

PÄIKESEKIIRGUSE MÕÖTESEADMELE LIIKUMISTRAJEKTOORI JÄRGIMISSÜSTEEMI LOOMINE

MOVEMENT TRACKING SYSTEM DEVELOPING FOR SOLAR IRRADIATION MEASUREMENT DEVICE

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Hans Kasepõld

Üliõpilaskood: 185297EAAB

Juhendaja: Martin Jaanus, vanemlektor

Kaasjuhendaja: Lauri Kütt, professor

Tallinn 2021

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.

“18” mai 2021. a.

Autor: Hans Kasepõld

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“18” mai 2021. a.

Juhendaja: Martin Jaanus

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

“.....”.....202... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Hans Kasepõld

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Päikesekiirguse mõõteseadmele liikumistrajektoori järgimissüsteemi loomine,

mille juhendaja on Martin Jaanus,

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.

“18” mai 2021. a.

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 loomingulise 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

<p><i>Autor:</i> Hans Kasepõld</p> <p><i>Töö pealkiri:</i> Päikesekiirguse mõõteseadmele liikumistrajektoori järgimissüsteemi loomine</p>	<p><i>Lõputöö liik:</i> Bakalaureusetöö</p>
<p><i>Kuupäev:</i> 18.05.2021</p>	<p>41 lk</p>
<p><i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool</p> <p><i>Teaduskond:</i> Inseneriteaduskond</p> <p><i>Instituut:</i> Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut</p>	
<p><i>Töö juhendaja(d):</i> vanemlektor Martin Jaanus</p> <p><i>Töö kaasjuhendaja(d):</i> professor Lauri Kütt</p> <p><i>Töö konsultant (konsultandid):</i> Muhammad Naveed Iqbal, Noman Shabbir</p>	
<p><i>Sisu kirjeldus:</i></p> <p>Töö eesmärgiks on luua suure täpsuse ja kõrge lahtusvõimega päikesekiirguse mõõteseadmele liigend, millega on võimalik saada informatsiooni päikese paiknemise kohta taevasfääril. Käsitleva bakalaureusetöö tulemusena disainiti kaks positsioonianduritega liigendit, kus ühe liigendi eesmärk on järgida päikese kõrgusnurga muutumist ja teise liigendi eesmärk on järgida asimuutnurga muutumist.</p> <p>Töö on jaotatud viieks osaks. Esimeses osas käsitletakse päikeselt tulenevat energiat ja kiirgust ning on kirjeldatud päikese liikumist ja sellest tingitud päikese positsiooni määramiseks vajalike nurkade teke. Teises osas on kirjutatud päikesepaneelidest ja nende tööpõhimõttest ning tootlikust mõjutavatest teguritest. Kolmandas osas on antud ülevaade päikese järgimis süsteemide tüüpidest ja meetoditest. Neljandas osas on kirjeldatud liigendite disainimist ja viiendas osas positsiooniandurite ja mikrokontrolleri vaheliste ühenduste loomist.</p>	
<p><i>Märksõnad:</i> Päike, päikesepaneelid, päikese järgimissüsteemid, positsiooniandurid, raalprojektseimine</p>	

ABSTRACT

Author: Hans Kasepõld

Type of the work: Bachelor Thesis

Title: Movement tracking system developing for solar irradiation measurement device

Date: 18.05.2021

41 pages

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

Co-supervisor(s) of the thesis: Professor Lauri Kütt

Consultant(s): Muhammad Naveed Iqbal, Noman Shabbir

Abstract:

The purpose of this bachelor's thesis is to develop a movement tracking system for solar irradiation measurement device, that can obtain information about the location of the sun on the celestial sphere. Two joints with position sensors were designed during this thesis. One joint was designed to track the change of altitude of the sun during the day, and another joint was designed to track the change of azimuth of the sun during the day.

The thesis is divided into five separate parts. The first part describes the energy and radiation from the sun and explains the different angles that are caused by the movement of the sun. The second part describes solar panels and their working principles, as well as the parameters that influence the productivity of energy of the panel. The third part describes different types and methods of sun-tracking devices. The fourth part describes the design and development of position sensor joints and the fifth part describes the connections between position sensors and microcontroller.

Keywords: sun, PV-panels, sun-tracking systems, position sensors, CAD design

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema: **Päikesekiirguse mõõteseadmele liikumistrajektoori järgimissüsteemi loomine**

Lõputöö teema inglise keeles: **Movement tracking system developing for solar irradiation measurement device**

Üliõpilane: **Hans Kasepõld 185277EAAB**

Eriala: **Elektroenergeetika ja mehhatroonika**

Lõputöö liik: **Bakalaureusetöö**

Lõputöö juhendaja: **Martin Jaanus**

Lõputöö kaasjuhendaja: **Lauri Kütt**
(ettevõtte, amet ja kontakt)

Lõputöö ülesande kehtivusaeg: **02.2022**

Lõputöö esitamise tähtaeg: **18.05.2021**

Hans Kasepõld
Üliõpilane (allkiri)

Martin Jaanus
Juhendaja (allkiri)

Lauri Kütt
Õppekava juht (allkiri)

Lauri Kütt
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. Mõõtevahend peaks olema tõrgeteta töövõimeline välistingimustes, läbi aastate.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- 1) Kuidas on koostatud olemasolev süsteemi, mismoodi kasutada komponente ning leida sobivaim struktuur töökindla süsteemi loomiseks.
- 2) Kuidas kujundada uus süsteem, milles kalibreeritud päikesepaneeli asendi kohta on võimalik saada tagasisidet magnetiliste kodeerimisseadmete abil.

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.

Kaustatavad vahendid: Autodesk Inventor 2021, Ultimaker Cura 4.9.0, Arduino IDE 1.8.13

6. Graafiline osa

Elektriskeemid, detailide joonised, elektroonikaskeemid, algoritmide skeemid Töö põhiosas

7. Töö struktuur

1. Päikeseenergeetika
 - 1.1 Päikeseenergia
 - 1.2. Päikese kiirus
 - 1.3. Päikese geomeetria
2. Päikesepaneelid
 - 2.1. PV-paneelide tööpõhimõte
 - 2.2. PV-paneelide tootlikus
3. Päikese järgimise süsteemid
 - 3.1 Ühe ja kahe teljeline järgimise süsteem

- 3.2 Järgimissüsteemide meetodid
- 4. Suure täpsuse ja kõrge lahutusvõimega päikesekiirguse mõõtesead
 - 4.1 Altituudi järgimise positsioonianduri liigendi kujundamine
 - 4.2 Altituudi järgimise hammasülekande kujundamine
 - 4.3 Asimuudi järgimise positsioonianduri liigendi kujundamine
 - 4.4 Asimuudi järgimise hammasülekande kujundamine
- 5. Positsioonianduritelt tagasiside saamine Arduino Mega 2560 abil
 - 5.1 Kodeerimisseadmete ja mikrokontrolleri vaheliste ühenduste loomine

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Teadusartiklid
Käsiraamatud
Andmelehed
Veebimaterjalid

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 valmistamine, hankimine (02.2021)
Süsteemi esialgne katsetamine (28.03.2021)
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
SISUKORD	9
EESSÕNA	10
Lühendite ja tähiste loetelu	11
SISSEJUHATUS	12
1. PÄIKESEENERGEETIKA	13
1.1 Päikeseenergia	13
1.2 Päikese kiirus	14
1.3 Päikese geomeetria	15
2. PÄIKESEPANEELID	18
2.1 PV-paneelide tööpõhimõte	18
2.2 PV-paneelide tootlikus	19
3. PÄIKESE JÄRGIMISE SÜSTEEMID	22
3.1 Ühe ja kahe teljelise järgimise süsteem	22
3.2 Järgimissüsteemide meetodid	23
4. SUURE TÄPSUSE JA KÕRGE LAHUTUSVÕIMEGA PÄIKESEKIIRGUSE MÕÕTESEADE 25	
4.1 Altituudi järgimise positsioonianduri liigendi kujundamine	26
4.2 Altituudi järgimise hammasülekande kujundamine	29
4.3 Asimuudi järgimise positsioonianduri liigendi kujundamine	32
4.4 Asimuudi järgimise hammasülekande kujundamine	34
4.5 Peatüki kokkuvõte	34
5. POSITSIOONIANDURITELT TAGASISIDE SAAMINE ARDUINO MEGA 2560 ABIL ..	37
5.1 Kodeerimisseadmete ja mikrokontrolleri vaheliste ühenduste loomine	37
KOKKUVÕTE	40
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	41

EESSÕNA

Käsitleva bakalaureusetöö teema sõnastati TalTech-i elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi programmijahi ja professori Lauri Kütti algatusel. Bakalaureusetöös käsitletud päikesekiirguse mõõteseadme töökindluseks vajalikud lisafunktsionaalsused ja nõuded määrati tema poolt.

Lühendite ja tähiste loetelu

σ - Stefan-Boltzmanni konstanti, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$

OAM - null-õhumass, W/m^2

G_{SC} - Solaarkonstant, W/m^2

G_{0n} - Maaväline kiirgus normaaltasandil, W/m^2

l - Maa ja Päikese vaheline kaugus, m

n - päeva järjekorranumber aastas

PV - photovoltaic

r - Päikese raadius, m

T - Päikese aktiivsusest tingitud pinnatemperatuurist, K

UV - ultraviolet

SISSEJUHATUS

Päikesekiirguse intensiivsuse andmed on üldiselt saadaval tunnipõhistena, millest piisab päikeseelektrijaamade jaoks üldiste tootlikkusnäitajate leidmiseks. Nii maailmas kui ka Eestis on viimaste aastatega suuresti populaarsust kogunud elektri tootmine päikesepaneelidega. See tähendab seda, et juurde on tekkinud palju mikrotootjaid, kes müüvad enda poolt toodetud elektrit võrku. Et elektritoite kvaliteeti kui ka mikrotootjate tasandil talitluse juhtimist ja planeerimist paremini läbi viia, on vajalik saada päikesekiirguse intensiivsuse andmeid palju väiksema ajalise eraldusvõimega. Sedasi on võimalik saada täpseid tulemusi väljundvõimsuste hetkväärtuste kohta ja ka pilvisuse mõjust tootlikkusele

Antud bakalaureusetöös tegeletakse TalTechi energeetika hoone katusel paikneva päikesekiirguse mõõteseadmega, mille eesmärk on mõõta kalibreeritud päikesepaneeli päikesekiirguse intensiivsust vähemalt 1 sekundilise ajalise eraldusvõimega. Mõõteseadme tõrgeteta, pikaajaliseks töötamiseks on vajalik välja arendada seadme liikumistrajektoori järgimise süsteem kodeerimisseadmete abil.

Töö teooria osas käsitletakse üldiselt päikeseenergeetikaga seostuvat ja päikese järgimissüsteemide tüüpe. Praktilises osas selgitatakse mõõteseadme küljes paikneva kalibreeritud päikesepaneeli positsiooni järgimiseks modelleeritud ülekandesüsteemide tööpõhimõtet ja seal kasutatavate magnetiliste kodeerimisseadmete kasutamist. Raalprojekteerimiseks on kasutatud programmi Autodesk Inventor.

1. PÄIKESEENERGEETIKA

1.1 Päikeseenergia

Päikese kiirgus on elektromagnetiline kiirgus, mis tekib päikesel toimivate termotuumareaktsioonide käigus. Osa sellest kiirgusenergiast jõuab Maa atmosfääri välisesse kihti, mille keskmine väärtus on $1367 \text{ W/m}^2 \pm 3\%$. [1] Erinevate päikese kiirgusega seotud arvutuste lihtsustamiseks on kasutusele võetud solaarkonstant $G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$. Seda võidakse nimetata ka null-õhumassiks, tähisega *OAM*. See on sõltuvuses Maa ja Päikese vahelisest kaugusest l (keskmiselt $1,496 \times 10^{11} \text{ m}$), päikese aktiivsusest tingitud pinnatemperatuurist T (keskmiselt 5777 K) ja ka Päikese raadiusest $r = 6,957 \times 10^8 \text{ m}$ [2]:. Seda on võimalik arvutada kasutades Stefan-Boltzmanni konstanti $\sigma = 5,670 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ valemiga 1.1:

$$G_{sc} = \frac{\sigma T^4 * 4\pi r^2}{4\pi l^2} = \sigma T^4 \left(\frac{r}{l}\right)^2, \quad (1.1) [2]$$

- kus G_{sc} - Solaarkonstant, W/m^2
 σ - Stefan-Boltzmanni konstanti, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$
 T - Päikese aktiivsusest tingitud pinnatemperatuurist, K
 r - Päikese raadius, m
 l - Maa ja Päikese vaheline kaugus, m

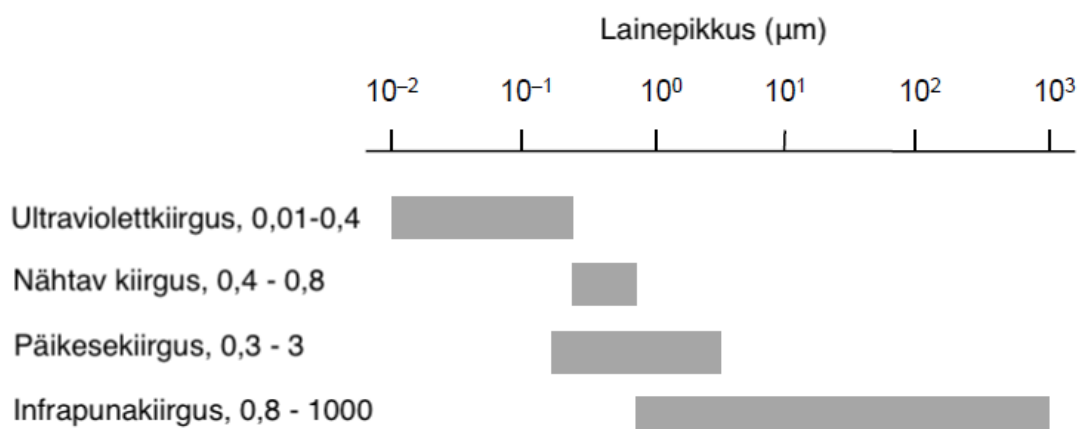
Solaarkonstandiks puhul on tegemist aasta keskmise väärtusega, kuid tegelik kiirgus, mis atmosfääri välisel kihil esineb, varieerub vahemikus 1322 W/m^2 kuni 1412 W/m^2 , olles väikseim detsembri lõpus ja suurim juuli alguses. Selline kiirguse muutus on tingitud maakera ellipsi kujulise orbiidi tõttu, mis põhjustab aastaringset Maa ja Päikese vahelise distantsi pidevat muutumist. Päevase täpsusega on võimalik leida kiirguse tugevus valemiga 1.2 [2]:

$$G_{0n} = G_{sc} \left(1 + 0,033 * \cos\left(360 * \frac{n}{365}\right)\right), \quad (1.2) [2]$$

- kus G_{0n} - Maaväline kiirgus normaaltasandil, W/m^2
 n - päeva järjekorranumber aastas

1.2 Päikese kiirgus

Päikese kiirgust, mis langeb teatud pinnale ja seal kas neeldub või eemale peegeldub, nimetatakse ka päikese kiirituseks. See iseloomustab päikese kiirguse intensiivsust või valgustihedust ruutmeetri kohta, mõõtühikuga W/m^2 . Päikese kiirguse efektiivsus maapinnal on sõltuvuses mitmest eri tegurist, milleks on näiteks kiirguse asukoha laius- ja kõrguskraadid, aastaaeg ja pilvisus [3]. Elektromagnetiline kiirgus on jaotatud nende lainepikkuste järgi. Joonis 1.1 näitab erinevate päikesekiirgusega seostuvate lainepikkuste suurusi, mis on olulised päikesetehnika valdkonnas. (vt. Joonis 1.1). Päikesekiirgus hoomab endas ultravioletti ehk UV-kiirgust ($0,01 \mu m - 0,4 \mu m$), nähtavat kiirgust ($0,4 \mu m - 0,8 \mu m$) ja infrapunakiirgust ($0,8 \mu m - 1000 \mu m$) [2].



Joonis 1.1 Elektromagnetilise kiirguse lainepikkuste sagedusalad [2]

Päikese kiirguse liikumisel läbi atmosfääri muutub see kiirgus olulisemalt nõrgemaks tänu kahele protsessile, milleks on päikesekiirguse hajumine ja neeldumine [2].

Hajumine esineb kui Päikeselt tulenev kiirgus puutub kokku atmosfääris lendlevate õhu ja vee molekulidega ning tolmuaga. See, kui palju Päikeselt tulev kiirgus hajub, on sõltuvuses lainepikkusest, õhus lendlevate osakeste suurusel ja nende tihedusest ning ka õhu massist, mida läbitakse. Enamasti esineb hajumist lühilainelisel kiirgusel [2].

Kiirguse neeldumine esineb Päikeselt tuleneva ultraviolettkiirguse ehk UV-kiirguse ja infrapunakiirgusega. UV-kiirguse hajumist tekitab maakera ümbritsev osoonikoht ja infrapunakiirguse hajumise põhjustajaks on õhus lendlevate vee ja süsihappegaasi molekulid. Neeldumise tulemusena muutub päikesekiirgus soojuseks, mida kantakse edasi aineosakestena pikalainelise kiirgusena [2].

Õhu mass on vaadeldaval ajahetkel päikese kiirguse poolt läbitava aineosakeste massi ja seniidis asuva päikese kiirguse poolt läbitava aineosakeste massi suhe. Päikesekiirguse nõrgenemine sõltub sellest, kui pika distantsi peab kiirgus Päikeselt Maale jõudmiseks atmosfääris läbima. Mida pikem on läbitav distants, seda rohkemate

aineosakestega kiirgus kokku puutub. Selle distantssi pikkus on pidevalt muutuv terve aasta kui ka päeva jooksul ning seda nimetataksegi õhu massiks [2].

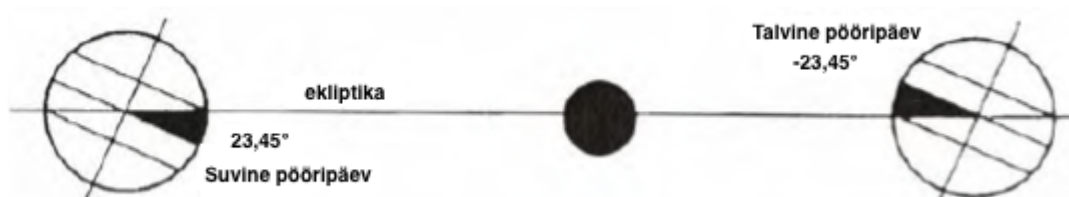
Maale jõudvat kiirgust on võimalik kiirguse hajumise tõttu vaadelda kahe komponendina, milleks on: otsekiirgus, hajuskiirgus. Otsekiirgus on kiirgus, mis jõuab Päikeselt Maale otsejoones. Hajuskiirguseks nimetatakse kiirgust, mis hajub enne Maale jõudmist atmosfääris olevate pilvede ja veemolekulide tõttu ja seetõttu ei jõua enam maale sirgjoonelise trajektooriga. Kiirguse hajumine võib toimuda ka siis, kui tegemist on otsekiirguse peegeldumisega maapinnalt, eriti talvel, kui esineb lumikate ja sellist kiirgust nimetatakse peegeldunud kiirguseks. Maapinnale jõudva päikesekiirguse jaotumine otsekiirguse ja hajuskiirguse vahel on väga tugevalt sõltuvuses ilmastikuoludega. Päikesepaistelise ja pilvitu taevaga ilma korral on moodustab kogu kiirgusest hajuskiirgus ainult 10-20% ja kogu ülejäänud kiirgus on otsene kiirgus. Pilviste ilmade puhul kus puudub otsene ere päikesevalgus on valdav enamus kiirgusest hajuskiirgus. Maapinnale jõudev kiirgus ongi kõigi kolme eelnevalt mainitud kiirguste, ehk siis otsekiirguse, hajuskiirguse ja ka peegeldunud kiirguse summa [2].

1.3 Päikese geomeetria

Maa on peaaegu kerakujuline planeet, ligi 12 700 kilomeetrise läbimõõduga, mis tiirleb ümber päikese mööda elliptilist trajektoori ja pöörleb ümber oma telje. Päikese ja Maa omavaheline distantss selle elliptilise trajektoori tõttu on aasta ringselt muutuv vahemikus 147 kuni 152 miljonit kilomeetrit. Maksimaalne vahemaa Päikese ja Maa vahel on 1. juulil, 152 miljonit kilomeetrit ja minimaalne kaugus on 1. jaanuaril, 147 miljonit kilomeetrit. Täis tiir ümber päikese kestab 365,24 päeva (365 päeva, 5 tundi, 48 minutit ja 46 sekundit) ja kalendriaasta pikkuseks on 365 päeva, mistõttu on korrigeerimise eesmärgil iga nelja aasta tagant liigaasta, kus veebruaris on 28 päeva asemel hoopiski 29 päeva [4].

Päikese positsiooni kirjeldamiseks piisab vaid kahest nurgast, kõrgusnurgast ehk altitudist (α) ja asimuudist (z). Siiski, et neid kahte nurka määrata, on vajalik defineerida kaks lisanurka, deklinatsioon (δ) ja aegnurk (h) [5].

Maakera pöörlemistelg ja tema elliptilise tiirlemistrajektoorist tekkinud pind ehk ekliptika asetsevad omavahel $23,45^\circ$ nurga all (vt. Joonis 1.2).



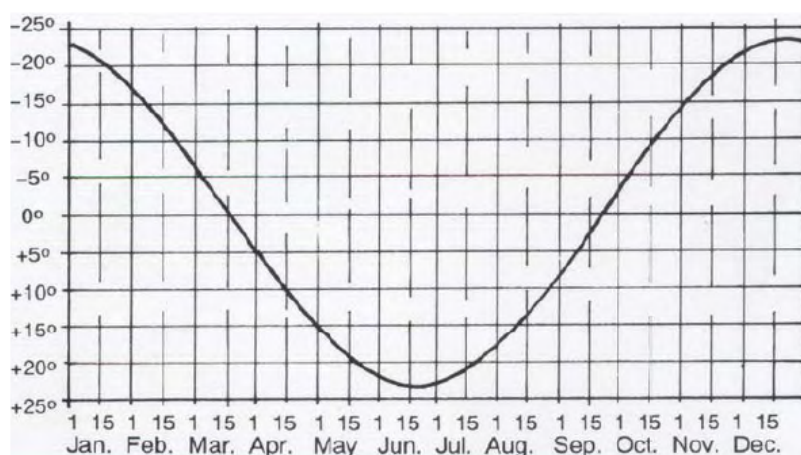
Joonis 1.2 Maakera asend päikese suhtes ühe aasta vältel [4]

Seetõttu tekib ka ekvaatori tasandi ja ekliptika vahele nurk δ , mida nimetatakse deklinatsiooniks, mis iseloomustab päikese kulminatsiooni (päikese igapäevane maksimaalne kõrgus) ja ekvaatori tasapinna vahelist suhet kraadides [6] ja on leitav kasutades valemit 1.3.

$$\delta = 23,45^\circ \sin \left[\frac{360}{365} (n + 284) \right], \quad (1.3) [5]$$

kus δ – deklinatsioon, °

Deklinatsioon on muutuv vahemikus $+23,45^\circ$ (suvine pööripäeval) kuni $-23,45^\circ$ (talvine pööripäev) [4]. Eestis on TalTechi asukohta geograafilistel koordinaatidel (59.396288820490845, 24.67107770718369) „Earth System Research Laboratories“ [7] lehe andmetel kõige pikemaks päevaks suvine pööripäev, mis 2021 aastal esineb 21. juunil. Sel päeval tõuseb päike 04:04 ja loojub 22:43, mis teeb päeva pikkuseks 18 tundi ja 39 minutit. Sel päeval on päikese deklinatsiooninurk 23,44 kraadi. Pärast seda päeva hakkab iga päev päikesevalgust aina vähem olema, kuni talvise pööripäevani, mis on 21. detsembril (vt. Joonis 1.3). Siis tõuseb päike 09:18 ja loojub 15:21, mis tähendab, et aasta kõige lühema päeva pikkuseks on 6 tundi ja 3 minutit. Sel päeval on ka deklinatsioon saavutanud suvisele pööripäevale vastandväärtuse, ehk $-24,44$ kraadi. Deklinatsioon omandab väärtuse 0° ühe aasta jooksul kaks korda, kevadisel ja sügisel pööripäeval, mille ligikaudne esinemiskuupäev on 22. märts ja 21. september (vt. Joonis 1.3). Deklinatsioon on ka põhjuseks miks Päike ei paista alati samal kõrgusel ja sama nurga alt, mistõttu tekivad aastaajad (kevad, suvi, sügis, talv).



Joonis 1.3 Deklinatsiooni väärtuse muutumine aasta jooksul [4]

Aegnurk on nurk, mis iseloomustab päikese kirjeldatud positsiooni erinevust keskpäevast. See on ajas lineaarselt muutuv, kuna maa teeb ühe täispöörde 24 tunni jooksul. See tähendab seda, et iga ühe tunni kohta muutub see nurk täpselt 15 kraadi.

Nurk on enne keskpäeva negatiivse ja pärast keskpäeva positiivse väärtusega ning seda on võimalik arvutada kasutades selleks valemit 1.4 [5].

$$h = (\text{kohalik aeg} - 12) * 15^\circ, \quad (1.4) [5]$$

kus h – aegnurk, °

Päikesekiirte langemist maapinnale iseloomustatakse altituudi ja asimuudiga. Altituud ehk kõrgusnurk on kuni 90° nurk mis esineb päikesekiire ja horisontaalpinna vahel ja on leitav valemiga (vt valem 1.5). Asimuut on nurk, mis iseloomustab paikese paiknemist põhjapooluse suhtes, mis jääb vahemiku $0^\circ \pm 180^\circ$, kus ida poole pöörates on nurk positiivne ja lääne poole pöörates negatiivne (vt. valem 1.6) [5].

$$\sin \alpha = \sin \varphi * \sin \delta + \cos \varphi * \cos \delta * \cos h, \quad (1.5) [5]$$

kus α – kõrgusnurk, °

φ – asukoha geograafiline laius, °

$$\sin z = \frac{\cos \delta * \sin h}{\cos \alpha} \quad (1.6) [5]$$

kus z – asimuut, °

2. PÄIKESEPANEELID

Päikeselt tulenev kiirgus on võimalik muuta elektriks, kasutades selleks kütuste asemel päikesepaneeli ehk PV (*photovoltaic*) -paneele. PV-paneelid töötavad fotoelektrilise efekti põhimõttel, kus kokkupuutel päikesekiirgusega vabastavad pooljuhid endas elektrone, mille kinni püüdmisel ja suunatud juhtimisel saadakse elektrivool [1]. Päikese abil on võimalik elektrit toota ka päikesekiirguse kontsentreerimisega soojuselektrijaamades. Seal suunatakse päikesekiirgus peeglite abil kindlasse punkti kõrge temperatuuri saamise eesmärgi nimel, mida kasutatakse omakorda vee või mõne muu vedeliku kuumutamiseks, et saadud auru abil liigutada turbiine elektri genereerimiseks. [8] Selles töös käsitletakse põhjalikumalt ainult PV-paneeli ja nendega elektrienergia tootmist.

2.1 PV-paneelide tööpõhimõte

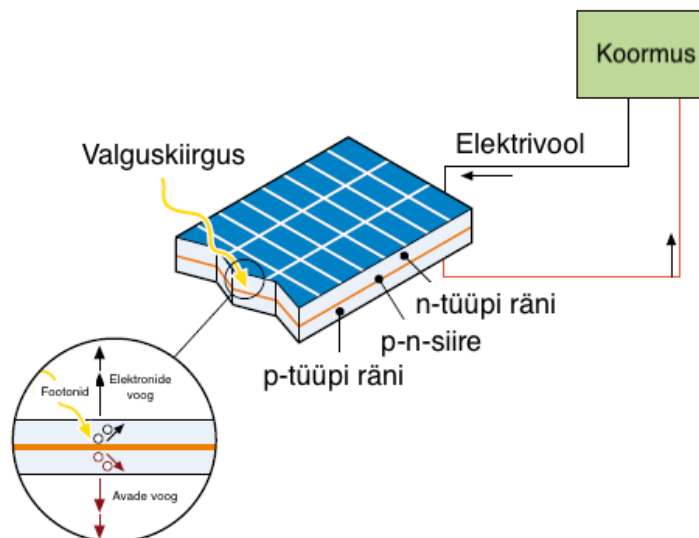
On olemas mitmeid tehnoloogiaid, mida on võimalik kasutada elektri tootmiseks lähtudes fotoelektriliste elementide tööpõhimõttest. Enimlevinud meetod on selleks kasutada ränist moodustatud polü- ehk mitmekristallilisi ning mono- ehk ühekristallilisi fotoelektrilisi elemente. Päikesepaneelid moodustuvad räni elementidest, mis on paigutatud kohakuti asetsevatesse õhukestesse, umbes 0,3 mm paksusega kihtidesse, mille pindala varieerub enamasti 100 cm² kuni 225 cm². [8] Mida suurem on päikesepaneeli pind, seda rohkem elektrit on võimeline ta tootma. [1]

Esimene PV-paneeli kiht on tehtud ränist, mida on rikastatud väikese koguse fosforiga, mille elemendil on räniga võrreldes välisel kihil üks elektron rohkem. Kui fosfori aatom omastab räni aatomi asukoha, vabaneb üks negatiivse laenguga elektron, mis liigub edasi räni poolt moodustatud kristallkihti, kus ta saab vabalt liikuda. Selle vabalt liikuda negatiivse laenguga elektroni tõttu nimetatakse seda kihti n-tüüpi (*n-type*) räniks.

Teist kihti nimetatakse p-tüüpi kihiks, kus esinevad positiivse laenguga osakesed, mille ränist moodustatud kristallkiht omastab talle lisatud boori tõttu. Positiivse laengu tekke põhjuseks on boori aatomi välise kihi elektronide arv, mis on ühe võrra väiksem kui ränil, mistõttu ei jagu piisavalt elektrone, et moodustada stabiilse oleku jaoks kõik vajaminevad kovalentsed sidemed kahe aatomi vahel. Selle tõttu tekivad teise räni kihti avad (ingl. k. *holes*), mis käituvad kui vabad positiivsed osakesed, kuhu vabad elektronid üritavad liikuda. [8]

Kui n-tüüpi ja p-tüüpi kihid omavahel kokku paigutada, moodustub nende vahel p-n-siire (ingl. k. *p-n junction*). Vabalt liikuvad elektronid ja avad tõmbuvad omavahel, mille käigus liiguvad n-tüüpi elektronide rikkalt poolelt p-tüüpi poolele, kus on elektronide defitsiit, tekitades sedasi p-tüüpi poolel negatiivse laengu. Samamoodi juhtub ka n-tüüpi poolega, kuhu liigub liigses koguses avasid ehk positiivseid osakesi, tekitades sinna positiivse laengu (vt. Joonis 2.1). Sedasi tekibki kahe ränikristallidest moodustatud kihi vahel vajalik elektriväli. [1]

Valgusosakeste ehk fotonite langemine kristalsele ränile kutsub esile elektronide vabanemise kristallvõrest. Kuid mitte iga foton ei kutsu esile elektronide vabastamist kristalselt ränist, vaid fotonit energialaeng peab jääma kindlasse energiavahemikku (ingl. k. *bandgap*), et see suudaks eraldada elektroni tema kovalentsest sidemest, mis võimaldaks tal saada osaks vooluringist. Kristalsest ränist elektroni lahti saamiseks on vajalik 1,1 elektronvolti (eV), kuid sobib ka suurem väärtus, millega kaasneb liigse energia eraldumine soojusena. [8] Kõik fotonite poolt vabastatud elektronid hakkavad omavahel sama laengu tõttu tõukuma ja liikuma. Elektrijuhtide kinnitamisel nii positiivsele kui negatiivsele poolele tekitatakse vooluring kus vabalt liikuvad elektronid tekitavad elektrivoolu, mida on võimalik juhtida läbi koormuse. [1]



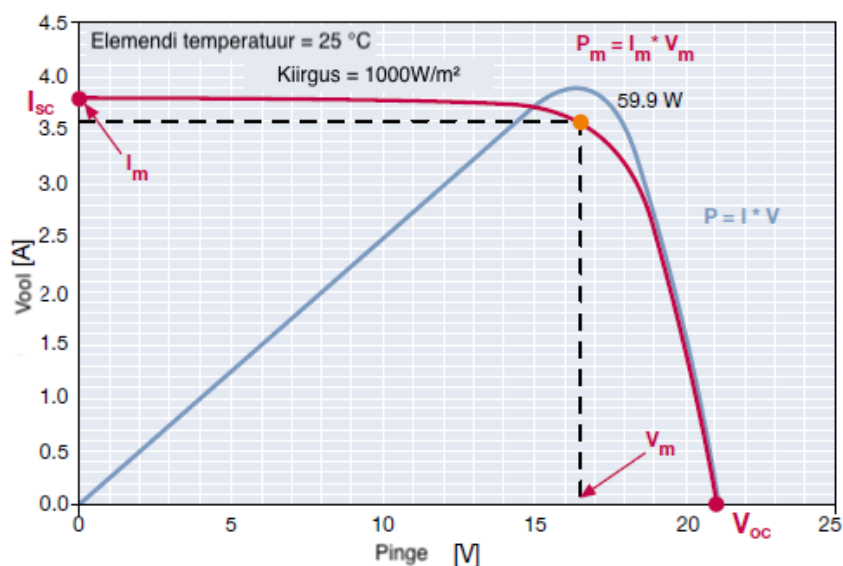
Joonis 2.1 Elektrivoolu tekkimine PV-paneelis [1]

2.2 PV-paneelide tootlikus

PV-paneelid suudavad keskmiselt neile langevast päikesekiirgusest elektri tootmiseks ära kasutada ligi 13%, mis ongi eelnevalt mainitud kindlasse energiavahemikku jääva

energialaenguga kiirgus. Ülejäänud 87% kiirgusest mida paneelid ei ole võimelised ära kasutama on paneeli pinnalt peegeldunud kiirgus (3%), liiga suure lainepikkusega footonid mis ei sobi elektronide vabastamiseks (23%), liiga lühikese lainepikkusega footonid (32%), neeldunud kiirgus uute sidemete loomiseks (8,5%), energia muundumine (20%) ja takistuskaod (0,5%). [1]

Paneelide tootlikust mõjutab 5 olulisemat tegurit: koormus, päikesekiirguse intensiivsus, temperatuur, varjud ja kristallvõrestiku struktuur. [8] Paneelidele avalduv pinge mõjutab oluliselt paneelide tootlikust. Et saavutada paneeli maksimaalne tootlikus, on oluline et paneel saavutaks kindla väärtusega koormuspinge, et võimsus oleks maksimaalne. Joonisel 2.2 on esitatud PV-paneeli võimsust iseloomustav karakteristik.



Joonis 2.2 PV-paneeli võimsuse karakteristik [1]:

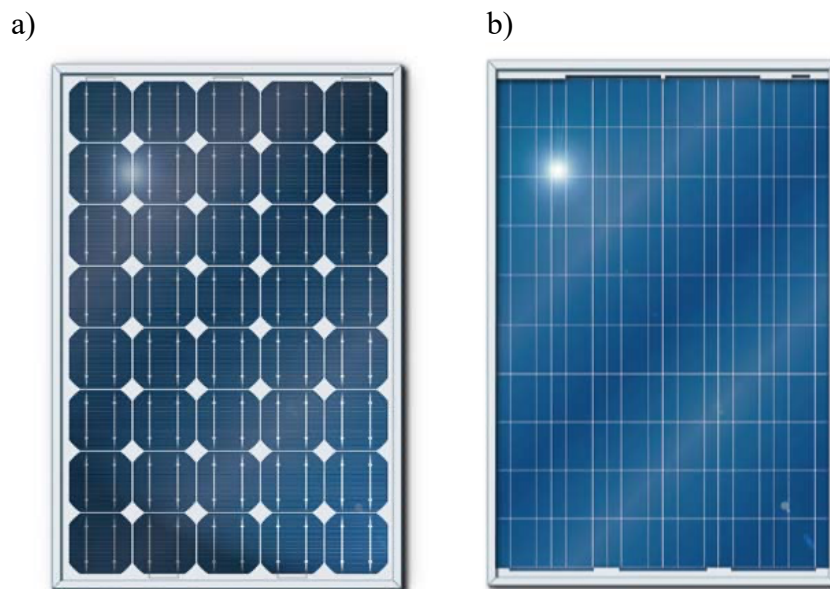
I_{sc} – lühisvool, V_{oc} – pinge avatud ahela korral, P_m – maksimaalne võimsus standardtingimuste korral, I_m – vool maksimaalse võimsuse korral, V_m – pinge maksimaalse võimsuse korral

Tootlikus on veel ka mõjutatud temperatuuri poolt. Paneeli päikeseelementide töötemperatuur STC ehk standardiseeritud testimistingimuste kohaselt (ingl. k *Standard Test Conditions*) on 25 °C, millest kõrgema temperatuuri korral toimib paneel vähemefektiivselt ja pinge paneelis langeb, kuna soojus käitub PV-paneelides kui takistusena elektronide liikumisele. Näiteks temperatuurivahemikus 80°C kuni 90°C langeb paneeli efektiivsus 0,5% võrra iga tõusnud kraadi kohta. [8]

Veel mõjutab tootlikust kiirguse efektiivsus. Mida tugevam on kiirgus, seda suurem on PV-paneeli tootlikus. Kindlasti tuleb vältida erinevate objektide varjude langemist paneelidele, sest 12 päikeseelemendist koosneva mooduli ühele elemendile varju

langemise korral võib kogu mooduli tootlikus langeda 75% võrra. See on ka üks põhjus, miks paneele paigutatakse tihti majade katustele, et varjude esinemise tõenäosus oleks võimalikult väike. [8]

Kristallvõre struktuuri järgi saab paneele liigitada mono- ehk ühekristallilisteks ning polü- ehk mitmekristallilisteks. (vt. Joonis 2.3).



Joonis 2.3 a) monokristallilistest elementidest PV-paneel [1], b) polükristallilistest elementidest PV-paneel [1]

Mono- ehk ühekristallilistest elementidest PV-paneelid koosnevad väga puhastest ränikristallidest, mis on välja lõigatud õhukeste kihtidena (0,2-0,25 nm) silindrilise kujuga plokkist. Sellise väljalõigatud kihi pealmist pinda on töödeldud sedasi, et sellele tekiks mikrosooned, mis vähendaks päikesevalguse peegeldumist päikeseelemendilt. Sellise ühekristalliliste elementidest koosneva PV-paneeli suurim eelis on ta kasutegur (14% kuni 17%) koos kõrge kvaliteediga, mis tagab sellise kasuteguri püsimise 10% täpsusega 20 aasta jooksul.

Polü- ehk mitmekristallilistest elementidest PV-paneelid on moodustatud räniosakestest mis on koondunud paneelis selliselt, et nad on erisuunalised ja eri kujuga. Polükristallne räni plokk on saadud räni sulatamisel ja valamisel ristküliku kujulisse vormi, mille lõikamisel 1,8 nm kuni 3 nm paksusega kihtideks saadaksegi PV-paneeli päikeseelementide kiht. Selliste paneelide kasutegur on 12 kuni 14 %, mis on madalam kui ühekristalliliste elementidega paneelidel, kuid nende hind on ka sellevõrra madalam. Monokristallist paneelide hinnaks on 2021 aasta jaanuari seisuga 0,31€/W ja polükristallpaneelide hinnaks 0,22€/W. [9]

3. PÄIKESE JÄRGIMISE SÜSTEEMID

Päikese järgimise süsteem on seade, mille eesmärk on hoida PV-paneelid risti päikesega. Kuna päikese positsioon on taevas muutuv läbi päeva, tõustes ühest ilmakaarest ja loojudes teise, on sellega otseses seoses ka PV-paneelide tootlikus. Et päikesepaneelide tööefektiivsus oleks suurim, peab see jäljendama päikese liikumist. Kui muidu on PV-paneelide konstruktsioon üsnagi lihtne, siis sellise süsteemi lisamine muudab need seadmed haldamise poolest aga omajagu keerulisemaks [10]. Järgimisseadmed võimaldavad elektrienergia tootlikust tõsta umbes ühe kolmandiku, võrreldes tootmissüsteemidega, mis on fikseeritud nurga all.

Sellise järgimissüsteemi rakendamisel PV-paneeli külge on mitmeid eeliseid:

- PV-paneelide tootlikus suureneb
- Maksimaalne efektiivsus
- Võimalik toota elektrienergiat kogu päeva vältel [11]

Järgimissüsteemid jagunevad oma tüübi poolelt kaheks: ühe ja kahe teljeline järgimissüsteem. Süsteemi järgimiseks kasutatava meetodi järgi on võimalik neid veel jaotada omakorda kolmeks: aktiivne, passiivne ja kronoloogiline järgimine.

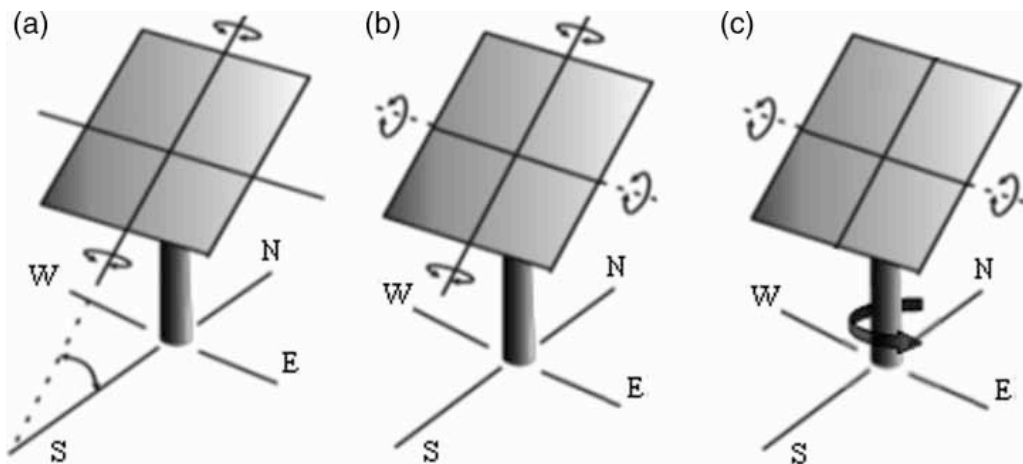
3.1 Ühe ja kahe teljeline järgimise süsteem

Ühe teljega järgimissüsteemi puhul toimub pöörlemine kas ümber horisontaaltelje või vertikaaltelje. Horisontaali suhtes pööravat järgimissüsteemi kasutatakse enamasti PV-paneelide jaoks pigem ekvaatori läheduses ehk väikeste laiuskraadidega asukohtades, kus päike tõuseb päeva jooksul väga kõrgele ning päevad on pigem lühemad. Vertikaaltelje osas pööravat süsteemi (vt. joonis 3.1, a) on efektiivsem kasutada jällegi suurtematel laiuskraadidel, nagu näiteks Eestis, kus päike tõuseb läänest ja loojub itta ning püsib suhteliselt madalal võrreldes ekvatoriaalse vööndiga. Sedasi on võimalik vertikaaltelje osas liigutada PV-paneeli fikseeritud kaldenurga all päikesega kaasa [10]. Selle süsteemi puhul on võimalik ka muuta hooajaliselt süsteemi kaldenurka, et PV-paneel oleks suurema tootlikkusega. [12]

Kahe teljega järgimissüsteemi puhul on võimalik seda liigutada nii horisontaaltelje kui ka vertikaaltelje suhtes. Seetõttu, on see ka sobilik kasutamiseks igal pool üle maailma ja tagab maksimaalse efektiivsuse PV-paneelide elektrienergia tootmise puhul. Soltuvalt

järgimissüsteemi maaga asetsevast peateljest, on võimalik liigitada neid kaheselt: kallutuspõhimõttelised ja pöörampõhimõttelised.

Kallutuspõhimõttelised süsteemidega püsib selle külge kinnitatud panel fikseeritud kõrgusel maa osas ja toimub ainult paneeli iseenda liikumine. (vt, joonis 3.1, b) Pöörampõhimõttelised süsteemid on ülesehituse poolelt sellised, kus horisondi suhtes toimub liikumine süsteemi külge kinnitatud PV-paneeli kinnituse juurest ja vertikaaltelje suhtes pöörab ennast seadeldise jalg, mille külge on kinnitatud paneel. (vt Joonis 3.1, c) [10].



Joonis 3.1 Päikese järgimissüsteemide tüübid [10]

3.2 Järgimissüsteemide meetodid

Et järgimissüsteemi üldse tema külge kinnitatud PV-paneeli telgede osas liigutada, on selleks vaja saada mingisugune informatsioon päikese asukoha või siis tema täpse liikumistrajektoori kohta. Selle saamiseks on kolm peamist võimalust, mille järgi järgimissüsteeme on võimalik ka liigitada:

- Aktiivjärgimine
- Passiivjärgimine
- Kronoloogiline järgimine

Aktiivjärgimise puhul on tegemist meetodiga, kus päikese asukoha määramiseks kasutatakse andureid, mis mõõdavad päikese kiirgust kindlates punktides, mille põhjal liigutatakse paneel päikesega ristuvasse asendisse. Sellised andurid on kinnitatud päikesevarju kujulise konstruktsiooni külge, kus iga andur mõõdab päikese kiirguse tugevust. Võrreldes horisontaalteljes ja vertikaalteljes paaris paiknevate andurite

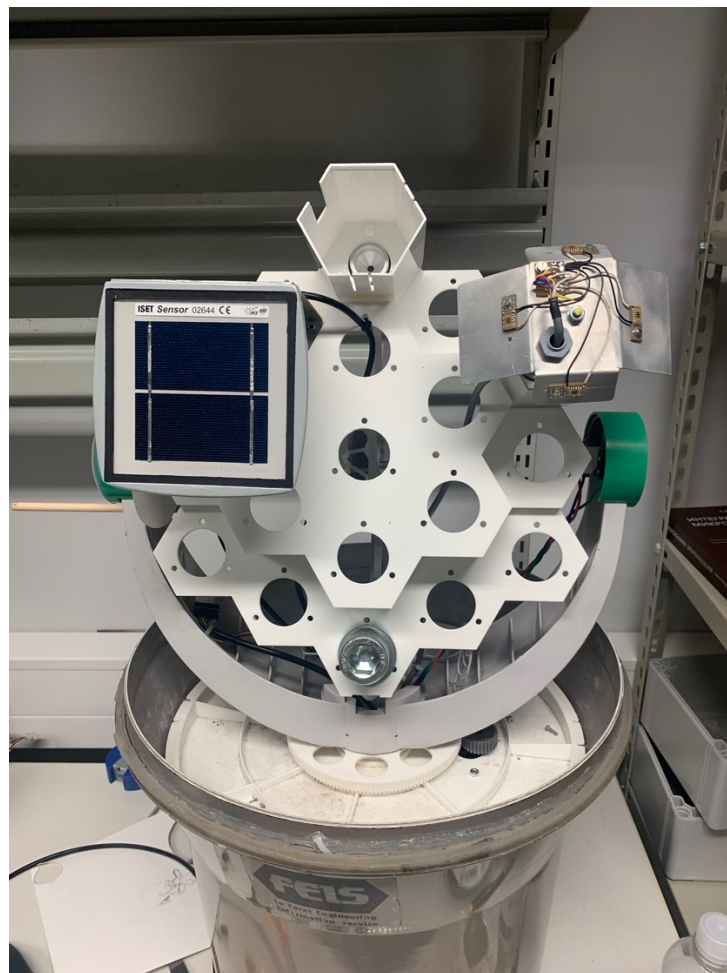
möödetulemuste erinevusi, on võimalik kindlaks määrata päikese asukoht. [11] Selline meetod on vägagi täpne, kuid selle suurim miinus on ebatäpne päikese positsiooni määramine pilviste ilmade puhul, kui päikesekiirguse suund moonutatakse pilve tõttu [12].

Passiivjärgimist viiakse läbi kasutades selleks kahte erinevat rõhupunkti kummaski järgimisseadme otsas. Selleks on võimalik kasutada näiteks vasktorusid, mis on täidetud kergelt aurustuva vedelikuga. Selline toru paigutatakse mõlemasse PV-paneeli serva ja kui üks nendest on otseses kontaktis päikesekiirgusega ja teine on varjus, hakkab päikese käes olev anum paisuma ja muutub raskemaks ja varjus olev muutub kaalult kergemaks. Sedasi on võimalik täiesti passiivselt ja ilma mootoriteta PV-paneeli päiksega risti hoida. Võrreldes aktiivlahendustega on tegemist väga vähe hooldust nõudva süsteemiga, kuid selle mehhaaniline disain peab olema äärmiselt täpne, et saavutada täpselt ristuv positsioon päikese suhtes [10].

Kronoloogilist põhimõtet kasutav järgimissüsteem jälgib päikese liikumist ajas, kus seade liigub fikseeritud kiirusel ühest positsioonist teise. Seda on võimalik teha kuna on teada, et päike liigub taevas ühe tunni kohta 15 kraadi. Selle jaoks on vaja järgimissüsteemile enda juhtmoodulit, kuhu on eelnevalt peale laetud informatsioon päikese geograafilise asendi kohta, et kindlate valemite põhjal oleks võimalik arvutil välja arvutada päikese asukoht ja edastada see informatsioon mootoritele, mis PV-paneeli päikesega risti hoiavad [10].

4. SUURE TÄPSUSE JA KÕRGE LAHUTUSVÕIMEGA PÄIKESEKIIRGUSE MÕÕTESEADE

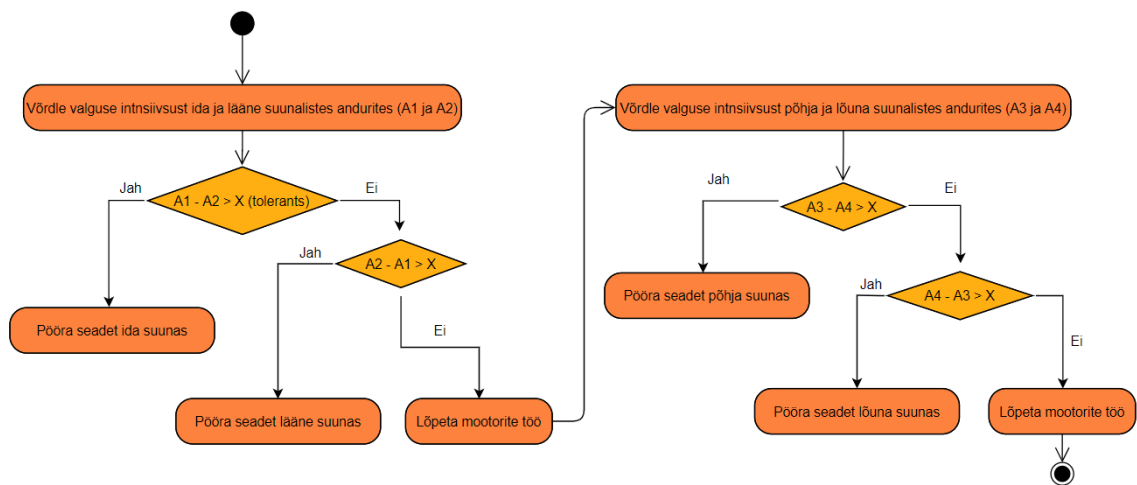
Antud töös käsitletakse Tallinna Tehnikaülikooli energetika maja katusel olevat suure täpsuse ja kõrge lahutusvõimega päikesekiirguse mõõteseadet (vt. Joonis 4.1). Seadme eesmärk on järgida päikese liikumist ja mõõta päikeselt tuleneva kiirguse intensiivsust. Kiirguse mõõtmiseks on seadme külge paigaldatud kalibreeritud ISET päikesesensor. Tegemist on sensoriga, mille sisse on ehitatud PT 1000 temperatuuriandur, millega on võimalik kindlaks määrata päikesekiirgust mõõtvast sensori töötemperatuur ja selle abil saadud mõõtetulemust parandada, et tulemuseks saada võimalikult täpne informatsioon päikesekiirguse tugevuse kohta.



Joonis 4.1 Päikesekiirguse mõõteseade

Eesmärgil, et antud kalibreeritud päikesesensor oleks päikeselt tuleneva kiirgusega püsivalt ristuvast olekus, on mõõteseadmele paigaldatud 4 valgustundliku andurit. Need andurid on paigaldatud päikesevarju kujulisele konstruktsioonile nii, et päikesega risti olles oleks kõikide andurite lugem sama. Kui andurite lugem erineb üksteisest,

liigutatakse samm-mootorite abil masinat sellele vastavalt niikaua, kuni on saavutatud soovitud tolerants valgustundlike andurite mõõtetulemustes (vt. Joonis 4.2).



Joonis 4.2 Masina juhtimisloogika

Antud mõõteseadmehel esinesid aga olulised puudused. Nimelt kui mõõteseade oli juhuslikult sattunud rikkesse, polnud võimalik selle kohta tagasisidet saada. Antud bakalaureusetöö ülesandeks kujuneski vajalike positsiooniandurite abil tagasiside loomine, mille abil on võimalik paremini jälgida süsteemi olekut ja päikese asendit taevas kindlal hetkel. Selleks on vajalik paigaldada seadmele kaks positsiooniandurit, kus üks andur annab tagasisidet päikese altituudi ehk kõrgusnurga kohta ja teine mõõteseade asimuutnurga kohta. Antud töös kasutatakse Avagon Technologies-i AEAT-6012-A06 magnetilisi kodeerimisseadmeid, mis võimaldavad mõõta asendit täpsusega 0,0879 kraadi, mis on võrdeline 4096 mõõtepunktiga ühe täispöörde kohta. Antud andurid on mõeldud keskkonda, kus temperatuurivahemik jääb piirkonda -40°C kuni 125°C [13], mis on Eestis kliimat arvestades sobilik ja garanteerib oma mõõtetäpsuse ka Eestis esinevate kõige kuumemate ja külmemate ilmade korral.

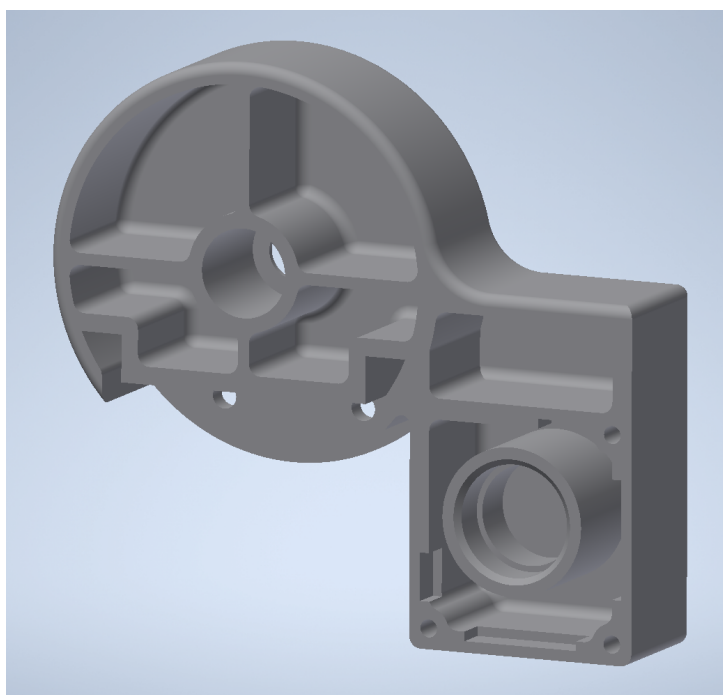
Kõikide detailide modelleerimiseks kasutati programmi Autodesk Inventor 2021 ja printimiseks programmi Ultimaker Cura 4.9.0.

4.1 Altituudi järgimise positsioonianduri liigendi kujundamine

Altituudi nurga järgimiseks vajalik positsioonianduri korpus modelleeriti päikese järgimise süsteemi varasemalt olemasoleva detaili asemele, luues sellele juurde eraldi sektsioon enkoodri kinnitamiseks. Et magnetiline kodeerimisseade liiguks vastavalt

mõõteseadme liikumisele, loodi hammasrattastega ülekandemehhanism, mille abil pöörati enkoodri sees olevat magnetit vastavalt mõõteseadme liikumisele, et saada andmeid masina kallutusnurga kohta. Loodud süsteem kallutusnurga järgimiseks koosneb kokku viiest 3D-prinditud detailist, millest kolm detaili on korpuse osad ja kaks detaili hammasülekande osad.

Korpuse esimene ja kõige suurem detail modelleeriti olemasoleva detaili järgi, kuid seda sai muudetud vastavalt vajadusele. Uue tüki disainimisel lähtuti originaaldetaili mõõtmetest, et 3D-prinditud komponent sobiks seadme külge sama hästi kui originaal. Kuna mõõtmed originaalkomponendi kohta olid puudulikud, oli vajalik nende ise käsitsi teostamine. Tulemuseks saadi originaali sarnane tükk, millele oli lisatud sektsioon, mida oli vaja ülekandemehhanismis kasutatava hammasratta kinnitamiseks (vt Joonis 4.3). Selle korpuse kolme nurka tehti avad läbimõõduga 3mm, mida kasutatakse korpuse detailide kruvidega üksteise külge kinnitamiseks. Samuti tehti detailide raamide sisse täpsemaks ja kindlamaks kinnitamiseks positsioneerimisavad, kuhu järgmise kinnitatava detaili küljes olevad lisasektsioonid täpselt sisse sobivad. Detaili fikseerimiseks masina külge kasutati samasid kruve, mida oli kasutatud ka originaalsel komponendil.

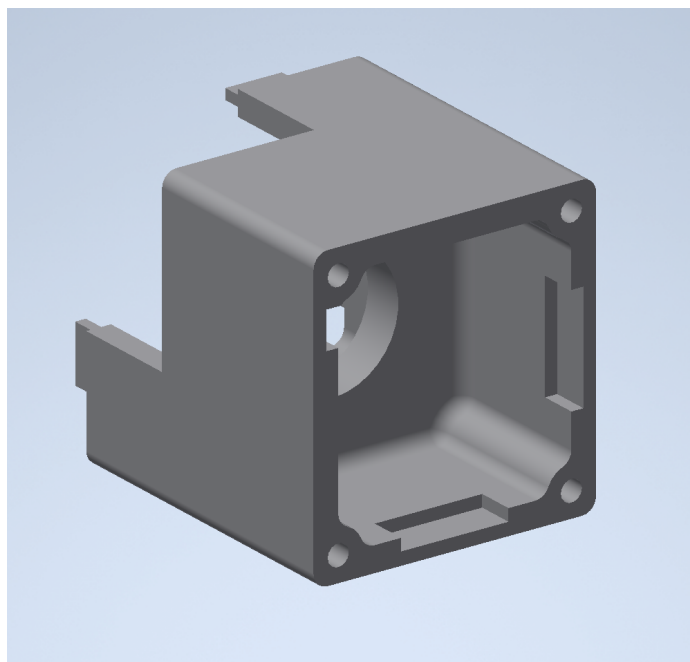


Joonis 4.3 Korpuse esimene detail

Et ülekandeks vajalik väiksem hammasrattas saaks pöörelda, oli vajalik kasutada laagreid mille peale hammasratta võll toetuks. Valitud sai 6mm avaga 19mm suurused

laagrid, mille kinnitamiseks modelleeriti korpuse sisse spetsiaalne pesa. Korpuse sisse paigaldatud laagri paigast liikumise vältimiseks loodi pesa täpselt sama suurusega nagu laagri väline diameeter, ehk 19mm, kuhu see jõuga sisse suruti. Lisaks sellele tehti pesa sügavusse eraldi kitsam soon, mis ei lubanud laagril liiga sügavale liikuda.

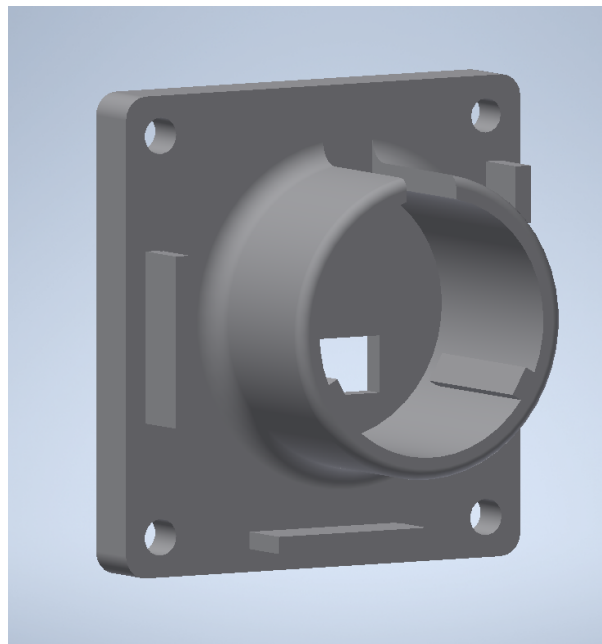
Korpuse teine detail (vt Joonis 4.4) sai disainitud selliselt, et selle sisse oleks võimalik kinnitada samas mõõdus laager, nagu korpuse 1. detailis. Selleks sai korpuse sisse tehtud 7mm paksusega vahesein. Vaheseina tehti 19mm suurune ava koos 1mm suuruse faasiga, et laagrit oleks seina sees olevasse avasse kergem suunata. Korpuse 2. detaili kujundades pidi meeles pidama, et see ei tohi takistada kahe hammasratta vahelist ülekannet, mispärast kinnitati detailid omavahel vaid kolmest nurgast, kuhu tehti 3mm suurused avad. Detaili ühte otsa tehti lisasektsioonid, mis sobivad kokku korpuse esimeses detailis olevate positsioneerimisavadega. Detaili teises otsas kasutati viimase detaili ehk kaane kinnitamise lihtsustamiseks samasugust positsioneerimisavadega lahendust, mistõttu tehti ka sinna vajalikud pesad.



Joonis 4.4 Korpuse teine detail

Esimese kodeerimisseadme kinnitamiseks vajaliku korpuse viimane detail toimib justkui kaanena kogu komplekti küljes, mille sisse omakorda paigutatakse kodeerimisseadme sensor koos tema kestaga (vt joonis 4.5). Kodeerimisseadme elemendi kinnitamiseks modelleeriti korpuse kolmandale detailile vastava diameetri ja sügavusega pesa koos fikseerimissoontega. Kuna kodeerimisseadme elemendi diameetriks oli 26mm, tehti pesa 1mm suurem ehk 27mm, kuna sooviti vältida detaili jõuga avasse surumist, mis võib detaili kahjustada. Vältimaks olukorda, kus pärast detaili sisestamist pessa pole

seda võimalik enam kätte saada, jäeti selle ühte külge tühi soon, mis võimaldab koodri vajadusel pesast eemaldada. Fikseerimissooned loodi selleks, et vältida koodri avas liikumist, mis muudaks mõõtmise ebatäpseks. Tähelepanu pöörati ka kodeerimisseadmelt andmete lugemiseks vajalikule ühendusele, mistõttu tehti korpuse detaili vastavasse kohta ava, mille kaudu oli võimalik luua juhtmega ühendus kodeerimisseadme ja mikrokontrolleri vahel. Tüki kinnitamiseks korpuse teiste elementide külge loodi tüki igasse nelja nurka 3mm suurused avad ja lisaks tehti veel juurde lisasektsioonid, mis sobivad kokku korpuse 2. detailis olevate positsioneerimisavadega.



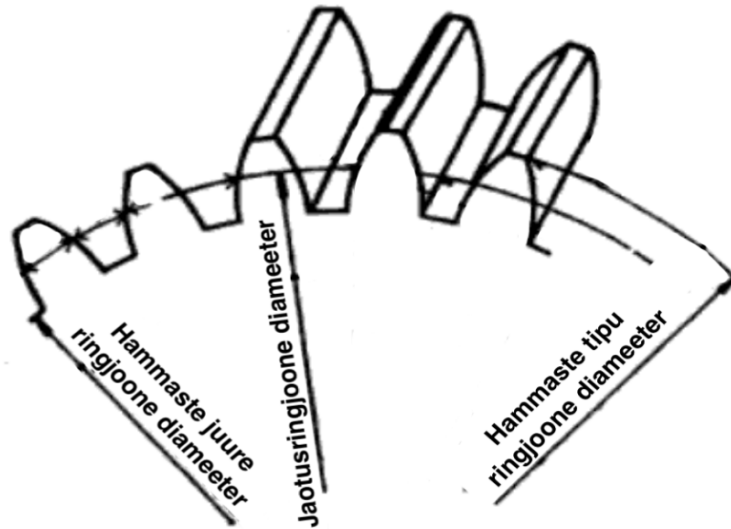
Joonis 4.5 Korpuse kolmas detail

4.2 Altitudi järgimise hammasülekande kujundamine

Enne hammasrataste disainimist tuleb mõista, kuidas hammasrataste mõõtmeid kirjeldada tuleb. Tegemist on keerulisi geomeetrisi parameetreid omava elemendiga, mida antud töös süvitsi ei analüüsita, kuid tuuakse ülevaade vaid teatud parameetritest, mis osutusid oluliseks vajamineva positsioonianduri liigendi kujundamisel.

Hammasrataste läbimõõtu on võimalik kirjeldada tema keeruka geomeetriselise konstruktsiooni tõttu mitme erineva diameetriga. Peamiselt kirjeldatakse hammasrataste suurusi jaotusringjoonte diameetritega (ingl. k *pitch circle diameter*), kuid olemas on ka veel kaks teist diameetrit, mis mõõdetakse kas hammaste tipust või

põhjast. (vt. Joonis 4.6) Hammaste tipust mõõdetavad diameetrit nimetatakse hammaste tipu ringjoonte diameetriks (ingl. k *tip circle diameter*) ja põhjast mõõdetavat diameetrit nimetatakse hammaste juure ringjoone diameetriks (ingl. k *root circle diameter*) [14].



Joonis 4.6 Hammasrattast iseloomustavad diameetrid

Positsiooni täpseks määramiseks oli vajalik leida lahendus, kuidas on võimalik liigutada magnetilise kodeerimisseadme sees olevat magnetit vastavalt mõõtesüsteemi liikumisele, et saada tagasiside päikese altituudi kohta. Selleks modelleeriti seadme horisontaaltelje külge hammasrattaga ülekandemehhanism. Kuna päikese kõrgusnurk ei saa olla mitte mingil juhul suurem kui 90 kraadi, sai hammasrattaste disainimisel lähtutud sellest, et hammasrattaste ülekandesuhteks kujuneks 1:3,75 ehk $\frac{4}{15}$ (vt valem 4.1). Sedasi on võimalik kodeerimisseadmega teha ära peaaegu et täisring, mis annab täpsema mõõtetulemuse, sest nii kasutatakse ära suurem hulk positsioonianduri mõõtepunkte.

$$u = \frac{r_2}{r_1}, \quad (4.1) [15]$$

kus u = ülekandesuhe

r_1 = väiksema hammasratta jaotusringjoone raadius, mm

r_2 = suurema hammasratta jaotusringjoone raadius, mm

Edasi tuli kindlaks teha korpuse esimesel detailil oleva kahe hammasratta paiknemise tsentrite vaheline kaugus, milleks osutus 60,83 mm. Selle tulemusel oli võimalik avaldada üks radiustest:

$$a = r_1 + r_2 \rightarrow r_2 = a - r_1, \quad (4.2) [15]$$

kus a = hammasrataste tsentrite vaheline kaugus, mm

Kombineerides kaks eelnevat valemit, on võimalik avaldada ülekande suhe sedasi, et on arvestatud ka kahe hammasratta tsentrite vaheline kaugus:

$$u = \frac{a - r_1}{r_1} \quad (4.3) [15]$$

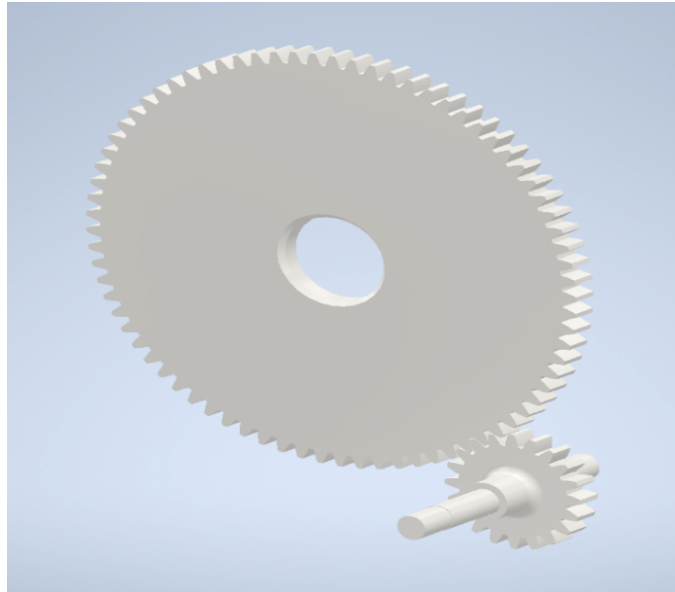
Järgnes vajaminevate hammasrataste raadiuste arvutamine, milleks kombineeriti eelnevalt näidatud valemeid:

$$r_1 = \frac{a}{u + 1} = \frac{60,83}{\frac{4}{15} + 1} = \frac{18249}{380} \approx 48,02 \text{ (mm)} \quad (4.4) [15]$$

$$a - r_2 = \frac{a}{u + 1} \rightarrow r_2 = \frac{a * u}{u + 1} = \frac{60,83 * \frac{4}{15}}{\frac{4}{15} + 1} = \frac{6083}{475} \approx 12,81 \text{ (mm)}, \quad (4.5) [15]$$

Hammasrataste modelleerimiseks kasutati ära 2021 aasta Inventoris leiduvat Design Acceleratorit, mis võimaldab genereerida komponente vastavalt arvutustele. Antud ülesande puhul määrati kummagi hammasratta tsentrid ja nende vaheline kaugus, hambumismoodul ehk hamba kõrgus (käsitletavas töös 1,25mm), soovitud ülekandesuhte (eelnevalt mainitud 1:3,75), hammasrataste paksuse (käsitletavas töös sai selleks määratud 5mm, kuna antud hammasratastele ei suunata otsest koormust ja oluline on ainult täpne liikumine) ja kahe hammasratta tsentrite vaheline kaugus. Sellest lähtuvalt lõi Inventor kaks hammasrattast, mille raadiused vastasid arvutustes saadud tulemustele. (vt. Joonis 4.7). Et väiksema hammasratta külge oleks võimalik kinnitada ka enkoodri magnet, sai selle tsentrisse modelleeritud võll diameetriga 6mm, mis läbib korpuse sees olevaid laagreid. Võlli otsast 8mm pikkune osa kuhu paigaldati külge enkoodri magnet, sai tehtud vastavalt magneti korpuse sisediameetrile 5,7mm, kuna muidu ei oleks korpus võlli otsa mahtunud. Hammasrattast kummaski suunas tehti võll omakorda paksemaks, diameetriga 9mm, eesmärgil, et hammasrattal ei oleks võimalik kahe laagri peal istudes edasi-tagasi liikuda. Sedasi välditi olukorda, kus suurem ja

väiksem hammasratas võivad liikumise käigus sattuda positsiooni kus ei paikne enam ühel joonel ja ülekannet ei toimu, sest hambad jooksevad üksteisest mööda.

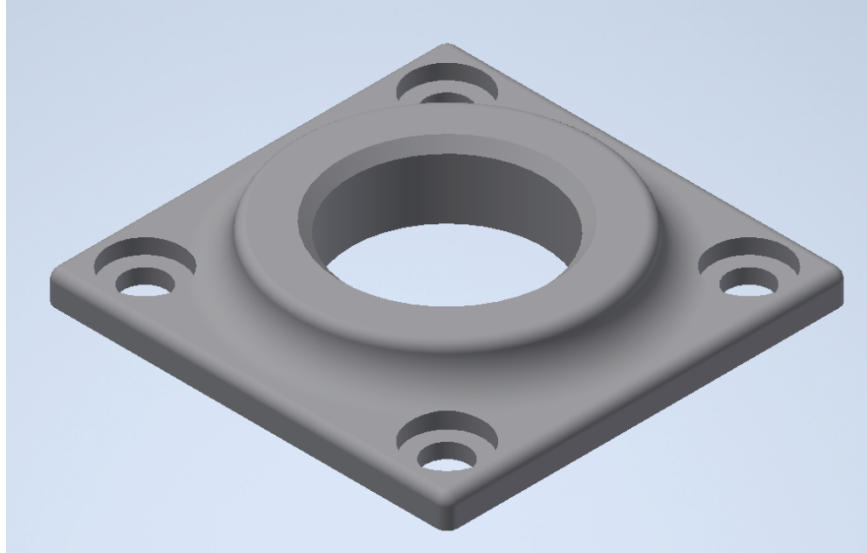


Joonis 4.7 Hammasülekanne

4.3 Asimuudi järgimise positsioonianduri liigendi kujundamine

Kodeerimisseadmega asimuudi nurga järgimiseks oli vajalik mõõteseadmele juurde modelleerida teine korpus koos hammasülekannega. Kuna mõõteseadme mootoriga pööramiseks on kasutatud hammasratastega süsteemi, oli võimalik juba seadme põhjas olevat hammasratat informatsiooni saamiseks ära kasutada. Kuna mõõteseadme konstruktsiooni tõttu polnud võimalik kodeerimisseadet koos vajalike detailidega masina põhja peale kinnitada, otsustati paigutada kõik peale hammasratta ja alusplaadi põhja alla. Sedasi ei takistanud lisatud elemendid mõõteseadme liikumist. Leitud lahendus koosnes kokku neljast 3D-prinditud detailist, millest üks detail oli hammasratas ja kolm tükki kodeerimisseadme kinnitamiseks vajaliku korpuse komponendid.

Hammasülekannde jaoks disainitud hammasratta kinnitamiseks mõõteseadme külge loodi eraldi 40x40mm mõõtmetega alusplaat (vt. Joonis 4.8). Plaadi kõrguseks kujunes 7mm, et kokku jooksvad hammasrattad paikneksid samal kõrgusel. Alusplaadi keskele loodi ava, mille sisse suruti laager, et hammasratta pöörlemine oleks sujuv. Plaadi kinnitamiseks mõõteseadme külge loodi igasse nurka 4,2mm suurused avad koos süvikutega, kust läksid läbi 50mm pikkused DIN 914 M4 poldid, mis pingutati korpuse teises otsas sobilike mutritega.



Joonis 4.8 Alusplaat

Kodeerimisseadme detail mis paikneb mõõteseadme põhja all sai modelleeritud vastavalt alusplaadi mõõtmetele. Lisaks oli oluline, et selle detaili sisse oleks võimalik paigutada laager sarnaselt alusplaadile, et hammasratta küljes olev võll liiguks võimalikult sirgelt ja sujuvalt. Selle jaoks kasutati ära samasugust lahendust nagu peatükis 4.1 korpuse teise detaili disaini juures, kus modelleeriti vahesein, mille keskel olevasse 19mm suurusesse avasse suruti sisse laager. Kuna selle detaili ühte otsa tuli kinnitada veel üks 3D-prinditud komponent, disainiti sinna positsioneerimisavad, mis suunasid kinnitatava detaili küljes olevate lisasektsioonide abil tüki õigesse kohta. Igasse nurka loodi 4,2mm avad, et modelleeritud komponente oleks võimalik üksteise külge kinnitada.

Korpuse otsadetail, mille sees paikneb kodeerimisseadme sensor koos kestaga, tuli peaaegu et identne esimese kodeerimisseadme juures loodud lahendusega. Ainukesteks erinevusteks olid positsioneerimisavade jaoks mõeldud lisasektsioonide suurused, mis olid mõnevõrra suuremad kui enne. Seda võimaldas täpselt detaili keskel paiknev kodeerimisseadme jaoks mõeldud pesa, mis esimese lahenduse puhul paiknes keskpunktist mõnevõrra vasakule. Detaili nurkades tehtud avad tehti sobilikuks valitud poltide jaoks, ehk siis 4,2mm suuruseks. Samaks jäeti ka otsadetaili paksus 5mm, kuna see peaks olema piisavalt tugev, et vastu pidada poltide külge keeratud mutrite tekitatud pingele.

4.4 Asimuudi järgimise hammasülekande kujundamine

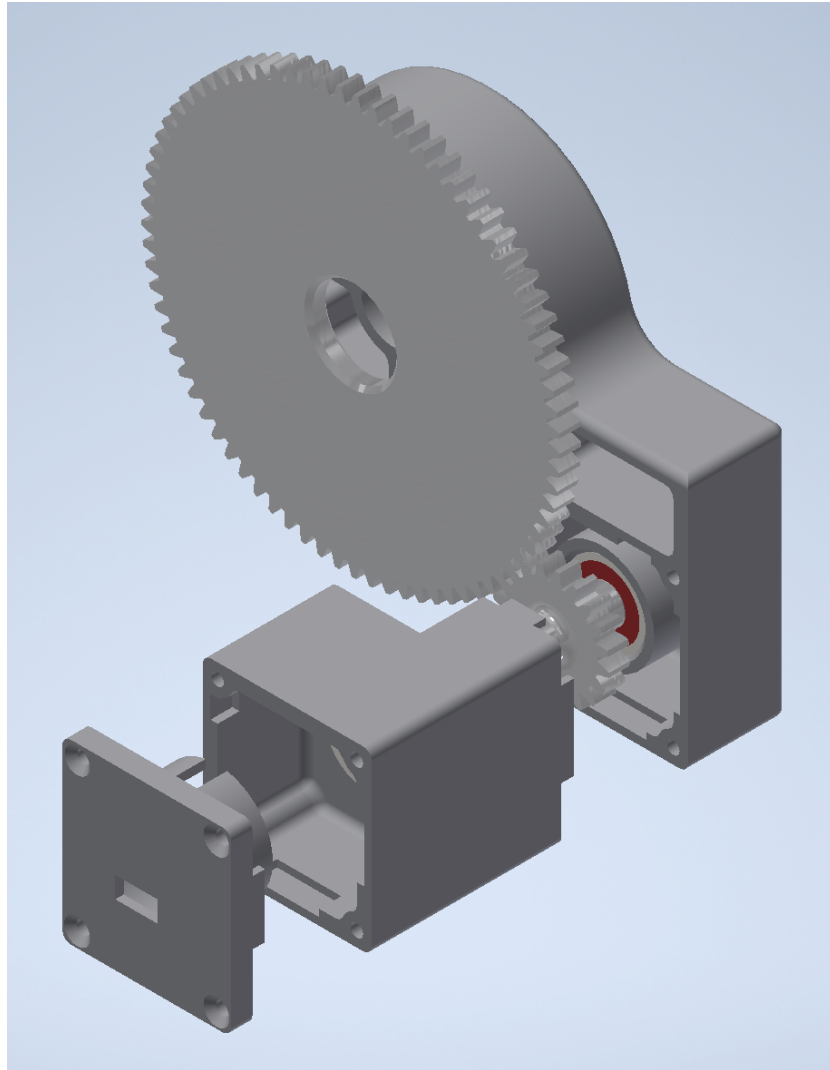
Mõõteseadme pöördnurga kohta tagasiside saamiseks otsustati ära kasutada põhja külge fikseeritud hammasratast, mida kasutati mootoriga mõõteseadme pööramiseks. Hammasülekande jaoks vajamineva teise hammasratta modelleerimiseks oli vajalik teada saada olemasoleva hammasratta dimensioonid. Kuna andmelehed masina mõõtmete ja hammasrataste kohta puudusid, oli vajalik mõõtmiste ise käsitsi teostamine. Hammasratta mõõtmine osutus keerukaks, kuna seda ei olnud võimalik seadme küljest lahti saada. Hammasratta übermõõdu 10 mõõtmise keskmiseks tulemuseks saadi ligikaudu 470mm, millest sai tuletada diameetri (D):

$$C = 2 * \pi * r = \pi * D \rightarrow D = \frac{C}{\pi} = \frac{470mm}{\pi} \approx 150 mm$$

Järgmisena sai kokku loetud mitu hammast oli olemasoleval hammasrattal, et teada saada hammasratta moodul, mis iseloomustab nii hammasratta diameetri ja hammaste arvu suhet kui ka hamba kõrgust. Kokku loeti 150 hammast, millest järeldati, et hambumismoodul on 1. Sama tulemus saadi ka siis, kui käsitsi hammasratta hamba kõrgust mõõdeti. Antud tulemuste põhjal sai Inventoris Design Acceleratorit kasutades valmis modelleerida kaks kokku sobivat hammasratast. Käsitletavas töös pidi arvestama sellega, et kodeerimisseadme pööramiseks kasutatav hammasratas peab mahtuma ka mõõteseadme sisse ära, seetõttu otsustati teha hammasrattad ülekanandesuhtega 1:2, ehk siis modelleeritud hammasratas tuli läbimõõduga 75mm. Antud hammasrattale disainiti külge ka 6mm diameetriga võll, mille otsa kinnitati kodeerimisseadme magnet.

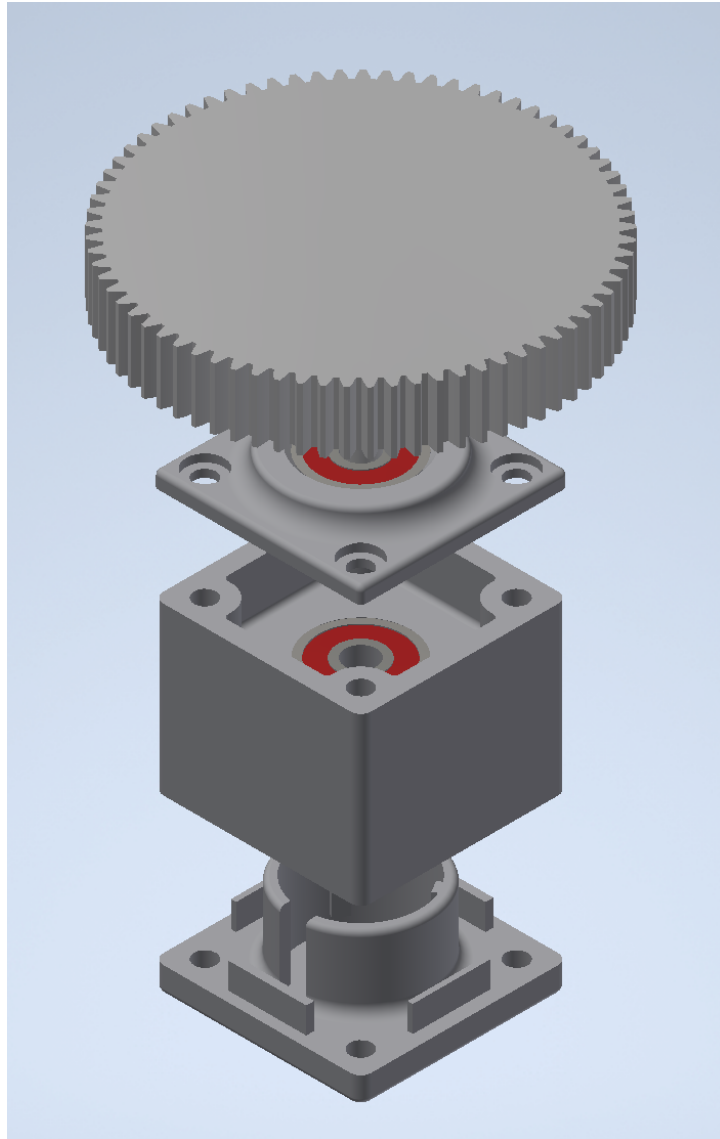
4.5 Peatüki kokkuvõte

Eelnevates peatükkides loodi Tehnikaülikooli energeetika maja katusel olevat suure päikesekiirguse mõõteseadmele positsioonianduritega vajaminev tagasiside, et masina töö kulgemise kohta oleks võimalik saada vajaminev informatsioon. Päikese altitudist tingitud masina positsiooni kohta loodi liigend (vt. Joonis 4.9), kus informatsiooni saamiseks kasutati ära hammasülekanne. Masina külge fikseeriti hammasratas, mille liikumisel pandi pöörlema teine hammasratas, mille abil sai positsiooniandurit kasutades soovitud informatsiooni.



Joonis 4.9 Altituudi järgimise liigendi koost

Et oleks võimalik saada tagasisidet ka päikese asimuudi muutumise kohta, kasutati samuti hammasülekanne. Selle lahenduse puhul oli võimalik ära kasutada juba masina küljes olevat hammasratat ja kuhu loodi juurde sellega kokku sobiv teine hammasratat, Hammasratta koostöö tagamiseks positsioonianduriga loodi liigend (vt. Joonis 4.10).



Joonis 4.10 Asimuudi järgimise liigendi koost

5. POSITSIOONIANDURITELT TAGASISIDE SAAMINE ARDUINO MEGA 2560 ABIL

Käsitletavas töös kasutati positsioonianduritena Avagon Technologies-i AEAT-6012-A06 magnetilisi kodeerimisseadmeid, millelt saadi tagasiside SSI (ingl. k *Synchronous Serial Interface*) protokollil alusel koostöös Arduino Mega 2560 mikrokontrolleriga, mille seadistamiseks kasutati Arduino IDE 1.8.13 tarkvara. Arduino Mega 2560 valiti just selle suur sisendite hulga tõttu, mis võimaldas mikrokontrollerit kasutada ära ka muude vajalike mõõteseadme poolt saadud mõõtetulemuste lugemiseks ja edastamiseks.

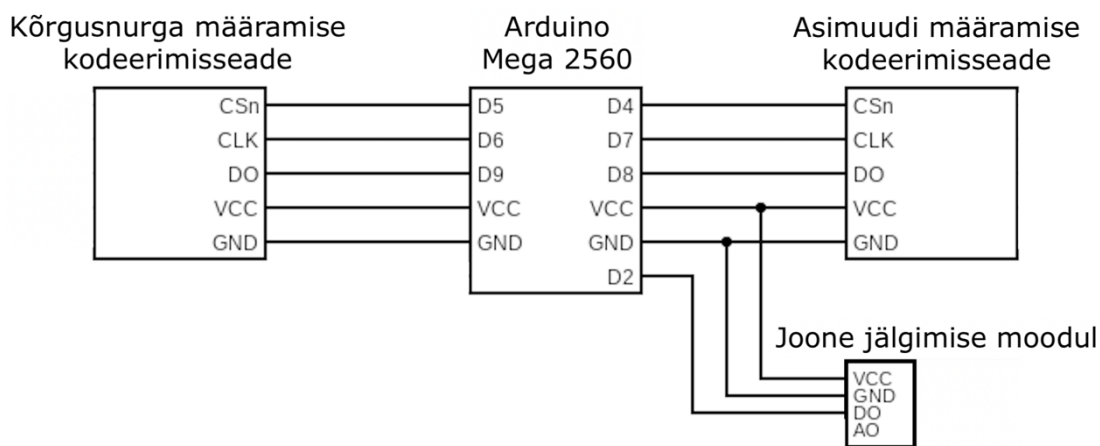
Synchronous Serial Interface ehk SSI on sünkroonne jadaliides, mida kasutatakse seadmetega, mille eesmärk on absoluutväärtuse edastamine, näiteks nagu positsiooni määravad andurid. SSI võimaldab luua jadaliideses andmeedastuse, kus edastatakse positsiooni kirjeldatavat absoluutväärtust. Sünkroonne jadaliides võimaldab andmete ülekannet, kus positsiooni andmeid edastatakse andurilt vastavalt kontrolleri poolt saadud kellatakti järgi. Andmete edastus algab alati suurima kaaluga bittiga (MSB). Nii andmeedastus kui ka kellatakti liin on ooteolekus kõrgel nivool ja kellatakti väärtuse muutumisel madalaks hakkab toimuma andmeedastus, mis kestab seni kaua, kuni kellatakti nivoo on saavutanud oma esialgse, kõrge oleku ja on edastatud ka vähima kaaluga bitt. Kellatakti väärtuse madalaks ja kõrgeks muutumise tsükli ajal edastatakse andmeid positsiooni muutumise kohta tsüklites, minimaalselt 25 mikrosekundilise ajavahemikuga. [16]

Arduino Mega 2560 on mikrokontroller, mis on üles ehitatud ATmega2560 protsessori peale. Sellel kontrolleril on 52 digitaalset sisendit/väljundit, millest 15 on sobilikud pulsilaiusmodulatsiooni (ingl. k *Pulse Width Modulation*) jaoks, 16 analoog sisendit. Lisaks sellele on kontrolleril veel 4 UART (ingl. k *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*) porti, 16MHz sagedusega kristallostsillaator, USB pesa, ICSP (ingl. k *in-circuit serial programming*) pesa, toitepesa ja algseadistustele sätestamise (ingl. k *reset*) nupp [17].

5.1 Kodeerimisseadmete ja mikrokontrolleri vaheliste ühenduste loomine

Kummagi kodeerimisseadme ühendamiseks mikrokontroller Arduino Mega 2560-ga oli vajalik luua 5 elektrilist ühendust. Kuna kodeerimisseadmetega ei tulnud kaasa sobiliku

kaablit mikrokontrolleriga ühendamiseks, oli see vajalik ise luua. Valitud kodeerimisseadmed vajasisid signaali edastamiseks viite ühendust, millest lähtuvalt võeti juhtmete valmistamiseks sobilikus pikkuses 6 sooneline kaabel, Molexi 5 avaga 1,25mm vahemikega juhtmeotsade kest ja sinna sisse sobivad metallist otsmikud kaablite kinnitamiseks. Kaablis olevale viiele soonele joodeti ühte otsa metallist otsikud, mis omakorda paigutati kesta sisse ja isoleeriti selliselt, et juhtmeotsad ei puutuks omavahel mitte mingil juhul kokku, kuna muidu pole võimalik mikrokontrolleril andurilt sobivat signaali saada. Loodi ühendused 5 voldise toitepinge (VCC), maanduse (GND), kiibi valiku (CSn), kellatakti (CLK) ja positsiooni andmete edastamise (DO) jaoks. Kaabli teise otsa joodeti vajalikud juhtme otsad, et oleks võimalik luua ühendus mikrokontrolleri peal olevate piikribadega (vt. Joonis 5.1).



Joonis 5.1 Elektriliste ühenduste skeem

Peatükis 4.4 on mainitud, et asimuudi järgimiseks loodud hammasülekanne jaoks modelleeriti hammasülekanne, kus esines ülekanne suhe 1:2. Selline ülekanne suhe tekitab aga olukorra, kus mõõteseadme 360 kraadisel pööramisel teeb kodeerimisseadme sees olev magnet kaks täisringi. Antud töös kasutatavad kodeerimisseadmed võimaldavad küll mitut pööret, kuid ei saa aru mitmendal pöörandel kindlal ajahetkel paiknevad. Selle probleemi lahendamiseks lisati loodud süsteemile joone jälgimise moodulit.

Joone jälgimise moodul töötab järgmisel põhimõttel: Mooduli küljes on infrapuna kiirgust eritav element, mille kõrval paikneb andur, mis tajub kas eritatud kiirgus on keskkonna poolt tagasi peegeldunud või mitte. Vastavalt peegeldumisele edastab moodul oma väljundisse väärtuse 0 või 1. Moodul paigaldatakse mõõteseadme põhja külge fikseeritud hammasratta lähedale, kus hammasrattast modifitseeritakse selliselt, et esimesel kodeerimisseadme ringil on hammasratta hambad valged ja alates teisest

ringist on hambad mustad. Sedasi on võimalik saada valguse peegeldumisel loogiline väärtus 0 ja musta värvuse tõttu mitte peegeldumisel väärtus 1.

Altituudi nurga mõõtmiseks teisendati kodeerimisseadme käest saadud mõõtetulemus kraadideks ja võeti arvesse ka joone jälgimis mooduli käest saadud informatsiooni, mille põhjal järeldati kas asimuudi nurga kohta tagasisidet andev kodeerimisseade on 1. või 2. pöördel.

KOKKUVÕTE

Käsitletavas töös tegeletakse Tallinna Tehnikaülikooli energeetika maja katusel oleva suure täpsuse ja kõrge lahtusvõimega päikesekiirguse mõõteseadmega. Tegemist on päikese liikumist järgiva süsteemiga. Selle küljes oleva kalibreeritud päikeseanduri abil on võimalik saada informatsiooni kiirgusintensiivsuse kohta väga täpselt. Päikese liikumistrajektoori järgimiseks disainiti mõõteseadmele positsiooniandurite abil liigendid, mis võimaldavad saada tagasisidet masina positsiooni ning päikese kõrgus- ning asimuutnurga kohta.

Käsitletavas bakalaureusetöö teooria osas antakse põhjalik ülevaade päikeseenergeetikast, päikesepaneelidest ja päikese järgimise süsteemidest. Päikeseenergeetika osas on käsitletud päikeselt tulenevat energiat ja kiirgust, kirjeldatud lahti päikese liikumine ja sellest tingitud erinevad nurgad, mida on vaja päikese positsiooni kirjeldamiseks. Päikesepaneelide teooria osas on kirjutatud nende tööpõhimõttest ja tootlikust mõjutavatest teguritest. Kuna töö keskmeks on päikest järgiv süsteem, siis on antud ülevaade päikese järgimise süsteemide tüüpidest ja meetoditest.

Praktilises pooles tegeletakse mõõteseadme täiustamisega, disainides sellele kaks erinevat positsioonianduri liigendit. Eelnevalt puudus päikesekiirguse mõõteseadmelt tagasiside töö olekust ja kulgemisest ja ei olnud võimalik saada informatsiooni päikese taevasfääril paiknemise kohta. Disainiti valmis kaks liigendit, kus kasutati magnetilisi kodeerimisseadmeid koos hammasülekannetega, et oleks võimalik saada informatsiooni päikese kõrgusnurga ja asimuutnurga osas. Positsiooniandurilt informatsiooni saamiseks loodi vajalikud ühenduse kodeerimisseadmete ja mikrokontrolleri vahel, kus mikrokontrollerina kasutati Arduino Mega 2560 ja selle programmeerimiseks oli kasutuses Arduino IDE 1.8.13 programm.

Raalprojekteerimiseks kasutati programmi Autodesk Inventor ja printimiseks kasutati Ultimaker Cura 4.9.0. programmi.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] ABB, „Technical Application Papers No.10: Photovoltaic plants,” Bergamo, 2010.
- [2] W. Joakim ja M. Joakim, *Solar Radiation Theory*, Uppsala: Uppsala University, 2019.
- [3] A. Pareek ja L. Gidwani, „Solar Irradiation Data Measurement Analysing Techniques,” 2019.
- [4] S. V. Szokolay, „Solar Geometry,” 2007. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.plea-arch.org/wp-content/uploads/PLEA-NOTE-1-SOLAR-GEOMETRY.pdf>. [Kasutatud 17 märts 2021].
- [5] A. Al-Khazzar, „A comprehensive solar angles simulation and calculation using Matlab,” *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY AND ENVIRONMENT*, kd. 6, nr 4, pp. 367-376, 2015.
- [6] T. Tomson, *Helioenergeetika*, Tallinn: Humare, 2000.
- [7] E. S. R. Laboratories, „Global Monitoring Laboratory,” National Oceanic and Atmospheric Administration, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/>. [Kasutatud 10 aprill 2021].
- [8] M. Wasfi, „Solar Energy and Photovoltaic Systems,” *Journal of Selected Areas in Renewable and Sustainable Energy*, pp. 1-4, 2011.
- [9] „PV Magazine,” jaanuar 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.pv-magazine.com/module-price-index/>. [Kasutatud 17 aprill 2021].
- [10] B. D. Verma, A. Gour ja M. Pandey, „A Review Paper on Solar Tracking System for Photovoltaic Power Plant,” *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH & TECHNOLOGY (IJERT)*, kd. 09, nr 08, 2020.
- [11] R. Banerjee, „Solar Tracking System,” *International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP)*, kd. 5, nr 3, märts 2015.
- [12] P. C. C. Alexandru, „Simulation of a dual-axis solar tracker for improving the performance of a photovoltaic panel,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, kd. 224, nr 6, pp. 797-811, 2010.
- [13] A. Technologies, „AEAT-6012 andmeleht,” 12 august 2011. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.farnell.com/datasheets/1884437.pdf>. [Kasutatud 06 mai 2021].
- [14] G. M. Maitra, *Handbook of Gear Design*, New Delhi: Tata McGraw-Hill Education, 1994.

- [15] F. Roos ja C. Spiegelberg, „Relations between size and gear ratio in spur and planetary gear trains,“ Royal Institute of Technology,, Stockholm, 2004.
- [16] „KUNBUS,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.kunbus.com/ssi.html>. [Kasutatud 2 mai 2021].
- [17] „Arduino Mega 2560 REV3,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://store.arduino.cc/arduino-mega-2560-rev3>. [Kasutatud 07 mai 2021].