

TARTU ÜLIKOOL

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Tehnoloogiainstituut

Timo Tiirats

Mehitamata langevarjule arendusplatvormi loomine

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Arvutitehnika eriala

Juhendajad

BSc Artur Abels

BA Andres Moks

Tartu 2020

Resümee/Abstract

Mehitamata langevarjule arendusplatvormi loomine

Maailmas kasvab järjest trend saata tellitud pakke laiali mehitamata sõidukeid kasutades. Sellest lähtuvalt on käesoleva töö eesmärk valmistada arendusplatvorm mehitamata langevarju juhtimiseks. Töö käigus arendatakse välja sobiv elektroonikalahendus koos sobivate andurite ning aktuaatoritega. Lisaks valmistatakse seadmele langevarju kinnitamiseks korpus. Valminud seadme puhul on pööratud tähelepanu kasutajamugavusele ning võimalusele kasutada seda tulevikus erinevate lendamisalgoritmide väljatöötamisel. Töö käigus kirjutatud püsivara põhjal viidi läbi katsed, et testida seadmesse paigaldatud andurite ja mootorite tööd.

CERCS: T310 Õhustransporditehnoloogia; T125 Automatiseerimine, robotika, juhtimistehnika; T170 Elektroonika; T455 Mootorid ja ajamid.

Märksõnad: langevari, mehitamata õhusõiduk, elektroonika, servomootor, pitot' toru, 3D-printimine.

Development platform for unmanned parachute

There is a growing trend in the world to distribute ordered packages using unmanned vehicles. For this reason, the aim of this thesis is to create a development platform for controlling an unmanned parachute. In the course of the research, a suitable electronics solution is developed together with suitable sensors and actuators. In addition, a housing is made for attaching the parachute to the device. In the case of the completed device, attention has been paid to user comfort and the possibility to use it in the future in the development of various flight algorithms. Based on the firmware written during the work, experiments were performed to test the operation of the sensors and motors installed in the device.

CERCS: T310 Air transport technology; T125 Automation, robotics, control engineering; T170 Electronics; T455 Motors and propulsion systems.

Keywords: parachute, unmanned aerial vehicle, electronics, servomotors, pitot' tube, 3D-printing.

Sisukord

Resümees/Abstract	2
Lühendid, konstandid, mõisted	4
1 Sissejuhatus.....	5
2 Olemasolevad lahendused.....	6
2.1 FC Mini.....	6
2.2 JPADS (Joint Precision Airdrop System)	7
2.3 RC Skydiver Steven.....	7
2.4 The HobbyKing Paramotor.....	8
3 Ülevaade valdkonnast	9
3.1 Langevarjud	9
3.1.1 Kuppellangevari.....	9
3.1.2 Tiiblangevari	11
3.2 Servomootorid.....	14
3.3 Pitot' toru	16
4 Valminud seade.....	19
4.1 Nõuded seadmele	19
4.2 Seadme disain ja ülesehitus	19
4.3 Seadme elektroonika.....	23
4.3.1 Seadme toide.....	26
4.3.2 Andurid	30
4.3.3 Servomootorid.....	33
4.3.4 Mikrokontroller ja EEPROM.....	33
4.4 Püsivara.....	34
5 Testimine.....	38
5.1 Testimine drooniga	38
5.2 Langevarjuga testimise koht ja varustus	40
5.3 Tulemused.....	42
6 Kokkuvõte.....	53
Tänuavaldused	55
Viited.....	56
Lisad.....	59
Lihtlitsents.....	60

Lühendid, konstandid, mõisted

ADC – analoog-digitaalmuundur (ingl *Analoog-to-Digital Converter*).

EEPROM – elektriliselt kustutatav programmeeritav püsimälu (ingl *Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*).

GPS – satelliitidel põhinev üleilmne asukoha määramise süsteem (ingl *Global Positioning System*).

I²C – kahejuhtmeliides (ingl *Inter-Integrated Circuit*).

IMU – inertsiaalandur (ingl *Inertial Measurement Unit*).

MCU – mikrokontroller (ingl *MicroController Unit*).

LiPo – liitium-ioon-polümeer (ingl *Lithium-ion-Polymer*).

PDI – Programmeerimis- ja silumisliides (ingl *Program and Debug Interface*).

RAM – muutmälu (ingl *Random Access Memory*).

RC – raadiolainete abil juhitud (ingl *Radio Controlled*).

SPI – sünkroonse järjestiksuhtluse liidese standard (ingl *Serial Peripheral Interface*).

UART – universaalne asünkroonne jadaport (ingl *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*).

USB – universaalne järjestiksiin (ingl *Universal Serial Bus*).

1 Sissejuhatus

Mehitamata sõidukite arendus on tänapäeva maailmas üha tähtsamal positsioonil. Mehitamata sõidukid ei vaja inimese kohalolu masinas, mistõttu sobivad nad hästi näiteks riskantsete ülesannete täitmiseks. Lisaks iseloomustab neid sõidukeid täpsus ning kontrollitus. Mehitamata sõidukid võivad töötada nii iseseisvalt kui ka kaugjuhitavalt.

Mehitamata õhusõidukite üheks alaliigiks on droonid. Droonideks nimetatakse väikseid, mitme rootoriga lendavaid mehitamata õhusõidukeid. Droone kasutatakse tänapäeval juba postipakkide laiali vedamiseks, meditsiinis, sõjatehnoloogias ning päästeoperatsioonidel. Droonide kasutamise eelised näiteks posti laiali kandmisel on kiirus, iseseisvus ning ummikutest sõltumatu liikumine. Oluline on märkida, et droonide puuduseks on lühike lennuaeg ja piiratud kandevõime [1, 2, 3]. Olulise panuse on droonid andnud ka filmitööstusele, kus helikopteritega tehtud kaadrid on asendunud drooniga tehtud kaadritega. Drooni ülalpidamiskulud on palju väiksemad kui helikopteri omad, mistõttu on drooni kaadrid odavamad.

Sarnaselt droonidele on võimalik postipakkide või varustuse transpordiks kasutada langevarjusid. Langevarjude üks suurim erinevus droonidest on see, et droonidega saab lendu alustada ka maapealselt platvormilt, kuid üldiselt vajavad langevarjud enda kasutamiseks kõrgemal asuvat lähtepunkti. Seetõttu on nende kasutusala piiratum ning langemist peab arvestama ka langevarju kasutamisel. Lähtuvalt kasvavast trendist kasutada pakkide transpordil mehitamata sõidukeid, otsustati bakalaureusetöö käigus luua arendusplatvorm mehitamata langevarju juhtimiseks. Sellega on võimalik testida erinevate lendamise algoritmide tööd ning loodav seade võimaldab tulevikus paremini planeerida erinevate sensorite kasutamist ja integreerimist seadme korpusesse. Töö raames töötatakse välja sobiv riistvara ning kirjutatakse seadme funktsionaalseks testimiseks püsivara. Loodav platvorm peab olema kasutaja jaoks paindlik ning pakkuma võimalust proovida erinevaid samasse suurusklassi kuuluvaid langevarjusid. Seadmes olevat püsivara on võimalik kasutajal ise programmeerida.

Töö algfaasis leiti seadmele sobivad sensorid ja elektroonikakomponendid, arvestades seejuures seadmele esitatavaid nõudeid ja vajadusi, mille tulemusena valmis trükkplaat ning seadme korpus. Lisaks eelnevalt mainitule uuriti, kuidas mõjutavad erinevad raskused ja ilmastikutingimused langevarju juhtimist. Seadme püsivara on avatud lähtekoodiga. Bakalaureusetöö autori soov on kasutada seadet ka enda magistratöös.

2 Olemasolevad lahendused

Mehitamata langevarjude juhtimisseadmeid võib leida nii tsiviil- kui ka militaarkäibes. On olemas nii autonoomseid kui ka puldi teel juhitud seadmeid. Militaarvaldkonnas leiduvad seadmed on tihti mõeldud vaid militaarvarustuse ning suuremahuliste pakside toimetamiseks. [4, 5]. Militaarvaldkonnas kasutatavad seadmed jäävad aga tavaliselt inimestele ja firmadele kättesaamatuks ning nad on liiga suured, et transportida väikesemahulisi pakke. Tsiviilkäibes kasutatavate mehitamata langevarju juhtimissüsteemide puhul on kõik eelnevalt programmeeritud ning kasutajale jääb väike võimalus ennast arendada või seadmega katseid teha. Olemasolevad seadmed on võimelised töötama ainult ühe tootja poolt arendatud detailidega ning need pole mõeldud pakside transpordiks. Tulenevalt olemasolevate seadmete puudusest otsustas autor välja töötada universaalsema arendusplatvormi.

Mootoriga varustatud langevarjusid nimetatakse paraplaanideks (ingl *paraglider*). Paraplaanid kasutavad enda õhus hoidmiseks langevarju ja mootori poolt tekitatud tõukejõudu. Mootorid annavad võimaluse startida maapinnalt ning paremini ajastada paraplaani maandumisaega ja -kohta. [6] Sarnaselt droonidele on inimestel võimalik osta väikeseid RC paraplaane, millega avatud maastikul lennata. Sarnasest seadmest sai ka töö autor inspiratsiooni enda korpuse disaini jaoks.

Käesolevas peatükis antakse ülevaade erinevatest olemasolevatest lahendustest ja seadmetest.

2.1 FC Mini

FC Mini on ühekordseks kasutamiseks mõeldud kontrollitav õhusaadetiste süsteem, edaspidi kasutatakse lühendit GPADS (ingl *Guided Precision Aerial Delivery System*), mille maksimaalne kandevõime on kuni 227 kg. FC Mini't kasutatakse peamiselt militaarvaldkonnas, kus tema põhiülesandeks on laskemoona ja varustuse toimetamine raskesti ligipääsetavatesse kohtadesse. [7]

Üheks tiiblangevarjude tähtsamaiks parameetriks on lauglemisväärtus, mis näitab, kui suur on lennumasina võimekus liuelda ilma mootorita. Näiteks kui lauglemisväärtus on 2 : 1, siis kahe meetri edasiliikumise kohta langeb õhusõiduk ühe meetri. FC Mini juhtimissüsteemi toodetakse kahes erinevas variandis, millest väiksema, 1T MC-4, lauglemisväärtus on 2,5 : 1 ja suurema, 1T INT-360, lauglemisväärtus on 3,5 : 1. Mõlema tiiblangevarju pindala on sama suur, kuid suurem lauglemisväärtus saavutatakse rohkemate õhukambrite arvuga. Seade on lennates iseseisev ning ei vaja täiendavat inimese sekkumist. FC Mini on varustatud GPS-

vastuvõtjaga ning omab seadistamiseks LCD-ekraani. Langevarju juhitakse ühe aktuaatoriga ning 80% juhtumitest maandub seade 100 m täpsusega. [7]

2.2 JPADS (Joint Precision Airdrop System)

JPADS on militaarkasutuseks mõeldud GPADS-süsteem, mille kandevõime on kuni 4,5 t. Peamiseks ülesandeks on enda sõjaväeüksuste toetamine varustusega. [8]

Juhtimiseks kasutab JPADS GPS-koordinaate ning omab võimekust enda maandumispunkti lennu kestel juhtmevabalt muuta. Tänu juhtmevabale ühendusele oskab seade vastavalt saabuvale ilmastikuinfole enda trajektoori sobivamaks muuta. Minimaalne lennukaugus on 8 km ning maksimaalne 25 km, seejuures lauglemisväärtus on 3,3 : 1. Suur lennukaugus annab seadmele võimaluse ennast transportival lennukil jääda väljaspoole vastase õhutõrje ulatust. Lisaks eelnevale annab see võimaluse lennukilt visata välja mitu saadetist ühes kohas. Seade maandub 80% juhtudest 150 m täpsusega. [8]

2.3 RC Skydiver Steven

Vastupidiselt eelnevatele süsteemidele on RC Skydiver Steven puldiga juhitav langevarju juhtimiskomplekt. Juhtimine toimub raadiolainetel töötava puldiga. Et langevarjuga langevat inimest võimalikult täpselt jäljendada, on seade inimese kujuga. Süsteem on mõeldud hobi- ja sportlennutajatele lendamiseks. [9]

RC Skydiver Steven-il puudub GPS-vastuvõtja, mistõttu ei ole see võimeline iseseisvalt lendama. Süsteemi kogukaal koos langevarjuga on 1,1 kg. Seade on varustatud kolme servo-ehk täiturmootoriga, aku ja raadiosignaali vastuvõtjaga. Kolmest mootorist kaks on mõeldud langevarju juhtimiseks ning üks langevarju avamiseks. Oluline on märkida, et RC Skydiver Stevenile sobivad ainult sama tootja langevarjud. Sellest lähtuvalt ei ole võimalik katseid läbi viia erinevate tootjate langevarjudega. [9]

2.4 The HobbyKing Paramotor

The HobbyKing Paramotor puhul on tegemist paraplaani juhtimisplatvormiga. Sarnaselt RC Skydiver Stevenile juhatakse seda raadiolainete teel. Seade on varustatud kahe servo- ja ühe harjavaba alalisvoolumootoriga ning ESC-iga (ingl *electronic speed controller*). Harjavaba mootorit kasutatakse propelleri käitamiseks ning servomootorit langevarju suunamiseks. Seadmega ei tule kaasa LiPo akut, pulti ja signaali vastuvõtjat ega saatjat. Vastavalt tootja soovitatud andmetele on soovituslik lennukaal 1,6 – 2 kg ja servomootorite jõumoment 15 kg/cm. [10]

3 Ülevaade valdkonnast

Langevarjude tööprintsipi on käsitletud paljudes vanemates teadusartiklites, küll aga uuemat sorti teaduskirjandust sel teemal napib. Samas saab väita, et andurite toimimise mehhanisme kirjeldavad artiklid on küllaltki levinud ja ajakohased. Vastavalt läbitöötatud kirjandusele antakse käesolevas peatükis ülevaade erinevatest langevarjudest ja nende juhtimisest. Seejärel kirjeldatakse langevarjude juhtimise seisukohalt olulisi sensoreid ning aktuaatoreid.

3.1 Langevarjud

Langevarjud jagatakse kahte suurde kategooriasse. Nendeks on juhitud ning juhitud langevarjud. Juhitud langevarjude esindajad on tiiblangevarjud. Juhitud langevarjudeks loetakse kuppellangevarjusid. Kuppellangevarjud võivad olla nii kupli kujuga kui ka ristkülikukujulise disainiga. Wyllie [11] uuris mõlema tüübi langevarjude kasutamismugavust ja jõudis järeldusele, et juhitud langevarjusid on lihtsam kasutada kui tiiblangevarjusid. Samas tõdeb autor, et kuppellangevarjude kasutamisel tuleb arvestada tuulesuunaga. Takizawa *et al.* [12] tõid välja, et tiiblangevari annab parema kontrolli nii juhtimise kui laugemise osas.

3.1.1 Kuppellangevari

Kuppellangevarjudel, tänu kupli kujulisele disainile, on suur õhutakistus ning oht hakata lendamisel ostsilleerima. See tähendab, et langevari võib hakata õhus küljelt küljele kiikuma kupli alt väljuvate õhuvoogude tõttu. Ostsilleerimist on võimalik vähendada, eemaldades langevarju küljest paneele, tekitamaks õhule väga kindla kanali, mille kaudu liikuda. [11] Potvin [13] viitab, et kuppellangevarjule väljalõigete lisamine parandab langevarju stabiilsust, kuid samaaegselt vähendab see langevarju õhutakistustegurit, mistõttu suureneb langemiskiirus. Langevarjule lisatavad väljalõiked katavad tavaliselt umbes 1-10% langevarju kogupindalast. Kuppellangevarju lihtsamaks iseloomustamiseks on selle kujust, väljalõigetest ja teistest elementidest tulenev käitumine koondatud õhutakistusteguri sisse. Langevarjutootja poolt ette antud õhutakistusteguri ja langevarju pindala kasutades saab valemi (3.1) abil arvutada langemiskiirust. Teades langemiskiirust on võimalik tuule kiirust ning suunda arvestades planeerida lennuteekonda.

$$V = \sqrt{\frac{2W}{\rho C_d S_0}} \quad (3.1)$$

kus:

V on langevarju vertikaalne langemiskiirus (m/s);

W on langevarju mass koos saadetisega (N);

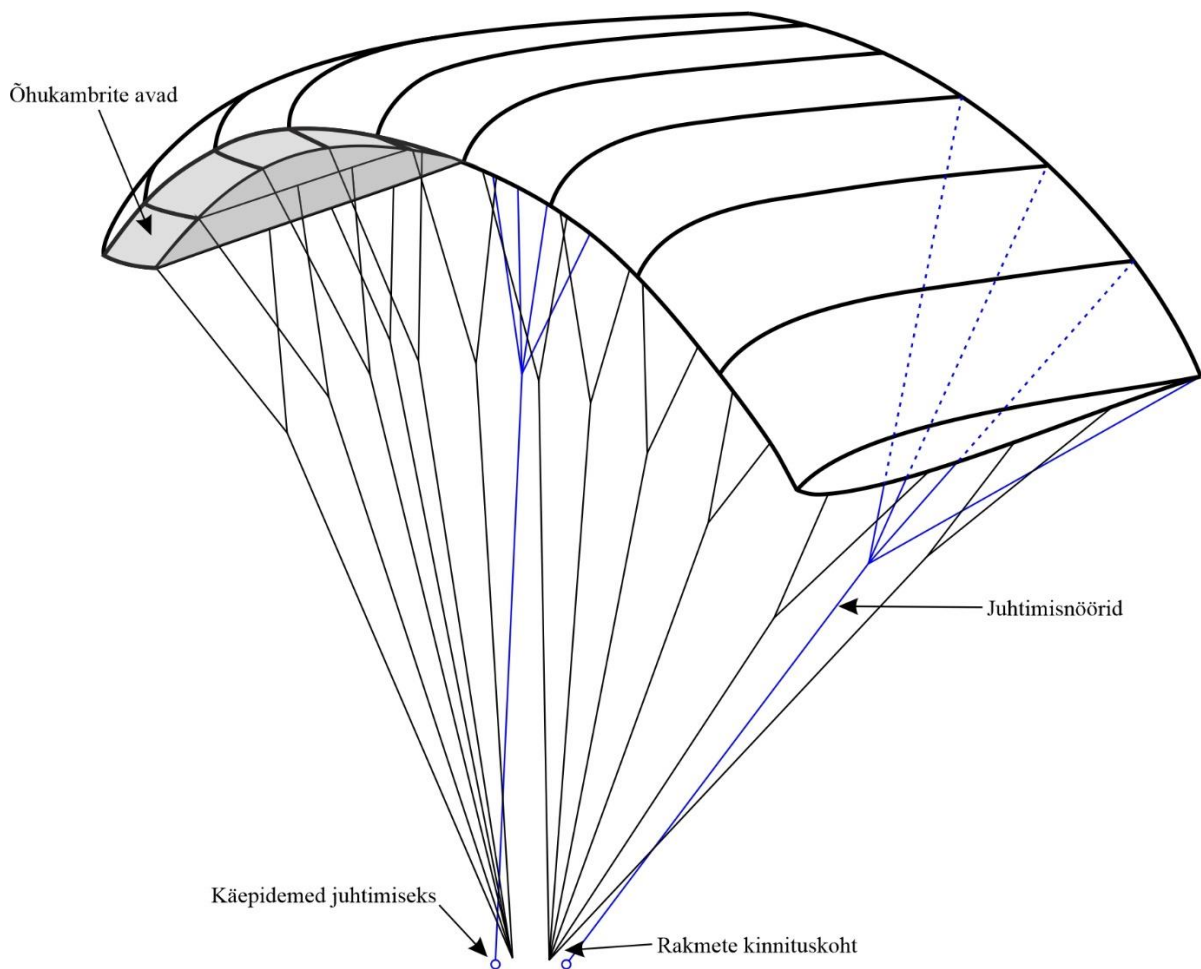
ρ on õhutihedus (kg/m^3);

C_d on langevarju õhutakistustegur;

S_0 on kogu langevarju pindala (koos aukude ja avadega) [13].

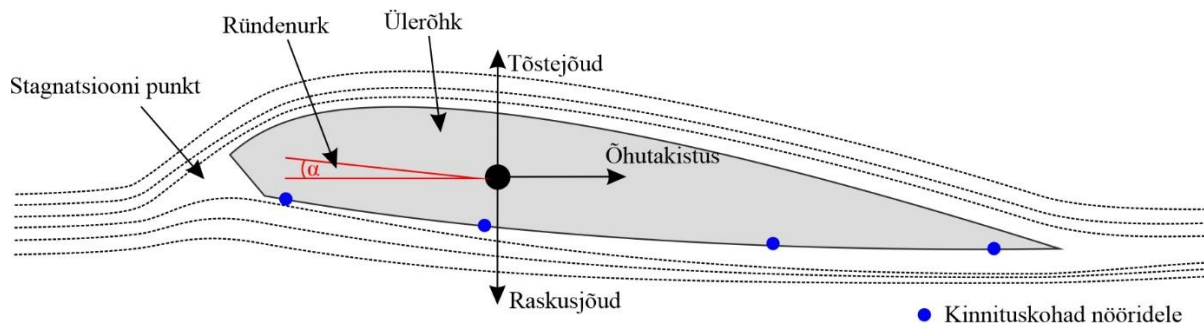
Kuigi kuppellangevarjusid ei saa juhtida, on siiski võimalik nende trajektoori planeerida ning lisaks on neid võrreldes tiiblangevarjudega kergem toota, pakkida ja hooldada [11]. Nende tootmise, pakkimise kui ka hooldamise teeb lihtsamaks õhukambrite puudumine ning ainult servadesse kinnitatud nõõride süsteem.

3.1.2 Tiiblangevari



Joonis 1. Tiiblangevari ning tähtsamad sõlmpunktid.

Nagu eelpool mainitud, siis tiiblangevari kuulub juhitud langevarjude klassi. Joonisel 1 on välja toodud tiiblangevarju üldine kuju ning tähtsamad punktid. Kujult meenutab ta kaart või ellipsi ühte külge. Joonisel kujutatud nöörid on vajalikud nii juhtimiseks kui ka langevarju kinnitamiseks lenduri rakmete külge. Paremaks illustreerimiseks on juhtnöörid joonistatud sinisega ning lenduri kinnitamiseks mõeldud nöörid mustaga. Nii juhtimiseks kui ka kinnitamiseks mõeldud nöörid jagunevad enne langevarju mitmeks väiksemaks nööriks, mis aitavad ühtlaselt jaotada langevarjule mõjuvaid ja edasikanduvaid jõude, et langevarju kuju püsiks õigena. Langevarju juhtnöörid kinnituvad tiiva tagaosale. Ülejäänud tiiva katavad ära kinnitusnöörid. Tiiblangevarju eristab kuppellangevarjust veel pidev edasi liikumine, mistõttu peaks lendamist alustama sihtmärgist kaugemalt, mitte otse selle kohalt. Vastasel juhul tuleb sihtpunkti jõudmiseks teha õhus lisaspiraale.

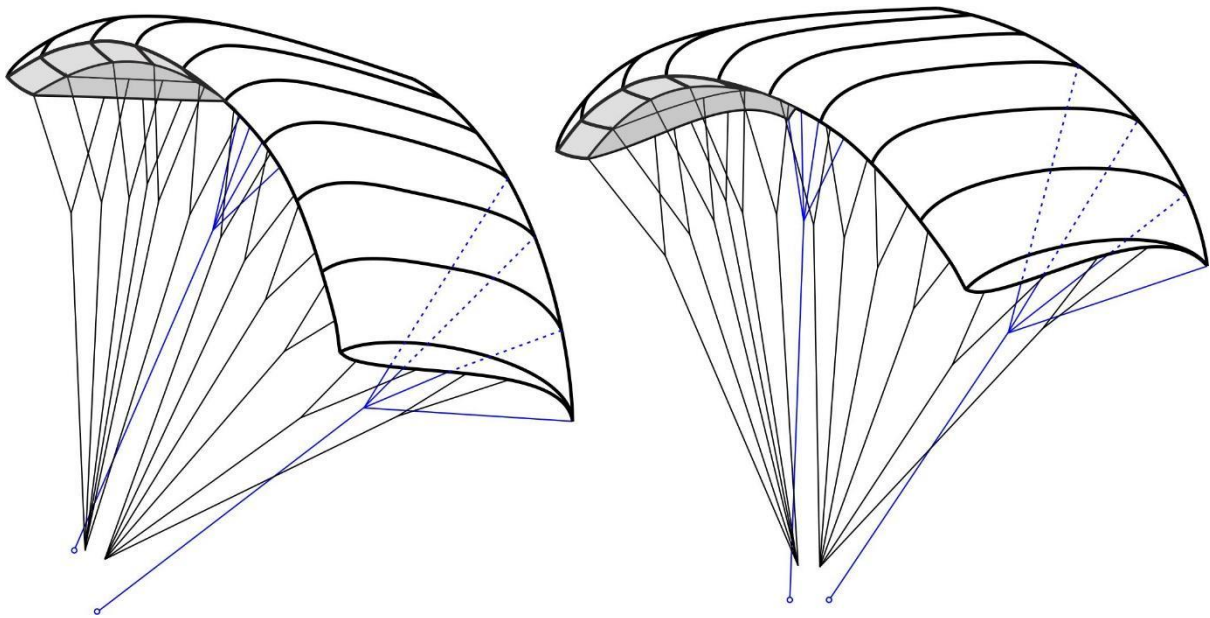


Joonis 2. Tiiblangevarju ristlâbilõige ning langevarjule mõjuvad jõud [12, 14, 15].
Modifitseeritud allikate põhjal.

Joonisel 2 on näidatud tiiblangevarju ümber tekkivad õhuvood ning varjule mõjuvad jõud. Tiiblangevari koosneb õhukambritest (näidatud joonisel 1), mis edaspidi laskudes täituvad õhuga, andes sellega langevarjule tiiva kuju. Langevarju ette tekib stagnatsiooni punkti, kus eralduvad langevarju ülemine ja alumine õhuvool. [14]

Uuringutest nähtub, et tiiblangevari töötab sarnaselt lennuki tiivale. Tiiva toimimises mängib väga olulist rolli erinev õhuvool mööda alumist ja ülemist tiiva poolt, tänu millele on tõstejõu tekitamine üldse võimalik. [12, 15] Tõstejõud tekib, kui tiiva kohal olev rõhk on madalam kui tiiva all asetsev rõhk. Tõstejõu tekkimisel liiguvad õhus olevad aineosakesed mööda tiiva ülemist osa kiiremini kui mööda tiiva alumist osa [15]. Kui osakesed alustavad liikumist stagnatsioonipunktist ning jõuavad nii tiiva üla- kui ka alaosas lõppu samal ajal, tõstejõudu ei genereerita. Veel enam, tõstejõu genereerimiseks ei pea tiib olema disainitud nii, et osakeste teekond tiiva ülemisel ja alumisel osal oleksid erineva pikkusega. [12, 15]

Tõstejõule vastassuunaliselt mõjub langevarjule gravitatsioon ehk raskusjõud, mis sõltub langevarju ning sellega kaasasoleva objekti kaalust. Lisaks mõjub langevarjule veel õhutakistus. Näitamaks, kui terava nurga all langevari läbi õhu liigub, kasutatakse mõistet ründenurk. [14, 15] Ründenurk tekib vastutuleva õhuvoolu suuna ning langevarju kõõlu (ingl *chord line*) vahele. Eslambolchi ja Johari [16] leidsid, et tiiblangevarju ründenurk määrab ära tõstejõu ja õhutakistuse omavahelise suhte. Suhte põhjal saab öelda, kui kaugel on langevari varisemisest (ingl *stall*). Stoop *et al.* [17] kirjutavad, et varisemine on seisund, kus lennuk ei suuda enam piisavalt tõstejõudu tekitada, mistõttu hakkab lennuk raskesti kontrollitavalt langema. Varisemise tunnuseks on õhuvoolu puudumine tiiva kohal. Varisemise seisundist aitab välja tulla ründenurga vähendamine ja stabiilse õhuvoolu taastamine tiiva kohal. Artikli autorid toovad välja, et varisemine on seotud ainult ründenurgaga, mitte lennukiirusega, kuigi korrelatsioon lennukiirusega on olemas.



Joonis 3. Vasakpööre (vasakul) ja pidurdamine (paremal) tiiblangevarjuga.

Langevarju kasutamisel on väga oluline roll selle õigel juhtimisel, et saavutada soovitud eesmärk. Tõmmates langevarju juhtnööri ükshaaval, saab keerata vasakule või paremale. Vastavalt sellele, kumma käega on nõör alla tõmmatud, hakkab langevari pöörama tõmmatud käe poole, sest sellel küljel suurendatakse õhutakistust ning samaaegselt ka tõstejõudu. Õhutakistuse suurenemisega langevarju kiirus sellel küljel väheneb ning tänu lendaja inertsile hakkab talle mõjuma tsentrifugaaljõud. Tekkiv tsentrifugaaljõud suurendab veelgi langevarju keeramise efekti, mistõttu õhutakistus muutub pööramise olulisemaks kui tekkiv tõstejõud. Keeramist vasakule illustreerib joonisel 3 vasakpoolne pilt. [11, 14, 15]

Kiiruse suurendamiseks või vähendamiseks tuleb mõlemat juhtnööri liigutada ühte moodi. Joonis 3 parempoolsel pildil on kujutatud langevarjuga kiiruse vähendamine, mis saavutatakse mõlema juhtnööri korraga alla tõmbamisega. Sellest tulenevalt suureneb kogu langevarju tõstejõud ning õhutakistus, mille tagajärjel toimubki aeglustumine. Nagu keeramise puhulgi, suurendab pidurdamisel lendaja mass kirjeldatud efekti, sest lendaja keha liigub inertsist edasi algse kiirusega, suurendades sellega langevarju rüнденurka. Vastupidiselt pidurdamisele tuleb kiiruse suurendamiseks tõsta käed üles ja lasta juhtnöörid vabaks. [11, 14, 15]

Olenemata manöövrist peab langevarju üle kontrolli säilitamiseks tagama kogu lennu vältel langevarju õhukambrite täidetuse. Tiiblangevarju juhtides tuleb arvestada ka

lauglemisväärtusega, et manöövreid tehes liialt kõrgust ega kiirust ei kaotaks. Tiiblangevarjude tavaline lauglemisväärtus on 3 : 1. [11, 14]

Bakalaureusetöö autor, olles analüüsinud nii tiiblangevarjude kui ka kuppellangevarjude positiivseid ja negatiivseid külgi, otsustas enda töös kasutada tiiblangevarjusid. Autori jaoks oli oluline langevarju juhitavus ning sobivus erinevate ilmastiku- ja tuuletingimustega. Tiiblangevarjude kasutamisel tuleb arvestada varisemise ning sõlme minemise ohuga.

3.2 Servomootorid

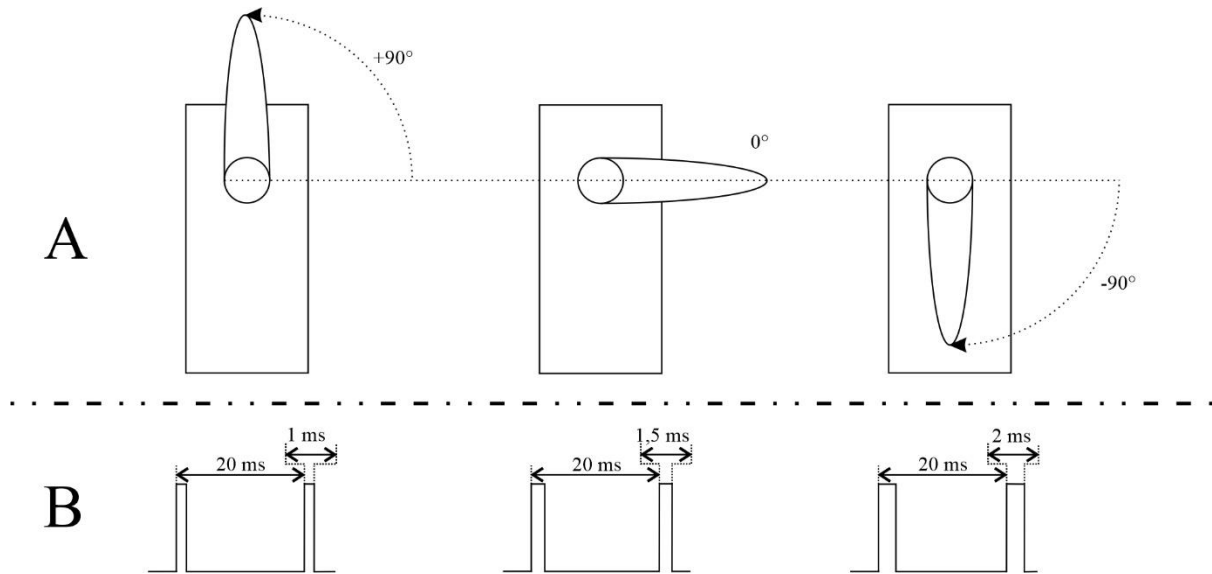
Servo- ehk täiturmootor on elektrimootor, mida saab kasutada elektroonikaseadmetes erinevate ülesannete täitmiseks, näiteks robotkäte või lennuki tiibade liigutamiseks. Servomootoritele on iseloomulik täpsus ning kontrollitus. Servomootorid omavad tagasisideahelat, mille abil kontrollitakse, kas mootori hetkepositsioon vastab kasutaja soovitud positsioonile. Kui mootori positsioon klappib kasutaja poolt etteantuga, jääb mootor paigale enda asendit hoidma. Seda ka siis, kui sellele rakendada mõõdukas koguses jõudu.

Kuna käesolevas bakalaureusetöös kasutatakse hobi servomootoreid, keskendutakse edaspidi nende kirjeldamisele. Seda tüüpi servomootor koosneb alalisvoolumootorist, potentsiomeetrist, käigukastist ning kontrollierist. Käigukasti kasutatakse jõumomendi suurendamiseks, samaaegselt vähendades mootori pöörlemiskiirust. Potentsiomeetri ja kontrolleri abil tekitatakse mootorile kinnine tagasisideahel. [18] Joonisel 4 on välja toodud tavalisse suurusklassi kuuluv alalisvoolu servomootor. Servomootoril on kolm juhet, millest punasega on tähistatud positiivne toide, pruuniga GND ja oranžiga juhtsignaali juhe. Mootor on disainitud nii, et sinna oleks mugav kinnitada erinevaid otsikuid.



Joonis 4. Servomootor.

Servomootoreid juhitakse varieeruva pulsilaiusmodulatsiooniga (ingl *Pulse Width Modulation*). Pulsi pikkus jääb enamustel servomootoritel vahemikku 1 ms kuni 2 ms, kuid mõnel juhul võib see olla vahemikus 0,5 – 2,5 ms. Kui servomootoreid juhtida pulsi pikkusega 1,5 ms, on servomootor neutraalses asendis. Üldise standardi järgi saadetakse servomootoritele pulssi sagedusega 50 Hz ehk iga 20 ms tagant. [19]



Joonis 5. 180° pöörderaadiusega servomootori ja PWMi omavaheline suhe [19].
Modifitseeritud allika põhjal.

Joonisel 5 on kujutatud PWMi signaali (B) ning servomootori asendi (A) omavahelist suhet. Näitena toodud servomootor on 180° pöörderaadiusega. Jooniselt on näha, et kui PWMi signaali pulsi pikkus on 1,5 ms, on servomootor neutraalses ehk null asendis. Muutes pulssi pikemaks, liigub servomootor kuni -90°. Kui toimida vastupidi ja muuta pulsi pikkus lühemaks, saab servomootori haara liigutada kuni +90°. [19]

Servomootoreid saab jagada mitmesse kategooriasse. Autori arvates on üheks tähtsamaks liigitamise aluseks servomootori pöörlemisnurk. On olemas piiratud kui ka piiramata pöördenergiaga mootoreid. Piiratud pöördenergiaga mootoritel on olemas tagasisideahel, mis annab mootori kontrollile võimaluse kontrollida võlli hetkeasendit. MCUst tuleva juhtsignaali abil muudetakse mootori pöördenergiat. See-eest piiramata pöördenergiaga servomootoritel tagasiside puudub ning juhtsignaaliga muudetakse pöörlemise kiirust ning suunda.

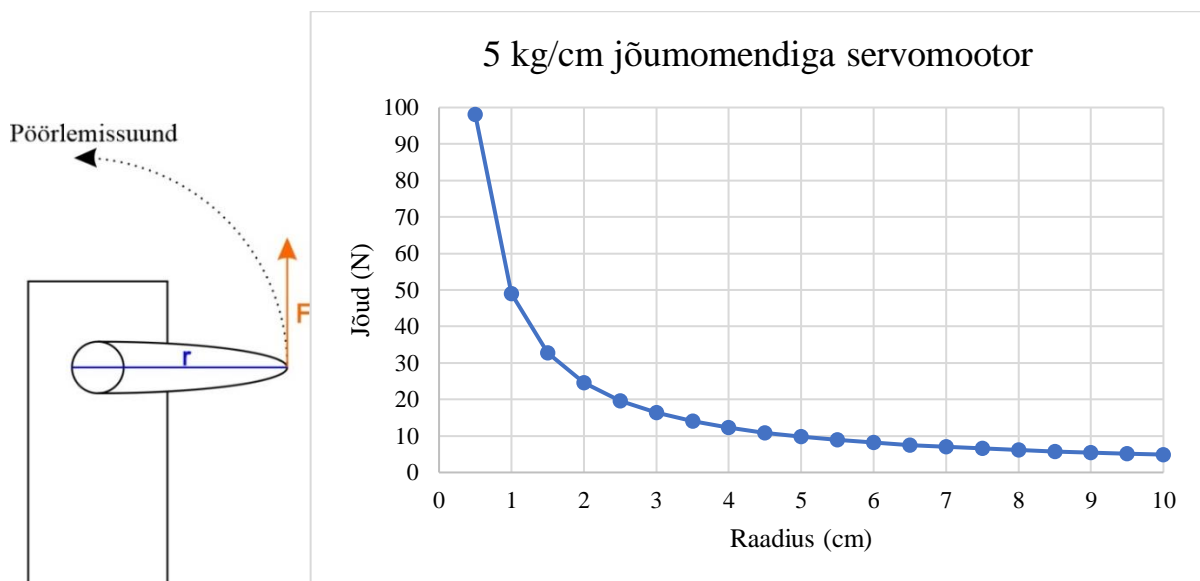
Autori arvates on käesoleva töö raames servomootorite tähtsaimad parameetrid on sisendpinge, voolutarve, jõumoment ja pöörlemisnurk. Servomootorite voolutarve sõltub suuresti

sisendpingest ning liigutatavast koormusest. Jõumoment määrab aga ära, kui suurt jõudu on võimeline servomootor ühikraadiuse juures tekitama. Jõumomendi ühikuks on tavaliselt 1 kg*cm või 1 Nm. Jõumomenti saab arvutada valemiga (3.2):

$$\tau = r * F \quad (3.2)$$

kus r tähistab raadiust ning F rakendatavat jõudu.

Jõumomendi näitlikustamiseks kujutab joonis 6 servomootori jõumomenti iseloomustavaid füüsikalisi suurusid. Graafik näitab, kuidas muutub servomootori jõud haara otsas, kui suurendatakse selle raadiust. Joonisel on selgelt näha, et väiksemate raadiuste puhul on jõud palju suurem kui suuremate raadiuste puhul.

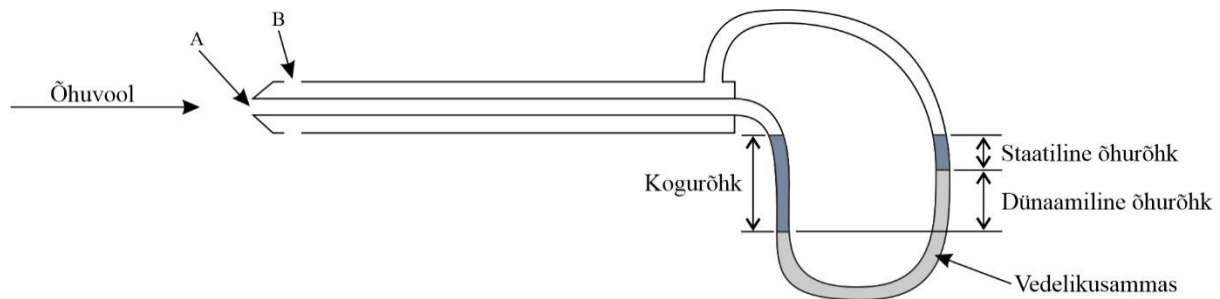


Joonis 6. Vasakul on kujutatud servomootori haara rakendatud jõudu iseloomustavad suurused ja paremal jõu suuruse ning haara raadiuse omavaheline suhe.

3.3 Pitot' toru

Pitot' toru on seade, mis võimaldab mõõta liikuva voolise kiirust. Kuna käesolev bakalaureusetöö keskendub lendamisele, on mõõdetavaks aineks õhk. Tihti kasutatakse pitot' torusid lennukite lennukiiruse või tuuletunnelis õhu liikumiskiiruse mõõtmiseks. Lennukitel kasutatavad pitot' torud põhinevad elektroonilistel rõhuanduritel, mis tavaliselt põhinevad elastsete materjalide deformatsioonide mõõtmisel. Laborites kasutatavad pitot' torud võivad töötada ka rõhu mõjul vedelikusamba kõrguse muutuse tuvastamisel. Sarnane seade on kujutatud ka joonisel 7. See koosneb kahest kontsentrisest torust. Ühe toru ava (A) on rist õhuvooluga ja selle abil saab mõõta süsteemile avalduvat kogurõhku, mis näitab süsteemile

avalduva staatilise ning dünaamilise rõhu summat. Teise toru ava (B) on paralleelselt õhuvooluga ning võimaldab mõõta süsteemi staatilist rõhku, mis näitab kui suurt rõhku avaldataks süsteemile paigal püsides. Kogurõhu ning staatilise rõhu kaudu on võimalik arvutada õhuliikumise tekkiv dünaamiline rõhk, mis näitab rõhkude erinevust torudes. Kiiruse leidmisel tuleb arvestada ka hetke õhutihedusega. [20]



Joonis 7. Pitot' toru tööpõhimõtte õhu kiiruse mõõtmiseks [21]. Modifitseeritud allika põhjal.

Teades õhutihendust ning dünaamilist rõhku, saab õhu liikumiskiirust arvutada valemiga (3.3):

$$V^2 = K * \frac{2 * P}{\rho} \quad (3.3)$$

kus:

P on dünaamiline õhurõhk;

ρ on õhutihendus;

K on korrelatsioonifaktor [21, 22].

Valemis 3.3 kasutatakse korrelatsioonifaktorit, sest pitot' toru kasutamise kaasnab mitmeid piiranguid. Nimelt peab eeldama, et õhuvool toru erinevates osades on täpselt samasugune, ühtlane ja turbulentsita. Parima tulemuse saamiseks tuleb paigutada pitot' toru kaks sisendit üksteisele võimalikult lähedale. On leitud, et õhu viskoossus mõjutab teatud olukordades pitot' toru toimimist ning sealt saadavaid mõõtetulemusi. Mõõtmistulemustele avaldab mõju õhu kokkusurumine ning lihtsustatult öeldakse, et kui õhu liikumiskiirus ületab 30% helikiirusest, muutub mõju tulemustele juba märgatavaks. Eelnevatest töödest on selgunud, et pitot' toruga tehtavad arvutused eeldavad ideaalse gaasi ning stabiilse temperatuuri olemasolu. Korrelatsioonifaktor aitab nende tingimuste puudumist ning paigaldamisel tekkivaid vigu kompenseerida. Kui eelnevalt mainitud piirangutega arvestada ei ole vajalik, tuleb võtta korrelatsioonifaktoriks 1. [21]

Vaatamata Pitot' toru piirangutele, leidub olukordi, kus selle kasutamine on õigustatud ja vajalik. Üks võimalus on kasutada pitot' torust saadavaid andmeid, et hinnata õhusõiduki

liikumiskiirust ning ennustada varisemist. Jann ja Ward [23] leidsid, et langevarju nõõride külge monteeritud pitot' toru põhimõttel töötava seadmega saab hinnata varisemist keskmiselt kaks sekundit varem kui GPSi andmete põhjal. Selle leidmiseks sooritasid artikli autorid korduvaid lennukatseid. Nad tõid välja, et ühel korral oli langevarjur juba varisemisest väljumist alustanud, kuigi GPSi andmete põhjal töötanud tuvastamisalgoritm ei olekski varisemist tuvastanud. Nii eelneva artikli autorid kui ka Cho *et al.* [22] väitsid, et lennates on võimalik pitot' toru abil hinnata tuule kiirust. Lisaks pitot' toru andmetele läheb tuule kiiruse hindamiseks vaja GPSi ning IMU andmeid.

4 Valminud seade

Bakalaureusetöö käigus valmis seade, mida on võimalik kasutada tiiblangevarjude autonoomseks juhtimiseks. Seadme valmistamise puhul pandi rõhku paindlikkusele ning võimalusele kasutada seda järgnevates teadustöödes ning see võimaldab testida erinevate lendamisalgoritmide tööd. Kõik valminud seadmega seotud failid on vabavarana kättesaadavad lisas 1 toodud lingi kaudu.

Seadme arendamise ja testimise jaoks kasutati tiiblangevarju HobbyKing Paraglider Parafoil, mille tiivaulatus on 1,95 m. Langevari on originaalis mõeldud kasutamiseks paraplaanina, mille juhtseadme soovituslik kaal on umbes 1,5 kg. [24] Konkreetset tiiblangevarju otsustati kasutada, sest selle parameetrid sobisid bakalaureusetöö käigus arendava seadme mõõtmetega ning langevari oli kergesti kättesaadav.

4.1 Nõuded seadmele

Tulenevalt bakalaureusetöö eesmärgist, et valmiv seade oleks võimalikult universaalne ning tiiblangevarjuga kergesti juhitav, seati seadmele järgnevad nõuded:

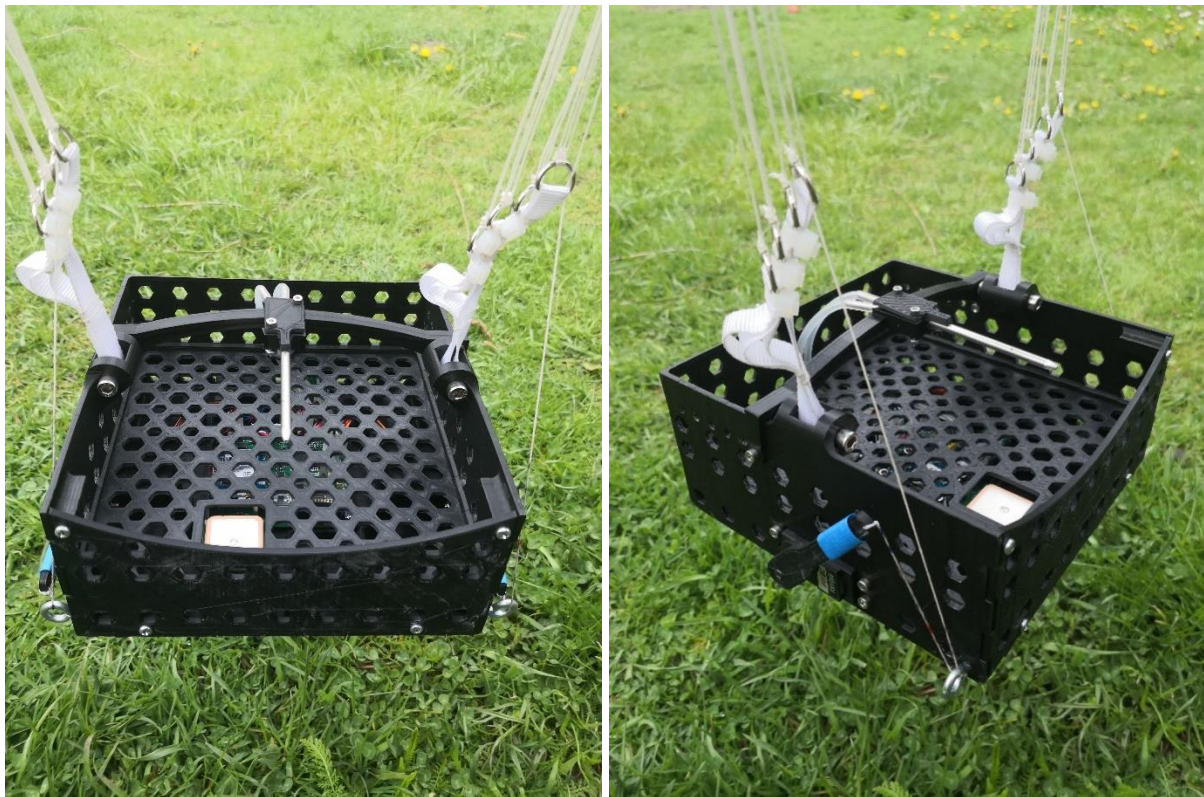
- 1) seade ei tohi kaaluda rohkem kui 1 kg;
- 2) seadme korpus peab olema kergesti avatav;
- 3) seade peab ühilduma teiste tiiblangevarjudega, mille tiivaulatus on kuni 2,5 meetrit;
- 4) seadmele peab olema võimalik lisada raskusi või lasti;
- 5) seadme raskuskese peab jääma horisontaalteljes võimalikult keskele;
- 6) seade võimaldab laadida kasutatavaid akusid;
- 7) seadet on võimalik kasutajal ümber programmeerida.

4.2 Seadme disain ja ülesehitus

Seade juhib langevarju servomootorite abil, analüüsides selleks erinevate andurite infot. Koordinaatide määramiseks kasutatakse GPS-vastuvõtjat, mis annab seadmele teadmise enda asukohast ning võimaldab juhtida lendamistrajektoori. Lisaks on seadmesse integreeritud inertsiaalandur ehk IMU, mille abil saab teada nii lennusuuna kui ka selle, kuidas seade hetkel asetseb. IMU abil on võimalik tuvastada nii varisemist kui ka järske pööramisi. Kolmanda andurina kasutatakse seadmes sonarit, millega tuvastatakse maapinna kaugust lennu lõpus, kui soovitakse pidurdada langevarju kiirus enne maandumist minimaalseks. See aitab vähendada seadmele maandumisel tekkivaid lööke. Lisaks on seadmes kasutusel kaks rõhuandurit.

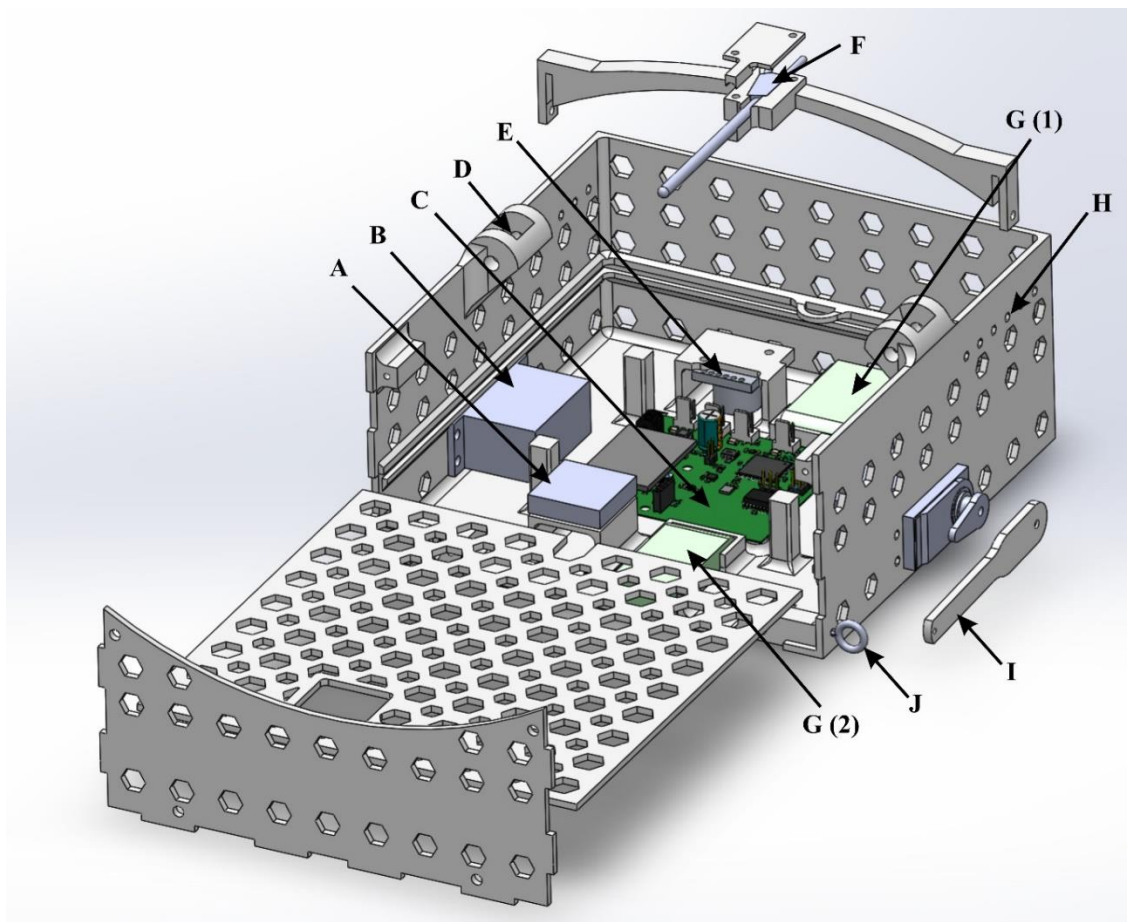
Absoluutne rõhuandur on kasutusel seadme kõrguse hindamiseks ning diferentsiaalne rõhuandur ühendatuna pitot' toru külge aitab hinnata seadme hetkekiirust ning varisemist. Servomootorite juhtimise võimekus koos ülalmainitud anduritega võimaldab hiljem arendada seadmele erinevaid lendamise kontrollalgoritme.

Bakalaureusetöö käigus valminud seadet on võimalik näha joonisel 8, kus on näha ka tiiblangevarju kinnitumist seadme külge. Seadme disainimise juures olid kõige olulisemateks parameetriteks selle funktsionaalsus, kaal ja lihtsus. Sellest lähtuvalt otsustas bakalaureusetöö autor teha seadmele sobiva trükkplaadi ise, ning võimalikult vähe kasutada valmisolevaid mooduleid. Seda eelkõige seepärast, et vähendada üleliigsete komponentide, funktsioonide ning juhtmete arvu. Lisaks annab trükkplaadi ise valmistamine ning elektroonika komponentide valimine suurema võimaluse kontrollida voolutarvet ja ruumikasutust seadmes. Seadme korpuse otsustas autor valmistada 3D-printimise tehnoloogiat kasutades.



Joonis 8. Töö käigus valminud seade. Piltidelt on nähtav veel langevarju kinnitamise ja juhtimise viis.

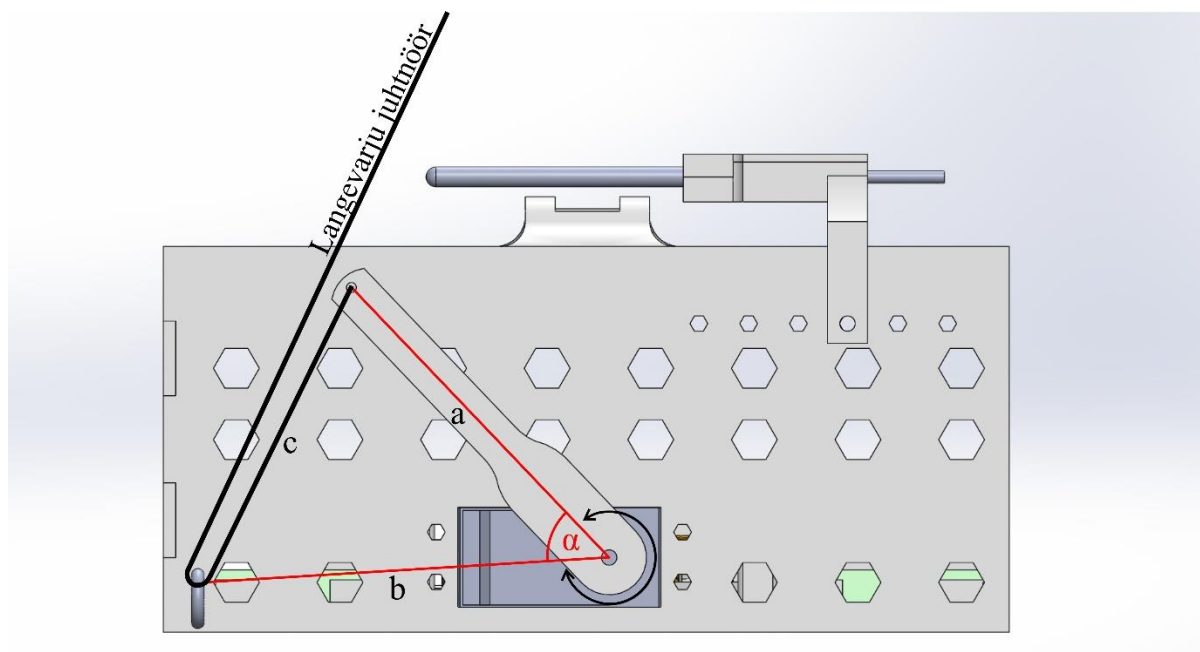
Valminud seadme ülesehitust on võimalik näha joonisel 9. Joonisel on tähtede ja nooltega näidatud erinevate andurite ning komponentide asukohad. Seadme korpus koosneb viiest prinditud detailist, mis on joonisel kujutatud helehallina. Seadmes on veel töö raames koostatud trükkplaat (C), servomootorid (B) ja kaks aku pesa (G). Kaks aku pesa annab võimaluse muuta seadme raskuskeset või ühendada kaks akut paralleelselt, et suurendada aku mahutavust. Tähega F on joonisel kujutatud pitot toru, mille hoidjat on võimalik positsioneerida valides sobiv kinnituspunkt (H). Maapinna kauguse mõõtmiseks mõeldud sonar on tähistatud tähega E. GPS-mooduli antenn (A) on parima signaali saamiseks paigaldatud vaatega taevasse ning tehtud eraldi ava vahelae sisse. Langevarju kinnitamiseks kasutatakse kinnitust D ning juhtnööride käsitlemiseks detaili I. Juhtnööride suunamiseks on seadmele lisatud rõngas J. Korpuse seintesse ning vahelakke on lisatud auke, et vähendada seadme kaalu. Arvutuste järgi vähendab see seadme kaalu ligikaudu 10%, mis andis seadme kaaluks ilma langevarjuta 530 g, mis mahub ilusti seadmele esitatud 1 kg kaalu piirangusse. Sellise disaini puhul suudeti saada raskuskese võimalikult täpselt horisontaalteljes seadme keskele.



Joonis 9. Valminud seadme ülesehitus ja disain.

Korpuse detailide printimiseks kasutati Ultimaker Original+ 3D-printerit, mis põhineb sulatatud materjali sadestamise tehnoloogial. Printimiseks kasutati nii ABS- (ingl *Acrylonitrile butadiene styrene*) kui ka PLA-materjali (ingl *Polylactic acid*). PLAg võrreldes on ABS parema painduvuse ja väiksema tihedusega, mistõttu otsustati võimalikult palju detaile sellest printida. Samas on ABS suurema soojuspaisumisega, mis põhjustab suuremate detailide valmistamisel nende kaardumise. Seetõttu tuli mõningate komponentide jaoks kasutada väiksema soojuspaisumisega PLA-materjali. [25, 26]

Mõlema materjali printimise profiilid olid juba varem välja töötatud. Mudeli lõikamiseks ning G-koodi tegemiseks kasutati printeri tootja enda tarkvara Ultimaker Cura 4.5. Kõikidel detailidel oli kihikõrgus 0,15 mm ja printimispea suurus 0,4 mm. Detailide printimise asendi valikul arvestati detailidele seadmes mõjuvate jõududega. Kui suuremad jõud mõjuvad risti printimise tasandiga, on oht, et kihte hakatakse üksteisest lahti tõmbama. Rakendades suuremaid jõudusid aga piki prinditud kihte, on vastupidavus märgatavalt parem. Vastavalt detailide suurusele ja keerukusele ulatusid printimise ajad kümnest minutist kuni 48 tunnini.



Joonis 10. Servomootori pöördenurga (α) seos tõmmatud nõõri pikkusega.

Valminud seadme puhul ei ole servomootori pöördenurk ning liigutatud juhtnõõri pikkus lineaarses suhtes. Siiski on liigutatud nõõri pikkust võimalik välja arvutada trigonomeetriliste valemite abil. Selle näitlikustamiseks on joonisel 10 kujutatud seadme juhtimisel tekkiv kolmnurk. Joonisel on langevarju juhtnõõr kujutatud mustana ning tekkiva kolmnurga haarad (a ja b) punasega. Valminud seadme põhjal on teada külgede a ning b pikkused ning püsivaras

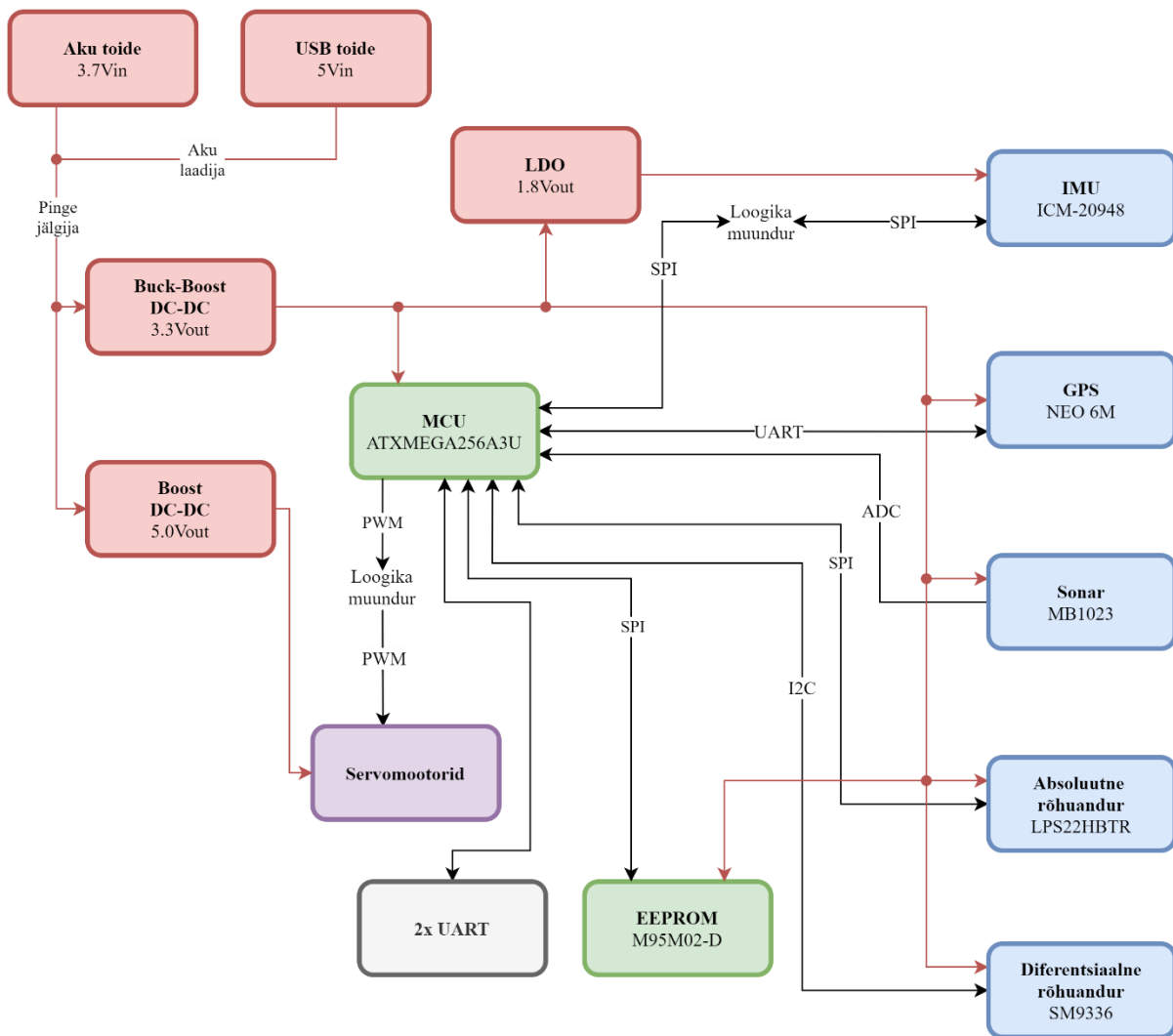
on teada nurga α suurus. Teades kõiki neid suuruseid on võimalik arvutada külje c pikkus valemiga (4.1):

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2 * a * b * \cos \alpha \quad (4.1)$$

4.3 Seadme elektroonika

Seadme elektroonika disainimiseks kasutati Altium Designer tarkvara. Elektroonika valmistamisel arvestati nii seadmele esitatavate nõuetega kui ka kasutatavate andurite ja aktuaatoritega. Lisaks, et suurendada loodava platvormi universaalsust, lisati trükkplaadile võimekus käitada kuni nelja servomootorit, mis annab tulevikus võimaluse testida näiteks langevarju avamist. Töö käigus valminud elektroonikaskeemid ning trükkplaat on leitavad lisast 2.

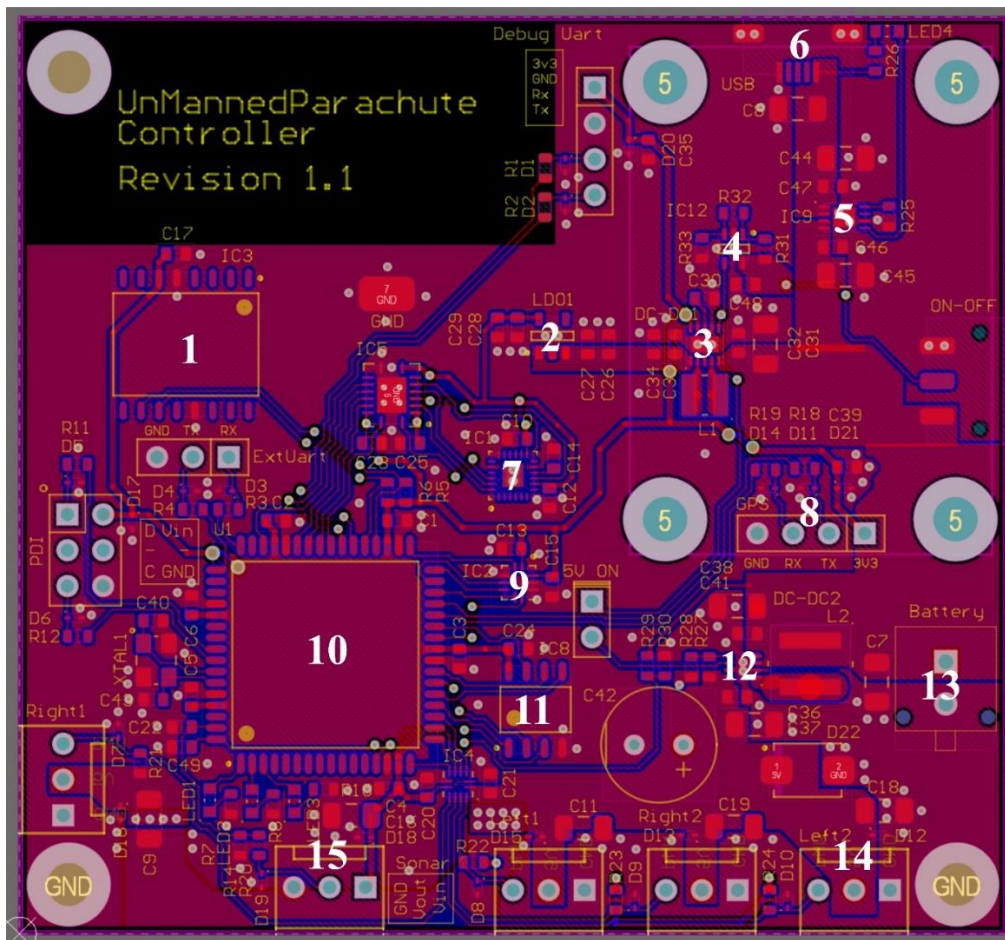
Seadme elektroonika plokk skeem on kujutatud joonisel 11, kus punasega on märgitud pingemuundurid ja -regulaatorid ning toiteallikad ja -ühendused. Sinisega on joonisel kujutatud kasutatud andurid ja nende suhtlusliidesed. Rohelisega on markeeritud mikrokontroller ja EEPROM-mälu. Seadmel on olemas kaks UART väljundit, millest üks on disainitud kasutamaks koos HC-06 Bluetooth mooduliga. Sellegipoolest saab mõlemat soovi korral kasutada tavalise UART väljundina. Kolme erineva toitepinge tõttu kasutatakse seadmel ka loogika muundureid, et erinevad digitaalsignaalid omavahel sobituma panna.



Joonis 11. *Elektronika plokk skeem.*

Kokku valmis töö käigus kaks trükkplaadi disaini. Esimene disain võimaldas testida valitud andurite ja täiturite tööd ning sobivust. Lisaks tõi välja disaini nõrgad ning vigased kohad, mida oli võimalik teise disaini puhul parandada. Teise disaini tegemine võimaldas lisada seadmele funktsionaalsusi nagu EEPROM-mälu, aku laadimine ja pinge jälgimine. Teises disainis otsustati ära kaotada esimeses disainis kasutatud *Hot-Swap* kontrolleri (LTC4412). Antud kontrolleri pidi lihtsustama vahetamist aku ning USB-toite vahel, kuid kasutatud kontrolleri ei võimaldanud servomootorite pidurdamisel genereeritud voolul liikuda tagasi akusse, mistõttu tekkis toiteahelal hetkeline pinge tõus. Suure amplituudiga pinge piigid võivad tekitada kahjustusi toiteahelal olevatele seadmetele. *Hot-Swap* funktsionaalsusest loobumisega saadi lisaks pinge probleemi lahendamisele parem voolu genereerimise ja talumise võimekus servomootorite käitamiseks.

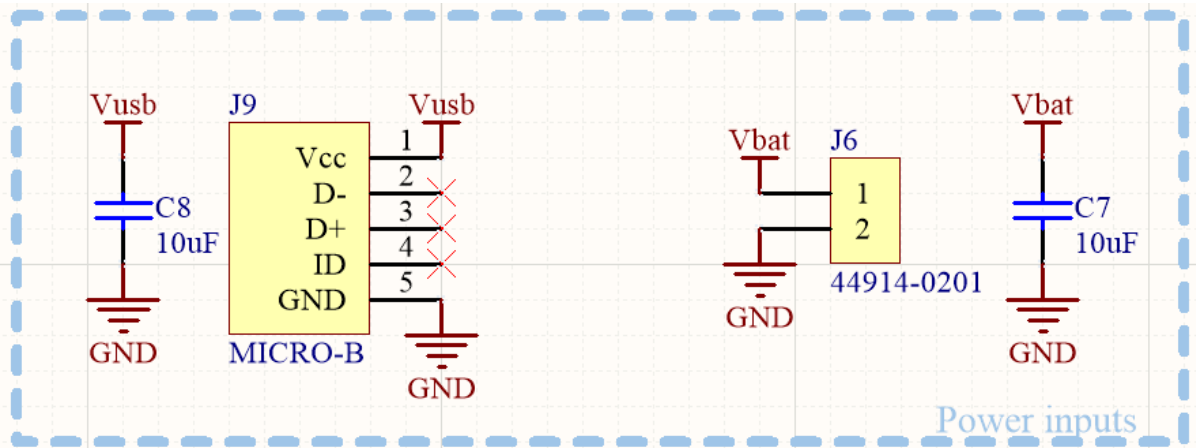
Nii esimene kui ka teine trükkplaadi versioon oli disainitud kahekihiliseks, mis võimaldab odavamalt tootmist võrreldes näiteks nelja- või kuuekihilise trükkplaadiga. Selle arvelt tuli hoolikamalt paigutada signaali- ja toiteradasid. Erilist tähelepanu pöörati vooluringide võimalikult efektiivsele paigutusele. Selle üheks eelduseks on võimalikult hea maanduskiht plaadi alumisel poolel. Takistuse vähendamiseks tehti toiterajad võimalikult laiad ning võimalusel hõivati enda alla suurem pind. Kõige suurema sagedusega on plaadil mikrokontrolleri kristall, mille sagedus on 16 MHz, mistõttu on paigutatud ta võimalikult MCU lähedale. Kristalli ega tema radade lähedal ei ole ühtegi voolu indutseerivat komponenti, mis võiks kristalli signaali segada. Leiti, et oluline on paigutada IMU täpselt plaadi keskele, et seadme liikumine või kõikumine avalduks IMU telgede väärtustes ühtlaselt. Trükkplaadi teise versiooni disaini on näha joonisel 12, millel on numbritega välja toodud tähtsamate komponentide paiknemine.



Joonis 12. Teise versiooni trükkplaadi disain. 1 – diferentsiaalne rõhuandur, 2 – 1,8 V pingeregulaator, 3 – 3,3 V pingemuundur, 4 – pingejälgija, 5 – aku laadija, 6 – USB-pistik, 7 – IMU, 8 – GPS-mooduli pistik, 9 – absoluutne rõhuandur, 10 – MCU, 11 – EEPROM, 12 – 5 V pingemuundur, 13 – aku pistik, 14 – servomootorite pistikud 15 – sonari pistik.

4.3.1 Seadme toide

Kogu süsteemi saab toita nii ühte LiPo akut kui ka Micro-USB-pistikut kasutades. Siiski peamiselt on USB-pistik mõeldud LiPo akude laadimiseks. Trükkplaadi toitesisendid on kujutatud joonisel 13.



Joonis 13. Trükkplaadi toitesisendid.

Lähtuvalt seadmele esitatud nõudest, et seadmega peab olema võimalik akusid laadida, otsustati kasutada ühe-elementilisi LiPo akusid. Ühe-elementilise aku laadimisel ei pea arvestama elementide vahel tekkivate pingete vahedega ning aku pinge peaks jääma vahemikku 3,0 V tühjana ja 4,2 V laetuna. Ületades nendest kumbagi piiri, võib LiPo akut jäädavalt kahjustada. Laadimisotsana kasutati Micro-USB-pistikut, kuna bakalaureusetöö kirjutamise ajal oli tegu levinud laadimisvõimalusega. LiPo akude laadimiseks otsustati kasutada laadimiskontrollerit MCP73832T-2. Leiti, et mikroskeem on seadmele sobilik, sest see on mõeldud 4,2 V ühe-elementiliste LiPo akude laadimiseks ning laadimisvoolu on võimalik kergelt ühe takisti vahetamisega reguleerida. Laadimiskontrolleri laadimisvool jääb vahemikku 15 kuni 500 mA, mis on seadmes kasutatavate akude jaoks sobilik. Sobiva takisti väärtuse arvutamiseks annab tootja valemi (4.2):

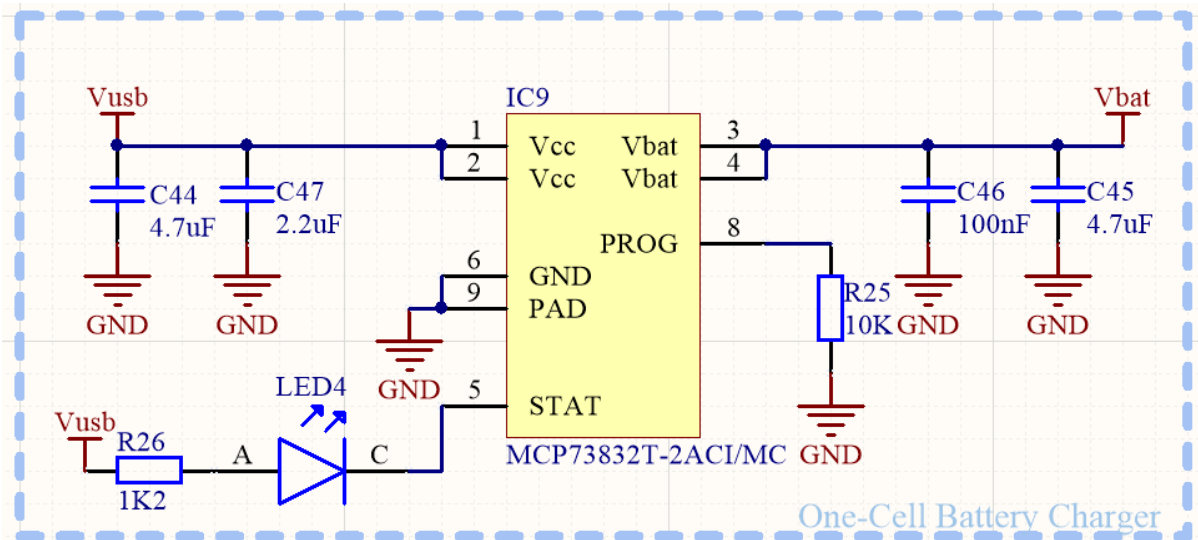
$$R = \frac{1000 V}{I_c} \quad (4.2)$$

kus:

R on takisti väärtus (kOhm);

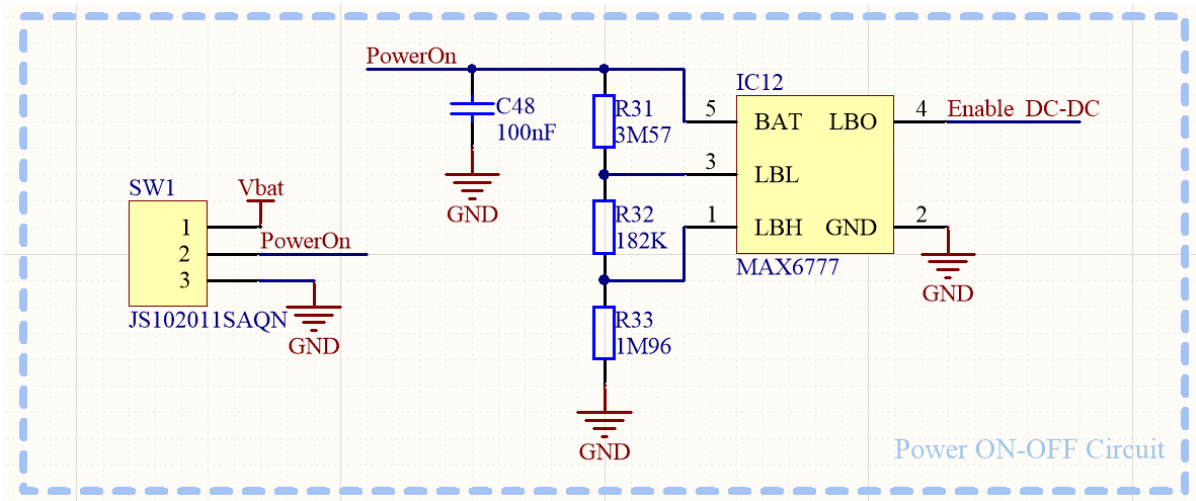
I_c on laadimisvool (mA). [27]

Laadija elektroonikaskeem on kujutatud joonisel 14. Nii kontrolleri sisendile kui väljundile on lisatud toite silumise kondensaatorid. Konkreetne mikroskeem võimaldab lisada plaadile valgusdiodi, et näidata kasutajale aku täituvust. Laadimisvoolu reguleerimiseks mõeldud takisti on joonisel nimega R25.

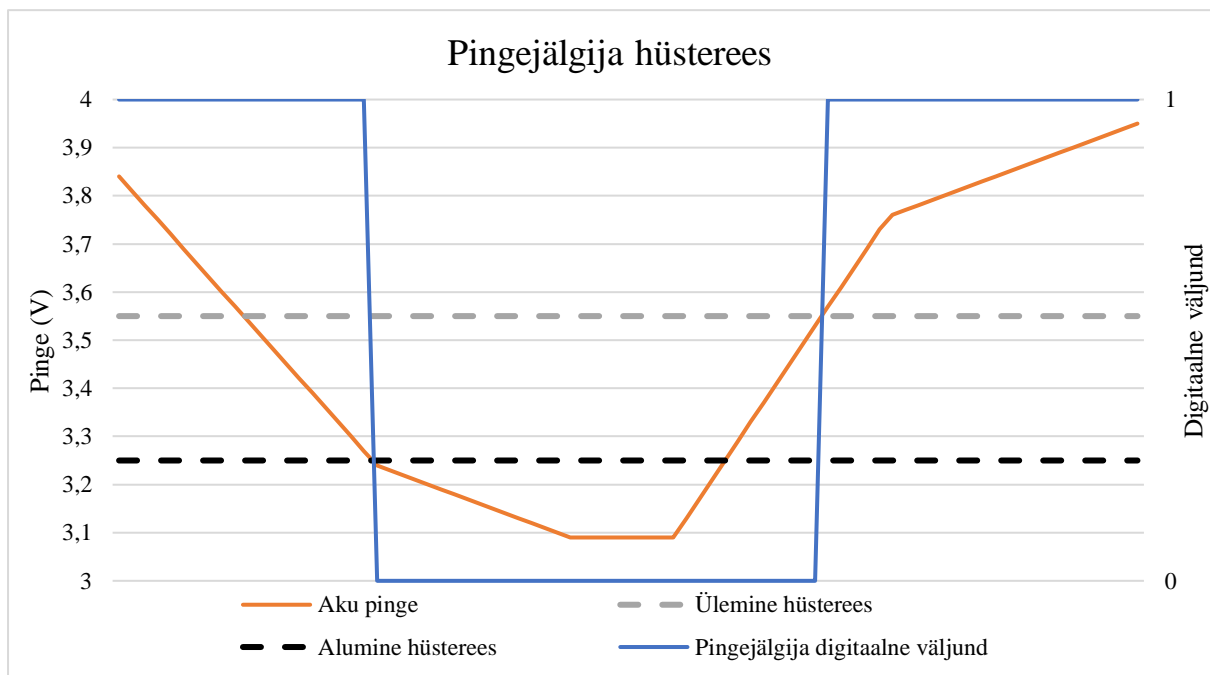


Joonis 14. Üheelemendilise LiPo aku laadija.

Tulenevalt LiPo aku rangetest pingepiirangutest, otsustati kasutada pingejälgijat, et vähendada ohtu, et kasutamisel aku liialt tühjeneb ning seetõttu kahjustada saab. Pinge alanedes lülitab pingejälgija välja kõik pingemuundurid, et vähendada süsteemi voolutarvet ja säästa akut. Seadmes kasutati pingejälgijat MAX6777, sest komponent sobib kasutamiseks üheelemendiliste akudega ning võimaldab valida hüstereesi suurust. [28] Pingejälgija elektroonikaskeem koos mehaanilise lülitiga on kujutatud joonisel 15. Pingejälgija hüstereesi toimimine on kujutatud joonisel 16.



Joonis 15. Pingeljälgi (IC12) elektroonikaskeem akupinge kontrollimiseks koos mehaanilise sisse-välja lülitiga (SW1).

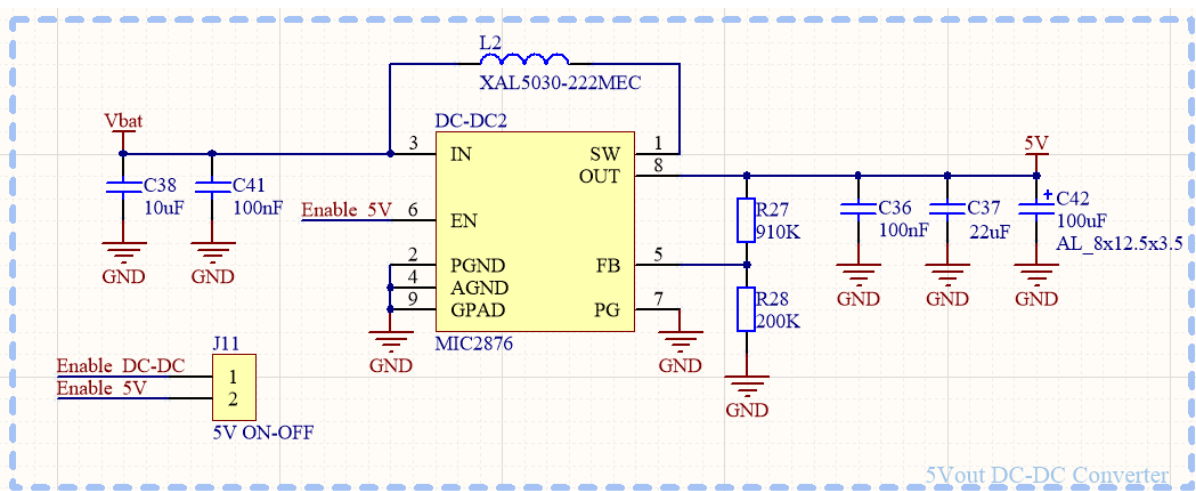


Joonis 16. Pingeljälgi väljundi sõltumine akupingest ning hüstereesist [28].

Hüstereesi suurust valitakse kolme takistiga, mis on elektroonikaskeemil takistid R31-33. Hüsteresi suuruse arvutamiseks ning takistite valimiseks kasutati pingeljälgi tootja andmelehes antud valemeid. Kui akupinge langeb alla 3,25 V, muudab pingeljälgi enda väljundi madalaks, mistõttu lülituvad pingemuundurid välja. Pingemuundurite sisse lülitumiseks peab aku pinge tõusma üle 3,55 V. Suur hüsterees valiti, sest servomootorid võivad tekitada toiteahelasse lühiajalisi pingelangusid. Väiksema hüstereesi korral on võimalik, et mootori tekitatav pingelang lülitaks kogu süsteemi välja ning toitepinge

normaliseerumisel kohe uuesti tööle. Selline käitumine võib põhjustada soovimatut toite ostsileerimist. Kogu süsteemi toide on võimalik välja lülitada ka mehaanilise lüliti abil.

Komponentidele sobiva toitepinge saamiseks kasutatakse seadmes kahte alalispingemuundurit ning ühte pingeregulaatorit. Servomootoritele sobiva toitepinge saamiseks kasutatakse kõrgendavat pingemuundurit, sest servomootorite vajalik toitepinge on andmelehe põhjal 4,8 kuni 6 V [29]. Kõrgendava pingemuunduri skeem on kujutatud joonisel 17, kus lisaks pingemuundurile on nähtav mehaaniline lülitus pingemuunduri väljalülitamiseks. Mehaaniline lülitus võimaldab vähendada süsteemi voolutarvet ning aitab välistada võimaluse kogemata mootoreid käitada. Mootorite juhusliku käitamise tulemusena võivad kahjustada saada näiteks nende käigukastid.



Joonis 17. Kõrgendav pingemuundur servomootorite toitmiseks.

Kuna kõrgendava pingemuunduri puhul on tegu muudetava väljundpingega muunduriga, siis on vajalik lisada muunduri väljundi ning tagasiside jala vahele pingejagur. Tootja andmelehe järgi peab tagasiside jalale langema pinge 0,9 V. Takistite väärtused arvutati järgneva valemi abil (4.3):

$$R27 = R28 * \left(\frac{V_{out}}{0.9V} - 1 \right) \quad (4.3)$$

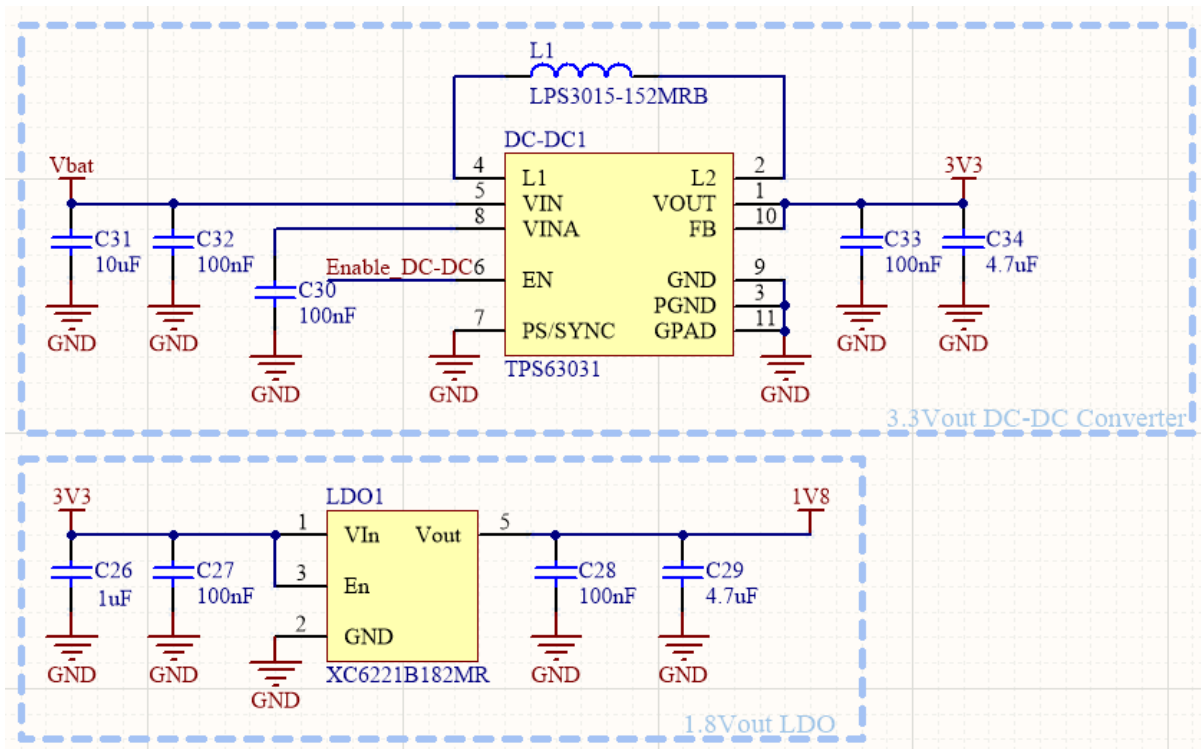
kus:

V_{out} on soovitud väljundpinge;

R28 on fikseeritud takisti väärtus.

Tootja andmete järgi peaks R27 ja R28 takistuse summa jääma ühe megaoomi juurde. [30]

Mikrokontroller ning andurid vajavad 3,3 V või 1,8 V toidet. Sobilik 3,3 V tehti vähendavat ja kõrgendavat pingemuundurit (ingl *Buck-Boost Converter*) kasutades, et tagada süsteemile stabiilne 3,3 V toitepinge ka olukorras, kus akupinge langeb alla 3,3 V. Pingeregulaatori abil tehti IMUle ning selle loogikamuundurile sobilik 1,8 V toitepinge. Nii 3,3 V pingemuunduri kui ka 1,8 V pingeregulaatori elektroonikaskeemid on näha joonisel 18. Mõlema mikroskeemi puhul on tegu fikseeritud toiteväljundiga variandiga, mis tähendab, et nad ei vaja lisa pingejagurit, vaid see on neile juba sisse ehitatud. Lisa pingejaguri puudumine vähendab plaadil olevate komponentide arvu ning lihtsustab trükkplaadi disaini.



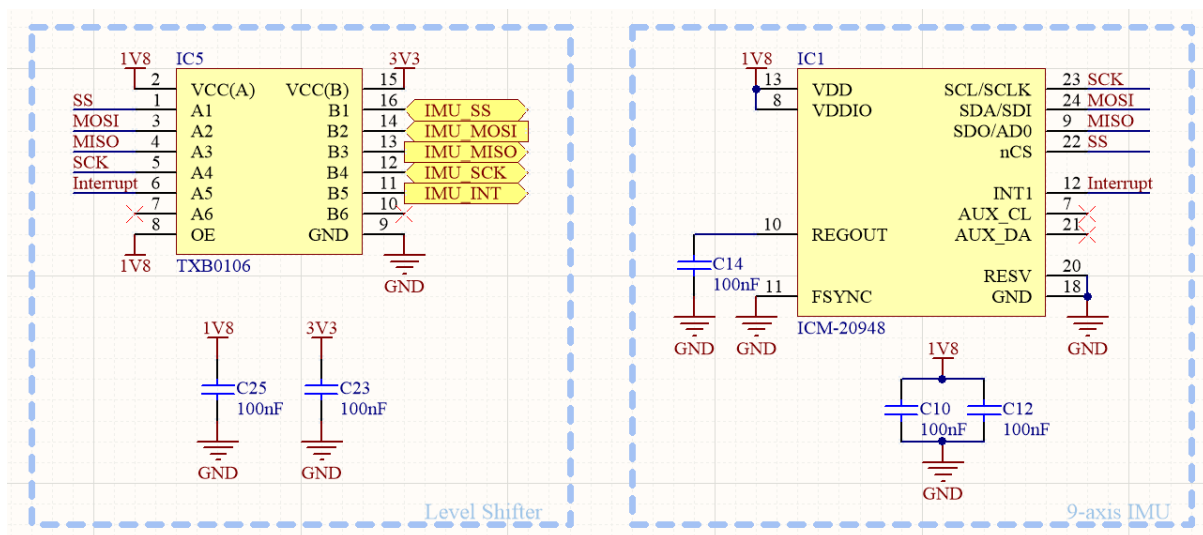
Joonis 18. 3,3 V pingemuundur ja 1,8 V pingeregulaator.

4.3.2 Andurid

Valminud seadmes kasutati järgnevaid andureid:

- 1) IMU;
- 2) GPS;
- 3) sonar;
- 4) absoluutne rõhuandur;
- 5) diferentsiaalne rõhuandur.

Inertsiaaliduri abil sooviti hinnata seadme asendit õhus ning uurida seadmele mõjuvaid jõudusid. Anduri puhul oli oluline, et see sisaldaks nii kiirendusandurit, magnetomeetrit kui ka güroskoopi. Kõiki neid funktsionaalsusi sisaldas inertsiaalidur ICM-20948 ning seetõttu otsustati seda töö käigus valminud seadmes ka kasutada. Suhtlusliidestena on võimalik kasutada nii SPI kui ka I²C suhtlust ning töös kasutati SPI-protokolli. Nii kiirendusanduri, güroskoobi kui ka magnetomeetri tundlikkust on võimalik eraldi muuta. IMU vajab toitepinget 1,71 kuni 3,6 V, kuid aktsepteerib digitaalsetel sisenditel ainult kuni 1.95 V pinget. [31] See aga tähendas, et MCU-ga suhtlemiseks pidi kasutama loogika muundurit, mis teeb 3,3 V digitaalsest signalist 1,8 V digitaalse signaali ning vastupidi. IMU elektroonikaskeem koos loogika muunduriga on välja toodud joonisel 19.



Joonis 19. Loogika muunduri (IC5) ja IMU (IC1) elektroonikaskeem.

GPSi asukoha määramiseks otsustati kasutada eelnevalt valmistatud u-blox NEO-6M moodulit. GPSi andmete vastuvõtmiseks läheb vaja nii signaali töötlevat mikroskeemi kui ka antenni. Antenni rajad vajavad väga kindlat impedantsi, et korrektselt töötada. Lähtudes sellest vajadusest otsustati, et töökindlam on valida valmis GPS-moodul, mis sisaldab nii mikroskeemi kui ka antenni. Valitud moodul on võimalik paigaldada trükkplaadile piikriba ühenduse abil. Mikroskeem võimaldab arvutis programmeerimist ning omab väga head andmelehte. MCUga suhtleb GPS-moodul UART-liidese kaudu ning vajalik toitepinge on 3,3 V. Andmelehe järgi on mooduli horisontaalne täpsus $\leq 2,5$ m, kuid vertikaalset täpsust andmeleht ei kirjelda. Maksimaalseks uuendamissageduseks annab tootja 5 Hz. GPS-mooduliga on kaasas ka patarei, et salvestada mikroskeemis olevaid sätteid. Bakalaureusetöö jooksul patarei tühjenes piisavalt, et pinge langeks alla 1,4 V, mistõttu sätteid enam ei

salvestatud. [32] Seetõttu pidi lisama moodulile uue patarei, et mikroskeemi sätteid jätkuvalt mälus salvestada.

Sobivaks sonariks, millega maapinna kaugust hinnata, leiti MaxBotix MB1023. Konkreetse sonari tööraadius ulatub ideaaltingimustes 5 meetrini. Kui võtta aluseks keskmise tiiblangevarju lauglemisväärtus ehk suhe 3:1, saab arvutada, et 5 m langemise kohta liigub langevari $5 \cdot 3 = 15$ meetrit edasi. Leiti, et sonari tuvastatav kaugus on piisav, et vajadusel tuvastada maapinda enne maandumist, isegi ideaaltingimuste puudumisel. Sonari toitepinge on 2,5 kuni 5,5 V. Sonaril on kolm väljundsignaali, milleks on analoogpinge, pulsi pikkus või RS232 baasil jadasuhtlus. [33] Töös otsustati kasutada analoogpinge väljundit, et hinnata seadme kaugust maapinnast. Analooepinget saab digitaalseks konverteerida mikrokontrolleri ADC abil.

Õhurõhu mõõtmiseks kasutatakse absoluutset rõhuandurit LPS22HB, mis pakub suhtlusliidestena nii I2C kui SPI-d. Sama rõhuanduriga oldi juba varem ka kokku puutunud, mistõttu olid teada anduri kasutamise kaasnivad nüansid. Toitepingena sobib andurile nii 1,8 kui ka 3,3 V. Rõhuandmete tulemus on 24-bitine pikkune ning uuendamissagedus kuni 75 Hz. Rõhuandur sisaldab ka temperatuurisensorit, mille abil enda rõhuandmeid kompenseerida ning temperatuurisensori andmed on kättesaadavad ka kasutajale. [34] Seadmes otsustati kasutada anduriga suhtlemiseks SPI protokollit ning toitepingena kasutada 3,3 V.

Pitot' toru kasutamiseks vajalikul diferentsiaalsel rõhuanduril on kaks sisendit, mille vahel rõhkude erinevust mõõdetakse. Üks sisend kinnitatakse pitot' toru ühe väljundiga ning teine teisega. Sisendites olevate rõhkude erinevuse tõttu saab arvutada õhu liikumiskiiruse. Seadmes otsustati kasutada SM9336 andurit, mille kalibreeritud rõhu tuvastamise vahemik on -250 kuni 250 Pa [35]. Kasutades valemit 3.3, saame arvutada anduri maksimaalse tuvastatava õhu liikumiskiiruse. Võttes arvesse, et keskmine õhutihedus merepinnal on $1,225 \text{ kg/m}^3$ ning $250 \text{ Pa} = 250 \text{ kg/(m} \cdot \text{s}^2)$, saame et:

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot 250 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}}{1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}} = 20,20 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (4.4)$$

Valemiga 4.4 leitud maksimaalne anduri tuvastatav kiirusevahemik sobis töö käigus valminud seadmele. Andur toetab ainult I²C suhtlusprotokollit ning uuendamissagedus on kuni 2 kHz.

4.3.3 Servomootorid

Töö käigus katsetati mitmeid servomootoreid, et tuvastada langevarju juhtimiseks vajalik jõud ja servomootorite tegelik voolutarve ning väändemoment. Töö algusfaasis katsetati väiksemaid, kuni 15 g kaaluvaid mootoreid, et hoida seadme kaalu võimalikult väiksena. Siiski jõuti järeldusele, et nendega ei ole võimalik saavutada langevarju juhtimiseks piisavalt suurt jõumomenti. Vajaliku jõu suurust määravad kõige rohkem kasutatav nööri liigutamise meetod ning liigutamise mehhanismi raadius. Lähtudes nõudest, et seadme kaal võib olla kuni 1 kg ning eeldusest, et suurem osa kaalust langeb langevarju kinnitusnööridele ja -aasadele, võeti aluseks, et ühel servomootoril ei tule langevarju juhtnööri rakendada suuremat jõudu kui 0,5 kg. Lähtudes eelnevalt tehtud eeldusest ning testidest, sai välja valitud seadmele sobiv servomootor FeeTech FS5106B, mille kaal on 40 g. Servomootori liikumisulatus on 180° ning jõumoment kuni 6 kg*cm. Andmelehe põhjal on mootori voolutarve kuni 1,1 A, kuid katsete käigus oli voolutarve kuni 1,9 A. [29] Sellest lähtuvalt sai ka trükkplaadi teises versioonis pingemuundurite väljundvoolu suurendatud.

Töö käigus tehtud testidest ning loetud materjalidest selgus, et tiiblangevarjud, mille tiivaulatus on kuni 2,5 m, vajavad juhtnööri tõmbamis pikkuseks kuni 15 cm. Selle saavutamiseks tuli disainida juhtnööri liigutamise hoovad pikkusega 7,5 cm. Hoova otsas tekitatava jõu arvutamiseks, saab kasutada valemit 3.2, mille põhjal saab tuletada servomootori tekitatava jõu õla pikkuse ning servomootori jõumomendi kaudu:

$$\tau = r * F \Rightarrow F = \frac{\tau}{r} \quad (4.5)$$

Seadmes kasutatav servomootor suudab juhtnööri liigutada maksimaalselt jõuga:

$$F = \frac{6 \frac{kg}{cm}}{7,5 \text{ cm}} = 0,8 \text{ kg} \quad (4.6)$$

Valemiga 4.6 arvatud maksimaalne jõud 0,8 kg ületab eelduseks seatud 0,5 kg piisavalt, et seda valminud seadmes kasutada. Suurem jõud annab see võimaluse panna seadmega kaasa ka suuremaid raskusi.

4.3.4 Mikrokontroller ja EEPROM

Välismaailma ja anduritega suhtlemiseks ning servomootorite juhtimiseks on vajalik süsteemis omada ühte kesket mikrokontrollerit. Käesolevas töös otsustati kasutada AVR perekonda

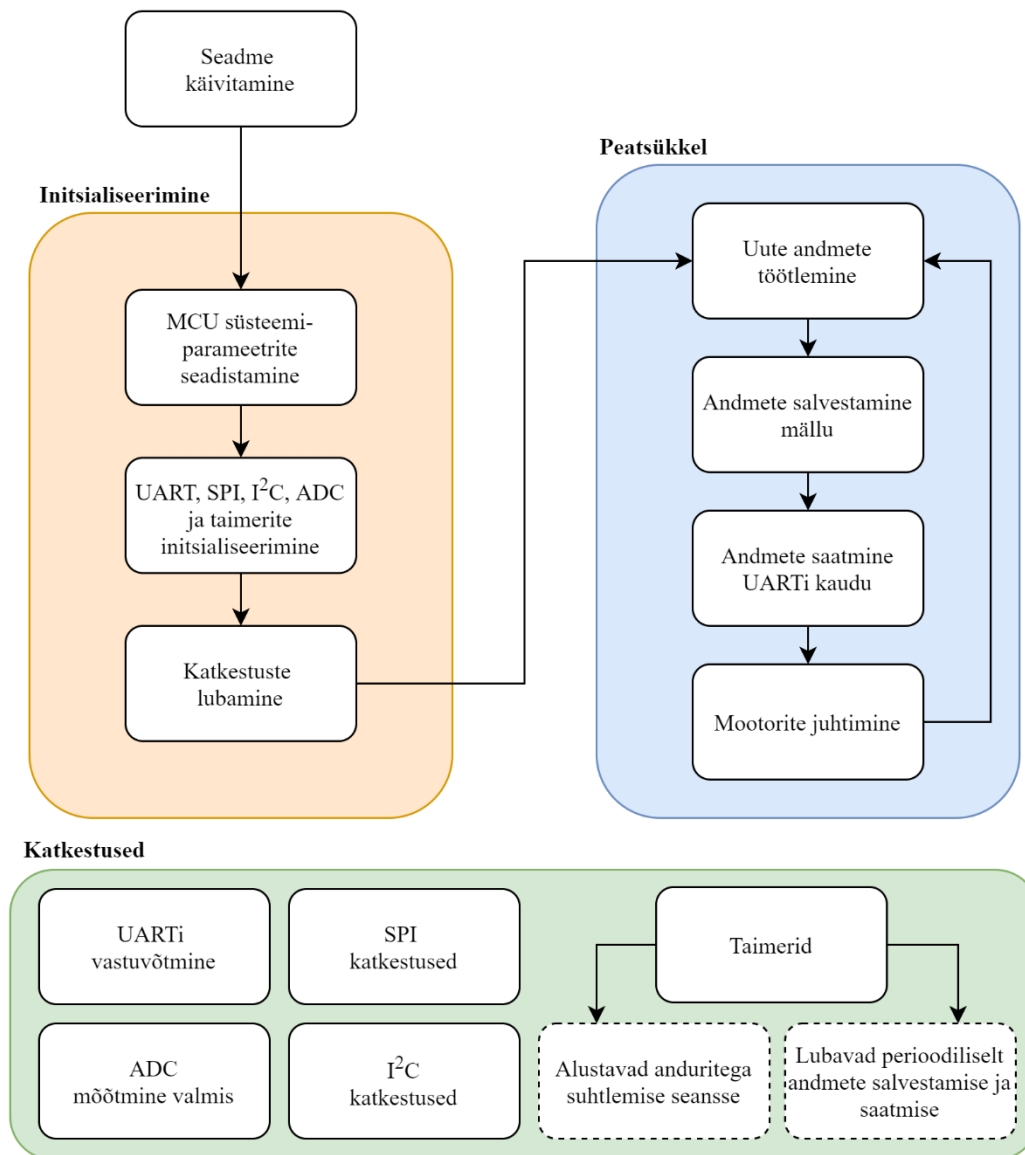
kuuluvat mikrokontrollerit ATXMEGA256A3U, mida oldi juba varem kasutatud. Mikrokontrolleril on piisaval arvul korraga kasutatavaid suhtlusliideseid ning omab 16 kB RAM ning 4 kB EEPROM mälu. Kokku oli seadmes vaja kasutada kolme SPI-, kolme UART- ning ühte I²C-suhtlusliidest. Kontroller sisaldas võimekust saata ühe taimeriga erinevaid PWM-signaale kuni neljale erinevale kanalile korraga. Mikrokontrolleri programmeerimiseks kasutatakse PDI-liidest. [36]

Bakalaureusetöö kirjutamise ning seadme testimise käigus tuli välja, et lisaks MCU enda sisemisele RAM ja EEPROM mälule, peaks seade omama ka välist suuremat EEPROM mikroskeemi, kuhu anduritelt tulevad andmed salvestada. Salvestamine annab suuremad võimalused lennuandmeid hiljem analüüsida ning seeläbi lendamise algoritme parandada. Samuti säilivad EEPROMis olevad andmed ka peale toitepinge kadumist. Seetõttu sai väline EEPROM mälu ka trükkplaadi teisele versioonile lisatud. EEPROMi valimise puhul oli tähtis, et mällu kirjutamise aeg oleks võimalikult lühike. Trükkplaadil otsustati kasutada mikroskeemi M95M02, mille maht on 256 kB ja terve lehe kirjutamise aeg on 5 ms. EEPROMi SPI-suhtlusliidese maksimaalne taktsagedus andmelehe andmetel 3,3 V toitepinge juures on 5 MHz. [37]

4.4 Püsivara

Bakalaureusetöö käigus kirjutati seadme funktsionaalseks testimiseks sobiv püsivara. Kirjutatud kood pidi võimaldama testida nii andurite kui ka servomootorite sobivust ning võimaldama esialgset testimist koos tiiblangevarjuga ning tulemuste analüüsi. Kogu kirjutatud püsivara on avatud lähtekoodiga ning programmeerimiskeelena kasutati C++i. Töö raames kirjutatud kood on leitav lisast 3.

Seadme juhtprogrammiloogika saab jaotada kolmeks suureks osaks. Esimene neist on MCU sisend/väljund seadmete ja andurite initsialiseerimine. Teine osa on lõputu programmiüksik, kus tegeletakse uute andmete töötlemise ja saatmisega ning kolmas on katkestuste teenindamine. Lihtsustatud programmiloogika plokk skeem on näha joonisel 20.



Joonis 20. Programmiloojika lihtsustatud skeem.

Initsialiseerimise etapis alustatakse kõigepealt MCU süsteemiparameetrite sätimisest. Sinna alla kuulub näiteks tuuma taktsignaali programmeerimine, mille jaoks kasutatakse PLLi (ingl *Phase-Lock Loop*), et kordistada välise kristalli signaali. Selle abil seadistatakse mikrokontrolleri tuum töötama 32 MHz taktsignaaliga. Edasi initsialiseeritakse kõik vajaminevad MCU perifeeriaseadmed nagu UART, SPI, I²C, ADC ning taimerid. Järgmisena liigub programm lõputusse tsüklisse. Kogu suhtlus anduritega toimub riistvaraliste katkestuste abil. Kõik suuremahulised arvutused ning uute andmete töötlemised toimuvad programmiloojika peatsüklis. Suuremahulised arvutused on tõstetud peatsüklisse, et vähendada katkestuste teenindamisaega. Sellise programmiloojika juures, kus katkestuses kirjutatavaid andmeid loetakse peatsüklis, on ülioluline säilitada andmete terviklikkus. Näiteks ei ole tagatud andmete terviklikkus, kui peatsüklis loetakse 32-bitist muutujat ning katkestuse

teenindamisel on võimalik seda lugemise käigus muuta. Anduritega suhtlemise alustamist dikteerib riistvaraline taimer. See annab võimaluse täpselt ajastada andmete uuendamissagedust mikrokontrolleris. Programmiloogika võimaldab riistvaralise taimer abil hinnata erinevate funktsioonide või katkestuste teenindamise kiirust, mis annab võimaluse neid vajadusel optimeerida.

Programmiloogika kasutab kokku kolme UART-liidest, millest üks on mõeldud GPS-moodulist tulevaid andmeid vastu võtma. Teised kaks on mõeldud kasutajale koodi silumiseks, mootorite juhtimiseks ning MCU mälust andmete kättesaamiseks. Lisades UART-liidesele HC-06 Bluetooth mooduli, on võimalik seadet juhtida ka Bluetooth ühendust kasutades. Kõik UARTid kasutavad FIFO (ingl *First In, First Out*) puhvrit, kuhu vastuvõetavad andmed pannakse ning hiljem töödeldakse andmed programmi peatsüklis. Püsivara võimaldab seadistada üle UART liidese andmete salvestamist ja saatmist kui ka muuta mootori asendit. Koodi vastuvõetavaid käsklusi illustreerib tabel 1. Käskude vastuvõtmise formaat on „Käsk Lisaparameter\n“.

Tabel 1. Programmi vastuvõetavad käsud ning nende tähendused.

Käsk	Lisaparameter	Käsu tähendus
save		Mällu andmete salvestamise alustamine
get		Salvestatud andmete väljalugemine mälust
cancel		Mällu andmete salvestamise lõpetamine
right/left/both	0 kuni 150	Langevarju juhtnööride tõmbamine lisaparametrina antud millimeetrite võrra. Võimalik tõmmata mootoritega eraldi kui ka mõlemat koos.
autoon		Automaatse mootorite liigutamise sisse lülitamine
autooff		Automaatse mootorite liigutamise välja lülitamine

GPSi mikroskeem saadab andmeid välja kas NMEA- või UBX-protokolli järgi. NMEA-protokoll on rahvusvaheline ning UBX-protokoll on mikroskeemi tootja enda arendatud. Lisaks sellele on võimalik kasutada tootja poolt modifitseeritud NMEA-protokolli sõnumeid

PUBX. Nii NMEA- kui ka PUBX-protokolli sõnumid on ASCII vormis, mistõttu vajavad nad enne mikrokontrolleris kasutamist dekodeerimist. [38] Programmioloogikas kasutati PUBX-protokolli järgi saadetavaid sõnumeid, sest sel juhul piisas kõikide vajalike andmete kättesaamiseks vaid ühe sõnumi dekodeerimisest. Kasutatud sõnum oli kujul:

```
$PUBX,00,hhmmss.ss,Latitude,N,Longitude,E,AltRef,NavStat,Hacc,Vacc,SOG,COG,Vvel,ageC,HDOP,VDOP,TDOP,GU,RU,DR,*cs<CR><LF> [38]
```

Kasutatud sõnumist sai kätte nii seadme hetkepositsiooni (Latitude, Longitude), kõrguse (AltRef) kui ühendatud satelliitide arvu (GU). Kasutatud sõnum sisaldas veel infot horisontaalse ja vertikaalse täpsuse, kiiruse ning rahvusvaheliselt mõõdetava GPS-aja kohta, kuid neid hetkel püsivaras ei kasutata.

Sarnaselt loodud elektroonikale võimaldab püsivara juhtida kokku kuni nelja servomootorit. Püsivara võimaldab muuta erinevate servomootorite nullasendit, juhul kui servomootorite pöördenurgad täpselt ei klapi. Mootoritele vajalikku PWMi genereeritakse riistvaralise taimeril abil. Selle jaoks kasutatakse ära taimeril töörežiimi *Single-slope PWM Generation*, mis võimaldab taimeril ise servomootorit juhtida. Taimer on tööle pandud nii, et servomootorile saadetavat signaali uuendatakse iga 20 ms tagant.

Kuna IMUst saadavad andmed on küllaltki müra, kasutatakse signaali ühtlustamiseks eksponentsiaalset silumist (ingl *exponential smoothing*). Selle rakendamiseks kasutatakse järgmist valemit (4.7):

$$\bar{x}_n = \alpha * x_n + (1 - \alpha) * \bar{x}_{n-1} \quad (4.7)$$

kus:

α on konstant, mis määrab ära silumise tugevuse;

\bar{x}_n on silutud tulemus;

x_n on silumata tulemus;

\bar{x}_{n-1} on eelmine silutud tulemus [39].

Programmioloogika kasutab konstandi α väärtusena 0,01 kuni 0,5. Eksponentsiaalset silumist rakendati ka sonari andmete puhul.

5 Testimine

Seadme testimise eesmärgiks oli testida seadme funktsionaalset tööd. Selleks viidi läbi lühikesed katsed, mis võimaldasid hinnata nii andurite kui ka mootorite tööd. Oluline oli välja selgitada, kas töö käigus valminud elektroonika- ja mehaanikalahendused sobivad langevarju juhtimiseks. Testid viidi läbi kahes etapis, kus esimeses etapis kinnitati drooni külge valminud trükkplaat, et katsetada andurite tööd. Teises etapis viidi katsed läbi valminud seadmega, kuhu külge oli kinnitatud ka langevari. Testimise teine etapp oli mõeldud nii elektroonika kui ka mehaanika töö testimiseks.

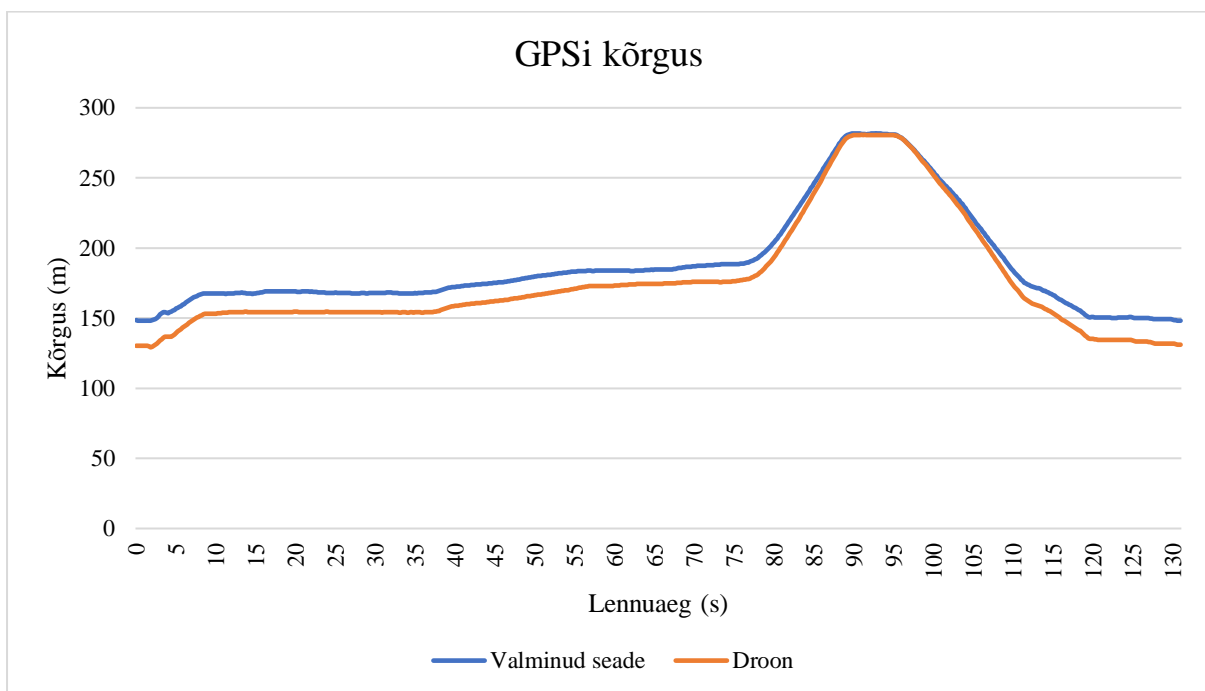
5.1 Testimine drooniga

Drooniga testimise põhiliseks eesmärgiks oli töö testida valitud andurite sobivust valminud seadmele. Testimisel kasutati drooni Mavic Pro ning spetsiaalselt testimiseks valmistatud rakist, mis on nähtav joonisel 21. Testrakis võimaldas sinna kinnitada nii trükkplaadi, sonari, aku kui ka GPS-antenni. Testrakisel puudus korrektne pitot' toru, mistõttu korrektseid diferentsiaalse rõhuanduri andmeid ei saadud. Samuti võis mõjutada rõhuanduri andmeid drooni poolt tekitatavad õhukeerised drooni all. Andmete salvestamiseks kasutati MCU sisemist muutmälu, mistõttu oli salvestatav andmehulk ning -kiirus väga piiratud.



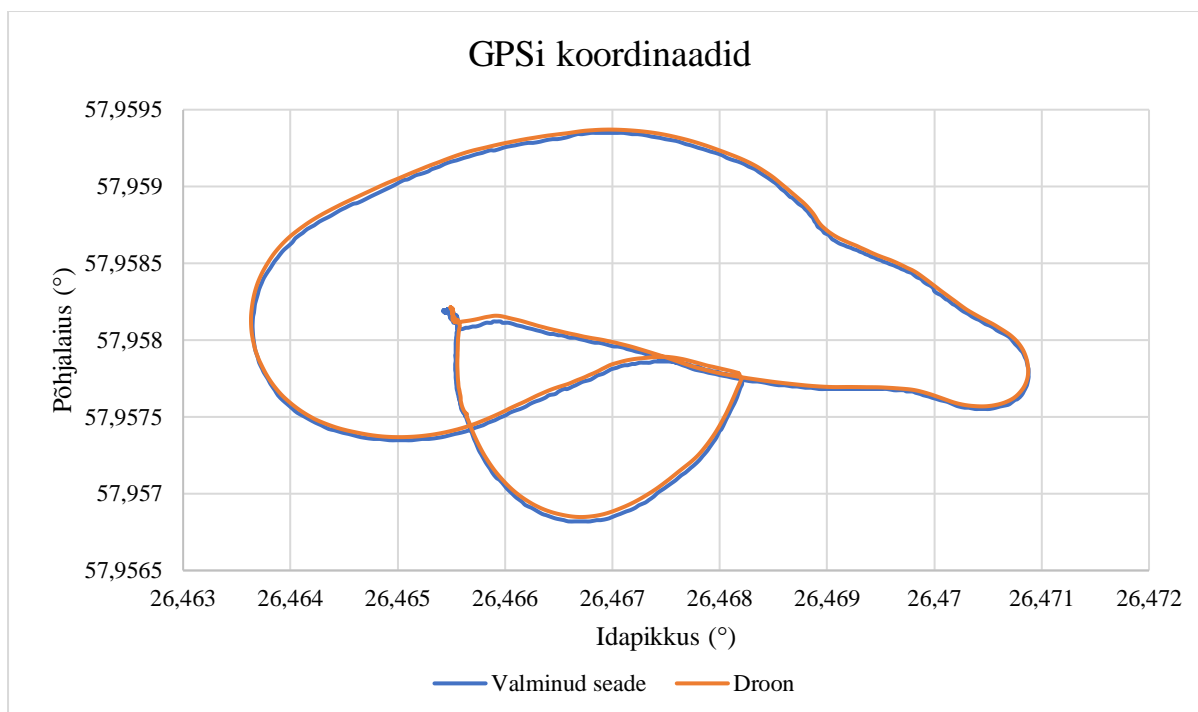
Joonis 21. Esmaseks testimiseks kasutatud droon koos testrakisega.

Kõige paremini sai testida GPS andmete täpsust ning seda, kas andmete dekodeerimine toimub õigesti. Valminud seadme GPSi täpsust sai võrreldud drooni sisemise GPSiga. Mõlemad määratlevad enda koordinaatteljestiku nullpunktiks WGS84-süsteemi alguspunkti. Joonisel 22 on välja toodud drooni ning valminud seadme GPSi kõrguse graafik. Graafikult võib näha seost seadme ja drooni GPSi kõrguse vahel. Graafikult võib näha, et kõrguse suurenedes valminud seadme ning drooni GPSi mõõdetud kõrguse erinevus väheneb ning kõrguse vähenedes erinevus suureneb ning kõige suurem kõrguste vahe oli lausa 19,1 m. Samas peab arvestama, et drooni GPS oli lennates ühenduses keskmiselt 14 kuni 17 satelliidiga, aga seadme GPS keskmiselt 7 kuni 9 satelliidiga. See on tingitud asjaolust, et seadmes kasutatav NEO-6M moodul ühildub ainult GPS-satelliitidega aga droon ka GLONASS-satelliitidega (ingl *GLOBAL Navigation Satellite System*).



Joonis 22. Valminud seadme ja drooni GPSi kõrguse võrdlus.

Teste analüüsid võrreldi ka GPSi koordinaatide ühtivust, mida illustreerib joonis 23. Joonisel on kujutatud 5 minuti ja 50 sekundi pikkune lend Lõuna-Eestis, mille jooksul salvestati nii seadme enda kui ka drooni GPSi koordinaate. Suuri erinevusi lendamistrajektoris ei täheldatud, kuid väike põhjalaiuse suunaline nihe on koordinaatidel olemas. Tehtud testidest nähtus, et GPSi moodul töötas korrektselt.



Joonis 23. Valminud seadme ja drooni GPSi koordinaatide võrdlus.

5.2 Langevarjuga testimise koht ja varustus

Langevarjuga testide läbiviimise koha jaoks oli oluline tagada nii testi läbiviijate kui ka ümbruskonnas liikuvate inimeste ohutus. Lisaks oli vaja piisavalt suurt lagedat pinda, et seadme triivimisel see puu latvadesse kinni ei jääks ning sooviti, et kasutatav testimispunkt oleks võimalikult kõrge, et seadme tööd korrektselt hinnata. Testide läbiviimiseks sai valitud Tartu Ülikooli Physicumi hoone. Maa-ameti andmetel on Physicumi kõrgus 24 kuni 25 m. Hoone katusel on mugav ning ohutu liigelda ning maja ümbruskond on suuresti lageda. Joonisel 24 on kujutatud Physicumi hoone põhjanurk, kus seadet põhiliselt testiti. Joonisel olevate punaste täpikestega on kujutatud katusel asuvad erinevad testimispunktid. Seadme testimispunkt valiti välja vastavalt tuule hetkesuunale ja -kiirusele. Seadet testides prooviti hoiduda külgtuulest ning vältida suuri tuulepuhanguid. Suuremate tuulte puhul hakkasid langevarju lendamistrajektoori mõjutama peale tuule veel ka majade vahel tekkivad keerised.



Joonis 24. *Physicumi hoone põhjanurk.*

Joonisel 25 on kujutatud testimisel kasutatud varustuste komplekti. Seadmest lennuandmete kätte saamiseks kasutati sülearvutit, mida kasutati veel seadme programmeerimiseks ja andmetöötluseks. Testimistel olid kaasas vahendid seadme korpuse parandamiseks ning elektroonika kontrollimiseks. Andmete salvestamise alustamist ning lõpetamist sai juhtida HC-06 Bluetooth mooduli abil, mis võimaldas andurite andmete terviklikkust reaajas juhtmeteta kontrollida. Võimalikult paljusid katseid prooviti ka filmida, et andmete analüüsi etapis oleks võimalik paremini seostada seadme positsiooni õhus saadud andmetega.



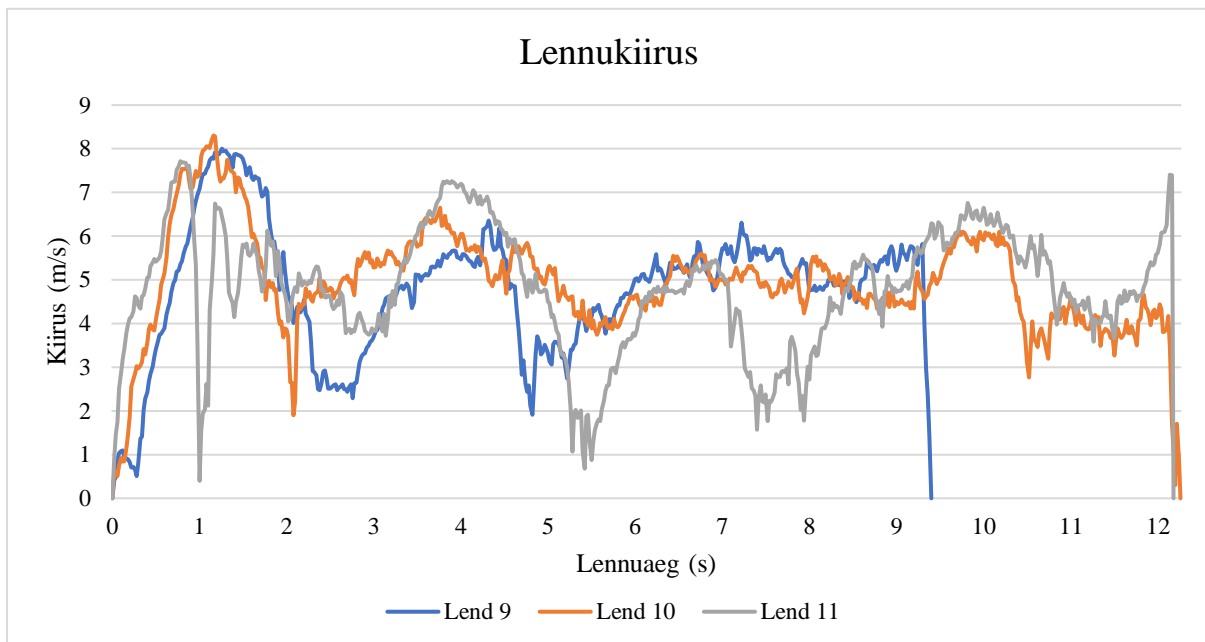
Joonis 25. Testimisel kasutatud varustus. Esmased parandusvahendid ja arvuti programmeerimiseks ning andmete maha lugemiseks valminud seadmetest.

5.3 Tulemused

Kokku sooritati töö raames 25 langevarjuga katset. Tulemuste võrdlemisel ja analüüsimisel kasutati igale katsele vastavat numbrit. Bakalaureusetöös välja toodud lendude puhul pöörati tähelepanu, et need iseloomustaks võimalikult suurt katsete kogumit. Kõikide andurite tulemusi salvestati kiirusel 50 Hz, mis annab salvestatud tulemuse iga 20 ms tagant. Tuule kiiruse ning suuna hindamiseks kasutati Physicumi katusel asuvat ilmajaama. Testide ajal olid keskmised tuulekiirused 2,5 kuni 5,6 m/s.

Tehtud katsetest nähtus, et seadme külge paigaldatud pitot' toru abil on edukalt võimalik hinnata seadme hetkekiirust. Joonisel 26 on välja toodud kolme katse lennu käigus kogutud lennukiiruse andmed. Kõikide katsete puhul on näha seadme algiirendus, mis ulatub kuni kiiruseni 8 m/s, peale mida hakkab kiirus vähenema ning seejärel jälle suurenema. Kiiruse vähenemine on tingitud sellest, et tänu inertsile liigub seade langevarjust ettepoole ning rüнденurga suurenemise tõttu pidurdab langevari hoogu. Sellist nähtust, kus lennudevahend suurendab järsult enda rüнденurka nimetatakse kabreerimiseks. Kiiruse suurenemise puhul

liigub seade langevarjust jällegi tahapoole, mistõttu langevarju rüнденurk väheneb ja seade hakkab pikeerima. Lennu 9 ja 10 puhul võib märgata sarnast lennukiiruse joont. Videote põhjal saab öelda, et lennu 11 puhul kõikus seade edasi-tagasi teistest rohkem ning sama on märgata ka kiiruse graafikul.

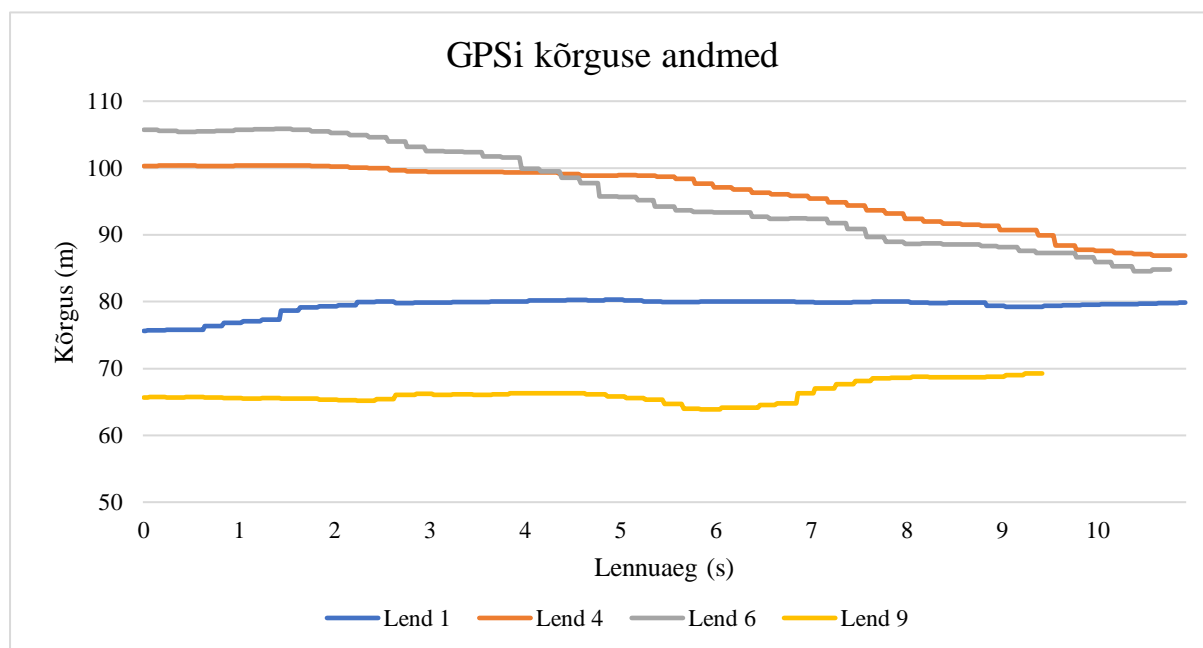


Joonis 26. Kolme katse lennukiirus pitot' toru andmete põhjal.

Joonisel 26 välja toodud kolm katset tehti lisaraskusega, mille mass oli 277 g. Lisaraskusega lendude puhul võis täheldada rohkem seisakuid. Lisaraskusega sooviti vähendada tuule mõjusid ning muuta langevari kontrollitavamaks. Lisaraskus ühtlustas lennu kulgu, suurendades ka keskmist lennukiirust. Tehtud katsetest saab järeldada, et pitot' toru sobib hästi lennukiiruse hindamiseks ning on sellega on võimalik hinnata langevarju varisemist õhus.

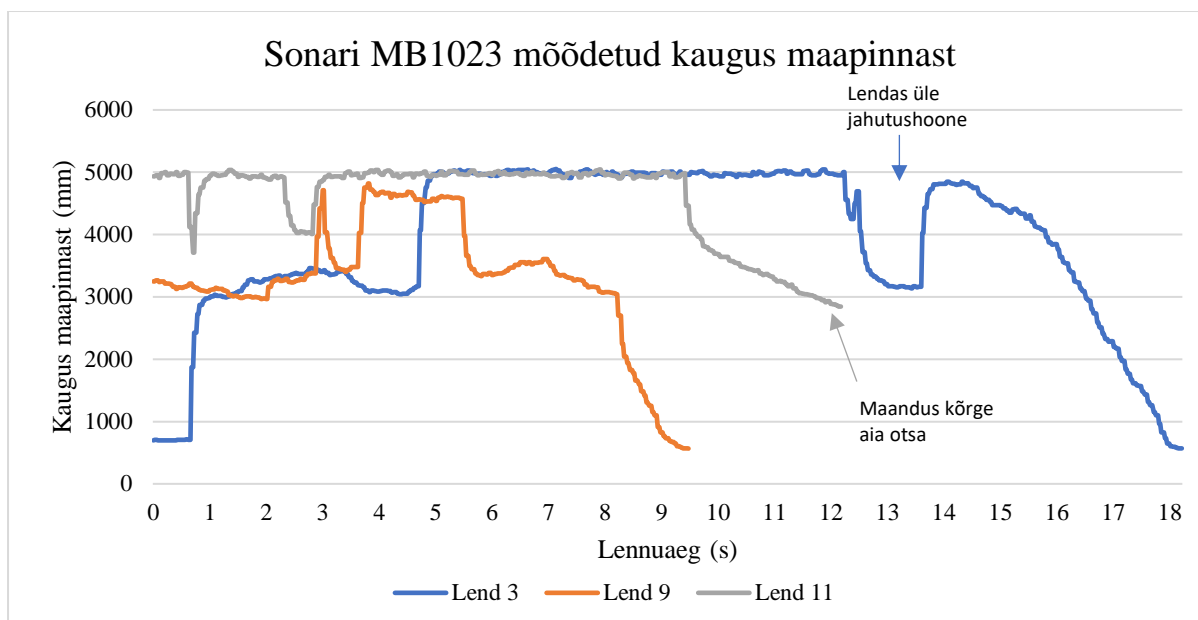
Küllaltki ebatäpseks osutus GPSiga kõrguse mõõtmine. Seda näitasid nii drooniga tehtud testid kui ka langevarjuga tehtud lennud. Esines olukordi, kus katsete jooksul kõrgus ei muutnud või alg- ja/või lõppkõrgus oli ebakorrekne. Maa-ameti kaardirakenduse andmetel on katsepaiga maapinna kõrgus 69 m, mis tehtud katsete puhul peaks tähistama lõppkõrgust. Joonis 27 kujutab nelja katse GPSi kõrguse muutust. Kõigi nelja katse puhul oli GPS-moodul ühendatud vähemalt 6, kuid keskmiselt 9 satelliidiga ning andmete uuendamissagedus oli 5 Hz. Jooniselt on näha, et kahe katse (lend 4 ja 6) puhul on seos seadme langemisega olemas, kuid kõrguse muutus oli liiga väike. Lend number 6 puhul on kõrguse muutus kõige suurem (20,86 m), kuid kõige suurem on ka algkõrgus. Lendude 1 ja 9 puhul ei ole seadme langemist GPSi kõrguse andmetelt näha, vastupidi ootustele on kõrgus pigem suurenenud kui vähenenud. Sellest

lähtuvalt ei saa kasutada GPSi kõrguse andmeid seadme täpseks juhtimiseks. On võimalik, et olukorda aitaks parandada lisaandmete kogumine GPS-moodulist.



Joonis 27. GPSi kõrguse muutumine nelja lennu näitel.

Maapinna kauguse hindamisel võrreldi kahe erineva sonari tööd. Lennud 1 kuni 12 tehti sonariga MaxBotix MB1023 ning lennud 13 kuni 21 sonariga MB1013. Töö käigus otsustati testida kahte sonarit, sest esialgsete katsetulemuste põhjal arvati, et MB1023, millel on suurem mõõtenurk (ingl *beam angle*), on ebatäpsem ning mürasem. MB1023 sonari andmeid on kujutatud joonisel 28. Joonisel on välja toodud kolme lennu andmed. Graafikutelt on näha, et sonari andmetes esineb ebatäpsusi, kuid maandumishetk on kõigil lendudel siiski tuvastatav. Samamoodi saab testide põhjal väita, et maapinna kaugusel alla kolme meetri on sonari andmed piisavalt täpsed, et nende järgi seadet lõpus juhtida. Kolmanda lennu puhul on ka selgelt näha ülelend jahutushoonest ning seejärel sujuv maandumine. Lend numbriga 11 maandus aia otsa, mistõttu jäi tema graafik poolikuks. Samuti on võimalik sonari andmete põhjal teha järeldusi kukkumiskiiruse kohta. Nähtub, et lennul 11 oli kukkumine kõige aeglasem ning lennu 9 puhul kõige kiirem. Nii lennul 9 kui 11 puhul kasutati ka lisaraskust 277 g. Seda tuleb arvestada kukkumiskiiruse võrdlemisel lennuga number kolm. Katsete käigus märgati, et mõningaid ebatäpsusi tekitas viskamise hetkel maja seinast tagasipeegelduv sonari signaal. Selle efekti vältimiseks prooviti valida viskamiseks võimalikult sileda seinaga koht, vältides seejuures näiteks aknalaudu.

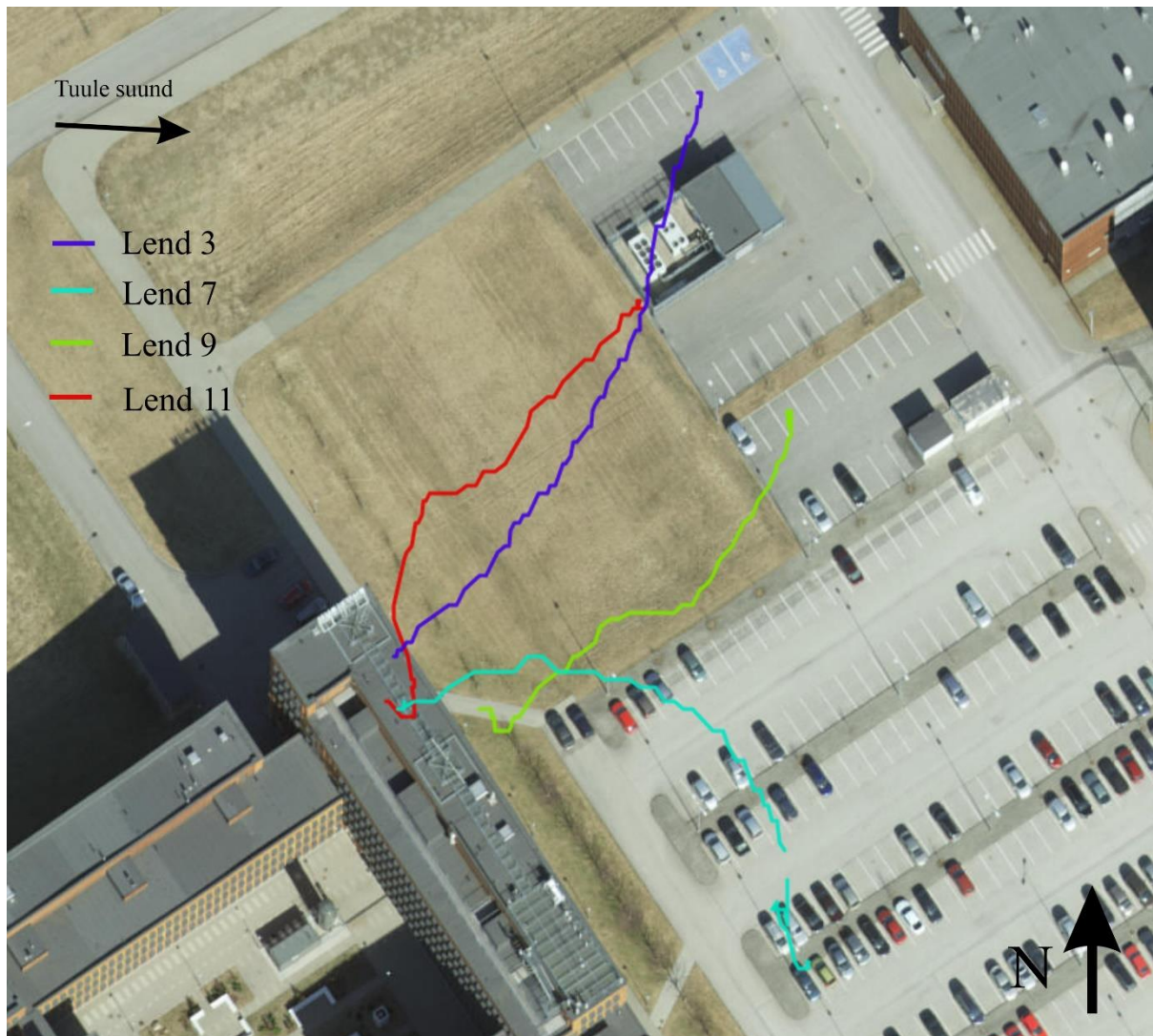


Joonis 28. Sonari MaxMotix MB1023 mõõdetud kaugus maapinnast kolme lennu vältel.

Tehtud katsetest selgus, et sonari MB1013 andmed ei erine oluliselt eelnevalt kirjeldatud sonarist. Leiti, et valminud seadme puhul ei ole oluline, kumba sonarit kasutada. Kokkuvõttes saab öelda, et sonari kasutamisel esineb teatud ebataäpsusi, mistõttu vajaksid need kindlasti edasisi uuringuid.

Kõik joonisel 28 kujutatud lennud on kujutatud ka joonisel 29, kus on võimalik näha GPS koordinaatide abil koostatud seadme lennutrajektoori. Lisaks lendudele 3, 9 ja 11 on lisatud joonisele ka lend 7. Katsete ajal puhus keskmine tuul kiirusega 3,5 m/s ning tuulepuhangud ulatusid kuni kiiruseni 8,5 m/s. Lennu 9 puhul võib tähendada teatud nihet koordinaatides nii põhjalaiust kui ka idapikkust pidi. Ühtlane nihe on olemas olnud kogu lennu vältel, mistõttu lennutrajektor klappib. Põhjust, miks selline nihe tekkis, ei leitud. Kõige suuremat kõrvalekaldumist võib näha lennu 7 puhul. Lende analüüsid tehti järelalus, et nii lend 9 kui ka 11 kalduvad vähem kõrvale, sest on tehtud lisaraskusega, mistõttu mõjutab tuul seadet vähem. Lennu 3 puhul ei kasutatud mingit juhtimisloogikat, vaid sooviti teada, kuidas käitub seade juhtimata langevarjuga. See andis võimaluse edaspidi tuletada, et millised probleemid võivad olla tingitud juhtimisloogikast ja millised ilmastikutingimustest. Katsete analüüsi tehes tõdeti, et suurte tuultega üle 8 m/s, on väga raske valminud seadmega lennata, sest see on väga kergelt mõjutatav tuule puhangutele. Tuule vastupanuvõimet parandas lisatud raskus, kuid selle arvelt väheneb ka läbitav vahemaa. Seda näitavad lendude lauglemisväärtused, kus vastavalt lennule 3 ja 7 on see näitaja 3,25 : 1 ja 2,95 : 1 ning lendude 9 ja 11 puhul vastavalt 2,41 : 1 ja 2,45 : 1. Siinkohal on oluline mainida, et lennu 11 puhul arvutati lauglemisväärtus kuni aeda

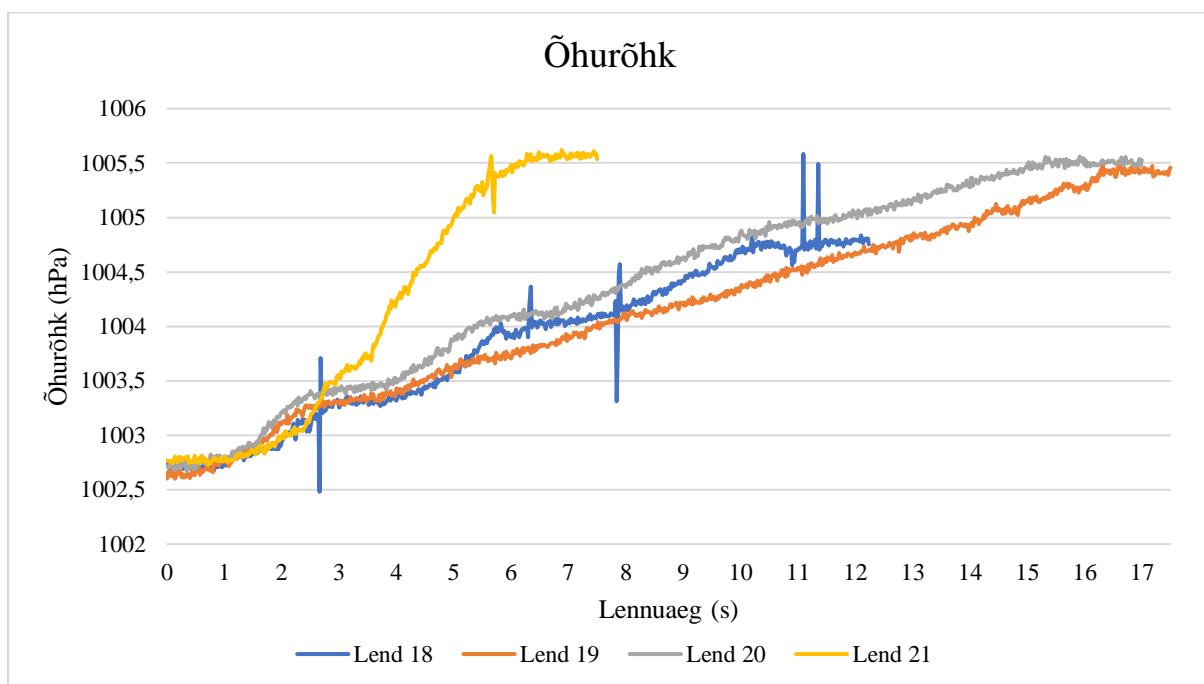
kinnijäämiseni. Tehtud katsetest ning analüüsitud tulemustest saab järeldada, et GPSi koordinaadid jäävad tootja lubatud vea piiridesse ning on piisavalt täpsed, et kasutada seadme juhtimiseks ja jälgimiseks.



Joonis 29. GPSi andmete põhjal koostatud nelja lennu trajektoorid.

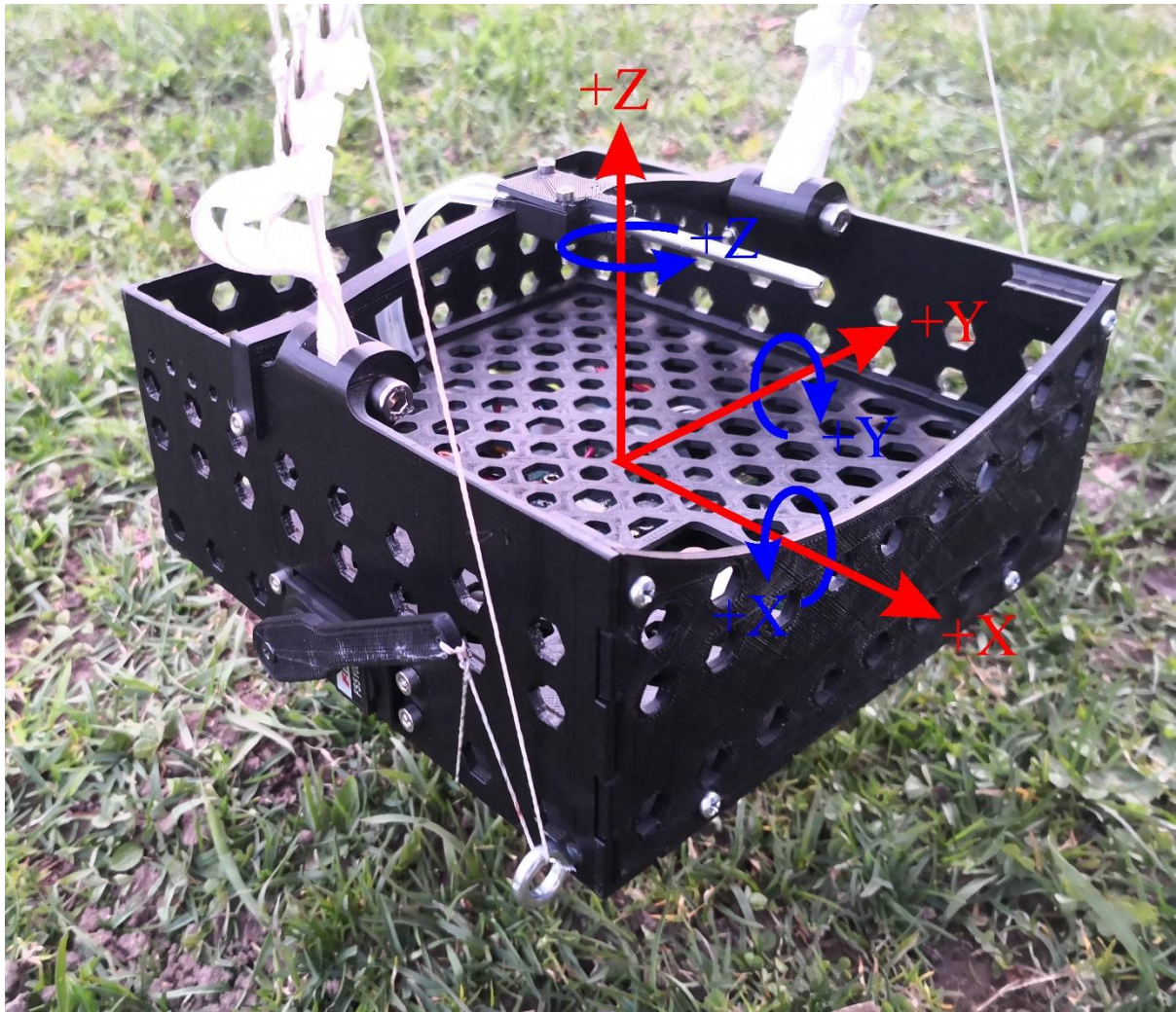
Töö käigus uuriti, kuidas ja kui palju muutub õhurõhk, kui seade Physicumi katuselt alla lennutada, milleks kasutati trükkplaadile paigaldatud absoluutset rõhuandurit. Rõhuanduri paigaldamisel tekkinud jootmisvea tõttu lendudel 1 kuni 12 ühtegi usaldusväärset tulemust ei saadud. Rõhu muutumist kujutab joonis 30, millel on välja toodud nelja lennu rõhuanduri andmed. Rõhuandmete ei rakendata püsivaras filtrit ning samamoodi on graafikul välja toodud töötlemata algandmed. Mõningate lendude juures võib märgata teatud müra olemasolu. Vaatamata sellele on rõhuandmed küllaltki stabiilsed. Lend 18 puhul jäi seade puu otsa kinni, mistõttu tema graafik stabiliseerub oluliselt väiksema rõhu juures kui teiste lendude puhul. Lennu 21 puhul kukkus seade tugeva külgtuule tõttu kiiresti maapinnale. Kõikide lendude

puhul on märgata, et algrõhk jäi vahemikku 1002,6 – 1002,75 hPa. Veel väiksemat erinevust näeb juba maandunud seadme juures, kus rõhk jäi vahemikku 1005,45 – 1005,53 hPa. Seejuures ei võetud arvesse puusse kinni jäänud lendu. Jooniselt on selgelt näha, kus iga lend on langenud kiiremini ning kus aeglasemini. Sarnaselt pitot' toru andmetele on ka õhurõhu graafikult näha langevarju ja seadme omavahelise kõikumise mõju. Sekunditel üks kuni kaks on üldiselt toimunud seadme algkiirendus, mistõttu on seadme kõrgus kiiremini vähenenud, seejuures õhurõhk suurenenud. Sealt järgnevatel sekunditel, kolm kuni viis, on seadme vertikaalne langemine aeglustunud. Sama seadme käitumismuster kordub ka edaspidistel lennu sekunditel. Tehtud testidest ning analüüsides saab järeldada, et õhurõhu andur on vajalik sensor, millega on võimalik määrata nii seadme kõrgust kui käitumist õhus.



Joonis 30. Absoluutse rõhuanduri rõhk nelja lennu vältel.

IMU kiirendusanduri ja güroskoobi telgede paiknemist valminud seadmes kujutab joonis 31. Punasega on joonisel tähistatud kiirendusanduri teljed ning sinisega güroskoobi teljed. IMU on seadmesse paigaldatud nii, et kiirendusanduri x-telg kujutab lennusuunalist kõikumist ning y-telje väärtused külgsuunalist liikumist. Z-telg näitab gravitatsiooni poolt tekitatavaid jõudusid. Güroskoobi andmed annavad võimaluse hinnata, kui kiiresti ning mis suunaline kaldumine või liikumine toimus.

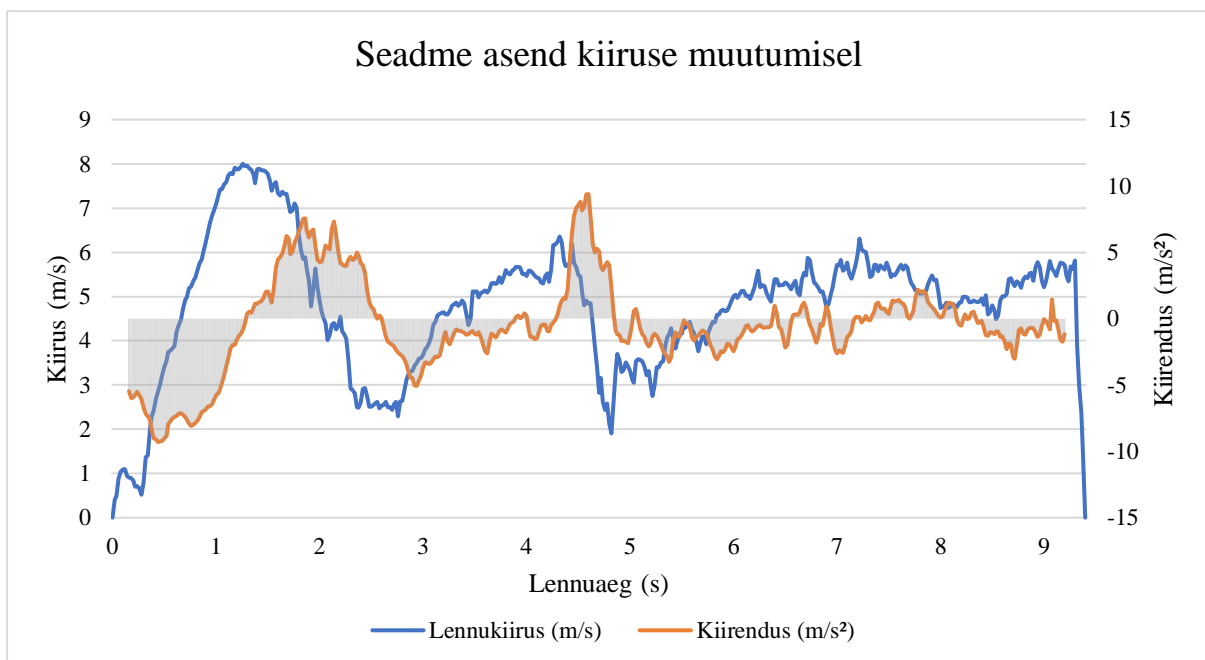


Joonis 31. *IMU teljed valminud seadmes. Punasega on kujutatud kiirendusanduri ning sinisega güroskoobi teljed.*

Testide käigus püstitati hüpotees, et pitot' toru andmetest nähtavaid kõikumisi peaks näha olema ka IMU kiirendusanduri andmetest, mille tõestamiseks tehti joonis 32. Joonisel on kujutatud üheksanda lennu kiirus ning kiirendusanduri abil hinnatud seadme asend. Kiirenduse graafik on mõlemast otsast ära lõigatud, sest andmete silumiseks kasutati libisevat keskmist, mistõttu ei saa kasutada esimesi ega viimaseid tulemusi. Asendi hindamiseks on vajalik teada seadmele mõjuva gravitatsiooni poolt tekitatavat kiirendust. Kuna kiirendusanduri x-telje väärtused sisaldavad nii gravitatsioonist kui ka liikumisest tekkivaid kiirendusi, on vajalik need esmalt üksteisest eraldada. Selle jaoks võeti pitot' toru andmetest tuletis, mis seejärel lahutati kiirendusanduri x-telje väärtustest, mille tulemusel jäi alles ainult gravitatsiooni tekitatav kiirendus (joonisel kujutatud oranžina).

Jooniselt 32 on selgelt näha seos seadme asendi ja kiirenduse vahel. Seadme nina on suunatud maa poole, kui kiirendus on alla nulli ning kui kiirendus on üle nulli, on seadme nina suunatud

taeva poole. Jooniselt on näha, et seadme kiirus hakkas vähenema hetkel, kui gravitatsiooni tekitatav kiirendus tõusis üle nulli. Kui kiirendus langes alla nulli, hakkas seadme lendamiskiirus suurenema. Sekunditel 5 kuni 9 on seadme kiirus aeglaselt suurenenud, kuid seejärel stabiliseerunud keskmiselt kiiruseni 5 – 6 m/s. Samasugust seost on näha ka inertsialanduri güroskoobi tulemustest, kuid nende andmete puhul on seos nõrgem. Güroskoobi andmed näitavad ainult hetkelist nurkkiirust, mistõttu aeglase muutumise korral ei pruugi olla muutus güroskoobi andmetest eristatav. Tehtud testidest järeldus, et kiirendusanduri ning güroskoobi andmed on olulised hindamaks seadme asendit õhus, kuid varisemise võimalikult kiireks tuvastamiseks on vajalik kasutada ka pitot' toru.

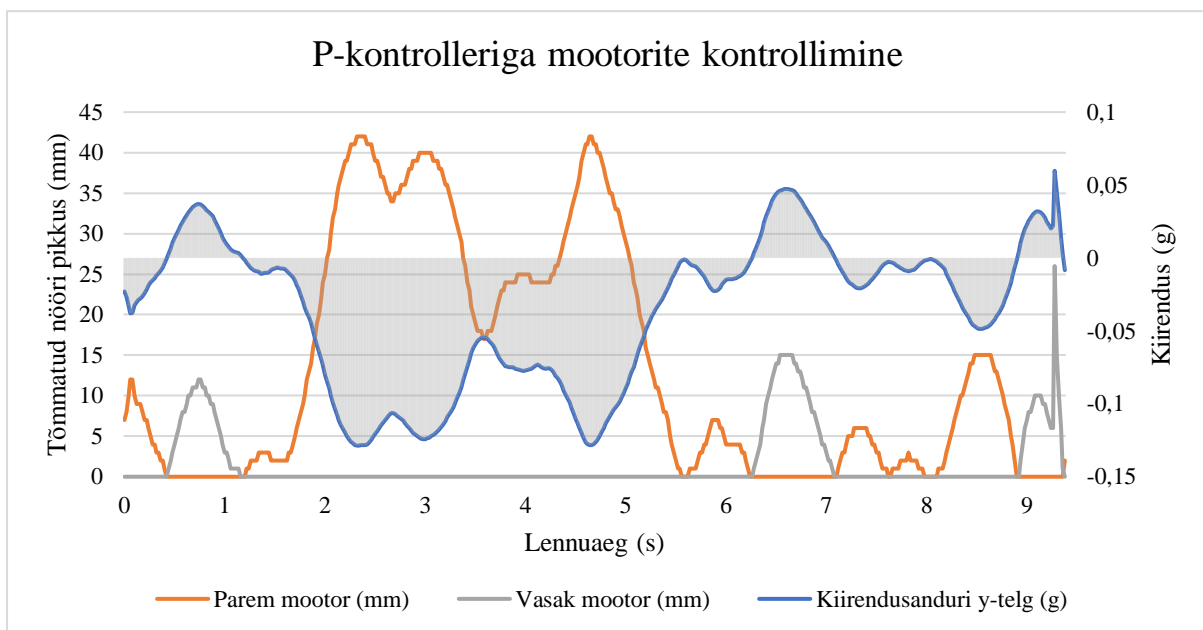


Joonis 32. Kiirendusanduriga hinnatud seadme asendi ning pitot' toru mõõdetud lennukiiruse omavaheline suhe.

Mootorite töö ning langevarju juhtnööride tõmbamise mehaanika testimiseks lennutati seadet nii juhtimata kui ka automaatse juhtimisega. Automaatse juhtimise puhul otsustati kasutada P- ja PID-kontrollerit. Juhtimisloogika ülesanne oli hoida seadet maapinnaga võimalikult paralleelselt. Selle abil loodeti saada tulemus, kus seade lendab lähtepunktist kuni maandumiseni võimalikult sirge trajektooriga. Seadme maaga paralleelsust hinnati kiirendusanduri y-telje väärtuste abil.

Testimisel leiti, et liiga kiire juhtimisviis ei vii soovitud eesmärgini ning kukutab langevarju suurema tõenäosusega kiiremini alla. Seadme kerguse tõttu hakkas seade küljelt küljele otsilleerima, mistõttu ei püsinud langevari enam stabiilsena ning keeras ennast sõlme. Lisaks

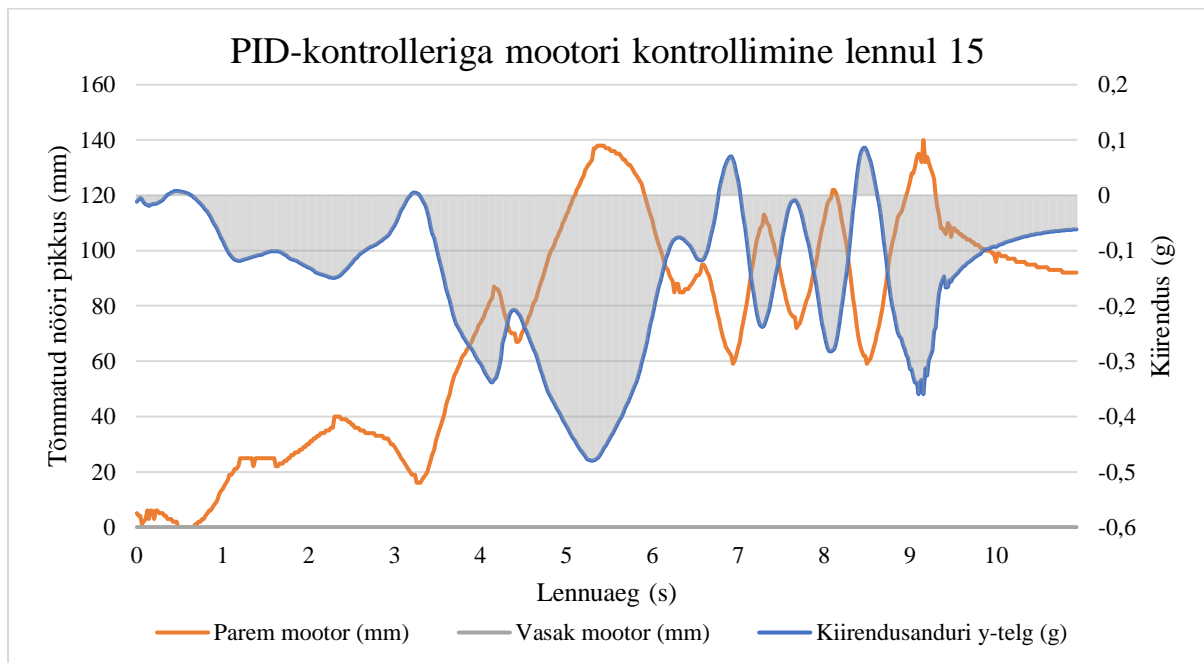
ei jõudnud langevari reageerida seadme poolt tekitavatele kiiretele muutustele. Sellest järeldati, et langevarjul on vaja pikemat aega, et tehtud muutustele reageerida. Olukorda parandati kiirendusanduri filtri tugevdamisega, mistõttu on andmete muutumiskiirus aeglasem, ning langevari suudab seadme tehtavatele muutustele reageerida. Joonisel 33 on välja toodud langevarju juhtnööride tõmmatud pikkused ja kiirendusanduri y-telje andmed, kui mootorite juhtimiseks kasutati P-kontrollerit. Näitlikustamiseks kasutatakse üheksandat lendu. Jooniselt on näha, et lennu keskel ehk sekunditel 2 kuni 5, on seade olnud rohkem ühele poole kaldu, kuid pärast on seadme asend stabiliseerunud. Sellest saab jäeldada, et tõmmatud juhtnööride pikkus oli piisav, et seade suudaks ennast stabiliseerida.



Joonis 33. Mootorite juhtimine P-kontrolleriga kasutades selleks kiirendusanduri y-telge.

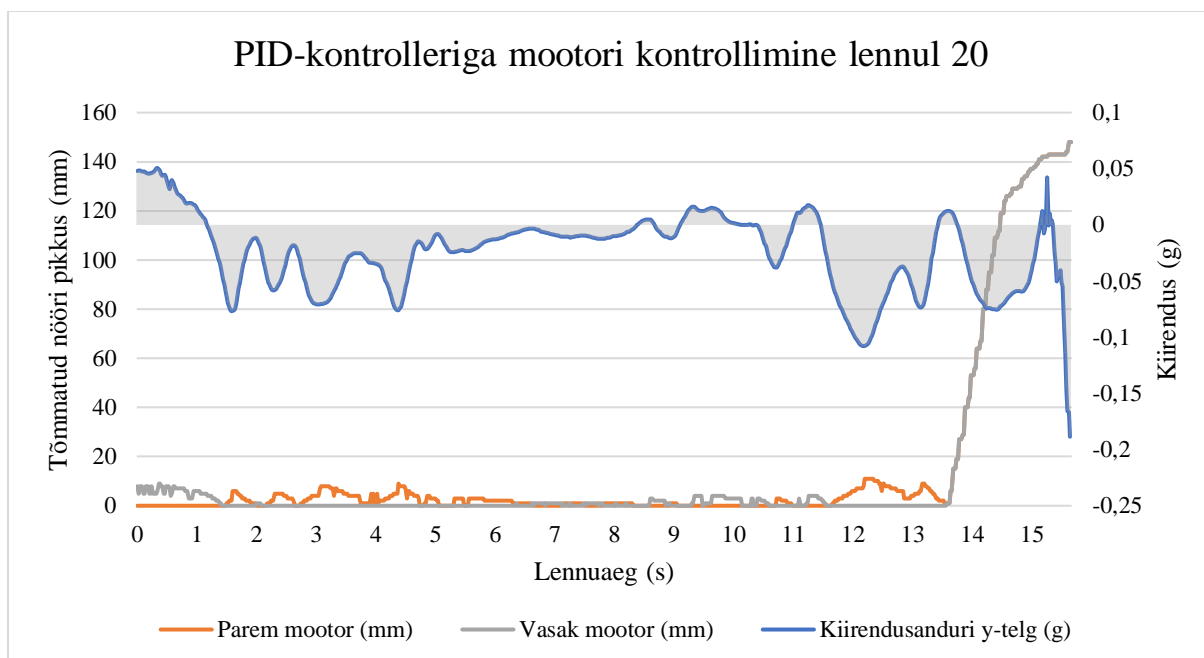
P-kontrolleri põhjal tehtud juhtimisloogika reageerib igale pisikesele muutusele ning mootori tõmmatud nööri pikkus on koguaeg kaldega proportsionaalne. See tähendab, et mootor ei tee lisaliigutusi, et seadet pikaajalisest kalduolekust maaga paralleelsesesse asendisse tuua. Näiteks kui seade on olnud viis sekundit paremale poole kaldu, ei tõmba mootor rohkem nööri, et seadet stabiliseerida, ja hoiab sama asendit edasi. Lähtudes sellest soovist prooviti kasutada PID-kontrollerit. Kontrolleri katsetamisel leiti, et liiga suure integraalkomponendi kordaja kasutamine põhjustab mootorite liigutamisel suurt hilinemist, mistõttu hakkas seade koos langevarjuga õhus poognaid tegema. Joonisel 34 on kujutatud juhtnööride tõmmatud pikkused, kui kasutati juhtimiseks PID-kontrollerit. Joonisel on kujutatud lendu numbriga 15. Lennu keskel, umbes kolmandal sekundil, tabas seadet tugev külgtuul, mistõttu lükati seade viltu. Jooniselt nähtub, et seadme stabiliseerimiseks kasutatud PID-kontroller proovis seadet

maapinnaga paralleelseks tagasi tuua. Selleks tõmbas parema mootoriga juhtnööri kuni 139 mm. See-eest eelnevalt P-kontrolleriga tehtud testidest nähtus, et kui tõmmata nööri rohkem kui 60 mm, hakkab seade küll pöörama, kuid see juures kaotab liialt hoogu, et edasi lennata. Nii video- kui andmeanalüüsi põhjal võib arvata, et sama juhtus ka sel lennu, et peale külgtuule tabamust tõmmati nööri liiga tugevasti, et hoogu säilitada ning langevari hakkas keerlema. Sellise olukorra vältimiseks vähendati juhtimisloogika aktiivsust.



Joonis 34. Mootorite juhtimine PID-kontrolleriga kasutades selleks kiirendusanduri y-telge.

Parandatud PID-kontrolleriga tehtud testid kõikusid palju vähem ning võrreldes P-kontrolleriga tehtud testidest oli suurem ka nende lauglemisväärtus. Joonisel 35 on välja toodud parandatud PID-kontrolleriga lend. Samas peab tõdema, et suuri tuuleiile lennu ajal ei olnud, kuid ühtlane külgtuul, keskmiselt 2,5 m/s oli olemas. Joonisel toodud lennu lauglemisväärtus oli 4,28 : 1. Lennu käigus oli seadmele lisatud lisaraskus 277 g. See tähendab, et sama kaaluga P-kontrolleriga juhitud langevari lendas oluliselt väiksema maa, lauglemisväärtus oli 2,45 : 1. Lennu lõpus prooviti hoogu maha pidurdada, et võimalikult väikese kiirusega maanduda, mida on võimalik näha alates 13,5 sekundist, kus mõlemad mootorid ühtlaselt nööri tõmbama hakkavad. Nööri tõmbamise aluseks on sonari mõõdetud kaugus maapinnast ning pidurdama hakati 2,5 meetri kõrguselt.

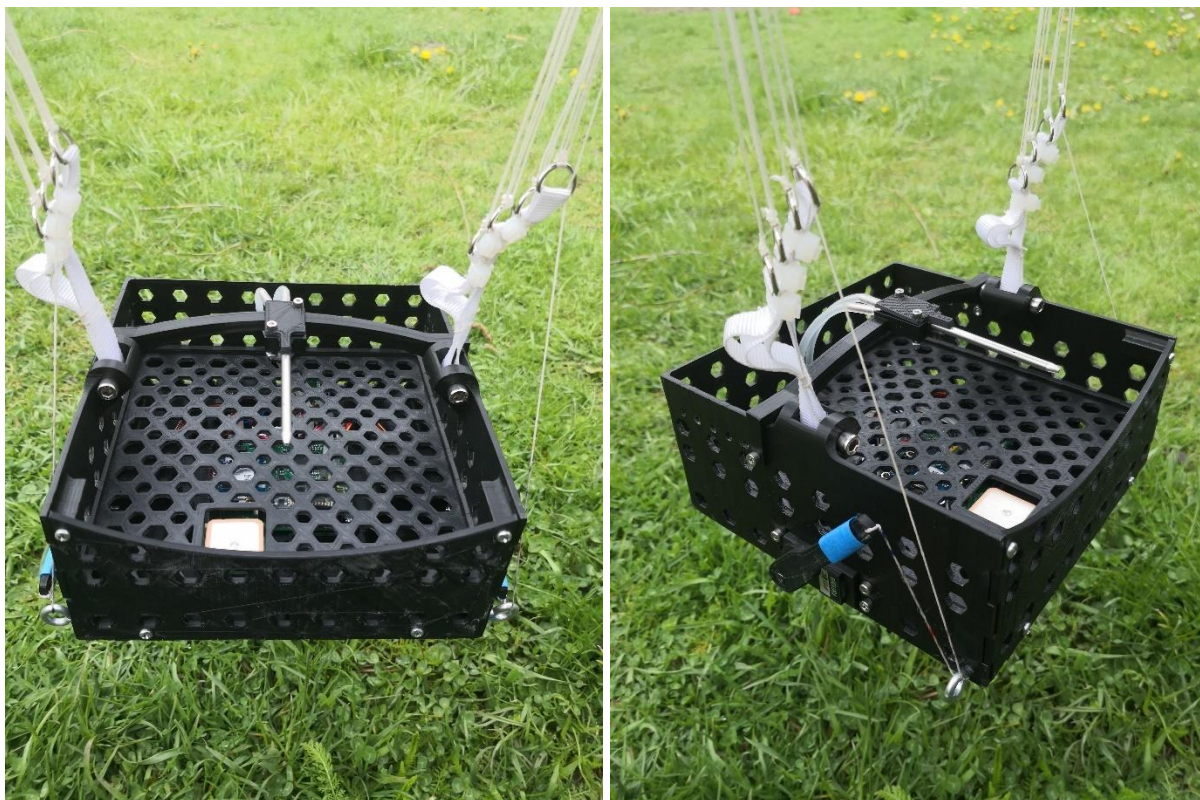


Joonis 35. Mootorite juhtimine parandatud PID-kontrolleriga kasutades selleks kiirendusanduri y-telge. Lend 20.

Tehtud katsete abil tõestati ära, et valmistatud juhtnõõride tõmbamise mehaanika töötab korrektselt ning mootorid omavad piisavalt pikka käiku, et langevarju juhtida. Katsete käigus tuli välja, et erinevatel juhtimisalgoritmidel on erinev mõju lendamisele. Testitud kontrolleritest sai langevarju juhtimisega kõige paremini hakkama PID-kontroller. Samas vajavad mõlemad algoritmid rohkem teste ja parandusi, et lennata täpselt mööda soovitud teekonda.

6 Kokkuvõte

Käesoleva bakalaureusetöö käigus valmis mehitamata langevarju juhtimise jaoks mõeldud arendusplatvorm, mida on kujutatud joonisel 36. Valminud platvorm võimaldab testida nii erinevate andurite kui ka lendamise algoritmide tööd. Andurite testimiseks kirjutatud püsivara on avatud lähtekoodiga.



Joonis 36. *Bakalaureusetöö käigus valminud seade.*

Töö käigus valmistati seadmele sobiv elektroonikalahendus ja 3D-prinditud korpus, millele on võimalik kinnitada sama suurusklassi erinevaid tiiblangevarjusid. Korpuse disainimise puhul pöörati tähelepanu kasutamise mugavusele ning koormate kinnitamise võimalusele. Elektroonikalahenduse väljatöötamisel prooviti leida võimalikult mitmekesine andurite komplekt, mis oleks piisav, et tiiblangevarju juhtida. Valminud trükkplaat võimaldab juhtida kuni nelja servomootorit, mis pakub suuremat arendamisvõimekust tulevikus.

Läbiviidud katsetest selgus, et enamus seadmesse paigaldatud anduritest töötavad nii nagu oodatud ning annavad piisavalt infot, et langevarju juhtida. Erandiks oli GPSi signaali abil kõrguse määramine, mis osutus küllaltki ebatäpseks. Väljatöötatud mehaaniline lahendus ja kasutatud mootorid sobisid langevarju juhtimiseks.

Valminud seadet on võimalik tulevikus kasutada uute teadustööde läbiviimisel ning efektiivsemate lendamise algoritmide väljatöötamisel, näiteks täppismaandumine ja trajektoori planeerimine, arvestades erinevate ilmastikutingimustega. Töö käigus valminud seadet saab kasutada väikeste pakkide või esemete transpordil.

Tänuavaldused

Autor soovib omalt poolt tänada töö juhendajad, kes aitasid teda kogu töö vältel nii füüsiliselt kui vaimselt. Autor võlgneb tänu abilistele, kes aitasid läbi viia teste ning Physicumi personalile, kes lubasid testide jaoks enda maja katust kasutada.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Tüürats".

Viited

- [1] M. Kim and E.T. Matson, “A Cost-Optimization Model in Multi-agent System Routing for Drone Delivery“, *Highlights of Practical Applications of Cyber-Physical Multi-Agent Systems*, **722**, 2017, 40-51, DOI: 10.1007/978-3-319-60285-1_4.
- [2] I. Hong, M. Kuby, A. Murray, “A Deviation Flow Refueling Location Model for Continuous Space: A Commercial Drone Delivery System for Urban Areas“, *Advances in Geocomputation*, 2017, 125-132, DOI: 10.1007/978-3-319-22786-3_12.
- [3] S.M. Shavarni, M.G. Nejad, F. Rismanchian, G. Izbirak, “Application of hierarchical facility location problem for optimization of a drone delivery system: a case study of Amazon prime air in the city of San Francisco“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **95(9-12)**, 2018, 3141-3153, DOI: 10.1007/s00170-017-1363-1.
- [4] O. Yakimenko, V. Dobrokhodov, J. Johnson, I. Kaminer, S. Delliker, R. Benney, “Guidance and control of affordable guided airdrop system“, *IFAC Proceedings Volumes*, **35(1)**, 2002, 13-18, DOI: 10.3182/20020721-6-ES-1901.01228.
- [5] R. Benney, J. Barber, J. McGrath, J. McHugh, G. Noetscher, S. Tavan, “The Joint Precision Airdrop System Advanced Concept Technology Demonstration“, *18th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar*, 2005, DOI: 10.2514/6.2005-1601.
- [6] M. Ward, S. Culpepper, M. Costello, „Parametric Study of Powered Parafoil Flight Dynamics“, *AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference*, 2012, DOI: 10.2514/6.2012-4726.
- [7] Airborne Systems. - FC Mini. <https://airborne-sys.com/product/fc-mini-army-cargo-delivery-parachute/>, 26.10.2019.
- [8] U.S.ARMY. - Joint Precision Airdrop System (JPADS). https://asc.army.mil/web/portfolio-item/cs-css-joint-precision-airdrop-system-jpads/?fbclid=IwAR16U_b84gaIiFDIB1KmKHjMfuD0Ioz3EW3F5TeAeqOAnTcx_mdnJyQtgM, viewed 26.10.2019.
- [9] Opale Paramodels. - RC Skydiver Steven. <https://www.opale-paramodels.com/gb/rc-skydiver/456-rc-skydiver-steven-orange.html>, 26.10.2019.
- [10] Hobbyking. - High Performance Paramotor PNF. https://hobbyking.com/en_us/hobbykingtm-high-performance-paramotor-pnf-2250mm.html?queryID=e56579d0fa73c2764b1f4c8820b98712&objectID=78340&indexName=hbk_live_magento_en_us_products, 29.04.2020.
- [11] T. Wyllie, “Parachute recovery for UAV systems“, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, **73(6)**, 2001, 542-551, DOI: 10.1108/00022660110696696.
- [12] K. Takizawa, T.E. Tezduyar, T. Terahara, „Ram-air parachute structural and fluid mechanics computations with the Space–Time Isogeometric Analysis (ST-IGA)“, *Computers & Fluids*, **141**, 2016, 191-200, DOI: 10.1016/j.compfluid.2016.05.027.

- [13] J. Potvin, „Calculating the descent rate of a round parachute“, *Parks College Parachute Research Group*.
- [14] Rumell. - Class #6: Canopy Control. <http://rumell.net/fpspa4/fpspa/class6.htm>, 29.04.2020.
- [15] H. Babinsky, „How do wings work?“, *Physics Education*, **38(6)**, 2003, 497-503, DOI: 10.1088/0031-9120/38/6/001.
- [16] A. Eslambolchi, H. Johari, „Simulation of Flowfield Around a Ram-Air Personnel Parachute Canopy“, *Journal of Aircraft*, **50(5)**, 2013, 1628-1636, DOI: 10.2514/1.C032169.
- [17] J.A. Stoop, J.L. de Kroes, „Stall shield devices, an innovative approach to stall prevention?“, in *Air Transport and Operations*, R. Curran, L. Fischer, 2012, 55-56, DOI: 10.3233/078-1-61499-199-9-55.
- [18] CircuitDigest. - Servo Motor: Basics, Theory & Working Principle. <https://circuitdigest.com/article/servo-motor-basics>, 29.04.2020.
- [19] A.M. Haidar, C. Benachaiba, M. Zahir, „Software interfacing of servo motor with microcontroller“, *Journal of Electrical Systems*, **9(1)**, 2013, 84-99.
- [20] E.L. Houghton, P.W. Carpenter, S.H. Collicott, D.T. Valentine, „Aerodynamics for Engineering Students 7th Edition“, 2017, 100-103, DOI: 10.1016/B978-0-08-100194-3.00002-X.
- [21] R.A. Robinson, D. Butterfield, D. Curtis, T. Thompson, „Problems with Pitots. Issues with flow measurement in stacks“, 2004.
- [22] A. Cho, J. Kim, S. Lee, C. Kee, „Wind Estimation and Airspeed Calibration using a UAV with a Single-Antenna GPS Receiver and Pitot Tube“, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, **47(1)**, 2011, 109-117, DOI: 10.1109/TAES.2011.5705663.
- [23] T. Jann, M.B. Ward, „Combining Distributed Measurements of Air Data, IMU and GPS for Gliding Parachute Applications“, *AIAA Aviation 2019 Forum*, 2019, DOI: 10.2514/6.2019-3283.
- [24] HobbyKing. - Paraglider Parafoil 1.95m. https://hobbyking.com/en_us/hobbykingr-tm-paraglider-parafoil-1-95m.html 02.05.2020.
- [25] Ultimaker. - Technical data sheet ABS. <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360012759139-Ultimaker-ABS-TDS> 02.05.2020.
- [26] Ultimaker. - Technical data sheet PLA. <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360011962720-Ultimaker-PLA-TDS> 02.05.2020.
- [27] Microchip. - Miniature Single-Cell, Fully Integrated Li-Ion, Li-Polymer Charge Management Controllers. <https://www.mouser.ee/datasheet/2/268/20001984g-846362.pdf> 02.05.2020.
- [28] Maxim. - Low-Power, 1%-Accurate Battery Monitors in μ DFN and SC70 Packages. <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX6775-MAX6781.pdf> 02.05.2020.

- [29] Feetech RC Model Co. - Specification of Product, FS5106B. <https://www.pololu.com/file/0J1432/FS5106B-specs.pdf> 02.05.2020.
- [30] Microchip. - 4.8A ISW, Synchronous Boost Regulator with Bi-Directional Load Disconnect. <http://www.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20005572A.pdf> 02.05.2020.
- [31] TDK InvenSense. - ICM-20948. <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2016/06/DS-000189-ICM-20948-v1.3.pdf> 02.05.2020.
- [32] u-blox. - NEO-6, u-blox 6 GPS Modules. https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_%28GPS.G6-HW-09005%29.pdf 02.05.2020.
- [33] MaxBotix. - HRLV-MaxSonar® - EZ™ Series. https://www.maxbotix.com/documents/HRLV-MaxSonar-EZ_Datasheet.pdf 02.05.2020.
- [34] STMicroelectronics. - LPS22HB, MEMS nano pressure sensor: 260-1260 hPa absolute digital output barometer. <https://www.st.com/resource/en/datasheet/dm00140895.pdf> 02.05.2020.
- [35] Silicon Microstructures. - SM9333/SM9336 Series Differential Pressure Sensors. https://www.mouser.ee/datasheet/2/589/Datasheet_SM9333_SM9336-1317493.pdf 02.05.2020.
- [36] Atmel. - 8/16-bit Atmel XMEGA A3U Microcontroller ATxmega256A3U / ATxmega192A3U / ATxmega128A3U / ATxmega64A3U. http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/atmel-8386-8-and-16-bit-avr-microcontroller-atxmega64a3u-128a3u-192a3u-256a3u_datasheet.pdf 02.05.2020.
- [37] STMicroelectronics. - M95M02-A125, Automotive 2 Mbit serial SPI bus EEPROM. <https://www.st.com/resource/en/datasheet/m95m02-a125.pdf> 02.05.2020.
- [38] u-blox. - u-blox 6 Receiver Description, Including Protocol Specification. https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/u-blox6_ReceiverDescrProtSpec_%28GPS.G6-SW-10018%29_Public.pdf?utm_source=en%2Fimages%2Fdownloads%2FProduct_Docs%2Fu-blox6_ReceiverDescriptionProtocolSpec_%28GPS.G6-SW-10018%29.pdf 02.05.2020.
- [39] J. Gwon, H. Kim, H. Bae, S. Lee, "Path Planning of a Sweeping Robot Based on Path Estimation of a Curling Stone Using Sensor Fusion", *Electronics*, **9(3)**, 2020, 458, DOI: 10.3390/electronics9030457.

Lisad

Lisa 1. GitHub link vabavaraliste failidele ligipääsemiseks:

<https://github.com/TiiratsT/UnMannedParachuteController>

Lisa 2. Lõputööga on koos üles laetud .zip fail, mis sisaldab:

- 1) valminud trükkplaadi dokumentatsiooni .pdf-kujul;
- 2) valminud trükkplaadi Altium Designer projekti faile.

Lisa 3. Lõputööga on koos üles laetud .zip fail, mis sisaldab valminud seadme püsivara.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Timo Tiirats,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose

„Mehitamata langevarjule arendusplatvormi loomine“,

mille juhendajad on Artur Abels ja Andres Moks,

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Timo Tiirats

Tartus, 20.05.2020