

TARTU ÜLIKOOL
Loodus- ja tehnoloogiateaduskond
Arvutitehnika eriala

Tõnis Uiboupin

ESTCube-1
elektromagnettõukurite
automatiseeritud
kerimisseadme arendus
ja testimine

Bakalaureusetöö

Juhendajad: Viljo Allik ja Mart Noorma

Sisukord

Sissejuhatus	4
1. ADCS	5
2. Elektromagnet.....	6
3. Elektromagnettõukurite kerimisseadme disain.....	10
3.1 Nõuded ja eesmärk.....	10
3.2 Kerija joonis.....	11
3.3 Kerimisseadme üldine kirjeldus	12
4. Tehniline lahendus.....	14
4.1 Kere ja konstruktsioon.....	14
4.2 Elektroonika.....	14
4.2.1 ARM Cortex-M4F tuumaga mikrokontroller STM32F407VGT6.....	14
4.2.2 Samm-mootorid ning nende draiverid.....	16
4.2.3 Ühendus arvutiga üle UART liidese.....	18
4.2.4 Andur OPB960T51.....	19
4.3 Programmi kood.....	20
4.3.1 Kerimise alustamine.....	20
4.3.2 Traadi kerimine.....	21
4.3.3 Traadi kerimise peatamine.....	21
5. Testimine	22
5.1 Elektriskeemi ja loogika testimine.....	22
5.2 Keritud elektromagnettõukurite testimine.....	23
Kokkuvõte	24
Kasutatud kirjandus.....	25
Abstract	27
Kasutatud joonised.....	28

Kasutatud tabelid.....	29
Lisa 1. Juhtelektroonika plaat.....	30
Lisa 2. Juhtelektroonika skeem.....	31

Sissejuhatus

Eesti Tudengisatelliidi projekt alustas 2008. aasta suvel Tartu Ülikoolis eesmärgiga edendada kosmosetehnoloogiaalaseid teadmisi. Projektist on välja kasvanud Tartu Ülikooli, Tallinna Tehnikaülikooli, Helsingi Ülikooli, Saksa kosmoseagentuuri ja Eesti Lennuakadeemia tudengite täismõõduline rahvusvaheline koostöö. Projekti abil on õpilastel võimalik omandada olulisi praktilisi kogemusi teadustöö realiseerimisel ning projekti arendamisel algusest lõpuni.

ESTCube-1 satelliit on esimene Eesti Tudengisatelliidi projekti raames arendatav satelliit. ESTCube-1 põhineb Cubesat standardil, mille töötas välja Kalifornia Riiklik Polütehniline Ülikool (California Polytechnic State University – *Cal Poly*) koostöös Stanfordini Ülikooliga. Standard on mõeldud peamiselt tudengisatelliitide projektideks ja see võimaldas muuta satelliitide ehitamise ja üleslaskmise palju odavamaks ning kättesaadavamaks. [1]

Selle bakalaureusetöö eesmärgiks on konstrueerida automatiseeritud elektromagnettõukurite kerija, selle arendamine, riistvaraliste ja tarkvaraliste nõuete koostamine. Tõukurid on vajalikud ESTCube-1 satelliidi asendi määramise ja kontrolli süsteemis (*ADCS – Attitude Determination and Control System*).

Antud lõputöö jaguneb viieks peatükiks. Esimene peatükk kirjeldab satelliidi asendi määramise ja kontrolli süsteemi eesmärki. Teises peatükis seletatakse lahti elektromagnettõukurite tööpõhimõtte. Kolmandas peatükis käsitletakse loodud seadmele esitatud nõudeid ning tuuakse seadme tööpõhimõtte kirjeldus. Tehniline informatsioon loodud elektromagnettõukurite kerimisseadme kohta on leitav neljandast peatükist ning kõige lõpuks on viiendas peatükis antud seadme ning keritud tõukurite testimisenõuded.

1. ADCS

Satelliidi asendi määramise ja kontrolli süsteemi (ADCS) eesmärgiks on satelliidi asendi stabiliseerimine orbiidil, selle asukoha ja orientatsiooni määramine Maa suhtes. Vajaduse korral peab ADCS võimaldama ka satelliidi orientatsiooni muutmist, pöörlemise alustamist, hoidmist ning peatamist. [2]

Kontrollimaks satelliidi asendit või orientatsiooni, on sellele mõjuval magnetväljal oluline roll. Satelliidi asendi muutmiseks vajaliku pöördemomendi on võimalik genereerida, tekitades magnetilist momenti, mis läheb vastastikmõjusse satelliiti ümbritseva magnetväljaga. Sellist magnetilist momenti, füüsilist vektorit, on võimalik tekitada kas elektromagnetiga või püsomagnetiga. Püsomagnetit saab kasutada vaid passiivse juhtsüsteemi puhul, kuid ESTCube-1 vajab oma eksperimentide täitmiseks aktiivset kontrolli, mida on võimalik saavutada, kasutades reaktsioonirattaid või elektromagnettõukureid. Hetkel eksisteerivad reaktsioonirattad on mõeldud suuremate satelliitide jaoks ning seda tehnoloogiat peaks kohandama väiksemaks, et see mahuks CubeSat tüüpi satelliitide sisse. Kuna reaktsiooniratta komponentide suuruste vähendamine on tohutult keerukas, võrreldes elektromagnettõukurite tootmisega on CubeSat standardi satelliitidel mõistlik kasutada tõukureid.

Satelliidi asendi kontrollimiseks on tarvis kolme elektromagnettõukurit. Kolmedimensioonilise asendikontrolli saavutamiseks paigaldatakse traadist keritud elektromagnettõukurid satelliidi külgpaneelide siseküljele kolmel teljel. Elektromagnettõukureid juhitakse mikrokontrolleriga kontrollitavate draiverite poolt tekitatud vooluimpulssidega. [3]

E-sail (*Electric sail*) eksperimendi käigus võimaldavad elektromagnettõukurid saavutada vajaliku pöördliikumise. E-sail on elektriline puri, mille abil on avakosmoses võimalik tekitada päikesetuulte ning dünaamilise rõhu abil satelliidi liigutamiseks tõukejõudu. [4]

2. Elektromagnet

Elektromagnet on käsitletav induktiivpoolina ehk traadina, mis on keritud keerdudesse, moodustades mähise genereerib see muutuvast magnetväljas mehhaanilist pöördemomenti.

Magnetostaatilist välja on võimalik tekitada staatilise elektrivooluga ehk liigutades laetud osakesi. Vaatluste tulemusena on täheldatud, et koormamata, kuid voolu all oleva juhi otstele mõjuvad elektromagnetilised jõud. Magnetvälja kirjeldatakse magnetilise induktsiooni vektorina ning selle märgiseks on \vec{B} .

Magnetiline jõud või „Lorentzi jõud“ \vec{F} , mis mõjub liikuvale laengule, oleneb laengu suuruselt q , selle kiirusest \vec{v} ning välisest magnetväljast \vec{B} . [4]

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (1)$$

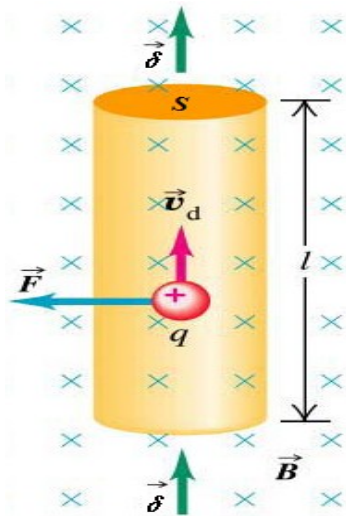
Juhet läbiva voolu tugevuse määrab paljude liikuvate laengukandjate keskmine, seega saab juhtmele mõjuva jõu leida liites kokku üksikutele laenguosakestele mõjuvad jõud.

Kujutades ette lõpmata väikest juhtmesektsiooni nagu kirjeldab joonis 1, kus voolu tähistab voolutiheduse suund δ . Laengukandjate arv on x ja iga laengukandja laeng on q .

Kui keskmine füüsikaline laengukandjate liikumiskiirus on v_d , siis $\delta = q \cdot v$. Lõpmatult väikese juhtmesektsiooni ruumalasse $S \cdot dl$ mahub $x \cdot S \cdot dl$ liikuvat laengut.

Nende laengute summaarset tugevust kirjeldab järgmine valem:

$$dF = q \cdot (v \times B) \cdot (x \cdot S \cdot dl) = \delta \times B (Sdl) \quad (2)$$



Joonis 1: Lorentzi jõud juhis [6]

Asendades valemis 2 voolutihedus voolutugevuse valemiga $I = \delta \cdot S$ saame avaldada elektronile välises magnetväljas mõjuva jõu järgneva valemiga:

$$dF = (I \times B) \cdot dl \quad (3)$$

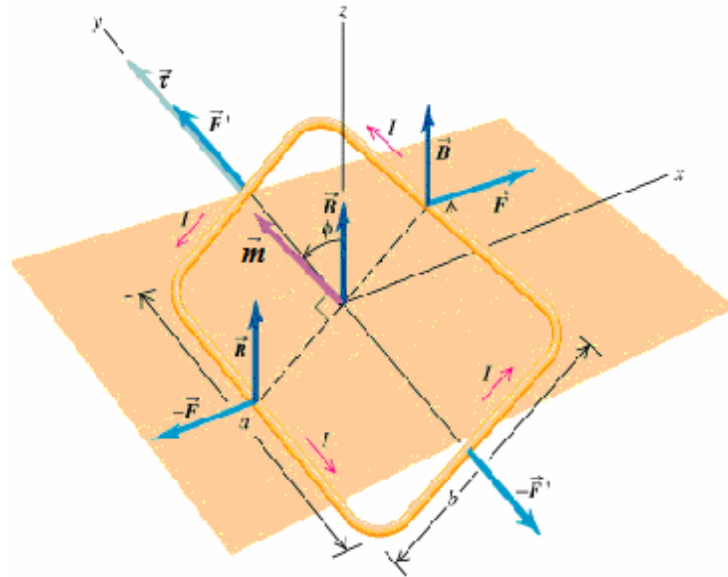
Piiratud pikkusega juhtmelõigule mõjuva jõu leidmiseks tuleb antud avaldist integreerida tervele juhtmelõigule.

$$\vec{F} = (\vec{I} \times \vec{B}) \cdot l \quad (4)$$

Elektromagnettõukur on põhiolemuselt pikk silmustesse keritud elektrijuht, mille igale küljele mõjuv jõud on avaldatud valemis 4.

Jõudude mõjumise suundade kujutamiseks saab kasutada „parema käe kuldreeglit“, kus õige sõrmedevaheliste nurkade puhul näitab põial voolusuunda, nimetissõrm magneetilise välja vektori suunda ning keskmise sõrm jõu mõjumise suunda. Joonisel 2 on näidatud nelinurkse mähise puhul selle külgedel tekkivaid Lorentzi jõude ühe traadikeeru puhul. Joonisel on selgelt näha b -ga tähistatud küljel tekkivad üksteist elimineerivad jõud, mis paiknevad y teljel ja tööd tegevad jõud x - z teljel mis tekivad a -ga tähistatud küljel. Kummalgi küljel tekkivad jõud valemi 4 järgi on:

$$\vec{F} = (\vec{I} \times \vec{B}) \cdot l = (\vec{I} \times \vec{B}) \cdot a \quad (5)$$



Joonis 2: Lorentzi jõud nelinurkse mähise külgedel [6]

Mõlema jõu poolt tekivad pöördemoment M on:

$$M = \frac{2 \cdot F \cdot b}{2} = a \cdot (\vec{I} \times \vec{B}) \cdot b = a \cdot b \cdot I \cdot B \cdot \sin \Phi \quad (6)$$

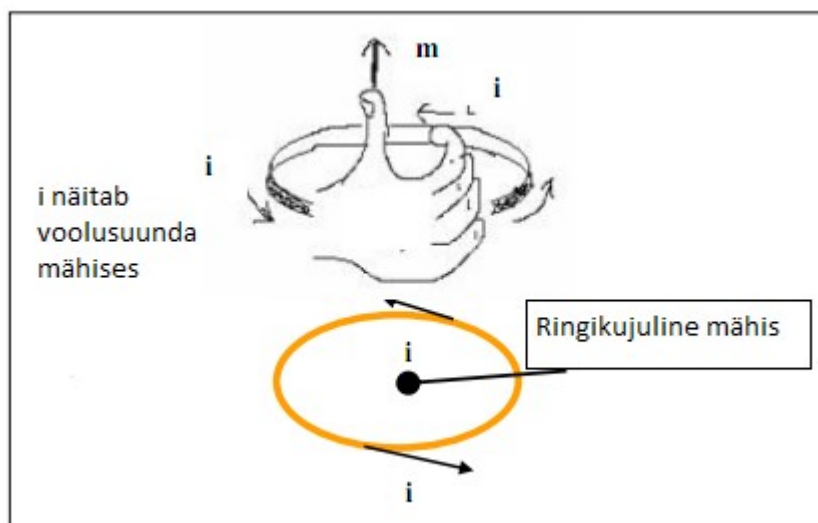
N keeruga mähise Lorentzi jõu ja magneetilise momendi määramiseks tuleb valem 6 lihtsalt N -iga läbi korrutada.

$$M = N \cdot S \cdot I \cdot B \cdot \sin \Phi \quad (7)$$

Mähise parameetrid $a \cdot b$ annavad pindala S , mis koos voolutugevusega I moodustab joonisel 2 oleva magneetilise momendi vektori m .

$$m = I \cdot S \quad (8)$$

Silmustesse keritud juhtme puhul kehtib magnetvälja suuna määramisel „parema käe rusikareegel“ mida seletab joonis 3.



Joonis 3: Parema käe reegel [6]

Sõrmed on keerdus voolu suunas ning põial näitab magnetvälja mõjumissuunda. See, silmuste tasapinnaga risti olev suund, näitab ka magnetilise momendi suunda m . Magnetiline moment oleneb mähises olevate juhtmekeerude arvust, mähise pindalast ning voolutugevusest.

$$m = N \cdot S \cdot I \quad (9)$$

Kasutades lihtsat Cartesiuse korrutise ehk ristkorrutise omadust saame tuletada põhivõrrandi

$$|m| \cdot |B| \cdot \sin \Phi = |m \times B| \quad (10)$$

$$N \cdot S \cdot I \cdot B \cdot \sin \Phi = M \quad (11)$$

$$\vec{M} = \vec{m} \times \vec{B} \quad (12)$$

Muutes elektromagnetit läbiva voolu tugevust või suunda, on võimalik reguleerida selle poolt tekitava magnetilise momendi tugevust ja suunda. Tänu sellisele omadusele on võimalik kolmele teljele paigutatud elektromagnetite abil kontrollida satelliidi asendit seda ümbritsevas magnetväljas \vec{B} . [5]

3. Elektromagnettõukurite kerimisseadme disain

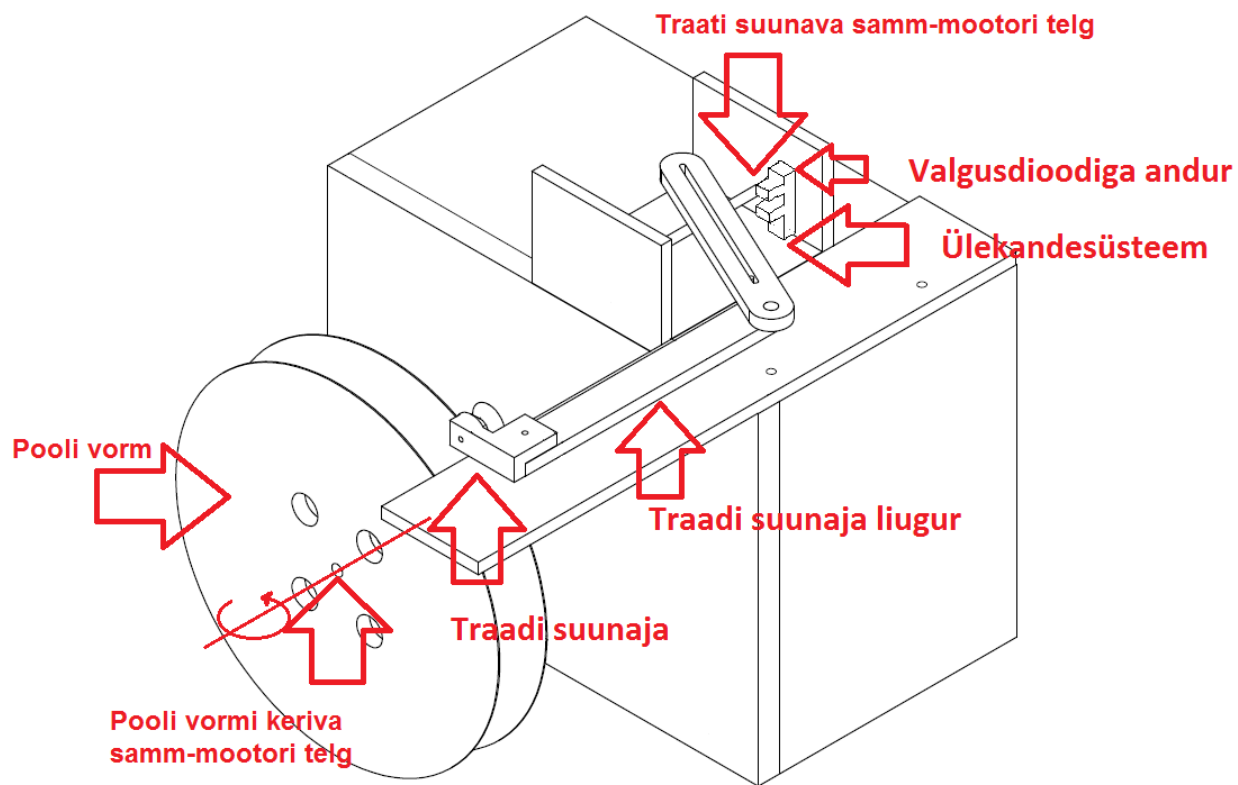
3.1 Nõuded ja eesmärk

ESTCube-1 tüüpi kuupsatelliitide üheks oluliseimaks osaks on ADCS süsteem, mis kannab hoolt satelliidi asendi muudatuste eest elektromagnettõukurite abil. Kuna üsna tõenäoliselt on peale ESTCube-1 projekti meie ülikoolis läbi viia sellele järgnevais satelliidiprojekte, siis tekkis vajadus leida mõistlik võimalus elektromagnettõukurite hankimiseks. Kuigi on olemas mitmeid erinevaid variante mähiste tellimiseks, puuduvad Tartu Ülikoolil lähedased sidemed tootjatega, kes oleks abiks. Probleemi lahendusena otsustati bakalaureusetöö raames disainida, arendada ning valmistada oma mähisekerija.

Esiialgu võib tunduda, et üsna lihtne oleks mähiseid käsitsi vormile kerida ning automatiseeritud kerijat polegi tarvis. Kui aga võtta arvesse, et satelliidile paigutatavad elektromagnettõukurid keritakse üsna väikese läbimõõduga traadist ning samas keerdude arv on üsna suur, siis osutub mehaaniliste mõõtmete poolest identsete mähiste kerimine väga keeruliseks. Lisaks on tõukurite töökeskkonnaks kosmos ning seda silmas pidades peavad mähised läbima keskkonnataluvuse testid, mis peavad tegema kindlaks, kas erinevad satelliidi osad elavad üle müra- ja vibratsioonirikka stardi ning avakosmoses olevad ekstreemsed temperatuurikõikumised, vaakumi ja radiatsiooni. Seega on üsna selge, et kosmosetingimustes mehhaanilist pöördemomenti tekitava kolme elektromagnettõukuri tootmiseks on tarvis automatiseeritud ja vajadustele vastavalt kohaldatavat mähisekerijat. [5]

Seega käesoleva töö väljundiks on automatiseeritud seade, mis võimaldab kerida soovitud kuju ja keerdude arvuga mähiseid ning lihtsustab nende kerimise - või hankimise protsessi. Kerimisseade peaks garanteerima käsitsi keritud mähistega võrreldes parema kvaliteedi.

3.2 Kerija joonis



Joonis 4: Kerimisseade

Traadi suunaja samm-mootori telg – keermelatt mida liigutab traati suunav samm-mootor.

Valgusdiodi ja fototransistoriga andur – kui traadi suunaja on algpositsioonis, siis andur annab mikroprotsessorile signaali.

Ülekandesüsteem – ülekanne traadi nihke vähendamiseks.

Traadi suunaja liugur – liugur, millel liigub traadi suunaja alus.

Traadi suunaja – traadi suunaja ülesandeks on traadikeerud võimalikult tihedalt üksteise kõrvale kerida.

Pooli vormi keriva samm-mootori telg – telg, mille ümber samm-mootor pooli vormi kerib.

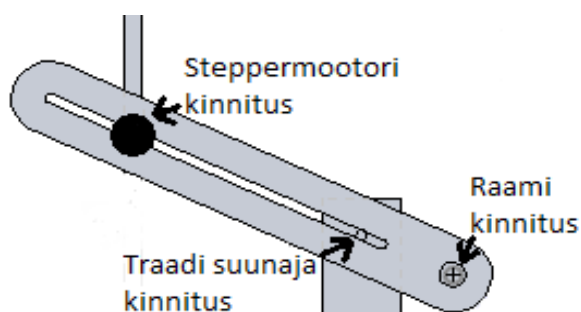
Pooli vorm – vahetatav alus, millele elektromagnettõukurid keritakse.

3.3 Kerimisseadme üldine kirjeldus

Kerimisseadmel on kaks põhilist süsteemi: traadi kerimise süsteem ning traadi suunamise süsteem.

Traadi kerimise süsteem koosneb raami külge kinnitatud pooli vormist ning seda kerivast samm-mootorist. Mikrokontrolleriga juhitud mootor pöörab vormi, mis omakorda veab kaasa traadi, kerides traadi keerdudesse.

Traadi suunamise süsteemis on samuti kasutusel samm-mootor. See mootor liigutab traadi suunajat iga uue keeru jaoks traadi läbimõõdu võrra edasi. Keerdude kihi täitumisel alustab traati suunav mootor liikumist vastassuunas. Sellise edasi-tagasi liikumisega on võimalik saavutada keerdude maksimaalne tihedus, mis on oluline kõrge kvaliteediga elektromagnetite tootmiseks. Traadi suunamisel on kasutusel samm-mootor L92121-P2, millel on fikseeritud minimaalne samm 0.0508 millimeetrit. 0,19 millimeetrise läbimõõduga traadi suunamisel suurema täpsuse saavutamiseks on seadmel ülekandesüsteem. Ülekandesüsteem on kujutatud joonisel 5 ning see koosneb latist, mille üks ots on fikseeritud raami külge ning teine ots on ühendatud samm-mootoriga. Selle lati keskele on kinnitatud traadi suunaja. Samm-mootori liigutamisel pöörab latt end laagril raamile kinnitumise punktis. Selle liikumisega liigutatakse ka traadi suunajat. Vastavalt kauguste suhtele lati otspunktist traadisuunaja kinnituseni on võimalik suunaja sammu pikkust vähendada mitmeid kordi.



Joonis 5: Traadi suunamise ülekandesüsteem

Traadi suunamise süsteemi kuulub ka asendiandur, mis kerimisprotsessi algul aitab fikseerida korrektse algpositsiooni.

Nõuetele vastavaks traadikeerdude suunamiseks on tarvis traadi suunajat liigutada ajaga, mis kulub ühe kihi traadikeerdude kerimiseks, mähise paksuse võrra edasi. See on lahendatud tarkvaraliselt arvestades samm-mootori poolt ühe sammuga keermelati edasi liikukumise pikkust Δl , traadisuunaja ühenduskoha ja raami kinnituse vahelise kauguse suhet raami kinnituse ja samm-mootori kinnituskoha vahelisessekaugusesse s ning mähise paksust d . Mähise ühe kihi kerimiseks vajalik samm-mootori sammude arv n avaldub valemiga 13.

$$n = \frac{\Delta l \cdot s}{d} \quad (13)$$

4. Tehniline lahendus

4.1 Kere ja konstruktsioon

Disainimisel ja ehitamisel lähtuti kättesaadavatest materjalidest, mis olid juba Tartu Ülikooli füüsikahoone laborites olemas. Kerimisseadme raamina sai kasutusele võetud olemasolev pöördpink, mille küljes oli olemas juba alust ringi ajav samm-mootor. Pöördpingist kerimisseadme ehitamiseks oli tarvis asendada pöördpingil ringi käiv alus elektromagnettõukuri vormiga ning lisada traadi suunamise süsteem. Peamine kuluartikkel oli seega plast – polükarbonaat – ja alumiinium. Ülekandesüsteemi liikuvate osade ühenduste juures sai kasutatud kuullaagreid ning sahtliliigureid. Jäikade ühenduste puhul oli kasutusel M3 või M4 keermega metallikruvid ning fikseerimiseks mutrid või sisemised keermed. Detailide loomiseks oli kasutusel põhiliselt rauasaag. Konstruktsiooni valmistamiseks kulus hinnanguliselt 1/3 kogu töö mahust.

Kogu konstruktsiooni keerukaimateks ja täpsust nõudvamateks osaks oli elektromagnettõukuri vormi pöördliikumise stabiliseerimine võimalikult täpselt traadikeerdude suunamiseks. Vormi ringi ajamiseks oli samm-mootor ühendatud hammaslindi abil pöörleva alusega, mis omakorda oli vahedetailide kaudu ühendatud vormiga. Kvaliteetsete mähiste tagamiseks oli tarvis tagada väiksem kui 0,19 mm-ne kõrvalekalle vormi pöörlemisetasandist.

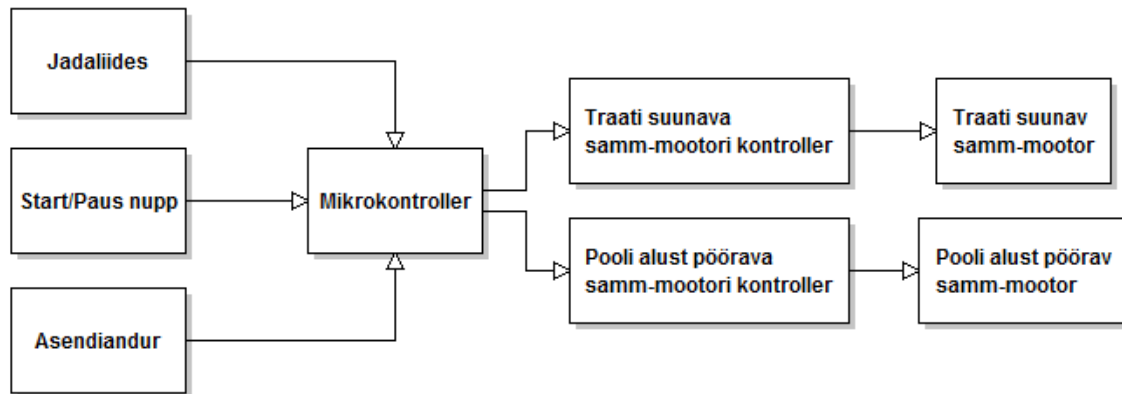
4.2 Elektroonika

Mähisekerija juhtimiseks on kasutusel STM32F4-Discovery komplekt, millel kasutatava ARM Cortex-M4F mikroprotsessori sisend-väljundportide kaudu toimub Allegro A3983 samm-mootori draiverite juhtimine. Lisaks on sellega ühendatud jadaport, mis on võimalik kasutusele võtta näiteks kerimisseadmele elektromagnettõukuri parameetrite ette andmiseks ning OPB960T51 valgustioodi ja fototransistoriga andur, mille poolt tekitatava välise katkestuse abil on võimalik määrata juhtme suunamiseks mõeldud samm-mootori algseis. Kerimisseadme töö alustamiseks ning peatamiseks on seadistatud Discovery komplekti kasutajanupp.

4.2.1 ARM Cortex-M4F tuumaga mikrokontroller STM32F407VGT6

ARM Cortex-M4F kuulub manussüsteemide jaoks mõeldud ARM protsessorite uusimasse generatsiooni. STM32F407xx sisaldab suurt valikut sisend-väljundporte, mille kaudu on

võimalik nii edastada juhtsignaale, kui ka võtta vastu väliseid katkestusi. Lisaks on võimalik kasutada ka lisafunktsioone: kahte 12-bitist digitaal-analoogmuundurit, kahte PWM taimerit ja UART liidest jadapordiga suhtlemiseks. Antud funktsioonid on võimalised iseseisvalt ülesandeid täitma ning nende kasutamiseks on võimalik programmeerida vastavad katkestused. Seadme juhtimist lihtsustab oluliselt ka 1MB suurune väikmälu, mis võimaldab juhtprogrammi koodi protsessori mälu mahutada. [7]



Joonis 6: Samm-mootorite juhtimisskeem

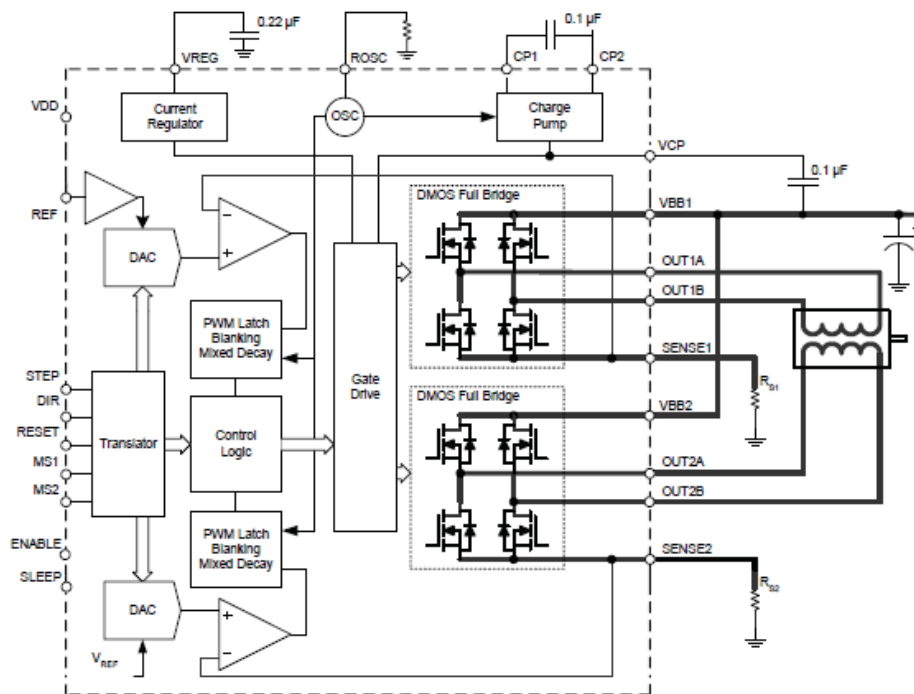
Mikrokontrolleriga ühendati läbi Discovery komplekti väljundjalgade jadaliidese draiver, kaks samm-mootori draiverit ning toite sõlmed. Elektroonikaplaadil on veel kaks pingeregulaatorit: samm-mootorite draiverite loogika ja Discovery komplekti toitepinge 3,3V ja valgusdiodiga anduri toitepinge 12V. Lisaks on ka signaalide häirete maha surumiseks erinevad kondensaatorid. Radade laiused trükkplaadil on enamasti 10 tuhandikku tolli, samm-mootori draiverite läheduses on radade laius mõnevõrra kitsam draiveri kivi jalgade väikeste vahede tõttu. Kuna väikese pindala kohta oli palju komponente, siis mugavamaks jootmiseks on plaat disainitud kahepoolsena. Tasandite ühenduste aukude läbimõõt oli 0,5 mm, Discovery komplekti ja teiste väliste ühenduskontaktide aukude läbimõõduks oli 0,8 mm. Komponente ning radasid ümbritsev katmata ala on kõik ühine maa. Et kõik komponendid kompaktselt ära mahuksid ja trükkplaat efektiivselt töötaks on see konstrueeritud elektroskeemide CAD programmiga Eagle. Loodud plaadi joonis on leitav käesoleva lõputöö lisast 1. Juhtelektroonika skeem koos Discovery komplekti ühendustega on toodud lisas 2.

Mikroprotsessor on skeemiga ühendatud *Discovery* komplekti väljundjalgade kaudu. Tabelites 1, 2 ja 3 on ära toodud mikroprotsessori sisend-väljund viikude ühendused samm-mootorite draiveritega, UART liidesega ning valgusdiodiga anduriga.

4.2.2 Samm-mootorid ning nende draiverid

Samm-mootorit juhitakse voluimpulssidega, millele vastavalt rootor end pöörab. Pöördliikumine toimub astmeliselt, seega saab impulsside arvule vastavalt teha täpselt soovitud arv samme. Otse kontrolleri külge ühendades jääb selle poolt pakutavast volust mootori liigutamiseks väheks. Internetist on aga võimalik leida mitmesuguseid erinevaid mikroskeeme, mis suudavad mikrokontrolleri poolt ette antud signaalide põhjal mootorit liigutada.

Otsustasin võtta kasutusele Allegro A3983 draiveri, mis on terviklik mikrosamm-mootori



Joonis 7: Samm-mootorite draiveri Allegro A3983 plokk-skeem [9]

kontrolleri koos kasutuse lihtsustamiseks sisse-ehitatud translaatoriga. Mootori liigutamiseks vajalik pinge on võimalik anda ette VBB jalgadel. Seades sammu resolutsiooni määravate 2 sisendviigu väärtusi nulli ja ühe vahel on võimalik määrata samm-mootorile täis-, pool-, veerand- või kaheksandiku täissammu võrra edasi liikumise seade. Step sisendi muutumisel

madalast olekust kõrgesse toimub vastavalt ette antud sammu pikkusele mootori liigutamine. Draiveri plokk-skeem on toodud joonisel 7.

ARM Cortex-M4F	Allegro A3983	AFN
PE15	(1) ENABLE	
PE13	(1) MS1	
PE11	(1) MS2	
PE10	(1) DIR	
PA1	(1) STEP	TIM5_CH2
PE7	(1) SLEEP	
PE9	(1) RESET	
PA5	(1)REF	DAC2_OUT
PA2	(2) STEP	TIM2_CH3
PE2	(2) SLEEP	
PE5	(2) ENABLE	
PE3	(2) MS1	
PE1	(2) MS2	
PE12	(2) DIR	
PE0	(2) RESET	
PA4	(2)REF	DAC1_OUT

Tabel 1: Ühendused ning kasutatavad funktsioonid (AFN) mikroprotsessori väljundite ning samm-mootori sisendite vahel

Võimaldamaks samm-mootorite üksteisest sõltumatut liikumist on mõlema samm-mootori draiverid ühendatud mikrokontrolleri erinevate väljundite külge. Mikrokontrolleri ja samm-mootorite draiverite ühendused on toodud tabelis 1. Sammu signaali jaoks on kasutusel 2 PWM signaaliga taimerit port A väljunditel 1 ja 2, mis võimaldavad kergelt seada intervalli mootorite MS1 ja MS2 sisendiga seadistatud sammu pikkuse võrra edasi liigutamiseks. Kerimisseadme korrektseks tööks on võimalik PWM signaalide perioodid seada täpselt selliselt, et sama ajaga mil üks samm-mootor kerib täisringi traati, siigutab teine traadi suunajat traadi paksuse võrra edasi.

Samm-mootorite draiverite etalonpinge etteandmiseks on kasutusel kaks mikroprotsessori digitaal-analoog väljundit, mille abil on võimalik määrata draiverite juhtimiseks sobilik pinge vahemikus 0-4 V. Etalonpinge abil on võimalik reguleerida samm-mootorile rakendatavat voolutugevust. Valem 14 näitab samm-mootori maksimaalse voolutugevuse $I_{tripMAX}$ suhet etalonpinge U_{REF} ja voolutugevuse tajumise takisti takistuse R_S väärtuse suhet.

$$I_{tripMAX} = \frac{U_{REF}}{8 \cdot R_s} \quad (14)$$

Ülejäänud samm-mootorite juhtimiseks vajalikud signaalid antakse ette mikroprotsessori pordi E erinevatest väljunditest. Enamus neist signaalidest püsivad tavajuhul kogu seadme töö jooksul ühes asendis, vaid traati suunava samm-mootori juhtkivil on keerdude kihi täitumise korral tarvis DIR jalal bitiseisundit muuta. [8][9]

4.2.3 Ühendus arvutiga üle UART liidese

Jadaliidest kasutades on võimalik kerimisseadmele anda ette näiteks tööparameetreid:

- kerimiskiirus
- keerdude arv
- keerdude tihedus (vastavalt traadi läbimõõdule)
- Elektromagnettõukuri paksus, ehk traadi suunaja liikumise amplituud

Mikrokontrolleri väljundsignaali nivoode sobitamiseks RS-232 liidese signaalinivoodega, on mikrokontrolleri ning jadapordi vahel ADM3202 transiiver, mis on kahe kanaliga RS-232 liidese nivoomuundi. Andmetevahetuse võimaldamiseks on vajalik seadistada transiiveri T1_{IN} ja R1_{OUT} jalgadega ühendatud mikroprotsessori USART1_TX ja USART1_RX lisafunktsiooniga väljundviigud nagu näidatud tabelis 2. Andmevahetuseks on võimalik kasutada Windows HyperTerminal-i, Labview-d, Termite-i, Putty-t või mõnd muud taolist programmi. Seadistamisel on tarvis panna paika järgmised parameetrid: andmevahetuskiirus, andmebittide arv, stopp bittide arv ja paarsus. [8][10]

ARM STM32F407	ADM3202	AFN
PA9	T1 _{IN}	USART1_TX
PA10	R1 _{OUT}	USART1_RX

Tabel 2: Ühendused ning kasutatavad lisafunktsioonid (AFN) jadapordi kontrolleri ning mikroprotsessori vahel

Ajapuuduse tõttu ei ole lõputöö esitamise ajaks jadaliidese kasutusvõimalust veel masinale lisatud, kuid see saab kindlasti lisatud hiljem, kui seadet tihedamalt kasutama hakatakse.

4.2.4 Andur OPB960T51

Valgusdiodi ja fototranstoriga andur võimaldab lihtsalt tekitada mikrokontrolleris katkestuse. Traadi suunamise süsteemi külge kinnitatud plaadi sattumisel anduri sensori ja kiirgaja vahele, edastatakse mikrokontrolleri välise katkestuse funktsiooniga sisendisse signaal. Anduri poolt tekitatud katkestuse saabumisel võib alustada kerimisprotseduuriga. Mikrokontrolleri ja anduri vaheline ühendus on toodud tabelis 3. [7][11]

ARM STM32F407	OPB960-T51	AFN
PE14	OUT	EXTI

Tabel 3: Anduri ühendus mikroprotsessori porti

12 V toitepinge saamiseks on pingesallika ja anduri vahel pingeregulaator. Et 12 V pingest saada mikrokontrollerile katkestuse tekitamiseks sobilik 3,3 V pinge on anduri ning mikrokontrolleri vahel veel ka pingejagur.

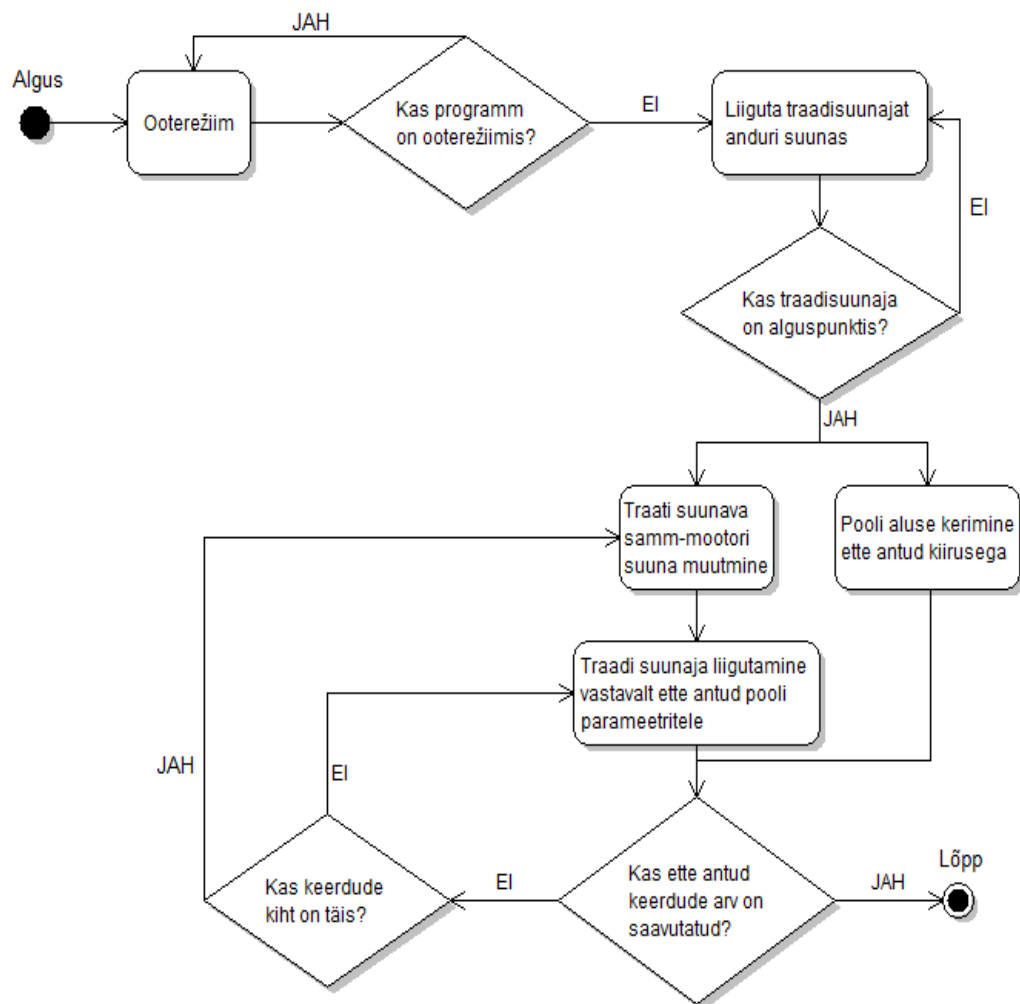
4.3 Programmi kood

Mikrokontrolleri programmeerimine teostati C-keeles kasutades IAR Embedded Workbench IDE arenduskeskkonda.

Programmi tööpõhimõtet kirjeldav plokkskeem on kujutatud joonisel 8.

4.3.1 Kerimise alustamine

Programmi töö alguses on seade ooteseisundis, kuni Discovery komplekti sinist värvi kasutaja nupu vajutamiseni. Nupuvajutuse poolt tekitatud katkestus, seab programmi aktiivsesse olekusse. Selle peale alustab mikrokontroller traati suunavale samm-mootorile liikumiseks pingeimpulsside saatmist. Samal ajal on samm-mootori suunda määraval mikrokontrolleri väljundviik asendianduri suunas liikumise asendis. Selline seis kestab, kuni samm-mootor jõuab asendiandurile piisavalt lähedale, et tekiks katkestus, millega asendiandur kinnitab traadi suunaja õiget alguspunkti.



Joonis 8: Programmi plokskeem

4.3.2 Traadi kerimine

Kui asendiandurilt on saadud kinnitus, et traadi suunaja on õiges positsioonis, võib alustada traadikeerdude kerimist. Mikrokontroller muudab selle peale traati suunava samm-mootori suuna ning aeglustab liikumisimpulside saatmise vastavaks traadi suunamiseks vajalikule kiirusele. Samal ajal alustab Mikrokontroller ka pooli alust pöörava samm-mootori liigutamist vastavalt ette antud kiirusele. Traati suunava samm-mootori liikumiskiiruse määramisel on arvestatud pooli aluse kerimise kiirust, traadi läbimõõtu ning mähise paksust. Sama ajaga, mis kulub ühel mähise paksuse jagu keerdude kerimiseks, liigutatakse traadi suunajat sama vahemaa võrra edasi.

Kui pooli vormile on keritud täis kiht kerde, muudab mikrokontroller taas traadi suunaja liikumise suunda.

4.3.3 Traadi kerimise peatamine

Kuna kerimisseadmel pole automaatset liimi lisamise funktsiooni, on vajalik kerimisprotsess vahepeal peatada. Selle võimaldamiseks on sama Start/Stop nupp, millega programmi algul ooterežiimist väljuda saab. Nupuvajutus kerimisprotsessi keskel seab programmi uuesti ootele, samas jättes meelde kui kaugele seade kerimisega jõudnud oli. Uus nupuvajutus jätkab kerimisprotsessi täpselt sealt, kus see eelnevalt pooleli oli jäänud. Määratud keerdude arvu saavutamisel lõpetatakse samm-mootoritele liikumisimpulsside saatmine ning kerimisprotsess programmi töö.

5. Testimine

5.1 Elektriskeemi ja loogika testimine

Elektriskeemi testimisel tuleb veenduda, et signaalid liiguvad komponentide vahel vastavalt ootustele. Signaalidel kontrollitakse järgmiseid väärtusi: pingeniivoo, voolutugevus, signaalide kuju.

Signaalide testimisel on võimalik kasutada erinevaid riistvaralisi seadmeid: loogikaanalüsaatorit, ostsilloskoopi, multimeetrit ning signaaligeneraatorit.

Peamised signaalid, nende kuju ning pingeniivoo on toodud tabelis 4.

Signaal	kuju	pingeniivoo
Samm-mootorite draiveritel		
ENABLE	kõrge/madal	Lubatud olekus 0V
MS1	kõrge/madal	~3,3 V / 0 V
MS2	kõrge/madal	~3,3 V / 0 V
DIR	kõrge/madal	~3,3 V / 0 V
STEP	PWM	0 – 3,3 V
SLEEP	kõrge/madal	~3,3 V / 0 V
RESET	kõrge/madal	~2,4 V / 0 V
REF	pingeniivoo	0,8 V
Samm-mootorite impulsid	pingeimpulsid	0 V – VBB
VBB	pinveniivoo	~12 V
VDD	pingeniivoo	~3,3 V / 0 V
CP1	pingeimpulsid	2 V – 10 V
CP2	pingeimpulsid	12 V – 20 V
VCP	pingeniivoo	18 V
UART liidesel		
T1 _{IN}	pingeimpulsid	~3,3 V / 0 V
R1 _{OUT}	pingeimpulsid	~3,3 V / 0 V
C1+	PWM	3,3 V – 6,3 V
V+	pingeniivoo	6,4 V
C1-	PWM	0,2 V – 3,2 V
C2+	PWM	0,2 V – 6,2 V
C2-	PWM	-6 V – 0 V
V-	pingeniivoo	~-6,2 V
Vcc	pingeniivoo	3,3 V
Asendiandur		
IN	pingeniivoo	12V
OUT	kõrge/madal	> 2V / 0V

Tabel 4: Peamiste signaalide omadused

5.2 Keritud elektromagnettõukurite testimine

Keritud elektromagnettõukurite kvaliteedi hindamiseks on tarvis veenduda nende parameetrite võimalikult täpses sobivuses arvutuslike füüsiliste parameetritega, mis on toodud tabelis 5.

Elektromagnetite testprotseduuride käigus määratakse:

- **lühisvoolukeerdude olemasolu** – Veendutakse, et traati kattev isoleerkiht pole kannatada saanudja keerdude koguarv (N) pole muutunud
- **elektromagneti mõõtmed** – Elektromagneti poolt kaetav pindala (A), keskmine ümbermõõt (C) ning traadi läbilõike pindala (a_w)
- **takistuse mõõtmine** – Toitepingest oodatava väärtusega voolutugevuse (I) saavutamiseks peaks reaalse takistuse erinevus arvutuslikust takistusest ($R = NC\sigma T/a_w$) olema minimaalne, kus σ on vase eritakistus ning T on töötemperatuur

Välised mõõdud (mm)	91 x 69
Pinge (V)	4
Keerdude arv	400
Takistus Ω	56,7
Mass (g)	25
Traadi läbimõõt (mm)	0,19
Tarbitav võimsus (W)	0,29
Magnetiline moment ($A \cdot m^2$)	0,11

Tabel 5: Elektromagnettõukuri arvutuslikud parameetrid

Lisaks sobivate poolide leidmisele, on antud testide läbiviimise tulemusena võimalik hinnata elektromagnetite kerimiseks kasutatud automatiseeritud kerimismasina töö kvaliteeti ning leida parim meetod poolide parameetrite lähendamiseks arvutuslikele parameetritele.

Kokkuvõte

Bakalaureusetöös kirjeldati asendi määramise ja kontrollimise süsteemi eesmärki ESTCube-1 satelliidiprojektis ning elektromagnettõukurite rolli selle täitmisel. Elektromagnettõukurite tööpõhimõtte on seletamiseks on kirjeldatud keerduesse keritud elektrijuhi poolt tekitatava magnetilise momendi olemust ning selle sõltuvust juhi kujust, mõõtmetest, ning seda läbiva voolu tugevusest.

Tulemus ülesandele, kavandada ning arendada automatiseeritud kerimisseade ESTCube-1 tüüpi kuupsatelliitidele elektromagnettõukurite valmistamiseks, oli üsna edukas. Pöördliikumisel tekkinud mehhaaniline ebastabiilsus eemaldatakse tulevaste täiendustega. Kuigi jadaliidese tugi ei valminud tähtjaks, töötavad seadme põhifunktsioonid väga hästi. Peale mehhaanika stabiliseerimist on võimalik alustada seadmega elektromagnettõukurite kerimist ning nende testimist arvutuslike parameetrite vastu.

Käesolevas lõputöös on kirjeldatud antud seadme tehniline dokumentatsioon ning toodud välja seadme ja selle poolt keritud elektromagnettõukurite kvaliteedi testimiseks tarvilikud protseduurid.

Kasutatud kirjandus

1. CubeSat mission statement - <http://cubesat.calpoly.edu/index.php/about-us/mission-statement> .
2. ESTCube Team. ESTCube-1 Space System and Mission Description - <http://www.estcube.eu/estcube-1/alamsuesteemid/adcs>
3. Janhunen, P., P.K. Toivanen, J. Polkko, S. Merikallio, P. Salminen, E. Haeggström, H. Seppänen, R. Kurppa, J. Ukkonen, S. Kiprich, G. Thornell, H. Kratz, L. Richter, O. Krömer, R. Rosta, M. Noorma, J. Envall, S. Lätt, G. Mengali, A.A. Quarta, H. Koivisto, O. Tarvainen, T. Kalvas, J. Kauppinen, A. Nuottajärvi and A. Obraztsov, [Electric solar wind sail: Towards test missions \(Invited article\)](#), Rev. Sci. Instrum., 81, 111301, 2010 - <http://www.electric-sailing.fi/paper9.pdf>
4. Janhunen, P., [The electric sail - a new propulsion method which may enable fast missions to the outer solar system](#), J. British Interpl. Soc., 61, 8, 322-325, 2008 - <http://electric-sailing.fi/Aosta2007.pdf>
5. Duffin, W.J. Electricity and Magnetism, 4th Edition, McGRAW-HILL Book Company, 1990.
6. Ali Aydinlioglu, “Design development and production of electromagnetic coils for attitude control of a pico satellite,” http://www.raumfahrt.fh-aachen.de/compass-1/download/Diploma_Thesis_Ali_Aydinlioglu.pdf .
7. STM32F407XX Datasheet [PDF] [Alla laaditud: 13.02 2012] http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/DATASHEET/DM00037051.pdf
8. RM0090 Reference manual [PDF] [Alla laaditud: 07.05 2012] http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/REFERENCE_MANUAL/DM00031020.pdf

9. Allegro Microsystems A3983 Datasheet [PDF] [Alla laaditud: 19.12 2011]
<http://www.allegromicro.com/Products/Motor-Driver-And-Interface-ICs/Bipolar-Stepper-Motor-Drivers/~media/Files/Datasheets/A3983-Datasheet.ashx>
10. ADM3202 Datasheet [PDF] [Alla laaditud: 13.02 2012]
<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/48731/AD/ADM3202.html>
11. OPB960T51 Datasheet [PDF] [Alla laaditud: 08.03 2012]
http://www.optekinc.com/datasheets/OPB960-990_SERIES.PDF

Abstract

Developing and testing the coil winder for ESTCube-1

Tõnis Uiboupin

This bachelor thesis described the purpose of Attitude Determination and Control System and the role of electromagnetic coils to fulfill this. For explaining the principle of electromagnetic coils, the essential point of magnetic moment, and its dependence from the shape, dimensions and current, produced by current carrying conductor wound into loops, is described.

The task of design and development of coil winder was carried out quite successfully. Remaining mechanical instability problems will be handled in following improvement tasks. The serial interface support could not be completed in time, but considering the main functions, the winder is operating very well. After stabilizing the mechanical parts of the coil winder, it will be possible to produce coils and test their parameters against calculated physical parameters.

The document contains technical documentation for the device and brings out the necessary testing procedures to ensure the quality of the machine and coils wound by it.

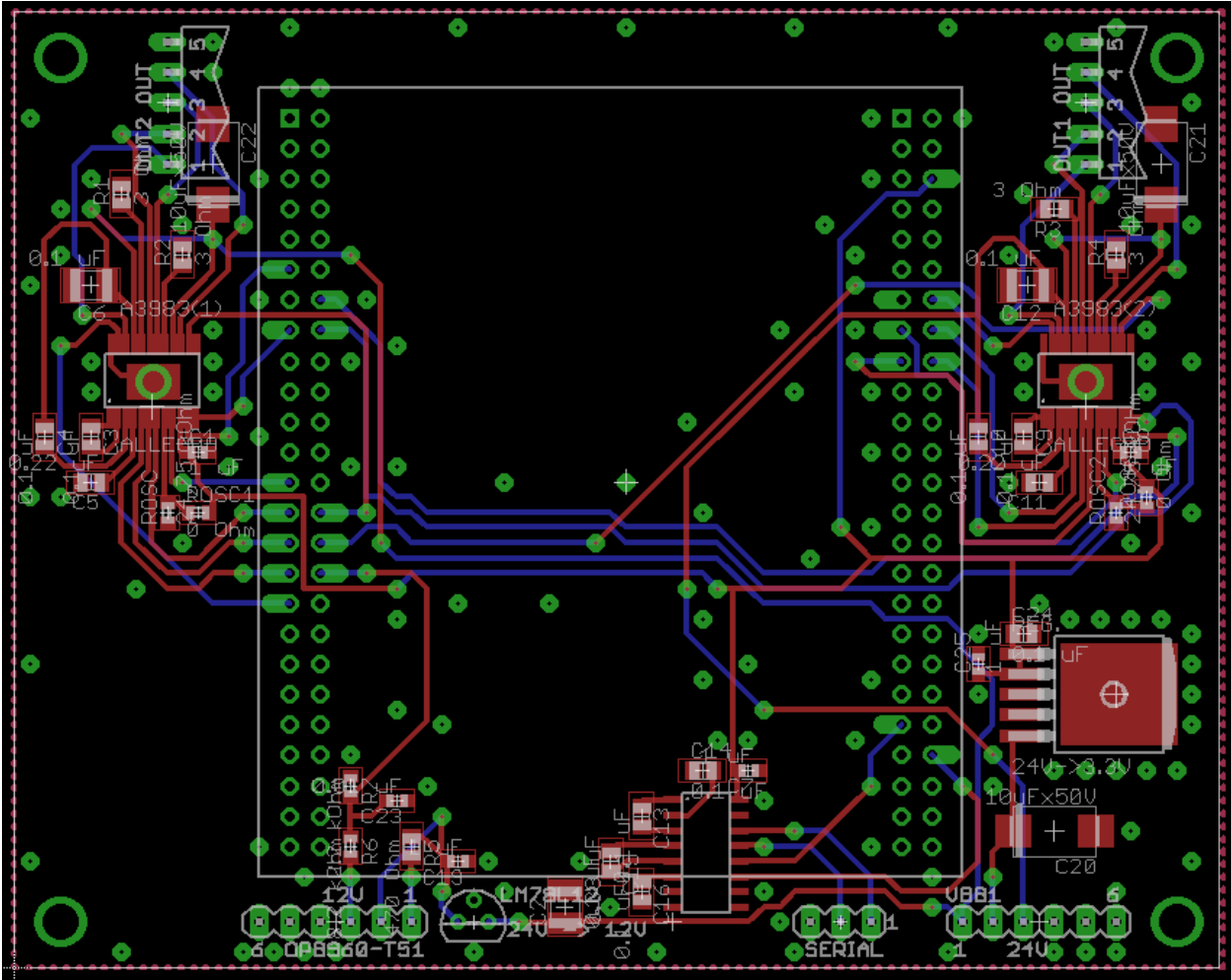
Kasutatud joonised

Joonis 1: Lorentzi jõud juhhis [6].....	7
Joonis 2: Lorentzi jõud nelinurkse mähise külgedel [6].....	8
Joonis 3: Parema käe reegel [6].....	9
Joonis 4: Kerimisseade.....	11
Joonis 5: Traadi suunamise ülekandesüsteem.....	12
Joonis 6: Samm-mootorite juhtimisskeem.....	15
Joonis 7: Samm-mootorite draiveri Allegro A3983 plokk-skeem [9].....	16
Joonis 8: Programmi plokk-skeem.....	20

Kasutatud tabelid

Tabel 1: Ühendused ning kasutatavad funktsioonid (AFN) mikroprotsessori väljundite ning samm-mootori sisendite vahel.....	17
Tabel 2: Ühendused ning kasutatavad lisafunktsioonid (AFN) jadapordi kontrolleri ning mikroprotsessori vahel.....	18
Tabel 3: Anduri ühendus mikroprotsessori porti.....	19
Tabel 4: Peamiste signaalide omadused.....	22
Tabel 5: Elektromagnettõukuri arvutuslikud parameetrid.....	23

Lisa 1. Juhtelektroonika plaat



Lisa 2. Juhtelektroonika skeem

