

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Infotehnoloogia teaduskond
Thomas Johann Seebecki elektroonikainstituut

IEE40LT

Alexander Raldugin, 134736IALB

MEHITAMATA LENNUK RASPBERRY PI JA NAVIO BAASIL - AUTOPILOOT JA SENSORID

bakalaureusetöö

Juhendaja: Rauno Gordon
PhD
Vanemteadur

Tallinn 2016

Autorideklaratsioon

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Autor: Alexander Raldugin

27.05.2016

Annotatsioon

Selle lõputöö eesmärk on ehitada mehitamata lennuk (droon), mis oleks võimeline lendama käsitsi maa pealt juhtides kui ka automaatselt ettemääratud programmi täites.

See lennuk peab kasutama Raspberry Pi mudel 2 kontrolleri koos Navio shield'iga, maapealse kasutajaga peab ta sidet 3G-võrgu kaudu. Lennukil peavad olema paigaldatud põhiparameetreid (nt. kiirus, kõrgus, aku pinge ja voolu tarbimine) jälgivad sensorid. Osa nendest sensoritest on juba Navio sees ja vajavad ainult seadistamist ja kalibreerimist, muud on eraldi paigaldatud.

Lennuk peab suutma nende sensorite andmeid kasutada selleks, et õhus navigeerida. Selleks on ka vaja seadistada autopiloot. Autopiloodiks on kasutatud ArduPlane tarkvara, mis on seadistatud kasutatava riistvara ja lennukikere jaoks. Maapealseks juhtimiseks kasutatakse Mission Planner tarkvara.

Mina keskendun selle töö jooksul sensorite ja autopiloodi seadistamisele, Andres Liba oma lõputöös tegeleb side ja telemeetriaga.

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab teksti 40 leheküljel, 4 peatükki, 12 joonist, 5 tabelit.

Abstract

Unmanned plane using Raspberry Pi 2 and Navio - autopilot and sensors

The objective of this thesis is to build an unmanned plane, which should be capable of controlled flight from the ground station, as well as fully autonomous flight according to its preset program.

This plane should be using Raspberry Pi 2 controller with Navio shield. Communication with the ground station is maintained using the 3G-network. Plane should have on-board sensors for watching the most important flight and hardware parameters (like airspeed, altitude, battery voltage and consumed current). Some of these sensors are part of the Navio shield, like barometer, compass and GPS. Others should be installed separately.

The plane should be capable of taking all these parameters into account for navigation purposes, as well as monitoring the hardware status. For autonomous and assisted flight the plane requires a corresponding software, which is ArduPlane. Ground station uses Mission Planner software to control the airplane.

Autopilot is configured by changing PID values. The behaviour of the plane can be controlled by setting specific commands, which the plane should follow.

My task during this thesis will be to install and configure sensors, ensure correct work of flight surfaces and configure the autopilot. Andres Liba will take the communication and telemetry part in his thesis.

The thesis is in Estonian and contains 40 pages of text, 4 chapters, 12 figures, 5 tables.

Lühendite ja mõistete sõnastik

UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i> , ehk mehitamata õhusõiduk
droon	mehitamata sõiduk
kopter	helikopter, traditsiooniline kui ka mitme propelleritega, ehk "nelikopter", ja muud
AOA	<i>Angle Of Attack</i> , ehk rüнденurk
ESC	<i>Electronic Speed Controller</i> , ehk elektriline kiiruskontroller
Throttle	Siin tähendab see nõutava mootori pöörlemiskiirust, mis seadistab kasutaja. Ehk "Full throttle" tähendab, et mootor töötab tippkiirusega ja "No throttle" - et mootor on välja lülitatud
LiPo	<i>Lithium Polymer</i> , ehk liitiumpolümeer
I/O, IO	<i>Input-Output</i> , ehk andmete sisend-väljund
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> , ehk Pulsi laius modulatsioon
ADC	<i>Analog-Digital Converter</i> , ehk Analoog-digitaalmuundur
AS	<i>Airspeed</i> , ehk Õhukiirus, kiirus õhuvoo suhtes
GS	<i>Ground speed</i> , ehk kiirus maa suhtes
IR	<i>Infrared-</i> , ehk infrapuna-
PID	<i>proportional-integral-derivative</i>
AHRS	<i>Attitude Heading and Reference System</i> , ehk Orientatsiooni ja Suunamise Referentssüsteem
EKF	<i>Extended Kalman filter</i> , ehk Täiendatud Kalmani filter

Sisukord

1	Sissejuhatus.....	10
2	Lennuki taust.....	12
2.1	Lennuki Teooria [1]	12
2.1.1	Aerodünaamilise lennu põhimõtte.....	12
2.1.2	Lennuki eripärad.....	13
2.1.3	Tõstejõud, rüнденurk, varisemine.....	13
2.1.4	Lennuki juhtimisseadmestik [2]	13
2.2	Lennuki kere omaduste määramine.....	14
2.2.1	Kere materjal.....	14
2.2.2	Mootor.....	14
2.2.3	Valmislennuk või KIT.....	15
2.3	Lennuki kere ja ristvara.....	15
2.3.1	Kere.....	15
2.3.2	Juhtimisseadmestik.....	15
2.3.3	Mootor ja jõuelektroonika.....	16
2.3.4	Aku ja Tühjakslaadimiskiirus [4]	17
2.4	Kontroller ja muu lennuelektroonika.....	17
2.4.1	Raspberry Pi 2.....	17
2.4.2	3G-modem ja kaamera.....	18
2.4.3	Navio.....	18
2.4.4	Toide [5]	18
2.4.5	Välised sensorid.....	19
2.5	Tarkvara.....	19
3	Andurid ja mõõtmised.....	21
3.1	Navios sisseehitatud sensorid.....	21
3.1.1	Kompass, kiirendusmõõtur, güroskoop [6]	21
3.1.2	Kõrgusmõõtur [7] [8]	22
3.2	Õhukiiruse andur.....	24

3.2.1	<u>Õhukiiruse mõõtuuri põhimõtte [9]</u>	24
3.2.2	<u>Õhukiiruse mõõtuuri paigaldus ja ühilduvus</u>	25
3.2.3	<u>Kalibreerimine</u>	25
3.3	<u>Infrapunane kõrgusmõõtur</u>	25
3.3.1	<u>Kõrgusanduri tööpõhimõtte [10]</u>	26
3.3.2	<u>Kõrgusmõõtuuri paigaldus ja ühilduvus</u>	26
3.3.3	<u>Kalibreerimine ja seadistamine</u>	26
3.3.4	<u>Katsed</u>	28
3.4	<u>Toidejälgimisseade (Power monitor)</u>	29
3.4.1	<u>Pinge mõõtmine</u>	29
3.4.2	<u>Pingemõõtuuri kalibreerimine ja katsetamine</u>	30
3.4.3	<u>Voolu mõõtmine</u>	31
4	<u>Autopiloot</u>	34
4.1	<u>Autopiloodi teooria [14]</u>	34
4.1.1	<u>Proportional</u>	34
4.1.2	<u>Integral</u>	35
4.1.3	<u>Differential</u>	35
4.1.4	<u>Summa</u>	35
4.2	<u>Lennuki orientatsiooni määramine</u>	35
4.2.1	<u>AHRS</u>	36
4.2.2	<u>EKF [16]</u>	36
4.3	<u>Autopiloodi režiimid [15]</u>	36
5	<u>Kokkuvõte</u>	38
	<u>Kasutatud kirjandus</u>	39
	<u>Lisa 1 – Lennuki fotod</u>	41

Jooniste loetelu

Joonis 1: Ründenurga seletus [1]	13
Joonis 2: Servode juhtiv signaal.....	16
Joonis 3: Juhtiva signaali impulss.....	16
Joonis 4: Navio ja selle pordid [5]	19
Joonis 5: Pitot toru ja õhukiiruse leidmine [9]	24
Joonis 6: IR kaugusmõõduri tööpõhimõtte [10]	26
Joonis 7: Sharp 2Y0A02 graafik [12]	27
Joonis 8: Kauguse ja pinge mõõdetud seos.....	28
Joonis 9: INA1x9 tüüprakenduse skeem [13]	32
Joonis 10: Lennuk (kokku pandud).....	41
Joonis 11: Õhukiiruse mõõtur.....	41
Joonis 12: Kõrgusandur.....	41

Tabelite loetelu

Tabel 1: Temperatuuri mõõtmiste tulemused.....	23
Tabel 2: Kõrgusanduri katsetamise tulemused.....	27
Tabel 3: Kauguse mõõtmiste tulemused.....	28
Tabel 4: Pinge mõõtmised.....	30
Tabel 5: Voolu mõõtmised.....	32

1 Sissejuhatus

Mehitamata õhusõidukid (*Unmanned Aerial Vehicles*) on lennukid ja muud lennuvõimelised masinad, mis ei vaja inimest pardal, et sõidukit juhtida, see eristab neid mehitatud õhusõidukitest. Samal ajal, nad on piisavalt suured ja võimekad, et suuta teha mingi kasulikku tööd, mis eristab neid juba raadiojuhtivatest mänguasjadest. Samuti, *UAV* all ei mõisteta tavapäraselt meteoroloogilisi õhupalle ja muid selliseid õhusõidukeid.

UAVd olid juba ammu kasutuses sõjaliste eesmärkide täitmisel, kuid tsiviilkasutusse nad jõudsid alles viimaste aastate jooksul, kui tehnoloogiline areng lubas tavainimestel ja ettevõtetel kasutada selliseid lahendusi nagu kompaktsed, kuid mahukad akud, võimsad elektrimootorid, pisiprotsessorid ja mikrokontrollerid, mis ei tarbi suurt voolu, aga on samal ajal piisavalt kiired ja stabiilsed, et reaajas teha vajalikke arvutusi eduka lendu jaoks.

Tänapäeval on mehitamata sõidukite rakenduste ala peaaegu piiramatult. Nad töötavad nii kommerts- kui ka militaarvaldkonnas. Peale seda, on "droonide" ehitamine ja õhku laskmine muutunud ka populaarseks ajaviitmiseks ümber kogu maailma. Neid ehitatakse ka mudellennukite, sportsõidukite kui ka videoplatvormidena ja materjalid varieeruvad paberist teraseni. Droonide ehituseks pakutakse peaaegu lõpmatu arv komponente igale maitsele, oleks see süsinakraam multikopteri jaoks või ülivõimas, kerge ja väike bensiinimootor.

Kõige levinumad UAV tüübid on helikopterid, multikopterid (ehk helikopterid, kus on kasutusel kolm või rohkem propelleri, tavaliselt sümmeetriliselt paigaldatud), ja lennukid. Selle lõputöö raames on tegu mehitamata lennuki ehitusega.

Lennukitel on võrreldes teiste UAV liikidega omad eelised kui ka puudused. Nad ei saa nii kergelt manööverdada, kui kopterid ja vajavad palju rohkem ruumi. Seetõttu ei sobi nad eriti hästi linnakeskkonda. Võrreldes multikopteritega vajavad nad rohkem oskusi ja lennupõhimõtete tundmist, et ohutult lennata. Aga samal ajal, nende omadused lasevad

neid kasutada sellistes tingimustes, kuhu teised sõidukid ei sobi. Näiteks, lennuk on oma tööpõhimõtte tõttu teistest tüüpidest energeetiliselt palju efektiivsem. Ehk sama aku suurusega saab lennuk kauem ja kaugemale lennata, mis laseb nende kaalu madalamaks hoida. Samuti, nad on tavapäraselt kiiremad, kui kopterid, ja võivad kõrgemale lennata. Lõpuks, lennuk ei vaja nii palju komponente, kui, näiteks, nelikopter, mis teeb selle hinna madalamaks.

Mehitamata lennukid võivad ka oma omaduste järgi erineda. Kõige lihtsam näidis on raadioteel juhitud lennuk, mis ei sisalda mingeid elektroonilise stabilisatsioonsüsteeme, ja oskab ainult inimese juhtimise all lennata. Selle lõputöö eesmärk on aga sellise lennuki ehitus, mis saaks lennata mitte ainult inimese kontrolli all, vaid ka täiesti automaatselt, ettemääratud programmiga kooskõlas.

Sellise lennuki ehitamisel on tähtis, et lennuk saaks maapealse jaamaga (see võib olla lihtsalt sulearvuti) sidet pidama võimalikult kaugelt, ning teaks oma asukohta, lennuparameetreid ja keskkonna omadusi. Side kanaliga, telemetria ja videoedastusega tegeleb oma töös Andres Liba, kuid minu töö on pühendanud peamiselt sensoritele ja autopiloodi seadistamisele.

2 Lennuki taust

Siin on seletatud üldpõhimõtted, mis on seotud lennukiga, lennuki ehituse ja üldkomponentidega. See osa katab seda tööd, mis sai tehtud grupitööna ja mis on seotud nii minu kui ka Andresi poolt tehtud tööga.

2.1 Lennuki Teooria [1]

Siin on seletatud põhiprintsiibid, mille järgi lennuk õhus liigub ja nendega seotud nõudmised lennukile.

2.1.1 Aerodünaamilise lennu põhimõtte

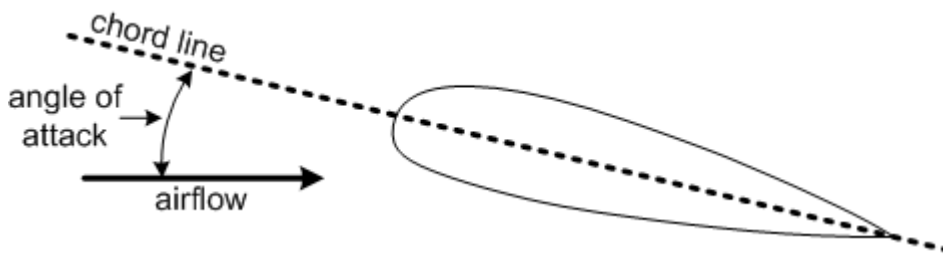
Lennuk on õhust raskem õhusõiduk. See tähendab, et õhust kergemate õhusõidukitega (näiteks, õhupallid ja dirižaablid) võrreldes hoiavad lennukit õhus mitte aerostaatilised (nt. Archimedese seadus), vaid aerodünaamilised seadused. Nendel õhusõidukitel, mis on õhust raskemad, peab õhus sõiduki õhus hoidmiseks tekkima tõstejõud.

Tõstejõudu võib kirjeldada kahe efektidega, need on Bernoulli seadus ja õhuvoo suunamine allpoole.

Bernoulli seaduse järgi, õhu (üldjuhul ka gaasi või vedeliku) kiiruse tõstmine langetab selle rõhku. Seoses tiiva või helikopteri propelleri ehitusega, kus ülemine pindala on tavaliselt suurem, kui alumine, peab õhuvoo läbima sama aja jooksul suurema vahemaa. Seetõttu tekkib rõhkude vahe, mis omakorda tekitab tõstejõu.

Teine faktor on inglise keeles nimetatud Ram Air. Kuna lennuki tiib on õhuvoo suhtes kallutatud, suunab tiib õhu kaldenurga suunas ehk tekitab nn. "*downwash*", õhk liigub allapoole, ja Newtoni 3. seaduse järgi tekib tõstejõud.

Seda kaldenurka nimetatakse "ründenurgaks" (inglise keeles *angle of attack*).



Joonis 1: Ründenurga seletus [1]

2.1.2 Lennuki eripärad

Eelnevalt peaks olema nähtav, et aerodünaamiline lend nõuab kandepinna kiirust, et antud efektid võiksid tekkida. Helikoptides ja autožiirodes on kandvaks pinnaks rootori laba, mis helikopteri juhul pöörleb mootori abil, ja autožiiros tekitab pöörlemist sissetulev õhuvoog.

Lennukil on tavaliselt tiib fikseeritud ja ei ole suuteline ise pöörlema, ehk mingi tõstejõud tekitada omapoolt. Seetõttu võib lennukil tekkida tõstejõud ainult siis, kui lennuk ise liigub õhu suhtes. See õhusuhteline kiirus on nimetatud õhukiiruseks (ingl. *airspeed*).

2.1.3 Tõstejõud, ründenurk, varisemine

Tõstejõu määrab ka õhukiirus, kui ründenurk. Sümmeetrilise tiiva puhul ja siis kui ründenurk on 0, ei teki tõstejõudu, kiirusest sõltumata.

Tõstejõud kasvab koos ründenurgaga, aga ainult teatud piirini, mis on tiiva omadustega seotud. Seda piiri nimetatakse "kriitiliseks ründenurgaks". Selle nurga saavutamisel langeb tõstejõud kohe ja tõuseb õhutakistus. Tekkib efekt, mida nimetatakse varisemiseks (inglise keeles *stall*).

Varisemine tavaliselt tekib sel juhul, kui lennuki kiirus on liiga madal kõrguse hoidmiseks või siis kui lennuki kaldenurk horisondi suhtes on liiga kõrge.

2.1.4 Lennuki juhtimisseadmestik [2]

Klassikalises lennukis on tavaliselt olemas järgmised seadmed ehk juhtivad pinnad:

1. Eleroonid ehk kaldtüürid (ingl. *ailerons*)
2. Kõrgustüür (ingl. *elevator*)
3. Rool ehk tüür (ingl. *rudder*)
4. Tagatiivad (ingl. *flaps*)

Eleroonid kontrollivad lennuki kaldenurka. Kui üks kaldtüür liigub üles, siis läheb see tiib allapoole ja seetõttu hakkab lennuk sellele poole kalduma. Vastandtiival kaldub kõrgustüür allapoole ja see tiib liigub ülesse.

Kõrgustüür juhib lennuki kallakut ehk kas lennuki nina kaldub alla või üles. Kui kõrgustüür kaldub allapoole, siis tõuseb lennuki saba, mis tähendab, et nina hakkab alla poole suunduma.

Rool töötab samal printsiibil, kui eleroonid või kõrgustüür, aga juhib lennuki pöörlemist paremale või vasakule.

Tagatiivad on mõeldud selleks, et kasvatada tõstejõudu, mis aitab liikuda madalamal kiirusel, näiteks, maandumise jooksul. Samal ajal nad tõstavad õhutakistust.

2.2 Lennuki kere omaduste määramine

Kuna lennukite valik on üsna suur on mõistlik valida just selline lennuk, mis antud eesmärgiks kõige paremini sobiks.

2.2.1 Kere materjal

Lennukite ehitamiseks pakutakse erinevaid materjale, näiteks, kihtpuitu, alumiiniumi, vaha. Vahakere ei ole nii vastupidav, kui muud, aga on paindlik ja talub kukkumisi paremini. Lisaks on see väga kerge ja odav.

2.2.2 Mootor

On olemas erinevad mootorid, näiteks, *brushless* elektrimootorid, bensiinimootorid ja isegi reaktiivmootorid. Nende arv võib ka vahelduma, aga kõige sagedamad on ühe

elektrimootoriga lennukid, need on kõige lihtsamad ka paigalduses, teeninduses ja juhtimises. Samuti, vahast kere jaoks on see kõige optimaalsem valik.

2.2.3 Valmislennuk või KIT

Turul pakutakse ka valmismudelid, mis tuleb ainult kokku panna kui ka erinevaid komplekte, kus võivad puududa mõned osad, mis tuleb ise otsida ja kokku ühendada.

2.3 Lennuki kere ja ristvara

Lõputöö tegemiseks oli tellitud HobbyKing poest lennuki mudel Mini Skyhunter [3] .

2.3.1 Kere

See on vahaplastist tehtud lennuk ühe elektrimootoriga ja tiibade siruulatusega 1,2m. Lennukil puudub telik, selle asemel visatakse ta õhku käe abil (nn. *hand launch*) ja maandutakse muru või muu pehme pinna peale. Lennuk on mõeldud tõukepropelleri kasutamiseks.

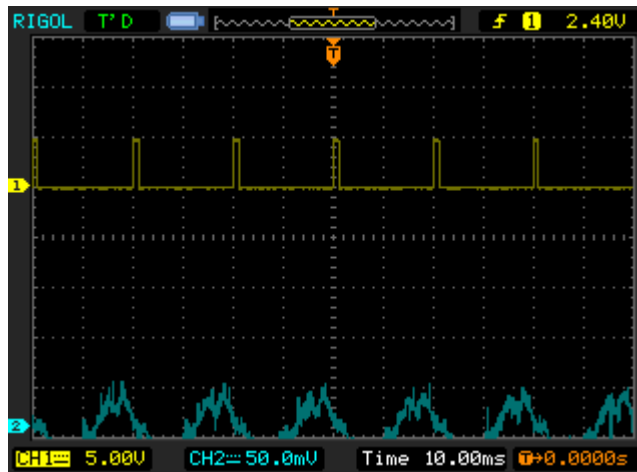
2.3.2 Juhtimisseadmestik

Sellel lennukil puuduvad rool ja tagatiivad. Lennuk on kontrollitav eleroonide ja kõrgustüüri abil.

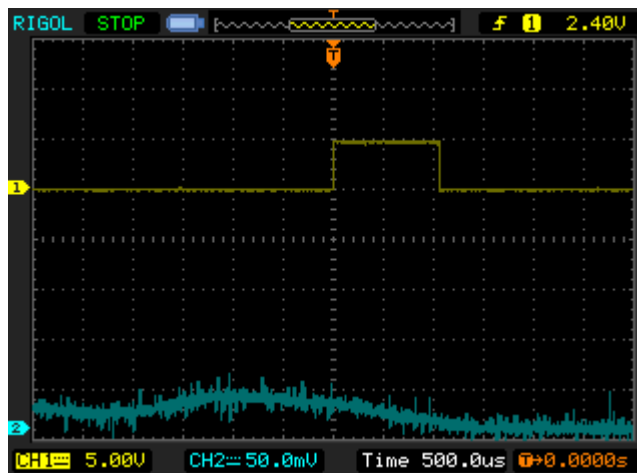
Tüürid on juhitavad servode abil. Lennukil on paigaldatud kokku 3 servot. Kaks nendest on eleroonide juhtimiseks, üks kontrollib kõrgustüüri.

Servomootor on selline mootor, mis saab asukohta täpselt seadistada juhtimissignaali abil. Selle sees on oma kontrollier ja asukoha andur. Servot saab kontrollida mingi määratud piirkonna sees. Antud lennukil kasutatud servod lubavad tüüride liikumist nurgaga umbes 45 kraadi.

Juhtimissignaali on impulsside jada, mis tuleb servo peale kontrolljuhtme kaudu. Impulsside vaheline aeg on 10ms, impulsi pikkus määrab servo positsiooni ja võib varieeruda antud lennuki juhul alates 1ms kuni 2ms. Keskpunkti määrab 1.5ms pikkusega signaal. Signaali amplituud on 5V.



Joonis 2: Servode juhtiv signaal



Joonis 3: Juhtiva signaali impulss

2.3.3 Mootor ja jõuelektroonika

Lennukile on paigaldatud üks tõukurpropelleriga vahelduva voolu elektrimootor. Mootori juhtimise eest vastutab 30-ampriline ESC, mis oli lennukiga komplektis kaasas.

ESC ehk *Electronic Speed Controller*, on seade, mis muudab aku alalisvoolu teatud sagedusega vahelduvvooluks, mis toidab mootorit. Kuna mootor ise on sünkroonmootor, sõltub selle pöörlemiskiirus voolu sagedusest. ESC on kontrollitav juhtivsignaaliga, mis on sarnane servode signaaliga, ehk 1ms tähendab, et mootor on välja lülitatud ("No throttle") ja 2ms tähendab, et mootor töötab täie kiirusega.

2.3.4 Aku ja Tühjakslaadimise kiirus [4]

Mootori ja teise elektroonika tarbimiseks on lennukil installitud 3300mAh LiPo aku. Aku oli vaja eraldi otsida ja osta, sest komplektis seda ei olnud. Aku oli ostetud samuti HobbyKingist. Aku ostmisel oli tähtis jälgida mitte ainult selle mahtuvust, aga ka pinget ja, kuna tegu on lennukiga siis ka kaalu.

Selle aku nominaalpinge on 11.1V (kolm elemente järjestikku, iga LiPo elemendi pinge on 3.7V). Aku tühjakslaadimise kiirus (*Discharge Rate, C-Rate*) on 20-30C.

C-Rate näitab, kui kiiresti saab aku maha laadida. Kui aku on 20C, siis võib ta tühjaks laadida 1/20 tunni (3 min) jooksul. Kui tegemist on 3300mAh ehk 3,3Ah-akuga, siis maksimumvool saab tõusta kuni $3,3\text{Ah}/(1/20\text{h}) = 66\text{A}$. Kuna lennukil on paigaldatud 30A ESC, siis selle aku tühjakslaadimise kiirus on piisav.

Kui aku on täiesti laetud, siis on selle pinge umbes 12,6V (4,2V elemendi kohta). Pinge ei tohi minna alla 3,3V, sest nii võib akut kahjustada. Samuti ei tohi aku temperatuur kasvada liiga kõrgeks.

2.4 Kontroller ja muu lennuelektroonika

Selleks, et tagada soovitud funktsionaalsus, oli lennukile paigaldatud meie poolt Raspberry Pi 2 kontroller ja muu autonoomse lennu jaoks vajalik seadmestik. Tavaliselt ostetakse lennuki jaoks ka raadiovastuvõtjad, millega saab piloodi käskusid kontrollerisse või servodesse edastada, aga kuna meil oli plaanis kasutada 3G võrgustiku, seda me otsustasime mitte osta.

2.4.1 Raspberry Pi 2

Raspberry Pi mudel 2 on kompaktrvuti, mis koosneb ühest plaadist. Selle väike läbimõõt ja kaal, samuti selle kõrged tööarakteristikud, teevad ta üsna sobivaks UAV jaoks. Samuti, kuna Raspberry peal on juba olemas ka andmeside vahendid, nagu USB ja Ethernet, võib koos Raspberryga kasutada ka teisi seadmeid, nagu 3G-modem ("netipulk") või USB-veebikaamera. Raspberry töötab Linux operatsioonisüsteemiga.

2.4.2 3G-modem ja kaamera

Kuna üks eesmärkidest on lennuki suhtlemine maapealse jaamaga 3G võrgustiku kaudu, siis oli otsustatud kasutada koos Raspberry-ga USB-netipulka. Lennukiga komplektis oli FPV videokaamera, aga kuna see meile ei sobinud, otsustasime paigaldada lennuki peale USB-veebikaamera.

2.4.3 Navio

Raspberry peale on paigaldatud Navio täiendusplaat ehk "*shield*". Selle plaadi eesmärk on siduda Raspberry muude lennuseadmetega. Plaadi peal on PWM-väljundid, kuhu võib servod, ESC ja muu seadmestiku sisse lülitada. Samuti, I2C ja SPI sisendid, sellepärast ei mõned seadmed (näiteks, sensorid) kasutavad neid protokolle kontrolleri suhtlemiseks. Navio plaadil on ka UART port, näiteks, raadiomodemi sisse lülitamiseks. Navio sisaldub ka mitu andureid: kompass, kõrgusmõõtur, GPS koos välise antenniga. Lisaks sellele on plaadil olemas neljakanaline ADC, mis lubab analoogsensorite ühendamist.

Navio võtab vastu 5V toidet ja tarnib toidepinget Raspberry'le.

2.4.4 Toide [5]

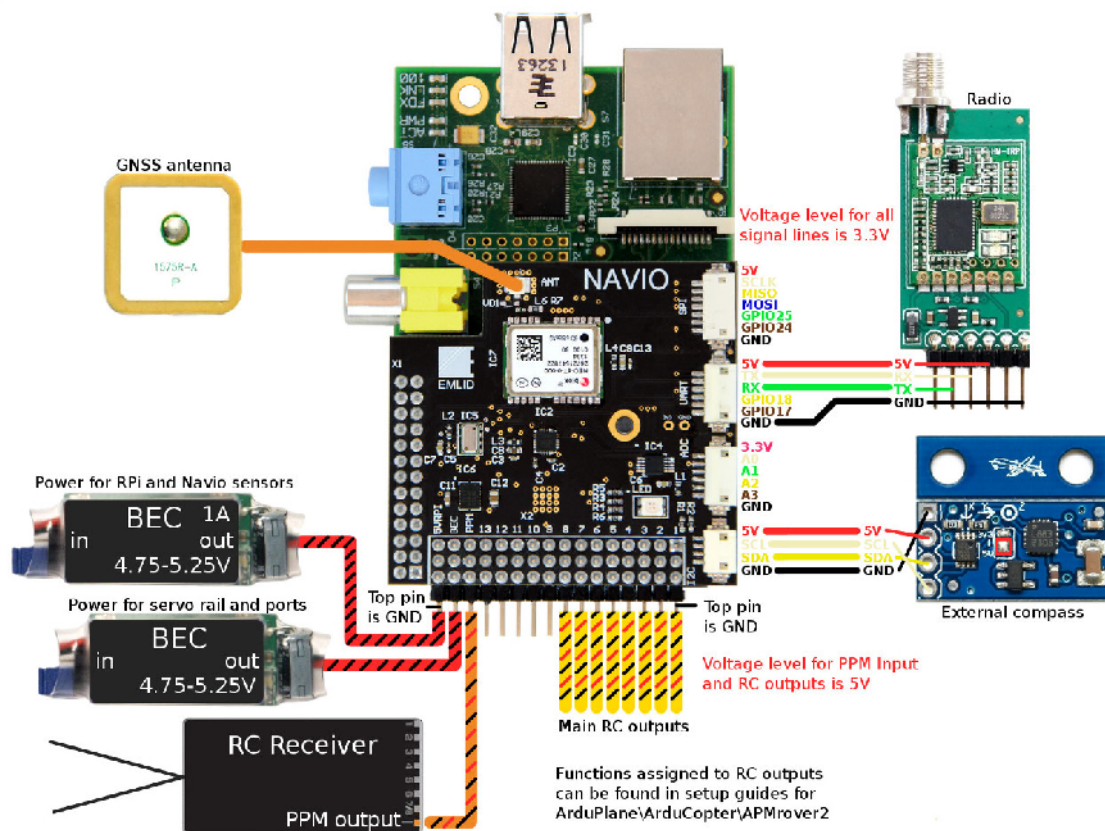
Raspberry (Navio kaudu) nõuab 5V toidet. Servod samuti vajavad töötamiseks 5V pinget.

Kuna lennuki aku on 11,1V nominaalpingega, siis pinget langetamiseks ja stabiliseerumiseks oli tellitud kaks 5V ja 5A "UBEC" komponenti.

UBEC, "*Universal Battery Elimination Circuit*", on seade, mis võtab toidet akust, langetab selle pinget kuni nõutud tasemeni (meie juhul 5V), stabiliseerib seda (sest aku pinget võib muutuda al. 9.9 kuni 12.6V), ja tarnib pinget tarbijatele. Antud juhul tarbijad on servod ja Raspberry.

Selleks, et tagada stabiilset tööd, on Navio peal Raspberry ja servode toidet eraldi. Selle jaoks on vaja just 2 UBECi.

Navio plaadil on selle jaoks kaks sisendit: 5VRPI (Raspberry ja Navio sensorite jaoks) ja BEC (servode jaoks).



Joonis 4: Navio ja selle pordid [5]

2.4.5 Välised sensorid

Selle lennuki peal on kasutatud õhukiiruse sensor ja infrapunane kõrguseandur. Mõlemad on analoogseadmed ja on ühendatud Navioaga ADC kaudu. Need on selle lõpputöö üks keskpunktidest ja need on edasi üksikasjalikult kirjeldatud.

Samuti on lennukile paigaldatud väline GNSS antenn.

2.5 Tarkvara

Raspberry peal on installitud ArduPlane tarkvara. See on avatud lähtekoodiga programm, mis on mõeldud lennukontrollerites kasutamiseks. Tarkvara on paindlik,

lubab kasutajal seda enda jaoks seadistada, kuid samal ajal võimekas ja funktsionaalne. ArduPlane oli algselt mõeldud Arduino baasil kontrollite jaoks, kuid hiljem sai ka sobitanud Raspberry+Navio süsteemiks. Olemas ka Kopteri versioon (ArduCopter) ja muud.

Maapealse jälgimise ja juhtimise teostatakse arvuti kaudu, mille peal on paigaldatud Mission Planner tarkvara. See on tarkvarapakett, mis on mõeldud kasutamiseks koos ArduPilot variantidega (ArduPlane, ArduCopter, jne). Mission Planner lubab kontrolleri reaalsajas jälgida, ühendades kas USB, raadioside või Internetiprotokollide kaudu, parameetrid muuta, käskusid anda ja vajadusel ka lennuki kontrollida (näiteks, gamepadi abil).

3 Andurid ja mõõtmised

Selleks, et edukalt autonoomselt lennata, peab lennuk teadma, kus ta asub ja mis on hetkeline kõrgus, kiirus ja muud parameetrid. Seetõttu on erinevad andurid lennu jaoks ülitähtsad.

Navio plaadi peal on juba olemas kompass koos GPS-mooduliga, kiirendusmõõtur, kõrgusemõõtur baromeetri baasil koos termomeetriga. Need andurid on lennu jaoks kõige tähtsamad, aga ainult neist ei piisa. Selleks, et lennuki võimalikult efektiivselt ja ohutult kasutada, on vaja paigaldada veel mitu sensorit.

Lennuki jaoks olid ostetud ja paigaldatud järgmised sensorid:

- Sharp 2y0A02 infrapunane kaugusandur kõrgusemõõtjana
- MPXV7002 rõhuandur õhukiiruse sensorina, koos Pitot toruga

Lisaks sellele oli ehitatud ja lennuki peale paigaldatud pinge- ja vooluandur.

Kõik need sensorid on analoogväljundiga, ja neid lülitakse sisse ADC kaudu.

ADC on neljakanaline, ehk saab käsitleda 4 sensori andmeid. ADC1 on oma 3,3V pingeallikas, mida saab kasutada sensorite toetamiseks.

3.1 Navios sisseehitatud sensorid

Siin on toodud Navio plaadil olevate sensorite ülevaade

3.1.1 Kompass, kiirendusmõõtur, güroskoop [6]

Navio peal on installitud MPU-9250 kiirendusmõõtur koos magnetomeetriga ja MEMS-güroskoobiga.

MEMS güroskoop on miniatüürne nurgalise kiiruse sensor, mis aitab tuvastada lennuki pöörlemist mingil teljel ja seejärel lennuki stabiliseeruda. MEMS güroskoobi ehitus erineb tavalise güroskoobilt, kuid samuti põhineb pöörleva keha omadustes.

Hall'i efektil põhinev magnetomeeter aitab tuvastada, mis poole on lennuk suunatud. See võimaldab kontrolleri kurssi stabiliseerida, või arvutada, kuhu tuleb pöörata, et antud käsu täita.

Kiirendusmõõtur annab teada, kuidas on lennuk orienteeritud maa suhtes ja mis moodi see liigub.

MPU-9250 sensori sees on olemas ADC, mis esitab saadud andmeid digitaalkujul. Controlleriga suhtleb see kiip SPI protokolliga abil.

3.1.2 Kõrgusmõõtur [7] [8]

Kõrguse leidmine lennunduses ei ole triviaalne probleem. Eksisteerivad mitmed meetodid, aga igauks nendest on oma puudustega. Selleks, et leida kõrgust mingi määratud taseme suhtes, lennunduses tavaliselt kasutatakse rõhkkõrgusmõõturid.

Rõhkkõrgusmõõtur on selline baroometer, mis on kalibreeritud, et näidata kõrgust. Atmosfääri rõhk langeb absoluutkõrguse kasvuga. See suhe on teada ja esitatakse valemiga:

$$z = \left(\frac{RT}{gM}\right) \cdot \log\left(\frac{p_0}{p}\right)$$

See tähendab, et teades temperatuuri (T), õhurõhku (p) ja kontrollrõhku mingi valitud "nullpunktis" (p_0) võib leida selle "nullpunkti" suhtes kõrgust.

Selline mõõtmisviis annab kindlalt ja ilma suure energiakuluta lennuki kõrgust merepinna (või mingi teise punkti, sõltuvalt altimeetri seadistusest) suhtes, kuid ei võtta arvesse maastiku. Samuti on vaja teada võrdluspunkti õhurõhku.

Lennunduses kui lennuk on lennujaama piirkonnas madalal kõrgusel, näiteks, lennujaama lähenemisel, maandumisel või startimisel, sellise võrdluspunktina kasutatakse merepinna tasemele arvatud õhurõhku lennujaama kõrgusel (ehk, õigesti

seadistatud mõõtur peab näitama kõrgust merepinna suhtes). Kaugemate lendude korral, kus õhurõhk maapinnal võib sageli muuta, ei ole seda igal hetkel teada või pole mõistlik iga kord seadistada. Samuti ei ole maapinna suhteline kõrgus nii tähtis lennuki jaoks, kui ta lendab mitme kilomeetri kõrgusel. Tähtsam on teiste lennukite kõrgused, mida on vaja teada, et kokkupõrke vältida. Selle tõttu kasutatakse lennunduses nn. "standardatmosfääri", ehk kõige lennukite altimeetrid seadistatakse õhurõhule 1013hPa, ja õhuruumi jagatakse nn. "lennutasanditesse" (ingl. *Flight Level, FL*). Nii ei saa täpselt lennukijuht teada oma kõrgust maapinna suhtes, aga selle asemel teab, mis kõrgusel teised lennukid on, ja teab, mis lennutasandi ta ise peab hoidma.

Mudellennukid aga tavaliselt kaugele ei lenda, seetõttu pole õhurõhku muutused maapinna tasemel tõenäolised. Tavaliselt kalibreerib end kõrgusmõõtur süsteemi käivitamisel, eeldades, et ta asub hetkel "nullpunktis", ja selle suhtes arvutab oma kõrgust.

Kõrgusmõõtuuri üks komponent on ka termomeeter. Seda kasutab mõõtur kõrguse arvutamises. Aga samuti saab seda kasutada, näiteks, lennuki sisese temperatuuri jälgimiseks. Kuna maa peal seistes ventilatsioon lennuki sees puudub, ja seadmed (Raspberry, modem) soojenevad, on vaja neid nii paigaldada, et nad ei kuumeneks üle.

Navioga kaasneva tarkvara koosseisus on Pythoni skript, mis laseb temperatuuri jälgida siis, kui ArduPlane ei tööta. Samuti edastab ArduPlane tarkvara koos teise telemeetriaga mõõdetud temperatuuri, mida saab maa peal Mission Planneri kaudu reaalsel ajal vaadata. Lennukiga olid teostanud mitmed mõõtmised, mis näitavad temperatuuri lennuki sees.

Tingimused	Aeg pärast käivitamist	Temperatuur (°C)
Kohe pärast käivitamist	umb. 1 min	32,08
"Tühikäigul", töötab Raspberry, 3G-modem, kaamera. Mootor on välja lülitatud	20 min	48,00
	60 min	57,33

Tabel 1: Temperatuuri mõõtmiste tulemused

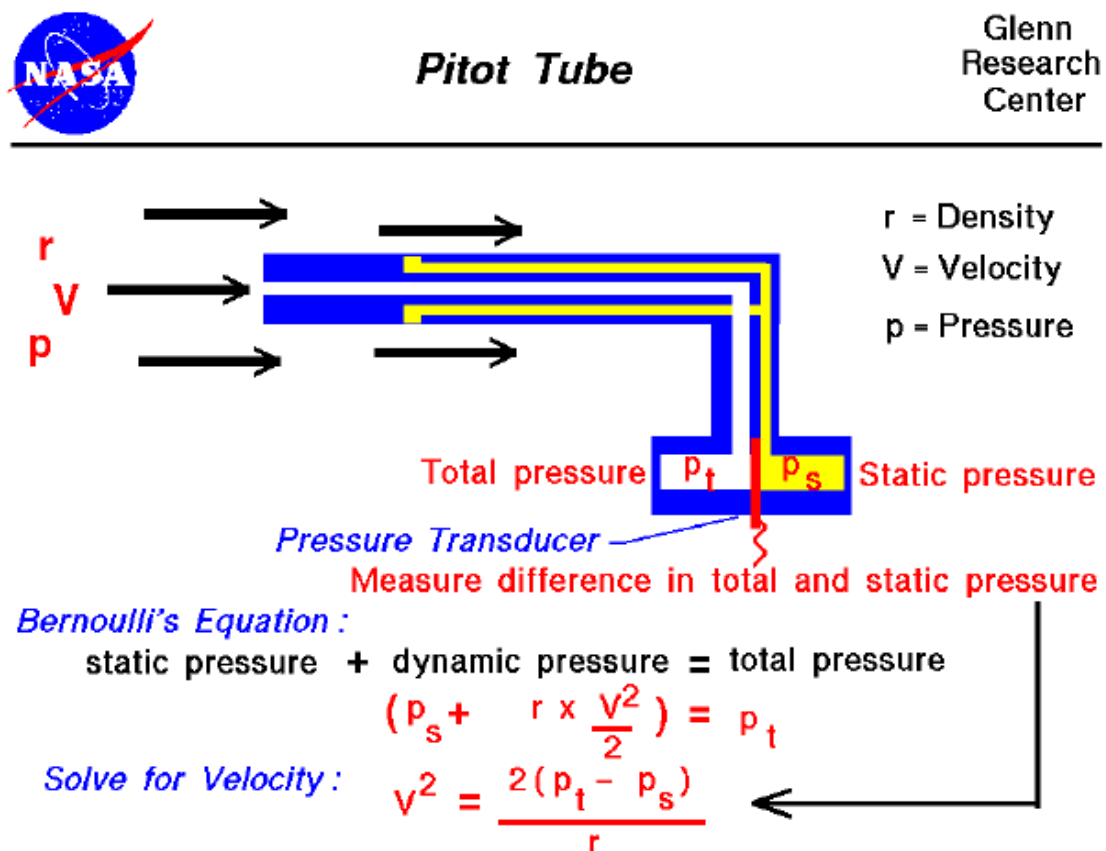
3.2 Õhukiiruse andur

Nagu oli punktides 2.1.1 ja 2.1.2 seletatud, üks kõige tähtsaimaid lennuparameetritest on õhukiirus, ehk kiirus õhu suhtes. Kuna Navios on sisse ehitatud GPS vastuvõtja, teab lennuk oma kiirust maa suhtes. Aga need kaks kiiruseid võivad üsna palju erineda. Üks selline näide oleks tuul - kuna Eestis on sageli ilm tuuline, võib tuulekiirus olla võrreldav lennuki startimiskiirusega. Selleks, et lennuk täpselt teaks, kui kiiresti ta lendab õhu suhtes ja ei lubaks kiirusel langeda alla ohutu kiiruse, mis võib põhjustada varisemist, on vaja paigaldada õhukiiruse sensori.

Selle lennuki jaoks oli HobbyKingist tellitud MPXV7002 rõhksensor koos Pitot toruga.

3.2.1 Õhukiiruse mõõturi põhimõtte [9]

Õhukiiruse mõõtur koosneb kahest põhikomponendist: Pitot torust ja rõhusensorist.



Joonis 5: Pitot toru ja õhukiiruse leidmine [9]

Pitot toru on selline toru, mis on suunatud õhuvoo sisse. Torus on auk selle ees. Õhk sattub õhuvoo toru sisse ja tekitab rõhku mõõturis. Kuna see rõhk koosneb mitte ainult dünaamilisest rõhust (ehk mis on kiirusega tingitud), vaid ka aga staatilisest rõhust (atmosfääri rõhk), siis tavaliselt mõõdab sensor mõlemaid rõhkusid eraldi ja leiab nende vahet.

3.2.2 Õhukiiruse mõõturi paigaldus ja ühilduvus

Õhukiiruse sensori paigaldamisel on tähtis see, et Pitot toru oleks suunatud võimalikult otse ette. Samuti oluline on, et toru ei oleks liiga lähedal kere või tiivale.

Ostetud Pitot toru on piisavalt pikk, ja seda oli võimalik paigaldada tiiva ette. Rõhuandur oli pandud tiiva sisse, ja ühendatud Pitot toruga pehme õhutoru abil.

Õhukiiruse mõõturi väljund on analoogkujul. See tähendab, et mõõdetud kiirusele vastab määratud väljundpinge. Selleks, et kontrolleri saaks sellest signaalist kasulikku infot, oli sensor ühendatud Navio sisseehitatud ADCga.

3.2.3 Kalibreerimine

Täpne kalibreerimine ja testimine ei olnud võimalik seoses sellega, et stabiilse õhuvoolu tekitamise võimalus puudus, aga eelneva kogemuse (seoses Prototüüpimise-II aine raames ehitatud lennukiga) baasil oli võimalik seadistada sensori parameetrid.

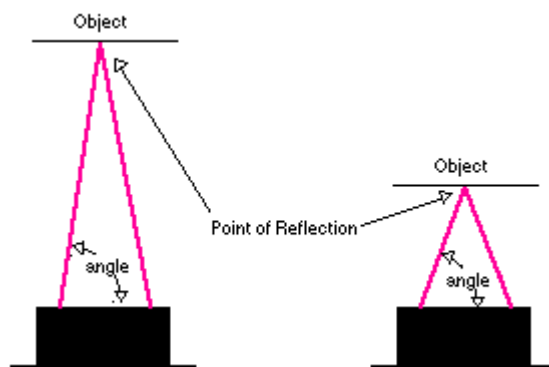
Ligikaudne katsetamine näitas, et mõõtmine oli suhteliselt õige.

3.3 Infrapunane kõrgusmõõtur

Tavaliselt piisab kõrguse mõõtmiseks baromeetrilisest kõrgusmõõturist, aga sellel on ka omad puudused. Autonoomse lennuki puhul on tähtsaim puudutus ebapiisav täpsus madalatel kõrgustel (ühe meetri piirkonnas). Kui lennuk maandub ise, siis on vajalik teada, mis kõrgusel ta täpselt on. Selleks oli lennukile installitud infrapuna kaugusemõõtur Sharp 2Y0A02.

3.3.1 Kõrgusanduri tööpõhimõtte [10]

Infrapunane kõrgusandur koosneb kahest komponendist: IR-allikas, IR-vastuvõtja. Allikas kiirgab valguskiire teatud nurgaga. Kui kiir peegeldub objektist saabub ta tagasi vastuvõtjasse mingi nurga all. Selle nurga abil saab arvutada vahemaad.



Joonis 6: IR kaugusmõõduri tööpõhimõtte [10]

3.3.2 Kõrgusmõõduri paigaldus ja ühilduvus

Kuna kõrgusmõõduri eesmärk on maapinna kauguse leidmine, peab see olema alla poole suunatud. Seetõttu oli see paigaldatud tiiva all.

Sarnaselt kiirusandurile, on kõrgusmõõdur analoogseade. See tähendab, et määratud kaugusele vastab teatud pinge väljund. Seda saab ADC kaudu kontrollerrisse edastada.

Sensor nõuab 5V pinget, et efektiivselt töötada. Kuna ADC pinge on 3.3V, siis tuleb anda sensorile toidet samalt UBECilt, mis servode toite eest vastutab.

3.3.3 Kalibreerimine ja seadistamine

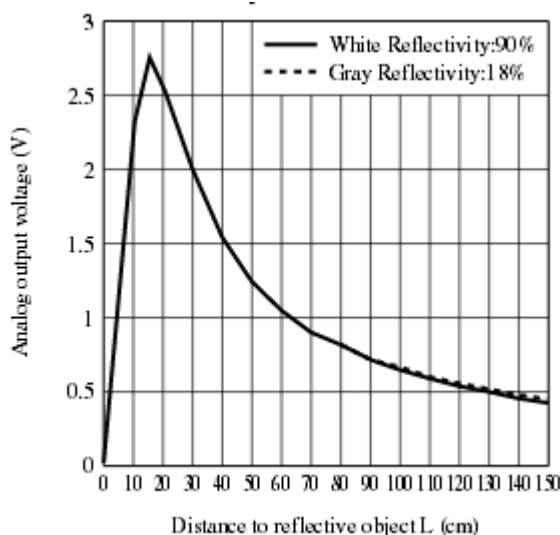
Kuna kontrolleri tarkvara (ArduPlane) on mõeldud peamiselt sonaritele, ja see mõõtur pole pakutavas nimekirjas, siis oli vaja see käsitsi seadistada.

Kauguse mõõtmisega on seotud järgmised tarkvaralised parameetrid [11] :

- RNFND_FUNCTION
 - See parameeter seadistab mõõduri funktsiooni, mis võib olla "lineaarne", "inverteeritud" või "hüperboolne"

- RNFND_SCALE
 - See parameeter määrab suhte voltide ja meetrite vahel.
- Muud tehnilised parameetrid, nagu paigalduse kõrgus, kanali number jm.

Antud parameetrite leidmiseks tuleb vaadata mõõteri infolehte [12] :



Joonis 7: Sharp 2Y0A02 graafik [12]

Siit saab näha, et see funktsioon pole lineaarne, aga pigem hüperboolse kujuga. Sellisele funktsioonile suhet leidmiseks vastab järgmine seos:

$$altitude = \frac{scaling}{(voltage + offset)}, \text{ ehk kui } offset = 0, \text{ siis } scaling = altitude \cdot voltage$$

Selleks, et leida kõrgust, koostan korrutiste tabeli graafiku andmetel:

Kõrgus	Pinge	Kõrgus * pinge
0,2	2,5	0,5
0,3	2	0,6
0,4	1,5	0,6
0,6	1	0,6
0,9	0,75	0,675
1,3	0,5	0,65

Tabel 2: Kõrgusanduri katsetamise tulemused

See tähendab, et ligikaudne parameetri "*scaling*" väärtus on 0,6.

Kuna Joonis 7 näitab, et mõõtur on efektiivne ainult 15..150cm (kaugusel suurem, kui 150cm on pinge peaaegu konstantne), alumise piirina on valitud 25cm, ja ülemiste piirina - 125cm.

Kui lennuk on kõrgem, kui 125cm, siis kasutab ta baromeetrilist sensorit. Kui lennuk on madalam, kui 25cm, siis ta on peaaegu maa peal ja kõrguse andmeid pole vaja arvestada.

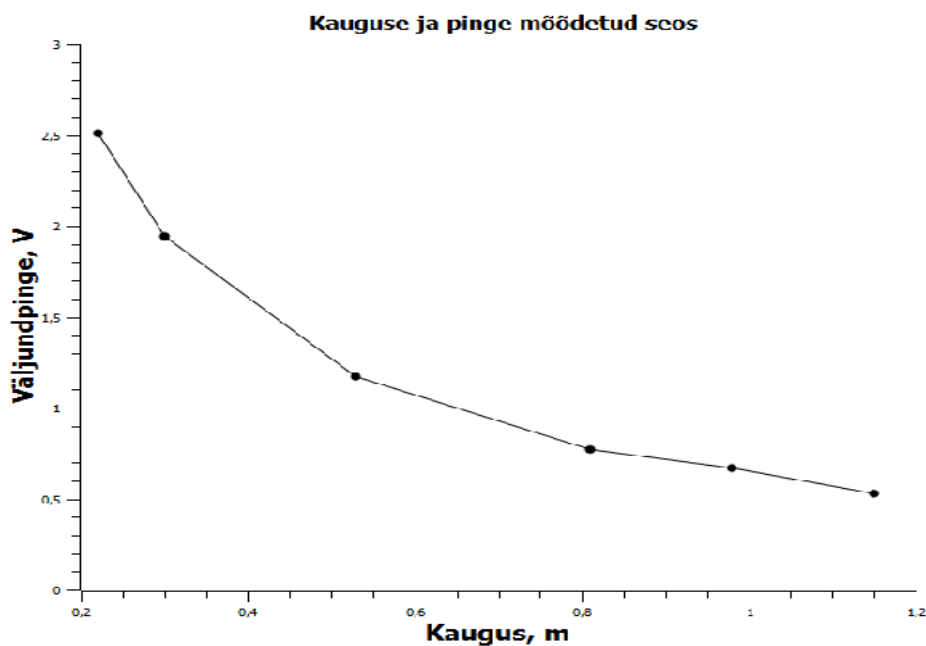
3.3.4 Katsed

Sensor sai katsetud vahemaal 20..115cm. Mõõdetavad parameetrid olid:

- Tõeline kaugus (ehk mõõdulindiga mõõdetud vahemaa)
- Sensori väljundpinge (mõõdetud ostsilloskoobiga ADC sisendil)
- Näidatud pinge (väärtus mille kontrolleri tagastab, loetud ADC-lt)
- Näidatud kaugus (kontrolleris arvutatud kaugus)

Tõeline kaugus (m)	Väljundpinge (V)	Näid. pinge (V)	Näid. kaugus (m)
0,22	2,51	2,42	0,25
0,3	1,94	1,86	0,32
0,53	1,17	1,09	0,54
0,81	0,77	0,68	0,87
0,98	0,67	0,59	1,01
1,15	0,53	0,46	1,25

Tabel 3: Kauguse mõõtmiste tulemused



Joonis 8: Kauguse ja pinge mõõdetud seos

Siin saab näha, et viga on suhteliselt madal. Suurel kaugusel muudab viga juba olulisemaks, ehk kuni 10cm kaugusel 1,15m. See võib olla seotud sellega, et nende väärtuste vastavad pinged on juba üsna lähedal. Aga selline viga ei mõjuta oluliselt lennuohutust.

3.4 Toidejälgimisseade (Power monitor)

UAV ehitamisel kasutatakse tavaliselt LiPo-akusid. Sageli nad on võimsad ja mahukad, ja samal ajal suhteliselt odavad. Nende madal hind tuleneb sellest, et neil puuduvad igasugused kaitsmeahelad ning seisundijälgijad. Ning lennuki kasutaja ei saa lennu ajal teada, kui palju on tema aku võimeline töötada.

Lennuki kasutajale tähendab see esmaselt seda, et aku on väga lihtne ülekasutada, ehk laadida tühjaks nii palju, et see oleks pöördamatult kahjustatud, või isegi pole enam kasutuskõlblik. Seda vältimiseks kasutatakse aku pinge- ja voolujälgijaid.

Kuna voolu- ja pingejälgija ehitus on üsna lihtne, seda oli otsustatud ise teha.

3.4.1 Pinge mõõtmine

Pinge mõõtmine on kõige olulisem aku laengut hinnates. See on ka kõige lihtsam. Kuna Navios on juba olemas oma ADC, võib seda kasutada pingemõõturiks. Kuid ADC tipppinge on 3,3V ja lennukis oleva aku pinge võib tõsta kuni 12,6V. Kõige lihtsam oleks seda teha pingejaguri abil.

Pingejaguriks olid kasutatud 4,7kOhm ja 14,7kOhm takistid ehk ülekanne oli

$$\frac{4,7}{4,7+14,7} = \frac{4,7}{19,4} = 0,24$$

See tähendab, et 12,6V pingega akuga oleks ADC sisse tulnud pinge

$$12,6V \cdot 0,24 = 3,05V$$

ja maksimaalne ohutu akupinge (millega ADC sisse tuleb 3,3V) oleks siis

$$\frac{3,3 V}{0,24} = 13,75 V$$

Kuna lennuki peal olev aku sellist pinget ei ole võimeline tagama, on antud pingejagur kasutamiseks sobiv.

3.4.2 Pingemõõtuuri kalibreerimine ja katsetamine

Selleks, et kontrolleri tarkvara saaks õigesti aru, mis pingele ADC-lt saadud väärtus vastab, tuleb pingejaguri ülekannet kontrollerrisse sisestada.

Seda saab teha kahel viisil. Üks on otseselt, parameetrite kaudu. Teine on kaudselt, sisestades mingil hetkel aku väärtuse. Seda tehakse järgmiselt: valitakse mingil hetkel sisendpinget, mis saab, näiteks, toideallika voltmeetriga mõõta, ja lülitakse pingejälgija sisse. Siis sisendatakse selle väärtust Mission Planneri kaudu kontrolleri tarkvarasse. Kuna kontroller samal hetkel teab ADC-lt tuleva pinget, arvutab ta ise ülekannet. Nii saab ka vältida ADC süstemaatilisi vigu. Antud juhul oli see meetod valitud.

Selleks, et pingejaguri katsetada oli kasutatud reguleeritavat toiteallikat ja ostsilloskoopi. Selgus, et pinget mõõtmisel kontrolleri tarkvara arvab, et pingejälgija väljund on vigane (sest aku pinget ei saa tavatingimustes töö ajal tõusta). Seetõttu katset oli alustatud 12.6V pingelt, ja alumiseks piiriks oli 10V, mis on aku kriitiline pingetase.

V (pingeallikas)	V (pingejagur)	V (näidatud)
12,6V	3,11V	12,56V
11,8V	2,93V	11,76V
11,2V	2,78V	11,23V
10,7V	2,64V	10,64V
10,0V	2,48V	10,03V

Tabel 4: Pinget mõõtmised

Saab näha, et pinget mõõtmised on hea täpsusega välja tulnud, ehk pingemõõtur on töökindel.

Kontrolleri tarkvaraga arvutatud korrutaja võrdub 4,15. Kuna see on väärtus, millega tarkvara korrutab ADC-lt saadud väärtust, võib sellelt ülekannet leida.

$$\text{Ülekanne} = \frac{1}{4,15} = 0,24$$

mis on aktuaalse pingejaguri ülekandega hea täpsusega võrdne.

3.4.3 Voolu mõõtmine

Voolu mõõtmine pole nii tähtis aku seisundi jälgimiseks, nagu pinge mõõtmine, aga aitab ennustada aku tööaega ja selgitada, kui palju voolu tarbib lennuk erinevates režiimides, ja kui säästlikult see lendab.

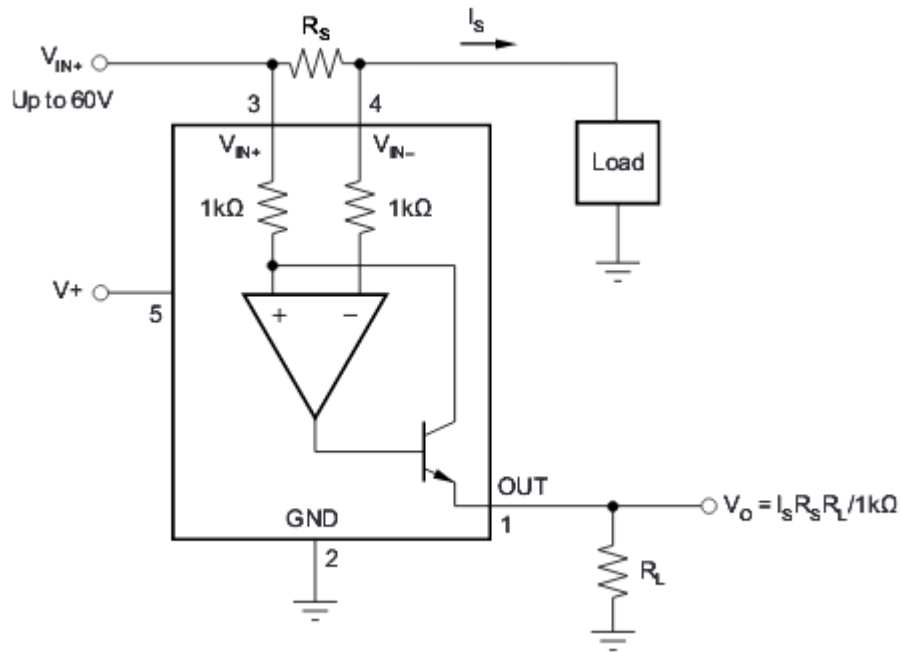
Voolu mõõtmiseks oli kasutatud Texas Instruments poolt toodetud voolujälgijat INA169NA [13].

Šundina on kasutatud 0,0025 Ohm šunttakistit. R_L (vaata Joonis 9) on valitud INA169 andmelehes antud valemi järgi:

$$V_0 = I_S \cdot R_S \cdot R_L / 1k\Omega$$

Kuna voolujälgija analoogväljund peab olema ühendatud kontrolleri ADC kaudu, mille tippinge on 3,3V, siis V_0 peab olema võrdne või madalam kui 3,3V maksimaalse võimaliku vooluga.

Maksimaalne voolu väärtus peaks olema vähemalt $30 \pm 1A$, kuna selleks ESC piirvool on 30A ja Raspberry koos teise varustusega tarbib umbes 0,5A.



Joonis 9: INA1x9 tüüprakenduse skeem [13]

Kui eeldame, et 30A voolule peaks vastama 3V pinge, siis arvutame R_L järgmisel viisil:

$$R_L = \frac{V_0 \cdot 1k\Omega}{I_S \cdot R_S} = \frac{3V \cdot 1k\Omega}{30A \cdot 0,0025\Omega} = 40k\Omega$$

Kuna 40 kΩ takisti pole standardne oli valitud ja ostetud 39kΩ takisti. Selle alusel võib arvutada voolu ja pinge suhte:

$$\frac{I_0}{V_0} = \frac{1k\Omega}{R_S \cdot R_L} = \frac{1k\Omega}{39k\Omega \cdot 0.0025\Omega} = 10,26\Omega^{-1}$$

Voolumõõturiga olid tehtud katsed toiteploki ja ostsiloskoobi abil. Lennukil puudusid katsete jooksul kaamera, modem ja servod. Propeller oli maha võetud.

I (allikas)	V (väljund)	I (näidatud)	Tingimused
0,29A	19,5mV	0,3A	Throttle 0
0,88A	81mV	0,9A	Throttle 1/4
0,99A	86mV	1,0A	Throttle 1/2

Tabel 5: Voolu mõõtmised

Pinge väljund oli seoses madala vooludega üsna madal, ebastabiilne ja mürane, seetõttu seda ei olnud võimalik selgelt mõõta.

Kuna katsete jooksul oli kasutatud 3A toiteplokk, ei olnud võimalik teha katseid propelleriga, et saavutada kõrgemaid voolusid.

1/2 Throttle saavutades ei kasvanud enam voolu tarbimine nähtavalt, kuna takistus mootori pöörlemisele oli madal.

On välja selgitanud, et suurte voolude puhul ei ole voolujälgija nii täpne, aga seda ei olnud võimalik hästi katsetada, kuna olemasoleva toiteallika tippvool on 3A.

Koos propelleriga ja täiskiiruses näitas voolujälgija kuni 20A voolu.

Kuna voolujälgija voolu/pinge suhe oli sisestatud kontrollerrisse samal viisil, nagu pingejälgija, arvutas tarkvara voolu/pinge suhte ise. ArduPlane poolt arvatud voolu/pinge suhe võrdub $11,3302 \text{ Ohm}^{-1}$, mis on reaalse väärtusele üsna lähedal, aga mitte võrdne.

4 Autopiloot

ArduPlane tarkvara üks tähtis osa on autopiloot. See võtab vastu andmeid sensoritest ja abistab kasutajat või lendab täiesti autonoomselt, täidetes käskusid.

4.1 Autopiloodi teooria [14]

Nagu enamik autopilootidest on ArduPlane autopiloot ehitatud PID-kontrolleri baasil.

PID-kontroller (PID tähendab *Proportional-integral-derivative* ehk proportsionaal-integraal-derivatiiv) on selline juhtimissüsteem, mille tagasisides on süsteemi väljundist, selle integraalist ja tuletisest kombinatsioon. PID-kontrollerid on kasutusel tänapäeval igas kohas, ka tööstuses tootmisliinide juhtimises kui ka autos püsikiirusehoidjana.

PID, nagu selle nimetus ütleb, koosneb 3 komponentidest:

4.1.1 Proportional

Proportsionaalkomponent sõltub ainult erinevusest kontrollitava suuruse hetkelise ja soovitava väärtuste vahel. Kui hetkeline väärtus on $r(t)$, ja etalonväärtus $y(t)$, siis hetkeline viga võrdub

$$e(t) = r(t) - y(t).$$

Siis võrdub proportsionaalkomponent

$$uP(t) = K_p \cdot e(t) ,$$

See tähendab, et proportsionaalkomponent püüab kompenseerida ainult hetkelise vea. Mida suurem on hetkeline viga seda suurem on toime.

4.1.2 Integral

Integraalkomponent on vigade summa üle aja, korrutatud ajasammuga. See kompenseerib pikaajalisi vigu ehk kui kauem väärtus ei ole jõudunud etalonväärtuseni, seda suurem on integraalkomponendi toime.

$$uI(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

4.1.3 Differential

Diferentsiaalkomponent on vea tuletis ehk muutuse kiirus. See üritab vea edasiarengut ennustada.

$$uD(t) = K_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

4.1.4 Summa

Summaarne reaktsioon on määratud nii komponentidega, kui ka nende ees koefitsientidega, mis seadistab projekteerija/kasutaja.

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

Koefitsiente muudetes võib süsteemi käitumist mõjutada. Autopiloodi konfiguratsioon on esialgu nende komponentide leidmine, et lennuk oleks piisavalt reageeriv, aga samal ajal mitte ülitundlik.

4.2 Lennuki orientatsiooni määramine

Selleks, et edukalt navigeerida, peab lennuk oma orientatsiooni teadma. Nagu oli juba seletatud, on selle eesmärgiga lennukis paigaldatud suur hulk sensoreid, kuid ainult neist ei piisa, sest andmeid on vaja ka töödelda ja ehitada mudel. Lisaks sellele, ei saa kunagi kindel olla, et kõik sensorid õigesti töötavad. Mingi sensor võib täpsust kaotada mõni võib üldse katki minna lennu jooksul. See tähendab, et on vaja ka asukoha andmeid analüüsida ja tegelikku asukohta approksimeerida.

4.2.1 AHRS

AHRS ehk *Attitude Heading Reference System*, on selline süsteem, mis võimaldab sensorite baasil määrata lennuki asukohta ja orientatsiooni. See koosneb sensoritest ja nende andmete analüüseeritavast koodist.

Selleks, et hinnata lennuki positsiooni sensorite andmete baasil, mis ei saa olla alati täpsed, on kasutatud sellist algoritmi nagu EKF (*Extended Kalman Filter*).

4.2.2 EKF [16]

Sensorid ei pruugi alati täpsed olla. Güroskoobid võivad olla kiirendustega häiritud, kompass ei talu magnetväljasid ja GPS signaal on tihti takistatud pilvedega. Tavaliselt kasutatakse hetkelise süsteemi seisundit ehk antud juhul lennuki asukohta approksimeerimiseks Täiendatud Kalmani filtrit.

EKF on tavalise Kalmani Filtri mittelineaarne versioon. Kalmani filter kasutab kahesammulist algoritmi. Esimene samm on tuleva seisundi ennustamine kasutades hetkelist seisundit ja vea hinnangut, teine samm on selle ennustuse parandus, kasutades mõõdetud väärtust.

4.3 Autopiloodi režiimid [15]

Autopilot ei tähenda kohe seda, et lennuk võtab endale kontrolli ja kasutaja ei suuda sellega midagi teha. Valikuid on palju, alates peaaegu manuaalsest lennuga ja lõpetades täisautomaatse programmiga.

Režiimid erinevad ka seadmestiku kasutamisega.

MANUAL

Täiesti manuaalne režiim, mis tuleb kontrolleri sisendisse, läheb kontrolleri väljundisse muutumata. Lennuk ei jälgi piirkiirust ega nurkasid.

STABILIZE

Peaaegu manuaalne, aga lennuk püüab end stabiliseerida, kui muud käsku ei ole.

FBW (FBWA/FBWB)

Kasutaja ei määra tüüride positsiooni otseselt, vaid pigem kaldenurka. Autopiloot ise otsustab, kuidas kasutada tüüre. Kaldenurgad ei saa ületada ohutuid piiranguid. Sarnaneb näiteks Airbus lennukitel kasutatava Fly-By-Wire süsteemiga. FBWA ja FBWB erinevus seisneb selles, et FBWB režiimil kontrollib lennuk ka mootori pöörlemiskiirust.

CRUISE

Lisaks stabiliseerumisele hoiab ka lennukurssi.

LOITER

Hakkab ringi käima üle määratud asukoha

AUTO

Selle režiimi sisse lülitades hakkab lennuk täitma missiooni, mis on tal sisestatud kasutaja poolt.

Muud režiimid (ACRO, TRAINING, etc.)

Eriotstarbelised režiimid.

Missiooni sammud ja käsud on kirjeldatud parameetrite abil.

5 Kokkuvõte

Selle lõputöö eesmärk oli mehitamata lennuki ehitamine ja selgitamine, kas valitud konfiguratsioon (Raspberry Pi 2 + Navio, sensorid, 3G-juhtivus ja FPV-veebikaamera) sobib sellise lennuki ehitamiseks.

Lõputöö näitas, et sellist lennukit on tõesti võimalik ehitada tudengiprojektina. Raspberry Pi suurem võimsus ja funktsionaalsus tavaliste lennukontrolleritega võrreldes võimaldab eriseadmestikku kasutamist, mille sobitamine koos tavakontrolleritega oleks kas liiga raske või üldse võimatu. Selle seadmestiku hulka kuulub, näiteks, veebikaamera ja 3G-modem.

Sensorite kasutamine on lihtsustatud Navio peale sisse ehitatud ADC abil. Sensorid annavad üsna täpseid tulemusi ja lasevad lennuki kontrolli all hoida ka käsitsi lennates või automaatrežiimi lülitudes.

Lai valik autopiloodi režiime aitab valida iga otstarbe jaoks sobiva. Samuti seadistatavad PID väärtused lasevad autopilooti sobitada efektiivselt lennuki või otstarbe jaoks.

Sellist lennukit võib kasutada ka lõbuks, kuid ka otstarbeliselt, näiteks, õhust filmimiseks ja õhujälgimiseks (näiteks, tulekahjude avastamiseks või infrastruktuuri monitooringus). 3G-ühilduvus laseb lennukil lennata väljaspool tavalist raadioside piirkonda ja samuti jääda kontrolli alla ja edastada videot või muud infot, kui mobiilvõrk on saadaval. Samuti, isegi võrgu kadumisega suudab lennuk oma programmi edasi täita.

Praktiliselt ei olnud veel lennuki lennuvõimelikkus lõputöö kirjutamise hetkeks katsetanud, aga kõik muud süsteemid töötavad ja võib oodata, et lähiajal saab lennukatsed teha.

Kasutatud kirjandus

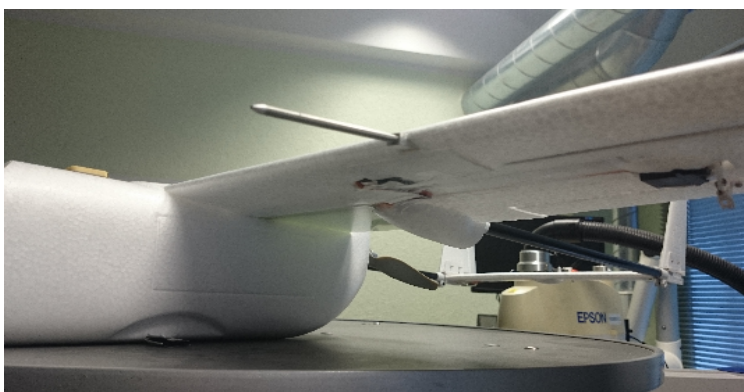
- [1] Aerodynamics And Theory of Flight, Langley Flying School,
<http://www.langleyflyingschool.com/Pages/Aerodynamics%20and%20Theory%20of%20Flight.html>
- [2] How airplanes fly - the basic principles of flight, R/C Airplane World,
<http://www.rc-airplane-world.com/how-airplanes-fly.html>
- [3] HobbyKing Mini Skyhunter,
http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__78976__HobbyKing_8482_Mini_SkyHunter_FPV_Platform_PNF_.html
- [4] BU-402: What Is C-Rate?, Battery University,
http://batteryuniversity.com/learn/article/what_is_the_c_rate
- [5] Hardware setup Navio, Emlid,
<https://docs.emlid.com/navio/Navio-APM/hardware-setup-navio/>
- [6] MPU-9250 Product Specification
<http://43zrtwysvxb2gf29r5o0athu.wpengine.netdna-cdn.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-9250-Datasheet.pdf>
- [7] MS5611 – Datasheet,
http://www.amsys.info/sheets/amsys.en.ms5611_01ba03.pdf
- [8] Graham Jackson, Chris Crocker, The use of altimeters in height measurement, The Database of British and Irish Hills,
<http://www.hills-database.co.uk/altim.html>
- [9] Pitot Tube, Glenn Research Center, NASA
<https://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/VirtualAero/BottleRocket/airplane/pitot.html>
- [10] Sensors - Sharp IR Rangefinders, Society of Robots,
http://www.societyofrobots.com/sensors_sharpirrange.shtml
- [11] Complete parameter list - Rangefinder, Ardupilot,
<http://ardupilot.org/plane/docs/parameters.html#rngfnd-parameters>
- [12] Sharp GP2Y0A02YK Datasheet,
http://www.erasme.org/IMG/gp2y0a02_e.pdf
- [13] INA1x9 High-Side Measurement Current Shunt Monitor datasheet
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina169.pdf>

- [14] Curtis L. Olson, Control Theory 101,
<http://www.flightgear.org/Docs/XMLAutopilot/node2.html>
- [15] Flight Modes, ArduPilot,
<http://ardupilot.org/plane/docs/flight-modes.html>
- [16] An Introduction to the Extended Kalman Filter, Goddard Consulting,
<http://www.goddardconsulting.ca/extended-kalman-filter.html>

Lisa 1 – Lennuki fotod



Joonis 10: Lennuk (kokku pandud)



Joonis 11: Õhukiiruse mõõtur



Joonis 12: Kõrgusandur