



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

## Drooni spetsialiseeritud kaamera gimbal

Drone Specialized Camera Gimbal and Gimbal Control

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Siim Soopalu

Üliõpilaskood: 155161MAHB

Juhendaja: Mart Tamre, Tallinna  
Tehnikaülikooli  
elektroenergeetika  
ja mehhatroonika  
instituudi professor

Tallinn 2019

## AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

“.....” ..... 201.....

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” ..... 201.....

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....” .....201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

**TTÜ Elektroenergeetika  
ja mehhatroonika  
instituut  
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE**

**Üliõpilane:** Siim Soopalu, 155161MAHB  
**Õppekava, peeriala:** MAHB02/13, Mehhatroonika  
**Juhendaja(d):** Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi  
professor, Mart Tamre, 620 3202  
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi insener, Dhanushka Chamara Liyanage, 620 3306

**Lõputöö teema:**

Drooni spetsialiseeritud kaamera gimbal  
Drone Specialized Camera Gimbal and Gimbal Control

**Lõputöö põhieesmärgid:**

1. Teha valmis droonile spetsialiseeritud kaamera gimbal
2. Projekteerida gimballi konstruktsioon võimalikult kompaktna ja kerge
3. Tehtud töö dokumenteerida

**Lõputöö etapid ja ajakava:**

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Nõuete analüüs, olemasolevate lahenduste uurimine.	18.03.2019
2.	Komponentide valik.	25.03.2019
3.	Esialgse gimballi kontseptsiooni loomine ning selle modelleerimine.	16.04.2019
4.	Gimballi konstruktsiooni muutmised ja parandused.	14.05.2019
5.	Töö lõplik vormistamine, köitmine ja esitamine.	21.05.2019

**Töö keel:** eesti keel

**Lõputöö esitamise tähtaeg:** "21" mai 2019 a

**Üliõpilane:** Siim Soopalu ..... "....." .....201....a  
/allkiri/

**Juhendaja:** Mart Tamre ..... "....." .....201....a  
/allkiri/

# Sisukord

Sisukord	4
EESSÕNA	5
LÜHENDITE LOETELU	6
SISSEJUHATUS	7
1. ÜLDINE KIRJELDUS	8
1.1 Droon	8
1.2 Kaamera	9
2. GIMBAL	13
2.1 Nõuete analüüs	13
2.2 Konstruksiooni valik	14
2.3 Mootorite valik	18
2.4 Kontrolleri valik	21
2.5 Laagri valik	23
3. KONSTRUKTSIOON	24
3.1 Korpus	24
3.2 Muna	27
3.3 Tugiäärrik	29
3.4 Gimballi kinnitus	30
4. GIMBALLI JUHTIMINE	32
5. VÕIMALIKUD ARENGUSUUNAD	33
KOKKUVÕTE	35
SUMMARY	37
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	39

## EESSÕNA

Käesoleva bakalaureusetöö teema tuleneb Tallinna Tehnikaülikooli soovist arendada olemasolevale droonile spetsiaalne gimbal, mida kasutatakse valitud hüperspektraal kaameraga.

Töö raames modelleeritakse komponendid SolidWorks 2018 keskkonnas ning elektriskeemi jaoks kasutati Altium Designer tarkvara. Lisaks valitakse vajalikud komponendid süsteemi töökindluse tagamiseks.

Käesolev töö on kirjutatud Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi professori Mart Tamre juhendamisel, kellega konsulteerisin ka seadme projekteerimisel.

## **LÜHENDITE LOETELU**

VTOL - Vertical take-off and landing

IMU - Inertial measurement unit

## SISSEJUHATUS

Antud bakalaureusetöö eesmärgiks on projekteerida Tallinna Tehnikaülikooli poolt kasutatavale droonile integreeritav gimbal, mida kasutatakse kindla kaameraga. See võimaldab drooniga lennates kaamerat stabiilsena hoida ning seda juhtida.

Turul on suur valik erinevaid õhusõidukeid ning kaameraid. Olenevalt nende kasutamise eesmärgist tuleb valida sobivad vahendid. Tihti pole kahe erineva tootja õhusõiduki ja kaamera integreerimine lihtne ülesanne.

Selle töö raames projekteerin gimballi Tallinna Tehnikaülikooli droonile ning sellega kasutatavale kaamerale. Selleks tuleb paika panna nõuded süsteemile ning valida sobivad komponendid. Töö käigus kirjeldan igas etapis tekkinud mõttekäiku ning kuidas valminud seadme komponendid projekteeriti või valiti. Töö eesmärgiks oli luua töökindel ning kaamerale ohutu konstruktsioon, mis ka löökidele vastu peaks.

# 1. ÜLDINE KIRJELDUS

## 1.1 Droon

Droonide kasutus ükskõik mis alal kogub aastast aastasse aina rohkem populaarsust. Olgu selleks alaks filmindus, fotograafia või pakivedu. Nende võime lennata ja käia kohtades, kuhu inimesel puudub lihtne ligipääs, tõstab droonide väärtust, eriti monitooringu alal. Drooni kasutamine monitooringuks võimaldab avastada ning koguda infot rohkem, kui varasematel aegadel. Piloot võib asuda mugavalt kaugel tee ääres või kontoris ning koguda samal ajal drooniga infot tihedast metsast, kaljudelt või isegi ookeanilt.

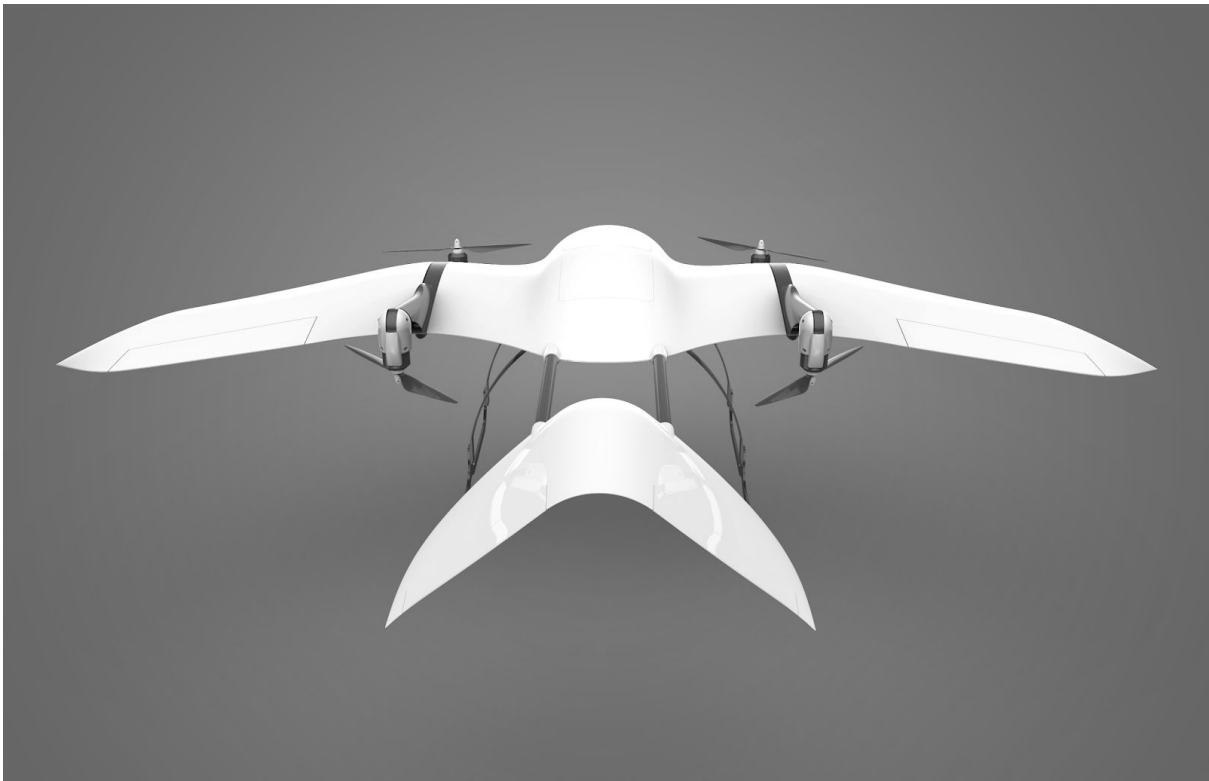
Kuna droonid on võrdlemisi uued seadmed, siis tuleb uusi tootjaid pidevalt turule juurde ning vanad tootjad tegelevad vanade mudelite modifitseerimise või uute mudelite arendamisega. Kui tekib soov droon soetada, siis valiku võimalus on suur. Sarnaselt droonidele, tekib pidevalt juurde ka uusi kaameraid, mida võiks drooniga kasutada. Kahjuks pole kaamerad tihtipeale sama ettevõtte omad, mis droonid, või puudub koostöö kahe vahel, mistõttu puudub lihtne võimalus drooni ja kaamerat integreerida- see tekitab vajaduse gimballi jaoks.

Monitooringu ülesannetel kasutatakse mitmeid erinevaid liiki lennudevahendeid. Tihti peale kasutatakse ka puldiga juhitavaid lennukaid või VTOL õhusõidukeid. VTOL õhusõidukid suudavad tõusta õhku, maanduda ja hõljuda vertikaalselt. Sellesse gruppi kuuluvad helikopterid, droonid ning mõned lennukid, mis suudavad vertikaalselt tõusta ning maanduda. Nende suurimaks eeliseks tavalise lennuki ees on võimekus startida ning maanduda igal pool, kus on sõiduki enda suuruse ulatuses puhas maa maandumiseks. VTOL kontseptsiooniga õhusõidukid on hiljuti tekkinud. Põhjuseks nende keerukam konstruktsioon ning keerulisemad juhtimisalgoritmid.

Töös projekteerin gimballi Tallinna Tehnikaülikooli droonile, mis soetati ettevõttelt Wingcopter. Ettevõtte asutati 2015. aastal Saksamaal. Esimene prototüüp valmis 2011. aastal ning esimene autonoomne droon 2016. aastal. 2017. aastal teenis Wingcopter auhinna "German Award for Innovation in Aviation", millega tunnustatakse Saksamaa innovatiivseimat ettevõtet lennunduses. 2018. aastal kirjutati Guinnessi Maailma Rekordi raamatusse nende drooniga saavutatud keskmine kiirus 240 km/h. Droonil kasutati võimsamaid mootoreid, seega kõik nende toodetud droonid nii kiirelt ei lenda. Selle saavutas professionaalne drooni võidusõitja """. Drooni tühimassiks reklaamitakse 6 kg. Ta suudab lennata kuni 100 km 2 kg lastiga. Tavaversiooni droonid liiguvad kuni 150 km/h kiirusega. Ta suudab tõusta kuni 6 m/s kõrguseni 5000 m. Wingcopteri tiivaulatuseks



ütlevad tootjad 178 cm, pikkus 132 cm ning kõrgus 52 cm. Wingcopterit kasutatakse mitmetel erinevatel eesmärkidel, näiteks kaardistamiseks. Lisaks rakendatakse seadet tulekahjude leidmiseks looduses või soojuskaameraga otsimiseks. Samuti teostatakse antud drooniga pakivedusid, mistõttu on droonist suur abi ka meditsiini valdkonnas, kus seda kasutatakse eraldatud saartele meditsiinitarbete ja ravimite transportimiseks ning vereanalüüside tagasi toomiseks erinevate haiguste diagnoosimiseks.



Joonis 1.1.1 Wingcopter[1]

## 1.2 Kaamera

Eelmises peatükis sai mainitud, et droone kasutatakse palju monitooringuks ning neid on palju erinevaid liike ning disaine, sama kehtib ka kaamerate puhul. Monitooringuks kasutatakse erinevaid liike kaameraid. Kaamera valik sõltub väga palju sellest, mida monitooritakse. Näiteks öösel inimesi metsast või ükskõik kust otsides kasutatakse termokaamerat. Tavalist kaamerat võib kasutada näiteks millegi jälgimiseks või mingi ala kaardistamiseks. Monitooringuks kasutatakse ka erilisemaid kaameraid nagu multispektraal ja hüperspektraal kaameraid. Multispektraal kaamerat kasutatakse näiteks põllumajanduses pinnase ning vilja seisukorrast info saamiseks või militaarsedel eesmärkidel. Selle kaamera abil saab mõõta näiteks vastase punkri sügavust, maamiine avastada või märgata

ballistilisi rakette[2]. Hüperspektraal kaameraid kasutatakse samuti põllumajanduses. See võimaldab taevast näha taimede võimaliku vee ja toitainete puuduse enne kui seda silmaga näha on [3].

Multispektraal kaamera teeb pilte 100 nm - 1 mm lainepikkuste ulatuses. Tema sees kindal lainelaga filtrid. Olenevalt kasutusala kasutatakse erinevaid filtreid mida võib olla olenevalt kaamerast kuni 10. Lainelad on laiad võrreldes hüperspektraal kaamera laineladega. Sel kaameral on filtreid sadu. Tema lainelad on 10 - 20 nm.

Töös projekteerin gimballi XIMEA MQ022HG-IM-LS150-VISNIR kaamerale, mis on pisike hüperspektraal kaamera. Line scan on eriline kaamera ja seepärast ei eksisteeri tema jaoks gimballi, mistõttu olen selle töö enda teha võtnud. Kaamera erilisus väljendub selles, et ta koosneb ühest reast pikslitest ja need suudavad info kiiresti vastu võtta. Ta teeb kiirelt (170 fps) ning väga kõrge resolutsiooniga (2048 x 1088) pilte. Antud kaamera spektri vahemik on 470 - 900 nm. Selle seadme mõõtmed on väikesed (26,4 \* 26,4 \* 30,2). Selliseid kaameraid kasutatakse paljudel aladel, näiteks meditsiinis, põllumajanduses, tootmistööstustes. Line scan kaameraga saab vähirakke uurida, endoskoopiaks kasutada. See võimaldab gaasilekkeid, toote defekte tuvastada. Line scan kaameraid kasutatakse ka topograafias või posti sorteerimiskeskustes.



Joonis 1.2.1 Line scan camera XIMEA MQ022HG-IM-LS150-VISNIR[4]



Joonis 1.2.2 Objektiiv 35mm C Series VIS-NIR[5]

Joonisel 1.2.2 nähtavat objektiivi kasutatakse joonisel 1.2.1 oleva kaameraga. Selle kaaluks nimetab tootja 75 g. Pikkust on objektiivil 41 mm ning välisläbimõõt 33 mm. Koos kaameraga on pikkus 71,2 mm ning mass 107 g.

## 2. GIMBAL

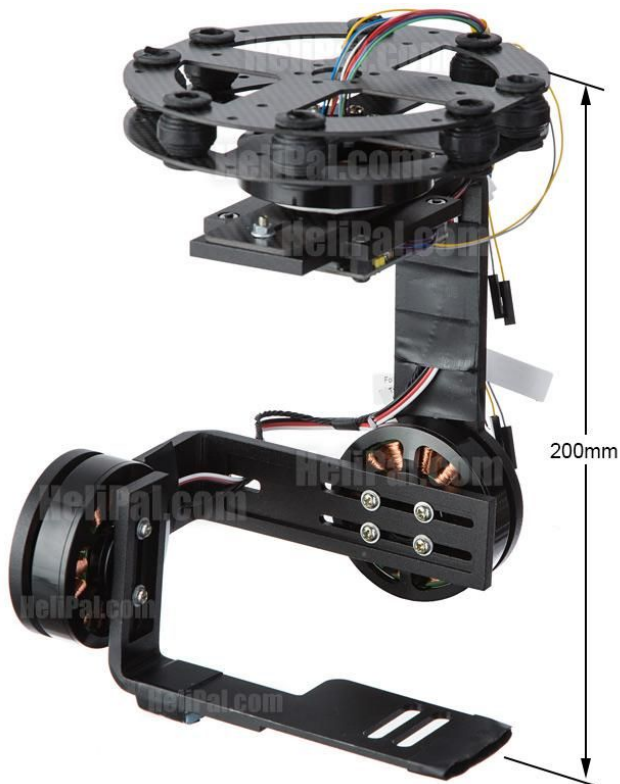
### 2.1 Nõuete analüüs

Seatud nõuded:

- 1) Võimalikult kerge ja kompaktne - Gimballi korpus tuleb projekteerida kerge. Tema läbimõõt ja kõrgus peavad olema minimaalsed. Korpuse seina paksused tuleb valida optimaalsed, arvestades massi kui ka konstruktsiooni tugevust. Komponentide valikul tuleb valida võimalikult kerged komponendid, kuid ei tohi ohverdada seadme töökindlust.
- 2) Kaamera pööraks 3-telje sihis - Tuleb kasutada kolme mootorit ja neid korrektselt juhtida.
- 3) Kaamera ja objektiiiv oleks kaitstud - Kaamera peab asuma korpuse sees ja korpus peab jääma väiksemate löökide korral terveks. Objektiiivi ette peab panema optilise klaasi, et kaamera näeks, kuid oleks ka kaitstud.
- 4) Gimbal peab kannatama minimaalselt 10 kg lööke kiirusel  $10 \text{ m/s}^2$  ehk  $10 * 100 = 1 \text{ kN}$  - Löövide tagajärjel ei tohi viga saada mootorid, kaamera ega korpus.

## 2.2 Konstruksiooni valik

Spetsiaalselt peatükis 1.2 kirjeldatud kaamerale, mida Tallinna Tehnikaülikool plaanib kasutada drooniga, ei ole ühtegi gimballi turul leida. Seetõttu otsisin kaameratele mõeldud gimbalide erinevaid disaine, mille seast valida sobivaim disain, arvestades seatud nõudeid.



### Compatible with Tarot 680 Pro or larger drone

\* need to use retractable landing skids to increase ground clearance

The Pan Axis motor module is quite tall, we changed the landing skids to remote controlled, ground clearance is increased to 30cm, then we zip tie this gimbal on the belly.

### Joonis 2.2.1 Kontseptsioon nr. 1[6]

Kontseptsioon nr. 1 - Minimalistlik ja kerge gimballi konstruktsioon. Sellel puudub korpus, mistõttu esineb suur oht kaamerat vigastada. Mootorid on omavahel ühendatud lülidega, mis pakuvad tagant ning küljelt löögikaitset, kuid sedagi minimaalselt. Kaamerat toetab ühelt küljelt vaid üks mootor. Teisel küljel puudub kaamerale toetuspind. See tähendab, et kaamerat pööraval mootoril on alati pinge peal, mis võib mootori eluiga lühendada. Pöörab kolmel teljel.



Joonis 2.2.2 Kontseptsioon nr. 2[7]

Kontseptsioon nr. 2 - Kaamera asub korpuse sees, kaitstult. Korpus koosneb ühest tükist. Seda pöörab mootor ümber vertikaaltelje. Korpuse sees asub kaks mootorit, tagumine mootor kinnitub korpuse külge ning kaamera küljel olev mootor ühendatakse tagumise mootoriga lüli abil. Selleks, et kaamera alati näeks, olenemata, mis asendis kaamera horisontaalteljel on, kasutatakse gimbalil optilist klaasi 180° kaamera objektiivi liikumise suunal.

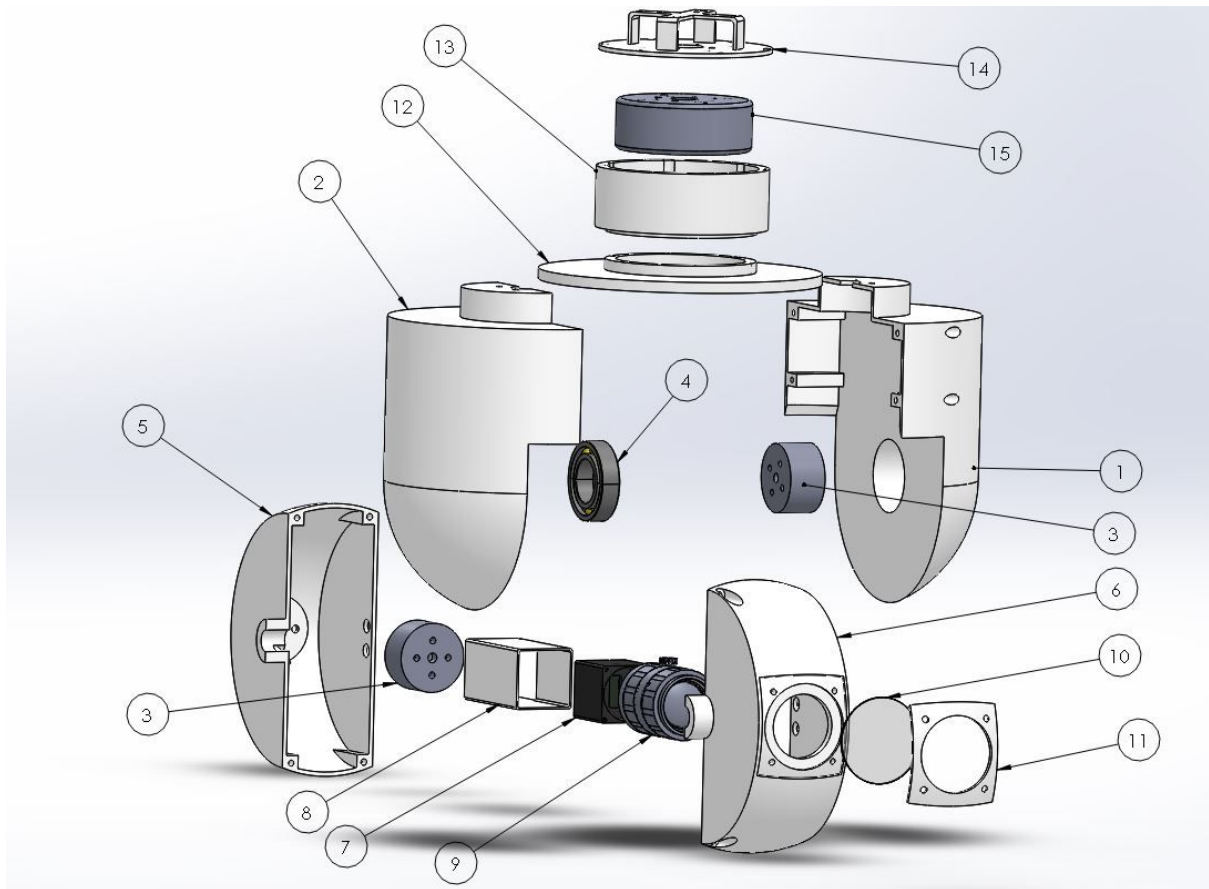


Joonis 2.2.3 Kontseptsioon nr. 3[8]

Kontseptsioon nr. 3 - Kaamera asub korpuse sees. See koosneb kahest osast: munast ja põhikorpusest. Põhikorpust pöörab üks mootor. Muna pöörab põhikorpuse küljele kinnitatud mootor. Muna sees on kolmas mootor, mis pöörab kaamerat ümber vertikaaltelje. Sellisel juhul pole vaja optilist klaasi 180° ümber kaamera, sest muna pöörab koos kaameraga. Objektiivi ette tuleb ainult väike klaas lisada.

Kontseptsioon nr. 1 ei paku kaamerale kaitset seetõttu välistati see variant esimesena. Kontseptsioon nr. 2 ja 3 sarnanevad põhimõttelt üksteisele, kuid valikul sai otsustavaks optilise klaasi disain. 3. kontseptsiooni puhul on klaas kaamera objektiivist natuke suurema diameetriga ring ehk väiksem osa gimbalist. 2. kontseptsiooni puhul oleks klaas tunduvalt suurem osa gimbalist. Valituks sai kontseptsioon nr. 3, mis klaasi purunemise korral kõige vähem kahju teeks.





Joonis 2.2.4 Gimballi koostu “plahvatusvaade”

Komponendid ja nende tähis:

- 1) “Roll” ehk külgmise mootori poolne korpus
- 2) Laagri poolne korpus
- 3) BGM 2606-90 mootor 2tk
- 4) Laager
- 5) “Pitch” ehk tagumise mootori poolne muna
- 6) Kaamera poolne muna
- 7) Ximea hüperspektraal kaamera
- 8) Kaamera korpus
- 9) Objektiiv
- 10) Optiline klaas
- 11) Klaasikate
- 12) Tugiäärük
- 13) Mootori kinnitus
- 14) Mootori kinnituse kate
- 15) “Yaw” ehk ülemine mootor BGM 5208-200-12

Joonisel 2.2.4 nähtav konstruktsioon ja komponendid said projekteeritud antud lõputööna. Kaamera objektiiviga asub muna sees. Kaamera on korpuse küljes fikseeritud ning korpus kinnitatult tagumise mootori küljes. Objektiivi kaitseb optiline klaas, mille ees asub klaasikate. Muna mõlemad osad ühendatakse omavahel 4 kruviga igast nurgast. Muna üks pool kinnitatakse küljel asuva mootori külge ning teine pool laagri sisse. Laager on laagri poolse korpuse osa sees. Sarnaselt asub küljepealne mootor mootori poolse korpuse osa sees. Korpuse mõlemad pooled ühendatakse sarnaselt munale 4 kruviga neljast punktist. Korpuse kitsam osa läheb tugiääriku sisse millega jääb vahe 0.5 mm. Tugiääriku külge ühendatakse ülemise mootori kinnitus 6 kruviga. Mootor ühendatakse gimballi korpusega. Viimasena tuleb peale kinnituse plaat, mis ühendatakse mootoriga ning lõpuks ka kinnitusega.

## 2.3 Mootorite valik

Tabel 1 Mootorite hindamismatriks

	Koormus	Kiirus	Eluiga	Kontrollimine	Positsiooni hoidmine	Maksumus	Kokku
Kaal	4	5	4	5	5	2	
BLDC	3	5	5	5	1	3	93
Servo	4	4	2	3	4	3	85
Samm mootor	3	2	4	4	5	4	91
Gimbal BLDC	4	4	5	5	5	1	108

Tabel 1 saadud tulemuste järgi valitakse antud töös mootoreid spetsiaalselt gimbalitele mõeldud harjasteta alalisvoolu mootorite seast.

Valikul tuli silmas pidada, et iga mootor liigutab erinevat massi. Pealmine mootor pöörab tervet gimballi. Küljel asuv mootor peab pöörama muna ning tagumine mootor pöörab ainult kaamerat. Eelistasin mootori valikul võllita mootoreid võlliga mootoritele, seda kahel põhjusel. Esiteks võllita mootori puhul on võlli asemel auk, kust on võimalik juhtmed läbi viia. See muudab juhtmete paigutuse palju lihtsamaks. Ei teki olukorda, kus juhe ümber mootori end põimub või mootori vahele läheb. Teiseks võimaldab võllita mootor ühendada keha külge vähemalt 4 poldiga. See on lollikindel ühendusviis võrreldes võlliga ühendamisel, kus keha ripub ühe punkti küljes. Teine murekoht võlliga mootoriga ühendamisel seisneb selles, et keha ei tohiks võllilt maha libiseda. Kui keha ripub võlli otsas, siis on see oht suur. Sel juhul tuleb lisada kinnitus kohale seadekruvi, mis takistaks maha

libisemist, kuid ei välista seda. Võllita mootori puhul ühendatakse mootor keha külge nelja poldiga. Olenemata kuidas mootor kehaga võrreldes asetseb, korrektset kinnitades, puudub oht mootori küljest kukkumisel.

Eelmisel semestril üritas grupp tudengeid teha samale kaamerale gimballi. Nad kasutasid enda projektis kolme joonisel 2.3.1 nähtavat mootorit.



Joonis 2.3.1. Olemasolev mootor tehniliste andmetega.[9]



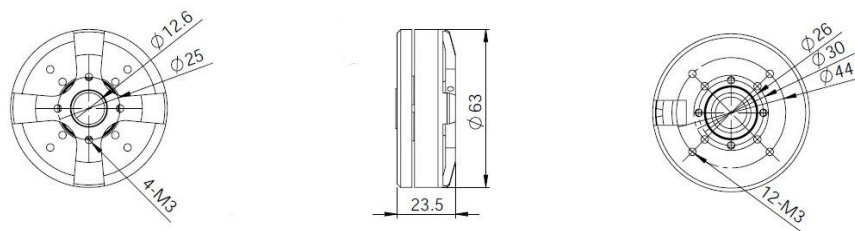
Joonis 2.3.2 Olemasoleva mootori joonis[9]

Valmis projekteeritud üldisest gimballi mudelist sain vajalikud massid, arvestades, et gimbal 3D printitakse plastmassist. Materjaliks määrasin ABS, see andis aimduse palju detailid reaalselt kaaluma hakkavad. Arvestades detailide massi, jõudsin järeldusele, et olemasolevatest mootoritest saan kasutada kahte mootorit. Gimballi täismassiks arvestasin umbes 1 kg. Sellist massi olemasolev mootor tehniliste andmete põhjal pöörata ei suuda. Muna massiks näitas programm umbes 250 g ning kaamera massiks 100 g. Nende andmete põhjal jõudsin järelduseni, et olemasolevad mootorid peaksid suutma muna ja kaamerat pöörata. Kuna nad olid olemas ja piisavalt võimekad vajalikuks tööks, siis otsustasin kahte olemasolevat mootorit kasutada.

Kolmanda mootori otsimisel jälgisin, et suudaks pöörata üle 1 kg massi ning oleks võllita mootor. Gimballi mootorite kontrollid lisas veel mõned kitsendused komponendi valikul. Kuna olemasolevad mootorid ning kontrollid pärinevad sama tootja (DYS) käest, siis keskendusin ainult selle tootja mootori valikusse. Seda põhjusel, et süsteemi tööst välistada võimalikud vead erinevate tootjate komponentide sobimatuse tõttu. Valik toimus 22 mootori vahel. Mõned mootorid olid võlliga, mis vähendas valikus olevate komponentide hulka. Valituks osutus DYS BGM5208-200-12 mootor. See oli kõige optimaalsem valik jõudluse ja kerge kaalu vahel.



Joonis 2.3.3 DYS BGM5208-200-12 [10]



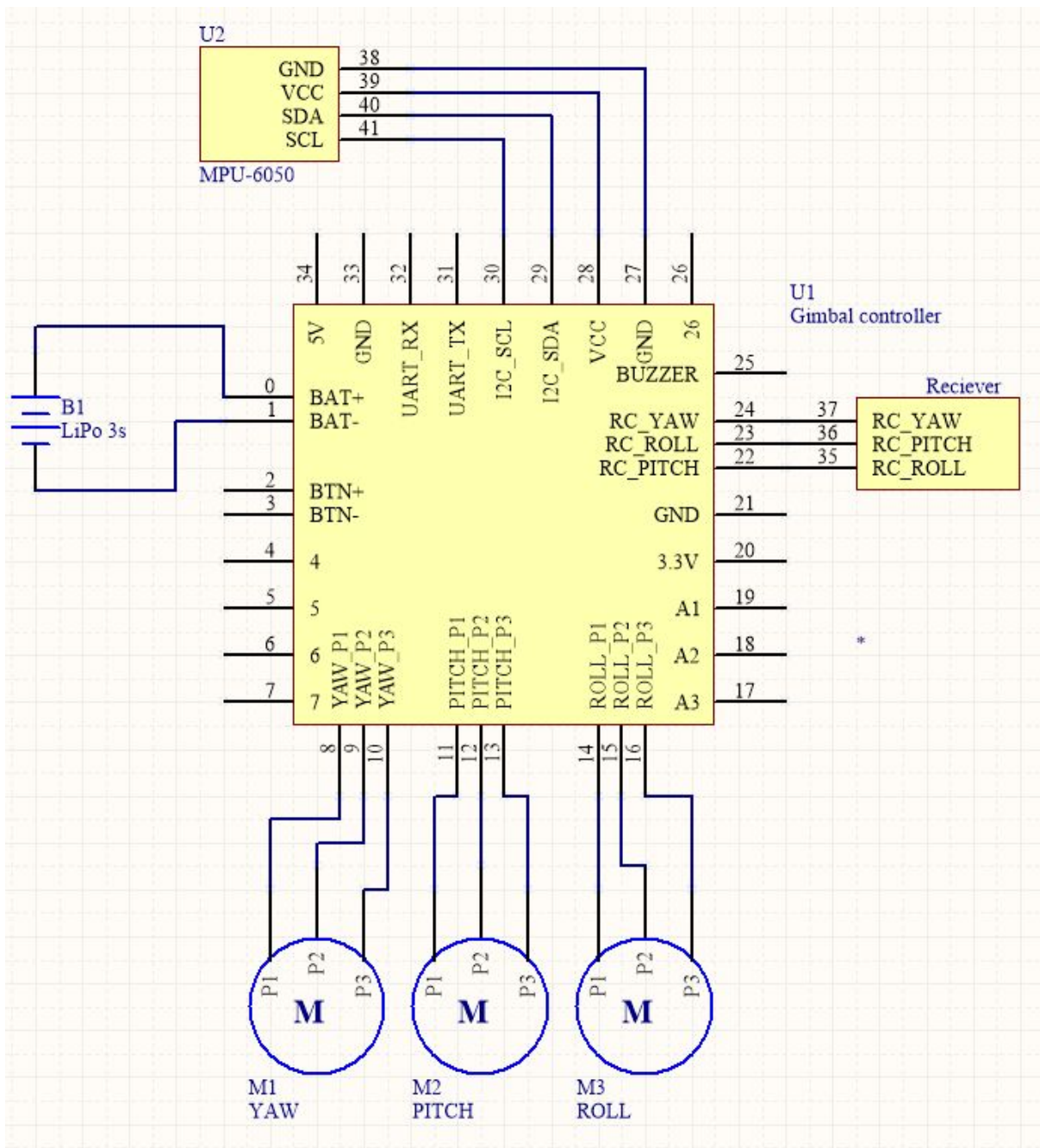
Joonis 2.3.4 DYS BGM5208-200-12 joonis[10]

## 2.4 Kontrolleri valik

Eelmisel semestril samale kaamerale gimballi projekteerinud grupi poolt soetati peatükis 2.3 mainitud mootoritega ka kontrolleri BaseCam SimpleBGC 32-bit. Kontrolleri pärineb sama tootja DYS poolt. Kontrolleri mõõtmeteks väidab tootja 50 \* 50 mm ning kinnitusaukude vahe 45 \* 45 mm. Nende mõõtmetega kontrolleri mahutamine ei tekitanud probleeme. Kontrolleri maksimaalne mootoritele edasi antav voolutugevus on 1,5 A. Teades komponentide umbkaudset kaalu ning mootorite tehnilisi andmeid, võib arvata, et nii palju voolu mootorid kokku ei tarbi. Tootja on loonud ise programmi, mis on tasuta kättesaadav kontrolleri kodulehel. Sellega saab kontrolleri tööd jälgida või andmeid muuta. Programmi kasutamine muudab kasutaja elu palju lihtsamaks. See võimaldab terve süsteemi tööd jälgida ja veaotsinguid teha. Kasutajale võimaldab programm muuta kontrolleriis olevaid väärtusi enda soovide järgi. Programmi, mille võib leida Basecam kodulehelt, nimi on SimpleBGC 32 bit GUI.



Joonis 2.4.1 Gimballi mootorite kontrolleri Basecam SimpleBGC 32 bit.[11]

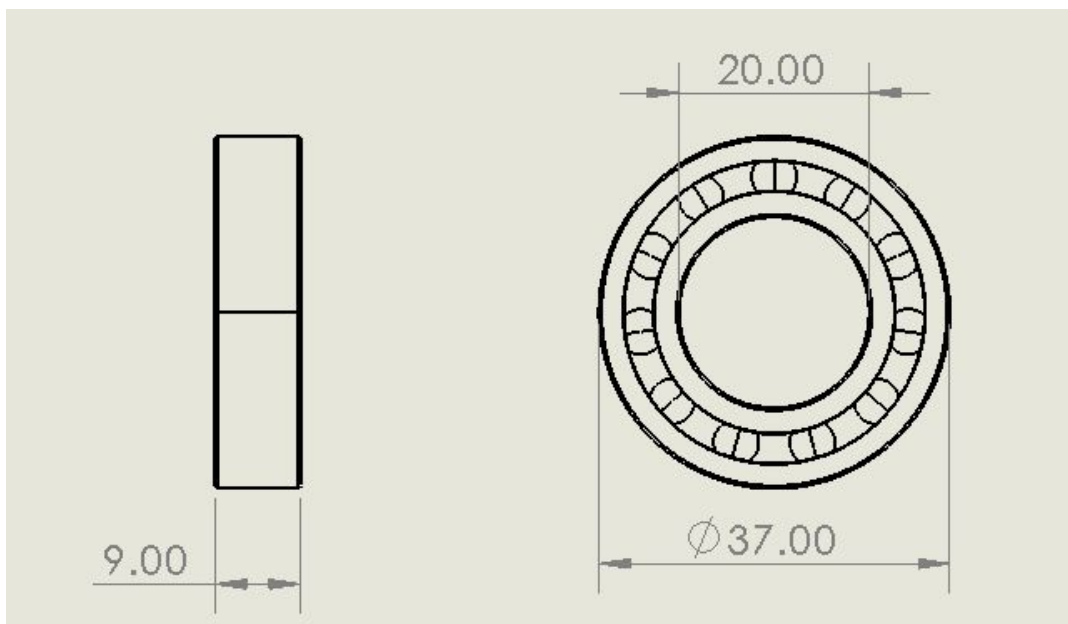


Joonis 2.4.2 Elektriskeem

## 2.5 Laagri valik

Laagrit kasutan muna ühe poole toetamiseks. See võtab muna pööravalt mootorilt koormust vähemaks. Vastasel juhul ripuks terve muna ühe väikese mootori otsas, mis raskendab mootori pööramist ning suurendab mootori laagri vigastamise tõenäosust löögi korral. Laagri valimisel lähtusin tema suurusest ja massist. Tema löögitaluvus tuleb boonuseks. Laagrit otsisin võimalikult munast teisel pool oleva mootori massile võrdse massiga, et korpuse masskese mootori poole liiga palju ei oleks. Mootori massiks väidab tootja  $40\text{ g} = 0,04\text{ kg}$ . Laagrit otsisin Alas-Kuul kodulehelt ning andmeid sealt leitud laagritele otsisin SKF laagrite kataloogist[12]. Valik tehti üherealiste radiaalkuullaagrite valikust, sest need on kõige odavam variant ning pole midagi paremat ehk kallimat vaja. Sarnase massiga laagrit leidsin 20 mm siseläbimõõduga, mille massiks oli 38 g ning 25 mm siseläbimõõduga, mille mass on 45 g. Kuna toru, mis muna küljes on ning laagrisse läheb, omab ka mingit väikest massi, siis mootoriga sarnase massi saaks 20 mm siseläbimõõduga laagrit kasutada. Kasutades 25 mm siseläbimõõduga laagrit ning lisades sinna teatud toru massi, siis ta omaks suuremat massi kui mootor. See tähendaks, et mootorit tuleb tuua gimballi kesktasapinnale natuke lähemale korpuse seest, ning tekitada munale väike süvis. Seetõttu valisin 20 mm siseläbimõõduga laagrit, mis hoiab konstruktsiooni lihtsa, sileda ja masside vahe mootoriga peaaegu võrdse. See lubab asetada laagri gimballi kesktasapinnast täpselt sama kaugemale kui teisel pool olev mootor on.

Valitud laagri dünaamilise koormuse reiting ületab nõuetes esitatud 1 kN löögi taluvuse 6 kordselt. Täpsemalt on valitud laagri reiting 6,37 kN[12].



### 3. KONSTRUKTSIOON

Kõik allolevad projekteeritud detailid 3D prinditakse ABS materjalist. Mootorite ühendamisel keha külge kasutatakse M3 polte, mida on iga mootori kohta 4. Sama palju polte kulub ka keha ühendamisel teisele poole mootorit. Modelleerimiseks ning jooniste tegemiseks kasutati programmi SolidWorks 2018 Student Edition.

Gimbali konstruktsioon koosneb 3 põhi detailist:

- 1) Korpus
- 2) Muna
- 3) Tugiäärrik
- 4) Kinnitus

Nende disainimisel tuli arvestada mootorite, laagri, drooni põhjaplaadi ja kontrolleri mõõtmeid ning masse. Disainimisel lähtuti seatud nõuetest ning juhendaja poolt antud suunistest.

#### 3.1 Korpus

Gimbali korpuse disain on silinder, mille alumine ots on ümar. See lisab voolujoonelisust, mis vähendab õhutakistust. Keskelt välja jäetud osa asendab muna, mis seal liikuma hakkab korpuse suhtes. Ülemise osa läbimõõt valiti, arvestades põhjaplaadis olevast 70 mm august, tugiäärriku seinapaksust 5 mm ning 0,5 mm vahetäärriku ja korpuse vahel, 59 mm. Korpus pole seest täidetud materjaliga. Seinade paksus valiti 2 mm, konstruktsiooni väikse massi tagamiseks. Kohtades, kus ligipääs pole oluline lisasin 1 mm ribid et konstruktsiooni tugevdada.

Tugevusarvutus tõestuseks, et surve 2 mm seinast piisab 1 kN löögi korral kõige väiksema ristlõikega osas, kus pole tugevdavaid ribisid. Selleks osaks on ülemine osa, mis läheb läbi drooni põhjaplaadi ava. Arvutus toimub ainult survele sellepärast, et tõmbel mõjub ainult gimballi enda raskusjõud, löögi korral tekib survepinge. Tõmbel on pinge üpris konstantne ning mõjuv jõud on 10 korda väiksem kui nõuetes ettenähtud löögijõu taluvus.

$$\sigma = \frac{[\sigma_{Lim}]}{[S]} \quad (3.1.1)$$

kus  $\sigma$  - lubatav pinge, Pa

$\sigma_{Lim}$  - materjali piirpinge, Pa



S - varutegur

$$\sigma_{Surve} = \frac{4 * N}{\pi(1-c^2)D^2} \quad (3.1.2)$$

kus  $\sigma_{Surve}$  - tegelik survepinge, Pa

N – Mõjuv jõud, N

D – Rõnga välisdiameeter, m

C – Rõnga siseläbimõõdu ja välisläbimõõdu suhe  $\frac{d}{D}$

Materjali piirpinge survel, arvestades materjaliks ABS, siis  $[\sigma_{Lim}] = 65 \text{ MPa} = 65 * 10^6 \text{ Pa}$  [13]

Avaldame valemist (3.1.1) lubatava pinget, kui varuteguriks valida 10.

$$\sigma = \frac{6.5 * 10^6}{10} = 6,5 \text{ MPa}$$

Nüüd arvutame tegeliku pinget korpuse nõrgeimas kohas valemi (3.1.2) järgi. N võtame nõuetes ettenähtud 1 kN ehk 1000 N. D on valitud 59 mm = 0,059 m ning  $c = \frac{55}{59} = 0,9322$ , arvestades, et d = 55 mm.

$$\sigma_{Surve} = \frac{4 * 1000}{\pi(1-0,9322^2) * 0,059^2} = 2792057 \text{ Pa} \approx 2,79 \text{ MPa}$$

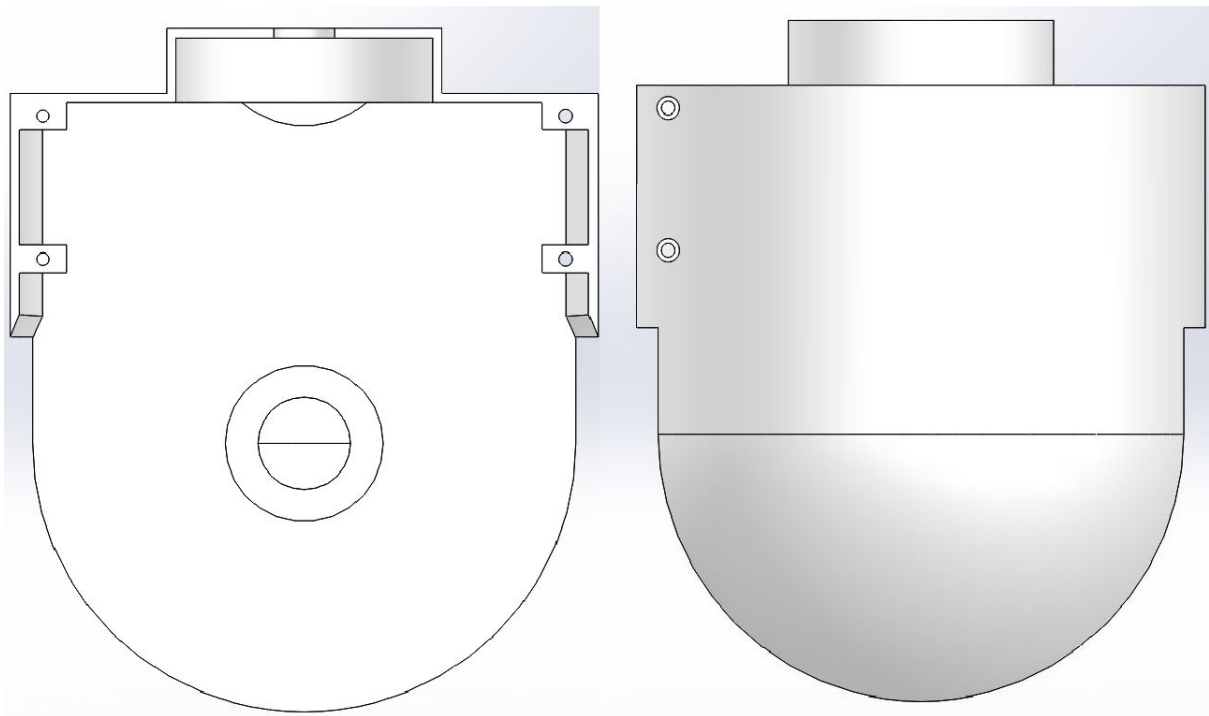
Võrdleme lubatavat ja tegelikku pinget varutegurit S = 10 arvestades.

$$2,79 \text{ MPa} \leq 6,5 \text{ MPa}$$

Sellest järeldub, et projekteeritud korpus peab vastu löögijõule 1 kN. Tuletades valemist (4.1.1) S leidmiseks, leian projekteeritud konstruktsiooni tegeliku varuteguri.

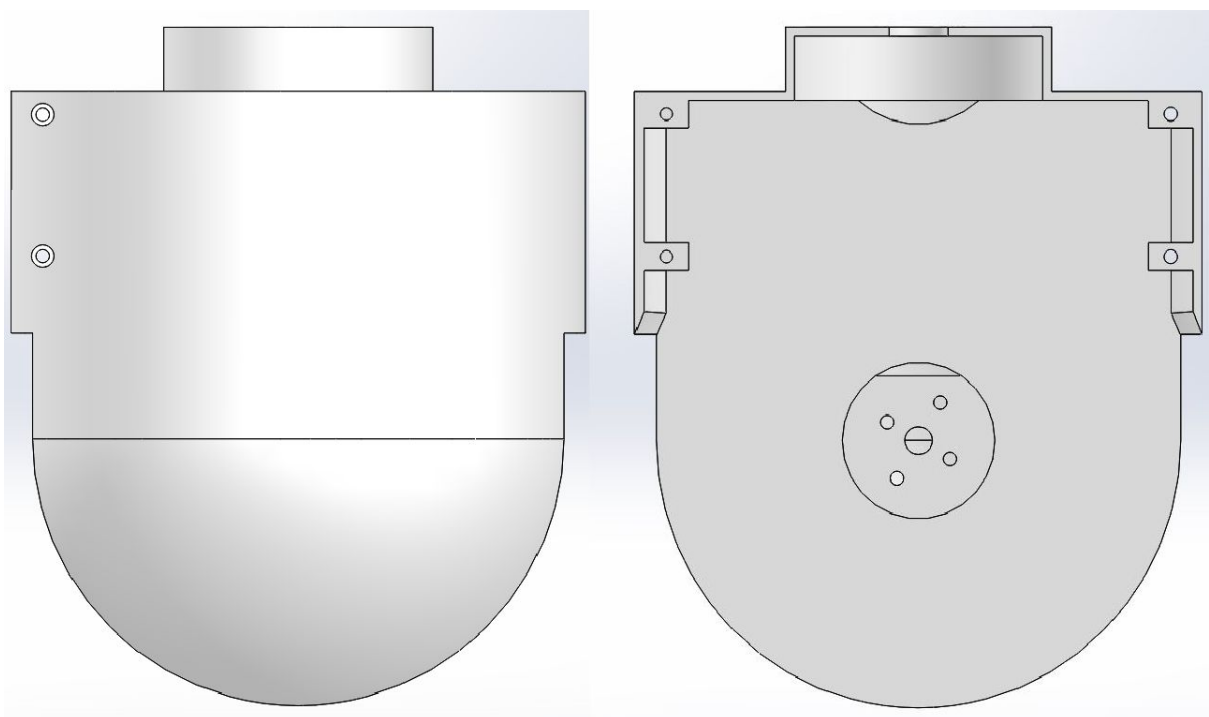
$$[S] = \frac{[\sigma_{Lim}]}{[\sigma]} = \frac{65 * 10^6}{2,79 * 10^6} = 23,30 \approx 23 \text{ on tegelik varutegur projekteeritud korpuse nõrgeimal kohal,}$$

kus puudub lisa tugevdus.



Joonis 3.1.1 Laagri poolne korpuse osa

Korpus koosneb kahest sarnasest osast. Osade erinevus on, et ühel poolel korpusest kinnitub mootor, mis pöörab muna ning teisel poolel on sees laager kuhu kinnitub muna teine pool.



Joonis 3.1.2 Mootori poolne korpuse osa

Poolel kuhu kinnitub mootor tegin seinä süvise, kuhu mootor sisse panna. Süvise tagumises seinas asuvad mootori kinnitamiseks augud, mis tehti vastavalt tootja antud jooniste järgi. Sama süvisesse tegin ühe suurema augu, kust tulevad välja mootori juhtmed. See võimaldab mootori juhtmed vabalt

otse üles kontrollerrisse viia. Vastasel juhul oleks need juhtmed süvise ja mootori vahel ning mootor võib pööreldes juhete kahjustada või juhe võib mootorisse minna. Korpusest välja lõigatud osa, kus asub muna on 2 mm laiem kui muna, ehk mõlemalt poolt lahutab korpust ja muna 1 mm. Korpuse pooled ühendatakse 4 kruviga. Joonisel 3.1.1 ja 3.1.2 nähtavatest kruvi aukudest kinnitatakse korpuse pooled omavahel. Korpuse ülemine pind kinnitatakse mootori külge, mis kogu gimballi pöörab. Seal asetseb 4 poldi auku 12,5 mm kaugusel pinna keskpunktist. Aukude vahed jagati 4 võrdseks nurgaks, ehk 90°. Nende vahele jätsin 13 mm läbimõõduga ava, mis on mootori keskaugust suurem, et pind vastu mootori laagrit ei pressiks. Ava põhiline mõte seisneb juhtmete viimiseks gimballist drooni.

### 3.2 Muna

Gimballile projekteeritud muna suuruse paika kaamera pikkus koos objektiiviga nii, et tema taga asuv mootor oleks piisavalt kaugel juhtmete ühendamiseks kaamera külge. Nii tuli muna sise raadiuseks 61 mm, seina paksusega 2 mm sain välis raadiuseks 63 mm. Muna laiuse valisin kaamera diagonaali arvestades, et ta pöörates vastu seina ei läheks.

Kaamera ristlõige on 26,4 mm \* 26,4 mm. Pythagorase teoreemi kasutades saame leida tema diagonaali.

$$c = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (3.2.1)$$

kus c - täisnurkse kolmnurga hüpotenuus, mm

a - täisnurkse kolmnurga üks kaatet, mm

b - täisnurkse kolmnurga teine kaatet, mm

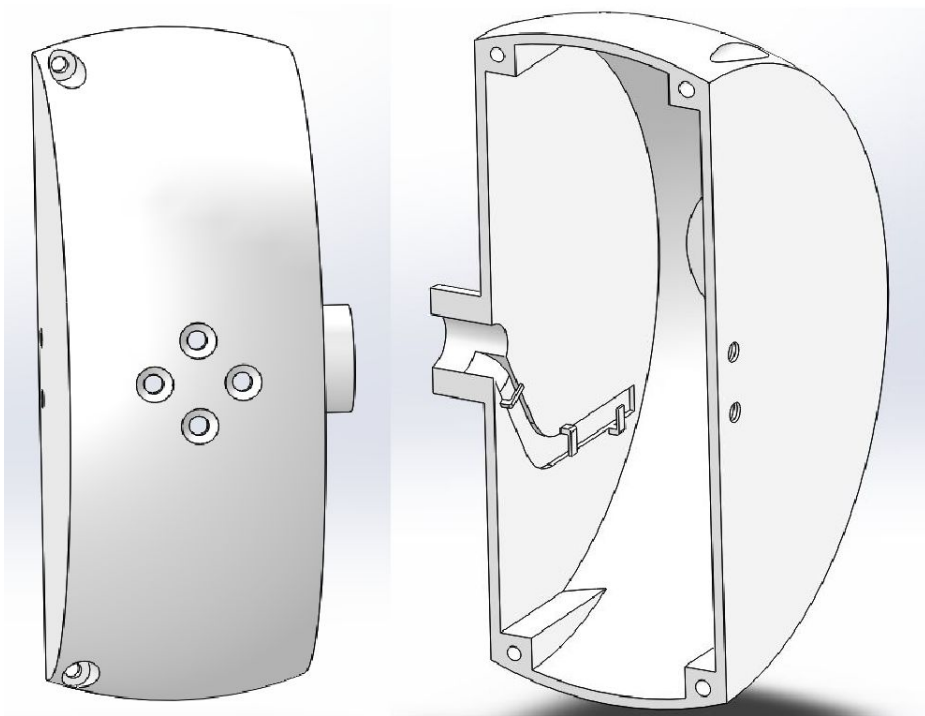
Kaamera mõlema külje pikkus on 26,4 mm.

$$c = \sqrt{26,4^2 + 26,4^2} = 26,4 * \sqrt{2} = 37,33 \text{ mm}$$

Lisaks tuleb arvestada kaamerale tehtud kinnituse paksust ning kaamera kui ka mootori juhtmete paksust, mis lähevad seina äärest läbi laagrisse mineva toru. Kaamera kinnitus peab liigutama ainult kaamerat seega see ei pea tugev olema. Selle seina paksuseks määrati 1 mm.  $37,33 + (1 * 2) = 39,33$  mm. Juhtmetele teen väikse süvendi seina ning klambri, mis tuleb seinast välja, mis hoiab juhtmeid vastu seina. See väldib juhtmete sattumist kaamera pöörämistrajektorile. Klambri kaugus seinast tuleb 2 mm.  $39,33 + 2 \text{ mm} = 41,33 \text{ mm}$ . Ohutuse tagamiseks tuleb jätta ka klambri ja kaamera vahele vahe. Selleks ümardan tulemuse üles ja liidan 0,5 mm.  $41,33 \approx 42$ .  $42 + 0,5 = 42,5 \text{ mm}$ . Muna

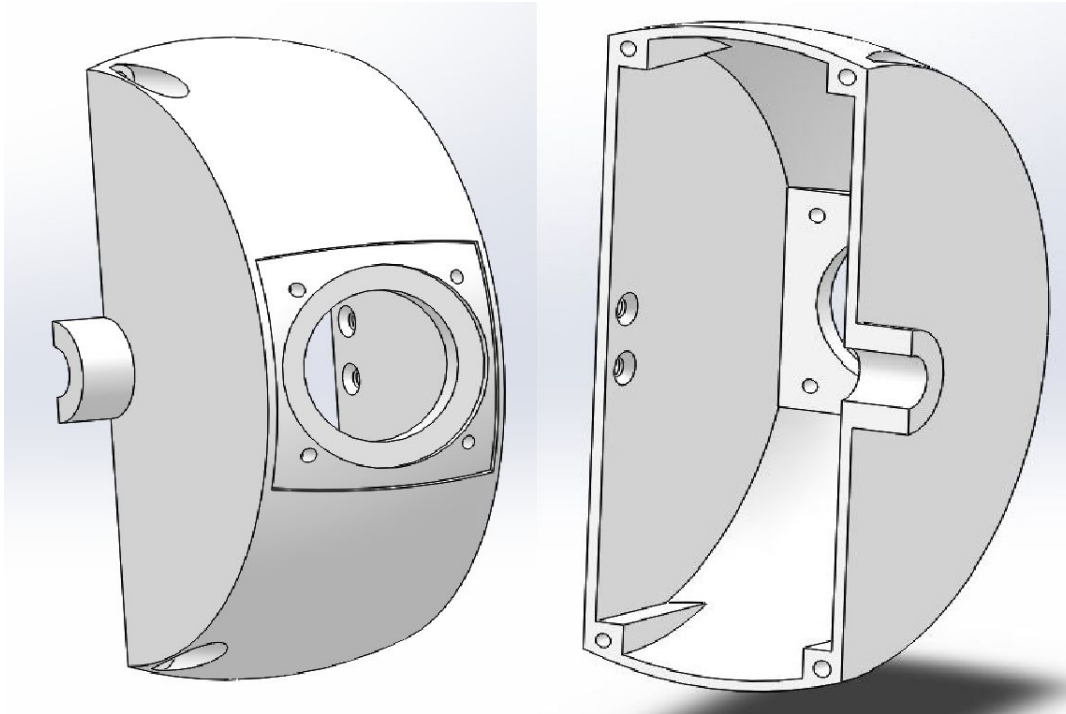
sisemine laius tuleb 42,5 mm ning 2 mm seina paksust arvestades, tuleb muna välimine laius 46,5 mm. See laius on arvestamata toru, mis läheb laagri sisse. Toru välisläbimõõduks valisin 25 mm, kuna see on valitud laagri siseläbimõõt. Toru seina paksuseks valisin 5 mm, kuna tegin sinna mõlemale poole M3 augud, kust poltide ja mutritega muna kaks osa kinnitada. Toru pikkus on 10 mm. See tuleneb laagri paksusest, mis on 9 mm ning muna ja korpuse 1 mm vahest.

See koosneb kahest osast: tagumine, kus asub tagumine mootor ja eesmine, kus on objektiivile auk. Muna liigub korpuse vertikaalteljel korpusega kaasa ja pöörleb korpuse horisontaal teljel. Tagumise osa seina kinnitub 4 poldiga mootor, mis pöörab muna sees kaamerat.



Joonis 3.2.1 Muna tagumine osa

Ühele muna küljele kinnitub mootor, mis on korpuse külge fikseeritud ja pöörab teda. Teisel muna küljel on välja ulatuv toru, mis läheb korpusesse pressitud laagri sisse. Torust tulevad kaamera ja mootori juhtmed. Kaamera ja mootori juhe lähevad läbi laagri üles korpusesse ning sealt kontrollerrisse.



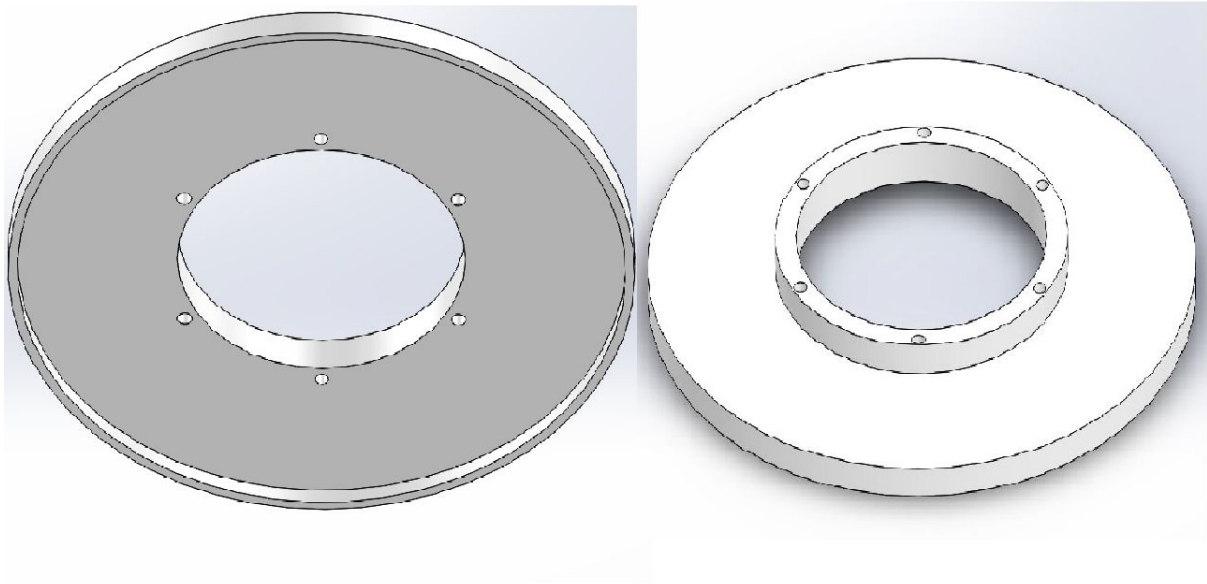
Joonis 3.2.2 Muna eesmine osa

Muna eesmises osas on objektivile auk, mille ees on klaas. Kaks osa ühendatakse omavahel 4-6 kruvi/poldiga. Klaasil on ees kate, mis hoiab klaasi paigal ega lase ära lennata. Kate kinnitub 4 kruviga muna eesmise osa külge.

### 3.3 Tugiäärrik

Esialgelt ei plaaninud tugiäärrikut kasutada. Tema vajadus tekkis kahtlusest, kas ülemise mootori laager suudab taluda radiaal- ja aksiaaljõude juhul, kui gimbal peaks saama löögi korpusesse. Kuna mootori andmetest polnud võimalik teada saada, kui suuri jõude laager kannatab, siis valisin mootori keskaugu sisediameetri (12 mm) järgi kõige väiksema laagri SKF lehelt ning uurisin tema jõudude limiite. Väikseima valisin sellepärast, et polnud andmeid laagri mõõtudest ega tootjast. Targem oli pigem alahinnata laagri tugevust kui ülehinnata. Leitud laagri Dynamic load rating oli 0,527 kN[14], mis on peaaegu 2 korda vähem kui nõutud 1 kN.

Tugiäärriku ülesandeks on vähendada löögijõudu mootori laagrile. Tema disain on 2 astmeline auguga silinder. Laiema astme sein peab olema 0,5 mm gimballi korpusest. Gimballi korpuse põhi peab olema 0,5 mm äärriku astmest. Ülemine aste läheb läbi drooni põhjakattes oleva augu ning kinnitub kinnitus raamiga kruvide abil.



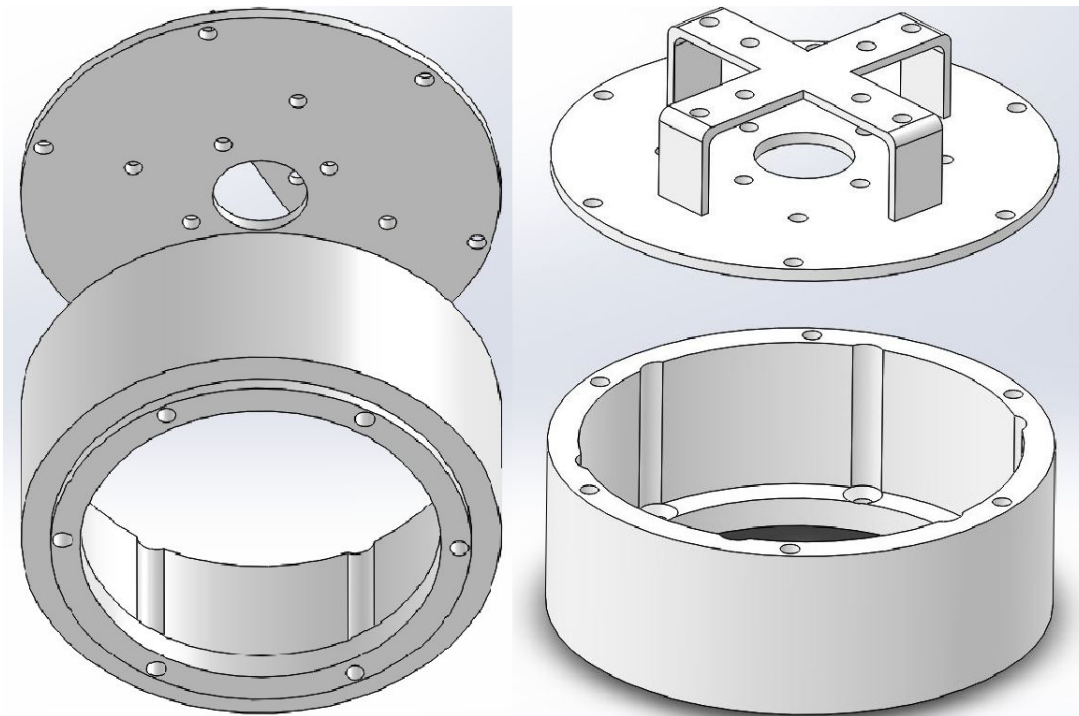
Joonis 3.3.1 Tugiäärrik

### 3.4 Gimballi kinnitus

Lõputööd tehes muutusid gimballi kinnitamise ideed mitmeid kordi. Alustades oli variant, et drooni põhja puurida 4 auku ja ülemisele mootorile tehtud raami jalad läbi aukude poltide või kruvide abil kinnitada. Projektiga edasi liikudes ei läinud siiski kergema vastupanu teed ning tulid uued mõtted, kuidas vähem drooni struktuuri nõrgestada.

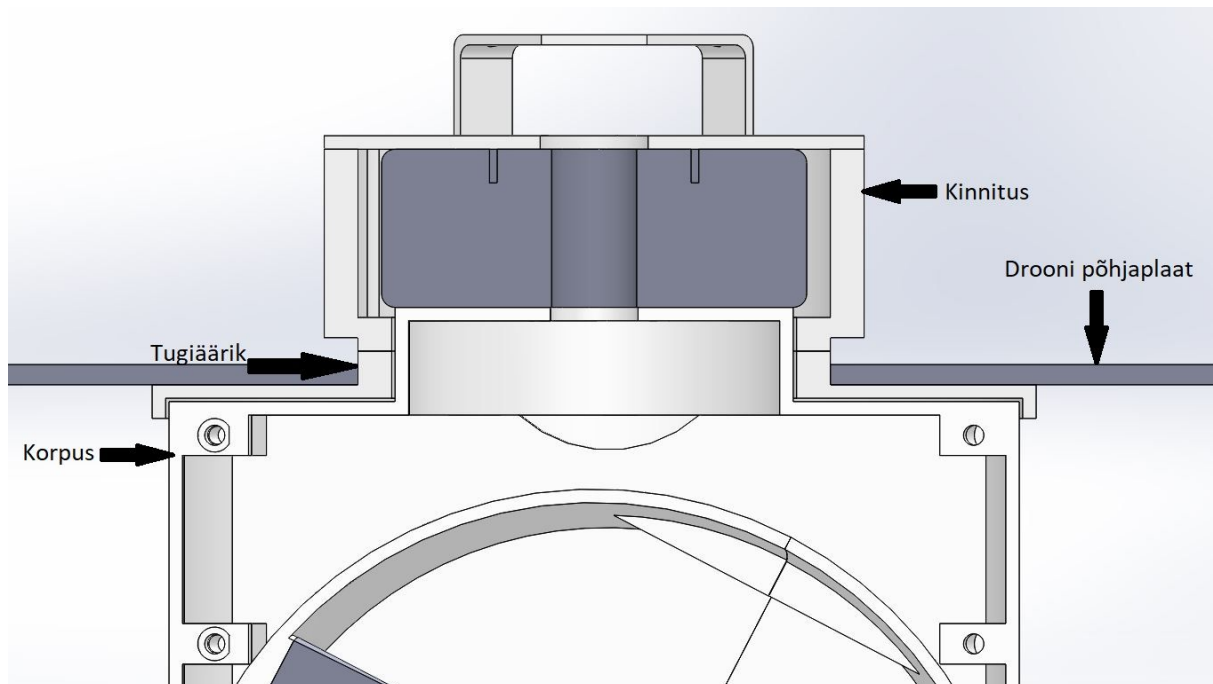
Järgmise idee järgi oleks saanud kasutada ära droonis olevaid polte kuhu kaks mootori raami punkti kinnitada ning ära kasutada ka seinu kuhu võinuks raami peale toetada, et lisa tuge saada.

Selle drooni ehitus koosneb mitmetest eraldi detailidest, kaasa arvatud põhjaplaat, kus eksisteeris auk, kust saab gimballi läbi panna ja drooni sisse kinnitada. Plaan tugiäärrikut kasutada tähendas, et äärrik jääb põhja ja gimballi vahele. Peale mitmeid ideid jõudsime juhendajaga mõttele terve gimballi põhjaplaadi külge kinnitada. Tugiäärrik jääb väljapoole droonist ning kinnitusraam jääb sisse poole. See annab võimaluse äärriku ja raami omavahel kinnitada ning neist moodustub üks tükki, mida on lihtne eemaldada ning vajadusel mujal kasutada.



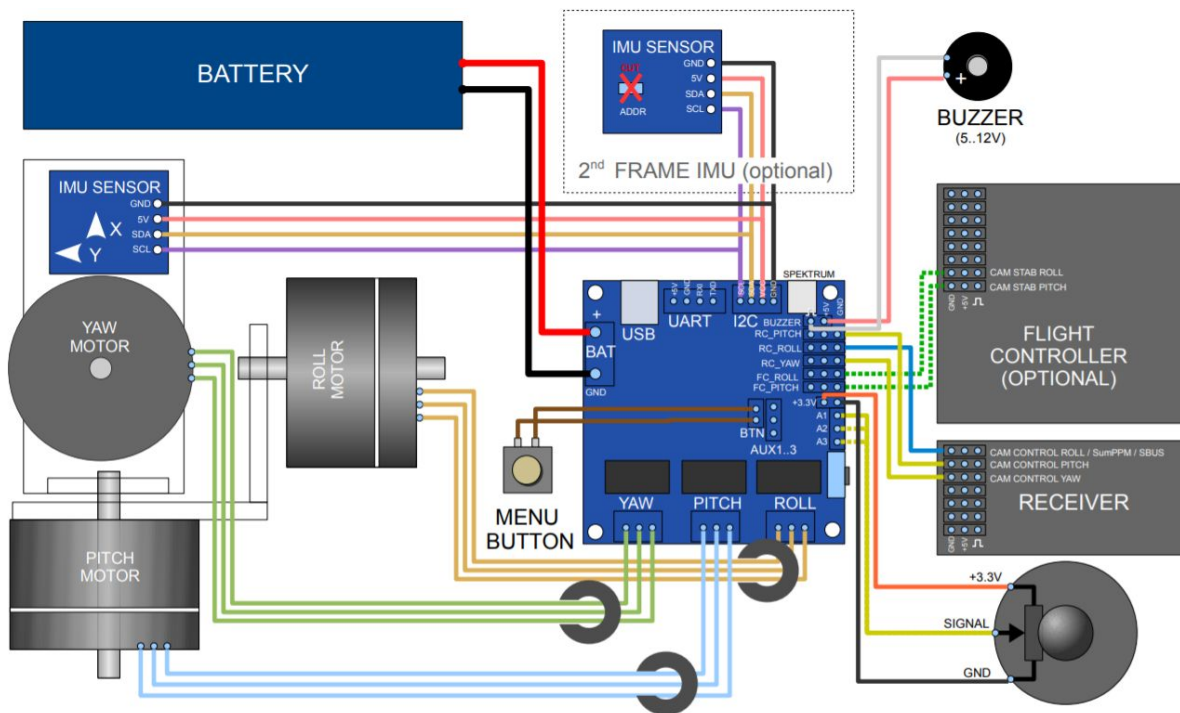
Joonis 3.4.1 Gimballi kinnitus

Kinnitus koosneb kinnitusest ja plaadist. Kinnituse alumine osa ühendatakse tugijääriku ülemise poolega kruvide abil. Allolevast august tuleb välja gimballi ülemine osa, mille külge kinnitatakse ülemine mootor. Mootori teine pool ühendatakse kinnitusplaadi külge kuni 8 poldiga. Kinnitusplaat kinnitatakse kinnituse külge. Plaadi keskel olevast august tulevad kaamera ning mootorite juhtmed. Need liiguvad plaadi pealmise tasandi pinna küljes oleva kontrollerrisse.



Joonis 3.4.2 Gimballi kinnitus drooniga

## 4. GIMBALI JUHTIMINE



Joonis 4.1 Kontrolleri ühenduskeem[15]

Joonisel 4.1 saab näha põhimõtteskeemi, kuidas gimbal töötab ja kuidas seda juhitakse. Kontrolleriit toidetakse 8 - 25 V (3s - 5s) akuga. Mootorid 3-teljel saavad oma positsiooni juhtpuldilt tulevate väärtuste järgi, mida edastab kontrolleriile puldi vastuvõtja. Positsiooni hoidmiseks tuleb info IMU sensorilt. Kontrolleriile arendatud koodis kasutatakse IMU algoritmi, mis defineerib kaamera kaldenurgad. Kontrolleri liigutab mootoreid PID kontrollimist kasutades, kus asendit muudetakse IMU ja juhtpuldi andmete põhjal. Tavaliselt koosneb IMU güroskoobist ja kiirendusandurist, kuid paljudel IMU sensoritel on lisatud ka baromeeter ja/või kompass. IMU sensori ülesandeks on näidata antud juhul droni asendit ning liikumist kõigil telgedel. See mõõdab kehale mõjuvaid jõude kiirendusanduriga, nurkkiirust güroskoobiga ning olemasolul orientatsiooni kompassiga. Soovi korral võimaldab kontrolleri lisada ka teise IMU sensori. Kontrolleri juhivad mootoreid PWM signaaliga ning töötab nagu samm mootor, hoides oma positsiooni.



## 5. VÕIMALIKUD ARENGUSUUNAD

Lõputöö raames projekteeritud gimbalit võib nimetada prototüübiks. Sellest tulenevalt esineb sellel seadmel erinevatel põhjustel mõned puudused või vead. Toon need välja ning arutlen, kuidas tulevikus antud projektiga saaks edasi liikuda ning mida silmas pidada.

Hetkel kinnitatakse tugiäärrik läbi drooni põhjaplaadis oleva augu gimballi kinnituse külge. Vahepeal tekkis idee ise põhjaplaat teha, mis on ühes tükis tugiäärrikuga. See jätaks droonile puhtama mulje ning eemaldab vajaduse eraldi tugiäärriku jaoks. Lisaks saaks sinna otse kinnitada terve gimballi koos mootori kinnitusega. Lõputöö raames otsustasin selle tootmisega ise mitte tegeleda, kuna tööd oli piisavalt ning aega vähe. Põhjaplaadi suurus limiteerib tootmisvõimalusi. Seda kindlasti oleks väga keeruline 3D printida. Lisaks ei tea põhja plaadi kumeruste raadiusi, mis annavad droonile voolujoonelisuse. Selle tegemine tulevikus tõstaks gimballi kooste kvaliteeti ning lihtsustab tema monteerimist droonile.

Peatükis 3.1 tehtud tugevusarvutused näitasid, et hetkel projekteerides kasutatud seinapaksus 2 mm talub nõuetes seatud 1 kN suurust lööki ning varutegur on 23. Optimeerides seinapaksust gimballis või vähemalt mõnes kohas, saab vajadusel kaalu vähendada. Kuna see nõuaks suuremat analüüsi seadme igas punktis ning droon ise on loodud pakiveoks ning muid seadmeid kasutama, siis ei seaks seda vajalike tööde prioriteetide hulgas kõrgele kohale.

Disainitud seadme efektiivseks tööks on vajalik detailide massikeskmete paika saamine. Kõige rohkem loeb, et korpuse massikeske asuks ülemise mootori keskpunktiga vertikaalselt samal teljel. Teiseks peaks muna massikeske olema samuti ülemise mootori keskpunktiga vertikaalselt samal teljel ning teda pöörava mootoriga samal horisontaalsel teljel. Hetke disaini saab selles vallas kindlasti arendada. Kui kõik massikeskmed oleks paigas, siis tasakaalu asendis mootorid ei tee tööd, mis säästaks akusid ning muudaks terve süsteemi töö efektiivsemaks.

Gimballi küljel asuva mootorina kasutasin eelmisel semestril sama ülesannet lahendava grupi tellitud mootorit. Selle kasutamise suureks plussiks sai see, et see juba eksisteeris ning tundus arukas teda ka kasutada. Seda disaini tehes arvestasin selle mootoriga. Kui muna peaks nõuetes määratud 1 kN löögi saama, siis esimese löögi saavad laager ning küljel olev mootor. Võttes arvesse laagri siseläbimõõtu 4 mm ning otsides SKF kataloogist väikseima sarnase laagri dünaamilise koormuse reitingut, sain teada, et löögi korral suure tõenäosusega võib laager kahjustada saada. Väikseima laagri, mille siseläbimõõt oli 4 mm, välisläbimõõt on 9 mm ning paksuseks 2,5 mm. Selle laagri

dünaamiliseks koormuse reitinguks hindab SKF 0,423 kN [12], mis on poole vähem kui nõuetes esitatud 1 kN. Seda meetodikat kasutasin ka ülemise mootori löögitaluvuse umbkaudseks leidmiseks, mistõttu tekkis tugiääriku vajadus.

## KOKKUVÕTE

Käesoleva lõputöö eesmärk oli projekteerida spetsiaalselt droonile mõeldud gimbal, mida kasutatakse kindla hüperspektraal kaamera kasutamiseks. Seadet kasutatakse drooniga lennates erinevate monitooringu tegemiseks, mida antud kaamera võimaldab. Antud teema valisin kooli poolt pakutavate mehhatroonika lõputöö teemade seast.

Esimeste sammudena analüüsisin tööle seatud nõudeid ning seejärel uurisin erinevaid gimbalide disaine. Arvestades seatud nõudeid valisin sobiva kontseptsiooni, mille järgi gimballi projekteerima hakata.

Projekteerimisprotsessi esimese sammuna modelleerisin algse kontseptsiooni, mille järgi sain teada vajalikud parameetrid millega komponente valida. Komponentidest tuli valida 3 mootorit, laager ning kontrolleri. Eelmisel semestril sama projektiga tegelenud grupp oli tellinud 3 identset mootorit ning kontrolleri. Algsest kontseptsioonist saadud masside järgi otsustasin kasutada kahte olemasolevat mootorit ning kontrolleri. Kolmanda mootori ning laagri valisin ise peatükis 2.1 seatud nõuete järgi. Järgnevalt alustasin gimballi komponentide detailsemat ning lõpliku konstruktsiooni modelleerimist. Valminud mudel koosneb korpusest, munast, tugiäärrikust ning kinnitusest.

Seade on projekteeritud arvestades seatud nõudeid ning mudelikoostus liigub takistusteta ega lähe kuhugi vastu. Gimbal kinnitub drooni põhjaplaadi külge, mistõttu on teda lihtne drooni küljest vajadusel eemaldada. Peatükis 3.1 tehtud arvutuste järgi, peaks valmiv seade pidama vastu 1 kN löökidele vastu korpust.

Hetkeseisuga pole kõne all olev seade valmis, kuid töö selle nimel käib. Komponentid on projekteeritud ning tuleb 3D printida. Puudub ka laager ning ülemine mootor. Kui kõik komponendid on olemas saab mootorid kontrolleri ühendada ning vaadata kui hästi terve süsteem töötab. Tulevikus tuleks droonile teha põhjaplaad, mis on tugiäärrikuga ühes tükis. See võimaldab terve gimballi otse drooni külge monteerida. Peatükis 3.1 tehtud arvutuste järgi on gimballi konstruktsioon piisavalt tugev 1 kN löögi vastu. Sellest tulenevalt võib vajadusel tulevikus optimaalsemad seinapaksused gimballi komponentidele valida. Üks mure koht löögi puhul on muna külje peal asuv mootor. Kuna see juba eksisteeris ning omas võimet muna liigutada, siis otsustasin seda kasutada. Kuid juhul, kui muna peaks löögi saama, siis võib juhtuda, et mootori laager saab kahjustada. Kui see peaks nii olema, siis tekib vajadus suurema mootori järele või kuidagi seda lööki pehmendada.

Kokkuvõttes on tehtud palju tööd töökindla ja vastupidava süsteemi nimel. Nüüd jääb üle vaid gimbali kokku panna ning vaadata, kui hästi seade oma eesmärki täita suudab. Projekteeritud või valitud komponendid on vastavuses seatud nõuetele.

## SUMMARY

Purpose of the thesis was to model a specialized gimbal for a drone which will be used with a certain hyperspectral camera. Device will be used while flying a drone for different monitoring purposes, which this camera provides. Current subject for thesis was picked from the selection of the university mechatronics thesis subjects.

First I analyzed the requirements for the given device and then I searched for different designs. Considering the requirements I picked a suiting concept on what I based the design of the gimbal I am making.

First step of the designing process I modelled a basic concept of the gimbal which gave me rough parameters on what to base my selection of components. I had to pick 3 motors, a bearing and a controller. A group involved with the same project last semester ordered 3 identical motors and a controller. After I got the masses from the basic concept I decided to use 2 of the existing motors and the controller. The third motor and bearing I chose based on the requirements that were set in chapter 2.1. Next I started modelling the final and more detailed construction of the gimbal. Model that was created consists of housing, egg, support flange and attachment.

The device is modelled considering the set requirements and in the assembly the model moves without obstacles and does not collide with anything. The gimbal attaches to the base plate of the drone which makes removing it when needed very easy. Based on the calculations made in chapter 3.1 the device should withstand a 1kN blow to the housing.

At this time the device in question is not finished, but progress is being made. Components are modelled and they need to be 3D printed. Also missing is the bearing and the upper motor. If all the components are present, then the motors can be connected to the controller and see how well the system works. In the future there is a need to make a base plate for the drone that is in one piece with the support flange. That allows easy mounting of the gimbal to the drone. Based on the calculations made in chapter 3.1 the construction of the gimbal is strong enough to take a 1 kN blow. That is why in the future more optimal wall thicknesses may be chosen for the components of the gimbal. One concern with the side motor is when a blow hits the egg. As the motor already existed and had enough power to rotate the egg then i decided to use it. In case of a blow to the egg the motor may be damaged. If that were to happen then it is needed to choose a larger motor or find a way to soften the blow to the motor.

In conclusion there has been a lot of work put into making a reliable and durable system. Now all that is left to do is assemble it and see how well it carries out its purpose. Modelled or chosen components are in compliance with the set requirements.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- 1) Wingcopter [WWW], <https://wingcopter.com/>
- 2) Multispektraal kaamera kasutusala [WWW],  
<https://photographycourse.net/multispectral-imaging-used-for/>
- 3) Hüperspektraal kaamera kasutusala [WWW],  
<https://altigator.com/multispectral-and-hyperspectral-drone-imagery/>
- 4) XIMEA MQ022HG-IM-LS150-VISNIR [WWW],  
<https://www.ximea.com/en/products/hyperspectral-cameras-based-on-usb3-xispec/mq022-hg-im-ls150-visnir>
- 5) 35mm C Series VIS-NIR [WWW],  
<https://www.edmundoptics.com/p/35mm-c-series-vis-nir-fixed-focal-length-lens/22384/>
- 6) Kontseptsioon 1, [WWW] <http://www.helipal.com/storm-pro-3-universal-3-axis-gimbal.html>
- 7) Kontseptsioon 2, [WWW]  
<http://octopus.uavfactory.com/uav-payloads-equipment/epsilon-135-hd-day>
- 8) Kontseptsioon 3, [WWW]  
<http://octopus.uavfactory.com/uav-payloads-equipment/epsilon-140>
- 9) BGM 2606-90, [WWW] <http://www.dys.hk/product/BGM2606-90.html>
- 10) BGM 5208-200-12, [WWW] <http://www.dys.hk/product/BGM5208-200-12.html>
- 11) Basecam SimpleBGC 32 bit, [WWW]  
<https://www.flyingtech.co.uk/fpv-camera-gimbals/dys-alexmos-32-bit-3-axis-bgc-brushless-gimbal-controller>
- 12) SKF kataloog, [WWW]  
<https://www.skf.com/binary/168-121486/SKF-rolling-bearings-catalogue.pdf>
- 13) ABS survepinge [WWW], <http://www.matweb.com/reference/compressivestrength.aspx>
- 14) SKF 12 mm laager [WWW],  
<https://www.skf.com/group/products/bearings-units-housings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/index.html?designation=W%2061701%20R-2ZS&unit=metricUnit>
- 15) Kontrolleri ühendusdiagramm, [WWW]  
[https://www.basecamelectronics.com/files/v3/SimpleBGC\\_32bit\\_Connection\\_Diagram.pdf](https://www.basecamelectronics.com/files/v3/SimpleBGC_32bit_Connection_Diagram.pdf)