

TARTU ÜLIKOOL
LOODUS- JA TEHNOLOOGIATEADUSKOND
Füüsika instituut

Hannes Haljaste

**MAGNETVÄLJA SIMULAATORI ARENDAMINE
SATELLIIDI ESTCUBE-1 TESTIMISEKS**

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Juhendaja: M. Sc. Mihkel Pajusalu

M. Sc. Viljo Allik

Kaitsmisele lubatud

Juhendaja

allkiri, kuupäev

Tartu 2014

Sisukord

Lühendid.....	3
Sissejuhatus	4
1. Teooria	5
2. Helmholtzi mähise ehitamine.....	7
3. Mikrokontroller	9
4. Komponentide temperatuur.....	11
5. Poolide elektroonikaplaad	12
6. Tarkvara	18
7. Magnetvälja uurimine	20
Tulemused	22
Kokkuvõte	24
Kasutatud kirjandus.....	25
MAGNETIC FIELD SIMULATOR FOR ESTCUBE-1 TESTING.....	28
Lisad	29
Mõõtmistulemused	29
Elektroonika	30
Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks.....	39

Lühendid

ADC – analoog-digitaalmuundur

DAC – digitaal-analoogmuundur

I²C - *inter-integrated circuit*

SPI - *serial peripheral interface*

USB - universaalne järjestiksin

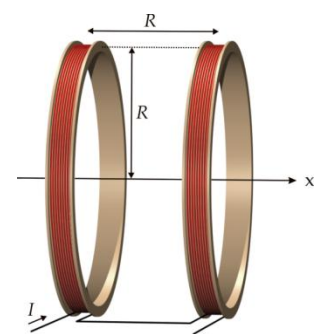
ADCS - *attitude determination and control system*

LCD - vedelkristallkuvar

Sissejuhatus

ESTCube-1 ülesandeks on katsetada elektrilise päikesetuulepurje arendamiseks vajalikke tehnoloogiaid Maa lähiorbiidil. [1] Selleks, et satelliidi liikumist Maa orbiidil kontrollida, on Eesti tudengisatelliidi juurde loodud eraldi meeskond, mis selle alamsüsteemi arendamisega tegeleb. ADCS ehk *Attitude Determination and Control System* on alamsüsteem, mis peab tagama satelliidi asukoha määramise ja juhtimise Maa orbiidil. Selle uurimiseks ja käitumise põhjuste kindlakstegemiseks maakera pinnal on vaja luua kontrollitud magnetväli. Magnetväli peab olema piisavalt tugev, et oleks võimalik teste läbi viia ilma segavate kõrvalmõjudeta: maa magnetväli, mõõtmisvahendite, arvutite ja muude elektrooniliste seadmete poolt tekitatud magnetväljad ja õhutakistus. Vajalik on Maa magnetväljast kuni kuus korda tugevama magnetvälja tekitamine. Sellise tugevusega magnetvälja saab kasutada erinevate sensorite ja seadmete testimiseks.

Homogeense magnetvälja loomiseks on olemas erinevaid lahendusi – üksik pool, Maxwelli mähis, Helmholtzi mähis. Kõige mugavam viis magnetvälja loomiseks ja satelliidi testimiseks on Helmholtzi mähis, kuna selle ehitamine on lihtne ja kergesti teostatav. Selle lahenduse mõtles välja Saksamaa füüsik Hermann von Helmholtz rohkem kui sajand tagasi. Helmholtzi mähis [2] koosneb kahest samasugusest keritud induktiivpoolist, mis on omavahel ühendatud nii, et vool läbiks neid samas suunas. Poolid on üksteisest asetatud kaugusele, mis on võrdne nende raadiusega. Selle abil on võimalik luua homogeenne magnetväli, mille tugevus on sõltuv traadi keerdude arvust ja mähist läbiva voolu tugevusest.



Joonis 1: Helmholtzi mähise joonis. I on voolutugevus, R on pooli raadius ja poolide vaheline kaugus ning x on tekkiva magnetvälja suund. [27]

Tegevusplaan:

1. Leida sobiv lahendus koos vajalike parameetritega magnetvälja tekitamiseks.
2. Kerida vajalikud poolid.
3. Ehitada raam poolidele.
4. Konstrueerida seade, millega tekitada vajaliku suurusega elektrivoolu poolides.
5. Luua vajalik arvutiprogramm elektrivoolu juhtimiseks poolides.
6. Teha vajalikud mõõtmised, et teada saada tegelik magnetvälja tugevus ja homogeenus.

1. Teooria

Induktiivpoolis elektrilaengu liikumise mõjul tekib magnetväli, mille suunda on võimalik teada saada parema käe reegli abil: kui parema käe peopesa on suunatud pooli suunas ja sõrmed näitavad voolu liikumise suunda, siis välja sirutatud põial näitab magnetvälja suunda. Magnetvälja tugevust iseloomustab magnetiline induktsioon B , mille ühikuks on üks tesla, mis on võrdne 10^4 gaussiga.

Helmholtzi mähises tekib kõige tugevam magnetväli kahe pooli keskpunkti, $1/3$ keskele jäävast alast on homogeense magnetväljaga. Helmholtzi mähise keskpunkti magnetinduktsiooni on võimalik leida valemiga (1).

$$B = \frac{8}{5\sqrt{5}} \frac{\mu_0 n I}{r}, \quad (1)$$

kus B on magnetinduktsioon kahe pooli vahel asuvas keskpunktis, μ_0 on magnetiline konstant $4\pi * 10^{-7} \frac{Tm}{A}$, n on keerdude arv ühel poolil, I on mähist läbiv voolutugevus ja r on poolide vaheline kaugus.

Magnetvälja tekitamine elektrivoolu abil toob kaasa juhtme soojenemise. Liigne traadi temperatuuri tõus mõjutab selle takistust ning olenevalt seadme ehitusest võib mõjutada magnetvälja tugevust. Kuna mähist võidakse testimisel kasutada pikemat aega, siis peab olema tagatud, et ka pikema aja jooksul selle temperatuur ei tõuseks liiga kõrgeks. Poolidel tekkivat võimsust, mis eraldub soojusena saab leida valemiga:

$$P = I^2 R, \quad (2)$$

kus P on juhtmes eralduv võimsus, I on voolutugevus ja R on juhtme takistus.

ADCS erinevaid seadmeid on vaja testida teatud kindlates ja muutuvates magnetväljades, simuleerides võimalikult täpselt Maa orbiidil toimuvat. Sellise võimekuse tagamiseks läheb vaja tarkvara, mille abil oleks võimalik tekitada kindla tugevusega magnetvälja. Juhtsüsteemi ülesanne on pakkuda kasutajale võimalikult paindlikku ja kasutajasõbralikku töökeskkonda.

Magnetvälja simulaatori loomiseks kasutati National Instruments LabVIEW visuaalprogrammeerimise keskkonda. Selle abil on võimalik paralleelselt luua kasutajaliides koos programmi algoritmidega. Selline lahendus aitab väga kiirelt luua kasutajasõbralikku ja mugavat kasutajaliidest, jättes rohkem aega programmi algoritmide täiustamiseks ja

parandamiseks. LabVIEW's loodud tarkvara on edasi võimalik kompileerida *dynamic-link libraryiks*, mis võimaldab loodud tarkvara kasutada paljudes teistes programmeerimiskeskkondades. Samuti on LabVIEW keskkonnas olemas *virtual instrument software architecture* (VISA), mille abil on võimalik veaotsingut sooritada ja kasutada erinevaid andmevahetusprotokolle. Seda kasutades on võimalik luua ühendus mikrokontrolleriga, mis korraldab Helmholtzi mähise juhtimist ja sensoritest andmete lugemist.

2. Helmholtzi mähise ehitamine

Poolide kerimiseks sai kasutatud 74 cm läbimõõduga alust. Selle peal keriti kaks 150 keeruga pooli, kasutades selleks 0,74 mm läbimõõduga vasktraati. Pooli mõlema traadi otsa külge sai joodetud juhtmed ning juhtmete teise otsa 4 mm banaani pistikud. Pooli takistust sai mõõdetud multimeetriga Velleman DV850BL, mille määramatust kirjeldab 200 Ω piirkonnas [3] valem:

$$\pm 0,8\% \text{ lugemist} \pm 2 \text{ numbrikohta.} \quad (3)$$

Induktiivsuse ja mahtuvuse mõõtmiseks sai kasutatud MIC-4070D [4] multimeetrit, mille induktiivsuse määramatust kirjeldab 200 mH piirkonnas valem

$$\pm 1\% \text{ lugemist} \pm 2 \text{ numbrikohta} \quad (4)$$

ja mille mahtuvust kirjeldab 2 μF piirkonnas valem

$$\pm 1\% \text{ lugemist} \pm 2 \text{ numbrikohta.} \quad (5)$$

	Pool 1	Pool 2
Raadius	37 cm	37 cm

Keerdude arv	150	150
Traadi läbimõõt	0,74 mm	0,74 mm
Takistus	15,3(3) Ω	15,3(3) Ω
Induktiivsus	46,1(7) mH	46,6(7) mH
Mahtuvus	0,545(7) μF	0,538(7) μF

Tabel 1: Keritud poolide parameetrid.

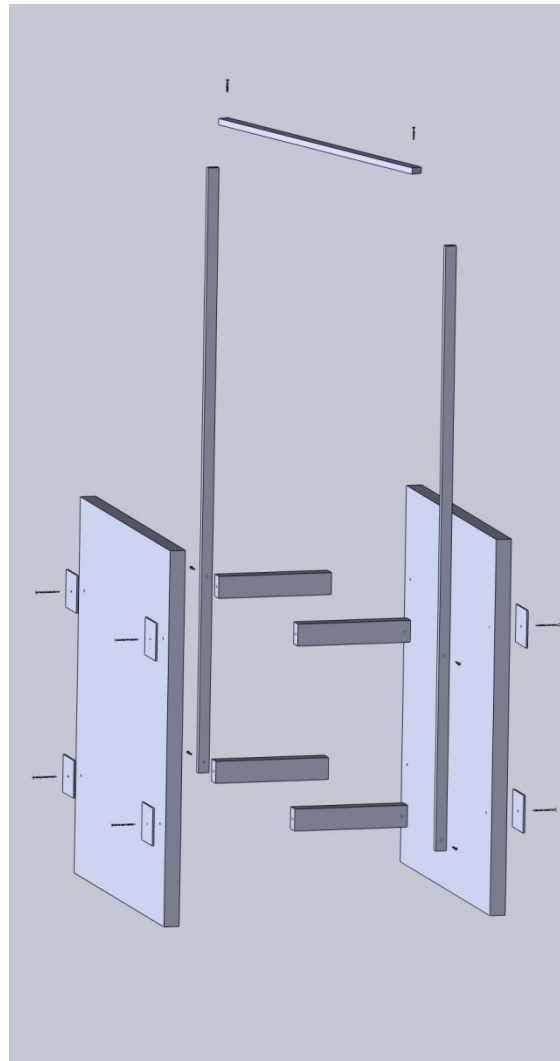
Kasutades valemit (1) saadud poolide väärtustega leiab, et vajalik voolutugevus on ~0,823 A. Seda teades saab Ohmi seadust kasutades leida pingelanguse ühel induktiivpoolil, milleks on ~12,59 V. Sellest lähtuvalt on vaja luua elektroonika, mis suudaks vajalikku pinget ja voolutugevust tekitada.



Pilt 1: Keritud poolid ja valmis ehitatud raam.

Kaks pooli on vaja paigutada üksteisest kaugusele, mis on võrdne nende poolide raadiusega. Selleks on vaja luua vastupidava ja kindla konstruktsiooniga raam, mis mõjutaks magnetvälja omadusi minimaalselt. Ligipääs peab olema olema Helmholtzi mähise keskel asuvale alale, et sinna asetada või riputada testitav seade. Vajadusel peab jääma võimalus konstruktsiooni lahtivõtmiseks ja ümberpaigutamiseks.

Mähise hoidmiseks sai ehitatud raam, mis koosneb kahest penoplastplaadist, mis on puidust klotside, akrüülplaatide ja puidukruvide abil paigutatud üksteisest 37 cm kaugusele. Penoplastist plaatide külge sai kinnitatud poolid kimbusidemete ja peenikeste puidust pulkadega. Klotside külge sai kinnitatud riputusmehhanism, et satelliiti või muud seadet oleks võimalik testida täpselt Helmholtzi mähise keskel.



Joonis 2: Helmholtz mähisele mõeldud raami laetusjoonis.

Nimi	Kirjeldus	Märked	Kogus
Penoplast plaat	Plaadid, mille külge kinnitatakse poolid	1200 x 1000 mm	2
Puidust klots	Seab kahe penoplastist plaadi vahekauguse	370 mm	4
Puidukruvi	Kinnitab omavahel penoplast plaadi ja puidust klotsi	M6 x 100 mm	8
Akrüülplaat	Aitab kruvil suruda penoplast plaati puidust klotsi vastu	80 x 80 mm	8
Puidust pulk	Toetab puidust latti	1930 mm	2
Puidust latti	Võimaldab kinnitada riputusmehhanismi	1030 mm	1
Puidukruvi	Puidust lati ja pulkade kinnitused raami külge	M6 x 60 mm	6

Tabel 2: Helmholtzi mähise raami juppide nimekiri.

3. Mikrokontroller

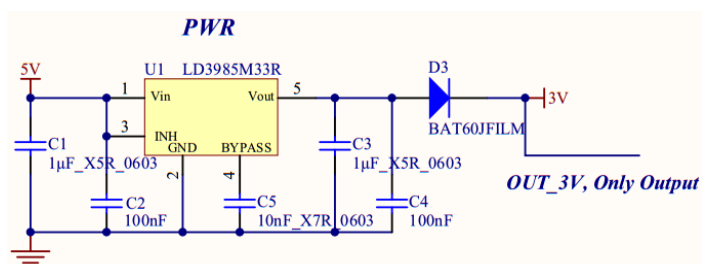
Arvutiga suhtlemiseks ja elektroonika juhtimiseks läheb vaja eraldi elektroonikat. Kõige mõistlikumaks osutus kasutada mikrokontrollerit, et kasutajale luua võimalus Helmholtzi mähise kontrollimiseks. Mikrokontroller pidi omama teatud funktsionaalsust, et seda kasutada magnetvälja simulaatori juhtimiseks:

1. USB andmevahetusliides side pidamiseks arvuti ja juhtelektroonika vahel,
2. Digitaal-analoogmuundur volutugevuse kontrollimiseks poolides,
3. Analoo-digitaalmuundur erinevate sensorite kasutamiseks,
4. I²C edasiarenduste võimaldamiseks.

Olemasolevatest võimalustest sai välja valitud STMicroelectronics poolt pakutav arendusplaat STM32F4Discovery [5]. Sellel asuvaks mikrokontrolleriks on STM32F407VGT6 [6], millel on ARM® Cortex™-M4 32-bitine RISC arhitektuuril põhinev tuum. Discovery plaadi muudab kasulikuks asjaolu, et suurem osa sisend/väljundid ja toitejalad on välja toodud standardse 2,54 mm pistikutena. Seda ära kasutades saab loodava elektroonika plaadi otse arendusplaadi külge kinnitada.

Discovery plaadil oleva mikrokontrolleri võrdluspinge sisend on ühendatud 3.3 V pingeregulaatori LD3985M33R [7] külge, mille väljundis on schottky diod BAT60JFILM [8], mida näitab Joonis 3. Sellel tekkinud pingelangus sõltub volutugevusest ja iga kivi iseärasustest. Andmelehe väitel tekib 100 mA juures tüüpiline pingelangus 350 mV. Parema ülevaate saamiseks sai

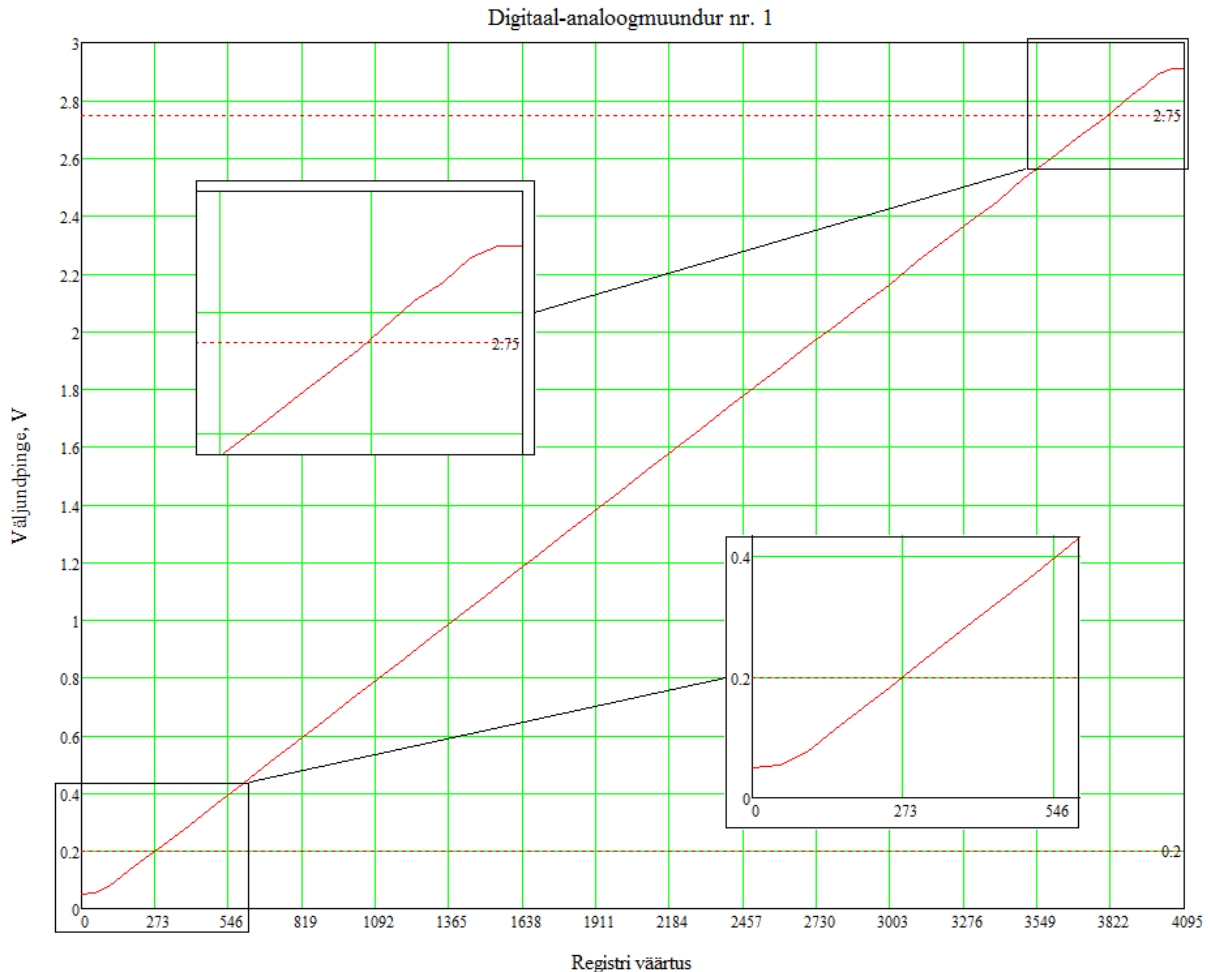
mikrokontrolleri pingele ülemõõdetud. 3 V väljundpinge testimisel STM32F4Discovery arendusplaadi väljundil multimeetriga 20 V piirkonnas, mida iseloomustab valem $\pm 0,8\%$ lugemist ± 3 numbrikohta,



Joonis 3: STM32F4Discovery arendusplaadi 3 V toite skeem. [24]

oli tulemuseks 2.95(5) V. Kuna STM32F4Discovery arendusplaadil on 3 V väljund ühendatud võrdluspinge sisendisse, siis on saadud tulemus digitaal-analoog- ja analoo-digitaalmuundurite võrdluspingeaks. Vastavalt sellele tuleb koostada induktiivpoolide

juhtimiseks elektroonika. STM32F407VGT6 [9] andmelehte lugedes tuleb välja, et digitaal-analoogmuundur ei ole oma olemuselt nõ. *rail-to-rail*. Digitaal-analoogmuundur [9] on alt ja ülevalt piiratud 0,2 V pingega, kui on kasutusel väljundpuhver. Sellest tulenevalt sai läbi viidud testid kontrollimaks DAC töö korrasolekut ja leida vahemik, kus oleks seda võimalik kasutada poolide juhtimiseks.



Joonis 4: Digitaal-analoogmuunduri väljundpinge sõltuvus registri väärtusest. DAC nr. 2 käitub sarnaselt.

Saadud tulemustest saab järeldada, et mõlemad digitaal-analoogmuundurid sobivad magnetvälja simulaatori juhtimiseks nende lineaarses piirkonnas, mis jääb 0,2 ja 2,75 V vahele. Kuna mähisel on vaja genereerida magnetvälja mõlemas suunas, siis 0,2 V piirang ülevalt ja alt ei muuda digitaal-analoog konverteri kasutamist võimatuks. Elektroonika tuleb koostada selliselt, et magnetvälja null väärtus mähisel jääks muunduri väljundi keskpunkti.

4. Komponentide temperatuur

Helmholtzi mähises magnetvälja tekitamine vajab paratamatult suurt võimsust, mis eraldub soojusenergiat. Liigne temperatuuri tõus võib lõhkuda komponente ning suurendab määramatust. Selle vältimiseks on vaja radiaatorite ja vajadusel ventilaatorite lisamist. Kuigi soojusenergia liigub kuumemalt kehalt külmemale, ei toimu see hetkeliselt. Selle kandumist ühelt kehalt teisele takistab soojustakistus. Selle suurust pooljuhilt väliskeskkonda komponendi puhul kirjeldab valem (6) [10].

$$\theta_{JA} = \frac{T_J - T_A}{P_D}, \quad (6)$$

kus θ_{JA} on soojustakistus pooljuhilt väliskeskkonda, T_J on pooljuhi maksimaalne lubatud temperatuur, T_A on väliskeskkonna temperatuur ja P_D on võimsus, mis eraldub soojusenergiat. Vajaliku radiaatori leidmiseks tuleb soojusjuhtivus θ_{JA} lahti kirjutada kolme komponendina.

$$\theta_{JA} = \theta_{JC} + \theta_{CS} + \theta_{SA}, \quad (7)$$

kus θ_{JA} on soojustakistus pooljuhilt pakendile, θ_{CS} pakendilt radiaatorile ja θ_{SA} radiaatorilt väliskeskkonda. Valemeid ((6),(7) kasutades on võimalik leida maksimaalne lubatud radiaatori soojustakistus.

$$\theta_{SA} = \frac{T_J - T_A}{P_D} - \theta_{JC} - \theta_{CS} \quad (8)$$

T_A puhul tuleb arvestada, et väliskeskkonnaks olev õhk radiaatori või kivi ümber samuti soojeneb ning ei püsi ülejäänud ruumiga samal temperatuuril. Sellest lähtuvalt sai arvestatud T_A võrdseks 50 °C [10].

5. Poolide elektroonikaplaat

Vajaliku voolu tekitamiseks poolidel on vaja eraldi elektroonikat. Selleks sai tehtud lisa elektroonikaplaat, mis kinnitub STM32F4Discovery arendusplaadi külge.

Suure voolu ja pinge tekitamiseks on vaja eraldi toiteplokki, kuna mikrokontroller ei suuda poole ise juhtida. Selleks sai kasutatud 24 voldist ja 3 amprist sülearvuti toiteplokki, mis on mõistliku hinnaga ja laialdaselt saadaval. Toiteploki väljundi otsaks on 2,5 mm sisemise ja 5,5 mm välimise läbimõõduga alalisvoolu pistik.

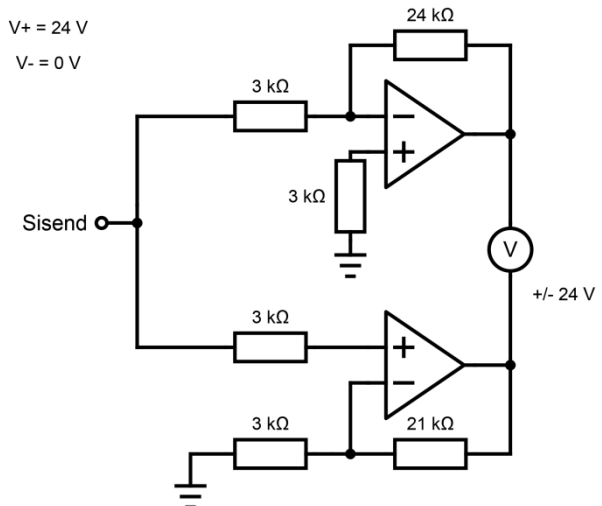
Mudel: YU2403	Sisend	Väljund
Pinge	100-240 V	24 V
Voolutugevus	1,6 A	3 A
Sagedus	50/60 Hz	-

Tabel 3: Toiteploki sisend pinge ja väljundpinge väärtused.

STM32F4Discovery kasutab toitepingena 5 V. Selleks on vaja olemasolevast 24 voldisest toiteplokkist tekitada vajalik pinge arendusplaadile. 5 V tekitamiseks sai kasutatud toiteregulaatorit MC78M05CTG [11], mis muudab kuni 35 V sisendpinge viie voldiseks väljundpingeks. Discovery vajab alla 100 mA voolu, sellest tulenevalt on võimalik leida, et maksimaalne võimsus, mis eraldub soojusena, on 2 W. Toiteregulaatori soojustakistus ilma radiaatorit kasutamata θ_{JA} on $70\text{ }^{\circ}\text{C/W}$. Kasutades valemit (6) saab leida, et kivi kuumeneb $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ väliskeskkonnas $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ni, mis ületab regulaatori maksimaalset lubatud temperatuuri. Sellest tulenevalt on vaja lisada radiaator üleliigse soojuse paremaks ära juhtimiseks. MC78M05CTG pakendiks on TO-220, mille soojustakistus θ_{JC} on $5\text{ }^{\circ}\text{C/W}$, kus θ_{CS} jääb $1\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ juurde. Valemist (8) tulenevalt peab radiaatori soojustakistus θ_{SA} olema madalama kui $44\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ väliskeskkonna temperatuuril, et toiteregulaator töötaks normaaltingimustes.

Poolide juhtimiseks oli vaja luua elektroonika, millega saaks ajas sujuvalt muuta poolidelt pinget. Selleks sai valitud sillatud operatsioonivõimendi lahendus, mis võimaldab luua ühepoolaarsest pingest kahepoolaarne pinge poolil, kus väljundite vahele ühendatakse pool. Selle lahenduse juures kuni kahekordistub alalisvoolu pinge amplituud poolil võrreldes toitepingega. Selline seisund saavutatakse, kui üks operatsioonivõimendi töötab mitte inverteeriva ja teine inverteeriva võimendina. Kasutades 24 V toidet saab sillatud võimendi väljundite vahel tekitada kuni $\pm 24\text{ V}$.

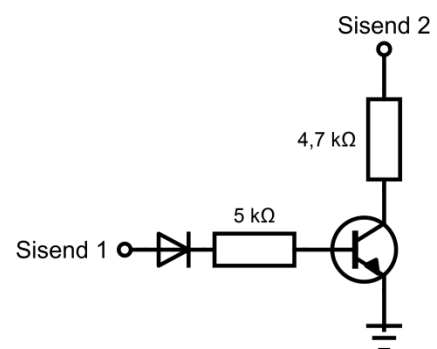
Kuna tavaline operatsioonivõimendi ei suuda vajalikku võimsust tekitada, on vaja kasutada võimsusvõimendit. Poolide juhtimiseks sai valitud LM4766 AB klassi võimsusvõimendi. Ühte pakendisse on sisse ehitatud kaks võimendit, mis sobib hästi Helmholtzi mähise juhtimiseks välja pakutud lahendusega ning võttes elektroonikaplaadil vähem ruumi. LM4766 omab ülekuumenemise kaitset, mis sulgeb väljundi, kui temperatuur ületab pooljuhil 165 °C.



Joonis 5: Sillatud võimendi tööpõhimõtet tutvustav elektroonikaskeem.

LM4766 on peamiselt mõeldud töötama kahepolaarse pingega. Toiteplokid, mis omavad sellist funktsionaalsust on kallid ja ei sobi oma konstruktsiooni poolest loodud lahendusega. Teise lahendusena on võimalik võimsusvõimendit juhtida ühepolaarse toitega, luues vajalik virtuaalmaad tasand. Reaalsed voolud, mis sellel tasandil tekivad, jäävad milliamprite piirkonda. Lihtsad takistite ja transistori lahendused on ebatäpsed ning muudavad seadme kalibreerimise hiljem keeruliseks. Nendest nõuetest lähtuvalt sai kasutatud virtuaalmaad loomiseks Texas Instruments *rail splitter*it TLE2426 [12], mis tekitab 24 V toitepinge korral väljundisse 12 V maad. LM4766 kasutab virtuaalmaad, et väljund vabastada *mute mode*ist ning võimaldab väljundit juhtida selle suhtes.

LM4766'1 on olemas helisummutusahel, millega on võimalik väljund nõ. kinni panna. Seda ära kasutades ei teki väljundisse võimsust ajal, kui kasutaja lisab seadme vooluvõrku või ei soovi parajasti seadet kasutada. *Mute mode* kontrollimist võimsusvõimendi jalgadel kujutab Joonis 6. Sisend 2 on ühendatud LM4766 [13] mute A ja mute B jalgade külge ning sisend 1 on ühendatud mikrokontrolleri väljundiga. Võimsusvõimendi väljundite avamiseks on vaja mõlemast jalast ammutada vähemalt 0,5 mA. Vajaliku takistuse R_m saab leida andmelehes [13] olevast valemist:

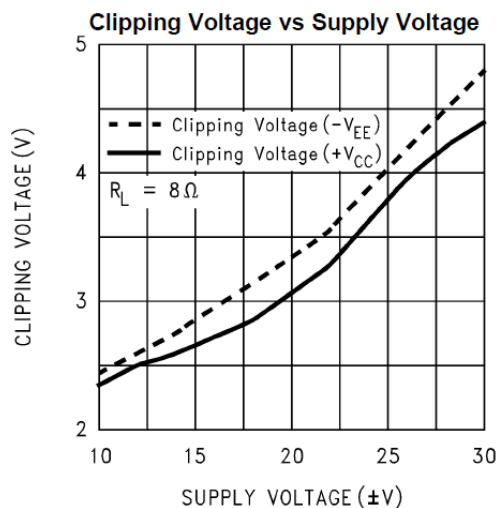


Joonis 6: Väljundi sulgemise ja avamise elektroonikaskeem.

$$R_m \leq \frac{(|-V_{EE}| - 2,6 V)}{I_{pin}}, \quad (9)$$

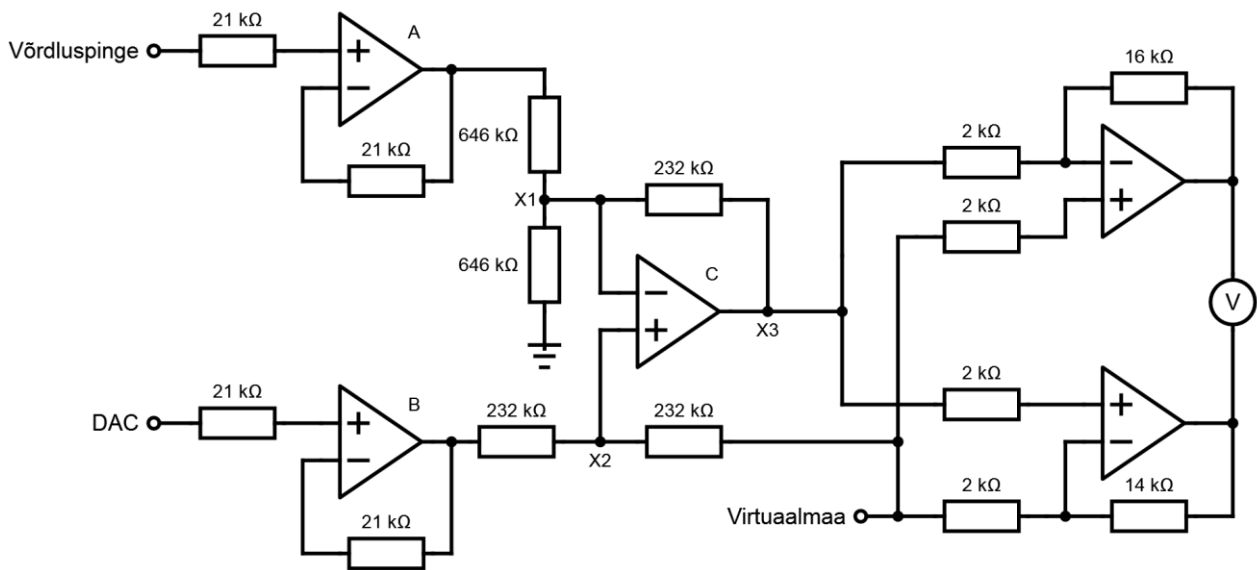
kus $-V_{EE}$ on virtuaalmaad ja tegeliku maad vaheline pingelang ning $I_{pin} \geq 0,5 \text{ mA}$. Sillatud skeemi korral tuleb mõlemat *mute* jalalt ammutada kokku rohkem kui 1 mA voolu 12 V virtuaalmaad pealt. Andmelehega tutvudes leiab soovitus, et mõlemalt jalalt võiks maha joosta 2 mA suurune vool. Neid andmeid kasutades valemiga (9) on võimalik leida, et vajaliku takisti väärtus on 4,7 k Ω . Väljundi avamise ja sulgemise kontrollimiseks on kasutatud NPN transistorit, mille sisendit 1 (Joonis 6) juhitakse mikrokontrolleri väljundist.

Nagu digitaal-analoogmuundur ei suuda LM4766 oma väljundit maksimaalse ja minimaalse pingele tõmmata. Andmelehes olev graafik, mis on kujutatud Joonis 7, illustreerib LM4766 käitumist. Selle tulemusena tuleb võimsusvõimendi tööd juhtida virtuaalmaad suhtes, et saavutada lineaarselt muutuv magnetvälja sõltuvus induktiivpoolidel tekkiva pingega. Digitaal-analoogmuunduri väljundist, 0,2 kuni 2,75 V, sobiv pingele saamiseks sillatud võimendi jaoks, $\pm 19 \text{ V}$, on vaja luua elektroonika sisendsignaali nihutamiseks.



Joonis 7: LM4766 andmelehest maksimaalse ja minimaalse pingele lõikamine seoses kahepoolase toitepingega.

Elektroonika skeemi paremaks tutvustamiseks eeldame, et digitaal-analoogmuunduri väljundpinge jääb vahemikus 0 – 3 V. Sillatud võimendit kasutamiseks virtuaalmaad suhtes, tuleb skeemis (Joonis 5) maad ühendused asendada 12 V virtuaalmaad TLE2426 väljundiga, mida kujutab Joonis 8. Vastavalt sellele peab operatsioonivõimendi C väljund X3 (Joonis 8) muutuma 12 V suhtes vahemikus 10,5 V kuni 13,5 V. Kuna mikrokontroller ei suuda oma sisend/väljunditel taluda ühe 5 V pinget, siis on vaja kuidagi kaitsta seda võimsusvõimendi juhtimiseks vajavate kõrgemate pingete eest. Selleks sai lisatud operatsioonivõimendid A ja B (Joonis 8), mis töötavad puhvritena. Operatsioonivõimendi C inverteerivaks sisendiks on pool digitaal-analoogmuunduri võrdluspingest ehk 1,5 V. See saavutatakse kasutades kolme takistit signaali X1 (Joonis 8) ümber, mis kasutavad inverteeriva summaatori ja pingejaguri omadusi. See tekitab olukorra, kus DAC väljundpinge on nihutatud 1,5 V alla poole ja võimaldab signaalil kõikuda null punkti ümber, -1,5 kuni 1,5 V. Selleks, et saavutada vajalik signaal, on vaja pinget tõsta 12 V võrra. See saavutatakse mitte inverteerivas sisendis asuva summaatoriga.



Joonis 8: Induktiivpoolil (joonisel tähistatud voltmeetrina) kahepoolarset pinget tekitav elektroonika skeem. Pinget juhtimine toimub digitaal-analoogmuundurist.

Operatsioonivõimenditena kasutati Texas Instruments LM258't [14]. Uurides nende integraalskeemide andmelehte [15] tuleb välja, et alla 0,6 V ei suuda ehitusest tulenevalt PNP transistor voolu ammutada. Selleks on 50 μA vooluregulaator, mis seda madala pinget juures teostab. Kuna signaali X1 (Joonis 15) peale tekib kombinatsioon virtuaalmaa 12 V ja digitaal-analoogmuunduri 0 kuni 3 V, siis sellest tulenevalt ammutab operatsioonivõimendi B pidevalt voolu. Sellest tulevalt peab takistite väärtused valima piisavalt suured, et saavutada B väljundis lineaarsus 0 - 0,6 V juures. Sellest tulenevalt peab tähelepanu pöörama takistite tolerantsile. Valides operatsioonivõimendi A (Joonis 8) väljundis tekkiva pingejaguri ning leides halvima juhu kahe 646 k Ω 1% takisti peal, saame 3 V pinget juures soovitud 1,5 V asemel 1,515 V. Saadud määramatus võimendatakse sillatud võimsusvõimendil 16 korda, mis tekitab poolidel 240 mV nihket nullpunktist. Määramatuse vähendamiseks sai kasutatud 0,1% tolerantsiga takisteid. Parema täpsuse saavutamiseks vähendab kasutaja aega, mis kulub seadme kalibreerimisele tarkvaraliselt.

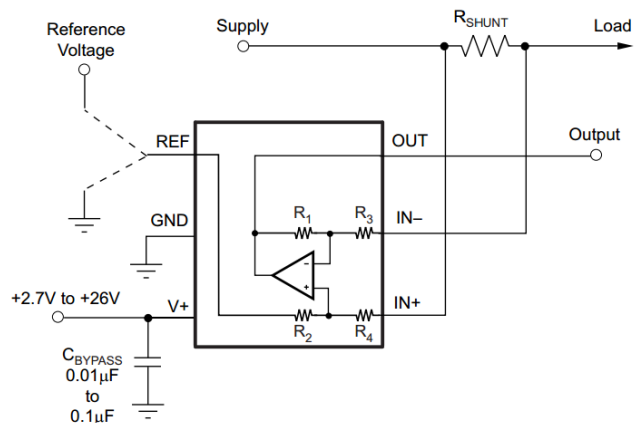
Võimsusvõimendi töö käigus tekib paratamatult soojusenergiat, mis tuleb kivitlt ära juhtida. Selleks tuleb valida sobiv radiaator, mis suudaks maksimaalsel võimsusel töötades tagada LM4766 normaaltingimustes töötamise. Teoreetiline maksimaalne võimsuse eraldus P_{DMAX} sillatud võimendil on võimalik leida andmelehes [13] antud valemiga:

$$P_{DMAX} = 4 * \frac{V_{CC}^2}{2\pi^2 R_L}, \quad (10)$$

kus V_{cc} on maksimaalne pinge langus ning R_L pooli takistus. 24 V toiteploki ja 15,3 Ω takistuse korral osutub maksimaalseks võimsuseralduseks ligikaudu 7,63 W. Teades samuti θ_{JC} , mis on 1 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$, ja θ_{CS} , mis termopastat kasutades on 0,2 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$, on võimalik välja arvutada valemit (8) kasutades maksimaalne radiaatori lubatud soojustakistus. 50 $^{\circ}\text{C}$ väliskeskkonna ja 155 $^{\circ}\text{C}$ pooljuhi temperatuuril saadud tulemuse, 12,56 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$, alusel sai valitud radiaator, mis tagab komponendi töötamise normaaltingimustes. LM4766 on kaitstud ülekuumenemise eest, mis aktiveerub 165 $^{\circ}\text{C}$ juures, kuid tuleb tagada, et seda temperatuuri tavatingimustes seadet kasutades ei saavutata.

Seade ise pannakse kinnisesse karpi, kus algselt puudub õhuringlus. Selle tulemusena tõuseb õhutemperatuur karbis, mis mõjutab elektroonika määramatust. Lisaks võib aktiveeruda ülekuumenemise kaitse ja isegi lõhkuda komponente. Selle vältimiseks sai lisatud elektroonika plaadile 24 V alalisvoolu ventilaatori lisamise võimalus, mis juhiks tekkinud soojuse karbist välja.

Magnetvälja tugevus Helmholtzi mähises sõltub induktiivpooli läbivast voolutugevusest. Kasutatud lahendus magnetvälja tekitamiseks kontrollib poolidel pinget, mis on otseselt seotud poolide takistusega. Reaalne poolidele tekkiv voolutugevus võib sõltuda erinevatest teguritest: pooli temperatuurist tekkiv takistuse muutus, ühendusjuhtmete pikkus, ühendusklemmide juhtivus ja muud

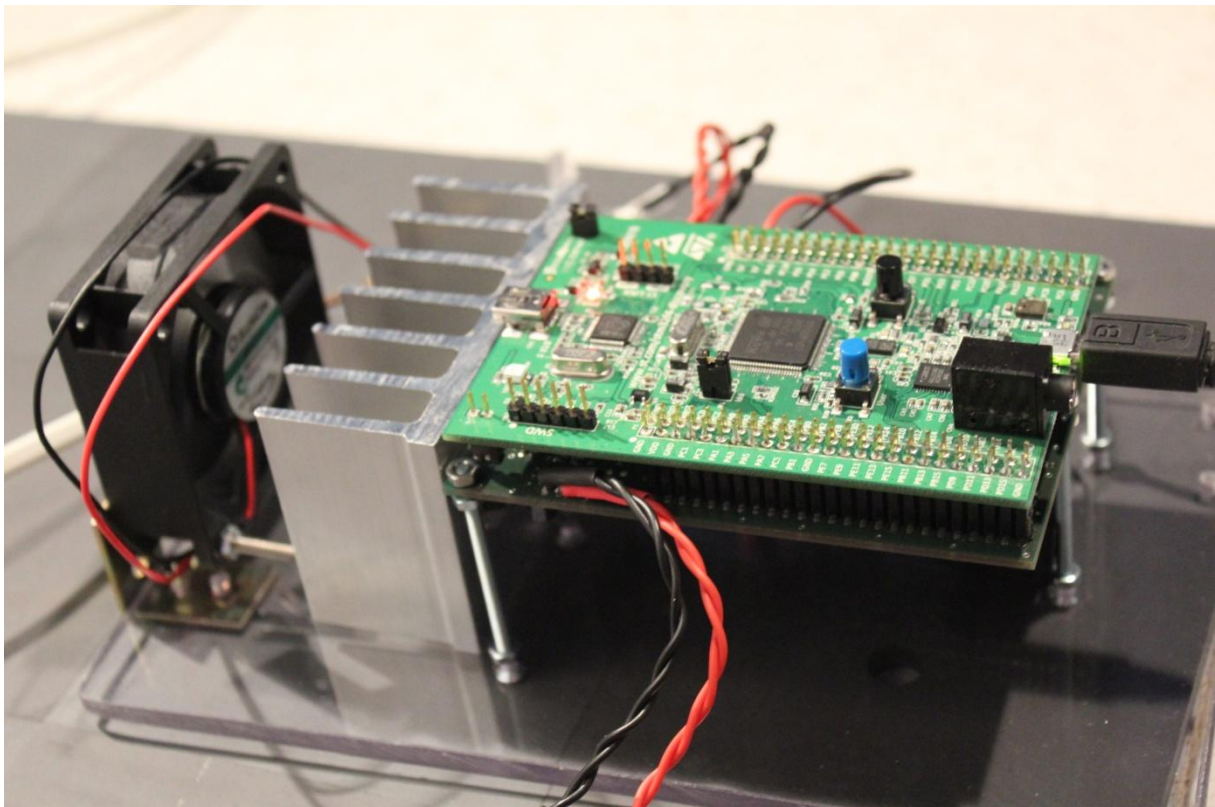


Joonis 9: INA199 tööpõhimõtet tutvustav skeem. [29]

parasiittakistused. Tagasiside ja voolutugevuse kontrollimiseks sai lisatud elektriskeemi Texas Instruments INA199A2 [16] voolumõõtmis skeem. Nende abil on võimalik mõõta pingelangust šunt takistil ja välja arvutada tegelik voolutugevus, mis läbib pooli, kasutada oomi seadust. INA199 suudab mõõta pinge langust takistil mõlemas suunas ja nii kõrgema kui ka madalama toitepinge pealt, tehes sellest parima valiku praeguse lahenduse juures. Kahepolarse voolu mõõtmiseks vajab voolujälgija võrdluspinget. Selleks sai kasutatud ISL21010, mis tekitab 1,5 V pinge REF sisendil (Joonis 9). INA199 väljundit mõõdetakse STM32F407VG mikrokontrolleri analoog-digitaalmuunduriga ja voolutugevus poolis leitakse tarkvaraliselt.

Maksimaalne voolutugevus, mis jadamisi ahelas tekib ühe pooli peal jääb 1,3 A juurde. Sellest tulenevalt sai leitud, et vajalik šunt takisti väärtus peab olema 0,01 Ω , et mõõta voolutugevust mõlemas suunas. INA199A2 võimendus A on 100, mille tulemusena tekib väljundisse OUT (Joonis 9) 0,2 – 2,8 voldine pinge, vastavalt voolutugevusele ja suunale, mille nullpunktiks on 1,5 V.

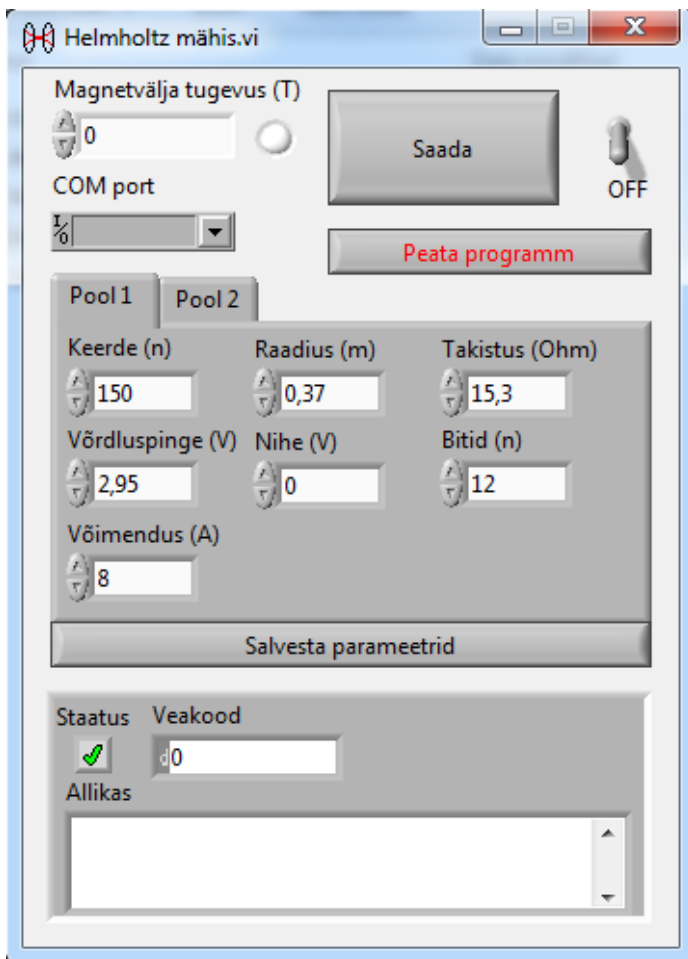
STM32F407VG mikrokontrolleril on palju lisavõimalusi ümbritsevaga suhtlemiseks. Nende võimaluste hilisemaks kasutamiseks on lisatud vajalikud sisend/väljundid elektroonika plaadile. Analoog-digitaalmuunduritega saab temperatuuri sensoreid kasutades jälgida Helmholtzi mähise poolide soojenemist. SPI ja I²C loovad võimaluse Helmholtzi mähist edasi arendada, tekitamaks kuni kolmedimensionaalse magnetvälja simuleerimist. Seda on võimalik teostada eelpool välja pakutud elektroonika abil ning lisades mikrokontrolleri või digitaal-analoogmuundurid, mis suudab nimetatud siinidel suhelda. Selline lahendus välistab mitme USB liidese kasutamise ning lihtsustab kasutaja võimalusi magnetvälja loomiseks. Siine kasutades saab lisada erinevaid lisavõimalusi: magnetomeetrid, temperatuuri sensorid ja muud lisavahendid.



Pilt 2: Valmis ehitatud seade mähise juhtimiseks ilma korpuseta.

6. Tarkvara

Helmholzi mähise juhtimiseks loodi kasutajaliides, mille kaudu kasutaja saaks magnetvälja tugevust mugavalt muuta. Läbi kasutajaliidese on võimalik seadet kalibreerida, kasutades selleks vastavat vahelehte pool 1 või pool 2 (Joonis 10). Vahelehtede esimeses reas olevad sisendid sisaldavad pooli reaalseid parameetreid: keerdude arv, raadius ja takistus. Teisel real asuvad digitaal-analoogmuunduri parameetrid: võrdluspinge, nihe (*offset*) ja bittide arv. Kolmandal real asub elektroonika plaadi signaali võimendus. Selleks, et iga kord, kui programm käivitatakse, ei peaks uuesti kõik parameetreid sisestama, on võimalik need salvestada. Parameetrid salvestatakse programmiga samasse kausta config.ini faili. Programm otsib käivituses iga kord seda faili, kui seda ei leita, siis luuakse uus fail algväärtustega. Loodud kasutajaliidest kasutades ei ole võimalda keerukamaid magnetvälju simuleerida. Selle võimaluse loomiseks sai kasutajaliidest programmeerides loodud kõik vajalikud alamprogrammid, et kasutaja saaks vajadusel simuleerida ajas muutuvat magnetvälja.



Joonis 10: Helmholtz mähise tarkvara kasutajaliides.

LabVIEW abil on võimalik samadest alamprogrammidest luua dynamic-link library ning neid kasutada teistes programmeerimis keskkondades. Kuna lähtekoodi abil ei ole võimalik ilma LabVIEW'd omamata programmi jooksutada, sai programm koos lähtekoodi, dokumentatsiooni ning muu vajalikuga kompileeritud installerijasse. Helmholtzi mähise tarkvaraga on samuti kaasas programm erinevatest sensoritest tulemuste saamiseks – magnetomeeter, digitaalsed ampermeetrid ja temperatuurisensorid.

Mikrokontrolleri ja arvuti vahel sai kasutatud virtuaal jadaväratit, mis on realiseeritud USB andmevahetusliidesel. Selleks on olemas eraldi draiver [17], mida STMicroelectronics pakub. Tarkvara kasutamiseks on vajalik selle draiveri installeerimine. Mikrokontroller tegutseb vastavalt saadud käskudele, mis talle saadetakse läbi andmevahetusliidese. Kõikide käskude lõppu tuleb saata uue rea kood 0x0A, tagasi saadetud andmetel on samuti uue rea kood lõppu lisatud. Selle töö käigus realiseeritud käsud on välja toodud Tabel 4.

Käsu kuju	Kirjeldus	Tagastab
DACDX0xFX0xF	Võimaldab saata mõlemale digitaal-analoogmuundurile väljundpinge registriväärtused	-
DAC[1,2,D]X0xF	Võimaldab saata ühele või kahele digitaal-analoogmuundurile väljundpinge registriväärtuse.	-
MUTEALL	Sulgeb kõik väljundid	-
OPENALL	Avab kõik väljundid	-
SOPENX[1,2]	Avab valitud väljundi	-
MFGET	Magnetomeetrist lugemi saamiseks.	12-baidine magnetomeetri registre väärtused
CPUT	STM32F407VG mikrokontrolleris olevast temperatuuri sensorist väärtuse lugemine.	Temperatuur kuueteistkümnendarvuna
AD1, AD3	Elektroonika plaadile välja toodud analoog-digitaalmuundurite sisendpinge väärtus.	Registri väärtus 3 baiti
AMP1, AMP2	Digitaalse ampermeetri väärtuste mõõtmise analoog-digitaalmuunduriga.	Registri väärtus 3 baiti
Muud käsud	Kui mikrokontrolleris ei ole saadetud käsk realiseeritud, siis saadetakse tagasi veateade.	NaN

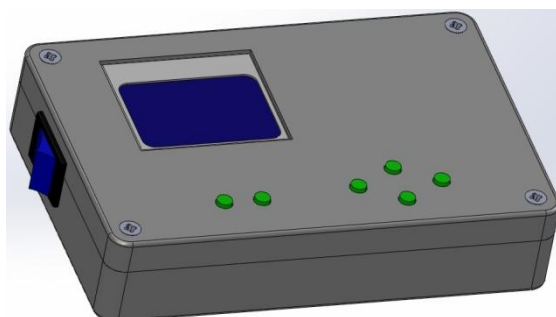
Tabel 4: Mikrokontrolleris realiseeritud käsud. Nurksulgudes olevatest väärtustest valida üks. 0xF asendada kolme baidise väärtusega, mis kirjutatakse registrisse.

7. Magnetvälja uurimine

Magnetvälja testimiseks on vaja lahendust, kuidas selle tugevust ja homogeensust mõõta. Magnetvälja sensorina kasutati Honeywell HMC5883L [18] kolmeteljelist digitaalset kompassi, mis võimaldab magnetvälja mõõta vahemikus $\pm 800 \mu\text{T}$. Elektroonika kivile on sisse ehitatud kõik vajalikud funktsioonid ja ühendus käib üle I²C andmevahetusliidese. Digitaalsel kompassil on sisse ehitatud 12-bitine analoog-digitaalmuundur, mis tagastab kahendkomplement arvu.

Elektroonika plaadil välja toodud I²C kaudu on võimalik digitaalset kompassi kasutada magnetvälja mõõtmiseks. Selleks, et seda saaks mähise keskkoha viia on vaja piisava pikkusega juhet. I²C on peamiselt loodud lühikestel distantidel, peamiselt elektroonikaplaatidel asetsevate komponentide andmevahetuseks [19]. Kaabli valikul tuleb jälgida maksimaalset parasiitmahtuvust, mis kaablil on, kuna see määrab aja, mis kulub signaal kõrgeks tõusmise. I²C maksimaalne mahtuvus liinil on 400 pF. Ühenduse loomiseks sai kasutatud kolmemeetrise CAT5 keerupaari kaablit, mille mahtuvus on $\sim 50 \text{ pF/m}$. Keerupaari kaabli jäikus muutis täpsete tulemuste saamise keeruliseks.

Korralike tulemuste mõõtmiseks sai HMC5883L digitaalset kompassi kasutatud, et valmis ehitada magnetomeeter. Magnetomeetri eesmärk on kuvada väliskeskkonnast saadud magnetvälja tugevus pidevalt kõigil kolmel teljel. Selleks sai kasutatud MSP430G2553 mikrokontrollerit ja Nokia 5110 LCD ekraani.



Joonis 11: Magnetomeetri joonis.

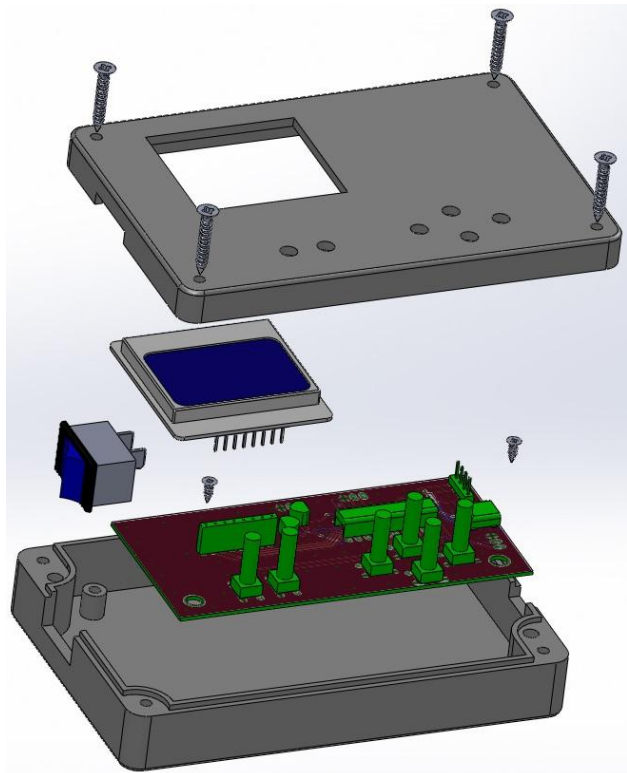
Magnetomeetri elektroonika asetati karpis ja digitaalne kompass kinnitati nähtavasse kohta, et seda oleks võimalik paigutada täpselt soovitud kohta magnetvälja mõõtmiseks. Seadme juhtimiseks lisati kuus nupp, et vajadusel programmeerida lisavõimalusi magnetomeetrile. Ekraani taustavalguse kontrollimiseks lisati NPN transistor, mida saab juhtida mikrokontrolleri väljundist, mis toestab pulsilaiusmodulatsiooni. Kuna ekraani taustavalgus on üks suurimaid voolutarbijaid seadmes, siis saab seda ära kasutades tööaja pikendamiseks. Toitena kasutab seade kolme AAA patareid ja 3 V toiteregulaatorit LP2950CZ-3.0.

Tulemuse kasutajale nähtavaks tegemiseks on see vaja kuvada. Selle töö raames sai kasutatud Nokia 5110 LCD [20], millel on 84 x 48 pixlit. LCD kasutab Philips Semiconductors PCD8544 madala voolutarbega CMOS kontrolleriit.

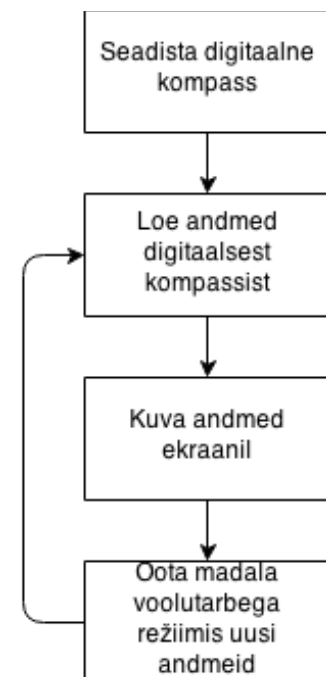
Texas instrument *value line* mikrokontrollerite perekonda kuuluv MSP430G2553 [21] omab väga kasulikku funktsionaalsust:

- madal voolutarve, jäädes paarisaja μA juurde aktiivses olekus,
- sisemine kell nelja kalibreeritud sagedusega kuni 16 MHz,
- 32 kHz ostsilaatori lisamise võimalus,
- kaks 16 – bitist taimerit,
- kaks *universal serial communication interface* (USCI) moodulit.

Ilma ekraani taustavalgusetarbib seade 7 mA voolu ning koos siniste valgusdiodidega 27 mA. Sellest järeldades on võimalik 750 mAh patareidega seadet kasutada vastavalt kuni 107 või 27 tundi. Selleks, et digitaalsest kompassist andmeid õige intervalliga lugeda, kasutati 32 kHz kvartsi ja 16 bitist taimerit. Nii HMC5883L kui ka mikrokontroller sai seadistatud 3 Hz peale, mis tähendab, et ekraanil uuendatakse andmeid kolm korda sekundis. Ekraani juhtimiseks kasutati USCI_A moodulit, mis seadistati SPI'na. Magnetvälja sensorit juhiti USCI_B mooduliga, kus digitaalse kompassi juhtimine ja sealt andmete lugemine käib I²C kaudu.



Joonis 12: Magnetomeetri laotusjoonis. Puuduvad juhtmed ja patarei pesad.



Joonis 13: Magnetomeetri põhiprogrammi tsükkel.

Tulemused

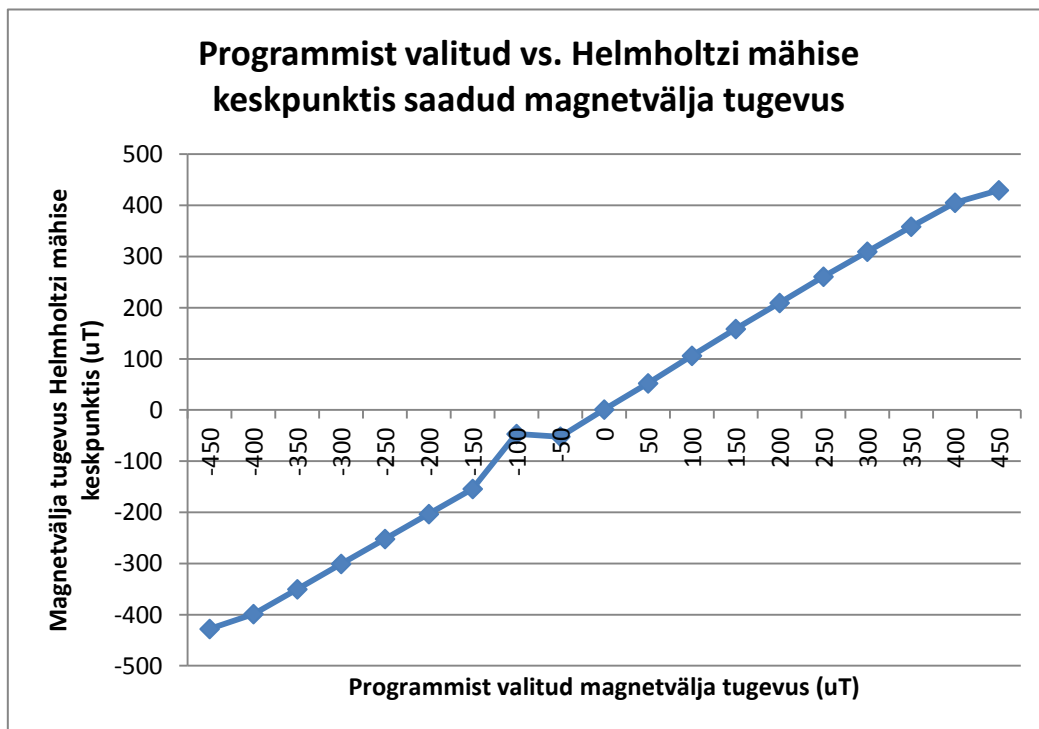
Helmholtzi mähise testimised viidi läbi Tartu Observatooriumisse paigaldatud varjestatud kambris, mis summutas väliskeskkonna magnetvälju.

Magnetomeetriga läbi viidud testide tulemused näitasid, et Helmholtzi mähise keskpunktis on võimalik tekitada magnetvälja tugevusega kuni $430 \mu\text{T}$, mis oli üks töö eesmärkidest.



Pilt 3: Valmis ehitatud magnetomeeter.

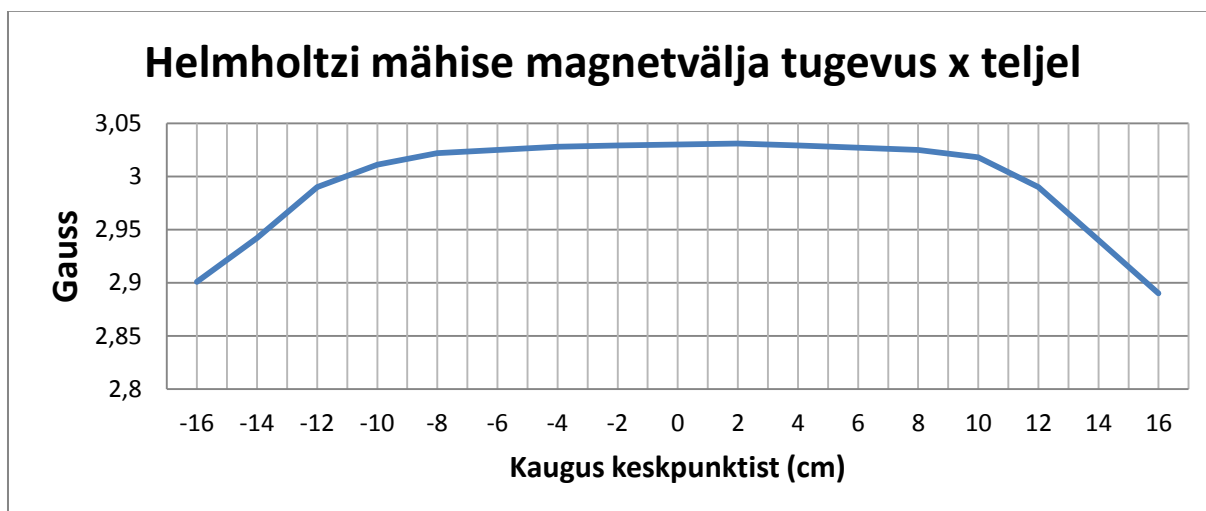
Elektroonika linearsuse kindlakstegemiseks läbi viidud testid prototüübi peal näitasid, et kahe-suunaline magnetväli mähise keskpunktis käitub lineaarselt. Täpsete tulemuste saamine nõudis esmalt seadme kalibreerimist. Põhjalikum uurimine (Tabel 5) lõppseadmepooli välja, et $-100 \mu\text{T}$ piirkonnas (Sillatud võimendi sisend $11,75 \text{ V}$, digitaal-analoogmuunduri väljund $1,225 \text{ V}$) ei ole tekkiv pinge õige (Joonis 14). Lähem signaali uurimine näitas, et selle väljundi juures tekib skeemis võnkumine. Selle probleemi lahendusega tegeletakse.



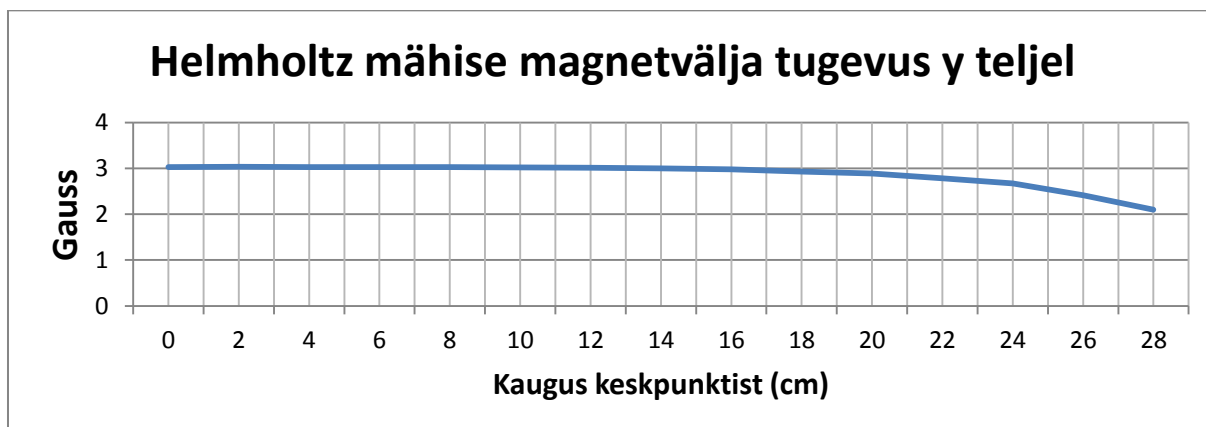
Joonis 14: Helmholtzi mähises tekkinud magnetvälja tugevus sõltuvalt juhtprogrammist valitud väärtusele.

Homogeensuse kindlaks tegemiseks uuriti keskpunkti ümber olevat magnetvälja. Tulemused (Joonis 15, 15) näitasid, et keskele asuvast alast 16 cm on homogeense magnetväljaga, mida saab kasutada satelliidi testimiseks.

Testimise käigus tuli välja, et mähise soojenemise tagajärjel muutub takistus märgatavalt. 30 minuti jooksul 16 V pinge juures muutus induktiivpooli takistus $0,5 \Omega$, mis on 3% muutus. Selle tulemusena vähendab Helmholtzi mähisel magnetvälja tugevus. Selle parandamiseks tuleks lisada tarkvarale PID (Proportsionaalne-integraal-tuletise) kontrolleri, mis kasutab temperatuuri või voolujälgimisskeemi.



Joonis 15: Helmholtzi mähise magnetvälja tugevus mööda x telge (magnetvälja tekkimise suund mähises Joonis 1).



Joonis 16: Helmholtzi mähise magnetvälja tugevus mööda y telge (magnetvälja suunaga risti Joonis 1)

Kokkuvõte

Selles bakalaureusetöö käigus valmistati seade, millega on võimalik simuleerida kahe-suunalist magnetvälja tugevusega kuni 3 gaussi. Sellega viidi läbi ESTCube-1 testimised Maa pinnal ja kasutatakse hetkel ESTCube-1 duplikaadiga pöörlemisalgoritmide uurimiseks, et saavutada püstitatud missiooni edukas täitmine Maa orbiidil.

Ette antud nõuetest lähtuvalt kasutati Helmholtzi mähist, mis tekitab kahe induktiivpooli vahele homogeense magnetvälja. Valmis keriti vajalikud poolid raadiusega 74 cm ja ehitati sobiv raam, mis võimaldab satelliiti testida. Magnetvälja tugevust on võimalik juhtida mähist läbiva voolutugevusega. Kahepolarse toiteploki puudumise tõttu kasutati sillatud võimendi lahendust kahe-suunalise magnetvälja tekitamiseks. Eelnevalt läbi viidud arvutuste põhjal koostati vajalik elektroonika Helmholtzi mähise juhtimiseks. Pinge juhtimine poolidel saavutatakse mikrokontrolleri digitaal-analoogmuundureid kasutades. STM32F4Discovery arendusplaadiga korraldatakse kogu elektroonika juhtimine elektroonika plaadil ja olemasoleva USB andmevahetusliidesega luuakse ühendus kasutajaliidesega. Kasutajaliides võimaldab seadet kalibreerida ja kontrollida magnetvälja tugevust Helmholtzi mähises.

Valminud seadme poolt tekitatud magnetvälja sai uuritud magnetomeetriga, mis selle töö juures valmistati. Läbi viidud testimistest saab järeldada, et seadet on võimalik kasutada satelliidi testimiseks Maa pinnal.

Kasutatud kirjandus

- [1] S. Lätt ja teised, „ESTCube-1 nanosatellite for electric solar wind sail in-orbit technology,“ doi: 10.3176/proc.2014.2S.01.
- [2] S. R. Gyawali, „Design and construction of helmholtz coil for biomagnetic studies on soybean,“
<https://mospace.umsystem.edu/xmlui/bitstream/handle/10355/5686/research.pdf?sequence=3>.
- [3] Velleman, „DV850BL USER MANUAL,“
<http://www.vellemanusa.com/downloads/1/dvm850blgblnfresdpl.pdf>.
- [4] „MIC-4070D DIGITAL LCR METER OPERATION MANUAL,“
http://www.joongang21.com/bin/minihome/upload/1453/etc_file/main4_1283995534.pdf.
- [5] STMicroelectronics, „STM32F4DISCOVERY,“ http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/data_brief/DM00037955.pdf.
- [6] STMicroelectronics, „STM32F405xx STM32F407xx,“ <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/DM00037051.pdf>.
- [7] STMicroelectronics, „Ultra low drop and low noise BiCMOS voltage regulators,“
Available:
<http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00003395.pdf>.
- [8] STMicroelectronics, „BAT60J SMALL SIGNAL SCHOTTKY DIODE,“
<http://www.stm32circle.com/resources/Datasheets/BAT60J.pdf>.
- [9] STMicroelectronics, „STM32F405xx STM32F407xx ARM Cortex-M4 32b MCU+FPU, 210DMIPS, up to 1MB Flash/192+4KB RAM, USB, OTG HS/FS, Ethernet, 17 TIMs, 3 ADCs, 15 comm. interfaces & camera,“ <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/DM00037051.pdf>.

- [10] Texas Instruments,, „Understanding Thermal Dissipation and Design of a Heatsink,“
<http://www.ti.com/lit/an/slva462/slva462.pdf>.
- [11] ON Semiconductor, , „MC78M05: Linear Voltage Regulator, Positive, 5.0 V, 500 mA,“
<http://www.onsemi.com/PowerSolutions/product.do?id=MC78M05>.
- [12] Texas Instruments, , „TLE2426, TLE2426Y THE "RAIL SPLITTER" PRECISION
VIRTUAL GROUND,“ <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tle2426.pdf>.
- [13] Texas Instruments,, „LM4766 Overture™ Audio Power Amplifier Series Dual 40W
Audio Power Amplifier with Mute,“
<http://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/lm4766.pdf>.
- [14] Texas Instruments,, „LM258 Dual Operational Amplifier,“
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm258.pdf>.
- [15] Texas Instruments, „Dual Operational Amplifiers,“
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm258.pdf>.
- [16] Texas Instruments,, „INA199A2 Voltage Output, High or Low Side Measurement, Bi-
Directional Zero-Drift Series,“ <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina199a2.pdf>.
- [17] STMicroelectronics, „STSW-STM32102STM32 Virtual COM Port Driver,“
http://www.st.com/web/en/catalog/tools/FM147/CL1794/SC961/SS1533/PF257938?s_s_earchtype=keyword.
- [18] Honeywell, „HMC5883L 3-Axis Digital Compass IC,“
http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/Defense_Brochures-documents/HMC5883L_3-Axis_Digital_Compass_IC.pdf.
- [19] NXP, „UM10204 I2C-bus specification and user manual,“
http://www.nxp.com/documents/other/UM10204_v5.pdf.
- [20] Sparkfun, „Graphic LCD 84x48 - Nokia 5110 - LCD-10168 - SparkFun Electronics,“
<https://www.sparkfun.com/products/10168>.

- [21] Texas Instruments,, „MSP430G2553 | Value Line | MSP430 Ultra-Low Power 16-bit MCUs | Description & parametrics,“
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430g2553.pdf>.
- [22] STMicroelectronics, „Discovery kit for the Value line STM32F100,“ Available:
<http://www.st.com/internet/evalboard/product/250863.jsp>.
- [23] Microchip, „Op Amp Precision Design: DC Errors,“
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01177a.pdf>.
- [24] STMicroelectronics, „UM1472 User manual,“ http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/user_manual/DM00039084.pdf.
- [25] J. Wang, G. Y. Tian, A. Simm ja G. P. Lucas, „Simulation of magnetic field distribution of excitation coil for EM flow meter and its validation using magnetic camera,“ <http://www.ndt.net/article/wcndt2008/papers/502.pdf> 2008.
- [26] E. R. Javor ja T. Anderson, „Design of a Helmholtz Coil For Low Frequency,“
<http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.utlib.ee/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=750329>
1998.
- [27] M. R. Brewer, „CUBESAT ATTITUDE DETERMINATION,“ 2012
<http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a557488.pdf>.
- [28] A. Hellwig, „File:Helmholtz coils.png - Wikimedia Commons,“
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Helmholtz_coils.png.
- [29] Texas Instruments,, „Voltage Output, High or Low Side Measurement, Bi-Directional Zero-Drift Series CURRENT SHUNT MONITOR,“
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina199a2.pdf>.

MAGNETIC FIELD SIMULATOR FOR ESTCUBE-1 TESTING

Hannes Haljaste

Summary

The purpose of this thesis is to develop a device for testing Estonia's first satellite ESTCube-1, and those that follow, on the ground in a simulated magnetic field. Presented device must be capable of generating a uniform magnetic field with a strength of at least three Gauss. To verify magnetic field strength and its uniformity, test needed to be conducted.

A Helmholtz coil design was chosen for its simplicity to build and use. For generating bidirectional magnetic field between coils a bridged amplifier application was designed with power amplifiers which were controlled through a digital - analog converter. To control electronics STM32F4Discovery development board with a STM32F407VG microcontroller was used. It supports USB, I2C and SPI communication interfaces, digital-analog and analog-digital converters. Data communication between the microcontroller and users PC is implemented over virtual serial port through USB. The user interface was programmed using LabVIEW visual programming environment. The software gives users the ability to calibrate the device and control magnetic field generated by Helmholtz coil.

The Honeywell HMC5883L digital compass was used for the testing developed device. An additional device was constructed using that sensor to conduct good measurements. The purpose of the tests was to find out uniformity of Helmholtz coils and actual magnetic field strength. Based on the tests the device is ready for testing satellites.

Lisad

Mõõtmistulemused

Soovitud magnetväli	Pinge poolil nr. 1	Pinge poolil nr. 2	Mõõdetud magnetvälja tugevus mähise keskpunktis
-450	-17,9	-17,87	-428
-400	-16,83	-16,7	-398,9
-350	-14,73	-14,63	-350,4
-300	-12,6	-12,55	-300,8
-250	-10,55	-10,47	-252,1
-200	-8,45	-8,38	-203,4
-150	-6,35	-6,28	-154,3
-100	-1,81	-1,9	-46,9
-50	-2,12	-2,09	-52,1
0	0	0	0,9
50	2,07	2,08	52,1
100	4,17	4,18	106
150	6,27	6,28	158,4
200	8,38	8,37	209,3
250	10,5	10,51	260,6
300	12,59	12,59	309,5
350	14,71	14,7	358,4
400	16,82	16,8	405,2
450	18	18	429,5

Tabel 5: Ehitatud seadme linearsuse ja täpsuse mõõtmiste tulemused.

Elektroonika

Väärtus/Nimi	Kirjeldus	Pakend	Kogus	Unikaalsed nimed skeemis
0,01 Ω	Šunt takisti	R0805	2	SHUNT_R1, SHUNT_R2
INA199A2	Ampermeeter	SC70-6	2	A_CURRENT, B_CURRENT
ISL21010	Võrdluspinge 1,5 V	SOT-23	1	1.5V_REF
100 μ F	Toite kondensaator	E3,5-8	1	PSU
10 μ F	Kondensaator	E2-5	4	CDA1, CDA2, CDB1, CDB2
10 μ F	Kondensaator	C0805	2	C_R3, C_LDO3
1 μ F	Kondensaator	C0603	1	C_RS2
0.33 μ F	Kondensaator	C0805	1	C_LDO1
0,1 μ F	Kondensaator	C0603	20	CDA3, CDA4, CDB3, CDB4, C_A1, C_A2, C_A3, C_RS2, C_R1, C_R2, C_M1A, C_M1B, C_VENT, C_ADC1, C_ADC2, C_ADC3, C_ADC4, C_PSU
LL4148	Diod	MINIMELF	2	D1, D2
464 k Ω	Takisti 0,1%	R0805	4	I_R1, I_R2, I_R8, I_R9
232 k Ω	Takisti 0,1%	R0805	6	I_R3, I_R4, I_R5, I_R6, I_R7, I_R10
24 k Ω	Takisti 0,1%	R0805	2	R_CA6, R_CB1
21 k Ω	Takisti 0,1%	R0805	2	R_CA2, R_CB2
3 k Ω	Takisti 0,1%	R0805	4	R_CB6, R_CB4, R_CA6, R_CA4
2,67 k Ω	Takisti 0,1%	R0805	2	R_CB5, R_CA5
2,61 k Ω	Takisti 0,1%	R0805	2	R_CB3, R_CA3
22 k Ω	Takisti 0,1%	R0805	8	A_R1, A_R2, A_R3, A_R4, B_R1, B_R2, B_R3, B_R4
5 k Ω	Takisti	R0603	8	M_R1, M_R2, M_R3, M_R4, R_I2C3, R_I2C4, R_I2C7, R_I2C8
1 k Ω	Takisti	R0603	2	R_MA, R_MB
100 Ω	Takisti	R0603	5	R_I2C1, R_I2C2, R_I2C5, R_I2C6, R_I2C9
BC817	NPN transistor	SOT23	2	Q1, Q2

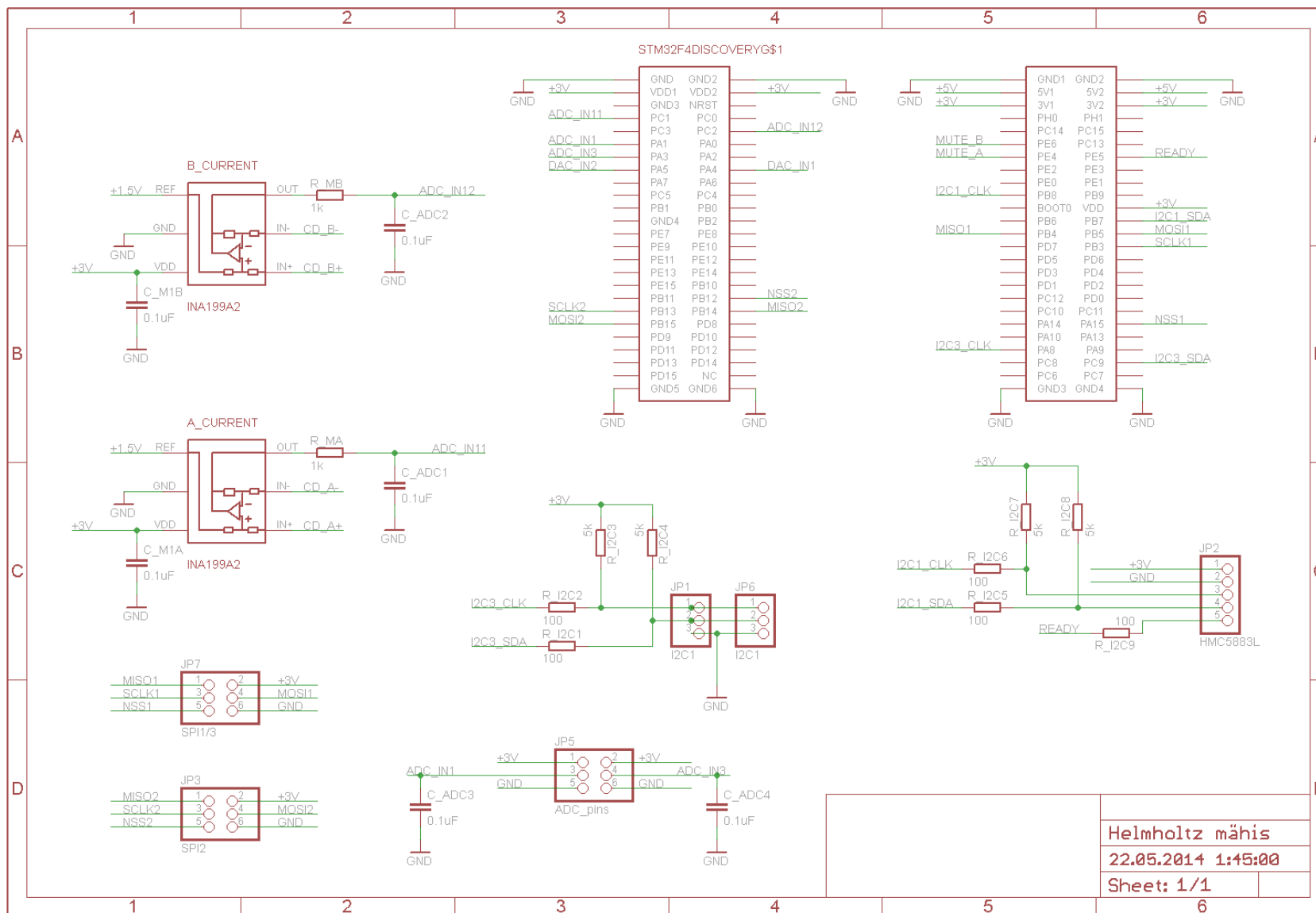
MC78M05CT G	Toite regulaator 5 V	TO220	1	5V_REG
LM258ADR	Operatsioonivõimen di	SOIC8	3	BUFFER_A, BUFFER_B, IC3
LM4766	Võimsusvõimendi	TF15B	2	COIL_DRIVER_A, COIL_DRIVER_B
TLE2426CD	Virtuaalmaa	SOIC8	1	RAIL_SPLITTER
24 V	Ventilaator	60 x x60 mm	1	VENTILAATOR
ELLYFJR47N	Drossel	2,5 x 2 x 1,2 mm	4	L1, L2, L3, L4
SMBJ22CA	TVS	DO-214AA	2	TVS1, TVS2
6,43 °C/W	Radiaator	50 x 78 x 35 mm	1	-
MC36328	Lüliti ON-OFF 6 A	SPST	1	-
BLUE	Banaani pesa	4mm	2	-
GREEN	Banaani pesa	4mm	2	-

Tabel 6: Helmholtzi mähise elektroonika plaadi komponentide nimekiri.

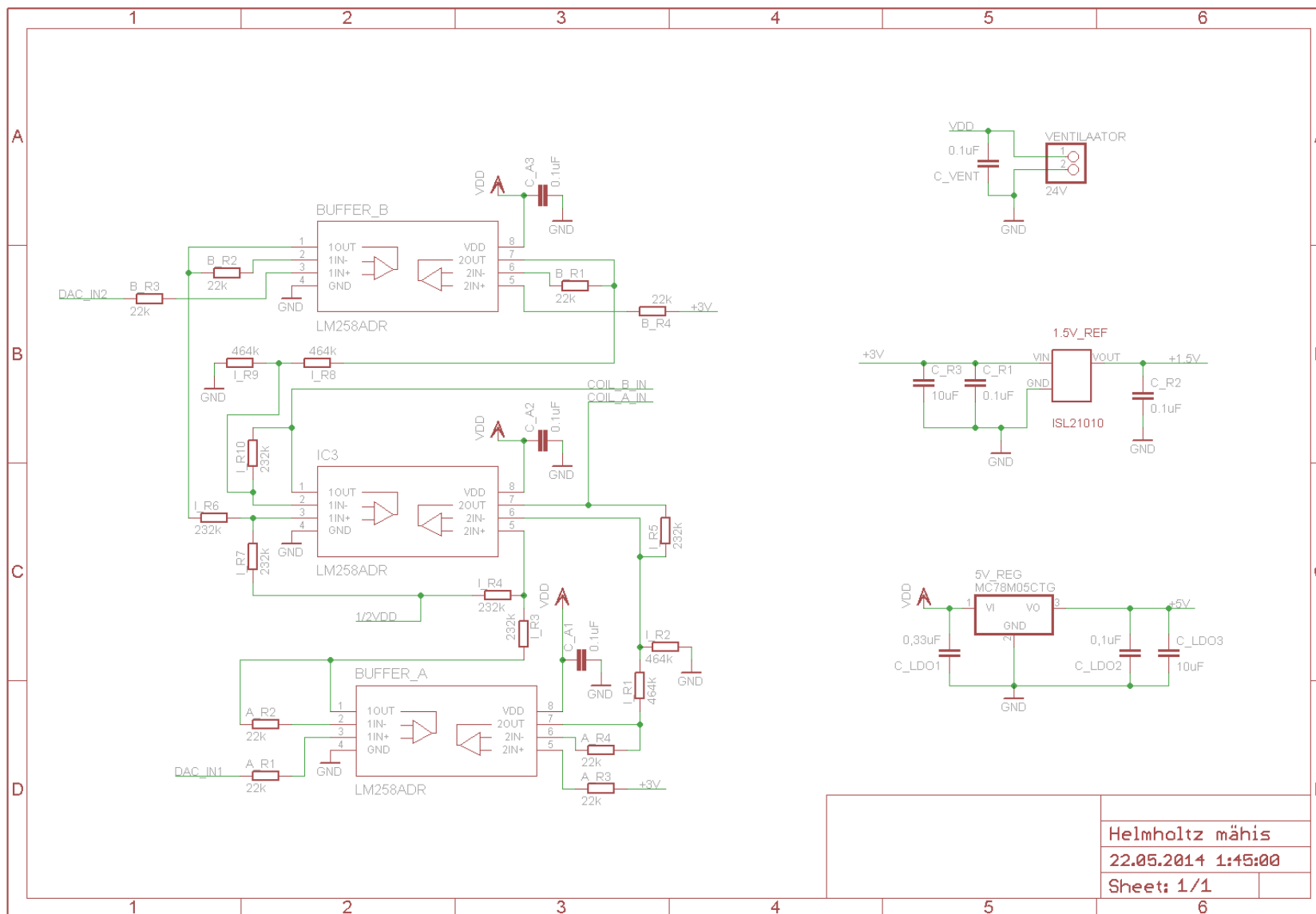
Väärtus/Nimi	Kirjeldus	Pakend	Kogus	Unikaalsed nimed skeemis
MSP430G2553	Mikrokontroller	PDIP-20	1	MSP430G2553
32,768 kHz	Kella kvarts	TC26	1	Q1
LP2950CZ-3.0	Pingeregulaator 3V	TO-92	1	IC1
2N3904	NPN transistor	TO-92	1	T1
B3F-1070	Lüliti	6 x 6 mm	6	S1, S2, S3, S4, S5, S6
100 nF	Kondensaator	C0603	9	C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9, C10
2,2 µF	Kondensaator	C0603	1	C1
10 µF	Kondensaator	C0805	1	C11
47 kΩ	Takisti	R0603	1	R4
100 Ω	Takisti	R0603	2	R5, R6

10 kΩ	Takisti	R0603	3	R1, R2, R3
6A / 250V	Lüliti	ROCKER	1	-
Patarei hoidja	-	AAA	3	-
Plastkarp	-	120 x 80 x 27 mm	1	-
Nokia 5110 LCD	-	-	1	-
GY-273	HMC5883L	-	1	-

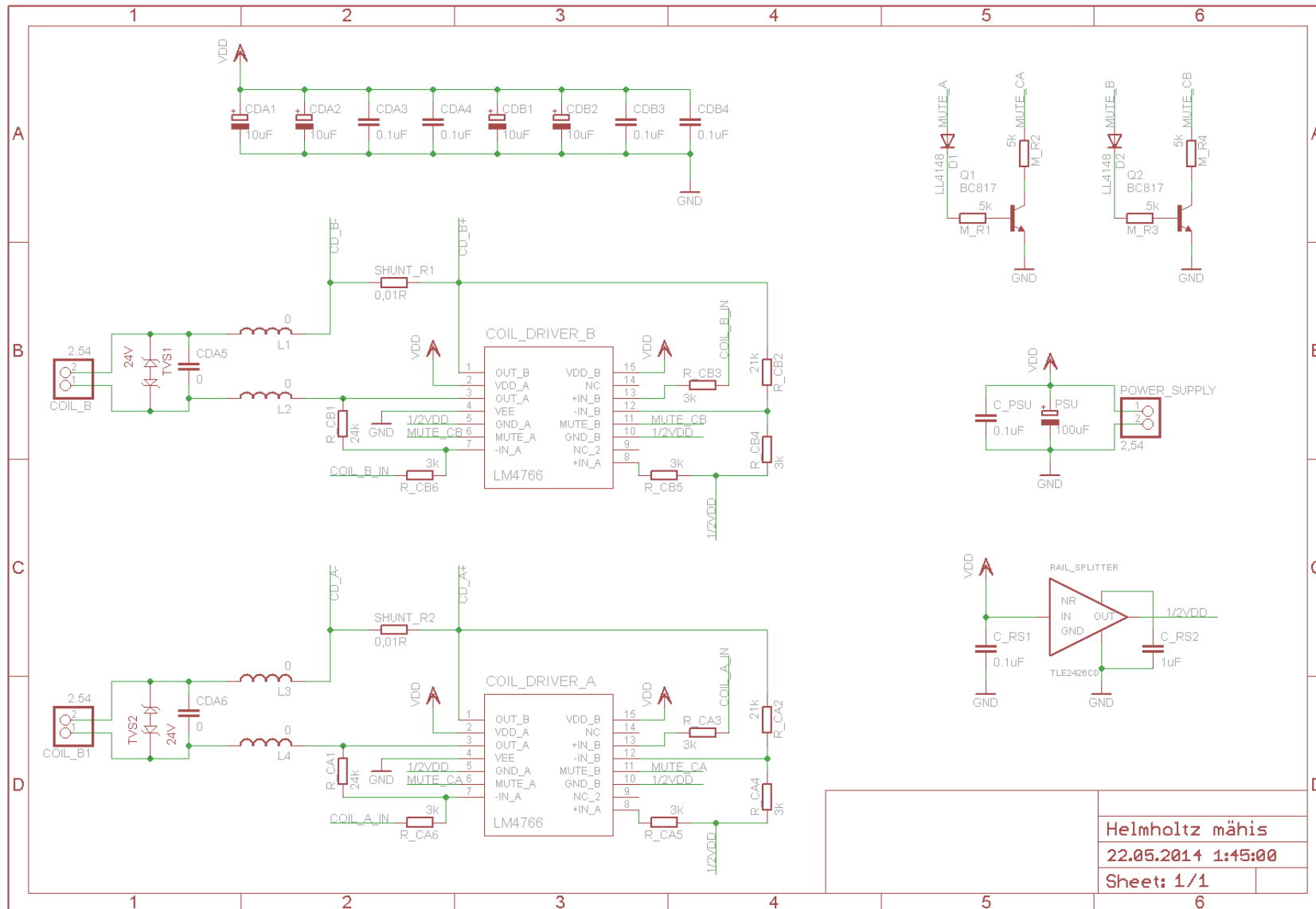
Tabel 7: Magnetomeetri komponentide nimekiri.



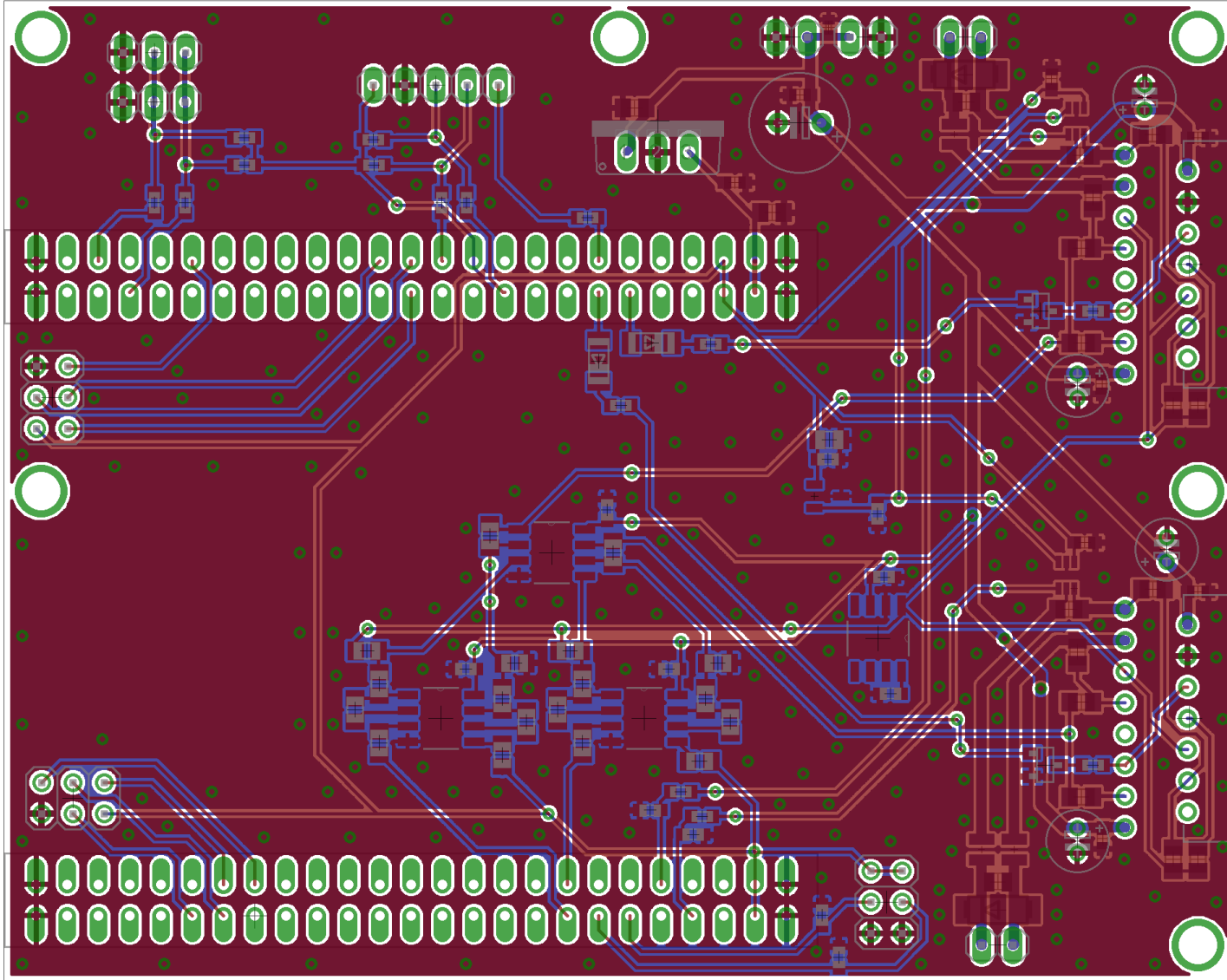
Joonis 17: Elektroonika plaadi skeem, leht 1.



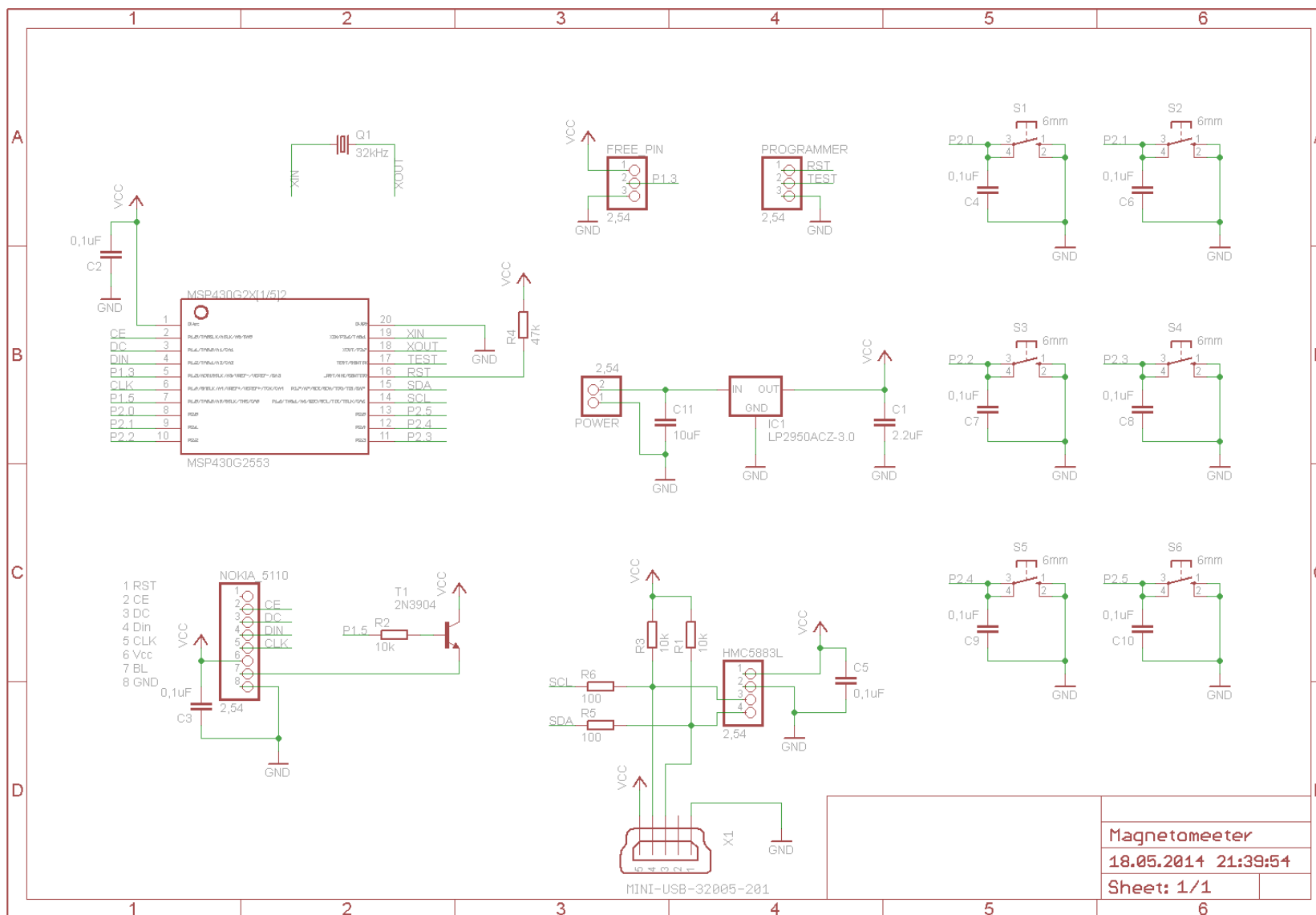
Joonis 18: Elektroonika plaadi skeem, leht 2.



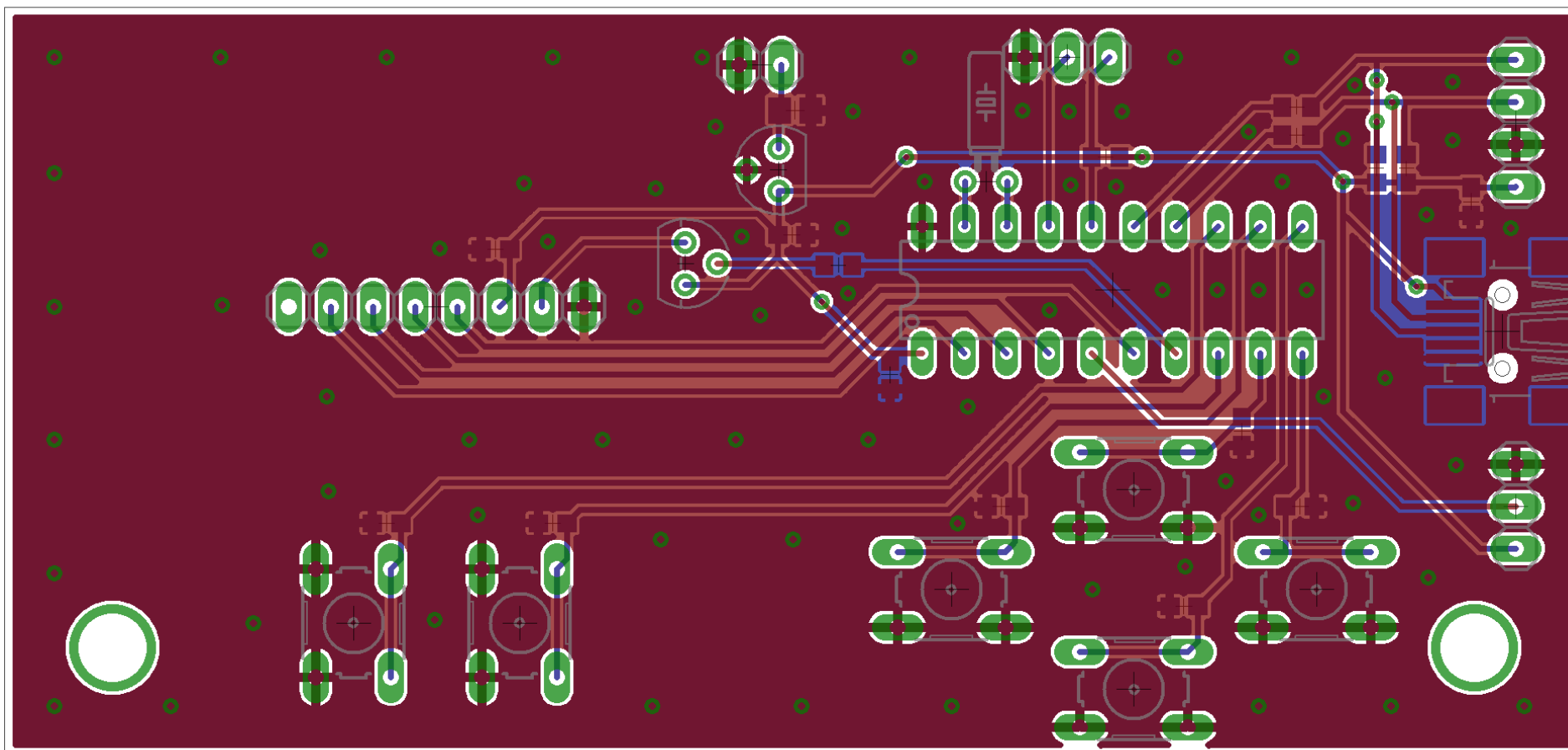
Joonis 19: Elektroonika plaadi skeem, leht 3.



Joonis 20: Helmholtzi mähise elektroonika plaat 100 x 80 mm.



Joonis 21: Magnetomeetri elektroonika plaadi skeem.



Joonis 22: Magnetomeetri elektroonika plaat.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Hannes Haljaste (sünnikuupäev: 15.05.1990),

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Magnetvälja simulaatori arendamine“, mille juhendajad on Mihkel Pajusalu ja Viljo Allik,
 - 1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2. 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 lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, 29.05.2014