeter; ADS – B: võimaldab tuvastada õhusõidukite asukohti automaatelt (Automatic Dependent Surveillance–Broadcast). Sarnaneb transponder süsteemile; BB: must kast näiteks BB SDcard tähendab et lennuinfo salvestatakse SD kaardi peale;

Tabel 10 Mini droonide lennukontrollerite mikrokontrolleri, tarkvara, sisendite ja väljundite ja lisade võrdlus

<b>Nimetus</b>	<b>Mikrokonroller (MCU)</b>	<b>Tarkvara</b>	<b>I/O</b>	<b>Lisad</b>
Hex Pixhawk 2.1 - The Cube Orange Standard Set + ADS-B [40]	STM32H753VIT6 ; STM32F100	PX4, Ardupilot	1 x I2C, 14xPWM, PPM, SBUS, DSM	3 x g, c, 2 x b, autopiloot , ADS-B vastuvõtja, IMU soojendus, tõrkekindel MCU, toetab 2x GPS
Holybro Pixhawk 4 Autopilot [41]	STM32F765; STM32F100	PX4, Ardupilot	3 x I2C, 16xPWM, 7xUART	2 x g, c, b, autopiloot, BB SDcard
Navio 2* [42]	Cortex-M3 RC I/O co-processor	Ardupilot	1 x I2C, 12xPWM, 1xUART, PPM, SBUS	2 x g, GPS, b
Veronte 1x autopilot [43]	**	Veronte tarkvara	**	2 x GPS, dubleeritud IMU ja baromeeter, IP67 kaitseklassiga korpus, kaamera kontroll, suur tõrketaluvus
DJI A3 [44]	**	DJI tarkvara	**	DJI Lightbridge2, DJI DR16, SBUS

\* - Raspberry PI lisa plaat, Navio 2 ei ole iseseisev lennukontroller.

\*\* - Puudub info

Tabel 11 Mini drooni lennukontrollerite mõõtmete, kaalu, toitepinge ja hinna võrdlus

<b>Nimetus</b>	<b>Mõõtmed</b>	<b>Kaal</b>	<b>Toitepinge</b>	<b>Hind (EUR)</b>
Hex Pixhawk 2.1 - The Cube Orange Standard Set + ADS-B [40]	94,5x44,3x31mm	73g	4,1-5,7V/2,5A	250
Holybro Pixhawk 4 Autopilot [41]	44x84x12mm	33,3g	6V	180
Navio 2 [42]	55x65mm	23g	4,75-5,25V	168
Veronte 1x autopilot [43]	63x39,6x67,9mm	190g	*	*
DJI A3 [44]	*	226g	3-12s	1099

\* - puudub info

## **5. LENNUKONTROLLERI VALIKU SOOVITUSED**

Erinevad droonid, mida ehitada nõuavad erinevat lennukontrollerit. Võib öelda, et eesmärk on kõige olulisem osa lennukontrolleri hankimisel. Kõik tänapäevased lennukontrollerid saavad suurepäraselt hakkama lennukontrolleri põhifunktsiooniga ehk sooritada PID algoritmi. Seetõttu on põhilised valiku kriteerium seotud lisadega lennukontrolleril, toe ja hinnaga. Valiku kriteeriumid on erinevad ja lähtuvalt drooni suurusest ja eesmärgist. Võistlusdroni peamiseks eesmärgiks on olla kiire ja kerge, et tagada suurepärase manööverdus. Samas filmimiseks kasutatavalt droonilt oodatakse kindlasti süsteeme, mis takistavad drooni kontrollimatud langemist maapinnale.

Lennukontrolli otsinguga tuleb olla ettevaatlik. Oma positsiooni parandamiseks turul tootjad reklaamivad lennukontrolli tuge mingile süsteemile, kuid see võib olla sõnastatud nii, et võib tekkida arusaam, et antud funktsionaalsus on lennukontrollerile integreeritud. Kusjuures seda kipuvad tegema nano ja mikro droonidele mõeldud lennukontrollerite tootjad. Mini ja suuremate tootjad üldjuhul ei reklaami kindla saatja tüübi tuge vaid reklaamivad millist rakendust on võimalik ehitada nende lennukontrolleriga.

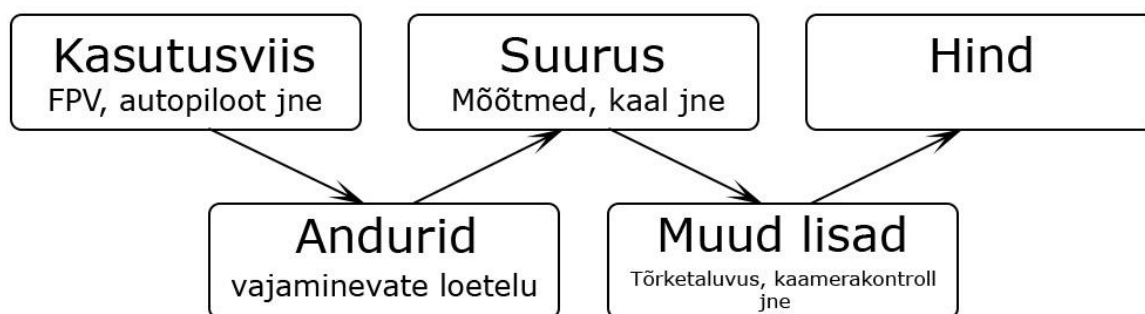
### **5.1 Nano ja mikro drooni lennukontroller valiku soovitus**

Nano ja mikro droonite näol on tegemist väiksemate droonitega. Eriti on see tõsi nano drooni puhul, mille põhi eesmärk on eelduse kohaselt lõbustus. Tegu on pisikeste, hea manööverdus võimega droonitega. Valikute peamiseks aluseks on siinkohal korralik tugi tootja poolt ja foorumites. Kusjuures foorumitest võib leida tarkvara toe parandamist. Joonis 7 esitatakse algoritm millises järjekorras võiks drooni lennukontrolleri valikul erinevate parameetrite peale mõelda.

Lennukontrolleri valikul on olulisel kohal kasutusviis. Kui soovitakse teha autopilootiga drooni siis tuleks kindlasti kaaluda tarkvara INAV, PX4, ArduPilot, DIJ või Verontet. Antud kitsendus vähendab oluliselt valikut. Teise asjana on oluline läbi mõelda vajalikud andurid ülesande täitmiseks. Alati on vajalik güroskoop, kuid baromeeter ei pruugi olla kõigile ajalik. Teise näitena võib tuua GPS vastuvõtja, mis autopiloodi puhul on ääretult oluline, kuid FPV drooni puhul ei oma tähtsust. GPS vastuvõtja puhul tuleb kaaluda kas on mõistlik, kui vastuvõtja on integreeritud lennukontrollerile või lisada see eraldi. Integreerimise tulemusena võib korpuse tõttu tekkida signaali häiringuid. Kolmas oluline aspekt on lennukontrolleri kaal ja suurus. Näiteks Hex Pixhawk 2.1 paigaldamine nano



droonile on keeruline tema kaalu tõttu. Lisaks on kaal väga lähedaselt seotud lennuaaja ja drooni efektiivsusega. Lühidalt, mida kergem on droon seda pikem on lennuaeg. Siiski lennukontrolleri kaal ei ole ainus näitaja, kuna vajalikkude moodulite kogu komplekt võib rohkem kaaluda kui integreeritud moodulitega komplekt samas kui esimese lennukontroller on põhimõtteliselt kergem. Muud lisad on oluline näitaja, mille abil saab täpsustada lennukontrolleri täpset eesmärki. Lisade all võivad olla ka mugavust pakkuvad lisad. Hind on oluline näitaja, kuna kui on kaks sarnaste näitajatega lennukontrollerit erineva hinnaga on mõistlik hankida odavam.



Joonis 7 Drooni lennukontrolleri valiku algoritm

Lennukontrolleri valiku soovitusel võib välja tuua, et soovitatav on jääda tuntud tootjate toodangu juurde. Üldjuhul on tuntud tootjate puhul tagatud toote kvaliteet mistõttu on vähenenud tõrgete oht. Tuntud tootja tugi on üldjuhul parem ja täpsem, lisaks toodavad tootjad vajalikke lisa mooduleid, mis töötavad hästi olemasoleva lennukontrolleriga. Seetõttu on soovitatav valida lennukontroller, mis omab võimalikult palju antud ehituse juures olulisi lisasid. Mooduleid saab küll juurde panna, kuid erinevate tootjate eri moodulid ei pruugi alati omavahel ühilduda. Lisaks suureneb oluliselt ehituse keerukus ja võimalus teha viga ühenduste kokku jootmisel, mille tulemusena võib rikneda oluline moodul.

Tuntud tootja lennukontrolleri kasuks räägib ka asjaolu, et rohkem tarkvarasid on toetatud. Siinkohal tuleb mängu asjaolu, et uuele ja tuntud tootja lennukontrollerile on tarkvara arendajal suurem soov teha vajalik tarkvara. Näitena võib tuua INAV tarkvara, millel puudub tugi osadele lennukontrolleritele, kuigi nad oleksid võimelised antud tarkvaraga töötama. Samas, kuna on tegu avatud tarkvaraga luuakse vajalikke tarkvara juppe ka lennukontrolleritele, mida ametlikult ei toetata. Sellistel juhtudel on vajalikud failid leitavad foorumitest, kuid puudub lennukontrolleri tootja või tarkvara tootja ametlik kinnitus, et antud tarkvara töötab veatult. Kuna ka selline tugi on võimalik siis tuntud tootjatele tehakse vajalik tarkvara kiiremini valmis ja on foorumites tugi, mida pakuvad teised entusiastid. Loomulikult antud tugi ei ole nii õelda ametlik tugi, kuid

nano ja mikro drooni ehitamiseks, mille eesmärk on õppida ja mängida on see täiesti piisav. INAV on toetatud teatud lennukontrolleritel ja seda pigem populaarsematel. Kuna enamused toetavad Betaflighti on tarkvara ainult oluline sellisel juhul, kui soovitakse autopiloodi võimekust kasutada – siis tuleks valida INav toega lennukontroller.

Drooni lennukontrollerile, eriti nano, peaks olema integreeritud ESC. Sellega vähendatakse kaalu, drooni keerukust ja on tagatud maksimaalne ühilduvus komponentide vahel. Viimase tõttu on kogu ehitus lihtsam ja vajab vähem eelteadmisi. Integreeritud ESC võib olla ka eraldi plaadina ehk *stack*, ka sellisel juhul on tagatud ühilduvus. Olenevalt drooni ehitusest ei pruugi pingeregulaatori olemasolu olla hädavajalik, kuid pingeregulaator lennukontrolleril ei lisa kaalu ega hinda. Seetõttu on enamustel antud seade peal.

## **5.2 Mini drooni lennukontrolleri valiku soovitused**

Üldistatult võib öelda, et mini suuruses droonid täidavad ülesannet ja seetõttu nõuavad töökindlaid lennukontrollereid. Mini lennukontrolleri valiku aluseks ongi töökindlus, mille määravad tarkvaraline tõrketuvastuse võimekus ja riistvaraline süsteemide dubleerimine. Mõlemad tõstavad süsteemi hinda palju, kuid vea korral päästavad potentsiaalselt kalli tehnika. Kui droon on suur, kuid droon ei täida kalli tehnikaga missiooni, on soovitatav valida lennukontrolleriks midagi mikro lennukontrolleri valikust. Ka nende puhul on tagatud teatav tõrketaluvus, kuid lennukontrollerid on märgatavalt odavamad. Seega on soovitus, et kui droon on suur, kuid odav võiks kasutada madalama kategooria drooni lennukontrollerit. Kusjuures odavama lennukontrolleriga ei pruugita kaotada oluliselt drooni funktsionaalsuses, kuid kindlasti kaotatakse tõrketaluvuses.

Mini drooni lennukontrolleri valiku puhul hakkab väga palju rolli mängima kogu lennukontrolleriga kaasas käiv ökosüsteem. Lennukontrollerit ei ole võimalik vaadata ühe eraldi seisva moodulina vaid tuleb vaadata kogu süsteemi, millel on lisamoodulid, sobivust antud ülesande täitmiseks. Kuna süsteemi töökindlus on ääretult oluline ei ole kallite, suurte ja kallist lasti vedavate droonitega võimalik kasutada teiste ja kolmandate tootjate lisaseadmeid ja mooduleid. Selle põhjus peitub asjaolus, et lennukontrolleri tootja ei saa tagada teiste tootjate kvaliteeti ja vankumatut ühilduvust lennukontrolleriga. Seetõttu võivad tekkida süsteemi vead ja hoolimata tõrkekindlusest on viga alati ohu allikas. Seega kindel soovitus on valida ja vaadata kogu tootja pakutatavat ökosüsteemi, mitte ainult üht komponenti tootjalt.

Professionaalsete süsteemide puhul ei ole võimalik soovitada avatud tarkvara nagu näiteks BetaFlight või INAV. Mõlemad võimaldavad nii autopilooti kui ka drooni otsest juhtimist, kuid ei ole riistvara spetsiifilised ja seetõttu pole välistatud riistvaraga ühilduvuse probleemid. Kriitiliste süsteemide korral on soovitatav vaadata tarkvara poole, mis on mõeldud teatud riistvaraga koos töötama. Näiteks PX4 tarkvara, antud tarkvara tagab õige riistvaraga tõrketaluvuse siis tõeliselt usaldusväärse lennukontrolleri jaoks on vaja süsteeme kolmekordistada. Sellisel juhul on näiteks Veronte pakutav tarkvara kindlasti parema tõrketaluvusega, koos vastava riistvaraga.

Mini kategooriasse kuuluvate droonide lennukontrollerite valikul ei oma enam nii palju tähtsust millised täpselt on sensorid droonil ja kui palju on sisendeid ja väljundeid. Kogu vajaliku stabiilsuse tagab tootja ja selleks ei ole vajalik, süsteemi ostjal, teada milliseid andurid on kasutusel. Sama on sisenditega, kuna ökosüsteemi mitte kuuluv riistvara võib tekitada tõrke, mida tootja ette ei osanud näha. Seetõttu sisendite olemasolu ei ole oluline. Samas on oluline funktsionaalsus, mida suudetakse antud lennukontrolleriga ja ökosüsteemiga pakkuda.

## KOKKUVÕTE

Teadlik mehitamata õhusõiduki lennukontrolleri valik on keeruline ja vajab head ülevaate omamist valdkonnast. Antud ülevaate andmine sai üheks töö eesmärgiks, sest vastasel juhul puudub analüüsimise võimalus. Töö peamine eesmärk oli pakkuda välja valik lennukontrollereid ja vajalik analüüsi alus, et teha teadlik valik. Töös olevates tabelites pakutakse välja valik lennukontrollereid ja kirjeldatakse nende funktsionaalsust. Kuna tootjad võtavad osa funktsionaalsusest suhteliselt loomulikuna ei kirjelda nad neid enda materjalides. Lisaks on tabelistes esitatud lennukontrollerite kasutusala vahelised jooned ähmased – sama lennukontrollerit saab kasutada eri suuruses droonidel. Algoritmi välja pakkumine osutus keeruliseks, kuna lennukontrolleri valik on eesmärgist lähtuv on valiku tegemiseks erinevaid teid mitmeid. Siiski koos teoreetilise osaga on võimalik lugejal teha teadlikum valik enda eesmärkidest lähtuvalt.

Lõputöö tulemuseks on soovitude pakk ja teekond kuidas valida lennukontroller. Kuna valiku tegemise teid on mitmeid, siis jääb valiku alus suhteliselt avatuks ja muudetavaks. Antud lahendus ei ole ideaalne, kuid minu meelest ainus võimalik. Erinevate droonide ehitajate vajadused on ääretult erinevad ja seetõttu ühtne algoritm ei ole kõigile sobilik. Ideaalis oleks iga ühel oma algoritm, mille järgi valida endale kõige sobilikumad kriteeriumid. Selliselt tuleks lugeda ka antud tööd ehk teoreetilise osa põhjal saab tekitada oluliste parameetrite nimekirja ja siis otsida sellele vastav lennukontroller. Oluline tulemus, milleni jõuti, on et suure tõrketaluvusega ja autopiloodi võimekusega drooni lennukontrolleri valik peaks lähtuma kogu pakutavast ökosüsteemist, mitte ainult lennukontrollerile lisatud anduritest.

Teiseks lõputöö tulemuseks on tabelid erinevate droonide kohta. Töö käigus selgus, et antud drooni suuruste vahel on jooned ääretult ähmased. Suur droon ei tähenda, et lennukontroller peab olema suur. Samuti on tõsi vastupidine ehk väike ja kerge droon võib vajada suure võimekusega lennukontrollerit, mis antud töös on pakutud klass suuremale droonile. Siiski on heaks tulemuseks asjaolu, et töös on esitatud hulgaliselt mitmekülgseid lennukontrollereid, mida on võimalik kasutada erinevates projektides. Antud lennukontrollerid on hea toega ja üldjuhul piisava võimekusega, et täita erinevaid ülesandeid.

Esialgne eesmärk lennukontrolleri algoritmi osas oli, et tuleks suhteliselt range ja täpne algoritm või punktisüsteem. Kahjuks teemas edasi minnes jõuti järeldusele, et range algoritm või punktisüsteem ei ole otstarbekas ja vajalik. Vajalik on üldine analüüsi alus, mille osa täitab erinevate komponentide kirjeldus. Samuti on vajalikud töös esitatud konkreetsed soovitused lennukontrolleri valikul, mis suunavad vähese

kogemusega valijat mõtlema olulistele asjadele. Seega võib öelda, et algoritmi eesmärk ei ole täidetud esialgses mahus, kuid on antud vajalik ülevaadet, et teha teadlik valik. Töös esitatud tabelid täidavad eesmärki ja lihtsustavad valikut ja on autori arvates hästi teostatud.

Mehitamata õhusõidukite puhul on uurimisvaldkondi mitmeid. Tulevikus võiks olla olemas töö, mis kirjeldaks elektrooniliste kiirusregulaatorite, mootorite ja propellerite ja akude valikut. Antud komponendid peavad koos töötama lennukontrolleriga ja teadmises antud komponentidest on vajalikud lennukontrolleri teadliku valiku tegemiseks. Teise suunana võiks kindlasti uurida täpsemalt erinevaid tarkvarasid, kuna arengud on väga kiired ja tarkvara funktsionaalsus suureneb palju. Antud uurimissuunaga võiks kaasas käia ka info ühtlustamine, sest tarkvara üldjuhul toetab rohkem funktsionaalsust kui lennukontroller. Kolmanda suunana võiks olla drooni lennu stabiilsuse seadistamine, mida antud töös ei käsitletud. Uurimise suund võiks anda aluse, kuidas seadistada PID regulaatorit, et saavutada maksimaalne stabiilsus võimalikult lühikese seadistuse ajaga. Selles uurimis suunas võiks olla ka käsitletud automaatse ja manuaalse reguleerimise võrdlus.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] „Mehitamata õhusõidukid, sealhulgas droonid,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ecaa.ee/et/lennundustehnika-ja-lennutegevus/mehitamata-ohusoidukid-sealhulgas-droonid>. [Kasutatud 25. 04. 2021].
- [2] [Võrgumaterjal]. Available: <https://dron.ee/mis-on-mehitamata-ohusoiduk/>. [Kasutatud 23. 02. 2021].
- [3] A. Cavoukian, „Unmanned Aerial Vehicles, Information and Privacy Commissioner of Ontario,” Ontario, 2020.
- [4] M. Hassanalian ja A. Abdelkefi, „Classifications, applications, and design challenges of drones: A review,” *Progress in Aerospace Sciences*, pp. 99-131, 05. 2017.
- [5] „Open Category - Civil Drones,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.easa.europa.eu/domains/civil-drones-rpas/open-category-civil-drones>. [Kasutatud 26. 02. 2021].
- [6] „Drone Parts And Components Overview With DIY Tips,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.dronetechplanet.com/quick-drone-parts-overview-with-diy-tips/>. [Kasutatud 15 05 2021].
- [7] O. Liang, „Quadcopter Hardware Overview – Every Component Explained,” 10. 06. 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <https://oscarliang.com/quadcopter-hardware-overview/>. [Kasutatud 26. 02. 2021].
- [8] O. Liang, „Flight controller explained,” 02. 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://oscarliang.com/flight-controller-explained/>. [Kasutatud 28. 02. 2021].
- [9] T. Gudde, „Flight controller explained to Everyone,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://fusion.engineering/flight-controllers-explained-for-everyone/>. [Kasutatud 20. 04. 2021].
- [10] „BETA FPV Toothpick F4 2-6S AIO Brushless Flight Controller 20A,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.getfpv.com/betafpv-toothpick-f4-2-6s-aio-brushless-flight-controller-20a-blheli-32-v4.html>. [Kasutatud 15 02 2021].
- [11] „DJI A3 Flight Controller for Multi-Rotor UAS,” [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.bhphotovideo.com/c/product/1247864-REG/dji\\_a3\\_flight\\_controller.html](https://www.bhphotovideo.com/c/product/1247864-REG/dji_a3_flight_controller.html). [Kasutatud 15 05 2021].
- [12] „How to Make a Drone / UAV,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.robotshop.com/community/tutorials/show/how-to-make-a-drone-uav-lesson-4-flight-controller>. [Kasutatud 28. 02. 2021].
- [13] „STM32F722RET6,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://drono.store/electronic-components/259-stm32f722ret6-mikroprocesor.html>. [Kasutatud 15 05 2021].
- [14] „HGLRC FD413 16x16 Stack - FD411 FC + 13A BL\_S 4-in-1 ESC,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.getfpv.com/hglrc-fd413-16x16-stack-fd411-fc-13a-bl-s-4-in-1-esc.html>. [Kasutatud 15 05 2021].
- [15] „PDB-XT60 W/ BEC 5V & 12V,” [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.mateksys.com/?portfolio=pdb-xt60>. [Kasutatud 15 05 2021].
- [16] „SucceX-E 45A 2-6S BLHeli\_S Dshot600 4-in-1 ESC,” [Võrgumaterjal]. Available: [https://shop.iflight-rc.com/index.php?route=product/product&product\\_id=979](https://shop.iflight-rc.com/index.php?route=product/product&product_id=979). [Kasutatud 15 05 2021].
- [17] „SPEDIX ES30 HV LITE 30A 3-6S BLHELI\_S ESC,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.quadcopters.co.uk/spedix-es30-hv-lite-30a-2-4s-blhelis-esc-2778>. [Kasutatud 15 05 2021].

- [18] „All About Multirotor Drone FPV Power Distribution Boards,” 03. 02. 2018. [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.getfpv.com/learn/new-to-fpv/all-about-multirotor-fpv-drone-power-distribution-board/>. [Kasutatud 08. 03. 2021].
- [19] „Power Distribution Board PDB,” [Vörgumaterjal]. Available: <https://dronenodes.com/pdb-power-distribution-board/>. [Kasutatud 08. 03. 2021].
- [20] „How to Choose a Flight Controller for FPV Quadcopter,” [Vörgumaterjal]. Available: <https://dronenodes.com/drone-flight-controller-fpv/#tab-con-8>. [Kasutatud 08. 03. 2021].
- [21] „Crowtail- BMP280 Barometer Sensor 2.0,” [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.elecrow.com/crowtail-bmp280-barometer-sensor.html>. [Kasutatud 15 05 2021].
- [22] „Beitian BN-880 GPS & Compass Module,” [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.unmannedtechshop.co.uk/product/beitian-bn-880-gps-compass-module/>. [Kasutatud 15 05 2021].
- [23] „MPU-6000 - Motion Processing Unit,” [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.sparkfun.com/products/retired/11234>. [Kasutatud 15 05 2021].
- [24] „Cube Flight Controller,” 28. 10. 2020. [Vörgumaterjal]. Available: [https://docs.px4.io/v1.9.0/en/flight\\_controller/pixhawk-2.html](https://docs.px4.io/v1.9.0/en/flight_controller/pixhawk-2.html). [Kasutatud 13. 03. 2021].
- [25] „Holybro Kakute F7 HDV AIO Flight Controller,” [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.getfpv.com/holybro-kakute-f7-hdv-aio-flight-controller.html>. [Kasutatud 15 05 2021].
- [26] E. Ebeid, M. Skriver, K. H. Terkildsen, K. Jensen ja U. P. Schultz, „A survey of Open-Source UAV flight controllers and flight simulators,” *Microprocessors and Microsystems*, pp. 11-20, 08 2018.
- [27] O. Liang, „Flight controller firmware overview,” 24. 05. 2017. [Vörgumaterjal]. Available: <https://oscarliang.com/mini-quad-fc-firmware/>. [Kasutatud 21. 03. 2021].
- [28] O. Liang, „Looptime and Flight Controller,” 6. 11. 2017. [Vörgumaterjal]. Available: <https://oscarliang.com/best-looptime-flight-controller/>. [Kasutatud 20. 03. 2021].
- [29] „Beginners guide to drone autopilots (flight controllers) and how they work,” [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.dronetrest.com/t/beginners-guide-to-drone-autopilots-flight-controllers-and-how-they-work/1380>. [Kasutatud 20. 03. 2021].
- [30] „mRo Pixhawk Flight Controller (Pixhawk 1),” [Vörgumaterjal]. Available: [https://docs.px4.io/master/en/flight\\_controller/mro\\_pixhawk.html](https://docs.px4.io/master/en/flight_controller/mro_pixhawk.html). [Kasutatud 20. 03. 2021].
- [31] O. Liang, „What are ESC, UBEC and BEC,” 15. 06. 2015. [Vörgumaterjal]. Available: <https://oscarliang.com/what-is-esc-ubec-bec-quadcopter/>. [Kasutatud 21. 03. 2021].
- [32] O. Liang, „Setup Blacbox in Cleanflight,” 19. 08. 2015. [Vörgumaterjal]. Available: <https://oscarliang.com/setup-blackbox-cleanflight/>. [Kasutatud 21. 03. 2021].
- [33] „Happymodel Crazybee F4 Lite 1S Whoop Flight Controller - Flysky,” [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.getfpv.com/happymodel-crazybee-f4-lite-1s-whoop-flight-controller-flysky.html>. [Kasutatud 15 05 2021].
- [34] „BETA FPV F4 1S AIO Flight Controller w/ Integrated 25mW VTX (Frsky FCC),” [Vörgumaterjal]. Available: BETA FPV F4 1S AIO Flight Controller w/ Integrated 25mW VTX (Frsky FCC). [Kasutatud 15 05 2021].

- [35] „JHEMCU GHF411 Pro 35A BLHELI\_S 3-6S AIO Whoop Flight Controller,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.getfpv.com/jhemcu-ghf411-pro-35a-blheli-s-3-6s-aio-whoop-flight-controller.html>. [Kasutatud 15 05 2021].
- [36] „CL RACING F7 V2.1 DUAL,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.drone-fpv-racer.com/en/cl-racing-f7-v21-dual-5835.html>. [Kasutatud 15 05 2021].
- [37] „Diatone Mamba F722 APP, F50PRO 3-6S ESC Stack,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.getfpv.com/diatone-mamba-f722-app-f50pro-3-6s-esc-stack.html>. [Kasutatud 15 05 2021].
- [38] „HolyBro Kakute F7 HDV Flight Controller,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.getfpv.com/holybro-kakute-f7-hdv-flight-controller.html>. [Kasutatud 15 05 2021].
- [39] „Matek F722-SE AIO Flight Controller,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.getfpv.com/matek-f722-se-aio-flight-controller.html>. [Kasutatud 15 05 2021].
- [40] „HEX The Cube Orange - Standard Set with ADS-B Carrier Board,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.3dxc.co.uk/autopilots-c2/the-cube-aka-pixhawk-2-1-c9/cube-autopilot-and-combos-c10/hex-the-cube-orange-standard-set-with-ads-b-carrier-board-p3509>. [Kasutatud 15 05 2021].
- [41] „Pixhawk 4,” [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.holybro.com/product/pixhawk-4/>. [Kasutatud 15 05 2021].
- [42] „Autopilot HAT for Raspberry Pi,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://navio2.emlid.com/>. [Kasutatud 15 05 2021].
- [43] „Veronte Autopilot 1X,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.embention.com/product/uav-autopilot/>. [Kasutatud 15 05 2021].
- [44] „A3 Specs,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.dji.com/ee/a3/info#specs>. [Kasutatud 15 05 2021].



# LISAD

## Lisa 1 Tarkvara tabelis kasutatavad lühendid

<b>Automaatpilot</b>	
<b>Lühend</b>	<b>Täpsustus</b>
Sph	Satelliidi positsiooni hoidmine st on võimaldatud hoida postisooni vastavalt GPS-le
Swp	Satelliidi vahepunktide järgi navigeerimine võimaldab lennata vastavalt ettemääratud punktidele
Fm	Järgne mulle funktsiooniga võimaldatakse droonil jälitada soovitud inimest või liikumisvahendit
Svnf	Stereovisiooni navigeerimine. Võimaldatakse lendamist dünaamilises ja teadmata keskkonnas reaajas info kogumisega keskkonnast.

<b>Kommunikatsioon</b>	
<b>Lühend</b>	<b>Täpsustus</b>
Sb	SBUS ehk serial BUS. Kasutatakse Futaba ja FrSky saatjatega. Võimaldab 16 kanalit kasutades ühe juhet
Ib	IBUS on digitaalne jada ühendus protokoll raadiosaatja ühendamiseks. Sarnane SBUS-ga ja on välja arendatud FlySky poolt.
Sd	SumD on digitaalne kommunikatsiooni protokoll raadiosaatja ühendamiseks.
Sh	SumH on sarnane SumD protokollile.
Pm	PPM on raadiosaatja ühendus viis, mis koosneb mitmetest pulsilaiusmodulatsiooni plokkidest. Võimaldab kasutada mitut kanalit.

Pw	PWM ehk pulsilaiusmodulatsioon. Kõige lihtsam ühendusviis. Võimaldab ühendada raadiosaatjat, kuid peamiselt kasutatakse ESC ühendamiseks.
Cf	CRSF. Kahepoolset sidet võimvaldav kommunikatsiooni protokoll, mis on mõeldud töötama koos TBS crossfire süsteemiga.
Jeb	JetiExBus, mis on mõeldud raadiosaatja ühendamiseks.
Ds	DSM on välja töötatud Spektrumi poolt. Digitaalne protokoll, mis võimaldab raadiosaatja ühendust. Suure müra taluvusega.
Xbu	XBUS on kasutuses JR puhul. Toetab 14 kanalit ja on väikese hilistusega.
Fs	FrSky on SBUS või FPort protokollil põhinev raadiosaatja ühendusviis.
Sp	SmartPort telemeetria protokoll.
Ht	HoTT raadiosaatja kommunikatsiooni protokoll.
Lt	LTM ühepoolne telemeetria protokoll.
Ml	MavLink kerge drooniga suhtlemise protokoll või drooni komponentide vaheline protokoll.
Sl	SRXL on raadiosaatja ühendamise protokoll.
Msp	Multiwii jada protokoll, mida kasutatakse ArduPilotiga telemeetria saatmiseks.
ir	Iridium Short Burst Data on satelliidi baasil mehitamata õhusõiduki telemeetria protokoll.

<b>Tõrketaluvus</b>	
<b>Lühend</b>	<b>Täpsustus</b>
Ar	ADS-B ehk Automatic Dependent Surveillance – Broadcast võimaldab jälitada õhusõidukit. Süsteem edastab perioodiliselt enda asukohta, mis on kasutatav teistel õhusõidukitel (sarnaneb transponderile lennukitel)
C2l	Droon maandub, kui kaob C2 side (õhusõiduki kontrolli võimaldav side).
c2rl	Droon tuleb tagasi lennualgus kohta, kui kaob C2 side.
c2k	Mootorite toide katkestatakse kui on kadunud C2 side
Bvw	Madala aku pinge hoiatus süsteem.
Apr	Automaatne langevarju aktiveerimis süsteem, mis aktiveerib langevarju, et võimaldada drooni võimalikult ohutut maandumist.
Sw	Ohulüliti mootorite toite sisse ja välja lülitamiseks.
Bll	Madala aku pinge korral droon lendab alguskohta tagasi.
Gf	Kasutatava õhuruumi piiritlus st õhusõiduk ei lähe antud õhuruumist välja.
Sc	Enne lendu andurite korrasoleku kontroll, et võimaldada ohutut ja nõuetekohast lendu.

<b>Lisad</b>	
<b>Lühend</b>	<b>Täpsustus</b>
G	Gimbal ehk liigendriputi tugi. Võimaldab ühendada ja juhtida antud seadet.
Rth	Koju tagasi tulemise funktsioon, kus droon iseseisvalt tuleb tagasi alguskohta.
Bm	Aku jälgimise funktsioon
DI	Telemeetria salvestamise funktsioon. Teisisõnu musta kasti funktsioon.
Hf	Fikseeritud kursi hoidmine ehk fikseeritud yaw lendamine
Ts	Transponder süsteemi tugi.
At	PID algoritmi automaatne seadistus. Võimaldab saavutada automaatselt PID algoritmile vajalikud kordajad.
Rlg	Sisse tõmmatava teliku tugi ehk võimaldab kasutada mehitamata õhusõidukit koos sisse tõmmatava telikuga.
loa	Takistustest eemale hoidmise funktsioon kasutades Lidarit.