



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

JAOTUSALAJAAMA OMATARBE MIKROVÕRGU PROJEKTEERIMINE JA KASUMLIKKUSE MÄÄRAMINE AS HARJU ELEKTER TOOTE HEJA NÄITEL

**DESIGN AND DETERMINATION OF PROFITABILITY OF
THE SUBSTATION'S AUXILIARY SYSTEM MICROGRID
ON THE EXAMPLE OF HARJU ELEKTER PRODUCT HEJA**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Karl Kalmet

Üliõpilaskood: 182790AAAM

Juhendaja: Tarmo Korõtko, PhD

Marek Mägi, PhD

Tallinn, 2021

(Tiitellehe pöördel)

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.

"....." 20.....

Autor: Karl Kalmet

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 20.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

".....".....20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Karl Kalmet

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

„Jaotusalajaama omatarbe mikrovõrgu projekteerimine ja kasumlikkuse määramine AS Harju Elekter toote HEJA näitel“,

mille juhendajad on Tarmo Korõtko, Marek Mägi

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

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

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

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

_____ (kuupäev)

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

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Karl Kalmet

Lõputöö liik: Magistritöö

Töö pealkiri: Jaotusalajaama omatarbe mikro võrgu projekteerimine ja kasumlikkuse määramine AS Harju Elekter toote HEJA näitel

Kuupäev: 18.05.2020

124 lk (koos lisadega)

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendajad: teadur, Tarmo Korõtko, PhD; Marek Mägi, AS Harju Elekter Elektrotehnika vanem elektriinsener

Töö konsultant:

Sisu kirjeldus:

Lõputöö eesmärgiks on jaotusalajaama omatarbe mikro võrgu projekteerimine ning selle kasumlikkuse määramine AS Harju Elekter toote HEJA näitel. Esmalt antakse töös ülevaade mikro võrkude vajalikkusest ning erinevatest tüüpidest. Lisaks tuuakse välja mõned näited analoogsetest projektidest. Esimese peatüki lõpus tutvustatakse jaotusalajaama HEJA ning esitatakse nõudmised kavandatavale mikro võrgule. Lõputöö teises osas teostatakse mikro võrgus kasutatavate päikesepaneelide, inverterite, salvestusseadme ning juhtimisseadmete valik.

Kolmandas osas projekteeritakse mikro võrk. Esmalt esitletakse mikro võrgu tööpõhimõtet tavaolukorras elektrivõrguga ühendatuna, seejärel aga isoleerituna. Lisaks esitletakse elektrienergia müügi protsessi akupakist ning ilmaennustuse päringut veebiserverist. Peatükis tuuakse välja juhtkontrolleri tööprogrammid. Lõputöö viimases peatükis teostatakse projekteeritud mikro võrgu majanduslik analüüs. Kõigepealt arvutatakse päikesekiirguse andmed veebikalkulaatoriga PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System). Seejärel esitatakse omatarbe elektriseadmete koormusgraafikud ning leitakse elektrienergia kogused, mida tarbitakse ära kohapeal või müüakse elektrivõrku. Pärast seda teostatakse tasuvusanalüüs, milles arvestatakse päikesepaneelide amortisatsiooni ning elektri hinna tõusuga ajas. Samuti tuuakse välja alternatiivne lahendus, mille puhul oleks kasumi saavutamine võimalik. Lõpetuseks esitatakse voodiagramme, mille abil on võimalik hinnata kavandatava päikeseelektrijaama tasuvust jaotusalajaamal HEJA.

Märksõnad: Mikro võrk, päikeseelektrijaam, taastuvenergia, alajaam, majanduslik kasumlikkus

ABSTRACT

<i>Author:</i> Karl Kalmet	<i>Type of the work:</i> Master Thesis
<i>Title:</i> Design and determination of profitability of the substation`s auxiliary system microgrid on the example of Harju Elekter product „HEJA“	
<i>Date:</i> 18.05.2020	124 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power and Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisors:</i> Research Scientist, Tarmo Korõtko; Marek Mägi, AS Harju Elekter Elektrotehnika Seniro Electrical Engineer	
<i>Consultant(s):</i>	
<i>Abstract:</i> <p>The purpose of this master thesis is to design and determine of profitability of the substation`s auxiliary system microgrid on the example of Harju Elekter product HEJA. First, the paper provides an overview of the demands and different types of microgrids. In addition, some examples of similar projects are given. At the end of the first chapter, the HEJA distribution substation is introduced and the requirements for the proposed microgrid are presented. In the second part of the disseration, the selection of solar panels, inverters, storage device and control devices used in microgrid is performed.</p> <p>In the third chapter, the microgrid is designed. First, the working principles of different modes like on-grid and off-grid are presented. Then, the process of selling electricity from the battery pack and the weather forecast request from the web server are presented. In addition different controller programs are pointed out.</p> <p>In the last chapter of the disseration, the economic analysis of the designed system is preformed. At first, the solar radiation data is calculated with the web calculator PVGIS. Then the load schedules of the auxiliary appliances were determined and also the quantities of electricity consumed on site or sold to the grid were found. After that, a cost-benefit analysis is carried out, which takes into account the depreciation of the solar panels and the increase of the electricity price over time. Finally, an alernative solution is presented in which it would be possible to make a profit. Finally, a flow chart is provided to assess the cost-effectiveness of the proposed solar power plant at the HEJA distribution substation.</p>	
<i>Keywords:</i> microgrid, solar power plant, energy management, substation, cost-effectiveness calculation	



LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:

Jaotusalajaama omatarbe mikrovõrgu projekteerimine ja kasumlikkuse määramine AS Harju Elekter toote HEJA näitel

Lõputöö teema inglise keeles:

Design and determination of profitability of the substation's auxiliary system microgrid on the example of Harju Elekter product HEJA

Üliõpilane:

Karl Kalmet, 182790AAAM

Eriala:

**Energiamuundus- ja juhtimissüsteemid
Magistritöö**

Lõputöö liik:

Tarmo Korõtko

Lõputöö juhendaja:

Marek Mägi

Lõputöö kaasjuhendaja:

**AS Harju Elekter Elektrotehnika, vanem
elektriinsener**

Lõputöö ülesande kehtivusaeg:

Kevad 2021

Lõputöö esitamise tähtaeg:

18.05.2021

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

Kaasjuhendaja(allkiri)

1. Teema põhjendus

Käesolev lõputöö käsitleb jaotusalajaama omatarbe mikro võrgu projekteerimist ettevõtte AS Harju Elekter (edaspidi „ettevõtte”) toote „HEJA” näitel. Teema on aktuaalne, kuna Euroopa Liidu eesmärk on saavutada 21.saj teiseks pooleks süsinikneutraalsus. Määratud siht on pannud inimkonda leiutama uusi elektrienergia tootmis- ja juhtimisviise. Ideaali saavutamiseks nähakse Eestis ette põlevkivist elektrienergia tootmise lõpetamist ning hajali paiknevate taastuvate energiaallikate kasutuselevõttu. Olenemata aga sellest, kas elekter on toodetud tsentraliseeritud või detsentraliseeritud elektri jaamades on üheks keskseks elektrisüsteemi osaks alajaam. Peamiselt käsitletakse alajaamu elektrienergia edastajatena, kuid tegelikult on alajaamadel endil ka omatarbekulud. Omatarbeks kuluva elektri tootmine päikesepaneeliga ning toodetud energia tark juhtimine võimaldaks vähendada alajaama omatarbe koormusi. Loodav omatarbe mikro võrk „HEJA” alajaamas annaks võimaluse analüüsida nutikat omatarbe juhtimist. Juhul kui projekteeritav süsteem on majanduslikult kasumlik võib ettevõtte tulevikus sarnaseid lahendusi pakkuda klientidele.

2. Töö eesmärk

Antud lõputöö eesmärgiks on projekteerida jaotusalajaama „HEJA” omatarbe mikro võrk, et analüüsida selle majanduslikku kasumlikkust.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- 1) olemasolevate mikro võrkude lahkamine ning erinevate lahenduste ja rakenduste analüüsimine jaotusalajaamas;
- 2) vajaminevate juhtimisseadmete ja tarvitate valik;
- 3) omatarbe mikro võrgu projekteerimine „HEJA” alajaama;
- 4) majandusliku tasuvuse ja kasumlikkuse analüüs.

4. Lähteandmed

Käesoleva lõputöö lähteandmeteks on:

- AS Harju Elekter „HEJA” jaotusalajaama tehnilist lahendust esindavad joonised, dokumendid ja pildid;
- Ettevõtte sisemised standardid;
- Asjakohased teadusartiklid, lõputööd, raamatud ja ajakirjade artiklid;
- Mikro võrgus kasutatavate seadmete ja tarvitite dokumentatsioon;
- Asjakohased standardid ja seadused

5. Uurimismeetodid

Lõputöö esimeses pooles tutvutakse ning analüüsitakse olemasolevaid mikrovõrkude lahendusi ja võimalusi nii elektrivõrkudes kui ka kodumajapidamistes. Pärast seda teostatakse vajalike seadmete (mh. päikesepaneelide) ja tarvitite otsimine ning nende dokumentatsioonidega tutvumine. Elektriaparaatide valikul hinnatakse nende funktsionaalsust, võimet ühilduda teiste seadmetega, füüsilise keskkonda sobimist ning ka hinda. Töö teises pooles teostatakse tasuvusarvutused, milles lõpptulemusena on võimalik anda projekteeritud süsteemile majanduslik väärtus. Kalkuleerides võetakse arvesse nii päikese intensiivsust alajaama paiknemisalal, aastaringset temperatuuri, elektri hindu ning loomulikult ka kavandatud süsteemi maksumust. Andmete analüüsiks kasutatakse erinevaid ilmastiku ning elektri hinna mudeleid, samuti valemeid elektri tarbimise ja tootmise hindamiseks.

6. Graafiline osa

Töö graafiline osa on nii põhiosas kui ka lisades. Joonised:

- Päikese intensiivsus
- Aastaringne temperatuur
- Elektri hinna joonis
- Voodiagramm mikrovõrgu toimimisest
- Voodiagramm nutilahenduste valikust HEJA-sse
- Andmevahetuse (protokolli) joonis
- Elektritootmise ja elektritarbimise graafik
- HEJA ruumiline plaan (layout)

Tabelid:

- Sobilike elektriaparaatide hinnavõrdlustabel
- Elektriseadmete omatarbe kaovõimsuste tabel
- Erinevate lahenduste kasutamine ning tasuvus (kas päikesepaneeliga või ilma)
- Süsteemi kasumlikkuse analüüs

Skeemid:

- Mikrovõrgu põhimõtteskeem
- Mikrovõrgu elektriskeem
- HEJA omatarbe elektriskeem

7. Töö struktuur

1. Ülevaade teema olulikkusest
2. Olemasolevate nutilahenduste tutvustused
 - 2.1 Nutilahenduste analüüs ja võrdlus
 - 2.2 HEJA alajaama sobilike seadmete otsimine ja analüüs
3. Jaotusalajaama „HEJA“ omatarbe projekteerimine
 - 3.1 HEJA alajaama tutvustus (paigutusjoonis)
 - 3.2 HEJA omatarbe elektriskeem
4. Omatarbe juhtimissüsteemi projekteerimine
5. Omatarbe mikrovõrgu kasumlikkuse analüüs
 - 5.1 Süsteemi kogumaksumus
 - 5.2 Süsteemi tasuvusaeg
 - 5.3 Hinnang majanduslikule kasumlikkusele

Kokkuvõte

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Teadusartiklite varamud Researchgate.net, sciencedirect.com ja Ieexplore.iee.org ja muud internetileheküljed. Samuti asjakohased Eestis ja mujal maailmas ilmunud raamatud, standardid, direktiivid jms. Projekteeritud süsteemis kasutatavate seadmete tehniline dokumentatsioon.

9. Lõputöö konsultandid

Töö esimeses pooles käsitletavas AS Harju Elekter alajaama „HEJA“ analüüsimises saadakse abi ettevõtte töötajalt Marek Mägilt.

10. Töö etapid ja ajakava

- 1) Materjalidega tutvumine ja analüüsimine (21.02)
- 2) Projekteerimistingimuste ja võimaluste väljaselgitamine (26.02)
- 3) Seadmete, aparaatide ja tarvikute valik (05.03)
- 4) Süsteemi projekteerimine (elektriskeemid, põhimõtteskeemid, voodiagrammid)
- 5) Projekteeritud lahenduse teoreetilise osa valmimine (26.03)
- 6) Finantsarvutused (02.04)
- 7) Finantsarvutuste teoreetilise osa valmimine (09.04)

- 8) Kokkuvõtte ja järelduste kirjutamine (16.04)
- 9) Töö esmane versioon (16.04)
- 10) Esmase versiooni esitamine juhendajale (19.04)
- 11) Juhendajalt saadud tagasiside põhjal töö täiustamine ja parandamine (02.05)
- 12) Töö esitamine juhendajale lõplikuks ülevaatamiseks (03.05)
- 13) Juhendajalt saadud viimase tagasiside põhjal teostatud muudatused ja viimistlused (10.05)
- 14) Lõplik versioon on valmis. Lõputöö esitatakse kaitsmiseks (15.05)

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
EESSÕNA	13
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	14
SISSEJUHATUS	15
1. MIKROVÕRGUD TÄNAPÄEVAL	17
1.1 Mikrovõrgu osad	17
1.2 Mikrovõrgu tüübid	19
1.3 Teostatud mikrovõrkude lahendused	22
1.3.1 Qodsi alajaam	22
1.3.2 McAlpine Creek alajaam	23
1.3.3 Nottinghami ülikooli laboratoorium	25
1.3.4 Teostatud mikrovõrkude lahenduste analüüs	26
1.4 Harju Elekter alajaam HEJA	28
1.5 Mikrovõrgu kavandamine	29
1.5.1 Projekteeritava mikrovõrgu omatarbeseadmed	30
1.5.2 Mikrovõrgus kasutatavate elektriseadmete esitatavad nõuded	32
1.5.3 Jaotusalajaama HEJA ning mikrovõrgu asjakohased standardid	34
2. MIKROVÕRGU ELEKTRISEADMETE VALIK	37
2.1 Päikesepaneel	37
2.2 Võrguinverter	39
2.3 Akuinverter	42
2.4 Akupank	44
2.5 Juhtimissüsteemi seadmed	46
2.5.1 Loogikakontroller	46
2.5.2 Digitaalne väljund- ja sisendmoodul	47
2.5.3 Kommutaator ja lüüs	48
2.5.4 Ruuter ja antenn	48
2.5.5 Puhvertoiteallikas ja toiteplokk	49
2.5.6 Voolumõõtesüsteem	52
3. MIKROVÕRGU PROJEKTEERIMINE	53
3.1 Mikrovõrgu töö isoleeritud režiimis	56
3.2 Elektrienergia müük tipukoormustel	59
3.3 Ilmaennustuse päring	61
4. PROJEKTEERITUD MIKROVÕRGU KASUMLIKKUSE ANALÜÜS	64
4.1 Päikesepaneelide tootlikkus	67

4.2 Alajaama soojuskaod	69
4.3 Alajaama omatarbe elektriseadmete koormusgraafikud	73
4.4 Projekteeritud mikrovõrgu omahind	76
4.5 Elektri ostu- ja müügihind.....	77
4.6 Elektrienergia müümine akupakist	81
4.7 Projekteeritud mikrovõrgu tasuvusarvutus	83
4.8 Mikrovõrgu tootmine ja tarbimine eluea jooksul	85
4.9 Hinnang majanduslikule kasumlikkusele	86
4.9.1 Projekteeritud mikrovõrk suurendatud päikesepaneelide arvuga.....	87
4.9.2 Kavandatava päikeseelektrijaama kasumlikkuse leidmise voodiagramm ...	90
4.9.3 Majandusliku kasumlikkuse analüüs ning ettepanekud	93
KOKKUVÕTE	95
SUMMARY.....	97
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	99
LISAD	105
LISA 1 – Müügitsükli juhtprogramm	106
LISA 2 – Andmete sisestamine PVGISis	107
LISA 3 – Alternatiivse lahenduse tasuvusanalüüsis PVGISi sisestatud andmed	108
LISA 4 - Projekteeritud mikrovõrgu sekundaarskeem	109

EESSÕNA

Käesoleva magistritöö „Jaotusalajaama omatarbe mikrovõrgu projekteerimine ja kasumlikkuse määramine AS Harju Elekter toote HEJA näitel“ eesmärgiks on projekteerida jaotusalajaama HEJA mikrovõrk ning hinnata selle majanduslikku kasumlikkust. Töö teema valis autor töötades antud ettevõttes ja konsulteerides AS Harju Elekter töötaja Marek Mägiga. Lõputöö teema on ettevõttele aktuaalne, sest annab võimaluse klientidele pakkuda päikeseelektrijaama funktsionaalsusega jaotusalajaama. Lisaks annab see alajaamale võimekuse töötada elektrivõrgust isoleerituna.

Töö autor soovib avaldada tänu lõputöö juhendajatele Tarmo Korõtkole ja Marek Mägile. Nende kommentaarid ning nõuanded olid töö koostamisel väga suureks abiks.

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

AC	Vahelduvvool (Alternating current)
API	Rakendusliides (Application Programming Interface)
CIM	Ühtne infomudel (Common information model)
CO ₂	Süsinikdioksiid (Carbon dioxide)
DA	Jaotuse automaatika (Distribution automation)
DC	Alalisvool (Direct current)
DER	Hajutatud energiaressursid (Distributed energy Resources)
DMS	Jaotuse haldamise süsteem (Distribution management system)
DNP3	Hajutatud võrgu protokoll (Distributed Network Protocol)
DR	Nõudluskaja (Demand response)
EMS	Energiahalduse süsteem (Energy management system)
GmbH	Piiratud vastutusega äriühing (Gesellschaft mit beschränkter Haftung)
HEJA	Harju Elektri jaotusalajaam
HTTPS	Turvaline hüperteksti edastusprotokoll (Hyper Text Transfer Protocol Secure)
IEC	Rahvusvaheline Elektrotehnikakomisjon (International Electrotechnical Commission)
JRC	Euroopa Komisjoni Teadusuuringute Ühiskeskus (Joint Research Centre)
LHTTP	Hüperteksti edastusprotokoll (Library for Hypertext Transfer Protocol)
MPP	Maksimaalne võimsuspunkt (Maximum Power Point)
MPPT	Maksimaalse võimsuspunkti jälgimissüsteem (Maximum Power Point Tracking)
NREL	Rahvusvaheline taastuvenergia labor (National Renewable Energy Laboratory)
PV	Fotogalvaaniline (Photovoltaic)
PVC	Polüvinüülkloriid (Polyvinyl chloride)
PVGIS	Fotogalvaaniline geograafiline infosüsteem (Photovoltaic Geographical Information System)
RCBO	Kombineeritud rikkevoolukaitselüliti (Residual Circuit Breaker with Overload)
REKK	Riiklik energia- ja kliimakava
SAS	Alajaama automaatikasüsteem (Substation automation system)
SCADA	Talitusjärelvalvesüsteem (Supervisory Control and Data Acquisition)
TCP	Edastusohje protokoll (Transmission Control Protocol)
UPS	Katkematu toite allikas (Uninterruptible Power Supply)

SISSEJUHATUS

Viimastel aastatel on üheks keskseks aruteluteemaks olnud kliimasoojenemine. Selle peamise tekitaja - atmosfääri paisatava CO₂ hulga vähendamiseks tehakse mitmesuguseid kokkuleppeid ning arengukavasid. Eesti Vabariigi Valitsuse poolt kinnitatud arengukavas „Energiamajanduse arengukava aastani 2030“ on seatud eesmärk, et 2030. aastaks peab olema toodetud vähemalt 50% sisemisest elektrienergia lõpptarbimisest taastuvatest energiaallikatest. Kava näeb ette, et taastuvatest energiaallikatest energia tootmise kasvatamiseks tuleks rajada uusi mikro- ja haja tootmisüksusi.

Antud magistritöö eesmärgiks on projekteerida Harju Elektri jaotusalajaama omatarbe mikrovõrk ning hinnata selle majanduslikku kasumlikkust. Teitava projekti näol on ettevõttel võimalik pakkuda klientidele mikrovõrgu funktsionaalsusega jaotusalajaama HEJA. Töö esimeses peatükis antakse ülevaade tänapäeva mikrovõrkudest ning nende eri tüüpidest. Samuti tuuakse välja mõned näited olemasolevatest mikrovõrkudest. Lõpetuseks püstitatakse kavandatavale mikrovõrgule peamised nõuded. Nende täitmiseks peab mikrovõrk olema võimeline talitlema elektrivõrguta ja autonoomse elektrienergiaallikata. Samuti peab HEJA omatarbe mikrovõrk olema võimeline müüma elektrienergiat võimalikult kõrge kasumlikkusega ning tasuma end eluea lõpuks majanduslikult ära.

Lõputöö teises peatükis valitakse vastavalt eelnevalt sätestatud nõudmistele mikrovõrgu elektriseadmed. Nende hulgas nii elektrienergia tootmiseks kui ka juhtimiseks vajaminevaid seadmeid. Lisaks kirjeldatakse mõnede elektriseadmete valimisel nende tööpõhimõtteid.

Kolmandas peatükis kavandatakse jaotusalajaamale HEJA mikrovõrk. Esmalt tuuakse välja projekteeritud mikrovõrgu jõuahel, milles on päikesepaneelid, võrguinverter, akuinverter ning aku. Seejärel kirjeldatakse mikrovõrgu tööd isoleeritud olekus milles, näitlikustatakse ka juhtimissüsteemi tööd ning ka loogikakontrolleri programmi. Samuti esitletakse elektrienergia müümist akupakist elektrivõrgu tipukoormusel ja kontrolleri talitlemist ilmaprognoosi saamiseks veebiserverist.

Viimases neljandas peatükis teostatakse projekteeritud mikrovõrgule majanduslik kasumlikkuse analüüs. Selle käigus leitakse veebikalkulaatori PVGIS abil päikesepaneelide tootlikkus. Samuti koostatakse kõikidele omatarbe mikrovõrgu elektriseadmetele koormusgraafikud. Kütteseadmete koormusgraafikute leidmisel kasutatakse Riigi Ilmateenistusest saadud temperatuuri arhiivandmeid.

Päikesepaneelide tootlikkuse ning omatarbe elektriseadmete koormusgraafikute võrdlusega selgitatakse välja elektrienergia, mis tarbitakse ära kohapeal või müüakse elektrivõrku.

Mikrovõrgu eluea tootluse leidmiseks liideti kokku aastatega teenitud müügitulud, millede leidmisel arvestati iga aastase päikesepaneelide tootlikkuse vähenemisega ning prognoositava elektrihinna tõusuga.

Samuti analüüsitakse alternatiivset lahendust, mille puhul lisatakse süsteemi juurde täiendavaid päikesepaneele, et saavutada päikeseelektrijaama eluea lõpuks kasumilävi. Alternatiivse lahenduse eesmärk on kasumliku lahenduse näitlikustamine.

Lisaks esitatakse voodiagramme, mille abil on võimalik hinnata jaotusalajaama HEJA kavandatava päikeseelektrijaama tasuvust. Lõpetuseks tuuakse välja ettepanekud mikrovõrgu kasumlikumaks muutmiseks.

1. MIKROVÕRGUD TÄNAPÄEVAL

Viimase kümnendi üheks päevakajalisemaks teemaks on olnud kliimasoojenemine. Aasta 2020 oli Euroopas läbi aegade kõige soojem. Maailma lõikes kordus 2016. aasta soojarekord. Satelliidiandmete analüüs näitas, et CO₂ hulk atmosfääri kontsentratsioonis on enneolematult suur. Kliimasoojenemise peamiseks süüdlaseks peetava süsinikdioksiidi juurdekasv oli küll pisut aeglasem kui 2019. aastal, kuid siiski pole inimkonnal veel põhjust rahul olla. Kui inimesed ei suuda süsinikreostuste kasvu piirata, ei muutu planeet ka süsinikneutraalseks, mis omakorda annab kliimasoojenemisele veelgi hoogu juurde. [1]

Kliimasoojenemise vähendamiseks näeb Eesti riiklik energia- ja kliimakava REKK 2030 ette, et aastaks 2030 peaks kohalikust toodetust elektrist vähemalt 30% olema toodetud taastuvenergiaallikatest [2]. Eesti Vabariigi Valitsuse poolt kinnitatud Energiamaajanduse arengukava aastani 2030 on samaks aastaks püstitatud veelgi kõrgema eesmärgi. Nimelt loodetakse, et aastaks 2030 moodustab taastuvatest energiaallikatest toodetud elektrienergia hulk vähemalt 50% sisemisest elektri lõpptarbimisest. Samuti sätestab kava, et taastuvenergia tootmise arendamiseks tuleks rajada uusi mikro- ja haja tootmisvõimsusi. [3]

Seatud eesmärkide täitmiseks rajatakse uusi detsentraliseeritud haja tootmisüksusi, mis sisaldavad mikrovõrke. Mikrovõrguks peetakse kontrollitavat lokaliseeritud kogumit, millesse kuuluvad elektrienergia tootmiseadmed ning tarvitid. Vastupidiselt makrovõrgule, milles on kõik tootmiseadmed ja tarvitid ühendatud samasse elektrivõrku on mikrovõrgu ulatus selgelt piiritletud. Mikrovõrk võib olla ühendatud üldelektrivõrguga, kuid võib talitleda ka täielikult iseseisvalt. Mikrovõrkusid rajatakse eesmärgiga vähendada energiakulusid ja pidurdada keskkonnasaastamist. Samuti vähendab mikrovõrk elektrikatkestuse riski ning optimaalse juhtimisega võib vähendada ka kulutusi. [4] [5]

1.1 Mikrovõrgu osad

Mikrovõrgu peamisteks elementideks on elektrienergia tootmiseseade, elektril töötav seade ehk tarviti, salvestusseade, juhtimiseseadmed ning saarestumiseks mõeldud lüliti. Viimasena välja toodud lüliti leiab kasutust ainult nendes mikrovõrkudes, mis võivad töötada sünkroonis elektrivõrguga. [4]

Elektrienergia tootmiseade on mikrovõrku elektriga varustav generaator, mis ei sõltu elektrivõrgust. See peab olema piisavalt võimas, et varustada mikrovõrgus olevaid seadmeid elektrienergiaga. Tootmiseadmeiks võivad olla nii taastuvatel energiaallikatel põhinevad lahendused nagu päikesepaneelid, tuulegeneraatorid või biogaas samuti ka vähem levinud päikesekollektorid, hüdrogeneraatorid ja loodete energia. Lisaks leiavad kasutust ka fossiilsetel kütustel nagu diisel, bensiin ja gaasil põhinevaid generaatorid. [4]

Mikrovõrgu tarvititeks peetakse elektriseadmeid, mis saavad töötamiseks vajaliku elektrienergia kohalikust tootmisüksusest. Mikrovõrgus olevate elektriseadmete tarbimist mõõdetakse pidevalt, tänu millele saab toimuda arukas elektrienergia juhtimine. Juhtimissüsteemi abil saab mikrovõrgus olevaid elektriseadmeid sisse ja välja lülitada vastavalt võrgus sätestatud prioriteetidele. [4]

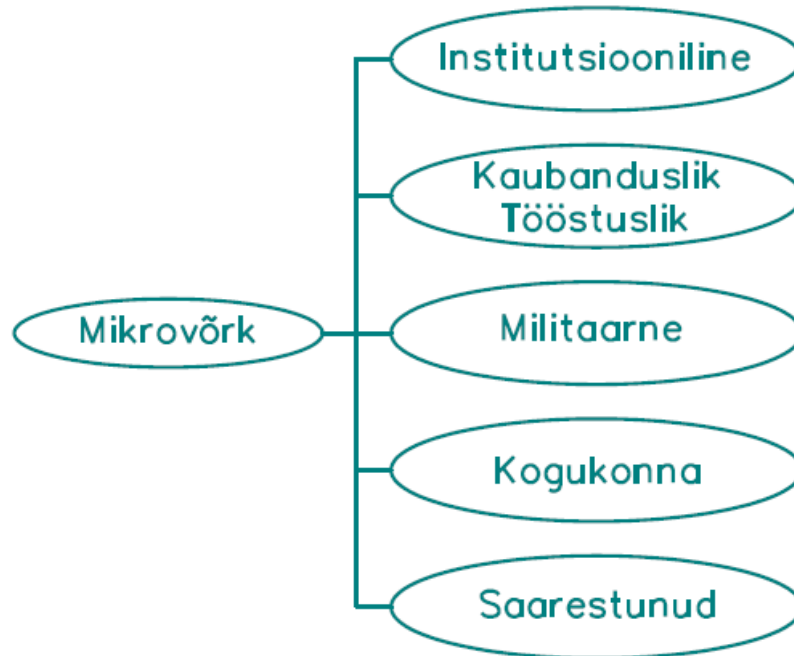
Mikrovõrgus olevaks salvestusseadmeiks võib olla nii elektril, rõhul, gravitatsioonil, hoorattal või soojuste salvestamisel põhinevad tehnoloogiad. Salvestusseadmel on mitmeid erinevaid funktsioone. Seadme abil on võimalik tagada elektri kvaliteeti sealhulgas nõutud sagedust ja pinget. Salvestusseade tagab mikrovõrgu toimimise ka volukatkestuse korral ning on samuti vajalik elektrienergia optimaalseks kasutamiseks. [6]

Mikrovõrgu juhtimisseadmeteks peetakse neid elektriaparaate, mida kasutatakse monitoorimiseks ja kontrollimiseks. Juhtimisseadmed seovad omavahel kokku kõik mikrovõrgus olevad seadmed, tänu millele on võimalik ohjata elektrienergia tootmist ja tarbimist. Tootmise juhtimisel toimub elektrienergia suunamine mikrovõrgus olevatele tarvititele, salvestusseadmetesse või elektrivõrku. Tootmise ja tarbimise juhtimine toimub vastavalt määratud prioriteetidele. Juhtimissüsteem võib olla nii tsentraliseeritud kui ka detsentraliseeritud. [4]

Mikrovõrku elektrivõrguga ühendumise lüliti on ainult nendel mikrovõrkudel, mis saavad töötada ka koos elektrivõrguga. Mikrovõrke, millel elektrivõrguga ühendumist ei ole, nimetatakse isoleeritud mikrovõrkudeks. Sellised mikrovõrgud on peamiselt kasutusel piirkondades, kus tavapärane elektrivarustus puudub. Lisaks võidakse mikrovõrk isoleerida tehnilistel või majanduslikel põhjustel. [6]

1.2 Mikrovõrgu tüübid

Mikrovõrkusid võib kategoriseerida erimoodi (Joonis 1.1). Üheks levinuks liigituseks on järgnev [7]:



Joonis 1.1 Mikrovõrkude tüübid

Institutsiooniline mikrovõrk koondab avalikke hooneid ning asutusi nagu haiglad ja õppeasutused. Nende mikrovõrkude projekteerimisel on arvestatud konkreetseid vajadusi. Peamiselt paiknevad need riigile kuuluvates taristutes. Rühma kuuluvate mikrovõrkude üheks peamiseks ülesandeks on katkematu elektrienergia tagamine. Õppeasutustesse projekteeritud mikrovõrke kasutatakse peamiselt õppeesmärkidel. [7]

Kaubanduslikud ja tööstuslikud mikrovõrgud on sarnased institutsiooniliste mikrovõrkudega, kuid on tehniliselt pisut keerukamad. Tihti kuulub kaubanduslikku ja tööstuslikku mikrovõrku mitu erinevat ettevõtet, mistõttu võib kõigile osapooltele sobiva juhtimissüsteemi väljatöötamine olla komplitseeritud. [7]

Militaarses mikrovõrgus kasutatakse peamiselt taastuvenergiaallikatel põhinevaid energiaressursse. Seda peamiselt elektrivõrgust isoleerituse tõttu. Enamik sõjaväelisi mikrovõrke on ajutise iseloomuga, milles kõrgeim prioriteet on töökindlusel. Seetõttu on elektrienergia kvaliteet pigem teisejärguline. [7]

Kogukonna mikrovõrgud on kasutusel elamurajoonides. Need võrgud on suurema osa oma tööajast ühendatud elektrivõrguga.

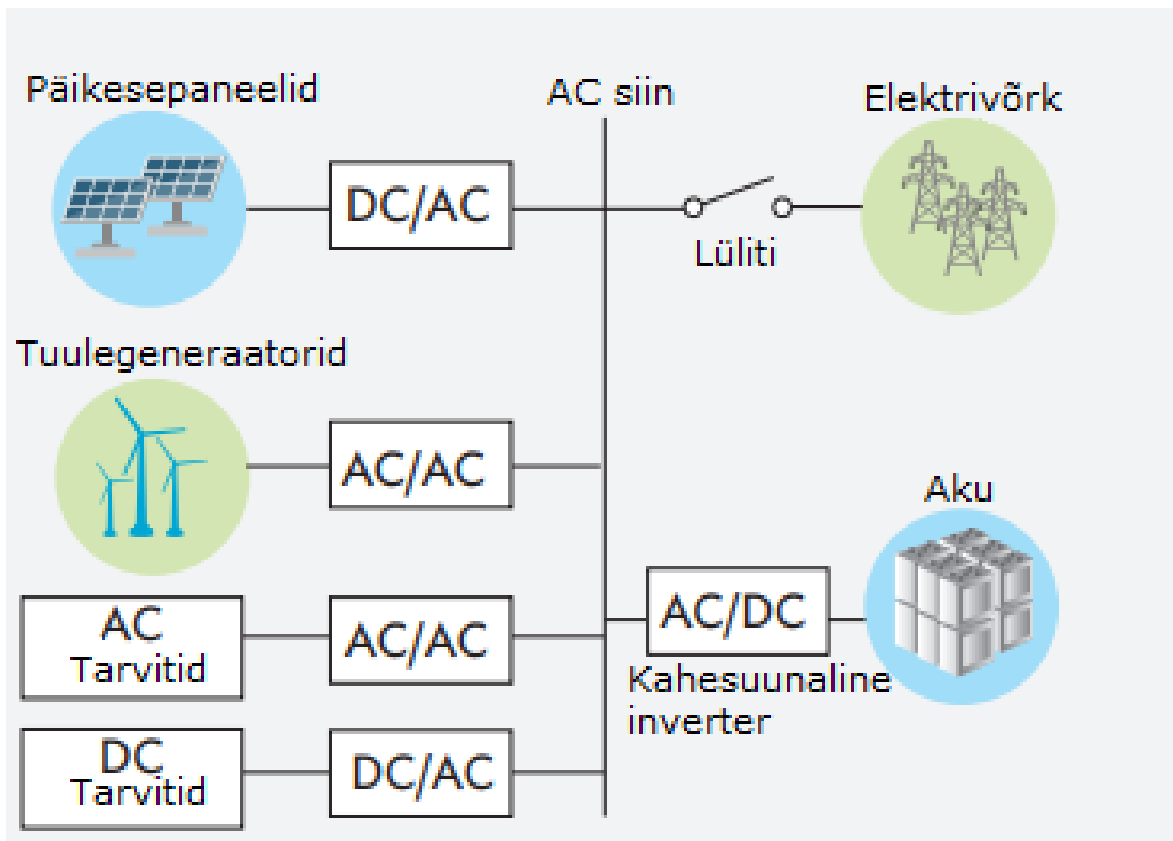
Kuna kogukonna mikrovõrgud on peamiselt eraomandis, on nende tehnilised lahendused piiratud asjakohase seadusandlusega. Kokkuleppeliselt mikrovõrgu omanikuga võib võrguteenuse pakkuja kasutada mikrovõrkusid ära tipukoormuste vähendamiseks. [7]

Saartalitudes mikrovõrk on elektrivõrgust alati isoleeritud. Olemuselt sarnanevad need kogukonna või tööstuslikele mikrovõrkudega. Erinevalt militaareesmärgil kasutatavast mikrovõrgust on saartalitudes töötavas võrgus oluline ka elektrienergia kvaliteet. Saarestunud mikrovõrgus on oluline töökindlus, efektiivsus ja kvaliteet. [7]

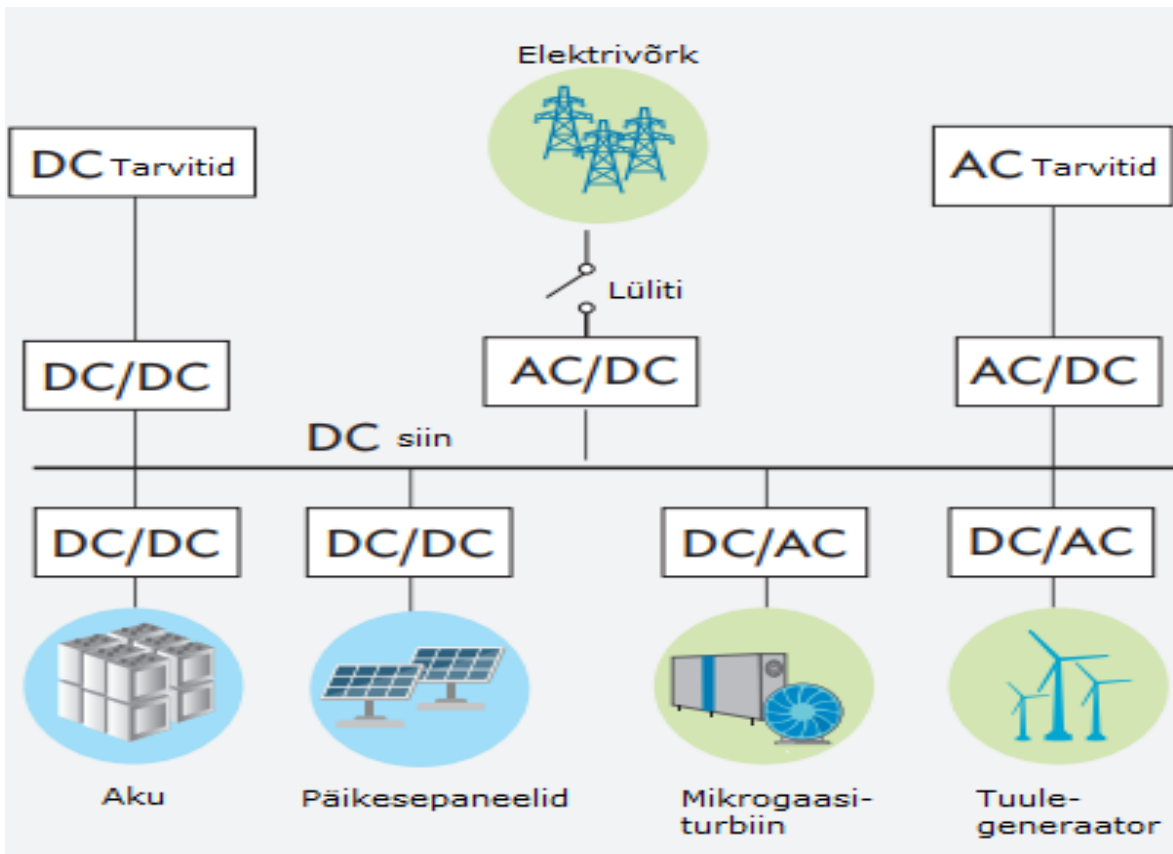
Kõiki mikrovõrke on võimaik jagada kahte rühma tulenevalt nende sidususega elektrivõrgu suhtes. Isoleerimata ehk *on-grid* mikrovõrguks nimetatakse süsteemi, mida saab ühendada elektrivõrguga. Sellises ühenduses võib mikrovõrk elektrivõrgust elektrienergiat ammutada või hoopis toodetud ülejäägi sinna suunata. Isoleerimata mikrovõrgu vastandiks on isoleeritud ehk *off-grid* süsteem. Selle lahenduse puhul on mikrovõrk elektrivõrgust täielikult eraldatud. Kasutusel on ka vahepealne mikrovõrgu variant, mis on võimeline töötama mõlemas režiimis. Tehnilistel või majanduslikel põhjustel võidakse mikrovõrk elektrivõrguga ühilduda või sellest lahutada. [8]

Ehitustehniliselt eristatakse vahelduvvoolu-, alalisvoolu- ning hübriidsiinidega mikrovõrke. Vahelduvvoolu mikrovõrgus on elektrienergia allikad, salvestusseadmed ja tarvitid ühendatud vahelduvvoolusiiniga (Joonis 1.2). Kui mikrovõrgu generaatori tootlikkus ületab võrku ühendatud tarvitite nõudlust saab ülejäägi võrku müüa. Elektri puudujäägil saab seda võrgust osta. Tänu vahelduvvoolusiinile ei ole vaja lisa seadmeid, et elektrit võrgust osta või müüa. Vahelduvvoolusiinil töötavaid mikrovõrke on lihtsam integreerida olemasolevasse elektrivõrku ning mikrovõrgu elektriseadmed on soodsamad kui alalisvoolusiinil töötavate mikrovõrkude elektriseadmed. Tänapäeval ületab vahelduvvoolusiinile ehitatud mikrovõrkude hulk alalisvoolusiinidega lahendusi. [4]

Alalisvoolusiiniga mikrovõrgus on elektriseadmed ühendatud ühisele alalisvoolusiinile (Joonis 1.3). Alalisvoolusiiniga mikrovõrgu rajamine on üldjuhul kallim kui vahelduvvoolusiiniga mikrovõrk, kuid seevastu on käidukulud ja süsteemi kaod väiksemad. Seda suuresti tänu samal alalispingel töötavatele alalisvoolutarvititele. Samuti on kaod väiksemad aku tühjendamisel ning täislaadimisel. Peamiste taastuvenergiaallikatena kasutatakse päikesepaneele, tuulegeneraatoreid ning kütuseelemente. Alalisvoolusiinil põhinevate mikrovõrkude populaarsus on kasvutrendis. [4]



Joonis 1.2 Vahelduvvoolusiinil töötav mikrovõrk [4]



1.3 Alalisvoolusiinil töötav mikrovõrk [4]

Lisaks vahelduvvoolusiinidega ja alalisvoolusiinidega mikrovõrkudele leiab kasutust ka nende omavaheline kombinatsioon ehk hübriidvõrk. Tänu kaheasuunaliste muundurite kasutamisele pakub hübriidmikrovõrk parimat integratsiooni erinevate energiatootmiseseadmete ja elektritarvitite ühildamisel. [4]

1.3 Teostatud mikrovõrkude lahendused

Lõputöö raames projekteeritava mikrovõrgu kavandamisel on alljärgnevalt analüüsitud ja omavahel võrreldud mõningaid varasemaid realiseeritud mikrovõrkude lahendusi.

1.3.1 Qodsi alajaam

Mikrovõrguga alajaam asub Iraani pealinnast Teheranist edelasse jäävas Qodsi linnas. Algselt oli alajaama projekteeritud alalisvoolul põhinev puhvertoiteallikas, mis tagas elektrienergiat lühikeste elektrikatkestuste jooksul. Projekti alguses püstitatud ülesandeks oli projekteerida innovatiivne lahendus, milles on kombineeritud nii taastuenergiaallikad kui ka akupakid. Eesmärgiks oli tõsta alajaama töökindlust ka pikemate elektrikatkestuste korral. Selleks projekteeriti süsteemi fotogalvaaniline generaator, akupank ja päikeseinverter. Projekteeritava süsteemi seadmete valikul arvestati halvimat juhtu, mil kõik tarvitid on üheaegselt töös. [9]

Päikesepaneelidena kasutati monokristall elementidega paneele, mille efektiivsus on 16,4%. Tänu soodsale asukohale ning päikesekülastele päevadele on tootlikkus üsnagi suur. Päikesepaneelide valikul arvestati elektrivõimsustega, elektrikadude, elektrivoolude ja elektripingetega, mis määrasid ära PV-paneelide ühendamise. Projektis kasutati ühtekokku 36-PV paneeli, mis mahtusid ära alajaama katusele. Päikeseinverteri valikul arvestati päikesepaneelide omavahelise ühendamisega, mis määratleb elektripinged ja elektrivoolud. [9]

Akupaki mahtuvuse valikul hinnati keskmist päevast elektrienergia vajadust, elektrivõrgust sõltumatult töötamise päevi, elektrikadusid, tühjendamise protsenti ja nimipinget. Alajaamas on omatarbeseadmed nagu elektrivalgustus, elektrikäte, kommunikatsiooni seadmed, ventilatsioon ja elektrimootorid. Lisaks alalisvooluseadmed nagu kaitselülite mähised, releed, akulaadija, talitusjärelvalvesüsteem SCADA ja muud kommunikatsiooni seadmed. Abiseadmed jaotati vastavalt elektrienergia tarbimisgraafikutele kolme kategooriasse. Erinevad rühmad moodustasid elektriseadmed, mis töötavad koguaeg, vahetevahel ning momentaalselt. [9]

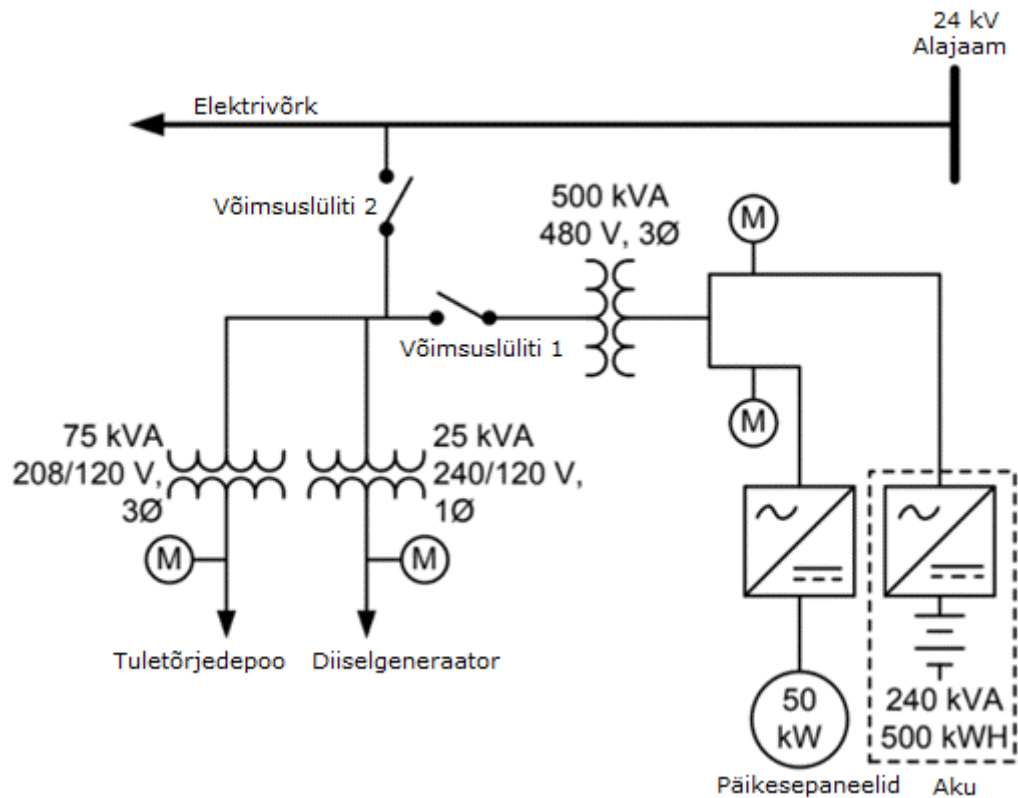
Projekti analüüsist selgus, et tänu päikseküllasele maastikule ja omatarbe elektrivõimsusele on projekteeritud päikesepaneelidega võimalik katta etteantud võimsustarve ning samuti tõuseb ka alajaama töökindlus. [9]

1.3.2 McAlpine Creek alajaam

Ameerikas Lõuna-Carolinas Charlottes asuvasse McAlpine Creek alajaama integreeriti 2015. aastal mikrovõrk. Töö teostajaks oli üks Ameerika suurimaid energeetika ettevõtteid Duke Energy, mis on uurinud mikrovõrke ja taastuenergiaallikaid aastast 2006. Alajaama läheduses on 50 kW jõudlusega päikeseelektrijaam. Süsteemis on ka akuhaldussüsteem võimsusega 240 kW ning mahutavusega 500 kW/h. [10]

Alajaama kõrval on kohalik tuletõrjedepoo, mis oli huvitatud päikesepaneelidest ning puhvertoiteallikast, et tagada elektrienergia olemasolu ka elektrikatkestuse korral. Duke Energy nägi paigaldatavas akupakis lisatoiteallikat, millega vähendada tipukoormusi. Seetõttu otsustas ettevõtte kogu süsteemi rajada omafinantseeringul. Depoo elektritarbimise väljaselgitamiseks teostati nädala pikkune mõõdistus. Testi tulemusena selgus, et kavandatav mikrovõrk suudaks jaamale tagada toitevoolu olemasolu vähemalt 36-48 tunniks. Tulemused näitasid samuti, et kontrollseadmete, kliimaseadme, kütte, kommunikatsiooni seadmete ja inverterite poolt tarvitatav elektrivõimsus võib ulatuda kuni 12 kW-ni. [10]

Süsteem ehitati selliselt, et tuletõrjejaama elektrisüsteem saaks töötada ka elektrivõrgust eraldatuna ehk *off-grid* režiimis (Joonis 1.4). Selleks, et mikrovõrku elektrivõrgust eraldada on ahelas kasutusel võimsuslüliti 1. Võimsuslüliti 2 abil on võimalik päikesepaneeli ning akut mikrovõrgust lahti ühendada. Võimsuslülitid seadistati avanema juhul kui elektrivõrgus esineb alapingeid, samuti lisati neile sünkronisatsiooni süsteem, mille abil on mikrovõrk elektrivõrguga sünkroonis. Lisaks on süsteemis kasutusel veel kontrollid, abitoiteahelad, kommunikatsiooni seadmed ja Duke Energy talitlusjärelvalvesüsteem. Mikrovõrgu kontrolleri valikul arvestati erinevate seadmete kommunikatsiooni ühilduvusega. [10]



1.4 McAlpine Creeki mikrovõrgu põhimõtteskeem [10]

Mikrovõrku juhtivasse kontrollerrisse seadistati kolm erinevat töörežiimi [10]:

- I režiim – automaatne, manuaalse sünkronisatsiooniga;
- II režiim – automaatne;
- III režiim – manuaalne.

Esimest režiimi kasutatakse peamiselt süsteemi demonstreerimiseks või testimiseks. Selles funktsioonis lülitub mikrovõrk elektrikatkestuse korral automaatselt *off-grid* režiimi. Saarestunud mikrovõrk annab tuletõrjedepoole ja alajaama omatarbeseadmetele elektrienergiat akupakist ning võimalusel ka päikesepaneelidelt. Juhul kui akupaki pinge langeb alla alampiiri lülitab see ennast unerežiimi ning jätab mikrovõrgu elektrita. Sel juhul käivitub diiseldiiselaator, mis hakkab mikrovõrku toitma. Elektrivõrguga uuesti ühendumiseks on tarvilik manuaalne lülitamine läbi dispetšersüsteemi. [10]

Teine režiim on sarnane esimesele, ainuke erinevus seisneb selles, et elektrivõrku tagasi lülitumine toimub automaatselt. Seda juhul kui elektrivõrgus on taastunud pinge ning sagedus. Elektrivõrguga uuesti ühendumisel käivitab kontrollerr sünkronisatsiooni protsessi, mille käigus võimsuslüüti 1 teostab sünkronisatsiooni kontrolli ning sulgeb oma kontaktid. [10]

Kolmas režiim on täielikult manuaalne. Manuaalselt on seadmeid võimalik juhtida talitlusjärelvalvesüsteemi või masinliidese abil. Viimasega on võimalik mikrovõrku monitoorida ning ka juhtida. Talitlusjärelvalve süsteemi abil on võimalik vahetada töörežiime, saarestuda, sünkroniseerida, määrata aku laadimistasemeid ning vaadata häiringuid. [10]

1.3.3 Nottinghami ülikooli laboratoorium

Nottinghami ülikooli laboratooriumis on olemas targa maja mikrovõrk, millega saab teostada erinevaid katseid. Laboratooriumis on kasutusel järgnevad seadmed [11]:

- liitiumioonaku mahutavusega 6,4 kWh;
- kahesuunaline akuinverter võimsusega 2,5 kW;
- päikesepaneelid tipuvõimsusega 1,4 kW;
- võrguinverter võimsusega 3,68 kW;
- vahelduvvoolu elektritarviti koormuse matkur võimsusega 5,6 kW;
- tark arvesti.

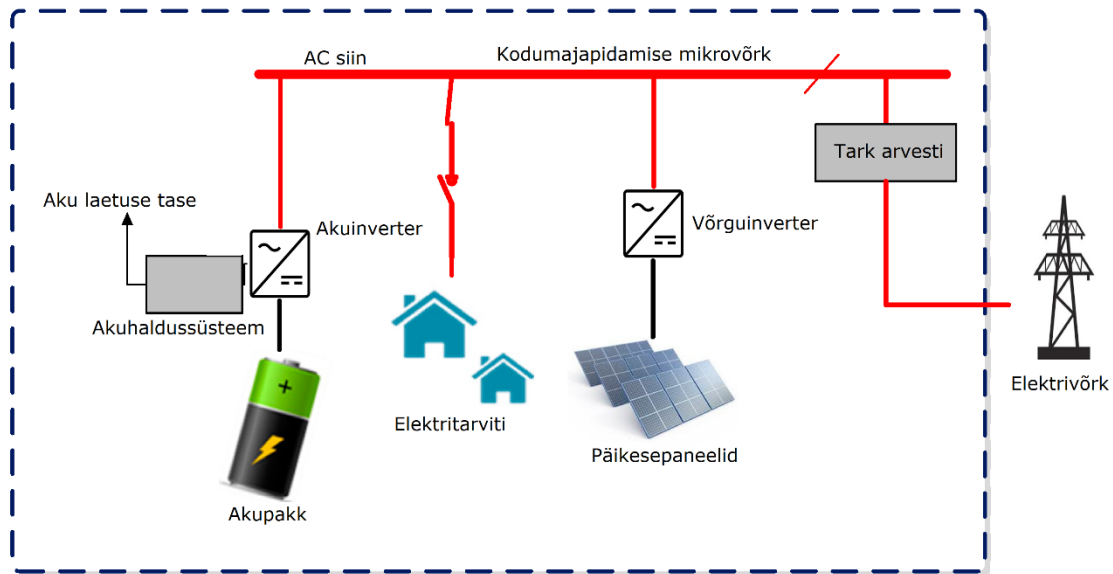
Ülikoolitöötajad tegid projekti, milles uurisid reaajas ning mudelitel põhinevaid energiahaldussüsteeme. Reaalaja energiahaldussüsteemi eesmärk on minimaliseerida majapidamise elektriarveid, võrgus olevaid elektrienergia kadusid ning kasutada ära maksimaalse efektiivsusega päikesepaneelide poolt toodetud elektrienergiat. [11]

Süsteemi põhimõte on laadida akupatareid öise elektritarviga, mis on päevasest odavam ning päeval ajal kasutada akupakis olevat elektrienergiat. Tänu sellele ei peaks üldse või siis minimaalselt soetama elektrivõrgust. Simulatsioonis kasutati vahelduvvoolu elektritarviti matkurit, mis ühendati mikrovõrgu pistikupessa. Aparaat on võimalik panna imiteerima mõnda tüüpilist majapidamises kasutatavat elektriseadet. [11]

Võrgus on kasutusel kolmefaasiline arvesti, mis mõõdab nii PV-paneelide poolt toodetud kui ka võrku suunatud ning sealt võetud elektrilist võimsust ajas (Joonis 1.5) . Tervet mikrovõrku juhib arvuti, mis on ühtlasi ka akuhaldussüsteemiks. [11]

Reaalaja haldussüsteemis simuleeriti viite erinevat lahendust. Kõige efektiivseima tulemuse andis režiim, milles kasutati ära järgmise päeva ilmaennustust. Eeloleva päeva ilmaprognoosi järgi ennustati päikesepaneelide tootlikkus ning seeläbi määrati ära akupaki laetuse tase. Akupatareid laeti võrgust võetava elektriga ainult niipalju kui tootmise ennustamise järgi oleks vaja. Seetõttu ei tekkinud päeval olukorda, mil päikesepaneelide poolt toodetud elekter oleks vaja suunata võrku.

Seda saaks ära kasutada aku laadimiseks. Selle lahenduse teostamiseks on tarvis interneti ühendust ning ligipääsu ilmaprognoosi andmetele. [11]



1.5 Nottinghami ülikooli mikrovõrgu laboratoorium [11]

Sarnaselt reaalaraja haldussüsteemile on ka mudeli põhise majandamise eesmärgiks vähendada elektri ostmiseks kuluvat raha, muuta efektiivsemaks PV-paneelide poolt toodetud elektrienergia kasutamist ja vähendada kadusid aku täislaadimisel ning tühjendamisel. Mudeli põhine energiahaldussüsteem teostab määratud ajavahemiku tagant uue elektrienergia kasutamise mudeli. Selleks saab süsteem sisendandmeid nagu päikesepaneelide toodang, eeldatav elektritarbimine ja aku laetuse tase. [11]

Elektrienergia tarbimise ennustamiseks saab kasutada kolme erinevat lähenemist. Seda saab ennustada näiteks möödunud päeva või nädala sama päeva tarbimise alusel. Samuti on võimalik määrata eelolev tarbimine eelmiste nädalate keskmiste väärtuste põhjal. Päikesepaneelid tootlikkust on võimalik ennustada eelmise päeva ning möödunud nädala keskmise järgi. Lisaks saab elektrienergia tarbimist ennustada ilmaprognoosi järgi. [11]

Simulatsiooni tulemused näitasid, et sobilike ennustusmeetodite kasutamisel võib mudeli põhise energiahaldussüsteemiga saavutada märkimisväärset säästu. [11]

1.3.4 Teostatud mikrovõrkude lahenduste analüüs

Selles alapeatükis analüüsitakse erinevaid kasutuses olevaid mikrovõrke. Seeläbi selgitatakse välja nende omadused, mis võiksid kasutust leida ka projekteeritavas mikrovõrgus.

Erinevate realiseeritud mikrovõrkude analüüsimise käigus selgus, et alajaama omatarbeseadmete jaoks loodud mikrovõrke väga laialdaselt veel ei kasutata. Siiski toodi välja mõned sarnased lahendused, mis olid töö autorile leitavad.

Üks kõige sarnasemaid mikrovõrke planeeritavale asub Iraani linnas Quodis. Projekteeritud alajaama mikrovõrgus on kasutusel katusele paigaldatud päikesepaneelid ning puhvertoiteallikas akupaki näol. Sealse mikrovõrgu eesmärk on tõsta alajaama töökindlust ka pikemate elektrikatkestuste korral. Lõputöö autori arvates annab katusele paigaldatud päikesepaneelid teatud eelise, kuna sel juhul ei ole alajaama lähistel oleva maa-ala leidmine ja kasutamine tarvilik. Kahjuks ei leidnud lõputöö autor antud mikrovõrgu kohta detailsemat informatsiooni.

Lõuna-Carolinas alajaam McAlpine mikrovõrku võib pidada kogukonna võrguks (Joonis 1.1). Mikrovõrgu erinevad elemendid asetsevad hajutatult alajaama lähistel. Seetõttu ei ole antud lahenduses palju ühiseid jooni kavandatavad mikrovõrguga. Välja saab tuua mikrovõrgus rakendatavaid erinevaid juhtimiserežiime. Nende seas on nii manuaalne, pool- kui ka täisautomaatne režiim. Automaatse režiimi korral toimub *off-gridi* ja *on-gridi* vaheline lülitamine inimese sekkumiseta. Poolautomaatse töö puhul saarestub mikrovõrk automaatselt, kuid uuesti võrguga liitumiseks on vajalik dispetšeri sekkumine. Manuaalse lahendusel toimub kogu juhtimine dispetšeri abil. See ei tekitaks alajaama omanikule juurde lisakohustusi dišpetsersüsteemi haldamise näol.

Nottinghami ülikoolis läbi viidud katsetused näitasid, et ilmaprognoosi abil on võimalik edukalt PV-paneelide tootlikkust ennustada. Selline funktsionaalsus annaks võimaluse suunata akupakki salvestunud energiat elektrivõrku tipukoormuste vähendamiseks. Sarnast lahendust kasutatakse ka McAlpine alajaamas. Ilmaprognoosiga arvestamises nähti head võimalust mikrovõrgu efektiivsuse tõstmisel ning seetõttu otsustati ka seda funktsionaalsust käesolevas lõputöös rakendada.

Lõputöö autor ei leidnud info otsimise käigus analoogset alajaama lahendust nagu käesolevas lõputöös kavandatav omatarbe mikrovõrk, mistõttu võib eeldada, et teemat ei ole väga laialdaselt uuritud. Välja toodud mikrovõrkude lahendusest saab ka mõningaid sisendeid kavandatavale mikrovõrgule. Nendeks on näiteks päikesepaneelide paigaldamine alajaama katusele, automaatne juhtimissüsteem ning ilmaprognoosi ennustuse ära kasutamine paneelide tootlikkuse ennustamiseks. Kahjuks ei ole eelmainitud mikrovõrkude lahenduste puhul teostatud majanduslikke analüüse, mistõttu ei ole teada nende kasumlikkus.

1.4 Harju Elekter alajaam HEJA

AS Harju Elekter poolt toodetav jaotusalajaam HEJA on peamiselt kasutusel jaotus-, komplektalajaamana ja ka jaotusvõrgu kombineeritud tehnilise ehitisena. Hoonesse paigaldatakse põhiliselt kesk- ja madalpingejaotusseadmeid, omatarbekeskusi, telemehaanikaseadmeid ning jõutrafosid. HEJA alajaam on rätsepttoode, mis ehitatakse vastavalt kliendi soovidele ning seetõttu ei ole antud tootel kindlaid parameetreid ega lahendusi. [12]

Alajaama hoone on disainitud teraskonstruksioonelementidest ning soojustatud sandwich-tüüpi kergpaneelidega (Joonis 1.6). Hoonel on kergpaneelidest viilkatus, mis on lahti monteeritav ning eemaldatav. See annab võimaluse suuremate seadmete vahetamiseks. Tänu terasraamile on jaotlat võimalik tõsta ning transportida koos sellesse paigaldatud seadmetega. Üldjuhul paigaldatakse konstruktsioon objektile valatud vundamendile. [12]



1.6 AS Harju Elekter jaotusalajaam HEJA [12]

HEJA jaotusalajaama tüüpandmed [12]:

Ümbritseva keskkonna temperatuur	-25 °C - +40 °C
Kõrgus merepinnast	kuni 1000 m
Keskkonna saasteklass	2
Tüüpiline värvitoon	RAL 7012, RAL 9002
Ventilatsioon	Sund- või loomulikventilatsioon
Standardne kaitseaste	IP 23D
Standardne tulepüsisivusklass	TP-2

1.5 Mikrovõrgu kavandamine

Planeeritaval mikrovõrgul on mitmeid eesmärke. Esmaseks eesmärgiks on tõsta alajaama töökindlust tänu autonoomsele taastuenergiaallikale ning salvestusseadmele. Seeläbi säilib alajaama omatarbeseadmete kasutusvalmidus ka elektrivõrgu rikke korral. Tänu sellele on näiteks võimalik kasutada alajaama valgusteid ning teostada hooldus- või remonttöid ajal, mil elektrivõrgus on katkestus. Lisaks eelnevale annab projekteeritav mikrovõrk alajaama omanikule võimaluse teenida tulu. Kui projekteeritav mikrovõrk on ennast tagasi teeninud, hakkab see tootma kasumit, mis läbi muutub alajaam ajas tagasi vaadatuna justkui odavamaks. Kolmandaks jälgib projekteeritav mikrovõrk energeetikaalaseid tuleviku trende. Kavandatavat süsteemi on võimalik pakkuda klientidele ning näidata, et ettevõtte käib muutustega kaasas. Samuti on juba paigaldatud süsteemid ettevõttele reklaamiks.

Järgnevalt toodi välja elemendid, milles kavandatav mikrovõrk peaks koosnema. Mikrovõrgu elementidena peaks seal leidma kasutust:

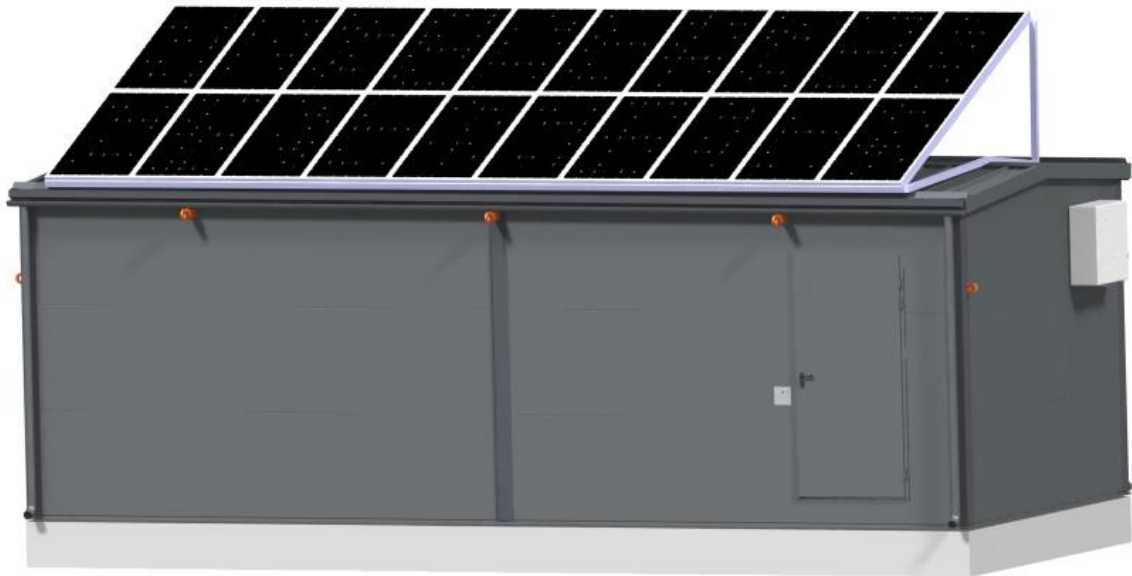
- päikesepaneelidel põhinev elektrienergia tootmine;
- arukas elektrienergia juhtimine omatarbeseadmete vahel;
- akupakk energia salvestamiseks;
- juhtimissüsteem.

Lisaks võeti alajaama projekteeritava mikrovõrgu kavandamisel aluseks järgmised põhimõtted:

- alajaama peab olema võimeline lühiajaliselt töötama ilma võrguühenduse ning autonoomse energiaallikata;
- kohapeal toodetud ning omatarbimisest ülejäänud elekter tuleb müüa elektriturul maksimaalse võimaliku kasumiga;
- mikrovõrk peab eluea jooksul ületama kasumiläve.

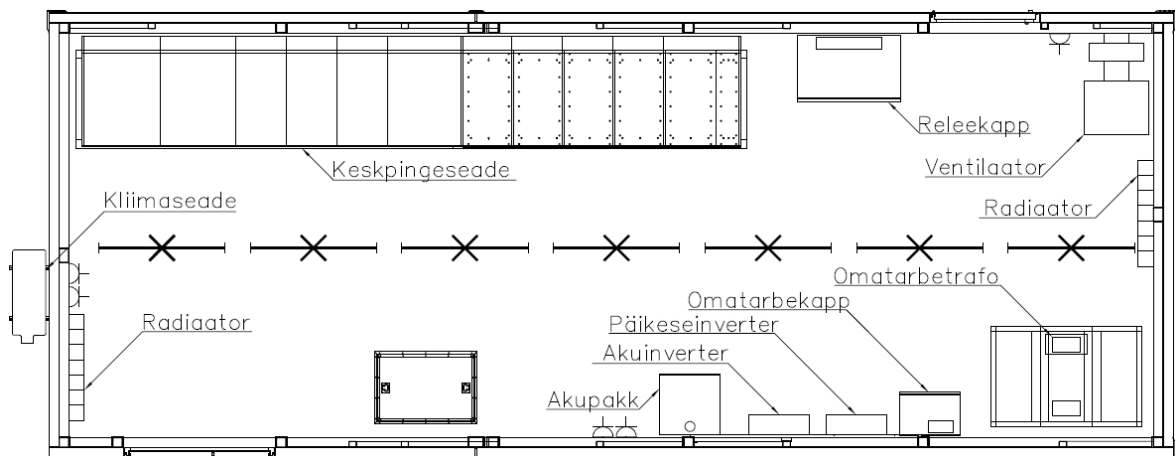
Päikesepaneelide kasutamise abil on projekteeritaval mikrovõrgul olemas autonoomne energia tootmisvõimalus. Tänu akupakile on see võimeline töötama ka lühiajaliselt ilma võrguühenduseta ning autonoomse energiaallikata. Elektrienergia maksimaalse kasumikkuse müümiseks tuleb seda müüa tipukoormusel, kuid seeläbi tuleb tagada, et alajaamal säiliks omatarbe elektrivarustus ka elektrikatkestuse korral. Seetõttu tuleks päikesepaneelide tootlikkust ennustada ilmaprognoosi abil.

Olemasolevate mikrovõrkude võrdlusest selgus, et päikesepaneelid võiksid olla alajaama katusel (Joonis 1.7). Lisaks peaks olema automaatne juhtimissüsteem, mis võtab arvesse ka ilmaprognoosi.



Joonis 1.7 Päikesepaneelidega jaotuslajaam HEJA

Kavandatav mikrovõrk projekteeritakse Harju Elekter jaotuslajaama HEJA, milles on kasutusel alapeatükis 1.5.1 väljatoodud elektriseadmed. Tüüpiline jaotuslajaama HEJA asendiplaan on esitatud joonisel (Joonis 1.8).



Joonis 1.8 Jaotuslajaama asendiplaan HEJA

Kavandatav mikrovõrguga jaotuslajaama asukohaks valiti Rapla maakonnas, Märjamaa vallas asuv Põlli küla.

1.5.1 Projekteeritava mikrovõrgu omatarbeseadmed

Tüüpilised alajaama omatarbeseadmed on elektriradiaator, õhksoojuspump, jäätumiskaitsekaabel, sise- ja välisvalgustus, kontroll- ja kommunikatsiooniseadmed, tulekahjusignalsatsioon, samuti veel muid väiksema võimsusega elektriseadmeid.

Osa nendest seadmetest on kasutusel ka projekteeritavas mikrovõrgu omatarbesüsteemis (Joonis 1.9). Parema ülevaate saamise huvides toodi välja suurema võimsustega omatarbeseamed (Tabel 1.1).

Alajaamas kasutataval õhk-õhk tüüpi õhksoojuspumbal on välimine seade ehk kompressor ning sisemine osa. Seadme toitekaabel tuleb ühendada ainult välise seadme külge. Soojuspumba elektriline võimsus on 2,12 kW, küttevõimsus küündib aga kuni 8 kW-ni. Aparaat on seadistatud töötama keskmises režiimis, mil küttevõimsus on 4,4 kW. [13]

Alajaama kütmiseks on kasutusel kaks sama võimsusega elektriradiaatorit nimivõimsusega 2 kW. Kuna elektriradiaatoris on kaod väiksed, siis on ka küttevõimsus ligilähedane nimivõimsusele. [14]

Alajaamas kasutatakse valgustiks Glamoxi I40 seeria toodet. Valgusti valimisel teostati valgustusarvutused Dialux programmis [15]. Antud töös valgustusarvutusi ei käsitleta.

Vihmaveerennis ja -torus kasutatakse jäätumise vältimiseks küttekaablit. Kaabli võimsus on ühe jooksva meetri kohta 20 W/m [16]. Ühe kaabli pikkus on 30 m. Kuna mikrovõrk kavandatakse alajaama, millel on viilkatus, on tarvilik kahe jäätumiskaitsekaabli kasutamine.



Joonis 1.9 Alajaamas kasutatav õhksoojuspump, elektriradiaator, jäätumiskaitsekaabel ja valgusti [13] [14] [16] [17]

Tabel 1.1 HEJA alajaama omatarbeseadmete nimiandmed [13] [14] [16] [17]

Elektri-seade	Õhksoojus-pump	Elektri-radiaator	Jäätumiskaitse-kaabel	Valgustus
Toota	Mitsubishi	Ensto	Ensto	Glamox
Mudel	Kompressor – MSZ-AP71VG(K) Siseosa – MUZ-AP71VG	BETA20-BT-EB	TASH 1.5	I40L60010
Voolutüüp	Vahelduv	Vahelduv	Vahelduv	Vahelduvvool, alalisvool
Pooluste arv	1	1	1	1
Nimivool, A	9,3	8,7	0,067	0,18

Elektri-seade	Õhksoojus-pump	Elektri-radiaator	Jäätumiskaitse-kaabel	Valgustus
Nimipinge, V	220-240	230	300	230-240AC, 186-250DC
Sagedus, Hz	50	50	50	50
Nimivõimsus, kW	2,12	2	0,02 kW/m	0,041
Küttevõimsus, kW	8	2	0,6	-
Mõõtmed, pikkus x laius x kõrgus, mm	840 x 330 x 880	1520 x 56 x 390	-	1573 x 101 x 101
Kaal, kg	55	7,92	0,04	3,42

1.5.2 Mikrovõrgus kasutatavate elektriseadmete esitatavad nõuded

Selles alapeatükis tuuakse välja mikrovõrgus kasutatavatele elektriseadmete esitatavad nõuded. Nõuded on vajalikud, et tagada mikrovõrgu toimimine. Samuti hõlbustab see seadmete valikut. Elektriseadmete väljavalimisel toetuti selles peatükis väljatoodule.

Päikesepaneelid peavad vastama järgnevatele nõuetele:

- monokristall või polükristall;
- võimsus vähemalt 400 W;
- efektiivsus vähemalt 20%;
- tootjapoolne garantii vähemalt 25 aastat.

Võrguinverter peab vastama järgnevatele nõuetele:

- Elektrilevi poolt tunnustatud;
- MPP jälgimissüsteem;
- väljundfaaside arv 3;
- väljundfaasipinge 230 V;
- väljundpinge sagedus 50 Hz;
- võimsus vähemalt 10 kW;
- maksimaalne sisendpinge vähemalt 410 VDC;
- maksimaalne sisendvool vähemalt 12 A;
- aku ühendamise võimalus;
- kommunikatsiooni võimalus läbi Modbusi aku laetustaseme määramiseks.

Akuinverter peab vastama järgnevatele nõuetele:

- ühildatav valitud akuga;

- väljundfaaside arv 3;
- väljundfaasipinge 230 V;
- väljundpinge sagedus 50 Hz;
- salvestusseadme tühjendamine ning täislaadimine läbi Modbusi protokolliga käskluste.

Akupakk peab vastama järgnevatele nõuetele:

- mahutavus vähemalt 5,12 kW/h;
- ühildatav nii võrgu- kui ka akuinverteriga;
- kolmefaasiline väljund.

Ka juhtimissüsteemis kasutatavatele elektriseadmetele esitati funktsionaalsuse nõuded (Tabel 1.2).

Tabel 1.2 Juhtimissüsteemi seadmetele esitatavad nõuded

Seade	Esitatavad nõuded
Loogikakontroller	<ul style="list-style-type: none"> • Mikrovõrgu töö juhtimine • Laiendusmoodulite lisamise võimalus • Mikrovõrgus kasutatavate elektriseadmetega ühildumine • Infopäringute teostamine veebiserverites kasutades HTTP ja HTTPSi hüperteksti protokolle
Digitallväljundi moodul	<ul style="list-style-type: none"> • Ühildumine loogikakontrolleriga • Väljundite arv vähemalt 16 • Väljundsignaali pinge 24 V alalispinge • Väljundsignaali vool vähemalt 0,5 A
Digitaalsisendi moodul	<ul style="list-style-type: none"> • Ühildumine loogikakontrolleriga • Minimaalne sisendite arv 16 • Sisendsignaali pinge 24 V alalispinge
Kommutaator	<ul style="list-style-type: none"> • RJ45 pistikupesade arv vähemalt 5
Lüüs	<ul style="list-style-type: none"> • RJ45 pistikupesade arv vähemalt 2
Ruuter	<ul style="list-style-type: none"> • Juhtmevaba IP põhine kommunikatsioon • Mobiilside standard 4 G • Tulemüüri olemasolu • RJ45 pistikupesade arv vähemalt 2
Antenn	<ul style="list-style-type: none"> • Mobiilside standard 4 G • Sobilik kasutada välitingimustes

Seade	Esitatavad nõuded
Puhvertoiteallikas	<ul style="list-style-type: none"> • Väljundpinge 24 V alalispinge • Väljundvool 2 A • Juhtimissüsteemi toitmine vähemalt 60 sekundit • Hooldusvaba
Toiteplokk	<ul style="list-style-type: none"> • Väljundpinge 24 V alalispinge • Väljundvool 2 A • Sisendpinge 230 VAC • Sagedus 50 Hz
Võimsuse mõõtmine	<ul style="list-style-type: none"> • Ühildatav loogikakontrolleriga • Mõõdetav vooluahel kuni 63 A • Suudab mõõta vähemalt 15 ahelat • Ühefaasiline mõõtmine

1.5.3 Jaotusalajaama HEJA ning mikrovõrgu asjakohased standardid

Jaotusalajaama HEJA projekteerimisel lähtutakse asjakohastest standarditest. Pidevat kasutust leiavad need standardid, mille järgimine on tehtud kohustuslikuks asjakohastes seadustes või määrustes. Mittekohustuslikud standardid on soovituslikud ning neid järgitakse võimalusel.

Jaotusalajaam projekteerimisel lähtutakse standarditest:

- EVS-EN 61936-1:2010 – Tugevoolupaigaldused nimivahelduvpingega üle 1 kV;
- EVS-EN 50522:2010 – Üle 1 kV nimivahelduvpingega tugevoolupaigaldiste maandamine;
- EVS-HD 603 S1.2001 – Jaotuskaablid nimipingega 0,6/1kV;
- EVS-HD 604 S1:2001- Tulekahjuoludele vastavate eriomadustega 0,6/1 kV ja 1,9/3,3 kV jõukaabli kasutamiseks elektrijaamades;
- EVS-EN 61439-1:2012 – Madalapingelised aparaadikoosted;
- EVS-EN 50525-1:2011 – Juhtmed ja kaablid. Tugevoolujuhtmed ja -kaablid nimipingega kuni 450/750 V. Osa 1: Üldnõuded.

Tootmisjaamade elektriseadmed standardiseeritakse IEC/EN 61850 standardi-perekonnaga [18]. Algselt loodi IEC 61850 jaotus- ja juhtimiskeskuste vahelise infovahetuse tagamiseks. Tänapäeval võib selle standardi rakendamist näha jaotusvõrgu automaatikas, hajutatud elektritootmises ja energiasalvestuses [19].

Standardit EN 61850-7-4 peetakse peamiseks osaks alajaama infovahetuse kihis [19]. Lisaks sellele kasutatakse ka standardeid [19]:

- EN 61850-7-420: DER;

- IEC 61850-90-2: Andmeside juhtimiskeskusega;
- IEC 61850-90-3: Olekute jälgimine;
- IEC 61850-90-7: PV inverterid.

Mikrovõrk kuulub oma olemuselt elektritarkvõrkude süsteemidesse, millega kohalduvad tabelis 1.3 ja 1.4 esitatud standardid (Tabel 1.3)(Tabel 1.4). Elektritarkvõrkude süsteemid on liigitavad kolme eri klassi vahel [19]:

- valdusepõhised süsteemid, näiteks tootmise jaotamine, hajatootmine;
- funktsioonipõhised süsteemid, mis tavaliselt ületavad valduste piire, näiteks turu-süsteemid, nõudluse paindlikkuse süsteemid, ilmavaatlus- ja ennustussüsteemid;
- teised süsteemid, mis peamiselt keskenduvad haldusfunktsioonidele, näiteks varahaldus, referents-kellad, sidehaldus.

Tabel 1.3 Tarkvõrgu standardid [18]

Tüvistandard või standardite kogum	Standardi sisu
IEC 61970 IEC 61968	Ühtne Infomudel (CIM) Rakendatavus: tootmise haldamise süsteemid, energiahalduse süsteem (EMS), jaotuse haldamise süsteem (DMS), jaotuse automaatika (DA), alajaama automaatikasüsteem (SAS)
IEC 62325	Ühtne Infomudel (CIM) baseeruv elektrituru infovahetus Rakendatavus: tootmise haldamise süsteemid, EMS, DMS, DER, AMI, DR, arvestitega seotud tugisüsteemid, energiasalvestised
IEC 61850	Elektrivõrgu automaatika, hüdroenergeetika andmeside, DER Rakendatavus: Tootmise haldamise süsteemid, EMS, DMS, DA, SAS, DER, energiasalvestid, e-mobiilsus
IEC 62056	Partneri Täpsustus Energia Mõõtmiseks (COSEM) Rakendatavus: DMS, DER, AMI, DR, nutikodu süsteemid, energiasalvestid, e-mobiilsus, arvestite näitude kogumine, tariifi ja koormuste juhtimine
IEC 62351	Rakendatavus: Süsteemide turvalisus
IEC 61508	Rakendatavus: Elektri-, elektroonika ja programmeeritavate elektroonikaseadmetega seotud süsteemide funktsionaalne turvalisus

Lisaks eelmainitule on mikrovõrke sisaldavate tarkvõrkude kontekstis veel teisigi olulisi standardeid.

Tabel 1.4 Asjakohased standardid tarkvõrgu seisukohast [18]

Standard või standardite kogum	Standardi sisu
IEC 62357	Elektrivõrkude referentsarhitektuur -SOA. Rakendatavus: EMS, DMS, DER talitluse süsteemid, turu- ja kauplemissüsteemid, DR süsteemid, arvestitega seotud tugisüsteemid
IEC 60870-5	Kaugjuhtimine. Rakendatavus: EMS, DMS, DA, SA.
IEC 60870-6	TASE2 juhtkeskuse sisene infovahetus. Rakendatavus: EMS, DMS.
IEC/TR 61334	DLMS Rakendatavus: AMI
IEC 61400-25	Tuulegeneraatorite andmeside. Rakendatavus: DER talitlussüsteemid (tuulepargid), EMS, DMS.
IEC 61851	EV-infovahetus Rakendatavus: E-mobiilsus, Nutikodu süsteemid, Hooneautomaatika süsteemid.
IEC 62051-54/58-59	Standardid mõõtmisele ja arvestitele. Rakendatavus: DMS, DER, AMI, DR, Nutikodu süsteemid, Energiasalvestid, E-mobiilsus.

2. MIKROVÕRGU ELEKTRISEADMETE VALIK

Selles peatükis valitakse mikro võrgu toimimiseks vajalikud elektriseadmed. Nende valikul lähtuti varasemalt püsitatud nõudmistest. Tähelepanu pöörati erinevate seadmete võimekusele töötada ühtses süsteemis. Samuti arvestati ka hindadega. Päikesepaneelide valikut ja erinevaid tehnoloogiaid kirjeldatakse jaotise esimeses alapeatükis. Järgnevates alapeatükkides teostatakse võrgu- ja akuinverteri valik. Salvestusseadme valikut on kirjeldatud alapeatükis 2.4. Viimases alapeatükis tuuakse välja valitud juhtimissüsteemiga seotud seadmed.

2.1 Päikesepaneel

Üheks mikro võrgu oluliseks komponendiks on taastuenergiaallikal põhinev elektrienergia tootmine. Antud projektis otsustati selleks kasutada päikesepaneelid. Laialdasemalt on kasutusel mono-, polükristall ning amorfsetel elementidel põhinevad päikesepaneelid.

Mono- ja polükristall elementidega paneelid kuuluvad esimesse päikeselementide generatsiooni. Nagu juba nimigi ütleb, on monokristall paneelides kasutusel ainult ühekristallilised räniplaadid. Neid plaadikesi ehk elemente toodetakse ühest suurest räni kristallist Szochralski protsessi abil. Töö käigus lõigatakse kristall väga suure täpsusega ning sama suunaliselt väiksemateks plokkideks. Ühele paneelile paigaldatuna ning päikese suhtes õige nurga all olevana on plokkide ehk elementide efektiivsus üsna suur. Tootlikkusele aitab kaasa ka see, et elemendid koosnevad ainult ühest materjalist ning tänu sellele on elektronidel rohkem liikumisruumi. Õige nurga all peale langeva päikese kiirguse juures võib nende elementide efektiivsus olla umbes 17-18%. Musta värvuse tõttu neelavad elemendid enamuse neile peale langevast valgusest. [20] [21]

Ka polükristall päikesepaneelid on tehtud ränist. Kuid erinevalt monokristall paneelidest on nendes kasutusel erinevaid räni fragmente, mis on tootmise käigus ühte päikeseelementi kokku sulatatud. Seetõttu kutsutakse neid ka multiräni või mitmikrääni paneelideks. Kuna ühes elemendis on erinevaid ränisid, on elektronidel vähem liikumisruumi, mistõttu on polükristall paneelid vähem tootlikumad kui monokristall paneelid. Samas ei ole need paneelid niivõrd sõltuvuses päikese kiirguse langemisnurgast ning tänu sellele on elektritootmine stabiilsem. Erinevalt mustadest kaheksanurksetest monokristall elementidest on polükristall paneeli päikeseelementid nelinurksed ning sinakat tooni. Selliste paneelide efektiivsus on umbes 12-14%. [20] [21] [22]

Amorfsed ränikilega elemendid on üsnagi primitiivsed. Neil ei ole korrapärasest kristallstruktuuri ning seetõttu on ka nende efektiivsus suhteliselt madal olles vahemikus 4-8%. Kuid tänu lihtsale ja keskkonna sõbralikumale tootmisprotsessile on ränikile paneelid suhteliselt odavad ning laialt levinud. [21]

Madala efektiivsuse tõttu välistati projektis amorfse ränikile päikeseelementidega paneelid. Kuid nii mono- ja polükristall paneelidel on mõlemal omad eelised. Parema ülevaate saamiseks ning nende võrdlemiseks koostati tabel (Tabel 2.1).

Tabel 2.1 Mono- ja polükristall paneeli võrdlus [22]

Tegur	Monokristall paneel	Polükristall paneel
Hind	Kallim	Odavam
Efektiivsus	Efektiivne	Vähem efektiivne
Elemendi välimus	Musta tooni	Sinakat tooni
Kuju	Oktagoon	Nelinurk
Eluiga	+25 aastat	+25 aastat
Suuremad tootjad	Canadian Solar Sunpower LG Hyundai SolarWorld	Hanwha Kyocera Hyundai SolarWorld Trina

Antud töös oli päikesepaneelide valikul kõige olulisemaks elektrivõimsus ning hind. Selleks, et paneelid ennast kiirelt tagasi teeniksid, peaksid need olema võimalikult võimsad ning odavad. Monokristall paneel on kallim ning efektiivsem kui polükristall, kuid teadmata täpseid väärtusi on raske hinnata kumma kasutamine on kasumlikum. Seetõttu otsustati parima paneeli leidmiseks võrrelda kaht mõlema tüübi paneeli (Tabel 2.2).

Tabel 2.2 Päikesepaneelide Trina ja AXITEC võrdlus [23] [24]

Tegur	Monokristall	Polükristall
Tootja	Trina	AXITEC
Mudel	TallmaxM TSM-450 DE17M (II)	AXIpower AC-330P/72S
Võimsus, W	430-450	310-330
Päikeseelementide arv, tk	144	72
Dimensioonid, mm	2102 x 1040 x 35	1956 x 992 x 40
Kaal, kg	24	23
Maksimaalne efektiivsus, %	20,6	17,7
Toote garantii, a	12	15
Tootlikkuse garantii, a	25	25
Aastane toodangu vähenemine, %	0,55	0,6
Hind, €	176	134

Mõlemad päikesepaneelid on elektrivõimsuse poolest üsnagi tootlikud. Märkimist väärib asjaolu, et polükristall paneelil on päikeseelemente täpselt poole vähem kui monokristallil. Samas ei ole võimsuse vahe kahekordne.

See on tingitud fotogalvaaniliste elementide suurusest, kuna multikristall paneelil on see mõõtmetelt suurem kui üksikkristallil.

Üsnagi suur võimsus mõlema PV-paneeli puhul on tingitud keskmisest mõnevõrra kõrgema efektiivsusega. Tavapäraselt on monokristall paneeli jõudlus ca 17-18%, polükristall paneelil aga 12-14% [21].

Toote garantii all mõistetakse defekte, mis on tekkinud paneeli toomisprotsessi käigus. Ehk määratud aastate jooksul vastutab tootja ilmnenud tootmispraagi eest. Tootlikkuse garantii tähendab aga, et paneel peab antud aastate möödudes olema võimeline tootma elektrienergiat, mis on kooskõlas aastase tootlikkuse vähenemisega [25].

Näiteks väheneb monokristall paneelil Trina tootlikkus aastas 0,55%, polükristall paneelil AXITEC on see peaaegu sama ehk 0,6% (Tabel 2.2 Päikesepaneelide Trina ja AXITEC võrdlus). Lihtsustuse huvides leiti mõlema paneeli puhul hinna ja võimsuse suhe, et selgitada ühe vati hind. Selleks jagati paneeli väärtus võimsusega. Monokristall paneelil Trina saadi ühe vati hinnaks 0,39 EURi. Polükristall paneeli puhul oli hinna ja võimsuse vahetegur 0,02 EURi võrra suurem. Seetõttu otsustati antud projektis kasutada päikesepaneelide Trina (Joonis 2.1).



Joonis 2.1 Monokristall päikesepaneel Trina [23]

2.2 Võrguinverter

Päikesepaneelide haldamiseks valiti mikrovõrku võrguinverter. Seadme ülesandeks on koguda kokku päikesepaneelide poolt toodetud elektrienergia ning suunata see akupanka või elektrivõrku.

Seetõttu leiti, et sobilik oleks kasutada hübriidinverterit, milles oleks nii alalispingemuundur ja vaheldi. Turul on saadaval nii ühefaasilisi kui ka kolmefaasilisi võrguinvertereid. Seadme valikul tuleb arvestada ka võrguteenuste pakkujate poolt määratud nõudmistega.

Eesti suurima võrguettevõtte Elektrilevi kehtivate eeskirjade järgi jaotatakse võrguga liitunud elektritootjad väiketootjateks, kelle võrku suunatav võimsus ei ületa 500 kW ning suurtootjateks, kes suudavad toota sellest enam. Ettevõtte klassifikatsiooni järgi kuulub väiketootja klassi A. Samasse astmesse kuuluvad ka mikrotootjad, kelle maksimaalne võimsus on kuni 15 kW. [26]

See liigitus on aga ettevõtte põhine, sest näiteks kehtiva Elektrituru seaduse § 7 lõike kaks järgi on väiketootja tootja, kelle Eestis asuvate tootmiseseadmete netovõimsus koos temaga ühte kontserni kuuluvate teiste tootjate Eestis asuvate tootmiseseadmete netovõimsusega kokku ei ületa 10 MW [27]. Projekteeritava mikrovõrgu tootmismahud jäävad mõlema klassifikatsiooni järgi väiketootja piiridesse.

Elektrilevi hallatava jaotusvõrguga tohib liita ainult neid võrguinvertereid, mille sobilikkust on ettevõtte kinnitanud. Ettevõtte kodulehel on olemas nimekiri heakskiidu saanud seadmetest. Nende aparaatide puhul on Elektrilevi teinud kindlaks vastavuse Euroopa Parlamendi ja Nõukogu direktiividele 2014/35/EU ja 2014/30/EU. Samuti peab elektriseadmetel olema vastavusmargis Euroopa liidu Akrediteerimise ja turujäreelvalve määruses nr. 765/2008 kehtestatud nõudmistele. Lisaks välismaistele direktiividele ja määrusele peab seade olema kooskõlas Eesti Vabariigi Valitsuse määruses Elektrisüsteemi toimimise võrgueeskirjas kehtestatud nõudmistele. [28]

Inverteri valik tehtigi Elektrilevi poolt heakskiidetud seadmete nimistust. Seadme nimivõimsuse valikul arvestati, et alajaama katusele mahub maksimaalselt 20 päikesepaneeli Trina, mille tipuvõimsused kokku liidetuna on 9 kW. Süsteemi valitud võrguinverter on Saksamaa ettevõtte KOSTAL GmbH seade Plenticore Plus 10 (Joonis 2.2). Plenticore Plus 10 on kümne kilovattise võimsusega hübriidinverter. Seadmel on kolm alalisvoolu sisendit, millesse on võimalik ühendada kolm päikesepaneelide gruppi. Soovi korral on ühte alalisvoolu sisendisse võimalik ühendada aku. Vahelduvvoolu ühendus on kolme faasiline liinipingega 400 V ning sagedusega 50 Hz. Seadmega on võimalik suhelda läbi TCP kommunikatsiooni protokoll. Infopäringuid on võimalik teha näiteks pinge, voolu ja sageduse ning paljude muude väärtuste kohta. [29]

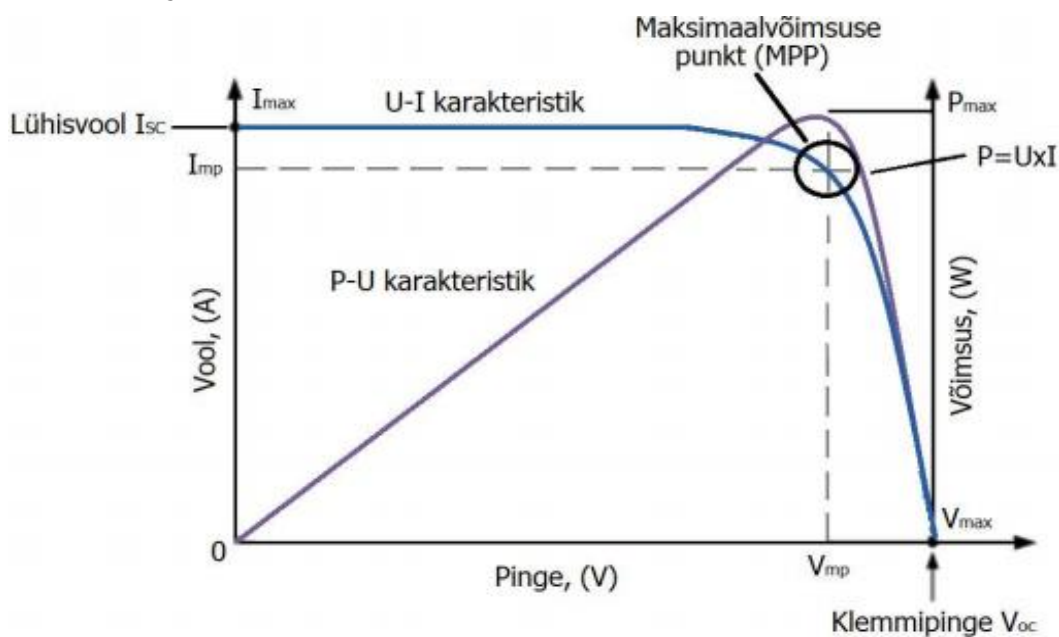


Joonis 2.2 Võrguinverter Plenticore Plus 10 [29]

Nimiandmed alalisvoolu sisendi kohta [29]:

Võimsusklass	10 kW
Nimi sisendpinge	570 VDC
Minimaalne sisendpinge	150 VDC
Sisendpinge vahemik	120 – 1000 VDC
MPP tööpinge vahemik	120 – 720 VDC
Maksimaalne aku laadimisvool	13 A
Alalisvoolu sisendite arv	3
MPP jälgijate arv	3
Minimaalne sisendpinge akust	120 VDC
Maksimaalne sisendpinge akust	650 VDC
Maksimaalne aku tühjendamisvool	13 A
Nimiväljundvõimsus	10 kW
Minimaalne väljundpinge	320 VAC
Maksimaalne väljundpinge	460 VAC
Nimiväljundvool	14,43 A
Väljundpooluste arv	3
Väljundsagedus	50 Hz
Väljundsagedusvahemik	47-52,5 Hz
IP klass	IP 65
Väljundi automaatkaitselülit	B25/C25
Pikkus x laius x sügavus	563 x 405 x 233 mm
Müra	39 dB
Ümbritseva keskkonna temperatuur	-4...+140 °C.

Seadme kolmel alalisvoolu sisendil on maksimaalse võimsuspunkti jälgimissüsteem ehk MPPT. Päikesepaneeli võimsuspunktide leidmiseks kasutatakse voolu-pinge karakteristikuid (Joonis 2.3). Kui PV-paneel ei ole koormatud on elektrivool klemmidel nullilähedane, kuid seevastu on pinge maksimaalne. Klemme omavahel lühistades on vool maksimaalne võimalikust, kuid pinge on madal. Mõlema äärmuse puhul on võimsus väike, sest fotogalvaaniliste elementide poolt toodetud jõudlust leitakse pinge ja voolu korrutisena. Nende kahe punkti vahele jääv ala on päikesepaneeli tööpiirkond, milles on võimalik väljundvõimsuse tekkimine.



Joonis 2.3 Maksimaalse võimsuspunkti leidmine voolu-pinge karakteristikult [21]

Päikesepaneelide poolt genereeritud elektrivool sõltub selle elementidele langeva päikesekiirguse intensiivsusest. Väljundpingele avaldab enim mõju aga keskkonnatemperatuur. Jälgimissüsteem suudab vastavalt keskkonnamõjudest tingitud hetkeolukorrale leida pinge-voolu karakteristikult maksimaalvõimsuse punkti ehk MPPI. [30]

2.3 Akuinverter

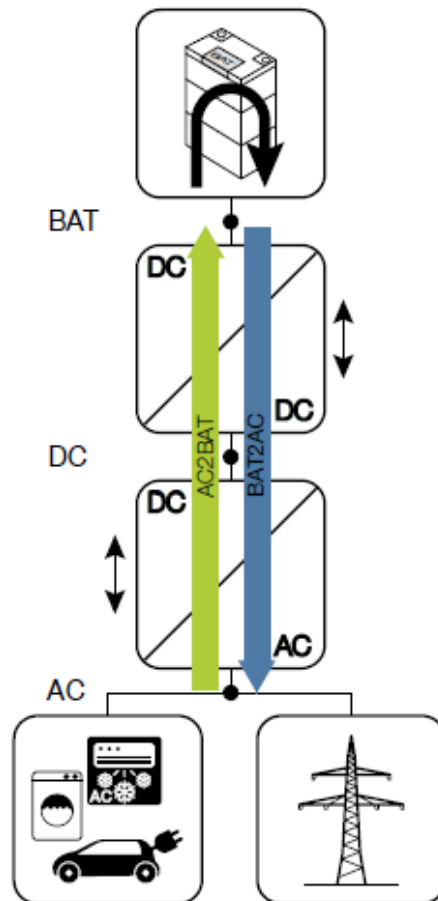
Võrguinverteriks valitu seadmel Plenticore Plus 10 on mõningaid puudusi. Paraku ei ole sellele võimalik saata süsteemis kasutatava loogikakontrolleriga käsklusi akupatarei tühjendamiseks, mis on aga antud projektis vajalik. Seetõttu valiti süsteemi eraldi akuinverteri, mis pakub pisut suuremat kommunikatsioonilist ühilduvust. Sarnaselt võrguinverterile on ka akuinverteri tootjaks KOSTAL Solar Electric GmbH. Seadme mudeliks on Kostal Plenticore BI.

Antud seade ei ole Elektrilevi poolt heaks kiidetud seadmete nimekirjas, kuid see vastab nõutud Euroopa liidu direktiividele 2014/35/EU ja 2014/30/EU. Lõputöös lähtutakse, et sarnaselt võrguinverterile vastab ka see seade nii Euroopa liidu akrediteerimise ja turujäreelvalve ning Eesti Vabariigi Valitsuse Elektrisüsteemi toimimise võrgueeskirja määrustes kehtestatud nõudmistele.

Seade on mõeldud paigaldamiseks akupaki ning elektrivõrgu vahele. Jooniselt 2.4 on näha, et aparaadiga saab akut nii tühjendada kui ka täis laadida, mistõttu omab see nii alaspingemuundurit kui ka vaheldit (Joonis 2.4). Tänu parematele kommunikatsiooni võimalustele on antud seadmele võimalik saata loogikakontrollerist käsklusi akupatarei tühjendamiseks või täislaadimiseks. Selleks saab kasutada TCP kommunikatsiooniprotokolli. Akuinverter on välimuselt identne võrguinverterile Plenticore Plus 10. [31]

Akuinverteri nimiandmed [31]:

Sisendpinge	120-650 VDC
Maksimaalne alalisvoolu sisendi laadimisvool	26 A
Alalisvoolu sisendite arv	1 tk
Nimivõimsus	5,5 kW
Maksimaalne väljundvõimsus	5,5 kVA
Minimaalne väljundpinge	320 VAC
Maksimaalne väljundpinge	460 VAC
Nimiväljundvool	7,94 A
Maksimaalne väljundvool	8,82 A
Faaside arv	3
Sagedus	50 Hz
Võrguühenduse pinge	400 VAC
Seadme võimsus ootel	8,45 W
IP klass	IP 65
Mõõdud	563 x 405 x 233 mm
Kaal	17,9 kg
Töötemperatuur	-20..+60 °C
Liidesed	Ethernet LAN ja Modbus



Joonis 2.4 Akuinverteri Plenticore BI põhimõtteskeem [31]

2.4 Akupank

Akupanga valik teostati inverterite poolt heaks kiidetud salvestusseadmete nimekirjast. Tänu sellele võib olla kindel, et need ühilduvad omavahel nii toiteühenduse kui ka kommunikatsiooni aspektides. Aku valikul oli oluliseks teguriks mahutavus ning hind. Antud lahenduses on akupanga peamine eesmärk varustada avariiolukorras elektrienergiaga valgustust ning juhtimissüsteemi. Akupanga mahtuvuse valikul ei võetud arvesse, et sellega peaks olema võimalik teostada ka suuremate tarbijate nagu näiteks kliimaseade ning elektriradiaator toitmine, kuid võimalusel ehk ülejäägi korral, võib juhtimissüsteem ka neid elektriga varustada. Projektis otsustati kasutada akupakki BYD BATTERY-BOX H6.4 (Joonis 2.5).

Valitud akuseadme mahtuvus on 6,4 kW/h. See koosneb viiest moodulist, millest igaühe mahtuvus on 1,28 kW/h. Mooduleid on võimalik ka juurde lisada. Ühtekokku on võimalik jadamisi ühendada 5-9 moodulit, tänu millele saab mahtuvust suurendada kuni 11,52 kW/h.

Paralleelset võib selliseid akupakke ühtekokku ühendada kuni viis, mis annaks kogumahtuvuseks 57,6 kW/h. Moodulites kasutatakse liitium-raudfosfaat ehk LiFePO_4 tüüpi elemente. [32]

Liitium-raudfosfaat tüüpi akusid peetakse üheks kõige ohutumateks. Nende elementide keemilised omadused on üsnagi stabiilsed. Akuelement muutub ebastabiilseks alles alates 480 °C kraadist, mis tähendab, et selle termiline lagunemine algab kaks korda kõrgemal temperatuuril kui liitium-nikkel-koobalt-alumiiniumoksiidakudel. Akudes toimuvat termilist lagunemist võib esile kutsuda mehaanilised või termilised rikked. Termilisi rikkeid võib toimuda elemendi ülelaadimisel- või alatühjendamisel, samuti ka sisemise lühise korral. Toimunud rikked võivad tipneda kõrge temperatuuriga akuelemendis, mis võib põhjustada eksotermilist lagunemist. Selle tulemusena võib element kaotada stabiilsuse ning puruneda. [33] Tänu kõrgele termilisele temperatuurile on seda akupanka ohutu alajaamas kasutada.



Joonis 2.5 Akupank BYD Battery-BOX H6.4 [32]

Akupanga nimiaandmed [32]:

Mahtuvus	6,4 kW/h
Akuelemendi tüüp	LiFePO_4
Moodulite arv	5
Nimipinge	256 VDC
Pingevahemik	200-282 VDC
Töötemperatuur	-10 - +50 °C
Faaside arv	1 või 3
Liides	CAN/RS485
Kasutegur	$\geq 95.3\%$
IP klass	IP 55

2.5 Juhtimissüsteemi seadmed

Juhtimissüsteemi elektriseadmete valimise osas oli Harju Elektril nõue, et need oleks toodetud mõne sellise ettevõtte poolt, kellega on head kaubanduslikud suhted. Üheks selliseks elektriseadmete tootjaks osutus Siemens ning seetõttu on lõputöö raames projekteeritavas juhtimissüsteemis rakendatud ka Siemensi juhtimisseadmeid. Siemensil on väga lai tootevalik ning hea kasutajatugi. Samuti on võimalik internetist leida palju andmelehti, manuaale ja juhendeid. Kasutades juhtimissüsteemis ühe brändi tooteid võib olla kindel, et need on omavahel ühildatavad.

2.5.1 Loogikakontroller

Kontrollsüsteemi juhtajuks valiti Siemensi kontroller Simatic S7-1500 protsessoriga 1511-1 PN (Joonis 2.6). Seadme valikul jälgiti, et sellega oleks võimalik ühenduda lokaalse võrguga ning teostada ka infopäringuid veebiserverites. Simatic S7-1500 loogikakontrolleritega on võimalik suhelda interneti võrkudega läbi HTTP ja HTTPS protokollid. [34]

Loogikakontrolleri nimiaandmed [34]:

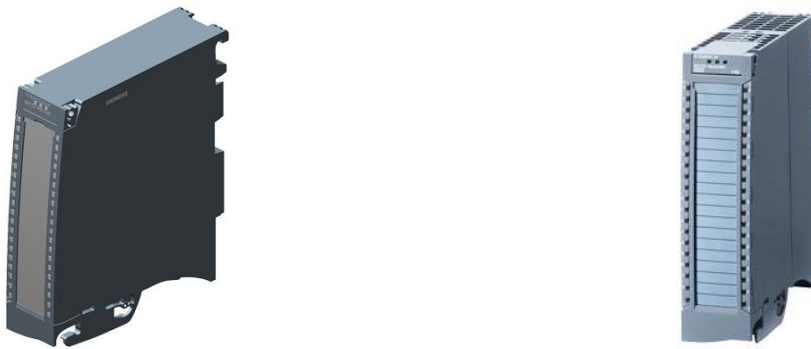
Protsessor	CPU 1511-1PN
Riistavara versioon	FS03
Püsivara versioon	V2.8
Seadistamine	STEP 7 TIA Portaali
Ekraani diagonaal	3,45 cm
Nuppude arv	8
Režiimi nuppude arv	2
Toitepinge	24 VDC
Voolutarve	0,7A
Maksimaalne voolutarve	0,95A
Mälukaardi pesade arv	1
PROFINETi liideste arv	1
RJ 45 Liideste arv	2
Protokollid	IP, PROFINET, Veebiserver, MODBUS
Konfiguratsiooni programmeerimiskeel	LAD, FBD, STL, SCL, GRAPH
Mõõdud (laius x kõrgus x sügavus)	35 x 147 x 129 mm
Kaal	405 g



Joonis 2.6 Loogikakontroller S7-1500 [34]

2.5.2 Digitaalne väljund- ja sisendmoodul

Kavandatav süsteem vajab juhtimiseks digitaalset väljund- ning sisendmoodulit. Digitaalse väljundmooduliga saab juhtida releesid ja kontaktoreid. Väljundmooduli valikul jälgiti ka väljundsignaalide elektrivoolusid veendumaks, et need oleksid piisavad releede ja kontaktorite kommuteerimiseks. Digitaalseks väljundmooduliks valiti DQ16X24V DC/0.5A HF (Joonis 2.7). Digitaalseks sisendmooduliks valiti sama seeria moodul SIMATIC S7-1500, DI 16Xdc 24V HF. Mõlemal seadmel on 16 kanalit (Tabel 2.3).



Joonis 2.7 Digitaalne väljundmoodul DQ16 ja digitaalne sisendmoodul DX16 [35], [36]

Tabel 2.3 Digitaalse väljundmooduli ja digitaalse sisendmooduli nimiandmed [35] [36]

Nimiandmed	Väljundmoodul	Sisendmoodul
Toote tähis	DQ 16x24VDC/0.5A HF	DI 16x24VDC HF
Riistavara versioon	FS02	FS04
Püsivara versioon	V1.1.0	V2.2.0
Seadistamine	STEP 7 TIA Portal, STEP 7, PROFIBUS, PROFINET	STEP 7 TIA Portal, STEP 7, PROFIBUS, PROFINET
Toitepinge	24 VDC	24 VDC
Voolutarve	30 mA	20 mA

2.5.3 Kommutaator ja lüüs

Kohtvõrgu loomiseks on juhtimissüsteemis vajalik ka kommutaator. Seadme valikul jälgiti, et sellel oleks piisavalt RJ45 pistikupesasid, et teenindada kõiki kohtvõrgus olevaid seadmeid. Sobilikuks kommutaatoriks leiti Siemensi SCALANCE XB005, millel on viis RJ45 pistikupesa (Tabel 2.4). [37] Juhtimissüsteemi ühendamiseks veebiserveriga on tarvis ka lüüsi. Selleks valiti Siemensi seade SIMATIC CC712 (Joonis 2.8). Seade on mõeldud lüüsiks programmeeritavatele loogikakontrolleritele, et teostada ühendus pilveteenustele ja ka kohtvõrgus. [38]

Tabel 2.4 Kommutaatori ja lüüsi nimiandmed [37] [38]

Nimiandmed	Kommutaator SCALANCE XB005	SIMATIC CC712
Ülekandekiirus, Mbit/s	10 või 100	10 - 1000
Nimipinge, VDC	24	24
Voolutarve, mA	70	180
RJ45 liideste arv	5	2
Kommunikatsioon	-	Modbus, S7
Kommunikatsioon serveriga	-	MQTT, OPC



Joonis 2.8 Kommutaator SCALANCE XB005 ja lüüs SIMATIC CC712 [37] [38]

2.5.4 Ruuter ja antenn

Pilveteenuste kasutamiseks valiti Siemensi ruuter SCALANCE M876-4 (Joonis 2.9). Ruuter on mõeldud juhtmevabaks Ehterneti põhiseks IP-protokolliga suhtluseks. Suhtlus toimub läbi neljanda generatsiooni mobiilse interneti. Ruuter on optimeeritud kasutamiseks Euroopas (Tabel 2.5). [39]

Ruuteriga koos on tarvilik kasutada ka antenni. Ruuteriga ühildub antenn ANT794-4MR. Selle antenniga saab luua ühenduse nii 2-, 3- ja 4-generatsiooni mobiilse internetiga.

Tänu kahe-suunalisele suhtlusele on võimalik infot edastada ja hankida. Antenn on ilmastikukindel ning tänu viie meetri pikkusele juhtmele on seda võimalik paigaldada ka välitingimustesse. [40]

Tabel 2.5 Ruuteri ja antenni nimiaandmed [39] [40]

Nimiaandmed	Ruuter SCALANCE M876-4	Antenn ANT794-4MR
Ülekandekiirus, Mbit/s	10 või 100	-
Kohtvõrgu liideste arv	4	-
Välisvõrgu liideste arv	2	-
Toetatud mobiilsidevõrgud	GSM, UMTS, LTE	GSM, UMTS, LTE
Toetatud mobiilside teenused	GPRS, eGPRS, HSPA+	
Nimipinge, VDC	24	-
Voolutarve, mA	330	-
Impedants, Ω	-	50



Joonis 2.9 Ruuter SCALANCE M876-4 ja antenn ANT794-4MR [39] [40]

2.5.5 Puhvertoiteallikas ja toiteplokk

Projekteeritavas juhtimissüsteemis on tarvilik ka varutoide, et tagada juhtimissüsteemi toimimine ajal, mil on toimunud voolukatkestus ning akuinverter ei ole jõudnud veel käivituda. Puhvertoiteallika valikul arvestati asjaoluga, et süsteemis on akupaki näol autonoomne toiteallikas juba olemas. Süsteemi eripärade tõttu on siiski tarvilik juhtimissüsteemi enda varutoiteallika olemasolu, et elektrikatkestuse korral teostada ümberlülitusi ning inverteri käivitamist. Arvestades tingimusi otsustati kasutada kondensaatoritel põhinevat UPS-i, mis tagaks varutoite ainult lühiajaliselt, kuid siiski piisavalt, et teostada vajalikud toimingud. Vajaliku UPSi leidmiseks summeeriti kõik 24 V elektritarbijad, mis voolukatkestuse korral jääksid toiteta. Selleks koostati tabel (Tabel 2.6).

Tabel 2.6 Juhtimissüsteemi seadmete voolutarbimised [34] [35] [36] [37] [38] [39] [41] [42]

Seade	Voolutarve, mA
Kontroller S7 1500	700
Digitaalne väljundmoodul	30
Digitaalne sisendmoodul	20
Kohtvõrgu kommutaator	70
Lüüs	180
Ruuter	330
Elektrivõrgu kontaktor	208
Pingekontrollirelee	500
Kokku:	1960

Elektrivõrgu kontaktoriks on antud töös kontaktor, mis ühendab alajaama omatarbe elektrivõrgu välise elektrivõrguga. Kontaktor on vajalik, et alajaam saaks töötada *off-grid* režiimis. Sobilikuks lülitusaparaadiks leiti 63 A nimivooluga Lovato kontaktor CN63. Seda on võimalik lülitada 24 V alalispingega, mis on digitaalväljundis. Lovato kontaktori mähise võimsus on 5 W. [41] Kasutades alalisvoolu ahela võimsuse valemit, kus pinge ja voolu korrutis on võimsus, selgub, et mähise voolutarve on 208 mA. Seega on 500 mA voolotaluvus digitaalmooduli väljundis piisav lülituse teostamiseks.

Välise elektrivõrgu elektrikatkestuse korral rakenduvad pingekontrollirelee abikontaktid, mis annavad kontrollerile märku pinge puudumisest välisvõrgus. Sellesse kontrollahelasse määrati maksimaalne 500 mA voolutarve.

Seadmete voolutarbimiste summeerimisel selgus, et maksimaalne voolutarve on umbes 2 A. Sobiliku puhvertoiteallika valikul oli abiks tabel, milles on toodud välja kondensaatoritega seadmete väljundvoolud ajaühikus (Tabel 2.7) [43].

Tabel 2.7 Siemensi kondensaatoritel põhinevate UPS-ide puhvertoite kestus ning väljundvoolud [43]

Available energy	SITOP UPS500S/501S								SITOP UPS500P	
Basic units	2.5 kW	5 kW	2.5 kW	5 kW	2.5 kW	5 kW	2.5 kW	5 kW	5 kW	10 kW
Expansion modules	–	–	1 x 5 kW	1 x 5 kW	2 x 5 kW	2 x 5 kW	3 x 5 kW	3 x 5 kW	–	–
Combined	2.5 kW	5 kW	7.5 kW	10 kW	12.5 kW	15 kW	17.5 kW	20 kW	5 kW	10 kW
Buffer times										
at load current ... 0.5 A	134 s	236 s	390 s	478 s	632 s	748 s	851 s	1007 s	284 s	647 s
0.8 A	90 s	167 s	266 s	346 s	440 s	527 s	580 s	706 s	190 s	435 s
1 A	75 s	138 s	219 s	296 s	365 s	414 s	490 s	572 s	153 s	351 s
2 A	38 s	76 s	122 s	156 s	203 s	230 s	265 s	306 s	80 s	152 s
3 A	26 s	52 s	82 s	106 s	136 s	159 s	186 s	213 s	53 s	108 s
4 A	19 s	39 s	61 s	81 s	101 s	120 s	139 s	160 s	40 s	84 s
5 A	15 s	31 s	49 s	65 s	81 s	95 s	111 s	130 s	30 s	68 s
6 A	12 s	26 s	40 s	55 s	67 s	80 s	94 s	106 s	25 s	57 s
7 A	10 s	21 s	34 s	47 s	58 s	69 s	81 s	82 s	21 s	49 s
8 A	8 s	18 s	29 s	40 s	50 s	59 s	69 s	79 s	–	–
10 A	6 s	15 s	23 s	32 s	39 s	47 s	54 s	62 s	–	–
12 A	4 s	12 s	19 s	26 s	32 s	38 s	44 s	52 s	–	–
15 A	3 s	9 s	14 s	20 s	25 s	30 s	35 s	40 s	–	–
Charging times										
at charge current ... 2 A	54 s	120 s	158 s	223 s	263 s	318 s	355 s	417 s	130 s	360 s
1 A	110 s	205 s	311 s	425 s	503 s	625 s	695 s	816 s	–	–

Lähtudes voolutarbest ning ülaltoodud Siemensi kondensaator UPS-ide väljundvooludest ning nende kestvusest, leiti, et süsteemi sobib SITOP UPS500S varutoiteallikas (Joonis 2.10). Valitud toiteallikas suudab varustada voolu 2 A kuni 76 sekundit. Ilmselt on tegelik voolutarve oluliselt väiksem, sest arvutustes kasutati maksimaalset väärtust ning seetõttu suudab puhvertoiteallikas töötada kauemgi. Vajadusel on seadmele võimalik lisada täiendavaid kondensaatoreid nagu näiteks SITOP UPS500P.

Valitud kondensaatoril põhinev puhvertoiteallikas on erinevalt akudel põhinevast seadmetest täielikult hooldusvaba. Selle mahutavus on 5 kWs. Diagnostikaks on varutoiteallikat võimalik ühendada ka arvutiga. Seade ei vaja ka ventilatsiooni, tänu millele võib seda paigutada ventileerimata kilpi. [44]

24V alalisvoolusiini toiteallikaks valiti samuti seade Siemens SITOP seeriast. Tänu samale tooteseeriale saab olla kindel, et alaldi ja puhvertoiteallikas omavahel ühilduvad. Valitud alaldi SITOP PSU100L väljundpinge on 24 V. Maksimaalne võimalik väljundvool küündib 20 A-ni. Sisendiks sobib ühefaasiline 100-240 V vahelduvpinge (Tabel 2.8). [45]



Joonis 2.10 Puhvertoiteallikas SITOP UPS500S ja toiteplokk SITOP PSU100L [43] [45]

Tabel 2.8 Puhvertoiteallika ja toiteploki nimiaandmed [43] [45]

Nimiaandmed	UPS SITOP UPS500S	Toiteplokk SITOP PSU100L
Alalisvoolu sisendpinge, V	24	100-240
Vahelduvvoolu sisendpinge, V	-	85-264
Väljundpinge, VDC	24	24
Sagedus, Hz	-	50
Nimivool, A	15,2	2,35
Varutoiteallika väljundvool, A	$2 \geq$	-

2.5.6 Voolumõõtesüsteem

Elektrienergia paremaks juhtimiseks on vaja mõõta elektriseadmete voolutarbimist. Alajaama seadmete poolt tarvitatud voolude mõõtmiseks otsustati kasutada Siemensi voolumõõtesüsteemi SENTRON 7KT PAC1200 (Joonis 2.11). Mõõtesüsteem koosneb andmehaldurist, anduri ribast ning anduritest. Andmehaldur on kahe-suunaline arvesti, mis mõõdab aktiiv-, reaktiiv-, ja näivvõimsust, samuti võimsustegurit ühes ja kolmes faasis kombineeritult. Haldur suhtleb kohalikus võrgus läbi TCP kommunikatsiooniprotokolliga, olles alamseadmeks. Mõõteseadme külge on võimalik ühendada kaheksa sensoririba, millest igal ühel võib olla kuni 12 voolutrafot. Seega maksimaalne võimalik ühendatav voolutrafode arv on 96. [46]



Joonis 2.11 Voolumõõteseadme SENTRON 7KT PAC1200 ja voolutrafo 7KT1255 [46] [47]

Voolumõõteseadme nimiaandmed [46]:

Maksimaalne vool	63 A
Täpsus	+/-2%
Täpsusklass	Klass 2
Mõõdetav võrgusagedus	50 +/-5%
Kommunikatsioon sensoritega	RS485, Modbus RTU protokoll
Kommunikatsioon seadmetega	RJ 45, Modbus TCP protokoll.

Sensoriribale vajaliku 9V alalisvoolu toite tagab voolumõõtesüsteem. Sensoriribale kinnituvad voolutrafod asetsevad täpselt liinikaitselülitite kohal. Voolutrafode sensoritel on avad, millest elektritarvitite toitekaabel läbi läheb. Igal sensoril on unikaalne aadress vahemikus 1 ja 247. [47] [48]

3. MIKROVÕRGU PROJEKTEERIMINE

Antud peatükis projekteeritakse eelnevalt kavandatule ja nõudmistele vastav päikeseelektrijaam koos mikrovõrguga Harju Elekter jaotusalajaama HEJA. Esmalt kirjeldatakse elektrienergia tootmisega seotud seadmete kasutatavust, ühendamist ning nende vahelist kommunikatsiooni. Tuuakse välja päikesepaneelide gruppide omavahelisi ühendusi. Samuti kirjeldatakse võrgu- ja akuinverterite jõu- ja kommunikatsiooni ahelaid. Lisaks tuuakse välja mikrovõrgus rakendatavad energia mõõtmisesüsteemi ja juhtimise põhimõtted.

Teises alapeatükis antakse ülevaade mikrovõrgu tööst elektrivõrgust isoleerituna. Kirjeldatud on loogikakontrolleris olevaid juhtprogramme ning nende tööpõhimõtteid. Kahes järgnevas alampeatükis tutvustatakse juhtseadme tööd. Esmalt esiteltakse, kuidas võetakse vastu otsus akupakki salvestatud elektrienergia müümiseks. Protsessi käigus teostab kontroller ilmaennustuse päringu veebiserverisse. Ilmaennustuse päringu protsess on kirjeldatud viimases alampeatükis.

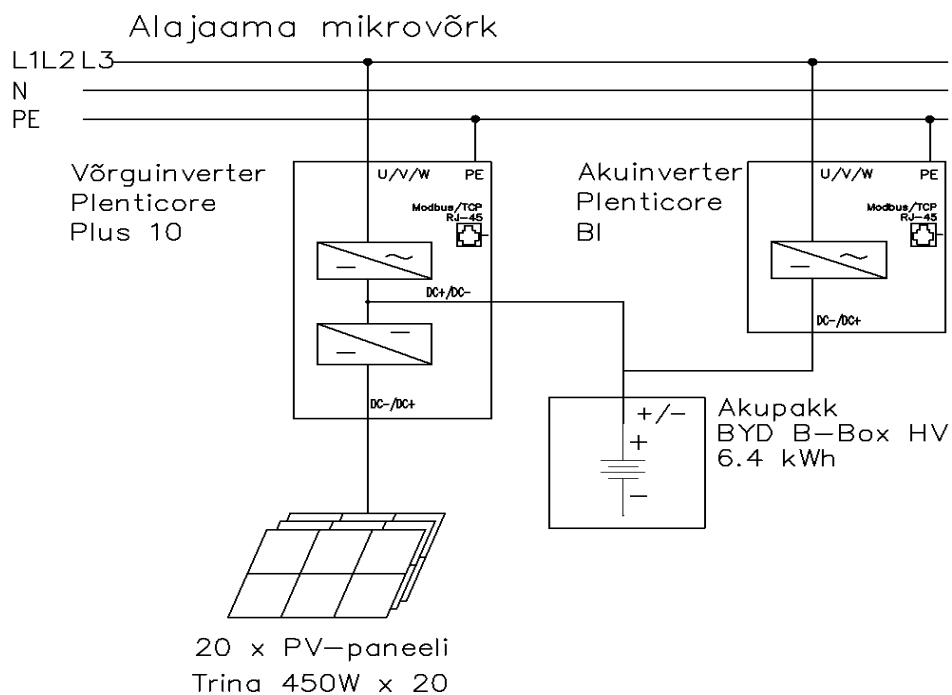
Autonoomse energiaallika valimisel otsustati päikesepaneelide kasuks. Päikesepaneelid paigaldatakse alajaama katusele. Ühtekokku mahub sinna 20 monokristall paneeli Trina. Ühe paneeli maksimaalne võimsus jääb vahemikku 430-450 W. Paneelid on ühendatud kahte gruppi, millest kummaski on kümme PV-paneeli (Lisa 4). Ühte rühma kuuluvad päikesepaneelid, mis on omavahel ühendatud jadamisi. Iga paneeli maksimaalne väljundpinge on 41 V. Järjestikku ühendatuna on ühe ahela pinge 410 V, mis jääb 160 V võrra alla võrguinverteri nimisisendpingele. Inverteri minimaalne sisendpinge on 150 V. Paneeli maksimaalne väljundvool on 10,98 A. Vastupidiselt pingele ei liitu jadamisi ühendatud PV-paneelide väljundelektrivoolud. Seetõttu on päikesepaneelide grupi maksimaalne võimalik väljundvool 10,98 A. Inverteri kõrgeim lubatud sisendvool on 13 A. Päikesepaneelide rühma väljundpinge ja -vool jäävad võrguinverteri lubatud piiridesse. [23] [29]

Kaks päikesepaneeli gruppi on ühendatud hübriidinverter KOSTAL Plenticore Plus 10 alalisvoolu sisenditesse (Joonis 3.1). Valitud seadmel on sisseehitatud alalispingemuundur, mis muundab päikesepaneelidelt tulevat sisendpinget sobilikuks väärtuseks. See on vajalik, et laadida elektriseadme kolmandasse alalisvoolu sisendisse ühendatud akupakki. Lisaks alalispingemuundurile on hübriidseadmel ka vaheldi, mis muundab monokristall paneelidelt või akust pärit alalisvoolu vahelduvvooluks. Vahelduvvool suunatakse alajaamavõrku, mis on läbi omatarbe trafo ühenduses elektrivõrguga. Võimalik on ka vastupidine muundamine.

See on hädavajalik juhul kui aku on tühjenenud alla kriitilise piiri ning autonoomsete energiatootmiseseadmete tootlikus on väike või olematu.

Sobiliku salvestusseadme valimisel lähtuti, et see oleks heaks kiidetud võrguinverteri tootja KOSTAL Solar Electricu GmbH poolt. Tänu sellele saab olla kindel, et need on ühildatavad nii pingeastmete kui ka kommunikatsiooni aspektides. Akupakk ühendati võrguinverteri kolmandasse alalisvoolu sisendisse. Salvestusseadme BYD B-Box HV nominaalpinge jääb vahemikku 200-500 V. Aku kogumahutavus on 6,4 kWh. Päikeseinverter ja akupakk saavad omavahel suhelda läbi sideliinide standardite RS485i või CANi. Standard määrab ära sideliini pingeastmed, pingemuutuste ajasutse, füüsilised andmeedastuskiirused, maksimaalsed edastuskaugused, modulatsiooniskeemid, kanalile juurdepääsu meetodid ning ka füüsilised pistikud. Projekteeritud lahenduses kasutatakse RS485 liidest. [32]

Hübriidinverteri seadistamisel on võimalik valida erinevate töörežiimide vahel. Antud lahenduses tuleb valida režiim, mille peamine prioriteet on laadida akut. Pärast eelisülesande edukat lõpetamist suunab inverter PV-paneelide poolt toodetud elektri alajaama mikrovõrku. Alajaama omatarbimisest üle jääv elektrienergia müüakse elektrivõrku. Päikeseenergia puudumisel ei lülita seade ennast välja, vaid jääb unerežiimi. Talveperioodil kui päikesepaneelide tootlikus on madal või olematu laeb võrguinverter akut elektrivõrgust võetava energiaga vältimaks aku isetühjenemist. Täis laetud aku tagab ka elektrikatkestuse korral energiasalvestusseadme täieliku potentsiaali.



Joonis 3.1 Mikrovõrgu ühejooneskeem

Võrguinverteril on RJ45 pistik, millesse on ühendatud CAT6 kaabel. Kaabel ühendab omavahel inverterit ning läbi Siemensi kommutaatori loogikakontrollerit SIMATIC S7-1500. Seadmete omavaheline suhtlus on ülesehitatud Modbus/TCP baasil. Võrguinverter on kui alamseade ning vastab kontrolleri poolt püstitatud küsimustele. Juhtseade saab küsida infot kuni 125 erineva parameetri kohta. Nendeks parameetriteks on informatsioon näiteks faaside arvu kohta, pingete, voolude, aktiiv-, reaktiivvõimsuste, võimsusteguri, akupaki pinge ja ka laetustaseme kohta. Päritud info on sisendiks juhtseadme programmile.

Paraku on läbi Modbus/TCP võrguinverterile võimalik esitada ainult infopäringuid. Seetõttu võeti süsteemi kasutusele akuinverter KOSTAL Plenticore BI, millele on lisaks infopäringute esitamisele võimalik anda ka töökäsklusi. Sarnaselt võrguinverterile on akuinverter ühendatud kontrolleriga läbi Modbus/TCP. Kommunikatsioon akuinverteri ja akupaki vahel on teostatud RS485-ga. Seadme alalisvoolu sisendisse on ühendatud akupaki pluss ja miinus klemm ning väljundisse alajaama kolmefaasiline elektrivõrk.

Alajaama iga elektriseadme liinikaitselüliti kohale on paigaldatud voolutrafod. Mikrovõrgus kasutatakse Siemensi voolumõõtesüsteem SENTRON 7KT PAC1200. Voolumõõtesüsteem koosneb andmehaldusseadmest, sensoriribadest ning sensoritest ehk voolutrafodest. Sensorid paiknevad sensoriribadel, mis omakorda on kinnitatud erinevate elektritarvitite toiteahelate liinikaitselülitite kohale. Suhtlusprotokolliks sensoriribade ning andmehaldussüsteemi vahel on Modbus, mis on ülesehitatud sideliinistandardil RS485. Ühe andmehaldussüsteemiga on võimalik ühendada kuni 8 sensoririba. Igasse sensoriribasse on võimalik ühendada kuni 12 voolutrafod. Voolutrafosid on sensoririba külge võimalik ühendada kõrvuti standardse liinikaitselüliti moodulsammuga. Mõnedes toiteahelates on aga kasutusel kombineeritud liini- ja rikkevoolukaitselülitid ehk RCBOd. Kombineeritud kaitselülitite laius on kaks korda suurem kui liinikaitselülitel. Seetõttu tuleb paigaldada osad voolutrafod sensoriribadel üle ühe. Projekteeritud süsteemis ei ole elektritarvitite toiteahelaid kuigi palju ning seetõttu piisab kahe sensoririba kasutamisest (Lisa 4). Andmehaldusseade edastab informatsiooni kontrollerisse läbi Modbus RTU. Tänu täpsele mõõtmisüsteemile on võimalik jälgida erinevate elektritarbijate elektritarbimist.

Mikrovõrgu juhtimiseks lisati enamike elektriseadmete toiteahelatesse kontaktorid. Kasutusele võeti Lovato kontaktorid, sest neid on võimalik juhtida 24 V alalispingega. Kontaktoried juhib kontroller koos digitaalse väljundmooduliga. Digitaalse väljundmooduli maksimaalne väljundvool on 0.5 A, mis on piisav, et lülitada ka 63 A jõukontaktorit.

Alajaama elektriseadmed on ühendatud elektrivõrguga läbi omatarbetrofo. Alajaama sisevõrgu faasipinge on 230 V ning liinipinge 400 V. Trafo sekundaarpoole madalpinge osa väljundahelasse on ühendatud elektriarvesti, mille abil on võimalik hinnata võrgust võetavat ja võrku antavat elektrivõimsust. Mõõteseadet suhtleb loogikakontrolleriga kasutades Modbus/TCPd. Alajaama ning üldelektrivõrgu vahelisse ahelasse on ühendatud pingekontrollirelee. Pingekontrollirelee abikontaktidega edastatakse kontrollerisse signaal elektripinge olemasolust elektrivõrgus. Signaal on sisendiks kontrolleri juhtprogrammile. Juhul kui elektrivõrgus esineb pingekatkestusi lülitab kontroller välja kontaktori, millega isoleerib alajaam end elektrivõrgust. Seejärel hakkab mikrovõrk tööle saartalitluses ning kontroller käivitab rikkerežiimi.

Mikrovõrgus kasutatavete elektriseadmete kaitseaparatuuri valikul lähtuti tootjapoolsetest nõuetest ning seadmete nimivooludest (Tabel 3.1).

Tabel 3.1 Mikrovõrgus kasutatavate elektriseadmete liinikaitselülitiid

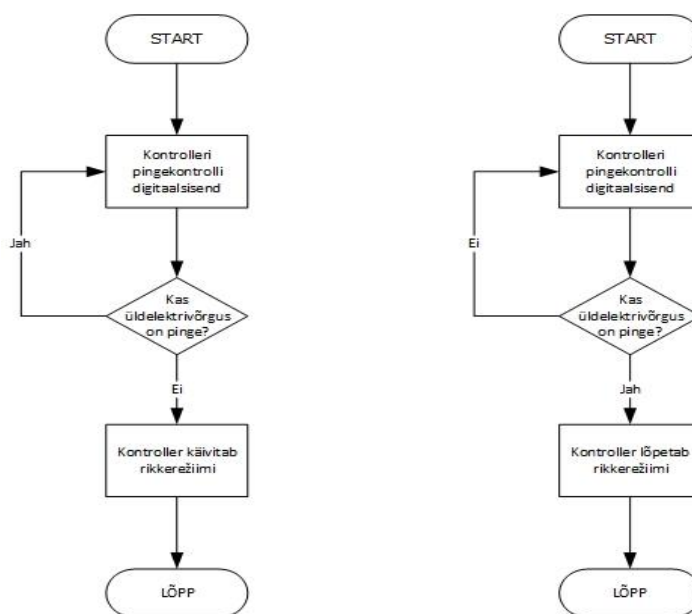
Elektriseade	Liinikaitselüliti
Võrguinverter „Plenticore Plus 10“	3C25
Akuinverter „Plenticore BI“	3C16
Elektriradiaatorid	1C20
Jäätumiskaitsekaabel	1C6
Õhksoojuspump	1C10
Multimeetri toide	1B4
Õhksoojuspumba juhtimine	1B2
Ventilaator	1C2
Valgustid	1C4
Reserv 1	1B6
Reserv 2	1C10
Reserv 3	1C16
Pistikupesad	1C16
Toiteplokk	1B16
Puhvertoiteallikas	1B4
Lüüs	1B2
Ruuter	1B2
Kommutaator	1B2

Antud lõputöös ei ole käsitletud mikrovõrgu elektrisüsteemis kasutatavate juhtmete ja kaablite valikut.

3.1 Mikrovõrgu töö isoleeritud režiimis

Alajaama elektrisüsteemi isoleerimine elektrivõrgust on vajalik kahel põhjusel. Esiteks välistab see olukorra, mil alajaama akupanka salvestunud elekter müüakse asjatult võrku. Teiseks aitab see ära hoida olukorra, mil üldelektrivõrgu olukorra normaliseerumisel tekiks faasinihe.

Off-grid režiimis töötades ei oska inverter avaliku elektrivõrgu sagedusega vajaliku referentsi puudumise tõttu sünkroniseerida. Juhul kui üldelektrivõrgus rike kõrvaldatakse ning tavaolukord taastub ei pruugi võrguinverteri poolt võrku antud pinge ja voolu sagedus ühtida elektrivõrgu sagedusega.



Joonis 3.2 Kontrolleri juhtprogramm rikke ning normaalolukorra tuvastamiseks üldelektrivõrgus. Konstantselt töötab kontrolleris üks kahest programmist. Kui üldelektrivõrk töötab tavapäraselt kasutab programm rikkerežiimi tuvastusprogrammi (Joonis 3.2). Juhul kui elektrivõrgus on rikkeline olukord ning mikrovrõrk töötab isoleerituna, siis kasutab kontroller normaalolukorra tuvastamise programmi, mis annab teada, kas elektrivõrgus on rikkeline olukord lõppenud.

Alajaama kontrolleriks valitud SIMATIC S7-1500-I on kaks peamist ülesannet. Nendeks on elektritarbimise juhtimine *off-grid* režiimis ning osalemine elektriturul akupakki salvestunud energia müügiga. Elektritarbimise ohjamine on aktuaalne elektrikatkestuse korral, mil kasutatav elektrienergia hulk on piiratud ning seda ei pruugi kõikidele elektriseadmetele jaguda. Elektritarbimise korraldamine rikkerežiimis toimub tänu toiteahelatesse paigutatud normaalselt suletud kontaktoritele (Lisa 4). Kontrolleril on releede ja kontaktorite juhtimiseks digitaalne väljund- ja sisendmoodul. Väljundmoodul ergastab kontrolleri käsul kontaktori mähist, mis selle peale avab kontaktori. Ahelas olev elektriseade on seejärel võrgust eraldatud.

Kui elektrivõrgus on tekkinud elektrikatkestus annab kontroller käivitumiskäskluse akuinverterile. Seepeale hakkab alajaama sisevõrk energiat ammutama akupakist.

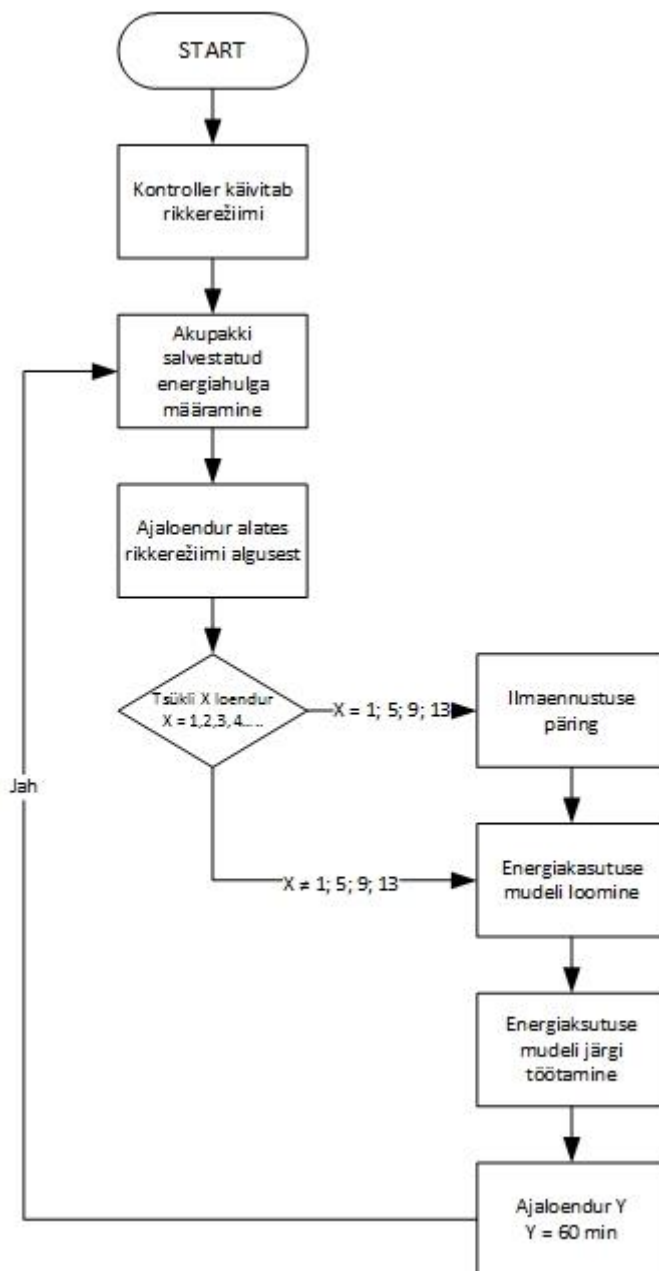
Samuti hakkab kontrolleri tööle juhtprogramm, mis kestab seni kuni elektrivarustus üldelektrivõrgus on taastunud (Joonis 3.3). Juhtprogrammi esimese tegevusena teeb juhtseade infopäringu akuinverterile selgitamiseks välja akusse salvestatud energia hulka. Samal ajal käivitub kontrolleri programmis ajaloendur, mis mõõdab aega alates *off-grid* režiimi lülitamisest. Juhtprogrammis on ka tsükliloend, mis loendab programmi korduste arvu. Esimeses tsüklis teostab kontrolleri päringu ilmaennustusportaali serverisse saamiseks kohalikku ilmaprognoosi. Järgnevate tsüklite jooksul tehakse ilmaennustuse päring ainult igal neljandal korral, sest ilmaennustus ei tee lühema aja jooksul märkimisväärseid muutusi. Ilmaennustuse andmete põhjal koostab kontrolleri energiakasutusmudeli.

Mudeli aluseks võeti määruse Võrguteenuste kvaliteedinõuded ja võrgutasude vähendamise tingimused kvaliteedinõuete rikkumise korral, § 4 viienda lõike esimene punkt, mis ütleb, et „Jaotusvõrgus tuleb rikket põhjustatud katkestus kõrvaldada 12 tunni jooksul ajavahemikus 1.aprillist kuni 30. septembrini ja 16 tunni jooksul ajavahemikus 1.oktoobrist kuni 31. märtsini“. [49]

Kuna HEJA alajaamad on üldjuhul ühendatud jaotusvõrku arvestab kontrolleri, et elektrikatkestus kestab maksimaalselt 16 tundi. Energiakasutusmudeli väljatöötamisel võtab kontrolleri arvesse akusse salvestatud energiahulka, ilmaennustuse andmeid ning alajaama elektritarvitite määratud prioriteetsust. Prioriteetsuse abil määratakse elektrenergia jaotamine elektriseadmete vahel rikkerežiimis. Näiteks kui valgustitele on määratud kõrgeim prioriteetsus, siis hoiab kontrolleri akupakis alles vähemalt niipalju energiat, et käesolevast hetkest kuni eeldatava rikkeolukorra lõppemiseni oleks valgusteid võimalik kasutada. Kui näiteks teised elektriseadmed nagu elektriküte ja ventilatsioon on määratud võrdse madalama prioriteetsusega, siis lubab kontrolleri neil tarvitada igal tsüklil sama elektrihulka. Voolumõõtesüsteemi abil jälgitakse seadmete poolt tarvitatud elektrenergia hulka. Juhtprogramm võtab arvesse ka järgmiseid võimalikke tsükleid. Kui mudel on loodud, alustab juhtprogramm vastloodud mudeli põhjal talitlema, katkestades kontaktorite abil neid elektritarvitite ahelaid, mis ei ole kõrge prioriteetsusega. Või lubab neil töötada ainult senikaua, kuni need on ära tarbinud selleks tsüklilis kavandatud elektrenergia eeldusega, et esimese prioriteetsusega elektriseadmed saaksid töötada rikkelise olukorra lõpuni. Iga tsükkel kestab ühe tunni, ning kui see aeg on möödunud alustab juhtprogrammi uus tsükkel akupakki salvestatud energia hulga määramisega.

Antud töö raamesse ei kuulunud konkreetsete energiakasutusmudelite loomine. Käesolevaga on kirjeldatud vaid üksnes üldist tööpõhimõtet.

Juhtprogrammis on määratletud ka reserv, mis peab võimaldama kontrolleri tööd elektrisüsteemi taaskäivitamiseks pikemaajaliste elektrikatkestuste korral. Juhul kui pärast kuueteist tunni möödumist on akupakis veel energiat ning võrgus ei ole normaalalitus taastunud, alustab programm uue tsükliga.

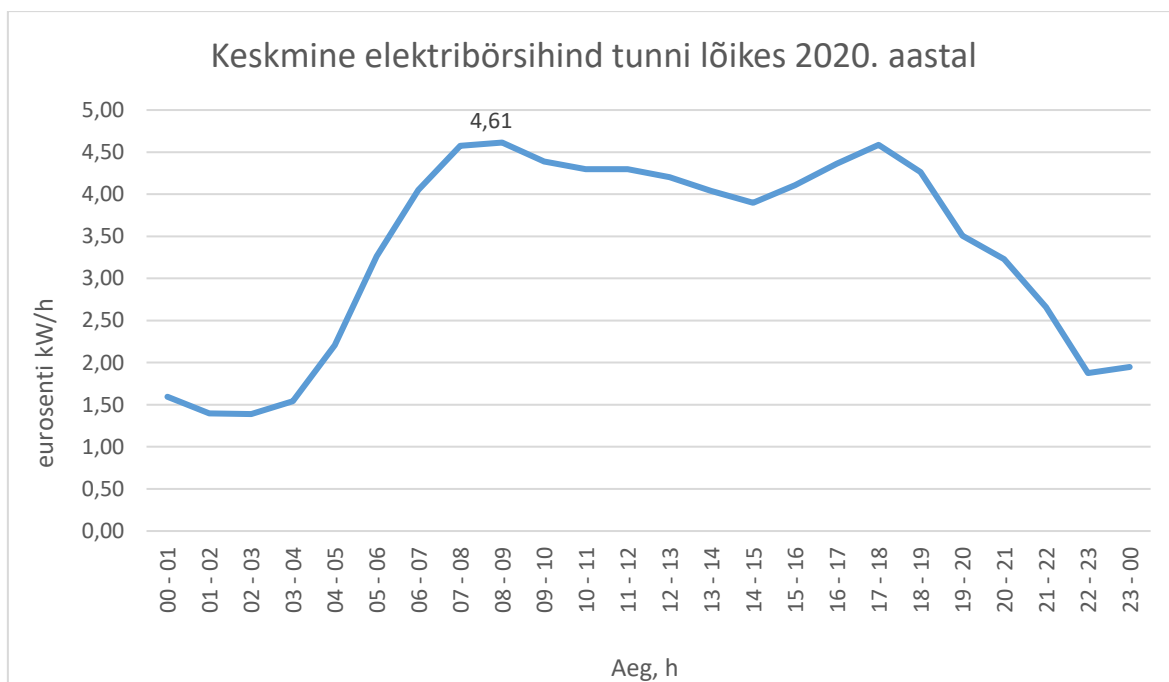


Joonis 3.3 Energiakasutuse mudeli loomine *off-grid* režiimis

3.2 Elektrienergia müük tipukoormustel

Lisaks elektrienergia juhtimisele elektrivõrgu rikkelses olukorras on kontrolleri ülesandeks osaleda elektriturul akupakki salvestatud energia müügiga. Alajaama katusel olevad päikesepaneelid töötavad koos võrguinverteriga iseseisvalt ning kui aku

on täis laetud, suunab akuinverter elektrienergia võrku. Kõige mõistlikum on teha seda siis, kui võrgus on tipukoormus. Seetõttu leiti, et ainuke võimalus maksimaalse kasumi saamiseks on müüa akupatareisse salvestatud energiat tipukoormustel, mil elektri hind on tavapärasest kõrgem. Müümisel kasutatakse ära hommikust tipukoormust. Hommikune tipukoormus jääb ajavahemikku kl 08:00-09:00. Aastal 2020 oli keskmiseks hommikuseks tipukoormuse elektribörsihinnaks 4,61 euro senti kW/h (Joonis 3.4).



Joonis 3.4 Keskmine elektribörsihind tunni lõikes 2020. aastal

Eeldatava tipukoormuse alguses kell 08:00, alustab kontrolleri müügitsükli programm (Lisa 1). Esmane tegevus müügitsükli programmis on kontrollimine, kas mikrovõrgus on käivitunud rikkerežiim. Juhul kui see nii on, siis lõppeb müügitehingu programm. Kui aga mikrovõrk parasjagu rikkerežiimis ei tööta teostatakse akupanka salvestatud energia hulga määramine. Kui selgub, et akupakk on tühjenenud alla sätestatud nivoo pii, lõppeb müügitsükkel. Juhul kui aga salvestusseadme laetusaste on üle sätestatud nivoo piiri, teostatakse ilmaennustuse päring. Selle prognoos põhjal saab kontroller määratleda, milliseks kujuneb päikesepaneelide tootmine päeva jooksul. Kui näiteks selgub, et saabumas on äikseline ilm, millega kaasneb pilvisus ning ka võimalikud elektrikatkestused, lõpetab kontroller müügitsükli. Kui aga ilmaprognoosi andmed on eelseadistatud parameetrite vahemikus, jätkub müügitsükkel. Vastavalt prognoositavale ilmale saab kontroller ära määrata kui suurt energia hulka on akupakist mõistlik ära müüa.

Kui saabumas on päikseküllane, mitte väga palav päev ning päikesepaneelid juba toodavad elektrit, siis müüakse ära kogu akuseadmesse salvestatud energia. Kui ilmaandmed vastavad osaliselt lubatud parameetritele, toimub osaline müük. Kavandatud lahenduses müüakse elektrienergiat võrku ainult hommikuse tipukoormuse ajal. Pärast õhtust tipukoormust ei ole päikesepaneelid enam piisavalt tootlikud ning akupakk võib jääda tühjaks. Antud lõputöö raames ei määratletud salvestusseadme nivooipiire ega ilma ilmaprognoosi parameetreid.

3.3 Ilmaennustuse päring

Elektritootmine päikesepaneelidega on suurel määral seotud ilmastikuoludega. Seetõttu projekteeriti alajaama mikrovõrku süsteem, mille abil on võimalik saada serverist ilmaprognoosi. Kontrolleri ühendamiseks internetiga kasutatakse Siemensi liidest SIMATIC CC712 ning ruuterit SCALANCE M874. Kasutades neid juhtimisseadmeid on kontrollerial võimalik saada ilmaennustusportaalidest informatsiooni.

Paljud tänapäeva ilmaennustusportaalid pakuvad võimalust kasutada nende poolt kogutud ja mudeltatud andmeid. Selleks, et suhelda mõne veebilehega on kasutusel rakendusliidesed ehk API-d. Rakendusliides on kogum alamprogrammide, protokollide ja vahendite rakenduste ehitamiseks. Liides määrab ära, kuidas kaks või enam programmi omavahel suhtlevad. Selle abil on programmeerijatel võimalik kopeerida andmeid ühest rakendusest teise. Rakendusliidesel on erinevaid ehitusplokke, mida programmeerija vastavalt oma soovidele saab ära kasutada. [50]

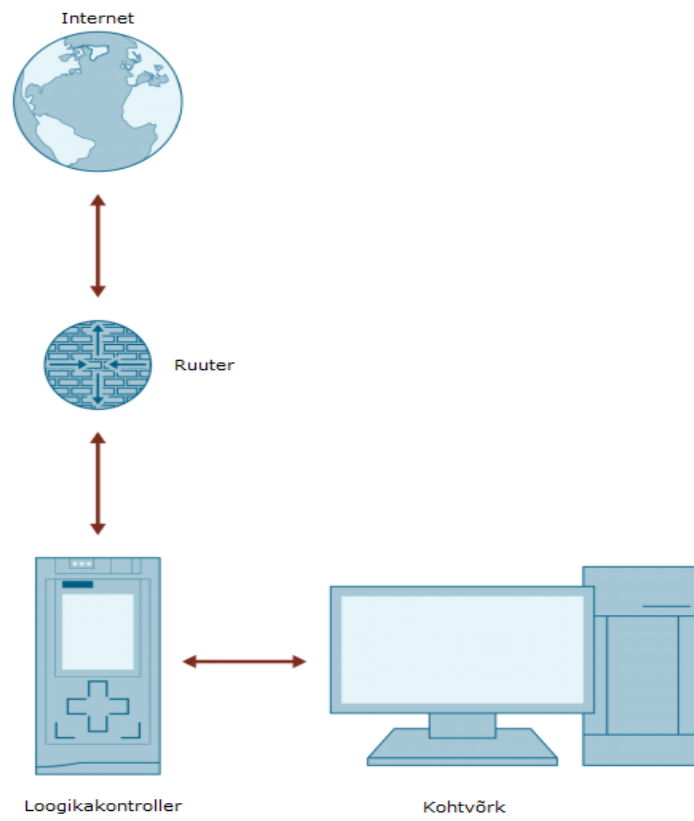
Projekti raames otsustati ilmaandmete päringuks kasutada Norra ilmaennustusportaali yr.no. Rakendusliidese „*MET teater API*” abil on võimalik teha lehelt päringuid ning vastuseks saada ilmaandmeid. Portaali lehel on alamleht „*For developers*”, millel on üksikasjalikult toodud välja vajalik informatsioon, et ilmaandmeid saada. [51] Veebilehel oleva liidese abil on võimalik saada informatsiooni väga erinevate ilmastikuolude kohta. Käesolevas projektis on oluline lokaalne ehk alajaama asukohta arvestav ilmaprognoos. Selle jaoks on lehel olemas rakendusliides nimega „*Location*”. Rakenduses tuleb ära määratleda sobiva asukoha geograafilised koordinaadid. Liidese abil on võimalik saada ennustust järgnevate meteoroloogiliste elementide kohta [52]:

- Kastepunkti temperatuur
- Tuulekiirus
- Kõrgetel kõrgustel olevate pilvede osakaal
- Maksimaalsed sademed
- Madalaim õhutemperatuur

- Keskmise õhuniiskuse
- Õhurõhk
- Minimaalsed sademed
- Maksimaalne õhutemperatuur
- Keskmisel kõrgustel olevate pilvede osakaal
- Udu
- Puhangulised tuuleiilid
- Sademete tõenäosus
- Tuulesuund
- Äikese tõenäosus
- UV-indeks
- Madalatel kõrgustel olevate pilvede osakaal
- Pilvisus
- Õhutemperatuur

Kõige olulisemad sisendid päikesepaneelide tootlikkuse ennustamiseks on pilvisus ja õhutemperatuur. Samuti võib kaaluda näiteks udu, sademete ja ka äikese tõenäosuse lisamise. Ülejäänud näitajad tuleks koodi lihtsuse huvides välja jätta.

Rakendusliidese käivitamiseks tuleb selle poole pöörduda hüperteksti edastusprotokolliga HTTPS. Siemensi loogikakontrolleril SIMATIC S7-1500 on olemas funktsiooniplokk, millega on võimalik teostada kommunikatsiooni hüperteksti edastusprotokolliga. Juhtseadmel on olemas vastav kogumik nimega „*Library for HTTP Communication*“ ehk LHTTP, mille abil on võimalik suhelda teiste kohalikus võrgus olevate seadmetega läbi Ethernet võrgu või veebiserveritega internetis (Joonis 3.5). Antud kogumikus on erinevaid funktsiooniplokke, mida on võimalik loogikakontrolleri programmis kasutada. Kasutades vastavaid plokkide programme on võimalik esile kutsuda pöördumisi HTTPS protokolliga määratud veebiserveritele. Veebiserver vastab kutsule ning annab infot koodis määratud päringutele. Veebis saadud infot kasutab kontroller sisendiks rikkerežiimi ja müügitsükli juhtprogrammidele.

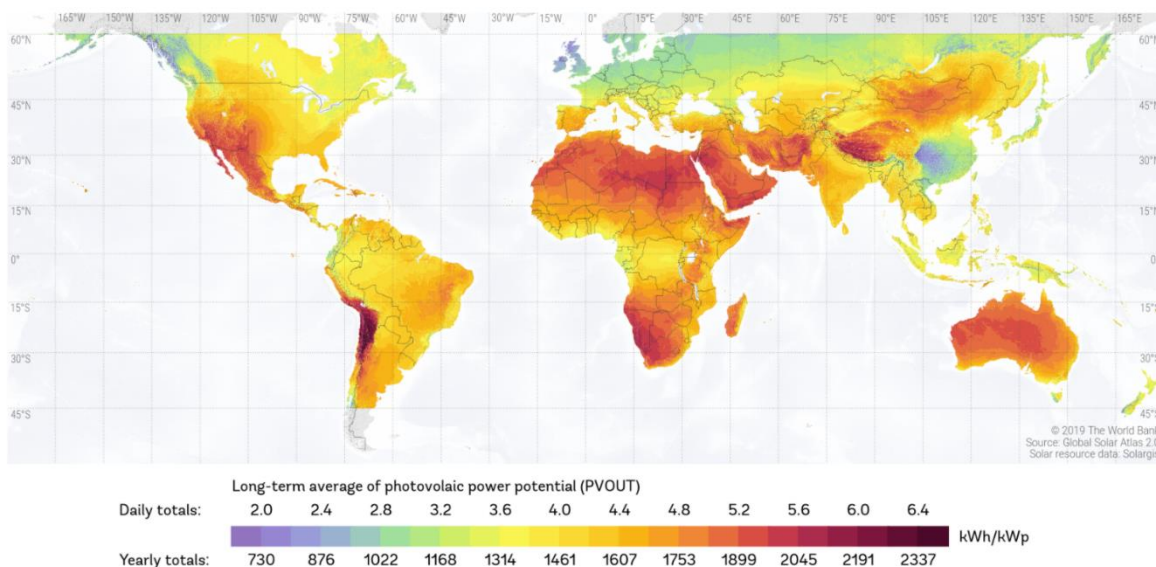


Joonis 3.5 Kontrolleri kommunikatsioon hüpertexti protokolliga [53]

4. PROJEKTEERITUD MIKROVÕRGU KASUMLIKKUSE ANALÜÜS

Päikesepaneelide paigaldamine on viimase kümne aasta jooksul märkimisväärselt kasvanud. Eestis on seda soodustanud päikeseparkide rajamiseks mõeldud toetused. Samuti ka taastuvenergia toetused toodetud energiahulga kohta. Lisaks sellele on muutumas inimeste hoiakud taastuvenergia suhtes ühiskonnas laiemalt. Päikesepaneelide paigaldamist nähakse üha rohkem kui kasumlikku investeringut. Siiski on mõistlik enne raha paigutamist päikeseelektrijaama veenduda selle tasuvuses.

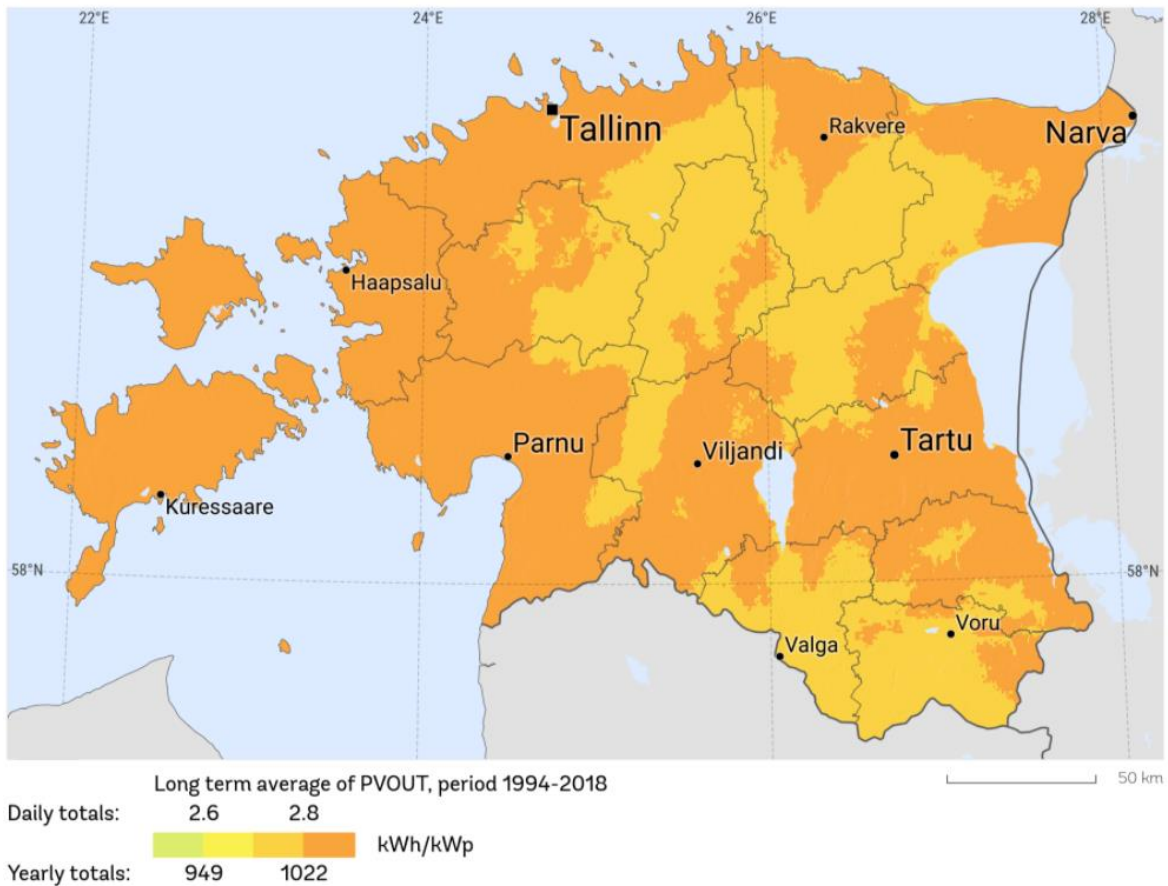
Igal aastal jõuab päikeselt maale päikesekiirguse energiahulk suurusega $1,8 \times 10^{17}$ W, mis ületab tuhande kordselt globaalse primaarenergia vajadust [21]. Seetõttu peetakse päikeseenergiat üheks parima kättesaadavusega taastuvaks energiaressurssiks. Paraku ei jagune päikeseenergia maakeral ühtlaselt. Kõige rohkem langeb päikesekiirgust ekvaatorile ning selle lähedal olevatele aladele. Päikseviljakamates piirkondades võib ööpäeva jooksul toota ühe kilovatise päikesepaneeliga kuni 6,2 kWh päevas (Joonis 4.1). Liikudes ekvaatorilt pooluste poole hakkab päikeseintensiivsus kahanema.



Joonis 4.1 Päikesekiirguse jaotumine maakeral [54]

Erinev päikeseintensiivsus on tingitud päikese ja maa vahelisest kaldenurgast. Eesti jääb ekvaatorist pisut eemale, ning seetõttu on sinne maksimaalne võimalik toodang pisut madalam. Keskmiselt on ühe kilovatise päikesepaneeliga Eestis võimalik toota 1022 kWh elektrienergiat aastas. Ühes päevas teeb see keskmiselt 2,8 kWh (Joonis 4.2).

PHOTOVOLTAIC POWER POTENTIAL ESTONIA



Joonis 4.2 Päikesekiirguse jaotumine Eestis [54]

Päikesepaneelide tootlikkust mõjutab ka maapinna ja paneelide vaheline kaldenurk. Paigaldusnurk maapinna ning päikesepaneelide vahel sõltub eelkõige päikese liikumise trajektoorist, mis on laiuskraaditi erinev. On välja selgitatud, et Eesti tingimustes saab suurimat tootlust paneelidega, mis on paigaldatud maapinna suhtes 40-kraadise kaldenurgaga. Parima tulemuse saavutamiseks peaksid paneelid olema suunatud lõunasse.

Kui võrrelda Eestit mõne ekvaatorile ligidamal paikneva riigiga võiks eeldada, et Maarjamaa on tootmisvõimekuse poolest kehvas seisus. Tegelikuses see nii ei ole, sest päikesepaneelide tootlikkuses on oluline roll ka ümbritseval õhutamperatuuril. Päikesepaneelide andmelehtedes on tavaliselt välja toodud maksimaalsed tipuvõimsused ümbritseva temperatuuriga 25 °C. Ümbritseva temperatuuri alanedes hakkab päikesepaneeli tootlikkus suurenema. Keskmiselt kasvab PV-paneeli tootlikus

0,5% kui alandada ümbritsevat temperatuuri ühe kraadi võrra [55]. Kasvuprotsent on erinevatel paneelidel varieeruv ning on tihti ära märgitud andmelehtedes.

Antud töösse valitud paneelide tootlikus kasvab temperatuuri alanedes 0,36% [23]. Tänu sellele ei ole Eesti oma geograafilise asukoha tõttu kehvemas seisus kui mõni ekvaatorile lähemal olev riik.

Lisaks õhutemperatuurile ja kaldenurgale on veel muidki tegureid, mis mõjutavad päikesepaneelide tootlikkust. Paratamatult käib päikesepaneelidega kaasas amortisatsioon, mistõttu efektiivsus langeb. Tihtipeale toovad tootjad andmelehtedes välja andmeid tõhususe kaotamise kohta ajas. Rahvusvahelise taastuenergia laboratooriumi NREL uuringu järgi väheneb tänapäevaste hinnalisemate paneelide tootlikus iga aastaga 0,3% [56] Esimesel kasutusaastal on langus veelgi suurem. Nii võibki varakevadel paigaldatud paneelide tootlikkus esimese hooaja lõpuks langeda kuni 3% võrra [57]. Lõputöös valitud paneelidel on see näitaja 2,5%. Järgneva 24 aasta jooksul ehk garantiiaja lõpuni langeb kasutegur igal aastal 0,6%. Põhjus, miks aastane efektiivsuse kahanemine on kaks korda suurem kui rahvusvahelise taastuenergia laboratooriumi katses on ilmselt selles, et valitud paneel on suhteliselt odav ning ei suuda selle näitajaga hinnalisemate paneelidega võistelda.

Lisaks ajale mõjub päikesepaneelide efektiivsusele negatiivselt ka tuulega leviv tolm ja liiv. Seetõttu tuleks paneel vähemalt korra aastas puhastada. Uuringute käigus on leitud, et kui ruutmeetrise paneeli pinna kohta langeb ühtlaselt 1,5 g liiva, langeb paneeli kasutegur kuni 50%. Ning kui sama suurele paneelile on langenud 6 g liiva kahaneb kasutegur kuni 90%. [58]

Eesti tingimustes tuleb lisaks tolmule ja liivale arvestada ka lumega. Päikesepaneelidele peale langev ning sinna koguneva lume hulk on suuresti sõltuvuses paneeli kaldenurgast. Näiteks langeb maja seinale paigaldatud paneelilt lumi koheselt maha. Samas võib lamekatusele paigaldatud paneelidele sadanud lumi kaduda ära alles kevadise sulaga. Aastatel 2012-2016 viidi Kanadas läbi katsetus, milles võrreldi lumega kaetud paneeli tootlikkust lumeta paneelide suhtes. Selgus, et 14-kraadise nurga all paigaldatud ning lume kattega paneeli tootlikus oli madalam 16,78% võrreldes puhastatud paneeliga. 45-kraadise nurga all paigaldatud paneelide tootlikkus langes aga kuni 5%. Ühtlasi näitasid tulemused, et kaldenurka suurendades vähenesid lumest tingitud kaod. [58] Lähtudes viimaste aastate suhteliselt lumevaestest talvedest ei arvestatud antud lõputöös lumest tingitud efektiivsuste langustega.

Päikesepaneelide tootlikkust mõjutavad ka varjud. Tootlikkuse vähenemiseks piisab vaid sellest, et vari on ühel paneelil. Jadamisi ühte gruppi ühendatud päikesepaneelide tootlikkus on alati võrdne kõige vähem tootva paneeli väärtuse järgi. Seetõttu tuleb paneelide paigaldamisel alati arvestada ka varjudega. Antud töös eeldatakse, et paneelide ning päikese vahel mingeid objekte ei ole.

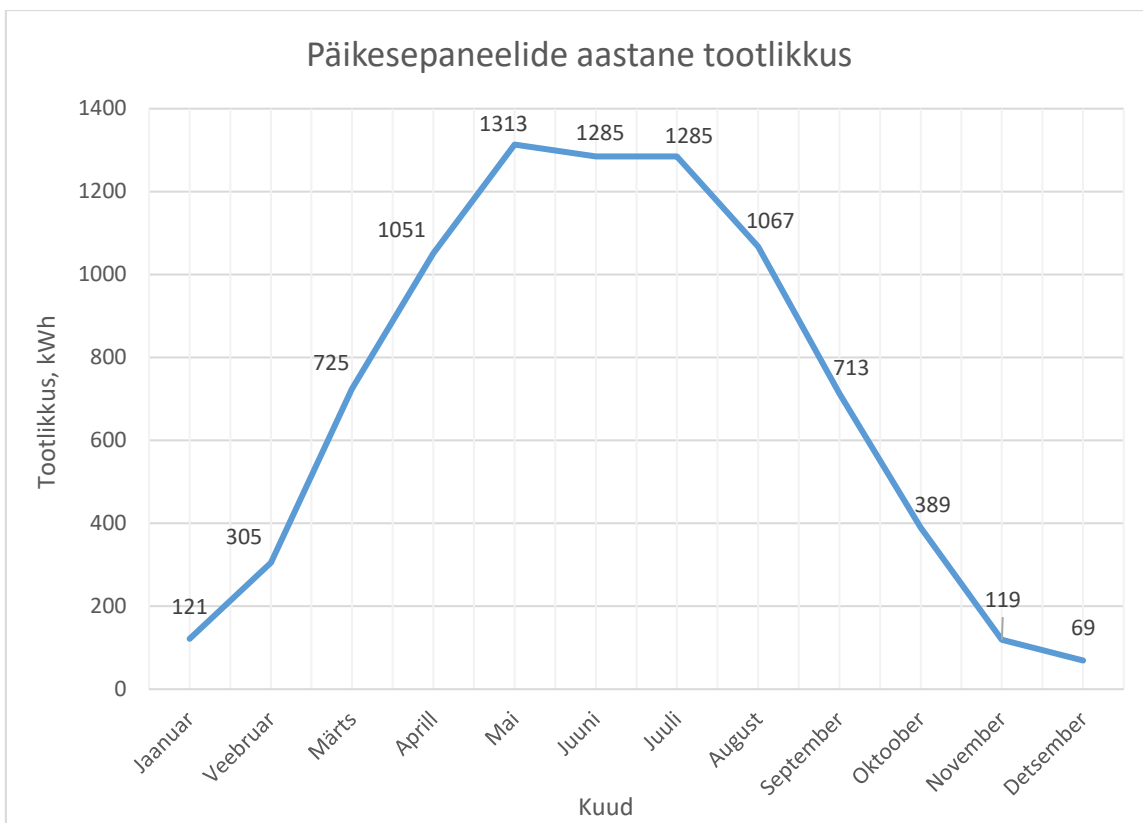
4.1 Päikesepaneelide tootlikkus

Päikesepaneelide tootlikkuse arvutused tehti PVGIS keskkonnas [59]. Veebilehel oleva kalkulaatori on loonud Euroopa Komisjoni Teadusuuringute Ühiskeskus ehk JRC. Veebilehel on võimalik teha arvutusi päikesepaneelide tootlikkuse kohta. Enne arvutuste tegemist sisestati süsteemi mõned algandmed (Tabel 4.1) (Lisa 2). Esmalt määrati päikesekiirguse andmebaas ning kasutatava paneeli tehnoloogia. Järgnevalt sisestati süsteemi tipuvõimsus, mis antud lahenduses on 9 kW. Seejärel hinnati süsteemi kadusid. Selleks määrati võrguinverteri kadu, mis andmelehe järgi on 3,4%. Paigalduse sektsioonis määrati, et paneelid on paigaldatud maja katusele maapinna suhtes 25-kraadise nurga alla. Paneelid määrati suunaga lõunasse. Kui tavaliselt näitab asimuut nurka põhja ja vaadeldava objekti vahel, siis antud programmis on nullpunktiks lõunapoolus. Seejärel kalkuleeris keskkond päikesepaneelide kogutoodangu kuude lõikes (Joonis 4.3).

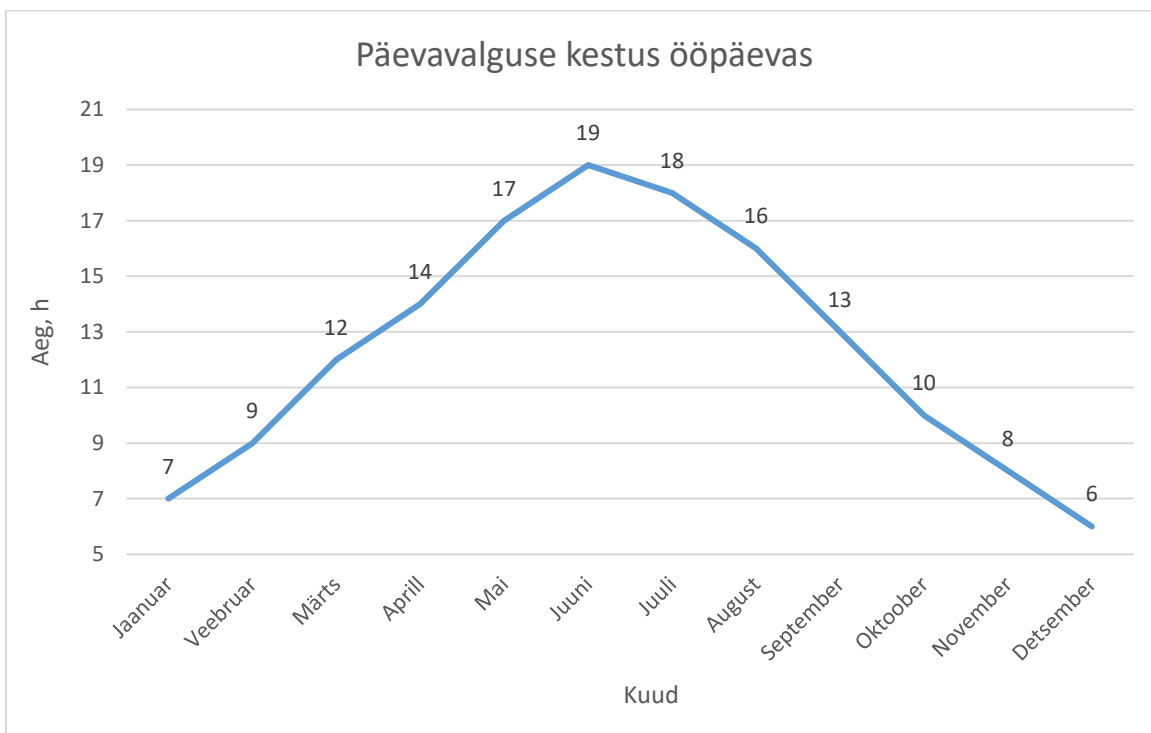
Tabel 4.1 PVGIS kalkulaatorisse sisestatud lähteandmed

Tegur	Väärtus
Päikesekiirguse andmebaas	PVGIS-SARAH
Paneeli tüüp	Kristalliline räni
Paigaldatud süsteemi tipu võimsus, kW	9
Süsteemi kaod, %	3,4
Paigaldusasend	Integreeritud hoonega
Kaldenurk, °	25
Asimuut, °	0

Saadud igakuine elektritoodang jagati kuus olevate päevade vahel ära. Päevane toodang jagati omakorda veel ära tundide vahel, mis jäävad päikesetõusu ja loojangu vahele (Joonis 4.4). Selleks määrati iga kuu keskmine päevavalguse aeg ööpäevas. Seeläbi leiti elektrienergia hulk, mis toodetakse ühe tunni jooksul.

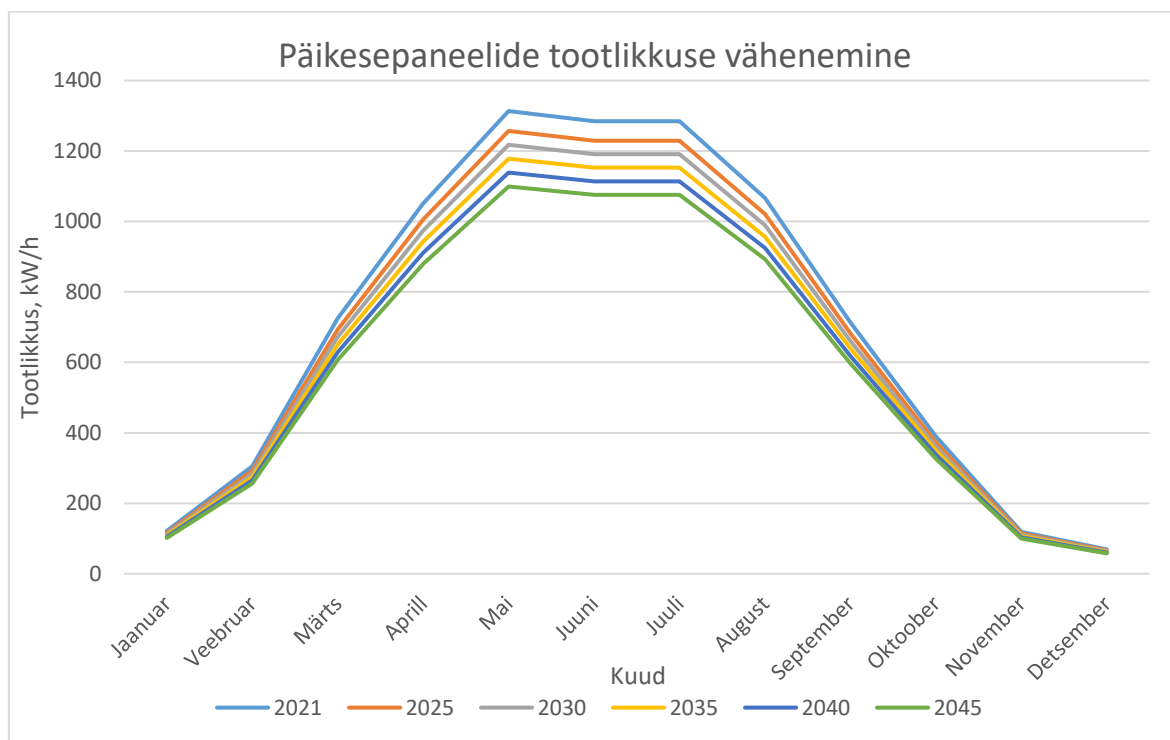


Joonis 4.3 Päikesepaneelide aastane toodang kavandatava alajaama piirkonnas [59]



Joonis 4.4 Keskmise päevalguse kestus kuus [60]

Tasuvusarvutustes arvestati ka päikesepaneelide tootmisvõimsuste vähenemisega ajas. Projektis kasutatava monokristall paneeli Trina tootlikkus väheneb esimesel aastal 2,5% ning igal järgneval 0,55% [23]. Joonisel 4.5 on esitatud PV-paneelide tootlikkuse langus ajas, mis väljendub eriti suuremate elektrivõimsuste juures (Joonis 4.5).



Joonis 4.5 Päikesepaneelide tootlikkuse vähenemine ajas

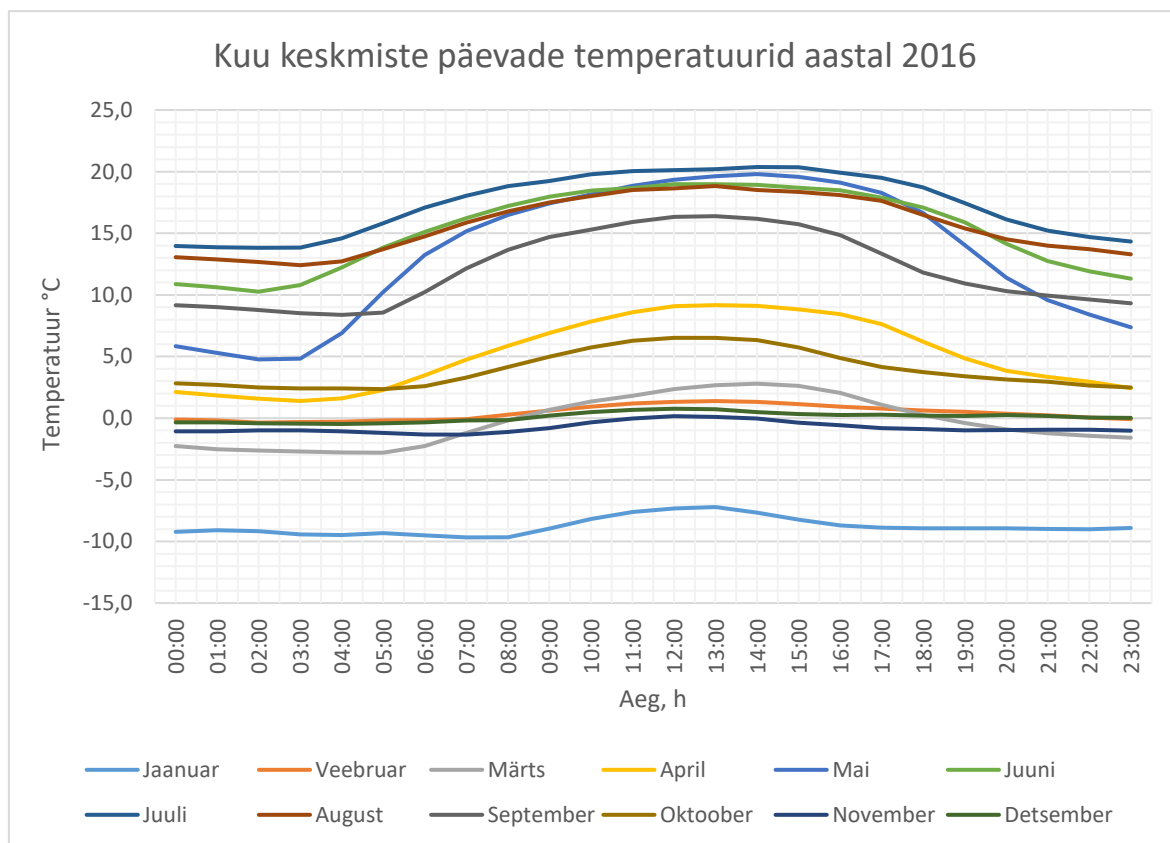
4.2 Alajaama soojuskaod

Tasuvusanalüüsi leidmiseks koostati iga elektriseadme kohta tervet aastat hõlmavad tunnipõhised koormusgraafikud. Võimsamate elektriseadmete nagu elektriradiaatorite, õhksoojuspumba ja jäätumiskaitsekaabli töö on otseselt seotud alajaama ümbritsevast õhutemperatuurist. Kütteseadmete töösükklite koostamiseks analüüsiti õhutemperatuure, mis on mõõdetud kavandatava alajaamale lähimas ilmavaatusjaamas. Lõputöös käsitletakse Kuusiku ilmajaamas 2016. aastal mõõdetud tunnipõhiseid temperatuure. Vajalikud andmed saadi Riigi Ilmateenistusest. Lihtsustuse huvides koondati kokku iga kuu kõik päevad üheks aritmeetiliseks keskmiseks (Joonis 4.6).

Lõputöös määrati alajaama seesmiseks õhutemperatuuri vahemikuks +15 °C kuni +35 °C. Kütmiseks on alajaamal kaks elektriradiaatorit ning õhksoojuspump. Kütteseadmete juhtimiseks kasutatakse termostaate.

Radiaatorite kasutamise tingib asjaolu, et kasutatavat õhksoojuspumpa ei või kasutada madalamate temperatuuride puhul kui $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Seega hakkavad radiaatorid alajaama kütma alles siis, kui väline temperatuur on langenud alla $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kütteseadmete koormusgraafik tugineb suuresti ümbritseva keskkonna õhutemperatuurile. Kütteseadmete koormusgraafikute koostamiseks leiti esmalt alajaama soojuskadu. Alajaama erinevatel tarinditel nagu seinad, lagi ja põrand on kasutusel erinevad ehitusmaterjalid, mistõttu leiti igal pinnal soojuskadu eraldi (Tabel 4.2).



Joonis 4.6 Kuu keskmiste päevade temperatuurid aastal 2016

Tabel 4.2 Alajaama tarindite materjalide soojuskaotevõimed [61], [62], [63], [64], [65]

Tarindielement	Materjal	Soojusjuhtivus U	Soojustakistus R	Soojuseerijuhtivus λ	Kogupindala m^2
Seinad	Sandwich paneel <i>Kingspan KS1150TF</i>	0,28	3,64	0,022	70,4
Lagi	Sandwich paneel <i>Kingspan KS1000RW</i>	0,34	2,73	0,022	46,8
Põrand	PVC	125	0,008	0,25	46,2
Põrand	Põrandavill <i>PAROC eXtra</i>	0,36	2,78	0,036	46,2
Põrand	Kasevineer	7,14	0,14	0,17	46,2

Alajaama seinad ning katus koosnevad erinevatest sandwich tüüpi paneelidest. Põranda soojuskaod kalkuleerimisel arvestati raamile toetuvad PVC katet, 24 mm paksust kasevineeri ja 100 mm paksust kivivilla (valem 4.3). Erinevatele materjalidele leiti soojusjuhtivus U , mis näitab soojuse hulka W , mis liigub läbi 1 m² suuruse pinna, kui vastaspindade temperatuuride erinevus on 1 K (valem 4.1). Samuti leiti soojustakistus R , mis iseloomustab piirdetarindite kihi ja kihtide soojustakistust (valem 4.2). Materjalide soojusjuhtivus ja soojustakistus leiti kasutades soojuseri juhtivust, mis väljendab soojusvoogu vattides, mis läbib 1 m paksust ja 1 m² pinnaga materjalikihi, kui temperatuuride vahe vastastikuste pindade vahel on 1 K. [66]

Materjali soojusjuhtivuse U leidmiseks kasutati valemit (4.1).

$$U = \frac{1}{R'} \quad (4.1)$$

kus U – soojusjuhtivus, W/(m²•K),
 R – soojataakistus, (m²•K)/W. [66]

Soojustakistuse leidmiseks kasutati valemit (4.2).

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (4.2)$$

kus R – soojataakistus, (m²•K)/W,
 d – materjali paksus, m,
 λ – materjali soojajuhtivustegur, W/(m•K). [66]

Põrand koosneb erinevatest kihtidest ning seetõttu leiti selle kogusoojustakistus R_t valemiga (4.3)

$$R_t = R_{PVC} + R_{vineer} + R_{kivivill} \quad (4.3)$$

kus R_{PVC} – polüvinüülkloriidi soojataakistus, (m²•K)/W,
 R_{vineer} – kasevineeri soojataakistus, (m²•K)/W,
 $R_{kivivill}$ – kivivilla soojataakistus, (m²•K)/W.

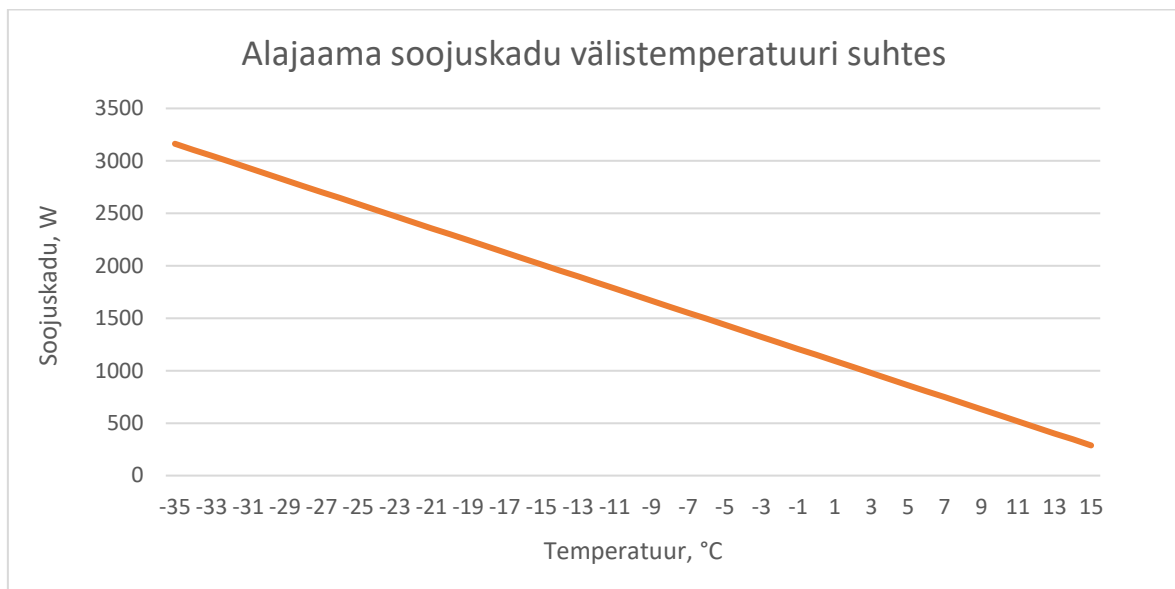
Leitud materjali soojusjuhtivusega ning tarindi pindalaga arvutati soojuskadu valemiga (4.4)

$$\Phi = U \cdot A \cdot (T_i - T_u) \quad (4.4)$$

kus Φ – soojuskadu, W,
 U – materjali soojusjuhtivus, W/(m²•K),
 A – piirde pindala, m²,
 T_i – sisetemperatuur, °C,

T_u – välistemperatuur, °C [66].

Soojuskao valemist nähtub, et alajaama soojuskadu sõltub sisemisest ja välimisest õhutemperatuurist (valem 4.4). Alajaama ruumitermostaadid on reguleeritud selliselt, et ruumis õhutemperatuur oleks vahemikus +15 °C kuni +25 °C. Arvutustes määrati ruumi temperatuuriks +20 °C. Väline õhutemperatuur on aga pidevas muutumises ning seetõttu kalkuleeriti hoone soojuskadu vastavalt sellele (Joonis 4.7).



Joonis 4.7 Alajaama soojuskadu välisõhu temperatuuri suhtes

Kütteseadmete elektritarbimine ning välisõhutemperatuuri väärtused leiti tunni täpsusega. Välisõhutemperatuuri määramiseks kasutati Riigi Ilmateenistusest päritud andmeid [67]. Kütteseadme elektritarbimise määramiseks kalkuleeriti esmalt alajaama soojuskadu käesoleval tunnil. Selleks leiti alajaama soojuskadu vastaval temperatuuril, mis lahutati kütteseadme võimsusest. Sellega leiti võimsus, tänu millele alajaama ruumi temperatuur tõuseb. Seejärel leiti aeg, mille jooksul seade suudab ruumi temperatuuri tõsta 10 °C võrra. Esmalt leiti soojushulk, mis kulub selleks, et temperatuuri etteantud tasemeni tõsta (valem 4.5). Selleks kasutati valemit (4.5).

$$Q=c \cdot m \cdot \Delta t, \quad (4.5)$$

kus Q – soojushulk, J,

c – materjali erisoojus, $1 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$,

m – keha mass, kg/m^3 ,

Δt – temperatuuri muutus soojusülekanne käigus [66].

Hoone siseõhu erisoojuseks ja tiheduseks määrati vastavalt 1005 J/kg•K ja 1,227 kg/m³. Alajaama kubatuur on 153 m³. Arvutustest järeldus, et temperatuuri tõstmiseks on vaja teha tööd 1 886 kJ.

Radiaatori ja õhksoojuspumba võimsusest lahutati võimsus, mis konstantselt alajaama soojakao tõttu hoones väljub. Alles jäänud võimsusega toimub alajaama kütmine. Seejärel võeti ruumitemperatuuri tõstmiseks tehtav töö džaulides ning see jagati võimsusega, millega köetakse alajaama õhku. Tulemusena saadi aeg, mis kulub alajaama õhu kütmiseks ning seeläbi saadi kütteseadme koormusgraafik. Aja leidmiseks kasutati võimsuse valemit (4.6).

$$1 W = \frac{1J}{1s}, \quad (4.6)$$

kus W – võimsus, W,
J – džaul, J,
s – sekund [68].

Lisaks leiti ka aeg, mille jooksul alajaam uuesti maha jahtub. Selleks jagati alajaama sisetemperatuuri tõstmiseks leitud tehtav töö hulk džaulides hoone soojuskao võimsusega. Tehtava töö hulka saab kasutada nii temperatuuri tõstmiseks kui ka langetamisel. Nii kütteseadme töötamise kui ka õhu jahtumise aeg leiti tunnipõhiselt vastavalt välimisele temperatuurile.

4.3 Alajaama omatarbe elektriseadmete koormusgraafikud

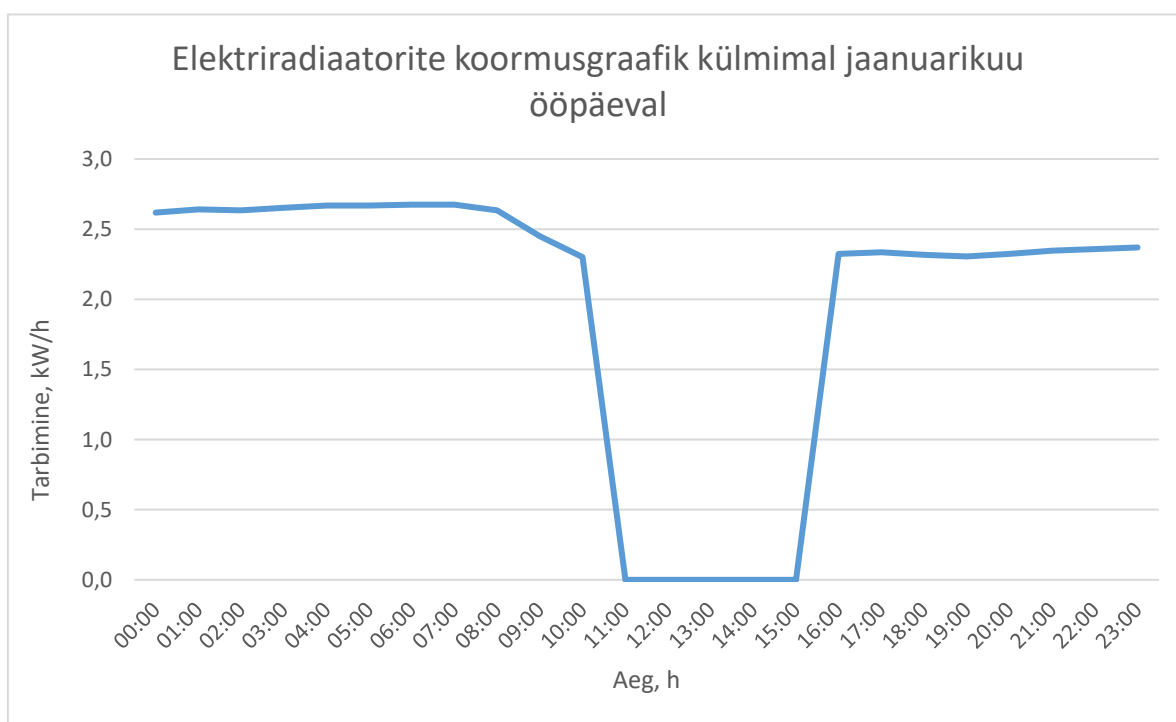
Parema ülevaate saamiseks moodustati tabel, milles toodi välja elektriseadmete hooajaline kasutusaeg, tarbimise tsükkel ja võimsus (Tabel 4.3).

Tabel 4.3 Alajaama omatarbe seadmete tööajad ning võimsused

Elektriseade	Kasutusaeg	Tsükliline või pidev	Võimsus, W
Radiaatorid	jaanuar	tsükliline	4000
Õhksoojuspump	aastaringselt	tsükliline	2120
Jäätumiskaitsekaabel	jaanuar, veebruar, märts, aprill, november ja detsember	tsükliline	1200
Ventilaator	mai, juuni, juuli ja august	tsükliline	150
Juhtimissüsteem	aastaläbi	pidev	30
Inverterid	aastaläbi	pidev	13

Elektriseade	Kasutusaeg	Tsükliline või pidev	Võimsus, W
Väiketarbijad	aastaläbi	pidev	25

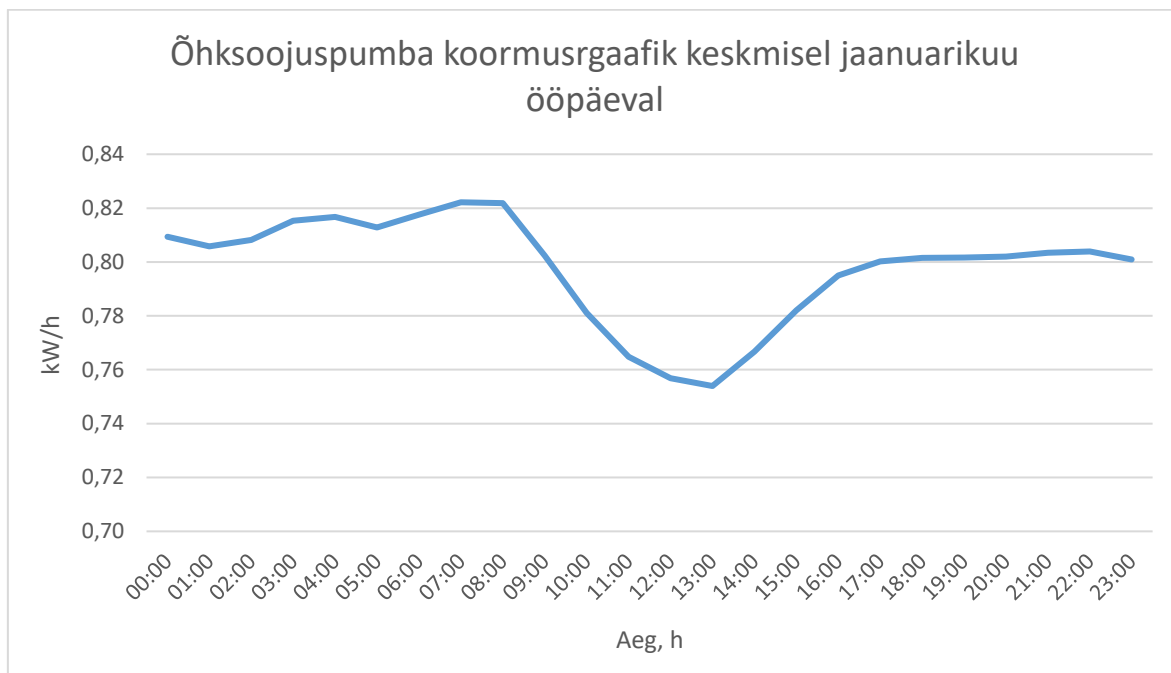
Alajaamas olevad elektriradiaatorid töötavad ainult siis, kui keskkonna õhutemperatuur on alla $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ning seetõttu ei kasutatud nende koormusgraafikute määratlemisel kuu keskmise temperatuuridega päeva vaid ainult neid ööpäevi, mil temperatuur oli madalam kui $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mõlemad elektriradiaatorid on seadistatud töötama nimivõimsusel ehk 2 kW. Aasta 2016 õhutemperatuuride andmete põhjal oli aasta külmim ööpäev kaheksas jaanuar, mille jooksul tarbiksid radiaatorid kokku 47,3 kW/h (Joonis 4.8). 2016. aasta andmete põhjal töötaksid elektriradiaatorid seitsmel ööpäeval aastas.



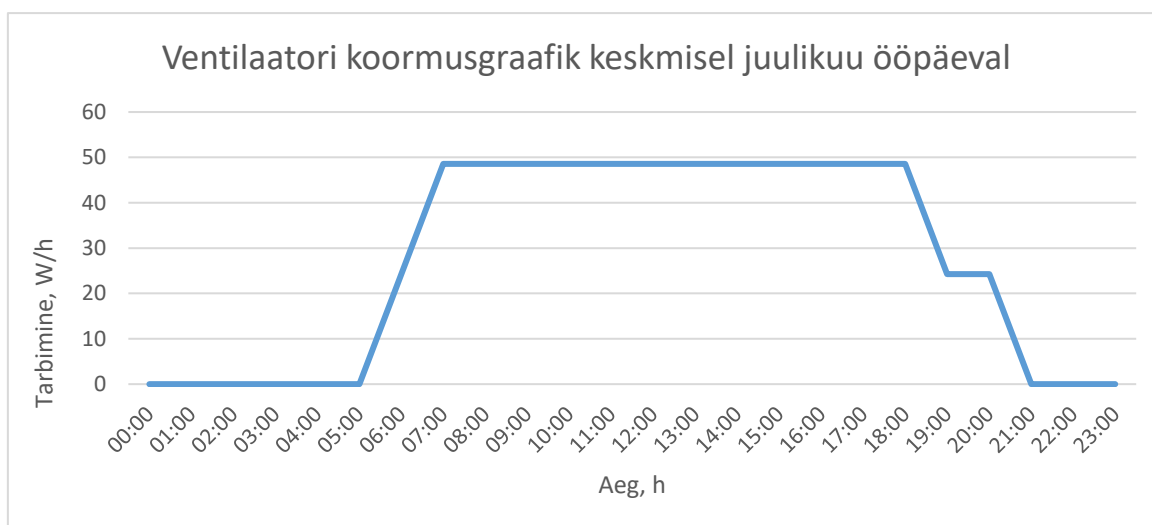
Joonis 4.8 Elektriradiaatorite koormusgraafik 2016. aasta külmimal ööpäeval

Õhksoojuspumba elektritarbimise leidmisel kasutati 2016 aasta iga kuu kõikide päevade tunni põhiste õhutemperatuuride keskmist väärtust. Enim tarbib õhksoojuspump elektrit jaanuaris (Joonis 4.9). Kuu keskmiste temperatuuride järgi peaks õhksoojuspump töötama läbi aasta igal ööpäeval. Jaanuaris, veebruaris, märtsis, aprillis, oktoobris, novembris ja detsembris töötab õhksoojuspump igas tunnis vähemalt korra.

Jäätumiskaitsekaablil termostaat on reguleeritud töötama õhutemperatuuride vahemikus $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ kuni $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jaanuaris, veebruaris, novembris ja detsembris töötab jäätumiskaitsekaabel konstantselt. Märtsis ja aprillis pisut vähem ning ülejäänud kuudel jäätumiskaitsekaabel ei tööta.



Joonis 4.9 Õhksoojuspumba koormusgraafik keskmisel jaanuarikuu ööpäeval



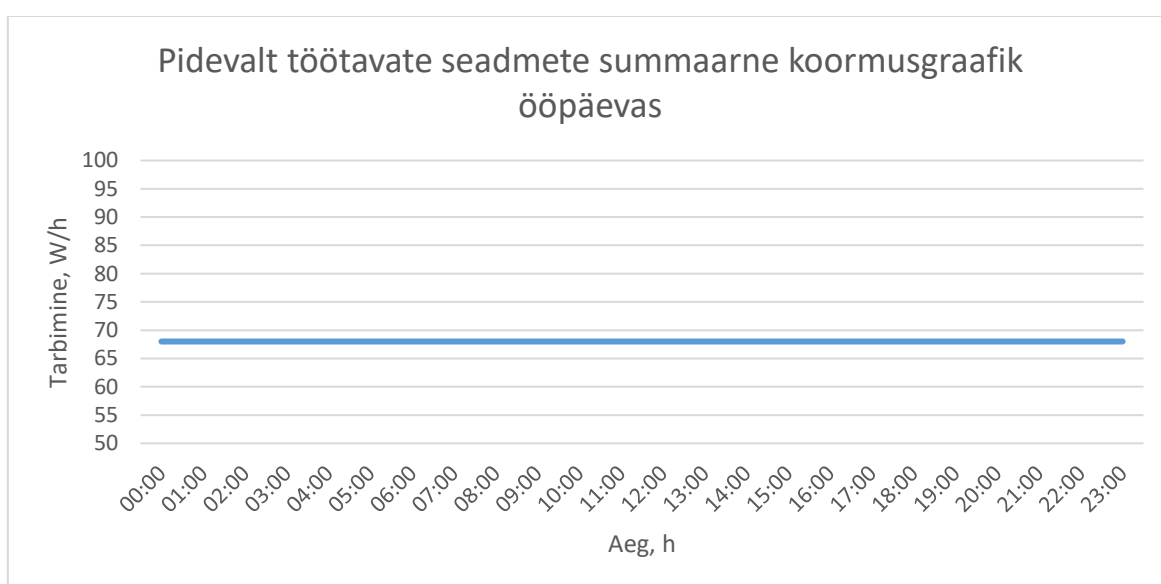
Joonis 4.10 Ventilaatori koormusgraafik keskmisel juulikuu ööpäeval

Ventilaatori koormusgraafik koostati vastavalt välisõhu temperatuurile (Joonis 4.10). Ventilaatori ülesanne on jahutada alajaamas olevat õhku ja tagada värsket õhku juurdevool. Koormusgraafiku koostamisel arvestati seadme tootlikkusega ühes tunnis, mis on 974 m³. Lõputöös eeldatakse, et kui ümbritseva keskkonna õhutemperatuur on vahemikus +16 °C kuni +18 °C töötab ventilaator ühe korra tunnis. Kui õhutemperatuur on tõusnud üle +18 °C töötab seade kaks korda tunnis.

Alajaama valgustite koormusgraafiku määramisel eeldati, et valgustid töötavad ühel päeval kuus kaheksa tundi järjest.

Lihtsustuse huvides jagati valgustite koguvõimsus 287 W ühes kuus olevate tundide arvuga. Seega tarbivad valgustid terve kuu jooksul konstantselt 3,1 W/h.

Kalkulatsioonide lihtsustamise huvides lisati valgustid konstantselt tarbivate väikeseadmete hulka. Nendeks seadmeteks on näiteks juhtimisseadmed, inverterid ning väiksema võimsusega seadmed nagu jäätumiskaitsekaabli termostaat, voolumõõtesüsteem, arvesti, lülitite mähised, avariiväljapääsu valgusti, ukseasendi andur, kandelamp, liikumisanduriga välisvalgusti, läbipääsu- ja tulekahju avastamissüsteem ja veel muud seadmed. Eeldati, et kõik need seadmed tarbivad kokku 250 W/h (Joonis 4.11).



Joonis 4.11 Konstantselt töötavate elektriseadmete summaarne koormusgraafik ööpäevas

4.4 Projekteeritud mikrovõrgu omahind

Enne tasuvusarvutusi selgitati välja projekteeritud süsteemi omahind. Projekti kõige kulukamaks seadmeks kujunes akupakk, mille hind on üle 3 600 EURi. Lisaks moodustavad märkimisväärse osa alginvesteeringust veel päikesepaneelid, kaks inverterit ja juhtimissüsteemi seadmed.

Juhtimissüsteemi seadmete alla kuuluvad loogikakontroller Simatic S7-1500, toiteplokk, UPS, digitaalne sisend- ja väljundimoodul, kommutaator, lüüs, ruuter, antenn ja voolu mõõtmisüsteem.

Nii päikese- kui ka akuinverter on toodu välja ühe kulureana. Väikseima ära märgitud investeeringuna on esitatud kontaktorid.

Päikesepaneelid kinnituvad alajaama katusel olevale alumiiniumist raamile. Alajaama mikrovõrgu omahinda on arvestatud juurde päikesepaneelide kinnitusraam, mis ei ole ostutoode, vaid on projekteeritud ning koostatud ettevõtte töötajate poolt. Kinnitusraami hinna sisse on arvestatud alumiiniumprofiili maksumus, mehaanikainseneri poolt tehtavad projekteerimistööd ning koostamisel rakenduvad tööjõukulud. Sellele lisaks on arvestatud ka tööjõukulusid, mis tulenevad nii projekteerimisest kui ka elektrimontaažist.

Lisaks tuleb täiendavalt arvestada iga-aastaste hoolduskuludega. Nendeks kuludeks on iga-aastane süsteemi funktsionaalsuse kontroll ning päikesepaneelide puhastamine tolmust ning vajadusel ka lumest. On leitud, et päikeseelektrijaamade iga-aastasteks hoolduskuludeks võib arvestada 0,5% kogu alginvesteeringu suuruselt. Samuti võib hoolduskulutusi arvestada kilovati põhiselt. Sellisel juhul oleks 1 kW hooldamise iga-aastane maksumus 10 eurot. [69] Projekteeritud lahenduse aastane hoolduskulu on 92,3 EURi, mis on 0,5% alginvesteeringust. Eluea jooksul kokku kuluvate hoolduskulude leidmiseks korrutati iga-aastane hoolduskulu 25-ga. Omahinna kalkuleerimisel ei võetud arvesse rikkevoolukaitseülilite ning kaablite soetusmaksumusi. Samuti ei arvestatud liitumislepingu ning elektriarvesti paigaldamisega, eeldusel, et see on alajaamas kasutusel ka mikrovõrguta. Lõputöö raames projekteeritud mikrovõrgu investeeringu suuruselt kujunes 20 782 EURi (Tabel 4.4).

Tabel 4.4 Mikrovõrgu omahinna leidmine

Seade/tegevus	Hind, EUR
Päikesepaneelid	3 200
Päikesepaneelide kinnitusraam	2 000
Inverterid	3 476
Akupakk	3 629
Siemensi juhtimisseadmed	3 364
Kontaktorid	284
Tööjõukulud	2 520
Hoolduskulud	2 309
Kokku:	20 782

4.5 Elektri ostu- ja müügihind

Eesti on ühinenud Põhjamaade elektribörsiga Nord Pool Spot. Nord Pool Spoti näol on tegemist Euroopa juhtiva elektribörsi turuga. Börsil ennustatakse eeloleva ööpäeva tunnipõhiseid elektrihindu, mille põhjal käib turul elektrienergiaga kauplemine. Börsi hind mõjutab ennekõike neid kliente, kes on liitunud börsi pakettidega.

Kõikuv hind mõjutab nii elektri ostmist kui ka müümist. Kuid tarbija jaoks on see elektrihinna kujunemisel ainult teatud osa.

Täiendavalt eelmainitule lisandub elektri hinnale veel müüja marginaal, võrgutasu, aktsiis, taastuenergia tasu ning käibemaks (Tabel 4.5).

Müüja marginaal, ehk elektrimüüja saadav tulu, väljendatakse nii protsentides kui ka eurodes kilovatt-tunni kohta. Marginaali määrab ära müüja ning see on lähtuv elektripaketist ja tarbija iseloomust. 2018. aasta Konkurentsiameti aruande Elektri jaeturu analüüsi järgi oli erinevate elektrimüüjate börsipakettide keskmine marginaal 0,23 euro senti kW/h kohta [70].

Sarnaselt marginaalile on ka võrguteenustasu lepingupõhine. Elektrilevi OÜ väitel on nende võrguteenuste keskmiseks hinnaks 3,04 euro senti kW/h. Võrguteenus sisaldab endas nii Eleringi võrguteenuseid, investeringuid, tegevuskulusid, tootlust ja ka kadusid. [71]

Kehtivate seaduste kohaselt on Eestis elektriaktsiis. See lisab igale tarbitud kilovatt-tunnile 0,00447 euro senti [72]. Lisaks eelmainitule sisaldab elektri hind ka taastuenergiatasu. Eestis kehtiva elektrituru seaduse alusel kalkuleerib taastuenergia tasu Elering. Ettevõtte avaldab oma veebilehel igal aastal 1. detsembril järgmise kalendriaasta toetuste rahastamiseks kuluva summa. Selle järgi leitakse taastuenergia tasu, millega maksustatakse tarbitud elektrit. 2021. aasta taastuenergia tasu on 1,13 euro senti kW/h. [73] Kõigele lisaks sisaldab lõpphind ka käibemaksu. Käesoleval ajal on käibemaks Eestis 20% toote või teenuse koguhinnast.

Elektrienergia võrku müümisel tuleb arvestada võrguteenuse pakkuja marginaaliga, mis lahutatakse hetkel kehtivast börsihinnast. Tavaliselt jääb kokkulepitud marginaal vahemikku 0,18-0,25 euro senti kW/h kohta [74]. Kalkulatsioonides arvestati, et määratud marginaal on 0,2 euro senti kW/h.

Tabel 4.5 Elektri hinna kujunemine

Hinnategur	Euro senti kW/h
Müüja marginaal	0,23
Võrgutasu	3,04
Elektriaktsiis	0,00447
Taastuenergiatasu	1,13
Käibemaks	20%
Võrguteenuse pakkuja marginaal elektrit võrku müües	0,2

Varasematel aastatel on päikeseelektrijaamadega toodetud ja müüdud elektrienergia müügihinnale lisandunud taastuenergia toetus.

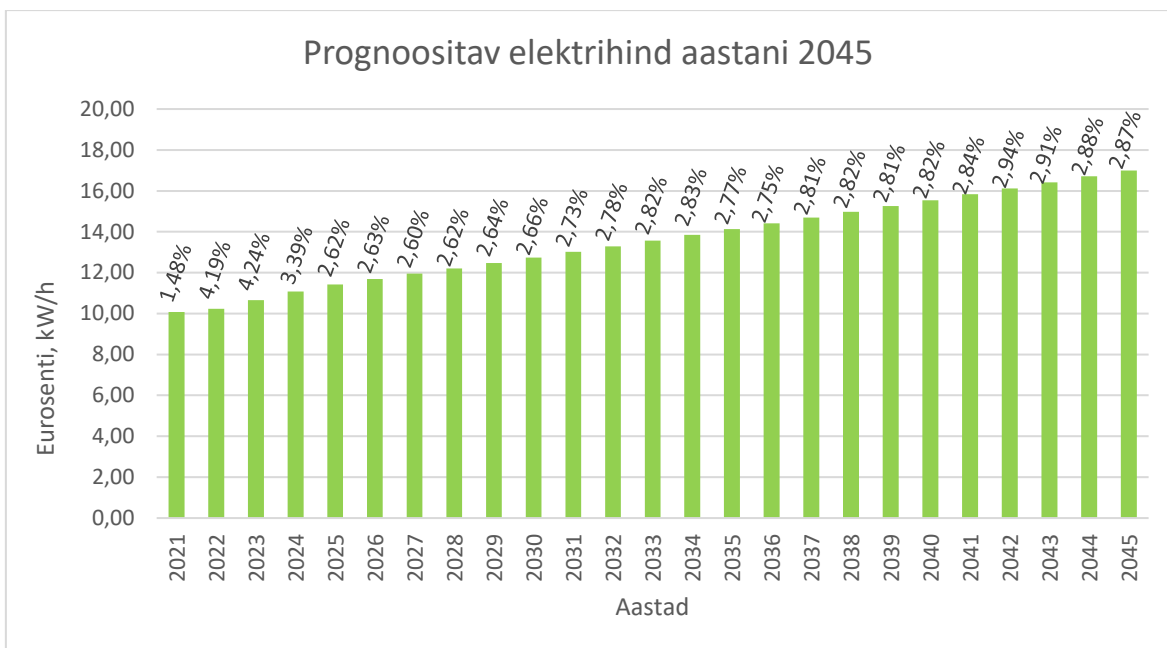
2020 aastal oli taastuenergia toetuseks 0,0537 eurot ühe müüdnud kilovatt-tunni elektrienergia eest. Paraku on seaduses toimunud muudatusi ning käesoleval hetkel taastuenergia toetusega enam arvestada ei saa. Praegu kehtiva Elektriturseaduse § 59 lõige kaks ütleb, et „alla 50 kW elektrilise võimsusega tootmiseseadmega toodetud elektrienergia eest võib tootja saada taastuenergia toetust juhul, kui elektrienergiat toodetakse hiljemalt 2020. aasta 31. detsembril ning asjakohase tootmiseseadme rajamiseks ei ole tootja saanud riigilt investeeringutoetust“. [75] Seetõttu ei saa antud töös arvestada taastuenergia toetusega.

Tasuvusarvutustes leiti iga-aastane protsentuaalne elektrienergia tõusu võrreldes eelneva aastaga. Elektrienergia prognoosimiseks kasutati Euroopa Liidu statistikaameti Eurostati poolt avaldatud Eesti elektrienergia alates aastast 2007 [76]. Samuti kasutati Rahandusministeeriumi poolt loodud pikaajalist SKP prognoosi. Rahandusministeeriumi poolt loodud majandusprognoosist „Pikaajaline majandusprognoos kuni aastani 2070“ on võimalik leida eeldatavad SKP kuni aastani 2070 [77].

Järgnevate aastate elektrienergia hindade leidmiseks kõrvutati Eurostati poolt avaldatud senised elektrienergia hinnad ning Rahandusministeeriumi poolt ennustatavad SKP-d. Seeläbi leiti nende vaheline korrelatsioon. Ennustuste tegemiseks kasutati Excelis *Slope* ja *Intercept* funktsioone.

Eelnevate aastate elektrienergia hindade põhjal leiti keskmine aastane elektrienergia kasvuprotsent. Seda kasvuprotsenti kasutati lõputöös iga-aastase elektrienergia määramisel. Rahandusministeeriumi poolt ennustatud SKP on igal aastal kasvutrendis. Seetõttu on ka prognoositud elektrienergia hind igal aastal teatud protsent eelmisest kõrgem (Joonis 4.12).

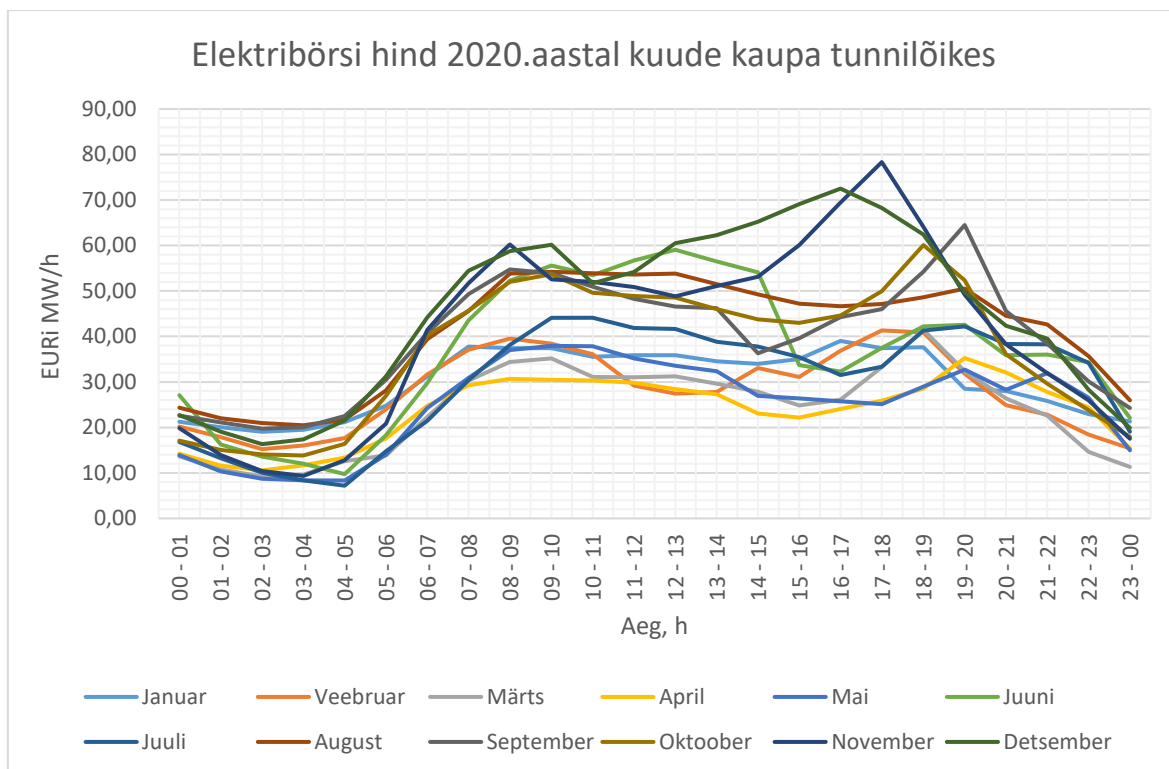
Protsentuaalse elektrienergia tõusus arvestati summaarset hinda, milles on lisaks elektrienergia jae hinnale veel müüja marginaal, elektriaktsiis, võrgutasu, taastuenergiatasu ja käibemaks. Tänu sellele kasutati tasuvusarvutustes iga aasta, kõikide kalendrikuude ning iga tunni lõikes erinevat elektrienergia hinda.



Joonis 4.12 Proгноositav elektrihind aastani 2045

Elektrihinnad leiti tunnipõhiselt iga kalendrikuu kohta eraldi. Selleks leiti ühes kuus olevate päevade tunnipõhiste elektrihindade aritmeetiline keskmine. Seeläbi saadi tunnipõhiste hindadega ööpäev, mis iseloomustab tervet kalendrikuud.

Esimese tööaasta elektrihinna arvutused tehti 2020. aasta börsihindade baasil (Joonis 4.13). Järgnevate aastate kuude lõikes olevate tunnipõhiste elektrihindade leidmiseks kasutati varasemalt proгноositud protsentuaalset elektrihinna tõusu.

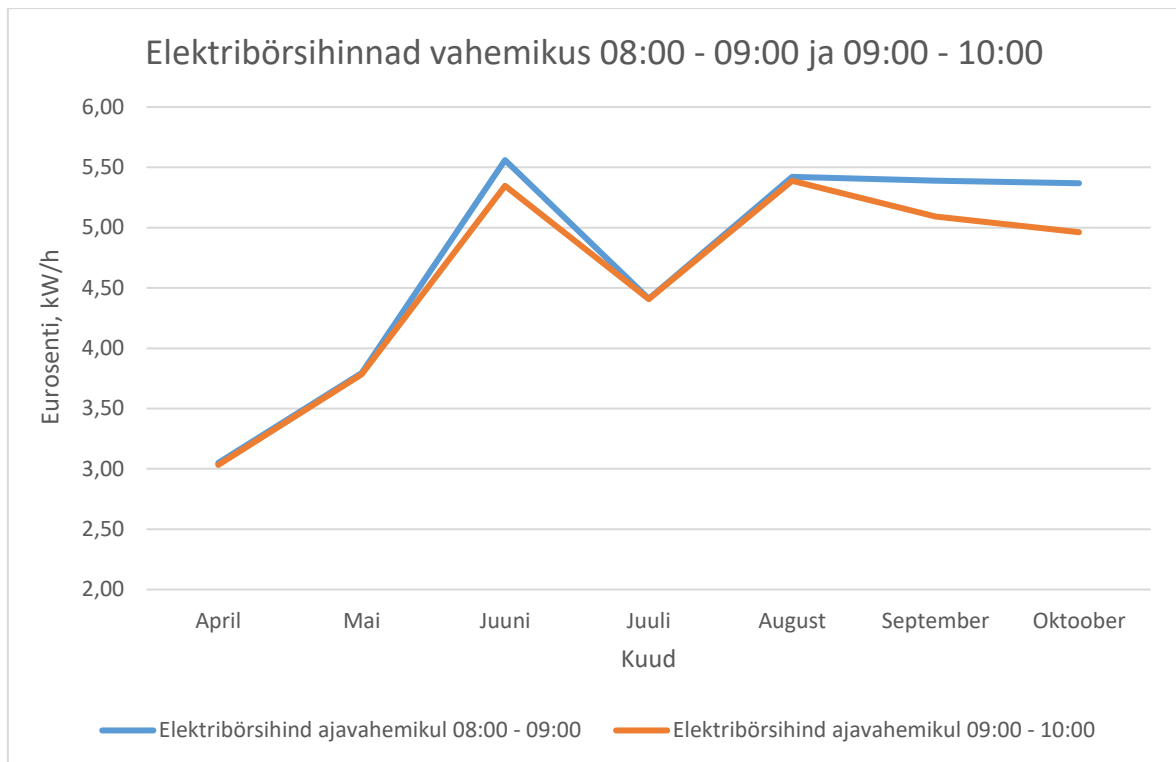


Joonis 4.13 Elektribörsi hind 2020. aastal

4.6 Elektrienergia müümine akupakist

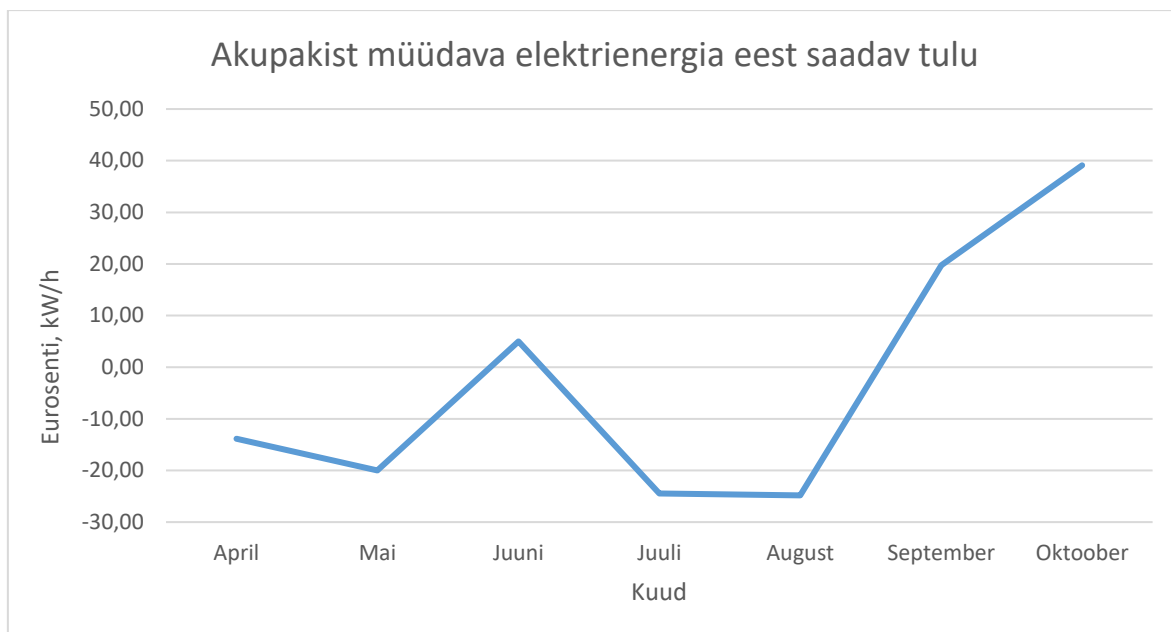
Projekteeritud süsteemis kasutatava akupaki mahtuvus on 6,4 kWh. Akuinverteri võimsus on 5,5 kW ning efektiivsus vahemikus 96,6-96,8%. Kalkulatsioonides arvestati 3,3% kaoga. Seega saab ühe tunni jooksul müüa maksimaalselt 5,32 kilovatt-tundi elektrienergiat. Kõige kasumlikum on seda teha siis, kui börsihind on maksimaalselt kõrge. Kõige kallim elektrienergia on börsil hommikul kella kaheksa ja üheksa vahel (Joonis 4.14). Antud vahemik määratigi ajaks, mil toimub energia müük akupakist elektrivõrku.

Mikrovõrgu süsteemi projekteerimisel on arvestatud, et sellele järgneval ajavahemikul ehk üheksast kümneni laevad PV-paneelid akupakki. Tipukoormuse ning sellele järgneva tunnipõhiste börsihindade võrdlusest selgub, et lahendust on mõistlik rakendada juunis, augustis, septembris ja oktoobris. Aprillis, mais ja juulis on tipukoormusele järgneva tunni börsihinnad enamvähem võrdväärsed. Seetõttu oleks mõistlikum PV-paneelide poolt toodetud elektrienergiat hoopis otse võrku müüa, kui sellega akupakki laadida. Akuinverteri kadude tõttu ei oleks võimalik sama suurt elektrienergia hulka hiljem maha võimalik müüa.



Joonis 4.14 Elektribörsi hinnad ajavahemikul 08:00 – 09:00 ja 09:00 – 10:00

Kalkulatsioonides kasutati 2020. aasta tunnipõhiseid elektri börsihindasid. Kalendrikuus saadava tulu leidmiseks kalkuleeriti esmalt ühe müügitsükli eest saadav tulu. See korrutati omakorda vastava kuu kalendripäevade arvuga. Selgus, et kuna aprillis, mais, juulis ja augustis on ajavahemikul 08:00 – 09:00 ning 09:00 – 10:00 elektri hind peaaegu sama nagu tipukoormuse ajal, ei ole nendel kuudel akupakist elektrimüük kasumlik. Arvutused näitasid, et süsteemiga on terve juuniku jooksul võimalik kokku teenida tulu 5 eurosent (Joonis 4.15). Pisut suuremat tulu on võimalik teenida septembris ja oktoobris. Kuna oktoobris on PV-paneelide tootlikkus suhteliselt madal, võtab akupaki täislaadumine aega terve päeva ning seetõttu ei ole antud lahenduse kasutamine sellel kuul otstarbekas. Akupakist elektrivõrku müüdava süsteemiga ühe aasta jooksul teenitud tulu on sedavõrd väike, et see ei ole majanduslikult otstarbekas. Selle põhjustavad suhteliselt ühtlane elektri hind tipukoormusel ning sellele järgnevatel tundidel. Samuti ka akuinverteri kaod. Väga madala saadava tulu tõttu jäeti antud lahendus kokkuvõtvast majandusliku kasumlikkuse analüüsist välja.



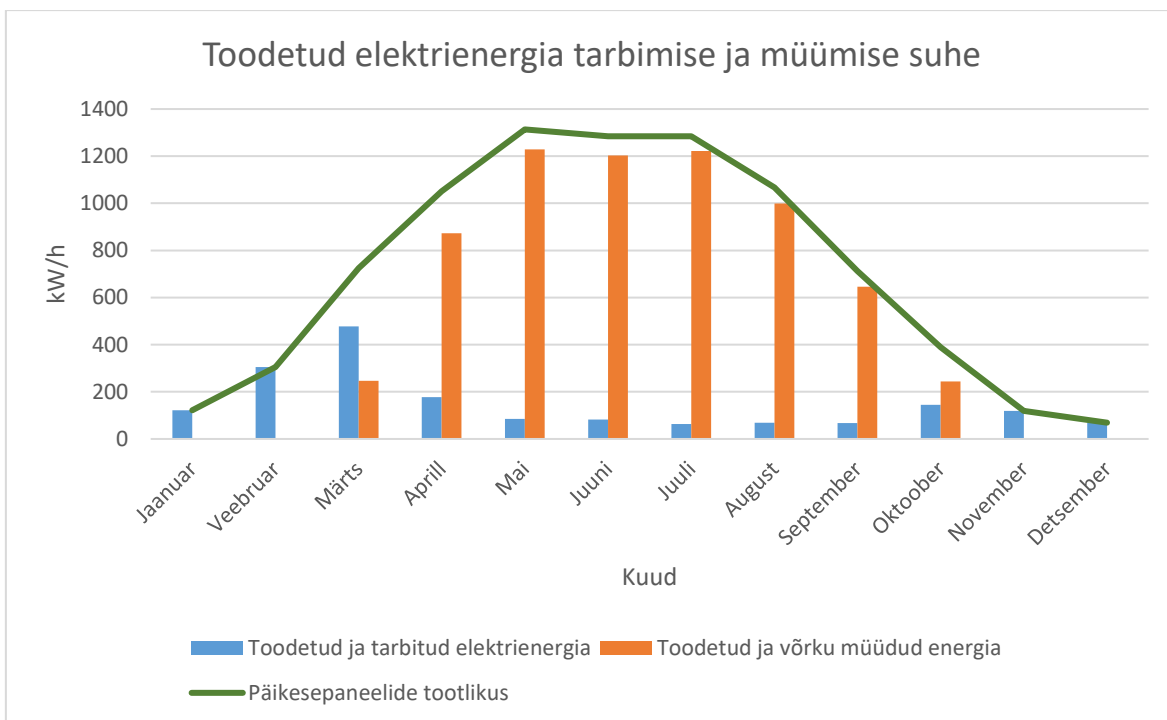
Joonis 4.15 Akupakist müüdava elektrienergia eest saadav tulu

4.7 Projekteeritud mikrovõrgu tasuvusarvutus

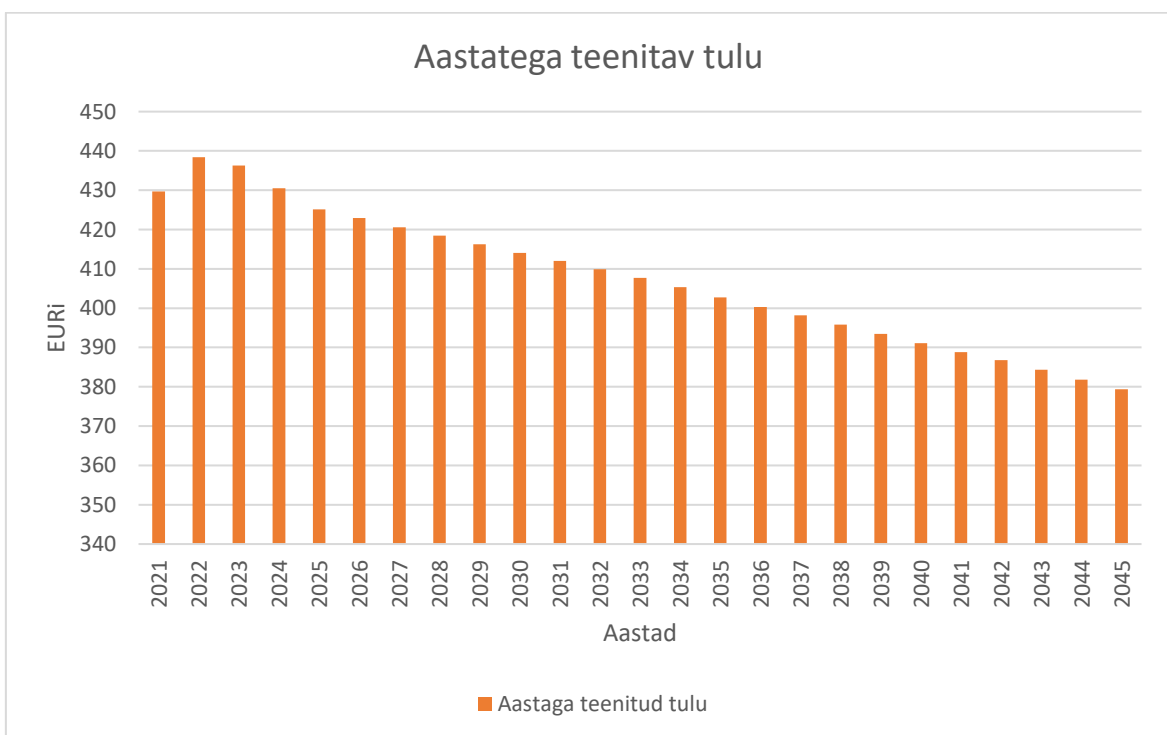
Tasuvusanalüüsi teostamiseks leiti kõikide elektriseadme tarbimine igas kuus ühe tunni pikkuse ajaühiku raames. Saadud tarbimine kõrvutati päikesepaneelide tootlikkusega. Seeläbi leiti tootetud elektrienergia hulkade kogused, mida saab alajaam koheselt omatarbeseadmetega ära kasutada või müüa elektrivõrku. Jaanuaris, veebruaris, novembris ja detsembris on PV-paneelide tootlikkus sedavõrd madal, et kogu nende poolt tootetud elektrienergia tarbitakse ära koheselt (Joonis 4.16).

Märtsist kuni oktoobri lõpuni on aga päikesepaneelide tootlikkus suurem kui omatarve ning ülejäävat elektrit on võimalik müüa elektrivõrku.

Kõikides kalendrikuudes paneelide poolt tootetud ning ära kasutatud elektrienergia hulk korrutati vastavate tunnipõhiste elektriostuhindadega, kuna ilma päikeseelektrijaamata oleks see elekter ostetud. Elektrivõrku müüdavast elektrist saadava tulu leidmiseks lahutati esmalt börsihinnast võrguteenuse pakkuja marginaal. Järelejäänud summa korrutati vastaval tunnil müüdud elektrihulgaga. Seeläbi saadi esimesel tööaastal tagasi teenitud summa. Seejärel leiti järgnevate aastate päikesepaneelide tootlikkus, mis iga aastaselt väheneb (Joonis 4.5). Igal aastal teenitavate summade leidmiseks korrutati tootmiskogused vastavalt elektri ostu- või müügihindadega, mis on võrreldes eelneva aastaga teinud läbi teatud protsendiga tõusu (Joonis 4.13). Lõpetuseks liideti kõikidel aastatel teenitud summad kokku (Joonis 4.17).



Joonis 4.16 Toodetud elektrienergia tarbimise ja võrku müümise suhe



Joonis 4.17 Päikesepaneelidega teenitav tulu läbi aastate

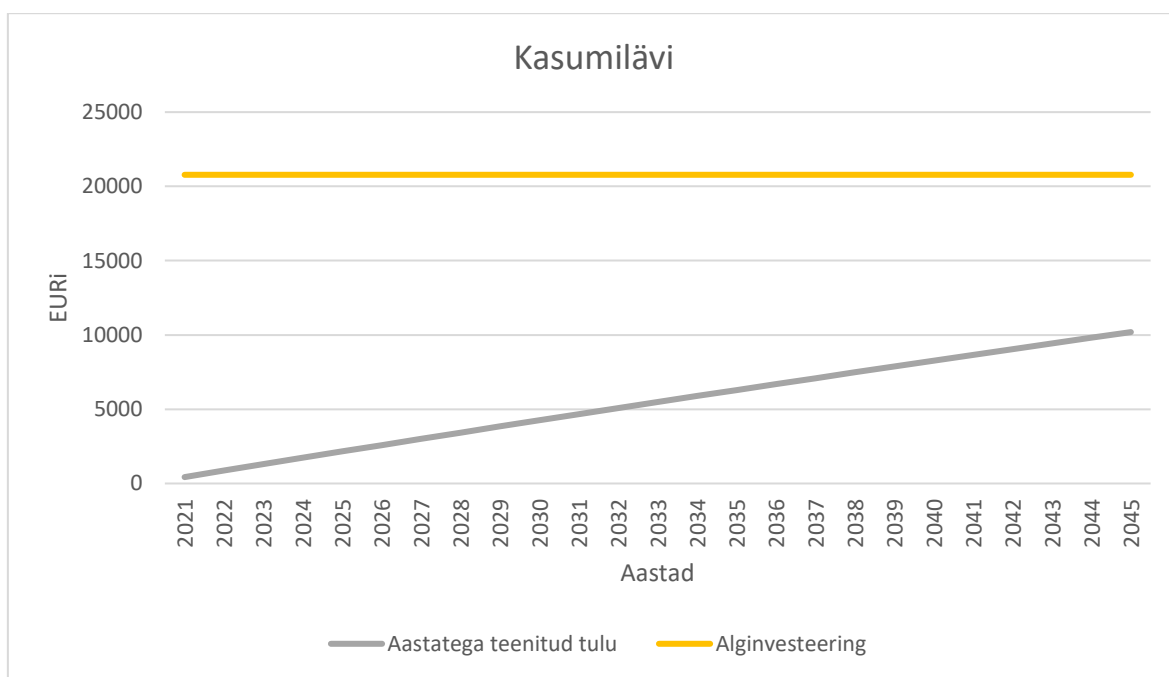
Kalkulatsioonidest selgus, et 25 aastaga teenib projekteeritud päikeseelektrijaam tagasi 10 190 EURi (Tabel 4.6). Lahutades sellest alginvesteeringu, mis on 20 782 EURi, saab

tulemuseks kahjumi. Seetõttu võib öelda, et projekteeritud mikrovõrk ei ole ennast majanduslikult ära tasuv.

Tabel 4.6 Alginvesteeringu ja teenitud tulu vahe

Tegur	Summa, EURi
Alginvesteering	20 782
25 aastaga teenitud tulu	10 190
Kahjum:	-10 592

Vaatamata sellele, et elektri hind igal aastal aina kasvab on tulu ajas kahanev. Selle asjaolu tingib päikesepaneelide amortisatsioon, mis on elektri hinnast suurema osakaaluga. Kasumilävi ehk tasuvuspunkt, milles tulud ja kulud on võrdsed, mistõttu ka kasum oleks võrdne nulliga, jäi antud lõputöö analüüsis saavutamata (Joonis 4.18).



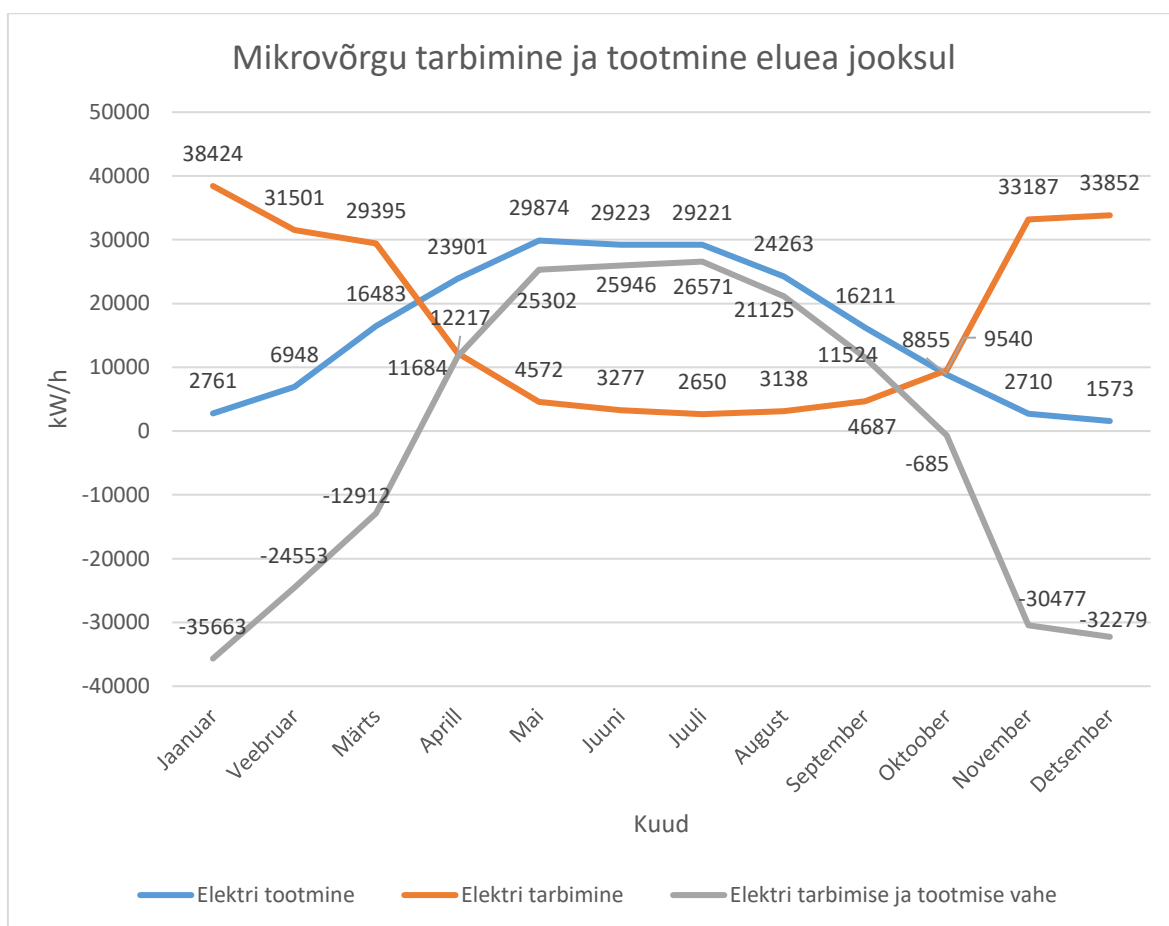
Joonis 4.18 Saavutamata jäänud kasumilävi

4.8 Mikrovõrgu tootmine ja tarbimine eluea jooksul

Lisaks tasuvuslikule analüüsile uuriti, milline on projekteeritud lahenduses elektritootmise ja tarbimise vahe eluea jooksul. Elektrienergia tarbimis- ja tootmishulcade näitlikustamiseks moodustati graafik. Graafikul on toodud välja kuude lõikes elektri tarbimine, tootmine ning nende vahe 25 aasta jooksul.

Alates oktoobrist kuni märtsi lõpuni on kogutootmise ja tarbimise vahe negatiivne (Joonis 4.19). Nende kuude jooksul jääb tootmine tarbimisele oluliselt alla, mistõttu on vaja osta lisa üldelektrivõrgust. Alates aprilli algusest kuni septembri lõpuni ületab elektritootmine tarbimist, tänu millele on võimalik ülejääk maha müüa. Liites kokku kõik väärtused kogutootmise ja tarbimise graafikul on võimalik välja selgitada, kas päikeseelektrijaam toodab piisavalt elektrit, et katta ära elektrialajaama omatarbe vajadus.

Kalkulatsiooni tulemusena selgus, et veerand sajandi jooksul toodab elektrialajaam 14,4 MW/h elektrienergiat vähem kui tarbib. Ehk elektrialajaama paigaldatud PV-paneelid ei suuda tagada vajalikku elektrienergia hulka, et katta ära omatarbeseadmete poolt kulutatud elektrit.



Joonis 4.19 Mikrovõrgu elektrienergia omatarbimine ja tootmine eluea jooksul

4.9 Hinnang majanduslikule kasumlikkusele

Tasuvusanalüüsi kalkulatsioonidega selgus, et projekteeritud päikeseelektrijaam koos mikrovõrguga ei tasu end ära 25 aasta jooksul.

Süsteemi kulutused koos alginvesteeringuga ja hooldustega on 20 782 EURi. Elektrienergia tootmisest ning müügist saadud tulu veerand sajandi jooksul on aga 10 190 EURi. Kasumilävest ehk tasuvuspunkti jäi puudu 10 592 EURi.

Järgnevalt on analüüsitud päikesepaneelidel põhinevat lahendust, mille puhul saavutaks projekteeritud mikrovõrk eluea lõpuks kasumlikkuse. Lisaks pakutakse välja veel teisigi võimalike alternatiive kasumi saavutamiseks. Lõpetuseks analüüsitakse põhjuseid, miks lõputöös projekteeritud mikrovõrk oma tootlusega kasumini ei jõudnud.

4.9.1 Projekteeritud mikrovõrk suurendatud päikesepaneelide arvuga

Üheks võimaluseks kasumi saavutamiseks on lisada projekteeritud süsteemile juurde päikesepaneelid.

Kuna alajaama katus on paneelide täis tuleks juurde lisatavad paneelid paigaldada maapinnale. Lisaks tuleb leida võimsam võrguinverter, et neid paneelid hallata.

Kalkulatsioonid näitasid, et mikrovõrk muutub majanduslikult kasumlikuks siis, kui selles on kokku 72 päikesepaneeli. Olemasolevatele päikesepaneelidele tuleks lisada juurde 52 paneeli. Päikesepaneelidena kasutati mudelit Trina TallmaxM TSM-450 DE17M II, mis oli kasutusel ka esmasel tasuvusarvutusel. Alternatiivses lahenduses kasutati võrguinverterina 36 kW nimivõimsusega GoodWe GW36K MT Solar Inverter seadet. Kuna paneelid on varasemast oluliselt rohkem ning kasutusel on teine võrguinverter teostati uued kalkulatsioonid ka PVGIS keskkonnas (Lisa 3). Portaali kalkulaatorisse sisestati vajalikud andmed (Tabel 4.7)

Tabel 4.7 PVGIS kalkulaatorisse sisestatud andmed alternatiivse lahenduse analüüsis

Tegur	Väärtus
Päikesekiirguse andmebaas	PVGIS-SARAH
Paneeli tüüp	Kristalliline räni
Paigaldatud süsteemi tipu võimsus, kWp	32,4
Süsteemi kaod, %	1,5
Paigaldusasend	Maapind
Kaldenurk, °	40
Asimuut, °	0

Süsteemi kadudeks määrati valitud inverteri väärtus, mis on 1,5%. Maapinnal olevad paneelid tuleks paigaldada 40-kraadise nurga all, mis on Eesti tingimustes kõige sobivam [78].

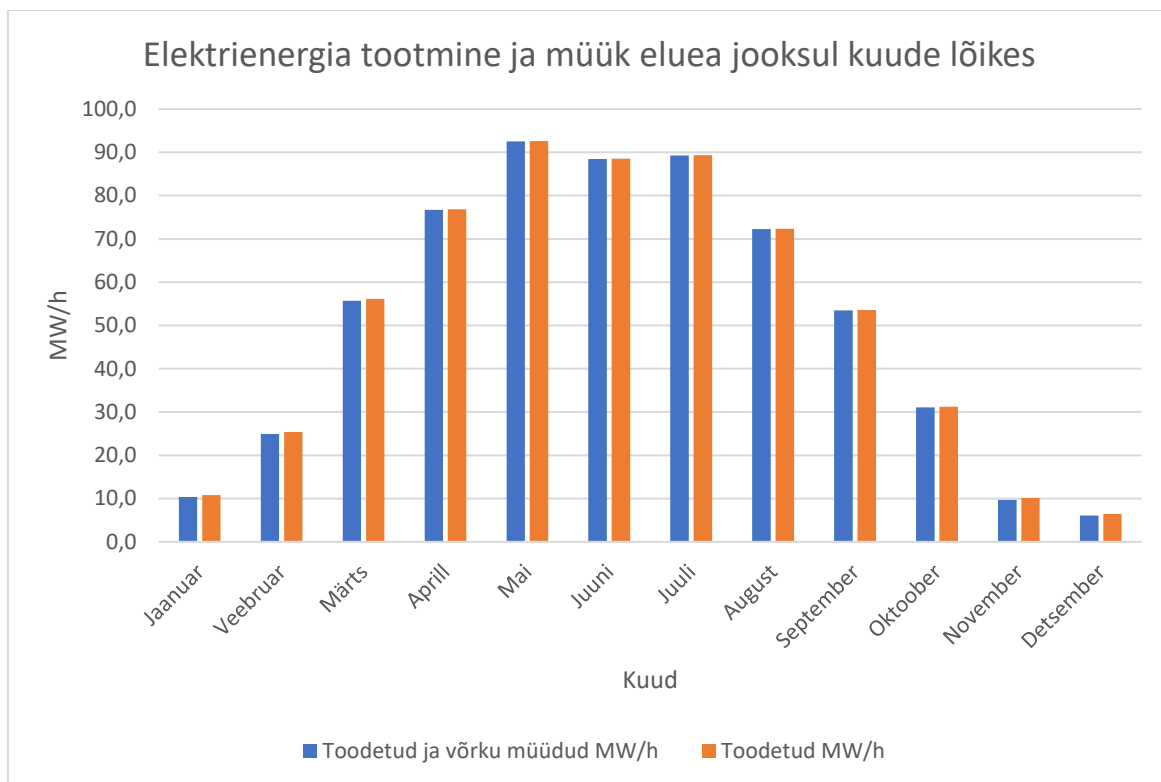
Portaali kalkulaatori abil leiti igal kuul toodetud elektrienergia hulk. Seejärel jagati igal kuul toodetud elektrienergia ära konkreetse kuu päevade arvuga, misläbi saadi päevane tootmiskogus. Ööpäevaste omatarbeseadmete koormusgraafikute ja päikesepaneelide tootmisgraafikute võrdlemisel leiti elektrienergia kogused, mida toodetakse ja tarbitakse ära koheselt või müüakse võrku. Kogused leiti iga kuu kohta eraldi terve aasta peale. Seejärel leiti samad väärtused järgneva 24 aasta jooksul, milles võeti arvesse päikesepaneelide armotiseerumist. Saadud väärtused korrutati läbi tunnipõhisete elektrihindadega 25 aasta jooksul, arvestades elektri hinnatõusu ajas.

Lõpetuseks liideti kokku elektrienergia müügist saadud tulu ja tänu oma tootetud elektrienergia tarbimisega säästetud summad. Selgus, et 25 aasta jooksul on võimalik teenida tagasi 29 482 EURi, mis on 94 EURi võrra enam alginvesteeringust (Tabel 4.8). Alginvesteeringus arvestati uue võrguinverteri ning 52 lisandunud päikesepaneeliga.

Tabel 4.8 Alginvesteeringu ja tulude vahe alternatiivses lahenduses

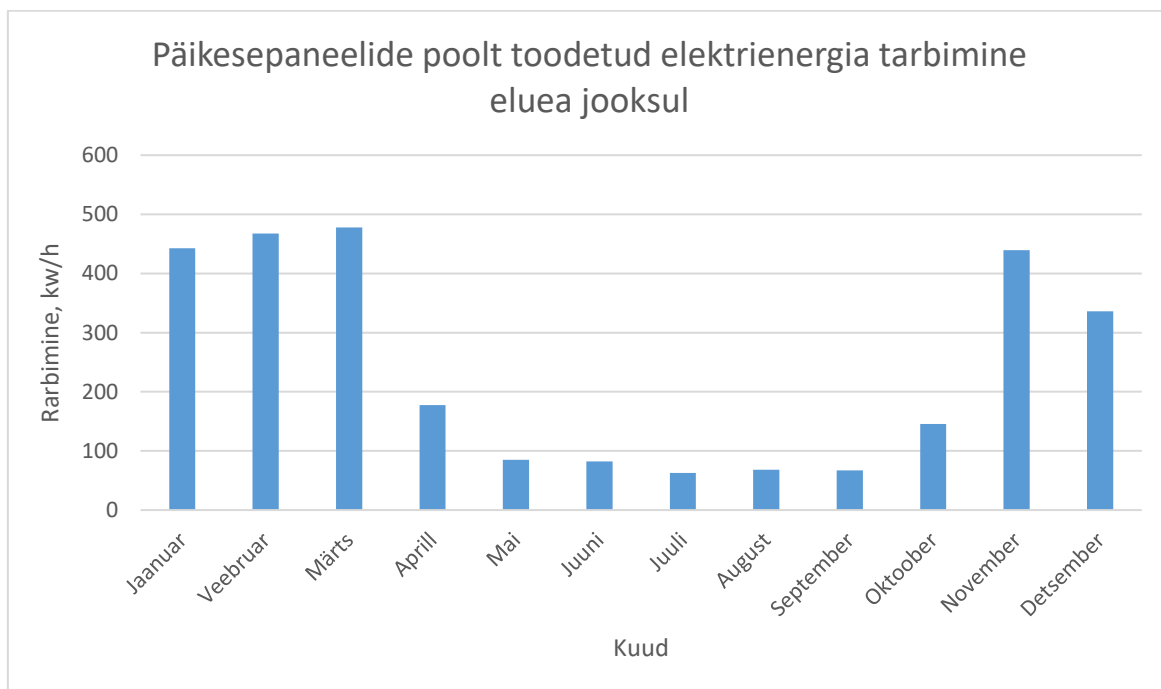
Tegur	Summa, EURi
Alginvesteering	29 388
25. aastaga teenitud tulu	29 482
Kasum:	94

Võrreldes esmase kalkulatsiooniga tuli kasumiläve saavutamiseks lisada juurde tervelt 52 päikesepaneeli. See on põhjendatav alajaama omatarbeseadmete tarbimisgraafikutega, mis ei kattu päikesepaneelide tootlikkusega ööpäevas. Võimsamad omatarbe elektriseadmed alajaamas on kütteseadmed, mis töötavad peamiselt öötundidel või talveperioodil. Seetõttu tuleb enamik toodetud elektrienergiast suunata võrku, mille eest saadav tulu on võrguettevõtja marginaali võrra väiksem börsihinnast. Jooniselt 4.20 on näha, et 25. aasta jooksul toodetud ja võrku müüdüd elektrienergia vahe on väga väike (Joonis 4.20). Projekteeritud päikeseelektrijaama tagasiteenimist raskendab ka asjaolu, et käesoleval ajal on lõpetatud taastuenergia toetuse maksmine.



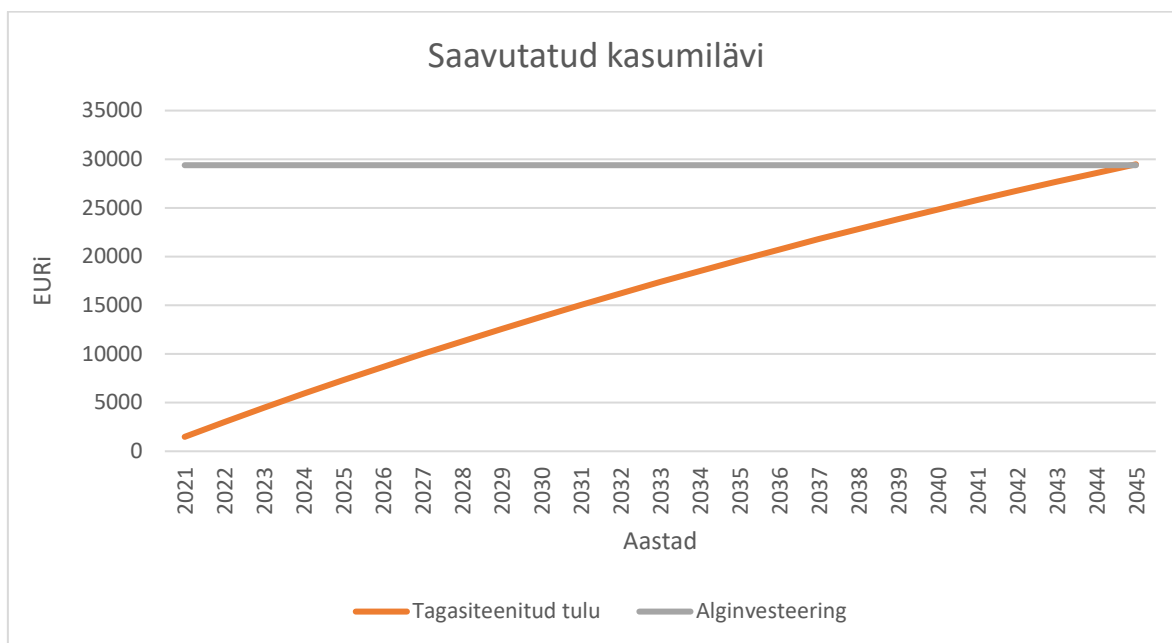
Joonis 4.20 Elektrienergia tootmine ja müük eluea jooksul

Jooniselt 4.21 on näha, et 25 aasta jooksul päikesepaneelide poolt toodetud ja koheselt ära tarbitud elektrienergia kogus on võrreldes toodetud ja võrku müüdnud hulgaga minimaalne (Joonis 4.21).



Joonis 4.21 Omatoodetud elektrienergia tarbimine eluea jooksul

Uute paneelide lisamisega on võimalik saavutada projekteeritud päikeelektrijaama kasumlikkus eluea lõpuks (Joonis 4.22). Valitud võrguinverterile on võimalik lisada juurde veel päikesepaneele. Alternatiivse lahenduse tasuvusarvutuses ei arvestatud päikesepaneelide raamidega ning seetõttu on realselt ära tasumiseks vajalik veel suurem päikesepaneelide hulk.



Joonis 4.22 Saavutatud kasumilävi alternatiivses lahenduses

Kokkuvõtvalt saab öelda, et rohkemate paneelidega on küll võimalik kasumiläveni jõuda, kuid see eeldab, et alajaama lähistel on piisavalt sobilikku maad, millele päikesepaneele paigaldada. Samuti on alginvesteering mõnevõrra suurem.

4.9.2 Kavandatava päikeseelektrijaama kasumlikkuse leidmise voodiagramm

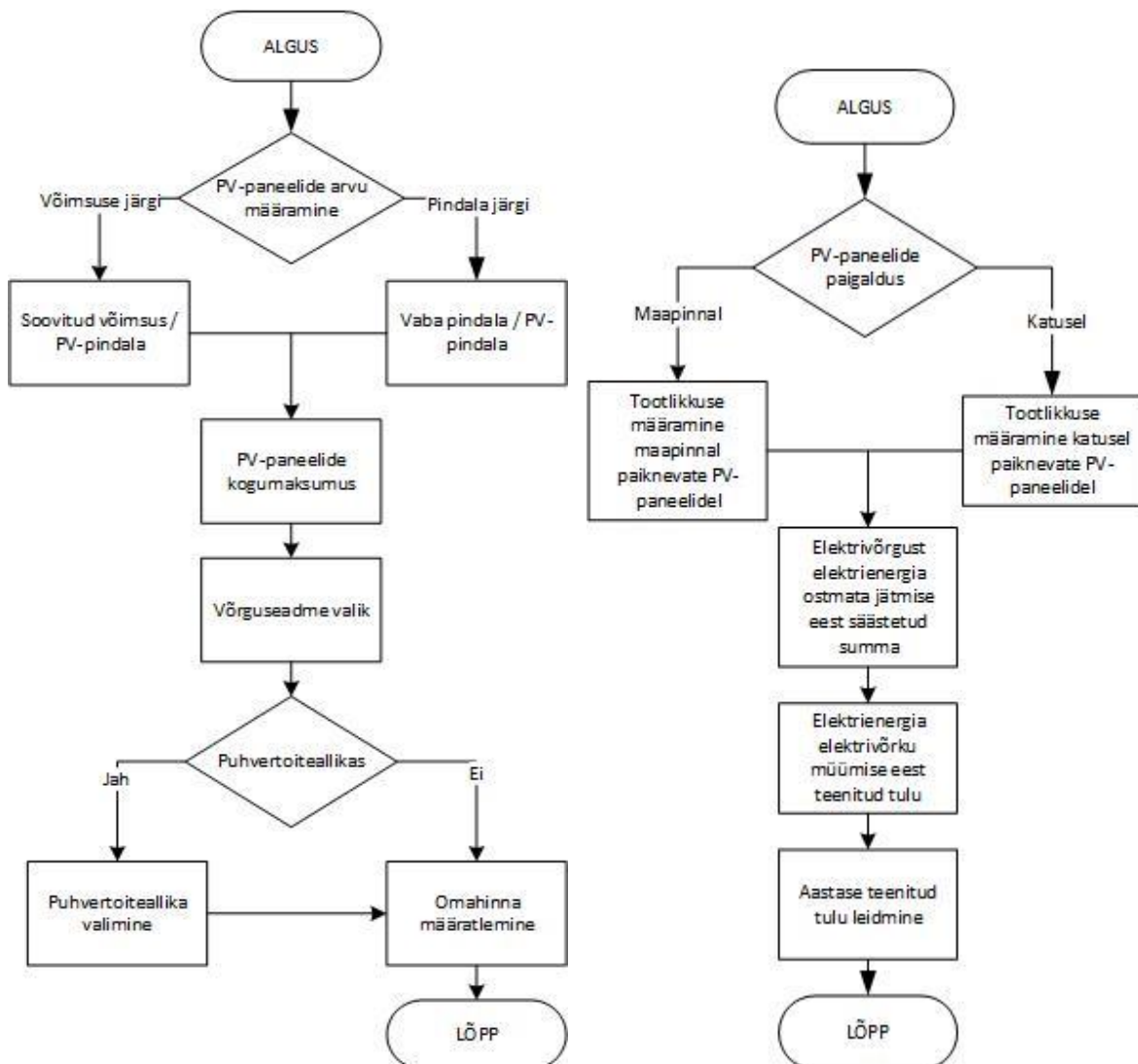
Jaotusalajaama HEJA kavandatava päikeseelektrijaama majandusliku kasumlikkuse leidmise hõlbustamiseks moodustati voodiagramm koos kahe alamvoodiagrammiga. Esmalt koostati alginvesteeringu määratlemise alamvoodiagramm (Joonis 4.23).

Alginvesteeringu määramise voodiagrammi etapid on järgmised:

- 1) Algus
- 2) Esmalt leitakse projektis kasutatavate PV-paneelide arv. Seda on võimalik teostada kahte moodi. Kasutatavate PV-paneelide arvu võib leida, kui jagada pindala, mille peale paneele kavatakse paigaldada, ühe päikesepaneeli pindalaga. Olgu selleks pindalaks kas alajaama katus või maapind. Selleks tuleb kasutada päikesepaneeli Trina pindala, mis on leitav tabelist 2.2 (Tabel 2.2). Samuti on võimalik leida vajaminevate PV-paneelide jagades kogu

päikeseelektrijaama võimsuse, ühe paneeli võimsusega, mis on samuti leitav tabelist 2.2 (Tabel 2.2).

- 3) Kui päikesepaneelide arv on leitud, saab arvutada nende kogumaksumuse. 20 päikesepaneeli Trina hinna saab tabelist 4.4 (Tabel 4.4).
- 4) Seejärel tuleb vastavalt võimsusele teostada võrguinverteri valik.
- 5) Kui süsteemis on vajalik ka puhvertoiteallika olemasolu, tuleb ka selle maksumusega arvestada. Lisaks puhvertoiteallikale on vajalik ka juhtimissüsteem. Juhtimissüsteemi maksumuse saab tabelist 4.4 (Tabel 4.4).
- 6) Lõpetuseks tuleb leida projekteeritava päikeseelektrijaama omahind. Lisaks süsteemis kasutatavate elektriseadmete hindadele tuleks arvestada ka muude kulutustega. Tööjõu ja hoolduskulude leidmiseks saab kasutada tabelit 4.4 ning peatükki 4.4 (Tabel 4.4).
- 7) Lõpp.



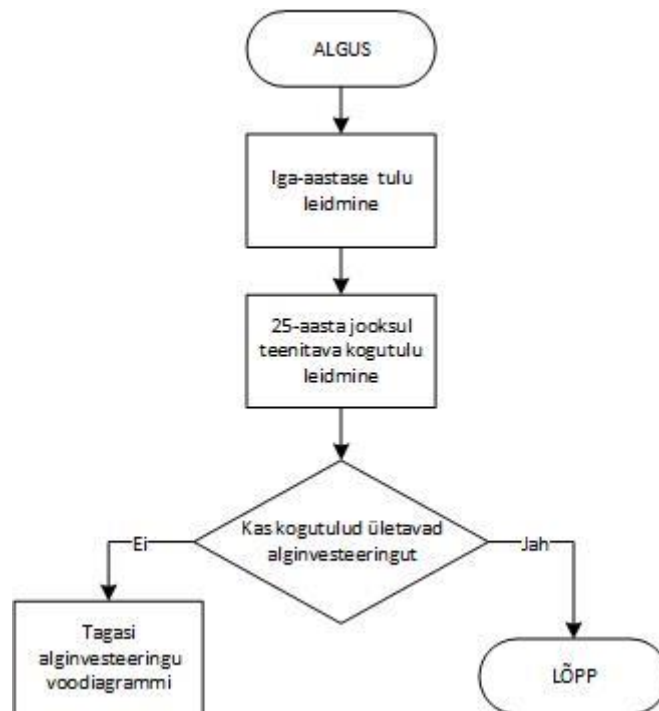
Joonis 4.23 Alginvesteeringu määramise ja teenitava tulu alamvoodiagramm

Kui projekteeritava päikeselektrijaama omahind on leitud, saab kalkuleerida ühe aastaga teenitavat tulu. Selleks tuleb kasutada aastase teenitava tulu alamvoodiagrammi (Joonis 4.23):

- 1) Algus
- 2) Esmalt tuleks leida PV-paneelide tootlikkus vastavalt paigaldusele. Paneelide tootlikkuse määramiseks kasutati PVGIS veebikalkulaatorit [59]. Sellega leiti ühe päikesepaneeli Trina aastane tootlikkus maapinnal ja katusel. Kui paigaldada üks Trina paneel katusele kaldenurgaga 25-kraadi ning määrata kadudeks 3,5% on aastane tootlikkus 421 kW/h. Sama päikesepaneeli paigaldamisel maapinnale 40-kraadise kaldenurgaga ning samuti 3,5% kadudega toodab ühe aasta jooksul elektrienergiat 447 kW/h. Korrutades PV-paneelide arvu ühe paneeli tootlikkusega on võimalik leida kogu päikeselektrijaama aastane tootlikkus. Päikesepaneelide amortisatsiooni tõttu tuleks toodetud elektrienergia kogused iga aasta kohta eraldi leida. Kalkulatsioonidel on abiks peatükk 4.1.
- 3) Seejärel tuleb leida summa, mis säästeti tänu sellele, et alajaama omatarbe seadmed said vajamineva elektri PV-paneelidelt. Esmalt tuleks leida elektrienergia hulk ning see korrutada vastava elektri hinnaga. Selleks tuleks kasutada lõputöö peatükke 4.2, 4.3, 4.5 ja 4.7.
- 4) Lisaks tuleb kalkuleerida elektrienergia kogused, mida on võimalik müüa elektrivõrku. Selleks on abiks lõputöö peatükid 4.5 ja 4.7.
- 5) Lõpetuseks tuleks eelnevate kalkulatsioonide abil leida ühe aastaga teenitud tulu.
- 6) Lõpp

Alajaama päikeseelektrijaama majandusliku kasumlikkuse leidmiseks tuleb kasutada vastavat voodiagrammi (Joonis 4.24).

- 1) Algus
- 2) Esmalt tuleb leida iga aasta kohta teenitav tulu eraldi. Arvestada tuleks nii päikesepaneelide tootlikkuse vähenemise kui ka elektri hinna tõusuga. Selle jaoks on aastase teenitava tulu voodiagramm (Joonis 4.23)
- 3) Kui kõikide aastate jooksul teenitud tulud on leitud, tuleb need summeerida.
- 4) Seejärel tuleb võrrelda aastatega teenitavat tulu alginvesteeringuga. Kui teenitav tulu ületab omahinda, on päikeseelektrijaam majanduslikult kasumlik ning protsess lõppeb. Kui aga kavandatava päikeseelektrijaama alginvesteering on suurem kui tagasiteenitud kogutulu, tuleb minna tagasi alginvesteeringu voodiagrammi juurde.
- 5) Lõpp.



Joonis 4.24 Kasumlikkuse leidmise voodiagramm

4.9.3 Majandusliku kasumlikkuse analüüs ning ettepanekud

Üheks põhjuseks, miks kavandatud mikrovõrk ei saavutanud majanduslikku kasumlikkust seisneb selles, et alajaama võimsamad elektriseadmed töötava ajal, mil päikesepaneelid elektrit ei tooda. Seetõttu müüakse enamik toodetud elektrienergiast võrku (Joonis 4.20). Majanduslikult kasumlikum oleks aga oma toodetud elekter koheselt või akupakki salvestatuna hiljem ära tarbida. Elektrit võrku müües saab arvestada ainult börsihinnaga, millest on maha arvatud võrguteenuse pakkuja marginaal. Erinevalt eelmistele aastatele, ei saa enam arvestada ka müügihinnale lisanduva taastuvenergia toetusega. Päikesepaneelide abil toodetud ja ise ära tarbitud elektri puhul saab arvestada aga elektriostuhinnaga, mis on pea poole suurem kui börsihind (Joonis 3.4) (Tabel 4.5).

Lisaks selgus analüüsist, et elektrienergia müük akupakist üldelektivõrku tipukoormuse ajal ei ole kasumlik. Selle peamiseks põhjusteks saab pidada asjaolu, et elektri börsihind tipu koormusele järgneval tunnil ei ole väga palju odavam. Ning seetõttu jääb teenimata raha elektrienergia koguselt, millega laetakse järgneval tunnil akupakki. Samuti on akul ja akuinverteril kaod, mistõttu kulub energiat rohkem kui läbi võrguinverteri müües.

Samuti võib saavutamata jäänud kasumit põhjendada suhteliselt kõrge omahinnaga. Tõhusamate seadmete leidmisel on võimalik omahinda pisut langetada. Näiteks on projekteeritud lahenduses kasutusel kaks inverterit. Nendeks on päikese- ning akuinverter. Kuigi päikeseinverter on hübriidversioon ning lisaks paneelide teenindamisele suudab ta ka akut laadida, jääb tema kommunikatsiooni funktsionaalsusest siiski puudu. Juhul kui leida mõni hübriidinverter, mis antud süsteemiga ühildub, saab akuinverteri süsteemist välja arvata. Seeläbi alaneks ka omahind.

Kavandatud mikrovõrgu majandusliku kasumlikkuse tõstmiseks võib kaaluda tuulegeneraatori lisamist. Samuti on tõenäone, et mõne alajaama projekti puhul saada ära kasutada olemasolevaid juhtimissüsteemi seadmeid, mis võiksid mikrovõrgu tööd juhtida. Seeläbi saaks alandada alginvesteeringut.

KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli projekteerida Harju Elekter jaotusalajaama HEJA omatarbe mikrovõrk ning analüüsida selle majanduslikku kasumlikkust. Töö esimeses peatükis tutvustati mõningaid olemasolevaid süsteeme. Samuti esitati kavandatavale mikrovõrgule ning selles kasutatavatele seadmetele nõuded. Selle põhjal pidi kavandatav mikrovõrk olema võimeline lühiajaliselt talitlema elektrivõrgu ühenduseta ning energiatootmise allikata. Samuti püstitati nõudmiseks, et elektrienergia müük elektrivõrku oleks maksimaalselt kasumlik. Lisaks eelnevale määrati nõue, et projekteeritav mikrovõrk jõuaks eluea jooksul kasumini.

Teises peatükis valiti vastavalt eelnevatele nõudmistele tuginedes mikrovõrku sobilikud elektriseadmed sealhulgas ka juhtimissüsteemi seadmed. Lisaks nõutule jälgiti ka seda, et erinevad seadmed oleksid võimelise töötama ühtse süsteemina ning täitma mikrovõrgule määratud funktsionaalsusi.

Kolmandas peatükis projekteeriti jaotusalajaama HEJA mikrovõrk, milles on kasutusel päikesepaneelid, võrgu- ja akuinverter, akupakk ning juhtimissüsteemi seadmed. Lühiajaliselt elektrivõrgu ühenduseta talitlemiseks lisati mikrovõrku akupakk ning juhtimissüsteem. Viimase ülesanne on tuvastada elektrivõrgus katkestus, millega alustada rikkerežiimi, milles toimub elektrienergia tark juhtimine, arvestades tarvititele määratud prioriteetsust, akusse salvestunud energia hulka ning ilmaprognoosi. Lisaks tegeleb juhtimissüsteem ka akupakki salvestunud energia müümisega tipukoormustel vastavalt ilmaennustusele. Tipukoormuse ajal saab elektrienergia müügiga teenida kõrgeimat tulu. Seeläbi täideti kolmandas peatükis kõik mikrovõrgule kehtestatud nõudmised.

Neljandas peatükis teostati projekteeritud mikrovõrgule majandusliku kasumlikkuse analüüs. Selleks koostati esmalt võimsate elektriseadmete koormusgraafikud. Kütteseadmete koormusgraafikute moodustamisel arvestati alajaama soojuskadusid ning õhutemperatuuri arhiivandmeid. Vajalike õhutemperatuuri arhiivandmeid saadi Riigi Ilmateenistusest. Samuti teostati paneelide tootlikuse arvutus veebikeskkonnas PVGIS. Lisaks prognoositi ka elektrienergia hind kuni mikrovõrgu eeldatava eluea lõpuni. Tasuvusarvutuste tulemusena selgus, et kavandatud mikrovõrk ei teeni ennast tagasi terve eluea jooksul, mistõttu jääb saavutamata ka kasumilävi. Seda saab põhjendada sellega, et enamik toodetud elektrienergiast müüakse võrku, mitte ei tarbita ära omatarbe seadmete poolt. Lisaks ei maksta käesoleval hetkel päikesepaneelide poolt toodetud ja võrku müüdüd elektrienergia eest taastuenergia toetust.

Kalkulatsioonid näitasid ka, et elektrienergia müük hommikuse tipukoormuse juures ei ole majanduslikult kasumlik. Selle põhjustab asjaolu, et tipukoormusele järgneval tunnil ei lange elektrienergia hinda märkimisväärselt ning võrguinverter hakkab koheselt laadima akut selle asemel, et müüa elektrit võrku. Kuna aga akuinverteril on oma kaod, siis on akust elektri müük võrku kasumlik ainult mõnel kuul ning seda väga vähesel määral.

Mikrovõrgule püstitatud kolmest nõudmisest täideti vaid üks. Tänu sellele on alajaam võimeline talitlema lühiajaliselt ilma elektrivõrgu ühendusega kui ka autonoomse energiatootmiseallikata. Majanduslikud aspektid jäid antud lahenduse puhul saavutamata.

Lisaks moodustati voodiagrammid, mille abil on võimalik teostada jaotusalajaama kavandatava päikeseelektrijaama tasuvust. Samuti analüüsiti ka alternatiivset lahendust, milles lisati kavandatavale mikrovõrgule päikesepaneele juurde. Tasuvusarvutused näitasid, et pisut rohkem kui kolme ja poole kordse päikesepaneelid arvuga saavutas mikrovõrk kasumilävendi. Siiski võib olla veel teisigi võimalusi kasumlikkuse saavutamiseks. Näiteks oleks võimalik tõsta mikrovõrgu kasumlikkust, kui sellele on lisatud juurde tuulegeneraator.

SUMMARY

The aim of this master thesis was to design the microgrid for the Harju Elekter distribution substation HEJA and analyze its economic profitability. In the first chapter of the work, different solutions of microgrids were mapped and some of the existing systems were introduced. After that some requirements were set for the proposed microgrid and for the equipment used in it. On this basis, the proposed microgrid must be able to operate for a short time without a grid connection and without a source of energy production. It was also demanded that the sale of electricity to the electricity network should be as profitable as possible. In addition, it was required that the proposed project should reach the break-even point during its lifetime.

In the second chapter, electrical equipment suitable for the microgrid, including control system equipment, was selected based on the previous requirements. In addition to the requirements, it was also ensured that the different devices would be able to work as a single system and perform the functionalities assigned to the microgrid.

In the third chapter the designing of the microgrid for the distribution substation HEJA was carried out. System uses solar panels, network and battery inverter, battery pack and control system equipment. A battery pack and a control system were added to the microgrid for short-term operation without the utility grid connection. The tasks of the control system is to identify an interruption in the electricity network, with which to start a fault mode in which the electricity is controlled wisely, taking into account the priority assigned to the consumers, the amount of energy stored in the battery and the weather forecast. In addition, the control system also sells the energy stored in the battery pack at peak loads according to the weather forecast. At peak times, electricity sales can generate the highest returns. In this way, all the requirements set for the microgrid in chapter one were met.

In the fourth chapter, the economic profitability analysis of the designed microgrid was performed. To do this, load diagrams were first prepared for the most powerful electrical equipment. The load schedules for the heating equipment were generated using substation heat loss and Estonian Weather Service temperature data archive. The productivity of the panels were calculated in the PVGIS web environment. In addition, the price of electricity was forecast until the end of the expected life of the microgrid. As a result of the cost-benefit calculations, it became clear that the proposed microgrid would not recoup over its lifetime, which would lead to a break-even point.

This can be explained by the fact that most of the electricity produced is sold to the grid and not consumed by auxiliary appliances. Furthermore no renewable energy subsidy is currently paid for electricity produced by solar panels and sold to the grid. Calculations also showed that selling electricity from the battery pack at morning peak is not economically viable. This is due to the fact that in the following hour after the peak load, the price of electricity will not drop significantly and the grid inverter will charge the battery instead of selling electricity to the grid. However, since the battery inverter has its own losses, the sale of electricity from the battery to the grid is profitable only in a few months and to a very small extent.

Only one of the three requirements for the microgrid was met. As a result, the substation is able to operate for a short time without a grid connection and autonomous power generation source. The economic aspects were not achieved with this solution.

The last chapter a flow chart is provided to assess the cost-effectiveness of the proposed solar power plant at the HEJA distribution substation. Finally, an alternative solution was proposed in which solar panels were added. Profitability calculations showed that slightly more than a three and a half times the number of solar panels reached the microgrid profit threshold. However, there may be some other ways to become profitable. For example, the profitability of a microgrid can be analyzed when a wind generator is added to it.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] E. C. Press, „Copernicus: 2020 warmest year on record for Europe; globally, 2020 ties with 2016 for warmest year recorded,” European Commission, 08 01 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://climate.copernicus.eu/copernicus-2020-warmest-year-record-europe-globally-2020-ties-2016-warmest-year-recorded>. [Kasutatud 04 05 2021].
- [2] K. M. Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, „Euroopa Liidu ametlik veebisait,” 27 12 2018. [Võrgumaterjal]. Available: https://ec.europa.eu/energy/sites/default/files/documents/estonia_draftnecp.pdf. [Kasutatud 04 05 2021].
- [3] E. V. Valitsus, „Vabariigi Valitsus,” 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.valitsus.ee/strateegia-eesti-2035-arengukavad-ja-planeering/arengukavad/kehtivad-arengukavad>. [Kasutatud 04 05 2021].
- [4] A. D. Bank, „Asian Development Bank,” 07 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.adb.org/sites/default/files/institutional-document/623446/handbook-microgrids-power-quality-connectivity.pdf>. [Kasutatud 04 05 2021].
- [5] I. Ilinõh, „TalTech Digikogu,” 03 06 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/ddaf402f-ebca-409e-bb17-086347fe349c>. [Kasutatud 04 05 2021].
- [6] Dayu Solar, „Basic Components in Micro Grids Systems,” Dayu Solar, 26 11 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.dayusolar.cn/basic-components-in-micro-grids-system/>. [Kasutatud 04 05 2021].
- [7] J. M. Fernández, „A voltage disturbances prototype for testing electrical generators connected to microgrids,” Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2015.
- [8] A. A. S. A. S. Faiza Anam, „Comparison of AC and DC Microgrid Considering Solar-Wind Hybrid Renewable Energy System,” *Engineering Science and Technology International Research Journal*, pp. 33-38, 2018.
- [9] M. P. Dadkhah Maryam, „ACECR Scientific Information Database,” 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.sid.ir/en/seminar/ViewPaper.aspx?id=16410>. [Kasutatud 05 05 2021].
- [10] A. G. L. W. Tom Fenimore, „Implementing a microgrid using standard utility control equipment,” 6 04 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8090030>. [Kasutatud 2021 05 05].
- [11] M. S. S. P. R. D. D. T. Mahmoud Elkazaz, „Performance Assessment of an Energy Management System for a Home Microgrid with PV Generation,” 03 07 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/13/3436>. [Kasutatud 05 05 2021].
- [12] HARJU ELEKTER, „Keskpinge jaotusalajaamad, Jaotusalajaam - HEJA,” HARJU ELEKTER, KEILA, 2006.
- [13] Mitsubishi Electric, „MSZ-AP R32,” Mitsubishi Electric, 04 2021. [Võrgumaterjal]. Available: https://library.mitsubishielectric.co.uk/pdf/book/MSZ_AP-R32_PISheet#page-1-2. [Kasutatud 14 05 2021].
- [14] Ensto, „Radiaator BETA20-BT-EB,” Ensto, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ensto.com/et/bulding-systems/tooted/elektrikuttelahendused/elektriradiaatorid/beta-radiaatorid-elektroonilise-termostaadi-ja-uhenduskarbiga/beta20-bt-eb/>. [Kasutatud 14 05 2021].

- [15] DIAL, „DIALux is the software for professional lighting design,” DIAL GmbH, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.dial.de/en/dialux/>. [Kasutatud 17 05 2021].
- [16] Ensto, „Frost protection cable TASH1.5,” Ensto, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ensto.com/building-systems/products/heating-systems/solutions-ensto-pour-lexterieur/tash/tash1.5/>. [Kasutatud 14 05 2021].
- [17] Glamox, „I40-1500 LED 8500 DALI E3/ST 840 TW PC,” Glamox, [Võrgumaterjal]. Available: <https://glamox.com/gsx/products/nogroup/items/i40l60010>. [Kasutatud 14 05 2021].
- [18] „Argo Rosin, Tarmo Korõtko,” 2019. [Võrgumaterjal]. Available: https://portal-int.taltech.ee/sites/default/files/2020-02/EE_ins_Energiasusteemide_digitaliseerimine_v3_0.pdf. [Kasutatud 14 05 2021].
- [19] R. Pikner, „Uue põlvkonna elektrisüsteem ja selle komponendid,” 24 02 2010. [Võrgumaterjal]. Available: http://www.ene.ttu.ee/elektriamid/oppeinfo/materjal/AAV0160/Uue_p_lvkonna_elektris_steem_ja_selle_komponendid__t_isversioon__Rando_Pikner.pdf. [Kasutatud 14 05 2021].
- [20] A. O. M. A. F. B. K. I. M. Abdulgader Alsharif, „ResearchGate,” 01 2017. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.researchgate.net/publication/320040499_Utilization_of_Solar_Power_in_Distributing_Substation. [Kasutatud 05 05 2021].
- [21] M. Löper, „TalTech Digikogu,” 01 06 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/19b8b767-198e-4e4c-a4a4-45b735884032>. [Kasutatud 05 05 2021].
- [22] EnergySage, „Monocrystalline and polycrystalline solar panels: what you need to know,” EnergySage, 15 07 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.energysage.com/solar/101/monocrystalline-vs-polycrystalline-solar-panels/>. [Kasutatud 05 05 2021].
- [23] EUROPE-SOLAR STORE, „Trina TallmaxM TSM-450 DE17M(II),” EUROPE-SOLAR STORE, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.europe-solarstore.com/trina-tallmaxm-tsm-450-de17m-ii.html>. [Kasutatud 05 05 2021].
- [24] EUROPE-SOLAR STORE, „Axitec AXIpower,” EUROPE-SOLAR STORE, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.europe-solarstore.com/axitec-axipower-ac-330p-72s.html>. [Kasutatud 05 05 2021].
- [25] A. Schell, „Paradise Energy Solutions,” Paradise Energy Solutions, 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.paradiscsolarenergy.com/blog/all-you-need-to-know-about-solar-panel-warranties>. [Kasutatud 05 05 2021].
- [26] Elektrilevi, „Elektrilevi,” Elektrilevi, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.elektrilevi.ee/elektritootjale>. [Kasutatud 05 05 2021].
- [27] E. V. Riigikogu, „Riigi Teataja,” Eesti vabriigi Justiitsministeerium, 01 07 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/130062020028>. [Kasutatud 05 05 2021].
- [28] Elektrilevi, „Väiketootja liitumine,” 16 04 2021. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.elektrilevi.ee/-/doc/8644141/liitumised/vaiketootjale/failid/kodulehe_nimekiri_2018.pdf. [Kasutatud 05 05 2021].
- [29] EUROPE-SOLAR STORE, „KOSTAL PLENTICORE PLUS 10,” EUROPE-SOLAR STORE, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.europe-solarstore.com/solar-inverters/kostal/kostal-plenticore-plus-10.html>. [Kasutatud 05 05 2021].
- [30] Alternative Energy Tutorials, „Alternative Energy Tutorials,” Alternative Energy Tutorials, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.alternative-energy->

- tutorials.com/photovoltaics/solar-cell-i-v-characteristic.html. [Kasutatud 05 05 2021].
- [31] Kostal Solar Electric GmbH, „Kostal Solar Electric,” 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.kostal-solar-electric.com/en-gb/products/battery-inverter/plenticore-bi>. [Kasutatud 05 05 2021].
- [32] EUROPE-SOLAR STORE, „BYD Battery-Box H6.4,” EUROPE-SOLAR STORE, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.europe-solarstore.com/byd/byd-b-box-hv/byd-battery-box-h6-4.html>. [Kasutatud 05 05 2021].
- [33] Battery Power, „Battery Power,” Battery Power, 19 09 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.batterypoweronline.com/news/thermal-runaway-understanding-the-fundamentals-to-ensure-safer-batteries/>. [Kasutatud 05 05 2021].
- [34] SIEMENS, „S7-1500,” SIEMENS, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/6ES7511-1AK02-0AB0>. [Kasutatud 05 05 2021].
- [35] SIEMENS, „SIMATIC S7-1500 digital output module,” SIEMENS, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/6ES7522-1BH01-0AB0>. [Kasutatud 05 05 2021].
- [36] SIEMENS, „SIMATIC S7-1500, digital input module,” SIEMENS, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/6ES7521-1BH00-0AB0>. [Kasutatud 05 05 2021].
- [37] SIEMENS, „SCALANCE XB005,” SIEMENS, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/ww/Catalog/Product/6GK5005-0BA00-1AB2>. [Kasutatud 06 05 2021].
- [38] SIEMENS, „SIMATIC Cloud Connect 7,” SIEMENS, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/6GK1411-1AC00>. [Kasutatud 06 05 2021].
- [39] SIEMENS, „SCALANCE M876-4 LTE,” SIEMENS, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/6GK5876-4AA00-2DA2>. [Kasutatud 06 05 2021].
- [40] SIEMENS, „ANT794-4MR,” SIEMENS, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/ww/Catalog/Product/6NH9860-1AA00>. [Kasutatud 06 05 2021].
- [41] Lovato electric, „RS-Online,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://docs.rs-online.com/2c01/0900766b81704525.pdf>. [Kasutatud 06 05 2021].
- [42] SIEMENS, „PHASE FAILURE AND SEQUENCE,” SIEMENS, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://support.industry.siemens.com/cs/products/3ug4512-1ar20/phase-failure-and-sequence?pid=265815&mlfb=3UG4512-1AR20&mfnc=ps&lc=en-WW>. [Kasutatud 14 05 2021].
- [43] SIEMENS, „SITOP DC UPS,” 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:d0e566d9-f815-4a88-a07d-23c8354a16f8/sitop-dc-usv-en.pdf>. [Kasutatud 06 05 2021].
- [44] SIEMENS, „SITOP UPS500S,” SIEMENS, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/6EP1933-2EC51>. [Kasutatud 06 05 2021].
- [45] SIEMENS, „SITOP PSU100L,” SIEMENS, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/6EP1336-1LB00>. [Kasutatud 06 05 2021].
- [46] SIEMENS, „7KT1260 Data manager for communication,” 2021. [Võrgumaterjal]. Available:

- <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/ww/Catalog/Product/?mlfb=7KT1260>. [Kasutatud 06 05 2021].
- [47] SIEMENS, „Sensor 63A,” SIEMENS, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/7KT1255>. [Kasutatud 06 05 2021].
- [48] SIEMENS, „7KT1242 12-sensor bar,” SIEMENS, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/7KT1242>. [Kasutatud 06 05 2021].
- [49] Eesti Vabariigi Justiitsministeerium, „Võrguteenuste kvaliteedinõuded ja võrgutasude vähendamise tingimused kvaliteedinõuete rikkumise korral,” Riigi Teataja, 24 10 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/113062014013?leiaKehtiv>. [Kasutatud 06 05 2021].
- [50] V. Beal, „API (Application Program Interface) Meaning Top articles & Definition,” Webopedia, 09 04 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.webopedia.com/definitions/api/>. [Kasutatud 06 05 2021].
- [51] YR For developers, „Getting Started,” YR.no, [Võrgumaterjal]. Available: <https://developer.yr.no/doc/GettingStarted/>. [Kasutatud 06 05 2021].
- [52] Meteorologisk institutt, „Locationforecast,” https://api.met.no/weatherapi/locationforecast/2.0/#!/data/get_compact, [Võrgumaterjal]. Available: https://api.met.no/weatherapi/locationforecast/2.0/#!/data/get_compact. [Kasutatud 06 05 2021].
- [53] Siemens, „Library for HTTP Communication (LHTTP),” 12 01 2021. [Võrgumaterjal]. Available: [https://support.industry.siemens.com/cs/document/109763879/library-for-http-communication-\(lhttp\)?dti=0&lc=en-CY](https://support.industry.siemens.com/cs/document/109763879/library-for-http-communication-(lhttp)?dti=0&lc=en-CY). [Kasutatud 06 05 2021].
- [54] Global Solar Atlas, „Maps and data downloads,” 23 10 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://globalsolaratlas.info/download?c=11.523088,8.261719,3>. [Kasutatud 06 05 2021].
- [55] Niclas, „Measuring the temperature coefficient of a PV module,” SINO VOLTAICS, 12 02 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <https://sinovoltaics.com/solar-basics/measuring-the-temperature-coefficients-of-a-pv-module/>. [Kasutatud 06 05 2021].
- [56] A. Sendy, „How long do solar panels actually last?,” SolarReviews, 05 05 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.solarreviews.com/blog/how-long-do-solar-panels-last>. [Kasutatud 06 05 2021].
- [57] Shawn, „Solar Efficiency Losses Over Time,” SRoeCo Solar, [Võrgumaterjal]. Available: <http://sroeco.com/solar/solar-efficiency-losses-over-time/>. [Kasutatud 06 05 2021].
- [58] M. Rehepapp, „TalTech digikogu,” 06 06 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/f38ac853-dd85-4371-ad96-06e885909ed4>. [Kasutatud 06 05 2021].
- [59] Euroopa Komisjoni Teadusuuringute Ühiskeskus, „Photovoltaic Geographical Information System,” Euroopa Komisjoni Teadusuuringute Ühiskeskus, 15 10 2019. [Võrgumaterjal]. Available: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#PVP. [Kasutatud 12 05 2021].
- [60] WorldData, „Sunrise and sunset in Estonia,” WorldData, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.worlddata.info/europe/estonia/sunset.php>. [Kasutatud 06 05 2021].
- [61] Kingspan, „KS1150 TF standard kinnitusega paneel,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.kingspan.com/ee/et-ee/tooted/sandwich-paneelid/soojustatud->

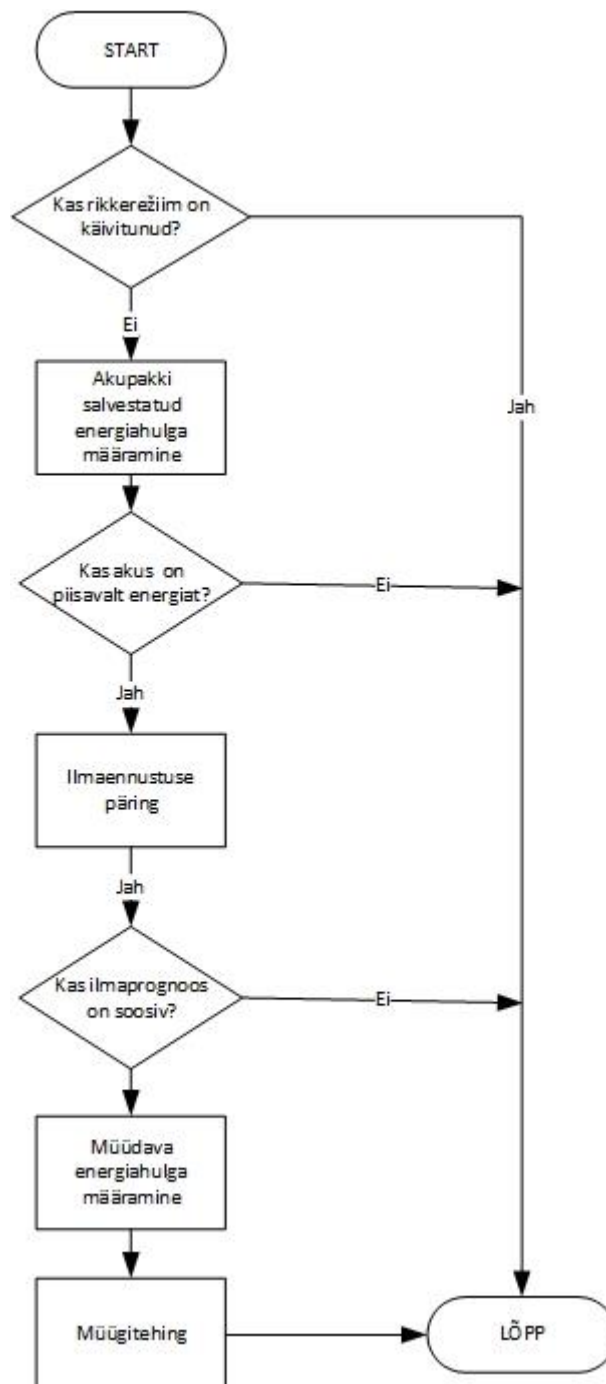
- seinapaneelid/ks1150-tf-ipn-standard-kinnitusega-paneel. [Kasutatud 06 05 2021].
- [62] Kingspan, „Trapezoidal Pitched Roof System KS1000 RW,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.kingspan.com/esea/en-ph/products/insulated-panel-systems/roof-panel-systems/trapezoidal-roof-panels-ks1000-rw>. [Kasutatud 06 05 2021].
- [63] Frobo Flooring System, „Heterogeneous Vinyl,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.forbo.com/flooring/en-gl/products/heterogeneous-vinyl/step-safety-vinyl/btl6ui#panel_109. [Kasutatud 06 05 2021].
- [64] PAROC, „PAROC eXtra,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.paroc.com/parocom/products/building-insulations/bi-general-insulations/paroc-extra>. [Kasutatud 06 05 2021].
- [65] UPM The Biofire Company, „Toimivusdeklaratsioon, UPM Plywood,“ 14 02 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.wisaplywood.com/siteassets/documents/dop/archive/upm007cpr-2017-02-01--2018-11-04-ee.pdf>. [Kasutatud 06 05 2021].
- [66] L. Paap, „Piirdetarindite soojuslääbivus,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://moodle.ttkk.ee/pluginfile.php/211946/mod_resource/content/1/5.%20Piirdetarindite%20soojusl%C3%A4bivus%2C%20mittehomogeenne%20sein%2C%20p%C3%B5rand%2C%20aken.pdf. [Kasutatud 06 05 2021].
- [67] Riigi Ilmateenistus, „Kontakt,“ Riigi Ilmateenistus, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ilmateenistus.ee/ilmateenistus/kontakt/>. [Kasutatud 12 05 2021].
- [68] E. Kirsman, „Füüsika põhivara,“ Blog at WordPress.com, [Võrgumaterjal]. Available: <https://opik.kirsman.ee/pohikool/8klass/energia/>. [Kasutatud 06 05 2021].
- [69] Tera AS, „Hooldus,“ Tera AS, 2014. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.tera.ee/hooldus/>. [Kasutatud 06 05 2021].
- [70] Eesti Vabariigi Justiitsministeerium, „Konkurentsiamet,“ 21 12 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.konkurentsiamet.ee/et/uudised/konkurentsiamet-viis-labi-elektrijaeturu-analuusi>. [Kasutatud 06 05 2021].
- [71] Elektrilevi, „Võrgutasu kujunemisest,“ Elektrilevi, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.elektrilevi.ee/ettevottest/elektrilevitutvustus?introduction=network-charges&tab=network-charges>. [Kasutatud 06 05 2021].
- [72] Maksu- ja Tolliamet, „Aktsiisimäärad,“ Maksu- ja Tolliamet, 23 02 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.emta.ee/et/ariklient/aktsiisid-varahasartmang/uldist/aktsiisimaarad#Kytus>. [Kasutatud 06 05 2021].
- [73] Elering, „Taastuenergia Tasu,“ Elering, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://elering.ee/taastuenergia-tasu#tab0>. [Kasutatud 06 05 2021].
- [74] M. Pinn, „Elektrijaama saab püsti lihtsalt,“ Äripäev, 22 04 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.aripaev.ee/uudised/2015/04/22/elektrijaama-saab-pusti-lihtsalt-paberimajandusega-pisut-pusimist>. [Kasutatud 07 05 2021].
- [75] Eesti Vabariigi Justiitsministeerium, „Elektrituruseadus,“ Eesti Vabariigi Justiitsministeerium, 01 07 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/130062020028>. [Kasutatud 07 05 2021].
- [76] Eurostat, „Electricity prices for household consumers -bi-annual data (from 2007 onwards),“ Eurostat, 16 04 2021. [Võrgumaterjal]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/NRG_PC_204__custom_894838/default/table?lang=en. [Kasutatud 07 05 2021].
- [77] rahandusministeerium, „Majandusprognoosid,“ Rahandusministeerium, 30 10 2019. [Võrgumaterjal]. Available:



<https://www.rahendusministeerium.ee/et/riigieelarve-ja-majandus/majandusprognoosid>. [Kasutatud 07 05 2021].

- [78] S. Iljin, „TalTech Digikogu,“ 16 01 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/dda4118c-d33a-4ff9-8691-f5c25bb0678d>. [Kasutatud 14 05 2021].

LISAD

LISA 1 – Müügitükli juhtprogramm





 PERFORMANCE OF GRID-CONNECTED PV


Solar radiation database*	<input type="text" value="PVGIS-SARAH"/>
PV technology*	<input type="text" value="Crystalline silicon"/>
Installed peak PV power [kWp]*	<input type="text" value="9"/>
System loss [%]*	<input type="text" value="3.4"/>
Fixed mounting options	
Mounting position *	<input type="text" value="Building integrated"/>
Slope [°]*	<input type="text" value="25"/>
Azimuth [°]*	<input type="text" value="0"/>
<input checked="" type="checkbox"/> PV electricity price	
PV system cost (your currency)*	<input type="text"/>
Interest [%/year]*	<input type="text"/>
Lifetime [years]*	<input type="text"/>

Optimize slope
 Optimize slope and azimuth

LISA 3 – Alternatiivse lahenduse tasuvusanalüüsis PVGISi sisestatud andmed

 **PERFORMANCE OF GRID-CONNECTED PV** 

Solar radiation database*

PV technology*

Installed peak PV power [kWp]*

System loss [%]*

Fixed mounting options

Mounting position*

Slope [°]*

Azimuth [°]*

PV electricity price

PV system cost (your currency)

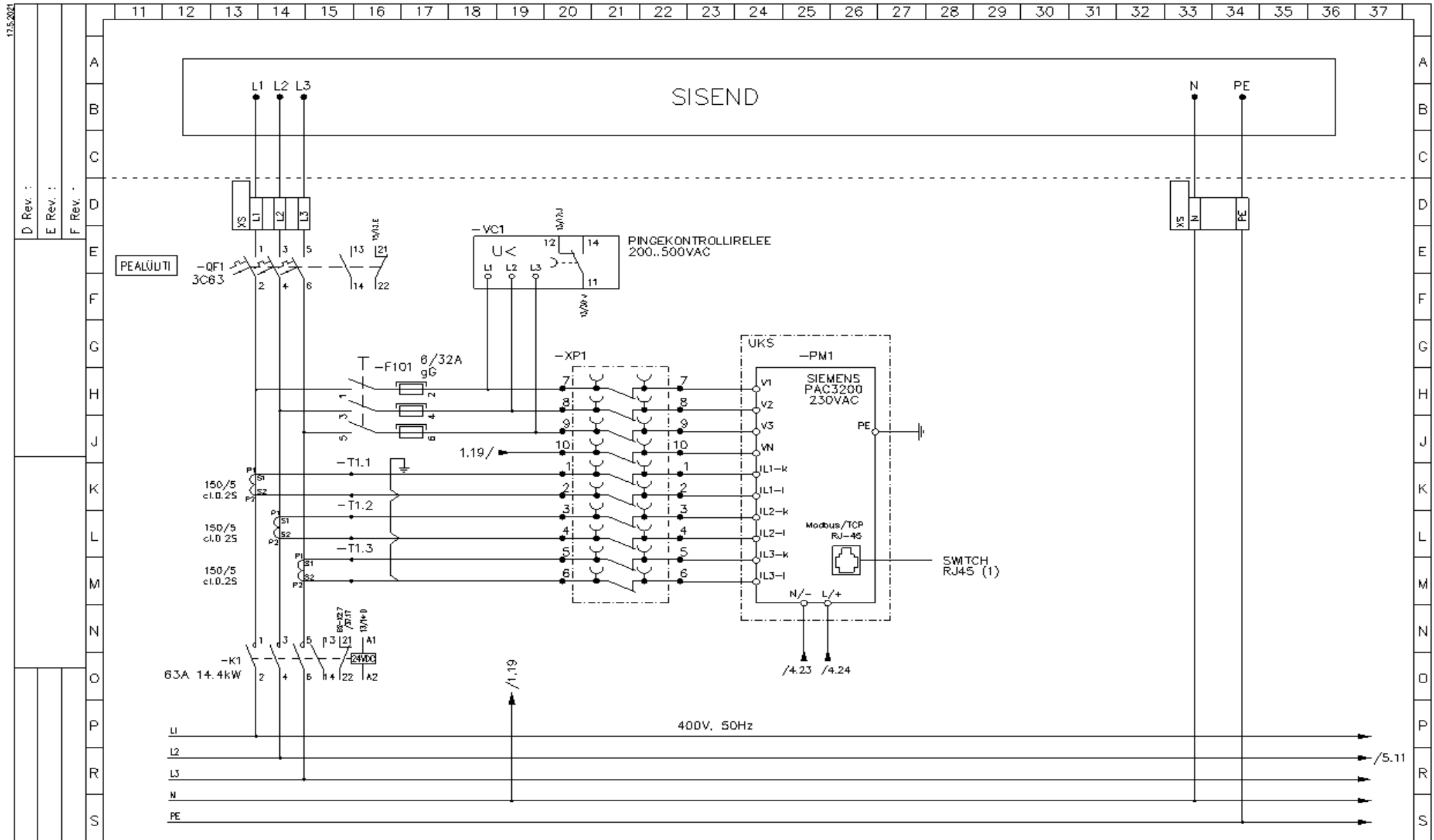
Interest [%/year]

Lifetime [years]

Optimize slope

Optimize slope and azimuth

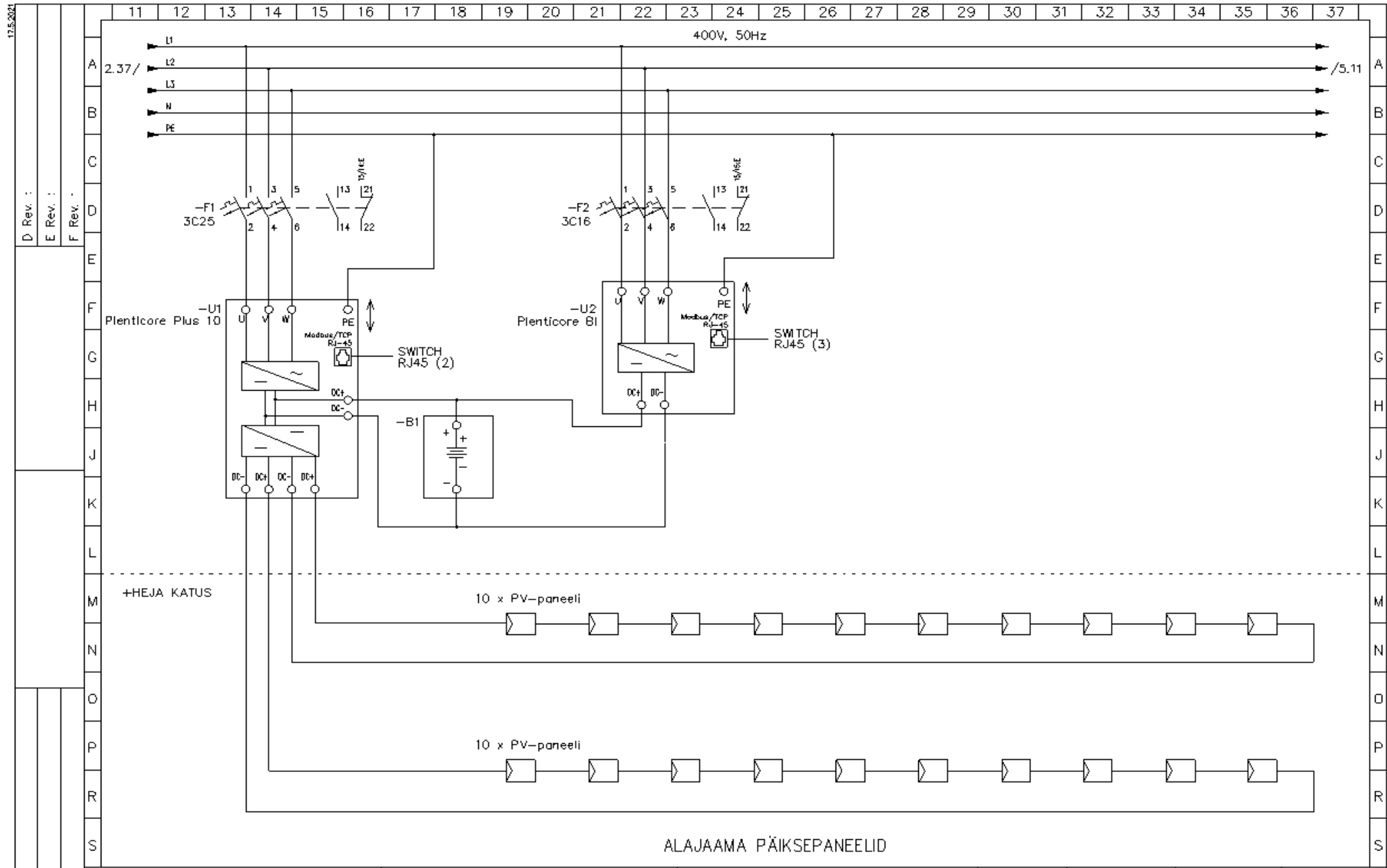
LISA 4 - Projekteeritud mikrovõrgu sekundaarskeem



HARJU ELEKTER
 Harju Elekter Elektrotehnika AS
 Tel. +372 6 747 449
 faks +372 6 747 441
 Põhikivi mnt. 31
 76506 Käpa
 mail@ha.ee

ALAJAAMA ELEKTRISKEEMID
 SISEND

Plan. k.k. /24.3.2021	Object ID =HEJA	Electrical position +JAM	Job no.
Draw. k.k. /24.3.2021	Sheet 1/16	Drawing no.	JAM_00_S1
Check Ma.M. /24.3.2021			



17.5.2021

Leads: vt

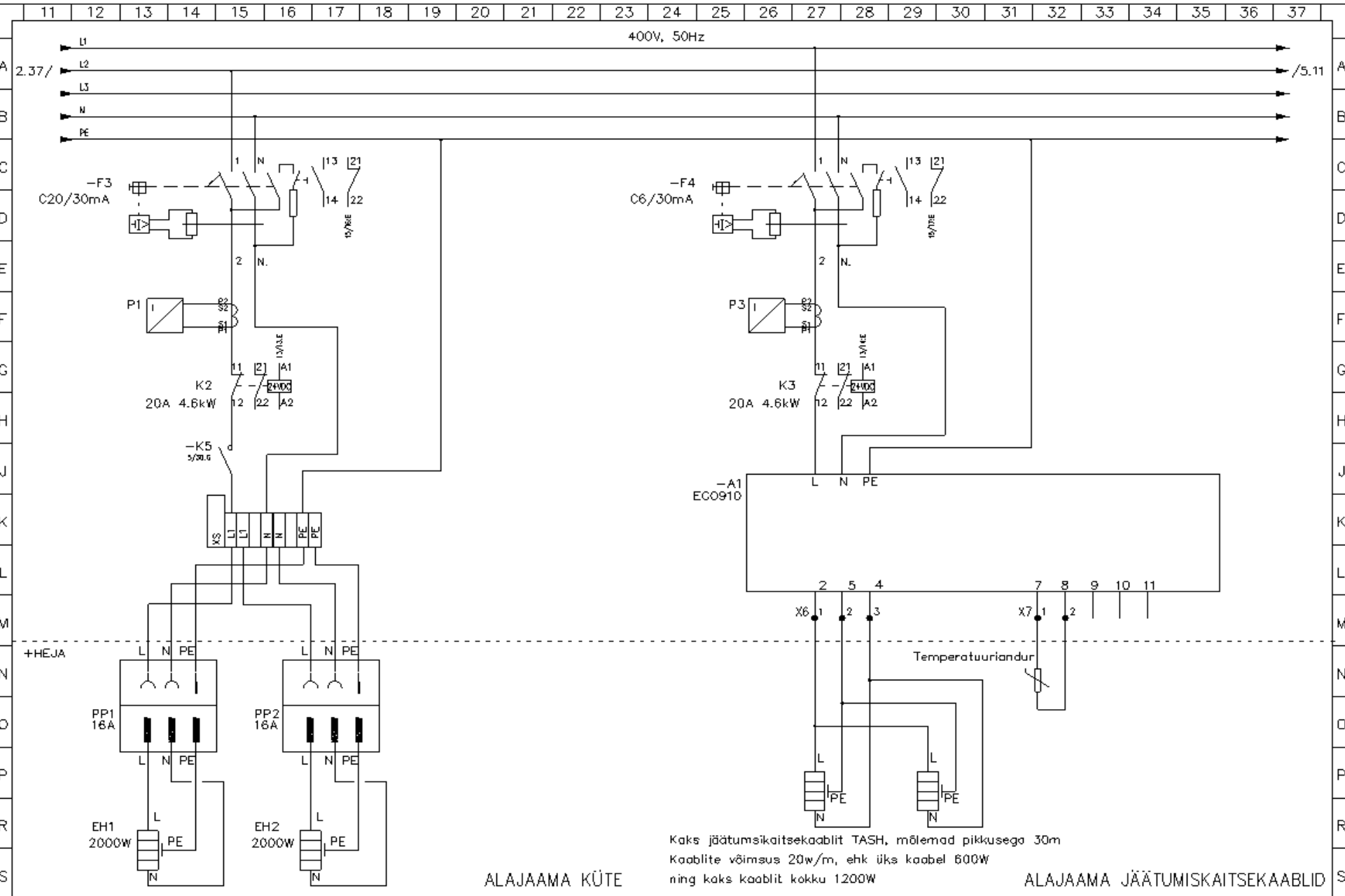
D Rev. :
E Rev. :
F Rev. :

A Rev. :
B Rev. :
C Rev. :

ALAJAAMA PÄIKSEPANEELID

ALAJAAMA ELEKTRISKEEMID
PÄIKESEENERGIA MUUNDAMINE

Plan. K.K /24.3.2021	Object ID =HEJA	Electrical position +JAM	Job no.
Draw. K.K /24.3.2021	Sheet 2 / 16	Drawing no. JAM_00_S1	
Check MaM /24.3.2021			



ALAJAAMA KÜTE

Kaks jäätumiskaitsekaablit TASH, mõlemad pikkusega 30m
Kaablite võimsus 20w/m, ehk üks kaabel 600W
ning kaks kaablit kokku 1200W

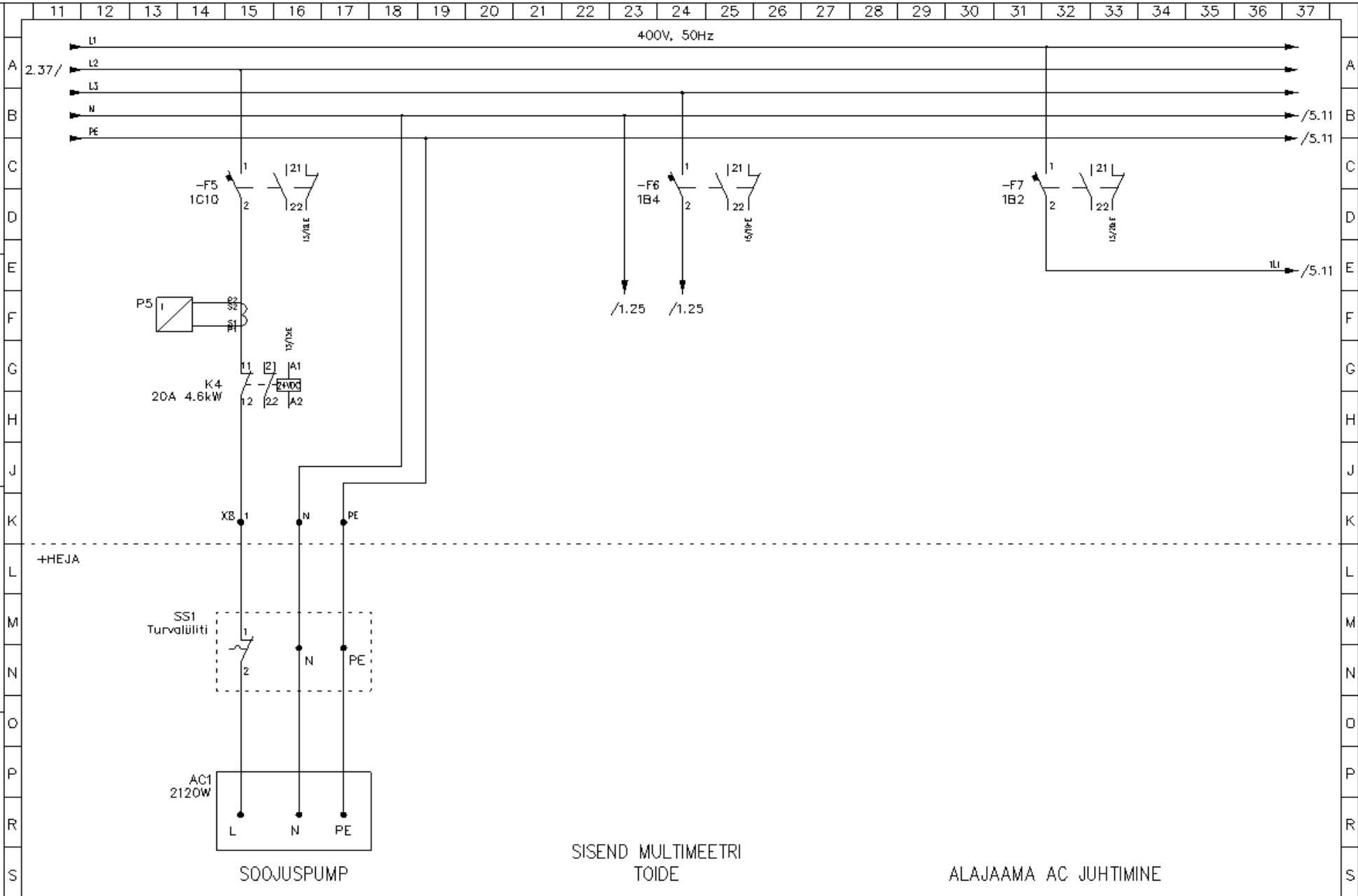
ALAJAAMA JÄÄTUMISKAITSEKAABLI

ALAJAAMA ELEKTRISKEEMID
ELEKTRIKÜTE JA
JÄÄTUMISKAITSEKAABEL

Plan. KK /24.3.2021	Object ID =HEJA	Electrical position +JAM	Job no.
Draw. K.K. /24.3.2021	Sheet 3 / 16	Drawing no. JAM_00_S1	
Check Ma.M. /24.3.2021			

D Rev. :
E Rev. :
F Rev. :

A Rev. :
B Rev. :
C Rev. :

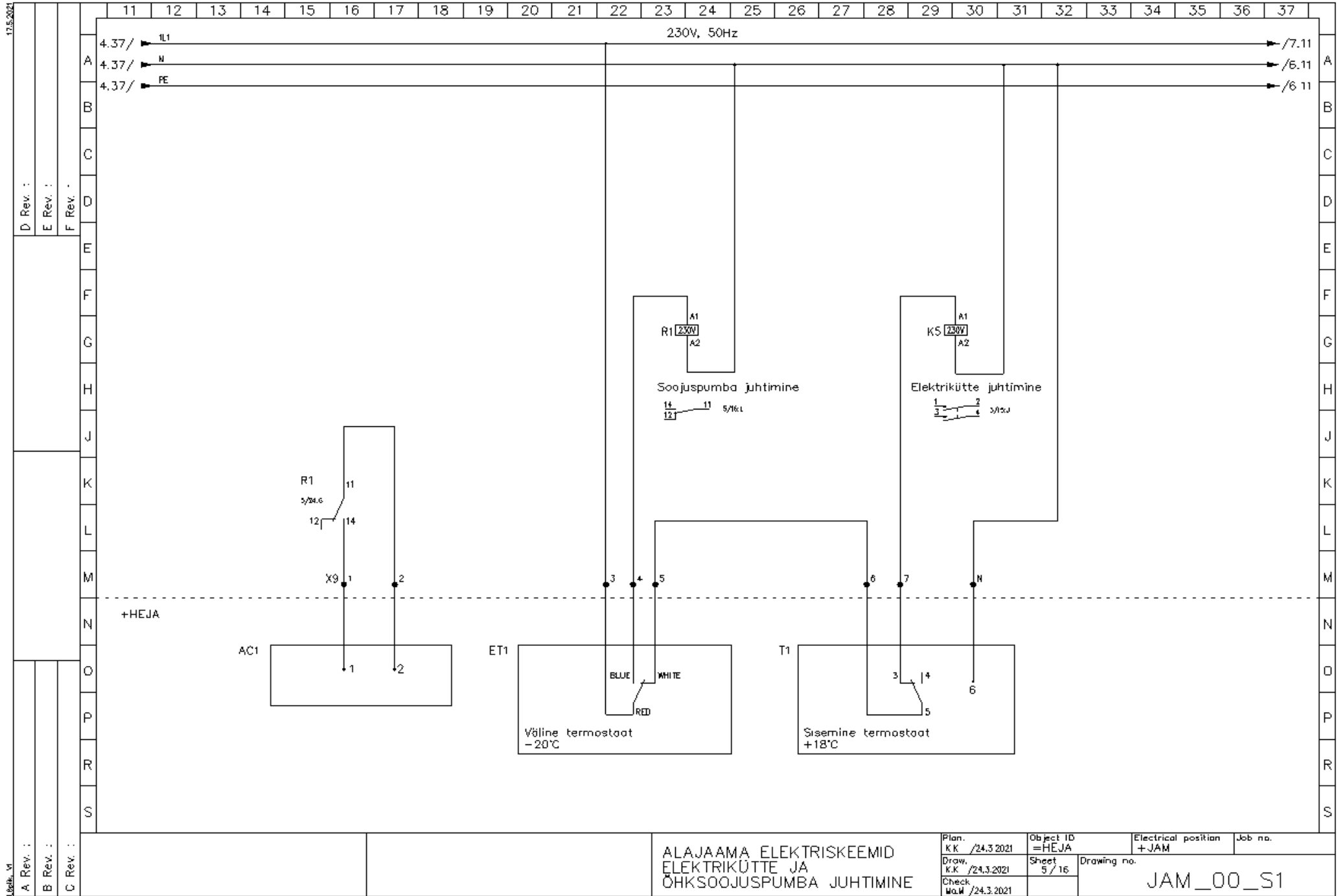


SISEND MULTIMEETRI
TOIDE

ALAJAAMA AC JUHTIMINE

ALAJAAMA ELEKTRISKEEMID
ÕHKSOOJUSPUMP

Plan. K.K. /24.3.2021	Object ID =HEJA	Electrical position +JAM	Job no.
Draw. K.K. /24.3.2021	Sheet 4 / 16	Drawing no. JAM_00_S1	
Check M.M. /24.3.2021			



17.5.2021

Leads: VI

D Rev. :
E Rev. :
F Rev. :

A Rev. :
B Rev. :
C Rev. :

ALAJAAMA ELEKTRISKEEMID
ELEKTRIKÜTTE JA
ÕHKSOOJUSPUMBA JUHTIMINE

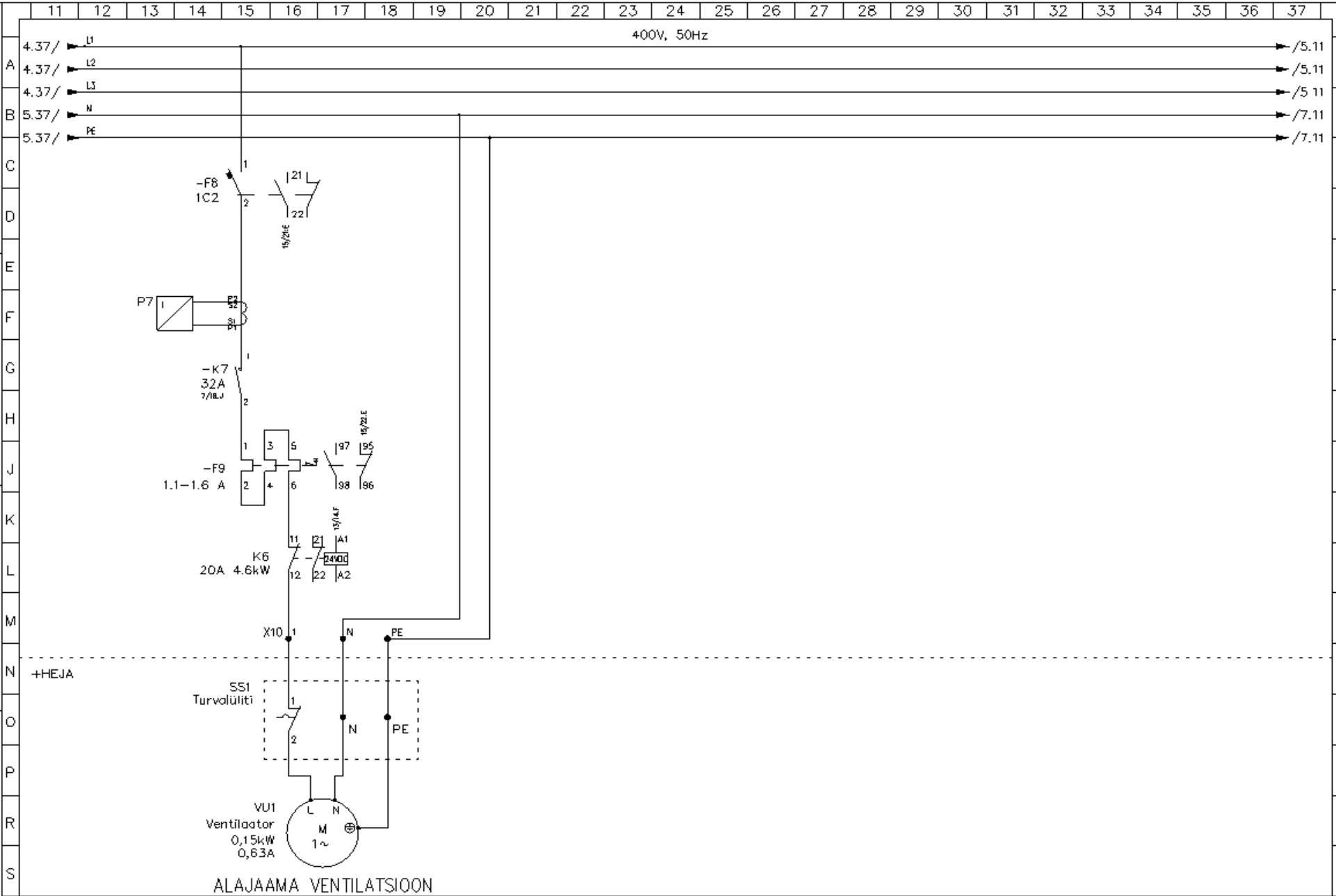
Plan. K.K. /24.3.2021	Object ID =HEJA	Electrical position +JAM	Job no.
Draw. k.k. /24.3.2021	Sheet 5 / 16	Drawing no. JAM_00_S1	
Check M.M. /24.3.2021			

17.5.2021

D Rev. :
E Rev. :
F Rev. :

A Rev. :
B Rev. :
C Rev. :

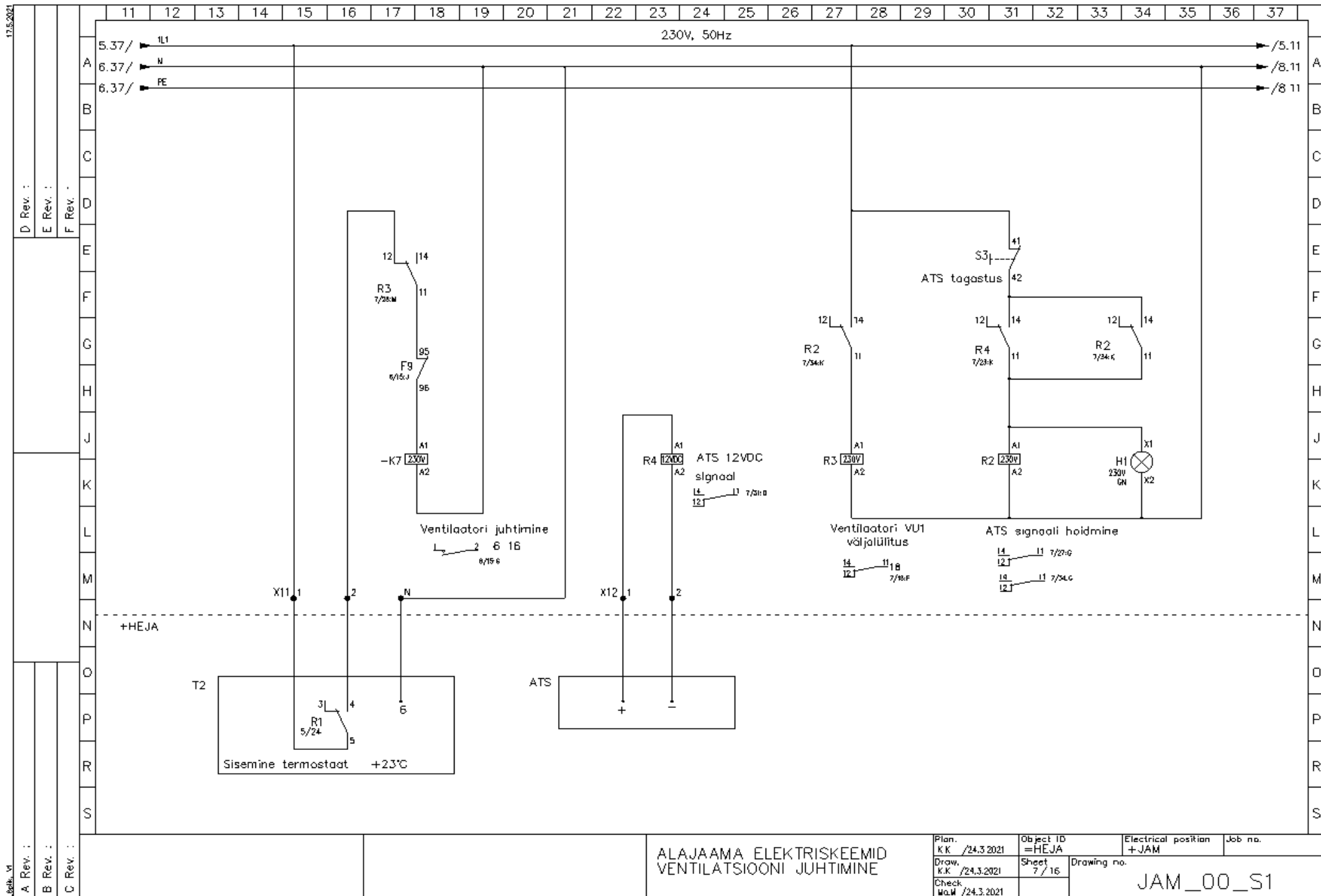
A Rev. :
B Rev. :
C Rev. :



ALAJAAMA VENTILATSIIOON

ALAJAAMA ELEKTRISKEEMID
VENTILATSIIOON

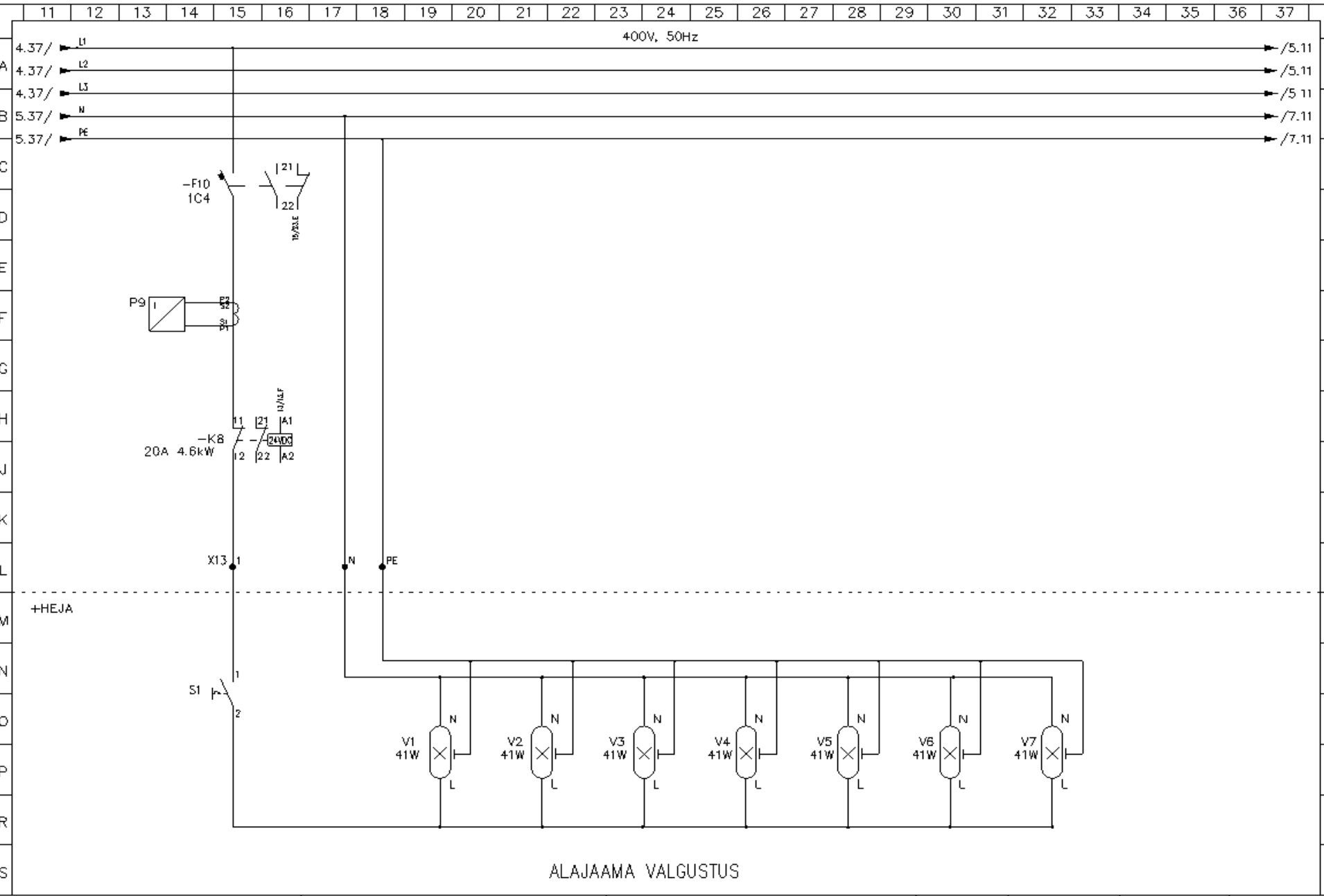
Plan. K.K /24.3.2021	Object ID =HEJA	Electrical position +JAM	Job no.
Draw. K.K /24.3.2021	Sheet 6 / 16	Drawing no. JAM_00_S1	
Check Ma.M /24.3.2021			



17.5.2021

D Rev. :	
E Rev. :	
F Rev. :	

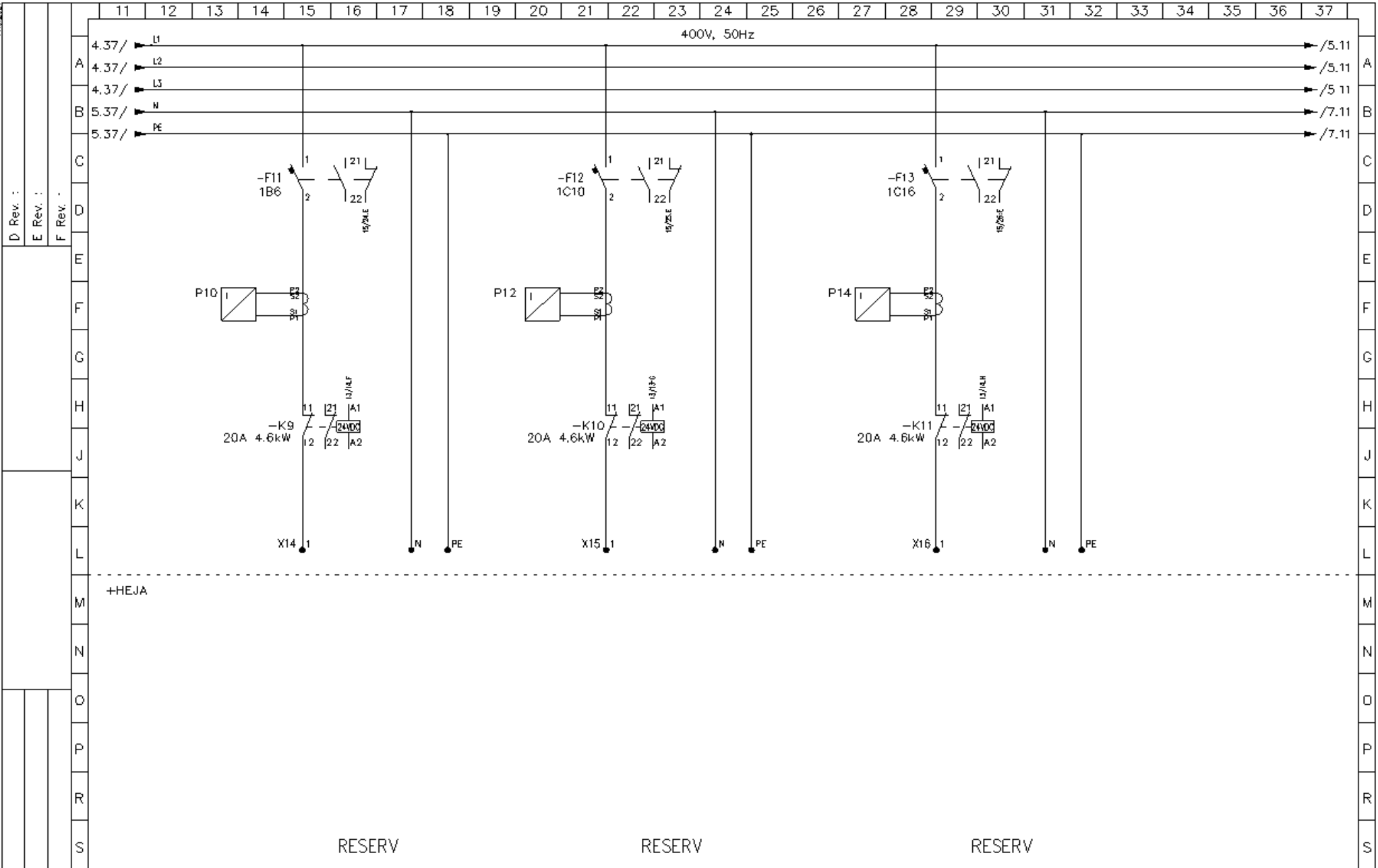
A Rev. :	
B Rev. :	
C Rev. :	



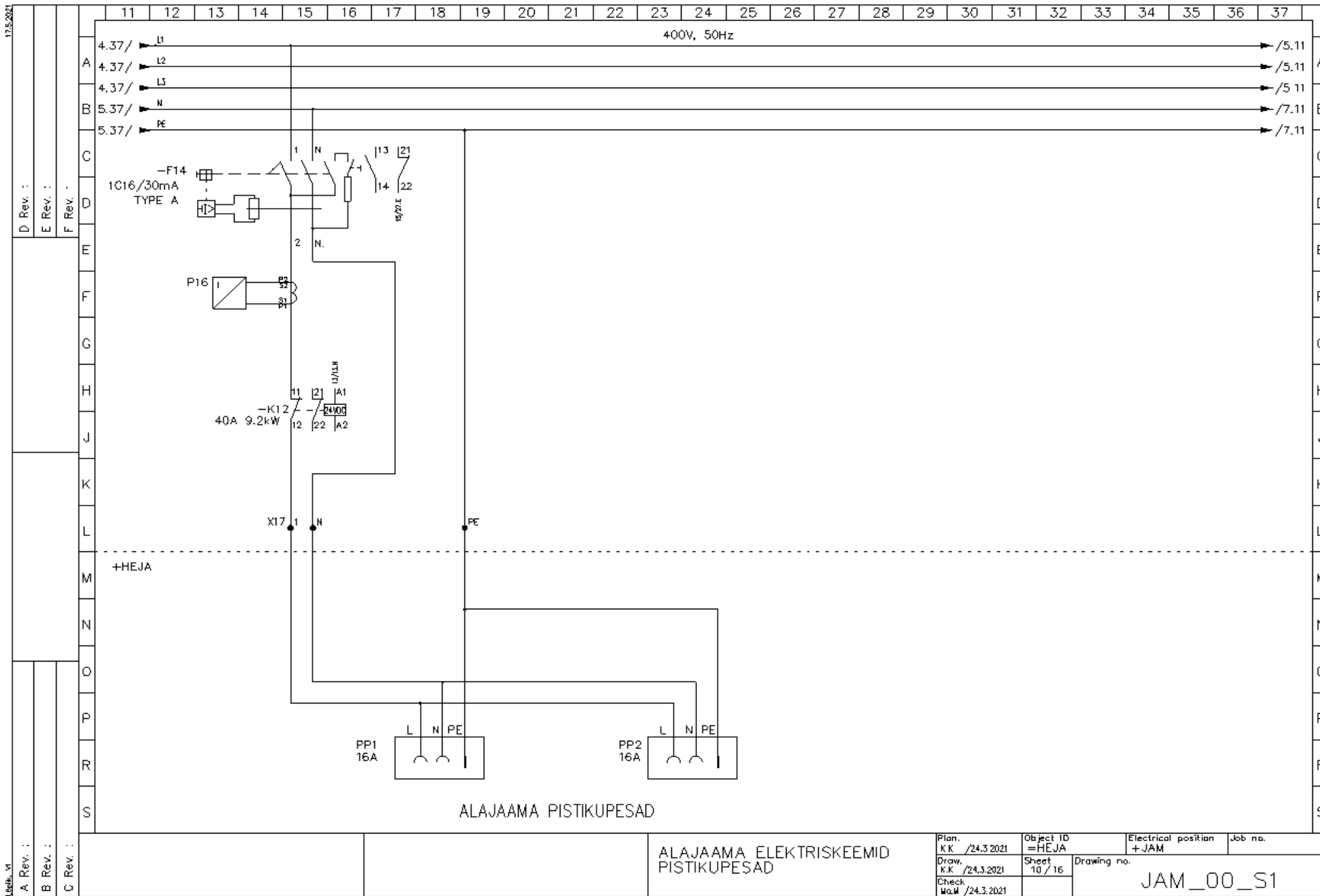
ALAJAAMA VALGUSTUS

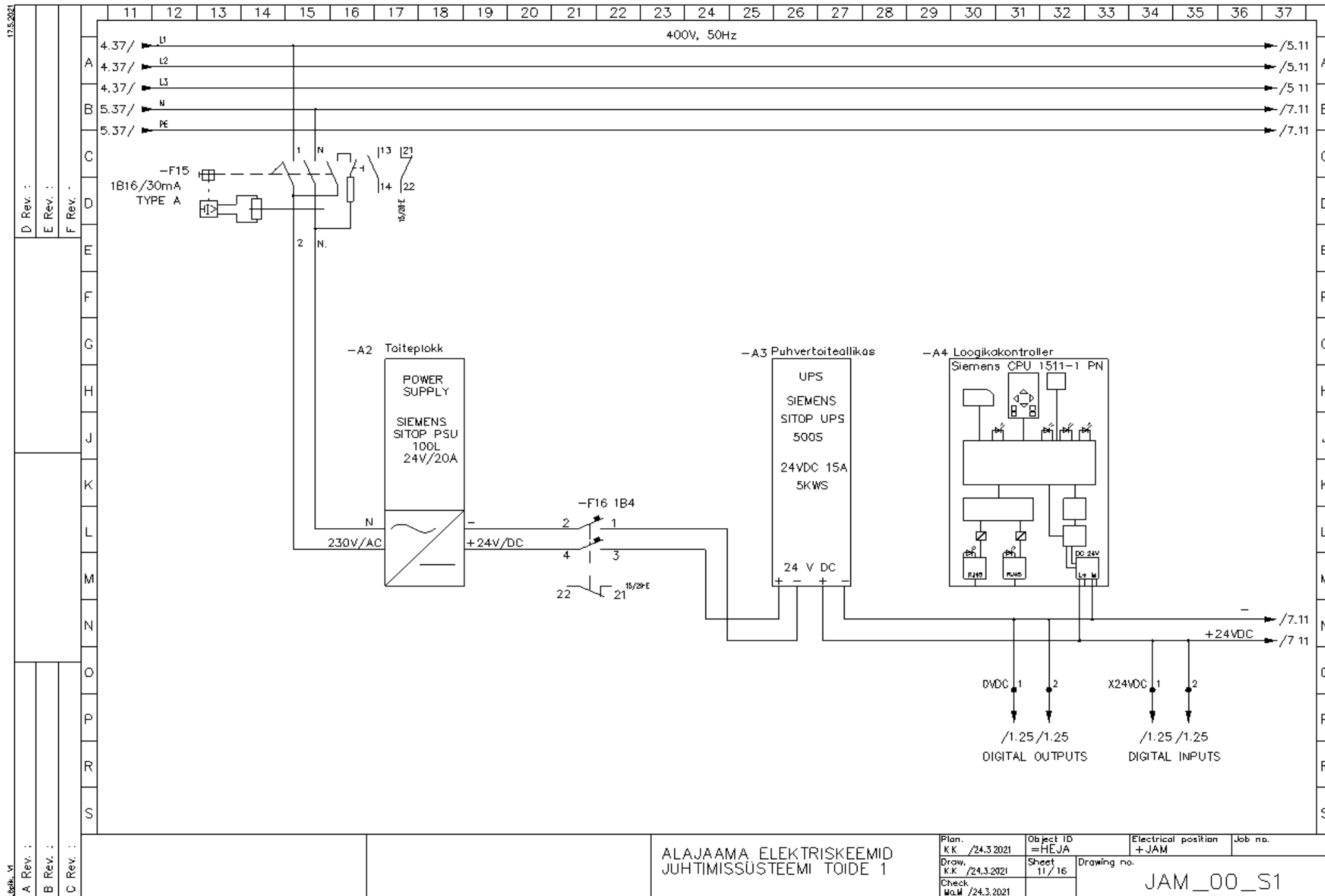
ALAJAAMA ELEKTRISKEEMID
VALGUSTID

Plan. K.K /24.3.2021	Object ID =HEJA	Electrical position +JAM	Job no.
Draw. K.K /24.3.2021	Sheet 8 / 16	Drawing no. JAM_00_S1	
Check MaM /24.3.2021			



A Rev. :	D Rev. :	Plan. K.K. /24.3.2021	Object ID =HEJA	Electrical position +JAM	Job no.
B Rev. :	E Rev. :	Draw. K.K. /24.3.2021	Sheet 9 / 16	Drawing no. JAM_00_S1	
C Rev. :	F Rev. :	Check Ma.W /24.3.2021			





17.5.2021

D Rev. :
E Rev. :
F Rev. :

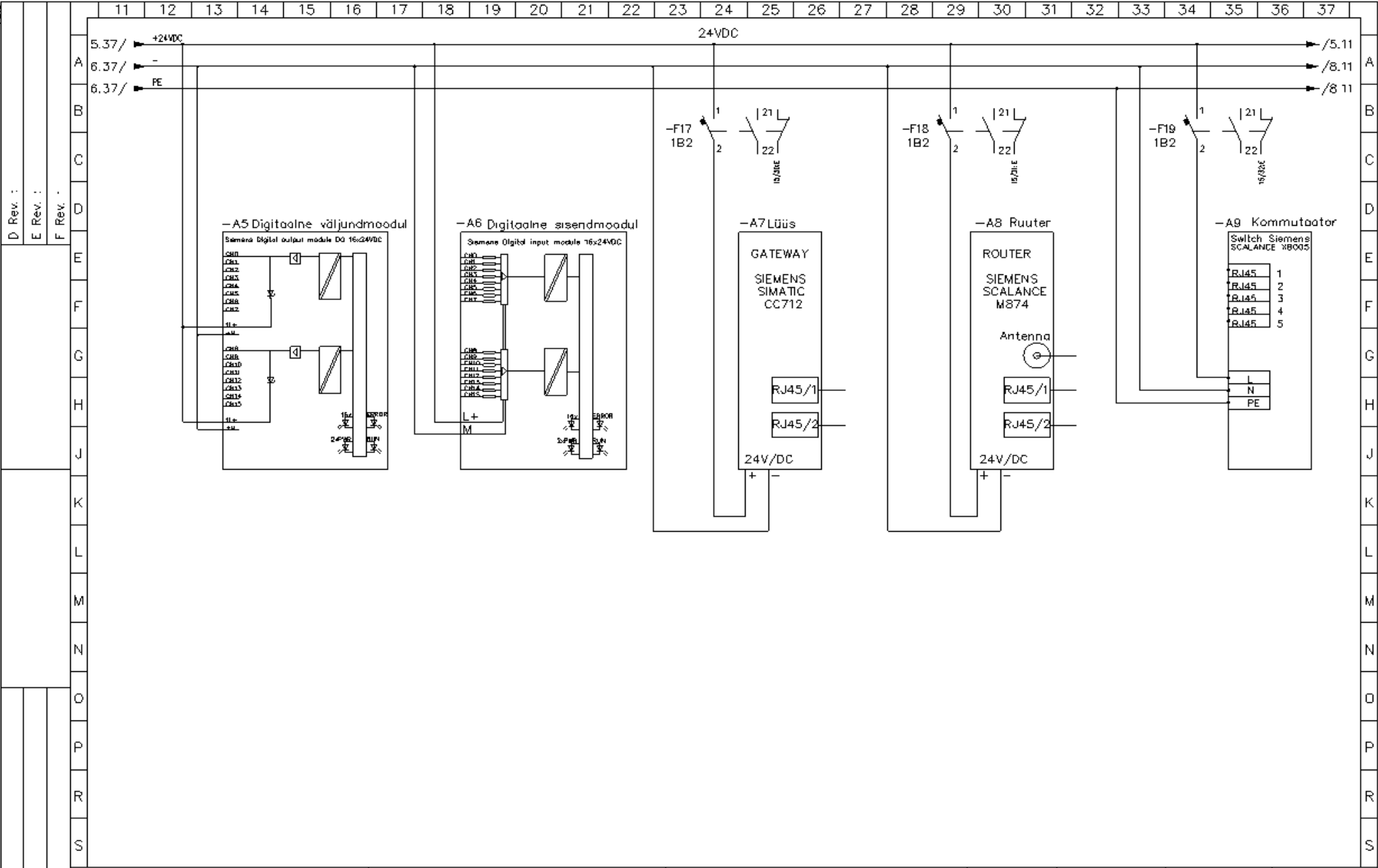
A Rev. :
B Rev. :
C Rev. :

Leidk. vi

ALAJAAMA ELEKTRISKEEMID
JUHTIMISSÜSTEEMI TOIDE 1

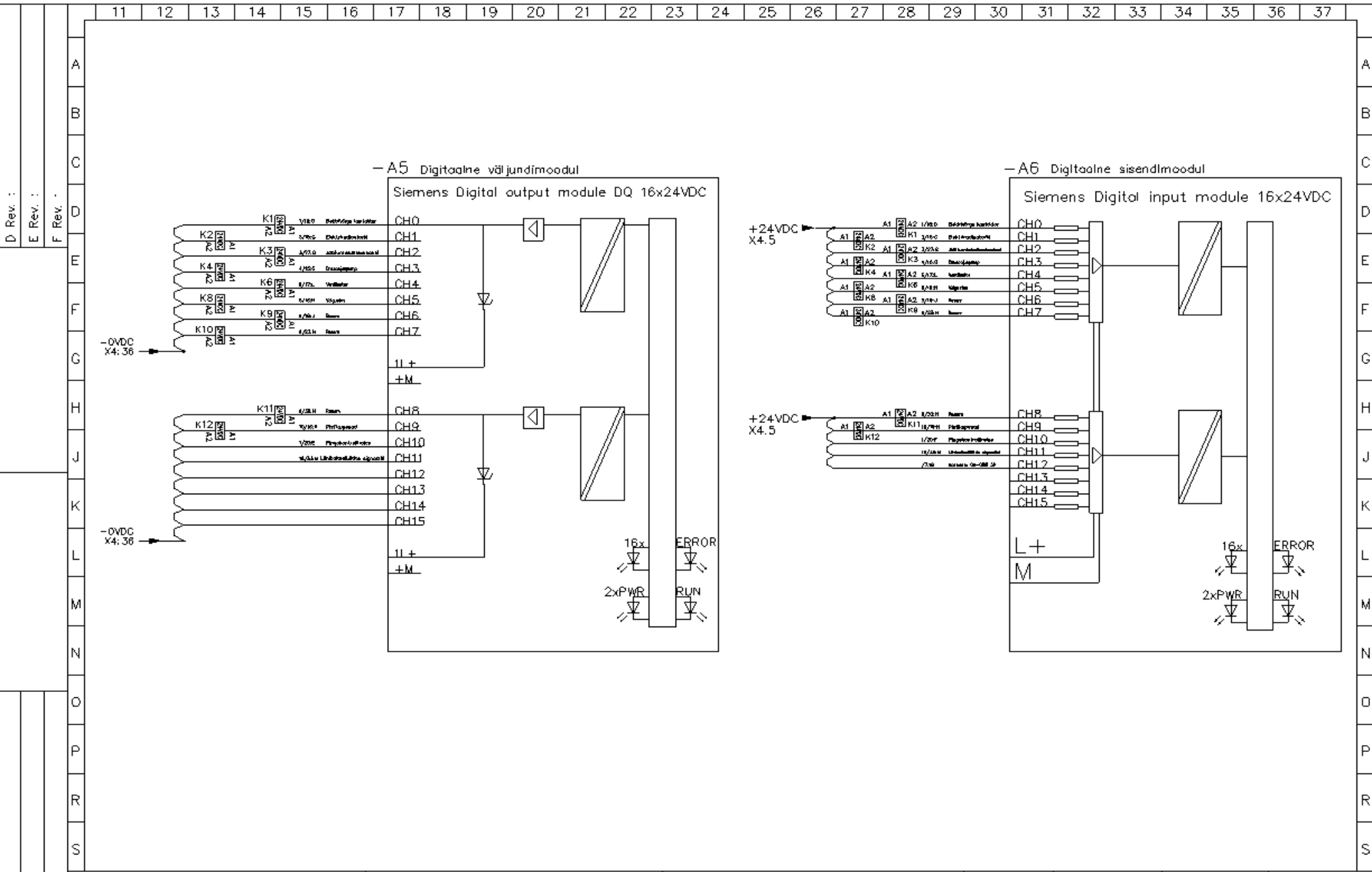
Plan. K.K. /24.3.2021	Object ID =HEJA	Electrical position +JAM	Job no.
Draw. K.K. /24.3.2021	Sheet 11/16	Drawing no. JAM_00_S1	
Check MaM /24.3.2021			

17.5.2021
17.5.2021



D Rev. :	E Rev. :	F Rev. :	ALAJAAMA ELEKTRISKEEMID JUHTIMISSÜSTEEMI TOIDE 2		Plan. K.K /24.3.2021	Object ID =HEJA	Electrical position +JAM	Job no.
A Rev. :	B Rev. :	C Rev. :			Draw. K.K /24.3.2021	Sheet 12 / 16	Drawing no. JAM_00_S1	
					Check MaM /24.3.2021			

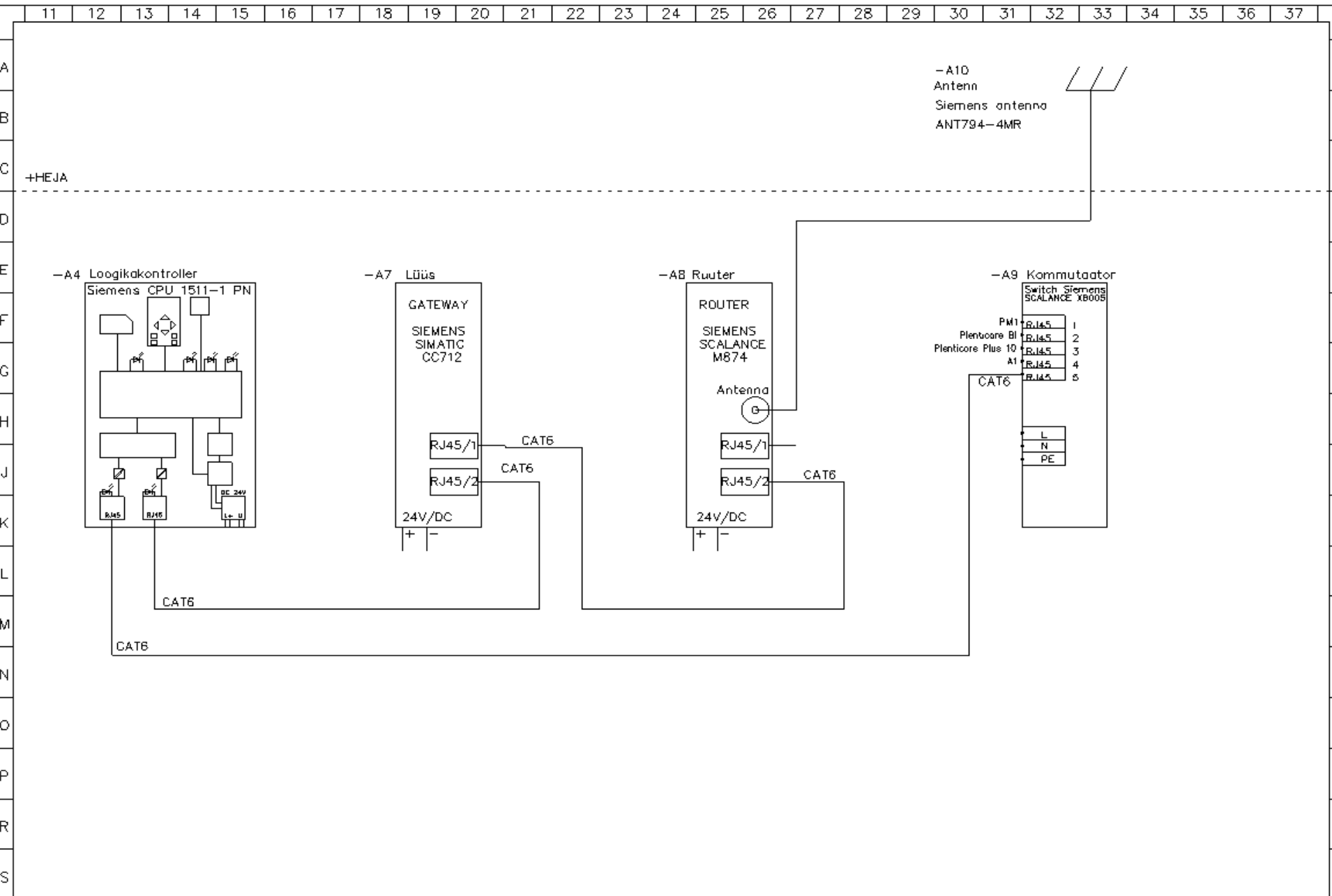
17.5.2021



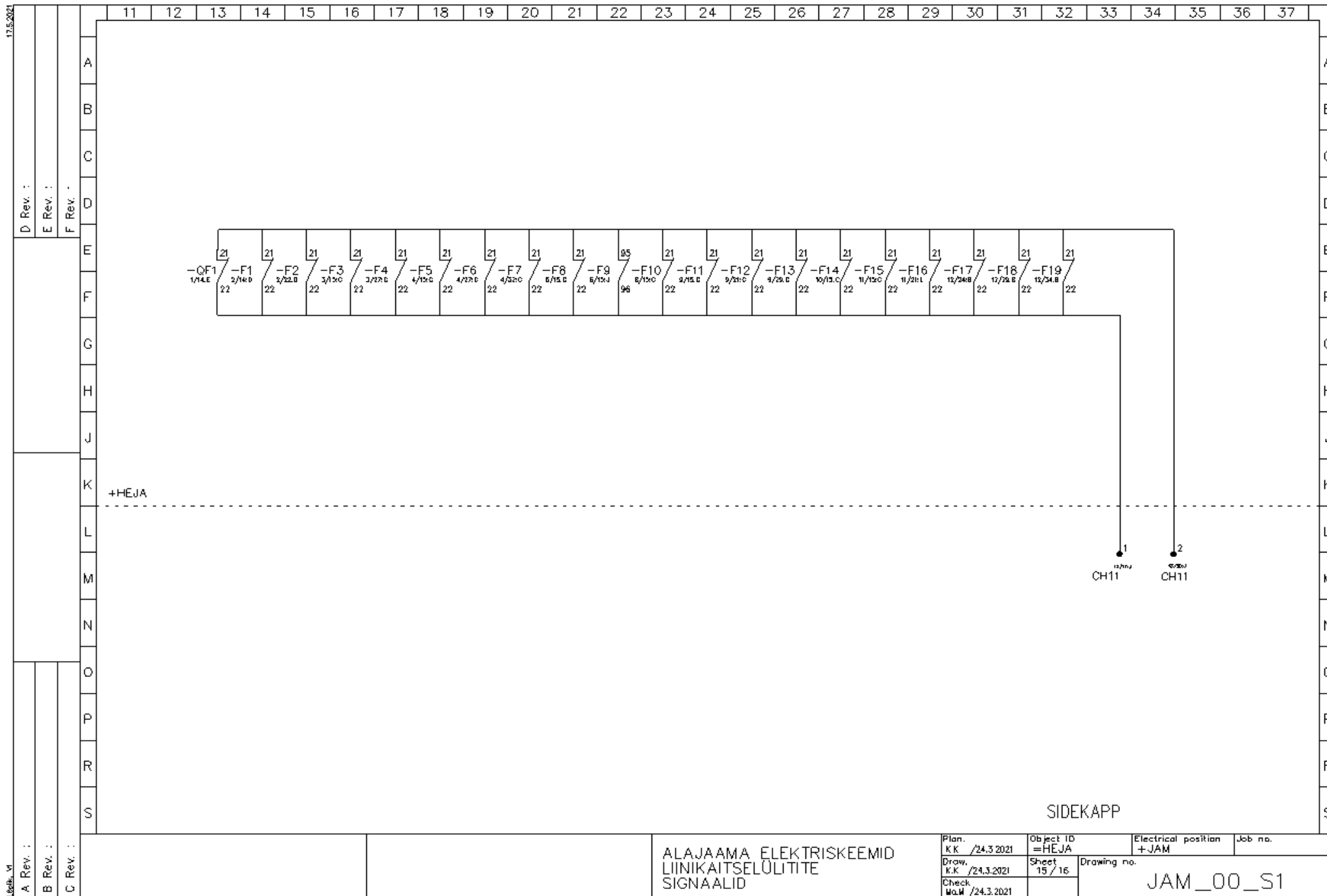
<p>D Rev. : E Rev. : F Rev. :</p>	<p>A Rev. : B Rev. : C Rev. :</p>	<p>ALAJAAMA ELEKTRISKEEMID DIGITAALSED VÄLJUNDID JA SISENDID</p>	<p>Plan. K.K /24.3.2021</p> <p>Draw. K.K /24.3.2021</p> <p>Check MaM /24.3.2021</p>	<p>Object ID =HEJA</p> <p>Sheet 13 / 16</p>	<p>Electrical position +JAM</p> <p>Job no. JAM_00_S1</p>
---	---	--	---	---	--

17.5.2021

D Rev. :
E Rev. :
F Rev. :
A Rev. :
B Rev. :
C Rev. :



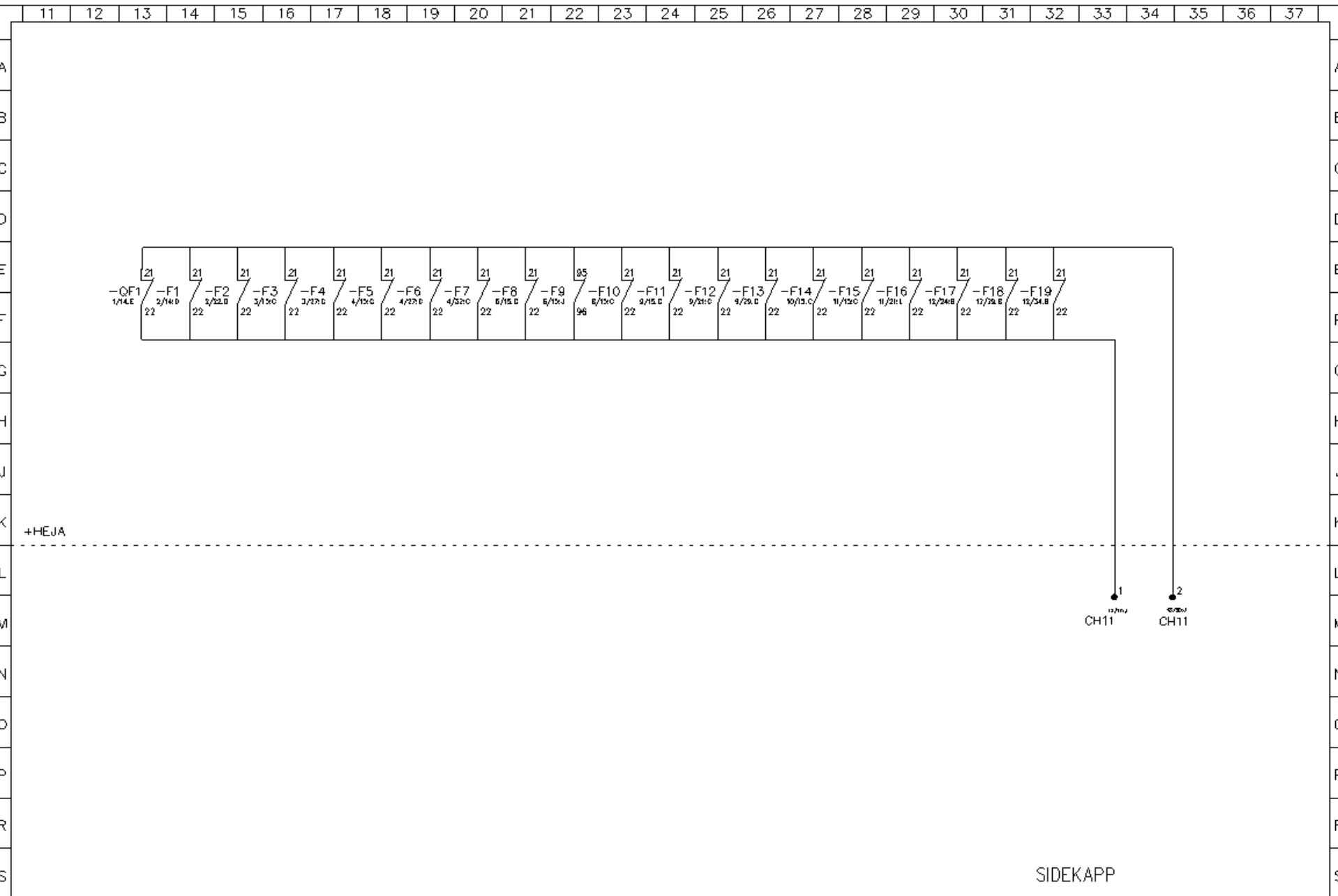
ALAJAAMA ELEKTRISKEEMID ETHERNET KOMMUNIKATSIOON		Plan. K.K /24.3.2021	Object ID =HEJA	Electrical position +JAM	Job no.
		Draw. K.K /24.3.2021	Sheet 14 / 16	Drawing no. JAM_00_S1	
		Check M.M /24.3.2021			



17.5.2021

17.5.2021

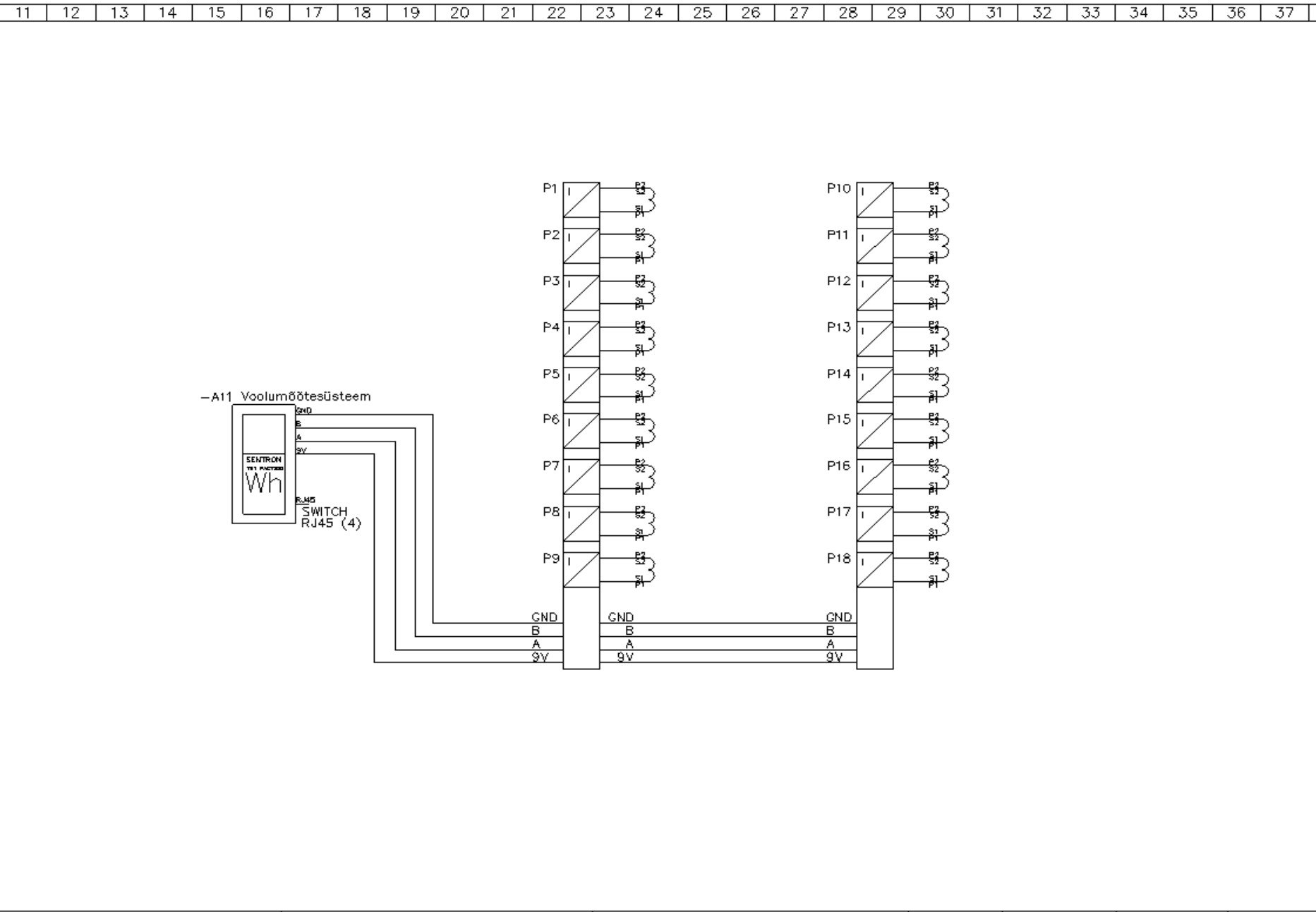
D Rev. :	
E Rev. :	
F Rev. :	
A Rev. :	
B Rev. :	
C Rev. :	



ALAJAAMA ELEKTRISKEEMID LIINIKAITSELÜLITITE SIGNAALID		Plan. K.K. /24.3.2021	Object ID =HEJA	Electrical position +JAM	Job no.
		Draw. K.K. /24.3.2021	Sheet 15 / 16	Drawing no. JAM_00_S1	
		Check M.M. /24.3.2021			

17.5.2021
 17.5.2021
 17.5.2021

D Rev. :
E Rev. :
F Rev. :
A Rev. :
B Rev. :
C Rev. :



ALAJAAMA ELEKTRISKEEMID
 VOOLUTARBE MÕOTMINE

Plan. K.K. /24.3.2021	Object ID =HEJA	Electrical position +JAM	Job no.
Draw. K.K. /24.3.2021	Sheet 16 / 16	Drawing no. JAM_00_S1	
Check MaM /24.3.2021			