

Tartu Ülikool
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Tehnoloogiainstituut

Rein Kokassar

Sümmeetrilise PV inverteri energia kasutamise optimeerimine

Bakalaureusetöö (12 EAP)
Arvutitehnika eriala

Juhendaja:

Alvo Aabloo

Tartu 2025

Resümee/Abstract

Sümmeetrilise PV inverteri energia kasutamise optimeerimine

Roheenergia ja päikeseparkide kasutamine on viimastel aastatel Eestis järjest populaarsemaks muutunud. Eesti elektrivõrgu operaator Elektrilevi arvestab elektri tootmist ja tarbimist faaside kaupa eraldi, mis ei ole optimaalne sümmeetrilise väljundiga inverterite puhul. Selliste inverterite puhul jaotatakse energia kõigi faaside vahel võrdselt, sõltumata faaside tegelikust koormusest, mis põhjustab olukorra, kus osa toodetud energiast eksporditakse võrku samal ajal, kui teisest faasist imporditakse energiat, suurendades seega kulusid ja vähendades süsteemi üldist efektiivsust.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärk on uurida võimalusi, kuidas akuta sümmeetrilise väljundiga inverteriga päikesepargi omanik saaks efektiivsemalt ära kasutada enda toodetud elektrienergiat. Töö raames loodi prototüüpne lahendus, mis võimaldab automaatselt sisse lülitada takistuskoormusel põhinevaid elektritarbijaid, arvestades reaajas päikesepargi väljundvõimsust konkreetsel faasil ning elektri börsihinda. Prototüübi lahenduse osadena valmisid CHINT DTSU-666 nutiarvestilt andmeid koguv seade, releepõhine elektritarbijate juhtseade ning kasutajaliides Home Assistant koduautomaatika keskkonnas.

Töö tulemusena võib järeldada, et välja töötatud lahenduse kasutuselevõtt võimaldab päikesepargi omanikul saavutada arvestatava rahalise kokkuhoiu, võttes arvesse päikeseparkidele prognoositud 25-aastast eluiga.

CERCS: T120 Süsteemitehnoloogia, arvutitehnoloogia; T125 Automatiseerimine, robotika, juhtimistehnika; T146 Energia muundamine, salvestamine ja inseneriteadus

Märksõnad: sümmeetriline inverter, fotogalvaaniline energia, energiatarbimise optimeerimine, faasitasakaal, Home Assistant, MQTT, nutiarvesti

Optimising Self-Consumption with a Symmetric PV Inverter

The use of renewable energy sources and the popularity of photovoltaic power stations has notably increased in Estonia over recent years. The Estonian electricity grid operator, Elektrilevi, looks at energy import and export individually across 3 phases. This method is not optimal for symmetrical output PV inverters, which distribute their output evenly across all phases regardless of actual phase loads. As a result, some energy is unnecessarily exported to the grid from one phase, while energy is simultaneously imported from another phase, increasing costs and reducing overall system efficiency.

The goal of this bachelor's thesis was to develop a solution to improve the self-consumption of locally produced electricity from PV power stations using symmetrical inverters without battery capability. A prototype system was designed and implemented, capable of automatically switching resistance-based electrical loads on and off based on real-time PV generation data specific to each phase and current electricity market prices. The prototype is built around three key elements: a data acquisition device for retrieving measurements from a CHINT DTSU-666 smart meter, a relay-based device for controlling electrical consumers, and a user interface built in the Home Assistant home automation software environment.

As a result of this work, it can be concluded that the implementation of the developed solution provides notable financial savings for PV system owners, especially when considering the projected 25-year lifespan of PV installations.

CERCS: T120 Systems engineering, computer technology; T125 Automation, robotics, control engineering; T146 Energy conversion, storage, engineering

Keywords: symmetrical inverter, photovoltaic energy, energy management, phase balancing, Home Assistant, MQTT, smart meter

Sisukord

Resümee/Abstract	2
Jooniste loetelu	6
Tablelite loetelu	7
Lühendid, konstandid, mõisted	8
1 Sissejuhatus	9
1.1 PV inverterite ehitus ja tööpõhimõte	9
1.2 String ehk jadainverterid	10
1.2.1 Sümmetrilised inverterid	10
1.2.2 Asümmetrilised inverterid	11
1.3 Mikroinverterid	12
1.4 Töö eesmärk ja ülevaade	13
2 Ülevaade probleemist	15
2.1 Olemasolevad lahendused	15
2.2 Elektrihinna komponendid	15
3 Tehniline teostus	17
3.1 Home Assistant	17
3.2 Modbus-RTU protokoll	17
3.3 MQTT protokoll	18
3.4 Andmehõive nutiarvestilt CHINT DTSU-666	18
3.5 Seade elektritarbijate juhtimiseks	20
3.6 Kasutajaliides	23
3.7 Sobivad ja mittesobivad tarbijad relepõhiseks lülitamiseks	24
4 Tulemused	26
4.1 Seadme reageerimiskiirus PV muutusele	26
4.2 Tulemused negatiivse börsihinnaga päeva näitel	27
4.3 Tulemused pikemal ajavahemikul	29
5 Võimalikud edasiarendused	30
6 Kokkuvõte	31
Kokkuvõte	31

Viited	33
7 Lisad	36
Lisad	36
7.1 Programmikoodi ja 3D-failide repositoorium	36
7.2 Pildid valminud seadmetest	36
7.3 Seadmete elektrilisi ühendusi kirjeldavad skeemid	39
Lihtlitsents	40

Jooniste loetelu

1.1	Sümmeetrilise väljundiga inverteri tööd selgitav plokkdiagramm.	11
1.2	Asümmeetrilise väljundiga inverteri tööd selgitav plokkdiagramm.	12
1.3	Nutiarvesti CHINT DTSU-666. Foto: CHINT Global veebileht [16].	13
3.1	Andmehõiveseadme korpus FUSION360 keskkonnas.	19
3.2	Andmehõive töövoogu selgitab plokkdiagramm.	20
3.3	Elektritarbijaid juhtiva seadme korpus FUSION360 keskkonnas.	21
3.4	Elektritarbijaid lülitava seadme töövoogu selgitav plokkdiagramm.	22
3.5	Kuvatõmmis kasutajaliidesest <i>Home Assistant</i> keskkonnas.	24
4.1	Seadme reageerimismuutust kirjeldav histogramm.	27
4.2	PV tootlikus ja energia müügihind 27.04.2025 negatiivse hinnaga tundidel. . .	28
7.1	Tarbijaid lülitava seadme korpus.	36
7.2	Tarbijaid lülitava seadme korpuse sisemus ja komponendid.	37
7.3	Andmehõiveseadme korpus koos komponentidega.	38
7.4	Tarbijaid lülitava seadme elektriskeem.	39
7.5	Andmehõiveseadme elektriskeem.	39

Tablelite loetelu

2.1	Elektrilevi võrgupakettide päevased ja öised hinnad koos taastuenergia tasu ja elektriaktsiisiga [23].	16
4.1	Lülitusviite statistika (N=100)	27
4.2	Müügihinna ja toodangu tabel.	28
4.3	PV toodetud energia, gaasi hind ja kokkuvõid kuude lõikes.	29

Lühendid, konstandid, mõisted

AC – vahelduvvool(Alternating Current).

API – tarkvara suhtluskiht(Application Programming Interface).

Asümmeetriline inverter – inverter, mis jaotab väljundvõimsuse faaside vahel dünaamiliselt vastavalt koormusele [1].

CRC – veakontrolli kontrollsumma(Cyclic Redundancy Check).

DC – alalisvool(Direct Current).

DIN – Saksa standardmõõdus DIN-liist, millele kinnitatakse elektrikilbi komponente.

ESP32 – Wi-Fi-ga mikrokontroller, mida kasutati andmehõiveseadmes.

ESP8266 – Wi-Fi-ga mikrokontroller, mida kasutati koos releega elektritarbijate juhtimiseks.

GPIO – Mikrokontrolleri programmeeritavad sisend-/väljundviigud(General Purpose Input/Output).

IoT – asjade internet(Internet of Things).

kWh – kilovatt-tund.

MPPT – Maksimaalse võimsuspunkti jälgimine(Maximum Power Point Tracking).

MQTT – Kergekaaluline publish–subscribe andmeside protokoll(Message Queuing Telemetry Transport).

PV – fotogalvaaniline (PhotoVoltaic) süsteem, mis muudab päikeseenergia elektrienergiaks.

RS-485 – diferentsiaalne jadaliides andmesideks pikkadel vahemaadel.

Sümmeetriline inverter – inverter, mis jaotab väljundvõimsuse võrdselt kõigi faaside vahel [1].

1 Sissejuhatus

Elektrienergia kättesaadavus on tänapäeval iseenesest mõistetav ning üha enam on muutunud aktuaalseks säästlikum eluviis ning oma ökoloogilise jalajälje vähendamine. Eestis on üsna populaarseks saanud energiakulude kokkuhoiu eesmärgil majapidamistesse päikeseparkide rajamine. Elektrivõrgu olemasolu korral liidetakse enamasti oma päikesepark Elektrilevi võrguga ning sõlmitakse mikrotootja leping. 2023. aasta seisuga on Eestis Elektrilevi võrgus 11822 mikrotootjat [2]. Siiski on suur osa nendest päikeseparkidest ilma akuta ning seetõttu kasutavad sümmeetrilist PV inverterit. Nendel päikeseparkidel pole enda toodetud energia ära kasutamine inverteri ehituse tõttu nii hea kui asümmeetrilise inverteri korral. Siiski on igale investeeringu teinud inimesele oluline see, et tema soetatud süsteem töötaks võimalikult hästi. Selle asemel, et vahetada välja kallis inverter võimekama vastu, oleks vaja leida viise, kuidas kasutada sümmeetrilise inverteri olemasolu korral maksimaalselt oma toodetud elektrienergiat ära ning seeläbi vähendada võrgust ostetava elektrienergia kogust.

Lisaks on muutunud üha tihedamaks nähtuseks väga madalad või lausa negatiivsed elektri hinnad. Selline olukord tekib, kui elektriturul toodetav võimsus ületab nõudluse. Negatiivse hinna korral on mikrotootjal elektri võrku müümine kahjumlik, kuna energia ekspordimise eest makstakse iga müüdud kWh eest müüginimist, mille kogus on individuaalne ning sõltub sõlmitud lepingust. Null või negatiivsete hindade korral tähendab see päikesepargi omanikule tulu asemel hoopis seda, et energia tootmise ja võrku andmise eest tuleb peale maksta ning selline olukord ei soosi roheenergia arengu jätku. Kuna päikeseparkide eluajaks prognoositakse üle 25 aasta [3], on tasuvusaja vaatepunktist äärmiselt oluline kasutada päikesepargi potentsiaal ära maksimaalselt.

1.1 PV inverterite ehitus ja tööpõhimõte

Päikeseenergia inverter on päikeseelektrisüsteemi komponent, mille peamine ülesanne on päikesepaneelidest tuleva alalisvoolu (DC) muundamine majapidamises ja elektrivõrgus kasutatavaks vahelduvvooluks (AC). Lisaks elektrienergia muundamisele on inverteri ülesandeks ka päikesepaneelide MPPT ehk maksimaalse võimsuspunkti jälgimine, võrgusagedusega ja pingega sünkroniseerimine ning ohutuse tagamine rikete korral [4].

Kuna Elektrilevi arvestab elektri tootmist ja tarbimist faaside kaupa eraldi [5], siis on äärmiselt oluline päikesepargi disainimisel valida vastavalt päikesepargi funktsioonile korrektse väljundiga inverter. Juhul, kui päikesepargil on juba eelnevalt olemas sümmeetrilise väljundiga inverter, tuleb leida viise olemasoleva inverteri optimaalsemaks kasutamiseks või soetada uus inverter. Kuna inverter on päikesepargi kõige kallim komponent, siis saab tihti määravaks aspektiks seadme hind. Lihtsalt seadme väljavahetamine pole soodne lahendus, kuna asümmeetrilise inverteri hind [6] on kolm korda kõrgem kui sümmeetrilise inverteri hind [7]. Lisaks tähendaks

see täiesti toimiva seadme tööst väljavõtmist, millele järelturul on raske uut omanikku leida asümmeetrilise funktsionaalsuse puudulikkuse tõttu.

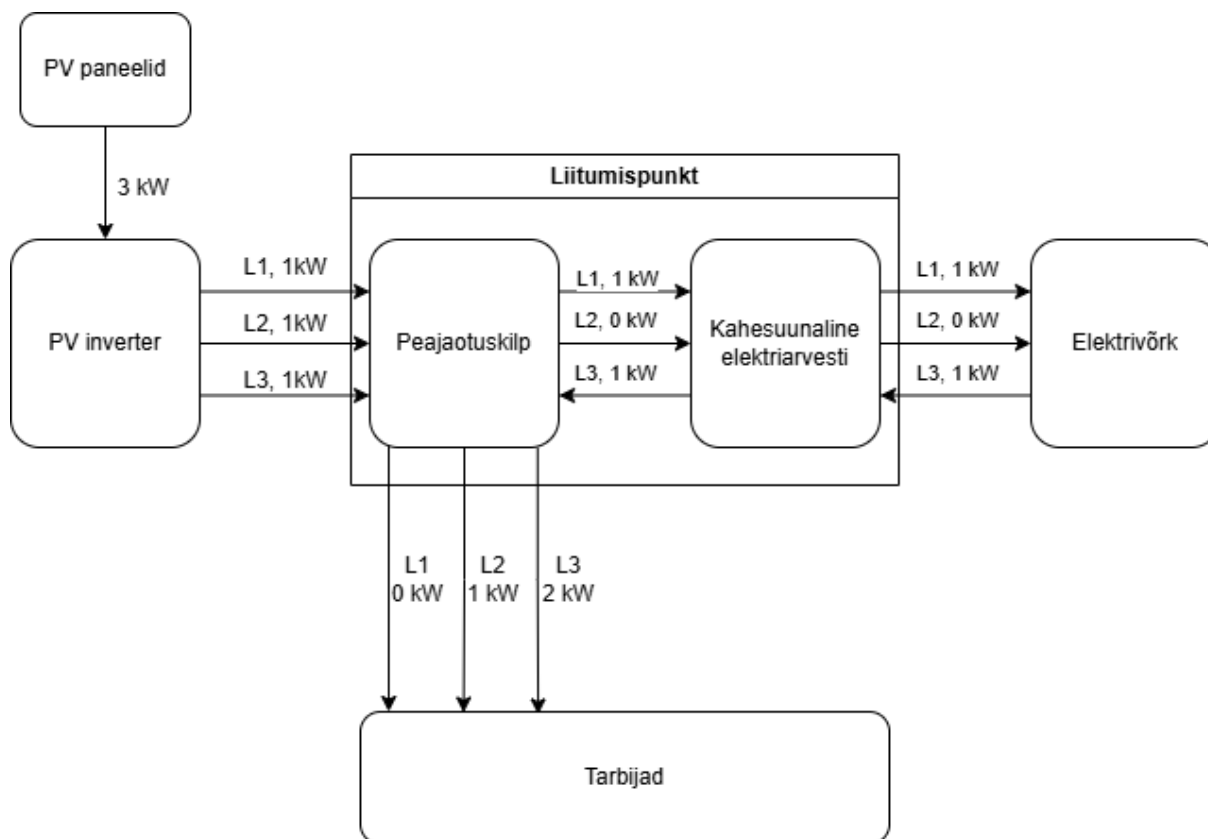
1.2 String ehk jadainverterid

Jadainverterid on päikeseparkides enim levinud energia muundamise viis, kus ühe inverteri sisendisse ühendatakse üks või mitu komplekti päikesepaneele, mis on omavahel jadaühenduses, et saavutada vajalik sisendpinge, mis vastab konkreetse inverteri nõutavatele parameetritele. Oma väljundilt jagunevad jadainverterid sümmeetrilisteks ja asümmeetrilisteks inverteriteks.

1.2.1 Sümmeetrilised inverterid

Sümmeetrilise inverteri korral jaotab inverter kogu oma muundatud energia kolme väljundfaasi vahel võrdselt [1]. Sellised inverterid on oma ehituselt lihtsamad kui asümmeetrilised inverterid ning see kajastub ka hinnas. Sümmeetrilised inverterid sobivad hästi päikeseparkidesse, mis on ainult ekspordile ehk energia võrku müümisele üles ehitatud ning lokaalselt toodetud energia tarbimist ei toimu. Teine levinud kasutuskoht on tööstushooned, kus on suure võimsusega kolmefaasilised tarbijad.

Sümmeetrilise inverteri kasutamine eramajas või talus ehk tavaliselt mikrotootja päikesepargis tekib olukord, kus hoones olevad tarbijad nagu külmkapid, pesumasinad, õhksoojuspumbad ja muu kodutehnika on ühefaasilised tarbijad ning nad töötavad erinevatel ajavahemikel, mitte üheaegselt. Selle tulemusena ei ole hoone faaside tarbimine tasakaalus. Päikesepargi omaniku vaatepunktist pole see optimaalne lahendus, kuna tekib olukord, kus päikesepargi paneelide toodang kataks ära kogu maja energiavajaduse, kuid inverteri ehituslike iseärasuste tõttu toimub ühelt faasilt energia eksport ehk makstakse müügi marginaali ja teiselt faasilt energia import ehk makstakse võrgutasusid.

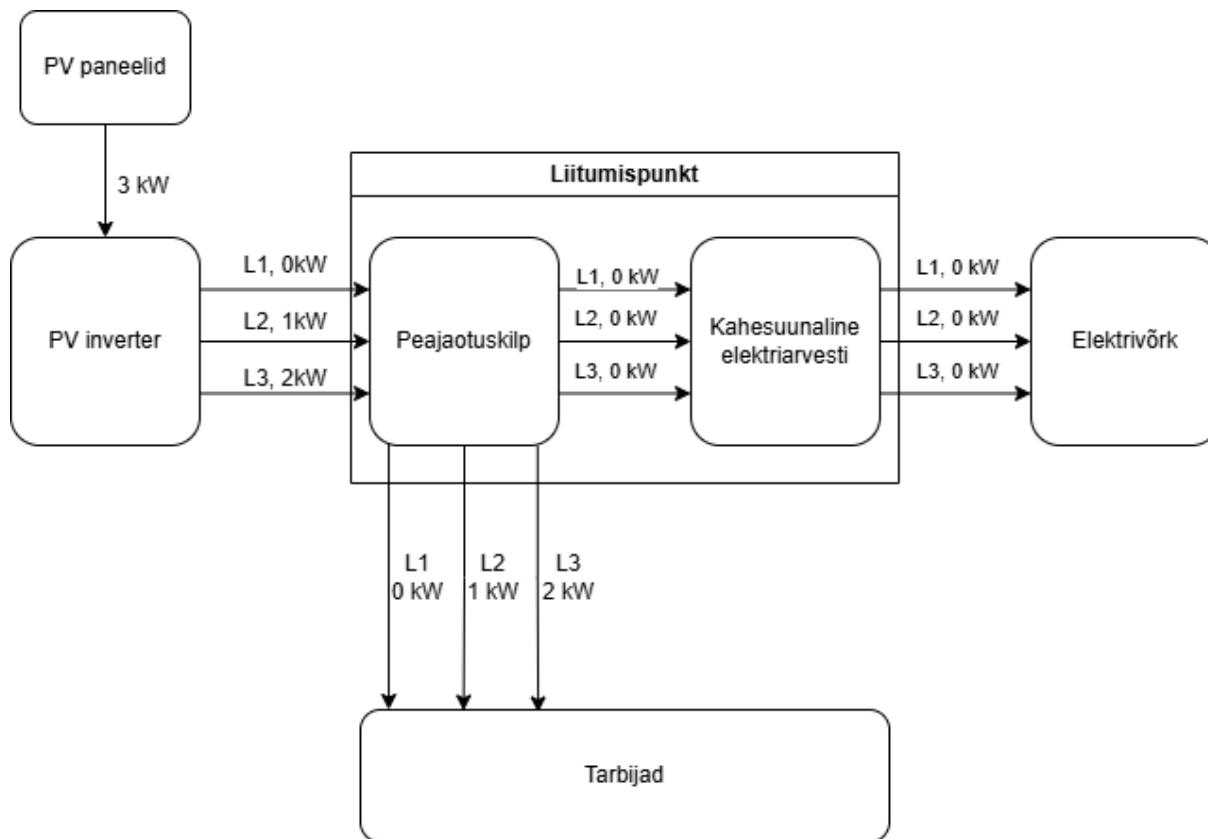


Joonis 1.1: Sümmeetrilise väljundiga inverteri tööd selgitav plokkiagramm.

Plokkiagrammil on kirjeldatud olukord, kus päikesepaneelide toodetav võimsus on 3 kW. Elektrisüsteemi faasid on tähistatud L1, L2 ja L3. Jooniselt on näha, et inverter jaotab oma väljundi võrdselt faaside vahel. Kuna faasidel olev tarbimine ei kattu inverteri väljundiga, tekib eelevalt kirjeldatud olukord, kus 3 kW tootluse ja 3 kW tarbimise korral toimub elektrivõrgust samaaegselt 1 kW võimsuse ostmine ja 1 kW võimsuse müümine.

1.2.2 Asümmeetrilised inverterid

Asümmeetrilised inverterid on erinevalt sümmeetrilistest inverteritest võimelised juhtima oma väljundvõimsust faaside vahel vastavalt koormusele [8]. Inverter kasutab oma võimsuse juhtimiseks informatsiooni faaside koormuste kohta, mis saadakse nutiarvestilt.



Joonis 1.2: Asümmeetrilise väljundiga inverteri tööd selgitav plokkiagramm.

Asümmeetrilise inverteri puhul on plokkiagrammilt näha sümmeetrilise inverteriga samasugune alguspunkt ehk 3 kW tootmine ja 3 kW tarbimine, kuid võrgust müümist ega ostmist ei toimu. Enamasti suudavad Eesti turul pakutavad asümmeetrilised inverterid hoida oma väljundit inverteri nimivõimsusest 1/3 ulatuses asümmeetrilisena.

1.3 Mikroinverterid

Mikroinverterid on väikesed inverterid, mis paigaldatakse iga päikesepaneeli külge eraldiseisvana. Nende eeliseks on parem tootlusvõimekus ebasoodsates tingimustes. Paneelidele langevate varjude korral langeb jadainverteri puhul kogu jada pinge kõige madalama pingega paneeli tasemele ning sellest langeb ja kogu jada väljundvõimsus. Mikroinverterid jälgivad iga paneeli MPPT väärtust eraldi ning on võimelised alandama ainult varjuga paneeli tootlust selliselt, et teised paneelid ei ole sellest mõjutatud. Erinevalt jadainverteritest tehakse mikroinverterite puhul DC-AC muundamine kohe paneeli juures. Jadainverterite puhul on alalisvoolu juhtmetes pinged vahemikus 200-900 V DC ning voolutugevused kuni 25 amprit [9]. Sellise voolutugevuse ja pinge juures on kaablirüüsi kahjustuse või mõne pistiku halva kontakti korral kaarleegi oht väga suur ning tagajärjed surmavad. Mikroinverterite korral jääb alalisvoolu tugevus ühe paneeli lühisvoolu võimsuse piiridesse, mis on tunduvalt ohutum lahendus. Mikroinverterid vajavad paigaldamiseks täiendavat aega ning seadmed pole odavad, siis on tegemist kalliga ja vähepopulaarse lahendusega. Kuna mikroinverterite väljundid ühendatakse otse AC võrku, siis on paigaldajal teatav kontroll selle üle, millise faasi külge ühendatakse vajadusel rohkem paneele ja mikroinvertereid, kuid antud lahenduse korral pole siiski asümmeetriline väljund võimalik.

Seega võib antud töö kontekstis lugeda mikroinverterite lahendust ja väljundit samaväärseks sümmeetrilise jadainverteri väljundiga ning loodav lahendus on sobilik mikroinverteritel põhineva PV pargiga kasutamiseks.

1.4 Töö eesmärk ja ülevaade

Selle bakalaureusetöö eesmärk on uurida, kuidas rakendada nutikaid energiahaldussüsteeme koduses elektrivõrgus, et maksimeerida omatarvet juhul, kui päikesepark kasutab akuta sümmeetrilist inverterit. Loodava prototüübi tööpõhimõte seisneb elektritarbijate releepõhises sisse-välja lülitamises vastavalt kasutaja poolt seadistatavatele parameetritele, milleks on korraga nii elektri börsihind kui ka päikesepargi poolt toodetav hetkevõimsus, et tagada võimalikult optimaalne lokaalselt toodetud energia kasutus. Optimaalne energiakasutus seisneb selles, et madala börsihinna korral on energia müük mikrotootjale majanduslikult ebamõistlik. Selle asemel on võimalik kasutada teatud takistuskoormusel põhinevaid elektritarbijaid nagu elektriradiaatorid ja elektriboilerid kaudsete energiasalvestussüsteemidena. Elektriboileri korral salvestatakse energia sooja veena ning elektriradiaatorite korral tõstetakse hoone õhutemperatuuri ajutiselt tavapärasest kõrgemale, et vähendada teiste kütteallikate kulusid. Loodava prototüübi abil on võimalik panna tarbijad tööle ainult siis, kui päikesepargi tootlikus tagab sümmeetrilise inverteri väljundi korral piisava võimsuse seadme kasutamiseks ilma energiat võrgust ostmata. Tagajärjena jääb kasutajal maksmata energia müügemarginal ning lokaalselt toodetud energia soojusenergia kasutamise tõttu vähenevad alternatiivsete kütelahenduste kogused ning nendega kaasnevad kulud.

Lahenduse realiseerimiseks valiti kolmefaasiline nutiarvesti CHINT DTSU-666 [10] sest tegemist on laialdaselt levinud inverterite tootjate nagu Huawei [11], Sungrow [12], FOXESS [13], AlphaESS [14], ja Solax [15] poolt kasutatava nutiarvestiga. Tihti on eelnevalt mainitud nutiarvesti juba inverteri baasvarustuses kaasas. Töö käigus loodud andmehõiveseadme võimaldab andmepäringut nutiarvestilt DTSU-666 viisil, mis ei riku arvesti suhtlust inverteriga. Arvestist saadud andmete alusel on võimalik juhtida sobivaid tarbijaid, kasutades ESP8266 mikrokontrollet ning releed selliselt, et seade lülitub sisse juhul, kui PV toodang on piisavalt suur, et katta ära seadme poolt tarbitav elektri kogus. Oluline on märkida, et seadmete lülitamise otsuste tegemiseks kasutatakse nutiarvestilt loetud väärtusi, mis juba hõlmavad endas hoone teiste tarbijate poolt kasutatavat energia kogust.



Joonis 1.3: Nutiarvesti CHINT DTSU-666. Foto: CHINT Global veebileht [16].

Töö raames valminud lahenduse ja prototüübi eeldatav tulemus on:

- PV energia omatarbe suurenemine ilma akusalvesti olemasoluta.
- Üleliigse PV energia muutmine soojusenergiaks kasutaja poolt määratud tingimuste korral.
- Müügitähtsusele kuuluva summa vähenemine.
- Hoone alternatiivsete kütteallikate kulude vähenemine.

Nõuded loodavale lahendusele

Loodav süsteem peab vastama järgmistele funktsionaalsetele ja tehnilistele nõuetele:

- Lahendus peab arvestama elektri börsihinnaga ning kohaliku päikeseenergia (PV) tootmise kogusega.
- Süsteem on võimeline reageerima hinna ja tootmisandmete muutusele maksimaalselt 5-sekundilise reageerimisajaga.
- On võimeline lülitama kuni 2000W nimivõimsusega vahelduvvoolutarbijat.
- Süsteem peab olema seadistatav kasutajaliidesega läbi Home Assistanti keskkonna.
- Arvesti suhtlust inverteriga ei rikuta.
- Seadmed töötavad 2.4 GHZ Wi-Fi võrgus.
- Energiatarbimise jälgimiseks ja juhtimiseks loodavad seadmed koostatakse võimalikult modulaarsetena. Kasutajal peab olema võimalik määrata:
 - hüstereesi väärtus(s) ehk ajavahemik mis peab mööduma enne kui süsteem reageerib tarbija sisse või välja lülitusega PV tootluse muutusele.
 - börsihinna alampiir seadme tööle lülitamiseks(s/kWh),
 - seadme võimsus (W),
 - faas, mille külge seade on ühendatud.

2 Ülevaade probleemist

2.1 Olemasolevad lahendused

Eestis turul olemasolevad lahendused keskenduvad valdavalt asümmeetrilistele inverteritele ja nende kasutamise eeldus on akude olemasolu.

Qilowatt.eu poolt pakutav toode Modbus R2 [17] ja Energiapada OÜ toode VooluValdaja [18] võimaldavad küll inverteri ja tarbimise juhtimist, kuid eeldavad kogu funktsionaalsuse toimimiseks, et süsteemis on akupank. Selliste lahenduste korral pole vaja kiiresti seadmeid sissevälja lülitada, sest akud kompenseerivad madalama päikeseenergia tootmise perioodid. Seega sümmeetrilise inverteriga süsteemide puhul pole antud lahendused rakendatavad.

TarkHoone poolt pakutav *HeatAdapt* [19] arvestab küll päikesepaneelide olemasoluga, kuid teeb seda üksnes päikesekiirguse prognoosi alusel. Kuna reaalne päikeseenergia tootmine võib oluliselt prognoosist erineda ning süsteem ei arvesta teiste majapidamises olevate tarbijate koormustega, võib vaba päikeseenergia tegelik kogus olla prognoositust väiksem ja seetõttu ei ole energia kasutamine optimaalne.

Samuti on turul levinud lihtsamad lahendused nagu börsihinda jälgivad nutipistikud [20]. Sellised lahendused aga ei arvesta üldse päikeseenergia kohaliku tootmisega, vaid ainult elektri börsihinnaga.

Viimase variandina on võimalik inverteri väljundvõimsuse piiramine, kuid ka see ei ole hea variant sümmeetrilist inverterit kasutades, kuna ebaühtlaste faasikoormuste korral ei ole võimalik piirata inverterit selliselt, et ei toimuks energia võrku müüki või energia võrgust ostmist.

2.2 Elektri hinna komponendid

Eesti turul on võimalik lõpptarbijal valida fikseeritud ja muutuva paketi vahel. Fikseeritud paketi korral määratakse kWh hind lepingu sõlmimise hetkel ning see püsib muutumatuna kogu lepingu vältel. Muutuva paketi korral sõltub elektri hind ettevõtte Nord Pool Spot AS poolt määratud börsihinnast. See hind muutub iga tund vastavalt pakkumise-nõudluse suhtele ning järgmise kalendripäeva hinnad avaldatakse Eesti aja järgi iga päev kell 14:00. Iga tarnitud kWh pealt makstakse täiendavaid tasusid, mis on kirjeldatud valemiga (2.1).

$$\text{Elektri hind koos KM-ga} = (H_{\text{elekter}} + H_{\text{marginaal}} + H_{\text{võrguteenus}} + H_{\text{taastuenergia}} + H_{\text{aktsiis}}) \cdot (1 + \text{KM}) \quad (2.1)$$

Taastuenergia hind on 2025. aastal 1.02 senti/kWh ja elektriaktsiis 0.18 senti/kWh. [21].

Võrgutasu sõltub kliendi poolt valitud võrgupaketist. Marginaal lisandub börsipaketi puhul nii energiat ostes kui ka müües. Ostu- ja müügemarginaalide suurused on kõikuvad ning sõltuvad energiamüüjast ning sõlmitava lepingu pikkusest. 2025. aasta mai kuu seisuga pakub Terminal Energia võimalust sõlmida lepingut ostumarginaaliga 0.407 s/kWh ja müügemarginaaliga 0.55 s/kWh [22].

Ajavahemik	Võrk 1	Võrk 2	Võrk 4	Võrk 5
Päevahind (s/kWh)	10.62	8.61	5.70	7.65 / 11.18
Ööhind (s/kWh)	–	5.48	3.76	4.90 / 6.98

Tabel 2.1: Elektrilevi võrgupakettide päevased ja öised hinnad koos taastuenergia tasu ja elektriaktsiisiga [23].

Tabelis 2.1 on nähtavad Elektrilevi poolt pakutavate võrgupakettide hinnad koos lisatasudega. Sõltuvalt paketist võib see hind moodustada ligi 50 % elektriarvest, seega on PV pargi omanikul kasulikum tarbida võimaluse korral lokaalselt toodetud energia kohe ära võrku müümise ning hiljem tagasi ostmise asemel.

3 Tehniline teostus

Lahendus koosneb kolmest põhiosast. Andmehõiveseade kogub andmeid nutiarvestilt CHINT DTSU-666. Kogutavad andmed on hoone kolmefaasilise elektrivõrgu hetkevõimsuse väärtused, kus negatiivne väärtus tähistab energia eksportimist ning positiivne väärtus tähistab energia importimist. Antud töö raames keskendutakse eksporditava elektrienergia koguse vähendamisele, ehk lokaalselt toodetud elektrienergia kohesele ärakasutamisele.

3.1 Home Assistant

Lahenduse realiseerimiseks kasutatakse populaarset koduautomaatika tarkvara Home Assistant. Tarkvara abil luuakse kasutajaliides ning automatsioonid, mis on vajalikud energiajuhtimissüsteemi tööks. Oluline on tagada Home Assistantile ka võrguühendus Nord Pooli börsihindade saamiseks ning MQTT suhtluse võimaldamiseks.

Home Assistanti tarkvara kasutamiseks on järgnevad variandid:

- Valmislahendused Home Assistant Green ja Yellow kus klient ostab riistvara kuhu on eelpaigaldatud vajalik tarkvara.
- Raspberry Pi 5 või 4 + 32GB A2 klassi SD kaart. Kasutaja paigaldab seadmele Home Assistant Operating Systemi.
- Linux või Windows operatsioonisüsteemiga ja UEFI võimeline x86-64 süsteem kuhu kasutaja paigaldab ja seadistab eraldiseisva tarkvara iseseisvalt.

3.2 Modbus-RTU protokoll

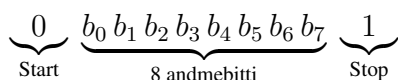
Modbus-RTU on tööstuslikes lahendustes laialdaselt kasutatud jadaliidese suhtlusprotokoll, mis toimib *master-slave* suhtluse põhimõttel, kus master seade teeb päringuid ja slave seade vastab. Iga kaader koosneb neljast andmeväljast:

[Aadress - Funktsioonikood - Andmed - CRC-16]

- **Aadress** (1-247) määrab, milline seade siinil vastab.
- **Funktsioonikood** kirjeldab operatsiooni (03h – *Read Holding Register*).
- **Andmeväljas** on päringu korral registri aadress või kirjutatavad andmed. Vastuse korral on loetud registri väärtus või veakood.

- **CRC-16** vigade tuvastamiseks arvutatud kontrollsumma, mille järgi kontrollitakse kaadri terviklikkust.

Modbus-RTU protokoll spetsifikatsiooni järgi peab iga päringute vaheline paus olema vähemalt 3.5 tähemärgi pikkune vaikusaeg. See on vajalik, et kõik ühendatud seadmed saaksid korrektselt eristada ühe kaadri lõppu ja järgmise algust. [24] Kasutusel on 8-N-1 formaat, kus edastatakse kokku 10 bitti korraga. 8 tähistab edastatava andmeosa pikkust, milleks on 8 bitti, N tähistab None ehk paarsuskontroll puudub ning 1 tähistab stop bitti kaadri lõpus. Kaader algab alati start bitiga. [25]



3.3 MQTT protokoll

MQTT on kergekaaluline ja avatud suhtlusprotokoll, mis on loodud piiratud ressursidega seadmete ning piiratud ribalaiusega võrkude jaoks. Tänu nendele omadustele on MQTT sobilik valik IoT seadmete omavaheliseks suhtluseks. MQTT põhineb *publish-subscribe* mudelil, kus sõnumid saadetakse teemade (*topic*) kaudu ühest seadmest (*publisher*) paljudele seadmetele või teenustele ehk vastuvõtjatele (*subscribers*).

MQTT suhtluse keskmes on *broker*, mis vahendab kõikide seadmete vahel liikuvad sõnumid. Käesolevas töös kasutatakse MQTT vahendajaks laialt levinud ning avatud lähtekoodiga Eclipse Mosquitto tarkvara, mis on tuntud oma lihtsuse, kiiruse ja töökindluse poolest. Tarkvara toetab MQTT protokollil versioone 5.0, 3.1.1 ja 3.1. [26]

MQTT protokollil on järgmised põhikomponendid:

- **Publisher (avaldaja)** – seade või rakendus, mis saadab andmeid.
- **Subscriber (tellija)** – seade või rakendus, mis kuulab ja võtab vastu huvipakkuvatel teemadel saadetavaid andmeid.
- **Broker (vahendaja)** – keskne server, mis vahendab sõnumeid, haldab teemade tellimusi ning edastab sõnumid automaatselt tellijatele.
- **Topic (teema)** – tekstipõhine kanal või kategooria, mille kaudu andmeid vahetatakse.
- **Payload (andmesisu)** – tegelikud andmed, mida teemadel saadetakse.

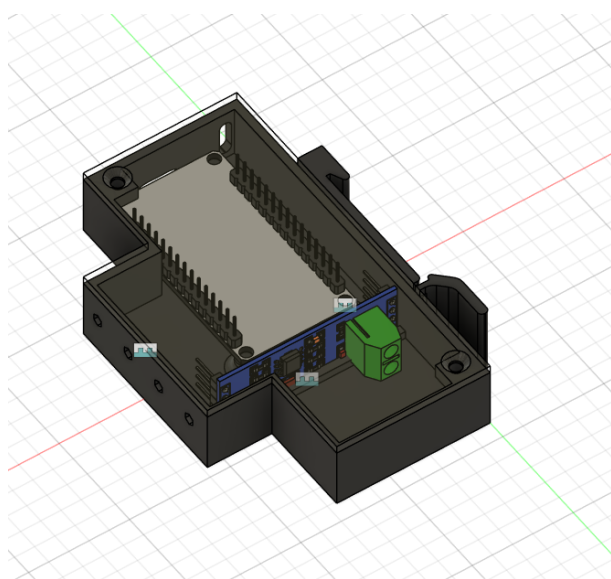
MQTT-ga on võimalik kasutada erinevaid teenuse kvaliteedi QoS ehk *Quality of Service* tasemeid ning *retain* funktsionaalsust, mille korral edastab MQTT vahendaja tellijale viimase teadaoleva sõnumi koheselt, kui teema tellitakse.

3.4 Andmehõive nutiarvestilt CHINT DTSU-666

Inverter suhtleb nutiarvestiga kasutades Modbus-RTU [24] protokollil üle RS-485 jadaliidese. Inverter on selles konfiguratsioonis *master* seade, mis saadab nutiarvestile regulaarseid päringuid, edastades saadud andmed koos inverteri enda tootmisandmetega tootja pilveteenusesse, kust kasutaja saab andmeid vaadelda. Olenevalt inverteri tootjast on pilveteenusest andmed lõppkasutajale

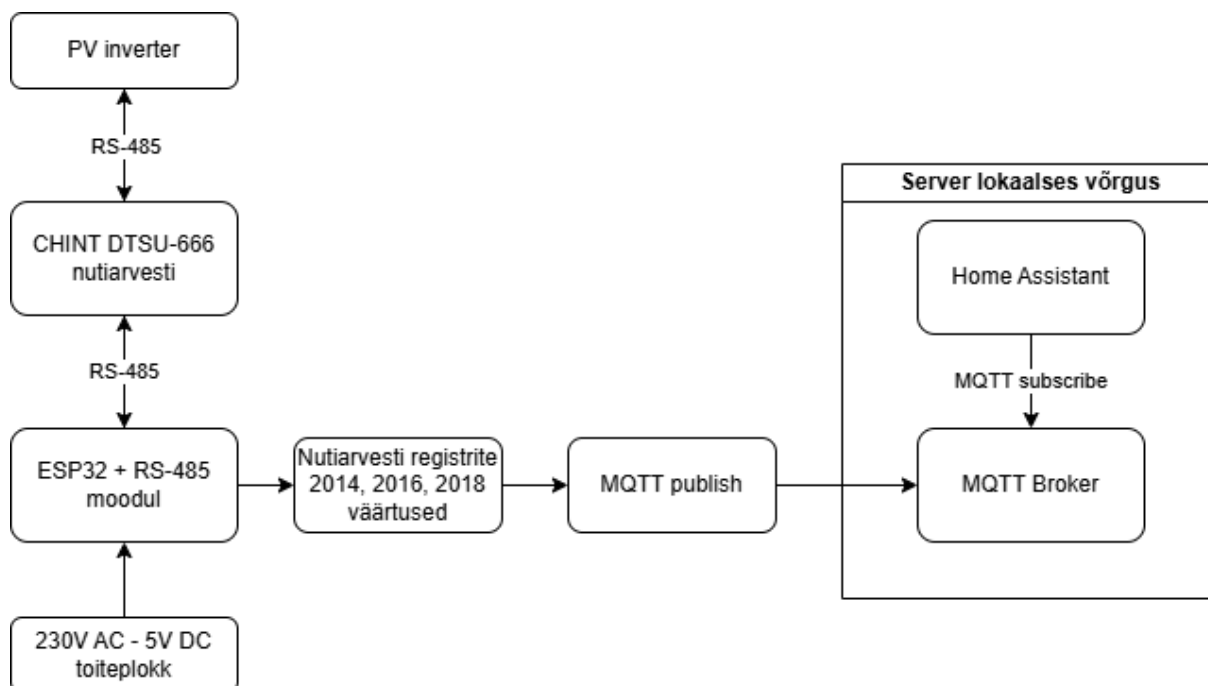
kättesaadavad ka API kaudu [27], kuid tihti on API-päringute arv piiratud [28]. Lisaks edastatakse pilveteenustesse andmeid tavaliselt ainult 5-minutilise intervalliga, mis ei võimalda piisavalt kiiret reageerimist PV tootlikuse ootamatutele muutustele ega teiste seadmete energiatarbimise järskudele kõikumistele.

Optimaalsema lahendusena loodi antud töö raames eraldiseisev andmehõiveseadme prototüüp, mis koosneb ESP32-WROOM-32 mikrokontrolleril põhinevast arendusplaadist [30] ja RS-485 liidese muundurist MAX485 [31]. Seadmele disainiti 3D-prinditav korpus, mis kinnitub elektrilbi DIN-liistule. Korpus on oma mõõtmetelt vastav standardsete elektrilipi kinnituvate moodulkaitsetega, et mitte raisata elektrilbis üleliigselt ruumi. Korpuse küljekatte kinnitamiseks kasutatakse kahte M3 x 5 mm kruvi. Seadme toiteks kasutatakse samuti DIN-liistule kinnitatavat 230V AC - 5V DC toiteplokki [32].



Joonis 3.1: Andmehõiveseadme korpus FUSION360 keskkonnas.

Andmehõiveseadme ühendub CHINT DTSU-666 nutiarvesti RS-485 klemmidele 24 (A) ja 25 (B) [10]. Kuna Modbus-RTU siinil on reeglina ainult üks *master*-seade, tuleb andmehõiveseadme puhul kasutada erandlikku lahendust, kus samal siinil töötab korraga kaks *master*-seadet, milleks on inverter ja loodud andmehõiveseadme. Selle lahenduse realiseerimiseks jälgib andmehõiveseadme RS-485 siinil toimuvat suhtlust ning teeb omapoolse päringu nutiarvestile ainult siis, kui inverteri poolseid aktiivseid päringuid nutiarvestile parasjagu ei toimu. Sellise lähenemisega tagatakse nutiarvesti ja inverteri vahelise suhtluse katkematus ning võimaldatakse arvesti andmete lugemine ööpäevaringselt, mitte ainult inverteri aktiivsetel töötundidel. Andmete lugemine ja edastamine kogu ööpäeva vältel annab kasutajale täiendava võimaluse oma hoone energiatarbe jälgimiseks ning võimalike öiste tarbijate tuvastamiseks, mida hoopis päevasel ajal PV energiaga kasutada. Programmikoodis kasutati Modbus RTU suhtluseks ModbusMaster teeki [29]. Programmikood ja korpuse 3D mudelid on kättesaadavad lõputöö GitHubi repositooriumist lisas 7.1.



Joonis 3.2: Andmehõive töövoogu selgitab plokkiagramm.

Seade ühendub käivitusel programmikoodis olevate parameetrite alusel kasutaja 2.4GHz Wi-Fi võrku ning hakkab kuulama RS485 siinil toimuvat suhtlust inverteri ja nutiarvesti vahel. Kui siinil tuvastatakse vaikus, siis teeb andmehõiveseadme lugemispäringu nutiarvesti registrele 2014, 2016 ja 2018 [10]. Selleks, et vältida vigaste andmete edastamist MQTT brokerile, kontrollitakse kõigepealt, et loetud väärtused oleksid ootuspärasel formaadis.

Seadme elektritarbe hindamiseks teostati mõõtmise multimeetriga UNI-T UT890C alalisvoolu poolelt:

$$I = 80 \text{ mA}, \quad V = 5 \text{ V}.$$

$$P_{\text{DC}} = V \times I = 5 \text{ V} \times 0.08 \text{ A} = 0.40 \text{ W}.$$

Võttes toiteploki kasuteguriks $\eta = 0.80$:

$$P = \frac{P_{\text{DC}}}{\eta} = \frac{0.40 \text{ W}}{0.80} = 0.50 \text{ W}.$$

$$E_{24\text{h}} = P \times 24 = 0.50 \text{ W} \times 24 = 12.0 \text{ Wh}$$

Seega tarbib andmehõiveseadme ühe ööpäevaga ligikaudu 0.012 kWh. Energiatarbe tulemus on indikatiivne, mitte täielikult täpne, kuna mõõteriist ei olnud täpse mõõtmise teostamiseks optimaalne.

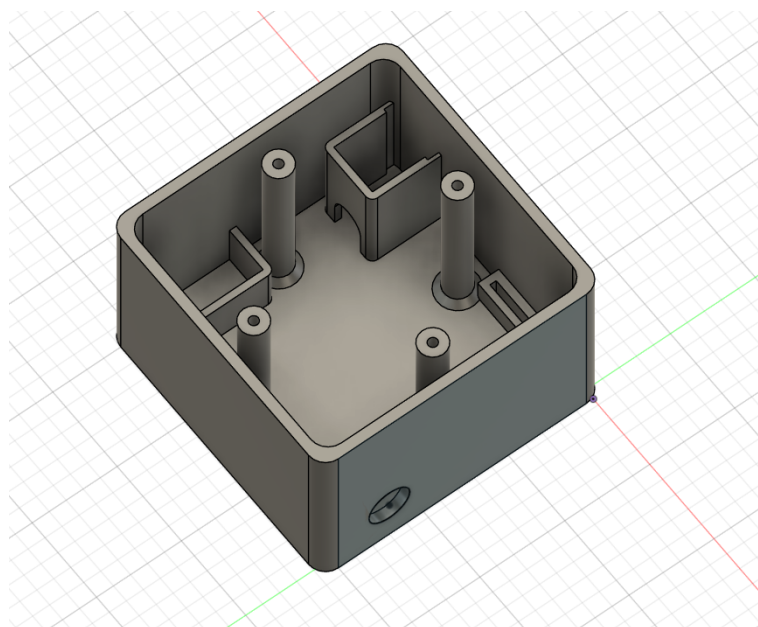
3.5 Seade elektritarbijate juhtimiseks

Loodud prototüüpseadme eesmärk on automatiseerida elektritarbijate sisse- ja väljalülitamine, et maksimeerida lokaalse päikeseenergia kasutust ning vähendada võrgust ostetava elektrienergia

kogust. Automaatset juhtimist teostatakse vastavalt reaalajas mõõdetud elektrienergia tootmis- ja tarbimisandmetele ning elektri börsihinnale.

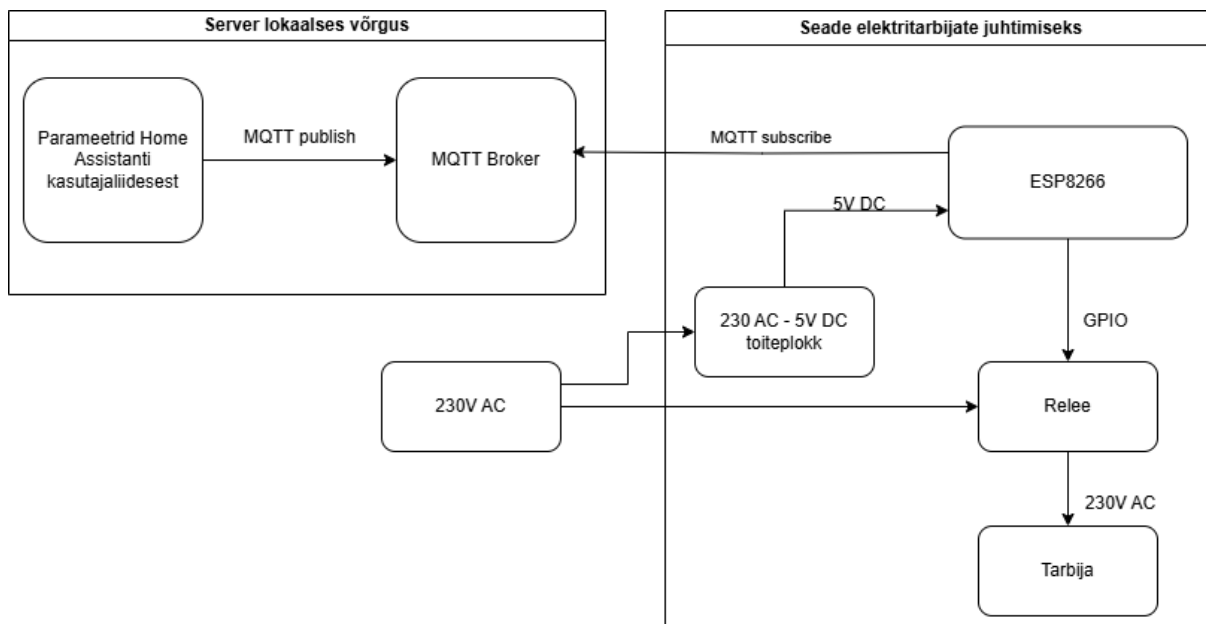
Riistvaraliselt koosneb seade järgmistest komponentidest:

- ESP8266 mikrokontrolleriga arendusplaat, mis võimaldab tänu WiFi olemasolule suhtlust andmehõiveseadmega ning Home Assistanti kasutajaliidesega [33].
- SONGLE SRD-05VDC-SL-C relee moodul, mis võimaldab väikese alalispinge signaaliga juhtida 230 V AC koormuseid [34].
- WX-DC12003 230V AC – 5V DC toitemoodul ESP8266 arendusplaadi ja relee toiteks [35].
- Süvistatav pistikupesa mille külge tarbija ühendatakse.
- 3G1.5 kaabel pistikuga – võimaldab seadme ühendamist vahelduvvoolu seinakontakti.



Joonis 3.3: Elektritarbijaid juhtiva seadme korpus FUSION360 keskkonnas.

Kõik komponendid on paigaldatud töö raames disainitud 3D-prinditavasse korpusesse. Korpus on projekteeritud vastavalt süvistatavate pistikute standardmõõtudele, seega on võimalik kasutada eri tootjate pistikupesasid. Korpusesisesteks vahelduvvoolu ühendusteks on kasutatud WAGO 221 klemmliiste [36]. Programmikood ja korpuse 3D mudelid on kättesaadavad lõputöö GitHubi repositooriumist lisas 7.1.



Joonis 3.4: Elektritarbijaid lülitava seadme töövoogu selgitav plokkdiagramm.

Joonisel 3.4 on kujutatud seadme töövoog. Vooluvõrku ühendamisel saab ESP8266 arendusplaat toite 5V DC toiteplokkist ning ühendub kasutaja 2.4 GHz Wi-Fi võrku programmikoodis seadistatud parameetrite alusel. Eduka ühenduse korral tellib ESP8266 mikrokontroller MQTT brokerilt ehk vahendajalt Home Assistanti kasutajaliidese seadistatud teemad ning rakendab saadud parameetreid oma juhtimisalgoritmis. Juhtimisloogika arvestab elektri börsihinda, valitud faasi, reaalajas mõõdetud vaba netovõimsust valitud faasil, tarbija nimivõimsust ja seadistatud hüstereesi aega. Nende parameetrite alusel lülitatakse automaatselt seadme külge ühendatud tarbijaid sisse-välja, et kasutada ära võimalikult palju PV pargi toodetud energiat ilma võrgust energiat ostmata.

Elektrilise ohutuse tagamiseks on relee ühendatud NO ehk *Normally Open* konfiguratsioonis, kus relee kontaktid on mähise pingestamata olekus avatud asendis ning vahelduvvoolu ühendus on katkestatud. Seega lakkab tarbija töö kohe, kui 5V toide või mikrokontrolleri juhtsignaal kaob. Väheneb oht, et elektritarbija jääb pingestatud olekusse juhtseade rikke korral.

Seadme elektritarbe hindamiseks teostati mõõtmise multimeetriga UNI-T UT890C alalisvoolu poolelt.

$$I = 165 \text{ mA}, \quad V = 5 \text{ V}.$$

$$P_{\text{DC}} = V \times I = 5 \text{ V} \times 0.165 \text{ A} \approx 0.83 \text{ W}.$$

Toiteploki kasutegur $\eta = 0.80$:

$$P = \frac{P_{\text{DC}}}{\eta} = \frac{0.83 \text{ W}}{0.80} \approx 1.04 \text{ W}.$$

$$E_{24\text{h}} = P \times 24 \text{ h} \approx 1.04 \text{ W} \times 24 \text{ h} \approx 25.0 \text{ Wh}$$

Kuna mõõtmine teostati olukorras, kus seadme relee mähis on pingestatud olekus, on seadme energiakulu 24 aktiivse töötunni kohta 0.025 kWh. Energiatarbe tulemus on indikatiivne, mitte täielikult täpne, kuna mõõteriist ei olnud täpse mõõtmise teostamiseks optimaalne.

3.6 Kasutajaliides

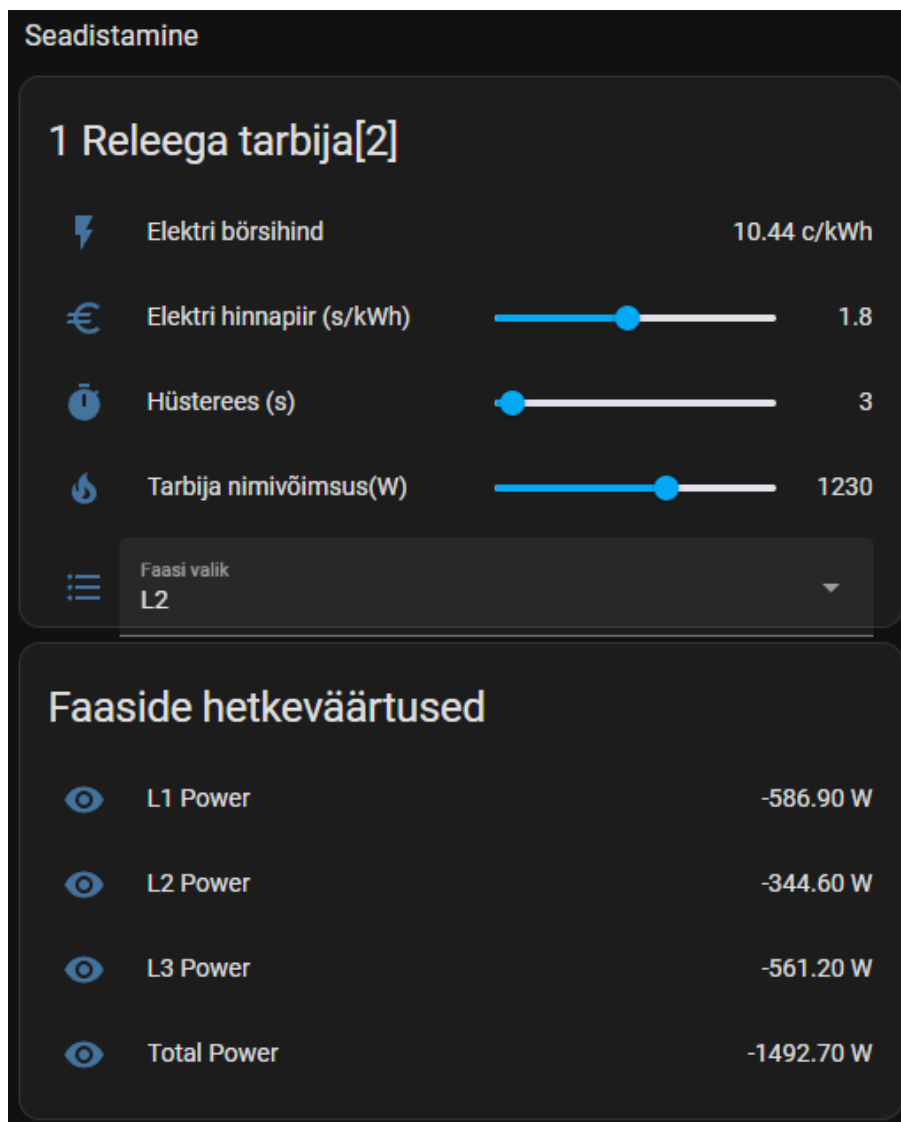
Kasutajaliidese loomiseks ning seadme lülitusparameetrite seadistamiseks kasutati populaarset koduautomaatika tarkvara Home Assistant. Elektri börsihinna saamiseks kasutatakse Home Assistantile loodud Nord Pool integratsiooni [37]. Kasutajaliidese loomine jaguneb kaheks osaks.

Sisendväljade loomiseks kasutatakse komponentide *input_number* ja *input_select* funktsionaalsust Home Assistanti konfiguratsioonis.

Väärtuste edastamiseks kasutatakse automatsioone, mis reageerivad sisendväljade muutusele. Lisaks on kasutajaliideses kuvatud nutiarvestilt edastatud faaside väärtused, et kasutajal oleks võimalik paremini hinnata, millise faasi külge oma seadet ühendada, sõltuvalt selle võimsusest. Kõikide kasutajaliideses olevate väärtuste edastamisel on kasutusel *retain*-lipp, mis võimaldab seadmel saada viimati seadistatud väärtused, olenemata ühendumise hetkest. Kõik kasutajaliidese loomiseks kasutatavad YAML koodilõigud on saadaval lõputöö GitHubi repositooriumis lisas 7.1.

Kasutajaliidesest on võimalik seadistada järgnevaid parameetreid:

- Elektri hinnapiir: elektri börsihind, millest madalama hinna korral alustab automaatika tööd ning kontrollib, kas on piisavalt vaba energiat seadistatud nimivõimsusega tarbija käivitamiseks.
- Hüsteres: aeg sekundites mis peab mööduma enne järgmise lülituse toimumist.
- Tarbija nimivõimsus: Lülitatava seadme võimsus, et automaatika saaks seda võrrelda reaalselt vaba elektrienergia kogusega.
- Faasi valik: Kasutaja määrab ära millise faasi külge on seade ühendatud, et automaatika toimiks korrektselt.



Joonis 3.5: Kuvatõmmis kasutajaliidesest *Home Assistant* keskkonnas.

3.7 Sobivad ja mittesobivad tarbijad releepõhiseks lülitamiseks

Loodud lahendus toimib hästi ainult teatud tüüpi tarbijatega. Kõige sobilikumad on takistuskoormused ehk küttekehad. Oluline on, et seadmel poleks keerulist töötsükli, mille katkestamine tekitaks soovimatuid tagajärgi. Sobivad seadmed on:

- Elektriradiaatorid(õli või konvektsioon)
- Elektrilised veeboilerid
- Elektrilised põrandaküttekaablid
- Elektrilised soojuskiirgurid

Oluline on valida seade, millel on tehasest ülekuumenemise kaitse näiteks bimetalltermostaadi näol või mingi muu lahendus ülekuumenemise vältimiseks. See annab võimaluse seadistada veel täiendava temperatuuripiirangu elektri- ja tuleohutuse tagamiseks juhuks, kui lõputöö raames loodud prototüübis kasutatava relee kontaktid peaksid mingil põhjusel jääma soovimatult

ühendatud olekusse.

Mittesobivad tarbijad on kindla töötsükliga seadmed, mille töö katkestamine tekitaks soovimatuid tagajärgi või rikuks seadet ennast. Nendeks seadmeteks on näiteks:

- Pesumasinad
- Kuivatid
- Praeahjud
- Soojuspumbad

4 Tulemused

Loodud lahenduse funktsionaalsuse hindamiseks vaadeldakse töö autori maja katusel oleva päikesepargi tootlikkust ja analüüsitakse, kui palju sellest oleks võimalik ära kasutada loodud automaatikaga võrku eksportimise asemel, kui kasutusel on sümmeetrilise väljundiga inverter. Päikesepaneelide konfiguratsioon on järgnev:

- 2.7 kW kagusuunas, kaldenurk 13°,
- 3.7 kW edelasuunas, kaldenurk 13°,
- 2.7 kW loodesuunas, kaldenurk 13°,
- 2.3 kW loodesuunas, kaldenurk 6°.

Päikesepaneelide koguvõimsus on 11.4 kW. Inverteriks on FOXESS T10-G3 10kW [9] sümmeetrilise väljundiga inverter.

Oluline on märkida, et paneelide paigutus katusel pole Eesti geograafilist asukohta arvestades optimaalne parima tootluse vaatepunktist ja tänu sellele on PV energia kogus ning ka lõputöös loodud seadme kasutegur madalam kui traditsioonilisema paigutusega päikesepargis, kus paneelid on suunatud lõunasse ning on maapinna suhtes 35-45 kraadise nurga all.

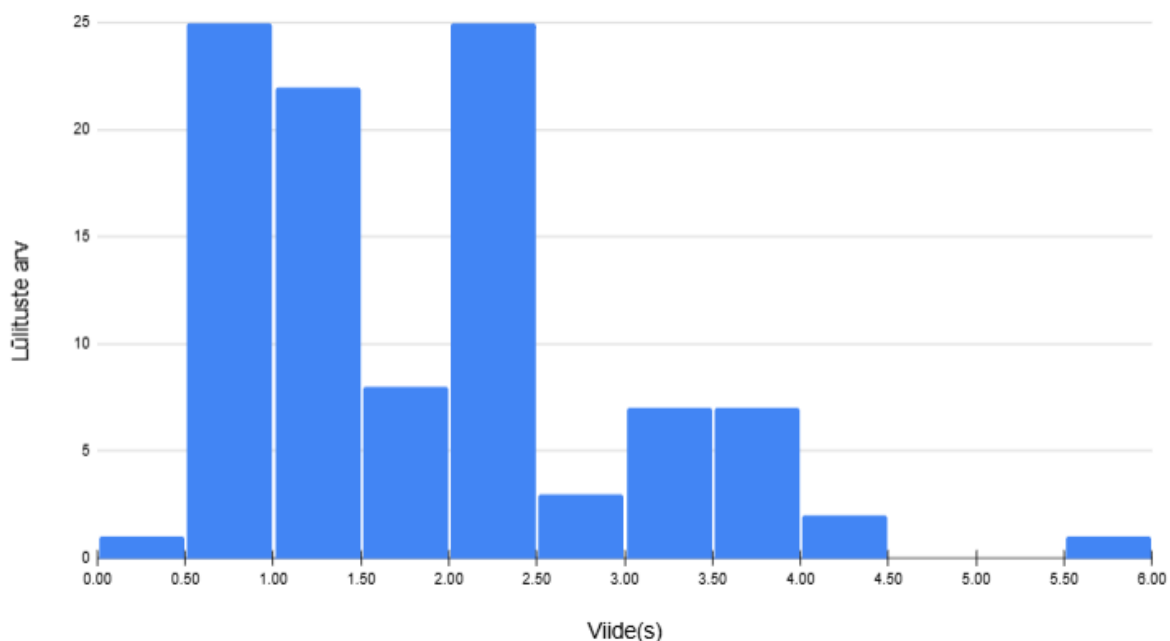
Lahenduse kasutegurit hinnatakse põhimõttel, et kui palju energiat oleks võimalik vaadeldavatel ajavahemikel ära kasutada kolme eraldi seadmega, mis kõik on erinevate faaside külge ühendatud, kuna tegemist on sümmeetrilise väljundiga inverteriga.

4.1 Seadme reageerimiskiirus PV muutusele

Seadme reageerimiskiirust hinnati praktilise katsega, mille tulemusena mõõdeti aeg hetkest, kui PV toodangu muutus tuvastati, kuni hetkeni, mil elektritarbijaid lülitava seadme rele reageeris muutusele. Sellisel viisil katsetamine võttis arvesse kogu ahela viivituse ehk arvestist andmete kättesaamise, andmete töötlemise, andmete edastamise üle MQTT ning lõpuks lülitusi tegeva seadme poolt MQTT väärtuste lugemise ja releelülituse tegemise.

Katse läbiviimiseks programmeeriti elektritarbijat juhtiv seade jälgima faasi L2 ning releed lülitama 100 ms perioodiks sisse iga uue nutiarvesti poolt saadetud MQTT sõnumi korral. Relee väljundite külge ühendati Raspberry PI 4B, mis luges rele olekut kasutades GPIO viiku ja GND viiku. Lülituse lugemiseks kasutati tõusva frondi tuvastust koos 10 ms *debounce*-iga, et filtreerida tahtmatud tuvastused välja ja registreerida iga rele lülitus ainult ühe korra. Katse viidi läbi ajal, mil inverter oli sisselülitatud olekus.

Lülitusviite jaotus (N = 100)



Joonis 4.1: Seadme reageerimismuutust kirjeldav histogramm.

Näitaja	Mõõdetud väärtus
Minimaalne viide	0,25 s
Keskmine viide	1,87 s
Mediaan	1,52 s
Maksimaalne viide	5,50 s

Tabel 4.1: Lülitusviite statistika (N=100)

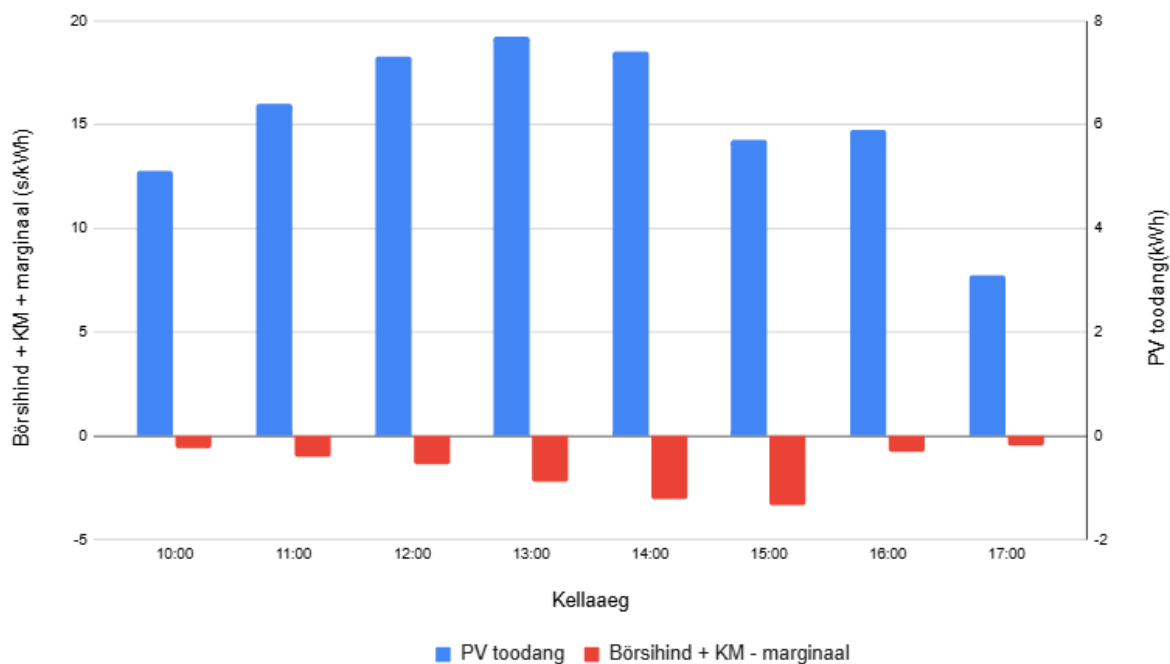
4.2 Tulemused negatiivse börsihinnaga päeva näitel

Negatiivse börsihinna mõju hinnati konkreetse päeva (27.04.2025) näitel, mil elektri börsihind oli pikemal perioodil negatiivne. Sellises olukorras on oluline vältida energia eksportimist võrku, kuna selle eest tuleb peale maksta. Joonisel 4.2 on esitatud 27.04.2025 päikesepargi toodetud energia(kWh) ja müügihind(s/kWh) mis on kirjeldatud valemiga (4.1).

$$\text{Müügihind (s/kWh)} = H_{\text{börsihind}} \times (1 + \text{KM}) - M_{\text{marginaal}} \quad (4.1)$$

Kuvatakse ainult negatiivse hinnaga tunnid, sest nendel PV energia võrku andmine pole mõistlik. Graafikult on näha, et ajavahemikus 10:00 kuni 18:00 peaks päikesepargi omanik võimaluse korral tarbima ära võimalikult suure koguse toodetud energiast, et vältida energia ekspordi eest peale maksmist.

PV tootlus ja börsihind koos täiendavate tasudega 27.04.2025



Joonis 4.2: PV tootlikus ja energia müügihind 27.04.2025 negatiivse hinnaga tundidel.

Kellaeg	Toodetud (kWh)	Müügihind (s/kWh)	Summa (senti)
10:00	5.1	-0.60	-3.04
11:00	6.4	-0.99	-6.36
12:00	7.3	-1.40	-10.20
13:00	7.7	-2.24	-17.22
14:00	7.4	-3.05	-22.59
15:00	5.7	-3.36	-19.14
16:00	5.9	-0.75	-4.43
17:00	3.1	-0.50	-1.55
Kokku			-84.52

Tabel 4.2: Müügihinna ja toodangu tabel.

Tabelist 4.2 on näha, et kogu toodetud energia ekspordimisel vaadeltavate tundide ajal tähendaks see päikesepargi omanikule -0.84 € summat ehk päikesepargi omanik peab energiaettevõttele selle summa võrku antud energia eest peale maksma.

Vaadeldaval ajavahemikul oli PV pargi väljundvõimsus $\geq 4500W$. Seega kasutades sümmeetrilise PV inverteri korral kolme töös loodud seadet koos kolme 1.5 kW võimsuse elektriradiaatoriga või mõne muu takistusel põhineva küttekehaga, oleks olnud võimalik ära kasutada $4.5 kW \times 6.63 h = 29.835 kWh$ PV energiat soojusenergiana maja kütteks. Selle tulemusena väheneks võrku müüdava energia kogus miinushindadega igal tunnil 4.5 kWh ning klient maksaks energiaettevõttele 0.84 € asemel 0.26 €.

Sama koguse soojusenergia saamiseks gaasiküttega kuluks antud majapidamises vastavalt aprilli kuu gaasi hindadele koos võrgutasu ja käibemaksuga $29.835 kWh \times 0.0954 € = 2.85 €$. Seega

võttes arvesse, et miinushinnaga energia ekspordi kulu väheneb 84 sendilt 26 sendile ja müümata jäänud energia kasutatakse ära maja soojusenergia vajaduse katteks, on sellise päeva näitel rahaline kokkuhoid 3.34 €.

4.3 Tulemused pikemal ajavahemikul

Kuna antud bakalaureuse töö peamine eesmärk on uurida võimalusi maksimaalseks lokaalselt toodetud PV-energia ära kasutamiseks, siis pikema ajaperioodi tulemuste analüüsil ei arvestatud Nord Pooli hinna võimalikku mõju toodetud energia ekspordimisel ja vaadeldi hoopis potentsiaalset kokkuhoidu toodetud päikeseenergia ära kasutamisest hoone alternatiivse kütelahenduse kulude vähendamisel.

Seadme töö hindamiseks pikemal perioodil vaadeldi töö autorile huvipakkuvat ajavahemikku PV tootluse osas vahemikul 09.2024 - 04.2025. Ajavahemik valiti, et uurida, kas seadmetest on kasu ka aastaegadel, kus päikesekiirgus Eestis on madalam. Detsember ja jaanuar jäeti tulemustest välja, kuna nendel kuudel oli PV tootlus lumega kaetud paneelide tõttu olematu. Tulemuste saamiseks antud ajavahemikul vaadeldakse kuude kaupa sümmeetrilise inverteri väljundvõimsust summaarse ajana tundides, kus võimsus oli ≥ 3000 W. Tundide arv korrutati kolmega, et saada sümmeetrilise inverteri potentsiaalselt kasutatava PV-energia kogus kolme 1000 W võimsusega takistusel põhineva küttekeha kasutades. Tulemused on esitatud tabelis 4.3.

Kuu	Kasutatav PV-energia (kWh)	Gaasihind (s/kWh)	Kokkuhoid (€)
09.2024	385.5	7.70	29.71
10.2024	116.1	7.70	8.94
11.2024	1.41	7.67	0.10
02.2025	21.24	8.61	1.83
03.2025	207.45	9.54	19.79
04.2025	380.49	8.72	33.18
SUMMA	1112.19	–	93.56

Tabel 4.3: PV toodetud energia, gaasi hind ja kokkuhoid kuude lõikes.

Tabelist 4.3 on näha, et ka Eesti mõistes mittesoodsal ajal PV toodangu mõistes on võimalik kasutada töös loodud lahendust takistusel põhinevate küttekehadega kütteks arvestatavas koguses nii kasutatud energia kui rahalise kokkuhoiu suhtes, kui sama soojusenergia kogus oleks tarnitud gaasikütte näol. Tabelis toodud tulp Kokkuhoid (€) on kirjeldatud järgneva valemiga:

$$\text{Kokkuhoid (€)} = 1 \text{ kWh saadaval} \times \text{Gaasihind (s/kWh)}$$

5 Võimalikud edasiarendused

Kõiki autorile huvi pakkunud ideid ei olnud võimalik antud töö raames ajaliselt teostada. Välja on toodud nimekiri seadmetest, ideedest ja võimalikest kasutusjuhtudest, kus saaks töös valminud prototüüpi täiendada või selle edasiarendust kasutada.

- Integreerida õhu omaduste mõõtmise võimalus seadme külge, et vältida liigset õhu kuiv-
atamist või ülekütmist ruumis kus lahendust kasutatakse.
- Suuremate PV parkide korral: Energia salvestamine sooja veena akumulatsioonipaagis.
- Täiendada lahendust, et võimaldada 3 faasiliste tarbijate lülitamist.
- Disainida trükkplaadid ja trükkplaatidele sobivad korpused mõlema lõputöös loodud seadme jaoks.

Käesolevas töös keskenduti ainult releepõhisele seadmete juhtimisele, kuid nutiarvestilt kogutavate andmete põhjal on võimalik juhtida ka juba tehasesst nutivõimekusega seadmeid, millel on koduautomaatika tugi olemas. Väljatoodud edasiarenduste korral poleks vaja seadmeid modifitseerida ega vajalik täiendav riistvara kasutus, vaid seadmete töö juhtimine toimiks Home Assistant tarkvara skriptide ja automatsioonide põhjal, võttes sisendiks andmehõiveseadmelt kogutud andmed PV pargi hetkevõimsuse kohta.

- Nutikate ühe ja kolmefaasiliste elektriauto laadijate juhtimine reaajas.
- Soojuspumpade ja konditsioneeride kompressori kiiruse juhtimine.
- Krüptokaevurite elektritarbe juhtimine.
- Nutivõimekusega elektripõrandakütte termostaadi juhtimine.
- Nutivõimekusega elektriliste veeboilerite juhtimine.
- Luua prioriteetide süsteem kui on mitu seadet ühe faasi küljes.
- Integreerida lahendus hoone alternatiivsete küttesüsteemidega.

6 Kokkuvõte

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli uurida võimalusi ilma akuta sümmeetrilise inverteriga PV-pargi energiakasutuse optimeerimiseks. Töö tulemusena valmisid prototüüpsed seadmed, mis täitsid kõik töö alguses püstitatud eesmärgid. Loodud lahenduse abil on päikesepargi omanikul võimalik vältida elektri müümist null- või negatiivse hinnaga tundidel ning suunata toodetud energia hoopis hoone soojusenergia vajaduse katteks.

Töö tulemustest võib järeldada, et loodud seadmete kasutuselevõtt aitab PV-pargi omanikul oluliselt suurendada lokaalselt toodetud energia kohapealset kasutamist ning seeläbi vähendada võrku eksporditava energia kogust. See omakorda aitab kaasa päikesepargi tasuvusaja lühenemisele. Samuti näitas töö, et loodud seadmete enda elektritarbimine on hoone energiatarbe kontekstis marginaalne ega mõjuta märkimisväärselt hoone elektritarvet.

Samas on oluline märkida, et võimalik saavutatav kokkuhoid sõltub olulisel määral PV-pargi suurusest, paneelide paigutusest ja kaldenurgast maapinna suhtes ning võimalikest varjudest paneelidel. Lisaks mängib kokkuhoiu ulatuses olulist rolli ka juhitavate elektritarbijate võimsus ja nende arv.

Töö käigus välja pakutud edasiarenduste rakendamisega oleks võimalik loodud lahenduse kasutegurit veelgi tõsta ning saavutada täiendavat majanduslikku kasu.

Tänuavaldused

Täna oma juhendajat Alvo Aablood asjalike nõuannete, sisukate arutelude ja põhjaliku tagasiside eest selle töö valmimisel.

R. Kõrre

Viited

- [1] PowMr, “Balanced vs Unbalanced Output for Solar without Net Metering,” PowMr blogi, <https://powmr.com/blogs/news/balanced-vs-unbalanced-output> (Vaadatud: 11.11.2024).
- [2] Elektrilevi, “Aastaruanne 2023,” https://public-docs.elektrilevi.ee/2/6/majandusaasta_aruanne_2023_4a93f7b27a.pdf (Vaadatud: 11.11.2024).
- [3] Enefit, “Päikeseenergia ekspert: päikesepaneelide peamine eesmärk ei ole raha teenimine, vaid raha säästmine,” <https://www.enefit.ee/et/-/blogi/paikeseenergia-ekspert-paikesepaneelide-peamine-eesmark-ei-ole-raha-teenimine-vaid-raha-saastmine> (Vaadatud: 23.04.2025).
- [4] ECGSOLAX, “How Does a Solar Inverter Synchronize with Grid?,” blogipostitus, 15 juuni 2023, <https://www.ecgsolax.com/blogs/for-beginners/how-does-a-solar-inverter-synchronize-with-grid> (Vaadatud: 11.05.2025).
- [5] Elektrilevi OÜ võrgulepingu tüüptingimused madalpingel kuni 63 A, https://www.elektrilevi.ee/-/doc/8644141/kliendile/TT_kuni_63A_alates_01_marts2022.pdf (Vaadatud: 19.05.2025).
- [6] Päikesejaam.ee, “Sofar Hybrid Inverter HYD-10KTL 3PH 10 kW,” <https://paikesejaam.ee/en/sofar-hybrid-inverter-hyd-10ctl-3ph-10-kw-en-292.htm> (Vaadatud: 12.05.2025).
- [7] MySolar, “Inverter Afore 10 kW,” <https://mysolar.ee/en/product/inverter-afore-10kw/> (Vaadatud: 12.05.2025).
- [8] Fronius, “Asymmetric Generation – Solar Energy Feature Overview,” <https://www.fronius.com/en-za/south-africa/solar-energy/installers-partners/products-solutions/features/asymmetric-generation> (Vaadatud: 11.05.2025).
- [9] FoxESS, “T Series TG3 Inverter User Manual,” https://ftemaximal.com/Fox.ess/T_Series/TG3-EN-user-manual.pdf (Vaadatud: 11.05.2025).
- [10] SolaX Power, “DTSU666 Energy Meter User Manual,” <https://ar.solaxpower.com/uploads/file/dtsu666-user-manual-en.pdf> (Vaadatud: 23.04.2025).
- [11] Huawei, “SUN2000-8/10/12/15/17/20KTL-M0 User Manual,” https://solar.huawei.com/-/media/Solar/attachment/pdf/au/service/commercial/SUN2000-8-20KTL-M0-User_Manual.pdf (Vaadatud: 23.04.2025).

- [12] Sungrow, “3-Phase PV Inverters (RT Series) – DTSU666 Energy Meter Wiring,” https://service.sungrowpower.com.au/files/Web_Files/FAQ/TD_202102_3-Phase_PV_Inverters_RT_Series_DTSU666_Energy_Meter_Wiring_V1.0.pdf (Vaadatud: 23.04.2025).
- [13] FoxESS, “Smart Meter Datasheet V1.1,” <https://www.fox-ess.com/download/upfiles/EN-Smart-Meter-Datasheet-V1.1-20241128.pdf> (Vaadatud: 23.04.2025).
- [14] AlphaESS, “SMILE S5 MTR 3P – Installation Manual (DTSU666),” https://haneco.com.au/import/downloads/SMILE-S5-MTR-3P_AlphaESS_Installation_manual_DTSU666.pdf (Vaadatud: 23.04.2025).
- [15] SolaX Power, “Smart Meter DDSU666-CT / DTSU666-CT User Manual,” <https://www.solaxpower.com/uploads/file/smart-meter-ddsu666-ct-dtsu666-ct-user-manual-global.pdf> (Vaadatud: 23.04.2025).
- [16] CHINT Global, “DTSU666 Three-Phase Energy Meter,” <https://www.chintglobal.com/global/en/products/instruments-meters/electricity-meter/dtsu666.html> (Vaadatud: 10.05.2025).
- [17] Qilowatt, “Inverterite juhtimine,” <https://qilowatt.eu/inverterite-juhtimine/> (Vaadatud: 11.11.2024).
- [18] Energiapada, “Energiajuhtimine,” <https://energiapada.ee/teenus/energiajuhtimine/> (Vaadatud: 11.11.2024).
- [19] TarkHoone, “HeatAdapt börsimoodul soojuspumpadele,” <https://tarkhoone.ee/heatadapt/> (Vaadatud: 23.04.2025).
- [20] Volton Technology OÜ, “Tooted,” <https://volton.ee/et/tooted> (Vaadatud: 23.04.2025).
- [21] Elektrilevi OÜ, “Hinnakirjad,” <https://elektrilevi.ee/et/hinnakirjad> (Vaadatud: 23.04.2025).
- [22] Terminal Energia, “Elekter – hinnakiri ja info,” <https://terminalenergia.ee/terminal/elekter/> (Vaadatud: 12.05.2025).
- [23] Elektrilevi, “Hinnakirjad,” <https://elektrilevi.ee/et/hinnakirjad> (Vaadatud: 23.04.2025).
- [24] ModbusTools, “Modbus Protocol Overview,” <https://www.modbustools.com/modbus.html> (Vaadatud: 23.04.2025).
- [25] ModemHelp.net, “What does 8-N-1 mean?,” <https://www.modemhelp.net/faqs/8n1.shtml> (Vaadatud: 23.04.2025).
- [26] Eclipse Foundation, “Eclipse Mosquitto – An open-source MQTT broker,” <https://mosquitto.org/> (Vaadatud: 23.04.2025).
- [27] IBM, “What is an API?,” IBM Think, <https://www.ibm.com/think/topics/api> (Vaadatud: 23.04.2025).

- [28] FoxESS, “FoxESS Open API Documentation,” <https://www.foxesscloud.com/public/i18n/en/OpenApiDocument.html> (Vaadatud: 23.04.2025).
- [29] Doc Walker, “ModbusMaster Arduino Library,” GitHub, <https://github.com/4-20ma/ModbusMaster> (Vaadatud: 23.04.2025).
- [30] AliExpress, “ESP32-WROOM-32 Development Board WiFi + Bluetooth,” <https://www.aliexpress.com/item/1005007446498441.html> (Vaadatud: 29.04.2025).
- [31] AliExpress, “MAX485 TTL to RS485 Module,” <https://www.aliexpress.com/item/1005007539932947.html> (Vaadatud: 29.04.2025).
- [32] AliExpress, “DR-15 15 W Industrial DIN-Rail Switching Power Supply 100–240 V AC → 5 V DC,” <https://www.aliexpress.com/item/1005006038126016.html> (Vaadatud: 23.04.2025).
- [33] AliExpress, “ESP8266 WiFi Development Board (WeMos D1 Mini Clone),” <https://www.aliexpress.com/item/1005008248110201.html> (Vaadatud: 10.05.2025).
- [34] Circuit Basics, “SRD-05VDC-SL-C Relay Module Datasheet,” <https://www.circuitbasics.com/wp-content/uploads/2015/11/SRD-05VDC-SL-C-Datasheet.pdf> (Vaadatud: 10.05.2025).
- [35] AliExpress, “AC-DC 220 V → 5 V 700 mA Power Supply Module,” <https://www.aliexpress.com/item/1005002133519235.html> (Vaadatud: 10.05.2025).
- [36] WAGO, “221 Series Compact Splicing Connectors,” <https://www.wago.com/global/electrical-interconnections/discover-installation-terminal-blocks-and-connectors/221> (Vaadatud: 10.05.2025).
- [37] Custom Components, “Nordpool: Home Assistant integration for Nord Pool electricity prices,” GitHub, <https://github.com/custom-components/nordpool> (Vaadatud: 23.04.2025).

7 Lisad

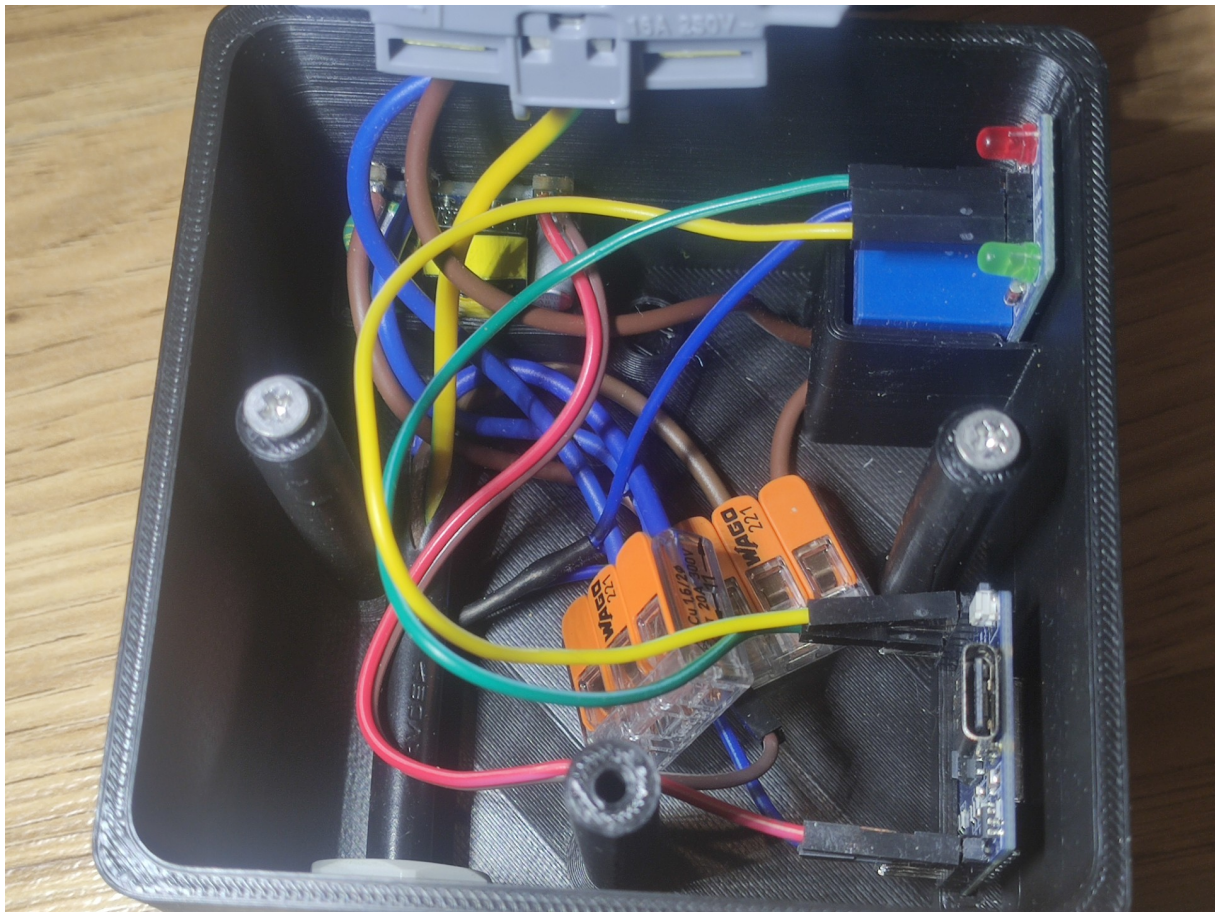
7.1 Programmikoodi ja 3D-failide repositoorium

GitHub: https://github.com/mekket/PV_optimeerimine_loputoo

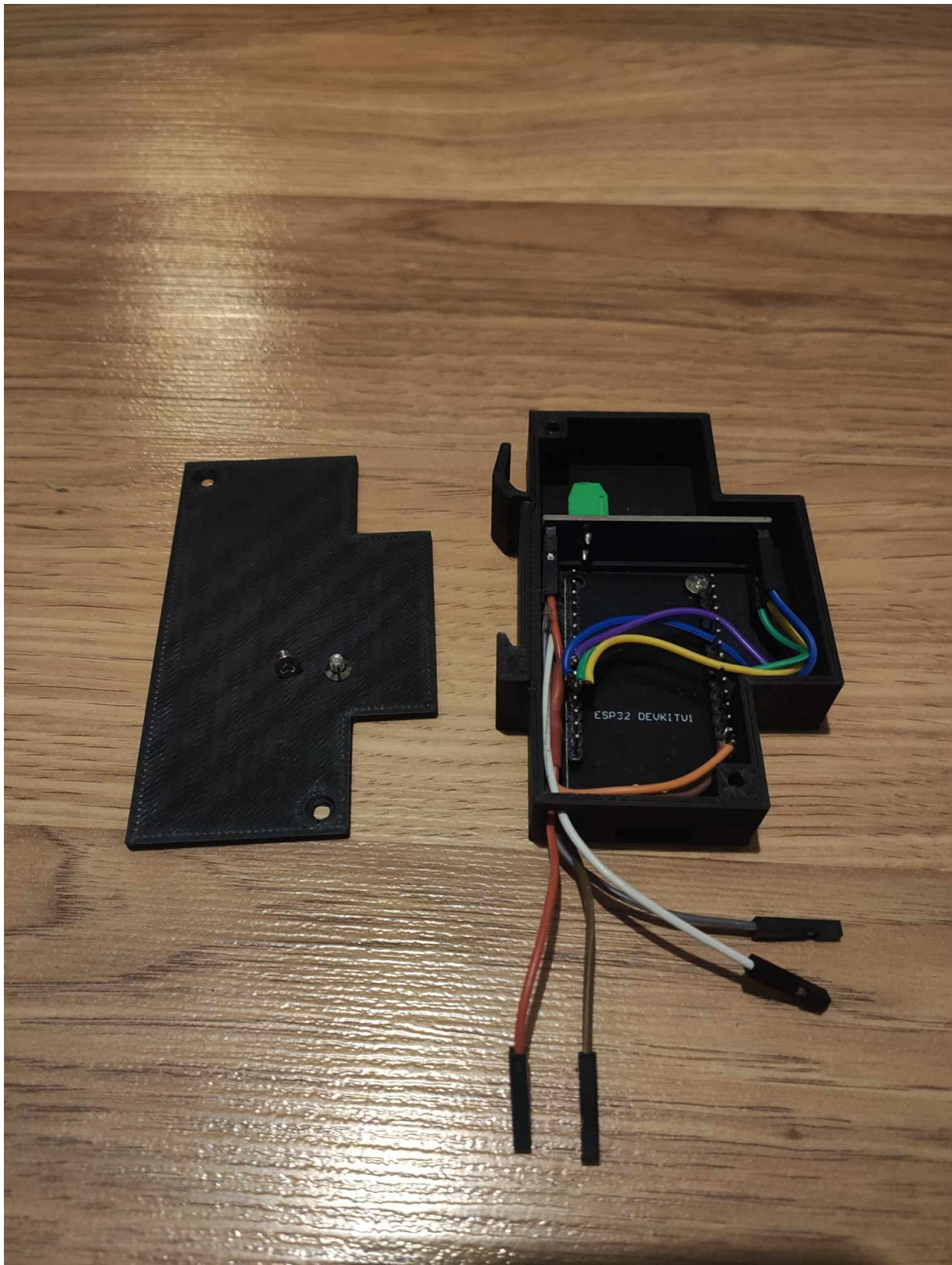
7.2 Pildid valminud seadmetest



Joonis 7.1: Tarbijaid lülitava seadme korpus.

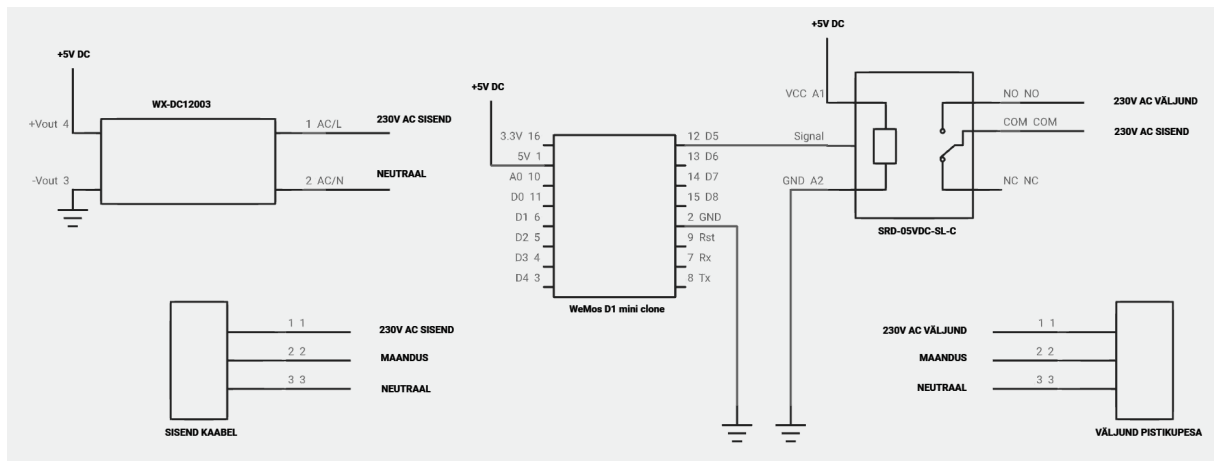


Joonis 7.2: Tarbijajaid lülitava seadme korpuse sisemus ja komponendid.

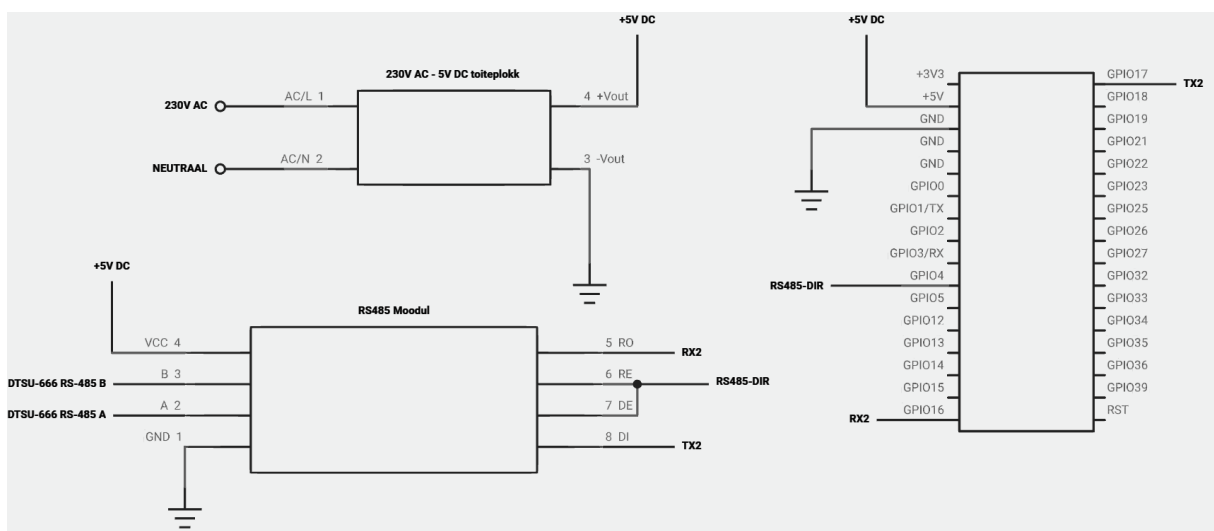


Joonis 7.3: Andmehõiveseadme korpus koos komponentidega.

7.3 Seadmete elektrilisi ühendusi kirjeldavad skeemid



Joonis 7.4: Tarbijaid lülitava seadme elektriskeem.



Joonis 7.5: Andmehõiveseadme elektriskeem.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Rein Kokassaar

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose

“Sümmeetrilise PV inverteri energia kasutamise optimeerimine”

mille juhendaja on Alvo Aabloo

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

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

Rein Kokassaar
20.05.2025