

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
Infotehnoloogia teaduskond  
Thomas Johann Seebecki elektroonikainstituut

# **Portatiivse päikeseelektrisüsteemi mõõtur**

Bakalaureuseõppe lõputöö

Üliõpilane:	Tanel Siilbek
Üliõpilaskood:	106882IAEB
Juhendaja:	Eero Haldre

Tallinn  
2016

## **Autorideklaratsioon**

*Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus ning kinnitan, et esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud. Kinnitan, et antud töö koostamisel on kõikide teiste autorite seisukohtadele, probleemipüstitustele, kogutud arvandmetele jmt viidatud.*

Kuupäev:

Autor: Tanel Siilbek

.....

/allkiri/

# Lõputöö ülesanne

**Lõputöö teema:** Portatiivse päikeseelektrisüsteemi mõõtur.

**Teema päritolu:** TTÜ, Thomas Johann Seebecki elektroonikainstituut. Teema on mõeldud välja koostöös lõputöö juhendajaga ning on saanud valituks seoses lõputöö autori huviga mikrokontrollerite ja päikeseelektrienergia lahenduste vastu.

**Lõputöö eesmärgid:** Lõppeesmärk on valmistada mõõtur, mis mõõdab päikesepaneeli-, akumulaatori- ja koormusahela voolusid ning pingeid ja salvestab saadud tulemused hilisemaks tasuvuse kalkuleerimiseks andmesalvestisse.

**Oodatavad tulemused:** Kolme mõõdetava ahela voolude ja pingete registreerimine andmesalvestisse ning saadud mõõtetulemustest tabeltöötlusprogrammi abil energiahulkade arvutamine.

**Lahendatavad küsimused:** Mõõteahela skeemide arvutamine ja disainimine, mikrokontrolleri A/D muundurite kasutamine, soovitud informatsiooni kättesaamine mõõteahelatest, saadud mõõtetulemuste salvestamine, energiahulkade kalkulatsioon tabeltöötlusprogrammiga.

Kuupäev: .....

Üliõpilane: .....  
/allkiri/

Juhendaja: .....  
/allkiri/

Kinnitaja: .....  
/allkiri/

## Annotatsioon

Käesolevas lõputöös koostatakse portatiivne madalpinge päikeseelektri mõõtur, mis suudab registreerida ja kalkuleerida väikesemõõtmelise päikeseelektri süsteemi energia tootmist, salvestamist ja tarbimist. Selleks, et kalkuleerida mõõtetulemustest energiahulka on vaja mõõta pingeid ja voolusid. Koostatud mõõturi tuumaks on lõputöö autori poolt valmistatud voolusensorid, mis ühendatakse Arduino mikrokontrolleri arendusplaadiga, kus teostatakse A/D muundamisi ning saadakse energiahulga kokku arvutamiseks vajalikud mõõtetulemused. Esmalt tutvustatakse mõõdetava- kui ka mõõtesüsteemi komponente, millele järgneb juba põhjalikum kirjeldus voolumõõtmise sensorite disainiprotsesside kohta. Seejärel antakse majanduslik ülevaade, kus tuuakse välja ehitatud süsteemi tarbeks vajaminevate komponentide nimekiri ning viimases osas esitatakse mõõtesüsteemi poolt saadud katsetulemused..

Lõputöö on kirjutatud Eesti keeles ning sisaldab teksti **45** leheküljel, **8** peatükki, **19** joonist, **9** tabelit.

## **Abstract**

The purpose of this thesis was to design a low-voltage portable solar power meter that is able to record and calculate energy production, storage and consumption for a small scale solar electric system. In order to be able to calculate the amount of energy consumed, it is necessary to measure the respective voltages and currents. The core of the measurement system are the current sensors designed by the author. The sensors are connected to the Arduino development board which performs A/D conversions to get the necessary readings for calculating the amounts of energy. The structure of the thesis is organized as follows: first, the author will give an overview of the measurable system as well as the measurement system components, followed by a more detailed description about the design process of the current sensors. Second, an economic overview of the necessary parts and the prices is presented by the author. Finally, the author outlines the experimental data which is collected by the designed measurement system.

The thesis is in Estonian and contains **45** pages of text, **8** chapters, **19** figures, **9** tables.

## Lühendite ja mõistete loetelu

<b>Valgustatus</b>	<i>Illuminance</i> Iseloomustab pinnauhikule langeva valgusvoo hajumist, mõõdetakse luksmeetriga luksides [lx]. Võtab arvesse ainult nähtavat valgust ehk inimsilmalse tajutavat spektriosa.
<b>MPP</b>	<i>Maximum Power Point</i> Maksimaalset võimsus punkt.
<b>Lühisahela vool</b> (Isc)	<i>Short Circuit Current</i> Ahela vool lühise ehk lõpmata väikese takistuse korral tema väljundis.
<b>Avatud ahela pinge</b> (Uoc)	<i>Open Circuit Voltage</i> Ahela pinge katkestuse ehk lõpmata suure takistuse korral tema väljundis.
<b>Keelutsoon</b>	<i>Band gap</i> Energiatase juhtivustsooni ja valentstsooni vahel, kus puuduvad elektronid. Selle ulatust tähistatakse elektronvoltides. Keelutsooni laius kirjeldab minimaalset elektroni ergastamiseks vajaminevat energiat viimaks elektron valentstsoonist üle juhtivustsooni.
<b>Valentstsoon</b>	<i>Valence band</i> Tsoonistruktuuri osa, kus paiknevad kõrgeima energiaga valetselektronid.
<b>Juhtivustsoon</b>	<i>Conduction band</i> Tsoonistruktuuri osa elektronide energia piirkonnale, kus pole veel elektrone kuid millel on piisavalt energiat valentselektroni vabastamiseks ja aatomite vahel liikuma saamiseks.

**Fotovool***Photocurrent*

Fotoseadise valgustamisel tekkiva fotoefekti tõttu genereeritav elektrivool.

**A/D muundur***Analog to digital converter*

(ADC, A/D)

Seade, mis muundab pideva füüsikalise suuruse, milleks on üldjuhul elektripinge vastavaks digitaalseks numbriks, mis väljendab mõõdetava suuruse amplituudi.

**RC ahel***RC circuit*

Takistist ja kondensaatorist koosnev elektriahel.

**PWM***Pulse width modulation*

Pulsilaiusmodulatsioon on modulatsioonitehnika liik, kus moduleeritakse impulsi laiust.

**Ajakonstant***Time constant*

On aeg, mis kulub kondensaatori pinge kasvamiseks kindlale tasemele. Ühe ajakonstandi ehk  $1\tau$  puhul kasvab kondensaatori pinge 63.2% 'ni maksimaalsest, kondensaator jõuab peaaegu täislaetud olekusse  $5\tau$  möödudes.

## Jooniste loetelu

Joonis 2.1 – Päikeseelektri süsteem [1] .....	12
Joonis 2.2 – Päikesepaneeli I-V kõver [2] .....	13
Joonis 2.3 – Päikesepaneeli karakteristikud [2] .....	14
Joonis 2.4 – Optimeerimata koormus [2] .....	14
Joonis 3.1 – Mõõtesüsteemi plokkskeem .....	17
Joonis 4.1 – Pingeväljundiga kiip [5] .....	19
Joonis 4.2 – Vooluväljundiga kiip [5] .....	19
Joonis 4.3 – RC ahela täislaadimise karakteristik [3] .....	20
Joonis 4.4 – Päikesepaneeli ahela voolusensor .....	22
Joonis 4.5 – Päikesepaneeli spetsifikatsioon [7] .....	23
Joonis 4.6 – Koormusahela voolusensor .....	24
Joonis 4.7 – Akumulaatori ahela voolusensor .....	26
Joonis 5.1 – Kalibreerimise mõõteskeem nr 1 .....	29
Joonis 5.2 – Kalibreerimise mõõteskeem nr 2 .....	31
Joonis 5.3 – U1241B mõõtetäpsus [9] .....	32
Joonis 6.1 – Paneeli- ja koormusahela voolusensori trükkplaadi disain .....	34
Joonis 6.2 – Akumulaatori ahela voolusensori trükkplaadi disain .....	35
Joonis 8.1 – Katseandmed tekstikujul .....	40
Joonis 8.2 – Katseandmed tabeltöötlusprogrammis .....	40



## **Tabelite loetelu**

Tabel 5.1 – Päikesepaneeli voolusensori väärtused.....	28
Tabel 5.2 – Päikesepaneeli pingejaguri väärtused.....	29
Tabel 5.3 – Akumulaatori voolusensori väärtused .....	30
Tabel 5.4 – Akumulaatori pingejaguri väärtused .....	31
Tabel 7.1 – Koormusahela voolusensori komponendid .....	36
Tabel 7.2 – Päikesepaneeli ahela voolusensori komponendid .....	37
Tabel 7.3 – Akumulaatori ahela voolusensori komponendid.....	39
Tabel 8.1 – Katseandmed .....	41
Tabel 8.2 – Katsetulemused.....	42

## Sisukord

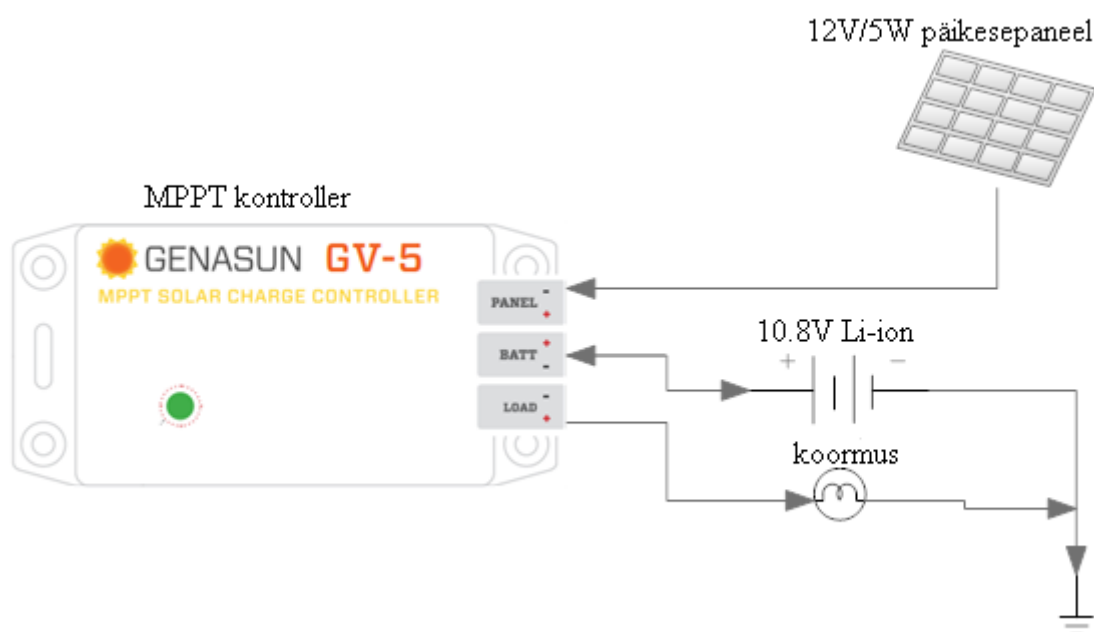
1. Sissejuhatus .....	11
2. Mõõdetav päikeseelektri süsteem.....	12
3. Mõõtesüsteemi tutvustus .....	15
4. Voolusensorid.....	18
4.1 Ühesuunalise voolu mõõtmine.....	21
4.1.1 Päikesepaneeli ahela arvutused .....	22
4.1.2 Koormusahela arvutused .....	24
4.2 Kahesuunalise voolu mõõtmine.....	25
4.2.1 Akumulaatori ahela arvutused .....	26
5. Voolusensorite kalibreerimine.....	27
5.1 Päikesepaneeli ja koormusahela voolusensori kalibreerimine.....	27
5.2 Akumulaatori ahela voolusensori kalibreerimine .....	30
5.3 Voolusensorite mõõtetäpsuse hinnang.....	32
6. Trükkplaadi disain .....	34
7. Majanduslik ülevaade .....	36
7.1 Komponentide loetelu .....	36
7.2 Majanduslik aruanne .....	39
8. Katsetulemused.....	40
8.1 Katse .....	41
Kokkuvõte .....	43
Summary.....	44
Kasutatud kirjandus .....	45

## 1. Sissejuhatus

Käesoleva lõputöö teemaks on valitud portatiivse madalpinge päikeseelektrisüsteemi mõõtur, mis on ehitatud Arduino mikrokontrolleri arendusplaadi baasil. Lõputöö eesmärgiks on valmistada mõõtur, mis mõõdab päikesepaneeli-, akumulaatori- ning koormusahela voolusid ja pingeid ning salvestab saadud tulemused tasuvuse kalkuleerimiseks ja analüüsiks andmesalvestisse. Energiahulkade kalkuleerimiseks on vaja mõõta erinevate ahelate pingeid ja voolusid, mistõttu peab lõputöö koostaja disainima selleks otstarbeks sobilikud mõõteahelad. Mõõtetulemuste sidumiseks mõõtekeskkonna *valgustatusega* on lisatud mõõteseadmele ka valgussensor. Enamikud sellesarnase ideega korralikud mõõtesüsteemid on küllaltki kallid ning pigem orienteeritud suurematele päikeseelektri süsteemidele. Käesolev lõputöö sai valitud lähtudes teema üldisest populaarsusest maailmas ja lõputöö koostaja huvist antud teema vastu. Käesolev lõputöö on kindlasti abiks ka elektroonikahuvilistele, kes tegelevad mikrokontrollerite ja -arendusplaatidel baseeruvate elektrienergia arvestamisega seotud lahenduste väljatöötamisega.

## 2. Mõõdetav päikeseelektri süsteem

Mõõdetav päikeseelektri süsteem koosneb neljast osast, milledeks on päikesepaneel, *MPPT* kontrolleri, akumulaator ja koormus. Mõningatel juhtudel ühendatakse päikesepaneel ka otse akumulaatoriga, kuid selline lahendus ei kasuta päikesepaneeli energia tootmise seiskohalt maksimaalselt ära ning ei ole sobilik ka kõikide akumulaatori tüüpidega. Väga levinud valik on siinkohal kasutada *PWM* kontrolleri, kuid selline lahendus ei kasutaks päikesepaneeli poolt potentsiaalselt genereeritavat energiat ära. Käesolevas lõputöös on aga valitud spetsiaalselt Li-ion akumulaatori tüübile sobilik *MPPT* kontrolleri, mille tööõhimoete annab võrreldes kahe eespool mainitud variandiga suurima päikese elektrienergia tootlikkuse.



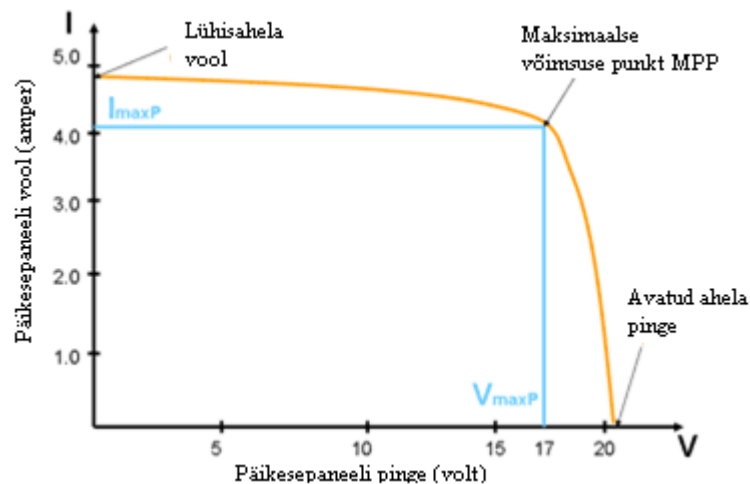
Joonis 2.1 – Päikeseelektri süsteem [1]

Päikesepaneeli ülesanne on genereerida päikesevalgusest elektrienergiat, selleks on kasutusel **12V/5W polükristalliline** päikesepaneel. Seda tüüpi päikesepaneel on kõige populaarsem valik oma hinna ja tootlikkuse suhtes, kui päikesepaneeli mõõtmed ei ole paigalduse seisukohalt piiratud.

*MPPT* kontrolleri on seade, mille peamine funktsioon on juhtida akumulaatori laadimisprotsessi vastavalt tema algoritmile eesmärgiga maksimeerida päikesepaneelilt saadavat väljundvõimsust ehk suurendada kogu päikeseelektrisüsteemi tootlikkust. Lisaks

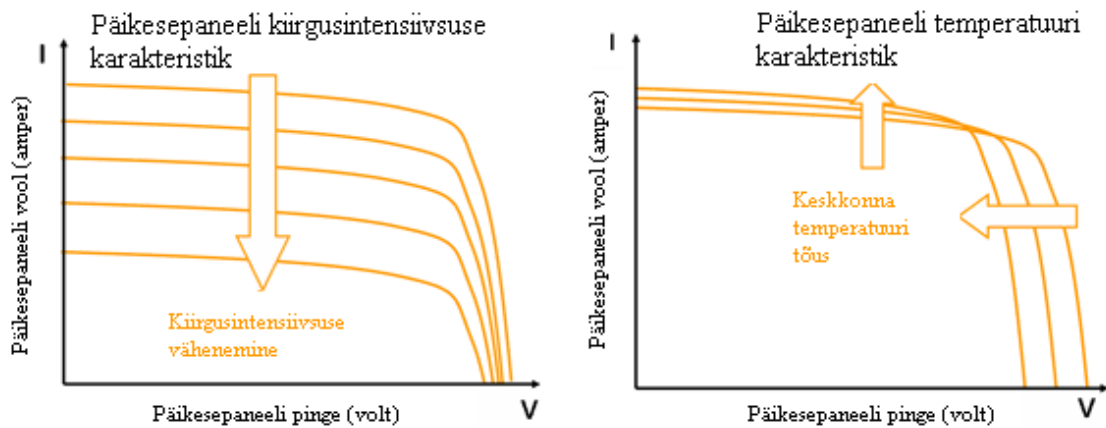
sisaldab käesolev MPPT kontrolleri kaitsefunktsionaalsust ehk antud MPPT kontrolleri kaitseb akumulaatorit liigse tühjakslaadimise eest ning sisaldab endas ka blokeerimisdiiodi, et takistada voolu liikumist akumulaatorist päikesepaneeli olukorras, kus päikesepaneeli pinge on akumulaatori pingest madalam. Päikesepaneelil on kompleksne sõltuvus temperatuuri ja tema takistuse vahel, mistõttu on ka tema pinge-voolu karakteristik (I-V kõver) ebalineaarne. MPPT kontrolleri funktsioon on mõõta päikesepaneeli väljundväärtusi ning rakendada vastavalt käesoleva hetke keskkonnatingimustele (temperatuur, valgustatus) sobilik koormus, et oleks tagatud maksimaalne paneeli väljundvõimsus.

MPPT kontrolleri kasumlikkuse mõistmiseks on toodud (Joonis 2.2) päikesepaneeli I-V kõver ja sellel olevate punktide selgitus. MPP (maksimaalse võimsuse punkt) on graafikul punkt, kus pinge ja voolu korrutis on maksimaalne. [2]



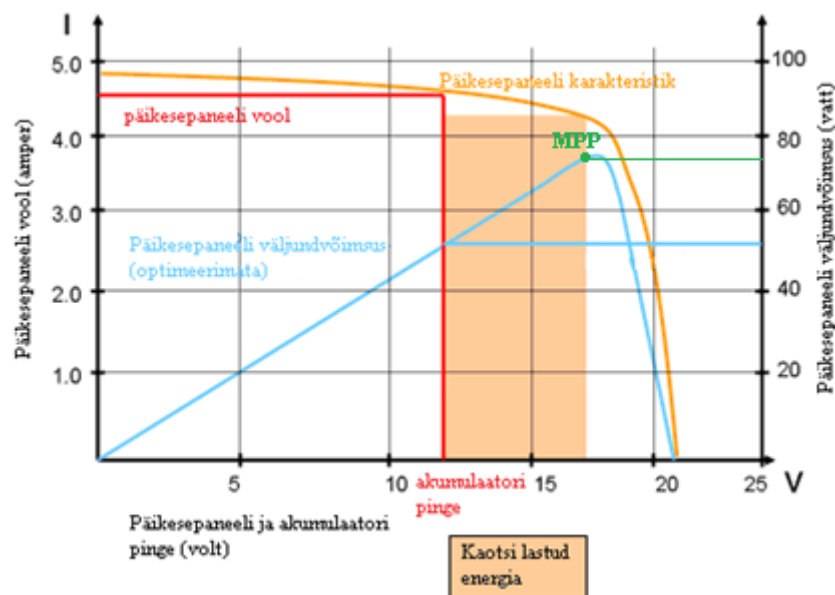
**Joonis 2.2 – Päikesepaneeli I-V kõver [2]**

*Lühisahela vool* on proportsionaalne valguse intensiivsusega ehk kui valguse intensiivsus suureneb, siis suureneb ka lühisahela vool, see aga põhjustab päikesepaneeli temperatuuri kasvu, mistõttu muutub pooljuhtelemendi *keelutsoon* kitsamaks ja väheneb *avatud ahela pinge*. Keelutsooni kitsenedes vajavad laengukandjad vähem ergastavat energiat, et pääseda *valentstsoonist juhtivustsooni*, mistõttu suurenebki *fotovool*. Kuna temperatuuri tõustes on fotovoolu juurdekasv proportsionaalselt väiksem kui avatud ahela pinge langus, siis kokkuvõttes saab öelda, et temperatuuri kasvades päikesepaneeli efektiivsus langeb. [2]



Joonis 2.3 – Päikesepaneeli karakteristikud [2]

Maksimaalse võimsuse ülekande teoreemi [3] kohaselt jõuab maksimaalne võimsus allikast koormusesse tingimusel, et koormus ja allikas on võrdse impedantsiga. Päikeseelektri rakenduste puhul on tavaliselt koormuseks eelkõige akumulaator, mis ei ole kaugeltki ideaalne koormus päikesepaneelile ning on lisaks kõigele ka ise energiaallikas. Allika ja koormuse sobituse puudumise tõttu on tulemuseks arvestatav efektiivsuse kadu.



Joonis 2.4 – Optimeerimata koormus [2]

Joonis 2.4 on näide, kus päikesepaneeli optimaalne väljundvõimsus on maksimaalselt **74.8W** (MPP), kuid kuna see ühendatakse otse akumulaatoriga, mille pinge vastavalt laetustasemele on **12V**, siis selle tulemusena saab päikesepaneeli väljundvõimsuseks natuke üle **50W**, kadu on seega üle **30%**. [2]

### 3. Mõõtesüsteemi tutvustus

Koostatava mõõtesüsteemi põhielementideks on lõputöö koostaja poolt disainitud voolusensorid, mis annavad mikrokontrollerile A/D muundamiseks ja energiahulga kalkuleerimiseks vajalikud sisendväärtused. Arduino Mega 2560 on arendusplaat, mille põhielemendiks on **8-bitine** Atmeli mikrokontroller ATmega2560. Kasutatav arendusplaat on valitud põhjendusega, et see omab **16** analoogpinge sisendkanalit ja **10 bitise** resolutsiooniga A/D muundurit. Antud mikrokontrolleri töötab võrdlusmeetodil (*successive approximation*) ehk mõõdetavat pinget võrreldakse fikseeritud pingeniivoodega ning lõpptulemus esitatakse bitijadana. See meetod on aeganõudev kuna iga mõõtmise teostamiseks kulub töö ajal **13 takti** ja esimese mõõtmise puhul isegi **25 takti**. Täpsustuseks tuleb veel mainida, et need taktid ei ole otseselt mikrokontrolleri töötaktid, vaid läbi seadistatava sagedusjaguri (*prescaler*) saadud taktid. Kui on soov kasutada A/D muundurit maksimaalse resolutsiooniga, siis peab vastavalt mikrokontrolleri kasutusjuhendile A/D muunduri töötakt olema vahemikus **50-200kHz**. [4]

Ümbritseva keskkonna valgustatuse hindamiseks on kasutatud tootja Adfruit logaritmilise skaalaga analoog valgussensor GA1A12S202. Antud valgussensori põhiliseks eeliseks on see, et tänu tema laiale mõõtevahemikule (**3...55 000 lux**) saab seda edukalt kasutada nii välis- kui ka sisetingimustes ilma, et peaks muutma kalibratsiooni või programmikoodi. Tavalised lineaarse skaalaga valgussensorid on üldiselt väga kitsa mõõtevahemikuga ning seetõttu satuvad nad lihtsasti küllastusse.

Andmete salvestamiseks on valitud tootja SparkFun avatud lähtekoodiga andmesalvesti, mis salvestab mälukaartile txt-failivormingusse kõik andmed, mis saadetakse mikrokontrolleri jadaliidesesse. Selleks, et txt faili salvestatavad mõõtetulemused oleks hilisemaks analüüsiks ja kalkuleerimiseks lihtsamini käsitletavad, eraldab mikrokontroller mõõtetulemused omavahel komadega ehk CSV (*comma separated values*) tekstivormingu stiilis, mis võimaldab mõõtetulemusi mugavalt töödelda populaarsetes tabelarvutusprogrammides nagu näiteks MS Excel või OpenOffice Calc.

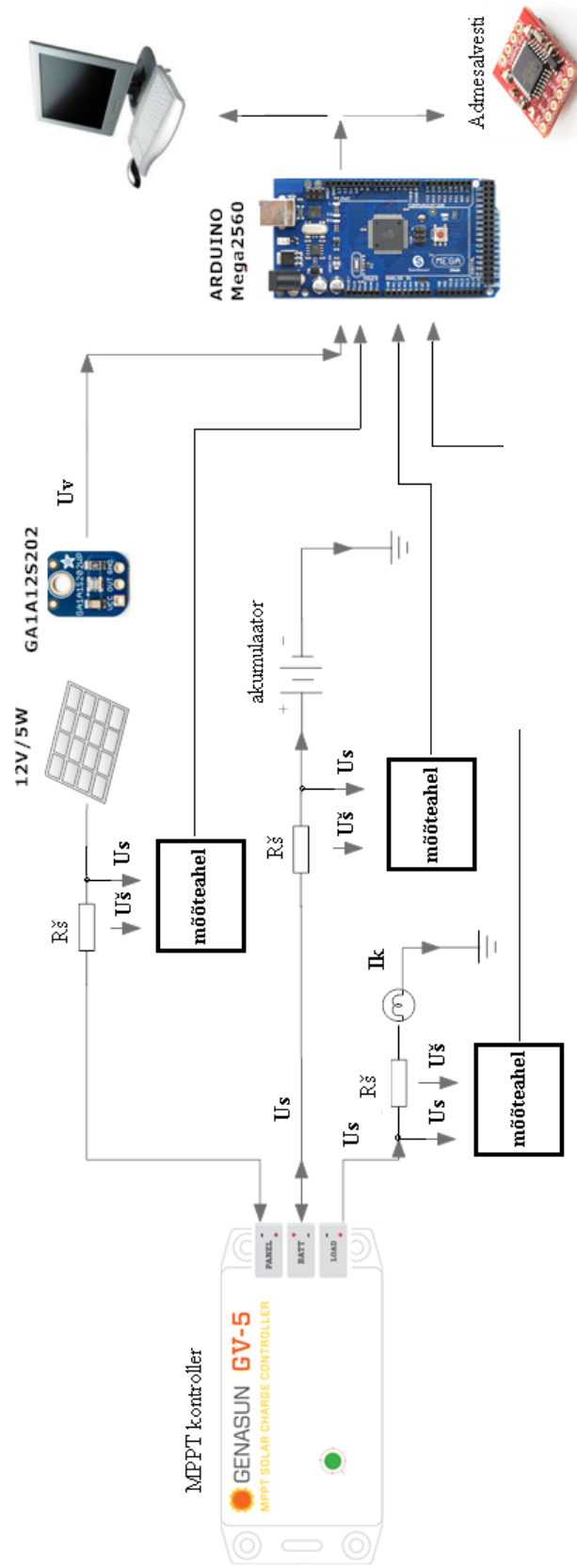
Ühesuunalise voolu mõõtmiseks on valitud tootja Diodes spetsiaalne voolumõõtmise mikroskeem ZXCT1022, mis on mõeldud voolu mõõtmiseks, kus šunt takisti paigaldatakse toiteallika ja koormuse positiivse toiteliini poolele. Sellise lahenduse üheks eeliseks on

mõõdetava toiteahela **GND** potentsiaali mittehäärimine ja kokkuvõid mikrokontrolleri analoog sisendite arvult. Kuna konkreetne mikroskeem sisaldab endas võimendit, siis ei pea mikrokontrolleris enam täiendavat võimendust kasutama ja seega säilitame A/D muunduri **10 bitise** resolutsiooni.

Kahesuunalise voolu mõõtmiseks on valitud tootja Texas Instruments spetsiaalne voolumõõtmise mikroskeem INA170, mille eelised on põhimõtteliselt samad kui ZXCT1022 mikroskeemil. Kui ühesuunalise voolumõõtmise korral on kogu väljundsignaali vahemik kasutusel ainult ühes suunas voolavat voolu kirjeldamiseks, siis kahesuunalise mõõtmise puhul on väljundsignaali vahemik jagatud kaheks osaks, mis aga vähendab mõõdetava voolu dünaamika ulatust.

Voolu mõõtmiseks kasutades A/D muundurit on vaja eelkõige paika panna eesmärgid, ehk mis väärtustega ja mis vahemikus voolusid soovitakse mõõtma hakata ning mis on antud rakenduse puhul kõige olulisem. Selleks, et saavutada parim eraldusvõime väikeste voolude korral, tuleks valida suur šunt takisti, madal tugipinge, kõrge resolutsiooniga A/D muundur ning suure võimendusega voolumõõtmise kiip, samas kannatab sellisel juhul suuresti voolumõõtmise üldine vahemik, kuna A/D muundur satub mõõdetava voolu kasvades kiiresti küllastusse. Kui eesmärgiks on mõõta suuremaid voolusid, siis tuleb valida väike šunt takisti, kõrge tugipinge ja väikese võimendusega voolumõõtmise kiip, sellisel juhul on ka voolu mõõtmise vahemik kõige laiem, kannatada saab aga voolumõõtmise eraldusvõime just väikeste voolude korral. Antud lõputöös on eesmärgiks mõõta väikeseid (kuni **300mA**) voolusid, mistõttu on valitud suhteliselt väikeseoomiline šunt takisti. Selleks, et mitte kaotada tundlikkuses siis on valitud **100** kordse pingevõimendusega voolumõõtmise kiip.





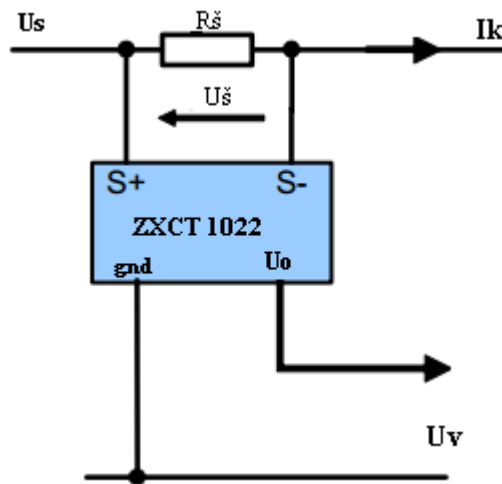
Joonis 3.1 – Mõõtesüsteemi plokk skeem

## 4. Voolusensorid

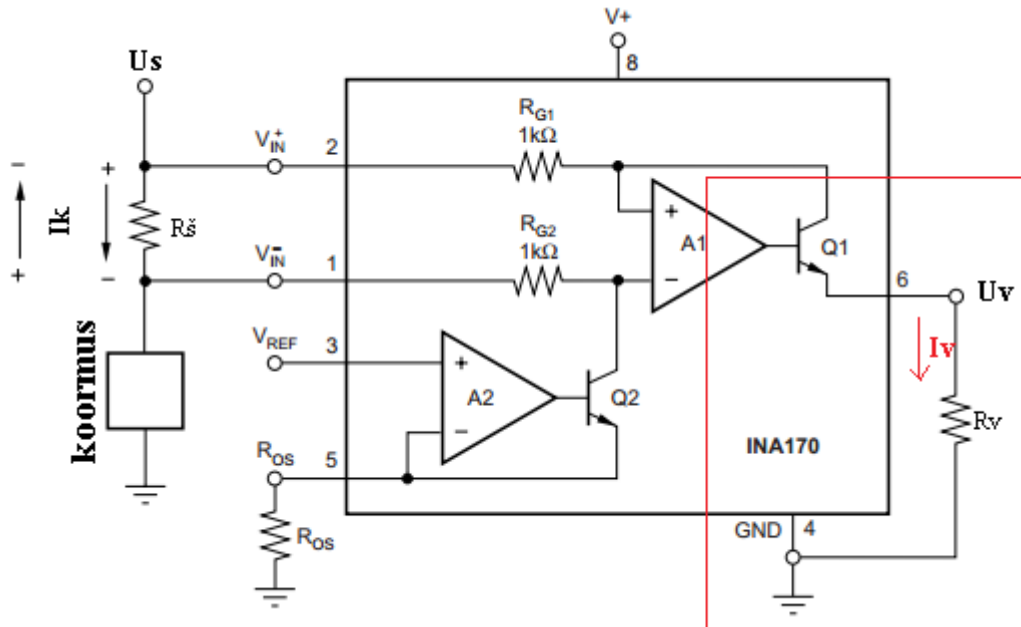
Käesolevas peatükis vaatame lähemalt, mis põhimõtetel ja kuidas on koostatud mõõtesüsteemi kuuluvad võtmetähtsusega voolusensorid.

Voolu mõõtmiseks on valitud kõikide mõõdetavate ahelate puhul takistuslik meetod. Takistuslik meetod on kõige odavam ja algelisem, kuid samas ka kõige täpsem ja lineaarsem, see asjaolu lihtsustab olulisel määral mikroprotsessori programmikoodi kirjutamist. Antud meetodi miinuseks on kunstliku lisatakistuse tekitamine mõõdetavasse elektriahelasse. Suuremate voolude korral põhjustada lisatakistus võimsuskadu, mis suureneb eksponentsiaalselt voolu suurenedes ( $P=I^2R$ ). Seega kasutatakse takistusliku meetodi ainult madalate ja keskmiste vooluväärtuste mõõtmiseks. Takistuslik meetod põhjustab järskude voolutarbimistega koormuse korral häireid mõõdetavas ahelas, mis on eriti probleemne just sellisel juhul kui kunstlikult tekitatud lisatakistus on paigaldatud „Maa“ potentsiaaliga elektrijuhti. Takistuslik meetod jaguneb kaheks, kus esimesel juhul lisatakse šunt takisti kõrge potentsiaaliga elektrijuhti ja teisel juhul „Maa“ potentsiaaliga elektrijuhti. Eristatakse ka voolumõõtmise mikroskeeme, mis annavad väljundiks toiteahelas mõõdetava vooluga proportsionaalse voolu või pinget (Joonis 4.1). Eespool kirjeldatud probleemide vältimiseks on mõistlik kasutada võimalikult väikese väärtusega ehk võimalikult nullilähedase väärtusega šunt takistit. Kui kasutada nullilähedase väärtusega šunt takistit ja eesmärgiks on mõõta ka väikeseid vooluväärtusi, tuleb kasutada võimendust ning kõrge tundlikkusega A/D muundurit.

[5]



Joonis 4.1 – Pingeväljundiga kiip [5]



Joonis 4.2 – Vooluväljundiga kiip [5]

Käesolevas lõputöös kasutatakse varianti, kus voolumõõtmise šunt takisti paigaldatakse kõrge potentsiaaliga elektrijuhti ning kasutatakse kahte erinevat voolumõõtmise kiipi, kus ühel juhul on väljundiks mõõdetava vooluga proportsionaalne pinge, teisel juhul -vool. Joonisel 4.2 nähtava lahenduse peamiseks eeliseks on tema paindlikus kuna skeemitehnik saab määrata sobilikud parameetrid nagu võimendus ja väljundpinge, muutes lihtsalt väliste komponentide **R<sub>os</sub>** ja **R<sub>v</sub>** väärtuseid. INA170 on vooluväljundiga kiip suudab mõõta toiteahelas voolu mõlemas suunas, mis on akumulaatori ahela seisukohast vajalik funktsionaalsus.

Voolu mõõtmiseks kasutatavate voolusensorite väljundid ühendatakse läbi madalpääsfiltrite (MPF) A/D muunduri sisenditega, kus MPF eesmärk on piirata A/D muundurisse sisenevate signaalide sagedusriba ning aidata vältida *Shannon-Nyquist'i kriteeriumiga* [6] määratud maksimaalse muundatava sageduse ületamist. Madalsageduslike (kuni **100kHz**) rakenduste puhul on A/D muunduri sisendfiltriks lihtne *RC ahel*, mille *ajakonstant*  $\tau$  peab olema teoreetiliselt vähemalt kaks korda suurem, kui on A/D muunduri muundamise intervall. Praktikas on soovituslik valida pigem suurem ajakonstant (näiteks **10 $\tau$** ).

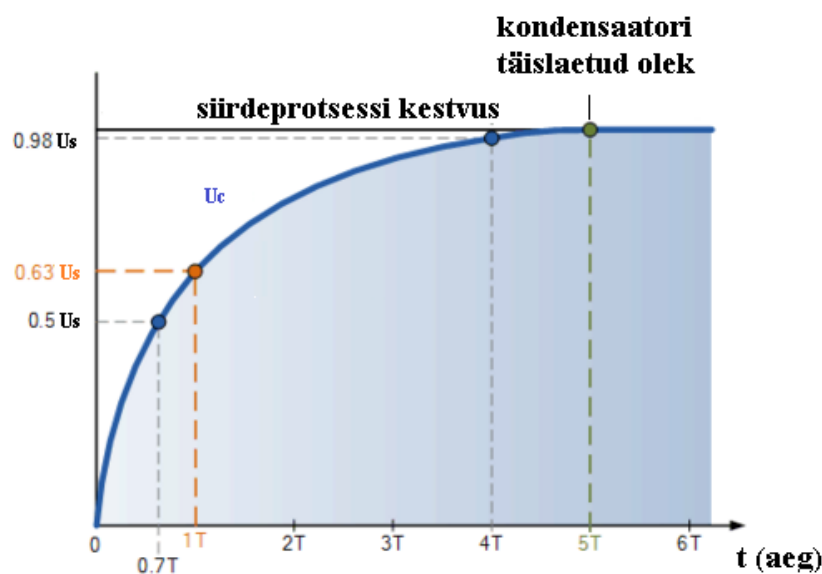
$$\tau = R \times C \quad (4.1)$$

kus

R – RC ahela takistus,  $\Omega$ ;

C – RC ahela mahtuvus, F:

Selguse mõttes tutvustatakse RC ahela laadimise karakteristikut, mis näitab, et siirdeprotsess võtab aega vähemalt **5 $\tau$** , et kondensaator jõuaks täislaetud olekusse ehk olukorda, kus kondensaatori pinge  $U_c$  saavutab maksimaalväärtuse ning saab võrdseks toitepingega  $U_s$ .



**Joonis 4.3 – RC ahela täislaadimise karakteristik [3]**

Kuna antud lõputöö on seotud energiaarvestamisega, siis RC filtri komponentide väärtused valitakse suhteliselt suured.

## 4.1 Ühesuunalise voolu mõõtmine

Nagu varasemates peatükkides mainitud, kasutatakse käesolevas lõputöös ühesuunalise voolu mõõtmiseks spetsiaalset voolumõõtmise kiipi tootjalt Diodes, nimega ZXCT1022. Antud lõputöös mõõdetakse ühesuunalist voolu kahes ahelas, esimeseks on päikesepaneeli ja MPPT kontrolleri vaheline ahel ning teine on MPPT kontrolleri ja koormuse vaheline ahel. Alljärgnevalt peatükis vaatame üle koostatud skeemilahenduse ja põhilised arvutuslikud sammud, mis on käesoleva lõputöö raames sooritatud. Alljärgnevalt esitatakse arvutuskäigu teostamiseks vajaminevad seosed ja selgitused.

$$ADC_{sens} = \frac{U_{ref}}{ADC_{bit}^2} \quad (4.2)$$

kus

$ADC_{sens}$  – A/D muunduri tundlikkus, V;

$U_{ref}$  – A/D muunduri tugipinge, V;

$ADC_{bit}^2$  – A/D muunduri resolutsioon, bit;

$$I_{min} = \frac{\left(\frac{ADC_{sens}}{R_{\text{šunt}}}\right)}{Gain} \quad (4.3)$$

kus

$I_{min}$  – minimaalne vool, mida A/D muundur suudab mõõta, A;

$R_{\text{šunt}}$  – šunt takisti väärtus,  $\Omega$ ;

$Gain$  – voolumõõtmise kiibi võimendus;

$$I_{max} = \frac{\frac{(ADC_{res} \times ADC_{sens})}{Gain}}{R_{\text{šunt}}} \quad (4.4)$$

kus

$I_{max}$  – maksimaalne vool, mida A/D muundur suudab mõõta, A;

$ADC_{res}$  – A/D muunduri resolutsioon, bit;

$$U_i = U_s \times \frac{R_i}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (4.5)$$

kus

$U_i$  – pingejaguri väljundpinge, V;

$U_s$  – pingesallika pinge, V;

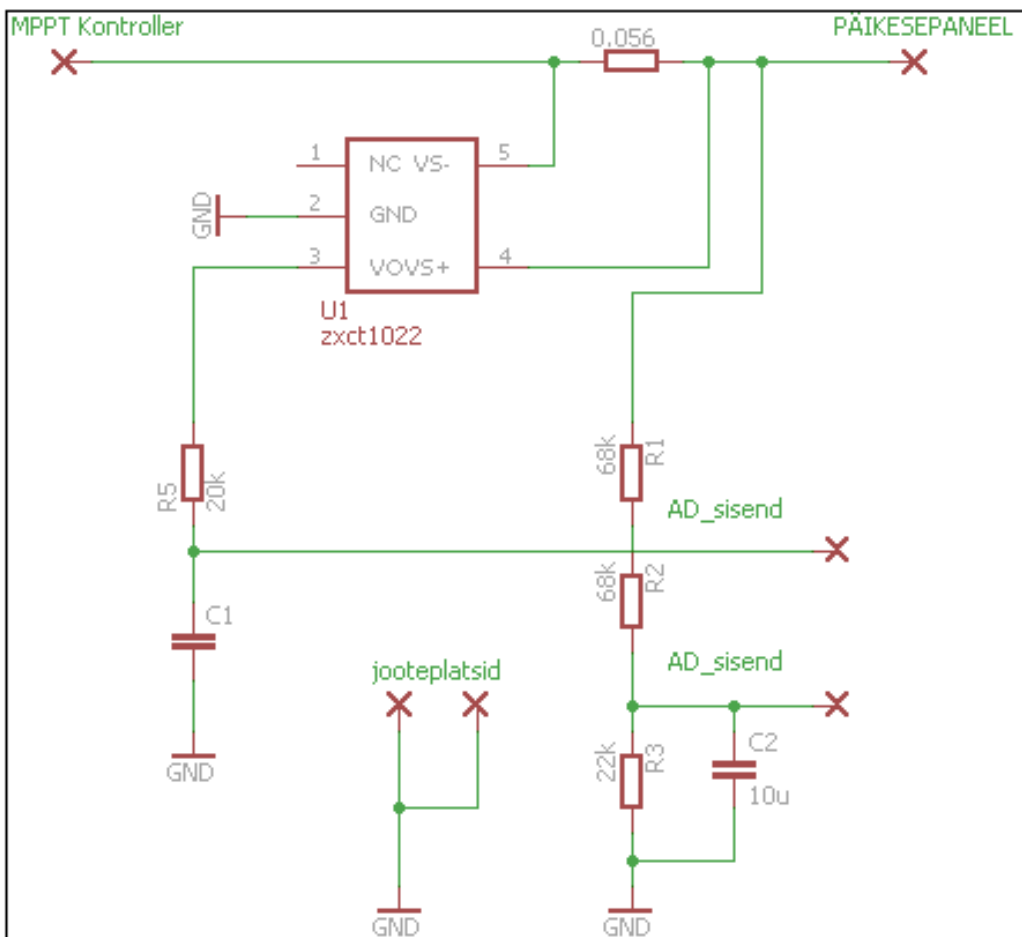
$R_i$  – takisti takistus,  $\Omega$ ;

$$R_1 R_2 || R_3 = \frac{(R_1 + R_2) \times R_3}{(R_1 + R_2) + R_3} \quad (4.6)$$

kus

$R_1 R_2 || R_3$  – Pingejaguri kogutakistus, kus  $R_1$  ja  $R_2$  on rööpühenduses  $R_3$ 'ga,  $\Omega$ ;

#### 4.1.1 Päikesepaneeli ahela arvutused



Joonis 4.4 – Päikesepaneeli ahela voolusensor

Esialgu tuleb püstitada eesmärgid, mida konkreetne voolusensor peab minimaalselt ja maksimaalselt mõõtma. Antud voolusensor paigaldatakse päikesepaneeli ja MPPT kontrolleri vahelisse toiteahelasse, seega saab praegusel juhul määravaks päikesepaneeli spetsifikatsioon.

Päikesepaneel 5W 12 V

**Spetsifikatsioon:**

Max võimsus	5W
Voc	18.2V
Vop	17.3V
Lühisvool	0.27A
Max vool optimaalse pingega juures	0.29A
Väljundi tolerants	±3%
Töötemperatuur	-40°C to +80°C
Aku pingeline	12V
Mõõdud (P x L x K)mm	200*210*3mm
kaal (KG)	0.25

**Joonis 4.5 – Päikesepaneeli spetsifikatsioon [7]**

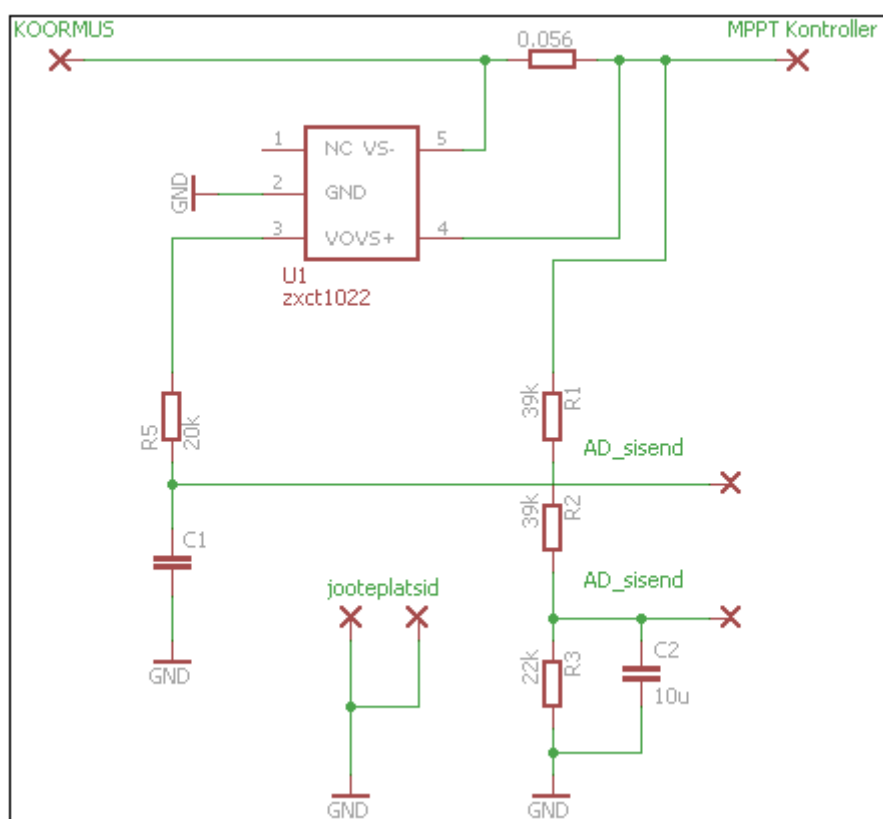
A/D muunduri puhul on kasutatud **3.3V** välist tugipingeallikat (**Uref**), mis annab nii piisava tundlikkuse ( $ADC_{sens} = 0.00322V$ ), kui ka piisava maksimaalse sisendpinge (**Uadc\_V\_max = 3.3V**). A/D muunduri tundlikkus valitud tugipinge korral on arvutatav vastavalt seosele (4.2).

Arvestades, et voolumõõtmise kiip ZXCT1022 on **100** kordset võimendusega (*gain*) ja et A/D muunduri tundlikkus tugipinge **3.3V** korral on **3.22mV**, saame arvutada voolusensori minimaalsed ja maksimaalsed väärtused vastavalt seosele (4.3) ja (4.4). Saame, et **Imin = 0.575mA** ja **Imax = 589mA**, kus **Imin 0.575mA** on minimaalne šunt takistit läbiv vool, mida A/D muundur suudab teoreetiliselt mõõta ja **Imax 589mA** on maksimaalne vool, millest suurema voolu korral satub A/D muundur küllastusse.

Voolusensori trükkplaadil (Joonis 4.4) on lisaks voolumõõtmise funktsioonile ka pingemõõtmine, mida on energia loendamise seisukohast vajalik mõõta. Takistid **R1**, **R2** ja **R3** moodustavad pingejaguri, mille väljundpinge on arvutatav seosega (4.5). Maksimaalse pingega **Us = 18.2V** puhul on pingejaguri väljundpinge **U3 = 2.54V**

Voolumõõtmise sensori osaks on ka A/D muunduri kaks sisendfiltrit. Esimese sisendfiltri moodustavad voolumõõtmise kiibi väljundahelas olevad **R5** ja **C1**, mille ajakonstant on arvutatud vastavalt seosele (4.1), saades ajakonstandiks **0.2s**. Teise sisendfiltri moodustab kondensaator **C2** koos pingejaguriga **R1**, **R2**, **R3**. Selle arvutamiseks võetakse pingejaguri takistitest moodustuv ülemine õlg, alumise õlga rööbiti. Arvutades vastavalt seosele (4.6) saame kogutakistuseks **18937Ω** ja seega ajakonstandiks vastavalt seosele (4.1) **0.18s**.

#### 4.1.2 Koormusahela arvutused



Joonis 4.6 – Koormusahela voolusensor

Antud voolusensor paigaldatakse MPPT kontrolleri ja koormuse vahelisse ahelasse. Seega on määravaks koormusvoolu väärtused, mida soovime mõõta. Käesoleva lõputöö puhul ei ole koormusseade täpselt defineeritud, kuid arvestades, et tegu on päikeseenergiast sõltuva lahendusega, teeme piirangu, et koormusvool **I<sub>k</sub>** ei ole suurem kui päikesepaneeli spetsifikatsioonis määratud lühisvool **I<sub>sc</sub>**, vastasel korral satub A/D muundur küllastusse. Antud ahelasse paigaldatav voolusensor erineb päikesepaneeli ja MPPT kontrolleri vahele paigaldatavast voolusensorist pingejaguri takistite **R1** ja **R2** poolest, seega arvutame käesolevas alapeatükis ainult pingejaguri väljundpinge ja mõlema RC filtri ajakonstandid.



$U_3 = 2.77V$ , arvestades, et  $U_s = 12.6V$  (seos 4.5), mis on akumulaatori maksimum pingeline. Pingejaguri ahela kogutakistus on (seos 4.6)  $17160\Omega$  ja vastav ajakonstant (seos 4.1)  $0.17s$ . Voolumõõtmise kiibi väljundahela RC filtri ajakonstant on (seos 4.1)  $0.2s$ .

## 4.2 Kahesuunalise voolu mõõtmine

Kahesuunalise voolu mõõtmiseks on antud lõputöös kasutusel Texas Instruments'i voolumõõtmise kiip INA170. Võrreldes ZXCT1022 kiibiga vajab INA170 mõningaid lisakomponente kiibi parameetrite määramiseks.

Antud juhul saab INA170 toitepinge Arduino Mega 2560 trükkplaadi  $3.3V$  toiteväljundist. Komponentid, millega määratakse võimendus ja nullinihe, võiksid olla võimalikult väikese takistushälbega. Käesolevas lõputöös kasutatakse  $1\%$  tolerantsiga, 0805 korpusega pindmontaaž takisteid. INA170 väljundimpedants on väga suur ja seega tuleb arvestada, et kõik lisaahelad, mis ühendatakse INA170 külge, peavad olema omakorda palju suurema takistusega kui  $R_v$ . Antud lõputöös sai  $R_v$  väärtuseks  $100k\Omega$ , mis annab teoreetiliselt võimenduseks  $40dB$  (100 korda). [8]

INA170 väljundsignaaliks on vool, mis muundatakse takisti  $R_v$  peal pingeks. Vastavalt andmelehele on soovituslik täpseteks mõõtmisteks vältida  $U_s 0.5V$  ületamist. Kui nüüd rakendada positiivset tugipinget kiibi 3 väljaviigule, siis põhjustab see voolu läbi nullinihet määrava takisti  $R_{os}$ , mis sunnib väljundvoolu  $I_v$  nihkuma nullist erinevaks. Väljundpinge on sellisel juhul arvutatav alljärgneva seosega (4.7). [8]

$$U_{INA} = \left( \frac{U_{ref} \times R_v}{R_{os}} \right) + \left( \frac{I_k \times R_{\check{s}} \times R_v}{1K\Omega} \right) \quad (4.7)$$

kus

$U_{INA}$  – INA170 väljundpinge, V;

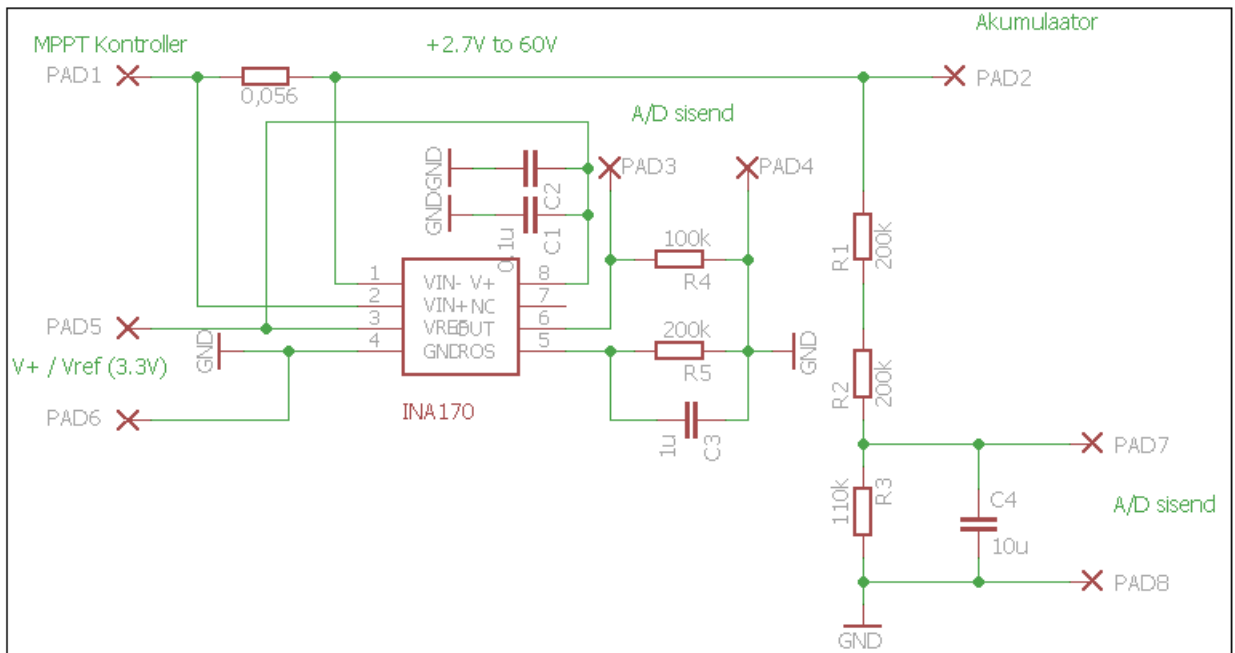
$R_v$  – kiibi väljundtakisti, mis määrab võimenduse,  $\Omega$ ;

$R_{os}$  – nullinihet määrav takisti,  $\Omega$ ;

$I_k$  – mõõdetavat ahelat läbiv vool, A;

$R_{\check{s}}$  – šunt takisti väärtus,  $\Omega$ ;

## 4.2.1 Akumulaatori ahela arvutused



Joonis 4.7 – Akumulaatori ahela voolusensor

Sarnaselt ühesuunalise voolu mõõtmisele on minimaalne mõõdetav vool  **$I_{min}$**  arvutatav vastavalt seosele (4.3) ( **$0.575\text{mA}$** ) ja  **$I_{max}$**  vastavalt seosele (4.4) ( **$589\text{mA}$** ). Kuna akumulaatori ahelas tuleb mõõta kahe-suunalist voolu, tuleb jagada kogu mõõtevahemik kaheks osaks, seega mõõdame voolu vahemikus  **$-0.295\text{A} \dots 0.295\text{A}$** .

Vastavalt seosele (4.7) saame, et  **$U_{INA} = 0\text{V}$**  kui  **$I_k = -0.295\text{A}$** ,  **$U_{INA} = 1.65\text{V}$**  kui  **$I_k = 0.0\text{A}$**  ja  **$U_{INA} = 3.30\text{V}$**  kui  **$I_k = 0.295\text{mA}$** .

Nagu ka ühesuunalise voolumõõtmise puhul soovime saada ajakonstandiks umbkaudu  **$0.2\text{s}$** . Takisti  **$R_v$**  on valitud  **$100\text{k}\Omega$** , et saada soovitud  **$40\text{dB}$**  võimendus. Seega, kui kondensaatori  **$C$**  väärtuseks saab olema  **$1\mu\text{F}$** , siis vastavalt seosele (4.1) on ajakonstandiks  **$0.2\text{s}$** .

## 5. Voolusensorite kalibreerimine

Teoreetilised arvutused erinevad alati vähemal või rohkemal määral reaalistest mõõtmistest, mistõttu on vajalik teostada reaalsed mõõtmised, kus etteantud vooluväärtused on kontrollitavad omakorda täpsema klassi mõõteriistadega, kui on seda mõõdetav voolusensor. Seejärel on võimalik koostada mikrokontrolleri programmikoodi tarbeks reaalsed seosed, mis määravad suhte A/D muunduri väärtuse ning voolusensorit läbiva voolu vahel.

Lõputöö koostajal on kalibreerimise tarbeks kasutada TTI EX355R (35V/5A) ja TTI EX1810R (18V/10A) toiteplokid ning kaks multimeetrit Agilent U1241B. Lisaks kasutatakse lõputöö koostaja poolt isevalmistatud elektroonilist koormust, mis võimaldab tarbida sõltumata toitepingest määratud konstantse väärtusega voolu. Elektrooniline koormus ei ole lõputöö osaks, seega seda pikemalt ei käsitleta. Mõõteskeemid on esitatud joonisel 5.1 ja 5.2.

### 5.1 Päikesepaneeli ja koormusahela voolusensori kalibreerimine

Andes fikseeritud vooluväärtused sammuga **30mA (Is)**, on saadud mõõdetava voolu ja voolumõõtmise kiibi ZXCT1022 väljundpinge **Ui** vaheline seos, mille järgi saab arvutada tõusu **k (5.52)** vastavalt seosele (5.1). Tegelik tõusu väärtus **k<sub>corr</sub> (5.48)** leitakse aga proovimise teel arvestades igas mõõtepunktis erinevust tegeliku- ja arvutatud vooluväärtuste vahel. Nagu alljärgnevast tabelist 5.1 näha siis eksisteerib **35.1mV** nullinihe (**V<sub>OFFSET</sub>**), mis nullitakse mikrokontrolleri programmikoodis nagu näha seoses (5.2).

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (5.1)$$

kus

k – graafiku tõus;

y<sub>2</sub> – väljundi väärtus punktis 2;

y<sub>1</sub> – väljundi väärtus punktis 1;

x<sub>2</sub> – sisendi väärtus punktis 2;

x<sub>1</sub> – sisendi väärtus punktis 1;

$$I_S = \frac{AD_{val} \times \left( \frac{V_{ref}}{AD_{bit}} \right) - V_{offset}}{k_{cor}} \quad (5.2)$$

kus

$I_S$  – päikesepaneeli vool, A;

$AD_{VAL}$  – A/D muunduri väärtus, bit;

$V_{OFFSET}$  – nullinihe, V;

$k_{cor}$  – korrigeeritud tõusu väärtus;

$I_{TEST}$ [mA]	$U_i$ [mV]	$AD_{VAL}$	$I_S$ [mA]	$\Delta (I_{TEST}-I_S)$ [mA]
0,00	35,1	11	0,00	0,00
30,00	195,0	61	29,18	0,82
60,00	360,0	112	59,29	0,71
90,00	524,0	163	89,22	0,78
120,0	686,0	213	118,78	1,22
150,0	846,0	263	147,97	<b>2,03</b>
180,0	1020	317	179,73	0,27
210,0	1190	369	210,75	-0,75
240,0	1350	419	239,95	0,05
270,0	1519	471	270,78	-0,78
300,0	1685	523	301,08	-1,08

Tabel 5.1 – Päikesepaneeli voolusensori väärtused

Voolusensori trükkplaadil oleva pingejaguri tõus ( $k = 0.220$ ) ja korrigeeritud tõus ( $k_{corr} = 0.219$ ) leitakse vastavalt tabelile 5.2 ja seosele (5.1). Seejärel arvutatakse vastavalt seosele (5.3) A/D muunduri väärtusele ( $AD_{VAL}$ ) vastav päikesepaneeli pinge  $U_S$ .

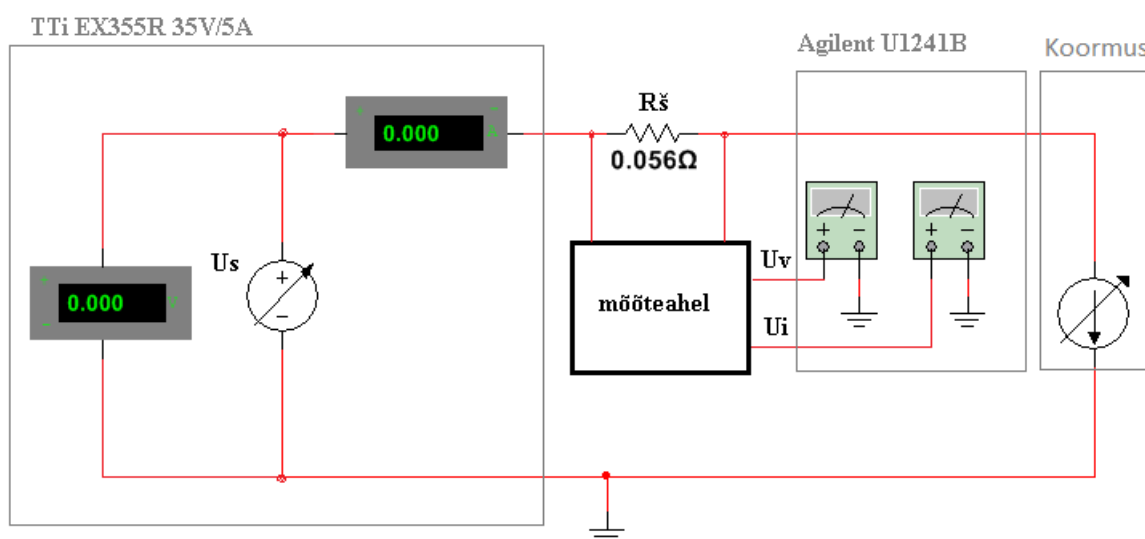
$$U_S = \frac{AD_{val} \times \left( \frac{V_{ref}}{AD_{bit}} \right)}{k_{cor}} \quad (5.3)$$

kus

$U_S$  – päikesepaneeli pinge, V;

$U_{TEST}$ [V]	$U_v$ [V]	$AD_{VAL}$	$U_s$ [V]	$\Delta(U_{TEST}-U_s)$ [V]
1,000	0,216	67	0,9881	0,011
2,000	0,437	136	1,9986	0,001
3,000	0,657	204	3,0037	-0,003
4,000	0,877	272	4,0050	-0,005
5,000	1,097	340	5,0091	-0,009
6,000	1,318	409	6,0183	-0,018
7,000	1,537	477	7,0183	-0,018
8,000	1,759	546	8,0320	-0,032
9,000	1,979	614	9,0365	-0,036
10,000	2,198	682	10,0365	-0,036
11,000	2,418	750	11,0411	-0,041
12,000	2,640	819	12,0548	-0,054
13,000	2,859	887	13,0548	-0,054
14,000	3,080	956	14,0639	-0,063
15,000	3,300	1024	15,0685	<b>-0,068</b>

Tabel 5.2 – Päikesepaneeli pingejaguri väärtused



Joonis 5.1 – Kalibreerimise mõõteskeem nr 1

Kuna nii päikesepaneeliahela kui ka koormusahela voolusensorid on trükkplaadi disaini poolest täpselt samad ning erinevused on ainult pingejaguri takistite väärtused, siis ei hakata siinkohal eraldi välja tooma koormusahela voolusensori kalibreerimisest. Ainus oluline erinevus seisneb selles, et nullinihe on mõnevõrra suurem ehk ( $V_{OFFSET}$ ) on **46.8mV**.

## 5.2 Akumulaatori ahela voolusensori kalibreerimine

Sarnaselt päikesepaneeli ja koormusahela voolusensori kalibreerimisega suurendame **30mA** sammude haaval sensorit läbivat voolu, mõõtes samaaegselt akumulaatori ahela voolusensori kiibi INA170 väljundpinget **U<sub>i</sub>**. Seejärel tuletame INA170 väljundpinge arvutamise seosest (4.7) voolu väärtuse, saades alljärgneva seose (5.4).

$$I_S = \frac{\left(AD_{val} * \frac{V_{ref}}{AD_{bit}}\right) - V_{null}}{R_{sense}} \quad (5.4)$$

kus

$R_{SENSE}$  – šunt takisti väärtus,  $\Omega$ ;

$V_{null}$  – voolusensori väljundpinge olukorras **I<sub>s</sub> = 0**, V;

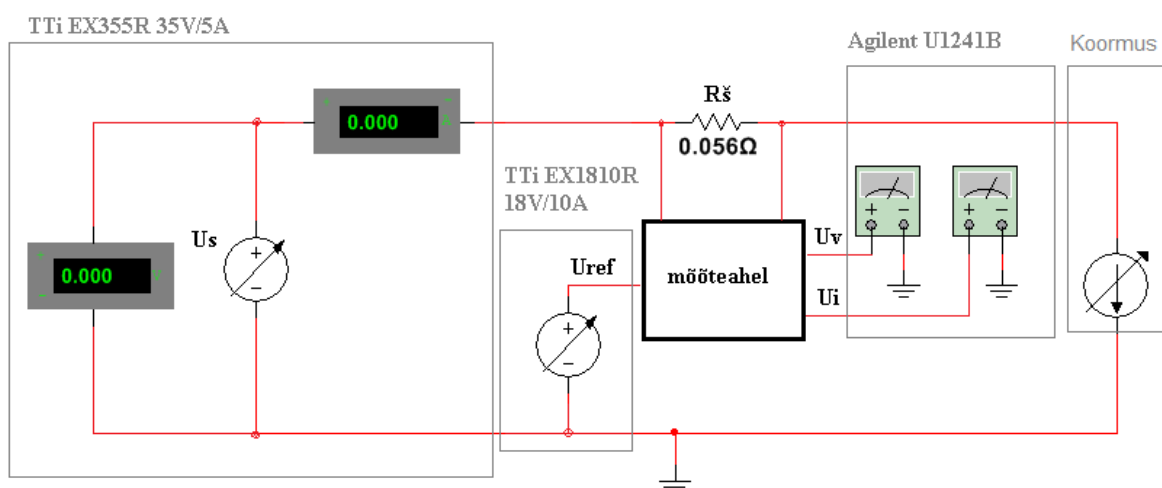
<b>I<sub>TEST</sub> [mA]</b>	<b>U<sub>i</sub> [mV]</b>	<b>AD<sub>VAL</sub></b>	<b>I<sub>s</sub> [mA]</b>	<b>Δ (I<sub>TEST</sub>-I<sub>s</sub>)[mA]</b>
-180,00	117,0	36	-180,02	0,02
-150,00	300,0	93	-150,04	0,04
-120,00	483,0	150	-120,07	0,07
-90,00	667,0	207	-89,93	-0,07
-60,00	848,0	263	-60,28	0,28
-30,00	1032,0	320	-30,14	0,14
0,00	1215,0	377	-0,16	0,16
30,00	1393,0	432	28,99	1,01
60,00	1577,0	489	59,13	0,87
90,00	1759,0	546	88,94	1,06
120,00	1944,0	603	119,25	0,75
150,00	2130,0	661	149,71	0,29
180,00	2306,0	716	178,54	<b>1,46</b>
210,00	2500,0	776	210,32	-0,32

Tabel 5.3 – Akumulaatori voolusensori väärtused

Akumulaatori voolusensori trükkplaadil oleva pingejaguri tõus (**k = 0.219**) ja korrigeeritud tõus (**k<sub>corr</sub> = 0.218**) leitakse vastavalt tabelile 5.4 ja seosele (5.1). Seejärel arvutatakse vastavalt seosele (5.3) A/D muunduri väärtusele (**AD<sub>VAL</sub>**) vastav akumulaatori pinge **U<sub>s</sub>**.

$U_{TEST}[V]$	$U_v[V]$	$AD_{VAL}$	$U_s[V]$	$\Delta(U_{TEST}-U_s)[V]$
1,00	0,200	67	0,9936	0,01
2,00	0,400	135	2,0009	0,00
3,00	0,700	203	3,0083	-0,01
4,00	0,900	272	4,0151	-0,02
5,00	1,100	340	5,0321	-0,03
6,00	1,300	408	6,0367	-0,04
7,00	1,500	477	7,0505	-0,05
8,00	1,800	545	8,0550	-0,06
9,00	2,000	613	9,0596	-0,06
10,00	2,200	681	10,0734	-0,07
11,00	2,400	750	11,0872	-0,09
12,00	2,600	818	12,0917	-0,09
13,00	2,900	886	13,0917	-0,09
14,00	3,100	954	14,1055	<b>-0,11</b>
15,00	3,300	1022	15,1147	<b>-0,11</b>

Tabel 5.4 – Akumulaatori pingejaguri väärtused



Joonis 5.2 – Kalibreerimise mõõteskeem nr 2

### 5.3 Voolusensorite mõõtetäpsuse hinnang

Antud lõputöös hinnatakse mõõtesüsteemi täpsust võrdlemise teel, kus võrreldakse omavahel mikrokontrolleri poolt arvatud mõõtetulemusi ja Agilent U1241B multimeetriga mõõdetud väärtuseid.

Agilent U1241B mõõtetäpsus sõltub konkreetselt kasutatavast funktsioonist ja mõõtepiirkonnast. Käesolevas töös tehtud voolumõõtmised on tehtud kõik mA piirkonnas, jäädes U1241B spetsifikatsiooni järgi kahe erineva mõõtetäpsuse vahemikku. Pingemõõtmised on tehtud mV ja V piirkonnas, mis tähendab vastavalt U1241B spetsifikatsioonile ühte mõõtetäpsuse vahemikku. Alljärgnevalt tuuakse välja näidisarvutus kõikide kasutatava mõõtepiirkondade kohta.

- 1) Mõõtes väärtust **80.00mA** on mõõtetäpsus  $\pm(0.2\%+3)$ . Seega saame, et **0.2%** eksimust tähendab **0.16mA** ja **3 LSD** tähendab eraldusvõime 0.01mA puhul **0.03mA**. Lõpptulemusena saame mõõteväärtuse koos veaga **80.00mA  $\pm$  (0.19mA)**.
- 2) Mõõtes väärtust **400.0mA** on mõõtetäpsus  $\pm(0.5\%+3)$ . Seega saame, et **0.5%** eksimust tähendab **2mA** ja **3 LSD** tähendab eraldusvõime 0.1mA puhul **0.3mA**. Lõpptulemusena saame mõõteväärtuse koos veaga **400.0mA  $\pm$  (2.3mA)**.
- 3) Mõõte väärtust **12.000V** on mõõtetäpsus  $\pm(0.09\%+2)$ . Seega saame, et **0.09%** eksimust tähendab **0.0108V** ja **2 LSD** tähendab eraldusvõime 0.001V puhul **0.002V**. Lõpptulemusena saame mõõteväärtuse koos veaga **12.00V  $\pm$  (0.011V)**.

#### DC specifications

Function	Range	Resolution	Test current/ burden voltage	Accuracy $\pm$ (% of reading + counts of least significant digit)	
				U1241B	U1242B
Voltage <sup>1</sup>	1000.0 mV	0.1 mV	–		0.09% + 5
	10.000 V	0.001 V	–		0.09% + 2
	100.00 V	0.01 V	–		
	1000.0 V	0.1 V	–		0.15% + 5
Current	1000.0 $\mu$ A	0.1 $\mu$ A	< 0.06 V (50 $\Omega$ )		0.1% + 3
	10000 $\mu$ A	1 $\mu$ A	< 0.55 V (50 $\Omega$ )		0.1% + 3
	100.00 mA	0.01 mA	< 0.18 V (0.5 $\Omega$ )		0.2% + 3
	440.0 mA <sup>2</sup>	0.1 mA	< 0.8 V (0.5 $\Omega$ )		0.5% + 3
	10.000 A <sup>3</sup>	0.001 A	< 0.4 V (0.01 $\Omega$ )		0.6% + 5

Joonis 5.3 – U1241B mõõtetäpsus [9]

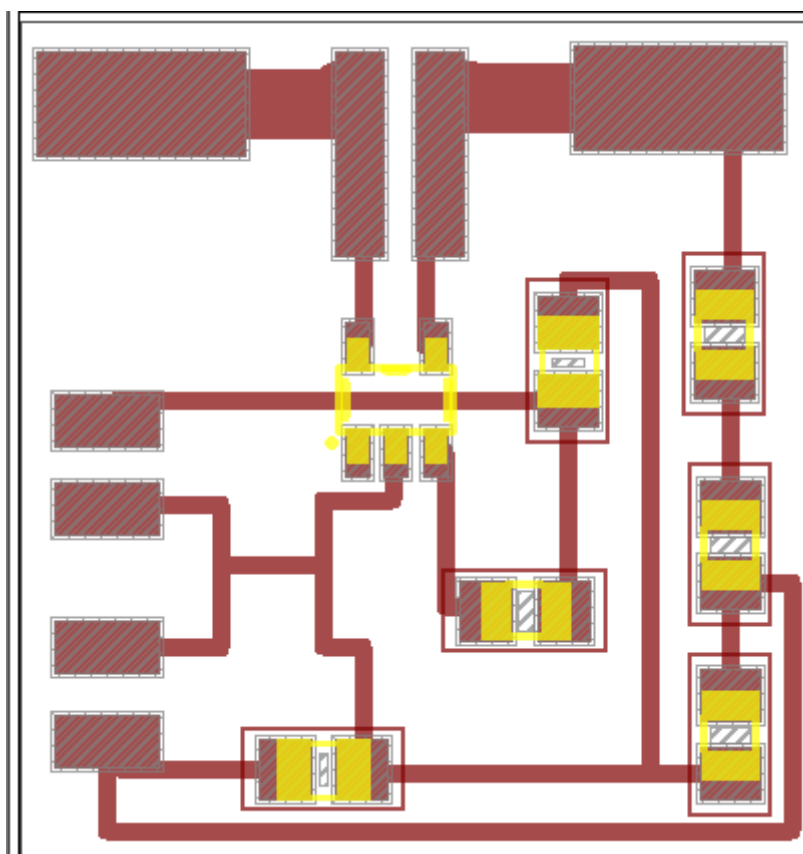


Nagu näha eelnevalt toodud tabelitest 5.1 – 5.4, siis päikesepaneeli ahela voolusensori näit erineb maksimaalselt vastavalt **2.03mA** ja **0.068V**, kus pingemõõtmise puhul on tendents, et mõõteerinevus suureneb  $U_{TEST}$  kasvades. Akumulaatori ahela voolusensori näit erineb maksimaalselt vastavalt **1.46mA** ja **0.11V** ning sarnaselt päikesepaneeli ahela voolusensoriga suureneb ka siin erinevus  $U_{TEST}$  kasvades.

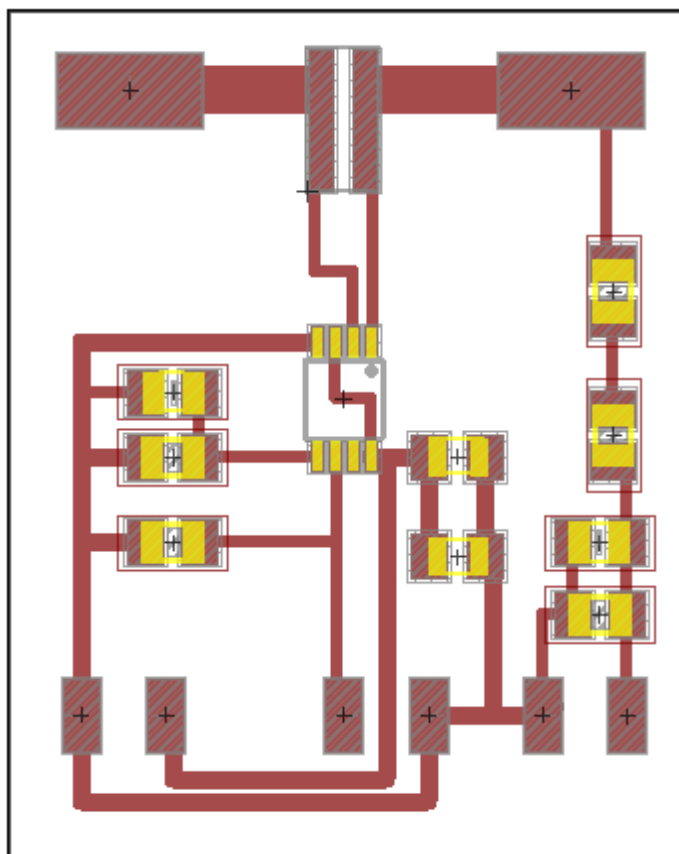
Täpsemateks hinnanguteks tuleb arvestada asjaolu, et lõpptulemusena soovitakse saada energiahulkasid, mis leitakse mõõdetud pingete ja voolude omavahelise korrutamise teel, kus sellisel juhul suurenevad proportsionaalselt ka mõõtemääramatused. Samuti tuleb arvesse võtta kasutatud multimeetri Agilen U12341B mõõtemääramatused, mis on antud tema spetsifikatsioonis (Joonis 5.3).

## 6. Trükkplaadi disain

Voolusensori trükkplaatide disainiks on kasutatud programmi **CadSoft Eagle** versiooni 7.5.0. Disainimisel oli lihtsuse huvides eesmärgiks hoida trükkplaadid ühepoolsed, kasutada ainult pindmontaaži komponente ning vältida erinevate pesade ja pistikute kasutamist. Iga mõõteahela voolusensor on tehtud eraldi trükkplaadile, et süsteemi kokkupanekul jääks võimalikult palju ümberpaigutamise võimalusi. Trükkplaadi rajad ja jooteplatsid, mida läbivad mõõdetava ahela koormusvoolud, on tehtud suhteliselt laiad, et vältida parasiittakistuse teket mõõteahelasse. Lisaks eelnevale on valitud ka šunt takistid korpusega 2010, mis on sobilikud just voolumõõtmise rakenduste tarbeks. Kõik ülejäänud takistid ja kondensaatorid on valitud korpusega 0805, et hoida trükkplaadi mõõtmeid võimalikult väiksena, samas on 0805 korpus ka piisavalt lihtsasti joodetav isegi piiratud töövahendite korral.



Joonis 6.1 – Paneeli- ja koormusahela voolusensori trükkplaadi disain



Joonis 6.2 – Akumulaatori ahela voolusensori trükkplaadi disain

## 7. Majanduslik ülevaade

### 7.1 Komponentide loetelu

Viide	Nimetus	Tootja	Kogus	Hind	Hind kokku
C1, C2	Keraamiline kondensaator, 0805, 10%, 10VDC, 10uF	KEMET	2	0,1966 €	0,3932 €
R1, R2	Metallkihttakisti, 0805, 1%, 0.125W, 39kΩ	Vishay	2	0,0299 €	0,0598 €
R3	Metallkihttakisti, 0805, 1%, 0.125W, 22kΩ	Vishay	1	0,0299 €	0,0299 €
R5	Metallkihttakisti, 0805, 1%, 0.125W, 20kΩ	Vishay	1	0,0299 €	0,0299 €
Rš	Metallkihttakisti, 2010, 1%, 2W, 0.056Ω	Panasonic	1	0,5639 €	0,5639 €
U1	Voolusensor, Zetex 1022, SOT23-5	Diodes	1	2,39 €	2,39 €
			<b>8</b>		<b>3,4667 €</b>

Tabel 7.1 – Koormusahela voolusensori komponendid

Viide	Nimetus	Tootja	Kogus	Hind	Hind kokku
C1, C2	Keraamiline kondensaator, 0805, 10%, 10VDC, 10uF	KEMET	2	0,1966 €	0,3932 €
R1, R2	Metallkihttakisti, 0805, 1%, 0.125W, 68kΩ	Vishay	2	0,0299 €	0,0598 €
R3	Metallkihttakisti, 0805, 1%, 0.125W, 22kΩ	Vishay	1	0,0299 €	0,0299 €
R5	Metallkihttakisti, 0805, 1%, 0.125W, 20kΩ	Vishay	1	0,0299 €	0,0299 €
Rš	Metallkihttakisti, 2010, 1%, 2W, 0.056Ω	Panasonic	1	0,5639 €	0,5639 €
U1	Voolusensor, Zetex 1022, SOT23-5	Diodes	1	2,39 €	2,39 €
			<b>8</b>		<b>3,4667 €</b>

Tabel 7.2 – Päikesepaneeli ahela voolusensori komponendid

Esimese kahe trükkplaadi erinevuseks on ainult komponentide R1, R2 väärtused, mis päikesepaneeli ahela voolusensoril on 68kΩ ja koormusahela voolusensoril 39kΩ. Järgmiseks esitatakse akumulaatori ahela voolusensori komponentide nimekiri.

Viide	Nimetus	Tootja	Kogus	Hind	Hind kokku
C1	Keraamiline kondensaator, 0805, 10%, 50VDC, 0.1uF	KEMET	1	0,2726 €	0,2726 €
C2	-	-	-	-	-
C3	Keraamiline kondensaator, 0805, 10%, 16VDC, 1uF	KEMET	1	0,1296 €	0,1296 €
C4	Keraamiline kondensaator, 0805, 10%, 10VDC, 10uF	KEMET	1	0,1966 €	0,1966 €
R1, R2	Metallkihttakisti, 0805, 1%, 0.125W, 40kΩ	Vishay	2	0,0299 €	0,0598 €
R3	Metallkihttakisti, 0805, 1%, 0.125W, 22kΩ	Vishay	1	0,0299 €	0,0299 €
R4	Metallkihttakisti, 0805, 1%, 0.125W, 100kΩ	Vishay	1	0,0299 €	0,0299 €
R5	Metallkihttakisti, 0805, 1%, 0.125W, 200kΩ	Vishay	1	0,0299 €	0,0299 €

Rš	Metallkihttakisti, 2010, 1%, 2W, 0.056Ω	Panasonic	1	0,5639 €	0,5639 €
U1	Voolusensor, INA170EA/250, MSOP-8	Texas Instruments	1	3,08 €	3,08 €
			<b>10</b>		<b>4,3922 €</b>

Tabel 7.3 – Akumulaatori ahela voolusensori komponendid

## 7.2 Majanduslik aruanne

Arvestades eelnevaid tabelleid 7.1, 7.2 ja 7.3, siis voolusensorite komponentidele kuluv rahaline summa tuli kokku **11.32 €**. Kuna tegu on prototüübiga, siis ei ole siinkohal arvestatud trükkplaatide valmistamise rahalist kulu, küll aga seeriatootmise puhul sõltuks see juba konkreetsest tellitavast kogusest ja ettevõttest, kust trükkplaadid tellitakse. Antud projekti jaoks oluline osa on mikrokontrolleri või mikrokontrolleri arendusplaadi valik. Praegusel juhul oli valitud arendusplaat Arduino Mega 2560, mille maksumus on **43.93 €**, samas sobiks siinkohal kasutada ka odavamamat ja väiksemat arendusplaati Arduino Micro, mille maksumuseks on **19.50 €**. Tegelikuses on Arduino arendusplaatidele palju erinevaid alternatiive nii tootja kui ka edasimüüja suhtes ning seega on väga erinevad ka nende hinnad. Kuna käesolev lõputöö seisneb mõõtesüsteemi ehitamises siis praegusel juhul ei arvesta lõputöö koostaja rahalisse kulusse mõõdetava süsteemi komponente. Arvestades kõike eelnevat, saame hinnata projekti kogumaksumuseks **55,25 €**.

## 8. Katsetulemused

Järgnevalt toome välja mõõturiga saadud katseandmed ja katsetulemused, kus lõpptulemusena saame teada päikesepaneelist akumulieeritud energiahulga vatt-tundides (Wh). Esialgu on katsetulemused tekstifailina (Joonis 8.1), misjärel sisestame kogutud katseandmed MS Office tabelitöötlusprogrammi Excel, kus saame eraldada funktsiooniga *Text to Columns* tekstikujul olevad katseandmed mugavamaks töötlemiseks ridadesse ja veergudesse.

```
File Edit Format View Help
PANELvolt [mV],PANELcurr [mA],BATTvolt [mV],BATTCurr [mA],LOADvolt [mV],LOADcurr [mA],lux
11246.67,4.12,11314.31,6.33,11262.65,0.59,1858
11246.67,5.30,11314.31,7.39,11277.35,0.59,1737
11246.67,5.30,11314.31,7.39,11277.35,-0.00,1718
11246.67,5.89,11314.31,7.92,11277.35,0.59,1757
11246.67,6.48,11314.31,8.45,11277.35,0.59,1777
11246.67,7.06,11314.31,8.97,11277.35,0.59,1838
11246.67,7.06,11314.31,8.97,11277.35,0.59,1879
11246.67,7.06,11314.31,8.97,11277.35,0.59,1879
11246.67,6.48,11314.31,8.45,11277.35,0.59,1797
11246.67,5.89,11314.31,7.92,11277.35,0.59,1699
```

**Joonis 8.1 – Katseandmed tekstikujul**

	B	C	D	E	F	G
1	PANELvolt [mV]	PANELcurr [mA]	PANELpower [W*min]	BATTvolt [mV]	BATTcurr [mA]	BATTpower [W*min]
2						
3	11386,67	85,95	0,980	11364,71	87,10	0,990
4	11386,67	67,70	0,770	11379,39	69,15	0,790
5	11386,67	102,43	1,170	11379,39	103,47	1,180
6	11386,67	53,57	0,610	11379,39	54,90	0,620
7	11386,67	58,28	0,660	11379,39	59,65	0,680
8	11386,67	87,71	1,000	11379,39	89,74	1,020
9	11386,67	62,99	0,720	11379,39	64,93	0,740
10	11386,67	42,97	0,490	11379,39	44,34	0,500
11	11386,67	30,61	0,350	11379,39	32,20	0,370
12	11386,67	40,03	0,460	11379,39	41,71	0,470
13	11386,67	34,14	0,390	11379,39	36,43	0,410
14	11386,67	32,38	0,370	11379,39	33,79	0,380

**Joonis 8.2 – Katseandmed tabelitöötlusprogrammis**



## 8.1 Katse

<b>Katse kuupäev:</b>	16.05.2016
<b>Katse algus- lõpp:</b>	09:00-15:00
<b>Paneeli paigaldus:</b>	Paneel on paigaldatud asfalteeritud maapinnale. Ajavahemikus 09:00-15:00 ei kata paneeli ükski vari. Paneeli suund on lõunasse ning maapinna suhtes 40° nurgaga.
<b>Riigi ilmateenistuse ennustus:</b>	Muutliku pilvisusega ilm. Kohati sajab hoovihma. Puhub lõuna- ja kagutuul 3-9, Liivi lahe ümbruses puhanguti kuni 13 m/s. Õhutemperatuur on 13..18°C.
<b>09:00</b>	<p><i>Helveim (09:00 16.05.2016)</i></p>
<b>15:00</b>	<p><i>Helveim (16:00 16.05.2016)</i></p>

Tabel 8.1 – Katseandmed

Katsetulemusena toome välja akumulaatori pinge juurdekasvu [mV], mahtuvuse juurdekasvu [mAh], laetud energiahulga [Wh] ja keskmise valgustatuse [lux].

Aeg	Akumulaatori pinge juurdekasv [mV]	Akumulaatorisse kantud laeng [mAh]	Akumulaatorisse salvestatud energia [Wh]	Keskmine valgustatus [lux]
09:00-10:00	29,36	97,25	1,108	23230
10:00-11:00	14,69	97,55	1,114	23402
11:00-12:00	29,36	119,37	1,367	27962
12:00-13:00	58,74	107,12	1,232	26688
13:00-14:00	0,00	53,47	0,615	14020
14:00-15:00	29,37	94,40	1,088	19968
<b>6h</b>	<b>+161,52mV</b>	<b>+569,16mAh</b>	<b>+6,523Wh</b>	<b>21962lux</b>

Tabel 8.2 – Katsetulemused

## Kokkuvõte

Käesoleva lõputöö eesmärgiks oli valmistada portatiivne päikeseelektrisüsteemi mõõtur, mille abiga saab vajalikke katseandmeid hindamiseks reaalseid tingimusi päikeseelektri akumulatsiooniks. Korralikud sellesarnased mõõteriistad on kallid ning seetõttu on piisavalt motivatsiooni sellesarnaseid lahendusi ise disainida ja valmis ehitada.

Teoreetilised arvutused ning reaalsus on omavahel mõnevõrra nihkes. Kõige enam erines teoreetilistest arvutustest akumulaatori ahela voolusensor (INA170) ning vajas soovitud eesmärgile lähedase tulemuse saamiseks paari komponendi väärtuse muutmist. Nii päikesepaneeli- kui ka koormusahela voolusensor erines teoreetilistest arvutustest siiski ainult nullnihke olemasolu poolest, kuid need sai hiljem edukalt programmikoodi kirjutades maha lahutada.

Rääkides edasiarendustest, saab mõõturile ehitada akumulaatori automaatseks tühjakslaadimiseks vajamine koormuse, mis välistab olukorra, kus akumulaator saab täislaetuks ning süsteem ei suuda enam päikeseenergiat salvestada. Hetke olukorra mugavamaks jälgimiseks saab mikrokontrollerile ühendada külge displei või mingi muu soovitud kasutajaliidese, mis kuvab kasutaja jaoks huvitavat informatsiooni reaalajas. Lisaks on mõistlik ühendada mikrokontrollerile juurde kellaajamoodul, mis annab kogutud katseandmetele külge ajatemplid.

Valmistatud päikeseelektri mõõtur andis lõputöö kirjutajale praktilisi teadmisi nii voolusensorite ehitamise, mõõtmiste kui ka mikrokontrollerite A/D muundurite kasutamise osas ning lisaks edasiarenenud nägemuse, milline võiks olla järgmine versioon sellesarnasest päikeseelektri mõõturist.

## Summary

The aim of this theses was to design a portable solar power meter which is able to collect experimental data in order to evaluate the real conditions of solar energy accumulation. Similar decent measuring systems are very expensive and therefore it is very motivating to build one yourself.

Generally, theoretical calculations and real-life measurements can be very offset from one another. The accumulator circuit sensor (INA170) showed the most deviated readings, compared to the theoretical calculations, therefore it was necessary to make a couple of changes in the design to obtain desired results. The solar panel and load circuit sensor showings differed from the theoretical calculations only in terms of offset voltage, however it was taken into account when programming and was therefore subtracted from the final results.

Regarding possible future developments, it is possible to design an automatic discharger for the accumulator to prevent a situation in which the accumulator is fully charged but the system is no longer able to store solar energy. To improve the usability, it is possible to add a desired user interface to monitor the current status of the system and display other important readings about the measurable and measurement system. It would also be reasonable to add a real time clock module to the Arduino development board to link experimental data and time to one another.

Designing a portable solar power meter was an important educational experience for the author. It provided comprehensive practical knowledge about current measurements, current sensors design and the usage of the microcontroller A/D converters, as well as advanced vision for designing the next version of the solar power meter.

## Kasutatud kirjandus

- [1] „**Genasun**,” Genasun LLC, 2012. [Võrgumaterjal]. Available: <https://genasun.com/all-products/solar-charge-controllers/for-lithium/gv-5-li-lithium-5a-solar-charge-controller/>. [Kasutatud 21 03 2016].
- [2] „**The Electropaedia**,” 2005. [Võrgumaterjal]. Available: [http://www.mpoweruk.com/solar\\_power.htm](http://www.mpoweruk.com/solar_power.htm). [Kasutatud 28 02 2016].
- [3] „**Electronics Tutorials**,” 03 2016. [Võrgumaterjal]. Available: [http://www.electronics-tutorials.ws/rc/rc\\_1.html](http://www.electronics-tutorials.ws/rc/rc_1.html); [http://www.electronics-tutorials.ws/dccircuits/dcp\\_9.html](http://www.electronics-tutorials.ws/dccircuits/dcp_9.html). [Kasutatud 03 2016].
- [4] „**TTÜ Robotiklubi**,” 03 03 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <http://home.roboticlab.eu/et/avr/adc>. [Kasutatud 21 03 2016].
- [5] „**Diodes Incorporation**,” Diodes Semiconductor, Discrete Devices, 01 01 2008. [Võrgumaterjal]. Available: [http://www.diodes.com/\\_files/product\\_app\\_note\\_pdfs/an39.pdf](http://www.diodes.com/_files/product_app_note_pdfs/an39.pdf). [Kasutatud 20 03 2016].
- [6] „**TTÜ Elektroonikainstituut**,” <http://www.elin.ttu.ee/>, 06 03 2004. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.elin.ttu.ee/~parveto/EthnLing/TechVoca/D/Discrete.htm>. [Kasutatud 27 04 2016].
- [7] „**Akromex**,” <http://www.akromex.com>, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.akromex.com/eshop/et/paikesepaneelid/99--5w-paikesepaneel-12-volt-.html>. [Kasutatud 27 04 2016].
- [8] „**Texas Instruments**,” Texas Instruments Inc., 01 2006. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina170.pdf>. [Kasutatud 21 03 2016].
- [9] „**Agilent**,” <http://cp.literature.agilent.com/>, 11 07 2013. [Võrgumaterjal]. Available: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-7040EN.pdf>. [Kasutatud 14 05 2016].