

Tartu Ülikool

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Tehnoloogiainstituut

Tõnis Peeter Kull

**Mõõteseade nanotehnoloogial põhinevate katete
karakteriseerimiseks kosmoses**

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Arvutitehnika eriala

Juhendajad:

Maido Merisalu, MSc

Andres Punning, PhD

Tartu 2019

Resümee/Abstract

Mõõteseade nanotehnoloogial põhinevate katete karakteriseerimiseks kosmoses

Käesolevas uurimistöös disainiti ja konstrueeriti seadme prototüüp, millega oleks võimalik viia läbi ekperiment tudengisatelliidil Estcube-2, kus mõõdetakse nanotehnoloogial põhineva kattega ja katteta alusmaterjalide elektrilist takistust.

Töö käigus valiti katse eesmärgi täitmiseks vajaliku seadme jaoks komponendid ja disainiti trükkplaat. Seade konstrueeriti ja viidi läbi mõõtmised, mis olid heas kooskõlas paralleelselt mõõdetud täppismultimeetri tulemustega.

CERCS: T170

Märksõnad: Elektriline takistus, satelliit, kosmos, korrosioon, sensor

Measurement device for characterizing nanotechnology-based coatings in space environment

The goal of this thesis was to design and construct a prototype of a device, that could be used in an experiment to measure the electrical resistance of materials, which are coated using nanotechnology-based coatings on the student satellite Estcube-2.

The suitable components for achieving the goal were chosen and a PCB was designed. The device was assembled and used to make test measurements. The resistances measured with the assembled system were consistent with the control measurements made with a precision multimeter.

CERCS: T170

Keywords: Electric resistance, satellite, space, corrosion, sensor

Sisukord

Resümee/Abstract	2
Lühendid/mõisted	4
1 Sissejuhatus	5
2 Ülevaade probleemist.....	6
2.1 Uuritav objekt	6
2.2 Materjalide hävimine kosmoses.....	6
2.3 Meetodid materjalide korrosiooni ulatuse määramiseks.....	7
2.4 Elektrilise takistuse mõõtmine	8
2.5 Ülesande püstitus	12
3 Metoodika	13
3.1 Mõõteseade takistuse mõõtmiseks	13
3.2 Veahinnang	16
3.3 Mikrokontroller ja andmetöötlus	17
3.4 Mõõteseadme testimise metoodika	18
4 Tulemused.....	20
4.1 Mõõteseadme disain ja ehitus	20
4.2 Mõõteseadme programmeerimine	21
4.3 Mõõteseadme testimise tulemused	23
5 Tulemuste analüüs ja järeldused.....	25
5.1 Tulemuste analüüs	25
5.2 Seadme edasiarendus	26
6 Kokkuvõte.....	27
Viited	28
Lisad.....	31
Lihtlitsents.....	33

Lühendid/mõisted

ADC – Seade analoogsignaali muutmiseks digitaalseks signaaliks (*Analog to Digital Converter*).

ALD – Aatomkihtsadestus (*Atomic layer deposition*).

AVR – Mikrokontrollerite tüüp, praegu toodab Microchip.

EEPROM – Elektrooniliselt kustutatav programmeeritav mälu (*Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*).

GPIO – Üldine sisend/väljundviik (*General-Purpose Input/Output*).

ISS – Rahvusvaheline Kosmosejaam (*International Space Station*).

LEO – Maalähedane orbiit (*Low earth orbit*).

PCB – Trükkplaat (*Printerd Circuit Board*).

SPI – Kommunikatsiooniprotokoll (*Serial Peripheral Interface Bus*).

USART – Kommunikatsiooniprotokoll (*Universal synchronous and asynchronous receiver-transmitter*).

1 Sissejuhatus

Kosmosesatelliitides kasutatavad materjalid peavad olema vastupidavad mitmesugustele korrosiooni põhjustavatele mõjudele nagu näiteks kõrge energiaga ioniseeriv kiirgus ja atomaarne hapnik. Materjale on võimalik kaitsta kaitsekatetega, kusjuures katete efektiivsuse hindamiseks tuleb neid testida. Läbi on viidud mitmeid materjalide vastupidavust testivaid eksperimente, kuid sageli on nende puuduseks vajadus tuua testitavad materjalid peale kosmosekeskkonnas viibimist Maa peale tagasi, et siis viia läbi täiendavaid uuringuid näiteks mikroskoopia meetoditel [1, 2].

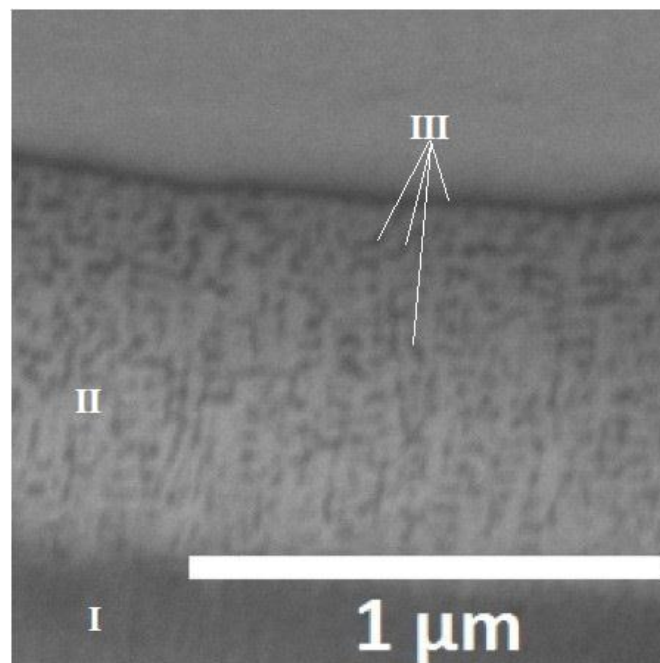
Lahenduseks võib olla korrosiooni monitoorimise meetodid, kus mõõdetakse elektrilist takistust ja sele muutust ajas. Juhtivate materjalide korrodeerumisel vähenevad elektrit juhtiva ainetüki mõõtmed ja seeläbi suureneb materjali elektriline takistus, mida mõõtes saab hinnata korrosiooni [3]. Esimeste seadmete prototüübid korrosiooni monitoorimiseks kosmoses arendati välja Captain Corrosion OÜ, Hedgehog OÜ ja Tartu Ülikooli kiletehnoloogia labori koostöös EAS-i kaasrahastatud arendusosaku projekti EU51950 raames [4].

Käesoleva töö eemärgiks on ehitada esialgne prototüüp elektroonikaseadmest, mis võimaldaks, integreerituna tudengisatelliidi Estcube külge, mõõta kuni nelja katsekeha, mis koosnevad kaitsekattega ja katteta traatidest, elektrilist takistust ja määrata selle muutust ajas. Töö tutvustab lühidalt erinevaid meetodeid korrosiooni ja elektrilise takistuse mõõtmiseks ning annab ülevaate seadme ehitusel kasutatavatest põhikomponentidest. Valminud seadmega viiakse läbi katsed seadme töö hindamiseks.

2 Ülevaade probleemist

2.1 Uuritav objekt

Käesoleva bakalaureusetöö raames testitavaks materjaliks on Tartu Ülikoolis välja töötatud nanostruktuurne kaitsekate [5], mis on valmistatud alumiiniumist alusele kahes etapis. Kaitsekatte loomiseks kasutati esmalt alumiiniumile oksiidikihi tekitamiseks anodeerimise protsessi. Saadud poorsele oksiidikihile rakendati seejärel aatomkihtsadestust, mis täidab poorid ja asendab oksiidikihi kompaktse keraamilise kihiga (joonis 1). Sünteesitud katte eesmärgiks on kaitsta alusmaterjali atomaarse hapniku ja ioniseeriva kiirguse poolt põhjustatava korrosiooni eest [5].



Joonis 1. Skaneeriva elektronmikroskoobiga tehtud sekundaarsete elektronide pilt nanostruktuurse katte ristlõikest, kus on näha metalli pinnal (I) olevat anoodset alumiiniumoksiidi (II, hele), mille poorid on täidetud aatomkihtsadestuse meetodil titaanoksiidiga (III). Pildi autor: Maido Merisalu

2.2 Materjalide hävimine kosmoses

Atomaarne hapnik (O) maalähedasel orbiidil tekib diatomaarse hapniku (O₂) lagunemisel päikesest tuleneva ioniseeriva ultravioletse kiirguse toimel [6]. Orbiidil liikuva kosmosetehnika suhtes on need hapniku aatomid väga suure kiiruse ja energiaga [1, 6, 7].

Maalähedasel orbiidil on atomaarse hapnik energiaga umbes 5 eV, mistõttu moodustab see kergesti ühendeid teiste ainetega. Tekkinud ühendid on peamiselt oksiidid, mis on teistsuguste omadustega, kui algne materjal, seega põhjustab atomaarne hapnik otseselt materjalide hävinemist [1, 7].

Materjalidele mõjub LEO-s kahjulikult ka ioniseeriv kiirgus [6]. Ioniseeriv kiirgus on kiirgus, mis on suure energia tõttu võimeline aatomitest elektrone lahti lööma. Ioniseerivat kiirgust leidub maalähedastel orbiitidel kolme tüüpi: süvakosmosest tulenev kosmiline kiirgus, mis koosneb väga kõrge (keskmiselt 0,3 GeV) energiaga osakestest, päikese protsessidest välja paiskuvad osakesed ning Maa magnetvälja lõksu jäänud laetud osakesed ehk Van Alleni vööd, mis paiknevad Maast vahemikus 640-58000 km [8].

2.3 Meetodid materjalide korrosiooni ulatuse määramiseks

Materjalide korrosiooni ulatust on võimalik mõõta erinevatel viisidel. Lihtsaim meetod on korrodeeruva objekti kaalumine enne korrosiivsesse keskkonda viimist ja peale mõne aja möödumist. Enne keskkonda viimist puhastatakse materjal põhjalikult ning peale korrodeerumist eemaldatakse materjalilt korrodeerudes tekkinud ained. Objekti kaalumisel saab hinnata kui suur osa materjalist antud aja jooksul korrodeerus. Selle meetodi puuduseks on asjaolu, et mõõtmiseks tuleb eksperiment lõpetada, kuna peale puhastamist ja kaalumist ei saa materjalitükiga enam sama eksperimenti jätkata [3].

Korrosiooni on võimalik mõõta ja uurida ka mikroskoopia abil. Selle meetodiga on NASA uurinud erinevaid materjale Rahvusvahelise Kosmosejaama (ISS) pardal. ISS-i külge paigaldati testrakised erinevate materjalidega, mis jäid kosmosesse mitmeks aastaks. Seejärel toodi need Maale tagasi ja uuriti muude meetodite hulgas ka optilise mikroskoopia ja skanneeriva elektronmikroskoopia abil. Mikroskoopia abil uurimine eeldab taaskord eksperimenti lõpetamist ja kosmoses toimuva eksperimenti korral materjali Maale tagasi toomist [2].

Levinud eemalt kasutatav meetod materjali korrosiooni ulatuse määramiseks on selle elektrilise takistuse mõõtmine. Ainetüki korrodeerudes selle algsest materjalist osa mõõtmised vähenevad, mistõttu muutub ka elektriline takistus [3]. Projekti EU51950 raames töötatati välja satelliidiga ühilduvaid mõõteseadmeid korrosiooni monitoorimiseks kosmoses, mis võimaldavad määrata elektrilist takistust ja selle muutust traatidel (joonis 2), mis on kaetud erinevate kaitsekateetega [4]. Traatide elektrilise takistuse suurenemine viitaks sellele, et kaitsekiht on näiteks atomaarse

hapniku tõttu ära hävinud, millest tulenevalt saab hinnata erinevate materjalide korrosiooni kiirust kosmoses.



Joonis 2. Foto katsekehas korrosiooni monitoorimiseks kosmoses ESTCube-2 pardal. Dielektrilise kihiga kaetud hoidja ümber on kaks traati, millest üks on kaetud nanostruktuurse kaitsekattega ning teine ilma katteta. Atomaarse hapniku toimel on oodata katteta traadi takistuse järk-järgulist suurenemist. Kattega traadi puhul sõltub takistus vaid temperatuurist kuni mittejuhtiv kaitsekiht on maha kulunud. Pildi autor: Maido Merisalu

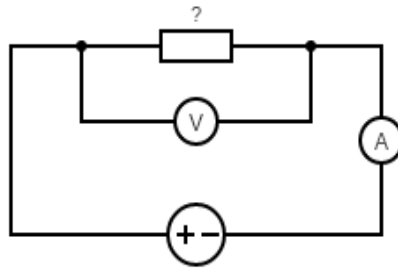
2.4 Elektrilise takistuse mõõtmine

Takistuse mõõtmisel on oluline teada, mis suurusjärgus takistusi mõõdetakse. Usaldusväärsete tulemuste saamiseks tuleb kõrgete ($>100\,000\,\Omega$), madalate ($<100\,\Omega$) ja nende vahepeale jäävate takistuste mõõtmiseks kasutada erinevaid meetodeid. Meetodid, mis sobivad ühes vahemikus mõõtmiste teostamiseks ei pruugi olla täpsed või praktilised mõõtmiseks teistsuguses skaalas [9].

Üks meetod tundmatu takistuse mõõtmiseks on mõõta voluluringis seda takistit läbiva voolu tugevus, ühendades sellega jadamaisi ampermeetri, ja sellel takistil langev pinge, ühendades sellega rööbiti voltmeetri (joonis 3). Seejärel saab, kasutades Ohmi seadust (valem 1) arvutada välja takisti takistuse.

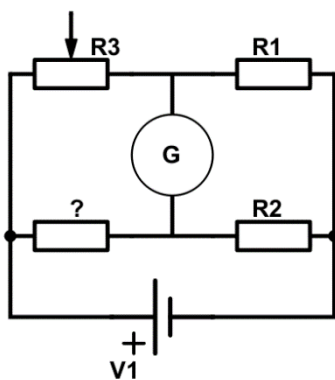
$$R = U/I \quad (1)$$

Valemis 1 tähistab R takistust, U pinget takisti otstel ja I voolutugevust [10].

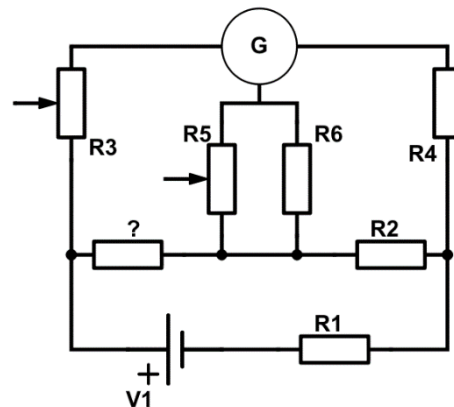


Joonis 3. Takistuse määramine voltmeetri ja ampermeetiga.

Silla meetod on takistuse mõõtmise viis, kus kasutatakse kõrge tundlikkusega galvanomeetrit, tuntud takistusega etalontakisteid ja potentsiomeetrit. Silla meetodi tarbeks on välja mõeldud mitmeid skeeme, neist tuntuimad on Wheatstone' sild ja Kelvini topeltsild (joonised 4 ja 5). Meetod seisneb potentsiomeetri seadistamises manuaalselt nii, et galvanomeetrit ei läbiks vool. Seejärel saab arvutada tundmatu takistuse, kuna ülejäänud takistused skeemis on teada [11].



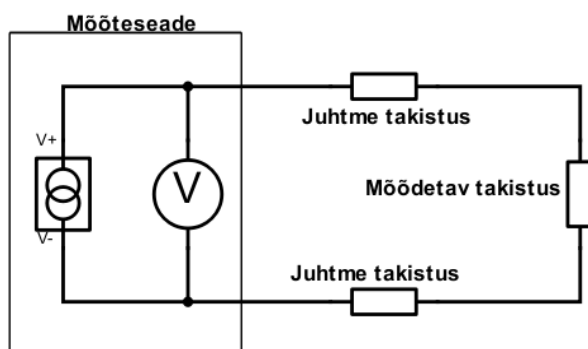
Joonis 4. Wheatstone' sild.



Joonis 5. Kelvini topeltsild.

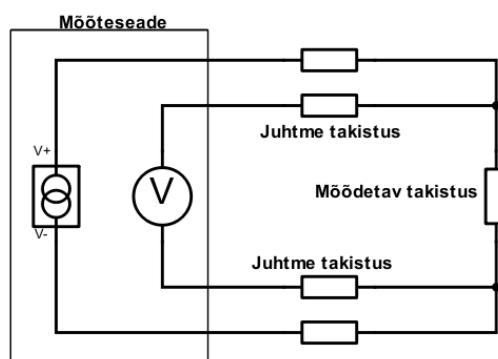
Levinud viis takistuse leidmiseks on potentsiaalide vahe määramine. Selleks kasutatakse konstantse voolu allikat ja pinget mõõtmist. Takistist juhitakse läbi kindlaks määratud

suurusega vool ja mõõdetakse pinged takisti otstel. Teades voolutugevust ja takistil langevat pinget arvutatakse takistus [11]. Võimalik on ka variant, kus vool juhitakse lisaks ka läbi tuntud takistusega täpse etalontakisti. Etalontakistilt mõõdetakse samaaegselt tundmatu takistiga samuti pingelang, saades seeläbi teada voolutugevuse väärtuse mõõtmiste tegemise hetkel. Enamik odavamaid multimeetreid kasutavad takistuse mõõtmiseks potentsiaalide vahe meetodit kahe juhtmega (joonis 6). See teeb protsessi mõõtja jaoks lihtsaks, kuid tekitab mõõtmistesse sisse vea, sest mõõtmisahelas on sees ka mõõtejuhtmete takistus.



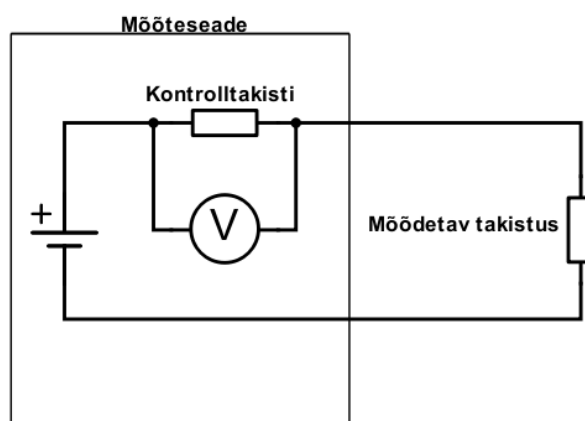
Joonis 6. Takistuse mõõtmine kahe juhtmega.

Probleemist vabanemiseks kasutatakse 4 punkti mõõtmist (joonis 7). 4 punkti mõõtmise korral viiakse uuritava takistuseni neli juhet. Läbi ühe juhtmepaari juhitakse takistisse konstantne vool ja teise juhtmepaari abil mõõdetakse pingelang. Kuna voltmeetri takistus on väga suur, siis Ohmi seaduse järgi on pinget mõõtvates juhtmetes voolutugevus väga väike, mistõttu ei lange ka potentsiaal ühe juhtme kahe otsa vahel oluliselt. Seega ei panusta mõõtejuhtmetes toimuv potentsiaalilangus tundmatu takisti otstelt mõõdetavasse pingesse ja mõõtmine on seetõttu täpsem. Voolujuhtmete takistus mõõtmisi ei mõjuta, sest pingelangu neil ei mõõdetata [9].



Joonis 7. Takistuse mõõtmine nelja juhtmega.

Madalate takistuste mõõtmiseks sobivad hästi 4 punkti meetod ja Kelvini topeltsild. Kui mõõdetavad takistused lähevad kõrgeks, siis kasvavad ka mõõdetavad pingelangud, mille määramine läheb praktiliselt keerukaks. Sellisel juhul on võimalik kasutada konstantse voolu allika asemel konstantse pinge allikat ja mõõta tekkinud voolu tugevust. Teine variant on kasutada samuti konstantse pinge allikat, kuid paigutada mõõtmeseadme sisse tuntud takistusega täpne takisti uuritava takistusega jadamisi ja mõõta selle kontrolltakisti pingelangu (joonis 8). Seejärel saab taaskord arvutada välja uuritava takistuse väärtuse. Kuna pinget mõõta on lihtsam kui voolutugevust, siis on see meetod eelistatud. Sellise mõõteskeemi puhul on oluline, et etalontakisti takistus ei erineks mõõdetava takistuse väärtusest rohkem kui paari suurusjärgu võrra [9].



Joonis 8. Takistuse mõõtmine etalontakistiga.

2.5 Ülesande püstitus

Seadme eesmärgiks on mõõta nanostruktuurse kattega kaetud alumiiniumtraadi elektrilist takistust. Mõõdetava traadi diameeter ja pikkus on valitud sellised, et traadi kogutakistus oleks ligikaudu 1Ω . Teades alumiiniumi eritakistust $\rho = 2,65 * 10^{-8}$ saab, kasutades valemit 2 traadi takistuse kohta vastavalt eritakistusele, valida sobivad traadi mõõtmed.

$$R = \rho * \frac{l}{S} \quad (2)$$

Kosmosemissiooni vältel on eeldatavaks traadi takistuse muutuseks korrosiooni tõttu umbes $0,01-0,1 \Omega$. See tähendab, et mõõtetäpsus peaks olema vähemalt $\pm 0,005 \Omega$. Mõõdetava 1Ω takistuse korral peaks suhteline mõõtetäpsus olema $\pm 0,5\%$.

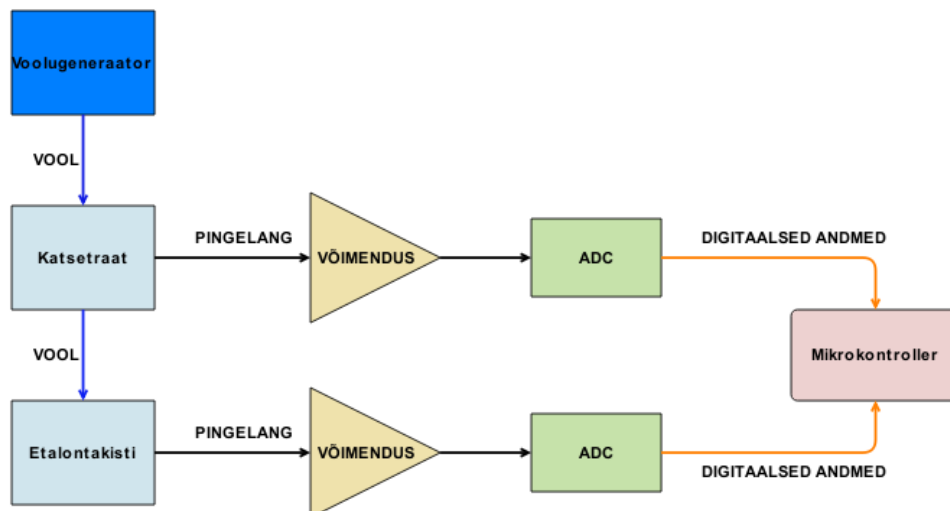
Katsemoodul peab olema suhteline iseseisvalt töötama peale Maalt saadetud käsu saamist. Moodulil tuleb oodata käsku, kuna satelliidi täpne orbiidi periood ja seejuures ka mõõtmiste tegemise periood selgub alles selle kosmosesse jõudmisel. Seadmel peab olema võimekus teostada nii ühekordseid mõõtmisi kui ka mõõtmisi pikema ajavahemiku vältel etteantud intervalliga. Seade peab suutma näiteks salvestada hulga väärtusi terve orbiidi ehk satelliidi ühe Maa ümber tiirlemise perioodi vältel. Kogutud andmed peavad säilima kuni neid saab kas töödelda seadme enda mikrokontrolleri poolt või kuni satelliidi juhtarvuti küsib neid andmeid Maale saatmiseks. Andmetöötlus satelliidi pardal võib olla vajalik, et vähendada Maale saadetavat andmehulka. Seadmel peab olema püsimalu, kus andmed säiliks ka voolu kadumisel ja millel oleks piisavalt mahtu, et säilitada mõõtmistulemusi kuni tekib võimalus need Maale saata.

3 Metoodika

3.1 Mõõteseade takistuse mõõtmiseks

Mõõtmisel tuleb kasutada meetodit, mis annaks täpseid tulemusi madalate takistuste juures. Selleks sobivad näiteks Kelvini topeltsild ja 4 punkti mõõtmine. Kelvini topeltsilla kasutamine satelliidil on raskendatud, sest see vajab iga mõõtmise jaoks eraldi kalibreerimist, et galvanomeetri näit oleks null. 4 punkti mõõtmisel sellist piirangut pole, mistõttu valiti takistuse mõõtmiseks see meetod [10].

4 punkti meetodi realiseerimiseks on vajalik voolugeneraator, täppistakisti ja selle pinget mõõtev ADC, et arvutada täpne voolutugevus mõõtmiste hetkel, ADC, et mõõta potentsiaalilangust eksperimendil ja võimendid, sest mõõdetavad pinged on väikesed. Kuna katseseade peab mõõtma kahe traadi pinget, siis peab olema ka ADC-sid ja võimendusi vastavalt rohkem. Joonisel 9 on esitatud ühe takistuse mõõtmise plokk skeem.



Joonis 9. Ühe takistuse mõõtmise plokk skeem.

Uuritavad takistused on ligikaudu suurusega 1Ω ja oodatav muutus on suurusjärgus $0,01-0,1 \Omega$. Et säilitada varu mõõtmistes tuleks arvestada uuritava takistuse suurusega vähemalt 2Ω . Minimaalne mõõdetav takistuse muutus peaks olema vähemalt suurusjärgu võrra väiksem kui minimaalne muutus ehk umbes $0,001 \Omega$. See tähendab et ADC peaks mõõtma vähemalt 11 bitise täpsusega, sest $2 \Omega / 0,001 \Omega = 2000$ ja $2^{11} = 2048$.

Selleks, et mõõtmise ajal traadilt eralduv võimsus ei hakkaks traati liialt soojendama ja takistust muutma, peab mõõtmisel kasutatav vool olema väike. Mõõdetava alumiiniumtraadi mass on umbes 0,1 g. Kui traat ei tohiks mõõtevoolu toimel soojeneda rohkem kui 0,1 °C, siis selleks kuluv soojushulk on 9 mJ vastavalt valemile 3, kus Q on soojushulk, c on aine erisoojus ja ΔT on temperatuuri muutus. Alumiiniumi erisoojuseks arvestati $c = 0,9 \text{ J/g}\cdot\text{K}$.

$$Q = c * m * \Delta T \quad (3)$$

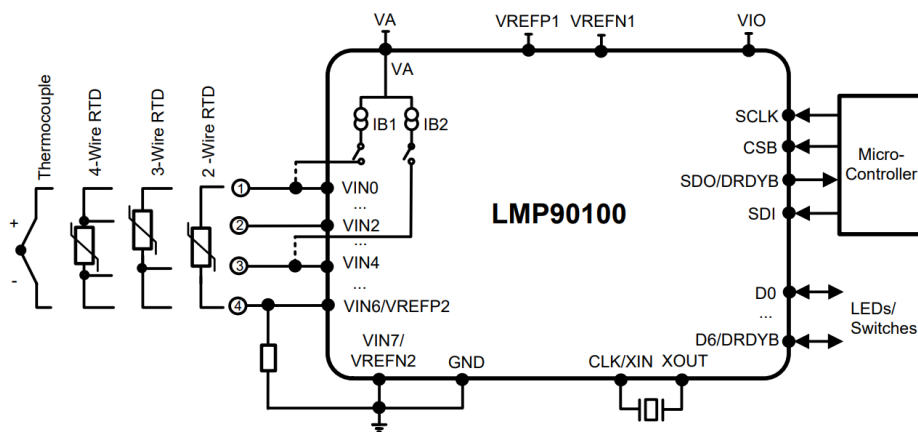
Traadil eralduv võimsus peaks järelt jätma alla 9 mW. Kindluse mõttes võib võtta veel umbes suurusjärgu võrra väiksema võimsuse $\sim 1 \text{ mW}$. Traadil eralduv võimsus avaldub valemist 4, kus P on võimsus, I on voolutugevus ja R on traadi takistus.

$$P = I^2 * R \quad (4)$$

Arvestades takistuseks 1Ω saab avaldada maksimaalse voolutugevuse, milleks on $\sim 0,03 \text{ A}$.

Traadi pingelangu mõõtmiseks tuleks võimendada pingepotentsiaali kõrgem väärtus võimalikult lähedale ADC etalonpingele, mis võib tüüpiliselt olla näiteks 3,3-5 V. Kui voolutugevus on 0,03 A, siis on takistil tekkiv pingelang vastavalt Ohm'i seadusele 0,03 V. Et ADC poolt mõõdetav pinge oleks 3 V tuleks seda võimendada 100 korda. Võimendusahelat on võimalik koostada kasutades näiteks operatsioonivõimendit mitte-inverteeritud konfiguratsioonis [12].

Mõõteskeem oleks võimalik kokku panna diskreetsetest komponentidest, kuid saada on ka mikroskeeme, kus on kõik vajalikud mõõteahelad ühendatud üheks komponendiks. Näiteks nii Microchip kui Texas Instruments pakuvad oma tootevalikus mitmed AFE-e (*Analog Front End*) [13, 14]. AFE on mikrokiip, mille sees on ahelad analoogsignaalide töötamiseks, näiteks võimendamiseks, ADC-d signaalide digitaalseks konverteerimiseks ja võimekus edastada andmed üle jadaühenduse. Käesolevas töös valiti kasutamiseks Texas Instrumentsi toodetav kiip LMP90100, mille tüüpiline rakenduskeem on toodud joonisel 10.



Joonis 10. LMP90100 tüüpilised rakendusskeemid.

Tegemist on 24-bitise ADC-ga sensoriga, millel on programmeeritav signaalivõimendus, sisseehitatud pideva kalibratsiooni võimekus ja madal voolutarve. LMP90100-l on kaks sisseehitatud voolugeneraatorit, seega pole uuritavale takistusele voolu andmiseks tarvis eraldi välist voolugeneraatorit. See vähendab vajalike komponentide arvu skeemis.

LMP90100 mõõdab vastavalt seadistusele pingepotentsiaalid neljal viigul ja saadab üle SPI ühenduse 24-bitise kahendarvu. See arv moodustub valemi 5 järgi.

$$\text{ADC_DOUT} = \pm \left(\frac{(\text{VINP} - \text{VINN}) \times \text{GAIN}}{\text{VREFP} - \text{VREFN}} \right) \times (2^{23}) \quad (5)$$

ADC_DOUT on väljund, VINP ja VINN vahe on uuritaval takistil olev pinge, GAIN on kiibisisene võimendus ning VREFP ja VREFN vahe on kontrolltakisti pinge. Valemit 5 teisendades ja asendades pinged vastavalt Ohm'i seadusele saab avaldada tundmatu takistuse R_x kui etalontakisti takistus on R_0 .

$$R_x = \frac{\text{ADC_DOUT}}{\text{GAIN} \times 2^{23}} \times R_0 \quad (6)$$

LMP90100-l on 6 väljaviiku katseobjekti pingelangu mõõtmiseks, 4 väljaviiku etalontakistuse pingelangu mõõtmiseks ja kaks voolugeneraatorit. Seega on võimalik ühe kiibiga mõõta kahe erineva objekti takistust [15].

Etalontakistiks valiti Vishay Intertechnology Inc poolt toodetav täppistakisti MMA02040E1001BB100 takistusega 1 k Ω ja täpsusega $\pm 0,1\%$ [16].

3.2 Veahinnang

Mõõteviiga takistuse mõõtmisel sõltub seadmel kahest komponendist: etalontakistist ja LMP90100 mikrokiibist. Etalontakisti MMA02040E1001BB100 täpsus on $\pm 0,1\%$. Lisaks on selle temperatuurist sõltuvus ± 15 ppm/K ehk 1Ω kohta takistusest ei muutu 1 kraadise temperatuuri muutusega see rohkem kui $15 \mu\Omega$. Kui eeldada Estcube satelliidi sisemuses temperatuurikõikumist 100 K võrra, siis käesolevas töös kasutatava $1 \text{ k}\Omega$ takisti korral tähendab see, et selle takistus ei muutu rohkem kui $1,5 \Omega$ [16]. Vastavalt valemile 6 on mõõdetud väärtused otseselt seotud etalontakisti täpsusega, mis tähendab, et selle viiga panustab otse mõõtmise veasse.

Teine vea allikas on takistust mõõtev mikroskeem LMP90100. LMP90100 mõõtetulemused on 24 bitised, seega diskreetimisest tulenev viiga on $\pm \frac{1}{8388608}$ mõõtetulemusest, mis on teiste mõõtevigade suhtes praktiliselt olematu ($\pm 0,119$ ppm). Lisaks tekib viiga temperatuurimuutuste tõttu. LMP90100 mikrokiibil on võimekus teostada mõõtmiste taustal pidevat kalibreerimist, mis sisuliselt eemaldab nii võimendusest tuleneva vea kui ka üldise temperatuurist sõltuva pingemuutuse vea. Joonisel 11 on esitatud AFE mõõdetava pingelangu väärtuse sõltuvus temperatuurist, kust on näha, et 3 V toitepinge korral on tekkiv viiga vahemikus $0,2\text{--}0,3 \mu\text{V}$. Joonisel 12 on võimendusest tuleneva vea sõltuvus temperatuurist.

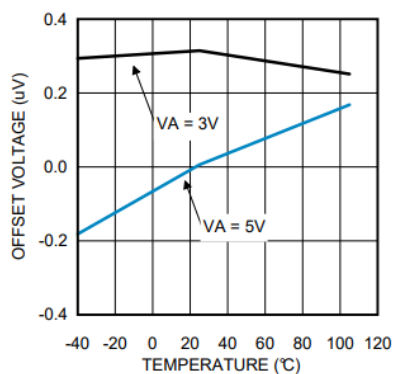


Figure 35. Offset Error vs. Temperature With Calibration at Gain = 8

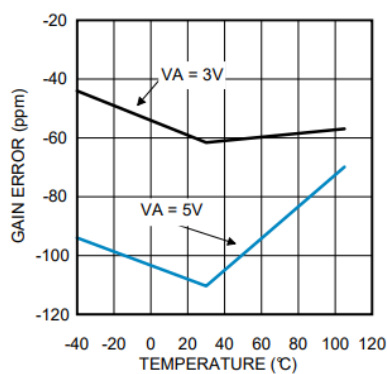


Figure 39. Gain Error vs. Temperature With Calibration at Gain = 8

Joonis 11. Mõõtepinge temperatuurisõltuvus Joonis 12. Võimenduse vea temperatuurisõltuvus [15]

Vastavalt LMP90100 andmelehele on võimendusel 128x müra alla $\pm 2 \mu\text{V}$, mis tähendab, et nii pingeviiga kui võimenduse viiga jäävad alla üldise mürafooni. Antud prototüüpseadme mõõtepinged jäävad 1 mV lähedale, seega on LMP90100-st tulenev suhteline viiga umbes $\pm 0,2\%$ [15].

Seadme suhtelist viiga saab arvutada valemiga:

$$E_R = E_{R_{\text{etalon}}} + E_{LMP}$$

Järelikult on seadme summaarne suhteline mõõteviga $E_R = \pm 0,3\%$. See on kõrgem, kui näiteks täppismultimeetri Tektronix mõõteviga, mis on 1Ω takistuse korral umbes $\pm 0,1\%$ [17], kuid käesolevas töös valmistatava seadme jaoks on see täpsus vastavalt ülesande püstitusele piisav.

3.3 Mikrokontroller ja andmetöötlus

Mikrokiip LMP90100 teeb ära kogu takistuste mõõtmisega seotud töö, kuid saadud andmeid on vaja enne maale saatmist töödelda. Takistuste väärtused tuleb salvestada terve orbiidi vältel, sest erinevates orbiidi punktides erineb traadi temperatuur suures vahemikus vastavalt sellele, kas satelliit asub päikese käes või maa varjus. Maale saadetava andmehulga vähendamiseks tuleb salvestatud väärtused keskmistada ja seejärel uuesti salvestada. Seejärel tuleb salvestatud väärtusi alles hoida seni kuni satelliidi juhtsüsteemid neid Maale saatmiseks küsivad.

Seetõttu on seadmele vaja ka oma mikrokontrollerit, mis oleks suuteline vajalikku andmetöötlust tegema. Üks võimalus on mikrokontrolleris arvutada vastavalt valemile 3 ka välja takistuste väärtused, teine variant on saata maale algandmete keskmised väärtused ja teha arvutused alles maal. Kuna enamik mikrokontrollereid on võimelised teostama arvutusi, siis kontrolleri valikus see suurt rolli ei mängi. Oluline on mikrokontrolleri madal voolutarve, kuna satelliidil on maksimaalne võimalik tarbitav võimsus piiratud. Katseplaadi mikrokontroller peab suhtlema satelliidi juhtsüsteemidega, milleks on vajalik USART ühenduse olemasolu, ja takistust mõõtvate mikrokiipidega, kasutades SPI suhtlusprotokolli. Andmete hoiustamiseks kuni ühenduse loomiseni maaga tuleb kasutada püsimälu, mis säilitaks andmed ka juhul, kui satelliit peaks eksperimendiplaadil voolu välja lülitama. Et vältida lisakomponendina plaadile kella lisamist peaks mikrokontrolleril olema ka reaalaaja taimer, et välja arvutada asukohta orbiidil.

Välja valiti Microchipi poolt toodetav ATXMega256D3 mikrokontroller. Atxmega256D3 on 8-bitise arhitektuuriga AVR XMEGA D kiipide perekonna mikrokontroller. Selle olulisemateks omadusteks on viis 16-bitist taimerit, 16-bitine reaalaaja taimer, 50 GPIO viiku, 3 USART porti, 16 kanaliline ADC, 2 I2C porti ja 2 SPI porti. 256D3 töötab pingetel 1,6-3,6 V ja on suhteliselt väikese energiatarbega AVR mikrokontrollerite seas (tüüpiliselt alla 1 mA töötades aktiivselt 2 MHz sagedusel ja 3 V pingega). Võimalik on kasutada mitmeid madala energiatarbega režiime, kus on välja lülitatud käesolevas projektis ebavajalikud võimekused.

Antud mudelil on saadaval ka 4 kB EEPROM mälu, mida saab kasutada andmete pikemaajaliseks hoiustamiseks [18].

3.4 Mõõteseadme testimise metoodika

Prototüüpseadme töö hindamiseks viidi läbi katsed, kus mõõdeti erinevaid takistusi nii katseseadmega, kui ka täppismultimeetriga Tektronix DMM4050 [17]. Takistusena kasutati 31,5 cm pikkusega ja 0,08 mm diameetriga vasktraati, mille mõlemad otsad kinnitati UTP pistikupesaga külge. Testimisel kasutati vasest traati alumiiniumi asemel selle parema kättesaadavuse ja kergema käsitlemise tõttu. UTP pesa kasutati selleks, et saaks kiirelt ja katset võimalikult vähe mõjutades mõõta takistust vaheldumisi nii prototüüpseadme kui ka täppismultimeetriga.

Takistuse muutus saavutati läbi traadi temperatuuri muutmise. Mõõtmised viidi läbi toatemperatuuril, keevas destilleeritud vees ja vedelas lämmastikus. Teades vase takistuse temperatuuritegurit oli võimalik arvutada välja oodatav muutus traadi takistuses vastavalt valemitele 2 ja 4 ning võrrelda seda prototüübiga mõõdetud tulemustega. Samuti mõõdeti lühikese ajavahega etalonina sama traati erinevates keskkondades täppismultimeetriga, kasutades 4 punkti mõõtmist.

$$R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (7)$$

Valem 7 annab takistuse R , kui temperatuur on T , aine temperatuuritegur on α ja takistus temperatuuril T_0 on R_0 [19].

Lisaks kontrolliti kõigi mikrokontrolleri funktsioonide tööd kasutades erinevaid mõõtefunktsioone takistuste mõõtmiseks. Veenduti ka orbiidi kestel tehtavate mõõtmiste korrektsuses. Testimisel kasutati Estcube-2 eeldatavat orbiidi perioodi 700 km kaugusel maapinnast, mis on vastavalt valemile 8 umbes 5918 sekundit [20].

$$T^2 = R^3 \times \frac{4\pi^2}{G \times M_{Maa}} \quad (8)$$

Valemis 8 on T periood, R satelliidi kaugus maa keskpunktist, G gravitatsioonikonstant ja M_{Maa} on Maa mass.

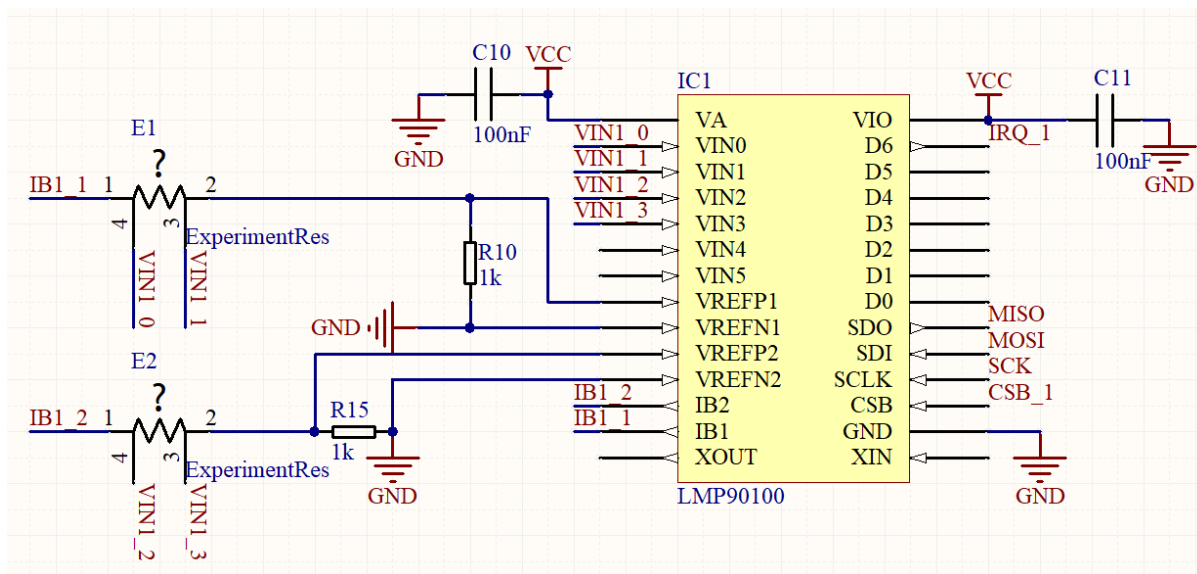
Katsetraati mõõdeti 5918 sekundi vältel nii, et esimesed 2959 sekundit hoiti eksperimenti 80 °C ahjus. Nii sai simuleerida orbiidi jooksul muutuvat temperatuuri, mis on põhjustatud satelliidi liikumisest päikese käest Maa varju. Ühe 5918 sekundi pikkuse „orbiidi“ vältel tehti

100 mõõtmist, kusjuures igal mõõtmisel võeti 100 näidu keskmine ja salvestati standardhälve. „Orbiidi“ perioodi täitumisel arvutati ja väljastati mõõdetud tulemuste keskmine väärtus ja keskmine standardhälve. Katset korrati 3 korda.

4 Tulemused

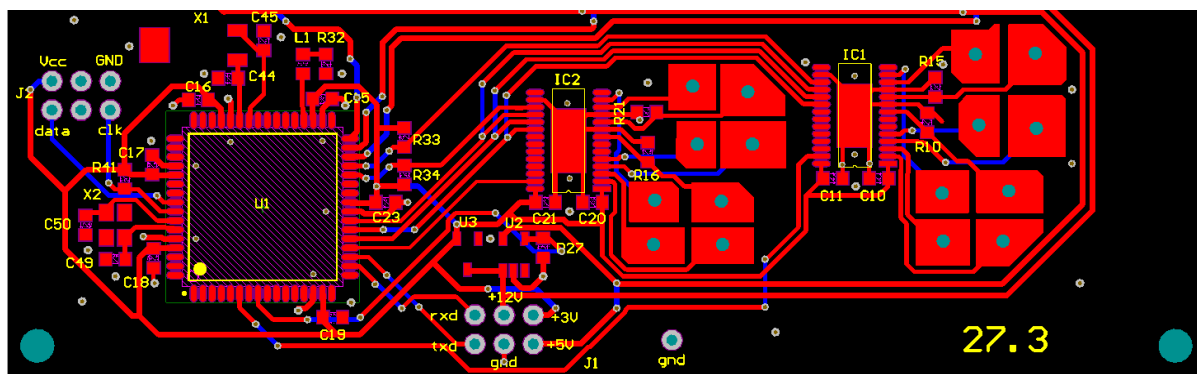
4.1 Mõõteseadme disain ja ehitus

Seadme trükkplaat disainiti kasutades programmi Altium Designer [21]. Prototüübile paigutati kaks takistusemõõtmiskiipi LMP90100, sest projekti algul polnud täpselt teada, mitut katsetraati mõõta on vaja. Mõõteahela skeem LMP90100-i kasutades on näha joonisel 13.



Joonis 13. LMP90100 mõõteskeem.

Ühe kiibiga on võimalik mõõta kuni kahte takistust, seega kahe kiibiga saab mõõta kuni nelja erineva katsetraadi takistust. Kiibid paigutati plaadil sedasi, et neil saaksid võimalikult lähedal olla katsetraatideni minevate juhtmete ühendused. Iga katsetraadi kohta on plaadil 4 kontakti 4 punkti mõõtmise teostamiseks. Kontaktid tehti suured ja 1.2 mm diameetriga aukudega. Sedasi on võimalik testimisel kasutada erinevaid kinnitusmeetodeid vastavalt lõplikule katsetraadirakisele.



Joonis 14. Trükkplaadi joonis.

PCB alusplaat toodeti Brandner PCB OÜ-s ja komplekteeriti Tartu Ülikooli Digilaboris. Trükkplaadi skeem ja joonised on esitatud ka lisadel 1 ja 2.

4.2 Mõõteseadme programmeerimine

Koodis realiseeriti esmalt abifunktsioonid USART ja SPI kommunikatsiooniks. USART oli vajalik seadme testimiseks ja suhtluseks satelliidi sidesüsteemiga ning SPI kaudu toimus andmevahetus LMP90100 kiipidega. Püsimalu EEPROM kasutamiseks loodi funktsioonid sinna kirjutamiseks ja lugemiseks. Kuna käesoleva prototüüpseadme töös on vajalik salvestada järjest mitmed väärtused ja hiljem need ka järjest tagasi lugeda, kirjutati funktsioonid 24 bitiste väärtuste järjest kirjutamiseks ja lugemiseks.

Seadme koodi saab jagada üldiselt 7-ks osaks:

1. Abifunktsioonid

- 1.1. spiTransmitMany() – Saadab sisendina antud baidimassiivi määratud kiibile üle SPI ühenduse.
- 1.2. usartWrite() – Saadab baidi üle USART ühenduse.
- 1.3. writeEEPROM()/readEEPROM() – Kirjutab/loeb antud aadressile baidi.
- 1.4. writeNext24bitToEEPROM()/readNext24bitFromEEPROM() – Kirjutab/loeb püsimalust järgmise 24 bitise väärtuse.
- 1.5. sendSavedOrbitDataToUsart() – Loeb püsimalust salvestatud keskmised väärtused ja saadab need üle USART ühenduse.

2. Mõõtefunktsioonid

- 2.1. measureRes()/measureResDec() – Mõõdab ühe takistuse vastavalt sisendiks antud kiibi numbrile ja kanalile ning väljastab selle kahendsüsteemis/kümnendsüsteemis.
- 2.2. measureAvg()/measureAvgDec() – Teeb järjest etteantud arvu mõõtmisi, arvutab nende keskmise ja väljastab selle.
- 2.3. measureAvgWStdDev()/measureAvgWStdDevDec() – Teeb järjest etteantud arvu mõõtmisi ja arvutab keskmise väärtuse ning standardhälbe.

3. Arvutusfunktsioonid

- 3.1. calcCRC() – Arvutab antud väärtuse kontrollsumma.
- 3.2. calcAvgFromArray() – Arvutab sisendina antud massiivi väärtuste aritmeetilise keskmise.
- 3.3. calcStdDevFromArray() – Arvutab sisendina antud massiivi väärtuste standardhälbe.

4. Konfiguratsioonifunktsioonid

4.1. `initLMPs()` – Saadab LMP90100 kiipidele konfiguratsioonibaidid.

4.2. `initFullOrbitMeasurement()` – Alustab mõõtmist sisendiks antud orbiidi perioodi vältel.

4.3. `setChannel()` – Määrab LMP90100 kanali, millest parasjagu takistust mõõdetakse

5. Initsialiseerimine

Siin koodi osas toimub mikrokontrolleri ja LMP90100 kiipide seadistamine tööks.

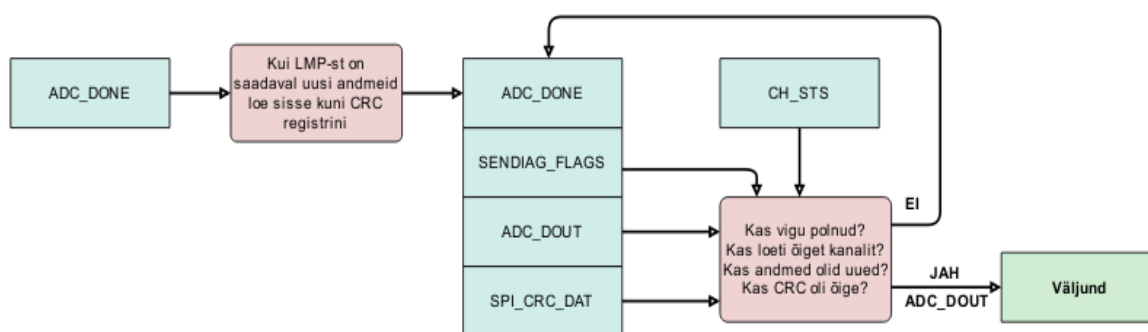
6. Mõõtettsükkel

Mõõtettsükkel on pidevalt läbitav tsükkel, kus toimuvad testimisel takistuste mõõtmised ja nende väljastamine üle USART ühenduse.

7. Katkestused

Katkestuste abil toimub mõõtmine orbiidi perioodi vältel. Võimalik on ka kasutada katkestust, et saada teada millal on LMP90100 kiibist võimalik lugeda uusi andmeid. Samuti toimub USART ühendusest andmete vastuvõtmine läbi katkestuse.

LMP90100 kiibiga ühe takistuse mõõtmise protsess on esitatud joonisel 15.



Joonis 15. Takistuse mõõtmise protsess.

ADC-st andmete küsimiseks tuleb esmalt lugeda selle ADC_DONE register, mille väärtus näitab, kas on saadaval uusi andmeid ja siis SENDIAG_FLAGS register, mille bitid näitavad, millist kanalit mõõdeti ja kui tekkis viga, siis milline. Seejärel sai lugeda kolm järjestikust ADC_DOUT registrit, et saada 24 bitine mõõdetud väärtus. Viimaseks loeti ka register SPI_CRC_DAT, mis sisaldas endas CRC kontrollsummat saadetud väärtusele, et kontrollida

saabunud andmete õigsust. Lisakontrollina loeti ka registri CH_STS väärtus, mis ütleb, kas äsjaloetud andmed olid korrektsed.

Takistuste mõõtmiseks loodi funktsioonid üksiku takistuse mõõtmiseks, ettemääratud hulga takistuste mõõtmiseks ja keskmise leidmiseks ning hulga mõõtmiste keskmise ja standardhälbe leidmiseks. Lisaks LMP90100-dest tulnud andmete otse väljastamisele lisati ka funktsioonid, kus arvutati kohe välja ka takistuse väärtus kümnendsüsteemis. Kuigi neid funktsioone saab kasutada ka missioonil, lihtsustasid need eelkõige testimise protsessi.

Andmemassiivi keskmise väärtuse ja standardhälbe leidmiseks realiseeriti eraldi arvutusfunktsioonid. Samuti tehti funktsioon CRC väärtuse arvutamiseks, et kontrollida LMP90100 kiibilt saadud andmete õigsust.

Mikrokontroller initsialiseeriti töötama sagedusele 32 MHz ning käivitati vajalikud taimerid, väljundviigud ja suhtlusliidesed. Kontrolleri käivitumisel loeti ka EEPROM-ist nende muutujate väärtused, mis peavad säilitama oma andmed ka juhul, kui kontroller kaotab voolu.

LMP90100 initsialiseerimiseks tuli esmalt saata sellele soovitud konfiguratsiooniregistrite väärtused, kui need erinesid vaikeseadistusest. ADC-d seadistati automaatsele kalibreeringule, kahe kanaliga mõõtmiseks ja takistust läbivaks voolutugevuseks 1mA.

Eraldi loodi funktsioonid ühe orbiidi vältel ettemääratud arvu mõõtmiste tegemiseks. Selleks tuli esmalt see protsess käivitada, kasutades vastavat funktsiooni, millele tuli ette anda orbiidi kestus sekundites ja soovitud mõõtmiste arv orbiidi kohta. See funktsioon käivitas reaalaraja kella, mille vastavate ajavahemike tagant toimivas katkestuses mõõdeti takistuse väärtused ja salvestati need. Ühe orbiidi täitumisel arvutas eraldi funktsioon välja orbiidi keskmise takistuse ja keskmise standardhälbe.

4.3 Mõõteseadme testimise tulemused

Mõõteseadme mõõtmise täpsuse testimiseks mõõdeti katsetraati erinevatel temperatuuridel nii prototüüpseadmega kui ka täppismultimeetriga Tektronix DMM 4050. DMM 4050 täpsus 10 Ω mõõtepiirkonnas on $\pm(0,003\%$ mõõteväärtusest + 0,001 Ω) ehk 1 Ω takistuste korral $\pm 0,00103 \Omega$ [17]. Samuti arvutati takistuse eeldatavad väärtused vastavalt vase eritakistusele ($1,72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$), temperatuuritegurile (0,00393) ja traadi mõõtmetele ($l = 0,315 \text{ m}$ ja $A = 0,00004^2 \cdot \pi \text{ m}^2$) kasutades valemit 7. Testimisel mõõdeti nii prototüübiga kui ka multimeetriga 100 mõõtmise keskmine tulemus ja nende standardhälve.

Mõõtmistulemused on esitatud tabelis 1.

Tabel 1 – Elektrilise takistuse mõõtetulemused ja nende standardhälbed

	<i>Prototüüp</i> (standardhälve)	<i>Textronix DMM 4050</i> (standardhälve)	<i>Arvutuslik</i> väärtus
<i>Toatemperatuur (22,4 °C)</i>	1,0836 Ω (0,0014 Ω)	1,0819 Ω (0,0002 Ω)	1,0880 Ω
<i>Keev vesi (100 °C)</i>	1,4074 Ω (0,0032 Ω)	1,4089 Ω (0,0002 Ω)	1,4168 Ω
<i>Vedel lämmastik (-195,8 °C)</i>	0,1724 Ω (0,0014 Ω)	0,1818 Ω (0,0004 Ω)	0,1637 Ω

Pikemaajalise mõõtmise tulemused on esitatud tabelis 2. Ühe 5918 sekundi ehk ~100 minuti pikkuse „orbiidi“ vältel tehti 100 mõõtmist, kusjuures igal mõõtmisel võeti 100 näidu keskmine ja salvestati standardhälve. Orbiidi täitumisel salvestati mõõdetud tulemuste keskmine väärtus ja keskmine standardhälve. Esimesed 2959 sekundit oli eksperiment 80,7 °C ahjus ja seejärel 2959 sekundit 20,3 °C toas. Valemite 2 ja 4 järgi peaks traadi takistus 80,7 °C korral olema 1,335 Ω ja 20,3 °C korral 1,079 Ω.

Tabel 2 – Pikaajalisel mõõtmisel mõõdetud takistuse keskmine väärtus ja standardhälvete keskmine väärtus.

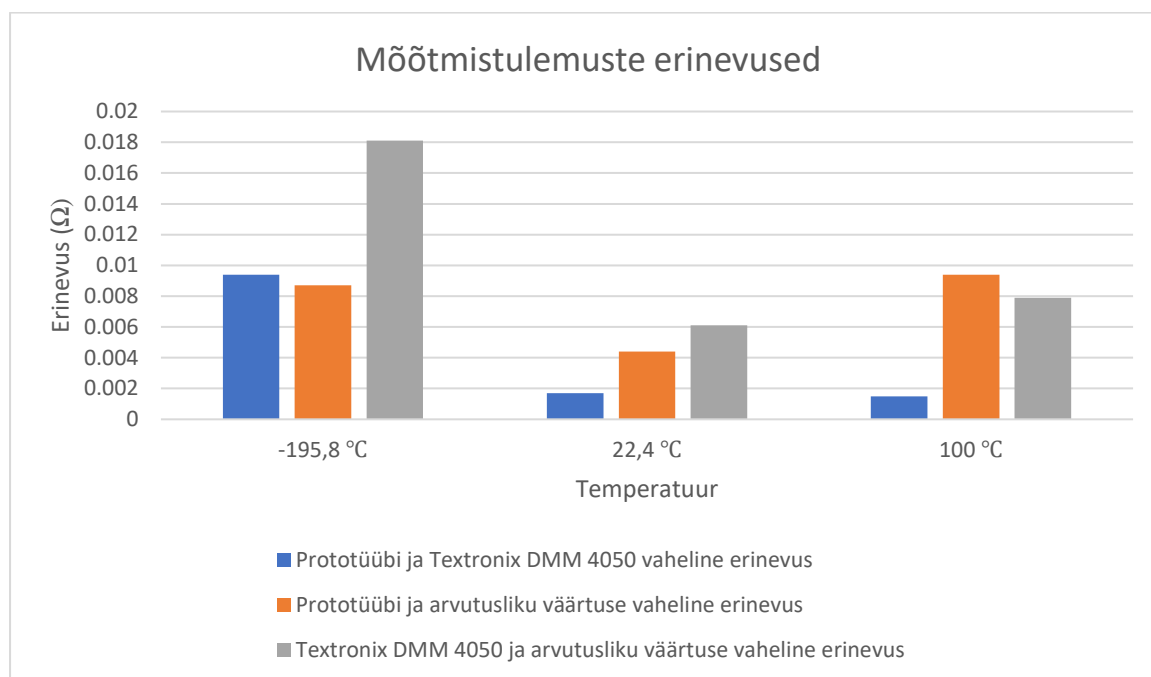
	<i>Takistuse keskmine</i> <i>väärtus</i>	<i>Standardhälve</i> <i>keskmine</i> <i>väärtus</i>
<i>Katse 1</i>	1,2274 Ω	0,0014 Ω
<i>Katse 2</i>	1,2349 Ω	0,0013 Ω
<i>Katse 3</i>	1,2331 Ω	0,0014 Ω

Mõõteseadet kasutati ka valminud lõpliku katseobjekti takistuse mõõtmiseks. Mõõdeti kahte katseobjektil olevat traati, mille elektrilisteks takistusteks saadi vastavalt 0,5082 Ω standardhälbega 0,0017 Ω ja 0,5334 Ω standardhälbega 0,0017 Ω.

5 Tulemuste analüüs ja järeldused

5.1 Tulemuste analüüs

Testid viitasid heale kattuvusele mõõdetud ja arvatatud väärtuste vahel. Prototüübiga mõõdetud takistused ei erine arvatatud takistustest ega täppismultimeetriga mõõdetud tulemustest rohkem kui $10\text{ m}\Omega$. Joonisel 16 on näha, kuidas erinevatel viisidel saadud tulemused omavahel erinesid.



Joonis 16. Erinevused mõõtmistulemuste vahel.

Läbiviidud katsed näitasid, et temperatuuri kõikumisel muutub takistus olulisel määral. Saadud tulemused on hästi ennustatavad vastavalt valemile 5. Täppismultimeetriga Tektronix DMM 4050 [17] tehtud mõõtmiste standardhälbed on ligikaudu ühe suurusjärgu võrra väiksemad.

Kõige suuremad erinevused tulemustes on näha mõõtmistes, mis teostati uputades katsetraat vedelasse lämmastikku. Kuna lämmastiku termosesse oli raske sisse näha, on võimalik, et katsetraat ei saanud uputatud täielikult lämmastikku või polnud seal püsivalt piisavalt kaua. Seetõttu veidi kõrgem traadi temperatuur võib seletada katses mõõdetud oodatust suuremaid takistusi.

Nii toatemperatuuril, kui 100°C juures tehtud mõõtmistel on näha, et prototüübi ja täppismultimeetri omavaheline erinevus on väike ja mõlemal on suurem erinevus arvutusliku

väärtusega. Sellest võib järeldada, et arvutusliku väärtuse leidmisel on tehtud vigu näiteks ühenduskohtade takistuse arvutusel või traadi täpse pikkuse leidmisel.

Pikaajalisel mõõtmisel saadud takistuste keskmised väärtused on sarnased ja standardhälbed umbes 1,3 mΩ ehk 0,1% mõõtetulemustest. Testimine näitas, et loodud funktsioonid orbiidi perioodi järgimiseks, andmete EEPROM-i salvestamiseks ja lugemiseks töötavad.

5.2 Seadme edasiarendus

Seadme kasutamiseks tuleks sellele lisada eraldi temperatuurisensor, mille saaks traadile võimalikult lähedale viia. Näiteks sobiksid temperatuuri mõõtmiseks PT1000 plaatinast sensorid. PT1000 puhul muutub vastavalt temperatuurile selle takistus, mida saaks mõõta, kasutades samasugust skeemi praeguste katsetakistuste mõõtmisega. Teades temperatuuri on võimalik mõõtetulemusi vastavalt korrigeerida ja saab teha ka üksikuid mõõtmisi orbiidi eri punktides [22].

Edasine tegevus oleks prototüübi uus disain, arvestades satelliidi ja katsetraadirakise täpseid mõõtmeid. Praegused jalajäljed mõõtmisjuhtmete ühendamiseks tuleb ümber tõsta vastavalt katsetraadile. Ilmselt võib eemaldada plaadilt teise LMP90100 mikrokiibi, kuna lõplikus katses on vajalik mõõta ainult kahe traadi takistust.

Prototüüpi on võimalik ümber kujundada ka vastavalt mõne teise sarnase eksperimendi vajadustele. Selleks tuleb kontaktid ümber paigutada vastavalt konkreetsele eksperimendile. Kui pole vaja lisafunktsioone saab mikrokontrolleri mõne mõõtmetelt tunduvalt väiksema vastu välja vahetada. Nii on võimalik seadet kasutada ka eksperimentides, kus ruum on piiratud. Veel suuremat kokkuhoidu ruumilt saab saavutada paigutades komponendid plaadi mõlemale poolele. Seade on sobiv kasutamiseks ka eksperimentides, millele puudub kerge ligipääs. Näiteks sobiks prototüüp või selle edasiarendus õhupalliga atmosfääri kõrgematesse kihtidesse saadetava katse läbi viimiseks.

6 Kokkuvõte

Käesolevas töös disainiti ja konstrueeriti mõõteseadme prototüüp, millega on võimalik viia läbi elektrilise takistuse mõõtmist kosmoses, et karakteriseerida nanotehnoloogial põhinevaid kaitsekatteid.

Töö alguses tutvustati eksperimenti nanostruktuurse kaitsekattega, selle omaduste määramise viise ja erinevaid elektrilise takistuse määramise meetodeid. Parimaks lahenduseks takistuse mõõtmisel osutus nelja punkti meetod, mida silmas pidades valiti sobivad komponendid ja disainiti nii elektriline skeem kui ka trükkplaat.

Prototüübiga tehtud mõõtmised näitasid, et see annab võrreldavaid tulemusi täppismultimeetriga ja arvutuslike tulemustega. Prototüübiga mõõdetud takistuste väärtused jäid $\pm 10 \text{ m}\Omega$ piiresse ($\sim 1\%$ mõõdetud väärtustest) nii täppismultimeetri näitudest kui arvutuslikest väärtustest. Projekti edasiarendusena tuleks disainida järgmine plaat, kus on arvestatud ka kandesatelliidi mõõtmete ja piirangutega ning katsetraadi rakise enda mõõtmega.

Käesolevas töös valminud seadet ja selle edasiarendusi saab kasutada ka teistes projektides, kus on vajalik elektrilise takistuse mõõtmine.

Viited

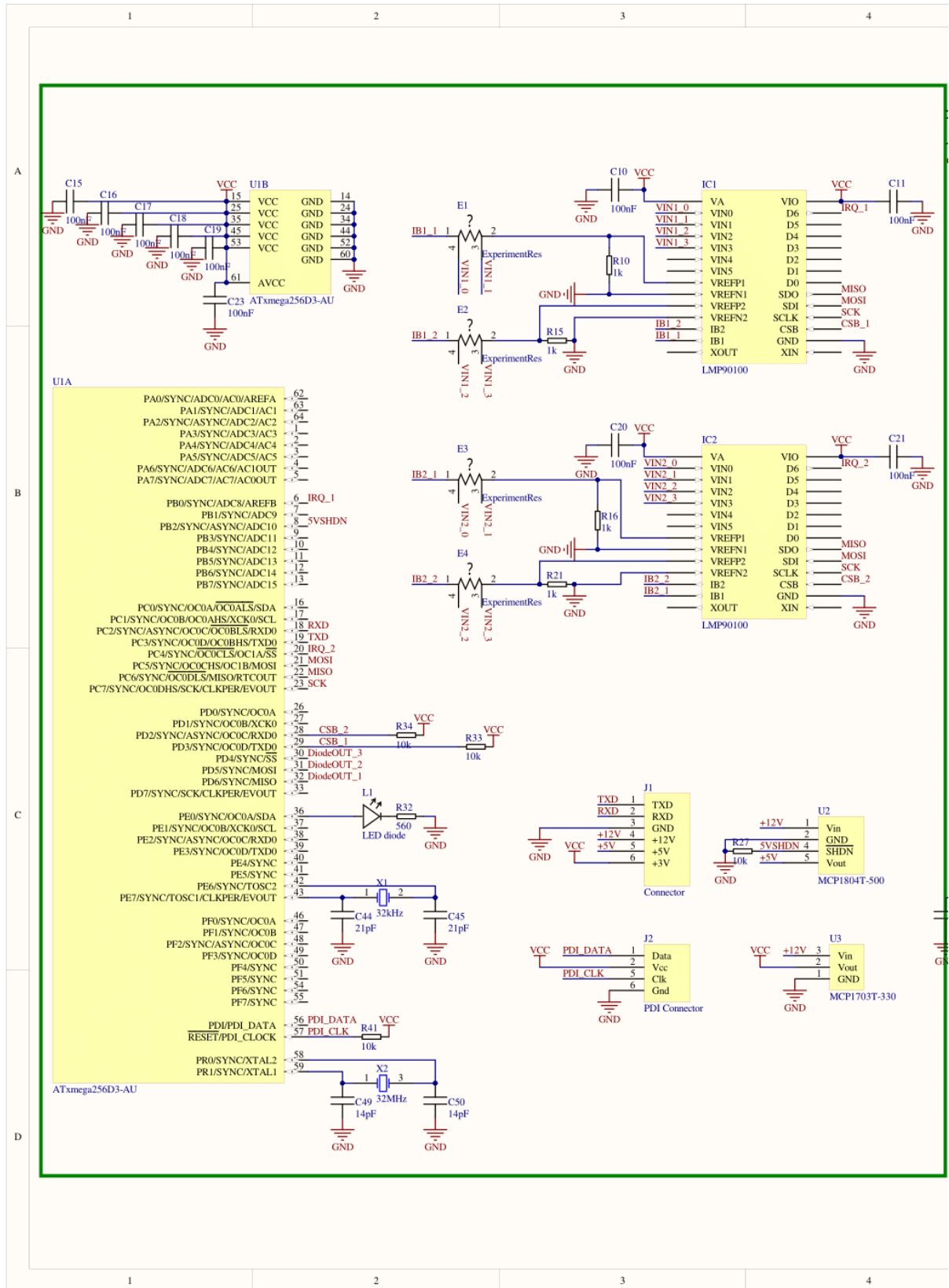
- [1] D. G. Zimcik ja C. R. Maag, „Results of apparent atomic oxygen reactions with spacecraft materials during Shuttle flight STS-41G,“ *Journal of Spacecraft and Rockets*, kd. 25, nr 2, pp. 162-168, 1988.
- [2] K. K. de Groh, B. A. Banks, J. Dever, D. Jaworske, S. K. Miller, E. A. Sechkar ja S. R. Panko, „NASA Glenn Research Center's Materials International Space Station Experiments (MISSE 1-7),“ NASA Glenn Research Center, 2008.
- [3] C. F. Britton, „Introduction to Corrosion Measurement Techniques,“ *Anti-Corrosion Methods and Materials*, kd. 22, nr 6/7, pp. 9-11, 1975.
- [4] *Projekt EU51950*. <https://captaincorrosion.com/2018/01/08/project-eu51950/>.
- [5] V. Sammelselg, L. Aarik ja M. Merisalu, „Method of preparing corrosion resistant coatings“. Patent EP2938758B1.
- [6] A. de Rooij, "CORROSION IN SPACE", Encyclopedia of Aerospace Engineering, John Wiley & Sons Ltd, 2010.
- [7] A. de Rooij, „The Degradation of Metal Surfaces by Atomic Oxygen,“ %1 *Proceedings of the Third European Symposium on Spacecraft Materials in Space Environment*, Noordwijk, The Netherlands, 1985.
- [8] K. C. Fox, „NASA’s Van Allen Probes Spot an Impenetrable Barrier in Space,“ 2014.
- [9] „Basic Techniques for Accurate Resistance Measurement,“ CAS Dataloggers, 14 August 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.dataloggerinc.com/resource-article/resistance-measurement-techniques/>. [Kasutatud 30 March 2019].
- [10] „A Guide to Resistance Measurement,“ Seaward Group, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.seaward.co.uk/resistance-measurement>. [Kasutatud 31 March 2019].

- [11] „Introduction to Resistance Measurement,“ Hioki, [Võrgumaterjal]. Available: https://hiokiusa.com/wp-content/uploads/pdf/18771-UG_TN_Resist_vol1_E1-4ZM.pdf. [Kasutatud 30 March 2019].
- [12] Electronics Tutorials, „Non-inverting Operational Amplifier,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.electronics-tutorials.ws/opamp/opamp_3.html. [Kasutatud 30 March 2019].
- [13] Texas Instruments, „Sensor Analog Front Ends,“ 2012. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.ti.com/lit/ml/slab061/slab061.pdf>. [Kasutatud 1 April 2019].
- [14] Microchip, „Measurement AFEs,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.microchip.com/design-centers/utility-metering-solutions/electric-meter/products/measurement-afes>. [Kasutatud 1 April 2019].
- [15] Texas Instruments, „LMP90100 and LMP9009x Sensor AFE System: Multichannel, Low-Power, 24-Bit Sensor AFE With True Continuous Background Calibration,“ 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/sn510s/sn510s.pdf>. [Kasutatud 30 March 2019].
- [16] Vishay Beyschlag, „Precision Thin Film MELF Resistors MMU 0102, MMA 0204, MMB 0207,“ 2016. [Võrgumaterjal]. [Kasutatud 3 April 2019].
- [17] Tektronix, „DMM4040 and DMM4050 Digital Multimeter Users Manual,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.cedesa.com.mx/pdf/tektronix/tektronix-DMM4040-DMM4050_user_manual.pdf. [Kasutatud 31 March 2019].
- [18] Atmel Corporation, „8/16-bit Atmel AVR XMEGA D3 Microcontroller ATxmega256D3 Datasheet,“ 2015. [Võrgumaterjal]. [Kasutatud 30 March 2019].
- [19] C. R. Nave, „Resistance: Temperature Coefficient,“ Hyperphysics, 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/restmp.html>. [Kasutatud 30 March 2019].
- [20] The Physics Classroom, „Mathematics of Satellite Motion,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.physicsclassroom.com/class/circles/Lesson-4/Mathematics-of-Satellite-Motion>. [Kasutatud 1 April 2019].

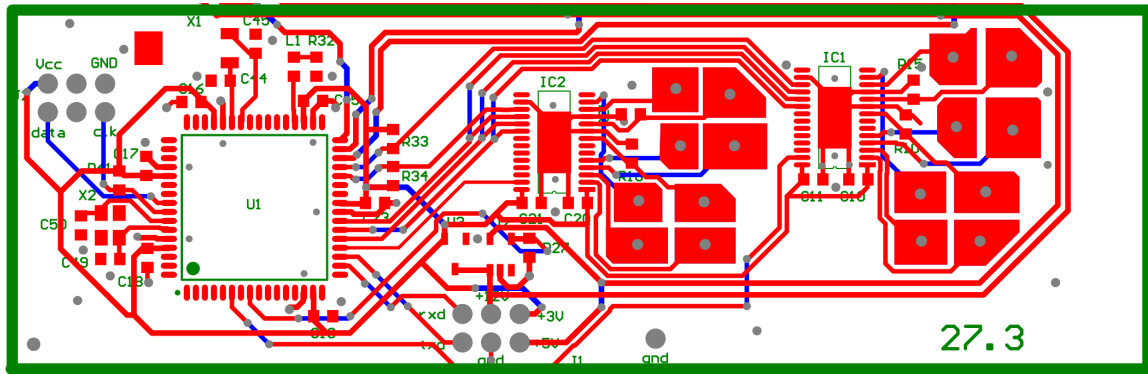
- [21] Altium LLC, „Altium Designer,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.altium.com/altium-designer/>. [Kasutatud 30 March 2019].
- [22] Thermometrics Corp, „PT1000 Sensor,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.thermometricscorp.com/pt1000>. [Kasutatud 1 April 2019].
- [23] „Linear Polarization Resistance (LPR) Monitoring,“ Metal Samples, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.alspi.com/lpintro.htm>. [Kasutatud 30 March 2019].
- [24] A. R. Timmis, „A Study of First Day Space Malfunctions,“ NASA TN D-6474, 1971.
- [25] S. D. S., *Vibration Analyses for Electronic Equipment*, NY: John Wiley and Son, 1973.
- [26] C. E. Vest, „The Effects of the Space Environment on Spacecraft Surfaces,“ *Johns Hopkins APL Technical Digest*, kd. 1, nr 12, pp. 46-54, 1991.
- [27] A. & E. D. & H. G. & A. M. & M. M. Anwar, „Outgassing Effect on Spacecraft Structure Materials,“ *International Journal of Astronomy, Astrophysics and Space Science*, kd. 2, nr 4, pp. 34-38, 2015.
- [28] C. Leonard, „Challenges for Electronic Circuits in Space Applications,“ *Analog Devices*, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.analog.com/en/technical-articles/challenges-for-electronic-circuits-in-space-applications.html>. [Kasutatud 31 March 2019].
- [29] B. Ray, „Electronic Circuit Design and Analysis for Space Applications,“ %1 *Proceedings of the 2001 American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition*, 2001.
- [30] „Active Transistor Constant Current Source,“ *Electronics notes*, [Võrgumaterjal]. Available: https://www.electronics-notes.com/articles/analogue_circuits/transistor/active-constant-current-source.php. [Kasutatud 31 March 2019].

Lisad

Lisa 1. Seadme skeem.



Lisa 2. PCB joonis.



Lisa 3. Kood (eraldi failina).

Lihtlitsents

Mina, Tõnis Peeter Kull ,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose
Mõõteseade nanotehnoloogial põhinevate katete karakteriseerimiseks kosmoses,

mille juhendajad on Maido Merisalu ja Andres Punning

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace
kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu
Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commonsi
litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada
ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, alates
03.06.2024 kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega
isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Tõnis Peeter Kull

03.06.2019

Tänuavaldused

Sooviksin tänada kõiki, kes aitasid kaasa lõputöö valmimisele.

Juhendajad Andres Punning ja Mairo Merisalu.

Tartu Ülikooli Kiletehnoloogia labor

Väino Sammelselg

Tartu Ülikooli Tehnoloogiainstituut

Heiki Kasemägi

Projekt EU51950

Captain Corrosion OÜ

Hedgehog OÜ

Estcube töögrupp

Ettevõtluse Arendamise Sihtasutus

