

KAHETELJELISEL PÄIKESEJÄRGIMISSÜSTEEMIL PÕHINEV KÕRGE LAHUTUSVÕIME JA SUURE TÄPSUSEGA PÄIKESEKIIRGUSE MÕÕTESEADE

DUAL – AXIS SUN TRACKING HIGH-RESOLUTION AND HIGH-ACCURACY SOLAR IRRADIANCE MEASUREMENT DEVICE

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Kevin Lüüde

Üliõpilaskood: 185703EAAB

Juhendaja: Martin Jaanus

Kaasjuhendaja: Lauri Kütt

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad,

kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....." 202.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 202.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."202... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina _____ (autori nimi)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja on

(juhendaja nimi)

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

_____ (kuupäev)

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Kevin Lüüde

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: Kaheteljelisel päikesejärgimissüsteemil põhinev kõrge lahtusvõime ja suure täpsusega päikesekiirguse mõõteseade

Kuupäev: 18.05.2021

45 lk (lõputöö lehekülgede arv koos lisadega)

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): Vanemlektor Martin Jaanus

Töö konsultant (konsultandid): Muhammad Naveed Iqbal, Noman Shabbir

Sisu kirjeldus:

Käesoleva töö eesmärgiks oli Tallinna Tehnikaülikooli energeetikahoone katusel oleva mittetöötava päikesekiirguse mõõteseadme ümber ehitamine töökindlaks ja robustseks. Mõõteseadme peab suutma päikesejärgimissüsteemi abil päikese trajektoori jälgida ning seejuures koguda ja kasutajale edastada päikesekiirguse intensiivsuse ning temperatuuriandmeid reaajas suure täpsuse ja ajalise eraldusvõimega.

Töös on kirjutatud lõputöö ülesandega seotud teemadel nagu päikesekiirgus ja selle mõõtmise olulisus, päikese liikumine maa suhtes ning päikesejälgimissüsteemid ja nendega seonduvad olulised aspektid. Samuti on detailsemalt vaadeldud konstrueeritava päikesejärgimissüsteemi struktuuri ja juhtimisloogikat ning loodava andmehõivesüsteemi ülesehitust ja andmete kogumise ning edastamise põhimõtet.

Lõputöö tulemusena valmis ülesandes eesmärgiks seatud ümber ehitatud päikesekiirguse mõõteseadme, mis aktiivse järgimise põhimõttel päikese trajektoori horisondil järgib ning sekundiliste ajavahemike tagant päikesekiirguse – ning temperatuuriandmeid mõõdab, salvestab ja kasutajale reaajas edastab.

Märksõnad: päikesekiirgus, päikesejärgimissüsteem, andmehõivesüsteem, Arduino Mega 2560, Raspberry Pi

ABSTRACT

Author: Kevin Lüüde

Type of the work: Bachelor Thesis

Title: Dual – axis sun tracking high-resolution and high-accuracy solar irradiance measurement device

Date: 18.05.2022

45 pages (the number of thesis pages including appendices)

University: Tallinn University of Technology

School: School of Engineering

Department: Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

Supervisor(s) of the thesis: Senior Lecturer Martin Jaanus

Consultant(s): Muhammad Naveed Iqbal, Noman Shabbir

Abstract:

The aim of this thesis was to reconstruct an out of order solar irradiance measurement device, located on the roof of Tallinn University of Technology, to a simple yet reliable build. The device must be able to track the sun, using a built – in sun tracking system, while simultaneously collecting solar irradiance and temperature data with high temporal resolution and accuracy and transmitting measured data to the user.

Topics closely related to the main subject, such as solar irradiance data and its importance, solar geometry, sun – tracking systems and their important aspects are all covered in this thesis. This paper also gives a more detailed look into the build of the reconstructed sun – tracking system and its control, it also covers the data acquisition system in more detail, describing the logic of collecting and transmitting data to the user.

As a result of this thesis, the goal of reconstructing the out of order solar irradiance device was met. The device utilises an active sun – tracking system to track the trajectory of the sun, while collecting solar irradiance and temperature data each second, transmitting it to the user in real – time.

Keywords: solar irradiance, sun – tracking system, data acquisition system, Arduino Mega 2560, Raspberry Pi

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema: **Kaheteljelisel päikesejärgimissüsteemil põhinev kõrge lahutusvõime ja suure täpsusega päikesekiirguse mõõteseade**

Lõputöö teema inglise keeles: **Dual – axis sun tracking high-resolution and high-accuracy solar irradiance measurement device**

Üliõpilane: **Kevin Lüüde, 185703EAAB**

Eriala: **Mehhatroonika**

Lõputöö liik: **bakalaureusetöö**

Lõputöö juhendaja: **Martin Jaanus**

Lõputöö kaasjuhendaja: **Lauri Kütt**

Lõputöö ülesande kehtivusaeg: **02.2022**

Lõputöö esitamise tähtaeg: **18.05.2021**

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

Kaasjuhendaja (allkiri)

1. Teema põhjendus

Päikesekiirguse intensiivsuse andmed on üldiselt saadaval tunnipõhistena, millest piisab päikeseelektrijaamade jaoks üldiste tootlikkusnäitajate leidmiseks. Elektritoite kvaliteedi, kuid ka mikrovõrkude tasandil talitluse juhtimise ja planeerimise seisukohast on selline ajaline eraldusvõime ebapiisav, kuna see ei iseloomusta oodatavaid väljundvõimsuste hetkväärtusi, ei näita pilvisuse mõju ning pilvede liikumisega seotud tootlikkuse muutumist.

2. Töö eesmärk

Antud töö eesmärgiks on koostada töökindel mõõteseade, mille abil oleks võimalik päikesekiirguse intensiivsust mõõta ajalise eraldusvõimega 1 sekund või vähem. Mõõteseade peaks olema tõrgeteta töövõimeline välistingimustes, läbi aastate.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- 1) Kuidas on koostatud olemasolev süsteem, mismoodi kasutada komponente ning leida sobivaim struktuur töökindla süsteemi loomiseks.
- 2) Kuidas kujundada uus süsteem, milles kalibreeritud päikesepaneeli asendit hoitakse püsivalt ristiasendis päikese suhtes.
- 3) Kuidas planeerida süsteemi tagasiside- ja mõõteahelad, millega oleks võimalik tagada suur mõõtetäpsus.
- 4) Kuidas kujundada seadme mõõteandmete halduse ja juhtimise süsteem, mis võimaldaks mõõdetud andmed salvestada ja edastada.

4. Lähteandmed

1. Kalibreeritud päikesepaneeli andmed (IKS Photovoltaik ISET).
2. Kristian Kajaki bakalaureusetöö
3. Elektrotehnika aluste uurimisgrupi poolt esitatud täiendavad andmed

5. Uurimismeetodid

Olemasoleva süsteemi analüüs ja selle nõrkade kohtade määratlemine vaatlustel.

Täiendatud struktuuri ettepanekud läbi arutelu ja ajurünnakute.

Kujundatud struktuuri elluviimine läbi realiseerivate tegevuste – jooniste vormistamine, kavandamine, mudeldamine, arvutamine.

Loodud struktuuri katsetamine läbi vaatluste, arvutustulemuste ja mõõtetulemuste kontrolli.

Kasutatavad vahendid:

Arduino IDE 1.8.13

Python IDE (Thonny)

Blynk rakendustarkvara

<https://app.diagrams.net/>

<https://www.circuit-diagram.org/editor/>

6. Graafiline osa

Elektriskeemid, elektroonikaskeemid, algoritmide skeemid, selgitavad pidid. Töö põhiosas

7. Töö struktuur

Sissejuhatus

1. Teooria päikesekiirgusest ja päikesejärgimissüsteemidest

1.1. Päikesekiirgus ja selle liigid

1.2. Päikese liikumine

1.2.1 Päikese liikumine Eesti vaates

1.3. Päikesejärgimissüsteemid

2. Uue päikesejärgimissüsteemi loomine

2.1. Loodava päikesejärgimissüsteemi tööpõhimõte

2.2. Kasutatav päikesekiirguse andur

2.3. Uue süsteemi struktuur ja komponendid

2.4. Päikesejärgimissüsteemi juhtimisloogika

3. Andmehõivesüsteem

3.1 Andmete lugemine Arduino platvormile

3.2 Päikesekiirgusandmete kogumine

3.3 Temperatuuriandmete kogumine

3.4 Süsteemi toiteallika – ja akupinge mõõtmine

3.5 Kogutud andmete edastamine kasutajale

Kokkuvõte

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Käsiraamatud

Andmelehed

Lõputööd

Teadusartiklid

9. Lõputöö konsultandid

Muhammad Naveed Iqbal

Noman Shabbir

10. Töö etapid ja ajakava

Olemasoleva süsteemi analüüs ja kaardistamine (12.2020)

Lähteandmetega tutvumine, lähtenõuete spetsifitseerimine (12.2020)

Uue struktuuri ettepanek (01.2021)

Komponentide kirjeldused (01.2021)

Komponentide hankimine (02.2021)

Süsteemi esialgne katsetamine (28.02.2021)

Andmete salvestamise ja edastamise platvormi kujundamine (31.03.2021).

Katsetamine ja täiendused (28.04.2021)

Lõputöö sisuosa valmimine (05.05.2021)

Juhendaja tagasiside alusel paranduste sisseviimine (15.05.2021)

Lõputöö esitamine (18.05.2021)

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	6
EESSÕNA	11
Lühendite ja tähiste loetelu	12
SISSEJUHATUS	13
1. PÄIKESEKIIRGUS JA PÄIKESEJÄRGIMISSÜSTEEM	15
1.1 Päikesekiirgus ja selle liigid	15
1.2 Päikese liikumine horisondil.....	17
1.2.1 Päikese liikumine Eesti vaates	18
1.3 Päikesejärgimissüsteem ja selle tüübid	19
2. PÄIKESEKIIRGUSE MÕÕTESEADME PÄIKESEJÄRGIMISSÜSTEEM	22
2.1 Päikesejärgimissüsteemi tööpõhimõtte mõõteseadmises	22
2.2 Päikesekiirguse andur ISET Sensor.....	23
2.3 Päikesejärgimissüsteemi struktuur ja komponendid.....	25
2.4 Päikesejärgimissüsteemi juhtalgoritm	27
3. ANDMEHÕIVESÜSTEEM NING MÕÕTEAHELAD MÕÕTMISANDMETE KOGUMISEKS JA EDASTAMISEKS	29
3.1 Andmete lugemine Arduino Mega 2560 platvormile	29
3.2 Päikesekiirgusandmete kogumine	31
3.3 Temperatuuriandmete kogumine	32
3.3.1 Temperatuuriandurilt saadava pingeväärtuse vastavaks temperatuuriks teisendamine.....	34
3.4 Süsteemi toiteallika ja aku pinge mõõtmine	36
3.5 Kogutud andmete edastamine kasutajale	37
KOKKUVÕTE	40
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	42
Lisa 1. Päikesekiirguse mõõteseade	45

EESSÕNA

Käesoleva töö teema pakkus välja elektroenergeetika ja mehhatroonika programmijuht ning professor Lauri Kütt, kes oli ühtlasi ka lõputöö kaasjuhendajaks. Samuti võimaldas tema koos töö juhendaja elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi vanemlektor Martin Jaanusega töö teostamiseks vajalikud komponendid, töövahendid ning tööruumid.

Töö autor tänab juhendajat Martin Jaanust ning kaasjuhendajat ja lõputöö teema välja pakujat Lauri Kütti nõuannete, konsultatsioonide, arutelude, kasuliku tagasiside ning igati meeldiva koostöö eest.

Lühendite ja tähiste loetelu

CNC	Numbriline juhtimine, i.k. <i>Computer Numerical Control</i>
GPS	Ülemaailmne asukoha määramise süsteem, i.k. <i>Global Positioning System</i>
IoT	Asjade Internet, i.k. <i>Internet of Things</i>
PCB	Trükkplaat, i.k. <i>Printed Circuit Board</i>
STC	Standardsed testimise tingimused, i.k. <i>Standard Testing Conditions</i>

SISSEJUHATUS

Kogu maailm liigub järjest enam jätkusuutlike taastuvenergia võimaluste arendamise ja kasutuselevõtu suunas. Fossiilsed kütused, mis on suuremas osas täitnud maailma energiavajadust juba sadu aastaid, on üldjuhul keskkonda saastavad, negatiivselt mõjutavad ning samuti on piiratud nende ressurss. Seega tuleb leida meetodid ning arendada tehnoloogiad, et võimalikult efektiivselt ära kasutada Maal saadaolevaid, taastuvaid energiaallikaid. Üheks olulisemaks taastuvenergia allikaks on Päike.

Päike on inimkonna ajaloo mõistes ammendamatu ressurss, samuti on sellelt Maale kiirguv aastane energiakogus küllalt suur, et teoreetiliselt katta ja kordades ületada kogu maakera energiavajadus [1]. Maale langeva päikesekiirguse kasutamine energia tootmiseks on keskkonna mõistes puhas ning tehnoloogiliselt laialdaselt kättesaadav, mistõttu saavad seda kasutada ka eraisikud. See on ka üheks põhjuseks, miks päikeseenergia osakaal kogu energiatootmises pidevalt suureneb. Samas trendis liigutakse ka Eestis, kus päikeseelektrijaamade installeeritud võimsused aastast aastasse suurenevad. Lisaks päikeseenergia kasvavale tähtsusele kogu energeetikas, pakub selle energialiigi laialdane kättesaadavus ja sellest kasuliku energia tootmislihtsus võimaluse kasutada seda ühe peamise energiaallikana mikrovõrkudes.

Päikeseenergeetikasse tehtud investeeringute suurendes on vaja selle efektiivsemaks ära kasutamiseks koguda andmeid tootlikuse kohta teatud ilmatingimustes ja perioodil. Elektritoite kvaliteedi ja mikrovõrkude talitluse planeerimise ning juhtimise seisukohalt on oluline päikesekiirguse intensiivsuse andmeid koguda reaalajas. Üldiselt on need andmed saadaval tunnipõhisena, kuid nimetatud juhtudel sellisest ajalisest eraldusvõimest ei piisa. Täpsemate päikesekiirguse andmete kogumiseks terve mõõteperioodi vältel peab olema võimalik mõõtmiseks kasutatavat andurit, antud töös kalibreeritud päikesepaneeli, hoida erinevates asendites ja vajadusel ka päikesekiirgusega risti, mistõttu on vaja rakendada päikesejärgimissüsteemi.

Tallinna Tehnikaülikooli energeetikahoone katusel seisab töökorrast väljas päikesejärgimissüsteem koos päikesekiirguse anduriga, mis on vaja ümber ehitada ja töökorda saada. Antud lõputöö eesmärgiks on seega luua robustne ja korrektselt töötav kaheteljelisel päikesejärgimissüsteemil põhinev päikesekiirguse mõõteseade, mille kalibreeritud päikesepaneel koos temperatuurianduriga kogub sekundiliste ajavahemike tagant andmeid päikesekiirguse intensiivsuse ning temperatuuri kohta, et oleks võimalik potentsiaalset tootlikust hinnata ja selle põhjal süsteemide talitlust planeerida ning juhtida. Üles on vaja seada ka andmehõivesüsteem, mis logib mõõdetud andmed ning

edastab need kasutajale. Konkreetne süsteem hakkab andmeid koguma Tallinna Tehnikaülikooli energeetikamaja katusel, kuid praktiline lahendus on kasutatav igal pool, kus on vaja päikesekiirguse - ning temperatuurandmeid koguda.

Mööteseadme ümberehitamisel tuleb teha muudatusi nii mehaanilises kui ka elektroonilises ja tarkvaralises pooles. Mehaanilisi täiendusi, parandusi ning positsiooniandurite tagasiside osa kajastatakse üliõpilase Hans Kasepõld lõputöös „Päikesekiirguse mööteseadmele liikumistrajektoori järgimissüsteemi loomine“, mis kuulub kaitsmisele samal ajal käesoleva lõputööga. Antud töös mainitakse positsiooniandurite tagasiside edastamist kasutajale vaid põgusalt, kuid sisuliselt mainitud teemasid ei kajastata.

Töö on jaotatud kolmeks peatükiks, esimeses peatükis on kirjutatud päikeseenergeetikast üldisemalt: päikesekiirgusest ning päikesekiirguse andmete kogumise olulisusest efektiivse päikeseenergial põhineva süsteemi loomisel. Lisaks on kirjeldatud, kuidas muutub Päikese asend horisondil Eesti vaates, milleks kasutatakse päikesejärgimissüsteeme ja millised on peamised kasutatavad tüübid.

Töö teises peatükis on täpsemalt kirjeldatud loodava päikesejärgimissüsteemi struktuuri, komponentide valikut ning tööpõhimõtet. See peatükk käsitleb ka fotoandurite tagasisidel põhinevat juhtimisloogikat, mille alusel saadetakse mootoritele pöörämiskäsklusi läbi mikrokontrollerplatvormi.

Kolmas peatükk hõlmab loodavat andmehõivesüsteemi, kus on kirjeldatud mööteseadme poolt kogutud päikesekiirguse intensiivsuse - ja temperatuurandmete ning päikesejärgimissüsteemi toiteallika ja varutoiteallika pingeväärtuste mõõtmine, salvestamine ja kasutajale edastamine.

1. PÄIKESEKIIRGUS JA PÄIKESEJÄRGIMISSÜSTEEM

Päikeselt Maale langev kiirgusenergia on laialdaselt kättesaadav ning sellest keskkondlikult puhta, kasuliku energia tootmine toimub nii eraisikute kui ka suurtootjate tasandil. Järjest enam kasvab taastuvenergia osakaal kogu energiatootmises, mistõttu suurenevad ka investeeringud päikeseenergeetikasse. Maale jõudva päikesekiirguse varieeruva olemuse tõttu, on enne päikeseelektrijaamade või teiste päikeseenergiaal põhinevate lahenduste kasutama hakkamist vaja päikesekiirguse andmeid kindlas piirkonnas koguda ning analüüsida. Selle põhjal saab teha otsuse, kas plaanitav lahendus konkreetses paigas on majanduslikult mõistlik või mitte.

Konkreetse paiga, kuhu plaanitakse rajada päikeseenergiaal põhinev süsteem, sobivuse esialgne selgitamine eeldab tavaliselt selles piirkonnas mitmete aastate vältel kogutud keskmiste päikesekiirguse andmete põhjal tehtud otsust. Need andmed on tavaliselt saadavad meteoroloogilistelt satelliitidelt. Päikesekiirguse andmeid on oluline koguda ka väiksemate ajavahemike tagant, kui rajatav süsteem on mõeldud tootma energiat vaid teatud perioodil päevast või aastast, samuti kui toodetavat elektrienergiat müüakse elektrivõrku ajapõhiselt varieeruva hinnaga. Kui päikeseenergiaal süsteemi rajamiseks valitud paik on eelnevate andmete põhjal sobiv, siis tuleb täpsemaks süsteemi optimeerimiseks ning talitluse planeerimiseks ja juhtimiseks koguda andmeid juba reaajas, eelistatult vähem kui ühe tunnise eraldusvõimega. Käesolevas töös ongi eesmärgiks välja töötada päikesejärgimisüsteemil põhinev kalibreeritud päikesekiirguse anduriga mõõteseade (lisa 1), mis suudab koguda ja kasutajale edastada päikesekiirguse andmeid sekundiliste ajavahemike tagant. [2]

1.1 Päikesekiirgus ja selle liigid

Päikeselt kiirgub kõigis suundades igal ajahetkel väga suur kogus energiat, millest Maa atmosfäärini jõuab vaid väike osa. Atmosfääris ülemistest kihtidest maapinnani nõrgeneb päikesekiirgus veelgi, sest see hajub ja neeldub atmosfääris leiduvates tahketes, vedelates ja gaasilistes aineosakestes, samuti pilvedes, veeaurus ning õhu molekulides. Maale jõudev päikesekiirgus on varieeruva iseloomuga ja selle muutused ajas võib jagada perioodilisteks ja aperioidilisteks. Päikesekiirguse perioodiline muutumine on tingitud vaatluspunkti geograafilisest laiusast, kuupäevast ning kellaajast. Kiirguse aperioidilist muutumist põhjustab eelkõige pilvkate ning seda mõjutavad tugevalt pilvkate paiknemine ja selle tihedus. [3]

Päikeselt maale langevat päikesekiirgust võib liigitada otseseks - ja hajuskiirguseks. Päikese otsest kiirgust võib defineerida kui päikeselt peaaegu paralleelsete kiirtena maapinnale langevat päikesekiirgust. Otsest kiirgust mõõdetakse pinnal, millele päikesekiirgus langeb risti. Hajusaks kiirguseks nimetatakse seda osa päikesekiirgusest, mis enne maapinnale jõudmist hajub, näiteks õhu molekulidel, pilvedel, veeaurul, aerosoolil ja muudel atmosfääris leiduvatel aineosakestel. Maale jõudvat otsest päikesekiirgust mõjutab oluliselt atmosfääri läbipaistvus, sest sumeda õhu korral neeldub või hajub päikesekiirgus erinevatelt teele jäävatelt takistustelt rohkem. Selle võrra suureneb aga hajuskiirgus. Hajutatud kiirguse osakaalu mõjutavad ka aluspinna optilised omadused nagu hajus peegeldumine, mis võib varieeruda mõnest protsendist ligi saja protsendini sõltuvalt pinnast. [3]

Päikesekiirguse mõõtmistes vaadeldakse lisaks otsesele - ja hajuskiirgusele summaarset kiirgust, mis arvutatakse läbi horisontaalsele pinnale langeva kiirguse ja hajuskiirguse. Horisontaalsele pinnale langeva kiirguse arvutamiseks kasutatakse kõrgusnurga mõistet, mis on päikesekiirguse arvutustes oluline tegur, sest mõjutab maapinnalt tagasipeegeldunud kiirgusenergia hulka ning atmosfääri läbipaistvuse karakteristikuid. Horisontaalsele pinnale langeva kiirguse väärtus on oluline ka aluspinna kiirgustingimuste seisukohalt ning see on arvutatav järgmise valemiga [3]:

$$S' = S \cdot \sin(ALT), \quad (1.1)$$

kus S' - horisontaalsele pinnale langeva kiirguse väärtus [W/m^2];
 S - otsene päikesekiirgus, [W/m^2];
 ALT - päikese kõrgusnurk [$^\circ$].

Summaarse kiirguse saab selle põhjal arvutada järgmiselt [3]:

$$Q = S' + D, \quad (1.2)$$

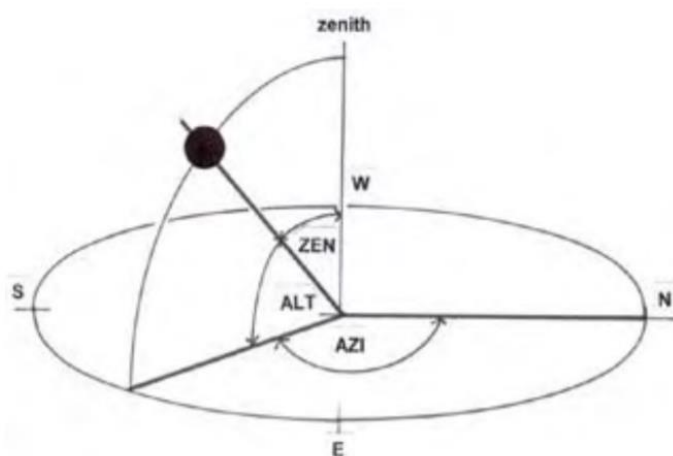
kus Q - summaarne päikesekiirgus [W/m^2];
 S' - horisontaalsele pinnale langeva kiirguse väärtus [W/m^2];
 D - hajuskiirgus [W/m^2].

Summaarne kiirgus nagu ka otsene ja hajuskiirgus, sõltuvad kõik päikese kõrgusnurgast, atmosfääri läbipaistvusest, pilvisusest ning aluspinna optilistest omadustest. Seetõttu on summaarse kiirguse olemus sõltuv seda moodustava otsese ja hajusa kiirguse osakaalust. Lauspilvisuse korral puudub otsene kiirgus täiesti ja summaarse kiirguse moodustabki täielikult hajuskiirgus. Selge taeva ja hea atmosfääri

läbipaistvuse korral aga esineb peaaegu ainult otsene kiirgus. Teatud juhtudel võib pilvisus ka summaarset kiirgust suurendada, kui osaline pilvkate päikese otsest kiirgust ära ei varja, kuid samuti jõuab maapinnale ka nendelt pilvedelt hajunud kiirgus. Seega võivad erinevad tingimused vastastikku suurendada ühe ja vähendada teise kiirguse liigi osakaalu summaarses kiirguses, kuid ka ainult vähendada või suurendada summaarset kiirgust. [3]

1.2 Päikese liikumine horisondil

Maalt vaadates saab päikese positsiooni taevsfääril määrata kahe nurga abil, mida nimetatakse asimuudiks ning kõrgusnurgaks. Päikese asimuut on horisontaaltasandile projekteeritud nurk päikesekiirte ning geograafilise põhjasuuna vahel. Päikese asimuuti võib arvuliselt kirjeldada erinevalt, üheks viisiks on valida geograafiliseks põhjaks 0° ning päikese asukoha muutumisel asimuudi väärtust muuta alates põhjasuunast päripäeva liikudes 360° ulatuses. Teisel juhul valitakse samuti geograafiliseks põhjaks 0° , kuid päikese asukoha jäämisel põhja – lõuna suunast ida poole suurendatakse asimuudi väärtust vahemikus 180° ning põhja – lõuna suunast lääne poole jäädes vähendatakse asimuudi väärtust 180° ulatuses. Päikese kõrgusnurk on nurk Maale langevate päikesekiirte ja horisontaaltasandi vahel, mis saab muutuda 0° ja 90° vahemikus. Kõrgusnurgale lisaks võib veel kasutada seniitnurga mõistet, mis on päikesekiirte ja seniidi vahele jääv nurk. Päikese asimuut ja kõrgusnurk sõltuvad selgelt vaatleja asukohast, mistõttu tuleb neid arvestada konkreetsest asukohast lähtuvalt. Kõrgusnurga ja asimuudi visuaalseks kujutamiseks on toodud alljärgnev joonis (joonis 1.1). [4]



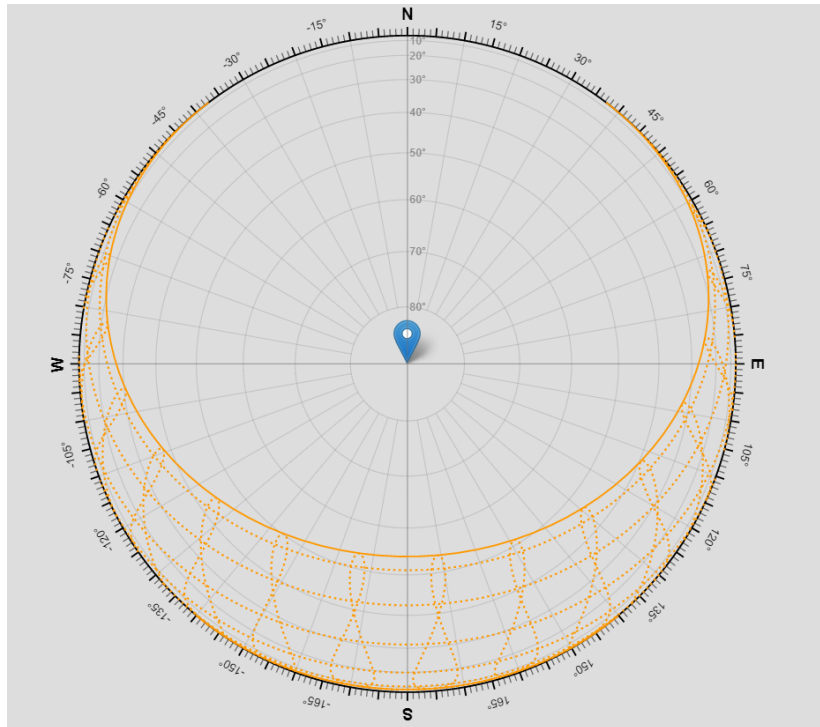
Joonis 1.1 Päikese asendit taevsfääril iseloomustavad nurgad AZI – asimuut, ZEN – seniitnurk, ALT – kõrgusnurk ning *zenith* – päikese seniit [4]

Maakera pöörlemine ümber oma kujuteldava, põhja - ning lõunapoolust läbiva telje, põhjustab Maalt vaadates päikese asukoha muutumise horisondi kohal ning seeläbi päeva ja öö vaheldumise. Maa tiirlemine ümber Päikese põhjustab aga aastaegade vaheldumise. Kui läbi orbiidi, mida mööda Maa ümber Päikese tiirleb, panna kujuteldav tasand, siis nähtub, et Maakera pöörlemistelg ei ole tasandiga risti, vaid hoopis kaldu ligikaudu $23,5^\circ$ nurga all tasandi normaali suhtes [4], [5]. See on ka põhjuseks, miks päikese kõrgusnurk horisondi suhtes aasta jooksul muutub, põhjustades päikesekiirguse intensiivsuse ning päeva kestuse muutumise (v.a ekvaatoril), mis avaldub läbi aastaegade vaheldumise. Seega sõltub päikese liikumistrajektor taevasfääril konkreetset geograafilisest asukohast ning muutub perioodiliselt.

Märkimisväärsed on neli päeva aastast, kus Maa asetseb oma orbiidil Päikese ümber olulistes punktides. Nendeks on suvine, sügisene, talvine ning kevadine pööripäev. Sügisene ja kevadine pööripäev tähistavad päeva, millal öö ja päeva kestus on võrdse pikkusega ning päike asub seniidis ekvaatori kohal. Suvine pööripäev tähistab päeva, millal põhjapoolkeral on aasta pikim päev, lõunapoolkeral aasta pikim öö, samuti tähistab see astronoomilise suve ehk põhjapoolkera suveperioodi ning lõunapoolkera talveperioodi algust. Vastupidiselt, tähistab talvine pööripäev päeva, millal lõunapoolkeral on pikim päev ning põhjapoolkeral pikim öö. Talvine pööripäev tähistab astronoomilise talve ehk põhjapoolkera talveperioodi ning lõunapoolkera suveperioodi algust. [6]

1.2.1 Päikese liikumine Eesti vaates

Päeva pikkus Eestis on aasta lõikes väga erinev, sest päikesetõusu - ja loojangu asukoht horisondil muutub päevast päeva. Talvisel pööripäeval on päeva kestuseks kõigest ligi kuus tundi, seevastu aasta pikimal päeval, suvisel pööripäeval enam kui 18,5 tundi. Aasta pikimal päeval on päikese tõusu ja loojangu asimuudi vahe suurim, näiteks Tallinnas on tõusu asimuudiks umbes 36° ning loojangu asimuudiks ligikaudu 324° ehk päikese asend horisondil muutub 288° ulatuses [7]. Kogu ülejäänud aastal jäävad tõusu ja loojangu asimuudid sellesse vahemikku. Sõltuvalt perioodist ja täpsest asukohast on ka päikese kõrgusnurk horisondi suhtes erinev, varieerudes Eestis umbes 7° talvisel pööripäeval kuni ligikaudu 55° suvise pööripäeva keskpäeval [5], [7]. Päikese liikumistrajektoori ühe aasta lõikes Tallinna Tehnikaülikooli energeetikahoone vaatest iseloomustab alljärgnev joonis (joonis 1.2).



Joonis 1.2 Päikese liikumistrajektoori aastane muutumine Tallinna Tehnikaülikooli energetika õppehoone vaatest [8]

Päikeseenergia efektiivse ärakasutamise seisukohalt on oluline sellega arvestada ning leida kasutatavate statsionaarsete lahenduste jaoks parim paigaldussuund ning kaldenurk. Sellest tulenevat on Eestis statsionaarsete maapinnale paigaldatud päikeseenergia süsteemide puhul parim suunata päikesepaneelid lõunasse 35° – 45° kaldenurga all [9]. Siiski jääb statsionaarse süsteemi korral päikesepaneelide tootlikus enamuse ajast alla maksimaalse võimaliku, sest päikesekiirgus langeb paneelile risti vaid teatud ajahetkedel. Veel efektiivsemaks päikesekiirguse ärakasutamiseks saab kasutusele võtta päikesejärgimissüsteemil põhineva lahenduse.

1.3 Päikesejärgimissüsteem ja selle tüübid

Päikesejärgimissüsteem kujutab endast süsteemi, mis suunab sellele kinnitatud päikesenergiat rakendavat seadet teatud viisil päikesekiirguse suunas. Päikeseenergiat rakendavaks seadmeks võivad olla näiteks päikesepaneelid, peeglid või läätсед. Seega on päikesejärgimissüsteemi puhul peamiseks ülesandeks päikese liikumistrajektoori järgimine Maa suhtes. Päikesejärgimissüsteemi rakendamise eesmärgiks on päevase päikesekiirguse efektiivsem ärakasutamine võrreldes statsionaarsete lahendustega, hoides päikesevalgust kasulikuks energiaks muundavat elementi päikesega võimalikult lähedaselt ristasendis. Laialt leivad kasutust erinevad päikese trajektoori järgivad

päikesejärgimissüsteemid, mis jagunevad üheteljelisteks ning kaheteljelisteks süsteemideks. Üheteljelised süsteemid pööravad end ühel juhul päikese järgi horisontaaltasapinnas ning nende kalle maapinna suhtes on fikseeritud. Teisel juhul võib olla fikseeritud nende asetus ilmakaarte suhtes ning reguleeritavaks parameetrik on sellisel juhul kaldenurk [10]. Üheteljelised süsteemid on juhitavad ühe mootoriga ning seetõttu konstruktsiooniliselt lihtsamad. Samas saavutatakse märgatav tõus energiatootlikuses, mis sõltub konkreetsest geograafilisest asukohast, vaadeldavast ajaperioodist ning ilmastikutingimustest. Artikli [11] põhjal, mis võrdles erinevates uurimistöodes esitatud andmeid, leiti kuni 32% tõus energiatootmises vaadeldava ajaperioodi jooksul, võrreldes statsionaarse süsteemiga. Päikesekiirguse veel efektiivsemaks ära kasutamiseks on loodud ka kaheteljelised päikesejärgimissüsteemid, mis suudavad korraka muuta nii oma kaldenurka kui ka pöördnurka horisontaaltasapinnas. Need on nii konstruktsioonilt kui ka juhtimise kohapealt keerulisemad, kuid saavutavad üheteljeliste süsteemide ees artiklis [11] esitatud andmete kohaselt kuni 5% efektiivsuse tõusu sõltuvalt asukohast ning ilmastikuoludest. Käesolevas töös on eesmärgiks päikesekiirguse intensiivsust mõõtvat andurit hoida päikesekiirgusega risti igal ajahetkel, seega on järgnevalt vaatluse all erinevad viisid selle saavutamiseks kaheteljelise päikesejärgimisüsteemi korral.

Üheks võimaluseks kaheteljelist päikesejärgimissüsteemi juhtida on kasutada aktiivset järgimist, mille korral rakendatakse elektrimootoreid päikeseelemendi sellele langeva kiirgusega ristseisus hoidmiseks. Üheks võimaluseks aktiivset järgimist teostada, on mootoreid juhtida läbi mikrokontrolleri, fotoanduritelt kogutava tagasiside põhjal [10]. Päikese asendi muutus Maa suhtes põhjustab muutuse päikesekiirguse langemisenurgas päikeseelemendile. Selle tagajärjel tekib süsteemi fotoandurites elektriline signaal, mis tingib vastavalt juhtloogikale juhised täiturseadmele päikeseelemendi liigutamiseks tagasi ristseisundisse päikesekiirgusega. Protsess kordub kui päikesekiirguse langemisenurga erinevus ristseisust on piisavalt suur, et ületab määratud tolerantsi. Süsteemi on mõistlik päikeseenergiat rakendava seadme liigutamiseks kasutada siis, kui see kaalub üle liigutamiseks kulutatava energia. Selline päikesejälgija on suhteliselt täpne, kuid raskusi päikese täpse asukoha määramisel võib põhjustada pilvkate. [12]

Passiivseid järgimissüsteeme rakendatakse päikesekiirguse efektiivsemaks ära kasutamiseks suhteliselt lihtsa ja võrdlemisi odava lahendusega. Erinevalt aktiivsest järgimisest, ei vaja selline süsteem päikeseelemendi telgede pööramiseks oma toiteallikat, vaid kasutab ära kehade soojuspaisumist, mille põhjustab päikesekiirgusega leviv soojus. Passiivse järgimise põhimõtteks on päikeseelemendi pööramine päikese suunas täituri abil, millele langeb erinev hulk päikesekiirgust. See põhjustab seadme erinevates osades ebaühtlased jõud, mille mõjul peaks seade koos päikeseelemendiga

suunama ennast risti või lähedaselt ristasendisse päikesekiirgusega. Passiivse järgimissüsteemi eeliseks aktiivse jälgija ees on selle lahenduse lihtsus ja odavus, kuid see ei võimalda üldjuhul sellist täpsust nagu saavutab aktiivne järgimissüsteem. Passiivse järgimissüsteemi täpsust võib negatiivselt mõjutada lisaks tihedale pilvkattele ka seadme ümber oleva keskkonnatemperatuuri ebaühtlus. [13]

Kronoloogilise päikesejärgimissüsteemi puhul võetakse aluseks mõõteseadme geograafiline asukoht, kuupäev ja täpne aeg. Nende andmete põhjal saab päikeseelemendi normaali hoida päikesekiirguse suunas igal ajahetkel ning seetõttu puudub vajadus valgustundlike andurite järele päikese asukoha määramiseks. Sellest tulenevalt on päikeselement suunatud soovitud suunas sõltumata pilvkatte tihedusest. Pöörlemistelgede liigutamise aluseks on välja arvatud päikese trajektoor kindla asukoha suhtes. Mootorid pööravad päikeselementi konstantse kiirusega kogu päeva, mis vastab päikese liikumisele horisondil. Kronoloogilise järgimise eeliseks on suur täpsus, kuid tiheda pilvkatte korral muutub süsteem vähem efektiivseks, sest mootorite pööramisele kulutatakse pidevalt elektrienergiat, samas kui tootlikkus on madal. Selle vältimiseks saab määrata kindla ajavahemiku, mille tagant täiturseadet päikeselemendi liigutamiseks aktiveeritakse, katkestades ülejäänud ajaks ühenduse toiteallikaga. Üheks viisiks kronoloogilist järgimist teostada on täiturseadmete juhtimine läbi kontrolleri, mis arvestab sisenditena täpset asukohta GPS vastuvõtjalt, Maakera põhjapooluse suunda magnetilise kompassi moodulilt ning maapinna kaldenurka läbi kaheteljelise inklinomeetri ja arvutab nende põhjal päikese asendi horisondil seadme suhtes. [14]

2. PÄIKESEKIIRGUSE MÕÖTESEADME PÄIKESE - JÄRGIMISSÜSTEEM

Käesolevas töös on ümber ehitatud töökorrast väljas, kaheteljelisel päikesejärgimissüsteemil põhinev päikesekiirguse mõõteseade, mille ülesanne on koguda päikesekiirguse intensiivsuse - ning temperatuurandmeid reaajas. Antud peatükis on kirjeldatud, kuidas töötab ümberehitatav päikesejärgimissüsteem, millised on kasutatavad komponendid ning millist ülesannet need täidavad süsteemi korrektseks toimimiseks. Töötava süsteemi loomisel oli eesmärgiks ära kasutada võimalikult palju olemasolevaid komponente, kuid samas tagada süsteemi töökindlus, et andmeid saaks koguda tõrgeteta ja pidevalt.

2.1 Päikesejärgimissüsteemi tööpõhimõte mõõteseadmes

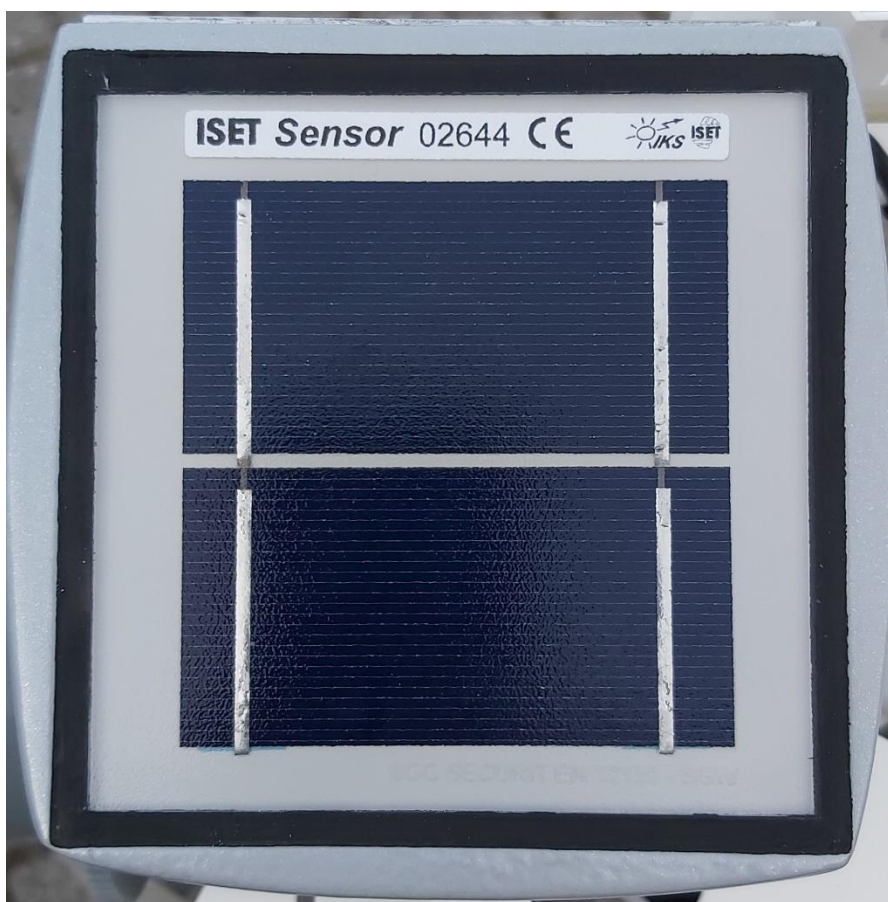
Konstrueeritava mõõteseadme üheks peamiseks osaks on kaheteljeline päikesejärgimissüsteem, mis võimaldab päikesekiirguse intensiivsust mõõtvat kalibreeritud päikesepaneeli liigutada vastavalt päikese asendi muutumisele horisondil, et hoida paneeli risti sellele langeva päikesekiirgusega. Lisaks, annab päikesekiirguse intensiivsust mõõtva anduri liikumisvabadus võimaluse koguda ka erinevat tüüpi päikesekiirguse andmeid, sõltuvalt mõõtmiste eesmärgist. Paneeli võib fikseerida kindla kaldenurga ja horisontaaltasapinnalise pöördenurgaga, et simuleerida fikseeritud päikeseelektrijaama paneelide asetust, samuti saab paneeli pöörata horisontaaltasandisse, et leida maale langeva päikesekiirguse intensiivsus pinnaühiku kohta. Vertikaal - ja horisontaaltasandis pööramine võimaldab koguda kalibreeritud päikesepaneelile risti langeva päikesekiirguse andmeid, et hinnata ühe - või kaheteljelistel päikesejärgimissüsteemidel põhinevate päikeseelektrijaamade tootlikkust.

Antud töös on eesmärgiks mõõta päikesekiirguse intensiivsust, hoides kalibreeritud päikesepaneeli sellele langeva kiirgusega risti, seega valiti päikesejärgimissüsteemi tüübiks aktiivne järgimine. Aktiivse järgimise teostamisel on pööramistelgedele liigutamiseks kasutatud samm-mootoreid, päikese asukoha tuvastamiseks fotoandureid ning samm-mootorite juhtimiseks fotoanduritelt saadava tagasiside järgi on kasutatud mikrokontrollerplatvormi Arduino Mega 2560. Päikesejärgimissüsteem võimaldab kalibreeritud päikesepaneeli asendit muuta horisontaaltasandis ligikaudu 360° ulatuses ning vertikaaltasandis 90° ulatuses, mis on piisav päikese asendi järgimiseks valitud

asukohas. Pöördenurkade piiramiseks on lisaks mehaanilisele takistusele lisatud ka lõpplülitid, mis annavad signaali mootorite seisma jätmiseks, kui lõpp – asend on saavutatud.

2.2 Päikesekiirguse andur ISET Sensor

Päikesekiirguse intensiivsuse mõõteandmete kogumiseks on konstrueeritavas mõõteseadmes kasutatud tootja IKS Photovoltaik GmbH monokristall kalibreeritud päikesepaneeliga andurit ISET Sensor 02644 (joonis 2.1).



Joonis 2.1 Päikesekiirguse andur ISET Sensor 02644

Kõik ISET päikesekiirguse andurid on kalibreeritud vastavalt standardile DIN EN 60904-2 ja kalibreerimistunnistus on väljastatud vastavalt standardile DIN EN 60904-4. See andur annab võimaluse mõõta päikesekiirguse intensiivsust ja selle varieeruvust teatud ajaperioodil. ISET päikesekiirguse andureid on saadaval eri tüüpi päikeselementidega: monokristall, polükristall ning amorfse ränikihiga. Seega saab valida sobiva päikeseelemendi tehnoloogiaga anduri, et koguda kindlasse paika ehitatava või

olemasoleva päikeseelektrijaama oodatava tootlikuse kohta adekvaatset informatsiooni. [15], [16]

Päikesekiirguse andmete saamiseks teisendatakse ISET anduri päikeselemendile langev päikesekiirgus kindlalt määratud viisil proportsionaalseks elektrivooluks. Järgmiseks määratakse anduri alumiiniumkorpuse külge ühendatud šundi kaudu mõõdetud pinge väärtus, mille saab lõpuks tootja poolt määratud teguriga läbi korrutades teisendada päikesekiirguse intensiivsuse väärtuseks. ISET päikesekiirguse andurisse on integreeritud ka PT1000 temperatuuriandur, mille näitu saab kasutada mõõdetud päikesekiirguse intensiivsuse väärtuse korrigeerimiseks. Temperatuuri suhtes korrigeeritud päikesekiirguse intensiivsuse saab arvutada järgmise valemiga [15], [17]:

$$G = \left(\frac{1000 \frac{W}{m^2} \cdot U_{m\ddot{o}ot}}{U_{STC}} \right) \cdot (1 - T_K \cdot (T_{m\ddot{o}ot} - 25)), \quad (2.1)$$

kus G – ISET anduri mõõdetud päikesekiirguse intensiivsus, [W/m²];

$U_{m\ddot{o}ot}$ – anduri mõõdetud pinge, [V];

U_{STC} – anduri pinge standardsetes testimise tingimustes, [V];

T_K – vastava päikeselemendi tehnoloogia temperatuuritegur, [1/°C];

$T_{m\ddot{o}ot}$ – PT1000 temperatuurianduri mõõdetud temperatuuri väärtus, [°C].

Kõrge täpsusega päikesekiirguse andmete saamiseks kasutatakse sageli termoelektrilist püranomeetrit, kuid odavamatel päikesekiirgust mõõtvatel kalibreeritud päikesepaneelidel nagu ISET päikesekiirguse anduril võivad olla omad eelised. Mõõtmisteks kasutatava kalibreeritud päikesepaneeli saab valida selliselt, et see oleks sama tüüpi nagu päikeselektrijaamas kasutatav päikesepaneel. Selliselt valides on mõõtvat kalibreeritud päikesepaneeli ja elektritootmiseks kasutatud päikesepaneeli tundlikkus ja omadused omavahel selgemini võrreldavad. Artiklis [17] läbiviidud katsetustes võrreldi omavahel kõrge täpsusega SR11 püranomeetrit ning ISET monokristall päikeselemendiga päikesekiirguse andurit ja leiti, et üldiselt on mõlema seadme mõõtetulemuste vahel märkimisväärne korrelatsioon, kuid kõrgemate temperatuuride korral alahindab ISET andur päikesekiirguse intensiivsust mitu protsenti võrreldes püranomeetriga [17]. Sellegipoolest on ISET andur kvaliteetne mõõtevahend, mille mõõdetavate päikesekiirguse andmete põhjal saab hinnata samal tehnoloogial valmistatud päikesepaneelide tootlikust. Samuti tagab vastupidav ja hooldusvaba disain ning sisseehitatud temperatuuriandur kõrge vastupidavuse erinevates tingimustes ning korratavuse mõõtetulemuste puhul [16].

2.3 Päikesejärgimissüsteemi struktuur ja komponendid

Mõõteseadme päikesejärgimissüsteemi ümberehitamisel oli eesmärgiks ära kasutada võimalikult palju olemasolevaid komponente, seega tuli kõigepealt välja mõelda uue süsteemi struktuur ja hinnata olemasolevate komponentide sobivust uude päikesejärgimissüsteemi. Süsteemi uuendamiseks tuli parandada ja muuta ka selle mehaanilist konstruktsiooni, kuid käesolevas töös käsitletakse ainult elektroonikas ning tarkvaras tehtud muudatusi.

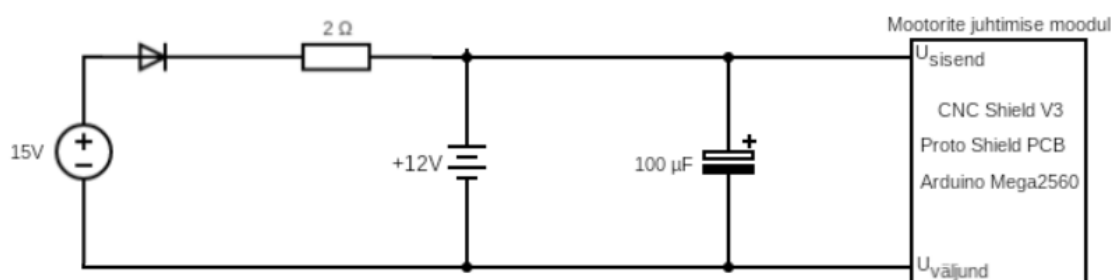
Päikesejärgimissüsteemi uue struktuuri paika panemiseks hinnati alustuseks olemasolevat süsteemi ja selles kasutatud komponente. Eelnev süsteem kasutas kalibreeritud päikesepaneeli telgede liigutamiseks samm-mootoreid, mis said fotoanduritelt informatsiooni päikese asendi kohta. Samm – mootorite lõppasendisse jõudmisel andsid lõpplülitid signaali mootorite seisma jätmiseks. Mootorite juhtimist tagasiside põhjal teostas Arduino Mega 2560 mikrokontroller, millele oli kinnitatud vaheplaat, kus olid tehtud ühendused elektroonikakomponentide vahel. Süsteemi toideti elektrivõrgust läbi toideadapteri.

Uuendatud päikesejärgimissüsteemi üldine struktuur mõeldi välja lähtuvalt päikesekiirguse andmeid koguva mõõteseadme tööpõhimõttest ja olemasolevatest komponentidest. Kirjeldatud varasema süsteemi ülesehitus sobis ka uude süsteemi aktiivse päikesejärgimise teostamiseks. Küll aga ei sobinud kasutamiseks kõik komponendid ja mitmed neist tuli asendada. Samuti oli eesmärgiks süsteemi töökindluse tagamine ja selleks lisati varu toiteallikaks pliiaaku, mis hoiab süsteemi töös ka elektrikatkestuste korral. Parema ülevaate saamiseks sellest, milliseid komponente kasutati ning millised on taaskasutatud varasemast süsteemist, on koostatud tabel (tabel 2.1), kus on välja toodud peamised päikesejärgimissüsteemi rakendamiseks kasutatud komponendid.

Tabel 2.1 Päikesejärgimisüsteemis kasutatavad komponendid ja nende eesmärk

Komponent	Eelnevast süsteemist?	Kogus	Kasutamiseesmärk/ülesanne
Samm-mootor RS798-3637	Jah	1	Kalibreeritud päikesepaneeli pööramine horisontaaltasandis
Samm-mootor RS191-8299	Jah	1	Kalibreeritud päikesepaneeli pööramine vertikaaltasandis
Mootori draiver A4988	Jah	2	Samm - mootorite juhtimine (pöörlemissuund ja samm)
Arduino Mega 2560	Jah	1	Platvorm juhtloogikaga (juhtimissignaali mootoritele fotoandurite tagasiside põhjal)
Fotoandur CPC1824	Jah	4	Päikese asendi muutuste tuvastamine
Lõpplülitid SS - 5GL2	Jah	4	Lõppasendi tuvastamine ja signaal mootorite seisma jätmiseks
Mega Proto Shield PCB	Ei	1	Täiendavad ühendused elektroonikaskeemis
Arduino CNC Shield V3	Ei	1	Komponentide (nt samm-mootorite draiverid, lõpplülitid) ühendused Arduinoga
Power Supply 15V	Ei	1	Konstantse pingega toide
Pliiaku CSB GP 12V 7.2Ah	Ei	1	Elektritoite katkemise korral süsteemi töökindluse tagamine

Varasem päikesejärgimissüsteem võeti peale üldise struktuuri paika panemist osadeks ja kuigi mitmeid komponente sai uuesti ära kasutada, tuli uuendatud süsteemi puhul koostada uued elektroonikaskeemid ja teha teistsugused ühendused. Elektriskeem toiteallika kaitseks ning samm - mootorite toiteks on kujutatud järgneval joonisel (joonis 2.2).



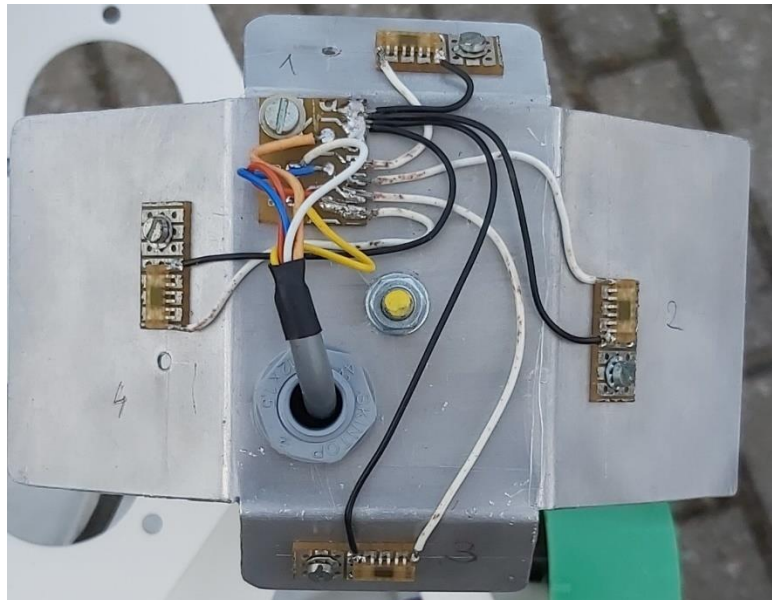
Joonis 2.2 Samm - mootorite juhtimise mooduli toiteskeem

Elektriskeemil kujutatud mootorite juhtimise moodul koosneb Arduino Mega 2560 mikrokontrollerist, sellele kinnitatud vaheplaadist Mega Proto Shield ja laiendusplaadist CNC Shield V3. Viimane ongi disainitud samm - mootorite lihtsaks ühenduseks ja

juhtimiseks Arduino platvormil, sellele on kinnitatud komponentide tabelis (tabel 2.1) toodud mootori draiverid ning laiendusplaadile kinnituvad ka samm – mootori toitejuhtmed. Selline moodul eemaldab vajaduse kasutada Arduino ja mootori draiverite ühenduseks juhtmeid, mis on kompaktsem ja ühendused on kindlamad.

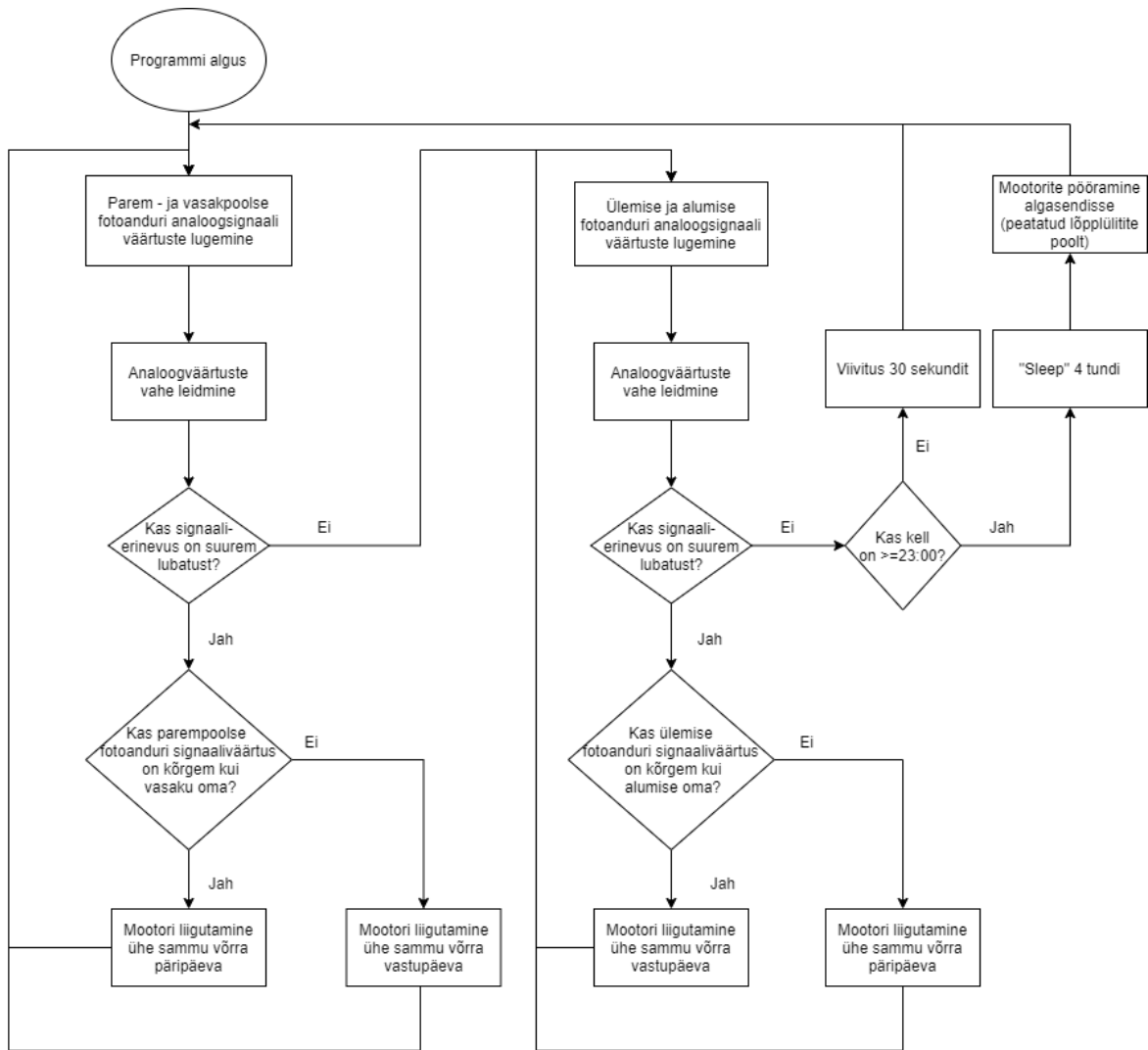
2.4 Päikesejärgimissüsteemi juhtalgoritm

Käesoleva töö autorile ei olnud kättesaadav eelneva süsteemi juhtimiseks kasutatud algoritm. Seega tuli algusest peale välja mõelda mõõteseadme tööpõhimõttele vastav juhtimisloogika. Konstrueeritava päikesejärgimissüsteemi aktiivse järgimise põhiosaks on fotoanduritelt kogutav tagasiside. Neli fotoandurit on asetatud ristikujuulisele alusele ja iga fotoandur asetseb aluse keskkosa tasapinnast tagapool (joonis 2.3).



Joonis 2.3 Fotoandurite aluse konstruktsioon

Selline konstruktsioon tagab, et fotoandurite väljundpinge on võrdne ainult sellisel juhul, kui seade koos kalibreeritud päikesepaneeliga on suunatud otse päikesekiirguse suunas. Vastasel juhul on tekkiv väljundpinge erinev ning erinevate pingeväärtuste võrdlemine võimaldabki süsteemi telgi liigutavaid mootoreid õiges suunas ning vajalikus ulatuses pöörata. Päikesejärgimissüsteemi juhtimisloogikat kirjeldab järgmine algoritm (joonis 2.4).



Joonis 2.4 Päikesejärgimisüsteemi mootorite juhtimisalgoritm

Päikesejärgimissüsteem võrdleb kõigepealt fotoandurite väärtusi, mis on tagasisideks horisontaaltasandis pööravale mootorile. Kui kalibreeritud päikesepaneeli pöördenurk horisontaaltasapinnas asetus jääb nõutud täpsuse piiridesse, siis asub programm võrdlema fotoandurite väärtusi, mille põhjal reguleeritakse kalibreeritud päikesepaneeli kaldenurka. Sarnaselt esimese mootoriga, pööratakse vertikaaltasandis pöörlevat mootorit õiges suunas, kuni päikeseandur on piisava täpsusega õige nurga alla keeratud. Seejärel on lisatud viivitus, sest paneelile langeva päikese kiirguse asend ei muutu hetkeliselt. Kui kalibreeritud päikesepaneeli asend mõlemas teljes jääb nõutud piiridesse, kontrollitakse ka kellaega. Aasta läbi loojub päike erinevatel aegadel, kuid valides kellaaja, mis on hilisem suvise pööripäeva päikeseloojangust, saab olla veendunud, et päike on loojunud ja päikesejärgimissüsteemi võib energia säästmiseks pikemaks ajaks unerežiimile viia. Lisaks sellele pööratakse kalibreeritud päikesepaneel tagasi algasendisse, et olla suunatud paremini päikesetõusu suunas ja olla koheselt lähemal ristseisule päikese kiirgusega.

3. ANDMEHÕIVESÜSTEEM NING MÕÕTEAHELAD MÕÕTMISANDMETE KOGUMISEKS JA EDASTAMISEKS

Käesolevas töös arendatava päikesekiirguse mõõteseadme eesmärgiks on koguda päikesekiirguse ja temperatuuriandmeid sekundiliste ajavahemike tagant ning edastada neid reaalajas jälgimiseks ning hilisemaks töötlemiseks kasutajale. Selle teostamiseks oli vaja luua mõõteahelad anduritelt vajaliku täpsusega mõõteandmete saamiseks ning üles seada andmehõivesüsteem, kus mõõteseadmesse integreeritud anduritelt kogutud mõõteandmeid edastatakse üle WiFi - võrgu kasutajale.

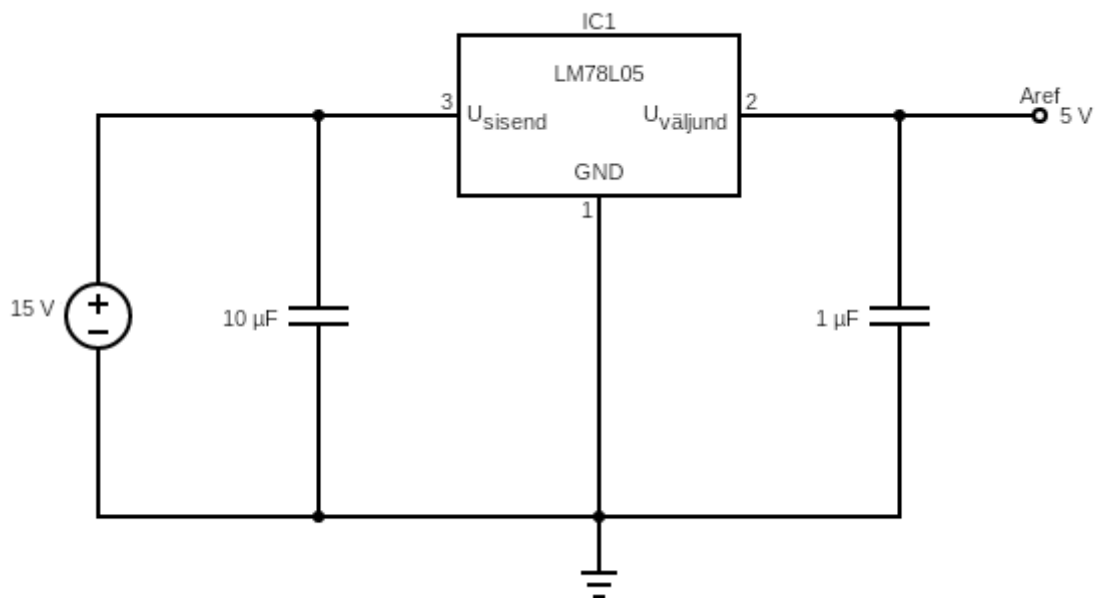
Edastatavateks andmeteks on päikesekiirguse intensiivsus, temperatuur, päikesejärgimissüsteemi vertikaal – ja horisontaaltelje pöördenurk ning süsteemi korrektse toimimise jälgimiseks ka toitepinge ning varutoiteallika ehk aku klemmipinge. Päikesekiirguse intensiivsust mõõdab päikesekiirguse andur ISET Sensor ning temperatuuri mõõdab selle korpusesse integreeritud PT1000 temperatuuriandur. Päikesejärgimissüsteemi telgede pöördenurki mõõdavad positsiooniandurid, mille tööd ning toimimisloogikat antud töös ei kajastata. Toiteallika ja aku pinget loetakse läbi pingejaguri Arduino mikrokontrolleri analoogsisenditesse. Seal teisendatakse need tarkvara abil tegelikeks pinge väärtusteks. Loodud andmehõivesüsteem edastab andmed kasutajale reaalajas, mis annab ülevaate süsteemi hetketööst, kuid samuti kogub kõik mõõtetulemused kokku ja võimaldab neid töödelda tarkvaras MS Excel. See teeb suuremahuliste andmehulkade töötlemise ja analüüsimise kasutajale lihtsamaks.

3.1 Andmete lugemine Arduino Mega 2560 platvormile

Päikesekiirguse - ja temperatuuriandmete ning toiteallika ja varutoite pingeväärtuste lugemiseks on kasutatud mikrokontrollerplatvormi Arduino Mega 2560. Päikesekiirguse andur ISET Sensor ning temperatuuriandur PT1000 väljastavad analoogsignaali, mida on võimalik Arduino platvormil sisse lugeda ja reaalse mõõdetava väärtusena kuvada. Arduino Mega 2560 on varustatud 10 – bitise analoog – digitaalmuunduriga, mis teisendab analoogsignaali vahemikus 0 V kuni 5 V vastavaks täisarvuks 0 kuni 1023, resolutsiooniga ligikaudu 4,9 mV ühiku kohta.

Arduino Mega 2560 platvormi sisemine 5 V referents analoogsisendite jaoks, võib aga Arduino toitepinge muutuste tõttu teatud vahemikus kõikuda, mis võib oluliselt mõjutada mõõteandmete täpsust. Selle probleemi kõrvaldamiseks saab Arduino

platvormil kasutada analoogreferentsi viiku *Aref*, mis võimaldab Arduinole pingereferentsi anda välisest toiteallikast. Konstantse 5 V pingeväärtuse tagamiseks kasutatakse pingestabilisaatorit LM78L05. Ühendusskeem pingestabilisaatori, selle toite ja analoogreferentsi viigu vahel on järgmine (joonis 3.1):

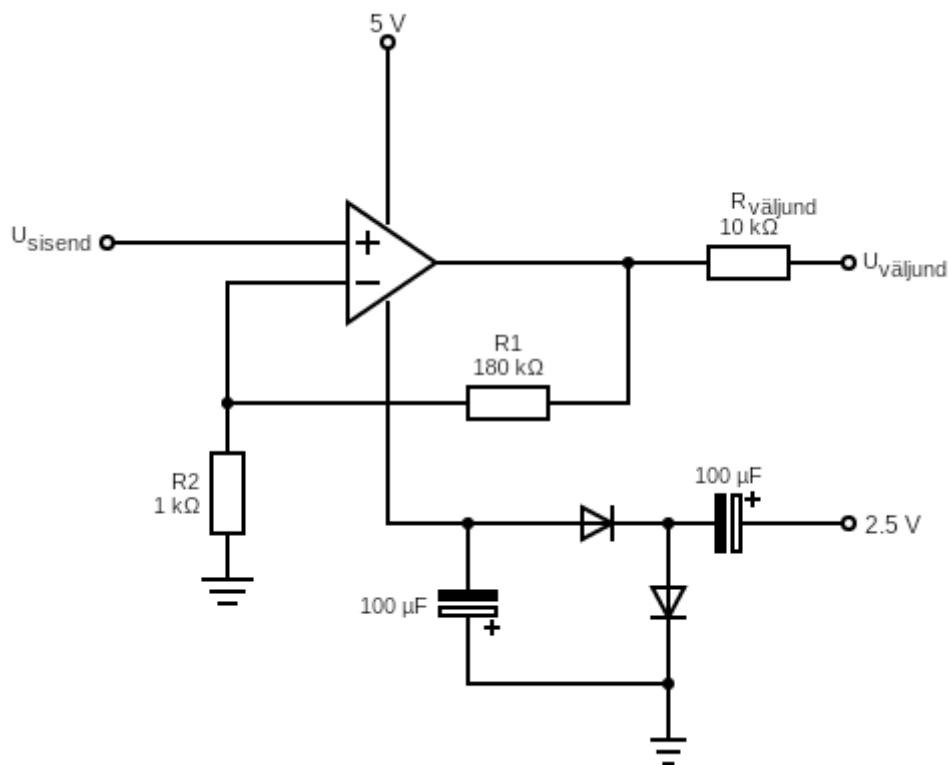


Joonis 3.1 Viie voldiseks väljundpingeks kasutatava pingestabilisaatori LM78L05 ühendusskeem

Vastavalt LM78L05 andmelehele [18], peab sellele antav sisendpinge jääma 7 V ja 30 V vahemikku, seega kasutatakse ära sama 15 V toiteallikat, mida kasutatakse ka süsteemi teiste osade elektritoitega varustamiseks. Samuti on 15 V toiteallika kasutamise puhul sisend - ja väljundpinge vahel piisavalt suur erinevus vajaliku volutugevuse tagamiseks. Antud pingestabilisaatori maksimaalne lubatav väljundvool on 100 mA, mis on antud rakenduses rohkem kui kümne kordselt piisav. Mõra filtreerimiseks ning piiramiseks on sisendisse ja väljundisse lisatud kondensaatorid. Vastavalt andmelehes esitatud soovitusetele, peaks sisendisse lisama kondensaatori, kui pingestabilisaator paikneb toiteallika silufiltrist rohkem kui 7,6 cm kaugusel, mis antud seadmes nii ka on. Väljundisse on lisatud kondensaator kõrgsagedusliku müra piiramiseks. [18]

3.2 Päikesekiirgusandmete kogumine

Konkreetse kalibreeritud päikesepaneeli ISET Sensor 02644 maksimaalne väljundpinge on 27,5 mV, mistõttu läheks analoogsignaali Arduino platvormile otse lugemisega kaduma kogu mõõtetäpsus. Selleks, et kasutada ära kogu 5 V skaalat ning saavutada vajalik täpsus, tuleb kalibreeritud päikesepaneeli väljundpinget võimendada. Selleks kasutati operatsioonivõimendit TL074CN. Signaalivõimendamiseks koostatud elektriskeem on kujutatud järgneval joonisel (joonis 3.2).



Joonis 3.2 Kalibreeritud päikesepaneeli väljundpinge võimenduskeem

Elektriskeemi koostamisel lähtuti kalibreeritud päikesepaneelile tootja poolt märgitud maksimaalsest väljundpingest ning arvestati võimendustegur selliselt, et võimendatud pinge oleks ligilähedaselt 5 V, kuid ei ületaks seda. Operatsioonivõimendi väljundsignaali saab sisendsignaali ehk kalibreeritud päikesepaneeli väljundpinge ja võimendusteguri järgi arvutada järgmise valemiga:

$$U_{\text{väljund}} = U_{\text{sisend}} \cdot K_{\text{võimendus}} = U_{\text{sisend}} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right), \quad (3.1)$$

kus $U_{\text{väljund}}$ – Kalibreeritud päikesepaneeli võimendatud väljundpinge [V];
 U_{sisend} – Kalibreeritud päikesepaneeli esialgne väljundpinge [V];

$K_{võimendus}$ – võimendustegur;

R_1 – esimene valitud takistus, [Ω];

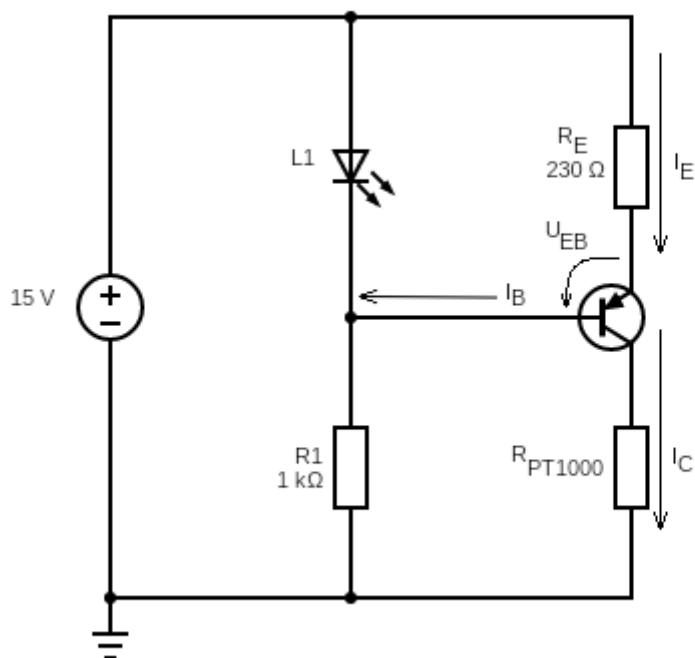
R_2 – teine valitud takistus, [Ω].

Valemist 3.1 lähtuvalt valiti takistusteks $R_1 = 180 \text{ k}\Omega$ ja $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$, mis tagaks 181 – kordse võimenduse. Sellisel juhul oleks kalibreeritud päikesepaneeli tootja poolt märgitud maksimaalse väljundpinge korral Arduino platvormile loetava signaali väärtus ligikaudu 4,984 V, mis jätkaks väikese varu kõrge päikeseintensiivsuse korral, kui paneeli väljundpinge peaks ületama maksimaalset märgitud. Samas kasutatakse ära peaaegu kogu 5 V vahemikku ehk saadavate mõõtetulemuste täpsus on ligikaudu maksimaalne, mida selline mõõtemetod võimaldab.

Kasutajale tuleb edastada päikeseikiirguse intensiivsuse väärtus, seega tuleb mõõdetud pinge programmikoodis vastavalt päikeseikiirguse anduri andmelehes esitatud valemile 2.1 teisendada sobivaks väärtuseks. Toodud valemis on konstantseteks väärtusteks konkreetse kalibreeritud päikesepaneeli puhul $U_{STC} = 27,5 \text{ mV}$ ning $T_K = 0,05 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ [15]. Mõõdetud pinge - ning temperatuuriväärtused $U_{Mõõt}$ ja $T_{Mõõt}$ asendatakse valemisse 2.1 vastavalt päikeseikiirguse andurilt ISET Sensor ning PT1000 temperatuuriandurilt saadud informatsioonile. Arvandmed asendades saab tulemuseks temperatuuri suhtes korrigeeritud päikeseikiirguse intensiivsuse väärtuse.

3.3 Temperatuuriandmete kogumine

Temperatuuriandmete lugemiseks Arduino platvormile, tuleb PT1000 temperatuurianduri takistus teisendada pingeks. Selleks kasutatakse vooluallikat, mis peaks tekitama konstantse voolutugevusega signaali, et temperatuurianduri otste vahel tekiks pinge. Vastavalt päikeseikiirguse anduri tootja poolt esitatud andmelehele [15], võib sellesse integreeritud PT1000 anduri temperatuuri mõõtmiseks kasutada kuni 1 mA voolutugevust. Sellest lähtuvalt on valitud vooluallika teostamiseks kasutatavate komponentide nimiväärtused. Ideaalset vooluallikat praktikas teostada ei saa, sest koormuse muutudes varieerub teatud määral voolutugevus. Ligikaudu konstantse voolutugevuse saavutamiseks kasutatud vooluallika elektriskeem on järgmine (joonis 3.3):



Joonis 3.3 Määratud temperatuurivahemikus kasutatav ligikaudu konstantse voolutugevusega vooluallika elektriskeem

Kujutatud vooluallika tekitatav voolutugevus on tähistatud kui I_C , mis läbib PT1000 temperatuuriandurit ja tekitab selle otstel pinge. Kasutatava vooluallika voolutugevuse saab arvutada järgmiselt, arvestades kõigepealt Kirchoffi esimest seadust:

$$I_E = I_C + I_B, \quad (3.2)$$

kus I_E – emitterivoolu voolutugevus [A];
 I_C – kollektorivoolu voolutugevus [A];
 I_B – baasivoolu voolutugevus [A].

Kasutatav PNP tüüpi transistor BC327 – 40 omab ligikaudu 330 – kordset voolvõimendust, seega on voolutugevus I_B 330 korda väiksem voolust I_C , mistõttu võib ligikaudselt arvestada, et $I_E \approx I_C$. Voolutugevuse I_E arvutamiseks, on vaja teada veel pinget takistil R_E , mille saab arvutada teades kasutatud komponentide mõõdetud parameetreid, transistori emitteri pinge baasi suhtes $U_{EB} \approx 0,7$ V ning valgusdiodi pingelang $U_{L1} \approx 3,0$ V. Järgmiseks saab Kirchoffi teise seaduse põhjal leida pinge U_{RE} :

$$U_{RE} = U_{L1} - U_{EB}, \quad (3.3)$$

kus U_{L1} – valgusdiodi pingelang [V];
 U_{EB} – emitteri pinge baasi suhtes [V];
 U_{RE} – pingelang takistil R_E [V].

Kasutades Ohm'i seadust, saab leida voolutugevuse $I_C \approx I_E$:

$$I_C \approx I_E = \frac{U_{RE}}{R_E}, \quad (3.4)$$

kus I_C – kollektorivoolu ehk vooluallika poolt tekitatav voolutugevus [A];
 I_E – emitterivoolu voolutugevus [A];
 U_{RE} – pingelang takistil R_E [V];
 R_E –takisti R_E takistuse väärtus [Ω].

Asendades valemisse 3.4 vastavad arväärtused saab voolutugevuseks ligikaudu 1,0 mA, mis vastab oodatavale tulemusele. Konstantse vooluallika poolt tekitatav voolutugevus on valitud selliselt, et see ei ületaks andmelehes esitatud maksimaalset voolutugevuse väärtust temperatuuri mõõtmiseks. Samuti jääb sellise voolutugevuse väärtuse korral temperatuurianduri otstel tekkiv pinge kõikide lubatud temperatuurivahemikule vastavate takistusväärtuste juures Arduino analoogsisendi 0 V kuni 5 V pingevahemikku.

3.3.1 Temperatuuriandurilt saadava pingeväärtuse vastavaks temperatuuriks teisendamine

Temperatuurivahemik, milles mõõteseade töötada saab on määratud päikesekiirguseanduri tootja poolt ning samuti tuleb arvestada konstrueeritava süsteemi omadustega. Sellest tulenevalt on mõõteseadme töötemperatuurivahemikuks arvestatud ligikaudu 10 °C kuni 80 °C. Temperatuurivahemiku ülemine piirväärtus on määratud kalibreeritud päikesepaneeli andmelehes [16] märgitud töötemperatuuri maksimaalse väärtuse järgi. Praktilistes välistingimustes töötades, temperatuurid eeldatavasti nii kõrgele ei tõuse. Toodud vahemikust lähtuvalt, saab temperatuurianduri temperatuurist sõltuva takistuse karakteristiku alusel arvutada neile temperatuuridele vastava takistuste muutumisvahemiku. PT1000 temperatuurianduri takistuse sõltuvus temperatuurist on kirjeldatav järgmise karakteristikuga [18]:

$$R(T) = R_{T_0} \cdot (1 + A \cdot (T - T_0) + B \cdot (T - T_0)^2), \quad (3.5)$$

kus $R(T)$ – PT1000 temperatuurianduri takistuse sõltuvus temperatuurist [Ω];
 R_{T_0} – nimitakistus 0 °C juures [Ω];
 T – temperatuur [°C];
 T_0 – referentstemperatuur [°C];
 A – lineaarne temperatuuritegur [K^{-1}];
 B – temperatuuri ruutegur [K^{-2}].

Asendades funktsiooni 3.5 mõõteseadme korrektseks töötamiseks arvestatud temperatuurivahemiku piirväärtused selgub, et takistus muutub vähem kui 300 Ω ulatuses, mis vooluallika tööd oluliselt ei mõjuta ja seetõttu püsib voolutugevus peaaegu konstantne.

Temperatuurianduri otste vahel mõõdetud pinge on vaja programmikoodis teisendada kasutajale mõistetavaks temperatuuri väärtuseks Celsiuse kraadides. PT1000 anduri temperatuurivahemik 0 °C kuni 100 °C on hinnatav lineaarfunktsiooniga, seejuures täpsust peaaegu kaotamata [18]. Kõige suurem takistusväärtuste erinevus kahe funktsiooni vahel esineb selle temperatuurivahemiku ülemise piirväärtuse ehk 100°C juures, misjuhul on erinevuseks ligikaudu 0.42%. Temperatuurivahemikus, milles on määratud töötama konstrueeritav mõõteseadme, on maksimaalne takistusväärtuste erinevus kahe funktsiooni vahel ligikaudu 0.29%. Ülemine temperatuuriväärtus on valitud varuga ning üldjuhul on töötingimustes mõõteseadme ümber olev temperatuur arvestatud mitukümmend kraadi °C madalamaks, mistõttu on erinevus tavaliselt veelgi väiksem. Seega kasutatakse temperatuuriandurilt saadud andmete töötlemiseks järgmist võrrandit, asendades referentstemperatuuri väärtusega $T_0 = 0$ °C ning temperatuuritegurid A ja B keskmise temperatuuriteguriga $\alpha = 3.91 \cdot 10^{-3}$ [K^{-1}] [19]:

$$R(T) = R_{T_0} \cdot (1 + \alpha \cdot T), \quad (3.6)$$

kus $R(T)$ – PT1000 temperatuurianduri takistuse sõltuvus temperatuurist vahemikus 0 °C kuni 100 °C [Ω];
 R_{T_0} – nimitakistus 0 °C juures [Ω];
 T – temperatuur [°C];
 α – keskmine temperatuuritegur [K^{-1}].

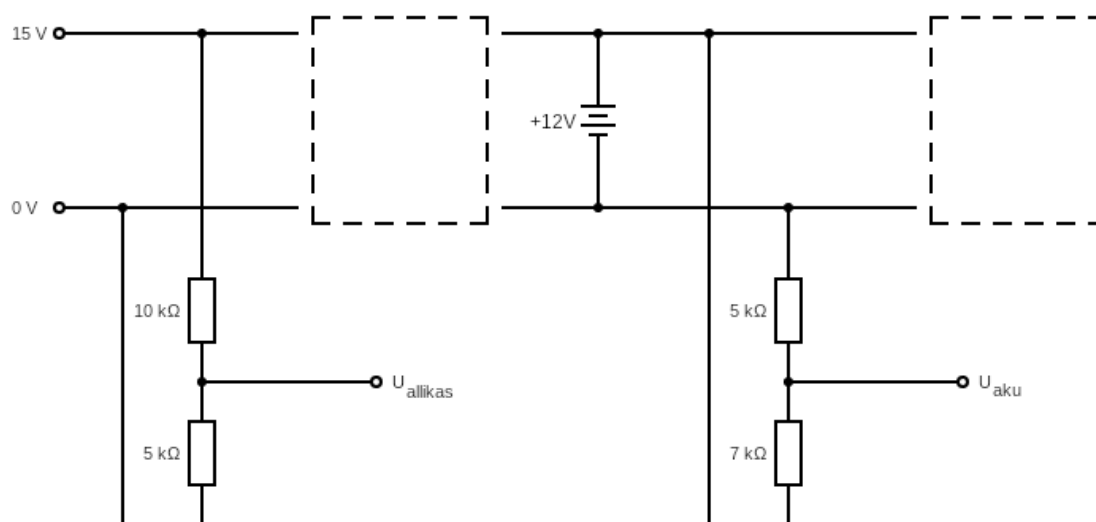
Karakteristiku 3.6 põhjal saab tuletada mõõdetud takistusest sõltuva temperatuuri funktsiooni $T(R)$, mille alusel programmikoodis takistus temperatuuriks teisendatakse. Funktsioon $T(R)$ on esitatav järgmiselt [19]:

$$T(R) = \frac{R - R_{T0}}{R_{T0} \cdot \alpha}, \quad (3.7)$$

kus $T(R)$ – mõõdetud takistusest sõltuv temperatuur [°C];
 R_{T0} – nimitakistus 0 °C juures [Ω];
 R – mõõdetud temperatuur[Ω];
 α – keskmine temperatuuritegur [K⁻¹].

3.4 Süsteemi toiteallika ja aku pingemõõtmine

Toitehäirete tuvastamiseks päikesejärgimisüsteemis, on samm - mootorite juhtimise toiteskeemis (joonis 2.2) lisatud nii akule kui ka toiteadapterile pingejagurid, et oleks võimalik Arduino Mega 2560 analoogsisendis pinget väärtusi mõõta. Konkreetsete takistite väärtustega pingejagureid kujutab järgmine skeem (joonis 3.4):



Joonis 3.4 Skeem toiteallika ja aku pingete mõõtmiseks

Nagu skeemilt nähtub, on päikesejärgimisüsteemi mootorite toitekaks kasutatud 15 V alalisvoolu toiteallikat ning varutoiteallikaks on 12 V pliiaaku. Sarnaselt päikesekiirguse – ja temperatuurandmete mõõtmisele, kasutatakse pingeväärtuste lugemiseks Arduino Mega 2560 mikrokontrollerit, mille analoogsisendisse antav signaal peab jääma 0 V ja 5 V vahemikku, et see oleks tõlgendatav kogu ulatuses täisarvuliseks väärtuseks 0 kuni 1023. Seega kasuti pinget jagamist pingejaguriga, mis kirjeldub järgmise valemiga:

$$U_{\text{väljund}} = U_{\text{sisend}} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}, \quad (3.8)$$

kus $U_{\text{väljund}}$ – analoogsisendis loetav pinge [V];

U_{sisend} – pinge pingejaguri otste, toiteallika puhul 15 V ja aku puhul 12 V [V];

R_1 – esimene valitud takistus, toiteallika ja aku puhul 5 k Ω [Ω];

R_2 – teine valitud takistus, toiteallika puhul 10 k Ω ja aku puhul 7 k Ω [Ω].

Toiteallikale lisatud pingejaguri takistite väärtused on valitud selliselt, et toiteallika nimipingel 15 V on Arduino analoogsisendis 5 V. Kui peaks tekkima elektrikatkestus, siis mõõdetakse pinge 0 V ning kui peaks esinema tõrge toiteallikas endas, siis võib pinge väärtus muutuda selles vahemikus. Akule lisatud pingejaguri takistite väärtused on leitud samal põhimõttel. Kui aku on täis laetud, siis on signaal analoogsisendis 5 V. Aku laadimistaset iseloomustavad väärtused, mis jäävad 0 V ja 5 V vahemikku. Need andmed annavad kasutajale ülevaate süsteemi olekust ning inditseerivad tõrkeid, et kasutaja teaks, millal süsteem vajab parandamist.

3.5 Kogutud andmete edastamine kasutajale

Arduino Mega 2560 platvormi analoogsisendites loetud mõõteandmeid edastatakse üle universaalse jadasiini ehk USB Raspberry Pi 3 B+ platvormile. Mõõteandmeid kogutakse enne Raspberry Pi platvormile edastamist Arduinole, sest Raspberry platvormil puuduvad analoogsisendid, mistõttu peaks teisel juhul kasutama välist digitaal – analoogmuundurit. Arduino programmeerimiskeel võimaldab aga väärtused lihtsasti sisse lugeda, teha vajalikud teisendused ja edastada Raspberry platvormile. Raspberry Pi on arvutuslikult oluliselt võimekam ja võimaldab erinevalt Arduinost täita mitut programmi samaaegselt. Samuti on konkreetsel mudelil olemas Ethernet'i pesa ja WiFi moodul, mis teeb võimalikuks andmete edastamise üle WiFi võrgu.

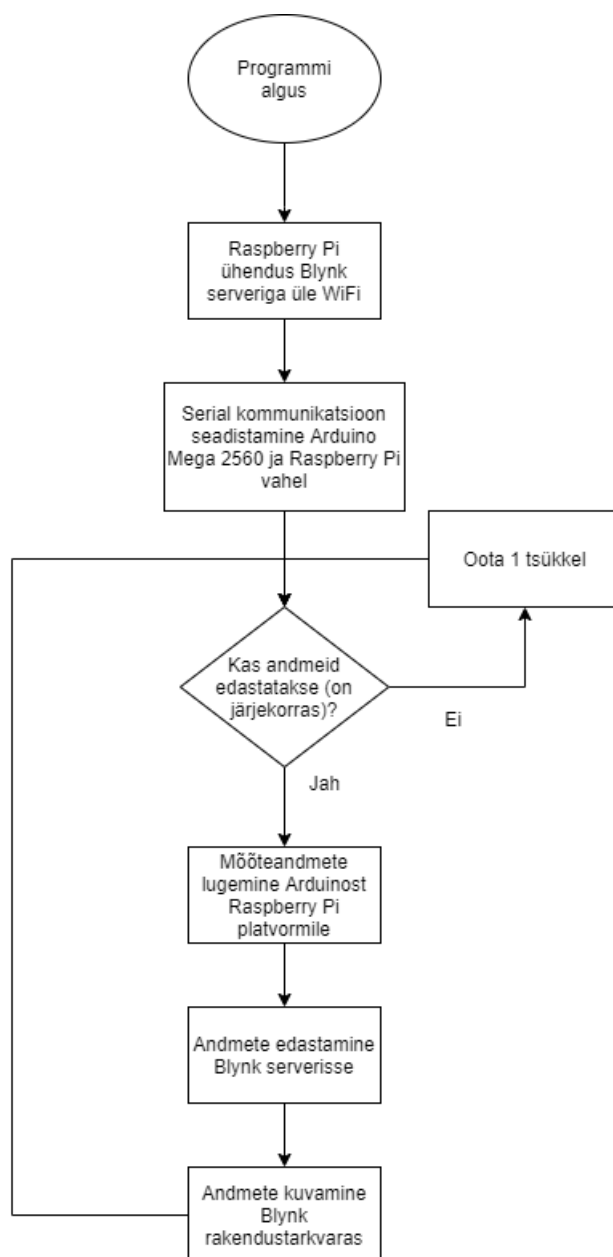
Andurite mõõtetulemuste kuvamiseks kasutajale kasutatakse asjade interneti ehk IoT platvormi Blynk. See hõlmab endas teeke laialt kasutatavate riistvaraliste platvormide nagu Arduino mikrokontrollerite ja Raspberry Pi miniarvutite jaoks, mis võimaldab muu hulgas suhtlust Blynk serveriga. Blynk server vastutab riistvaralise platvormi ja nutitelefonide vahelise suhtluse eest. Nutitelefonile installeeritav Blynk'i rakendustarkvara võimaldab lihtsalt luua graafilise kasutajaliidese erinevate ülesannete täitmiseks või andmete kuvamiseks. [20].

Käesolevas töös kuvatakse Blynk rakendustarkvaras päikesekiirguse intensiivsust, temperatuuri, toiteallika ja varutoiteallika pingeväärtusi ning positsioonianduritelt saadud pööramistelgede nurkasid. Andmete hetkeväärtusi kuvatakse arvuliselt, samuti on võimalik andmevoogu jälgida graafikutelt. Blynk rakendustarkvara võimaldab kuvada andmeid graafikutena erinevatel kasutaja poolt valitud ajaperioodidel, mis annab visuaalse ülevaate sellel perioodil kogutud andmetest ja nende väärtuste varieerumisest. Päikesekiirguse mõõteseadmelt saadavate andmete jaoks loodud kasutajaliidest iseloomustab järgmine pilt (joonis 3.5), mis kujutab kasutajale saadetud testandmeid rakendustarkvaras loodud visuaalse poole illustreerimiseks.



Joonis 3.5 Mõõteandmete kuvamiseks loodud kasutajaliides saadetud testandmetega

Mõõteseadme informatsiooni edastamiseks tuli luua Blynk rakendustarkvaras projekt. Iga projekti jaoks väljastatakse kasutajale sümbolitest koosnev sõne, mis seob kasutatava riistvara konkreetse projektiga rakendustarkvaras. Arduino mikrokontrollerilt Raspberry Pi platvormile üle universaale jadasiini edastatud andmed võetakse vastu ja töödeldakse programmeerimiskeeles Python. Sobival kujul andmed saadetakse Blynk rakendustarkvarasse, kus saab kujundada andmete kuvamisviisi ja luua nende põhjal graafikuid. Programmeerimiskeeles Python andmete vastuvõtmist ja Blynk serverisse edastamist on kujutatud järgneva algoritmiga (joonis 3.6).



Joonis 3.6 Algoritm andmete lugemiseks Raspberry'le ja kasutajale edastamiseks

KOKKUVÕTE

Viimastel aastakümnetel on üle maailma suurenenud taastuenergia osakaal kogu energiatootmises ja erinevaid jätkusuutlike taastuenergia kasutamise võimalusi ning lahendusi arendatakse järjest enam. Üheks peamiseks taastuenergia allikaks on päike, mille kiirgusenergiat kasutatakse laialdaselt ära jätkusuutliku ja keskkondlikult puhta kasuliku energia tootmiseks.

Päikesekiirguse efektiivsemaks utiliseerimiseks energiatootmises, on vaja koguda päikesekiirguse - ning temperatuurandmeid, mille põhjal on võimalik hinnata päikese kiirgusenergia põhineva süsteemi tootlikust. Tootlikuse hindamiseks on samuti oluline teada päikese trajektoori horisondil päikeseelektrijaama geograafilise asukoha suhtes erinevatel ajaperioodidel. Päikesekiirguse - ja temperatuurandmed on üldiselt saadaval tunnipõhistena, kuid teatud valdkondades nagu mikrovõrkude talitluse juhtimine ja planeerimine, on vaja tunduvalt suurema ajalise eraldusvõimega andmeid.

Sellest tulenevalt oli käesoleva töö eesmärgiks ümber ehitada Tallinna Tehnikaülikooli energeetikahoone katusel paiknev töökorrast väljas olev päikesekiirguse mõõtesead, mille ülesandeks on koguda päikesekiirguse - ning temperatuurandmeid suure täpsuse ja kõrge ajalise eraldusvõimega. Töö esimeses osas on kirjeldatud mõõteseadme toimimisega seonduvat taustainformatsiooni päikesekiirgusest, päikese liikumisest horisondil ning päikesejärgimissüsteemidest, nende põhimõttest ja kasutamiseesmärkidest. Teises osas on vaadeldud detailsemalt konstrueeritud päikesejärgimissüsteemi, selle teostamiseks kasutatud komponente ning juhtimisloogikat. Viimane osa hõlmab andmete kogumiseks ja edastamiseks loodud andmehõivesüsteemi ning kirjeldab vajalike andmete kogumise ja kasutajale edastamise põhimõtteid.

Eesmärgist lähtuvalt, arendati käesoleva töö tulemusena välja päikesekiirguse intensiivsust ning temperatuuri mõõtev, aktiivsel päikesejärgimissüsteemil põhinev mõõtesead. Päikesekiirguse anduri ehk antud töös kalibreeritud päikesepaneeli ristseisus hoidmiseks sellele langeva päikesekiirgusega, kasutatakse samm - mootoreid, mis liigutavad anduri pöörämistelgi vastavalt fotoanduritelt saadud tagasisidele. Seejuures koguvad kalibreeritud päikesepaneel ning selle korpuses olev temperatuurandur vastavalt päikesekiirguse - ning temperatuurandmeid. Süsteemi korrektse toimimise jälgitavuseks, kogutakse ka toiteallika ning varutoite pingeväärtuste andmeid, mis kõik edastatakse üle WiFi võrgu kasutajale, kes saab Blynk

rakendustarkvaras katseandmeid ning süsteemi töötamist nii reaalajas jälgida kui ka kogutud andmeid hiljem alla laadida ja töödelda.

Tehtud töö täitis püstitatud eesmärgid ning konstrueeritud mõõteseadme täidab oma ülesannet. Päikesekiirguse mõõteseadme edasiarenduseks saab sellele lisada ka kronoloogilise järgimise, millel oleks võimekus tuvastada päikesekiirguse anduri asendi kõrvalekaldeid oodatavast, näiteks tugeva pilvkatte korral, ning võtta seejuures süsteemi juhtimine teatud ajaperioodiks üle.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] J. Goldemberg, United Nations Development Programme, United Nations, Department of Economic and Social Affairs, World Energy Council, *World Energy Assessment: Energy and Challenge of Sustainability*. United Nations Development Programme, New York, 2000. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://sustainabledevelopment.un.org/index.php?page=view&type=400&nr=2423&menu=35> [Kasutatud 15 Märts 2021].
- [2] M. Sengupta, A. Habte, C. Gueymard, C. Wilbert, D. Renné, *Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications: Second Edition*. United States: N. p., 2017. [Võrgumaterjal]. doi:10.2172/1411856.
- [3] V. Russak, A. Kallis, *EESTI KIIRGUSKLIIMA TEATMIK*, Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituut, Tallinn, 2003. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.ilmateenistus.ee/ilmatarkus/publikatsioonid/eesti-kiirguskliimateatmik/> [Kasutatud 1 Mai 2021].
- [4] S. Szokolay, *Solar Geometry, Passive and Low Energy Architecture International* in association with Dept. Of Architecture, University of Queensland, Queensland, 1996. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.plea-arch.org/wp-content/uploads/PLEA-NOTE-1-SOLAR-GEOMETRY.pdf> [Kasutatud 1 Mai 2021].
- [5] T. Tomson, *Helioenergeetika*. Tallinn: Humare, 2000.
- [6] Alison Eldridge, „What’s the Difference Between a Solstice and Equinox?” in *Britannica Online*. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.britannica.com/story/whats-the-difference-between-a-solstice-and-an-equinox> [Kasutatud 15 Märts 2021].
- [7] T. Tuvikene, E. Tempel, T. Eenmäe. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.astronoomia.ee/tahistaevas/efemeriidid/> [Kasutatud 15 Märts 2021].
- [8] A. Marsh, „2D Sun-Path,” 12 Juuni 2014. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://andrewmarsh.com/apps/releases/sunpath2d.html> [Kasutatud 15 Märts 2021].

- [9] M. Rehepapp, „Solar panel economic profitability comparison for different consumers in Estonia. Päikesepaneelide kasutamise majandusliku otstarbekuse võrdlus erinevatele tarbijatele Eestis“, [Magistritöö], Inseneriteaduskond, TalTech, Tallinn, Eesti, 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/f38ac853-dd85-4371-ad96-06e885909ed4>
- [10] R. Singh, S. Kumar, A. Gehlot, R. Pachauri, „An imperative role of sun trackers in photovoltaic technology: A review,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 82, no. 3, pp. 3263-3278, ISSN 1364-0321, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.10.018.
- [11] N. Kuttybay, A. Saymbetov, S. Mekhilef, M. Nurgaliyev, D. Tukymbekov, G. Dosymbetova, A. Meiirkhanov, Y. Svanbayev, „Optimized Single-Axis Schedule Solar Tracker in Different Weather Conditions,“ *Energies* 13(19), no. 19:5226, 2020, doi: 10.3390/en13195226.
- [12] N. Barsoum, "Fabrication of Dual-Axis Solar Tracking Controller Project," *Intelligent Control and Automation*, vol. 2, no. 2, pp. 57-68, 2011, doi: 10.4236/ica.2011.22007.
- [13] S. Madala, R. Boehm, „A review of nonimaging solar concentrators for stationary and passive tracking applications,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 71, pp. 309-322, ISSN 1364-0321, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.12.058.
- [14] M. Jovanović, Z. Despotovic, D. Urukalo, „The chronological system for solar tracking implemented on mobile solar generator,“ in *the 5th Int. Conf. on Renewable Electrical Power Sources 2017*, Belgrad, 2017, pp. 1-7. Saadaval: https://www.researchgate.net/publication/320357642_THE_CHRONOLOGICAL_SYSTEM_FOR_SOLAR_TRACKING_IMPLEMENTED_ON_MOBILE_SOLAR_GENERATOR [Kasutatud 2 Aprill 2021]
- [15] IKS Photovoltaik GmbH, „FAQ ISET Sensor,“ ISET Sensor andmeleht, Mai 2015. [Võrgumaterjal]. [Kasutatud 2 Aprill 2021].
- [16] IKS Photovoltaik GmbH, „Solar radiation sensor ISET Sensor high – quality measurement technology for the mass market,“ ISET Sensor andmeleht, Mai 2015. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.iks->

photovoltaik.de/fileadmin/iks/pdf/ISET_Sensor_EN.pdf [Kasutatud 2 Aprill 2021].

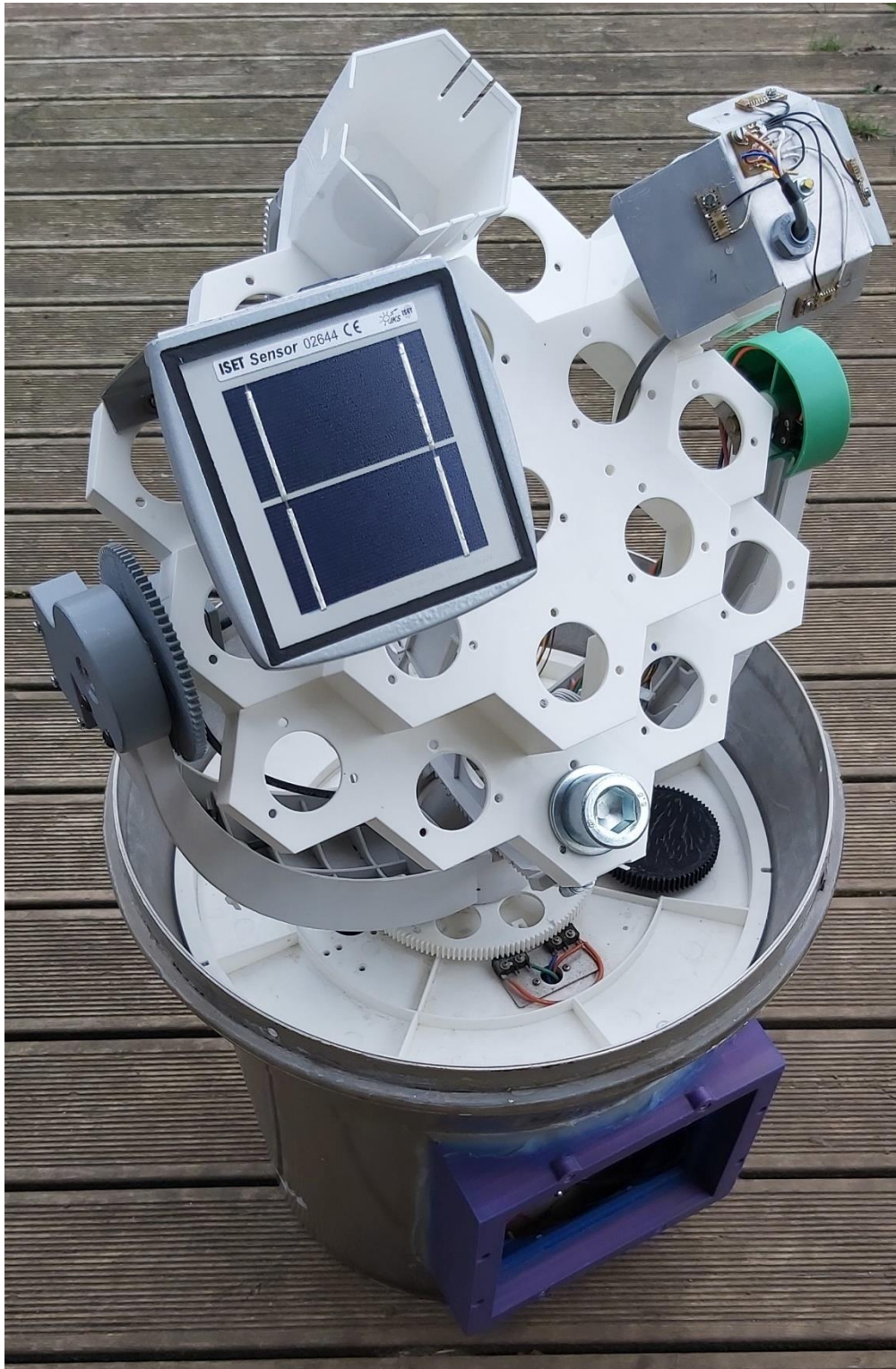
- [17] A. Azouzoute, A. Merrouni, G. Bennouna, A. Gennioui, „Accuracy Measurement of Pyranometer vs Reference cell for PV resource assessment,“ *Energy Procedia*, vol. 157, pp. 1202-1209, ISSN 1876-6102, 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2018.11.286.

- [18] Texas Instruments, „LM78L 100 – mA Fixed Output Linear Regulator,“ LM78L05 andmeleht, Jaanuar 2000 [Kontrollitud Juuni 2020]. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm78l.pdf> [Kasutatud 13 Mai 2021].

- [19] Autosen. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://autosen.com/en/knowledge-platinum_measuring_resistor# [Kasutatud 10 Mai 2021].

- [20] Blynk Inc. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://docs.blynk.cc/> [Kasutatud 1 Mai 2021].

Lisa 1. Päikesekiirguse mõõteseade



Joonis Lisa 1. Kaheteljelisel päikesejärgimissüsteemil põhineva päikesekiirguse mõõteseadme üldvaade