

Tartu Ülikool
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Tehnoloogiainstituut

Mauno Tamm

**Kommertsiaalse asendi määramise ja reguleerimise alamsüsteemi
prototüübi projekteerimine kuupsatelliitidele**

Magistritöö (30 EAP)

Arvutitehnika eriala

Juhendajad:

Assistent Aivo Reinart

Spetsialist Jaanus Kalde

Vanemteadur Heiki Kasemägi

Tartu 2017

Resümee/Abstract

Kommertsiaalse asendi määramise ja reguleerimise alamsüsteemi prototüübi projekteerimine kuupsatelliitidele

Kuupsatelliidi kontseptsiooni populariseerimine on andnud tõuke eraettevõtete tekkeks, kes valmistavad ja müüvad nanosatelliitide komponente või süsteemplaate. Ka Eesti esimesest tudengisatelliidi projektist ESTCube-1 on välja kasvanud eestlaste eraettevõtte Crystalspace OÜ, kelle jaoks käesoleva lõputöö raames valmiv asendi määramise ja juhtimise alamsüsteemi (ADCS) prototüüp projekteeritakse. ADCS olemasolu on kosmosemissioonide puhul hädavajalik tehiskaaslase asendi määramiseks ning juhtimiseks mõne taustsüsteemi suhtes. Lõputöö raames projekteeritakse alamsüsteem, mis on valmistatud töötama Maa lähedasel orbiidil ning vastab *CubeSat* standardi poolt sätestatud nõuetele.

Lõputöös antakse ülevaade ESTCube-1 ning erinevatest kommertsiaalsetest asendi määramise ja juhtimise alamsüsteemidest. Kogutud info põhjal luuakse Crystalspace OÜ ADCS prototüübi jaoks sobilik kontseptsioon. Defineeritakse alamsüsteemi mehaanilised-, riistvaralised- ja funktsionaalsed nõuded, vastavalt millele valitakse ADCS jaoks vajalikud komponendid, joonestatakse elektriskeem ning projekteeritakse ja valmistatakse füüsiline trükkplaat.

Võtmesõnad: ADCS, ESTCube-1, kuupsatelliit, Crystalspace, kommertsilahendus, alamsüsteem, asendi määramine ja reguleerimine, komponendi valik, trükkplaat, kosmosetehnoloogia

CERCS: T120, T170, T171, T320, T455

Attitude Determination and Control System Prototype Design for CubeSats

The increasing popularity in CubeSat concept has given an impetus for creating private companies who produce and sell commercial components or subsystems for nanosatellites. Also Crystalspace OÜ was grown from the Estonians first satellite project ESTCube-1 mission to whom the present attitude determination and control system (ADCS) will be designed. ADCS is essential in space missions for controlling the spacecraft's orientation with respect to an inertial frame of reference. The ADCS which will be designed and described in this thesis is meant to work in a low Earth orbit and has to fulfill the requirements stated by the CubeSat standard.

In this thesis an overview about ESTCube-1 and commercial attitude determination and control systems will be given. From the information about different ADCS solutions the ADCS concept for Crystalspace OÜ will be created. The author of this thesis will define the mechanical-, hardware- and functional requirements for the ADCS prototype. According to the defined requirements the components will be chosen, an electrical diagram drawn and printed circuit board designed- and manufactured.

Keywords: ADCS, ESTCube-1, CubeSat, Crystalspace, commercial solution, subsystem, attitude determination and control, component evaluation, printed circuit board, Space technology

CERCS: T120, T170, T171, T320, T455

Sisukord

Resümee/Abstract.....	2
Lühendid.....	9
1. Sissejuhatus.....	11
2. Ülevaade probleemist.....	12
2.1 Taustakirjeldus.....	12
2.2 Asendi määramise ja juhtimise alamsüsteem	13
2.3 Ülevaade asendi määramise ja juhtimise alamsüsteemidest.....	14
2.3.1 ESTCube-1.....	14
2.3.2 New Space - NSS CubeSat ACS.....	15
2.3.3 Maryland Aerospace - MAI-400 ADCS	16
2.3.4 Cube Space Cube ADCS	18
2.3.5 Clyde Space ADCS.....	19
3. Nõuded ADCS alamsüsteemile.....	22
3.1 Nõuded mehaanikale	22
3.2 Nõuded riistvarale.....	23
3.3 Nõuded funktsionaalsusele	26
3.3.1 Andurid.....	26
<input type="checkbox"/> Päikeseandur	26
<input type="checkbox"/> Tähtede jälgimise seade (Star Tracker).....	27
<input type="checkbox"/> Magnetomeeter	28
<input type="checkbox"/> GYROSKOOP.....	28
<input type="checkbox"/> Kiirendusanduri.....	29
<input type="checkbox"/> Inertsiaalandur.....	30
3.3.2 Aktuaatorid.....	31
<input type="checkbox"/> Elektromagnetpoolid.....	31
<input type="checkbox"/> Hoorattad.....	32

3.3.3	Haldussüsteem.....	33
	□ Mikrokontroller (MCU).....	33
	□ Mäluhaldus (FRAM).....	34
	□ Demultiplekser.....	34
	□ Toitesüsteem.....	35
	□ Kommunikatsiooniliidesed.....	37
4.	Trükkplaadi projekteerimine.....	38
4.1	Elektriskeem.....	38
4.2	Trükkplaadi disain.....	41
5.	Tulemused.....	44
6.	Kokkuvõte.....	45
	Kasutatud allikad.....	46
	LISAD.....	54

Jooniste loetelu

Joonis 1: ESTCube-1 U1 kuupsatelliit	13
Joonis 2: New Space - NSS CubeSat ACS	16
Joonis 3: Maryland Aerospace - MAI-400 ADCS moodul	17
Joonis 4: MAI-400 kontrolleraud	18
Joonis 5: Cube Space Cube ADCS moodul	19
Joonis 6: Clyde Space ADCS emaplaat koos hooratta lahendusega	20
Joonis 7: ADCS trükkplaadi mehaaniline joonis	23
Joonis 8: ADCS riistvara ja ühenduste plokk skeem	25
Joonis 9: ESTCube-1 päikeseanduri riistvaraline mudel	27
Joonis 10: ESTCube-1 elektromagnetpool	32
Joonis 11: ADCS toitesüsteemi selgitav plokk skeem	36
Joonis 12: ADCS PCBA prototüüp Altiumis	42
Joonis 13: ADCS prototüübi trükkplaat	44

Tabelite loetelu

Tabel 1: Kommertsiaalsete ADCS lahenduste riistvaraliste näitajate koondtabel	21
Tabel 2: Magnetomeetri valik projekteeritavale ADCS alamsüsteemile	28
Tabel 3: Güroskoobi valik projekteeritavale ADCS alamsüsteemile.....	29
Tabel 4: Kiirendusanduri valik projekteeritavale ADCS alamsüsteemile.....	29
Tabel 5: IMU andurite valik projekteeritavale ADCS alamsüsteemile.....	30

Lisade loetelu

Tabel A.1: ADCS prototüübi trükkplaadi komponentide loetelu tabel.....	54
Tabel C.1: MCU 1 Mikrokontrolleri sisend- ja väljundviikude tabel	64
Joonis B.1: Kommertsiaalse ADCS prototüübi elektroonikaskeemi pealehekülg.....	56
Joonis B.2: Elektromagnetpooli liides	57
Joonis B.3: ADCS MCU 1	58
Joonis B.4: MCU 1 IMU	59
Joonis B.5: ADCS MCU 2	60
Joonis B.6: MCU 2 IMU	61
Joonis B.7: ADCS väline magnetomeeter	62
Joonis B.8: ADCS päikeseandurite liides	63
Joonis D.1: Projekteeritud ADCS trükkplaadi pealmine vasekiht	68
Joonis D.2: Projekteeritud ADCS trükkplaadi GND vasekiht	68
Joonis D.3: Projekteeritud ADCS trükkplaadi vaheline toiteraja lisa vasekiht.....	69
Joonis D.4: Projekteeritud ADCS trükkplaadi alumine vasekiht	69
Joonis D.5: Projekteeritud ADCS PCBA kolmemõõtmeline mudel pealtvaates	70
Joonis D.6: Projekteeritud ADCS PCBA kolmemõõtmelise mudeli tagumine pool	71

Lühendid

ADCS – *Attitude Determination and Control System* – Asendi määramise ja juhtimise alamsüsteem

EPS – *Electric Power System* – Elektrienergia haldamise alamsüsteem

CDHS – *Command and Data Handling System* – Satelliidi põhiline pardaarvuti

IC – *Inter-Integrated Circuit* – Kahejuhtmeline jadasiin

MEMS – *Micro-Electro-Mechanical System* – Elektromehaaniline mikrosüsteem

GPS – *Global Positioning System* – Üleilmne asukoha määramise süsteem

UART – *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter* – Universaalne asünkroonne vastuvõtja/saatja

PC104 – *Embedded computer standard* – Manussüsteemide omavahelise ühendamise standard

FOV – *Field of View* – Vaateväli

OBC – *On Board Computer* – Pardaarvuti, kontrolleri

RS232 – *Serial communication transmission standard* – Jadaliidese standard

SPI – *Serial Peripheral Interface* – Lisaseadmete jadaliides

CAN – *Controller Area Network* – Andmevahetuse standard

ARM – *Advanced Risc Machine* – Kärbitud käsustikuga arvutiarhitektuur

FPGA – *Field-Programmable Gate Array* – Integraallülitus, mis koosneb programmeeritavatest loogikakomponentidest

LEO – *Low Earth Orbit* – Maa-lähedane orbiit

RS485 – *Serial communications system standard* – Hulkpunkt-sideliinide standard

JTAG – *Joint Test Action Group* – Ühendatud testimisrühm, neljatraadiline kommunikatsiooniprotokoll

FRAM – *Ferroelectric Random Access Memory* – Ferroelektriline muutmälu

PWM – *Pulse Width Modulation* – Pulsilaiusmodulatsioon

MUX – *Multiplexer* – Multiplekser/demultiplekser, kommutaator

ADC – *Analog-to-Digital Converter* – Analoog-digitaalmuundur

IMU – *Inertial Measurement Unit* – Inertsiaalrandur

PSD – *Position Sensitive Device* – Positsioonitundlik seade

PCB – *Printed Circuit Board* – Trükkplaat

MCU – *Microcontroller Unit* – Mikrokontroller

USART – *Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter* – Universaalne sünkroonne/asünkroonne vastuvõtja/saatja

FET – *Field-Effect-Transistor* – Väljatransistor

RTC – *Real Time Clock* – Reaalaja kell

SMD – *Surface - Mount Device* – Pindmontaaži komponent

THT – *Through-Hole-Technology* – Aukmontaaži tehnoloogia

GND – *Ground* – Maaühendus, maapotsiaal

1. Sissejuhatus

2013. aastal 7. mail sai Eestist kosmoseriik, kui Maa-lähedasele orbiidile lennutati tudengisatelliit ESTCube-1. Tegemist on märkimisväärse sündmusega Eesti teadusajaloos ning edukaks osutunud missioon on praeguseks andud tõuke edasisteks ESTCube projektide arendusteks. Kosmos pole eales varem olnud kättesaadavam kui praegusel ajal ja seda suures osas tänu kuupsatelliitide (*CubeSats*) populariseerimisele. *CubeSat* standardi kontseptsiooni loomist alustati üheksakümnendate aastate lõpus kahe ülikooli, *California Polytechnic State University* ja *Stanford University* omavahelises koostöös. Antud standard [1] on loonud soodsad tingimused säästlikumateks- ja sagedamateks kosmoselendudeks, mistõttu on ülikoolid saanud hea võimaluse kaasata üliõpilasi tegelema kosmosetehnoloogiaga. Lisaks on kuupsatelliitide hüppelise kasvuga tekkinud kümneid eraettevõtteid, kes valmistavad ning müüvad nanosatelliitide komponente või süsteemplaate [2].

Antud lõputöö eesmärk on projekteerida kommertsilahenduslik prototüüp satelliidi asendi määramise ja juhtimise alamsüsteemist (ADCS) eraettevõttele Crystalspace OÜ. Alamsüsteemi projekteerimiseks kogutakse infot erinevate kommertsiaalsete lahenduste kohta ning samuti analüüsitakse ESTCube-1 ADCS süsteemi. Kogutud info põhjal luuakse Crystalspace OÜ ADCS prototüübi jaoks sobilik kontseptsioon. Defineeritakse alamsüsteemi mehaanilised-, riistvaralised- ja funktsionaalsed nõuded, vastavalt millele valitakse ADCS jaoks vajalikud komponendid, joonestatakse elektriskeem ning projekteeritakse ja valmistatakse füüsiline trükkplaat.

2. Ülevaade probleemist

Järgnevates alampeatükkides antakse ülevaade kuupsatelliitidest ning nende ADCS alamsüsteemidest. Lisaks tutvustatakse ESTCube-1 kui ka kommertsiaalseid ADCS lahendusi, kus kogutud info saab antud lõputöö raames projekteeritava ADCS lahenduse jaoks olema heaks teeviidak.

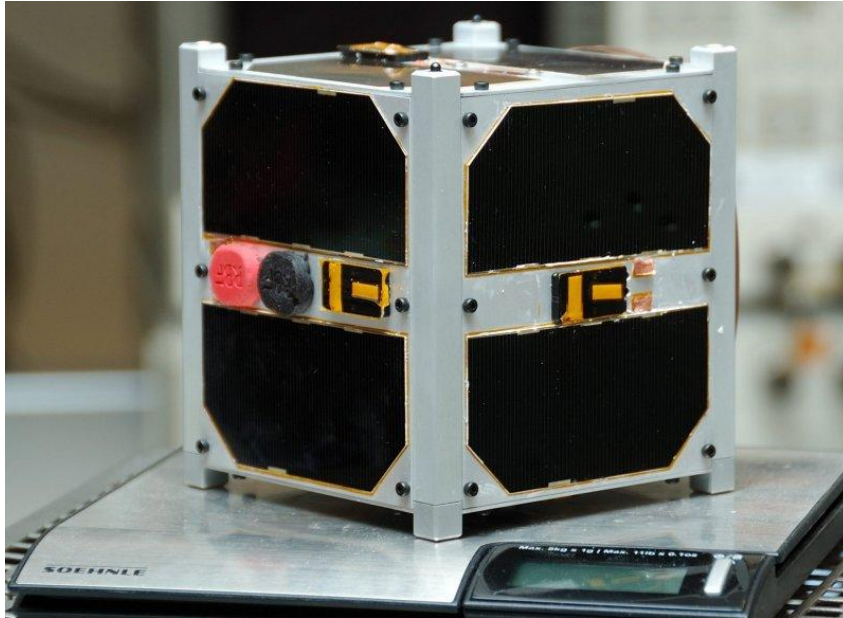
2.1 Taustakirjeldus

Kuupsatelliit (*CubeSat*) on 10 x 10 x 11,35 cm mõõtudega Maa tehiskaaslane, mille kogumass jääb alla 1,33 kg. Antud mõõtudega satelliit liigitub kuupsatelliidi standardi järgi 1U-satelliitide hulka [1]. Kuna kuupsatelliidi standard on loonud soodsad tingimused tehiskaaslaste arenduseks, siis enamik kuupsatelliite ongi valminud haridusasutustes.

Eesti esimene satelliit ESTCube-1 (joonis 1) [3] valmiski suures osas Tartu Ülikooli üliõpilaste poolt. ESTCube-1 peamiseks eesmärgiks oli katsetada päikesepurje (*E-Sail*) kontseptsiooni, mille autor on Pekka Janhunen Soome Meteoroloogia Instituudist (*Finnish Meteorological Institute*).

Päikesepurje koosneb peenikestest (25 μm) alumiiniumtraatidest, mis paiknevad radiaalselt ümber satelliidi [4]. Traadid laetakse kõrge potentsiaalse energiaga (tavalisel 20 kV) ning traadi ümber tekitatakse seeläbi elektriväli. Laetud ning radiaalselt ümber satelliidi paiknevad alumiiniumtraadid moodustavad justkui purje, mis kasutab jõuallikaks päikesetuules sisalduvaid laetud osakesi [5]. Päikesepurje moodustamiseks pannakse satelliit ümber oma telje pöörlema ning tsentrifugaaljõu abil keritakse traadid satelliidi eksperimendimoodulis paiknevalt poolilt maha. Antud operatsiooni juures on oluline roll ADCS alamsüsteemil, sest alumiiniumtraatide väljakerimine toimub kontrollitud pöörlemiskiirusel, milleks on ligikaudu $360^\circ \cdot \text{s}^{-1}$. ESTCube-1 satelliidi pöörlema panemiseks kasutati elektromagnetpoole, sealjuures tuli eksperimendi läbiviimisel hoida satelliidi pöörlev telg paralleelselt Maa pöörleva teljega [6]. ESTCube-1 päikesepurje väljakerimise katset alustati satelliidi pöörlemiskiiruse suurendamisega kuni $250^\circ \cdot \text{s}^{-1}$, mis oli vajalik 3 m traadi väljakerimiseks. Telemeetria kohaselt õnnestusid kõik käsud, kuid vaatamata sellele polnud traadi otsamassi võimalik satelliidi piltidelt tuvastada. Ebaõnnestunud katsete järel otsustati satelliidi pöörlemiskiirust veelgi suurendada, lootuses et tsentrifugaaljõud vabastab mõne kinni jäänud lõa, kuni

saavutati nurkkiiruseks $841^{\circ}\cdot\text{s}^{-1}$. Päikesepurje väljakerimise katse ebaõnnestus ning juurpõhjuste otsimisel jõuti järeldusele, et eksperimendimooduli mootor koos traadi pooliga ei pöörle [7].



Joonis 1: ESTCube-1 U1 kuupsatelliit

2.2 Asendi määramise ja juhtimise alamsüsteem

Asendi määramise ja juhtimise alamsüsteemi eesmärk on määrata kindlaks satelliidi orientatsioon mõne taustsüsteemi suhtes või liikumise kiirus orbiidil. Orientatsiooni määramiseks kasutatakse päikeseandureid, magnetomeetreid, güroskoope või tähe jälgimise seadet. Satelliidi asendi juhtimine on Maa-lähedasel orbiidil (LEO) võimalik elektromagnetpoolide või hoorataste abil. Anduritelt saadud infot võrreldakse erinevate taustsüsteemidega ning reguleeritakse aktuaatorite abil vastavalt soovitud suunas [7].

Tulenevalt kuupsatelliitidele esitatavatest piirangutest mõõtmetele tuleb erilist tähelepanu pöörata satelliidi alamsüsteemide projekteerimisel viimaste energiatarbele. Väiksemate gabariitide tõttu on piiratud ka satelliidi akude mahtuvus [8]. Antud asjaolu ajendab kasutama energiatõhusamaid elektroonikakomponente. Alamsüsteemide energiatõhusus on oluline veel soojusjuhtivuse seisukohalt, kuna Maa-lähedasel orbiidil viibivad tehiskaaslased

vaakumkeskkonnas, kus puudub soojusvahetus konvektsiooni teel – soojus tuleb ära juhtida vahetu ülekandega või kiirgusena. Lisaks energiatõhususe nõuetele peavad elektroonika komponendid taluma radiatsioonilist kiirgust ning kanderaketiga orbiidile lennutades erinevaid mehaanilisi koormuseid [8].

2.3 Ülevaade asendi määramise ja juhtimise alamsüsteemidest

Antud peatükis antakse ülevaade kuupsatelliitide erinevatest asendi määramise ja juhtimise alamsüsteemidest. Uuritakse erinevaid kommertsiaalseid ADCS süsteeme, mida müügiturul pakutakse ning mis on mõeldud töötama Maa-lähedasel orbiidil.

Uurides erinevaid kosmosetehnoloogiat pakkuvaid ettevõtteid, mis valmistavad asendi määramise ning juhtimise kommertsialahendusi, kerkisid esile ettevõtted nagu Clyde Space [9], Maryland Aerospace [10], Cube Space [11] ning New Space [12]. Kommertsiaalsete lahenduste analüüsimisel on raskendavaks asjaoluks see, et detailne informatsioon alamsüsteemide kohta pole vabalt kättesaadav. Lisaks tuleb lahenduste analüüsimisel säilitada kriitiline mõtlemine, sest ükski ettevõtte, kes oma toodangut soovib müüa, ei hakka välja tooma oma toote puuduseid. Vaatamata sellele on asendi määramise ja juhtimise süsteemide üldine info kättesaadav pakutavate toodete andmelehtedest, ettevõtte kodulehekülgedelt ja ettevõtte lahendusi kasutanud projektide ning missioonide publikatsioonides.

2.3.1 ESTCube-1

ESTCube-1 satelliidi asendi halduse ja kontrolli alamsüsteemil puudus oma mikrokontroller ning ADCS oli kogu satelliidi peale laiali jagatud [13]. Vaatamata sellele oli alamsüsteemil oma trükkplaat, millel paiknesid kaks Honeywell HMC5883L magnetomeetrit, neli Invensense ITG-3200 güroskoopi, kaks temperatuuriandurit ning kaheteljeliste päikesesensorite kasutamiseks vajalikud Maxim MAX1230 analoog-digitaalmuundurid. Süsteemi töökindluse suurendamiseks olid eelmainitud komponendid disainitud liigsuses ehk igat andurit oli trükkplaadil üks paar. Päikesesensorid sai valmistatud ESTCube meeskonna poolt ning selleks kasutati üheteljelisi Hamamatsu S3931 optilisi positsiooniandureid [14].

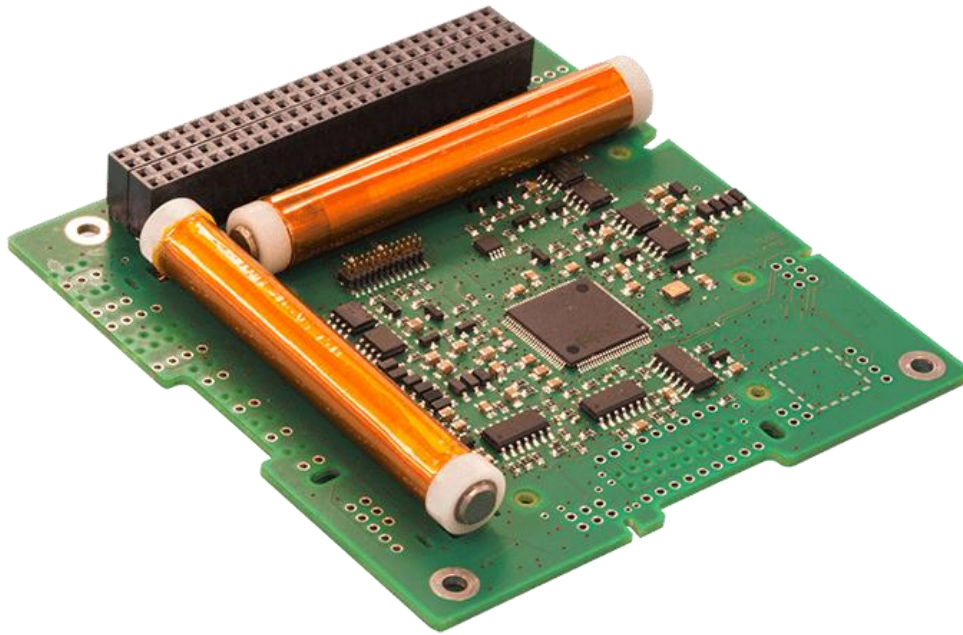
Asendi juhtimiseks kasutati kolme ortogonaalselt paigutatud elektromagnetpooli, mis said toitepinge energia haldamise alamsüsteemi plaadilt (EPS). Elektromagnetpoole juhiti satelliidi põhilise pardaarvuti alamsüsteemi kaudu (CDHS) [14].

ESTCube-1 asendi määramise ja juhtimise alamsüsteem oli võimeline töötama taktsagedusel 10 Hz, mille juures pardaarvuti töötas oma suurimal taktsagedusel 72 MHz [15].

ADCS täitis ESTCube-1 missioonil küll oma eesmärgi, kuid mõningad probleemkohad sellel siiski esinesid. Näiteks polnud võimalik lülitada andureid ükshaaval sisse-välja, et toetada taaskäivitust. Taaskäivitamise vajadus tulenes I²C kommunikatsioonisiinil suhtluse kadumisest mõne anduri ning pardaarvuti vahel. Olukorra taastamiseks tuli taaskäivitus teha tervele ADCS alamsüsteemile, mis aga jättis satelliidi mõneks hetkeks määramatult orbiidile tiirlema [13].

2.3.2 New Space - NSS CubeSat ACS

New Space'i NSS CubeSat ACS (joonis 2) [12] võimaldab määrata satelliidi asukohta orbiidil, absoluutset orientatsiooni ning tehiskaaslase enda orientatsiooni oleku parameetreid. Asendi reguleerimine on võimaldatud elektromagnetpoolide- või hoorataste abil. Asendi määramiseks on integreeritud plaadile 3 päikeseandurit, 1 magnetomeeter, MEMS tehnoloogial põhinev güroskoop ning kaks silindrilist elektromagnetpooli. Lisaks võimaldab väline liides lisada juurde kolm päikeseandurit, z-teljele ühe elektromagnetpooli ning samuti ka asendi reguleerimiseks hoorattad. Peale selle võimaldab süsteem endale külge ühendada GPS vastuvõtja, mis lisab magnetomeetri tööle täpsust. New Space GPS kasutab andmesideks UART protokollit. Ülejäänud plaadi andmeside toimub I²C kommunikatsioonisiini baasil. Toote hind pole avalikustatud. Vastab *CubeSat* standardile ning on PC104 [16] ühilduv [12].



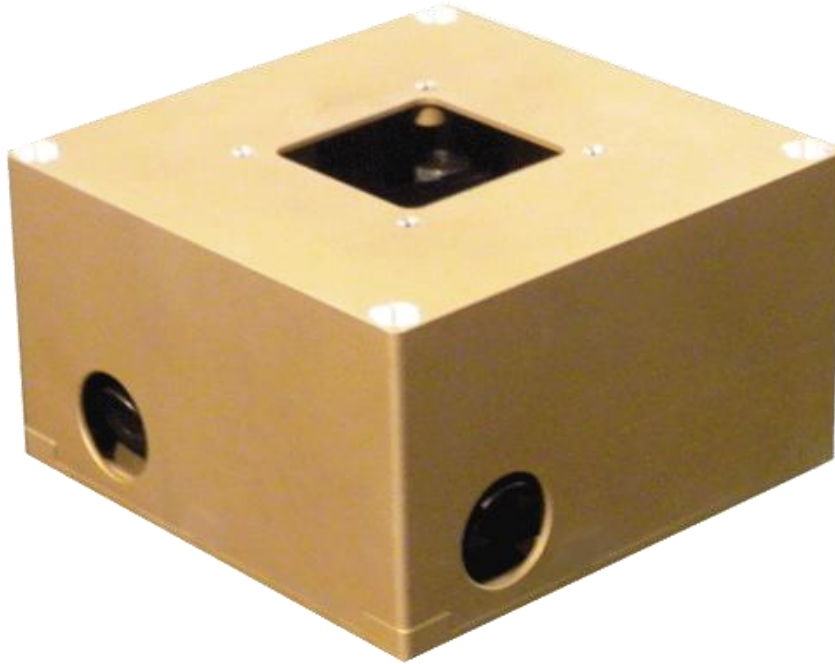
Joonis 2: New Space - NSS CubeSat ACS

2.3.3 Maryland Aerospace - MAI-400 ADCS

Maryland Aerospace MAI-400 ADCS (joonis 3) [17] on mõõtmetelt on 1/2U (10 cm x 10 cm x 5,16 cm) kuupsatelliidi moodul. Moodul sisaldab endas kolme ortogonaalselt paigutatud hooratast (maksimaalne moment pööretel 10 000 rpm on 9,351 mNms), 3-tejelist magnetomeetrit PNI RM3000 mõõtepiirkonnaga 1100 μ T [18], ettevõtte Space Micro MSS päikeseandurit (120° FOV) mõõtemääramatusega 1° diskreetimissagedusel 4 Hz, kahte horisondiandurit, kolme elektromagnetpooli ning pardaarvuti (OBC), mis võimaldab süsteemi hõlpsasti ühendada kuupsatelliitidega. Lisaks on süsteemile võimalik juurde lisada kuni kaks tähtede jälgimise seadet. Seade ei sisalda güroskoope, mis võimaldaksid mõõta satelliidi nurkkiirust. Lisaks kasutab moodul piiratud vaateväljaga päikeseandurit ning puudub võimalus lisada päikeseandureid, mis kataksid satelliidi kõiki külgi. Riistvaralised puudused seejuures teevad süsteemi tarkvara keerulisemaks [18]. Lubatud vaatesuuna määramise täpsus on kuni 0,05°. Satelliidi asendi määramise ja juhtimise moodulit on võimalik osta neljas erinevas konfiguratsioonis [10]:

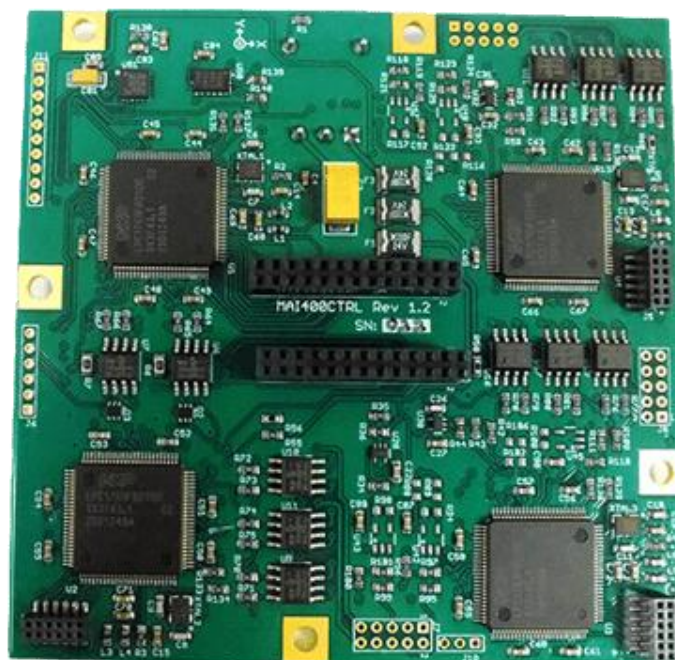
- Pardaarvuti + elektromagnetpoolid.
- Pardaarvuti + elektromagnetpoolid + hoorattad.
- Täielikult integreeritud ADCS lahendus va. tähtede jälgimise seade.
- Täielikult integreeritud ADCS seade koos tähtede jälgimise seadmega.

MAI-400 ADCS hind algab 12370,36 € ning ulatub kuni 93739,39 € [17].



Joonis 3: Maryland Aerospace - MAI-400 ADCS moodul

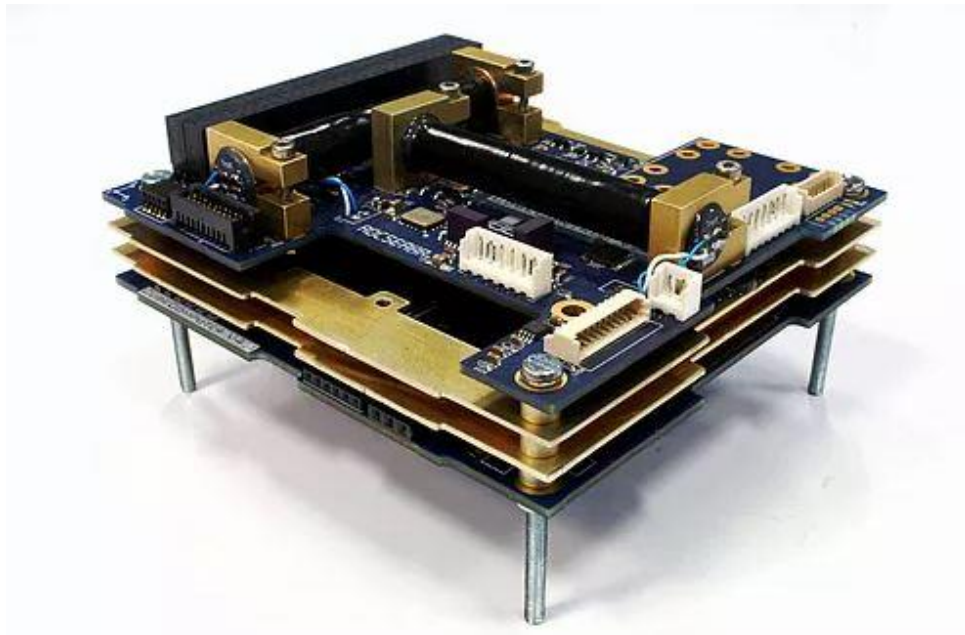
Lisaks terviklikule moodullahendusele pakub Maryland Aerospace eraldiseisvat kontrollerrplati (joonis 4) [17]. MAI-400 kontrollerrplaat sisaldab nelja mikrokontrolleri, üht 3-teljelist MEMS tehnoloogial põhinevat kiirendusanduri, 3-teljelist MEMS güroskoopi ja asendi reguleerimiseks kolme väljundit hooratuste juhtimiseks. Üks mikrokontrolleritest on rakendatud täitma protsessori arvutuslikku funktsiooni ning ülejäänud kolme mikrokontrollerit kasutatakse hooratuste juhtimiseks. MAI400 on väga mitmekülgne kommunikatsiooni liideste poolest, võimaldades UART, RS232, I²C ja SPI protokolle. Lisaks on ADCS trükkplaadil 6 analoogisendit päikeseandurite jaoks, mistõttu on trükkplaadile integreeritud analoog-digitaal muundurid (ADC). Pole ühilduv PC104 standardiga [10]. CubeSatShop kodulehel on toote hinnaks märgitud 16170,09 € – 25598,72 € [17].



Joonis 4: MAI-400 kontrollerplaat

2.3.4 Cube Space Cube ADCS

Cube Space Cube ADCS (joonis 5) [17] on ettevõtte Cube Space baasmudel. Koosneb kahest komplekteeritavast moodulist – CubeComputer, mis täidab arvutusliku funktsionaalsuse ülesannet ning CubeControl, mis sisaldab endas andureid ning aktuaatorelemente. Cube Space CubeControl võimaldab elektromagnetpoolide ning hoorataste juhtimist. Mooduliga saab ühendada magnetomeetreid ning päikeseandureid. Cube ADCS Magnetic toetab kommunikatsiooni protokolle UART, I²C, SPI ja CAN. Peasiini ning toitejalgade asetus PC104 sobib enamus kuupsatelliitidega. Mikrokontrolleriks on 32-bitine ARM Cortex-M3 taktsignaalliga 4 - 48 MHz [11]. CubeSatShop kodulehel pakutakse Cube Space ADCS moodulit hinnaga 14200,00 € – 29200,00 € [17].

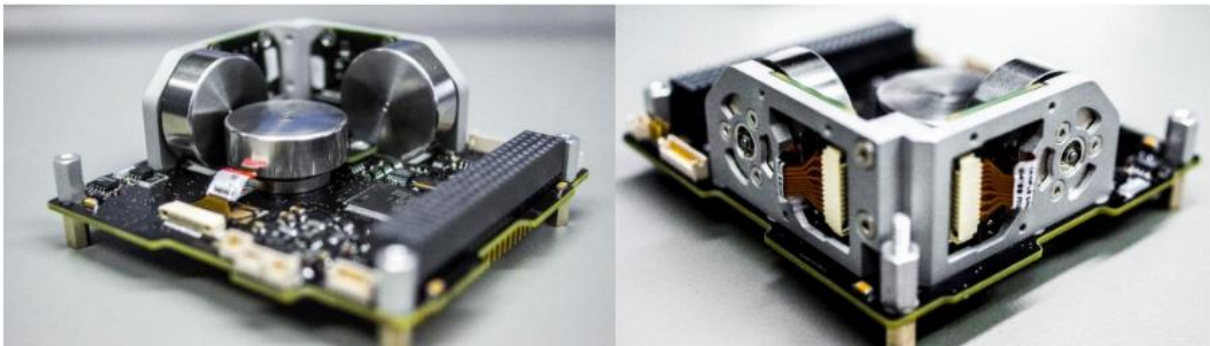


Joonis 5: Cube Space Cube ADCS moodul

2.3.5 Clyde Space ADCS

Clyde Space poolt pakutavad asendi määramise ja juhtimise lahendused (joonis 6) [19] on võimelised saavutama asendi reguleerimise täpsust kuni $0,5^\circ$ ning satelliidi asendi määramist $0,055^\circ$ täpsusega. Sellise täpsusega lahendust kasutati PICASSO kosmosemissioonil. ADCS baasmudeli hinnaklass algab 18400 eurost. Clyde Space ADCS emaplaat baseerub Microsemi FPGA (Actel FPGA) arhitektuuril. ADCS alamsüsteemi moodul sisaldab endas magnetomeetreid, güroskoope ning temperatuuriandureid. Päikesepaneelid kuuluvad baaslahenduse juurde ning läbi EPS süsteemi võimaldavad Päikese asukoha määramise täpsust $\pm 10^\circ$ 90-kraadises vaateväljas (FOV). Kasutab GPS andmeside Maa taustsüsteemi ning magnetvälja info ammutamiseks. Baasmudel sisaldab elektromagnetpooli, mis on integreeritud päikesepaneelide trükkplaadi alusainele. Elektromagnetpooli poolt tekitatav väändemoment sõltub suuresti päikesepaneeli trükkplaadi mõõtmetest ja paksusest. Näiteks 1,6 mm paksusega paneelil annab 1U klassi satelliidil väändemomendiks $0,06 \text{ Am}^2$ ning 3U satelliidil $0,179 \text{ Am}^2$. Kõige tüüpilisemad ADCS konfiguratsioonid on välja toodud järgnevalt [9]:

- 1U Konfiguratsioon – sisaldab endas ADCS emaplaati, päikesepaneele ning päikesepaneelidesse integreeritud elektromagnetpoole. Funktsionaalselt võimaldab Päikese suuna määramist (päikesepaneelide abil) ning satelliidi orientatsiooni stabiliseerimist.
- 2U/3U Konfiguratsioon – võimaldab satelliidil teostada keerulisemaid manöövreid kui 1U lahendus ning asendi määramise ja juhtimise täpsust $0,5^\circ$. Riistvaralise poole pealt sisaldab ADCS emaplaati koos päikeseandurite ning päikesepaneelidesse integreeritud magnetpoolidega, kolmel teljel paiknevaid hoorattaid satelliidi asendi juhtimiseks, GPS andmeside mooduli ja tähe jälgimise seadet.



Joonis 6: Clyde Space ADCS emaplaat koos hooratta lahendusega

Kõik eelnevalt uuritud ADCS lahendused on projekteeritud töötama LEO-s. Uuritud lahenduste põhjal saab öelda, et põhilisteks asendi määramise ning reguleerimise süsteemi komponentideks kasutatakse magnetomeetreid, päikeseandureid ning güroskoope. Satelliidi asendi reguleerimiseks pakuvad tootjad hoorataste kui ka elektromagnetpoolide valikut. Kallimad ADCS moodulid võimaldasid lisaks eelmainitud anduritele ka tähtede jälgimise seadme ning GPS liidese lisamist. Taustauuringut teostades ei olnud võimalik saada oluliselt informatsiooni ADCS alamsüsteemide liigsusest ega mikrokontrollerite ning andurite tüübist. Oluliste komponentide dubleerimine tähendab ADCS süsteemiplaadi tootjale küll lisakulu, kuid sellega suureks alamsüsteemi toimivuse usaldusväärsus kliendi silmis, mida antud lõputöö raames projekteeritava ADCS lahenduse puhul kindlasti arvesse võetakse. Järgnevalt välja toodud eraettevõtete ADCS moodulite riistvaralised näitajad koondtabelis:

Tabel 1: Kommertsiaalsete ADCS lahenduste riistvaraliste näitajate koondtabel

Riistvara	Clyde Space	New Space	Maryland Aerospace MAI-400	Cube Space Magnetic
Mikrokontroller	1 FPGA	x	x	ARM Cortex-M3, 4-48MHz
Magnetomeeter	2 x 3-teljeline	1 x	1 x 3-teljeline	1 x 3-teljeline
Güroskoop	3-teljeline	Jah	1 x 3-teljeline	1 x 3-teljeline
Kiirendusandur	Ei	Ei	1 x 3-teljeline	Ei
Päikeseanduri liides	Jah	Jah	Jah	Jah, 10-le andurile
Päikesepaneelide kasutamine päikeseandurina	FOV 90° ±10° täpsusega	Ei	Ei	Ei
Temp. Andurid	Jah	x	x	x
Elektromagnetpooli liides	Jah	Jah	Jah	Jah
PC104 ühilduv	Jah	Jah	Ei	Jah
Tähtede jälgimise seade	Jah	Ei	Jah	Ei
Horisondiandur	Jah	Ei	Jah	Jah
Hoorattad	Jah	Jah	Jah	Jah
GPS liides	Jah	Jah	Ei	Jah

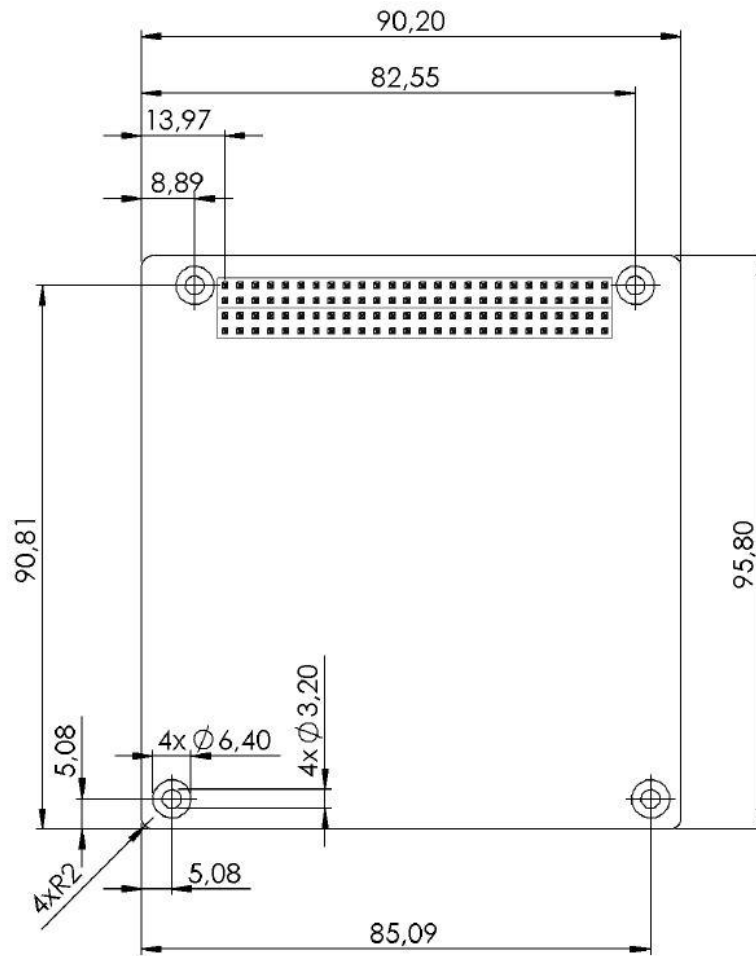
3. Nõuded ADCS alamsüsteemile

Käesoleva lõputöö raames projekteeritava asendi määramise ja juhtimise alamsüsteem peab vastama *CubeSat* standardi [1] nõuetele ning olema PC104 ühilduv [16]. PC104 on standard, mis on kohaldatud manussüsteemide hõlpsaks kasutamiseks ning see sätestab süsteemidele mehaanilised nõuded. Mehaaniliste ning riistvaraliste nõuete defineerimisel võeti arvesse nii ESTCube-1 kui ka kommertsiaalsete ADCS lahenduste analüüsil kogutud teadmisi. Järgnevalt antakse ülevaade disainitava ADCS süsteemi mehaanilistest, funktsionaalsetest ja riistvaralistest nõuetest.

3.1 Nõuded mehaanikale

- Projekteeritud süsteemiplaat peab olema mõõtmetega 90 x 96 mm – nõue on sätestatud PC104 standardi poolt, mida enamuse *CubeSat* kommertslahenduste tootjad järgivad.
- Trükkplaadi igas nurgas on 3,2 mm kinnitusavad, mis peavad olema maandatud.
- Trükkplaadi ülemises servas peab olema 104-nõelaline pistikühendus ehk PC104 pistik.
- ADCS kõik pistikühendused peavad olema struktureeritud ning olema paigaldatud trükkplaadi servadesse.

Järgnevalt on välja toodud ADCS trükkplaadi mehaaniline joonis [20], kus kõik mõõtmed on millimeetrites. Plaadi ülemises osas olev pistikühendus koosneb kahest eraldiseisvast 52 nõelalisest pistikühendusest [20]:



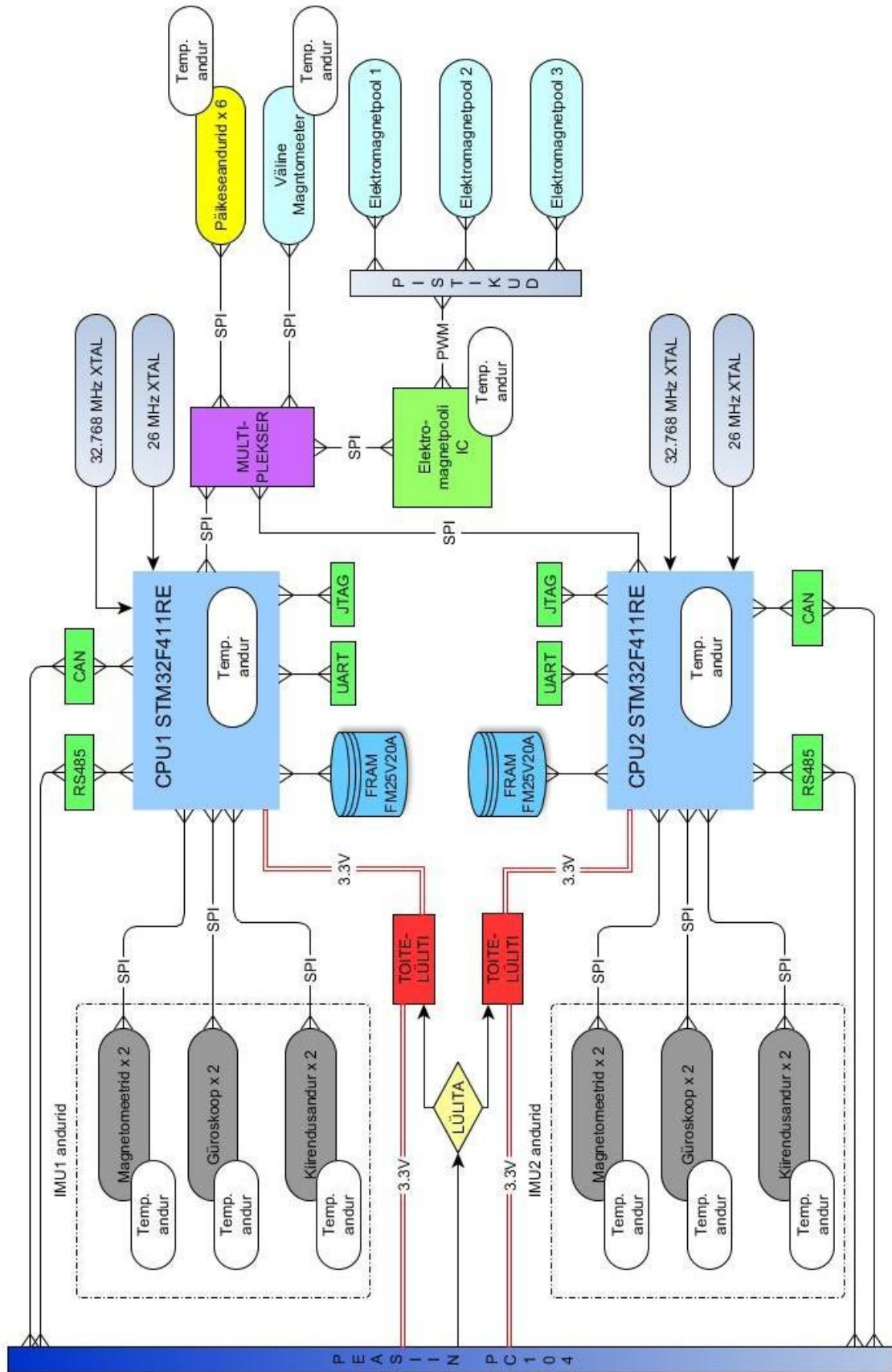
Joonis 7: ADCS trükkplaadi mehaaniline joonis

3.2 Nõuded riistvarale

- ADCS riistvara peab olema suures osas projekteeritud liigsuses. Süsteem peab sisaldama kahte mikrokontrolleri ning kummagi mikrokontrolleri jaoks eraldi andureid – magnetomeetrid, güroskoopandurid ning kiirendusandurid.
- Andurid ja teised integraallülitused peavad sisaldama integreeritud temperatuuriandurid.
- Mikrokontrolleri ning anduritevaheliseks suhtluseks eelistatult SPI liidese kasutamine.
- Suhtluseks satelliidi teiste alamsüsteemidega peab kasutama RS485 või CAN protokollid.
- Andureid peab saama eraldi sisse ja välja lülitada, juhul kui tekivad probleemid kommunikatsioonisiinil ja on vaja teostada taaskäivitust.

- Primaarse mikrokontrolleri valik peab käima läbi peasiini ning kummagi mikrokontrolleri jaoks vaja projekteerida toitelülitid koos kontrolleri valiku loogikaga.
- Tarkvaraarenduse jaoks sobilikud liidesed – UART ning JTAG.
- Alamsüsteem peab sisaldama FRAM lisamälu mikrokontrollerile.
- ADCS peab sisaldama lisa–magnetomeetri pistikut välise magnetomeetri lisamiseks, et suurendada töökindlust satelliidi sisemise magnetmomendi suhtes.
- Trükkplaadil peab olema kolm pistikut elektromagnetpoolide juhtimiseks. Elektromagnetpoole peab saama juhtida pulsimodulatsioon (PWM) abil.
- Trükkplaadil peab olema projekteeritud liides koos kuue pistikuga päikeseandurite kasutamiseks.

Päikeseandurid, väline magnetomeeter ning elektromagnetpoolid ei ole projekteeritud liigsuses ning nende, mikrokontrollerite ühiste, komponentide infovahetuse jaoks tuleb kasutada demultipleksereid (MUX). Tulenevalt nõuetest, koostati ADCS alamsüsteemi riistvara plokkskeem (joonisel 8).



Joonis 8: ADCS riistvara ja ühenduste plokk skeem

3.3 Nõuded funktsionaalsusele

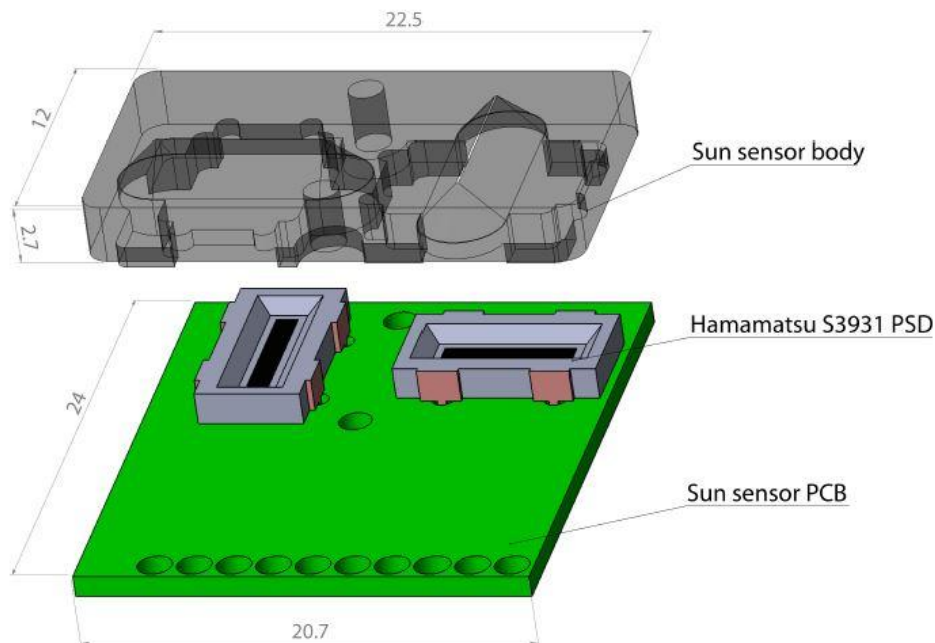
Enne reaalset alamsüsteemi projekteerimist on vaja välja valida süsteemi jaoks sobilikud integraalskeemid, mis tagaksid satelliidi asendi määramisel piisava täpsuse ning mis võimaldaksid täita alampunktis 3.2. esitatud nõudeid süsteemile. Järgnevalt antakse detailsem ülevaade ADCS alamsüsteemi erinevate integraalskeemide funktsionaalsusest.

3.3.1 Andurid

Satelliidi asendi määramine põhineb anduritel saadava informatsiooni ning matemaatiliste mudelite kombineerimisel. Põhilisteks ADCS alamsüsteemi anduriteks on magnetomeetrid, päikeseandurid, güroskoobid, ning kiirendusandurid. Suurema täpsuse satelliidi asendi määramisel tagab tähe jälgimise seade, mis on ADCS juurde kuuluv osa, kuid on antud lõputöö raames valmistatavast seadmest eraldiseisev alamsüsteem, mille tarnib Crystalspace OÜ [20]. Andurite valikul eelistati digitaalväljundiga andureid, kuna see lihtsustaks süsteemi riistvaralist skeemi ning poleks tarvis kasutada analoog-digitaal muundureid (ADC).

- **Päikeseandur** koosneb korpusest ning optilistest positsioonianduritest. Päikeseanduri korpusel on kaks pilu, millest läbiva päikesekiirguse korral tekib optilisele positsiooniandurile valgustriip, mis tuvastab valgustriibu paiknemise asukoha anduril. Andurile langenud valgustriip konverteeritakse kaheks pinge väärtuseks, mille abil saab välja arvutada valguse langemisnurka ning seega satelliidi asendi Päikese suhtes [7]. ESTCube-1 kasutas kaheteljelisi, analoogväljundiga päikeseandureid, mis sisaldasid kahte üheteljelist Hamamatsu S3931 optilist positsiooniandurit. ESTCube-1 päikeseandurite riistvaraline mudel on kujutatud joonisel 9 [14]. Käesolevas lõputöös valmiv lahendus peab sisaldama kuue päikeseanduriga ühendamiseks pistikuid – satelliidi igale küljele üks andur. Alamsüsteem projekteeritakse kasutamaks digitaalväljundiga päikeseandureid, seega süsteemplaadil puudub ADC kasutamise vajadus. Päikeseandurite kasutamiseks on ADCS trükkplaat varustatud Hirose Electric DF13A-6P-1.25H tüüpi pistikutega. Päikeseandurid saavad toite läbi Texas Instruments TPS2553 integraallüliti (*switch*). Integraallüliti võimaldab päikeseandureid sisse ja välja lülitada. Kuna päikeseandurid pole mikrokontrollerite

suhtes projekteeritud liigsuses, siis kummagi mikrokontrolleriga suhtlemiseks on kasutatud Texas Instruments SN74CBTLV3257 demultipleksereid (MUX).



Joonis 9: ESTCube-1 päikeseanduri riistvaraline mudel

- **Tähtede jälgimise seade (*Star Tracker*)** – tegemist on optilise seadmega, mille fotoelemendi abil tuvastatakse tähtede asukoht kaamera vaateväljas [21]. Tähtede jälgimise seadme abil saab määrata satelliidi orientatsiooni tähtede suhtes. Orienteerumiseks on tähe jälgimise seadmel vaja tähtede muustrist pilti, mida võrreldakse pardal oleva tähtede kaardi mustriga. Tähtede jälgimise seade võimaldab väga täpset asendi määramist, kuid antud seadet ei saa kasutada, kui satelliidi pöörlemiskiirus on suurem kui mõnikümne kraadi sekundis. Probleem on tingitud kaamera jõudlusest, mistõttu satelliidi suurema pöörlemiskiiruse korral ei saa tähtedest teostada selgeid pilte.

Antud seadme on välja töötanud Crystalspace OÜ ja seda kasutatakse antud lõputöö raames valmiva ADCS-alamsüsteemiga. Liidestamiseks on trükkplaadil PC104 pistik CAN-andmeside jaoks.

- **Magnetomeeter** võimaldab mõõta Maa magnetvälja suunda ning tugevust satelliidi asukohas [7]. Valikus oli neli magnetomeetrit: LSM303D [22], HMC5883L [23], LIS3MDL [24] ning LIS3MDLTR [25]. Valikust välistati andur HMC5883L, mis kasutab I²C liidest ning mille puhul on miinuseks ka väiksem töötemperatuuri vahemik ja integreeritud temperatuurianduri puudumine. Valituks osutus magnetomeeter LSM303D, mille puhul on kindel eelis anduri suur tundlikus/täpsus ning kõrgem diskreetimissagedus.

Tabel 2: Magnetomeetri valik projekteeritavale ADCS alamsüsteemile

Magneto- meeter	Mõõte- piirkond (gauss)	Täpsus- Tundlikkus (mgauss/ LSB)	Bit	Diskreet- sagedus (Hz)	Toite- pinge (V)	Voolu- tarve (mA)	Töötemp (C°)	Liides
LIS3MDLTR	±4..16	1,711..6,842	16	0,625..80	1,9..3,6	0,27	-40..+85	SPI/I ² C
HMC5883L	±8	0,23..1,37	12	0,75..75	2,2..3,6	0,1	-30..+85	I ² C
LIS3MDL	±4..16	1,711..6,842	16	0,625..80	1,9..3,6	0,27	-40..+85	SPI/I ² C
LSM303D	±4..12	0,08..0,479	16	3,12..100	2,2..3,6	0,3	-40..+85	SPI/I ² C

- **Güroskoop** võimaldab mõõta satelliidi nurkkiirust. Güroskoopide tööpõhimõte seisneb Coriolise jõu efektil [26]. Valikus olid andurid L3G4200DTR [27], L3GD20HTR [28], L3GD20TR [29], A3G4250D [30], mis oma parameetrite poolest olid omavahel küllaltki sarnased (tabel 3). Valikust välistati güroskoop A3G4250D, kuna selle mõõtepiirkond jäi väikeseks. Ülejäänud anduritel on piisavalt lai mõõtepiirkond, kus suurimaks mõõtekiiruseks saab olla ~5,5 pöret sekundis. Lisaks oli oluline SPI liidese olemasolu. Valituks osutus L3GD20HTR, mis eristus teistest anduritest väikseima voolutarbe näitajaga, milleks on 5 mA.

Tabel 3: GÜroskoobi valik projekteeritavale ADCS alamsüsteemile

Güroskoop	Mõõtepiirkond (dps)	Tundlikkus (mdps/digit)	Bit	Diskreetsagedus (Hz)	Toitepinge (V)	Vool (mA)	Temp (C°)	Liides
A3G4250D	±245	7,4..10,1	16	100..800	2,4..3,6	6,1	-40..+85	SPI/I ² C
L3GD20TR	±250..2000	8,75..70	16	95..760	2,4..3,6	6,1	-40..+85	SPI/I ² C
L3G4200DTR	±250..2000	8,75..70	16	100..800	2,4..3,6	6,1	-40..+85	SPI/I ² C
L3GD20HTR	±250..2000	8,75..70	16	11,9..758	2,2..3,6	5	-40..+85	SPI/I ² C

- **Kiirendusanduri** kasutus seisneb satelliidi trajektoori muutmise hetkel selle kiirenduse mõõtmisel. ESTCube-2 ja ESTCube-3 missioonidel on plaanis kasutada täpseid kiirendusandureid päikesepurje poolt tekitatud tõukejõu momendi mõõtmiseks. Lisaks saab kiirendusandurilt saadavat infot kasutada lisainformatsiooni allikana ADCS võrrandites [13]. Tabelis 4 välja toodud kiirendusanduritest osutus valituks ADXL362BCCZ-RL7 [31]. Valitud komponendi eeliseks on hea tundlikkus (1..4 mg/LSB), piisav mõõtepiirkonna ulatus (±2...±8 g) ning teiste anduritega võrreldes väiksem voolutarve (0,013 mA). Lisaks puudus teiste andurite kohta informatsioon integreeritud temperatuurianduri olemasolu kohta.

Tabel 4: Kiirendusanduri valik projekteeritavale ADCS alamsüsteemile

Kiirendusandur	Mõõtepiirkond (g)	Tundlikkus (mg/LSB)	Diskreetsagedus (Hz)	Toitepinge (V)	Voolutarve (mA)	Töötemp (C°)	Liides
SCA3100-D04	±2	0,9	-	3..3,6	3	-40..+125	SPI
ADXL362BCCZ-RL7	±2..8	1..4	625	1,6..3,5	0,013	-40..+85	SPI
ADXL350BCEZ-RL7	±1..8	1,95..15,6	12,5..400	2..3,6	0,166	-40..+85	SPI/I ² C
ADXL312ACPZ	±1,5..12	2,9..23,2	12,5..400	2..3,6	0,17	-40..+105	SPI/I ² C
H3LIS331DLTR	±100..400	49..195	50..1000	2,2..3,6	0,3	-40..+85	SPI/I ² C
LIS3LV02DL	±2..6	0,31..0,37	-	2,2..3,6	0,6..0,8	-40..+85	SPI/I ² C

- **Inertsiaalandur** (IMU) on komponent, mis sisaldab ühes pakendis magnetomeetrit, güroskoopi ning kiirendusandurit. Kolme anduri asemel ühe kasutamine lihtsustaks trükkplaadi disaini ning hoiaks kokku ka tootmiskulusid. IMU andurite otsimisel teostati järgnev valik:

Tabel 5: IMU andurite valik projekteeritavale ADCS alamsüsteemile

Güroskoop	Mõõtepiirkond (dps)	Tundlikkus (mdps/LSB)	Bit	Diskreetsagedus (Hz)	Toitepinge (V)	Voolu-tarve (mA)	Töötemp (C°)
MPU-9250	±250..2000	7,63..60,98	16	4..8000	2,4..3,6	3,2	-40..+85
LSM9DS1	±245..2000	8,75..70	16	14,9..952	1,9..3,6	4,00	-40..+85
L3GD20HTR	±250..2000	8,75..70	16	11,9..757,6	2,2..3,6	5	-40..+85

Magnetomeeter	Mõõtepiirkond (mT)	Tundlikkus (μT/LSB)	Bit	Diskreetsagedus (Hz)	Toitepinge (V)	Voolu-tarve (mA)	Töötemp (C°)
MPU-9250	±4,8	0,6	14	x	2,4..3,6	0,28	-40..+85
LSM9DS1	±0,4..1,6	0,014..0,058	16	x	1,9..3,6	0,6	-40..+85
LSM303D	±4..12	0,008..0,048	16	3,125..100	2,1..3,6	0,3	-40..+85

Kiirendusandur	Mõõtepiirkond (g)	Tundlikkus (mg/LSB)	Bit	Diskreetsagedus (Hz)	Toitepinge (V)	Voolu-tarve (mA)	Töötemp (C°)
MPU-9250	±2..16	0,061..0,488	16	4..4000	2,4..3,6	0,45	-40..+85
LSM9DS1	±2..16	0,061..0,732	16	x	1,9..3,6	0,6	-40..+85
ADXL362BCCZ-RL7	±2..8	1..4	12	625	1,6..3,5	0,013	-40..+85

Valik sisaldab kahte IMU anduri MPU-9250 [32] ning LSM9DS1 [33]. Tabelis 5 on toodud IMU anduri funktsioonide peamised parameetrid võrdluses eelnevalt välja valitud andurite näitajatega (tähistatud kollase värviga). Alustades nurkkiirust mõõtvatest anduritest, siis MPU-9250 paistab silma suurema tundlikkuse (7,63 – 60,98 mdps/LSB) ning madalaima voolutarbega (3,2 mA). Magnetvälja mõõtmise funktsionaalsuse osas jäävad IMU andurite näitajad LSM303D andurile alla. IMU andurite puhul on suurima tundlikkusenäitajaga LSM9DS1 0,014 – 0,058 μT/LSB anduri LSM303D [20] 0,008 – 0,048 μT/LSB vastu. Lisaks jääb IMU andurite mõõtepiirkonna ulatus alla magnetomeetri LSM303D mõõtepiirkonnale ±4

– ± 12 mT. MPU-9250 võimaldab IMU anduritest maksimaalset mõõtepiirkonda $\pm 4,8$ mT. Kiirenduse mõõtmisel on selge eelis IMU anduritel, võimaldades suuremat mõõtepiirkonda $\pm 2 - \pm 16$ g ning tundlikkust $0,061 - 0,488$ mg/LSB.

Vaatamata kehvematele magnetvälja mõõtmise näitajatele otsustati andurite valikul IMU andurite MPU-9250 ning LSM9DS1 kasuks. Magnetvälja täpsemaks mõõtmiseks lisatakse ADCS alamsüsteemi trükkplaadile võimalus ühendada süsteemiga väline magnetomeeter. Väline magnetomeeter lisab süsteemile paindlikkust, kuna saab kasutada kliendi soovile vastava tundlikkusega mõõteseadet. Lisaks ei mõjuta välise magnetomeetri mõõtetulemusi oluliselt satelliidi elektromagnetpoolide kasutamisest tingitud sisemise magnetmomendi olemasolu [14].

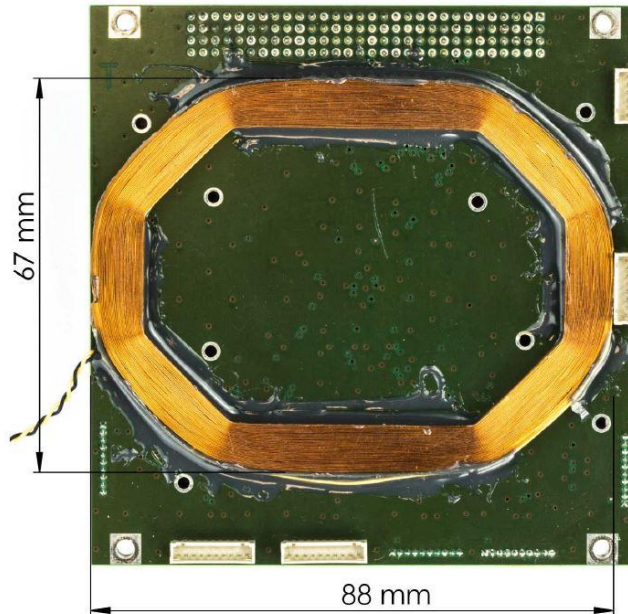
Mõlemad IMU andurid võimaldavad SPI jadaliidese suhtlust ning omavad integreeritud temperatuuriandureid.

3.3.2 Aktuaatorid

Satelliidi asendi reguleerimisel on põhilisteks aktuaatoriteks ehk täiturmehhanismideks elektromagnetpoolid ning hoorattad.

- **Elektromagnetpoolid** – tegemist on vasktraat mähistega (joonis 10) [14], mille abil tekitatakse Maa lokaalses magnetväljas väändemoment, mille abil satelliit saab end pöörata. Üldiselt kasutatakse satelliidi iga telje kohta ühte elektromagnetpooli ehk kokku kolme mähist. Antud lõputöö raames valmiv ADCS lahendus sisaldab kolme elektrimagnetpooli liidest, mis hõlmavad endas integraallülitusi mähiste juhtimiseks- ja mähiseid läbiva voolu tugevuse mõõtmiseks ning demultipleksereid mikrokontrollerite vaheliste käskluste jagamiseks. Elektromagnetpoolide juhtimiseks kasutatakse Diodes Incorporated ZXBM5210 [34] integraalskeeme, mille viikudele FWD ja REV pulsimodulatsiooni (PWM) signaali rakendamisel muudetakse mähiseid läbiva alalisvoolu pinget väärtust ning tekitatakse seeläbi soovitud tugevusega magnetväli. ZXBM5210 komponent võimaldab lisaks elektromagnetpoolide juhtimisele muuta mähiseid läbiva voolu suunda. Oluline on sealjuures mõõta mähiseid läbiva elektrivoolu suurust, mille mõõtmiseks kasutatakse Texas Instruments INA199 [35] integraalskeemi koos $0,1\Omega$ šundiga. Antud lahendus võimaldab igast

elektromagnetpoolist läbi lasta kuni 500 mA tugevusega elektrivoolu. Kuna elektromagnetpoolide liides pole projekteeritud liigsuses, siis mikrokontrollerite ning mähiseid juhtivate integraalskeemide ZXBM5210 vaheliseks suhtluseks kasutatakse Texas Instruments SN74CBTLV3257 demultipleksereid. Elektromagnetpoolide ühendamiseks on trükkplaadile lisatud kolm Hirose Electric DF13A-2P-1.25H [36] pistikut.



Joonis 10: ESTCube-1 elektromagnetpool

- **Hoorattad** – tegemist on satelliitide asendi reguleerimisel üpris traditsioonilise lahendusega, kus kasutatakse kolmele teljele paigaldatud elektrimootoreid koos kerge massiga hooratastega. Elektrimootori rootori vastupidisel pöörlemisel soovitud suunas saab satelliiti liigutada etteantud suunda [37]. Hoorattad võimaldavad suure täpsusega asendi reguleerimist, näiteks leidsid need kasutust ka Kepleri missioonil [38]. Käesolevas lõputöös valmiv trükkplaat ei sisalda hoorataste jaoks liidest, kuid Crystalspace OÜ ADCS terviklik lahendus pakub hoorataste lisamise võimalust. Hoorataste jaoks on plaanitud eraldi moodul, mis suhtleks läbi PC104 pistiku CAN-siini käesolevas töös valmiva ADCS alamsüsteemiga. Crystalspace OÜ hoorataste moodul projekteeritakse liigsuses ehk kolme hooratta asemel plaanitakse kasutada nelja hooratast.

3.3.3 Haldussüsteem

- **Mikrokontroller (MCU)** – tegemist on väikese juhtarvutiga, mis on mahutatud ühele integraalskeemile ning sisaldab nii mälu, protsessorit kui ka sisend-väljundliideseid. ADCS kontrolleri valikul järgiti järgmisi füüsilisi parameetreid [39]:
 - Protsessori töösagedus – määrab juhtseadme töökiiruse.
 - Programmimälu maht – kui suure mahuga programmi on võimalik juhtseadmele lisada. Kasutatakse andmetöötlusel algoritmide jaoks.
 - Andmemälu maht – kui suures mahus andmeid on võimalik käsitleda programmi koodis. Ümberkirjutatava väikmälu FLASH maht pole käesoleva mikrokontrolleri valikul kriitilise tähtsusega, sest antud mälu tüüp on väga tundlik radiatsioonile [40]. Plaanis on kasutada mälu FRAM (*Ferroelectric Random-Access Memory*), mis on radiatsiooni suhtes vastupidavam.
 - Sisend-väljundviikude arv ja nende funktsioon – kui mitut välist seadet on võimalik mikroskeemiga ühendada. Eelistatud on kontroller, millel on võimalikult palju SPI liideseid ning piisav arv sisend-väljundviike, et ühendada end alamseadmetega (*slave device*) ilma, et tuleks kasutada laiendusi (*I/O expanders*).
 - Voolutarve – oluline on leida väikese voolutarbega mikrokontroller, mille jõudlus oleks piisavalt optimaalne.

Kuna ADCS peab olema projekteeritud liigsuses, siis otsustati kasutada kahte STM32F411RE ARM®Cortex® - M4 32-bit RISC 100MHz kontrollerit, mille füüsilisi parameetreid iseloomustavad järgmised näitajad [41]:

- Protsessori töösagedus – 100 MHz
- Programmimälu maht – SRAM – 128 KB
- Andmemälu maht – FLASH - 512 KB
- Sisend-väljundviikude arv – 50
- Liidesed – 5 x SPI, 3 x I2C, 3 x USART
- Voolutarve – 100 μ A/MHz
- Toitepinge – 1,7 V – 3,6 V

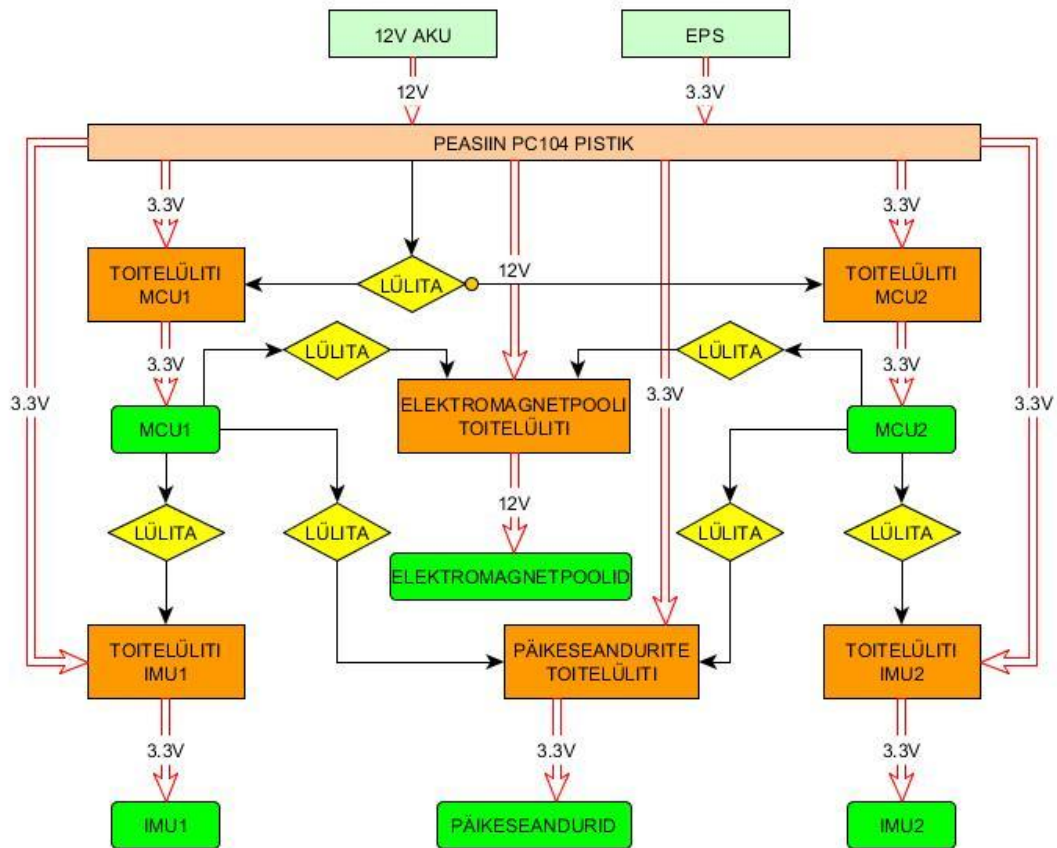
Kontrolleri valikul lähtuti eelnevalt välja toodud tehnilistest näitajatest, kuid teiseks valiku kriteeriumiks oli Crystalspace OÜ asutajate varasem kogemus STM32-tüüpi mikrokontrolleritega. Lisaks kasutatakse teistel Crystalspace OÜ pakutavatel alamsüsteemidel sama tüüpi mikrokontrollereid, mistõttu hõlbustub oluliselt ka hilisem ADCS tarkvara arendus.

- **Mäluhaldus (FRAM)** – Kuna mikrokontrolleri välmälu on LEO's viibides pidevas radiatsiooni mõjusfääris, siis on oluline kasutada programmi talletamiseks radiatsiooni suhtes vastupidavamat mälu, milleks sobib hästi FRAM [42]. Kummalegi mikrokontrollerile on plaanitud üks FRAM integraalskeem. Otsiti FRAM'i, mis võimaldaks kiiret SPI andmeside, oleks madala voolutarbega ning taluks töötemperatuuri $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ kuni $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sobivaks komponendiks osutus Cypress Semiconductor Corporationi FM25V20A [43], mille parameetreid iseloomustavad järgmised näitajad:
 - Andmemälu maht – 256 KB x 8
 - Liidesed – SPI diskreetimissagedus kuni 40 MHz
 - Voolutarve – 300 μA /1MHz, ooterežiimis 100 μA , unerežiimis 3 μA
 - Toitepinge – 2,0 V – 3,6 V
 - Töötemperatuur – $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ kuni $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$
 - *Read/write* tsüklite arv – 10^{14}

- **Demultiplekser** – tegemist on kommutaator integraalskeemiga, mille eesmärk on jagada informatsiooni kahe mikrokontrolleri ning alamseadmete vahel. Demultiplekseri kasutamise vajadus tulenes komponentide kasutamisest, mis pole projekteeritud ADCS trükkplaadile liigsuses. Näiteks antud projekti puhul tuleb kasutada demultipleksereid elektromagnetpoolide, välise magnetomeetri ning päikeseandurite jagamisel kahe mikrokontrolleri vahel. Põhiliseks valikukriteeriumiks oli optimaalse kanalite arvuga komponendi leidmine ehk süsteem ei tohtinud olla üledimensioneeritud ning samas sooviti trükkplaadil kasutatavate integraalskeemide arvu võimalikult väiksena hoida. Antud lõputöös osutus valituks Texas Instruments

poolt toodetav multiplekser/demultiplekser SN74CBTLV3257. Tegemist on bipolaarse, nelja sisendkanaliga seadmega, mis võimaldab kaheksat väljundkanalit ning mille juhtimine põhineb väljatransistoride (FET) loogikal. SN74CBTLV3257 komponenti iseloomustavad järgmised füüsilised parameetrid [44]:

- Kanalite arv – 4 sisendit, 8 väljundit
 - Voolutarve – 300 μ A
 - Toitepinge – 2,3 V – 3,6 V
 - Töötemperatuur – -40 °C kuni +85 °C
-
- **Toitesüsteem** – projekteeritav ADCS töötab alalispingel ning süsteemile tagab vajaliku toitepinge satelliidi elektrienergia haldamise alamsüsteem (EPS). EPS varustab ADCS komponente toitepingega läbi PC104 pistiku ning võimaldab pingeväärtust 3,3 V. Toitepinget 12 V, mis on vajalik elektromagnetpoolide juhtimiseks, saadakse aku toitest läbi PC104 pistiku. Ülejäänud integraalskeemid, loogikaelemendid ning andurid vajavad töötamiseks 3,3 V toitepinget. Toitesüsteemi ühtedeks tähtsaimateks osadeks on toitelülitid, millede kasutamine vajab hoolikat läbimõtlemist. Seoses toitelülitite kasutamisega sai paika pandud plaan, mida näeb plokk skeemil, joonis 11.



Joonis 11: ADCS toitesüsteemi selgitav plokk skeem

Plaani kohaselt saab ADCS trükkplaadil olema kuus toitelülitit, mis võimaldavad varustada toitepingega järgmisi ahelaid ning komponente:

- 1) MCU1 – Mikrokontroller 1
- 2) MCU2 – Mikrokontroller 2
- 3) Elektromagnetpoolid
- 4) IMU1 – Mikrokontroller 1 inertsiaalandidurid
- 5) IMU2 – Mikrokontroller 2 inertsiaalandidurid
- 6) Päikeseandurite liides

Mikrokontrollerite varustamiseks 3,3 V toitepingega kasutatakse Texas Instruments Schmitti triggerit SN74LVC1G14-EP [45], mille kasutamine võimaldab töötada korraga ainult ühel toitelülil. Vaikimisi on sisse-lülitatud olekus mikrokontroller 1. Ülejäänud toitelülid rakenduvad siis, kui vastav mikrokontroller selleks loa annab ehk „LÜLITA“ signaaliga. Toitelüliti valiku osas otsustati kasutada Texas Instruments TPS2553 [46] ning elektromagnetpoolide 12 V toitepinge lülitiks Farchild FPF2700 [47] komponenti.

- **Kommunikatsiooniliidesed** – andmesideks ülejäänud satelliidi alamsüsteemidega peab ADCS võimaldama kommunikatsiooniprotokolle RS485, CAN ning UART. Mikrokontrollerite suhtlusel alamsüsteemidega on eelistatult välja valitud integraalskeemid, mis võimaldavad SPI suhtlust. SPI liinile saab ühendada mitu seadet, kus mikrokontroller annab lisasignaali (*select signal*) infot, millise seadmega ta suhelda soovib. RS485 andmevahetuseks valiti välja Linear Technology Corporation mikroskeem LTC2850 [48] ning CAN liidese andmesideks Texas Instrument komponent SN65HVD230 [49]. SN65HVD230 ja LTC2850 on projekteeritud kummalegi mikrokontrollerile ning antud komponendid vastutavad ADCS ja ülejäänud satelliidiga andmeside eest.

4. Trükkplaadi projekteerimine

Antud peatükis antakse ülevaade ADCS kommertsiaalse prototüübi projekteerimise protsessi erinevatest etappidest. Projekteerimine hõlmab endas ADCS elektriskeemi joonestamist, komponentide "loomist" joonestustarkvara abil ning trükkplaadil komponentide asukoha paigutamist (*layout design*). Kuna elektriskeem hõlmab ligi 160 komponenti (Lisa A), siis elektriskeemi joonestamisel ja trükkplaadi disainimisel kasutati vastavat tarkvara, milleks oli Altium Designer 14.1.5.

4.1 Elektriskeem

Käesolevas alampeatükis antakse ülevaade elektriskeemi joonestamisest ja skeemi struktuurist ning kirjeldatakse detailsemalt skeemis kasutatud komponentide funktsionaalsust. Lisaks eelmistes peatükkides kirjeldatud integraalskeemidele sisaldab ADCS elektriskeem lisaks komponente, mis tagavad integraalskeemide jaoks sobiliku töörežiimi. Näiteks kasutatakse 0,1 μF mahtuvusega kondensatoreid kõrgsagedusliku müra eemaldamiseks integraalskeemide toitepingest. Prototüübi elektriskeemi leiab antud lõputöö lisast B. Elektriskeemi joonestamisel pandi paika skeemi hierarhia vastavalt süsteemplaadi liigsus- ja funktsionaalsuskriteeriumite jaotamisega. ADCS struktuur oli alljärgnev:

1. *ADCS.SchDoc*
 - 1.1. *Elektromagnetpool.SchDoc*
 - 1.2. *MCU 1.SchDoc*
 - 1.2.1. *IMU 1.SchDoc*
 - 1.3. *MCU 2.SchDoc*
 - 1.3.1. *IMU 2.SchDoc*
 - 1.4. *Magnetomeeter.SchDoc*
 - 1.5. *Päikeseandurid.SchDoc*

- **ADCS.SchDoc** – asub skeemi struktuuris kõige kõrgemal positsioonil, mis sisaldab endas Altium lehe sümboleid (*Sheet Symbol*), toitelüliteid mikrokontrollerite toitepinge jaotamiseks, PC104 pistikut ning Schmitti trigerit toitelüliti lülituse valikuks. Lehe sümboleid kasutatakse Altiumis alam-lehekülgede tähistamisel mitmeleheküljelistes hierarhilise struktuuriga elektriskeemides [50]. Kumbki toitelüliti on võimeline varustama mikrokontrollereid kuni 1,5 A vooluga. Takistite R3 ja R6 valikuga saab seadistada toitelülite voolutugevuse piirväärtust, mille arvustamiseks tuleb kasutada järgmist valemit [47]:

$$R_{ILIM} = \left(\frac{22980V}{I_{OSmax}} \right)^{\frac{1}{0.94}},$$

kus R_{ILIM} on takisti väärtus k Ω ;

I_{OSmax} on maksimaalse voolu piirväärtus mA.

Toitelülitid saavad 3,3 V toite satelliidi EPS alamsüsteemilt, mis tagab stabiilse pinge väärtuse alamsüsteemi enda väljundis. Toitepinge jõudmiseks ADCS alamsüsteemini tuleb sellel läbida pistikuid ning elektriabelaid, mis mõjutavad toitepinge kvaliteeti. Seoses sellega kasutatakse integraalskeemide toitepinge viikudel 0,1 μ F kondensaatoreid C2 ja C5. Toitelülite juhtimine käib läbi EN (*enable*) viigu ning juhtimiseks kasutatakse Schmitti inverter trigerit SN74LVC1G14-EP.

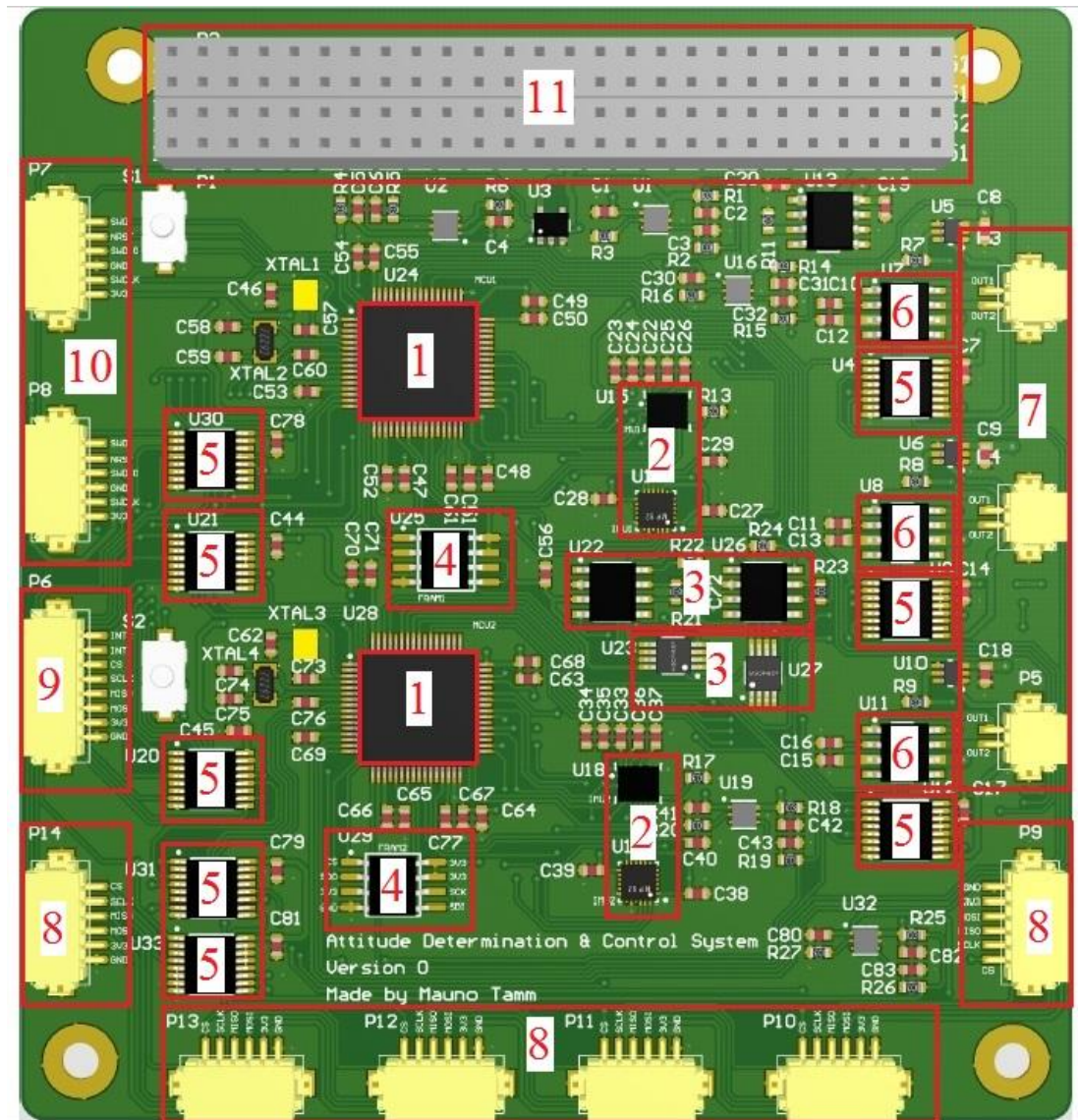
- **Elektromagnetpool.SchDoc** – elektromagnetpoolide liidese skeemi lehel asub kolm SN74CBTLV3257 demultiplekserit, mille toitepinge sisenditesse on lisatud 0,1 μ F kondensaatorid C7, C17 ja C17. Elektromagnetpoolide juhtimiseks on kasutatud kolme integraalskeemi ZXBM5210, mille 0,1 % tolerantsiga ning 0,1 Ω takistusega šuntidelt R7, R8 ja R9 mõõdetakse INA199 integraalskeemiga elektromagnetpoole läbiva elektrivoolu suurust. Hilisemal trükkplaadi disainimisel on oluline paigutada šunt võimalikult lähedale INA199 viikudele IN+ ja IN-. Elektromagnetpoolide ühendamiseks ADCS trükkplaadiga kasutatakse DF13A-2P pistikuid. Elektromagnetpoolide liidese skeemile on projekteeritud veel toitelüliti FPF2700, mis saab 12 V elektritoite satelliidi akudelt. Kasutatud sai teistsugust toitelüliti kui ülejäänud ADCS ahelates kasutatakse, sest antud komponent peab taluma suuremat sisendpinge väärtust kui teised toitelülitid. FPF2700 talub sisendpinget kuni 40 V, kus toitepingest müra filtreerimisel kasutatakse 10 μ F kondensaatorit C20.

- MCU1.SchDoc** – MCU 1 skeemi lehel on kesksel kohal mikrokontroller STM32F411RE. Suhtluseks alamseadmetega on mikrokontrolleril vaja teatud hulk sisendeid ja väljundeid, mille ühendustest antakse ülevaade lisas C tabelis C.1. Mikrokontrolleril on kuus toite sisendit, mille iga viigu jaoks on projekteeritud toitepingest müra filtreerimiseks üks või mitu 0,1 μ F mahtuvusega kondensaatorit. Lisaks mikrokontrollerile paiknevad MCU1 elektriskeemi lehel integraalskeemid LTC2850 RS-485 andmeside jaoks ning SN65HVD230 CAN kommunikatsiooniprotokolli kasutamiseks. Eelmainitud integraalskeemid võimaldavad mikrokontrolleril läbi peasiini pistiku PC104 suhelda ülejäänud satelliidi alamsüsteemidega. Andmevahetus mikrokontrolleri ning ülejäänud satelliidi vahel käib mööda MAINBUS_A ja MAINBUS_B liini. CAN protokolli kasutamiseks tuleb MAINBUS_A ja MAINBUS_B viikude vahele joota 120 Ω väärtusega takisti R2. Mikrokontrolleriga samal skeemi lehel paikneb samuti kontrolleri programmeerimiseks vajalik JTAG pistik DF13A-6P ning FRAM FM25V20A lisamälu. Mikrokontrolleri reaalaja kella (RTC) režiimi seadmiseks kasutatakse 32,768 kHz kvartsresonaatorit, mis on ühendatud kontrolleri viikudega PH0-OSC_IN ja PH1-OSC_OUT. 32,768 kHz stabiilse sageduse genereerimiseks vajab kvartsresonaator kahte 12,5 pF kondensaatorit C58 ja C59. 26 MHz kvartsresonaatorit koos 9 pF kondensaatoritega C46 ja C57 kasutatakse mikrokontrolleri kella seadmiseks. Kontrolleri *reset* viigu NRST külge on ühendatud surunupp ning 0,1 μ F kondensaator, mis kaitseb kontrollerit juhusliku taaskäivitamise (*parasitic reset*) vastu. Lisaks sätestab mikrokontrolleri andmeleht 2,2 μ F kasutamise vajaduse viigul VCAP1 [41].
- IMU 1.SchDoc** – IMU1 skeemi lehel asuvad kaks inertsiaalandurit LSM9DS1 ja MPU-9250. Andureid toidetakse, sarnaselt mikrokontrolleritele, pingega 3,3 V läbi toitelüliti TPS2553. Toitelüliti sisse-välja lülitatud olekut kontrollib MCU1 mikrokontroller. Andurite toitejalgadele on ühendatud lisaks 3,3 V pingesallikale ka 0,1 μ F kondensaatorid kõrgsagedusliku müra filtreerimiseks. Mikrokontrolleri ja andurite vaheliseks suhtluseks kasutatakse SPI andmeside.

- **MCU 2.SchDoc** – MCU 2.SchDoc elektriskeem on sama, mis MCU 1.SchDoc.
- **IMU 2.SchDoc** – IMU 2.SchDoc elektriskeem on sama, mis IMU 1.SchDoc.
- **Magnetomeeter.SchDoc** – magnetomeetri skeemi lehel paikneb liides välise magnetomeetri ühendamiseks. Kuna projekteeritud sai üks väline magnetomeeter kahe mikrokontrolleri peale, siis oli vaja kasutada kahte demultipleksit SN74CBTLV3257. Välist magnetomeetrit saab toita otse mikrokontrolleri PB2 viigu kaudu. Magnetomeetri ühendamiseks on lisatud DF13A-8P pistik.
- **Päikeseandurid.SchDoc** – päikeseandurite ühendamiseks on projekteeritud kuus DF13A-6P pistikut ehk üks andur igale satelliidi küljele. Päikeseandureid toidetakse 3,3 V pingega läbi toitelüliti U32, mille sisse-välja lülitatud olekut reguleeritakse mikrokontrolleriga. Päikeseandurid suhtlevad mikrokontrolleritega mööda SPI siini ning kasutavad kolme demultipleksit SN74CBTLV3257 kontrollerite ja andurite vaheliseks andmevahetuseks.

4.2 Trükkplaadi disain

Antud lõputöö raames disainiti ADCS prototüübi trükkplaat, mille pinnalaotuse leiab lisast D joonisel D.1. Trükkplaadi kujundamine algas mehaaniliste piirjoonte määramisega vastavalt PC104 mehaaniliste nõuete standardile. Autori poolt valmistatud trükkplaat on neljakihiline ning valdavalt kasutatakse pindmontaaž komponente (SMD). Ainsaks aukmontaaž (THT) komponendiks on trükkplaadi ülemises servas paiknev PC104 pistik. Kuna trükkplaat sisaldab endas ligemale 160 komponenti, oli oluline panna paika komponentide jaoks pinnalaotuse plaan, grupeerides seejuures sarnase funktsionaalsusega komponente. Lisaks funktsionaalsusele mängis antud trükkplaadi kujundamisel olulist rolli ka trükkplaadi esteetiline väljanägemine, sest tegemist on kommertsiaalse lahendusega. Joonisel 12 antakse ülevaade komponentide paigutuse strateegiast trükkplaadil.



Joonis 12: ADCS PCBA prototüüp Altiumis

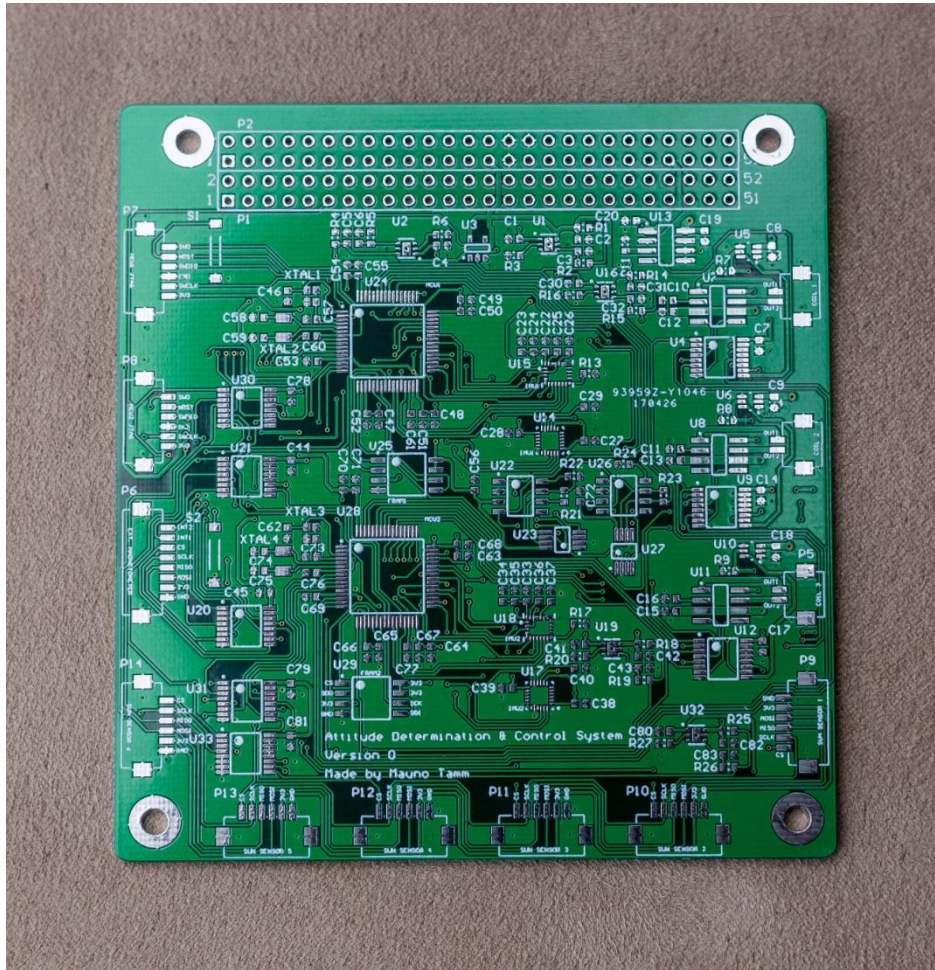
Joonis 12 komponentide paigutuse plaan: **1** – mikrokontrollerid, **2** – IMU andurid, **3** – kommunikatsiooniliidese integraalskeemid, **4** – FRAM, **5** – demultiplekserid, **6** – elektromagnetpoole juhtivad integraalskeemid, **7** – elektromagnetpoolide pistikühendused, **8** – päikeseandurite pistikühendused, **9** – välise elektromagnetpooli pistikühendus, **10** – JTAG pistikühendused, **11** – peasiin, PC104 pistikühendus.

Komponentide paigutamine trükkplaadil on olulise tähtsusega. Komponentide paigutamine mõjutab nende funktsionaalsust ning signaali kvaliteeti. Näiteks tuleb toitepinge stabiliseerimiseks mõeldud kondensaatorid ühendada võimalikult lähedale integraalskeemide toiteviikudele [51]. Oluline oli paigutada pistikühendused trükkplaadi servadesse, et tagada

alamsüsteemi kasutajasõbralikkus ühenduste loomisel. Trükkplaadi kesksel kohal on mikrokontrollerid koos kontrolleri funktsionaalsust tagavate komponentidega nagu kvartsresonaatorid ja kondensaatorid, mis on ühendatud toiteviikudele võimalikult lähedale. Trükkplaadil üsna keskele ning mikrokontrollerite lähedusse paigutati IMU andurid, kommunikatsiooni integraalskeemid ning FRAM mikroskeem. Demultiplekserite paigutus asub trükkplaadil laiali ning antud komponendid on paigutatud võimalikult lähedale neid vajavatele liidestele nagu näiteks elektromagnetpoolide juhtimise liides. Elektromagnetpoolide juhtimise liides on paigutatud trükkplaadi paremasse serva. Ühenduste loomisel tuli hoida veetavad rajad võimalikult lühikesed ning leida optimaalne teekond vältimaks üleliigse müra teket edastatavas signaalis. Vaseradade vaheline ala on kaetud vase polügoniga ehk maandatud alaga (GND), mis on vajalik potentsiaaliühtlustuseks mitmekihilistes trükkplaatides. Füüsilise trükkplaadi valmistamiseks kasutati DirtyPCBs teenust [52], kellele saadeti trükkplaadi valmistamiseks vajalikud gerber-failid.

5. Tulemused

Antud lõputöö raames valmis ADCS prototüüp-trükkplaat mõõtmetega 90 x 96 mm, mis valmistati eraettevõttele Crystalspace OÜ. Joonisel 13 on pilt projekteeritud alamsüsteemi trükkplaadist. Valminud ADCS prototüüp vastab kõigile eespool seatud mehaanilistele ning riistvaralistele kriteeriumitele.



Joonis 13: ADCS prototüübi trükkplaat

Pärast lõputöö kaitsmist plaanib lõputöö autor tööd prototüübi kallal jätkata ning järgnevateks tegevusteks on ADCS komponentide tellimine ja trükkplaadi komplekteerimine. Seejärel alustatakse alamsüsteemi riistvaralise testimisega ning funktsionaalsuse jaoks tarkvara arendusega.

6. Kokkuvõte

Antud lõputöö raames valmistati kommertsiaalsete satelliitide asendi määramise ja juhtimise alamsüsteemi jaoks prototüübi trükkplaat, mis on tellimus eraettevõttelt Crystalspace OÜ. Projekteeritud alamsüsteem on valmistatud töötama Maa-lähedasel orbiidil ning vastab *CubeSat* standardi poolt sätestatud nõuetele. Tegemist on PC104 ühilduva süsteemplaadiga, mis sobitub 1U ning suurema ühikuga satelliitidesse.

Lõputöös anti ülevaade ESTCube-1 ning erinevatest kommertsiaalsetest asendi määramise ja juhtimise alamsüsteemidest. Kogutud info põhjal loodi Crystalspace OÜ ADCS prototüübi jaoks sobilik kontseptsioon. Defineeriti alamsüsteemi mehaanilised-, riistvaralised- ja funktsionaalsed nõuded, vastavalt millele valiti ADCS jaoks vajalikud komponendid, joonestati elektriskeem ning projekteeriti ja valmistati füüsiline trükkplaat.

Lõputöö käigus jõudis töö autor füüsilise trükkplaadi valmistamiseni ning järgnevateks plaanitavateks tegevusteks on ADCS prototüübi jaoks komponentide tellimine, PCBA komplekteerimine ning riistvara testimine.

Kasutatud allikad

- [1] CubeSat Design Specification Rev.13. (4. Juuni 2015. a.). Kasutamise kuupäev: 13. Aprill 2017. a., allikas The CubeSat Program: <http://www.cubesat.org/resources/>
- [2] Kulu, E. (2014). Nanosatelliitide tehnoloogia arengutrendid. Tartu.
- [3] Kulu, E. (27. Detsember 2012. a.). ESTCube-1 1U CubeSat. Kasutamise kuupäev: 13. Aprill 2017. a., allikas Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Small_satellite#/media/File:Estcube-1_2012-12-27.jpg
- [4] Janhunen, P. (2006). Electric Solar Wind Sail (E-sail). Kasutamise kuupäev: 13. Aprill 2017. a., allikas Electric solar wind sail spacecraft propulsion: <http://electric-sailing.fi/index.html>
- [5] Janhunen, P. (7. September 2007. a.). ELECTRIC SAIL FOR PRODUCING SPACECRAFT PROPULSION. Kasutamise kuupäev: 13. Aprill 2017. a., allikas International and National Patent Collections: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2007099201>
- [6] Silver Lätt, Andris Slavinskis, Erik Ilbis, Urmas Kvell, Kaupo Voormansik, Erik Kulu, Mihkel Pajusalu, Henri Kuuste, Indrek Sünter, Tõnis Eenmäe, Kaspars Laizans, Karlis Zalite, Riho Vendt, Johannes Piepenbrock, Ilmar Ansko, Ahto Leitu, Andres Vahter, Ants Agu, Elo Eilonen, Endel Soolo, Hendrik Ehrpais, Henri Lillmaa, Ivar Mahhonin, Jaak Mõttus, Jaan Viru, Jaanus Kalde, Jana Šubtidze, Jānis Mucenieks, Jānis Šate, Johan Kütt, Juris Poļevskis, Jürgen Laks, Kadi Kivistik, Kadri-Liis Kusmin, Kalle-Gustav Kruus, Karl Tarbe, Katrin Tuude, Katrīna Kalniņa, Laur Joost, Marko Lõoke, Markus Järve, Mart Vellak, Martin Neerot, Martin Valgur, Martynas Pelakauskas, Matis Averin, Mats Mikkor, Mihkel Veske, Ott Scheler, Paul Liias, Priit Laes, Ramon Rantsus, Reimo Soosaar, Risto Reinumägi, Robert Valner, Siim Kurvits, Sven-Erik Mändmaa, Taavi Ilves, Tanel Peet, Tavo Ani, Teet Tilk, Timothy Henry Charles Tamm, Tobias Scheffler, Toomas Vahter, Tõnis Uiboupin, Veigo Evard, Andreas Sisask, Lauri Kimmel, Olaf Krömer, Roland Rosta, Pekka Janhunen, Jouni Envall, Petri Toivanen, Timo Rauhala, Henri Seppänen, Jukka Ukkonen, Edward Haeggström, Risto Kurppa, Taneli Kalvas, Olli Tarvainen, Janne Kauppinen, Antti Nuottajärvi, Hannu Koivisto, Sergiy Kiprich, Alexander Obraztsov, Viljo Allik, Anu Reinart,

Mart Noorma, "ESTCube-1 nanosatellite for electric solar wind sail in-orbit technology demonstration", Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, 2014, 63, 2S, 200–209.

[7] Slavinskis, A. (13. Aprill 2017. a.). ESTCUBE-1. Allikas: Eesti Tudengisatelliidi Sihtasutus: <https://www.estcube.eu/estcube-1-0>

[8] Kalde, J. (2012). PIESOELEKTRILISE MOOTORI JUHTSEADE KUUPSATELLIIDILE. Tartu.

[9] Clyde Space Ltd. (2005). Kasutamise kuupäev: 13. Aprill 2017. a., allikas Clyde Space Ltd.: <https://www.clyde.space/>

[10] Maryland Aerospace Inc. (2017). Kasutamise kuupäev: 13. Aprill 2017. a., allikas Maryland Aerospace Inc.: <http://maiaero.com>

[11] Cube Space. (2017). Kasutamise kuupäev: 13. Aprill 2017. a., allikas Cube Space: <https://www.cubespace.co.za>

[12] New Space Systems. (2017). Kasutamise kuupäev: 13. Aprill 2017. a., allikas New Space Systems: <http://www.newspacesystems.com/>

[13] Olentšenko, G. (2014). PROTOTYPE DESIGN OF ESTCUBE-2 ATTITUDE AND ORBIT CONTROL SYSTEM. Tartu.

[14] Andris Slavinskis, Erik Kulu, Jaan Viru, Robert Valner, Hendrik Ehrpais, Tõnis Uiboupin, Markus Järve, Endel Soolo, Jouni Envall, Tobias Scheffler, Indrek Sünter, Henri Kuuste, Urmas Kvell, Jaanus Kalde, Kaspars Laizans, Erik Ilbis, Tõnis Eenmäe, Riho Verdt, Kaupo Voormansik, Ilmar Ansko, Viljo Allik, Silver Lätt, Mart Noorma, "Attitude determination and control for centrifugal tether deployment on the ESTCube-1 nanosatellite", Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, 2014, 63, 2S, 242–249.

[15] Slavinskis, A. (26. November 2015. a.). ESTCube-1 attitude determination. Tartu.

[16] PCI/104-Express. (2017). Kasutamise kuupäev: 13. Aprill 2017. a., allikas PC/104: <http://pc104.org/hardware-specifications/pci104-express/>

[17] CubeSatShop. (2017). Kasutamise kuupäev: 13. Aprill 2017. a., allikas CubeSatShop: <https://www.cubesatshop.com/>

- [18] Christopher Masaru Pong, D. W. (Juuni 2014. a.). High-Precision Pointing and Attitude Estimation and Control Algorithms for Hardware-Constrained Spacecraft. Kasutamise kuupäev: 13. Aprill 2017. a., allikas <http://ssl.mit.edu/files/website/theses/PhD-2014-PongChristopher.pdf>
- [19] Clyde Space Ltd. (2016). Attitude Determination and Control System Capability Overview. Kasutamise kuupäev: 08. Mai 2017. a., allikas Clyde Space Ltd All Rights Reserved: <https://www.clyde.space/>
- [20] Crystalspace OÜ. (14. Mai 2014. a.). Crystalspace P1U "Vasik" Power Supply Version 1.0. Tartu.
- [21] Space Technology. (21. Juuli 2011. a.). Kasutamise kuupäev: 08. Mai 2017. a., allikas Star Camera: https://web.archive.org/web/20110721054014/http://nmp.nasa.gov/st6/TECHNOLOGY/star_camera.html
- [22] STMicroelectronics. (November 2013. a.). LSM303D. Kasutamise kuupäev: 13. Aprill 2017. a., allikas Ultra-compact high-performance eCompass module: 3D accelerometer and 3D magnetometer: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/1c/9e/71/05/4e/b7/4d/d1/DM00057547.pdf/files/DM00057547.pdf/jcr:content/translations/en.DM00057547.pdf>
- [23] Honeywell. (Aprill 2012. a.). HMC5883L. Kasutamise kuupäev: 13. Aprill 2017. a., allikas Three-Axis Digital Compass IC: <http://www.farnell.com/datasheets/1683374.pdf>
- [24] STMicroelectronics. (Mai 2015. a.). LIS3MDL. Kasutamise kuupäev: 13. Aprill 2017. a., allikas Digital output magnetic sensor: ultra-low-power, high-performance 3-axis magnetometer: <https://www.pololu.com/file/0J1089/LIS3MDL.pdf>
- [25] STMicroelectronics. (Mai 2015. a.). LIS3MDLTR. Kasutamise kuupäev: 13. Aprill 2017. a., allikas Digital output magnetic sensor: ultra-low-power, high-performance 3-axis magnetometer: <https://www.pololu.com/file/0J1089/LIS3MDL.pdf>
- [26] Introduction to MEMS gyroscopes. (15. November 2010. a.). Kasutamise kuupäev: 13. Aprill 2017. a., allikas <http://electroi.com/blog/2010/11/introduction-to-mems-gyroscopes/>

- [27] STMicroelectronics. (Detsember 2010. a.). L3G4200D. Kasutamise kuupäev: 13. Aprill 2017. a., allikas MEMS motion sensor: ultra-stable three-axis digital output gyroscope: <http://www.mouser.com/ds/2/389/l3g4200d-954834.pdf>
- [28] STMicroelectronics. (Märts 2013. a.). L3GD20H. Kasutamise kuupäev: 13. Aprill 2017. a., allikas MEMS motion sensor: three-axis digital output gyroscope: <http://www.mouser.com/ds/2/389/l3gd20h-954865.pdf>
- [29] STMicroelectronics. (Veebruar 2013. a.). L3GD20. Kasutamise kuupäev: 13. Aprill 2017. a., allikas MEMS motion sensor: three-axis digital output gyroscope: <http://www.mouser.com/ds/2/389/l3gd20-954745.pdf>
- [30] STMicroelectronics. (Veebruar 2012. a.). A3G4250D. Kasutamise kuupäev: 13. Aprill 2017. a., allikas MEMS motion sensor: 3-axis digital output gyroscope: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/5c/f1/a4/70/1b/fa/40/d2/DM00047823.pdf/files/DM00047823.pdf/jcr:content/translations/en.DM00047823.pdf>
- [31] Analog Devices. (23. Veebruar 2017. a.). ADXL362. Kasutamise kuupäev: 13. Aprill 2017. a., allikas Micropower, 3-Axis, ± 2 g/ ± 4 g/ ± 8 g Digital Output MEMS Accelerometer: <http://www.mouser.com/ds/2/609/ADXL362-879195.pdf>
- [32] InvenSense Inc. (20. Juuni 2016. a.). MPU-9250. Kasutamise kuupäev: 13. Aprill 2017. a., allikas Product Specification Revision 1.1: <https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01-v1.1.pdf>
- [33] STMicroelectronics. (Märts 2015. a.). LSM9DS1. Kasutamise kuupäev: 13. Aprill 2017. a., allikas iNEMO inertial module: 3D accelerometer, 3D gyroscope, 3D magnetometer: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/1e/3f/2a/d6/25/eb/48/46/DM00103319.pdf/files/DM00103319.pdf/jcr:content/translations/en.DM00103319.pdf>
- [34] Diodes Incorporated. (Detsember 2013. a.). ZXBM5210. Kasutamise kuupäev: 07. Mai 2017. a., allikas REVERSIBLE DC MOTOR DRIVE WITH SPEED CONTROL: <https://www.diodes.com/assets/Datasheets/ZXBM5210.pdf>
- [35] Texas Instruments. (Veebruar 2017. a.). INA199. Kasutamise kuupäev: 07. Mai 2017. a., allikas INA199 26-V, Bidirectional, Zero-Drift, Low- or High-Side, Voltage-Output, Current-Shunt Monitor: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina199.pdf>

- [36] HIROSE ELECTRIC CO. (Mai 2017. a.). DF13A. Kasutamise kuupäev: 08. Mai 2017. a., allikas 1.25mm Pitch Miniature Crimping Connector: http://www.mouser.com/ds/2/185/DF13_catalog-939190.pdf
- [37] N.J. Meckel, R.J. Cassady, R.D. Osborne, W.A. Hoskins, R.M. Myers, PRIMEX Aerospace Company, "INVESTIGATION OF PULSED PLASMA THRUSTERS FOR SPACECRAFT ATTITUDE CONTROL", 1997, 813-820, allikas: http://erps.spacegrant.org/uploads/images/images/iepc_articledownload_1988-2007/1997index/7128.pdf
- [38] NASA Content Administrator. (29. Märts 2013. a.). NASA. Kasutamise kuupäev: 08. Mai 2017. a., allikas Kepler Mission Manager Update: https://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/news/keplerm-20130329.html
- [39] Sell, R., Leini, M., Salong, P. Mikrokontrollerid ja praktiline robotika. – Tln:Tallinna Tehnikaülikool,2010. - 219 lk
- [40] D.N. Nguyen, S.M. Guertin, G.M. Swift, A.H. Johnston, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, "Radiation Effects on Advanced Flash Memories", 1999, 1-7, allikas: <https://nepp.nasa.gov/docuploads/C5CA0F47-361D-42D0-BA53A555BB5D2F00/Flash-99.pdf>
- [41] STMicroelectronics. (Detsember 2016. a.). STM32F411RE. Kasutamise kuupäev: 08. Mai 2017. a., allikas ARM® Cortex®-M4 32b MCU: <http://www.st.com/en/microcontrollers/stm32f411re.html>
- [42] Rana Sayyah, Todd C. Macleod & Fat D. Ho, "Radiation-Hardened Electronics and Ferroelectric Memory for Space Flight Systems", 30 Juuni 2011 a., allikas: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00150193.2011.554145?journalCode=gfer20>
- [43] Cypress Semiconductor Corporation. (10. August 2015. a.). FM25V20A. Kasutamise kuupäev: 08. Mai 2017. a., allikas 2-Mbit ferroelectric random access memory: <http://www.cypress.com/file/141396/download>
- [44] Texas Instruments. (Oktoober 2016. a.). SN74CBTLV3257. Kasutamise kuupäev: 08. Mai 2017. a., allikas Multiplexer/Demultiplexer: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74cbtlv3257.pdf>

- [45] Texas Instruments. (Märts 2007. a.). SN74LVC1G14-EP. Kasutamise kuupäev: 08. Mai 2017. a., allikas SINGLE SCHMITT-TRIGGER INVERTER: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74lvc1g14-ep.pdf>
- [46] Texas Instruments. (August 2016. a.). TPS2553. Kasutamise kuupäev: 08. Mai 2017. a., allikas Precision Adjustable Current-Limited Power-Distribution Switch: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps2553.pdf>
- [47] Fairchild. (Detsember 2013. a.). FPF2700. Kasutamise kuupäev: 08. Mai 2017. a., allikas Adjustable Over-Current Protection Load Switch: <http://www.mouser.com/ds/2/149/FPF2700-1009146.pdf>
- [48] Linear Technology. (2007). LTC2850. Kasutamise kuupäev: 08. Mai 2017. a., allikas RS485/RS422 Transceiver: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/285012fe.pdf>
- [49] Texas Instruments. (Juuli 2015. a.). SN65HVD230. Kasutamise kuupäev: 08. Mai 2017. a., allikas CAN Bus Transceiver: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn65hvd230.pdf>
- [50] Altium LLC. (20. November 2013. a.). Altium. Kasutamise kuupäev: 08. Mai 2017. a., allikas Sheet Symbol: [http://techdocs.altium.com/display/ADRR/Sch_Obj-SheetSymbol\(\(Sheet+Symbol\)\)_AD#](http://techdocs.altium.com/display/ADRR/Sch_Obj-SheetSymbol((Sheet+Symbol))_AD#)
- [51] Väljaots, T. (2014). KAMSTRUP SOOJAARVESTITE KAUGLUGEMISSEADE LÄBI GSM VÕRGU. Tartu.
- [52] DirtyPCBs. (2017). DirtyPCBs. Kasutamise kuupäev: 08. Mai 2017. a., allikas PCB manufacturer: <http://dirtypcbs.com/store/pcbs>

Lihtlitsent lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Mauno Tamm

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lühilitsents) enda loodud teose

“Kommertsiaalse asendi määramise ja reguleerimise alamsüsteemi prototüübi projekteerimine kuupsatelliitidele“

mille juhendajad on Jaanus Kalde, Aivo Reinart ja Heiki Kasemägi

- a) reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - b) üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
 3. kinnitan, et lühilitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, 16.05.2017

LISAD

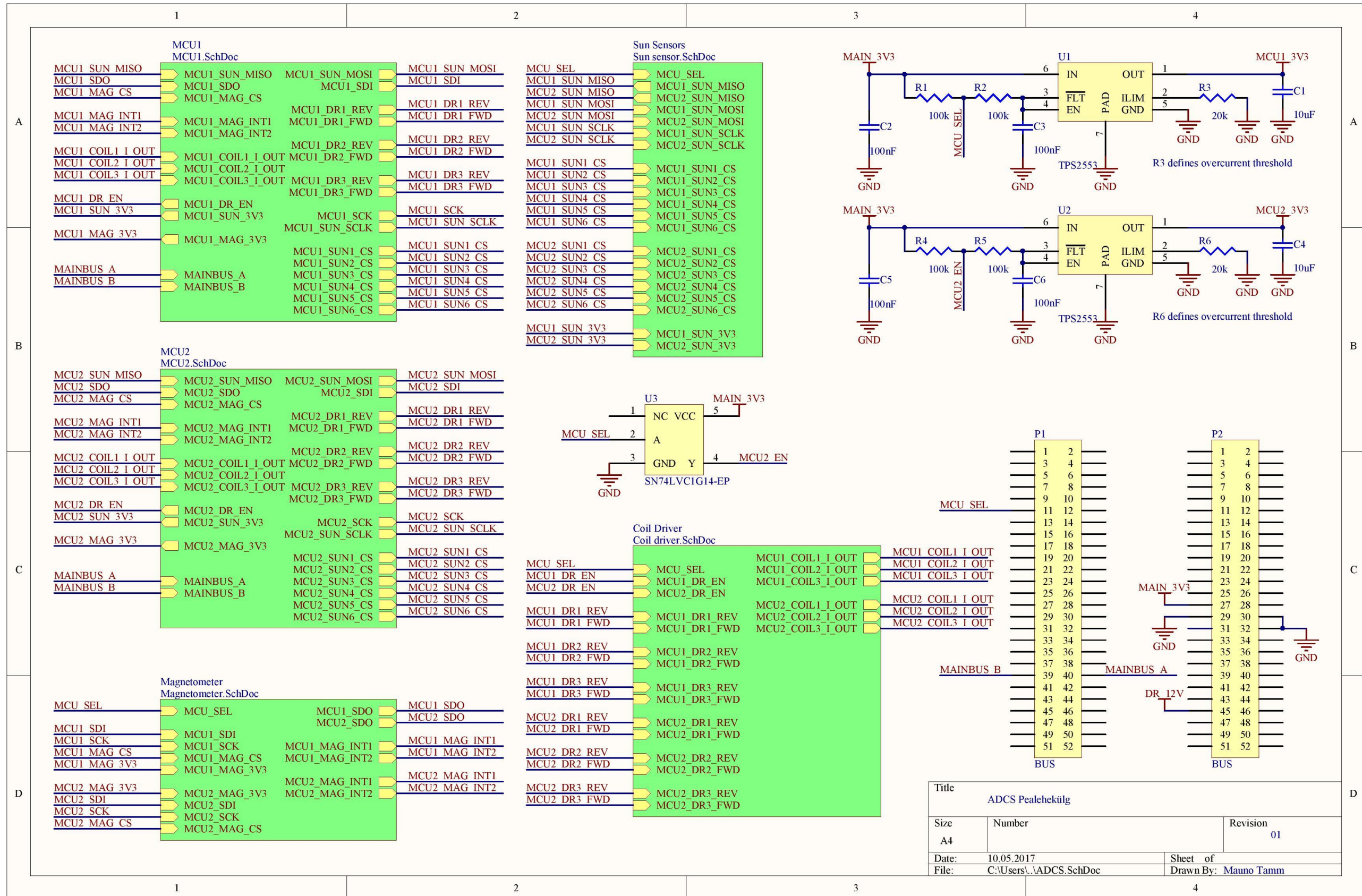
LISAD

Lisa A – ADCS prototüübi trükkplaadi komponentide loetelu

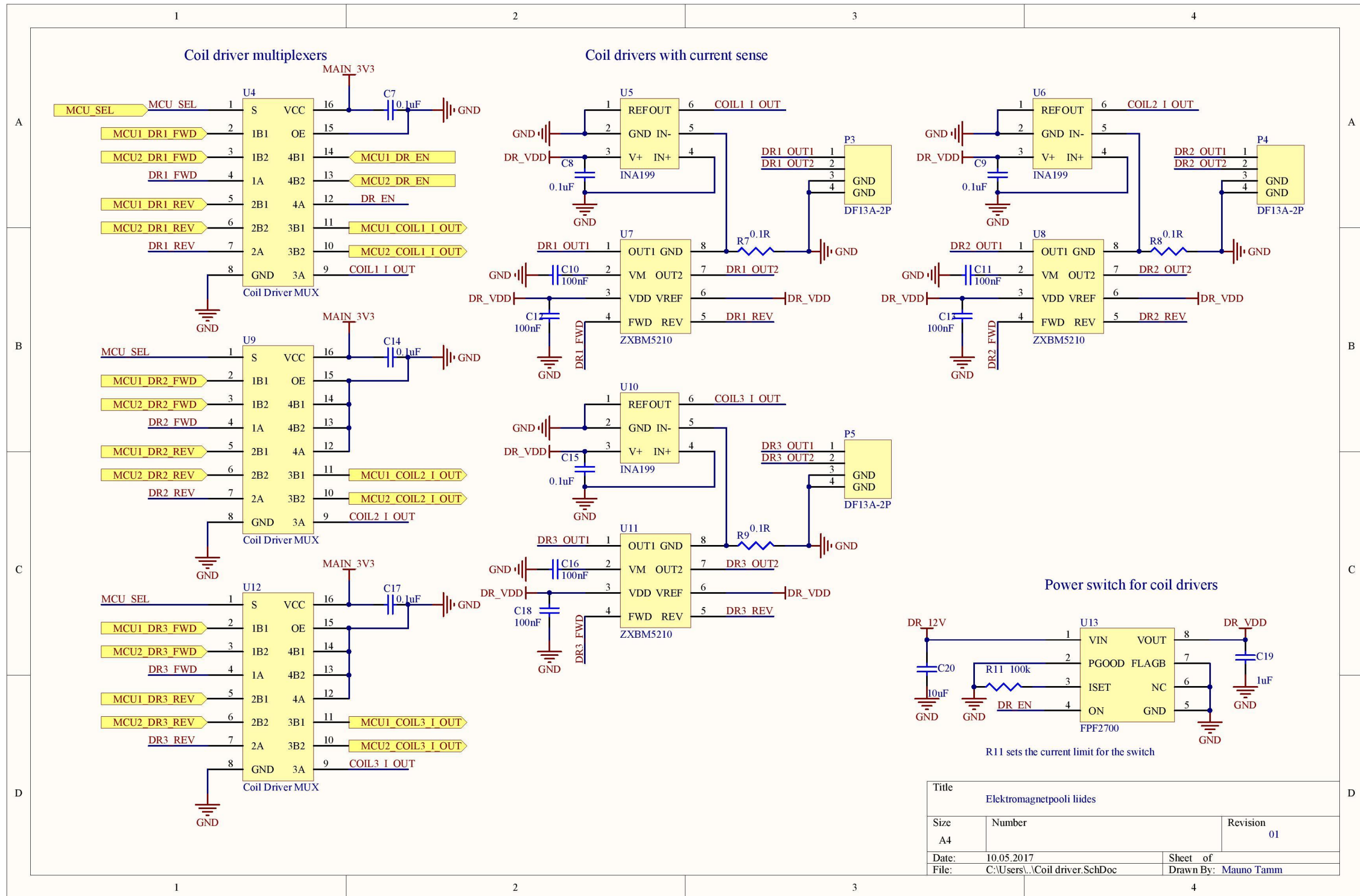
Tabel A.1: ADCS prototüübi trükkplaadi komponentide loetelu tabel

Kirjeldus	Tähis	Kommentaar	Kogus
Capacitor (Semiconductor SIM Model)	C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9, C10, C11, C12, C13, C14, C15, C16, C17, C18, C19, C20, C22, C23, C24, C25, C26, C27, C28, C29, C30, C31, C32, C33, C34, C35, C36, C37, C38, C39, C40, C41, C42, C43, C44, C45, C46, C47, C48, C49, C50, C51, C52, C53, C54, C55, C56, C57, C58, C59, C60, C61, C62, C63, C64, C65, C66, C67, C68, C69, C70, C71, C72, C73, C74, C75, C76, C77, C78, C79, C80, C81, C82, C83	Kondensaatorid, pakend 0603	82
Pinheader MAIN BUS	P1, P2	BUS, PC104 pistik	2
Connector DF13A-2P	P3, P4, P5	DF13A-2P pistik	3
Connector for external magnetometer	P6	Väline magnetomeeter, pistik	1
JTAG DF13A-6P	P7, P8	DF13A-6P	2
Sun sensor connector DF13A-6P	P9	Päikeseandur 1 pistik	1
Sun sensor connector DF13A-6P	P10	Päikeseandur 2 pistik	1
Sun sensor connector DF13A-6P	P11	Päikeseandur 3 pistik	1
Sun sensor connector DF13A-6P	P12	Päikeseandur 4 pistik	1
Sun sensor connector DF13A-6P	P13	Päikeseandur 5 pistik	1
Sun sensor connector DF13A-6P	P14	Päikeseandur 6 pistik	1
Resistor	R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8, R9, R11, R13, R14, R15, R16, R17, R18, R19, R20, R21, R22, R23, R24, R25, R26, R27	Takistid, pakend 0603	25
Reset switch	S1, S2	KSR231G reset lüliti	2
Power Switch	U1, U2, U16, U19, U32	TPS2553, toitelüliti integraalskeem	5
SN74LVC1G14-EP SINGLE SCHMITT-TRIGGER INVERTER	U3	SN74LVC1G14-EP	1

SN74CBTLV3257 Low-Voltage 4-Bit 1-of-2 FET Multiplexer/Demultiplexer	U4, U9, U12	Coil Driver MUX	3
INA199 26-V, Bidirectional, Zero-Drift, Low- or High-Side, Voltage Output Current Shunt Monitor	U5, U6, U10	INA199	3
REVERSIBLE DC MOTOR DRIVE WITH SPEED CONTROL	U7, U8, U11	ZXBM5210	3
0.4 - 2A Adjustable Over-Current Protection Load Switch	U13	FPF2700	1
Motion Tracking Device Gyro, Accel, Magneto	U14, U17	MPU-9250	2
iNEMO inertial module: 3D accelerometer, 3D gyroscope, 3D magnetometer	U15, U18	LSM9DS1	2
SN74CBTLV3257 Low-Voltage 4-Bit 1-of-2 FET Multiplexer/Demultiplexer	U20, U21	Magnetometer MUX	2
SN65HVD23x 3.3-V CAN Bus Transceivers	U22, U26	SN65HVD230	2
3.3V 20Mbps RS485/RS422 Transceivers	U23, U27	LTC2850	2
ARM® Cortex®-M4 32b MCU+FPU, 125 DMIPS, 512KB Flash, 128KB RAM, USB OTG FS, 11 TIMs, 1 ADC, 13 comm. interfaces	U24, U28	STM32F411RE	2
2-Mbit (256 K × 8) Serial (SPI) F-RAM, FM25V20A FRAM	U25, U29	FM25V20A	2
SN74CBTLV3257 Low-Voltage 4-Bit 1-of-2 FET Multiplexer/Demultiplexer	U30, U31, U33	Sun Sensors MUX	3
Surface Mount Quartz Crystal	XTAL1, XTAL3	26MHz	2
Crystal Oscillator	XTAL2, XTAL4	32.768kHz	2

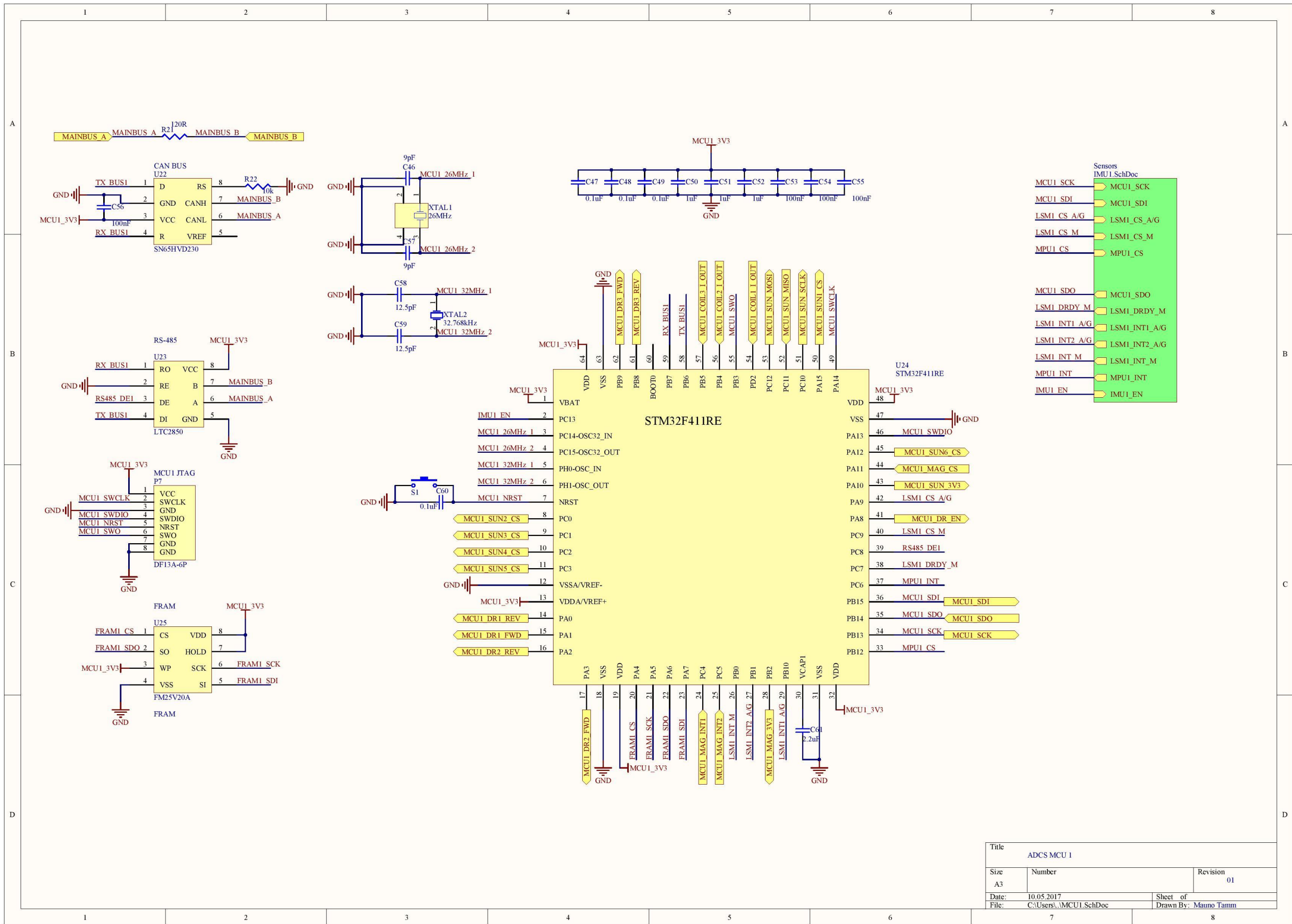


Joonis B.1: Kommertsiaalse ADCS prototüübi elektroonikaskeemi pealehekülg

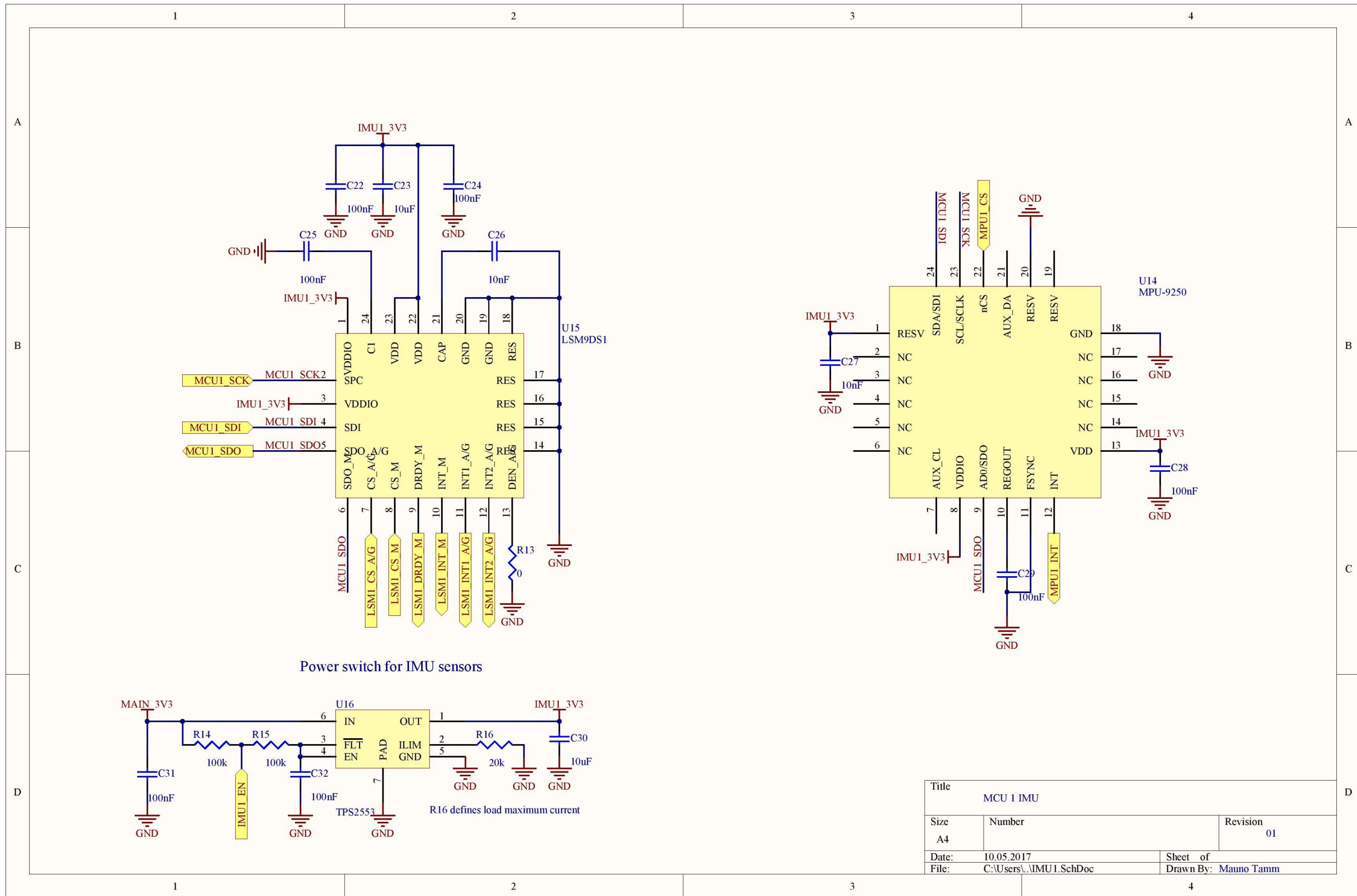


Title			Elektromagnetpooli liides		
Size	Number			Revision	01
A4					
Date:	10.05.2017	Sheet of			
File:	C:\Users\...\Coil driver.SchDoc	Drawn By:		Mauno Tamm	

Joonis B.2: Elektromagnetpooli liides

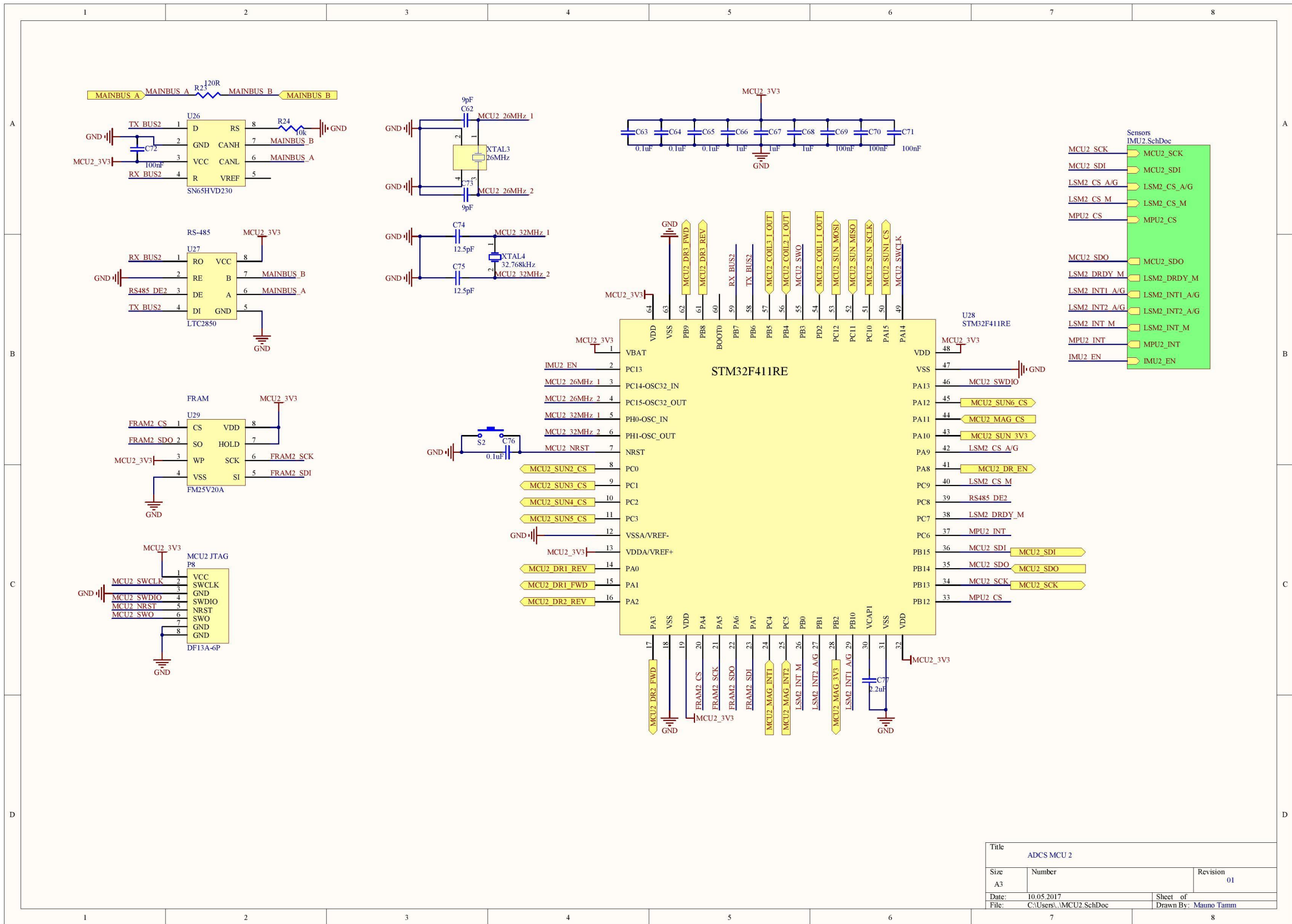


Joonis B.3: ADCS MCU 1

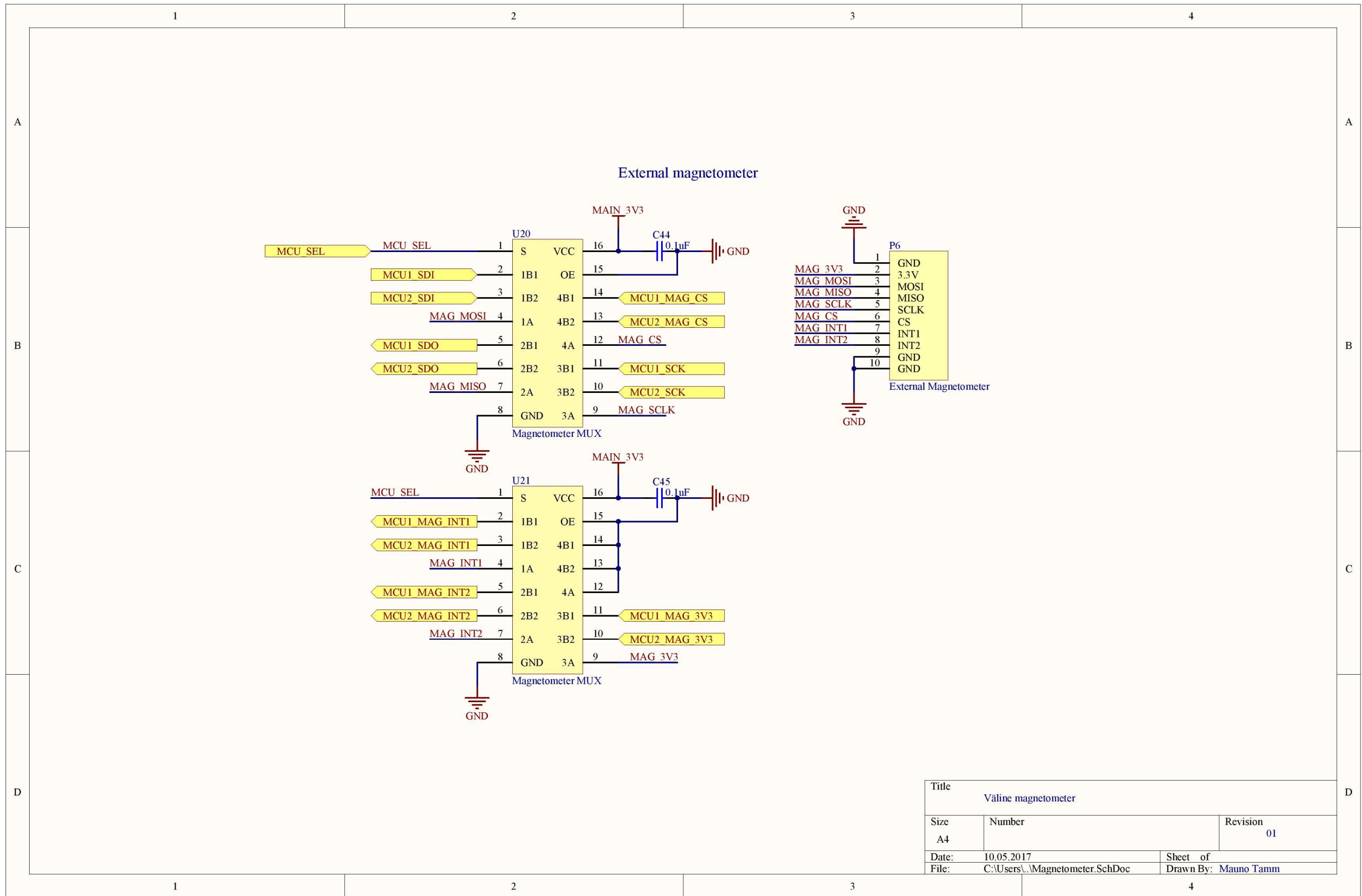


Title			MCU 1 IMU		
Size	Number	Revision		01	
A4					
Date:	10.05.2017	Sheet of			
File:	C:\Users\...IMU1.SchDoc	Drawn By:		Mauno Tamm	

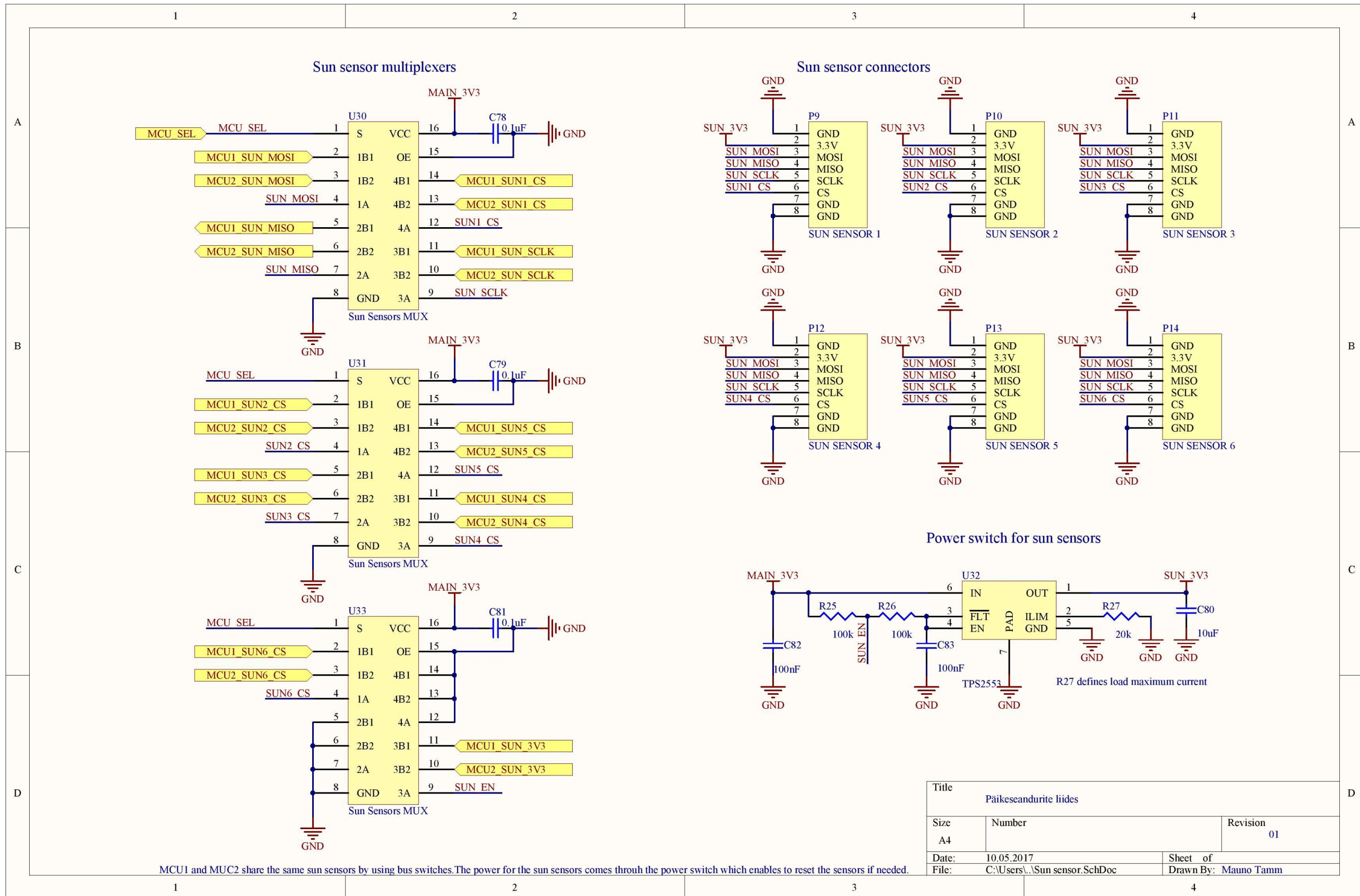
Joonis B.4: MCU 1 IMU



Joonis B.5: ADCS MCU 2



Joonis B.7: ADCS väline magnetomeeter



MCU1 and MUC2 share the same sun sensors by using bus switches. The power for the sun sensors comes through the power switch which enables to reset the sensors if needed.

Joonis B.8: ADCS päikeseandurite liides

Lisa C – Mikrokontrolleri sisend- ja väljundviigud

Tabel C.1: MCU 1 Mikrokontrolleri sisend- ja väljundviikude tabel

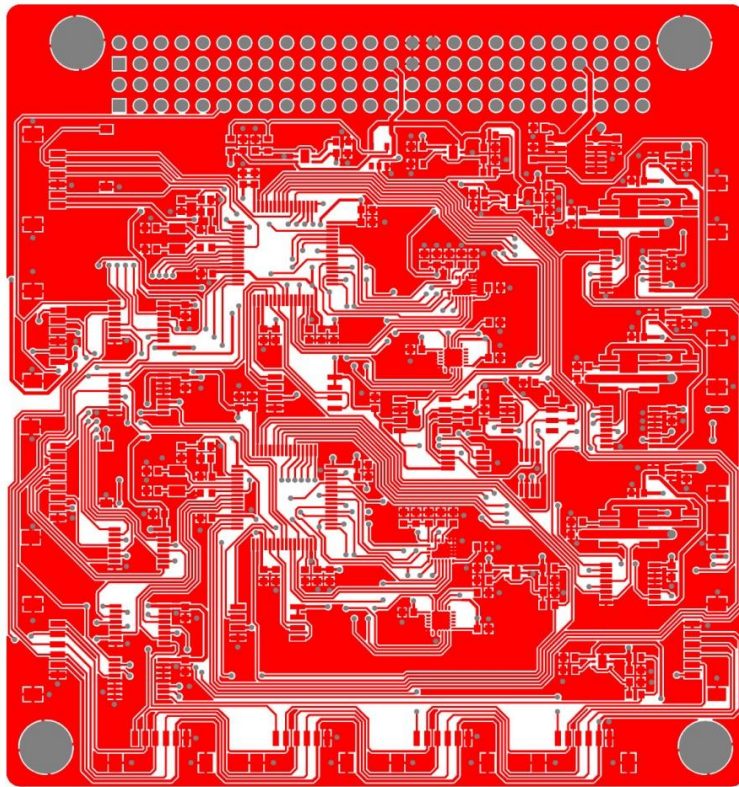
Kontrolleri viik	Nimetus	Funktsioon	Ühendus signaal
1	VBAT	Supply pin	MCU1_3V3
2	PC13	RTC_AMP1, RTC_OUT, RTC_TS	IMU1_EN
3	PC14-OSC32_IN	OSC32_IN	MCU1_26MHz_1
4	PC15-OSC32_OUT	OSC32_OUT	MCU1_26MHz_2
5	PH0-OSC_IN	OSC_IN	MCU1_32MHz_1
6	PH1-OSC_OUT	OSC_OUT	MCU1_32MHz_2
7	NRST	EVENTOUT	MCU1_NRST
8	PC0	ADC1_10	MCU1_SUN2_CS
9	PC1	ADC1_11	MCU1_SUN3_CS
10	PC2	ADC1_12	MCU1_SUN4_CS
11	PC3	ADC1_13	MCU1_SUN5_CS
12	VSSA/VREF-	Supply pin	GND
13	VDDA/VREF+	Supply pin	MCU1_3V3
14	PA0	TIM2_CH1/TIM2_ET, ADC1_0, WKUP1, TIM5_CH1, USART2_CTS, EVENTOUT	MCU1_DR1_REV
15	PA1	TIM2_CH2, TIM5_CH2, SPI4_MOSI/I2S4_SD, USART2_RTS, EVENTOUT, ADC1_1	MCU1_DR1_FWD
16	PA2	TIM2_CH3, ADC1_2, TIM5_CH3, TIM9_CH1, I2S2_CKIN, USART2_TX, EVENTOUT	MCU1_DR2_REV
17	PA3	TIM2_CH4, ADC1_3, TIM5_CH4, TIM9_CH2, I2S2_MCK, USART2_RX, EVENTOUT	MCU1_DR2_FWD
18	VSS	Supply pin	GND
19	VDD	Input only pin	MCU1_3V3
20	PA4	SPI1_NSS/I2S1_WS, SPI3_NSS/I2S3_WS, USART2_CK, EVENTOUT, ADC1_4	FRAM1_CS
21	PA5	TIM2_CH1/TIM2_ET, SPI1_SCK/I2S1_CK, EVENTOUT, ADC1_5	FRAM1_SCK

22	PA6	TIM1_BKIN, TIM3_CH1, SPI1_MISO, I2S2_MCK, SDIO_CMD, EVENTOUT, ADC1_6	FRAM1_SDO
23	PA7	TIM1_CH1N, TIM3_CH2, SPI1_MOSI/I2S1_SD, EVENTOUT, ADC1_7	FRAM1_SDI
24	PC4	ADC1_14	MCU1_MAG_INT1
25	PC5	ADC1_15	MCU1_MAG_INT2
26	PB0	TIM1_CH2N, TIM3_CH3, SPI5_SCK/I2S5_CK, EVENTOUT, ADC1_8	LSM1_INT_M
27	PB1	TIM1_CH3N, TIM3_CH4, SPI5_NSS/I2S5_WS, EVENTOUT, ADC1_9	LSM1_INT2_A/G
28	PB2	BOOT1	MCU1_MAG_3V3
29	PB10	TIM2_CH3, I2C2_SCL, SPI2_SCK/I2S2_CK, I2S3_MCK, SDIO_D7, EVENTOUT	LSM1_INT1_A/G
30	VCAP1	Supply pin	-
31	VSS	Supply pin	GND
32	VDD	Supply pin	MCU1_3V3
33	PB12	TIM1_BKIN, I2C2_SMBA, SPI2_NSS/I2S2_WS, SPI4_NSS/I2S4_WS, SPI3_SCK/I2S3_CK, EVENTOUT	MPU1_CS
34	PB13	TIM1_CH1N, SPI2_SCK/I2S2_CK, SPI4_SCK/I2S4_CK, EVENTOUT	IMU1_SCL, MCU1_MAG_SCLK
35	PB14	TIM1_CH2N, SPI2_MISO, I2S2ext_SD, SDIO_D6, EVENTOUT	IMU1_SDO, MCU1_MAG_MISO
36	PB15	RTC_50Hz, TIM1_CH3N, SPI2_MOSI/I2S2_SD, SDIO_CK, EVENTOUT, RTC_REFIN	IMU1_SDI, MCU1_MAG_MOSI
37	PC6	TIM3_CH1, I2S2_MCK, USART6_TX, SDIO_D6, EVENTOUT	MPU1_INT
38	PC7	TIM3_CH2, SPI2_SCK/I2S2_CK, I2S3_MCK, USART6_RX, SDIO_D7, EVENTOUT	LSM1_DRDY_M
39	PC8	TIM3_CH3, USART6_CK, SDIO_D0, EVENTOUT	RS485_DE2
40	PC9	MCO_2, TIM3_CH4, I2C3_SDA, I2S2_CKIN, SDIO_D1, EVENTOUT	LSM1_CS_M
41	PA8	MCO_1, TIM1_CH1, I2C3_SCL, USART1_CK, USB_FS_SOF, SDIO_D1, EVENTOUT	MCU1_DR_EN

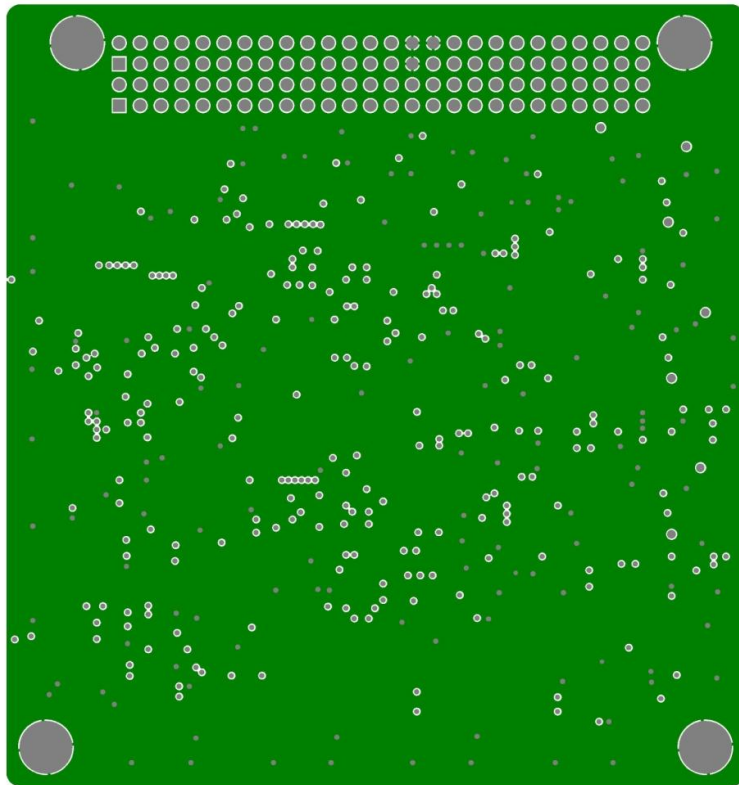
42	PA9	TIM1_CH2, I2C3_SMBA, USART1_TX, USB_FS_VBUS, SDIO_D2, EVENTOUT, OTG_FS_VBUS	LSM1_CS_A/G
43	PA10	TIM1_CH3, SPI5_MOSI/I2S5_SD, USART1_RX, USB_FS_ID, EVENTOUT	MCU1_SUN_3V3
44	PA11	TIM1_CH4, SPI4_MISO, USART1_CTS, USART6_TX, USB_FS_DM, EVENTOUT	MCU1_MAG_CS
45	PA12	TIM1_ETR, SPI5_MISO, USART1_RTS, USART6_RX, USB_FS_DP, EVENTOUT	MCU1_SUN6_CS
46	PA13	JTMS-SWDIO, EVENTOUT	MCU1_SWDIO
47	VSS	Supply pin	GND
48	VDD	Supply pin	MCU1_3V3
49	PA14	JTCK-SWCLK, EVENTOUT	MCU1_SWCLK
50	PA15	JTDI, TIM2_CH1/TIM2_ETR, SPI1_NSS/I2S1_WS, SPI3_NSS/I2S3_WS, USART1_TX, EVENTOUT	MCU1_SUN1_CS
51	PC10	SPI3_SCK/I2S3_CK, SDIO_D2, EVENTOUT	MCU1_SUN_SCLK
52	PC11	I2S3ext_SD, SPI3_MISO, SDIO_D3, EVENTOUT	MCU1_SUN_MISO
53	PC12	SPI3_MOSI/I2S3_SD, SDIO_CK, EVENTOUT	MCU1_SUN_MOSI
54	PD2	TIM3_ETR, SDIO_CMD, EVENTOUT	MCU1_COIL1_I_OUT
55	PB3	JTDO-SWO, TIM2_CH2, SPI1_SCK/I2S1_CK, SPI3_SCK/I2S3_CK, USART1_RX, I2C2_SDA, EVENTOUT	MCU1_SWO
56	PB4	JTRST, TIM3_CH1, SPI1_MISO, SPI3_MISO, I2S3ext_SD, I2C3_SDA, SDIO_D0, EVENTOUT	MCU1_COIL2_I_OUT
57	PB5	TIM3_CH2, I2C1_SMBA, SPI1_MOSI/I2S1_SD, SPI3_MOSI/I2S3_SD, SDIO_D3, EVENTOUT	MCU1_COIL3_I_OUT
58	PB6	TIM4_CH1, I2C1_SCL, USART1_TX, EVENTOUT	TX_BUS1
59	PB7	TIM4_CH2, I2C1_SDA, USART1_RX, SDIO_D0, EVENTOUT	RX_BUS1
60	BOOT0	Dedicated BOOT0 pin	-

61	PB8	TIM4_CH3, TIM10_CH1, I2C1_SCL, SPI5_MOSI/I2S5_SD, I2C3_SDA, SDIO_D4, EVENTOUT	MCU1_DR3_REV
62	PB9	TIM4_CH4, TIM11_CH1, I2C1_SDA, SPI2_NSS/I2S2_WS, I2C2_SDA, SDIO_D5, EVENTOUT	MCU1_DR3_FWD
63	VSS	Supply pin	GND
64	VDD	Supply pin	MCU1_3V3

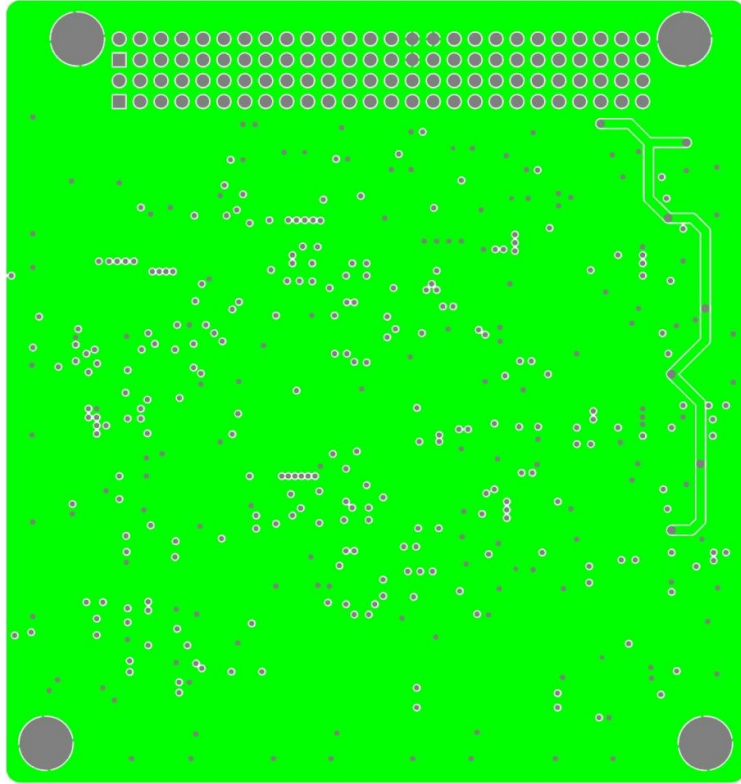
LISA D – Kommertsiaalse ADCS prototüübi trükkplaat



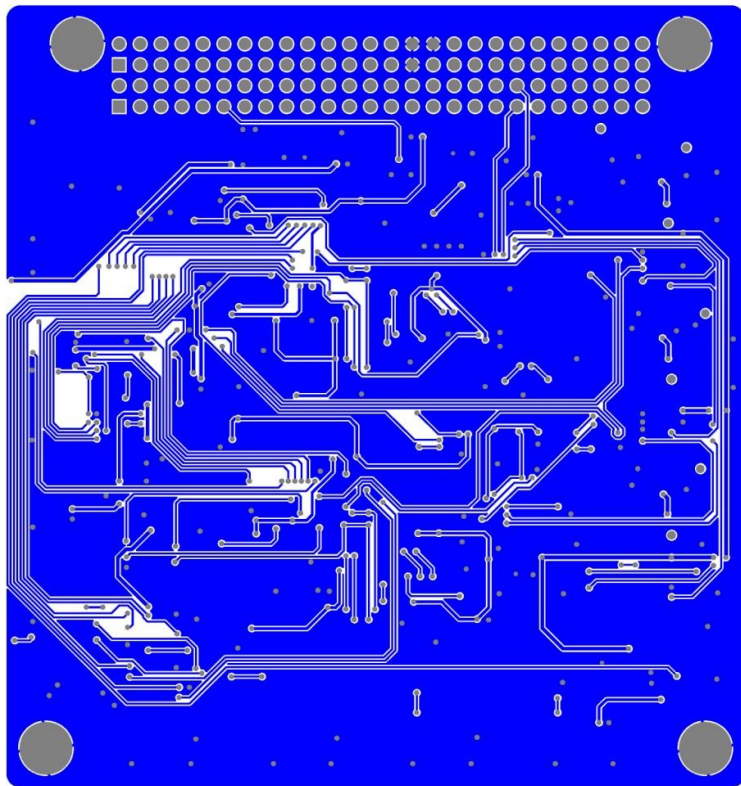
Joonis D.1: Projekteeritud ADCS trükkplaadi pealmine vasekiht



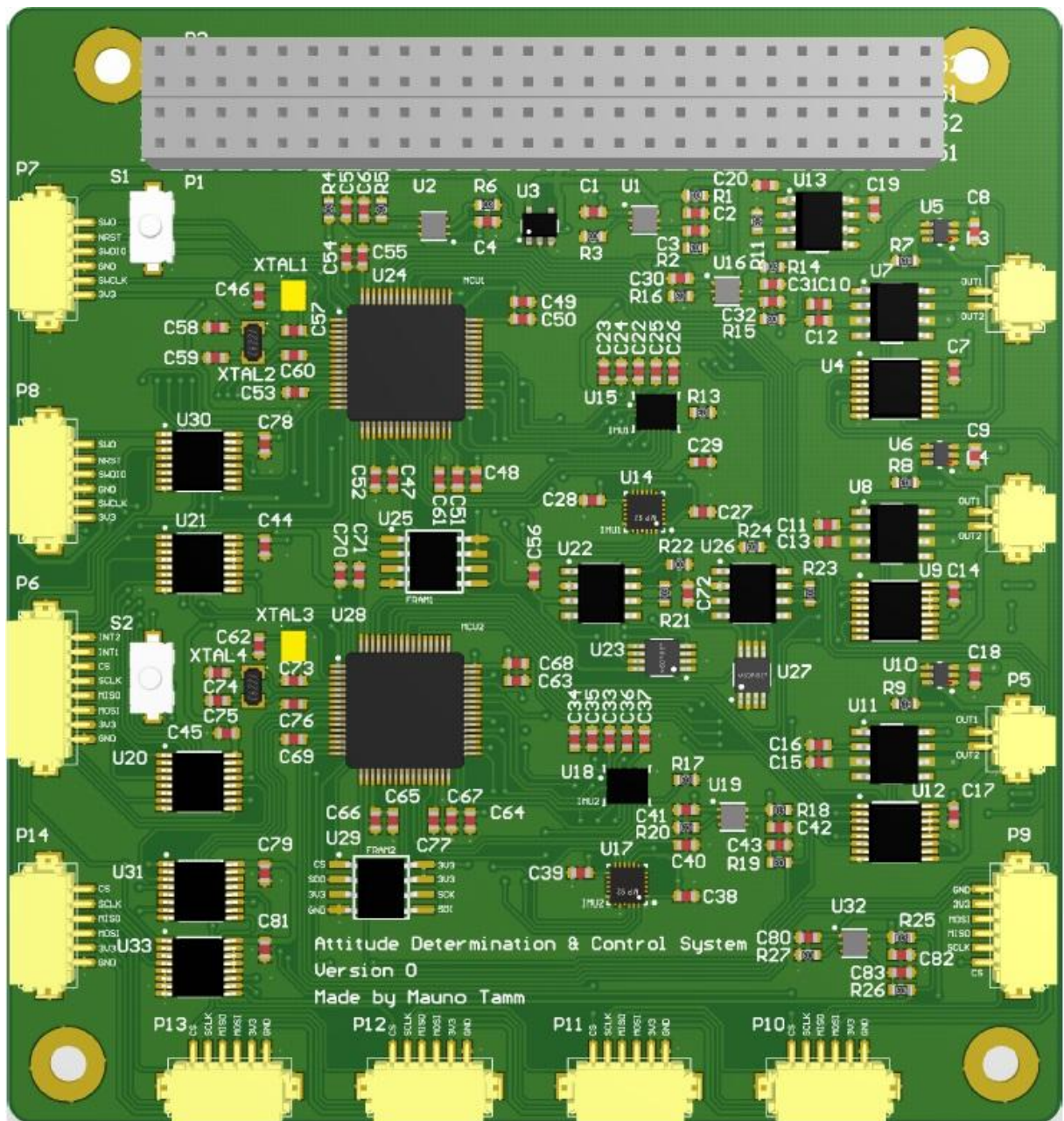
Joonis D.2: Projekteeritud ADCS trükkplaadi GND vasekiht



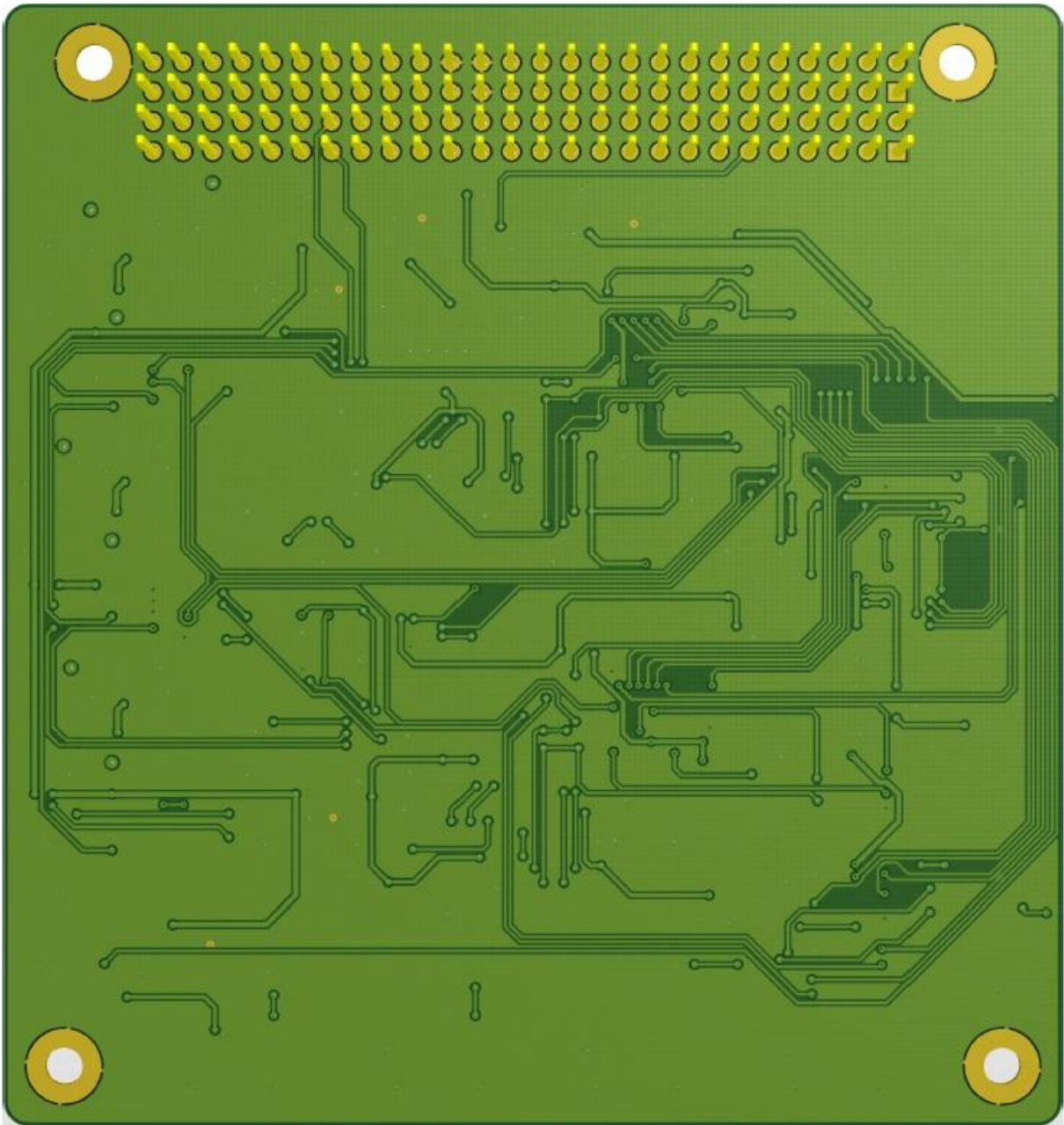
Joonis D.3: Projekteeritud ADCS trükkplaadi vaheline toiteraja lisa vasekiht



Joonis D.4: Projekteeritud ADCS trükkplaadi alumine vasekiht



Joonis D.5: Projekteeritud ADCS PCBA kolmemõõtmeline mudel pealtvaates



Joonis D.6: Projekteeritud ADCS PCBA kolmemõõtmelise mudeli tagumine pool