

TARTU ÜLIKOOL
LOODUS- JA TEHNOLOOGIATEADUSKOND

Arvutitehnika eriala

Henri Lillmaa

**ESTCUBE-1 PÄIKESEELEMENTI SIMULAATORI
ARENDUS JA TESTIMINE**

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Juhendaja: M.Sc. Mihkel Pajusalu

Tartu 2013

Sisukord

Sissejuhatus	3
1. Teooria	5
1.1. ESTCube-1	5
1.1.1. Missioon	5
1.1.2. Satelliidi ülevaade	5
1.2. EPS	7
1.3. Päikeseelemendi simulaatori teooria	9
1.4. Päikeseelemendi pöörlemise simulatsiooni teooria	12
2. Päikeseelemendi simulaatori nõuded	14
2.1. Nõuded	14
2.2. Metoodika	15
3. Disain	15
3.1. Simulaatori prototüübid	15
3.2. Lõplik riistvara	16
3.2.1. Päikeseelemendi juhtmoodul	16
3.2.2. Simulaatori elementide moodul	18
3.3. Tarkvara	19
3.3.1. Ülevaade	19
3.3.2. Välisliides	20
3.3.3. Pöörlemise simulatsioon	21
4. Testimine	21
4.1. Elektrilised testid simulaatoriga	22
4.1.1. Pöörlemissimulatsiooni testid	24
4.1.2. Testid satelliidi lauamudeliga	25
Kokkuvõtte	26
Tänuavaldused	27
Summary	28
Kasutatud kirjandus	30
Lisad 1-6	

Sissejuhatus

ESTCube-1 on Eesti tudengisatelliidi projekti raames valminud kuupsatelliit, mille missiooniks on testida elektrilist päikesetuulepurje (ESAIL ehk *electric solar wind sail*). Satelliit lennutati orbiidile (650 km kõrgune päikesesünkroonne orbiit) Prantsuse Guajaana Kosmosekeskusest (*Centre Spatial Guyanais – CSG*) 07.05.2013. Satelliit on arendatud Tartu Ülikooli üliõpilaste poolt koostöös Tallinna Tehnikaülikooli ja Eesti Lennuakadeemia tudengite ning Soome Meteoroloogia Instituudi (FMI) ja Saksa Kosmoseagentuuri (DLR) teadlastega. Teadusliku missiooni kõrval on oluline ka tudengite kosmosetehnoloogiaalaste teadmiste suurendamine, praktilise kogemuse pakkumine kosmosetehnoloogia arendamises ning projekti arendamisel algusest lõpuni. [1]

ESTCube-1 kasutatavate päikeseelementide testimine elektrienergia alamsüsteemiga on laboritingimustes võrdlemisi tülikas. Rohkema kui ühe-kahe päikeseelemendi ühtlane valgustamine on võrdlemisi keerukas, samuti ka nende töötemperatuuri kontrolli all hoidmine. Päikeseelementidega on raske teostada dünaamilisi teste, näiteks elemendi pöörlemist ümber ühe või rohkema telje, mistõttu on otstarbekas teostada selliseid teste päikeseelemendi simulaatoril. Ühe päikeseelemendi hind jääb suurusjärku paarsada eurot, mis teeb testimise päikeseelementidega võrdlemisi kalliks. Päikeseelementide hinda ja testimise keerukust arvestades tõstataks vajadus päikeseelemendi simulaatori järele, millega oleks satelliidi testimine laboritingimustes lihtsam ja odavam.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärk on programmeeritava päikeseelemendi simulaatori ehitamine, selle arendamine, testimine, kalibreerimine, programmeerimine ja ESTCube-1 elektrienergia alamsüsteemi (EPS ehk *electrical power system*) testimine simulaatoriga. Päikeseelementide simulaator on korduvkasutatav seade, mille abil on võimalik võrdlemisi lihtsa vaevaga testida nii maksimum võimsuspunkti jälgimisseadme (MPPT – *maximum power point tracker*) kui EPS alamsüsteemi tööd tervikuna.

Kindlasti kasutatakse ka tulevastes tudengisatelliidi projektides päikeseelemente, mistõttu saaks seadet kasutada edaspidigi. Käesolevas töös kirjeldatud päikeseelemendi simulaatori kasutamine eeldab sarnast päikeseelementide topoloogiat, kui on see ESTCube-1 ehk kõik elemendid on asetatud paralleelselt. Tulenevalt disainist, on võimalik simulaatorit kasutada ka kuueteistkanalilise programmeeritava koormisena.

Käesolev lõputöö koosneb neljast peatükist. Esimene peatükk kirjeldab ESTCube-1 ehitust, missiooni ja annab ülevaate päikeseelemendi simulaatori teooriast. Teises peatükis esitatakse ülevaade seadmele esitatud nõuetest. Kolmandas peatükis kirjeldatakse seadme riistvara ja tarkvara. Seadmega tehtud testid ja saadud tulemused on väljatoodud neljandas peatükis.

1. Teooria

1.1. ESTCube-1

1.1.1. Missioon

Tudengisatelliidi ESTCube-1 peamine eesmärk on elektrilise päikesetuulepurje katsetamine kosmoses. Elektriline päikesetuulepurje kasutab tõukejõu saamiseks Päikeselt kiirratavate elektriliselt laetud osakeste voogu ehk päikesetuult. ESTCube - 1 väljastab madal maa orbiidil (LEO – *low earth orbit*) tsentrifugaaljõudu ja mootorit kasutades 10 m pikkuse võrkja struktuuriga traadi (*Heytether*). Päikesepurje väljakerimise edukust hinnatakse purje otsmassist tehtava pildi ja pöörlemiskiiruse muutumise järgi. Elektrilise päikesetuulepurje edukas ülesseadmine ja katsetamine on oluliseks aluseks demonstreerimaks tehnoloogiat tulevaste kosmosemissioonide jaoks.

Väljakeritava juhtme moodustab neljast alumiiniumtraadist läbimõõduga 25 – 50 µm võrkjas struktuur (*Heytether*), mis peaks suurendama töökindlust kokkupõrkel kosmoseprügi ja mikrometeoridega, võrreldes ühekiulise traadiga. ESAIL kontseptsiooni on välja töötanud Soome Meteoroloogia Instituudi teadlane Pekka Janhunen 2006. aastal ning sellel tehnoloogial on potentsiaali saada efektiivseimaks Päikesesüsteemis liikumise viisiks, mis senini leiutatud. [2]

1.1.2. Satelliidi ülevaade

ESTCube-1 on kavandatud vastavalt *CubeSat* standardile ning on ühe-ühikuline kuupsatelliit (1U-CubeSat) mõõtmetega 100 x 100 x 113,5 mm ja massiga 1048 g. [3] Satelliidi kere on valmistatud alumiiniumist ja koosneb raamist ning raamile kinnituvatest külgpaneelidest. [4] Kõigil kuuel külgpaneelil on päikeseelemendid ja ühe külgpaneeli sees on antennide lahtikerimise seade. ESTCube-1 on jaotatud järgmisteks alamsüsteemideks (tähestikulises järjekorras):

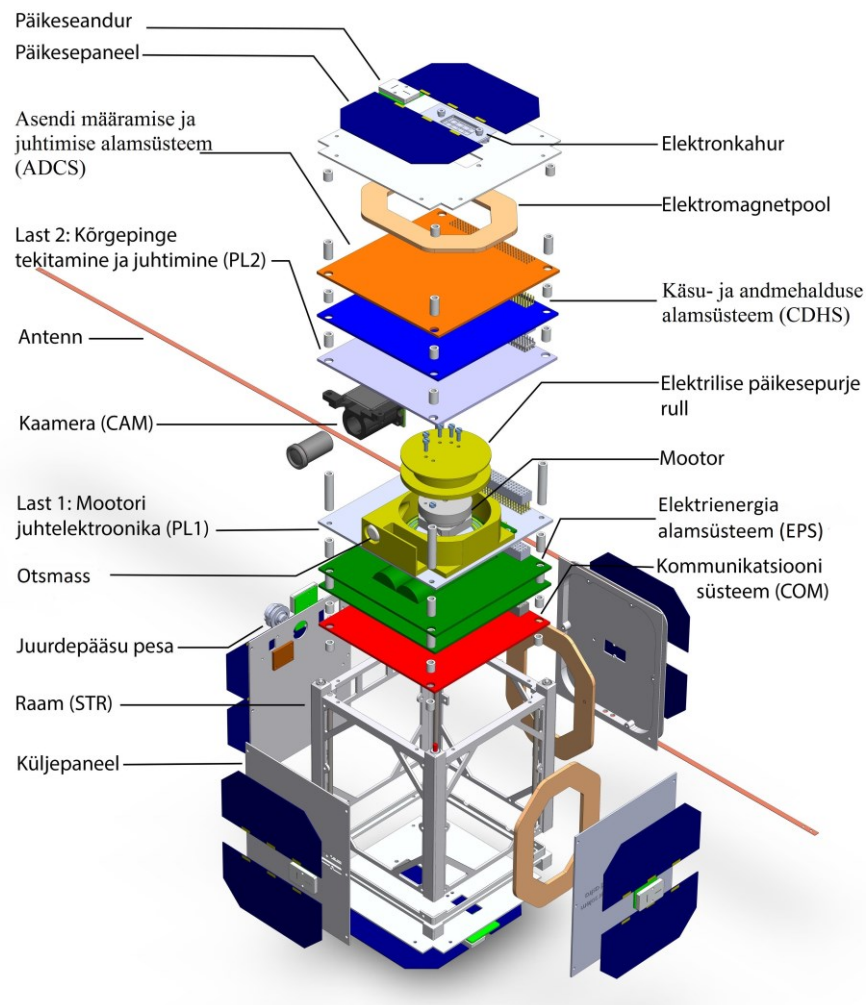
- Asendi määramise ja juhtimise alamsüsteem (ADCS - *Attitude Determination and Control System*) stabiliseerib satelliidi orbiidil ja tagab vajaliku asendi ning pöörlemiskiiruse. Päikesetuulepurjega tehtava eksperimendi käigus alustab ADCS satelliidi pöörlõuet (kuni 1 pööre/sekundis) ja tagab eksperimendiks vajaliku satelliidi asendi.

- Elektrienergia alamsüsteem (EPS - *Electrical Power System*) kogub elektrienergiat päikeseelementide abil, salvestab seda akudes ning varustab kõiki teisi alamsüsteeme elektrienergiaga.
- Eksperimendi alamsüsteem (PL – *payload*) hõlmab endas päikesepurje traati koos juurdekuuluva riistvara ja instrumentidega viimaks läbi eksperimenti päikesetuulepurjega.
- Kaamera alamsüsteem (CAM - *camera*) teeb kindlaks päikesetuulepurje ülesseadmise edukuse, tehes päikesepurjest ja selle otsas olevast raskusest pilti. Hariduslikul ja teaduse populariseerimise eesmärgil proovitakse teha pilti ka Maast ja Eestist.
- Kommunikatsiooni alamsüsteem (COM - *communications system*) võimaldab raadioside suhtlust maapealsete sidejaamade ja satelliidi vahel. Raadiosideks kasutatakse kahte amatöörraadio laineala:
 - Kahemeetrine laineala üleslaadimiseks
 - 70 cm laineala allalaadimiseks
- Käsu- ja andmehalduse alamsüsteem (CDHS - *Command and Data Handling System*) on andmete ja kaugjuhtimise kontrollkeskus ESTCube-1 satelliidi peal. CDHS kogub ja salvestab andmeid satelliidi kohta ning saadab vastava käsu korral kogutud telemeetria Maale.

Maapealsed tugisüsteemid on (tähestikulises järjekorras):

- Missioonijuhtimissüsteem (MCS – *Missioon Control System*) on tarkvara, millega on võimalik Maalt satelliidi tööd juhtida ning saada tagasisidet satelliidil toimuva kohta. Veel saab missioonijuhtmistarkvaraga juhtida ja jälgida maapealseid sidejaamasid.
- Satelliitside keskus (GS – *Ground Station*) on raadiojaam Maal, mille abil saadakse raadioside satelliidiga. Satelliitside keskus koosneb raadiojaamast, satelliiti jälgivatest antennidest, pakettside modemist ning seadmeid juhtivast arvutist.

Satelliidi komponentide paigutus on näidatud alloleval Joonisel 1.



• Joonis 1: ESTCube-1 alamsüsteemide paigutus (Kalde, 2013).

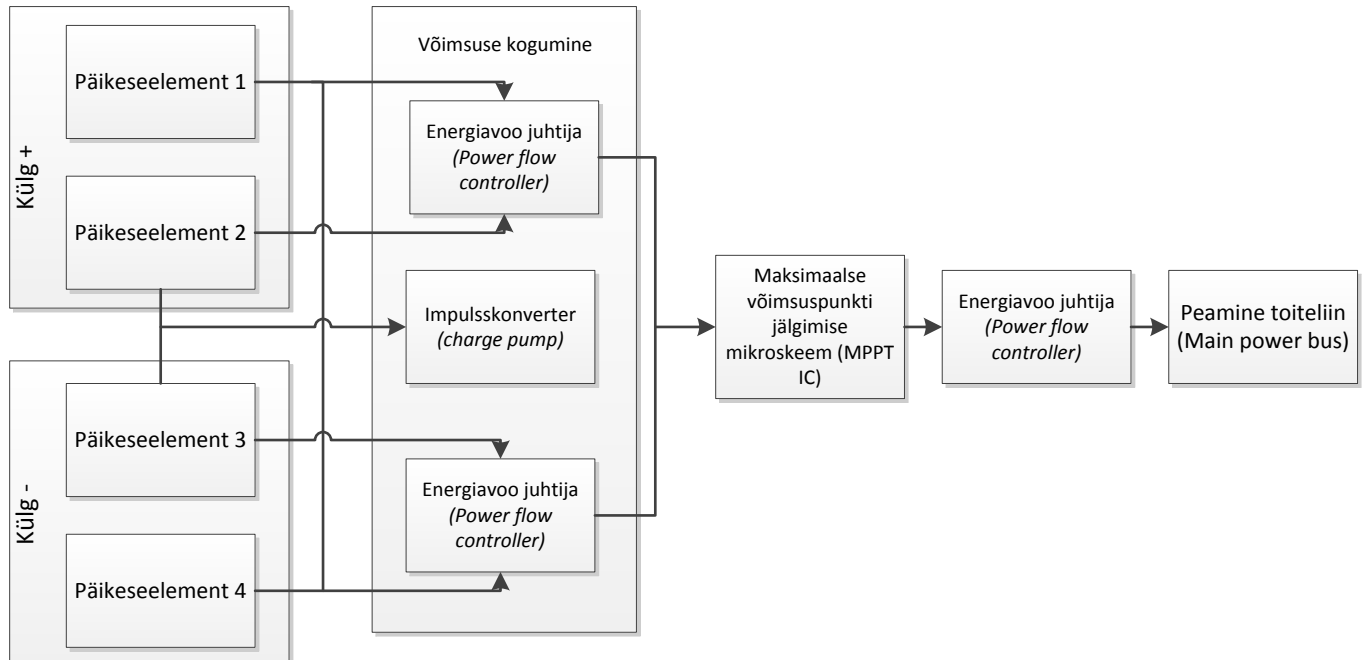
1.2. EPS

Elektrienergia alamsüsteem (EPS) kogub, salvestab ja jagab elektrienergiat satelliidil. EPS oli esimene alamsüsteem, mis käivitati pärast orbiidile lennutamist. Lisaks on tegemist ainsa alamsüsteemiga, mis töötab ka sügavaimas turvarežiimis, võimaldades vahetult kontrollida satelliidi raadiomajakat. [1]

ESTCube-1 on varustatud kaheteiskümne galliumarseniid päikeseelemendiga firmalt AZUR SPACE Solar Power. Päikeseelementide efektiivsus on 30%, referentstingimustel (AM0 ehk valgustatusel vahetult väljaspool Maa atmosfääri ja 28°C töötemperatuuril) peaksid 12 päikeselementi tööea alguses andma väljundvõimsuseks maksimaalselt 2,4 kuni 3,6 W. Päikeselementide väljundvõimsus sõltub elementidele langeva päikese kiirguse nurgast,

elementide töötemperatuurist (nimelt paneelide efektiivsus väheneb temperatuuri tõustes) ning elementide vananemisest missiooni jooksul. Satelliidil on päikeseelemendid kinnitatud alumiiniumist külgsuunalisele paarikaupa, moodustades päikesepaneeli. Kuna mõne ESTCube-1 missiooni faasi energiatarve ületab päikesepaneelide poolt toodetava võimsuse, on satelliit energia salvestamiseks varustatud kahe Panasonic liitium-ioon akuga. Kasutatavate akude kogumahtuvus missiooni alguses on halvimal juhul 9 Wh. [1][5][6]

Päikeseelemendid on satelliidi peal ühendatud paralleelselt ning elementide tüüpiliseks tööpingeks on 2,3 V. Rööpühendus on tehtud ideaalse diodi süsteemi kaudu (*ideal diode system*), mida juhib ideaalse diodi kontrolleri LTC4352 firmalt Linear Technology. Ideaalse diodi kontrolleri tüüpiliseks on omakorda kahte isoleeritud paisuga väljatransistorit (MOSFET - *metal-oxide-semiconductor field-effect transistor*) transistorit. Sellise süsteemi eeliseks on elementide sõltumatus üksteisest, mis teeb võimalikuks elektri tootmise ka juhul, kui üks elementidest on näiteks varjus või katki. 12 päikeseelementi on jaotatud kolme gruppi, igas grupis on satelliidi vastaskülgede päikeseelemendid (vt Joonis 2). Selline jaotus lubab päikeseelementide maksimaalset võimsuspunkti (vt järgmine lõik) efektiivselt jälgida, kasutades selleks kolme sõltumatut kontrolleriit SPV1040 firmalt STMicroelectronics. [5][6]



Joonis 2: Maksimum võimsuspunkti jälgimismooduli plokkiagramm [6]

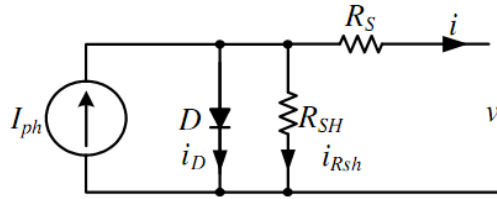
Iga SPV1040 kontrolleriit jälgib nelja päikeseelementi, mis kõik on omavahel paralleelselt ühendatud ideaaldiodiahela kaudu. Süsteem on disainitud veakindlaks kasutades kolme

üksteisest sõltumatut maksimum võimsuspunkti jälgimismoodulit (MPPT – *maximum power point tracker*), mis võimaldavad toota voolu ka olukorras, kus kaks moodulit kolmest pole enam töökorras. Selline disain on oluliselt lihtsam ja kiirem, kui kasutada maksimaalse võimsuspunkti jälgimiseks mikroprotsessorit, kuna lubab efektiivset päikeseelementide maksimaalse võimsuspunkti jälgimist ka olukorras, kus mikroprotsessor ei tööta. [5]

1.3. Päikeseelemendi simulaatori teooria

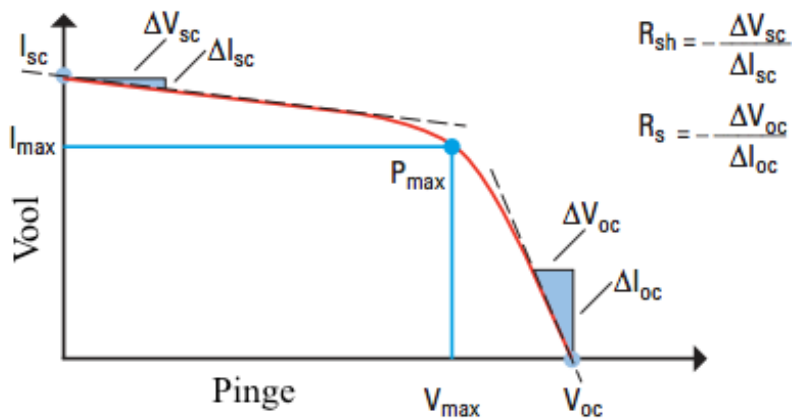
ESTCube-1'1 kasutatavate päikeseelementide testimine elektrienergia alamsüsteemiga on laboritingimustes võrdlemisi keeruline, näiteks dünaamiliste testide tegemine, kus peab sooritama päikeseelementide pöörlemist ümber ühe või rohkema telje. Rohkem kui ühe-kahe elemendiga testimise teeb keeruliseks see, et saadaoleva ksenoon-kaarlambi valgusvihk ei jaotu ühtlaselt päikeseelementide pinna suhtes. Nii halogeen- kui ksenoon-kaarlambilt eraldub arvestatav hulk infrapunakiirgust, mis päikeseelemendi ebapiisava jahutamise tõttu viib elemendi mõranemiseni. Lisaks sõltub ka mõõdetav voolu-pinge karakteristik oluliselt päikeseelemendi temperatuurist. Päikeseelementide hind on kallis, ESTCube-1'1 kasutatavate päikeseelementide hind jääb paarisaja euro lähedale. Elementide kõrget hinda ja testimise keerukust arvestades, tõusis vajadus satelliidi testimisel päikeseelemendi simulaatori järele.

ESTCube-1 testimiseks on valitud analoogelektronikal ja päikeseelemendi ekvivalentsskeemil põhinev simulaatori mudel. [7] Aluseks võetud päikeseelemendi ekvivalentsskeem on toodud Joonisel 3, kus I_{PH} (*photoelectric current*) tähistab valguskiirguse poolt tekitatud voolu, I_D diodi läbivat voolu, R_S jadamisi takistust, I väljundvoolu ja V klemmipinget. Jadamisi takisti R_S määrab päikeseelemendi efektiivse takistusliku komponendi, kusjuures mida väiksem see on, seda efektiivsem on päikeseelement. Rööbiti takistus R_{SH} simuleerib voolu lekkimist läbi päikeseelemendi, mis võib tekkida näiteks läbi siirde ja kristalli defektide läheduses. Mida suurem on R_{SH} väärtus, seda efektiivsem on päikeseelement, kuna väheneb lekkevoolu määr. Paralleel- ja jadatakistuse väärtustega saab päikesepaneeli simulaatori kalibreerida vastavusse simuleeritava päikeseelemendiga. [7][8]



Joonis 3: Päikeseelemendi mudel [5]

Enamikku päikeseelemendi parameetreid saab välja lugeda voolu-pinge sõltuvuste mõõtmistulemustest. Joonisel 4 on näha tüüpilise päripingestatud päikeseelemendi voolu-pinge tunnusjoon. Lühisvool (I_{SC} – *short circuit current*) on vool läbi päikeseelemendi, kui paneel on lühistatud. Avatud ahela pinge (V_{OC} – *open circuit voltage*) on pinge päikeseelemendi klemmidelt, kui vool läbi elemendi on null, ühtlasi on tegemist päikeseelemendi maksimaalse pingega. Maksimaalne võimsuspunkt P_{MAX} on voolu-pinge kombinatsioon, kus võimsus on maksimaalne, vastavat voolu märgitakse I_{MAX} ja pinget V_{MAX} . [7]



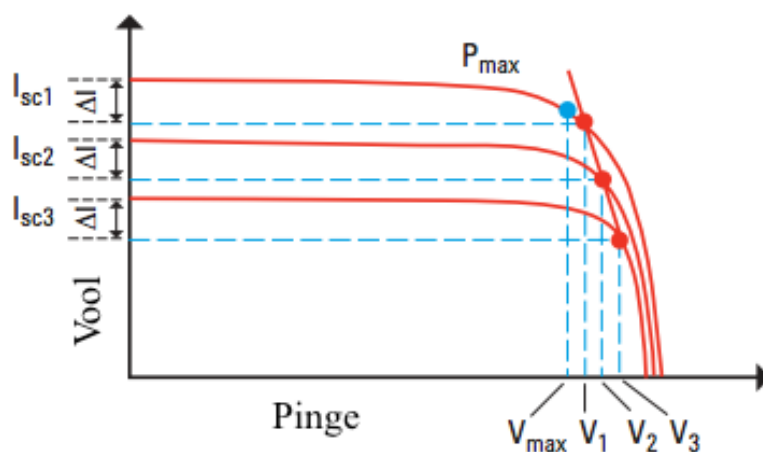
Joonis 4: Päripingestatud päikeseelemendi voolu-pinge tunnusjoon. [7]

Päikeseelemendi tööd iseloomustavateks karakteristikuteks on ka täiteaste (FF – *fill factor*) ja muundamiseefektiivsus (η). Päikeseelemendi täiteaste (vt valem 5) avaldub P_{MAX} suhtena V_{OC} ja I_{SC} korrutisse. Muundamiseefektiivsus (vt valem 6) on defineeritud P_{MAX} suhtena valguse intensiivsuse (E) ja päikeseelemendi pindala (A_C) korrutisest

$$FF = \frac{P_{Max}}{I_{sc}V_{oc}} \quad (5)$$

$$\eta = \frac{P_{MAX}}{E A_c} = \frac{V_{OC} I_{SCFF}}{E A_c} \quad (6)$$

Väärtuste R_{SH} ja R_S täpsus on oluline kalibreerimaks päikeseelemendi simulaatori karakteristikut simuleeritava päikeseelemendi omaga. Nimetatud väärtuseid saab seadistada nii korduva testimise teel kui ka hinnata voolu-pinge karakteristikut analüüsides. Joonisel 4 on välja toodud, et R_{SH} ja R_S avalduvad voolu-pinge tunnusjoone tuletisest vastavalt lühisvoolu piirkonnas ja tuletisest avatud ahela piirkonnas. [7] Jadamisi takistuse täpsemaks hindamiseks peab tegema korduvaid voolu-pinge tunnusjoone mõõtmisi erinevatel valgusintensiivsustel. Kolme mõõteseeria korral võib alustada mõõtmisega, kus valgusintensiivsus valitakse selline, et avatud ahela pinge oleks suurem kui V_{MAX} . Järgmisel kahel mõõtmisel valitakse iga kord eelmisest väiksem valgusintensiivsus, nagu näidatud Joonisel 5.



Joonis 5: Soovituslik meetod määramaks päikeseelemendi jadamisi takistust voolu-pinge tunnusjoone põhjal. [7]

Jadamisi takistuse saame arvutada kolme mõõtmise aritmeetilise keskmisena (vt valem 7), kus R_1 , R_2 , R_3 avalduvad valemis 8.

$$R_S = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{3} \quad (7)$$

$$R_1 = \frac{V_2 - V_1}{I_{SC1}(V_1) - I_{SC2}(V_2)} \quad (8)$$

$$R_2 = \frac{V_3 - V_2}{I_{SC2}(V_2) - I_{SC3}(V_3)}$$

$$R_3 = \frac{V_3 - V_1}{I_{SC1}(V_1) - I_{SC3}(V_3)}$$

Paralleeltakistust saab hinnata, mõõtes pimedas päikeseelemendi voolu-pinge karakteristikut, ja võttes graafiku lineaarsele alale jääva tunnusoone tuletise.

1.4. Päikeselemendi pöörlemise simulatsiooni teooria

Päikeseelementide simulatsioon on vajalik satelliidi MPPT' de efektiivsuse testimiseks erinevatel pöörlemiskiirustel. Päikeseelementidel toodetav elektrienergia ja MPPT' de reageerimise kiirus ning efektiivsus on olulised näiteks päikesetuulepurjega tehtava eksperimendi käigus, kus saavutatakse pöörlemiskiirus kuni 1 pööre/sekundis. Kuna päikeseelementidega on keeruline sooritada pöörlemistest ümber ühe või rohkema telje, on vaja pöörlemistest teha päikeseelemendi simulaatoriga.

Pöörlemise simuleerimisel kasutatakse asendivektorite omadusi. Keha orientatsioon ehk suunistus ruumi ristkoordinaadistikus $\{A\}$ määratakse kolme ühikvektoriga x_B, y_B, z_B . Need vektorid on üksteisega risti ning moodustavad vastava ristkoordinaadistiku $\{B\}$. Seega on keha suunistuse muutumine kirjeldatav ühe ristkoordinaadistiku pööramisega teise ristkoordinaadistiku suhtes. Ühikvektor x_B on kirjeldatav oma kolme projektsiooniga koordinaadistiku $\{A\}$ telgedel x, y, z . Samamoodi on kirjeldatavad ka ühikvektorid y_B ja z_B .

$${}^A X_B = \begin{bmatrix} x x_B \\ y x_B \\ z x_B \end{bmatrix} \quad {}^A Y_B = \begin{bmatrix} x y_B \\ y y_B \\ z y_B \end{bmatrix} \quad {}^A Z_B = \begin{bmatrix} x z_B \\ y z_B \\ z z_B \end{bmatrix} \quad (9)$$

Vektorid ${}^A x_B, {}^A y_B, {}^A z_B$ moodustavad pöörlemismaatriksi ${}^A R_B$, mis näitab koordinaadistiku $\{B\}$ suunistust koordinaadistiku $\{A\}$ suhtes.

$${}^A R_B = \begin{bmatrix} x x_B & x y_B & x z_B \\ y x_B & y y_B & y z_B \\ z x_B & z y_B & z z_B \end{bmatrix} = [{}^A X_B, {}^A Y_B, {}^A Z_B] \quad (10)$$

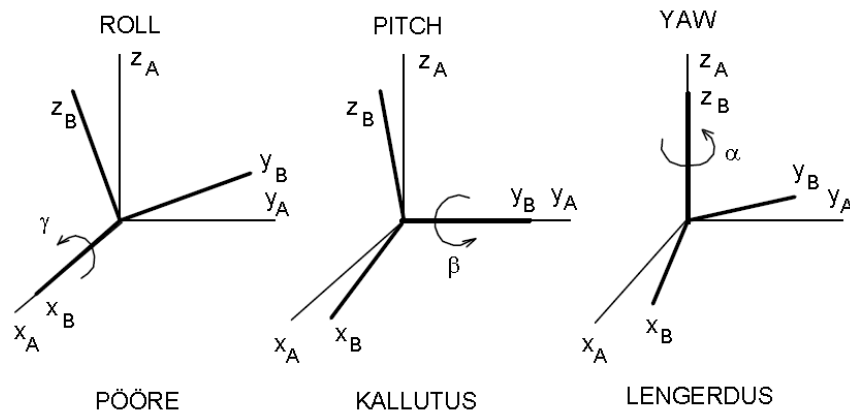
Keha suunistust saab peale rotatsioonimaatriksi määrata ka kolme sõltumatu nurga abil. Rotatsioonimaatriksi 9 elementi on üksteisest sõltuvad. Nende kohta kehtib 6 tingimust, sealhulgas 3 ühikvektori pikkuse kohta:

$$|X| = 1; \quad |Y| = 1; \quad |Z| = 1 \quad (11)$$

ja 3 nende ortogonaalsuse (risti oleku) kohta:

$$X \cdot Y = 0; \quad X \cdot Z = 0; \quad Y \cdot Z = 0 \quad (12)$$

Järelikult võib teljestiku pööramist iseloomustada kolme sõltumatu muutujaga. Enamikul juhtudel kasutatakse selleks kolme nurka. Nendeks on pöörde- (*roll*), kallutus- (*pitch*) ja lengerdusnurk (*yaw*) (vt. Joonis 6).



Joonis 6: Illustratsioon pöörde-, kallutus- ja lengerdusnurga kohta. [18]

Pöördenurka mõõdetakse yz -tasandil teljestiku pööramisel x -telje ümber, kallutusnurka xz -tasandil teljestiku pööramisel y -telje ümber ja lengerdusnurka xy -tasandil teljestiku pööramisel z -telje ümber. Vastavalt sellele, mis telje ümber pööramine toimub, nimetatakse nurki α , β , γ ka Euleri Z-, Y-, X-nurkadeks.

Teljestiku üldistatud rotatsioonimaatriksi saab tuletada ka üksikute rotatsiooniopeeraatorite kaudu:

$${}^A_B R(\gamma, \beta, \alpha) = ROT({}^A Z_B, \alpha) \cdot ROT({}^A Y_B, \beta) \cdot ROT({}^A X_B, \gamma), \quad (13)$$

kus $ROT({}^A Z_B, \alpha) = \begin{bmatrix} c\alpha & -s\alpha & 0 \\ s\alpha & c\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$

$$ROT({}^A Y_B, \beta) = \begin{bmatrix} c\beta & 0 & s\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\beta & 0 & c\beta \end{bmatrix};$$

$$ROT({}^A X_B, \gamma) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\gamma & -s\gamma \\ 0 & s\gamma & c\gamma \end{bmatrix}.$$

Kõigis nendes maatriksites on siinus- ja koosinusfunktsioonide tähistamiseks kasutatud vaid esitähti vastavalt s ja c .

Üldistatud kujul esitatakse maatriksite rotatsioonimaatriks nurkade γ , β ja α kaudu järgmiselt: [18]

$${}^A_B R(\gamma, \beta, \alpha) = \begin{bmatrix} c\alpha \cdot c\beta & c\alpha \cdot s\beta \cdot s\gamma - s\alpha \cdot c\gamma & c\alpha \cdot s\beta \cdot c\gamma - s\alpha \cdot s\gamma \\ s\alpha \cdot c\beta & s\alpha \cdot s\beta \cdot s\gamma + c\alpha \cdot c\gamma & s\alpha \cdot s\beta \cdot c\gamma - c\alpha \cdot s\gamma \\ -s\beta & c\beta \cdot s\gamma & c\beta \cdot c\gamma \end{bmatrix} \quad (14)$$

Päikeseelemendile vastav rotatsioonimaatriks korrutatakse läbi päikese suunavektorile vastava maatriksiga. Seejärel võetakse saadud tulemusmaatriksist vastava päikeseelemendi teljele vastava komponendi positiivne väärtus, negatiivse väärtuse korral 0, ning korrutatakse läbi maksimaalse soovitud voolupiiraväärtusega. Korrutatava voolupiiraja väärtus on valitud selline, mis annab võimalikult täpselt simulaatori lühisvooluks $I_{SC} = 525$ mA.

2. Päikeseelemendi simulaatori nõuded

2.1. Nõuded

Simulaator peaks olema suuteline simuleerima võimalikult lähedaselt AzurSpace 3G30C päikeseelemente, kusjuures iga kanalit peab olema võimalik eraldi juhtida ja mõõta. Simulaator peaks toatemperatuuril võimalikult täpselt ühtima 3G30C päikeseelemendi karakteristikutega, klemmipinge $V_{oc} = 2700$ mV, lühisvool $I_{sc} = 525$ mA, pinge maksimaalse võimsuse juures $V_{mp} = 2411$ mV ja vool maksimaalse võimsuse juures $I_{mp} = 504$ mA. Samuti oli nõueteks päikeseelemendi simulaatorile väljundvoolu ja -pinge mõõtmise võimalus.

Päikeseelemendi simulaator peab olema suuteline reguleerima väljundvoolu vahemikus 0 kuni 0.8 A. Veel peab päikeseelemendi simulaator olema suuteline stabiilselt töötama – diodidel ning MOSFET'il toimuv võimsuseraldus peab olema jahutusega stabiliseeritud.

Diodide stabiilne töötemperatuur on seadme töökindluse seisukohast eriti oluline, arvestades pingelangu sõltuvust töötemperatuurist.

Simulaatoriga peab olema võimalik testida kogu EPS alamsüsteemi tööd ehk simuleerima 12 päikeseelementi. ESTCube-1 puhul piisab testimiseks 12-st kanalist, kuid kuna seadet kasutatakse loodetavasti ka tulevikus, peaks 16 kanaliga olema võimalik simuleerida ja testida ka 2U (20 x 10 x 10 cm) kuupsatelliidi pöörlemist Päikese käes piirjuhul (satelliidi vertikaaltelg paralleelne Päikesega), kus otsmised päikeseelemendid võib jätta arvestamata või toita teiselt simulaatori seadmelt.

2.2. Metoodika

Mõõtmistel kasutasime multimeetreid Velleman DVM850BL, Mastech MY-64 ja Amprobe 37XR-A. Voolu-pinge tunnusjoone mõõtmisel kasutati 30 Ω muuttakistit. Elektriskeemi ja trükiplaadi kavandamisel kasutati CadSoft EAGLE 6.4.0 ning mikroprotsessori programmeerimiseks kasutati Atmel Studio 6.1 ja Atmel Flip 3.4.7 tarkvara. Suhtlusprotokollis vigade lahendamiseks, signaali ja väljund liinidel müra otsimiseks kasutati HAMEG HMO1522 ostsilloskoopi firmalt Rohde&Schwarz. Toiteplokinä oli kasutusel HAMEG HMP2030, mis on kolmekanaliline programmeeritav toiteplokk firmalt Rohde&Schwarz.

3. Disain

3.1. Simulaatori prototüübid

Päikesesimulaatori tehnoloogia väljaarendamiseks alustasime väiksema võimekusega prototüüpidest, millel katsetasime läbi keerukamad osad simulaatorist. Pärast prototüüpide töölesaamist läksime edasi täisversiooni juurde. Esimene prototüüpplaat oli ühekanaliline päikeseelemendi simulaator, mille töötamiseks ja juhtimiseks oli vaja kahte toiteplokki ning kolmandat vajadusel ventilaatori toiteks. Samuti puudus esimesel prototüüpplaadil võimalus lugeda väljundpinget ja -voolu.

Teine prototüüpplaat oli neljakanaliline, arvutiga liidestamiseks ning plaadi juhtimiseks kasutati Arduino Mega1280 arendusplaati. Samuti oli simulaatoril juba võimekus lugeda väljundpinget väljundist ja voolu tagasisideahelast ning kuvada seda terminali aknas. Puudusteks oli madalpääsfiltri puudumine tagasisideahelas; simulaatori juhtimiseks oli tarvis

eraldi arendusplaati; kanaleid oli vähe ning puudus võimalus mõõta väljundvoolu, kuna tagasisideahelast ei saanud täpset väljundvoolu mõõta. Teise päikeseelemendi simulaatori prototüübi pilt on toodud Lisas 5.

Prototüüpsimulaatoril sai testimise käigus kindlaks tehtud, et päikeseelemendi voolu-pinge tunnusjoonega ühtis simulaatori voolu-pinge tunnusjoon kõige lähedasemalt jadatakistusega R_S ning ilma paralleeltakistita R_{SH} . Päikeseelemendi läbiv vool muutub lühisvoolu I_{SC} piirkonnas väga vähe, mistõttu paralleeltakisti osutus mittevajalikuks. Ilma jadatakistusega oli lühispinge piirkonnas diodidel voolu langemine liiga järsk ning jadatakisti $R_S = 0,02 \dots 0,04 \Omega$ kasutamise saadi päikeseelemendi voolu-pinge tunnusjoonele kõige lähedasemaid tulemusi. Lõpliku simulaatori versiooni kavandamisel jäeti paralleeltakisti R_{SH} välja. Jadatakisti R_S väärtuseks valiti väljundis oleva voolumõõtmisahela lisamise tõttu $0,04 \Omega$. Voolumõõtmisahela takistite valikul sai lähtunud voolumõõtmise täpsuse ja eelkõige mõõtmise kiiruse valikust, sest viimane mõjutab ühtlasi tagasiside ahela kiirusel. Prototüüpplaadiga saadud mõõtmistulemused on väljatoodud Lisas 1.

3.2. Lõplik riistvara

Päikeseelemendi simulaatori lõppversioon koosneb juhtmoodulist ja elementide plaadist. Seadme juhtmoodul teostab suhtlust arvuti ja elementide moodulite vahel. Simulaatori elementide moodul koosneb neljast simuleeritavast päikeseelemendi kanalist ja kanalite sisend-, väljundpingete, väljundvoolude mõõtmise loogikast. Simulaatori juhtmoodulile saab paigutada kuni neli elementide moodulit.

3.2.1. Päikeseelemendi juhtmoodul

Juhtmoodulil olev mikroprotsessor kontrollib elemendi moodulitel olevat loogikat, loeb näitusid ja teostab suhtlust arvutiga. Mikroprotsessorina kasutatakse Atmega32U4, mida on kerge arvutiga ühendada tänu sisseehitatud USB liidesele. USB liidese kaudu on võimalik realiseerida ka virtuaalne jadaliides, mille abil saab arvuti suhelda mikroprotsessoriga programmi töö käigus. Mikroprotsessoril on olemas ka eelseadistatud alglaadur, mis teeb seadme programmeerimise arvuti ja USB liidese kaudu lihtsaks. Atmega32U4 maksimaalne võimalik töökiirus on 16 MHz ning päikeseelemendi simulaatoril kasutatakse selle töökiiruse realiseerimiseks 16 MHz kristallosillaatorit. Simulaatori juhtmooduli all servas on kaheksa

valgusdiodi elemendi moodulite ja üks valgusdiodid juhtmooduli seisu või töösükli näitamiseks. [10]

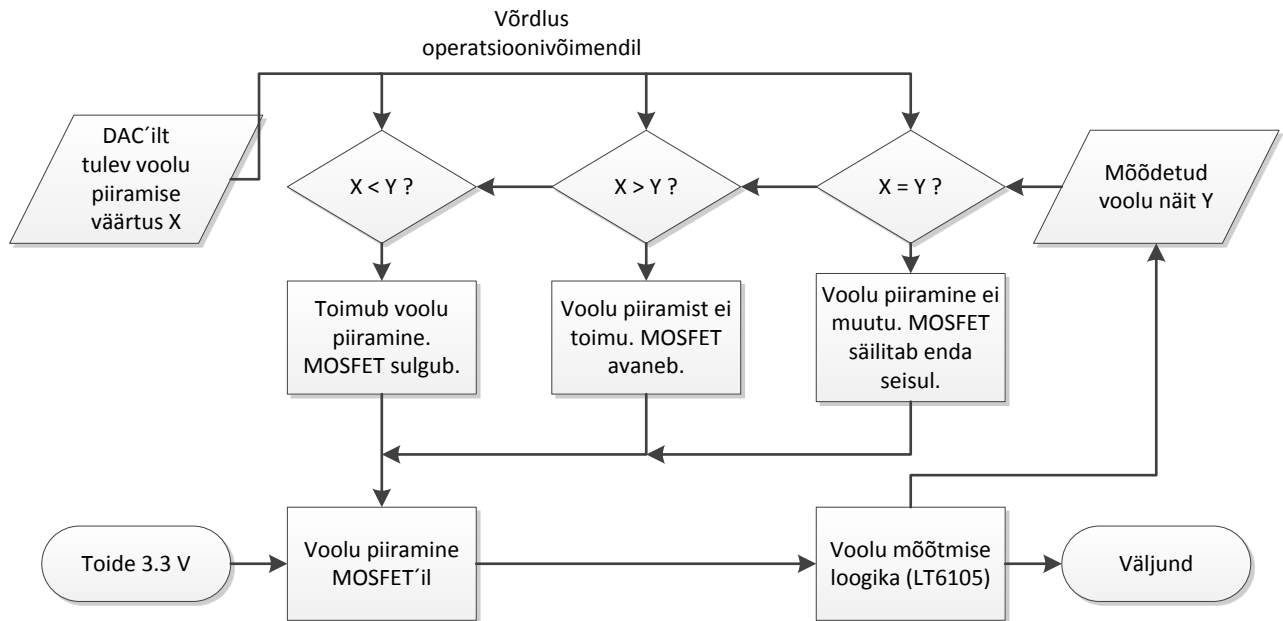
Mikroprotsessor suhtleb elementide moodulitel olevate analoog-digitaalmuundurite (ADC – *analog digital converter*) ja digitaal-analoogmuunduritega (DAC – *digital analog converter*) SPI suhtlusliidese kaudu (*serial peripheral interface*), mis on jadaliidese ja välisseadmete vaheline andmevahetuse standard. Kõik ADC ja DAC seadmed jagavad ühist kellasignaali (SCLK - *serial clock*) ja andmevahetusliine: juhtseadme väljund (MOSI - *master output, slave input*), alamseadme väljund (MISO - *master input, slave output*). Igale alamseadmele on aga eraldi alamseadme valiku liin (SS – *slave select*), millega antakse alamseadmele märku, et parasjagu toimub suhtlus just temaga.

Viievoldine toitepinge integreeritud mikrokiipidele, nii juhtmoodulile kui elementide moodulitele, saadakse USB ühenduse kaudu arvutist. 3,3 V toitepinge päikeseelemendi simulaatori tööahelasse saadakse väliselt toiteploki, millest kinnitatakse juhtmed simulaatori juhtmoodulil olevatesse kruviterminalidesse. Simulaatori juhtmooduli elektriskeem on toodud Lisas 3.

Simulaatori temperatuuri stabiilsena hoidmiseks on seadme külge võimalik kinnitada ventilaator, mille toitmiseks on ka juhtmoodulil pesa. Ventilaatori vool võetakse 3,3 V liini pealt ning pinget tõstmiseks kasutatakse pinget suurendavat muundurit (*boost converter*) LM2700 firmalt Texas Instruments, millega saadakse optimaalne toitepinge 9,7 V nii jahutamiseefektiivsuse kui tekitatava müra suhtes. [11]

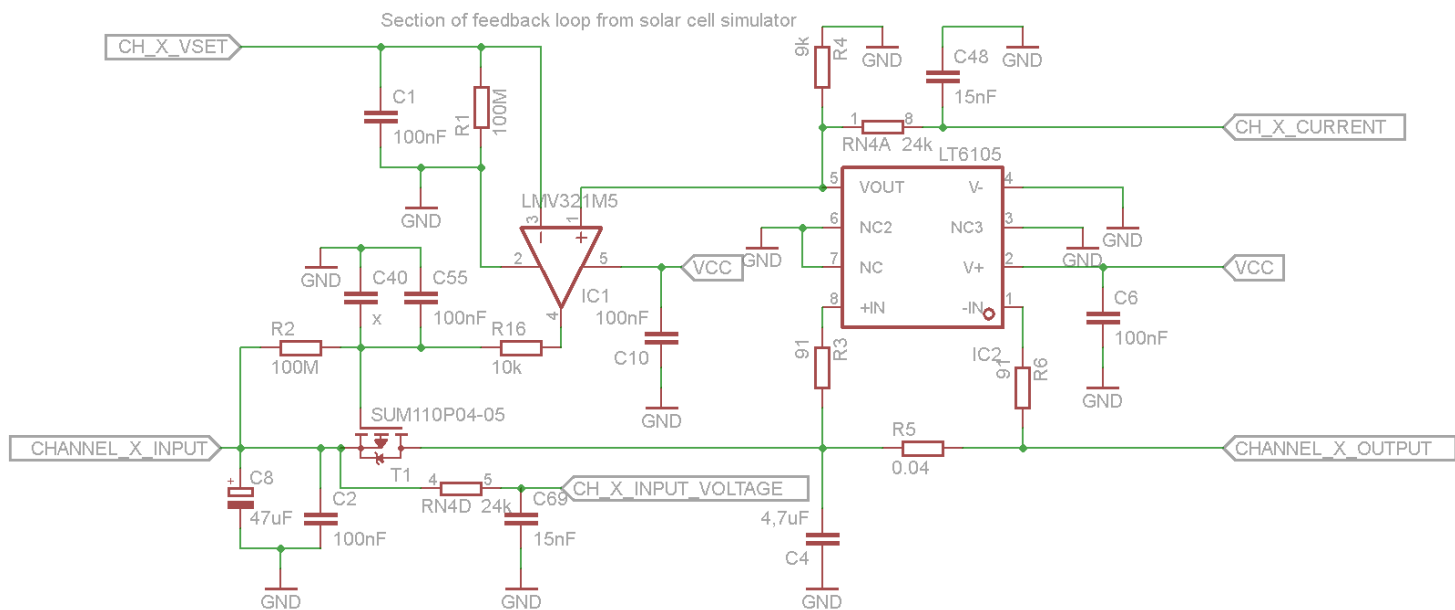
3.2.2. Simulaatori elementide moodul

Päikeseelemendi simulaatori elementide plaadil olev analoog-digitaal muundur (ADC) loeb sisendpinget, voolu voolupiiramisahelast, väljundvoolu pärast diodide ahelat ning väljundpinget. Väljundvoolu piiramisahel töötab tagasiside põhjal (vt. Joonis 7) ja koosneb P-MOSFET'ist SQM50P03-07 firmalt Vishay, voolumõõtvast mikrokiibist LT6105 firmalt Linear Technology ja operatsiooni võimendist LMV321. [12][13]



Joonis 7: Simulaatori tagasiside ahelat illustreeriv diagramm.

Operatsioonivõimendi invertteerivasse sisendisse on ühendatud DAC väljund ja mitteinvertteerivasse sisendisse on ühendatud voolumõõtmiskiibi LT6105 väljund. Operatsiooni võimendi on komparaatori konfiguratsioonis. Kui voolu mõõtev LT6105 mikrokiip annab operatsioonivõimendisse suurema väärtuse kui digitaal-analoogmuundurist tulev väärtus, siis on P-MOSFET'i väraal pinget tõstetakse ja MOSFET sulgub – vool läbi p-kanali väheneb. Kui aga LT6105 voolumõõtja annab operatsioonivõimendile sisendisse väiksema väärtuse kui digitaal-analoog muundurist tulev väljund, siis on MOSFET avatud. Juhul kui DAC ja LT6105 väljundid on võrdsed, siis on pinge paisul 0 V ja MOSFET'i läbib keskmise tugevusega vool. Tagasiside ahelasse on lisatud ka madalpääsfilter, mis kaitseb võimaliku müra lisandumise eest väljundisse. Madalpääsfilter tagasiside ahelas on optimeeritud süsteemi maksimaalse stabiilsuse jaoks. Voolupiiramisahela skeem on toodud Joonisel 8. Samasuguse voolupiiramisahela võtsin selle töökindluse tõttu kasutusele ka satelliidi maapealse hooldusseadme (APD – access port device) disainimisel ja koostamisel.



Joonis 8: Lõik päikeseelemendi simulaatori voolupiiramise skeemist.

Väljundiga paralleelselt on neli diodi, millel tekib pingelang on ühtlasi ka päikeseelemendi simulaatori väljundpingeks. Päikeseelemendi simulaatoril kasutatakse diode firmalt Rohm Semiconductor RF071M2S, mille päripingestatud pingelang 0,7 A voolu korral on keskmiselt 0,79 V. [14]

Vahetult enne simulaatori väljundit on veel üks LT6105 kivil baseeruv voolumõõtmisahel, mis annab täpsema mõõtmistulemuse väljundvoolule.

Analoog-digitaalmuundurina kasutatakse 12-bitise lahutusega MAX1230, millel on 16 sisendkanalit. [15] ADC sisendite ette on pandud madalpääsfilter, kõrvaldamaks võimalikku tekkivat müra sisendsignaalis ja tehes seeläbi lugemivõtmise täpsemaks. Digitaal-analoogmuundurina kasutatakse neljakanalilist, 12-bitise resolutsiooniga AD5684R. [16] Simulaatori elementide plaadi elektriskeem on toodud Lisas 4.

3.3. Tarkvara

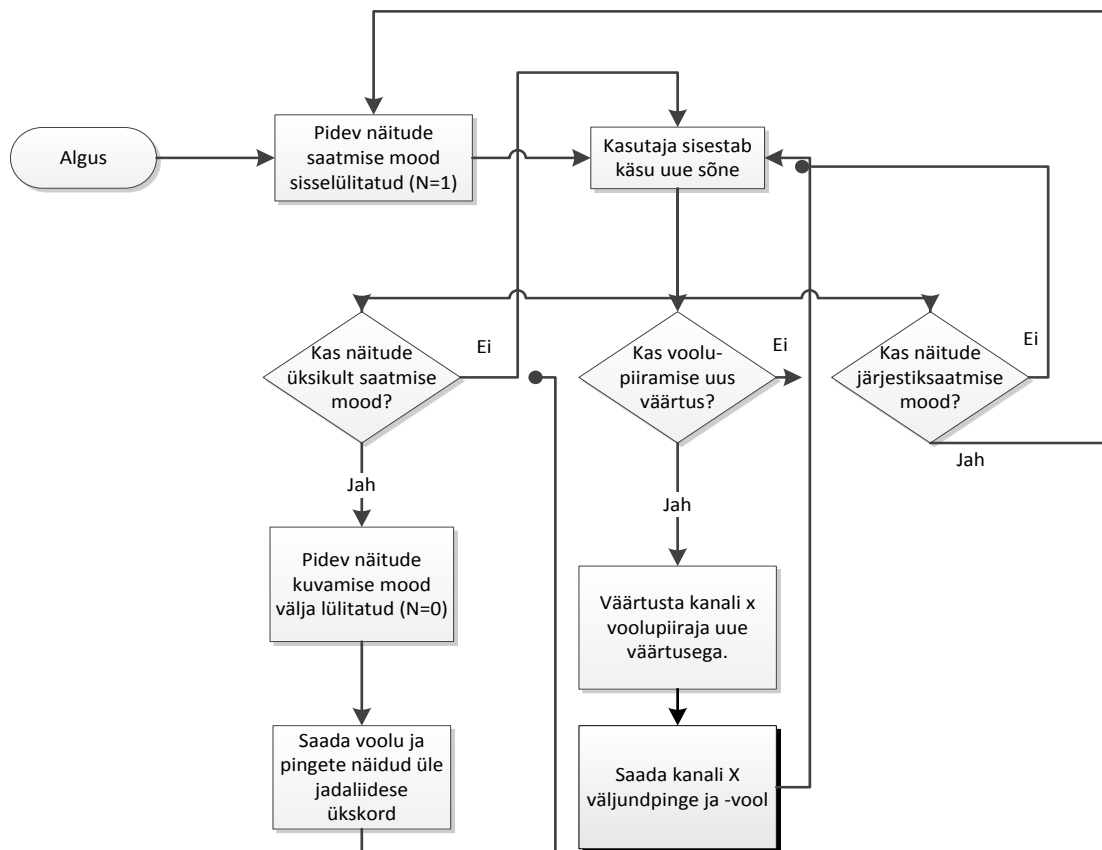
3.3.1. Ülevaade

Päikeseelemendi simulaatori püsivara võib jagada kolmeks: arvuti ja simulaatori vaheline suhtlus üle virtuaalse USB – jadaliidese ühenduse, ADC lugemite võtmine ja DAC väärtuste kirjutamine. Simulaatorit saab juhtida arvutist üle USB ühenduse virtuaalse jadaliidese kaudu, mille realiseerimiseks kasutatakse Teensy teeki. [17]

Arvutist juhitud tarkvara võimaldab päikeseelemendi simulaatori pöörlemise simuleerimist ümber kolme telje, mis on väga oluline MPPT testimisel. Pöörlemise simuleerimise võimekus ja selle lihtsus on oluline eelis päikeseelementidega testimise ees.

3.3.2. Välisliides

Simulaatorit saab juhtida TeraTerm, HyperTerminal või mõne teise terminali programmi kaudu. Andmeside kiirus (*baud rate*), stopp-bitid, paarsuskontroll ja andmebitide arv lepitakse kokku automaatselt. Kui ühendatavas arvutis on draiver tarkvara [17] installeeritud, hakkab päikeseelemendi simulaator arvutiga ühendamise järel perioodiliselt saatma kanalite sisend- ja väljundpinge ning väljundvoolu näituseid. Vajadusel saab näite kuvada, saates käsusõna, misjärel kuvatakse terminalis kõikide kanalite väljundvoolud ja -pinged. Päikeseelemendi simulaatori suhtlemist arvutiga kirjeldab Joonis 9.



Joonis 9: Simulaatori suhtlemist arvuti ja kasutajaga kirjeldav skeem.

Kanali väärtustamise järel vastava kanali näitude saatmine on vajalik päikeseelemendi simulaatori liidestamisel elementide pöörlemise simuleeriva tarkvaraga. Näitude vahetu

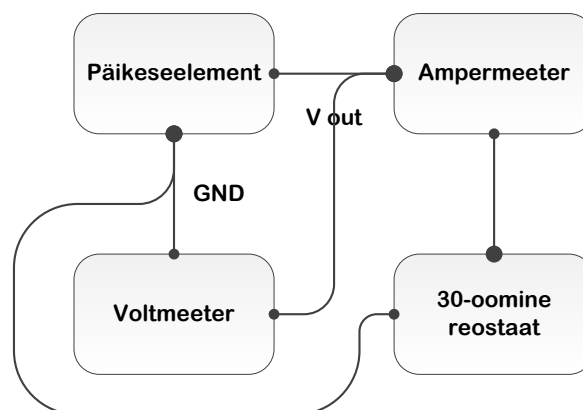
saatmine volupiiraja uute väärtustuse järel võimaldab jälgida nii simulaatori enda kui väljundisse ühendatud seadme stabiilsust pöörlemise simuleerimise ajal.

3.3.3. Pöörlemise simulatsioon

Päikeseelementide pöörlemise simulatsiooni juhtiv tarkvara on kirjutatud programmeerimiskeeles C++. Kasutatud on Boost C++ [19] ja Gaspard Petit [20] maatriksite teeki. Simulatsiooni tarkvaras on võimalik kirjeldada pöörlemise sammu suurus (kraadides) ühes programmi töotsükli, määrata tehtavate pöörete arv ja hilistusaeg pöörete vahepeal. Programmis saab määrata ka ümber milliste telgede pöörlemine toimub. Nii hilistusaja kui pöörde sammu järgi kraadides, on võimalik muuta päikeselementide pöörlemise simulatsiooni kiirust. Simulatsiooni tarkvara alustab USB ühenduse olemasolul automaatselt seadmega suhtlust ning vastavalt programmeeritud parameetritele alustab päikeselementide pöörlemise simuleerimist. Kasutajale kuvatakse konsooli aknas hetkel väärtustatav kanal ning kanalile vastav volupiiraja väärtustus millivoltides, ajatempel millisekundi täpsusega, simulaatori väljundvool ja –pinge väärtustamise järel.

4. Testimine

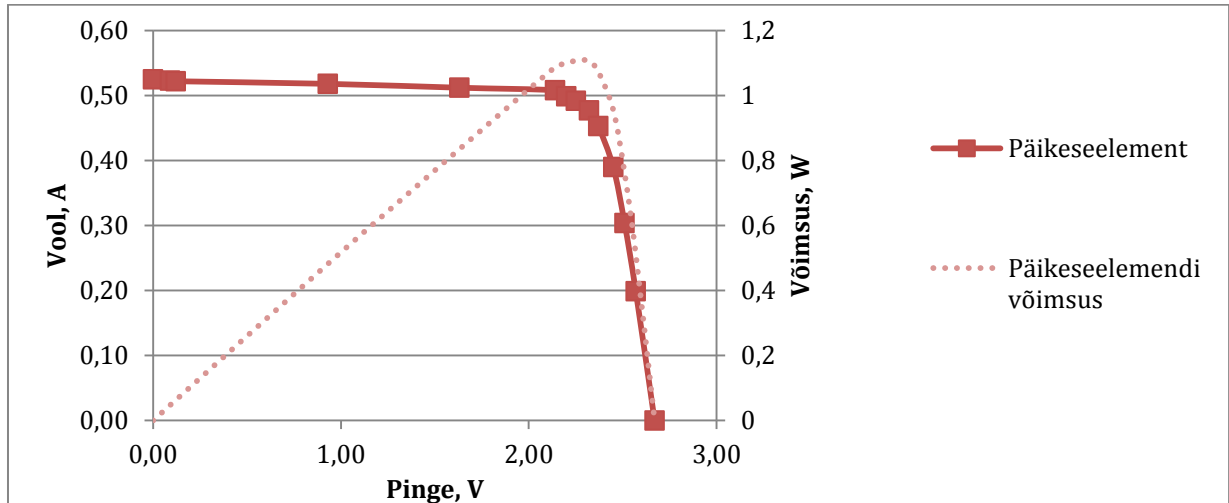
Päikeseelemendi simulaatori arendamiseks oli vajalik mõõta ka päikeseelemendi voltamperkarakteristik. Päikeseelemendi voolu-pinge tunnusjoone testimist kirjeldav skeem on toodud Joonisel 10.



Joonis 10: Päikeseelemendi voolu-pinge karakteristiku mõõtmist kirjeldav skeem.

Valgustamine toimus ksenoon-kaarlampi abil. Päikeseelement oli kinnitatud alumiiniumist külpaneelile, mis omakorda oli kinnitatud jahutusradiaatori külge. Päikesepaneeli ja

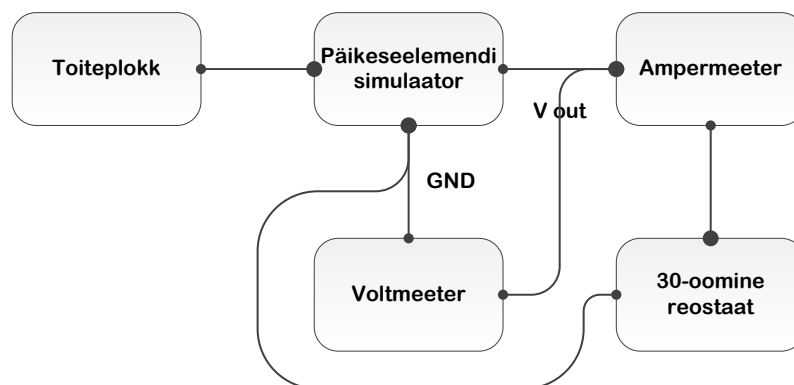
jahutusradiaatori vahel oli termopasta (Arctic MX4) ning radiaatorile puhusid kaks 92 mm ventilaatorit. Parima tulemuse andis mõõtelugemite võtmise vahel päikeseelemendi varjamine paberilehega, mis aitas päikeseelemendi kuumenemise vastu reostaadi väärtuse muutmise ja lugemite ülesmärkimise ajal. Päikeseelemendi ja simulaatori voolu-pinge tunnusjoone mõõtmisel saadud graafik on toodud Joonisel 11.



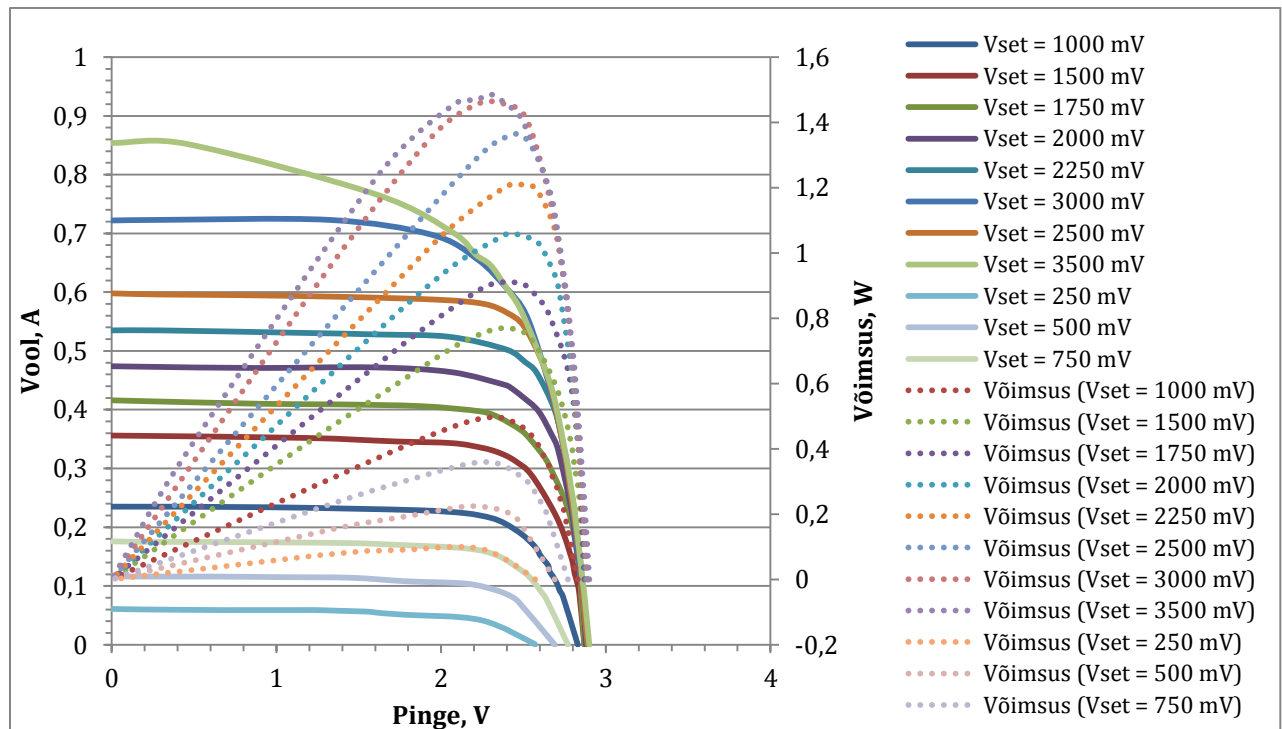
Joonis 11: Päikeseelemendi ja simulaatori voolu-pinge tunnusjoonte võrdlus.

4.1. Elektrilised testid simulaatoriga

Tuvastamaks päikeseelemendi simulaatori töötamist erinevate valgustingimuste simuleerimisel, tuli teha voolu-pinge tunnusjoonte mõõtmisi erinevatel voolupiiramisväärtustel. Päikeseelemendi voolu-pinge tunnusjoonte mõõtmisi kirjeldav skeem on toodud Joonisel 12 ning testimisest tehtud pilt asub Lisas 2.

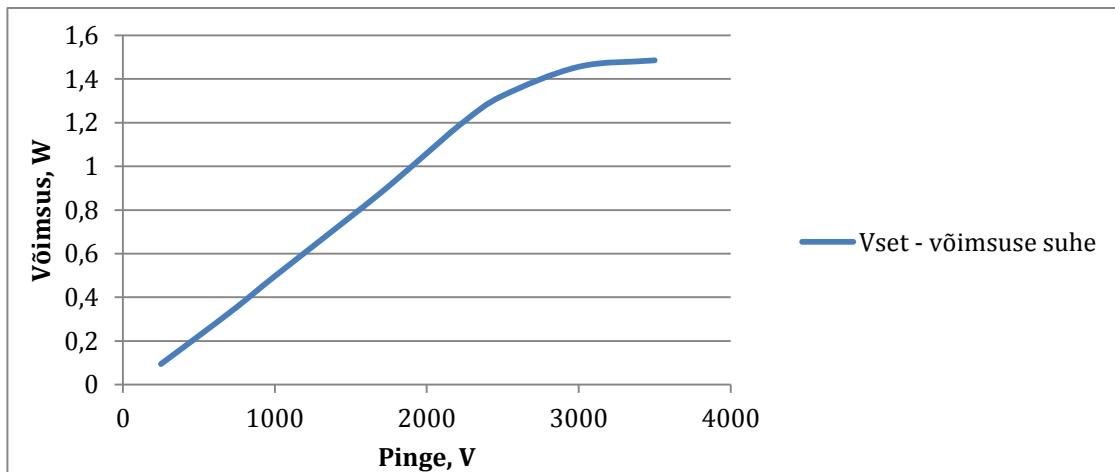


Joonis 12: Simulaatori voolu-pinge tunnusjoonte mõõtmisi kirjeldav skeem.



Joonis 13: Simulaatori voolu-pinge karakteristikud erinevatel voolupiiramise seadetel (toatemperatuur = 21°C).

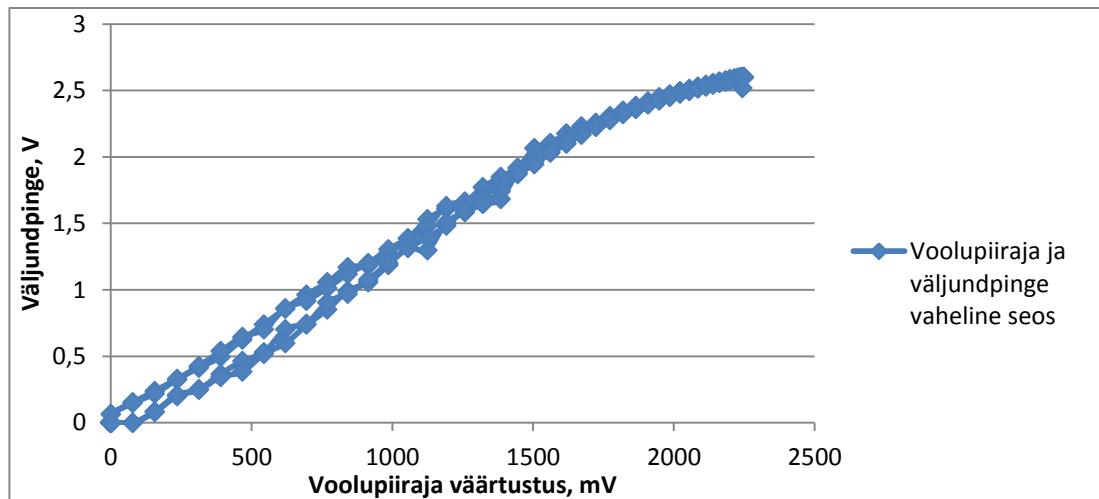
Joonisel 13 on toodud päikeseelemendi simulaatori voltamperkarakteristikud erinevate voolupiiramise väärtuste korral, mis simuleerivad päikeseelementide erinevaid valgustatuse tasemeid. Voolu-pinge tunnusjoonte graafikust ilmneb, et lühisvoolu $I_{SC} = 0,722$ A korral tõuseb MOSFET'ide kuumenemise tõttu voolutarve, diodide kuumenemise tõttu toimub kiirem („sujavam“) pingelang ja võimsuse maksimumpunkt hakkab hajuma. Väljundvõimsuse langemist suurte voolupiiraja väärtuste korral kinnitab ka Joonisel 14 toodud väljundvõimsuse ja voolupiiraja väärtuste vahelist suhet kirjeldav diagramm. Üldiselt säilitab aga simulaator kuni lühisvooluni $I_{SC} = 0,6$ A päikeseelemendile iseloomuliku voolu-pinge tunnusjoone ja päikeseelemendi simulaator käitub ootuspäraselt. Testimisel erinevate termopasta koguste, ventilaatori paigutuste ja pöörlemiskiirustega ilmneb, et diodide temperatuurile 21 °C vastab klemmipinge 2,9 V ja temperatuurile 42 °C vastab 2,76 V, mis on vastavuses ka diodide andmelehel [14] olevate näitajatega.



Joonis 14: Simulaatori väljundvõimsuse ja voolupiiramise suhet kirjeldav graafik.

4.1.1. Pöörlemissimulatsiooni testid

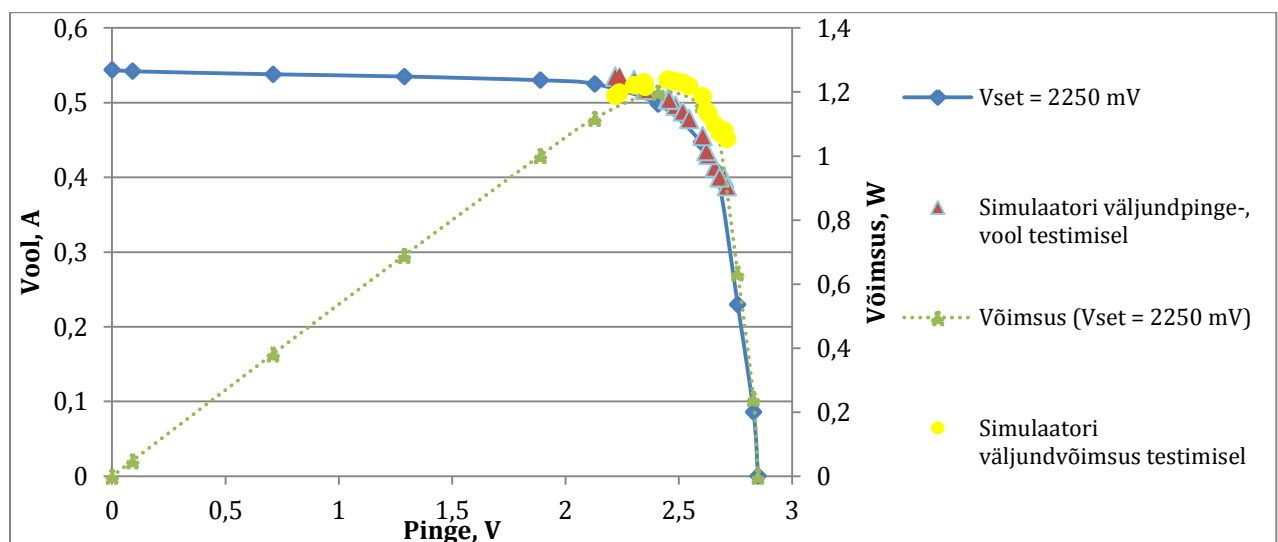
Päikeseelementide pöörlemise simuleerimisel ümber ühe või rohkema on vaja testida simulaatori väljundi vastavust pöörlemisnurgaga erinevatel kiirustel. Pöörlemistest on vajalik kinnitamaks, et päikeseelemendi väljund vastab igal ajahetkel simuleeritava elemendi nurgale päikese suhtes. Testimiste käigus tuli leida milliste kiiruste juures seade veel suudab nurga ja voltamperkarakteristiku vastavust korrektselt jäljendada. Pöörlemise simuleerimisel on oluline roll simulaatori voolupiiraja tagasiside ahela kiirusel. Tagasiside ahelast tuleneva viivituse tõttu ei suuda väljund reageerida sisendisse tulevatele voolupiiraja uutele väärtustustele. Süsteemi omadust, kus väljund ei sõltu ainult sisendist, vaid ka eelnenud seisundist nimetakse hüstereesiks. Suurte pöörlemiskiiruste juures väljendub hüstereesi omadus tugevamalt kui aeglastel pöörlemiskiirustel, ehk teisisõnu suurtel kiirustel saadaval väljundpinge ja voolupiiraja väärtustuse vahelist seost kirjeldaval graafikul on hüstereesisilmuse pindala suurem kui väiksemate pöörlemiskiiruste korral. Väljundpinge ja voolupiiraja väärtustuse vahelist seost kirjeldav graafik on toodud Joonisel 15. Testimiste käigus kohandati tagasiside ahelal oleva madalpääsfiltri väärtusi müra ja kiiruse suhtes optimaalseks. Seadmega on võimalik saavutada pöörlemiskiirus kuni 300 kraadi sekundis. Suuremate kiiruste korral suureneb hüstereesisilmusealune pindala juba oluliselt ja tagasiside ahela kiirus jääb aeglaseks. Seadmega on võimalik ligikaudselt hinnata päikese purjega tehtava eksperimendi käigus saavutataval pöörlemiskiirusel päikeseenergia abil toodetavat võimsust.



Joonis 15: Väljundpinge ja voolupiiraja väärtustuse vahelist sõltuvust kirjeldav graafik kiirusel 300 kraadi sekundis.

4.1.2. Testid satelliidi lauamudeliga

ESTCube-1 satelliidi lauamudeliga testimisel oli eesmärgiks MPPT' de töö testimine päikeseelemendi simulaatorit kasutades. Simulaatoril valiti voolupiiraja väärtuseks 2,25 V, mis peaks vastama võimalikult lähedaselt päikeseelemendi väljundvoolule $I_{SC} = 525 \text{ mA}$. Satelliidi lauamudeliga ühendati üks päikeseelemendi kanal ning uuriti, kuidas käitub MPPT.



Joonis 16: Päikeseelemendi simulaatori testimine ESTCube-1 lauamudeliga (toatemperatuur 30 °C).

Joonisel 16 on toodud graafik päikeseelemendi testimise tulemustest satelliidi lauamudeliga. Graafikul on näha, kuidas MPPT muudab sisendtakistust, et püsida maksimum võimsuspunktil või selle lähedal. Tulemusena võib öelda, et maksimum võimsuspunkti jälgimine satelliidi MPPT' del töötab ning järgmise sammuna oleks võimalik testida ligikaudset tootlikkust päikeseelemendi simulaatorilt pöörlemiskiirusel 300 kraadi sekundis.

Kokkuvõte

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärk oli päikeseelementide analüüs ning selle tulemustest lähtuvalt päikeseelementide simulaatori kavandamine, ehitamine, programmeerimine ja testimine. Bakalaureusetöös kirjeldati elektrienergia alamsüsteemi ja päikeseelementide olulisust ESTCube-1 satelliidiprojektis ning päikeselementide olulisust satelliidi testimisel.

Ülesanne kavandada, arendada, programmeerida ning testida päikeseelemendi simulaatorit ESTCube-1 tüüpi kuupsatelliidil osutus edukaks. Valminud päikeseelementide simulaatorit saab kasutada nii MPPT´de, EPS alamsüsteemi kui ka satelliidi kui terviku töö testimiseks. Simulaatorit saab kasutada ka tulevaste satelliidiprojektide testimisel, eeldusel, et kõik elemendid on ühendatud läbi ühise maanduse. Seade töötab ootuspäraselt ning kõik põhilised testid seadme töötamise kinnituseks on tehtud.

Olulisemad tulemused käesolevas töös:

- kavandati ja koostati lõplik päikeseelemendi simulaatori elektroonikaplaat;
- koostatud päikeseelemendi simulaator töötab ootuspäraselt;
- voolu-pinge tunnusjoonte vastavus päikeseelementide karakteristikutele on testitud;
- päikeseelemendi simulaatorile on programmeeritud töötav püsivara;
- päikeseelemendi simulaatorile on programmeeritud pöörlemist juhtiv tarkvara;
- pöörlemise simuleerimise maksimaalne võimalik kiirus ning stabiilsus on testitud.

Soovituslikud sammud tulevaseks tööks:

- teostada väljundpinge kalibreerimine diodide täpsema valiku ja kombineerimise teel;
- võimaluse korral arendada digitaalelektronikal põhinev päikeseelementide simulaator;
- vastavalt vajadusele joota valmis ülejäänud elemendiplaadid;
- testida EPS alamsüsteemi elektrienergia tootlikkust päikeseelemendi simulaatori pöörlemise simulatsioonil.

Tänuavaldused

Kõigepealt tahaksin tänada oma juhendajat Mihkel Pajusalu, kelle ideed, õpetussõnad ja juhendamine on alati olnud suureks abiks ning eeskujuks. Ta on alati olnud abivalmis, kannatlik ja julgustav. Samuti tahaksin tänada kogu ESTCube meeskonda, kes on andnud mulle võimaluse selles huvitavas, rohkelt väljakutseid esitavas ning eelkõige harivas projektis kaasa lüüa.

Südamest tänan pereliikmeid ja lähedasi mõistva suhtumise eest.

Summary

Designing, building, programming and testing solar cell simulator for ESTCube-1.

Henri Lillmaa

Estonian Student Satellite project started in the summer of 2008 at Tartu University with the objective for promoting space and giving students a hands-on experience on developing space technologies. The main outcome of the project was pronounced to be a fully operational nanosatellite ESTCube-1 - the first Estonian satellite.

The aims for this bachelor thesis were to analyse solar cells and based on the results design, develop, programme and test the solar cell simulator. This bachelor thesis describes the purpose of solar cells and solar cell simulator, it also explains the need for such device.

The task of designing, developing, programming and testing solar cell simulator was carried out successfully. The device can be used for testing maximum power point tracking devices, electrical power subsystem and satellite working as a whole. Also this simulator can be used for testing future satellite projects, which have similar solar cell topology – cells connected in parallel. Solar cell simulator is working as expected and all the main tests to confirm that have been done.

The most important results of the current thesis are:

- the final version of solar cell simulator board has been designed and manufactured;
- the simulator is working as expected;
- the characteristics of the simulators' I-V curve meet those of real solar cell;
- the firmware for the solar cell simulator has been programmed;
- the software for simulating rotation of solar cells has been programmed;
- maximum rotation simulation speed and stability have been tested.

Based on the current work, recommended future steps would be following:

- more accurate open circuit voltage calibration should be made by choosing more accurate diodes to combine with or replace current diodes;
- developing solar cell simulator based on digital electronics;

- according to the necessity, the rest of the four cell boards of the simulator should be manufactured;
- rotation tests with ESTCube-1 table model should be done.

Kasutatud kirjandus

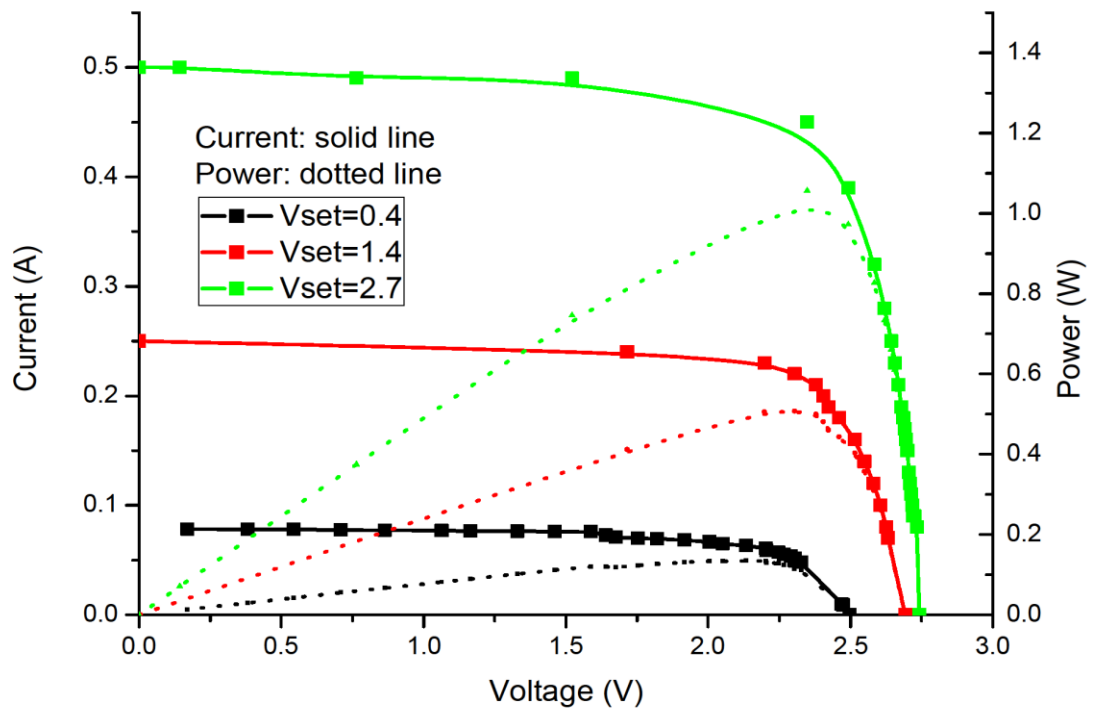
1. Eesti tudengisatelliit. <http://www.estcube.eu> (Külastatud 14.nov 2012).
2. P. Janhunen and A. Sandroos, "Simulation study of solar wind push on a charged wire: basis of solar wind electric sail propulsion", *Ann. Geophys.*, 25, 755-767, (2007) <http://www.ann-geophys.net/25/755/2007/angeo-25-755-2007.pdf> (Alla laaditud 25.03.2013).
3. The CubeSat Project, "CubeSat Design Specification" (2009), http://cubesat.atl.calpoly.edu/images/developers/cds_rev12.pdf (Alla laaditud 25.03.2013).
4. ESTCube-1 STR Team, "ESTCube-1 Preliminary System Requirements and Design, Structure and Mechanics", (Tallinn, 2010).
5. Pajusalu, M., Ilbis, E., Kalde, J., Lillmaa, H., Reinumägi, R., Rantsus, R., Pelakauskas, M., Leitu, A., Allik, V., Noorma, M., Lätt, S., Envall, J. (2012) Electrical Power System of ESTCube-1: A fault-tolerant COTS solution, IAC-12-C3.4.5, 63rd International Astronautical Congress, Naples, Italy
6. Pajusalu, M., Rantsus, R., Pelakauskas, M., Leitu, A., Ilbis, E., Kalde, J., Lillmaa, H., Reinumägi, R., Voormansik, K., Zālīte, K., Allik, V., Noorma, M., Lätt, S. (2012) Design of the electrical power system for the ESTCube-1 satellite. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 49(3), 16-24, 10.2478/v10047-012-0014-4.
7. IV and CV Characterizations of Solar/Photovoltaic Cells Using the B1500A ,Application Note B1500A-14 ,(2009) 5990-4428EN <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5990-4428EN.pdf>
8. Umit, M. E., Bas, M. E., Akyol, I. E., Uludag, M. S., Ecevit, A. B., Aslan, A. R. (2012) Solar emulator and simulator for cubesats. IAC-12-C3, 4, 9, 63rd International Astronautical Congress, Naples, Italy
9. 30% Triple Junction GaAs Solar Cell [PDF] (Alla laaditud 15.11.2012) <http://azurspace.de/index.php?mm=162>
10. ATmega16U4/ATmega32U4 Preliminary [PDF] (Alla laaditud 17.04.2013) <http://www.atmel.com/Images/doc7766.pdf>
11. LM2700 600kHz/1.25MHz, 2.5A, Step-up PWM DC/DC Converter Datasheet [PDF] (Alla laaditud 17.04.2013) <http://www.ti.com/lit/ds/snvs152c/snvs152c.pdf>

12. SQM50P03-07 - Automotive P-Channel 30 V (D-S) 175 °C MOSFET Amplifier Datasheet [PDF] (Alla laaditud 17.04.2013) <http://www.vishay.com/docs/67044/sqm50p03.pdf>
13. LT6105 - Precision, Extended Input Range Current Sense Amplifier Datasheet [PDF] (Alla laaditud 17.04.2013) <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/6105fa.pdf>
14. RF071M2S - Fast Recovery Diode Datasheet [PDF] (Alla laaditud 17.04.2013) http://rohms.rohm.com/en/products/databook/datasheet/discrete/diode/fast_recovery/rf071m2s.pdf
15. MAX1226/MAX1228/MAX1230 12-Bit 300ksps ADCs with FIFO, Temp Sensor, Internal Reference Datasheet [PDF] (Alla laaditud 17.04.2013) <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX1226-MAX1230.pdf>
16. AD5686R/AD5685R/AD5684R - Quad, 16-/14-/12-Bit nanoDAC+ with 2 ppm/°C Reference, SPI Interface Datasheet [PDF] (Alla laaditud 17.04.2013) http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD5686R_AD5685R_AD5684R.pdf
17. USB: Virtual Serial Port [HTML] (Vaadatud 17.04.2013) http://www.pjrc.com/teensy/usb_serial.html
18. Lehtla T. Robotite juhtimine I, Tallinna Tehnikaülikool, Elektriagamite ja jõuelektroonika instituut, Robotitehnika õppetool, Tallinn 1994
19. Boost Library, [HTML] (Vaadatud 30.04.2013) <http://www.boost.org/users/index.html>
20. Compiler Friendly Matrices, Gaspard Petit, [HTML] (Vaadatud 30.04.2013) <http://www-etud.iro.umontreal.ca/~petitg/cpp/matrix.html>

Lisa 1. Prototüüpplaadi voolu-pinge tunnusjoon.

ESTCube-1 solar cell simulator I-V testing

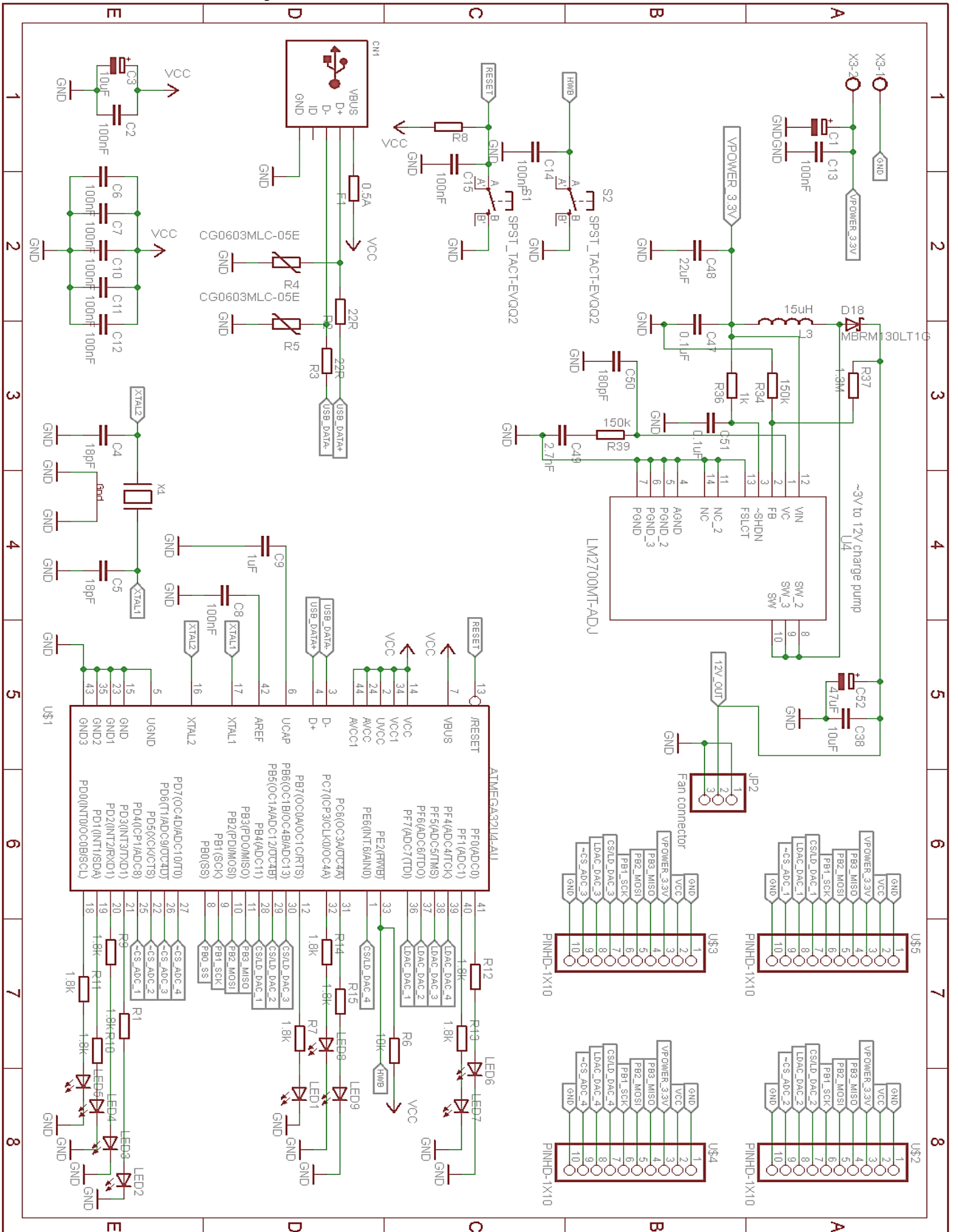
18.09.2012



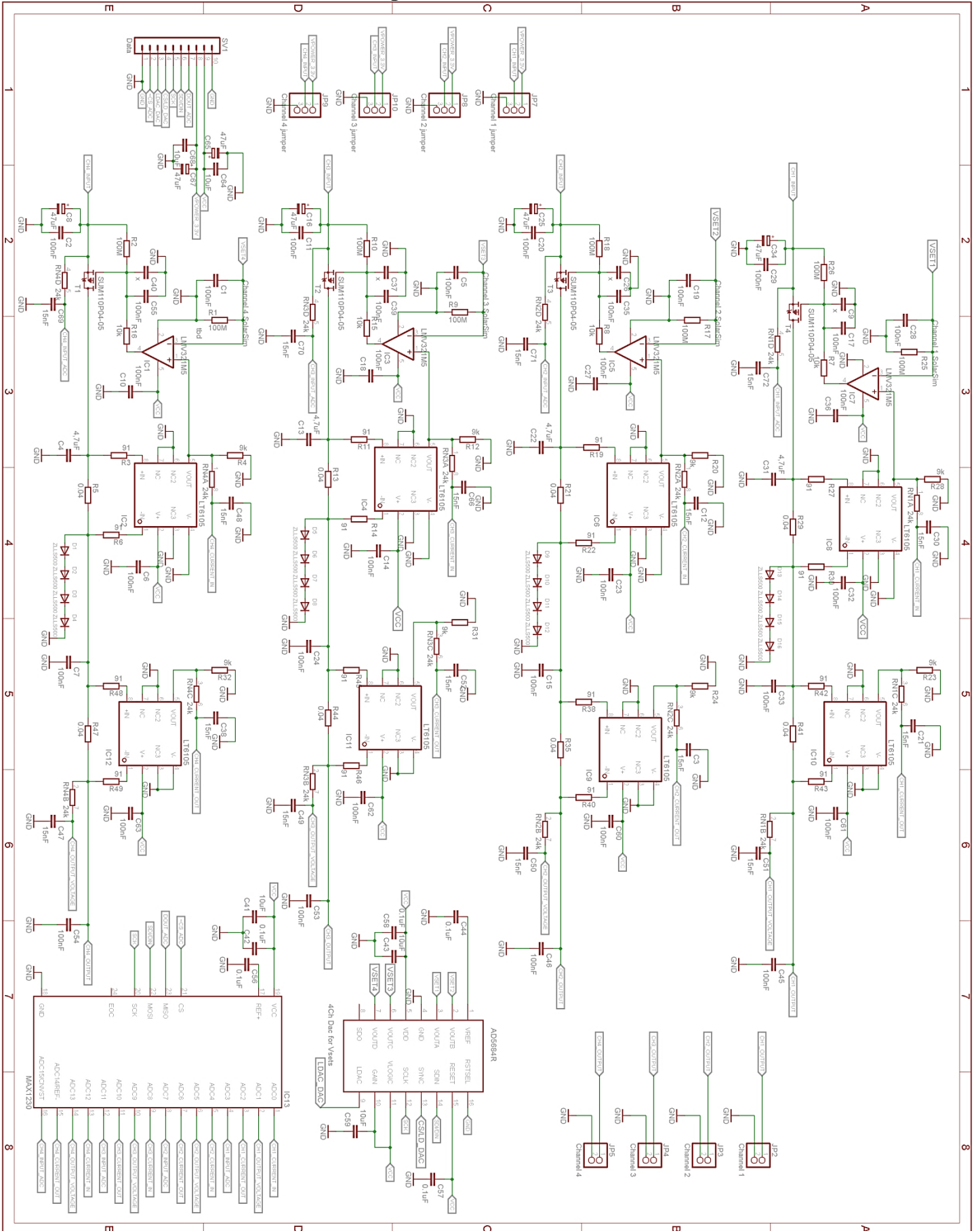
Lisa 2. Pilt päikeseelemendi simulaatori voolu-pinge tunnusjoone mõõtmisest.



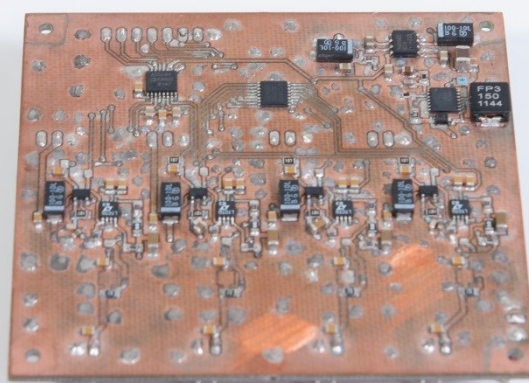
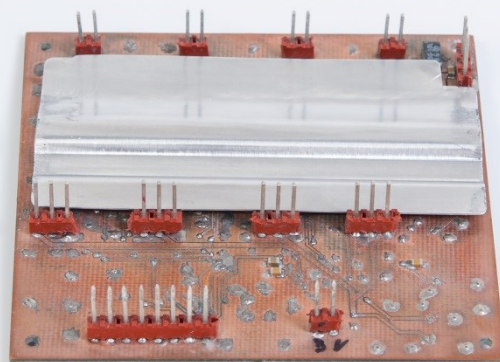
Lisa 3. Simulaatori juhtmooduli elektriskeem.



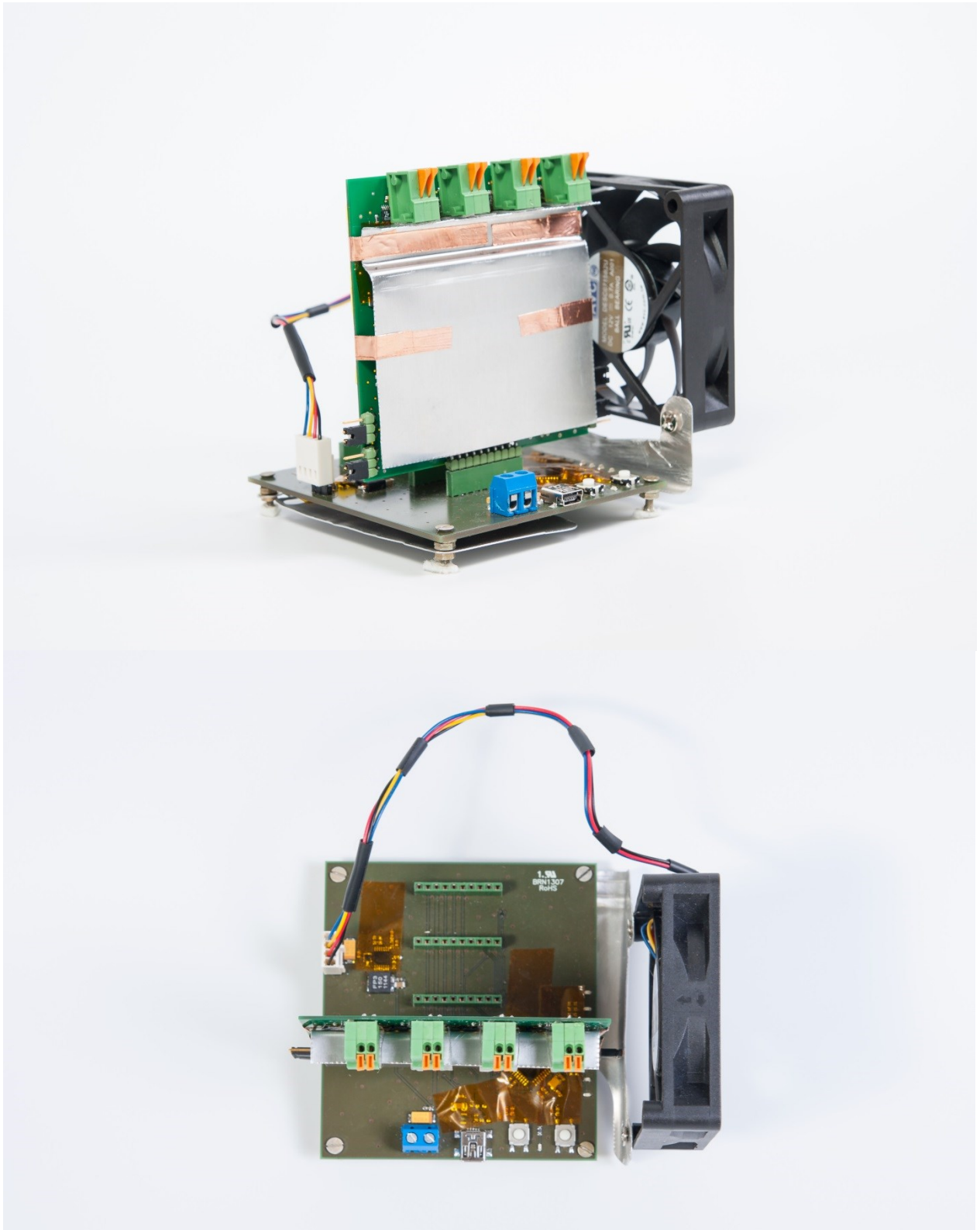
Lisa 4. Simulaatori elemendi plaadi elektriskeem.



Lisa 5. Pildid järjekorranumbriga kaks prototüüpsimulaatorist



Lisa 6. Pildid lõplikust päikeseelemendi simulaatorist.



Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina Henri Lillmaa

(sünnikuupäev: 03.07.1990)

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „ESTCUBE-1 PÄIKESEELEMENDI SIMULAATORI ARENDUS JA TESTIMINE“

mille juhendaja on Mihkel Pajusalu

- 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, 19.05.2013