



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

TUULETUNNEL TESTPINK DROONI LENNU
TESTIMISEKS TURBULENTSES KESKKONNAS,
ELEKTRIOSA

WIND TUNNEL TESTBENCH FOR DRONE FLIGHT TESTING IN A TURBULENT
ENVIRONMENT, ELECTRONICS

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Ardi Soosalu

Üliõpilaskood: 164809EAAB

Juhendaja: Kristjan Pütsep, lektor

Tallinn, 2020

AUTORIDEKLARATSIOON

Lõputöö on tehtud koostöös kaastudengiga Markus Koert, kes vastutab antud töös oleva mehaanika osa eest. Lõputöös oleva elektroonika osa olen koostanud iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” 201.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autorid: Ardi Soosalu

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: Tuuletunnel testpink drooni lennu testimiseks turbulentses keskkonnas, elektrooniosa

Kuupäev: 20.05.2020

57 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): Professor Anton Rassõlkin

Sisu kirjeldus:

Antud lõputöö eesmärgiks on teha drooni testimiseks vajaminev testpink, mida oleks võimalik paigaldada TalTech laboris olevasse tuuletunnelisse. Samuti on vaja testide jaoks kokku panna ka droon, mille peal esialgseid teste teha.

Elektroonika osa eesmärk on luua süsteemile juhtloogika elektroonika komponentidest ning juhtalgoritm mille abil kogu süsteem tööle panna. Tuleb luua ka tagasiside süsteem, mis võimaldaks testpingi operaatoril testi lõppedes tulemustest vajaminevad järeldused teha. Sealhulgas on vaja ka süsteemi juhtida ning seda võimalikult lihtsalt operaatori jaoks.

Märksõnad: Droon, testpink, tuuletunnel, juhtimisloogika, juhtalgoritm, tagasiside, lihtsus.

ABSTRACT

Authors: Markus Koert, Ardi Soosalu

Type of the work: Bachelor Thesis

Title: Wind tunnel testbench for drone flight testing in a turbulent environment, electrical part

Date: 20.05.2020

57 pages (the number of thesis pages including appendices)

University: Tallinn University of Technology

School: School of Engineering

Department: Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

Supervisor(s) of the thesis: Lecturer Kristjan Pütsep

Consultant(s): Professor Anton Rassõlkin

Abstract:

The goal of this thesis is to create the testbench necessary for testing drone flight within a wind tunnel which could be attached to the wind tunnel in TalTech laboratory. Also the assembly of a drone is needed which would act as the first test subject within said wind tunnel.

The goal of the electronics part of the thesis is to create control logic with electronic components and a control algorithm with which the whole system could be controlled. The creation of a feedback system is also needed which the operator could use to make the necessary conclusions regarding the tests they ran. Also the system itself needs to be controlled by the operator as simply as possible.

Keywords: Drone, testbench, wind tunnel, control logic, control algorithm, feedback, simplicity.

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	Drooni Tuuletunnel
Lõputöö teema inglise keeles:	Drone Wind Tunnel
Üliõpilane:	Markus Koert, 179696
Üliõpilane:	Ardi Soosalu, 164809
Eriala:	Elektroenergeetika ja mehhatroonika
Lõputöö liik:	bakalaureusetöö
Lõputöö juhendaja:	Kristjan Pütsep
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	20.05.2021
Lõputöö esitamise tähtaeg:	20.05.2020

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

1. Teema põhjendus

Antud teema on oluline tulevastele õppuritele, kes soovivad testida droonide juhtimisloogikat turbulentses keskkonnas. Kuna droonide tehnoloogia valdkond areneb kiiresti, oleks antud testpink hea investeering Taltech'i tudengitele, kellel on soovi tegeleda droonide arendusega.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on konstrueerida terviklik süsteem, mille abil on võimalik testida droonide reageerimisvõimet tuule suuna ning tugevuse muutustele.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Tuuletunnelisse paigaldatava drooni ehitamine.

Optimaalse drooni ja testpingi kinnituskoha leidmine, vältimaks liigseid turbulentsse.

Testpingi, mis annab droonile vajaliku liikumisvabaduse, projekteerimine ning konstrueerimine.

Testpingi tagasiside- ning juhtimissüsteem.

4. Lähteandmed

Milliseid andmeid plaanid kasutada püstitatud eesmärkide lahendamiseks? Kust või kelle käest saad andmed?

Plaanis on kasutada järgnevaid lähteandmeid:

- Drooni tootjad

- Zubax.com
- NRG-001 labori tuuletunnel

5. Uurimismeetodid

Kuidas plaanid töö tulemusteni jõuda? Milliseid uurimismeetodeid kasutate püstitatud ülesannete lahendamisel? Metoodika võib põhineda mõõtmistel, katsetel, vaatlustel, küsitlustel, kirjanduse analüüsil, modelleerimisel. Milliseid vahendeid kasutate andmete analüüsiks (tabelarvutused Excelis, valemid, mudeli kasutamine)?

Meie peamiseks uurimismeetoditeks on modelleerimine, mõõtmised ja katsetamised.

6. Graafiline osa

Olulisemad joonised ja skeemid tulevad peamiselt töö põhiossa.

- 3D joonised
- Elektriskeemid
- Juhtalgoritm
- Drooni joonised

7. Töö struktuur

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

ABSTRACT

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

EESSÕNA

Tööjaotus

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

SISSEJUHATUS

1. DROON

1.1 Drooni komponendid

1.2 Drooni konstrueerimine

2. TUULETUNNELI PROJEKTEERIMINE

2.1 Mehaanika

2.1.1 Ülesande püstitus

2.1.2 Konstruktsiooni arendus

2.1.2 Mehaanika komponendid

2.1.3 Teostus

2.1.4 Mehaanika projekteerimise vahekokkuvõte

2.2 Elektroonika

2.2.1 Ülesande püstitus

2.2.2 Andurid

2.2.2.1 Andurite liigitus

2.2.2.2 Andurite valiku kriteeriumid

2.2.3 Kontroller

2.2.3.1 Juhtalgoritmi ülesande püstitus

2.2.3.2 Programmi kirjeldus

2.2.4 Üldine elektriskeem

2.2.5 Elektroonika vahekokkuvõte

KOKKUVÕTE

SUMMARY

KASUTATUD KIRJANDUS

LISAD

Lisa 1 Esimese lisa pealkiri

GRAAFILINE OSA

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Mis tüüpi allikaid kasutad (raamatud, teadusartiklid, aruanded, arengukavad, seadusandlikud aktid, intervjuud)? Lisada 4-5 viidet töö peamistele kirjanduse allikatele.

- Bannwarth, Jérémie, Chen, Zhenrong Jeremy, Stol, Karl, MacDonald, B., Richards, Peter, 2018/07, Development of a Wind Tunnel Experimental Setup for Testing Multirotor Unmanned Aerial Vehicles in Turbulent Conditions
- Miguel Marques Borges, 2015/06 , Design of an Apparatus for Wind Tunnel Tests of Electric UAV Propulsion Systems
- Singh, Neeraj, Muthukrishnan, Porselvan, Sanpini, Satyanarayana, 2019/01, Industrial System Engineering for Drones: A Guide with Best Practices for Designing
- Clothier, Reece, Watkins, Simon, Abdulrahim, Mujahid, Mohamed, Abdulghani, 2015/08, Development and Flight Testing of a Turbulence Mitigation System for Micro Air Vehicles

9. Lõputöö konsultandid

Kristjan Pütsep – Tuuletunneli testpingi konstrueerimine

Anton Rassõlkin – Drooni ehitus

10. Töö etapid ja ajakava

1. Drooni konstrueerimine (06.03.2020)
2. Drooni valiku kirjeldamine (08.03.2020)
3. Testpingi komponentide valimine (9-15.03.2020)
4. Teoreetilise osa kirjutamine (16-22.03.2020)
5. Testpingi mehaanilise osa konstrueerimine (20-31.03.2020)
6. Testpingi katsetused koos drooniga (03-05.04.2020)
7. Testpingi juhtimis süsteemi väljatöötamine (06-15.04.2020)
8. Testpingi juhtimissüsteemi komponentide valik (10-15.04.2020)
9. Teoreetilise osa kirjutamine (15-22.04.2020)
10. Testpingi juhtimissüsteemide katsetamine (22-29.04.2020)
11. Katsetuste tulemuste kirjeldamine (27-29.04.2020)
12. Kokkuvõtte kirjutamine (28-31.04.2020)
13. Juhendajale läbilugemiseks andmine (01.05.2020)
14. Vajadusel paranduste tegemine (02-09.05.2020)
15. Töö lõplik version (10.05.2020)

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE.....	3
ABSTRACT	4
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	5
EESSÕNA.....	12
TÖÖJAOTUS.....	13
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	14
SISSEJUHATUS	15
1. OLEMASOLEVAD LAHENDUSED.....	17
2. DROON	18
2.1 Drooni komponendid	18
2.1.1 Mootori valik	18
2.1.2 Raami valik	20
2.1.3 Aku valik	21
2.1.4 Lennukontrolleri valik.....	22
2.2 Drooni mudeli konstrueerimine.....	24
2.3 Drooni peatüki vahekokkuvõte.....	25
3. MEHAANIKA	26
3.1 Ülesande püstitus	26
3.2 Mehaanika konstruktsioon	26
4. ELEKTROONIKA.....	28
4.1 Ülesande püstitus	28
4.2 Andurid	28
4.2.1 Andurite liigitus	28
4.2.2 Andurite valiku kriteeriumid	29
4.2.3 Potentsiomeeter	29

4.3 Anemomeeter	31
4.4 Samm-mootor	32
4.5 Samm-mootori juht kontrolleri.....	34
4.6 Mikrokontroller.....	35
4.6.1 Mikrokontrolleri eelised	35
4.6.2 Arduino UNO	36
4.6.3 Arduino UNO valik.....	36
4.6.4 Kokkuvõtlikult Arduino plaatidest.....	37
4.7 ATmega328P	38
4.7.1 ATmega328P parameetrid	38
4.7.2 Mikrokontrolleri põhi ülesehitus.....	39
4.8 Juhtalgoritmi ülesande püstitus.....	41
4.9 Programmi blokkdiagramm	41
4.10 Üldine ühendusskeem	42
4.11 Elektroonika vahekokkuvõte.....	44
5. ELEKTROONIKA TULEVIKU PLAANID.....	45
5.1 Tagasiside süsteemi edasi arendus.....	45
5.1.1 Ultraheli andur	45
5.1.2 Kaamera	46
5.2 Süsteemi juhtimise lihtsustamine.....	47
5.2.1 Klaviatuuri abil juhtimine	47
5.2.2 Juhtkangi abil juhtimine	47
KOKKUVÕTE	49
SUMMARY	50
KASUTATUD KIRJANDU	52
LISAD	55

Lisa 1 Süsteemi elektriskeem 55

EESSÕNA

Antud bakalaureusetöö idee sündis Tallinna Tehnikaülikooli Elektroenergeetika ja Mehhatroonika instituudi vajadusest testida ja arendada olemasolevaid ning tulevasi droone. Töö koostamine ning katsete läbiviimine toimus Tallinna Tehnikaülikoolis.

Soovime tänu avaldada meie juhendajale, lektor Kristjan Pütsepale ja konsulteerivale õppejõule professor Anton Rassõlkinile, kes aitasid paika panna konkreetse lõputöö teema ning toetasid selle protsessi käigus meid konsultatsioonidega ja andmetega.

TÖÖJAOTUS

Drooni tuuletunneli testpingi projekt on läbi viidud koostöös kaastudengiga Markus Koert. Projekti tööjaotus on järgmine: elektriosa tegi autor, Ardi Soosalu ning mehaanika osa tegi Markus Koert. Olemasolevate lahenduste uurimine ning drooni konstrueerimine on tehtud ühiselt, kus mõlema panus oli võrdne.

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

ADC – Analoog-digitaalmuundur;

C (*C-rating*) – C-väärtus, iseloomustab kui kiiresti saab akut tühjaks laadida;

DAC – Digitaal-analoogmuundur;

IMU (*Inertial Measurement Unit*) – inertsiaalander;

LiPo – Liitium polümeer (aku);

PWM – Pulsilaius modulatsioon;

RAM – Muutmälu;

RISC (*Reduced instruction set computer*) – Kärbitud käsklustega arvuti;

ROM – Püsिमälu;

RPM – Pööret minutis;

SISSEJUHATUS

Droonid, ehk teiste sõnadega mehitamata õhusõidukid on oma olemuselt põhimõtteliselt lendavad robotid. Droonide kasutuselevõtt algas ajalooliselt enamjaolt militaarsektoris, kus mehitamata õhusõidukeid arendati luure ning valve eesmärkidel, et teha töid, mis olid inimeste jaoks liiga monotoonsed või ohtlikud. Suuresti tänu investeeringutele militaarsektoris on mehitamata õhusõidukite tehnoloogia arenenud viimaste aastakümnete jooksul eksponentsiaalselt. Droonide komponentide areng on olnud üheks kõige olulisemaks eelduseks mehitamata õhusõidukite massilisele esile tulekule nii militaarsektoris kui ka äri-, põllumajandus-, teadus- ja paljudes muudes majandussektorites.

Tänapäeval on droonid näinud laialdast kasutust mitmetes erinevates valdkondades, kohanes kiirelt erinevate keskkondade ning ülesannetega. Mehitamata õhusõidukid on leidnud kasutust näiteks pakkide kohale veos, fotograafias, infrastruktuuri inspeksioonides, ilma monitoorimises, päästemissioonidel ja droonide võistlussõitutes. Droon võib olla inimese poolt kaugelt juhitud või autonoomne, kasutades tarkvaraliselt juhitud lennutrajektoore. Tingitult liitumioonakude kasutuselevõttust ja üha enam efektiivsematest käitursüsteemidest on lennuajad pikemad ning droone varustatakse erinevate GPS süsteemidega, sensoritega, kaameratega ja isegi relvadega.

Quadcopter on üks populaarne drooni tüüp, mis on juhitud tema nelja mootori varieeruvate pöörlemiskiirustega. Antud tüüpi drooni kasutatakse ka käesolevas töös. Drooni võrdlemisi väike suurus ning kiire manööverdamisvõime lubab kasutajal läbi viia komplekseid manöövreid, mille jaoks on vaja väga täpset juhtimist.

Õhusõidukite lendu turbulentses keskkonnas vaadatakse tihti kui anomaalset olukorda lendamisel, kus turbulentsi mõju lennutrajektoorile kontrollida ei ole võimalik. Droonide kere geomeetria ning lennu juhtimissüsteemid on tihti disainitud rahulikku keskkonda silmas pidades, kus õhu liikumine ning tuulepuhangud on minimaalsed. Selle tulemusena mõne väikese õhusõiduki lennusuutlikus turbulentses keskkonnas langeb. Droone kasutatakse tihti ka linnades ning kitsamates ruumides, kus õhu liikumisel ümber erinevate takistuste tekib turbulents, mis võib olla märkimisväärse intensiivsusega võrreldes drooni relatiivsele liikumiskiirusele. Mehitamata õhusõidukite madal kaal ning võrdlemisi väikesed liikumiskiirused süvendavad turbulentsi mõju drooni liikumistrajektoorele.

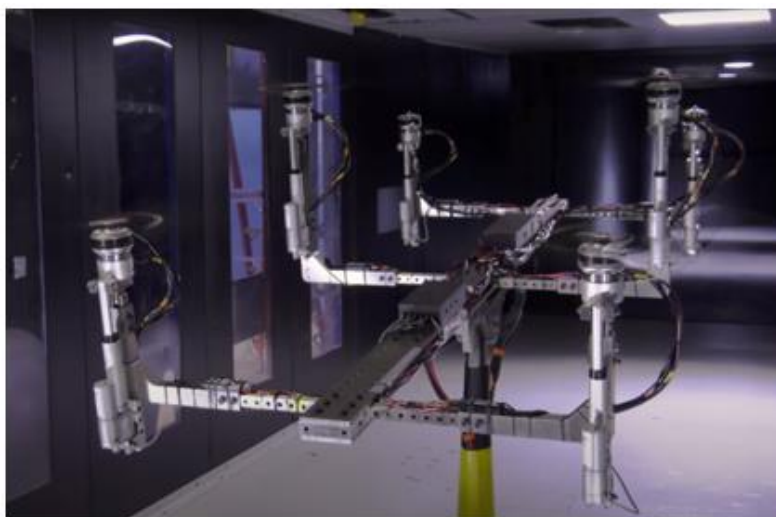
Käesoleva töö eesmärk on välja töötada lahendus droonide juhtimissüsteemi testimiseks turbulentses keskkonnas, sest tundlikkus turbulentsile peab olema faktor mehitamata õhusõidukite juhtsüsteemides, et tagada igas keskkonnas töökindlus. Antud töö sihiks on projekteerida testpink, mis aitaks kõigil huvilistel testida ning arendada oma drooni juhtimissüsteemi, et see arvestaks turbulentsiga ning vähendaks selle mõju drooni lennule, muutes drooni lendu efektiivsemaks.

Antud süsteemi modelleerimiseks kasutame projekteerimistarkvara CATIA V5 R21 ja elektroonika skeemide tegemiseks tarkvara Altium Designer 17. Tugevusanalüüsid on samuti tehtud tarkvaraga CATIA V5 R21.

1. OLEMASOLEVAD LAHENDUSED

Viimaste aastakümnete jooksul on avaldatud suur kogus uurimustöid ja artikleid mehitamata õhusõidukite testimise kohta nii erinevates simulatsiooniprogrammides kui ka reaalmaailmas. Mitmed tööd on lähenenud antud ülesandele kasutades siseruumides ventilaatoreid, et jäljendada õhu liikumist erinevates olukordades. Sellist tüüpi lahenduse puhul testitakse droone tihtipeale vabalt lennates. Negatiivseks küljeks ventilaatorite kasutamisel vabas ruumis on see, et õhu kiirus langeb kiirelt kui liikuda ventilaatorist eemale, vähendades oluliselt lennuruumi.

Tänu tuuletunnelile on võimalik saavutada suuremaid tuule kiirusi kontrollitud keskkonnas, ilma et õhuvool laiali valguks. Tuuletunnel lubab paremini juhtida tuule omadusi ning teha katseid kontrollitud, korrataval ja mõõdetaval viisil. Tuuletunnelite kasutamine on levinud viis kuidas testida sõidukite, lennukite, tuuleturbiinide ja paljude muude tehnoloogiate omadusi voolavas õhus.



Joonis 1.1 Drooni testimine NASA testpingil [1]

Tuuletunnelite kasutus multirootor droonide testimisel piirdub tihti sellega, et katsetatakse individuaalseid mootoreid staatilise testpingi peal [2]. Mõned teadustööd on katsetanud ka terveid droone staatiliste katsepinkide peal, et uurida õhu kiirust, rootori kiirust ning õhu liikumissuunda. [3] Esineb ka näiteid, kus on ehitatud siseruumidesse piisavalt suur tuuletunnel, et testida drooni vabalt lennates. [4]

Autorite teadmiste kohaselt ei ole spetsiifiliselt sellist lahendust, kus terve droon on paigutatud dünaamilise testpingiga koos tuuletunneli sisse, veel kasutatud. Sellest lähtuvalt oleme projekteerinud lahenduse droonide testimiseks, kus tuuletunnelis asetseb tagasisidega ja juhitud testpink.

2. DROON

Drooni komponentide valik ning konstruktsioon on valminud koostöös kaastudengiga Markus Koert. Lõputöodes on drooni peatüki sisu sama, kuna eesmärk ning teostus olid ühised.

Käesolevas töös konstrueerime katsete läbi viimiseks nelja mootoriga drooni, ehk teise nimetusega kvadrootori. Sellist sorti droon on tüüpiliselt juhitud kahe mootori paariga: kaks päripäeva ning kaks vastupäeva pöörlevat mootorit. Drooni lendu kontrollitakse iga mootori pöörlemiskiirust eraldiseisvalt juhtides.

2.1 Drooni komponendid

2.1.1 Mootori valik

Antud peatükis on välja toodud drooni konstrueerimisel kasutatavad komponendid, nii mehhaanilised kui ka elektroonilised. Esimesena sai droonile valitud mootorid, milleks osutusid harjasteta alalisvoolumootorid Sadulli (Joonis 2.1) [5]. Tegemist on täielikult avaliku disainiga mootoriga, mille külge on integreeritud juhtloogika elemente. Sadulli mootori parameetrid on järgmised:

Table 2-1 Sadulli mootori parameetrid

Mass (propelleriga)	Võimsus	Andmeside protokoll	Toitepinge
245 g	500 W	UAVCAN ja RCPWM	10...34 V

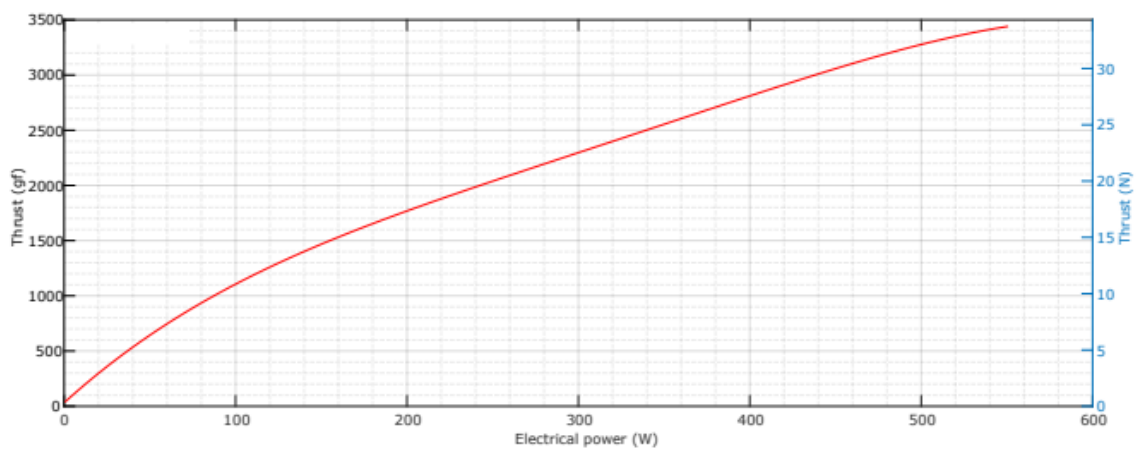


Joonis 2.1 Integreeritud mootor-draiver "Sadulli"

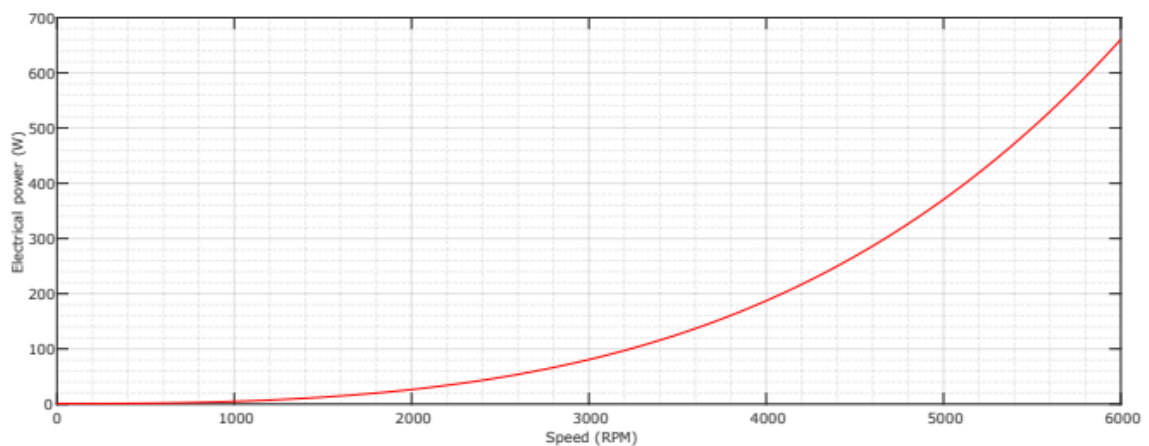
Harjasteta alalisvoolumootoreid kasutatakse droonide mootoritena tänu nende kõrge jõu ja võimsuse suhtele, suurele kiirusele ja elektroonilise juhtimise võimalusele. Lisaks vajavad harjasteta alalisvoolumootorid suhteliselt vähe hooldust kuna neil puuduvad harjased, mille materjal ajapikku kulub.

Mootori valikul arvestati esimesena tema tõukejõu ning kaalu suhet. Rusikareeglina võiks kvadrootori jõu-kaalu suhe olla vähemalt 2:1, kusjuures on tavaline näha kiirematel võidusõidu droonidel isegi 5:1 suhet. Sadulli mootor koosneb kahest osast: mootorist endast ning mootori kontrollierist. Antud mootor on kõige efektiivsem kui tema tõukejõu ning võimsuse suhe on vähemalt 10 g tõukejõudu iga wati kohta. All olevatelt graafikutelt (Joonis 2.3, 2.4, 2.5) võib järeldada, et Sadulli mootor töötab efektiivselt 100 W juures, kus tema gramm-jõud on ~1500 gf ning pöörde arv efektiivse lennu jaoks on ~3200 RPM.

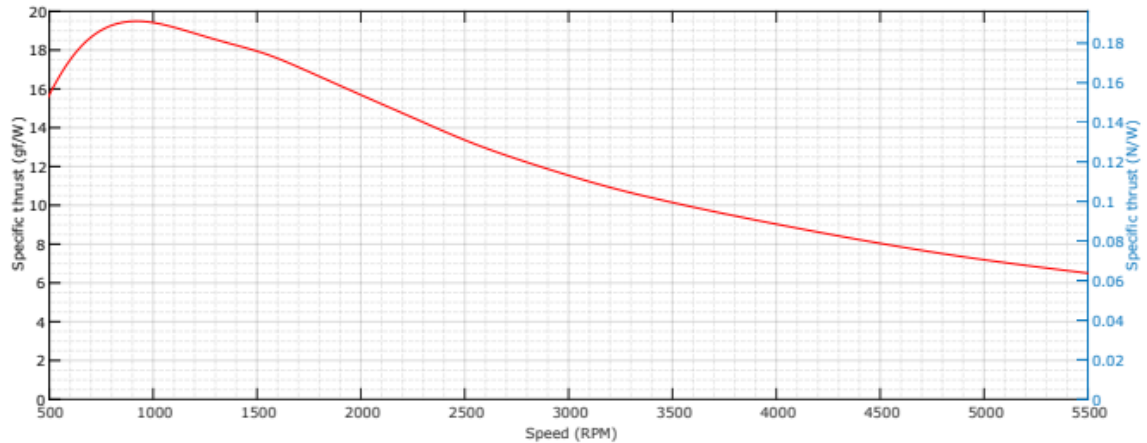
Arvestades, et meie valitud mootorid, raam ning aku koos ülejäänud elektroonikaga kaalub kokku ligikaudu 3000 g, on meie drooni tõukejõu ja kaalu suhe 2:1.



Joonis 2.2 Sadulli mootori tõukejõu (*Thrust*) ja võimsuse (*Power*) suhe



Joonis 2.3 Sadulli mootri võimsuse (*Electrical power*) ja pöörde (*Speed (RPM)*) suhe



Joonis 2.4 Sadulli mootori pöörete (*Speed(RPM)*) ja tõukejõu (*Specific thrust*) suhe

2.1.2 Raami valik

Mootori valikust tekkis aga omaette probleem - nimelt Sadulli on suhteliselt raske, kaaludes kokku 245 g. See tähendab, et raami valikul pidime arvestama sellega, et raam oleks piisavalt tugev mootorite hoidmiseks ilma läbi paindumata. Lisaks sellele, on oluline valida võimalikult kerge raam, et hoida drooni massi ja võimsuse suhet optimaalsena. Mainitud kriteeriumitest lähtuvalt valisime toru konstruktsiooniga raami ZD550 (Joonis 2.6).



Joonis 2.5 Drooni raam 'ZD550'

Lisaks sellele, et tegemist on stabiilse konstruktsiooniga, on raami alumise osa abil drooni kinnitamine katsepingile lihtsustatud. Raami propelleri kinnituspunktide vahe on 550 mm, mis

kindlustab selle, et meie valitud 300 mm tiivikud mahuvad nii drooni peale, kui ka kogu droon ise mahub tuuletunnelisse. ZD550 on tehtud süsinikkiust, mis tagab toote tugevuse ning võrdlemisi madala massi.

2.1.3 Aku valik

Antud drooni aku valik sõltub peamiselt kasutusel olevatest mootoritest. Sadulli mootor kasutab efektiivse lennu ajal võimsust 100 W ning voolu ~3,5 A, kuid suuremate kiiruste juures võib vool tõusta kuni ~10 A. See tähendab, et kasutades nelja mootorit on summaarne vool mootoritesse kuni 40 A. Arvestades efektiivse lennu võimsuse tarbimist, arvutame aku energia, et lennutada drooni 1 tund:

$$E = P * t \quad (2.1)$$

$$E = 4 * 100 * 1 = 400 \text{ Wh}$$

Kus E – Energia, Wh,

P – Võimsus, W,

T – Aeg, h.

Arvutusest selgub (Valem 2.1), et akupakk peab tagama vähemalt 400 Wh energiat et droon saaks lennata 1 tund. Lisaks on oluline, et akupaki pinge oleks mootoritele sobiv ja et akupakk taluks 40 A voolu. Nendele parameetrite põhjal otsustades, osutus parimaks sobivaks akuks Turnigy High Capacity 14000 mAh 6S Lipo (Joonis 2.7). Liitiumpolümeerakud on droonide ehitamisel levinud tänu nende kõrgele voolule ning väiksele massile. Kuigi antud aku ei taga mahtu 1 tunnise lennu jaoks, vaid umbes 45 min, on Turnigy aku parim valik oma mahu ning kaalu juures.



Joonis 2.6 Turnigy High Capacity 14000 mAh 6S LiPo [6]

Table 2-2 Valitud LiPo aku parameetrid

Pinge	Mass	Aku mahutavus	C-väärtus
22,2 V	1.82 kg	14000 mAh	12 C

Akupaki C-väärtuse põhjal saab arvutada akupaki maksimaalse võimaliku voolutarve korrutades aku mahutavuse amprites tema C-väärtusega (Valem 2.2):

$$I_{max} = Q * C \quad (2.2)$$

$$14000 \text{ mah} = 14 \text{ Ah}$$

$$I_{max} = 14 * 12 = 168 \text{ A}$$

Kus I_{max} – Vool, A,

Q – Maht, Ah,

C – C väärtus, C.

2.1.4 Lennukontrolleri valik

Drooni lennukontrollerit valides otsustasime peamiselt kahe toote vahel - kas Holybro Pixhawk 4 [7] (Joonis 2.8) või Holybro Durandal [8] (Joonis 2.9). Mõlemad lennukontrollerid on valmistatud Holybro poolt ning samuti om mõlemad ühilduvad Sadulli mootoriga. Lõplikult sai otsustatud Holybro Durandal kasuks, kuna Durandal on peaaegu kaks korda kiirema protsessoriga kui Pixhawk

4 ning lisaks on tal rohkem sisendeid mootorite jälgimiseks. Ainus eelis, mis on Pixhawk 4 on tema väiksem kaal. Nimelt on Pixhawk ~50 g kergem, kuid suures pildis see ei muuda midagi. Allpool on välja toodud Pixhawk 4 ja Holybro Durandal võrdlus:

	Pixhawk 4	Durandal
Peamine protsessor	216MHz ,2MB mälu , 512KB RAM	480MHz,2MB mälu , 1MB RAM
PWM väljundid	8-16	8-13
PWM salvestus sisend	3	6
Kaal	15.8g	68.8g



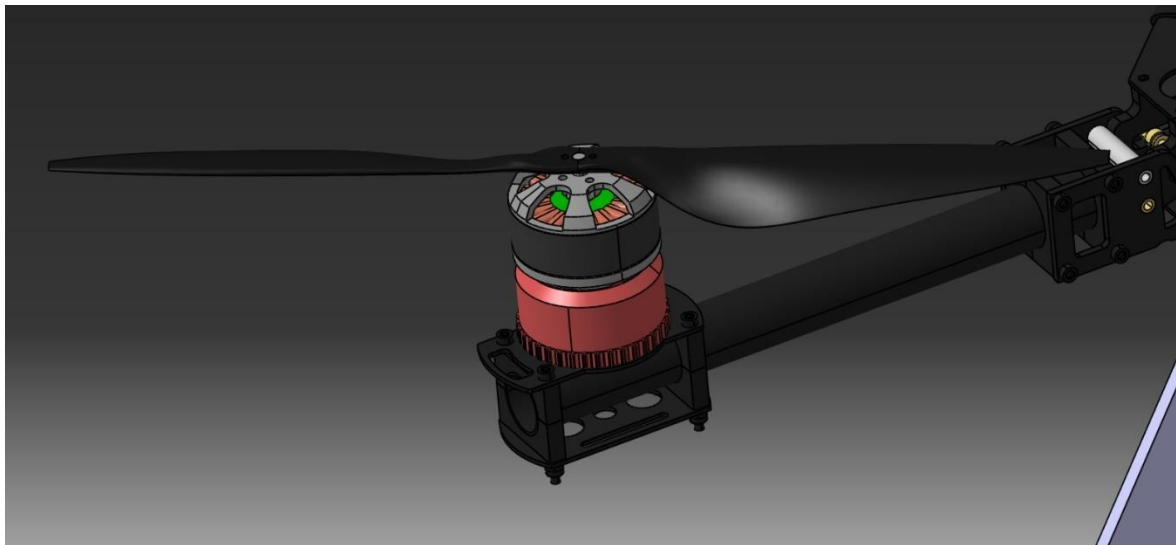
Joonis 2.7 Lennukontroller Pixhawk 4 [7]



Joonis 2.8 lennukontroller Holybro Durandal [8]

2.2 Drooni mudeli konstrueerimine

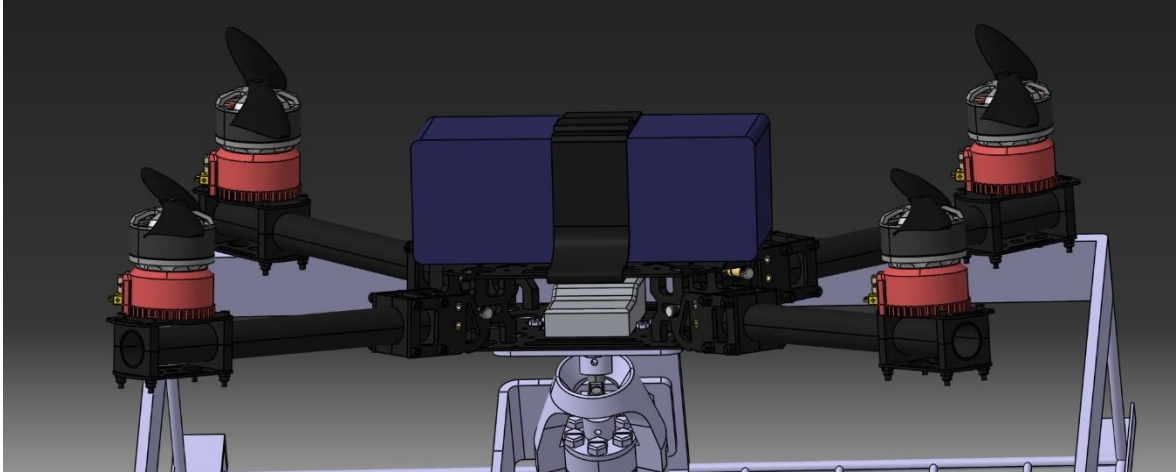
Drooni mudeli konstrueerimisel on kasutatud veebist kättesaadavaid mootori ning drooni raami 3D mudeleid. Esimesena sai drooni ZD550 raamile lisatud 4 Sadulli mootorit. Iga mootor on kinnitatud raamile nelja M2,5 kruviga. Mootorite võlli külge on kinnitatud 30 cm diameetriga süsinikust propellerid.



Joonis 2.9 Sadulli mootor kinnitatud droonile

Järgmisena sai drooni raamile kinnitatud Turnigy aku ning Holybro Durandal lennukontroller. Holybro Durandali tootja poolt on lennukontrolleri tutvustuses [8] välja toodud korrektne lennukontrolleri kinnitus raamile. Oluline on, et Durandal oleks paigutatud nii, et toote pealmine osa oleks näoga üles poole ning kontrolleril olev nool näitaks sõidusuunas. Lisaks tuleb asetada Durandal Holybro võimalikult drooni massikeskmesse. Tootja soovist lähtuvalt sai

lennukontroller paigutatud drooni raami alumise tasapinna peale. Turnigy aku kinnitamisel suurt valikuvõimalust ei olnud kuna aku on mõõtmete poolest võrdlemisi suur. Lisaks ei ole tootja poolt aku kinnituseks disainitud mingisugust lahendust. Aku on paigaldatud drooni pealmisele tasapinnale ning kinnitatud raami külge reguleeritava rihmaga. Joonisel 2.11 on näha nii lennukontrolleri kui ka aku lihtsustatud mudelit drooni peal.



Joonis 2.10 Droon koos mootorite, aku ning lennukontrolleriga

2.3 Drooni peatüki vahekokkuvõte

Antud peatükis sai ülekäidud testimiseks ehitatava drooni peamised komponendid. Valiti mootorid droonile ning mootorite kaalust tulenevalt raam, vältimaks raami deformatsiooni. Lisaks sellele sai valitud aku, mis suudaks efektiivse lennu ajal drooni tund aega õhus hoida. Kõige lõpuks pandi paika ka lennukontrolleri valik ning selle valiku põhjuseks peamiselt protsessori kiirus.

3. MEHAANIKA

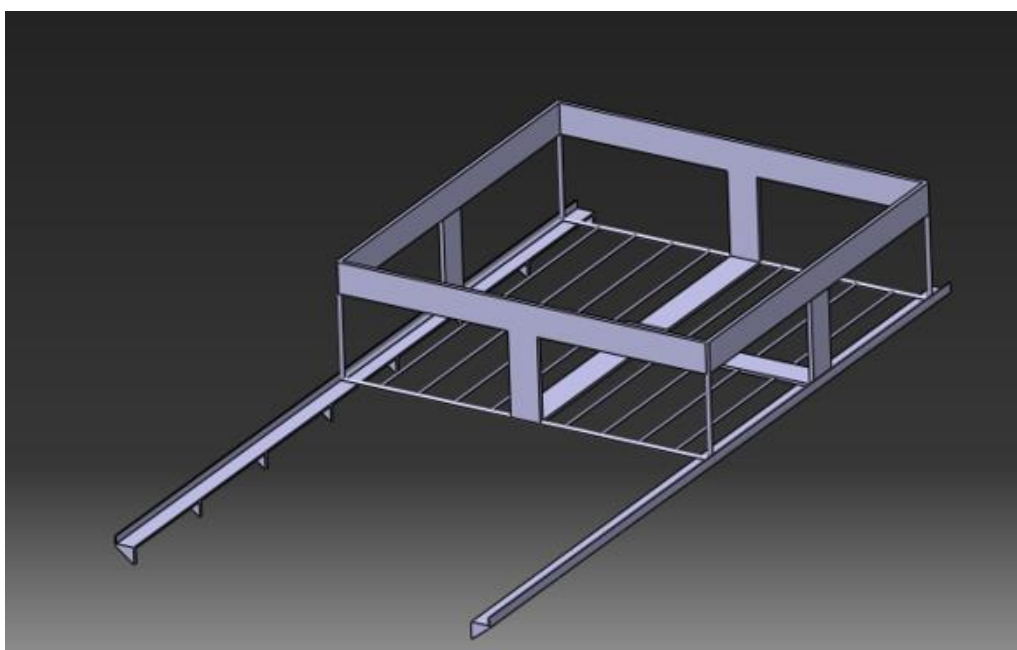
Antud töö on tehtud kahepeale kaastudengiga Markus Koert, kes vastutas antud töös mehaanika osa eest. Käesolevas peatükis tehakse lühike kokkuvõtte mehaanika osast, kuna käesolev töö keskendub peamiselt elektroonika osale.

3.1 Ülesande püstitus

Antud projekti mehaanika osa peamine ülesanne on anda testpingile konstruktsioon, mida elektroonika osaga saaks juhtida. Lisaks sellele peab konstruktsioon ka võimaldama drooni kinnitamist testpingile, võimalikult lihtsalt, et vajadusel saaks ka teist tüüpi droone sinna kinnitada. Samuti on tarvis teha piisavalt raske või kinnitussüsteemiga raam, et droon töötates ei tõstaks raami õhku ega tekitaks liiga suurt vibratsiooni, vältimaks elektroonika komponentide viga saamist.

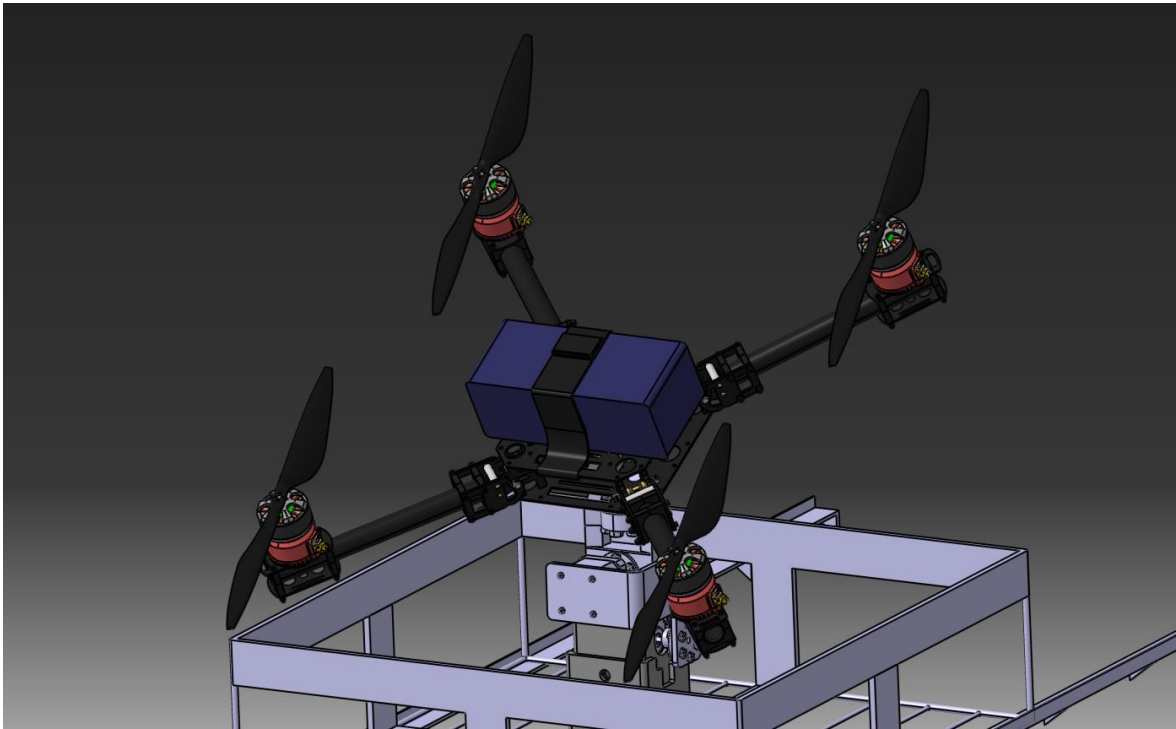
3.2 Mehaanika konstruktsioon

Testpingi mehaanika konstruktsiooni disaini alustalaks on tuuletunnel ise. Nimelt on NRG-001 laboris olemas tuuletunnel, millele antud töös ehitatakse drooni testpink. Tuuletunneli läbimõõt on 800 mm ning sellest tulenevalt oli tarvis valida droon, mis sinna sisse mahuks. Drooni maksimaalne läbimõõt on 760 mm, jättes natuke vaba ruumi propellerite jaoks. Samuti tuli ka tuuletunneli läbimõõte võtta arvesse testpingi raami ning ka tüvi disainimisel, selliselt, et drooni keskpunkt jääks võimalikult täpselt tunneli keskmesse.



Joonis 3.1 Tuuletunneli testpingi kinnitus raam

Algselt sai valmis disainitud kinnitus raam, mis kinnitatakse tuuletunneli külge, vältimaks selle liikumist tunneli sees. Raami disain lisab paindlikkust, võimaldades raskuste lisamist võimsama drooni puhul, et raam õhku ei tõuseks ning samuti on piisavalt ruumi elektroonika komponentide lisamiseks. Avatud disain laseb õhul käia üle kogu raami, mis pakub elektroonika komponentidele lisa jahutust. Lisaks on raami paigaldus tuuletunnelisse lihtsustatud tema suusataoliste siini disaini abil, vajadusel on lihtne konstruktsioon kokku pakkida ning liigutada vastavalt vajadusele.



Joonis 3.2 Tuuletunneli drooni testpink [9]

Ülal toodud jooniselt 3.2 saab näha drooni testpingi kogu koostu. Raami keskele on paigaldatud tüve osa, mille abil on võimalik kinnituse kõrgust reguleerida, juhul kui on tarvis katseid läbi viia teist tüüpi droonidega. Mootorite abil on võimalik drooni paigalseisust kõrvale viia, et jälgida reaktsiooni suuna muutustele ning kuidas droon ennast stabiliseerib, kuid samuti on jäetud droonile kahes teljes liikumis vabadus [9].

4. ELEKTROONIKA

4.1 Ülesande püstitus

Elektroonika projekteerimise suurim eesmärk on juhtida tuuletunneli sisse ehitatava testpingi automaatika süsteeme. Drooni peab saama viia erinevatesse olukordadesse, et testida tema reaktsioone positsiooni muudatustele ning läheb vaja ka tagasiside süsteemi, et operaator saaks tulemusi salvestada ning jälgida. Järgnevas loetelus esitatakse ülesande püstituse punktid, millega elektroonika pool peab arvestama:

- Drooni liigutamine X- ja Y-telje suhtes;
- Drooni positsiooni muutuste jälgimis süsteem;
- Lihtne juhtimis süsteem;

4.2 Andurid

4.2.1 Andurite liigitus

Andurid on seadmed, mille abil mõõdetakse erinevaid füüsikalisi omadusi nagu näiteks temperatuur, jõud, kiirus jne. Elektroonika süsteemis kasutatakse andureid, mis muudavad mõõdetud suurused elektroonilisteks signaalideks.

Andureid võib jaotada näiteks järgmiselt:

- Positsiooni mõõtmisseadmed;
- Lähedus-, liikumisandurid;
- Inertsiaalsed seadmed;
- Surve-, jõuseadmed;
- Optilised seadmed;
- Pilt-, videoseadmed;
- Magnetilised seadmed;
- Keemilised andurid;
- Voolu- ja pingeseadmed;
- Temperatuuriseadmed;
- Spetsialiseerunud seadmed;

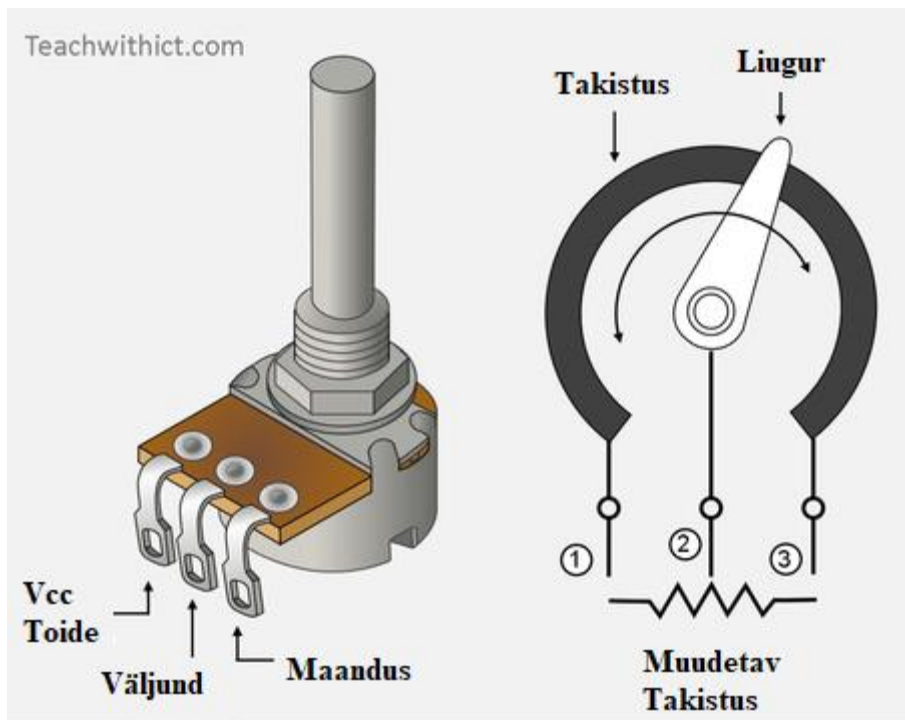
4.2.2 Andurite valiku kriteeriumid

Järgnevates punktides tuuakse välja kriteeriumid mille põhjal andurid antud süsteemi valitakse:

1. **Mõõtepiirkond, viga;**
2. **Töökiirus;**
3. **Ümbritsev keskkond:**
 - Metallist tulenev mõju;
 - Ümar, peegeldavast pinnast tulenev mõju;
4. **Montaažitingimused:**
 - asukoht;
 - mõõtmed;
 - vibratsioon;
 - toide (toiteallikas või aku);
 - reguleeritavus, mobiilsus;
5. **Kulud:**
 - Hind;
 - Töökindlus;
 - Kalibreerimine;

4.2.3 Potentsiomeeter

Potentsiomeeter on kõige lihtsamast mõistest 3 terminaliga muudetava takistusega takisti mistõttu peamiselt kasutatakse teda pingejagurina [10]. Antud süsteemis on potentsiomeeter kasutusel nurga mõõtmise seadena, kus tema takistus on proportsionaalne nurgaga (Joonis 4.1) [11]. Antud projektis on kasutusel OMEG poolt toodetav potentsiomeeter, mille takistus on 47 k Ω , pöördeulatus 270° ja võlli pikkus 29 mm [12].



Joonis 4.1 Potentsiomeetri tööpõhimõte

Kuigi potentsiomeeter ei mõõda kogu 360° ulatuses, vaid kuni 300° , on ta antud süsteemis ideaalne, kuna mootorid ei olegi mõeldud liikuma rohkem kui $\sim 180^\circ$. Eeliseks potentsiomeetril on veel see, et ta on absoluutne, ehk kindlal positsioonil on kindel takistus, mistõttu isegi kui süsteem välja lülitada, siis uuesti tööle pannes on kohe teada tema täpne positsioon [11].

Teine valikuvõimalus oleks olnud enkooder, kuid seda ei valitud kuna enkooder pole antud süsteemi jaoks piisavalt täpne. Potentsiomeetri mõõdab nurka täpsusega $\sim 2^\circ$, kuid valikus olnud enkoodri täpsus on $\sim 20^\circ$ ning kuna süsteemi eesmärk on jälgida drooni nurga muutusi, siis 20° inkrementidega jälgimine ei sobiks [11]. Teine eelis potentsiomeetril enkoodri üle, on Arduino terminalide kasutus. Nimelt enkooder tuleks ühendada digitaal terminali, kuid seal tekiks ruumi puudus, sest enamik seadmeid vajab digitaal terminale. Samal ajal tuleb potentsiomeeter aga ühendada analoog terminali, kus kõik terminalid on vabad.

Kolmas valikuvõimalus oleks olnud kasutada drooni peal olevat IMU (inertsiaalandur), mis koosneb kolmest andurist:

- Magnetomeeter;
- GPS ehk globaalne positsioneerimis süsteem;
- Güroskoop;

Magnetomeetri abil saab määrata kindlaks drooni lennu suuna vastavalt põhja ilmakaare suunale. Selle suurimaks probleemiks on nii metall kui ka kõik võimalikud magnet- ja elektriväljad mõjutavad

selle anduri tulemusi. GPS abil saab määrata kindlaks drooni asukohta, kuid ilma korraliku magnetomeetri näiduta ei toimi ka GPS korralikult. Samuti toimuvad testimised siseruumides, mis omakorda ei võimalda GPS kasutust üldse. Güroskoobi abil määrab droon oma kaldenurga maapinna suhtes, gravitatsiooni abil. Just sellega olekski võimalik drooni enda nurka määrata, kuid kui IMU kaks komponenti juba ei tööta, hakkab tulemustele viga sisse tulema. Samuti sõltub güroskoobi tulemus ka temperatuuri muutustest ning minnes stabiilsest ruumi temperatuurist tuuletunnelisse, muutub ka kogu drooni temperatuur, mis võib tulemused ära rikkuda.

Kuigi ka drooni peal olev güro võib toimida, on siiski vaja teada mootorite nurka, mida IMU ei suuda lugeda. Samas güroskoop on drooni peal niikui nii olemas ning annab võimaluse võrrelda drooni enda nurka mootori nurga muutustega.

4.3 Anemomeeter

Teiseks anduriks antud projektil on anemomeeter, mille abil saab mõõta tuuletunnelis oleva tuule kiirust. Konkreetselt sai valitud Adafruit poolt toodetud anemomeeter (Joonis 4.2), kuna see on ka Arduino plaadiga ühilduv. Antud anemomeetril on 7-24 V toite sisend, kus tootja soovib kasutada 9 V toidet, maa ühendus ning analoog väljund, kust saab 0.4-2 V väljund signaali. Väljundil 0.4 V tähendab, et tuult pole, ehk tuulekiirus on 0m/s ning 2V väljund tähendab maksimum tuule kiirust, milleks on 32.4 m/s. Kuna tuuletunnel, mida kasutatakse antud töös saab tekitada kuni 20m/s tuult, siis see anemomeeter sobib süsteemi väga hästi [13].



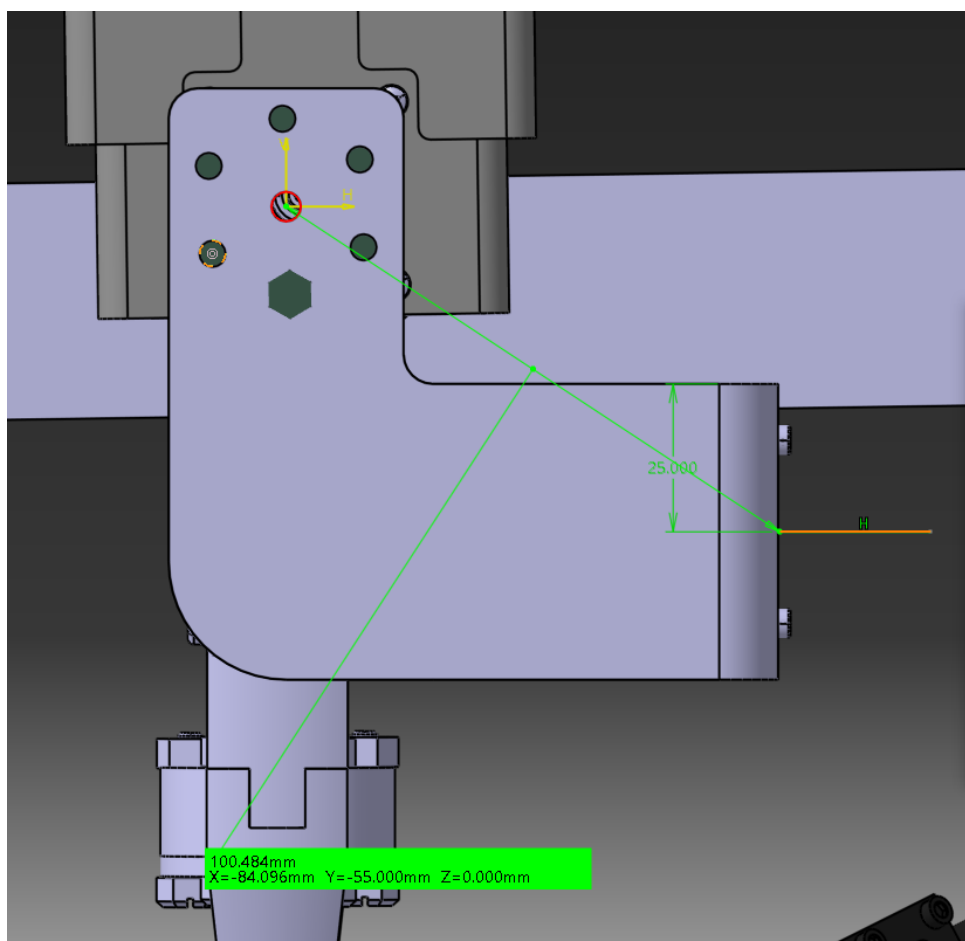
Joonis 4.2 Adafruit anemomeeter [13]

4.4 Samm-mootor

Samm-mootor on digitaalselt kontrollitav harjasteta mootor, mis pöörleb ette antud nurga võrra, ehk sammu võrra (sealt tulebki nimi samm-mootor). Igakord kui juhtsisend ahelasse antakse *clock* impulss, sooritab samm-mootor sammu. Nurk, mille mootor läbib, võib olla lausa $<1^\circ$, kuid ka samas võib olla ka 90° samm [11].

Suurimaks eeliseks samm-mootoril antud süsteemi jaoks on tema suur pöördemoment väikestel kiirustel, mis tagab selle, et mootor ikka suudab töötavat drooni tuuletunnelis liigutada [11].

Teiseks eeliseks, on samm-mootori täpsus. Nimelt on süsteemi peamine eesmärk testida drooni juhtsüsteemi reaktsioone nurga muutustele ning võimalus muuta nurka suure täpsusega, annab operaatorile suurema kontrolli testimis protsessi üle.



Joonis 4.3 Jõu rakenduspunkti kohavektor

Testpingi jaoks sai valitud Trinamic QSH8618-96-55-700 7 Nm, 5.5 A samm-mootor [14](Joonis 4.4). Valiku aluseks on mootori pöördemoment, 7 Nm, kust saab teada massi, mida mootor suudab liigutada. Allpool olev arvutus käib alumise mootori kohta, kus jõu rakenduspunkti kohavektor on 100 mm (Joonis 4.3):

$$F = m * g$$

$$M_0 = r * F \equiv r * m * g$$

$$m = \frac{M_0}{r * g} = \frac{7}{0.1 * 9.81} = 7.14 \text{ kg} \quad (4.1)$$

Kus, F – jõud, N,

m – liigutatav mass, kg,

g – keha kiirendus, 9.81 m/s^2 ,

r – jõu rakenduspunkti kohavektor, m,

M_0 – pöördemoment, Nm.

Ülal toodud valemi 4.1 abil saab teada, et raskus, mida Trinamic samm-mootor liigutada suudab antud konstruktsioonis on 7.14 kg. Kuna droon lendab 6000 gf jõuga, siis valitud mootor on sobiv



Joonis 4.4 Samm-mootor Trinamic QSH8618-96-55-700

Trinamic QSH8618-96-55-700 sai valitud, kuna ta on täpne, piisavalt tugev, et liigutada drooni ning ühildub enamik turul olevate mootori juht kontrollritega. Lisaks sellele, on autoril ka eelnevaid kokkupuuteid sarnaste mootoritega ning olemasoleva kogemuse abil on süsteemi kokku- ja töölepanek palju lihtsam.

Esialgelt oli valitud süsteemi jaoks samm-mootor NEMA 17, 3 A, ja 0.8 Nm [15](Joonis 4.5). Esialgsete arvutuste järgi tundus, et antud mootor sobib, kuna projekti alguses ei olnud jõu rakenduspunkti kohavektori pikkust teada ning sellega arvutustel ei arvestatud. Nimelt valik tehti

selle põhjal, et teoorias, 0.8 Nm suudab liigutada ~8kg, aga ainult juhul, kui jõu rakenduspunkti vektori pikkus on 1 cm ehk raskust liigutatakse näiteks nõõriga, mis on kinnitatud otse mootori võlli külge. Hiljem arvutusi ületehes kui mehaaniline konstruktsioon oli juba valmis, saadi valemi 4.1 abil siiski teada, et 0.8 Nm pole siiski piisavalt antud süsteemi jaoks.



Joonis 4.5 Esialgne samm-mootor NEMA17

4.5 Samm-mootori juht kontrolleri

Igal samm-mootoril peab olema juhtkontrolleri ahel, kontrollimaks voolu, mis läbib staatori mähiseid. Samal ajal peab mootori juht kontrolleri kontrollima mingi loogika element, mida nimetatakse tõlkijaks ehk juht signaale ja käske saatev komponent [11].

Antud süsteemi jaoks sai valitud Pololu High-Power Stepper Motor Driver 36v4 [16](Joonis 4.5). Peamiseks otsustajaks valiku osas sai tema suhteliselt odav hind ning samuti antud mootori juht kontrolleri vastupidavus 5.5A voolule, mida mootori mähised vajavad. Tootja on ka märkinud, et üle 4 A mootori puhul läheb vajab lisa jahutust, kuid tuuletunnelis olles sellest probleemi ei teki. Lisaks on see ka ühilduv Arduinoga, mis täidab mootori juht kontrolleri jaoks tõlkija ehk käsu andja rolli [16].



Joonis 4.6 Pololu High-Power Stepper Motor Driver 36v4 [15]

4.6 Mikrokontroller

Mikrokontroller on põhimõtteliselt kiibi peal olev arvuti. Sellel on protsessor, ROM (Püsimälu), RAM (muutmälu), jada kommunikatsiooni terminalid, ADC (analoog-digitaalmuundur) ja palju muud, ehk siis ta on nagu väike arvuti. Mikrokontrollereid on mitmeid erinevaid tüüpe, millest peamised kaks tüüpi on:

- OTP ehk ühekorra programmeeritavad mikrokontrollerid;
- Üle programmeeritavad mikrokontrollerid;

Mikrokontrollerid täidavad erinevates seadmetes aju funktsiooni. Näiteks spordi käekellad kontrollib ekraani peale ilmuvat infot, võtab vastu käske ning täidab neid - näiteks alustab stopperit. Kui seade kuvab informatsiooni või täidab operaatori poolt etteantud käske, siis on tõenäoliselt antud seadmas ka mikrokontroller [11].

4.6.1 Mikrokontrolleri eelised

Mikrokontrolleri eelised võrreldes tavapärase arvutiga, on järgmised:

- Mälu, protsessor ja teised funktsioonid on kõik integreeritud ühe kiibi peale. Sellest tulenevalt on võimalik säästa raha oma süsteemi monteerimise ning komponentide pealt.
- Kuna kõik vajalik arvuti jaoks mahutatakse väikesse kiipi ära, jääb rohkem ruumi üle teiste komponentide jaoks. See tähendab et disaini saab teha kompaktsemaks ning lihtsamaks. Lihtsustub just tänu sellele, et ei pea eraldi juhtmeid viima komponentide vahelt, mis on juba mikrokontrolleris olemas.

- Mikrokontrollerid spetsialiseeruvad teatud ülesannete tegemises, nimelt selliste, mis ei nõua väga suurt arvutusjõudu. Miks raisata raha kalli arvuti peale, mille võimsusega pole midagi peale hakata, kui tegemist on lihtsa süsteemiga?

Lisaks veel kõigele sellele, on mikrokontrollerid ka vägagi vastupidavad, suutes vastu panna nii madalatele temperatuuridele kui ka kõrgetele [17].

4.6.2 Arduino UNO

Arduino UNO sai valitud antud süsteemi mikrokontroller plaadiks, mikrokontroller ise on ATmega328P. Valides kohe mikrokontroller plaadi, ei ole vaja ise trükkplaati disainida, vaid kõik vajalik on juba Arduino UNO olemas:

- 14 Digitaal sisendit ja väljundit;
- 6 PWM ehk pulsilaius modulatsiooni võimalusega väljundit;
- 6 analoog sisendit;
- 16 MHz kvartz;
- USB ühendus arvuti jaoks;
- Eraldi toite ühendus;
- ICSP otsik, ahela siseseks jada programmeerimiseks;

Lisaks sellele, on olemas veel 5 V väljund, mille abil saab toita teisi loogika elemente, näiteks mootori juht kontrollerit [18].

Arduinol on ka enda tasuta pakutav programmeerimistarkvara, IDE ehk *Integrated Development Environment*. Enamikel mootori kontrolleritel, ekraanidel ja teistel toodetel on tootja poolt kaasa pakutavad näidisprogrammid ning tüüpfunktsioonide kogumikud Arduinole, mille abil on lihtne luua endale vajaminev programm. Kõik see muudabki just Arduino UNO antud süsteemi jaoks kõige paremaks valikuks.

4.6.3 Arduino UNO valik

Miks Arduino UNO ning mitte mõni teine Arduino plaat? Nagu ka eelnevalt mainitud, on Arduino UNO peal kõik vajalik olemas. Piisavalt terminale nii digitaalsisendite osas kui ka PWM signaalide jaoks. Samas on ka teisi Arduino plaate, mis võiksid antud projekti hästi sobida. All on toodud võrdlus kolme erineva Arduino plaadi vahel (Tabel 4-1):

Tabel 4-1 Erinevate Arduino plaatide võrdlus

Arduino	Arduino UNO	Arduino Mega 2560	Arduino Micro
Hind	20-23\$	36-39\$	20-25\$
Protsessor	ATmega328P	ATmega2560	ATmega32U4
Välkmälu (kB)	32	256	32
Toitepinge	5V	5V	5V
Digitaal sisend/väljund	14	54	20
Digitaal sisend/väljund PWM	6	15	7
Analoog terminalid	6	16	12
Lisadega ühilduvus	Jah	Jah	Ei
Ethernet/WIFI/Bluetooth	Ei, Ainult lisa mooduliga	Ei, ainult lisa mooduliga	Ei

Vaadates tabelist 4-1 Arduino UNO andmeid, tunduks justkui ainuke eelis teiste üle on tal hind. Tegelikult oleneb Arduino plaadi valik suuresti projektist endast, mitte sellest, milline plaat on teoreetiliselt parim. Arduino UNO digitaal terminalide arv on küll kõige väiksem, kuid neid on täpselt piisav arv antud süsteemi jaoks. Lisaks saab Arduino UNO külge ühendada ka lisasid, näiteks puutetundlikke ekraane või ka WIFI mooduli, mille abil oleks võimalik süsteemi tulevikus edasi arendada.

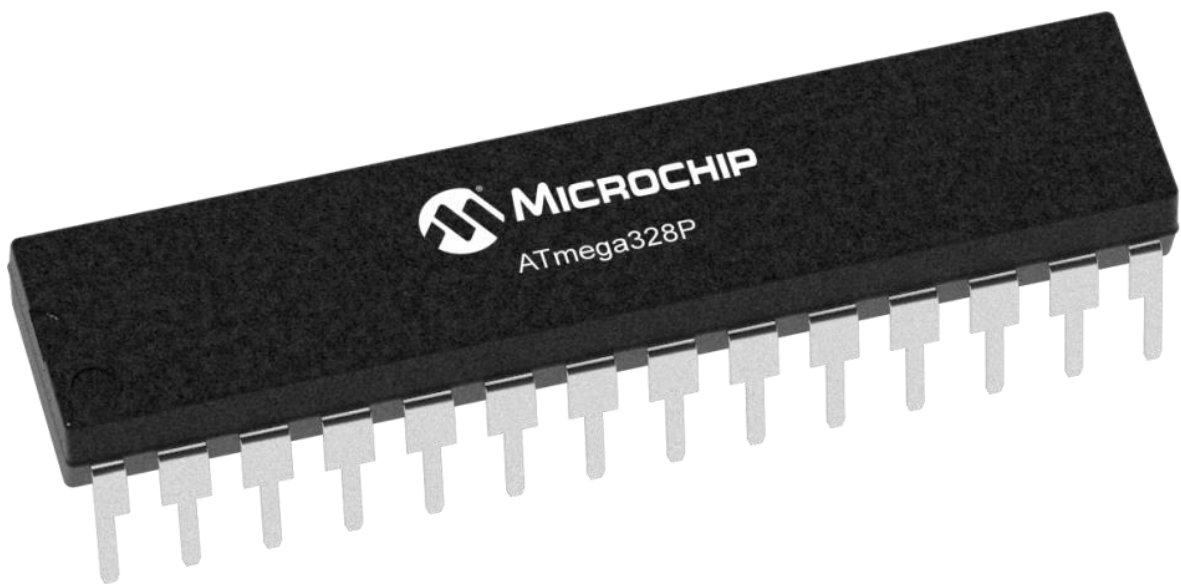
4.6.4 Kokkuvõtlikult Arduino plaatidest

Kokkuvõtlikult Arduino plaatidest võib järeldada, et antud süsteemi jaoks parim plaat on Arduino UNO, kuna tal on täpselt sobiv arv terminale ning on ka võimalus süsteemi edasi arendada. Teine valiku võimalus oleks Arduino Micro, millel natuke kõrgem hind, kuid digitaal terminale on rohkem, mis võimaldaks rohkem andureid lisada. Samas puudub Arduino Micro võimaluste seas lisade ühilduvus, mis tuleviku mõttes jääks vähem ruumi edasiarendustele. Arduino Mega 2560 on antud süsteemi jaoks liialt suur. 54 digitaalterminali on väga palju ning enamikega neist poleks midagi

teha. Parem oleks raha säästa ning selle eest soetada mõni huvitav lisa näiteks WIFI moodul või ekraan.

4.7 ATmega328P

ATmega328P (Joonis 4.6) on Atmel firma poolt loodud üksik-kiip 8-bit mikrokontroller RISC (Kärbitud käsklustega arvuti) arhitektuuri põhimõttel. Ta suudab täita keerulisi juhiseid üksiku *clock*-tsükli jooksul ning selle tulemusena suudab ta läbida peaaegu miljon käsku sekundis. Tänu sellele, ei pea ATmega328p'ga süsteeme disainides protsessimis võimsuse pärast nii palju muretsema, vaid võib keskenduda rohkem energia kasutus efektiivsusele [19].



Joonis 4.7 ATmega328P üksik-kiip mikrokontroller [20]

4.7.1 ATmega328P parameetrid

All toodud loetelus enamik ATmega328P peamisi parameetreid:

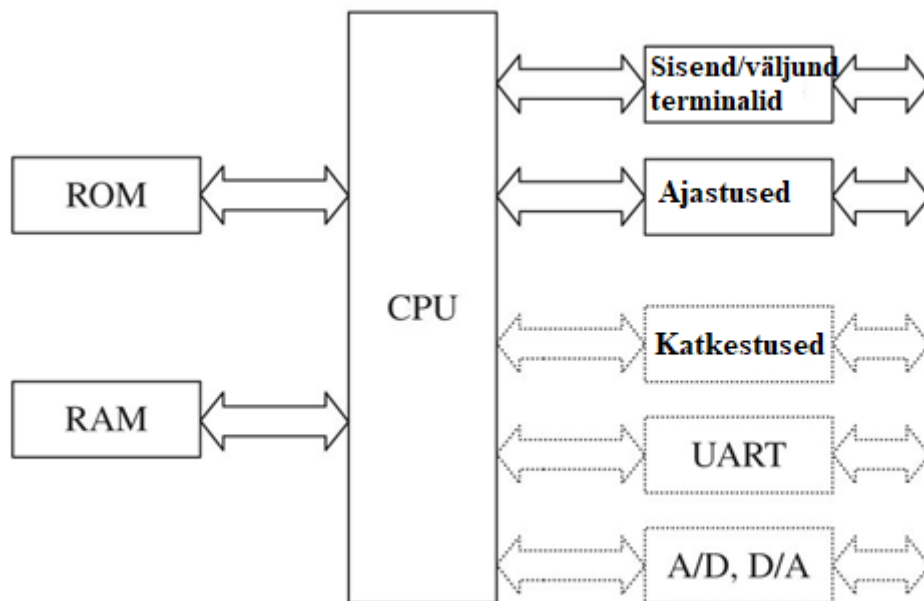
- Suur jõudlus, kuid väike energia kulu;
- RISC ehk kärbitud käsklustega arvuti arhitektuur;
 - 32 x 8 registrit;
 - Suudab täita kuni 16 miljonit käsku sekundis 16 MHz juures;
- Suure vastupidavusega püsimälu segmendid;
- Mitmeid lisa võimalusi;

- 6 PWM;
- USART ehk universaal sünkroon/asünkroon vastuvõtja ja saatja;
- SPI ehk sünkroonse järjestiksuhtluse liides;
- 8 kanaliga 10-bit ADC;
- 23 sisend/väljund kanalid;
- 2.7 V kuni 5.5 V tööpinge;
- Töö temperatuuri vahemik: -40°C kuni +125°C;
- Madal energia tarbimine, näiteks 3 V juures 1.5 mA;

Lisaks ülal väljatoodud omadustele on ATmega328P veel palju häid omadusi, kuid antud projekti juures ei ole neid kõiki tarvis, seetõttu pole ka absoluutselt kõik omadused välja toodud. Tänu ATmega suurele jõudlusele on antud süsteemis võimalik lugeda mitut väljundit korraga, andurite tulemusi kui ka nappudelt tulevaid käsklusi, ning samal ajal saab ta ka juhtida süsteemi, mootoreid liigutada ja ka andurite tulemusi info pakettidesse salvestada. Abiks tuleb ka ATmega väike energia kulu, juhaks kui on vaja süsteemi akuga toita, ei pea seda väga tihti laadima ning samuti ei ole tarvis soetada võimsat ning kallist akut. Pealt näha pole palju, kuid vaadates akude hindu, näiteks antud töös ehitatava drooni aku maksab pea 700 dollarit ning näiteks 1000 mAh aku kõigest 25 eurot, on hinna võit vägagi suur [21].

4.7.2 Mikrokontrolleri põhi ülesehitus

Antud peatükis käiakse üle üksik-kiip mikrokontrollerite ülesehitus, seletuse aluseks võetakse lihtsustatud mikrokontroller ehk baas komponendid. Sellest olenemata sobib seletus ka ATmega328P kohta, kuigi tollel on komponente rohkem.



Joonis 4.8 Lihtsustatud mikrokontrolleri põhikomponendid

Ülal toodud joonisel 4.7 on näha mikrokontrolleri põhilised komponendid, milleks on: CPU (protsessor), eri tüüpi ROM, RAM, sisend/väljund terminalid, ajastus/luger ahelad, katkestuste kontroll, jada ühendus terminalid, näiteks UART/USART ja SPI, ning ka ADC ja DAC (digitaal-analoogmuundur).

CPU ehk protsessor saab programmi juhised operaatorilt, kes programmeerib need ROMi, samal ajal kasutades RAMi, kus hoitakse ajutist infot, mis on vajalik programmi täide viimiseks. Sisend/väljund terminalide kaudu saab ühendada väliseid seadmeid, mille abil on võimalik saata juhiseid protsessorisse või siis protsessor saadab nende kaudu juhised välisesse seadmesse. Antud töös saavad juhiseid nupu vajutustest, mille tulemusena teab protsessor anda käskluse mootori juht kontrolleri mootorite liigutamiseks.

Jadaühendus terminalide kaudu saab mikrokontroller suhelda kas arvuti või teise mikrokontrolleriga. Selle abil saab jälgida andmeside voogu kahe seadme vahel. Levinumad jadaühendus protokollid mikrokontrollerites on USART/UART, SPI ning ka USB, kuigi ATmega328P ei võimalda USB ühendust, on Arduino plaadil muundur kiip, mille abil saab antud töös USB (universaalne järjestiksiin) abil arvuti ja ATmega328P ühendada. Samuti puudub jooniselt ka SPI, kuid ATmega seda võimaldab ning seda on tarvis mootori juht kontrolleri juhtimiseks.

Katkestus süsteemi kasutatakse jooksva programmi või ülesande katkestamiseks. Seda kasutatakse peamiselt selleks, et kui mõnelt väliselt seadmelt, näiteks antud töös start nupult null asendisse

minek, tuleb signaal, mis vajab kohest tähelepanu, saab programm ka sellele kohe keskenduda. Eriti tähtis on see funktsionaalsus sellisel juhul, kui tegemist on signaaliga mõnelt ohutus andurilt, näiteks kui midagi hakkab üle kuumenema.

4.8 Juhtalgoritmi ülesande püstitus

Juhtalgoritmi peamine ülesanne on anda käsk elektroonika süsteemi komponentidele. Sealhulgas peab juhtalgoritm ka jälgima süsteemi seisust ning sellega seotud info edastama operaatorile loetavas formaadis. Süsteemi juhtalgoritm peab hakkama saama järgmiste ülesannetega:

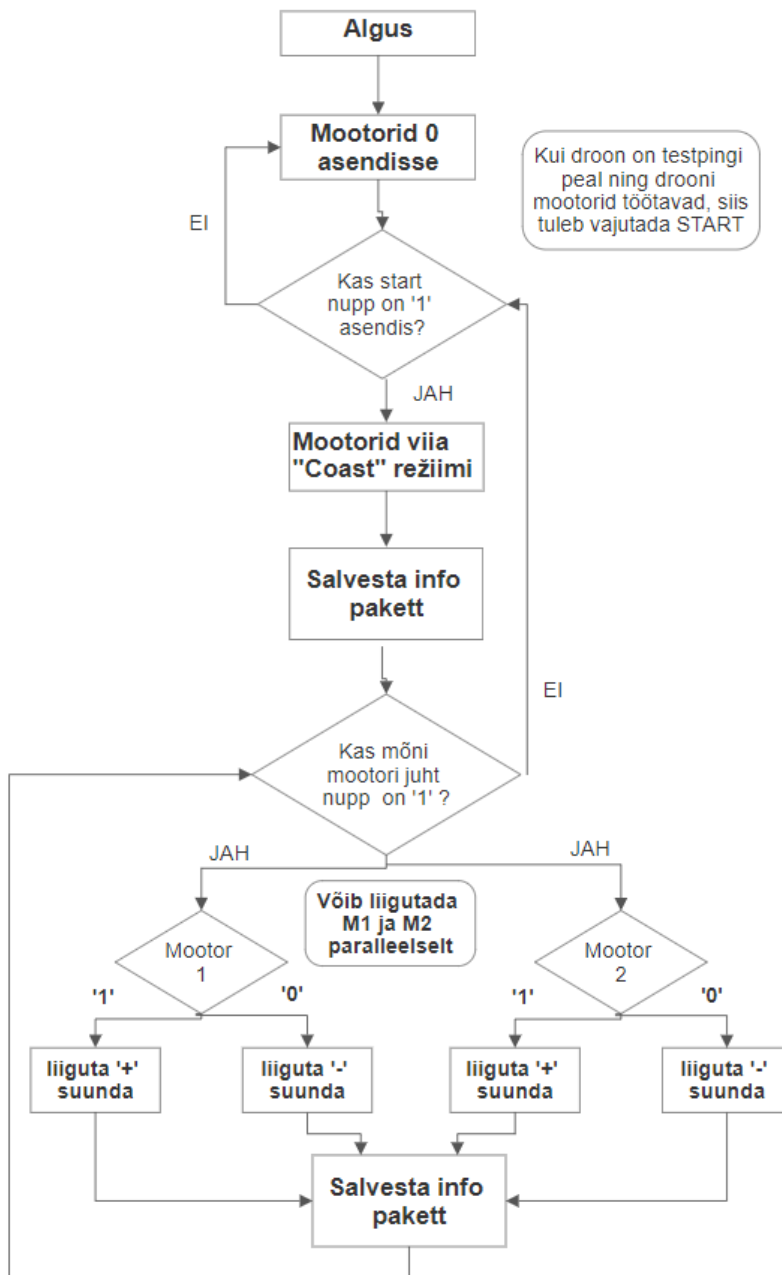
- Jälgima süsteemi nurka X- ja Y-telje suhtes;
- Võimaldama nurga muutmist stepper mootorite abil;
- Kuvama informatsiooni operaatorile;
- Analoog väljundid muundama loetavaks operaatorile (kraadidesse).

4.9 Programmi blokkdiagramm

Programm põhineb peamiselt elektroonika komponentide lugemisel ning liigutamisel, mistõttu on ta suhteliselt lihtne. Programmi loogikat saab näha Joonisel 4.8.

Programm algab sellega, et mootorid viiakse kõik nullpunkti, mis tähendab, et kui droon sinna peale panna, siis ta oleks paralleelne maapinnaga. Just sellel eesmärgil nullpunkti viimine ongi programmis olemas, et saaks drooni asetada testpingi peale, ilma, et droon kohe pikali vajuks ning vastu tuuletunnelit ennast katki kukuks. Kui droon on peal ja mootorid töötavad ehk ta on lennu režiimis, võib mootorid lahti lasta vabakäigule, et droon saaks tuule tunnelis vabamalt liikuda ning nurga andurid ning tuule kiiruse mõõdik saaksid infot koguda. Kogutud info salvestab algoritm eraldi faili, kus hiljem on seda võimalik lugeda ning oma katsele vastavad järeldused teha. Algoritm salvestab mõõtmise aja, tuule kiiruse ja mõlema mootori nurgad.

Vajutades mootori juhtnuppe, saab liigutada drooni testpingi abil operaatori poolt soovitud suunas. Liikumise telgedeks on X ja Y ning mõlemat neid saab liigutada nii positiivses kui ka negatiivses suunas. Samas on ka võimalus liigutada X- ja Y-telge korruga, ning seda tehakse seni, kuni juhtnupp on aktiivne või kuni start lüliti viiakse null asendisse.



Joonis 4.9 Süsteemi juhtalgoritmi blokkdiagramm

Algoritmi blokkdiagramm on koostatud smartdraw tarkvaraga nende kodulehel, interneti versiooni kasutades.

4.10 Üldine ühendusskeem

Antud peatükis käsitletakse elektroonika osa tähtsaimat teemat, millest sõltub kogu süsteem ning mille põhjal on ka juhtalgoritm tehtud. Üldiselt on skeem väga lihtne, kõige keskmeks on mikrokontroller plaat Arduino UNO ning ülejäänud komponendid on jagatud nelja blokki: Toite blokk, mootori juhtimis blokk, süsteemi juhtimis blokk ja andurite blokk. Keskel asub Arduino plaat,

kuhu on ühendatud mootori juht kontrollid. Mootorite nurka kontrollivad kaks potentsiomeetrit, mis saavad info analoog terminali. Teiseks anduriks on anemomeeter, mille abil saab mõõte tuule kiirust tuuletunnelis. Lisatud on veel start lüliti, mis juhtalgoritmi abil täidab ka reset funktsiooni (Joonis 4.4). Lisaks sellele on neli suuna juhtimise lüliti ning iga lüliti start nupu juures on indikaator LED lamp, mis aitab operaatoril aru saada, mis funktsiooni süsteem antud hetkel täidab.

Funktsioonidele, mis töötavad nupu või lüliti abil, on lisatud ka *pull-down* takistid Arduino juurde, vältimaks seda, et mõni terminal *float'*ima hakkaks ehk keskkonnast või süsteemist tuleneva elektrilise mõju tõttu suvalisi lugemeid andma ei hakkaks. *Pull-down* takistite väärtuseks sai valitud 10 k Ω , kuna üldjuhul 5 V süsteemide jaoks kasutatakse just seda ning ka Arduino tootja enda lehel oli samuti soovitatud kasutada vähemalt 10 k Ω takistust [22]. *Pull-down* takisti eesmärk on tema külge ühendatud terminali väärtus viia madalaks ehk nulli. Elektriskeem sai tehtud programmis Altium Designer 17.

Ühendusskeemi saab näha lisa 1. Allpool on välja toodud komponentide lühendid:

- Arduino ehk Arduino UNO plaat;
- MOT_PS1 ehk Mootori toite allikas;
- M1 ja M2 ehk Stepper mootorid;
- DRV1 ja DRV2 ehk mootori draiverid;
- B1-4 ehk suuna nupud;
- Sw1 ehk start lüliti;
- D1-5 ehk LED (valgusdioodlamp) lambid;
- R1-5 mis on kasutusel *pull-down* takistitena;
- Rp1 ja Rp2 ehk potentsiomeetrid;
- Anemo on anemomeeter;
- VCC ja GND on loogika komponentide toide ja maa;
- MOT_VCC ja MOT_GND on mootori toide ja maa;
- 9V_VCC on anemomeetri toide;

4.11 Elektroonika vahekokkuvõte

Elektroonika osas on tuuletunneli testpingile loodud lihtne juht- ja jälgimissüsteem, mis koosneb elektroonika komponentidest, elektriskeemist ning selle põhjal tehtud juhtalgoritmist. Tuuletunnelis testitaval droonil on vaja jälgida tema reaktsioone muutustele nurga jälgimise kaudu. Tuuletunnel ise, suudab drooni viia nii mõndagi olukorda, kuid stepper mootorite abil on operaatoril võimalus viia droon just sellisesse olukorda, kus tema reaktsioone jälgida soovitakse. Samuti on sisse ehitatud ka null positsiooni viimise süsteem, et drooni saaks testpingile panna või sealt võtta ilma, et operaator või droon võiksid endid vigastada. Kokku said pandud lihtsa loogikaga süsteem, mille juhtimine operaatori jaoks on samuti lihtne.

5. ELEKTROONIKA TULEVIKU PLAANID

Käesolevas peatükis räägitakse antud süsteemi tuleviku plaanidest elektroonika osas. Allpool on välja toodud elektroonika poolsed võimalikud edasi arendused:

- Lisa sensorika paigaldus;
- Süsteemi juhtimise lihtsustamine, mugavamaks tegemine;

5.1 Tagasiside süsteemi edasi arendus

Antud peatükis käiakse üle tagasiside süsteemi võimalik edasi arendus. Preagune tagasiside süsteem on väga lihtne ja väikese mahuline. Nimelt praegu saab süsteemist kahte tüüpi tagasisidet: mootoritelt tulev nurk ning tuuletunnelis oleva tuule kiirus. Sellele oleks veel võimalik lisada ohutus ning ka operaatori tööd mugavamaks tegevad andurid. Ohutus käiks peamiselt drooni kohta, nimelt võiks süsteemi lisada kaugusandurid, mis oleksid võimelised tuvastama drooni kaugust tuuletunneli seintest. Juhul, kui mingi põhjusel droon peaks sattuma seintele liiga lähedale, ohustades sellega oma propellereid, teavitab sellest tagasiside süsteem mikrokontrollerit, mis omakorda ohu likvideeriks. Operaatori töö mugavamaks tegemiseks, võiks lisada tuuletunnelisse ka kaamera, mille abil oleks võimalik läbi arvuti jälgida drooni testpingil. See lisab veel süsteemi ka ohutus elemendi, nimelt kui operaator jälgib drooni tuuletunneli ees seistes ning juhuslikult droon lendab vastu tunneli seina, võib operaator propelleri või teiste purunenud drooni detailidega pihta saades end vigastada. Kui aga kogu jälgimine käib läbi arvuti, siis antud oht likvideeritakse.

5.1.1 Ultraheli andur

Ultraheli andur oleks antud süsteemile parim sobiv kaugusandur, nimelt ultraheli moodul HC-SR04, Lisa 2 juures näeb selle manuaali ja spetsifikatsioone. Ultraheli andur laseb välja pulsi, mis liigub edasi kuni takistuseni ning sealt seejärel pörkub tagasi. Aega, mis jääb pulsi välja laske ja tagasi jõudmise vahele ning heli liikumis kiirust kasutataksegi kauguse arvutamisel. Maskimaalne kaugus, mida ultraheli moodul HC-SR04 mõõta suudab on 500 cm ning minimaalne 2 cm. Mõõtmiste resolutsioon on 0.3 cm, mõõtmis nurk on $\sim 15^\circ$ ning toite pingeks on 5 V, mis sobib ideaalselt kokku Arduino mikrokontroller plaadiga [23].



Joonis 5.1 Ultraheli andur moodul HC-SR04 [23]

5.1.2 Kaamera

Kaameraks sobiks antud süsteemi OV7670 kaamera moodul (Joonis 5.2), selle parameetrid ning võimalused on järgnevad:

- 640x480 VGA resolutsioon;
- Vajab 3.3 V toite pinget;
- Kõrge sensitiivsus vähe valgustatud keskkondade jaoks;
- Suudab töötada kuni 30 fps ehk kaadreid sekundis;
- Pildi kvaliteedi kontrolli võimalused, näiteks gamma, teravus;
- Objektiivi suurus on 1/6 tolli;
- Arduinoga ühilduv;

Antud kaamera pildi resolutsioon pole just kõige parem, kuid kui monteerimisel sellega arvestada ning paigutada droonile võimalikult lähedale, on sealt drooni piisavalt hästi näha. Samuti on ka suureks eeliseks kaamera sensitiivsus valguse suhtes, kuna tuuletunneli sees otsest valguse allikat pole, kuid täis pimedus ka seal sees ei ole. Viimaseks kuid ehk tähtsaimaks parameetriks on ühilduvus Arduinoga, samuti on Arduinol olemas ka 3.3 V toide ehk pole vaja ka eraldi toite allikat antud kaamerale.

Kuid kaamera lisamisel tekib ka oma probleem, nimelt tekib vajadus 14 vaba terminali järele. Vaadates olemasolevat disaini, siis on näha, et juba praegu on kõik terminalid kasutuses. See tähendaks, et oleks vaja lisada veel üks Arduino plaat disaini ning need omavahel ühildada [24].



Joonis 5.2 Kaamera moodul OV7670 [24]

5.2 Süsteemi juhtimise lihtsustamine

Antud peatükis käiakse üle, kuidas süsteemi juhtimist veelgi lihtsustada. Praegugi pole süsteemi juhtimine tegelikult keeruline. On olemas üks start nupp ning neli suuna nuppu, kuid paigaldatud eraldi mooduli peale.

5.2.1 Klaviatuuri abil juhtimine

Klaviatuuri abil juhtimine oleks antud süsteemi jaoks tõenäoliselt kõige mugavam variant. Kogu süsteemi jälgimine käib läbi arvuti, mistõttu oleks operaaatori mõistes loogiline, et ka kontrollida saaks läbi arvuti. Nimelt on võimalus Arduino juhtida klaviatuuri abil. Arduino tüüp funktsioonide kogumis on olemas ka klaviatuuri vajutuse tuvastus. Juhtides mootoreid näiteks noole nuppude abil, on operaaloril lihtsam aru saada, kuhu poole mootorid liigutavad drooni, seadistades need ühtima tuuletunneli suunaga. Näiteks kui vajutad noolt ülesse, liigutavad mootorid drooni tuuletunneli sisse poole ehk avast eemale.

Lisaks juhtimise loogilisemaks muutmisele, vabastaks selline variant ka mitmeid digitaal terminale, kuna start nupu saaks samuti klaviatuurile tõsta. Vabanenud terminale saaks ära kasutada uute andurite lisamiseks.

5.2.2 Juhtkangi abil juhtimine

Juhtkang ehk *joystick* (Joonis 5.3) oleks teine valik juhtimise lihtsustamiseks. Juhtkang küll lisab ekstra elemendi, mida operaalor käsitlema peab, kuid tal on ka oma eelis üle klaviatuuri. Nimelt, klaviatuuri või olemasoleva lahendusega saab liigutada süsteemi 45° inkrementide kaupa ning fikseeritud kiirusel. Juhtkangi eeliseks on võimalus liigutada mootoreid erinevatel kiirustel, mitte ekstreemselt erinevatel, ning liigutada süsteemi väiksemate kraadi inkrementide kaupa.



Joonis 5.3 Arduino Joystick Shield [25]

Kiiruse reguleerimine tuleb just sellest, et kui tavalisel nupul on ainult kaks olekut ehk sees või väljas, siis juhtkangi saab teatud maa edasi lükata, valides kiiruse. Null asendis ei liigu midagi, ning mida kaugemale juhtkang null asendist lükata, seda kiiremini liiguvad ka mootorid. Lisaks sellele, saab juhtkangi liigutada ka ringi mööda 360° ning selle abil saab valida suunda. Kui juhtkang lükata null asendist otse ette, siis liigutab ainult üks mootor süsteemi ühes suunas. Liigutades aga juhtkangi näiteks paremale, hakkab teine mootor aina kiiremini tööle ning esimene aeglustub, proportsionaalselt juhtkangi asukohaga.

KOKKUVÕTE

Käesoleva lõputöö eesmärgiks oli projekteerida ning koostada tuuletunnelis kasutatav testpink drooni lennu testimiseks, valida sobivad komponendid nii testpingi kui ka drooni valmistamiseks. Testpingi peamiseks eesmärgiks on jälgida drooni reaktsioone tuulest tulenevatele muutustele, peab olema operaatori poolt lihtsasti juhitav ning testides tulenev info salvestada sellises formaadis, et testi järgselt oleks võimalik ka vajaminevad järeldused teha.

Töö esimese sammuna sai valitud drooni komponendid. Kõigepealt sai valitud mootorid, mis suudaksid kanda tulevast drooni piisavalt efektiivselt, esialgne valik osutus valeks, kuid pärast matemaatilisi arvutusi, sai valitud uus ning tugevam mootor. Seejärel pandi paika drooni raam, pidades silmas mootorite raskust, et selle all midagi painduma ei hakkaks. Seejärel tuli valida aku, mis suudaks mootoreid toita ning drooni piisava aja õhus hoida ning kõige lõpuks lennukontroller, millega kogu süsteem kokku siduda.

Töö teise sammuna sai valmis tehtud testpingi kinnitus raam. Tehti võimalikult paindlikult kasutatav raam, mida oleks lihtne paigaldada. Testpingi disainimisel sai silmas peetud universaalsust, et oleks võimalik ka teist tüüpi droone kinnitada sel viisil, et drooni keskpunkt kattuks võimalikult täpselt tuuletunneli keskpunktiga. Samuti on võimalus ka lisada raskusi, juhul kui katseid tehakse võimsama drooniga.

Töö kolmanda sammuna sai paika pandud süsteemi elektroonika komponendid ning nendest tulenevalt juhtloogika ja tagasiside süsteem. Kõigepealt valiti sobivad andurid, mis antud süsteemiga kokku sobiksid. Seejärel valiti mootor, milleks osutus samm-mootor, ning tema juht kontroller. Kogu süsteemi ajuks ehk mikrokontrolleriks osutus mikrokontroller plaat Arduino UNO, välja toodi ka põhjused, et miks just Arduino UNO ning mis selle eelised ja võimalused on.

Kõige lõpuks koostati ka kogu süsteemi elektriskeem, mille põhjal ka juhtalgoritm sai koostatud, kuna algoritmi ülesanne on siiski elektroonika komponente juhtida ning neilt tagasiside vastu võtta ja operaatori jaoks loetavas formaadi salvestada. Pärast seda sai valmis tehtud ka juhtalgoritm ning selle blokkdiagramm ning seletati lahti, kuidas algoritm süsteemi täpsemalt juhib.

Antud töö eesmärk oli valmis projekteerida tuuletunneli testpink drooni lennu testimiseks turbulentses keskkonnas ning sellega saadi ka hakkama. Antud süsteemis saab testida drooni ning saab ka tagasisidet drooni käitumise kohta antud tuuletunnelis. Võimalik on ka mootorite abil tekitada lisa olukordi millega droon peab hakkama saama.

SUMMARY

The goal of this thesis was to design a wind tunnel testbench that could be used to test drone flight within a turbulent environment and choose the right components for the testbench itself and the drone to be used in these tests. The main goal of the testbench was to monitor drones reactions to the changes forced by the wind, has to be controls for the operator had to be simple and the info from the tests had to be saved in a format where it could be easily used to make conclusions about the performed tests.

As the first step the components for the drone were picked. It started off with picking the motors which could effectively carry the drone we were about to create. In the beginning a wrong motor was chosen but after some mathematical calculations, a correct one was chosen. Next off the frame for the drone was chosen, keeping in mind the fact that the motors are heavy and the frame had to be firm to avoid bending. After which the battery had to be chosen which could keep the drone in flight for a decent amount of time. And lastly the flight controller was picked to tie the whole system together.

The second step was to design the frame where the testbench would be attached. The design was made to be as flexible as possible and as easily attachable to the wind tunnel as possible. As for the design of the testbench, the key was universality, namely being able to attach different kinds of drones to the testbench in way, that the middle point of the drone would match the middle point of the wind tunnel as accurately as possible. Also there is a possibility to add weights to the frame in the case of testing a more powerful drone.

As the third step the electrical components of the system were chosen and deriving from that the control logic and algorithm were made. First of all the most suitable sensors for the system were chosen. After which the type of motor to be used, which happened to be stepper motors, was chosen alongside with the motor driver being used. As the brain of the whole system the microcontroller was picked, which came out to be the Arduino UNO microcontroller board, with reasons aligning why it specifically was picked.

Lastly the electrical schematic was created, which was the base for the control algorithm and logic, since their objective after all is to control the electronic components and collect feedback from them. Afterwards the control algorithm and the block diagram explaining it's inner workings and how it controls the system was made.

As previously stated the goal of this thesis was to design a testbench that could be used to test drones flight within a turbulent environment which was achieved. The system can be used to

monitor a drone and collect feedback regarding its behaviour within the wind tunnel. With the help of stepper motors it is possible to create extra situations where drone could be monitored.

KASUTATUD KIRJANDU

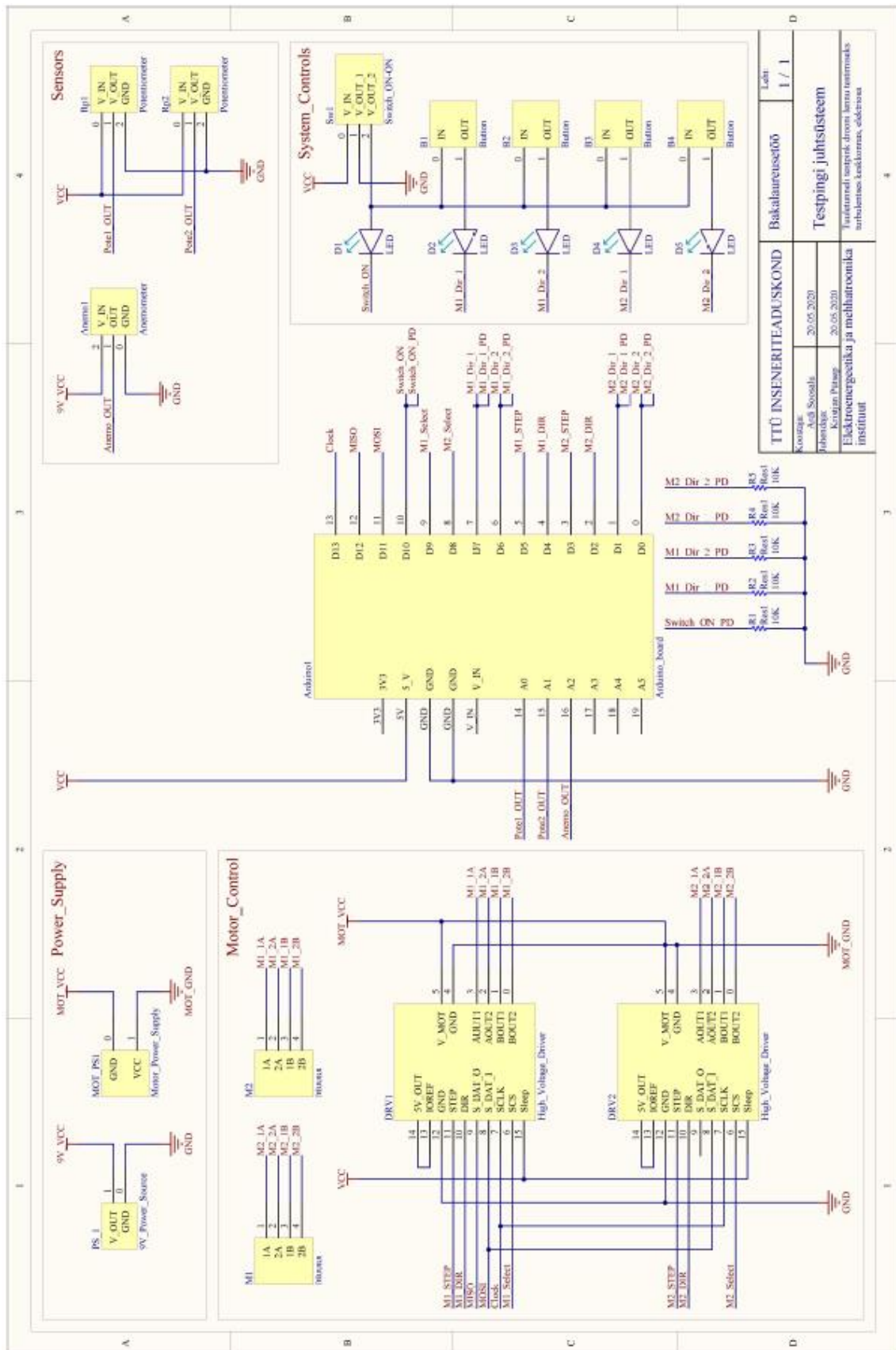
- [1] A. Tabor, „nasa.gov,“ National Aeronautics and Space Administration, 9 detsember 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.nasa.gov/feature/ames/testing-air-taxis-drones-and-more-with-nasa-s-multirotor-test-bed>. [Kasutatud 19 mai 2020].
- [2] F. Riccardi, „Wind tunnel testing of a variable-pitch quadrotor UAV isolated rotor,“ %1 *41th European Rotorcraft Forum*, Munich, 2015.
- [3] J. V. Foster ja D. C. Hartman, „High-Fidelity Multi-Rotor Unmanned Aircraft System Simulation Development for Trajectory Prediction Under Off-Nominal Flight Dynamics,“ %1 *AIAA Aviation and Aeronautics Forum*, Denver, 2017.
- [4] J. X. J. Bannwarth, K. A. Stol, Z. J. Chen ja P. J. Richards, „Development of a wind tunnel experimental setup for testing multirotor unmanned aerial vehicles in turbulent conditions,“ %1 *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 2018.
- [5] Z. Robotics, „Zubax.com,“ 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://shop.zubax.com/collections/integrated-drives/products/sadulli-integrated-drive-open-hardware-reference-design-for-mitochondrik?variant=27740841181283>.
- [6] „hobbyking.com,“ HobbyKing, [Võrgumaterjal]. Available: https://hobbyking.com/en_us/turnigy-high-capacity-14000mah-6s-12c-multi-rotor-lipo-pack-w-xt90.html?__store=en_us&fbclid=IwAR1RS_r4NoiQlfzvCn0JCUw2Q0wCnTyOh7SulZAPPHtkvWC4_r-XJ_-15Qo. [Kasutatud 17 Mai 2020].
- [7] „Dronecode.com,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://docs.px4.io/v1.9.0/en/flight_controller/pixhawk4.html. [Kasutatud 12 mai 2020].
- [8] „Dronecode.com,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://docs.px4.io/master/en/flight_controller/durandal.html. [Kasutatud 12 mai 2020].
- [9] M. Koert, „Tuuletunnel testpink drooni lennu testimiseks turbulentses keskkonnas, mehaanika osa,“ Tallinn, 2020.
- [10] Electrical4U, „electrical4u.com,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.electrical4u.com/potentiometer/>.

- [11 S. Monk ja P. Scherz, Practical Electronic for Inventors, McGraw-Hill Education, 2016.
]
- [12 „oomipood.ee,“ Dormikor OÜ, [Võrgumaterjal]. Available:
] https://www.oomipood.ee/product/potentsiomeeter_47k_logaritmiline_0_12w?q=potentiometer. [Kasutatud 19 mai 2020].
- [13 „adafruit.com,“ Adafruit, [Võrgumaterjal]. Available:
] <https://www.adafruit.com/product/1733>. [Kasutatud 14 mai 2020].
- [14 „ee.farnell.ee,“ Premier Farnell Limited, [Võrgumaterjal]. Available:
] <https://ee.farnell.com/trinamic/qsh8618-95-55-700/stepper-motor-3-ph-5-5a-7n-m/dp/2902337>. [Kasutatud 19 mai 2020].
- [15 „ee.farnell.com,“ Premier Farnell UK Limited, [Võrgumaterjal]. Available:
] <https://ee.farnell.com/nanotec/st4118d3004-a/stepper-motor-3-3vdc-3a/dp/2507565>. [Kasutatud 20 mai 2020].
- [16 „pololu.com,“ Pololu Corporation, [Võrgumaterjal]. Available:
] <https://www.pololu.com/product/3730>. [Kasutatud 10 mai 2020].
- [17 S. Attel, „Autodesk.com,“ Autodesk Inc., 2016. [Võrgumaterjal]. Available:
] [Autodesk.com/products/eagle/blog/how-microcontrollers-work/](https://www.autodesk.com/products/eagle/blog/how-microcontrollers-work/).
- [18 „Farnell,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.farnell.com/datasheets/1682209.pdf>.
]
- [19 „octopart.com,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://datasheet.octopart.com/ATMEGA328P-MU-Microchip-datasheet-65729177.pdf>. [Kasutatud 14 mai 2020].
- [20 „microchip.com,“ Microchip Technology Inc., [Võrgumaterjal]. Available:
] <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega328p>. [Kasutatud 14 mai 2020].
- [21 „microchip.com,“ [Võrgumaterjal]. Available:
] http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf. [Kasutatud 14 mai 2020].
- [22 „Arduino.cc,“ Arduino, [Võrgumaterjal]. Available:
] <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/DigitalPins>. [Kasutatud 13 mai 2020].

- [23 „oomipood.ee,“ [Võrgumaterjal]. Available:
] <http://data.oomipood.ee/kasutusjuhend/arduino/HC-SR04.pdf>. [Kasutatud 14 mai 2020].
- [24 „openhacks.com,“ [Võrgumaterjal]. Available:
] https://www.openhacks.com/uploadsproductos/ov7670_cmos_camera_module_revc_ds.pdf. [Kasutatud 15 mai 2020].
- [25 „oomipood.ee,“ Dormikor OÜ, [Võrgumaterjal]. Available:
] https://www.oomipood.ee/product/ard_joyst_sh_arduino_joystick_shield?q=arduino&page=2. [Kasutatud 15 mai 2020].

LISAD

Lisa 1 Süsteemi elektriskeem



TTÜ INSENERITEADUSKOND		Bakalaureusetöö	
Koostaja:	Andi Soostals	20.05.2020	1 / 1
Juhendaja:	Kristina Patare	20.05.2020	
Testingsi juhtisüsteem			
Tööained on peepik drooni lenna testimiseks			
Elektronitehnika ja mehatronika instituut			
Töölises koostöös, eeltoot			



Tech Support: services@elecfreaks.com

Ultrasonic Ranging Module HC - SR04

Product features:

Ultrasonic ranging module HC - SR04 provides 2cm - 400cm non-contact measurement function, the ranging accuracy can reach to 3mm. The modules includes ultrasonic transmitters, receiver and control circuit. The basic principle of work:

- (1) Using IO trigger for at least 10us high level signal,
- (2) The Module automatically sends eight 40 kHz and detect whether there is a pulse signal back.
- (3) IF the signal back, through high level , time of high output IO duration is the time from sending ultrasonic to returning.

Test distance = (high level time×velocity of sound (340M/S) / 2,

Wire connecting direct as following:

- 5V Supply
- Trigger Pulse Input
- Echo Pulse Output
- 0V Ground

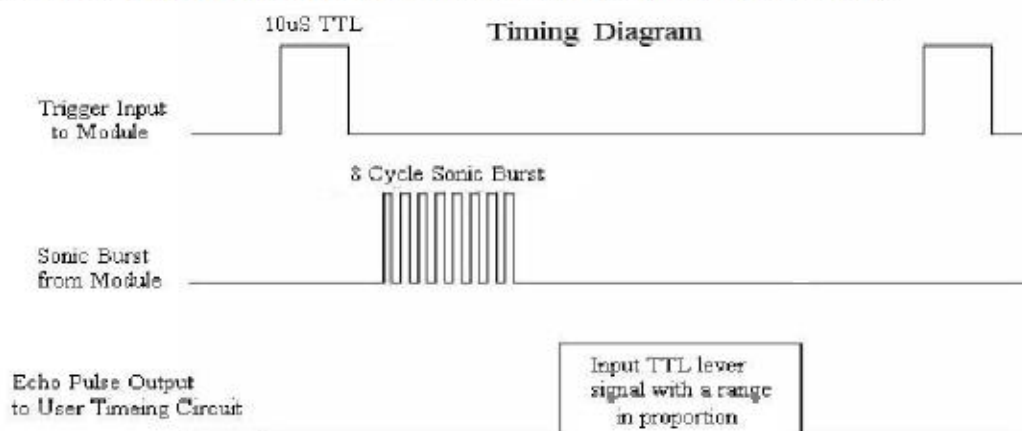
Electric Parameter

Working Voltage	DC 5 V
Working Current	15mA
Working Frequency	40Hz
Max Range	4m
Min Range	2cm
MeasuringAngle	15 degree
Trigger Input Signal	10uS TTL pulse
Echo Output Signal	Input TTL lever signal and the range in proportion
Dimension	45*20*15mm



Timing diagram

The Timing diagram is shown below. You only need to supply a short 10uS pulse to the trigger input to start the ranging, and then the module will send out an 8 cycle burst of ultrasound at 40 kHz and raise its echo. The Echo is a distance object that is pulse width and the range in proportion. You can calculate the range through the time interval between sending trigger signal and receiving echo signal. Formula: $\mu\text{S} / 58 = \text{centimeters}$ or $\mu\text{S} / 148 = \text{inch}$; or: the range = high level time * velocity (340M/S) / 2; we suggest to use over 60ms measurement cycle, in order to prevent trigger signal to the echo signal.



Attention:

- The module is not suggested to connect directly to electric, if connected electric, the GND terminal should be connected the module first, otherwise, it will affect the normal work of the module.
- When tested objects, the range of area is not less than 0.5 square meters and the plane requests as smooth as possible, otherwise ,it will affect the results of measuring.

www.ElecFreaks.com

