



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

# GÜROSTABILISEERITUD PLATVORMIDE PARENDAMINE

IMPROVING GYROSTABILIZED PLATFORMS

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Reino Poom

Üliõpilaskood: 143129AAAB

Juhendaja: Prof. Lauri Kütt

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 bakalaureusetööle esitatud nõuetele

“.....” ..... 201.....

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....” .....201....

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

**LÕPUTÖÖ ÜLESANNE**

**Üliõpilane:** Reino Poom

**Õppekava, peeriala:** AAAB Elektrotehnika

**Juhendaja(d):** prof. Lauri Kütt, Professor, Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**Lõputöö teema:**

(eesti keeles) Güstabiliseeritud platvormide parendamine.

(inglise keeles) Improving gyrostabilized platforms.

**Lõputöö põhieesmärgid:**

1. Vähendada platvormi volutarvet
2. Lihtsustada platvormi eksploatatsiooni
3. Vähendada platvormi mehaanilist keerukust

**Lõputöö etapid ja ajakava:**

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Praeguste platvormide lahenduste uurimine	1.11.18
2.	Praeguste platvormide kitsaskohtade kaardistamine	15.11.18
3.	Parendatud elektrotehniliste ja mehaaniliste lahenduste esitamine	1.12.18

**Töö keel:** Eesti keel

**Lõputöö esitamise tähtaeg:** ".....".....201....a

**Üliõpilane:** Reino Poom

.....

".....".....201....a

/allkiri/

**Juhendaja:** prof. Lauri Kütt

.....

".....".....201....a

/allkiri/

*Kinnise kaitsmise ja/või avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel*

## SISUKORD

SISUKORD.....	4
EESSÕNA.....	5
Lühendite ja tähiste loetelu.....	6
SISSEJUHATUS.....	7
TÄNASTE PLATVORMIDE KITSASKOHTADE ANALÜÜS.....	10
1.1 Asimuudi ajam.....	10
1.2 Tõusunurga ajam.....	12
1.3 Kommunikatsioon.....	13
1.4 Installatsioon.....	14
1.5 Kontroller.....	15
1.6 Ekspluatsioon.....	16
STABILISEERITUD PLATVORMI OPTIMEERIMINE.....	19
2.1 Optimeerimise täpsustatud eesmärk.....	19
2.2 Asimuutliigendi optimeerimine.....	20
2.3 Tõusunurgaliigendi optimeerimine.....	23
2.4 Juhtelektroonika optimeerimine.....	25
2.5 Optimeeritud lahendus.....	26
KOKKUVÕTE.....	35
ABSTRACT.....	36
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU.....	37
LISAD.....	38
Lisa 1. Sea Tel Coastal 18 spetsifikatsioon.....	38
Lisa 2. Sea Tel DAC-92 juhtimisskeemid.....	39
L2.1. Asimuudi juhtimisskeem.....	39
L2.2. Tõusunurga juhtimisskeem.....	40
Lisa 3. Mootorite spetsifikatsioonid .....	41
L3.1. GBM5208H-200T spetsifikatsioon.....	41
L3.2. GBM110-150T spetsifikatsioon.....	41
Lisa 4. Liugkontakti spetsifikatsioon.....	42
Lisa 5. Mikrotik rb960pgs spetsifikatsioon.....	43

## EESSÕNA

Käesolev bakalaureusetöö on valminud autori praktilistele kogemustele baseerival hüpoteesil ja TTÜ Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi poolt hüpoteesi ülesandena formuleerimise tulemusel. Teema valik on autori pikaajalise tööga seondud ning baseerub väga suures osas autori otsesel kogemusel antud valdkonnas.

Autor tänab TTÜ-d võimaluse eest õppida elektrotehnikaga seonduvat mis aitas süstematiseerida ja formuleerida antud bakalaureusetöös välja toodud probleeme ning leida neile teaduslikult põhjendatud lahendusi.

Võtmesõnad: Stabiliseeritud platvorm, Tootedisain, Lihtsustamine, Bakalaureusetöö.

## Lühendite ja tähiste loetelu

- ADU – Süsteemi osad, mis on ette nähtud paigaldamiseks välistekile. (Ingl.k. Above Deck Unit)
- AZ – Asimuut. Platvormi vertikaalse telje liigend. (Ingl.k. *Azimuth*)
- BLDC – Harjavaba alalisvoolumootor (Ingl.k. *Brushless direct current*)
- BDU - Süsteemi osad, mis on sisetingimustes. (Ingl.k. Below Deck Unit)
- BUK – Sageduskordistiga võimsusvõimendi. (Ingl.k. Block Up Converter)
- CL – Põikloodsus. - Platvormi põikloodsuse liigend. (Ingl.k. *Cross-Level*)
- DC-DC – Alalisvoolu pingemuundur. (Ingl.k. Direct Current – Direct Current)
- EIRP – Efektiivne isotroopiline kiiratud võimsus. (Ingl.k. Effectiv Isotropic Radiated Power)
- EL – Tõusunurk. Platvormi horisontaalse telje liigend. (Ingl.k. *Elevation*)
- FSK – Sagedusmodulatsioon. (Ingl.k. Frequency Shift Keying)
- GPS – Globaalne positsioneerimissüsteem. (Ingl.k. Global Positioning System)
- ITU – Rahvusvaheline telekommunikatsiooni ühing. (Ingl.k. International Telecommunication Union)
- LNB – Madala müratasemega vastuvõtu allakordisti. (Ingl.k. Low Noise Block Downconverter)
- OMT – Polarisatsiooni duplexer. (Ingl.k. Orthomode Transducer)
- Pitch - Pikikõikumine (Ingl.k. *Pitch*)
- Roll - Põikkõikumine (Ingl.k. *Roll*)
- SMA – Väiksemõõduline koaksiaalühendus (Ingl.k. SubMiniature version A)
- WISP – Raadiosidet kasutatav andmeside teenusepakkuja (Ingl.k. Wireless Internet Service Provider)
- Yaw - Aluse asimuudi pööramine (Ingl.k. *Yaw*)

## SISSEJUHATUS

Gürostabiliseeritud platvormid on platvormid, mida kasutatakse ühes- või mitmes teljes liikuvate objektide pardal teise liikuva või liikumatu objekti suuna hoidmiseks. Näiteks sõidukite, seal hulgas ka õhu- ja veesõidukite pardal.

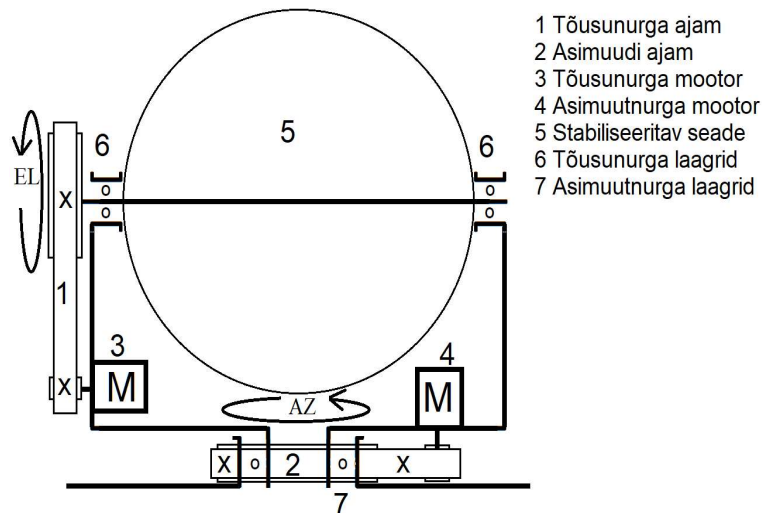
Sellist suuna hoidmist kasutatakse üldiselt kahe-suunalise kommunikatsiooni, olgu selleks siis andmeside, kõneside või telemeetria kuid ka ühesuunalise, broadcast-tüüpi kommunikatsiooni vastuvõtuks (näiteks satelliit-televisiooni). Tüüpilise sellise platvormi sise- ja välisvaade on näidatud pildil 1.



Pilt 1. Tüüpilise gürostabiliseeritud platvormi vaade. [<https://www.cobham.com>]

Antud töös kaardistame täna turul olevate süsteemide puudused, ning üritame leida nende puudusteta või neid puuduseid vähendavaid lahendusi. Seda nii elektrotehniliselt, materjalitehniliselt kui ka sensortehniliselt. Rõhku pöörame ka eksploatatsiooni ning installatsiooni lihtsusele.

Järgnevalt on välja toodud selliste platvormide põhikomponendid ja täna turul olevate platvormide realisatsioon koos eeliste ja puudustega. Üldülevaate saamiseks on joonisel 1 kujutatud tüüpilise gürostabiliseeritud platvormi kinemaatikaskeem.



Joonis 1. Tüüpilise gürostabiliseeritud platvormi kinemaatikaskeem.

Joonisel 1 toodud kinemaatikaskeemiga platvorm omab vabastusastmeid asimuudi (AZ) ja tõusunurga (EL) osas. Vabastusaste pöikloodsuse (CL) osas puudub.

Stabiiliseeritud platvormidel on nii elektrotehnilisi kui ka mehaanikast tingitud kitsaskohti. Autor esitab edasistes peatükkides töökindluse tõstmiseks optimeerimissetepanekud, mille abil oleks võimalik vältida või elimineerida kõige potentsiaalsemalt tõrkuvate sõlmede ja komponentide nõrki kohti. Kuna edasine töö baseerub reaalselsete platvormide kitsaskohtade analüüsil ning reaalse uue platvormi väljatöötamisel, mitte vaid teoreetilise lahenduse leidmisel, siis on kogu antud töö järgnevad peatükid ka otseselt seotud tootedisaini ja optimaalsete materjalide, lahenduste ja poolproduktide kasutamisega.

Lähtepunktiks antud töös on kõige lähedasema suurusega platvormi karakteristikud, milleks on Seatel Coastal 18. Selle platvormi täpsem spetsifikatsioon on toodud lisa 1. Spetsifikatsiooni aluseks on nii tooteleht[1] kui ka paigaldusjuhend[2]. Tähtsamad parameetrid, mis optimeerimise aluseks on:

- Voolutarve – 3.0 A (Toitepingel 13,6 V)
- Kaal – 17,2 kg
- Järgimiskiirus:

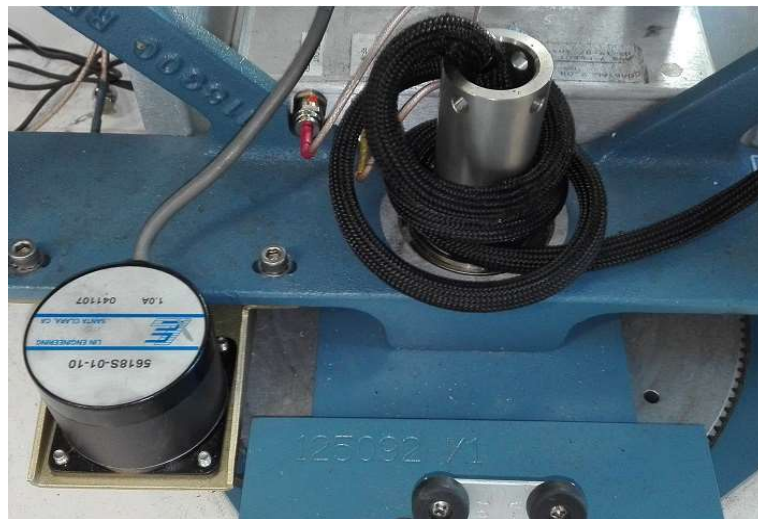


- Põikõikumine (Ingl.k. *Roll*): 25°/s
- Pikikõikumine (Ingl.k. *Pitch*): 25°/s
- Aluse pööramiskiirus (Ingl.k. *Yaw*): 15°/s
- Tõusunurga piirang: 10° - 78°
- Asimuutnurga piirang: 680°
- Installatsioonikaablid:
  - 4 tk koaksiaal vastuvõetava signaali jaoks
  - 1 tk 8 juhiga toite- ja signaalikaabel.

# 1. TÄNASTE PLATVORMIDE KITSASKOHTADE ANALÜÜS

## 1.1 Asimuudi ajam

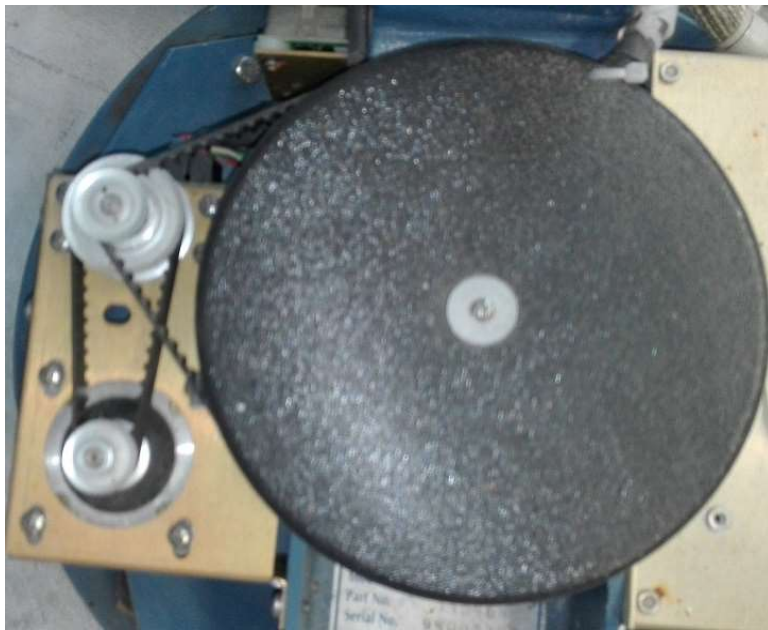
Asimoot-liigendil on mitmeid ülesandeid. Asimuudi ajami põhiülesanne on võimaldada juhtida platvormi asimuutnurka, selle liigend peab võimaldama ka sellele toetuvate ajamite tööks vajalike elektri- ja sensorühenduste toimimist. Ajami tehniline realisatsioon täna turul olevatel seadmetel on üldjoontes ühesugune. See koosneb telje keskpunktis oleval laagrist, seda ümbritsevast hammasrattast ja teljelt eemale viidud servo- või sammootorit. Jõu ülekandeks kasutatakse enamasti hammasrihma, vähesel määral ka kettülekanne. Pildil 2 ja Pildil 3 on kuvatud tüüpilised asimootliigendid.



Pilt 2. Asimuutliigend koos spiraalkaablitega, Seatel Coastal 24. [erakogu]

Tagasiside ajami relativsest asendist saadakse samm-mootori puhul arvutuslikult ning servomootori puhul mootori teljel asuva enkoodri kaudu. Ajami tegelik asimuut-nurk lähtestatakse üldiselt töö alguses, kasutades nullpunkti andurit või siis teatud juhtudel füüsilist piirajat ning selle lugemiseks mootori voolutugevuse monitoorimist.

Asimoot-liigend peab võimaldama ka olenevalt rakendusest signaaliahela, elektriahela ja juhtimisahela häirimatut liigendist läbimist. Selleks kasutatakse kas liugkontaktidel piiramatuid pöördühendusi laagri keskmes või siis odavamatel lahendustel spiraalselt keeratud juhtmepunti, mis võimaldab üldjuhul umbes 2 täispööret vabastusastet. Eelnevas punktis välja toodud füüsilised piirangud ongi enamasti kasutusel piiratud vabastusastmega asimoot-liigendi puhul.



Pilt 3. Asimuut-ajam Seatel 5004. [erakogu]

Voolutarbe optimeerimise alustena võib välja tuua kaks tegurit, mis põhjustavad energiakadu. Esimeseks on ülekandemehhanismi hõõrdekaod ja teiseks samm-mootori puhul nii asendi hoidmise kui ka asimuudi liigutamiseks vajalik energia. Viimase puhul peab ajami kontrolleri kindlustama, et ajam on statsionaarne kui liigutamist ei ole vaja, ehk peab tagama mähisel hoidevoolu, mis tekitab suurema hoidemomendi alussõiduki pöördliikumisel kogu asimuutliigendile kinnitatud platvormi kaalu inertsmomendi ületamiseks. Samuti liigutamisel peab kontrolleri kindlustama, et liikumine toimib, seega tuleb ka liigutamisel kasutada ülemäärast, varuga voolutugevust.

Tegelikus eksploatatsioonis alussõiduki pöördliikumisel ühes suunas aitab asimuutliigendi järel paiknev mass ja selle inertsmoment iseenesest keerata õiges suunas, seda aga esimesed pool sammu. Enne kui kontrolleri on reageerinud, üritatakse neutraliseerida vastassuunas liikumist ning pärast kontrolleri reageerimist üritatakse liigutada platvormi kahekordse kiirusega vajalikus suunas. Kokkuvõttes võideldakse kogu aeg inertsjõuga, mis tegelikult oleks soovitud liikumise jaoks positiivne, ehk samasuunaline. Lisas 2.1 on välja toodud asimuudi ja lisas 2.2 tõusunurga veapõhine juhtimisskeem[3], mis on kasutusel enamikes platvormide juhtahelates.

Asimuut-ajami prioriteetseteks arendust vajavateks osadeks on autori hinnangul nende voolutarbe vähendamine ja asimuut nurga relatiivse asendivea vähendamine. See on ka antud töö lähteülesandeks.

## 1.2 Tõusunurga ajam

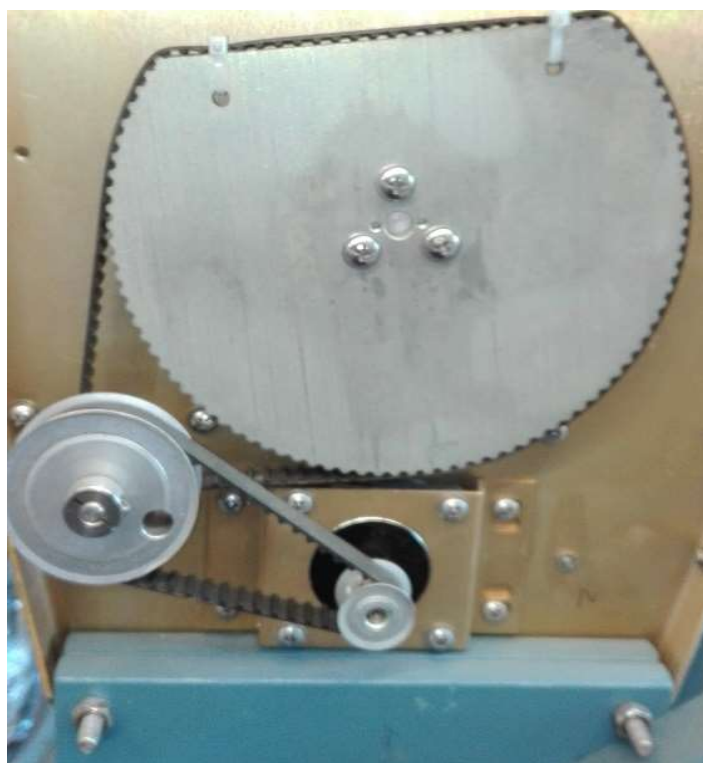
Tõusunurga ajami ülesanne on hoida platvormi tõusunurka vajalikul tasemel. Samuti peab tõusunurga liigend nagu asimuut-liigend võimaldama muude signaalide läbimise liigendist.

Tüüpiline tõusunurga ajam on, nii nagu asimuutajamgi, realiseeritud üldjuhul teljelt eemalseisva servo- või sammootori abil, kasutades ülekandeks hammasrihm-ülekannet. Erinevus asimuutajamiga on vajaliku vabastuse piiratus. Üldjuhul pole vajalik vabastus üle  $115^\circ$  ( $-15^\circ \dots +90^\circ$ ). Seega ei kasutata siin liigendis liugkontaktidel põhinevaid signaali- ja voolukaablite ühendusi. Kasutatakse piisava vabastusega kaablit, mis võimaldab ühe kaabliotsa kaasaliikumist tõusunurgaga. Tüüpilised tõusunurga ajamite ehitused on toodud piltidel 4. ja 5.



Pilt 4. Tõusunurga ajam, KVH Trackvision G6. [erakogu]

Põhilised parendused, mis on võimalik teha tõusunurga ajamile, on voolutarbe koha pealt samad, mis asimuutajamil ning vabastusastme koha pealt üle seniidi liikumisel vajaliku liikumiskiiruse nõude täitmine. Viimase all mõeldakse olukorda, kus platvorm peab järgima objekti, mille trajektor läbib platvormi mõistes vertikaalsihi telge. Seniidi läbimisel peab platvormi asimuut-ajam keerama platvormi  $180^\circ$  jälgitava objekti suuna  $1^\circ$  muutusel.



Pilt 5. Tõusunurga ajam, Seatel 5004. [erakogu]

### 1.3 Kommunikatsioon

Erinevad signaali-, sensor- ja toiteahelad esitavad erinevad nõudmised asimuutliigendi läbilaskele ning enamasti üritatakse võimalikult palju erinevaid vajalikke signaale multipleksida ühte meediumisse. Näiteks raadiosagedusliku signaaliahela puhul kasutatakse sama koaksiaal-liugkontakti nii andme-, toite- kui ka juhtsignaalide jaoks. Need viiakse samasse ahelasse kasutades erinevat sagedust, ehk kasutades dipleksereid tekitatakse samas koaksiaalkaablis sagedusjaotus. Näiteks:

- Alalispinge toiteks
- 1 MHz kande sagedusega sagedusmodulatsiooni kanal jadaandmete edastuseks ühes suunas
- 1.1 MHz kande sagedusega sagedusmodulatsiooni kanal jadaandmete edastuseks teises suunas
- 950 MHz – 2150MHz L-band sagedusala signaali jaoks

Osadel juhtudel on ühte ahelasse kokku liidetud 5-6 erinevat signaali. Pildil 6 on kujutatud tavapärase spiraalkaablite tehniline lahendus.



Pilt 6. Kommunikatsioonikaablite spiraal, KVH Trackvision G6. [erakogu]

Signaalide paljususe vähendamiseks on tähtis mõista, mida tegelikkuses informatsiooni mõistes soovitakse üle kanda, kas seda on võimalik üle kanda mitmeti ning millist ühisosa ehk samaliigilist ülekannet oleks võimalik kasutada paralleelkastamise asemel. Andmekanalil mõistes pole alati vajalik juba moduleeritud raadiosagedusliku signaali edastamine. On võimalik ka modulaator-demodulaator integreerida platvormi pärast liigendeid, mis elimineerib raadiosagedusliku trakti liigenditest läbimise. Liigendeid läbib sel juhul vaid diskreetne andmevoog, millel ei ole sedavõrd kõrged signaalikvaliteedi nõuded.

Kontrollsignaalide mõistes tuleb esitada küsimus, kas platvormi kontrollid peab üldse asuma platvormist eraldiseisvana. Kui see on võimalik integreerida platvormiga näiteks asimuut- ja tõusunurga liigendite vahel, siis kaob vajadus ka juhtsignaalide edastamiseks läbi asimuutliigendi. Samuti on küsimus piisava elektrilise toitevõimsuse tarnes, mis on täna enamasti eraldiseisev arvestades platvormi koos selles sisalduvate raadioseadmete elektrilist kogutarvet. (Cobham ST24: 12-24V, <5A). Kui seda annaks vähendada piisavalt, oleks võimalik seda ühildada andmekanaliga (nt. IEEE802.3at POE+).

## 1.4 Installatsioon

Eelnevatest näidetest võib välja lugeda, et mõned tootjad on astunud väga selgeid samme installatsiooni lihtsustamiseks, samas kui teised tootjad on jäänud selles vallas maha. Sailor 900 (Pilt 7) platvormi puhul on sellesse ühte kaablisse multipleksitud kasutades sagedusjaotust:

- Platvormi toide ja juhtsignaalid
- Võimsusvõimendi ja vastuvõtu allakordisti toide.
- Võimsusvõimendi juhtsignaalid.
- Vastuvõtu allakordisti faaslukestiga ostsilaatori juhtimine(4 sagedusala).

- Võimsusvõimendi ostsilaatori ergutussignaali (10 MHz reference).
- Saatesignaali, algselt 950 MHz-1700 MHz
- Vastuvõtusignaali, algselt 950 MHz-2150 MHz



Pilt 7. Ühte kaablisse mahutatud kommunikatsioon - Sailor 900 [erakogu]

## 1.5 Kontrollerid

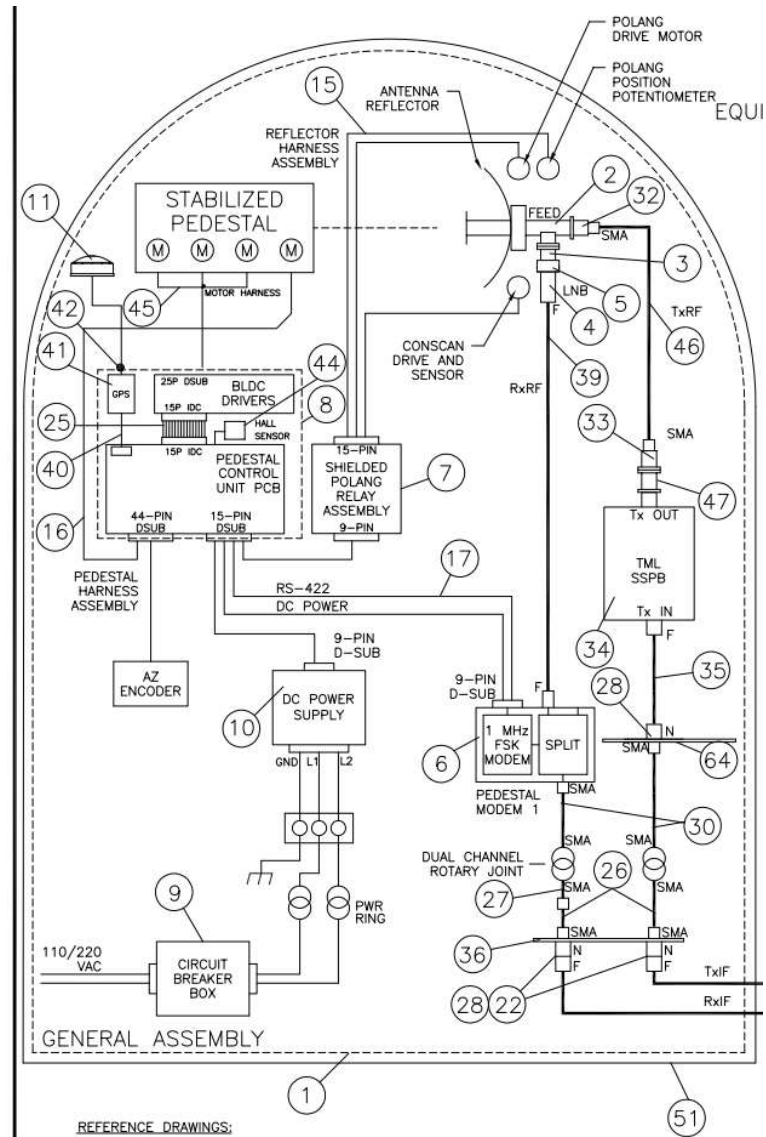
Gürostabiliseeritud platvormide kontrollerid on insenertehniliselt keerukad, kuid lõppkokkuvõttes on see vajalik tagamaks tõrgeteta töö läbi kogu eksploatatsiooniaja. Joonisel 2 on kujutatud tüüpilise kontrolleri ülesehitus. Numereeritud on selle osad ära toodud tabelis 1.

1 Välispaigaldis	24 FSK modem
2 OMT ehk polarisatsiooni eraldaja.	25 Kaablikõidid mootori draiveritele
3 Saatesignaali tõkkefilter	26 Koaksiaalikaabel SMA pistikutega
4 LNB ehk madala müratasemega allakordisti	27 Koaksiaalikaabel SMA pistikutega
5 180 kraadi lainejuhi põlv	28 Koaksiaal üleminek N-SMA
6 Platvormi modem.	29 Ühenduskaablite komplekt 30 meetrit F-F
7 Polaarsusreele	30 koaksiaalikaablid SMA pistikutega
8 Platvormi kontroller	31 F-F koaksiaal üleminek
9 Kaitsmeplokk	32 WR62 lainejuhi üleminek SMA kaablile
10 Toiteplokk	33 WR75 lainejuhi üleminek
11 GPS antenn	34 Võimsusvõimendi koos üleskordistajaga (BUC)
12 DAC-97 BDU kontroller	35 Koaksiaalikaabel N-F
13 Klemmliist	36 Flants
14 BDU juhtmekõidid	37 Flants
15 Platvormi juhtmekõidid	38 Koaksiaalikaabel N-F
16 Platvormi juhtmekõidid	39 Koaksiaalikaabel F-F
17 Värati juhtmekõidid	40 GPS ühenduskaabel
18 Koaksiaalikaablite komplekt	41 GPS vastuvõtja
19 FSK modemi kinnitusliist	42 Koaksiaal üleminek Hirose-BNC
20 Koaksiaal üleminek SMA	44 Trükkplat Hall-i anduriga
21 Jadavärati kaablikõidid	45 Mootorite ühendusjuhtmete kõidid
22 Koaksiaal üleminek N-F	46 Vastuvõtuahela koaksiaalikaabel
23 Raadiosageduslik jagur	47 WR75 lainejuhi niiskustihend

Tabel 1. Joonisel 2 toodud platvormi komponendid.



Selline keeruline ülesehitus ei ole taotluslik, see on tekkinud järk-järgult, lisanduva funktsionaalsuse adapteerimisel olemasoleva platvormiga. Selline lähenemine on olnud küll tootmisküpsuse saavutamiseks õigustatud, kuid praegusel hetkel on tegemist mitteoptimaalse lahendusega.



Joonis 2. Tüüpilise platvormi ülesehitus koos juht- ja raadioseadmetega [3]

## 1.6 Eksploatsioon

Gürostabiliseeritud platvormide eksploatsioonis jääb silma kõikide mudelite väga suur varuosade valik ja hea kättesaadavus. See on ühelt poolt küll hea, kuid insenertehniliselt tekitab küsimuse vastupidavuse osas. Kuna sellised platvormid vananevad moraalselt ja tehniliselt umbes



15 aastaga, siis on oluline pöörata tähelepanu, kui suur on hooldus- ja remondikulu ning sellega seonduv tõrkeaeg.

Autor, olles hooldanud ja remontinud selliseid platvorme tänaseks üle kümne aasta, saab isiklikule kogemusele tuginedes välja tuua, et põhilised probleemid on seotud just rihmülekande kasutamisega. Rihm ise ei ole kuluartikkel, küll aga on nii asimuudi kui ka tõusunurga ajamite probleemiks rihma pingutusnõuetest tingitud külgpinge mootori võllile, mis üldjuhul lõpeb prematuurse mootori rihmarattapoolse laagri purunemisega. Harvemal juhul tagumise laagri rikkega nagu näha pildil 8.

Autori kogemuses nii asimuut, kui ka tõusunurga ajamite mootorite tõrketa tööaeg piiratud, vajades väljavahetamist kord viie aasta jooksul. Sellele ülekanderihma pingsusest tingitud probleemile ilma kogu konseptuaalset lahendust muutmata alternatiivi ei ole, sest tuleb silmas pidada järgimise täpsust – ehk rihma pingsust läbi kogu vajaliku temperatuurivahemiku, milleks on  $-40^{\circ}\text{C}$  kuni  $+85^{\circ}\text{C}$ .



Pilt 8. Laagri riknemisest tingitud kontakt rootori ja staatori vahel Seatel Coastal24 [erakogu]

Teine sagedane purunemiskoht on spiraalkaablite juhtmesooned. Kaablid, mida selles köidikus kasutatakse, on küll valitud konstantset deformatsiooni silmas pidades, evides näiteks koaksiaalkaablite puhul kiulist keskjuhti, kuid sellegipoolest on tegemist aastatepikkuse

koormusolukorraga, mida leevendab ainult kasutatavate materjalide elastne deformatsioon. Jääkdeformatsiooni ja materjalide väsimust, eriti pragunemist pole aga täielikult võimalik vältida, seega ühel hetkel katkeb mõni voolujuht. Pilt 9. illustreerib sellist situatsiooni.



Pilt 9. Riknenud spiraalkaabel pärast nailonsuka eemaldamist. [erakogu]

Lahendus siingi võiks olla läbi kogu platvormi konseptsiooni muutuse, mis elimineerib niivõrd väikese raadiusega spiraalkaablite olemasolu.

## 2. STABILISEERITUD PLATVORMI OPTIMEERIMINE

### 2.1 Optimeerimise täpsustatud eesmärk

Töö eesmärgiks on optimeerida platvormi installeerimise ja käidu kulusid ning vähendada platvormi energiatarvet. Ideaaleesmärk on vabaneda rihmülekannetest mõlemal vabastuse teljel ning saavutada piiramatu pöörlemisvõimekus mõlemal teljel, seega:

- Vähendada ekspluatatsioonikulusid.
- Vähendada kogu platvormi energiatarvet.
- Vähendada hõõrdekadusid.
- Vähendada installatsiooni kaabeldustööde mahtu.

Toodud eesmärke ei saa vaadata üksikult, vaid tuleb vaadata mõlema telje pöördvabastuse kontekstis komplekselt, siis eesmärkide saavutamiseks on üheks võimaluseks vabaneda:

- Hammasrihm-ülekannetest.
- Pöördkaablitest.
- Üleliigsetest installatsioonikaablitest.

Autor kontsentreerub antud töös platvormile, mille eesmärgiks on raadiokanali kaudu andmeside tagamine, seega on vabastusastmeid läbivaks meediumiks kas raadiosageduslikud signaalid, optiline andmeside või keerdpaar-andmeside.

Energiatarbe eesmärk on kogu platvormi energiatarve mahutada IEEE 802.3 standardis esitatud piiridesse. Kuigi antud standard omab mitmeid versioone, siis eelistatud on madalaima voolutarbe piiridesse jäämine, näiteks on 802.3af standardi kohaselt tarbija maksimaalseks tarbitavaks võimsuseks on 12.95 W

Viidatud standard kasutab meediumina kategooria 3 kuni kategooria 5 keerdpaar-kaablit, mis võimaldab samaaegselt nii toitevõimsust kui ka andmesidet, seega kaablite optimeerimise mõistes on siinkohal mõistlik kõrvale jätta raadiosageduslikud ja fiiberoptilised kaablid.

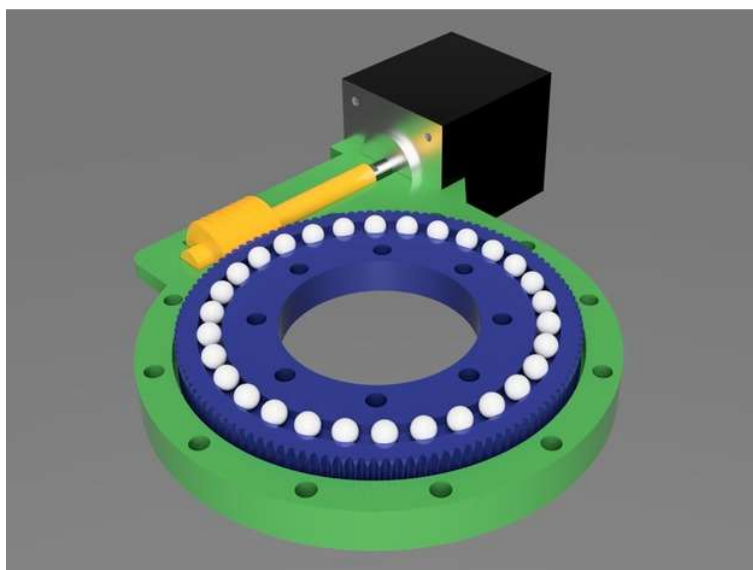
## 2.2 Asimuutliigendi optimeerimine

Asimuutliigendi optimeerimise eesmärkide saavutamiseks on vaatluse alla võetud erinevad mootorid, mis juba sisaldavad aeglustavat ülekannet, tagamaks võimalikult suurt elektriliste täisringide arvu ühe mootori võlli mehaanilise täisringi kohta.

Kaalumise alla võeti järgnevad mootori ja ülekande variandid:

**Reduktoriga samm-mootor.** Reduktoriga samm-mootor tagab väga suure täpsuse isegi täis- või veelgi enam, poolsammude kasutamisel. Küll aga tekkis probleem leidmaks turult lamedat n.n. *pancake*-tüüpi mootorit mis omaks ka keskava kaablite läbitoomiseks.

**Reduktorita samm-mootor.** Vähendades nõudeid aeglustava ülekande olemasolule ei olnud samuti leida turult piisava keskavaga mootorit, mis võimaldaks spiraalkaablite köidiku või siis liugkontakt-liidese läbitoomist.



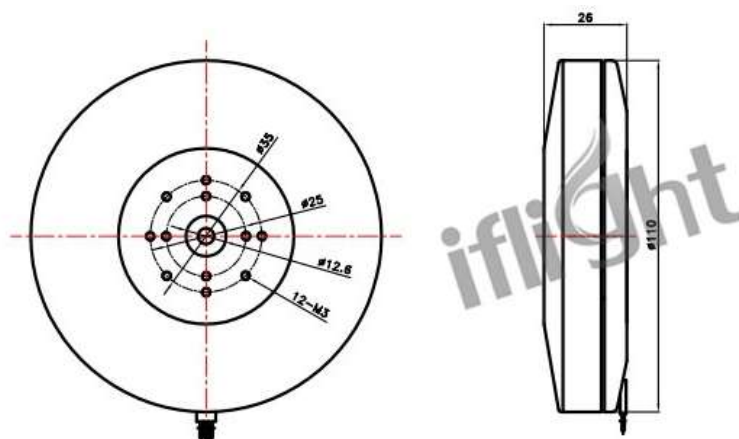
Joonis 3. Kuulidega tiguülekanne. [<https://www.thingiverse.com/>]

**Kuulidega tiguülekanne** (Ingl.k. *slewing drive*) samm- või alalisvoolumootoriga. Neid leidis väga erinevates mehaanilistes mõõtmetes ja võimekuses, samuti oli valida nii samm- kui ka alalisvoolumootoriga tüüritavat. Keskava on enam kui piisav kaablite läbitoomiseks. Küll aga olid sellel mootori/ülekande tüübil üldjuhul probleemiks kaal ja tiguajami kui sellise jäikus tagurpidi jõudude suhtes. Nimelt kui platvormi baas muudab oma suunda, siis platvormi massist tulenev inertsjõud üritab platvormi jätta manöövri eelsesesse seisusse. Selle jõu vektor on samasuunaline

soovitava platvormi liigutamise suunaga, seega energiatarbe vähendamise kaalutlusel ei tohiks lasta raisku platvormi enda massist tingitud inertsmomenti ainult selleks, et järgmisel ajahetkel elektriliselt platvormi samas suunas keerama hakata.

**Paljupooluselisi alalisvoolumootoreid** leidis turult õõnsa rootoriga ning ka selliseid, mille pooluspaaride ja mähiste konfiguratsioon võimaldas väga täpset nurga hoidmist ja juhtimist. Tegemist on põhimõtteliselt paljude pooluspaaridega kolmefaasilise vahelduvvoolu-sünkroonmootoriga, mida juhitakse üldjuhul läbi pulsilaius-moduleeritud alalisvooluga. Seda mootoritüüpi lähemalt uurides leidis turul ka variante, mis võimaldasid kasutada selle keskmes ühekorraga nii liugkontakt-ühendust kui ka magneetilist enkoodrit.

Konkreetsema, turult saada oleva mootori valikukriteeriumiteks oli lisaks eeltoodule ka mehhaaniline võimekus kanda asimuut-vabastusastmest edasi olevat platvormi, mille kaal sellel hetkel polnud veel täpselt teada, ainult suurusjärg 5 kg. Lisaks tuli arvestada vastupidavust külgsuunas mõjuvatele kiirendusjõududele, mis mootorisse sisseehitatud tugilaagritele samuti nõudmisi esitas, kuid laagri ja impulssjõu koormuse taluvuse informatsiooni ei olnud võimalik leida. Kokkuvõttes tuli seda testida katseliselt, seega valitud sai iPower GBM110-150T kui selle seeria kõige suurem ja võimekam esindaja.



Joonis 4. GBM110-150T Harjavaba paljupooluseline alalisvoolumootor [<http://www.iflight-rc.com>]

Sellise mootori kasutamisel asimuutliigendi tsentris on mitmeid eeliseid:

- Pooluspaaride paljusus võimaldab väga täpset soovivat asimuutnurka hoida. Sellel mootoril on 24 poolust, 12 pooluspaari ja 28 magnetit.
- 12,6 mm keskava kaabelduse läbiviimiseks.

- Sellele mootorile pakutakse ka magnet-enkoodrit, mis sisaldab toroidmagnetit ning selle magnetvälja mõõtvat sensorit AS5048A [4].
- Mootori keskvasse on saada sobiv liugkontakt ühendus.

Mootori keskvas kasutatav piiramata pööretearvuga liugkontakt on 12 voolujuhiga, mis võimaldab platvormi statsionaarsest osast asimuutliigendi järgsesse vabastusastmesse tuua standardi IEEE802.3ab-1999 liidese ehk võimaldab täisdupleks andmesidekiirust 1 Gbps. Siinkohal peab arvestama, et liugkontakti läbides ei ole keerdpaarid keerutatud, seega tekitavad paarid omavahel elektromagnetilist ülekostvust. See vähendab standardijärgset maksimaalset kaabelduse pikkust.

Ülejäänud 4 voolujuhti on kasutusel toite ja I<sup>2</sup>C liidese jaoks, mida on vaja platvormi baasi güroskoopanduri jaoks. Mootori keskava katab katteplaat, mille külge ühtlasi kinnitub AS5048A magneetiline enkooder.



Pilt 10. Liugkontakt BLDC mootori rootori õõnsuses. [<http://www.iflight-rc.com>]

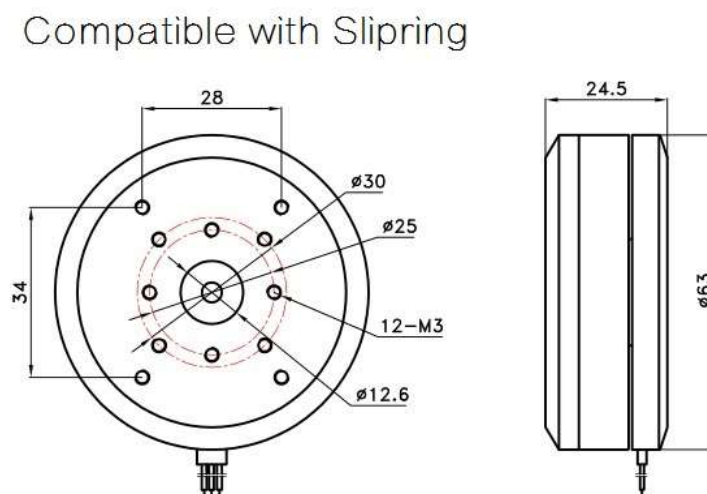
Kokkuvõttes saavutati antud lahendusega eelpoolmainitud eesmärkidest järgnevad:

- Hammasrihm-ülekanne eemaldamine – Selle asemel on ülekanne tekitatud magnetiliselt pooluspaaride ja magnetpaaride erineva arvuga, mille tulemusel faasi täpsus on viidud väga väikeseks.
- Pöördkaablite eemaldamine – Nii toide, kommunikatsioon kui ka alusplatvormi güroskoopanduri jaoks vajalik kommunikatsioon liigub läbi liugkontakt-liidese, mille tulemusena on tagatud asimuut-vabastusastme tegelik suutlikkus ja kaablite lahtikeeramise (un-wrap) vajaduse elimineerimine.
- Installatsioonikaablite mõistes peab platvormi sisenema ainult 1 kategooria 5 kaabel, milles on nii platvormi toide kui ka kommunikatsioon.

Oluline on tähele panna, et mootor on liigendisse installeeritud pea alaspidi, ehk rootor on ühendatud baasplaadiga ja staator on ühendatud esimese vabastusastme järgse konstruktsiooniga. Sellise installatsiooni eeliseks on nii mootori kolme faasi juhtmete kui ka enkoodri 4 juhtme väljumine pärast esimest vabastusastet. Vastasel juhul poleks piisanud liugkontakti voolujuhtide arvust. Selline lahendus eeldab platvormi kontrolleri asetsemist esimese ja teise vabastusastme vahel.

## 2.3 Tõusunurgaliigendi optimeerimine

Tõusunurga liigendi optimeeritud lahenduses kasutatakse samuti paljupooluselist õõnsa keskosaga harjavaba alalisvoolumootorit nagu näha joonisel 5.



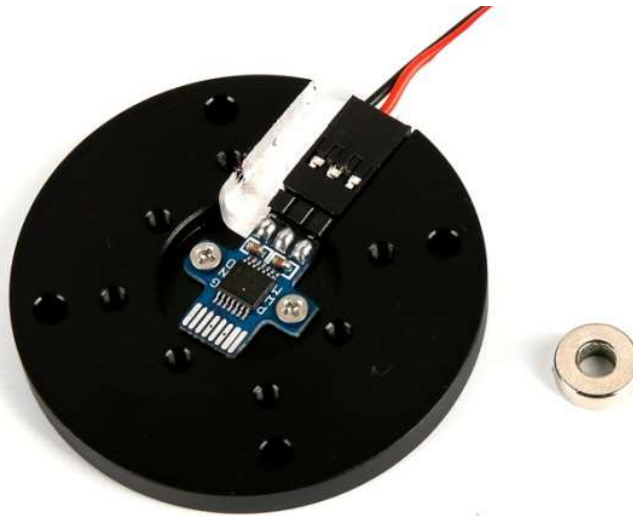
Joonis 5. GMB-5208H-200T paljupooluselise alalisvoolumootori joonis. [<http://iflight-rc.com>]

Sellise mootori kasutamisel tõusunurga liigendi tsentris on mitmeid eeliseid:

- Pooluspaaride paljusus võimaldab hoida väga täpset soovivat asimuutnurka. Sellel mootoril on 12 magnetit ning 14 pooli.
- 12,6 mm keskava kaabelduse läbitoomiseks.
- Sellele mootorile on samuti saada ka magnet-enkooder, mis sisaldab toroidmagnetit ning selle magnetvälja mõõtvat sensorit AS5048A.
- Mootori keskavasse sobib sama liugkontakt ühendus.

Mootori keskavas kasutatav piiramata pööretearvuga liugkontakt on 12 volujuhiga, mis võimaldab platvormi esimesest vabastusastmest teise vabastusastmesse tuua nii kommunikatsiooni kui ka güroskoopanduri jaoks vajalikud volujuhid. Keerupaaride lineaarne kõrvutiasetsemise pole küsimuseks, sest kogupikkus on alla meetri.

Ka tõusunurga liideses kasutatakse AS5048A magneetilist enkoodrit. Mootori keskava katab katteplaat, mille külge ühtlasi kinnitub AS5048A magneetiline enkooder (Pilt 11).



Pilt 11. AS5048A Magneetiline enkooder koos kinnitusplaadiga. [<http://www.iflight-rc.com>]

Kokkuvõttes saavutati antud lahendusega eelpoolmainitud eesmärkidest järgnevad:

- Hammasrihm-ülekanne eemaldamine



- Pöördkaablite eemaldamine – Nii raadiomooduli toide, kommunikatsioon kui ka teise vabastusastme güroskoopanduri jaoks vajalik kommunikatsioon liigub läbi liugkontaktliidese.

## 2.4 Juhtelektroonika optimeerimine

Väljatöötatud optimeeritud lahendus eeldab, et platvormi juhtelektroonika on paigaldatud esimese ja teise vabastusastme vahele. Muul juhul pole piisavalt voolujuhte läbi liugkontaktliideste. Samuti lihtsustab see installatsiooni, sest puudub vajadus tagada siseruumides asetsevast seadmeruumist juhtsignaalide kaabli kaudu edastamist platvormi juurde.

Raadiomodem peab asetsema pärast teist vabastusastet, ning kõik raadiosageduslikud muundamised peavad olema tehtud enne teist vabastusastet. Teisest vabastusastmest peab vajalik andmevoog liikuma kontrollerrisse ainult läbi võrguliidese, et vältida raadiosageduslike liideste, s.h. koaksiaalkaablitel põhinevate liideste vabastusastmete läbimine, mis on kas ebamõistlikult kallis kasutades raadiosageduslikku mitmekanalilist liugkontakti, või siis tavaliste koaksiaalkaablite kasutamisel, piirab liigendi talitust.

Need tingimused seavad esimese ja teise vabastusastme vahel olevale platvormi kontrolleri riistvarale järgnevad nõuded:

- Vähemalt kolme liideseaga võrgulüliti (kasutaja võrguliides, raadiomodem ja kontrolleri)
- Ühel liidesel PoE klient
- Kahel liidesel PoE väljund
- USB liides sensorite ja mootorite kontrolleri jaoks
- Lisa-toiteväljund mootorite kontrolleri toiteks.

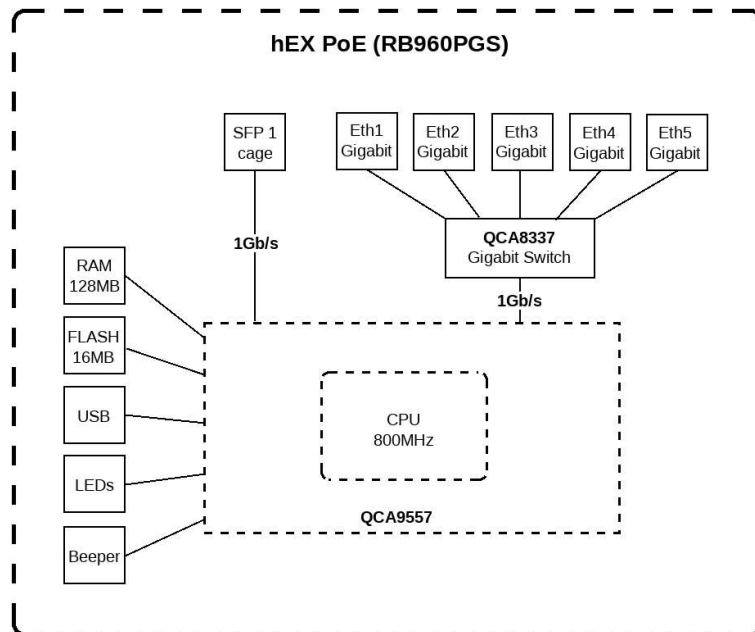
Kaalumisel oli PoE võimekusega võrgulüliti ja juhtkontroller paigaldada eraldi, kuid pärast ammendavat otsingut turult saadaolevate seadmete osas langes valik kõik-ühes lahendus Mikrotik rb960pgs marsruuterile, mille spetsifikatsioon on toodud lisa 3.

Selle marsruuteri eelisteks on:

- 1 võrguvärat koos PoE kliendiga (PoE sisend).
- 4 võrguväratit PoE alalisvoolu väljundvõimekusega.
- 1 USB liides

- võrgu PoE väljundvõimekusega värateid saab kasutada ka ainult toiteväljundina.
- Ruuteris olev tarkvara võimaldab läbi MetaROUTER paketi kaitada Linux operatsioonisüsteemiga virtuaalserverit.

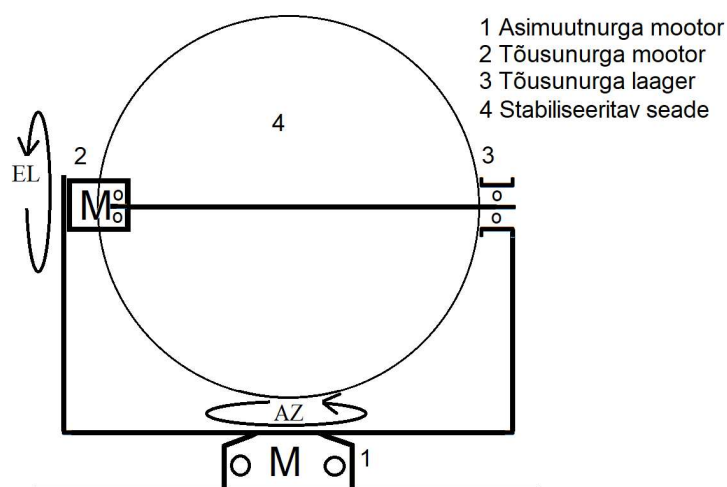
Mikrotik RB960PGS ruuteri plokk skeem on toodud joonisel 6.



Joonis 6. Mikrotik RB960PGS plokk skeem [<https://www.mikrotik.com/>]

## 2.5 Optimeeritud lahendus

Optimeeritud gürostabiliseeritud platvormi lahenduse kinemaatikaskem on joonisel 7.



Joonis 7. Optimeeritud platvormi kinemaatikaskem

Sellest nähtub võrreldes joonisel 1 olnud skeemist mehhaaniliste ülekannete puudumine ning otsene jõuülekanne mootorite rootoritelt platvormi asimuut- ja tõusunurga liigendite telgedele.

Lahenduses on elimineeritud mehhaanilistest ülekannetest tingitud hõõrdekaod. BLDC mootorite kasutamine on samuti võimaldanud läbi õõnsate keskosade tuua kommunikatsioonikaabelduse, seega on elimineeritud ka spiraalkaablite painderaadiuste muutumiseks kuluv energia. Reaalne koostatud prototüüp on nähtav pildil 12.

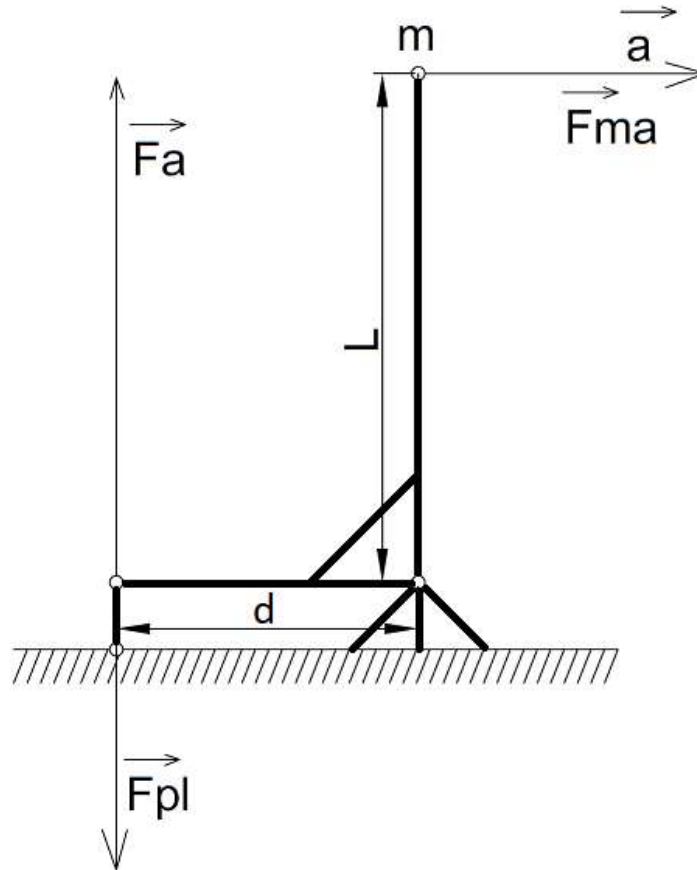
Prototüübi testimise käigus on optimeeritud platvormi energiatarvet läbi mootorite kiirenduse ja kiiruse piiramise vähima vajalikuni. Täna turul olevad platvormid on enamasti spetsifitseeritud kuni 30 kraadi sekundis liikumiseni tavalises tööolekus, seega sai loetud see minimaalseks vajalikuks sõltumata alusplatvormi võimalikest liikumiskarakteristikutest.

Platvormi 2 prototüüpi on praegusel hetkel testimises reaalsel kruisilaeval ning on täielikult jäänud seatud eesmärkide piiresse. See tähendab on suutnud järgida etteantud objekti ning teinud seda sätestatud energiabilansi sees.



Pilt 12. BLDC mootoritega gürostabiliseeritud platvormi prototüüp

Lahenduse mehhaanilise tugevuse ja vastupidavuse osas tuli arvesse võtta kõige nõrgemat punkti, milleks on asimuutmootori kinnitus baasplaadile. Baasplaadile kinnitamiseks on antud mootoril eelpuuritud ja -keermestatud 12 M3 mõõdus poldiava 8tk baasdiameetril 35mm ja 4tk baasdiameetril (d) 25mm. Arvestades kontaktpinna diameetrit 55mm on seega kõige kaugema poldi jaoks jõuõla pikkus 45mm. Stabiliseeritud platvormi vertikaalsihis massikesse (m) on sellest asukohast 225mm (L) kõrgemal (Joonis 8).



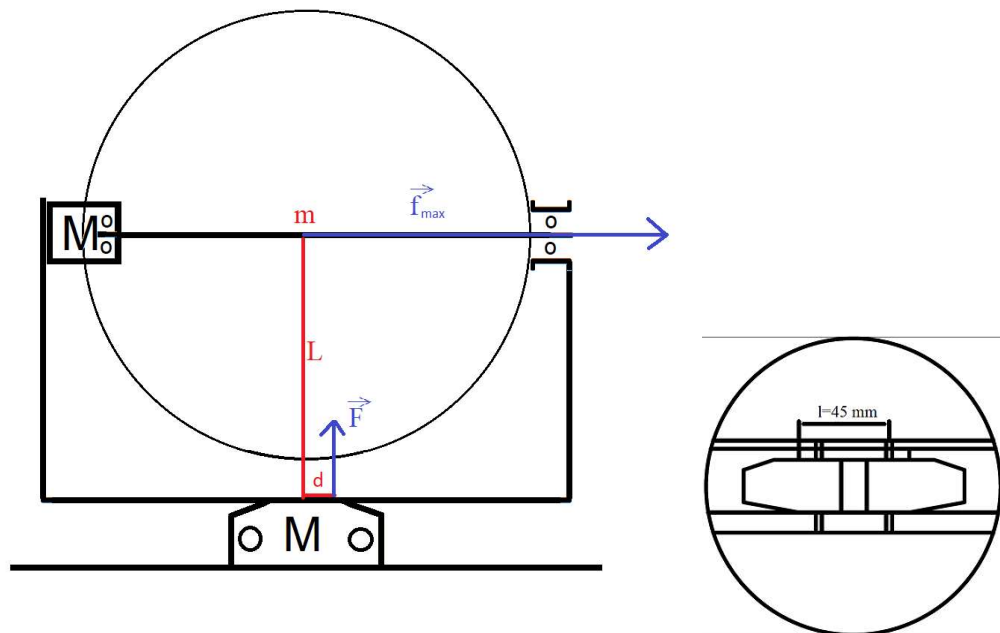
Joonis 8. Poldliitele mõjuva jõu leidmise skeem.

Külgsuunalise jõu kordaja on seega:

$$K_{\text{õlg}} = \frac{L}{d} = \frac{0,225 \text{ m}}{0,045 \text{ m}} = 5$$

Arvestades turulolevate platvormide andmeid, on üldine külkkiirenduse disainikriteerium suurusjärgus  $a_{\text{max}}=5 \text{ g}$ , kus  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ . Seega peab antud liide toime tulema tõmbejõuga vektori sihis  $F_{\text{max}}$  ilma jääkdeformatsioonideta.

$$F_{\text{poltliide}} = \vec{F}_{\text{max}} = \vec{F}_m \cdot K_{\delta lg} = a_{\text{max}} \cdot m \cdot K_{\delta lg}$$



Joonis 9. Asimuutliigendi kinnitustele mõjuvad jõud.

M3 keermeatud poldiava T6 alumiiniumis nominaal tõmbetugevusega 82,7 MPa ning paksusel 4,5 mm evib purunemistugevust  $F_{kr} = 1480 \text{ N}$  normaalsuunas, M3 AISI304 roostevabast terasest polt 7700 N. Seega kannatab üks poltliide platvormi lateraalset jõudu:

$$f_{kr, \text{max}} = \frac{F_{kr}}{K_{\delta lg}} = \frac{1480 \text{ N}}{5} = 296 \text{ N}$$

Arvestades siinkohal umbkaudset platvormi massikeskmes (m) massi 5 kg saame ühe poltliite tõmbel purunemise lateraalseks külgiirenduseks vektori sihis(f):

$$a_{kr, pl} = \frac{f_{kr}}{m} = \frac{296 \text{ N}}{5 \text{ kg}} = 59,2 \text{ m/s}^2$$

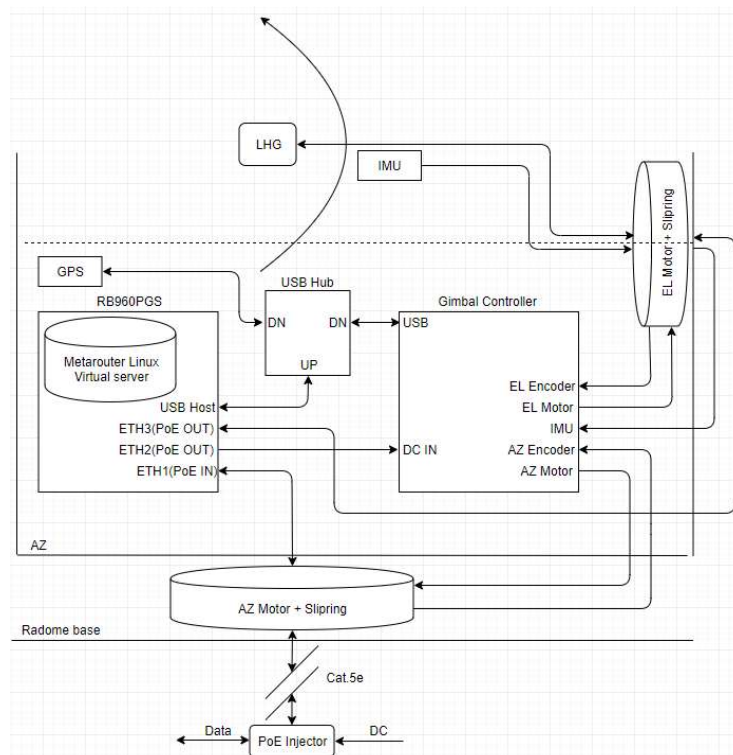
$$a_{g, kr} = \frac{a_{kr, pl}}{g} = \frac{59,2 \text{ m/s}^2}{9,81 \text{ m/s}^2} = 6,03 \text{ g}$$

Arvutame varuteguri:

$$k_{varu} = \frac{a_{g,kr}}{a_{max}} = \frac{6,03 g}{5g} = 1,21$$

Eelnevast tulenevalt võib lugeda liite tugevusvaru 21% piisavaks. Liite koost teostatakse reaalselt 8 poltliitega välistamaks ka materjali väsimisest tingitud probleeme eksploatatsioonis.

Kuna platvormi raadiosageduslik osa on täielikult eraldatud, siis tulles tagasi joonisel 2 esitatud skeemi juurde on optimeeritud lahenduse skeem joonisel 10.



Joonis 10. Optimeeritud süsteemi plokkskeem

Võrreldes joonisel 2 esitatud algse skeemiga on tehniline lahendus väga palju lihtsustunud. Kogu raadiosageduslik osa on lahendatud platvormiga kaasaliikuva modemi ja sinna juurde kuuluvate kordistite ja võimsusvõimendiga. Selle tulemusena on ka vajalik kaabelduse hulk vähenenud minimaalseni. Platvormi kogukaal on suurusjärgus 5 kg, mis on samuti vähendanud inertsomendi ületamiseks vajalikku energiahulka.

Platvormi raadiomoodulina (Joonisel 10 märgitud kui LHG) saab kasutada järgnevaid mooduleid:

- RBLHG-2nD – 2,4 GHz IEE802.11b/g/n
- RBLHG-5nD – 5,8 GHz IEE802.11a/n

- RBLHG-5HPnD – 5,8 GHz IEE802.11a/n
- RBLHG-5acD – 5,8 Ghz IEE208.11a/n/ac
- RBLHGR&R11e-LTE – 2G(Class 12)/3G(R7)/4G(Category 4)
- RBLHGG-60adkit – 60 GHz 802.3af/ad

Seega on kaetud kõik antud hetkel enamlevinud sagedusalad ja standardid maapealse otsenähtavusega side tagamiseks. Lahendust on edukalt testitud Tallinna ja Helsingi vahelisel laevateel, ning saavutatud:

- Maksimaalne levikaugus 85 km. (IEE802.11n 5.8Ghz. RBLHG-5HPnD)
- Maksimaalne andmeside kiiruse/kauguse suhe 670 Mbit/s @ 38 km. IEE802.11ac 5.8Ghz RBLHG-5acD)
- Maksimaalne andmeside kiirus 2 Gbit/s. IEE802.11ad, 60 Ghz RBLHGG-60adkit)

Kõikide testide puhul on jäädud ITU poolt ettemääratud võimsuse ja võimsustiheduse(EIRP) piiridesse.

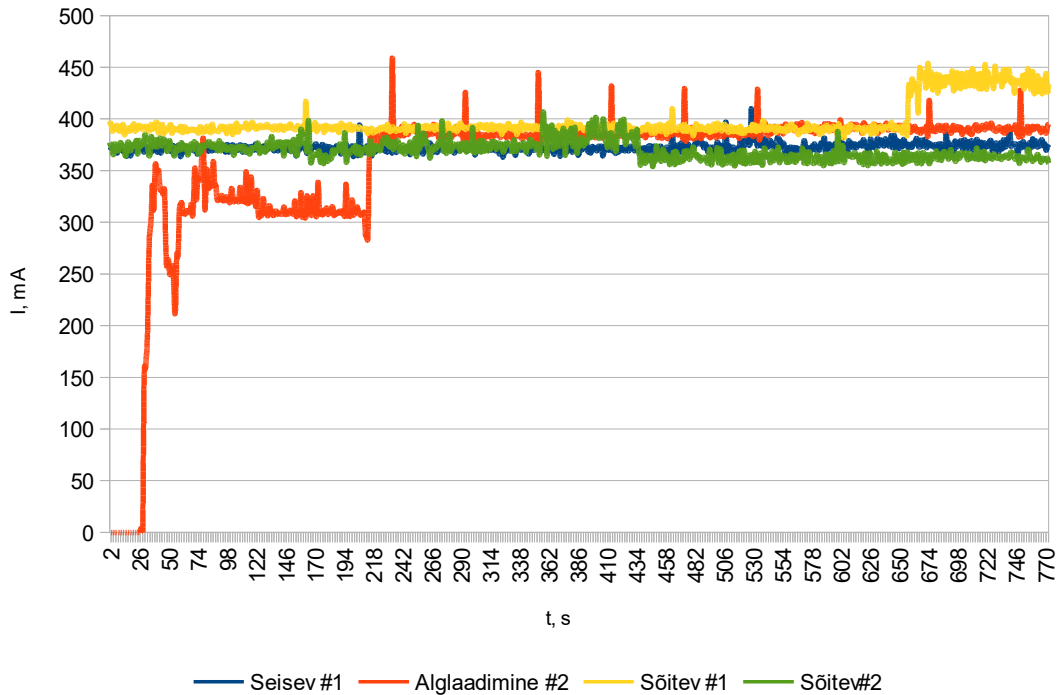
Toitepinge- ja võimsuse osas peab arvestama kõigi potentsiaalsete raadiomoodulite võimsustarbega ning loomulikult ka platvormi enda võimsustarbega. Tabelis 1 on toodud raadiomoodulite ja süsteemi osade lubatud pingevahemik ja maksimaalne võimsustarve.

<b>Pinge ja võimsusnõuded</b>			
<b>Osis</b>	<b>Umin</b>	<b>Umax</b>	<b>Pmax</b>
Gimbal controller	8 V	26 V	6 W
RB960PGS	12 V	57 V	6 W
RBLHG-2nD	10 V	30 V	5 W
RBLHG-5nD	11 V	30 V	6 W
RBLHG-5HPnD	10 V	28 V	7 W
RBLHG-5acD	10 V	30 V	8 W
RBLHGR&R11e-LTE	12 V	57 V	6 W
RBLHGG-60adkit	12 V	57 V	5 W
<b>Süsteem kokku</b>	<b>12 V</b>	<b>26 V</b>	<b>13 W</b>

Tabel 1. Pinge- ja võimsusnõuded.

Tegelik mõõdetud süsteemi voolutarve on kujutatud Graafikul 1, millel on kujutatud kolm erinevat kasutusjuhtu. Sinise joonega on baastarve seisval alusel konstantset nurka hoidva platvormi korral. Punase joonega on mõõdetud alglaadimise voolutugevust. Alglaadimise käigus peab platvorm liikuma nii nullasendisse kui selle järgselt soovitud asendisse, ehk kahel juhul alustatakse inertsmomendi ületamist mõlema telje mootorite poolt korraga. Kollane ja Punane joon on

tavaolukorras mõõdetud, ehk tööasendis. (Alusplatvorm liigub, platvorm ise liigub.) Kollase joonega näidatud sõidu lõpupoole toimus raadiomooduli üleandmine (Ingl.k. Handover) kaugema teenindusmasti suunas, mis tõstis raadiomooduli saatevõimsust.

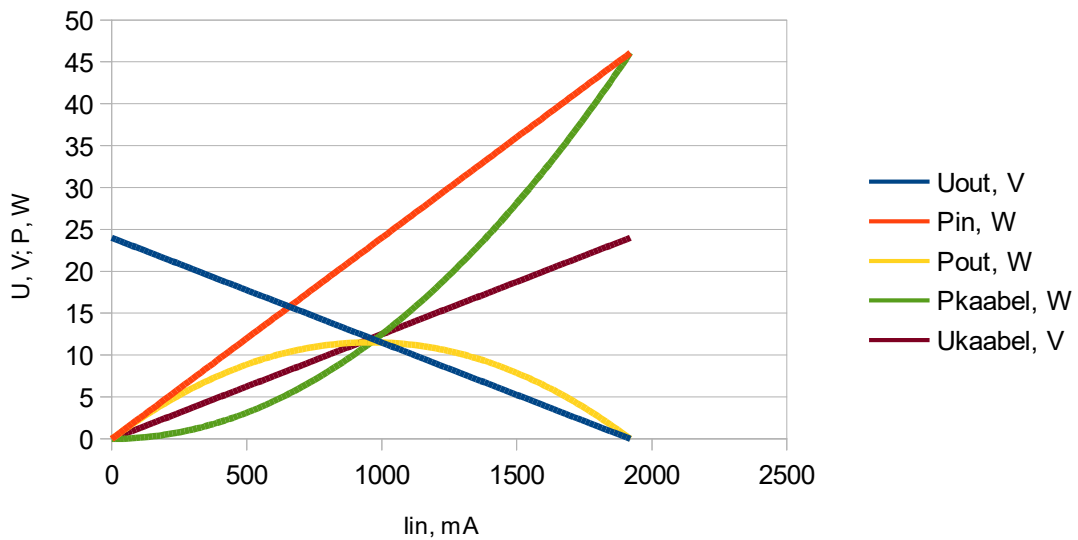


Graafik 1. Mõõdetud platvormi voolutugevus  $I$ , mA ajas  $t$ , s.

Maksimaalne mõõdetud voolutugevus 24 V toitepinge puhul on 459 mA, mis tähendab platvormi võimsustarbekes koos ADU-BDU kaabli takistusest tingitud pingelangu ja võimsusega 11 W. Siinkohal tuleb arvestada aga mitte IEEE802.3AB standardis lubatud võimsustarvet, vaid arvutada välja spetsifikatsiooni piiresse jäämine ka madalama toitepinge puhul. Standard sätestab maksimaalseks kaablijooksu ühe paari (edasi-tagasi) takistuseks  $12.5 \Omega$  ning maksimaalseks lubatavaks voolutugevuseks kuni 960 mA paari kohta.

Juhindudes eelnevast, peab välja arutama maksimaalse võimaliku tarbitava võimsuse platvormi poolt, sest kaablitakistusest tingitud pingelang vähendab kasulikku võimsust, mis oleks kasutatav platvormi poolt. Graafikul 2 on kujutatud voolutugevuse sõltuvus kaablis tekkiva pingelangu ja reaalselt võimaliku tarbitava võimsusega. Graafikult 2 on näha, et suurendades toitekaablis voolutugevust üle 960 mA, hakkab reaalselt tarbitav võimsus langema tänu voolutugevusega kaablis kaasnevale pingelangule. Tulenevalt eeltoodust on antud 24 V toitepinge puhul maksimaalne võimsuspunkt ehk MPP just 960 mA voolutugevuse juures 12 W.





Graafik 2. Võimalik tarbitav võimsus sõltuvalt tarbitavast voolutugevusest.

Reaalselt mõõdetuna graafikul 1 toodud platvormide installatsioonide puhul on tegelikud koormusvoolud ja toitepinged mõõdetuna platvormide töötamise ajal järgmised:

- Testplatvorm 1 –  $U_{\text{sis}}=24.0 \text{ V}$ ;  $U_{\text{väl}}=8,6 \text{ V}$ ;  $I=434 \text{ mA}$ ;
- Testplatvorm 2 –  $U_{\text{sis}}=24.0 \text{ V}$ ;  $U_{\text{väl}}=22,1 \text{ V}$ ;  $I=387 \text{ mA}$ ;

Arvutades nendest mõõdetulemustest reaalse kaablitakistuse saame:

$$R_{\text{kab}} = \frac{U_{\text{sis}} - U_{\text{väl}}}{I}$$

$$R_{\text{kab1}} = \frac{24 \text{ V} - 18,6 \text{ V}}{0,434 \text{ A}} = 12,44 \Omega$$

$$R_{\text{kab2}} = \frac{24 \text{ V} - 22,1 \text{ V}}{0,387 \text{ A}} = 4,91 \Omega$$

Need tulemused on ootuspärased, arvestades, et platvorm #1 toitekaabel on siin kahest jätkatud osast vaheühendusega ja pikemas osas vanema kategooria 3 kaablina. Platvormi #2 toitekaabel on küll sama pikk, kuid uuem, kategooria 5e kaabel ning jätkudeta.

Antud töö tulemusena koostatud platvormi puhul on eelistatud 24 V alalispingega toitmine, sest toode on suunatud Mikrotik-i WISP-idele. Seega pole arvesse võetud potentsiaalne 802.3

standardile vastava toitepinge kasutamisel saavutatav lisavõimsuse efekt. Seda efekti oleks võimalik hõlpsasti kasutada lisades platvormi 802.3 mõnele standardi redaktsioonile vastav muundur, näiteks Planet PoE-171S. See tagaks platvormi ja raadiomooduli maksimaalse koguvõimsuse 48W. Planet PoE-171S on toodud pildil 13.



Pilt 13. Planet PoE-171S DC-DC konverter. [planetechusa.com]

## KOKKUVÕTE

Antud bakalaureusetöö eesmärgiks oli leida optimaalsemad ja kõrgemate töökindlusnäitajatega lahendused võrreldes täna turul olevate stabiliseeritud platvormidega. Selleks kaardistati turul olevate platvormide elektrilised ja mehhaanilised kitsaskohad, töö esimeses osas leiti puudujääke põhiliselt mehhaaniliste ülekannete kasutamisest ja elektriliste signaalide läbiviimisega vabastusastmetega kaasnevatest detailidest.

Pärast kitsaskohtade leidmist täpsustati ülesannet konkreetsete kitsaskohtade parendamiseks ning uute lahenduste leidmiseks. Järgnevalt on välja toodud kitsaskohad ning nende ületamiseks kasutatud lahendused.

**Vähendada installatsioonikaablite vajadust.** Eesmärk on täidetud, antud platvormi koos raadiomooduliga kommunikatsioon, toide ja andmeedastus toimub ühe IEEE802.3 kategooria 5 kaabli kaudu. Andmeedastuskiirus on piiratud 1 Gbit/s dupleks võimekusega.

**Vähendada platvormi võimsustarvet,** tagamaks töötamise 802.3(af/at/bt) standarditega. Eesmärk sai osaliselt täidetud. Platvormi kontrolleri ei talu pinget üle 26 VDC, seega 802.3af standardis sätestatud. Küll aga täideti 802.3bt standardis maksimaalse voolutugevuse nõue. Antud standard lubab ühe paari kaudu edastada kuni 960 mA, ehk 24 VDC toitepinge korral 23 W. Platvormi koguvõimsus jääb alla 13 W. Edasine arendus võib kasutada ka täiendavat DC/DC muundurit tagamaks mootorikontrolleri sisendpinge hoidmise vajalikes piirides kasutades kõrgemat PoE toitepinget.

**Eemaldada süsteemist tüüpiliselt enimkuluvad osad.** Eesmärk sai täidetud, eemaldades süsteemist nii hammasrihmad kui ka hammasrihma rattad. Ainukesteks liikuvateks osadeks on mootorid. Ülekanne on teostatud magnetiliselt. Samuti on platvormi koost lihtsustunud vähendades arvuliselt üle kahe korra erinevate komponentide kasutamist.

## **ABSTRACT**

This Bachelor's graduation thesis is based on hypothesis that current gyro-stabilized platforms are not optimized by design and aims to improve on electrical and mechanical areas of the platform.

The thesis concluded, that in order to reduce installation challenges, the power consumption of the platform needs to be reduced so the power could be supplied via the same cable as the required communication. This leads to reducing rotating mass of the stabilized platform in order to reduce the inertia and also reduction of friction typically introduced by cogged-belt drive systems of the platform axes.

Also in this thesis, it was pinpointed that the required force to wind and unwind the spiral-cable type rotary joints also inflicted the power consumption of the platform and was replaced by slip-ring type unlimited turn range rotary joints on both axis.

The general assembly of the platform was simplified further by moving the radio frequency and modem from BDU to ADU and using embedded modulator-demodulator right on the platform.

The end-product had reduced the power consumption by a factor of 6-10, yielding to the possibility of powering the whole platform including the RF part via a single power-over-ethernet solution.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] – Seatel Coastal 18 Data Sheet, Cobham SATCOM Maritime Systems 2013, 126900\_E/13
- [2] - Installation and operation manual for Seatel Coastal 18 satellite TV receive-only antenna without polarization, Seatel Inc, 2006, 124769 Rev.A
- [3] - Installation and operation manual for Seatel model 4003-6 broadband-at-sea transmit/receive system, Seatel Inc, 2003, 122409 Rev.Preliminary-X1
- [4] - AS5048A/AS5048B Magnetic Rotary Encoder datasheet, AMS, 2016, V1-09
- [5] – Rakendusmehaanika, Ilmar Kreis/Heino Arumäe, Tallinn 2001

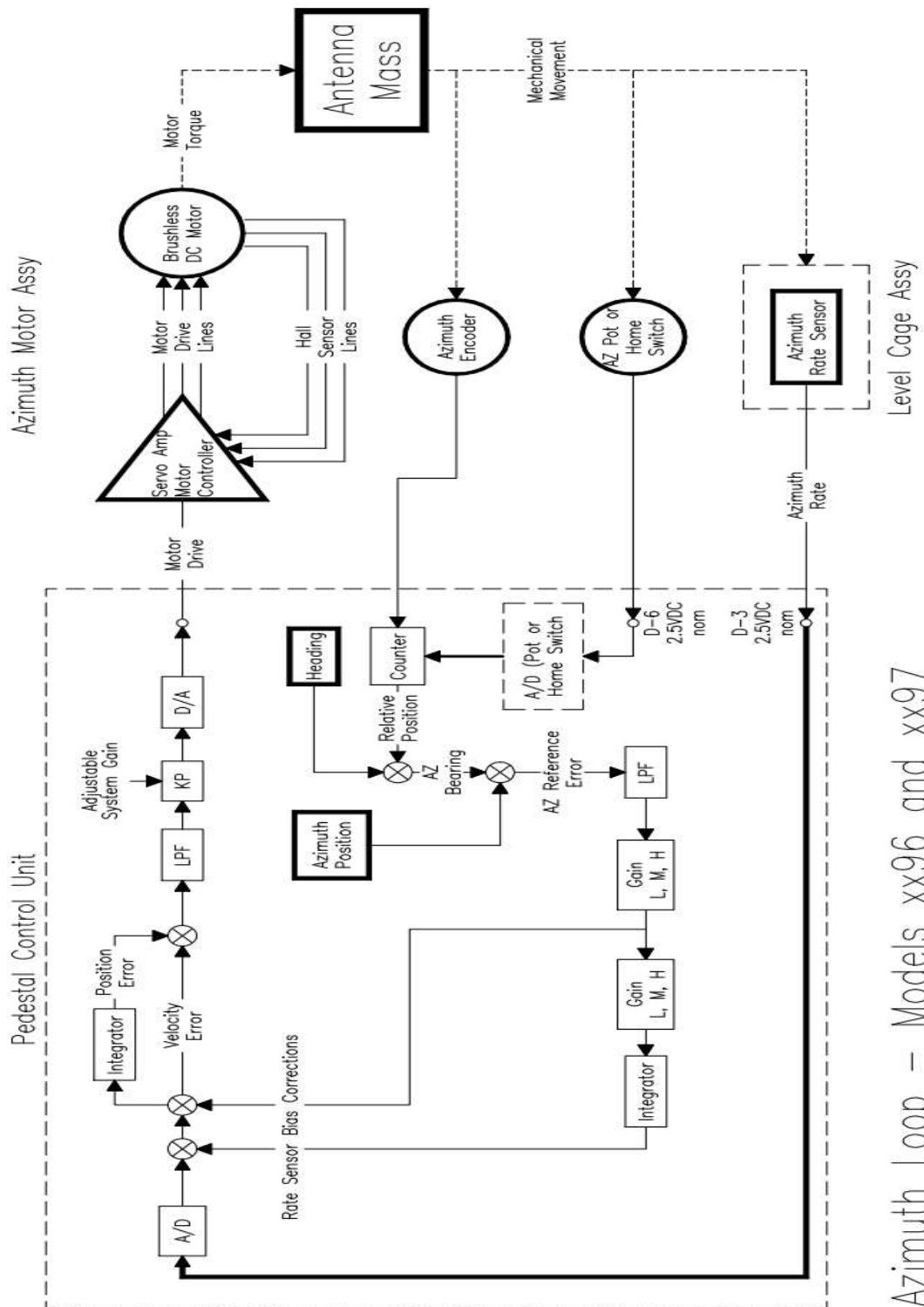
## LISAD

### Lisa 1. Sea Tel Coastal 18 spetsifikatsioon

<b>Spetsifikatsioon</b>	
Kaal	17,2 kg
Toitepinge	10-16 VDC
Temperatuurivahemik	-20°C kuni +55°C
Aluse põikkõikumine	+/- 25°
Aluse pikikõikumine	+/- 25°
Aluse pööramiskiirus	+/- 15°
Põikkõikumise korrektsioon	+/- 25°/s
Pikikõikumise korrektsioon	+/- 25°/s
Pööramiskiiruse korrektsioon	+/- 12°/s
Asimuudi pööramiskiirus	+/- 12°/s
Tõusunurga piirväärtused	10° kuni 78°

# Lisa 2. Sea Tel DAC-92 juhtimisskeemid

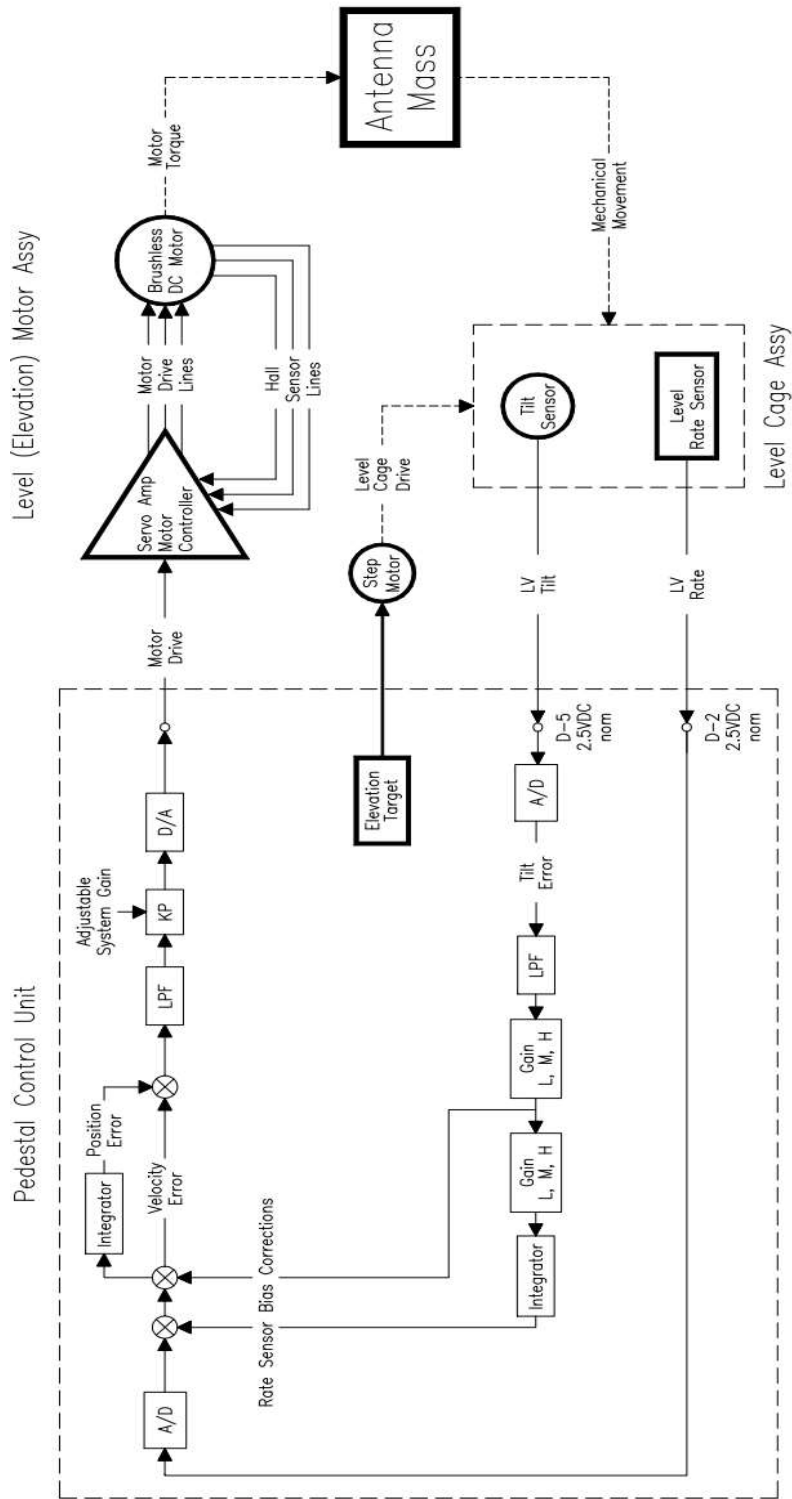
## L2.1. Asimuudi juhtimisskeem



Joonis 11. Seatel DAC-92 Asimuutliigendi juhtimisskeem

Azimuth Loop – Models xx96 and xx97

## L2.2. Tõusnurga juhtimiskeem



Joonis 12. Seatel DAC-92 Tõusnurga juhtimiskeem



## Lisa 3. Mootorite spetsifikatsioonid

### L3.1. GBM5208H-200T spetsifikatsioon

Spetsifikatsioon	
Mudel	GBM5208H-200T
Kaal	179 g
Mootori mõõtmed	Diameeter 63 mm, kõrgus 24.5 mm
Staatori mõõtmed	Diameeter 52 mm, kõrgus 8 mm
Mähisetraadi diameeter	0.27 mm
Konfiguratsioon	12 poolust 14 magnetit
Elektriline takistus	15.5 $\Omega$
Poldivalem	25 mm; 30 mm
Eelmähitud	200 keerdu, õõnsa keskosaga
Õõnsa keskosa diameeter	12.6 mm
Vabastusastme mass	800-1550 g
Pinge	11.1 V
Voolutugevus	0.066 A
Maksimaalne voolutugevus	10 A
Maksimaalne pöörlemiskiirus	278 p/min

### L3.2. GBM110-150T spetsifikatsioon

Spetsifikatsioon	
Mudel	GBM110-150T
Kaal	554 g
Mootori mõõtmed	diameeter 110mm, kõrgus 26mm
Staatori mõõtmed	diameeter 100mm, kõrgus 8mm
Mähisetraadi diameeter	0.32 mm
Konfiguratsioon	24 poolust, 22 magnetit
Elektriline takistus	17.8 $\Omega$
Poldivalem	25mm 35mm
Eelmähitud	150 keerdu, õõnsa keskosaga
Õõnsa keskosa diameeter	12.6 mm
Vabastusastme mass	5000-8000 g
Pinge	20 V
Voolutugevus	0.066 A
Maksimaalne voolutugevus	13 A
Maksimaalne pöörlemiskiirus	137 p/min

## Lisa 4. Liugkontakti spetsifikatsioon

Spetsifikatsioon	
Voolujuhte	12
Pingetaluvus	240 V DC/AC
Välisdiameeter	12.5 mm
Kontaktide kate	Kuld / kuld
Kesta materjal	ABS plastik
Tõrketa tööiga	> 40 miljonit pööret
Dielektriline tugevus	600 V (60 Hz sagedusel)
Isolatsiooni takistus	1000 M $\Omega$ (500 V)
Töötemperatuuri vahemik	-40°C kuni +80°C
Vibratsioonikindluse standard	MIL-SID-810E
Materjali standard	RoHS
Maksimaalne voolutugevus	2 A juhi kohta
Maksimaalne pööremiskiirus	250 pööret minutis
Pikkus	25 mm
Liugkontaktide sisetakistus	< 150 m $\Omega$
Mehaaniline pööremistakistus	0.02 Nm
Juhtmete spetsifikatsioon	Isolatsioonimaterjal UL Teflon, 0,05mm <sup>2</sup>
Juhtmete pikkus	250 mm
IP standard	IP51
Õhuniiskuse taluvus töötamisel	10% kuni 90% relatiivne
CE Sertifikaat	Jah

## Lisa 5. Mikrotik rb960pgs spetsifikatsioon

<b>Spetsifikatsioon</b>	
Tootekood	RB960PGS
Arhitektuur	MIPSBE
Protsessor	QCA9557
Tuumade arv	1
Taktsagedus	800 MHz
Litsentsi tase	4
Muutmälu maht	128 MB
Püsिमälu maht	16 MB
Püsिमälu tüüp	FLASH
Töötemperatuuri vahemik	-40°C kuni 60°C
Soovituslik jaehind	\$79.00
<b>Elektrilised parameetrid</b>	
PoE sisend	Passiivne PoE
PoE väljund	802.3af/at
PoE sisendpinge vahemik	12-57 V
Alalispinge sisendeid	2 (DC pulkpistiku pesa, PoE-sisend)
DC sisendpinge vahemik	12-57 V
Maksimaalne väljundi vool (sisend > 30 V)	450 mA
Maksimaalne väljundi vool (sisend < 30 V)	1 A
Maksimaalne kombineeritud väljundvool	2 A
Maksimaalne kombineeritud võimsus	59 W
Maksimaalne omatarve	6 W
<b>Võrguliidesed</b>	
10/100/1000 vārateid	5
<b>Fiberoptilised liidesed</b>	
SFP pesasid	1
<b>Lisaseadmed</b>	
USB vārateid	1
USB vāрати alglaadimise vōimalus	Jah
USB vāрати tüüp	USB tüüp A
Maksimaalne voolutugevus	1 A
<b>Muu</b>	
Trükkplaadi temperatuuriandur	Jah
Toitepinge andur	Jah