



EESTI MAAÜLIKOOL
Tehnikainstituut

Steven Visla

**ELEKTERVEESOOJENDI KASUTAMINE HOONE
KÜTTESÜSTEEMIS PV PANEELIDE OTSEÜHENDUSEGA**

USING ELECTRICAL BOILER WITH SOLAR PANEL DIRECT
CONNECTION IN BUILDING HEATING

Magistritöö
Energiakasutuse õppekava

Juhendaja: Janar Kalder, *PhD*

Tartu 2021

| | | | |
|---|---------------|---------------------------|-----------|
| Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014 | | Magistritöö lühikokkuvõte | |
| Autor: Steven Visla | | Õppekava: Energiakasutus | |
| Pealkiri: Elekterveesoojendi kasutamine hoone küttesüsteemis PV paneelide otseühendusega | | | |
| Lehekülgi: 49 | Jooniseid: 11 | Tabeleid: 8 | Lisaid: 5 |
| Osakond / Õppetool: Energiakasutuse õppetool ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: 4. Loodusteadused ja tehnika; 4.17. Energeetikaalased uuringud; T140 Energeetika Juhendaja(d): Janar Kalder Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu 2021 | | | |
| <p>Töö annab ülevaate hetkel päikesepaneelide kasutuse sagenemisest, nende tüüpidest ning erinevatest paigaldusviisidest. Töö eesmärk on välja selgitada, kui palju on võimalik hoone küttesüsteemis tõsta taastuvenergia osakaalu, kui kasutatakse päikesepaneeli elekterveesoojendi otseühendusega. Töö eesmärgi saavutamiseks loodi hoone küttevajaduse mudel SciLab 6.0.2 keskkonnas kasutades Coselica plokkide. Mudeli modelleerimise käigus tuli välja, et aastane hoone taastuvenergia osakaal on 11,30%. Kui vaadata taastuvenergia osakaalu kuu lõikes, siis kõige suurem osakaal oli mai kuus (33,06 %), järgmiseks tuli aprilli kuu (30,42 %) ja siis septembri kuu (27,84 %). Arendusena pakutakse välja suurema päikesepaneelide koguvõimsusega paneelidekompleksi kasutamist, et katta paremini soojavajadust.</p> | | | |
| Märksõnad: taastuvenergia, mudel, energia, võimsus | | | |

| | | | |
|--|-------------|--|---------------|
| Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014 | | Abstract of Master's Thesis | |
| Author: Steven Visla | | Curriculum: Energy application engineering | |
| Title: Using electrical boiler with solar panel direct connection in building heating | | | |
| Pages: 49 | Figures: 11 | Tables: 8 | Appendixes: 5 |
| Department / Chair: Chair of Energy Application Engineering Field of research and (CERC S) code: 4. Natural Sciences and Engineering; 4.17. Energetic Research; T140 Energy research Supervisors: Janar Kalder Place and date: Tartu 2021 | | | |
| <p>In this research, overview of the increasing use of solar panels is given, where also their types and different installation methods are described. The aim of this thesis is to find out how much it is possible to increase the percentage of renewable energy in the building heating system, using solar panels with direct connection. To achieve the aim, model of the building's heating demand was created using SciLab 6.0.2 with Coselica blocks. When modeling the model, it turned out that annual share is 11,30%. If share of renewable energy is viewed by month, then it turns out that largest share was in May (33,06%), followed by April (30,42%) and then September (27,84%). In future, it is proposed to use solar panels, which have higher total power to cover the heat demand of a building.</p> | | | |
| Keywords: renewable energy, model, energy, power | | | |

SISUKORD

| | |
|---|----|
| LÜHENDID | 5 |
| SISSEJUHATUS | 6 |
| 1. KIRJANDUSE JA TEHNOLOOGIA ÜLEVAADE | 8 |
| 2. PÄIKESEPANEELID | 10 |
| 2.1. Päikesepaneelide tüübid | 10 |
| 2.2. Paigalduse tüübid | 11 |
| 3. ELEKTRIENERIGA MUUNDAMINE | 15 |
| 3.1. Inverteri vajadus | 15 |
| 3.2. Jadainverter | 16 |
| 3.3. Võimsuse optimeeriija | 16 |
| 3.4. Mikroinverter | 17 |
| 4. METOODIKA | 18 |
| 4.1. Automaatreguleerimine | 18 |
| 4.2. Valemid | 20 |
| 4.3. Mudeli algandmed | 22 |
| 5. MUDEL | 24 |
| 5.1. Mudeli kirjeldus | 24 |
| 5.2. Päikesepaneelide ühenduse juhtimine | 25 |
| 5.3. Andmete failist lugemine | 26 |
| 5.4. Päikesepaneeli võimsus | 27 |
| 5.5. Küte päikesepaneelidest | 28 |
| 5.6. Küte võrgust | 30 |
| 5.7. Ruumi mudelid | 31 |
| 6. TULEMUSED | 33 |
| 7. ARUTELU | 35 |
| KOKKUVÕTE | 38 |
| KASUTATUD KIRJANDUS | 40 |
| LISAD | 43 |
| Lisa 1. Skaleerimise funktsioon | 44 |
| Lisa 2. Failist lugemise funktsioon | 45 |
| Lisa 3. Kütteelemendi ühendusviisi lülitite valiku funktsioon | 46 |
| Lisa 4. Mudeli üldskeem | 47 |
| Lisa 5. Andmete salvestamine | 48 |

LÜHENDID

| | |
|-------------------|---|
| c | – materjali erisoojus, J/kg · K; |
| C | – materjali soojusmahtuvus, J; |
| $C_{piirded}$ | – mudelis piirete soojusmahtuvus, J; |
| $C_{põrand}$ | – mudelis põranda soojusmahtuvus, J; |
| C_{tuba} | – mudelis toa soojusmahtuvus, J; |
| d | – materjali paksus, m; |
| dt | – regulaatori integreerimisaeg, s; |
| $G_{piirded}$ | – mudelis piirete soojusjuhtivus, W/K; |
| $G_{põranda alt}$ | – mudelis põranda betooni all oleva temperatuuri soojusjuhtivus, W/K; |
| k_i | – regulaatori integraalosa tegur, s; |
| k_p | – regulaatori proportsionaalne tegur; |
| m | – materjali mass, kg; |
| R | – materjali soojustakistus, m ² · K/W; |
| U | – materjali U-arv, W/m ² · K; |
| U_{arv} | – Soojusjuhtivus, W/m ² K; |
| V | – materjali pindala, m ² ; |
| $V_{piirded}$ | – piirete pindala, m ² ; |
| x | – regulaatori sisend; |
| y | – regulaatori väljund; |
| λ | – materjali soojuserijuhtivus, W/m · K; |

SISSEJUHATUS

Päikesepaneelide kasutamine on tõusvas trendis, kuna tehnoloogia on läinud aastatega järjest odavamaks ning päikesepaneelide efektiivsus paremaks. Vastavalt päikesepaneelide süsteemi suurusele on võimalik ka terve hoone päevane elektrivajadus täita, sealhulgas toita igapäevaseid koduseadmeid ning samuti kütta hoonet. Lisaks on võimalik kohapeal mitte tarbitud elektrienergiat müüa võrku.

Magistritöö peamine eesmärk on välja selgitada, kui palju on võimalik hoone küttesüsteemis tõsta taastuenergia osakaalu, kui kasutatakse päikesepaneeli elekterveesoojendi otseühendusega. See tähendab, et süsteemis ei kasutata inverterit päikesepaneelidest tulevat elektrienergia muundamiseks. Töö esimeses osas antakse ülevaade kirjandusest ning tehnoloogiast, sealjuures kirjeldatakse taastuenergia arengut Eesti elektrivõrgus. Lisaks antakse ülevaade tavapärasest päikesepaneeli süsteemist ning võimalustest süsteemi vastavalt soovile kohandada.

Töö teises osas kirjeldatakse peamisi päikesepaneeli tüüpe ja nende omadusi, mida võrreldakse omavahel, ning nende valmistamisprotsessi. Lisaks antakse ülevaade päikesepaneelide paigaldamise tüüpidest, nende erinevustest, eelistest ning keskkonda sobivusest. Töö kolmandas osas selgitatakse millisel juhul on päikesepaneelide süsteemis olev inverteri vajalik ning antakse ülevaade inverteri erinevatest tüüpidest. Lisaks kirjeldatakse võimalust süsteemi ühendada elektrivõrguga ning inverterite üldisi omavahelisi erinevusi ja võimalusi.

Töö neljandas osas tutvustatakse automaatreguleerimise vajadust ning kirjeldatakse selle erinevaid liike. Samuti antakse ülevaade mudeli koostamisel vaja läinud arvutusvalemitest ja tuuakse näiteid nende kasutamisest. Lisaks esitatakse mudeli algandmed. Töö viiendas

osas kirjeldatakse hoone küttevajaduse mudelit ja selle osasid. Muuhulgas selgitatakse mudeli koostamiseks vajalikke funktsioone ning kirjeldatakse mudelis kasutatavat ühendusviisi juhtsõnale vastavaid kütteelemendi lülitusi.

Töö kuuendas osas tuuakse välja töö käigus saadud tulemused. Töö seitsmendas osas kirjeldatakse saadud tulemusi ning arutletakse nende üle, sealjuures leitakse taastuvenergia osakaal kalendrikuude lõikes.

Käesoleva magistritöö hoone küttevajaduse mudel on koostatud kasutades SciLab 6.0.2 versiooni. SciLabi lisana on kasutatud Coselica mudeli plokkide, mis lihtsustab küttevajaduse määramiseks vajaliku mudeli koostamist.

1. KIRJANDUSE JA TEHNOLOOGIA ÜLEVAADE

Taastuvatest elektrienergiaallikatest on enim kasutatavad päikesepaneelid, mille kogu installeeritud võimsus suureneb iga aastaga aina enam. Eestis on kaheksa aasta jooksul (2011 – 2019) elektrivõrguga liitunud päikeseenergia toomise võimsus ligi 600 korda tõusnud. Täpsemalt oli 2011. aastal vastav võimsus 0,2 MW, 2013. aastal 1,5 MW, 2017. aastal 18,46 MW ning 2019. aastal juba 118,31 MW. Sarnase suure kasvu on teinud Eleringi elektrivõrku müüdiv päikesepaneelidest saadud elektrienergia hulk, kuue aastaga (2013 – 2019) on elektrienergia kogus suurenenud ligi 575 korda, vastavalt 2013. aastal müüdi 94 MW·h ja 2019. aastal 54 GW·h. [1, 2, 3]

Päikesepaneelidest tulevat elektrienergiat kasutatakse erinevates majandusharudes peamiselt siis, kui eesmärgiks on õhu soojendamine, põllumajandussaaduste kuivatamine või üldine vee soojendamine. Päikesepaneelide võimsus sõltub paneeli temperatuurist ning paneelile langevast päikesekiirgusest. Eesmärgiga kasutada päikesepaneeli kõige efektiivsemalt ära, ühendatakse päikesepaneel suurima võimaliku energia saamiseks seadmega, millel on maksimaalse võimsuse otsimise funktsionaalsus. Küll aga on seadme negatiivseks küljeks selle kõrge hind, mis võib suurte võimsuste korral küündida isegi tuhandete eurodeni. [4]

Tavapärast kasutatakse päikesepaneelidega elektritoomise süsteemis mitmeid päikesepaneeli, akusid ning invertere. Saadud elektrienergiaga laaditakse akusid, millesse salvestatud elektrienergiat on võimalik kasutada tavapärasel majapidamises inverteri abil. Inverteriga muundatakse akudest tulev alalisvool seadmete jaoks kasutatavaks vahelduvvooluks. Kirjeldatud süsteemi on võimalik näiteks kasutada elektrienergia tagavarana, kui elektrivõrgu ühendus peaks katkema, või kohtades, kus ei ole üldse ühendatud elektrivõrku. Kuigi peamiselt kasutatakse süsteemi koos akudega, siis päikesepaneeli on võimalik kasutada ka ilma nendeta. [5]

Akude puudumine süsteemis tähendab seda, et päikesepaneelidest saadud elektrienergiat on võimalik kasutada ainult siis, kui päikesepaneelidele langeb päikesevalgus. Paneelidele langev päikesevalgus sõltub omakorda päikesepaneelide süsteemi geograafilisest asukohast, ilmast ja muudest sarnastest teguritest. Seetõttu tuleks päikeseenergiat kasutatavates süsteemides arvestada olukorraga, kus antud süsteem ei saa töötada pidevalt. Selle kompenseerimine võib viia installatsioonikulude suurenemiseni. [5]

Seadmete toitmise ilma inverterita ehk otse alalisvooluga toob kaasa efektiivsema elektri kasutamise, kuna inverteriga voolu muundamisel tekivad elektrikaod. [5]

2. PÄIKESEPANEELID

2.1. Päikesepaneelide tüübid

Päikesepaneelid koosnevad fotogalvaanilistest elementidest, mida on võimalik toota erinevatest kristallilistest ränidest. Peamised elemendid, millest päikesepaneele koostatakse, on monokristallilisest ränist valmistatud elemendid, polükristallilisest ränist valmistatud elemendid ning õhukesekihilised elemendid.

Enamik monokristallilist räni on toodetud kasutades Czochralski meetodit. Seda meetodit kasutades kasvatatakse silindrikujuline monokristalliline räni, mille pikkus on kuni 2 meetrit ning mis kaalub sadu kilogramme. Seejärel lõigatakse kasvatatud räni õhukesteks kihtideks, mida kasutatakse hilisemal töötlemisel. [6]

Monokristallilise räni lõigatud kihid meenutavad värvuselt musta või tumedat sinist tooni. Elemendi peale kinnitatud metalljuhtide abil on võimalik päikesepaneeli poolt tekitatud elektrienergiat elemendist ülejäänud süsteemiga ühendada. Monokristallilise ränist päikesepaneeli elemendi tootmine kasutab rohkem ressursse, kuid omavad suuremat efektiivsust kui teist tüüpi elemendid. Kuna monokristallilisest ränist valmistatud elemendid on suurema efektiivsusega, siis sellest koosnev paneel toodab rohkem elektrienergiat võrreldes samasuurte teist tüüpi elementidega. [7, 8]

Polükristalliline räni on valmistatud metallurgilisest ränist, kasutades Siemensi meetodit. Valmistatud räni on analoogiliselt monokristallilisele lõigatud õhukesteks kihtideks, mida kasutatakse päikesepaneeli elementide, integraallülituste ning teiste pooljuhtseadmete

valmistamiseks. Polükristalliline räni koosneb väikestest kristallidest, mis annavad elemendile helkiva välimuse. [6]

Polükristallilisest ränist valmistatud päikesepaneeli elementidel on väiksem temperatuuri taluvus, mistõttu ei ole kuumadel ilmadel antud elemendist tehtud päikesepaneelid nii efektiivsed. Nende tootmine on arenenud nii kaugele, et järjest rohkem on nende efektiivsus ligilähedasem monokristallilisest ränist toodetud päikesepaneeli elementidele. Lisaks on nende tootmine keskkonna sõbralikum, kuna neid on vaja vähem mehaaniliselt töödelda. [7, 9]

Õhukesekihilised elemendid on valmistatud väga õhukestest fotogalvaanilistest materjalidest, nagu näiteks räni, kaadmium, vask ja muud taolised. Antud elemente on võimalik valmistada nii jäikadena kui ka painduvate elementidena, see võimaldab päikesepaneeli vastavalt soovile või nõudlusele paremini erinevate elementide sisse integreerida. Õhukesekihiliste elementide tootmine on kallim ning nende efektiivsus on väiksem kui tänapäeva mono- ja polükristallilisest ränist toodetud elementide korral, mistõttu ei ole antud elemendid paljudes riikides enam kasutusel. Enamus õhukesekile tehnoloogial põhinevaid päikesepaneeli on valmistatud kaadmiumtelluriidist (CdTe). Jäikadel päikeseelementidel on pealne kiht klaasist, mis kaitseb päikesepaneeli elemente. Lisaks on võimalik valmistada elemente amorfse räni (a-Si) või vaskindium-gallium-seleniidi (CIGS) materjalist. [7, 10]

2.2. Paigalduse tüübid

Peamiselt on päikesepaneelide paigaldamiseks kaks eri viisi: paigaldus maapinnale või katusele. Maapinnale paigaldatud päikesepaneelide üheks eeliseks on see, et läheneda saab väga paindlikult ning mõlemal pool paneeli on parem jahutus, mistõttu jahtuvad sellise paigaldusviisiga päikesepaneelid paremini kui katusele paigaldatud päikesepaneelid. See tagab maapinnale paigaldatud päikesepaneelide suurema efektiivsuse. [11]

Katusele paigaldatud päikesepaneelide installatsioon on odavam, kuna põhistruktuuriks/aluseks, mille peale paneelid kinnitatakse, on hoone katus. See säästab kinnitusmehhanismi ja toetuste ehitamise ning maapinna ettevalmistamise osas. Sellise paigaldusviisi negatiivseks pooleks on nende väike reguleerimis võimalus, mistõttu ei ole võimalik paneele suunata päikese poole, nagu on võimalik teha maapinnale paigaldatud päikesepaneelidega. [11]

Päikesepaneele katusele paigaldades peab arvestama olukorraga, kus tarbimise suurenedes ei pruugi olla võimalik päikesepaneele juurde lisada, kui kogu katus on juba nende poolt hõivatud. Maapinnale paigaldades on üldjuhul päikesepaneelide lisamine tarbimise suurenedes lihtsam. [12]

Maapinnale on võimalik paigaldada päikesepaneele mitmel viisil, kuid sobilik paigaldusviisi valik sõltub suuresti konkreetsest maapinnast, kuhu soovitakse päikesepaneele paigaldada. Enim kasutatavad paigaldusviisid on: vundamendile paigaldus, raskusega jalg, posti kinnitus või mitme posti kinnitus.

Vundamendile kinnitatud päikesepaneelide paigaldusviisi kasutamise käigus tuleb maapinnas ette valmistada: esmalt tuleb valada betoonist vundament, mille järel paigaldada maapinnaga vertikaalsed postid. Antud paigaldusviis nõuab enne tööga alustamist pinnase analüüsi kontrollimaks pinnase sobivust sellise kinnitusviisi jaoks. [11]

Ballastiga jala paigaldusviisi eeliseks on see, et maapinda ei ole vaja puurida ega analüüsida. Pinnasele asetatakse raskusega jalad, mis on ette nähtud päikesepaneelide kinnitamiseks ja hoidmiseks vajalikus suunas. Sellise paigaldustüübi jaoks on vajalik, et maapind oleks tasane. [11]

Postiga kinnitusviisi eeliseks on see, et maapind ei pea olema tasane nagu nõuavad seda ballastiga jalad. Maapinna sisse puuritakse auk ning post kinnitatakse betoonist ankruga maasse. Üldjuhul on antud kinnitusviisist piisav päikesepaneelide kinnitamiseks, mõningatel juhtudel, kui maapind ei ole sobiv või tegemist on suure tuulise maa-alaga, võib olla vajalik lisakinnituste kasutamine. Selle kinnitusviisi eeliseks on see, et päikesepaneel on võimalik liigutada sobivas suunas. [11]

Mitme postiga kinnitusviis on sarnane eelmisele kinnitusviisile, kuid erineb selle poolest, et kõik päikesepaneelid on paigaldatud horisontaalselt ritta. Antud kinnitusviisi eeliseks on see, et päikesepaneelide rida on võimalik toetuste lisamisel jätkata. Lisaks on selle kinnitusviisi eeliseks võimalus luua suuri süsteeme ning muuta paneelide kaldenurka. [11]

Sarnaselt maapinnale kinnitamiseviisidega, on ka hoone katusele võimalik paigaldada päikesepaneel erinevatel viisidel. Hoone katusel kasutatavateks päikesepaneelideks on tavaline päikesepaneel klambritega, katusesindel päikesepaneel ning katusekivi päikesepaneel. [13]

Olemasoleva katuse peale on võimalik paigaldada tavalisi päikesepaneeli spetsiaalsete klambritega, kuid selle tõttu päikesepaneelid ei ole peidetud ning neid on kergem märgata. Tavapärased päikesepaneelid on kasutusel olnud juba pikka aega, mistõttu on nad efektiivsemad ning nendega ollakse rohkem tuttavam, mis tähendab ka, et on suurem hulk ettevõtteid, kes pakuvad nende paigaldust. Antud lahendust on võimalik kasutada peaaegu kõiksugu katusetüüpide korral ja ei pea ilmtingimata katma kogu katust, vaid saab paigaldada vastavalt hetke vajadusele. [13]

Katusesindli tüüpi katusele paigaldatavad päikesepaneeli elemendid on loodud selliselt, et need meenutaksid välimuselt sindelkatusel kasutatavaid bituumensindlit. Sellist tüüpi päikesepaneeli kasutades peab antud tüüpi puhul asendama kogu katust katva osa. Katuse sindlid koosnevad erinevatest sinist ning musta tooni sindlitest, mis meenutab välimuselt tavalist bituumensindel katust. [13]

Katusekivid, kus päikesepaneeli elemendid on ehitatud kivi sisse või kivi kujuliselt, on olnud kasutusel lühikest aega, mistõttu ei olda täiesti kursis nende negatiivsetest külgedest ja vastupidavusest. Kuna tegemist on pigem uuema tehnoloogiaga, on hetkel vähe ettevõtteid, kes neid paigaldab. Antud tüüpi lahenduse kasutamist piirab nõuded katusele. Kuna tegemist on katusekivi sisse ehitatud päikesepaneeli elementidega, siis nende asendit ei ole võimalik muuta. Asendi määrab ära katuse nurk, hoone paiknemine geograafiliselt ning katuse ehitus. Antud lahendus on kõige sobilikum kasutada siis, kui tegemist on uue ehitatava hoonega. Üldjuhul peetakse antud lahendust vähem efektiivseks võrreldes eelnevalt kirjeldatutega, kuna see ei sobitu kõikide katustega ning päikesepaneeli elemente ei ole võimalik keerata.

[13]

3. ELEKTRIENERIGA MUUNDAMINE

3.1. Inverteri vajadus

Inverterit kasutatakse juhul, kui soovitakse päikesepaneelidest tulevat alalisvoolu teisendada ümber vahelduvvooluks, mida saab kasutada hoone elektriahelates ja seadmete toiteks. Lisaks voolu teisendamisele on võimalik inverteriga jälgida päikesepaneelide tootlikkust ning statistikat. [14]

Päikesepaneeli süsteemi on võimalik siduda elektrivõrguga. Kui päikesepaneelide poolt toodetav elektrienergia kogus on suurem kui ära kasutatav elektrienergia kogus, siis on võimalik müüa see ülejääk võrku. Samas võimaldab selline süsteem öisel ja vähese päikesevalguse ajal tarbida osaliselt või täielikult elektrienergiat võrgust. Lisaks on võimalik kasutada *off-grid* süsteemi jaoks mõeldud inverterit, mis ei ole ühendatud elektrivõrguga ja salvestab päikesepaneelidest saadud elektrienergia akudesse. Vastavalt vajadusele toodetakse akudest hoonele vahelduvvoolu. [15]

Invertereid jagatakse peamiselt kolme suuremasse rühma: jadainverterid, võimsuse optimeerijad ning mikroinverterid. [15]

3.2. Jadainverter

Jadainverteri eeliseks on süsteemi lihtsus, kuna süsteemi toimimiseks on vaja vaid ühte inverterit. Kuna kõik päikesepaneelid peavad olema ühendatud jadana, on päikesepaneelide ja inverteri vaheline ühenduste arv väiksem, mis vähendab võimalust ühendamisel eksida. [16]

Seda tüüpi inverteeri kasutamiseks on vajalik päikesepaneelid ühendada ühe jadana. Vastavalt inverterite võimekusele on võimalik päikesepaneelid ühendada kas ühe pika jadana või kui inverter võimaldab, siis mitme eraldi jadaahelana. Antud süsteem on odavam teistest inverteritest, kuid omab ka selle juures puudusi. Üheks olulisemaks puuduseks on see, et ühe päikesepaneeli võimsuse langus mõjutab ka jadas olevate teiste päikesepaneelide võimsust. Päikesepaneeli väiksem võimsus võib olla põhjustatud paneeli vigastusest, varjudest, lindudest või näiteks mustusest. [15]

Süsteemi kõige efektiivsema kasutuse jaoks peab inverter töötama peaaegu täisvõimsusel. See tähendab uute päikesepaneelide lisamisel lisa inverteri soetamist ning võrku ühendamist. Lisaks ei ole võimalik antud süsteemis jälgida individuaalselt päikesepaneelide tööd. [16]

3.3. Võimsuse optimeerija

Süsteemi kasutatakse koos jadainverteri ühendusega. Võimsuse optimeerijad on ühendatud iga päikesepaneeli külge eraldi. Tegemist on MPPT (*Maximum Power point tracker*) ehk maksimaalse võimsuspunkti jälgijaga, mistõttu ühele paneelile langev madalam päikesevalguse hulk ei mõjuta kogu süsteemi. Antud lahendus annab võimaluse iga päikesepaneeli eraldi jälgida ning tuvastada, kas mingi paneel töötab teistest halvemini. [15]

Kuna päikesepaneelidele ei lange koguaeg samapalju valgust, siis päikesepaneelide poolt väljastatav pinge ning vool on muutuv. MPPT kontrolleri leiab parima pinge ning voolu, tänu millele on võimalik saavutada päikesepaneelide maksimaalne võimsuspunkt. Antud lahendus tähendab seda, et kasutatakse päikesepaneelidest kogu saadaolev võimsus. [17]

Süsteemi negatiivseks küljeks on vajadus päikesepaneelid ühendada üksteisega jadamisi, mis võib keerulisema katuse või päikesepaneelide paigutuse korral osutada probleemiks. Lisaks on piiritletud, mitu päikesepaneeli võib süsteemi ühendada. [15]

3.4. Mikroinverter

Mikroinverterid paigaldatakse samuti iga päikesepaneeli külge eraldi, kuid antud süsteem muundab päikesepaneelist välja tuleva pinge kohe vaheldusvooluks, mis tähendab, et keskne inverter puudub. Selle süsteemi tugevaks küljeks on see, et ühele päikesepaneelile langev päikesevari ei mõjuta teiste päikesepaneelide tööd. Lisaks ei ole piiranguid päikesepaneelide omavahelisele ühendusele, st päikesepaneelid ei pea olema ühendatud üksteisega jadamisi. [15]

Sarnaselt võimsuse optimeerijaga on ka sellel süsteemil võimalik päikesepaneeli eraldi monitoorida ning vajadusel tuvastada halvasti töötavat paneeli. Sooviga tulevikus lisada uusi päikesepaneeli või kui katuse ehitus on keeruka kujuga, on antud süsteem kõige kasutajasõbralikum. Kuigi süsteem on paindlik paljude lahenduste jaoks, on antud süsteem kõige kulukam. [15]

4. METOODIKA

4.1. Automaatreguleerimine

Automaatreguleerimine on vajalik, kui süsteem peab järgima seadistatud suurust, kuid tegelik suurus on mõjutatud erinevatest teistest teguritest. Näiteks sõltub katla võimsuse reguleerimine välitemperatuurist ja tarbitavast võimsusest ning sõiduki püsikiirusehoidja reguleerimine sellest, kas sõiduk sõidab allamäge, ülesmäge või tasase maa peal. Käesoleva töö hoone küttevajaduse mudelis kasutatakse automaatreguleerimist päikesepaneelide poolt väljastatava võimsuse imiteerimiseks ühendusskeemile.

Samuti kasutatakse antud töös automaatreguleerimist kütteelementide ühendusviisi valikul, mis sõltub soovitud ning mõõdetud ruumitemperatuuri vahest tingitud ennustavast (*feedforward*) ning tagasiside (*feedback*) reguleerimisest. Kui küttesüsteem on suure reageerimisajaga, siis kütte ennustav reguleerimine aitab süsteemis vältida suuri temperatuuri langusi. Kütte tagasiside reguleerimisega saavutatakse täpne soovitud temperatuur.

Automaatreguleerimises kasutatavad põhilised regulaatorid [18]:

- Positsioonregulaator;
- P-regulaator;
- PI-regulaator;
- PID-regulaator.

Positsioonregulaatori ehk positsioonilise reguleerimise käigus muutub regulaatori reguleeritav suurus alles siis, kui selle sisendi suurus on muutunud teatud väärtuse võrra. Sellise reguleerimise korral ei ole reguleeritav suurus sujuv vaid on hüppeline. Regulaatori

juures kasutatakse veel hüsterees väärtusi, mis annavad võimaluse reguleerimishetki nihutada. Antud reguleerimisviis on sobilik näiteks kompressori või ventilaatori juhtimiseks. [18]

P-regulaatori ehk proportsionaalse reguleerimise käigus muutub regulaatori reguleeritav suurus ajas siis, kui muutub regulaatori sisend, kusjuures reguleeritav suurus on sisendiga proportsionaalne. Regulaatori väljundi seos on toodud valemiga 1. [18]

P-regulaatori väljundsuuruse seoses [18]:

$$y = k_p \cdot x, \quad (1)$$

kus y on regulaatori väljund;

x – regulaatori sisend;

k_p – regulaatori proportsionaalne tegur.

Antud regulaatori juures muudetavaks väärtuseks on k_p , mis on regulaatori proportsionaalne tegur ehk vea võimendustegur.

PI-regulaatori ehk proportsionaal-integraalsel reguleerimisel on lisaks P-regulaatorile juurde toodud I-regulaator, mis tähendab, et regulaatorile on juurde lisatud omadus, kus regulaatori reguleeritav suuruse muutumise kiirus on mõjutatud regulaatori sisendi suurusest. Selline omadus võimaldab regulaatoril töötada ka juhul, kui regulaatori sisend ei muutu. Regulaatori väljundsuurus on toodud valemis 2. [18]

PI-regulaatori väljundi seos [18]:

$$y = k_p \cdot x + k_i \int x \cdot dt, \quad (2)$$

kus y on regulaatori väljund;

x – regulaatori sisend;

k_p – regulaatori proportsionaalosa tegur;

k_i – regulaatori integraalosa tegur;

dt – regulaatori integreerimisaeg, s.

Antud regulaatori juures muudetavaks väärtusteks on k_p , mis on regulaatori proportsionaalne tegur ehk vea võimendustegur ning k_i , mis on regulaatori integraalosa tegur.

PID-regulaatorit ehk proportsionaal-integraal-differentsiaalset reguleerimist kasutatakse olukordades, kus on vajalik regulaatori kiire toimimine ning süsteem reageerib muutustele kiiresti. Regulaatori diferentsiaalne osa mõjutab regulaatori kiirust, mis üritab prognoosida tekkivat viga. [18, 19]

4.2. Valemid

Soojusmahtuvus on materjali omadus soojust salvestada, kui seda soojendatakse, või välja anda, kui seda jahutatakse. Soojusmahtuvus kirjeldab soojushulka, mis on vajalik, et teatud kaaluga materjali temperatuuri mõjutada ühe kraadi võrra. Mida suurem on soojusmahtuvus, seda stabiilsemalt hoiab materjal ümbritseva keskkonna temperatuuri. [20]

Materjali soojusmahtuvust on võimalik leida, kui on teada materjali erisoojus ja materjali mass. Materjali soojusmahtuvust on võimalik leida valemiga 3 [21]:

$$C = c \cdot m, \quad (3)$$

kus C on materjali soojusmahtuvus, J;

c – materjali erisoojus, J/kg · K;

m – materjali mass, kg;

Võttes näiteks materjaliks telliskivi, mille erisoojus on 900 J/kg · K [22] ja kaal 5 kg, saadakse, et viie kilogrammi materjali temperatuuri tõstmiseks ühe kraadi võrra on vaja:

$$C = c \cdot m = 900 \cdot 5 = 4500 \text{ J/K.}$$

Soojustakistus on materjali omadus sooja hoida, mis tähendab, et mida suurem on materjali soojustakistus, seda halvemini kandub temperatuur üheltpoolt materjali teisele poole. [23]

Töös on kasutusel U-arv, mis on soojustakistuse pöördväärtus ning ka materjali soojusjuhtivus.

Kui on teada materjali soojuserijuhtivus, on võimalik leida materjali soojustakistus valemiga 4 [24]:

$$R = d \cdot \lambda, \quad (4)$$

kus λ on materjali soojuserijuhtivus, $W/m \cdot K$;

d – materjali paksus, m.

Kui on teada materjali soojustakistus, on võimalik leida materjali soojusjuhtivust (U-arv) valemiga 5 [24]:

$$U = \frac{1}{R}, \quad (5)$$

kus U on materjali U-arv, $W/m^2 \cdot K$;

R on materjali soojustakistus, $m^2 \cdot K/W$.

Kui on teada materjali U-arv, siis mudelis kasutatavaks suuruse leidmiseks on vaja U-arv korrutada pindalaga, millele see U-arv vastab. Mudelis kasutatavat suurust on võimalik arvutada valemiga 6:

$$G = U \cdot V, \quad (6)$$

kus U on materjali U-arv, $W/m^2 \cdot K$;

V – materjali pindala, m^2 .

4.3. Mudeli algandmed

Mudeli õigeks toimimiseks on vajalik arvutada erinevate hoone osade soojusmahtuvus ning soojustakistus. Neid on võimalik leida, kui on teada hoone mudeli algparameetreid. Hoone mudeli algparameetrid on toodud tabelis 1.

Tabel 1. Mudeli algparameetrid

| Kirjeldus | Suurus |
|--------------------------|----------------------------|
| Hoone pikkus | 15,0 m |
| Hoone laius | 10,0 m |
| Seina kõrgus | 3,0 m |
| Seina paksus | 0,2 m |
| Betoonpõranda paksus | 0,1 m |
| U-arv [25] | 0,17 W/(m ² ·K) |
| λ_{betoon} [26] | 1,6 W/(m·K) |
| PV paneelide koguvõimsus | 3000 W |

Arvutuste käigus kasutatud erisoojused ja tihedused on toodud tabelis 2.

Tabel 2. Arvutuste juures kasutatud erisoojused ja tihedused [27, 28, 29, 30]

| Liik | Erisoojus, J/(kg · K) | Tihedus, kg/m ³ |
|--------|-----------------------|----------------------------|
| Õhk | 1005 | 1,184 |
| Betoon | 880 | 2371 |
| Vill | 837 | 10 |

Mudelis kasutatav tubade soojusmahtuvus on leitud valemiga 3:

$$C_{tuba} = c \cdot m = 1005 \cdot (15 \cdot 10 \cdot 3) \cdot 1,184 = 535464 J.$$

Mudelis kasutatav hoone piirete soojusmahtuvus on leitud valemiga 3:

$$C_{piirdeed} = c \cdot m = 837 \cdot (2 \cdot (15 \cdot 3) + 2 \cdot (10 \cdot 3)) \cdot 0,2 \cdot 10 = 251100 J.$$

Mudelis kasutatav hoone põranda soojusmahtuvus on leitud valemiga 3:

$$C_{põrand} = c \cdot m = 880 \cdot (15 \cdot 10 \cdot 0,1) \cdot 2371 = 31297200 J.$$

Mudelis kasutatav hoone piirete soojusjuhtivus on leitud valemiga 6:

$$G_{piirdeed} = V_{piirdeed} \cdot U_{arv} = \left((10 \cdot 15) + (2 \cdot (15 \cdot 3) + 2 \cdot (10 \cdot 3)) \right) \cdot 0,17 = 51 W/K.$$

Mudelis kasutatav hoone põranda soojusjuhtivus on leitud valemiga 6:

$$G_{põrand} = U_{põrand} \cdot V_{põrand} = \frac{1}{\frac{d_{betoon}}{\lambda_{betoon}}} \cdot 150 = \frac{1}{\left(\frac{0,1}{1,6}\right)} \cdot 150 = 2400 W/K.$$

Mudelis kasutatav hoone betooni alt soojusjuhtivus on leitud valemiga 6:

$$G_{põranda alt} = V_{põrand} \cdot U_{arv} = (10 \cdot 15) \cdot 0,17 = 25,5 W/K.$$

5. MUDEL

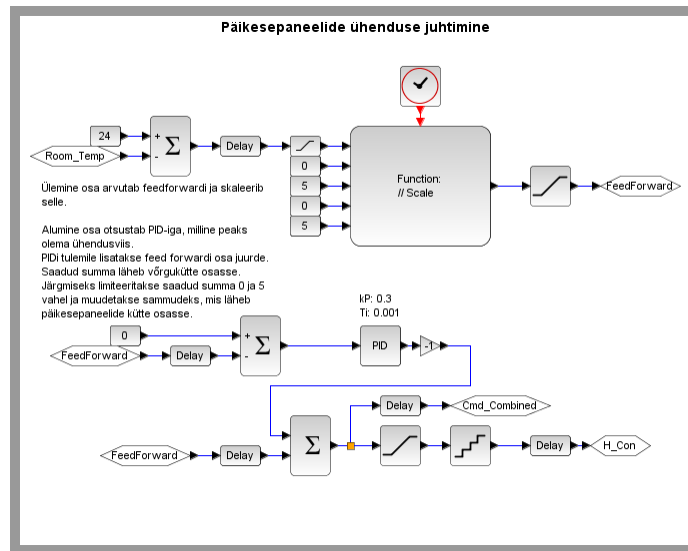
5.1. Mudeli kirjeldus

Töö aluseks on võetud abstraktne hoone, mille mudeli baasil hinnatakse hoone küttevajadust ning võimalust kütmissprotsessis taastuenergia osakaalu hoone kütmisest tõsta. Mudel on loodud SciLab 6.0.2 versioonis kasutades Coselica plokkide. Coselica plokkid võimaldavad SciLab tarkvaras luua lihtsamini hoone küttevajaduste hindamiseks mudelit. Mudeli läbiviimiseks on kasutatud lihtsustatud hoone skeemi, kus ei arvestata hoone erinevaid ruume, vaid leitakse kogu hoonele kuluvat küttevajadus. Mudeli koostamisel on kasutatud andmeid tabelist 2.

Mudeli koostamise käigus laaditakse mudelist väljastpoolt sisse välistemperatuur ning päikesepaneeli hetkel väljastatav võimsus. Failis on terve kalendriaasta välistemperatuur ning päikesepaneelide võimsus 5 minutiliste vahedega, mis on mõõdetud Tartus Eesti Maaülikoolis perioodil 01.12.2015 kuni 30.11.2016.

5.2. Päikesepaneelide ühenduse juhtimine

Päikesepaneelide juhtimine koosneb kahest osast: *feed-forward* (nn ülemine) ning *feed-back* osast (nn alumine). Antud ploki terviklik ühendus on toodud joonisel 1.



Joonis 1. Päikesepaneelide ühenduse juhtimise osa mudelis.

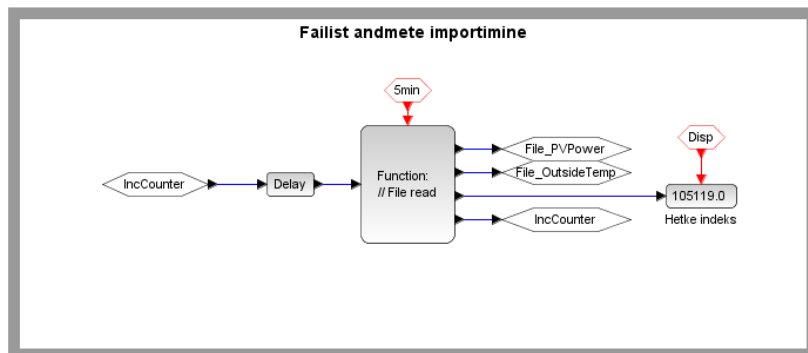
Ülemine osa koostab nn *feed-forward* osa, mis mõjutab päikesepaneelide ühendust hetkel olevast temperatuuride vahest. Kui soovitud temperatuuriks on näiteks seadistatud 24 kraadi ning hetkel on 20 kraadi, on vahe 4 kraadi. Antud tulemus liigub edasi skaleerimise funktsiooni (funktsiooni kirjeldatud lisas 1), kus on võimalik sisendväärtust skaleerida kas suuremaks või väiksemaks. Sellega on võimalik kütte etteereguleerimist vähendada või võimendada. Peale skaleerimist on võimalik tulem ära piirata maksimaalse ja minimaalse väärtuse vahele.

Ploki alumine osa koosneb PID regulaatorist, mille sisenditeks on summa konstandist 0 ning ülemises osas saadud tulemist. Selliste parameetrite korral üritab PID-regulaator saada ülemise osa tulemiks 0. PID-regulaatorist väljundsignaal on negatiivne, seega on vajalik see ümber keerata juhtimissüsteemi toimimiseks. Seda on võimalik saavutada korrutades tulemi läbi „-1“-ga. Ümber keeratud PID-regulaatori tulem liidetakse kokku *feed-forward* osast

saadud arvuga, mis moodustab kombineeritud ühendusviisi juhtsõna. Seejärel piiratakse kombineeritud ühendusviisi juhtsõna 0 ja 5 vahele, kuna päikesepaneelide taha ühendatud kütteelementide on võimalik ühendada viie erineva viisiga. Edasi muudetakse piiratud väärtus sammudeks, mis suureneb 1 võrra. Kombineeritud ühendusviisi juhtsõna piiramata väärtust kasutatakse „Küte võrgust“ plokis.

5.3. Andmete failist lugemine

Andmete failist lugemise jaoks on koostatud funktsioon. Funktsioon saab algandmed SciLabi „*Set Context*“ osast, kus loetakse mudeli mällu temperatuurid ühe vektorina ning päikesepaneeli võimsused teise vektorina. Ühendusskeem on toodud joonisel 2. Failist andmete lugemisel on võimalik kasutada ka SciLabi enda „*RFILE_f*“ ehk „*Read from input file*“ plokki.

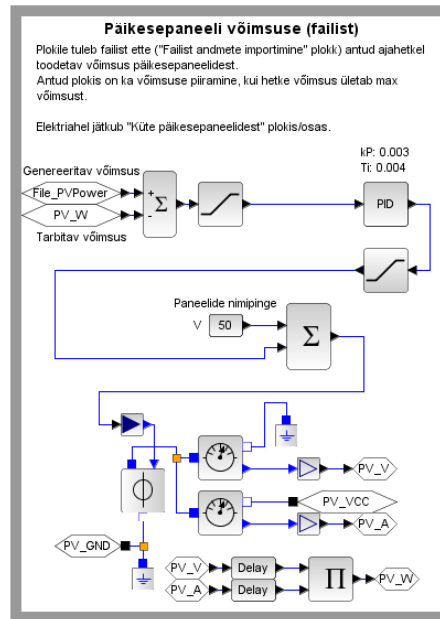


Joonis 2. Mudeli päikesepaneelide võimsuse ning välitemperatuuri failist lugemise osa.

Funktsiooni sisend on loetud rea indeks ning funktsiooni väljundid on failist hetke päikesepaneeli võimsus ning välitemperatuur. Funktsiooni kutsutakse iga mudeli 5 minuti tagant. Iga uue loetud rea indeks väljastatakse järgmise lugemiseks. Funktsiooni väljundeid kasutatakse päikesepaneeli võimsuse ning välitemperatuurina. Failist lugemise funktsiooni kood koos „*Set Context*“ osaga on toodud lisas 2.

5.4. Päikesepaneeli võimsus

Päikesepaneeli võimsuse juhtimine töötab sõltumatult päikesepaneelide hetkelisest ühendusviisist. Päikesepaneelide taha ühendatud küttelementides kasutatav pinge on genereeritud Coselica pinge allikaga. Ühendusskeem on toodud joonisel 3.



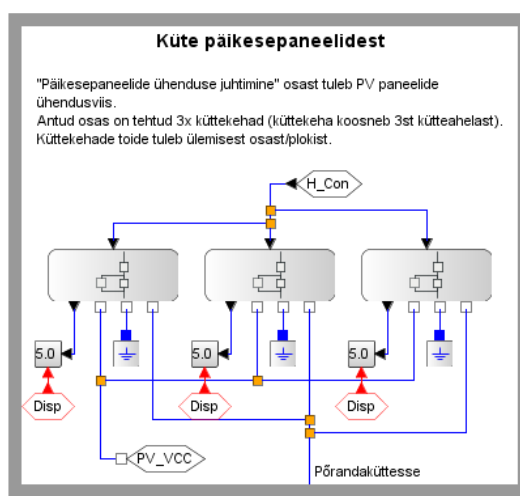
Joonis 3. Mudeli päikesepaneeli võimsuse juhtimise osa.

Maksimaalne võimalik tarbitava võimsuse juhtimine toimub PID-regulaatoriga. Enne PID-regulaatorit võrreldakse realselt päikesepaneelidest tulnud võimsust, mida saadakse faili lugemisel, ning küttesüsteemi poolt hetkel tarbitavat võimsust. Kui hetkel tarbitav võimsus ületab realselt päikesepaneelidest tulnud võimsust, hakkab PID-regulaator genereerima võimsuste erinevuse kompenseerimiseks negatiivset pinget. PID-regulaatori poolt genereeritav negatiivne pinge liidetakse päikesepaneelide nominaalse pingega järgmises SUM-plokis. SUM-ploki väljundiks on pinge, mis edastatakse Coselica pinge allika plokile. PID-regulaatori väljundpinge on limiteeritud -50 voldi ning 0 voldi vahel, et vältida pinge lisamist või Coselica plokile realselt negatiivse pinge edastamist. SUM-ploki teiseks sisendiks on arvutuslikult saadud päikesepaneelide pinge, milleks on 50 volti, mis kirjeldab päikesepaneelide nimipinget.

Coselica plokiga genereeritud pinget kasutatakse „Küte päikesepaneelidest“ plokis.

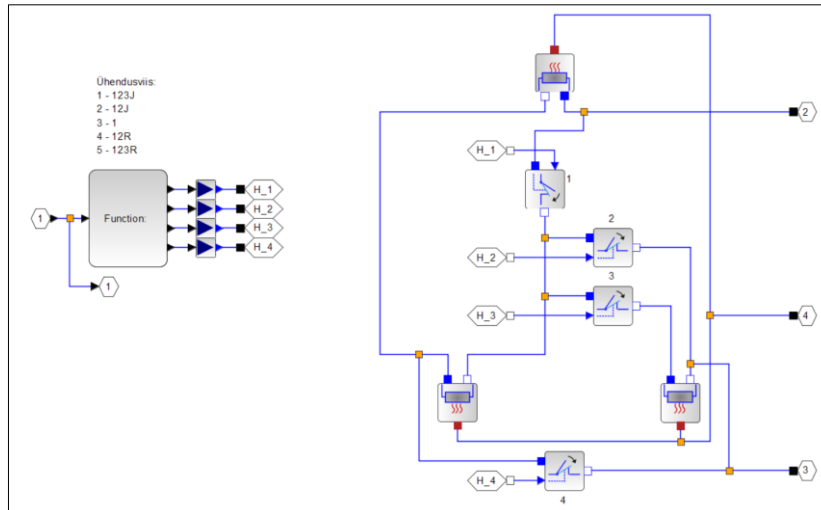
5.5. Küte päikesepaneelidest

Päikesepaneelist saadakse küte selliselt, et päikesepaneelidest tulev elektrienergia suunatakse läbi kütteelementide. Antud mudelis on kasutusel kolm 3-faasilist küttekeha, mis on omavahel ühendatud rööbiti. Küttekeha sees olevaid kütteelemente juhitakse vastavalt ühendusviisile. Üldine ühendusskeem on toodud joonisel 4. Küttekehad soojendavad põrandaküttes kasutatavat vett.



Joonis 4. Mudeli päikesepaneelide taha ühendatud kütteelementide osa.

Mudelist parema ülevaate loomiseks on iga küttekeha muudetud SciLab keskkonnas *Super Block*-iks (toodud joonisel 5). Selle ühele poole on ühendatud ühendusviisi valik, mis on tehtud „Päikesepaneelide ühenduse juhtimine“ plokis. Teisele poole on ühendatud „päikesepaneeli võimsus“ plokis genereeritud elektrienergia ning maandus elektriringi loomiseks. Veel on ühendatud küttekehade poolt tekitatud soojusenergia põrandaküttes plokiga.



Joonis 5. Pääkesepaneeli osas kütteelemendi *super block*.

Super blocki sisendiks tuleb ühendusviisi number liigub funktsiooni, mis otsustab, millised lülitusühendused on vajalik teha. Funktsiooni kood on toodud lisas 3. Ühendusviisidele vastavat lülitite ühendused on toodud tabelis 3.

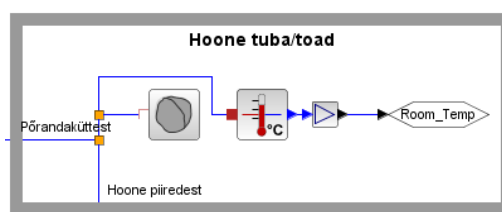
Tabel 3. Ühendusviisi juhtsõnale vastavad lülitused

| Ühendusviis | Lüliti 1 | Lüliti 2 | Lüliti 3 | Lüliti 4 | Küttekehade ühendus |
|-------------|----------|----------|----------|----------|---------------------|
| 1 | Ei | Ei | Jah | Ei | 3 jadamisi |
| 2 | Ei | Jah | Ei | Ei | 2 jadamisi |
| 3 | Ei | Ei | Ei | Jah | Üksik |
| 4 | Ei | Jah | Ei | Jah | 2 rööbiti |
| 5 | Jah | Ei | Jah | Jah | 3 rööbiti |

Vastavalt ühendusviisile ühendatakse kütteelemendid omavahel kas rööbiti või jadasse. Ühendused on võimalik teha selliselt, et rööbiti oleks kas kolm või kaks küttekeha ning jadamisi kas kolm või kaks küttekeha. Samuti võib tekkida olukord, kus küttes osaleb vaid üks kütteelement.

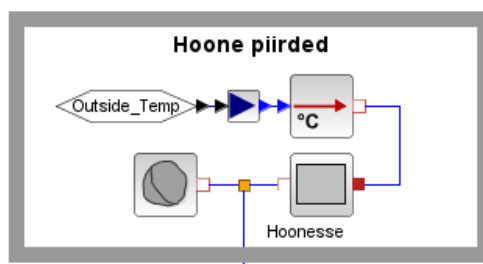
5.7. Ruumi mudelid

Hoone kütmiss vajaduse modelleerimiseks on kasutatud SciLabi Coselica plokkide „MTH_HeatCapacitor“ (käitub soojusmahtuvusena) ja „MTH_ThermalConductor“ (käitub soojusjuhtivusena). Nende plokkide abil on loodud lihtsustatud hoone mudel. Hoone tubade osa on toodud joonisel 7 ja koosneb soojusmahtuvusest. Sellest osast tuleb ruumi temperatuur, mida kasutatakse küttevajaduse juhtimiseks.

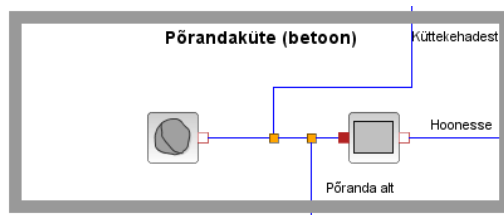


Joonis 7. Mudeli hoone tubade soojusmahtuvuse osa.

Hoone toa plokki mõjutavad hoonepiirete ning põrandakütte osa. Hoonepiirete osa on toodud joonisel 8, põrandakütte osa on toodud joonisel 9. Hoone piirete plokk on otseselt mõjutatud välistemperatuurist. Välistemperatuur on sisse loetud „Andmete failist lugemine“ osas.

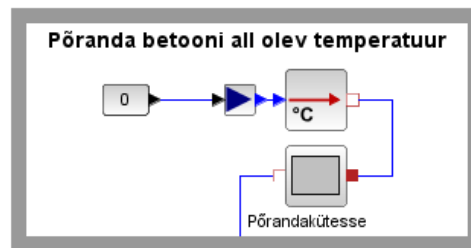


Joonis 8. Mudeli hoone piirete osa.



Joonis 9. Mudeli põrandakütte soojusmahtuvuse ja -takistuse osa.

Põranda temperatuuri mõjutavad põranda soojuskaod, mis sõltuvad põranda all oleva pinnase temperatuurist, mida mõjutab välistemperatuur. Mudelis kasutatud lahendus on kujutatud joonisel 10.



Joonis 10. Mudeli hoone põranda all oleva temperatuuri arvestamise osa.

Põranda all olevaks temperatuuriks on võetud arvestuslikult 0 °C.

Terve hoone skeem on toodud lisas 4. Modelleerimise käigus saadud tulemuste väljastamiseks SciLabi programmist, on kasutatud „TOWS_c“ ehk „To Workspace“ plokki. Antud plokk võimaldab kindla aja tagant modelleerimise käigus saadud tulemuste salvestada SciLabi konsooli puhvrise, mille nimi on antud ploki seadistamisel. Konsooli puhvrise salvestatakse selle salvestusaeg (*time* tulpa) ning väärtus (*values* tulpa) Kui modelleerimine on lõppenud, on võimalik SciLabi konsooli salvestatud puhvri väärtused ümber omistada vektoriks kasutades käsku „Muutuja2 = PuhvriNimi.values“. Uut tekitatud muutujat on võimalik eksportida CSV faili, mida on võimalik kasutada hilisemal andmetöötlemisel. Mudeli väärtuste salvestamise ühendusskeem on toodud lisas 5.

6. TULEMUSED

Mudeli, kuhu oli modelleeritud 3000 W koguvõimsusega päikesepaneelid, modelleerimise käigus mõõdetud tarbitud aastane elektrienergia andmed on toodud tabelis 4.

Tabel 4. Hoone küttevajadus aasta lõikes

| | Elektrienergia võrgust, kW·h | Elektrienergia PV paneelidest, kW·h |
|---------------------|-------------------------------------|--|
| Koos PV paneelidega | 10091,25 | 1135,27 |
| Ilma PV paneelideta | 11231,25 | - |

Andmete paremaks analüüsiks on tabelis 5 toodud elektrienergia tarbimine kuude kaupa, mis on saadud modelleerimise käigus salvestatud andmete töötlemisest. Kuna suvekuudel (juunikuu kuni augustikuu) tavaliselt hoonet ei kõeta, siis neil kuudel on tarbimine arvestati võrdeliseks nulliga.

Tabel 5. Hoone elektrienergia vajadus kütteks kuude kaupa

| | Ilma PV-ta | Koos PV-ga | PV-st |
|-----------|-------------------|-------------------|--------------|
| | kW·h | kW·h | kW·h |
| Jaanuar | 1748,75 | 1735,00 | 30,22 |
| Veebruar | 1316,25 | 1215,00 | 85,29 |
| Märts | 1415,00 | 1201,25 | 195,86 |
| Aprill | 1136,25 | 871,25 | 253,04 |
| Mai | 800,00 | 601,25 | 215,64 |
| Juuni | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Juuli | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| August | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| September | 872,50 | 682,50 | 199,54 |
| Oktoober | 1232,50 | 1148,75 | 95,79 |
| November | 1353,75 | 1315,00 | 30,02 |
| Detsember | 1356,25 | 1321,25 | 29,84 |

Aastaaegade lõikes päikesepaneelide taha ühendatud kütteelementide ühendusviisi juhtsõna osakaalud on toodud tabelis 6. Tabelis 7 on toodud sama informatsioon erinevusega, et osakaalusid arvestatakse ainult sellise juhul, kui päikesepaneelid toodavad elektrienergiat.

Tabel 6. PV paneelide taha ühendatud kütteelementide juhtsõna osakaal protsentides aastaaegade lõikes terve aasta peale

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Kevadkuud | 18,16 | 3,12 | 2,94 | 3,40 | 3,67 | 68,71 |
| Suvekuud | 100,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Sügiskuu | 5,97 | 1,79 | 1,38 | 1,68 | 2,25 | 86,94 |
| Talvekuud | 2,96 | 0,05 | 0,04 | 0,20 | 0,29 | 96,46 |

Tabel 7. PV paneelide taha ühendatud kütteelementide juhtsõna osakaal protsentides aastaaegade lõikes ajal, kui päikesepaneelid tootsid elektrienergiat

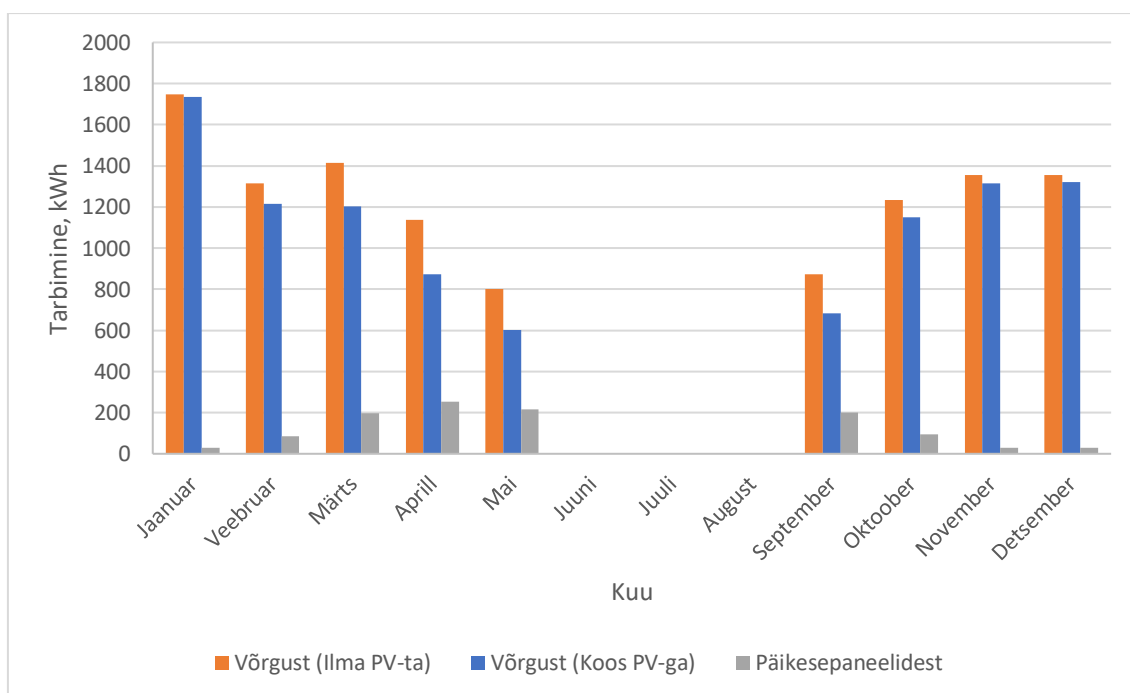
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Kevadkuud | 26,72 | 4,28 | 3,68 | 4,61 | 5,15 | 55,57 |
| Suvekuud | 100,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Sügiskuu | 11,98 | 3,93 | 2,90 | 3,46 | 4,90 | 72,84 |
| Talvekuud | 1,36 | 0,00 | 0,00 | 0,58 | 1,19 | 96,86 |

7. ARUTELU

Tabelis 5 on näha, et kõige suurem elektrienergia tarbimine päikesepaneelidest on kevadkuudel ning kõige väiksem tarbimine päikesepaneelidest on talvekuudel. Talvekuude päikesepaneelidest tarbitava elektrienergia madal kogus võib tingitud olla sellest, et sel ajal on päike madalal ning aeg, mil päike paistab, on tunduvalt lühem kui kevad- või sügiskuudel.

Arvestades tabelis 5 toodud andmeid, on võimalik leida, et päikesepaneelidest tarbitakse kõige rohkem elektrienergiat kevadkuudel. Kevadkuudel tarbitakse 58,54% kogu aastasest päikesepaneelidest tarbitavast elektrienergiast. Sügiskuudel on selleks 28,66% ning talvekuudel 12,8%

Vastavalt tabeli 5 põhjal on koostatud joonis 11, kus on toodud välja hoone elektrienergia tarbimine hoone kütteks kuude kaupa.



Joonis 11. Hoone elektrivajadus kütteks kuude kaupa.

Tabeli 5 põhjal saadakse, et aastane elektritarbimine võrgust hoone kütteks, kui päikesepaneelid hoone küttes ei osale, on 11231,25 kW·h. Kui päikesepaneelid hoone küttes osalevad, on aastane elektritarbimine võrgust hoone kütteks 10091,25 kW·h. Arvutuslikult teeb päikesepaneelidest tarbitavaks energiaks 1140 kW·h. Mudeli põhjal saadakse selleks arvuks 1135,27 kW·h. Seega on arvutuslikult ja mudeli põhjal saadud arvude vahe 4,73 kW·h. Arvutuslikult ja mudeli põhjal leitud erinevus võib olla põhjustatud mudeli võrgust tarbitava elektrienergia leidmise loogikast, mis ei arvesta igat väiksemat võimsuse muutumist ning seetõttu on väikese ümarduse efektiga.

Arvestades, et kui päikesepaneelid hoone küttes ei osalenud oli aastane võrgust elektrienergia tarbimine 11231,25 kW·h ning kui päikesepaneelid hoone küttes osalesid oli aastane võrgust elektrienergia tarbimine 10091,25 kW·h, saame leida, et aastane taastuvenergia osakaal süsteemis oli:

$$\frac{11231,25}{10091,25} = 11,30\%.$$

Tegemist on terve aasta peale jaotatud osakaaluga, milles ei väljendu kuude lõikes olevat osakaalu. Vaadates joonist 11, on näha, et päikesepaneelidest tarbitav elektrienergia kogus ei ole igakuiselt sama ning talvekuudel on päikesepaneelidest tarbitav elektrienergia väike. Igakuise osakaalu leidmiseks on kasutatud tabeli 5 andmeid. Igakuise taastuvenergia osakaal on toodud tabelis 8.

Tabel 8. Igakuise taastuvenergia osakaal hoone küttes

| | Taastuvenergia osakaal, % |
|-----------|----------------------------------|
| Jaanuar | 0,79 |
| Veebruar | 8,33 |
| Märts | 17,79 |
| Aprill | 30,42 |
| Mai | 33,06 |
| Juuni | 0,00 |
| Juuli | 0,00 |
| August | 0,00 |
| September | 27,84 |
| Oktoober | 7,29 |
| November | 2,95 |
| Detsember | 2,65 |

Tabel 8 põhjal selgub, et hoone kütmisses on taastuenergia osakaal kõige suurem aprilli-, mai- ning septembrikuus. Võib eeldada, et nendel kuudel taastuenergia osakaal on suure selle tõttu, et hoone vajab minimaalselt kütet, kuna välitemperatuur sel ajal on veel kõrge. Talvekuude madal taastuenergia osakaal võib põhjendatud olla sellega, et sel ajal on päikesepaneelide poolt väljastatav koguvõimsus väike. Peamisteks põhjusteks võivad olla lühikesed päevad ning ebasoodsad tingimused päikesepaneelide jaoks.

Vaadates tabelit 6, on näha, et enamuse ajast on soovitud küttekehade ühendusviisiks astet „5“, mis on kõige võimsam aste. Kevadkuudel oli selleks 68,71 %, sügiskuudel 86,94 % ning talvekuudel 96,46 % ajast. Kuna antud tabelis on arvestatud kogu aastaga, siis nende arvude sisse on arvestatud ka öised ning madala päikesevalgusega ajad.

Tabel 7 näitab küttekehade soovitud astet ajal, kui päikesepaneelid tootsid elektrienergiat. Sellegi poolest selgub, et paneelide taha ühendatud küttekehade soovitud ühendusviis oli enamuse ajast endisel ühendusviis „5“. Tabelist on näha, et kevadkuudel, võrreldes sügis- ja talvekuudega, on suurem osakaal (26,72 %) ka ühendusviis „0“-il, mis tähendab, et ajal, kui päikesepaneelid tootsid elektrienergiat, oli saavutatud seadistatud ruumitemperatuur ning päikesepaneelidest saadud elektrienergiat ei kasutatud ära.

Vaadeldes tabelit 6 ja tabelit 7, on võimalik näha, et antud võimsusega päikesepaneelide süsteemist oli kõige rohkem kasu ainult kevadkuudel. Sel ajal oli küttekehade astmeks „5“ ainult peaaegu 50% ajast ning küttekehad täiesti välja lülitatud 26,72% ajast. Ülejäänud kuudel töötasid küttekehad peaaegu pidevalt maksimaalse võimsusega.

Päikesepaneelide koguvõimsuse suurendamisel tõuseks süsteemi võimekus hakkama saada ka sügis- ning talvekuudel. Praegusel hetkel antud päikesepaneelide koguvõimsus ei suuda hakkama saada talvekuudega. Päikesepaneelide koguvõimsuse suurendamisega tõuseks ka taastuenergia osa hoone küttesüsteemis. Mudeli edasi arendamisel võib suvekuudel ülejäänud elektrienergiat ära kasutada tarbevee soojendamiseks ning võrku tagasi müümiseks.

KOKKUVÕTE

Aastal 2011 oli Eestis elektrivõrguga liitunud päikeseenergia tootmisvõimsus 0,2 MW. Aastaks 2019 oli see tõusnud ligi 600 korda ehk 118,31 MW. Kasvanud on ka hüppeliselt Eleringi võrku müüdav päikesepaneelidest saadud elektrienergia hulk. Aastal 2013 müüdi elektrivõrku 94 MW·h elektrienergiat ning aastal 2019 oli selleks suuruseks 54 GW·h. Tavapäraselt kasutatakse päikesepaneeli süsteemis mitut päikesepaneeli, akusid ning inverterit, mis muundab akudesse salvestatud alalisvoolu hoones kasutatavaks vahelduvvooluks.

Peamiselt kasutatakse monokristallilisest või polükristallilisest ränist toodetud elementidest koosnevaid päikesepaneelide nende suure efektiivsuse ja odava hinna tõttu. Päikesepaneelidest elektrienergia tootmise süsteemis on inverter vajalik, kui soovitakse sellega toita igapäeva seadmeid. Lisaks on inverter vajalik, kui soovitakse ülejäänud päikesepaneelidest saadud elektrienergiat müüa võrku. Päikesepaneelidele on võimalik paigaldada võimsuse optimeerijad päikesepaneelist maksimaalse võimsuse kätte saamiseks.

Käesolevas tööst kasutatakse automaatreguleerimist päikesepaneelide hetkel toodetava võimsuse reguleerimiseks mudelile. Antud suurus loetakse sisse välisest failist, mis on salvestatud iga 5 minuti tagant Tartus Eesti Maaülikoolis perioodil 01.12.2015 kuni 30.11.2016.

Päikesepaneelidega hoone kütmisel tarbiti võrgust hoone lisakütteks 10091,25 kW·h ulatuses elektrienergiat. Kui päikesepaneelid hoone kütmisel ei abistanud, tarbiti võrgust hoone kütteks 11231,25 kW·h elektrienergiat. Seega saadi aastaseks hoone küttes osaleva taastuvenergia osakaaluks 11,30 %. Kuna päikesepaneelidest talvekuudel tarbitud elektrienergia oli väike, siis see põhjustas ka aastase taastuvenergia osakaalu vähenemise.

Kuna suvekuudel (juuni kuni august) kütmist ei toimu, arvestati nendel kuudel päikesepaneelidest tarbitud elektrienergia võrdeliseks nulliga. Jaanuaris oli taastuenergia osakaaluks hoone kütmissüsteemis 0,79%, veebruaris 8,33%, märtsis 17,79%, aprillis 30,42%, mais 33,06%, septembris 27,84%, oktoobris 7,29%, novembris 2,95% ning detsembris 2,65%.

Mudeli modelleerimise käigus tuli välja, et päikesepaneelide koguvõimsuse suurendamisel tõuseks süsteemi võimekus hakkama saada hoone kütmisega. Antud koguvõimsuse juures oli valdavalt päikesepaneeli taha ühendatud küttekehade ühendusviisi astmeks „5“ ehk kõige võimsam aste. Edasiste arendamiste käigus võib kasutada suvekuudel ülejäänud elektrienergiat tarbevee soojendamiseks või võrku müümiseks.

KASUTATUD KIRJANDUS

- 1) **Petrollase, M., Cau, G., Cocco, D.** (2017). Use of weather forecast for increasing the self-consumption rate of home solar systems: An Italian case study. University of Cagliari.
- 2) **Eesti Taastuenergia Koda.** (2019). Taastuenergia aastaraamat 2019. [on-line] http://www.taastuenergeetika.ee/wp-content/uploads/2020/10/E TEK_aastaraamat_A4_2019_veeb.pdf (14.04.2021)
- 3) **Eesti Taastuenergia Koda.** (2013). Taastuenergia aastaraamat 2013. [on-line] <http://www.taastuenergeetika.ee/wp-content/uploads/2016/12/Taastuenergia-aastaraamat-2013.pdf> (14.04.2021)
- 4) **Pelece, I., Ziemelis, I., Putans, H., Snegovs, A.** 2019. Improvement of efficiency of PV panels for water heating by changing heater resistance. Latvia University of Life Sciences and Technologies.
- 5) **Ortiz, J. M., Expósito, E., Gallud, F., García-García, V., Montiel, V., Aldaz, A.** (2007). Electrodialysis of brackish water powered by photovoltaic energy without batteries: direct connection behaviour. University of Alicante.
- 6) **Bagher, A. M., Vahid, M. M. A., Mohsen, M.** Types of Solar Cells and Application. American Journal of Optics and Photonics
- 7) **Newkirk, M.** (2014). What Are Monocrystalline, Polycrystalline And Thin Film Solar Panels? [veebileht] <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/pv-panel-technology> (15.04.2021)
- 8) Team Productline. (2019). Monocrystalline solar panel: Solar cells that have longevity up to 30 years. [veebileht] <https://economictimes.indiatimes.com/small-biz/productline/power-generation/monocrystalline-solar-panel-solar-cells-that-have-longevity-up-to-30-years/articleshow/69140542.cms> (15.04.2021)
- 9) Team Productline. (2019). PolyCrystalline Solar Panels: Cheap yet efficient long lasting solar panels. [veebileht] <https://economictimes.indiatimes.com/small-biz/productline/power-generation/polycrystalline-solar-panels-cheap-yet-efficient-long-lasting-solar-panels/articleshow/69130611.cms> (15.04.2021)

- 10) EnergySage. (2020). Types of solar panels. [veebileht] <https://www.energysage.com/solar/101/types-solar-panels/> (18.04.2021)
- 11) Greentumble. (2018). Types of Solar Panel Mounting Systems and Their Installation. [veebileht] <https://greentumble.com/types-of-solar-panel-mounting-systems-and-their-installation/> (18.04.2021)
- 12) **Matasci, S.**, (2019). Ground mount solar panels: top 3 things you need to know. [veebileht] <https://news.energysage.com/ground-mounted-solar-panels-top-3-things-you-need-to-know/> (20.04.2021)
- 13) **Roussey, B.** (2019). Solar Roof Tiles vs. Solar Panels Explained. [veebileht] <https://www.cleanenergyauthority.com/solar-energy-resources/solar-roof-tiles-vs-solar-panels-explained-041219> (20.04.2021)
- 14) **Zipp, K.** (2013). What is a solar inverter and how does it work? [veebileht] <https://www.solarpowerworldonline.com/2013/04/how-do-solar-inverters-work/> (20.04.2021)
- 15) The Solar Nerd LLC. (2021). How do solar inverters work? [veebileht] <https://www.thesolarnerd.com/guide/how-do-solar-inverters-work/> (21.04.2021)
- 16) **Sendy, A.** (2020). Pros and cons of string inverters vs microinverters. [veebileht] <https://www.solarreviews.com/blog/pros-and-cons-of-string-inverter-vs-microinverter#what-is-a-string-inverter> (25.04.2021)
- 17) **Svarc, J.** (2020). MPPT Solar Charge Controllers Explained. [veebileht] <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/mppt-solar-charge-controllers> (29.04.2021)
- 18) **Jaanus, K.** 2011. Päikesekollektori asendi juhtimine ja andmehõive. Magistritöö. Eesti maaülikooli tehnikainstituut. Tartu. 107 lk.
- 19) **Ennulat, H.** (2010). The D in PID Control. [veebileht] <https://hennulat.wordpress.com/2010/02/15/the-d-in-pid-control/> (06.05.2021)
- 20) **Zhang, H.** (2011). Building materials in civil engineering. Published by Woodhead Publishing Limited.
- 21) Lumen. Specific Heat. [veebileht] <https://courses.lumenlearning.com/boundless-physics/chapter/specific-heat/> (06.05.2021)
- 22) Engineering ToolBox, (2003). Specific Heat of Solids. [veebileht] https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-solids-d_154.html (11.05.2021)
- 23) **Mishra, R., Militky, J., Venkataraman, M.** (2019). Nanoporous materials. Technical University of Liberec.

- 24) Kingspan Group. (2017). How to Calculate a U-value. [veebileht] <https://www.kingspan.com/meati/en-in/product-groups/insulation/knowledge-base/articles/u-values/how-to-calculate-a-u-value> (11.05.2021)
- 25) **Kalder, J., Hovi, M., Allik, A., Annuk, A.** (2019). Interseasonal heat storage for residential buildings with Renewable energy generation. Estonian University of Life Sciences, Estonia.
- 26) Engineering ToolBox, (2003). Thermal Conductivity of some selected Materials and Gases. [veebileht] https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html (22.05.2021)
- 27) Integrated Environmental Solutions Limited. Apache-Tables User Guide. [on-line] <https://www.iesve.com/downloads/help/ve2012/Thermal/ApacheTables.pdf> (22.05.2021)
- 28) Engineering ToolBox, (2003). Specific Heat of some common Substances. [veebileht] https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-d_391.html (22.05.2021)
- 29) **Walker, R.** (2016). Density of materials. [veebileht] https://www.simetric.co.uk/si_materials.htm (22.05.2021)
- 30) Engineering ToolBox, (2003). Air - Density, Specific Weight and Thermal Expansion Coefficient at Varying Temperature and Constant Pressures. [veebileht] https://www.engineeringtoolbox.com/air-density-specific-weight-d_600.html (22.05.2021)

LISAD

Lisa 1. Skaleerimise funktsioon

```
// Scale
x = u1;
in_min = u2;
in_max = u3;
out_min = u4;
out_max = u5;

y1 = ((x - in_min) * (out_max - out_min)) / (in_max - in_min) + out_min;
```

Lisa 2. Failist lugemise funktsioon

„Set Context“ osa:

```
Path_TempsFile = "C:\SciLabData\Temperatures_5min.txt";  
Path_PowerFile = "C:\SciLabData\PowerData_5min.txt";
```

```
OutsideTemps = read(Path_TempsFile, -1, 1)  
PVPowers = read(Path_PowerFile, -1, 1)
```

```
OutsideTemps_Length = length(OutsideTemps);  
PVPowers_Length = length(PVPowers);
```

Failist lugemise osa:

```
CurrentCounter = u1;  
Out_Power = 0.0;  
Out_Temp = 0.0;
```

```
if (CurrentCounter < PVPowers_Length) then  
    Out_Power = PVPowers(CurrentCounter+1);  
end
```

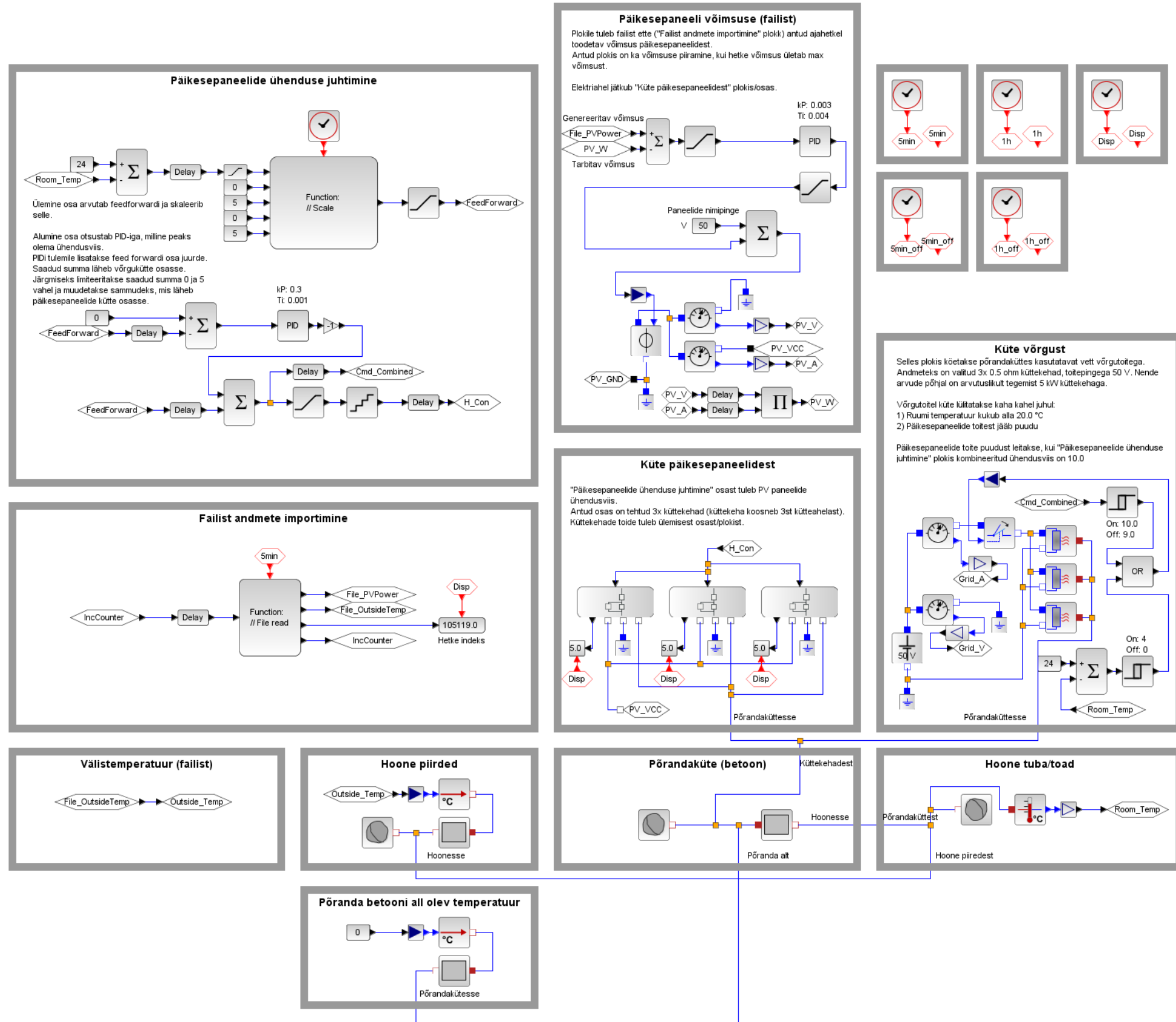
```
if (CurrentCounter < OutsideTemps_Length) then  
    Out_Temp = OutsideTemps(CurrentCounter+1);  
end
```

```
y1 = Out_Power;  
y2 = Out_Temp;  
y3 = CurrentCounter;  
y4 = CurrentCounter + 1;
```

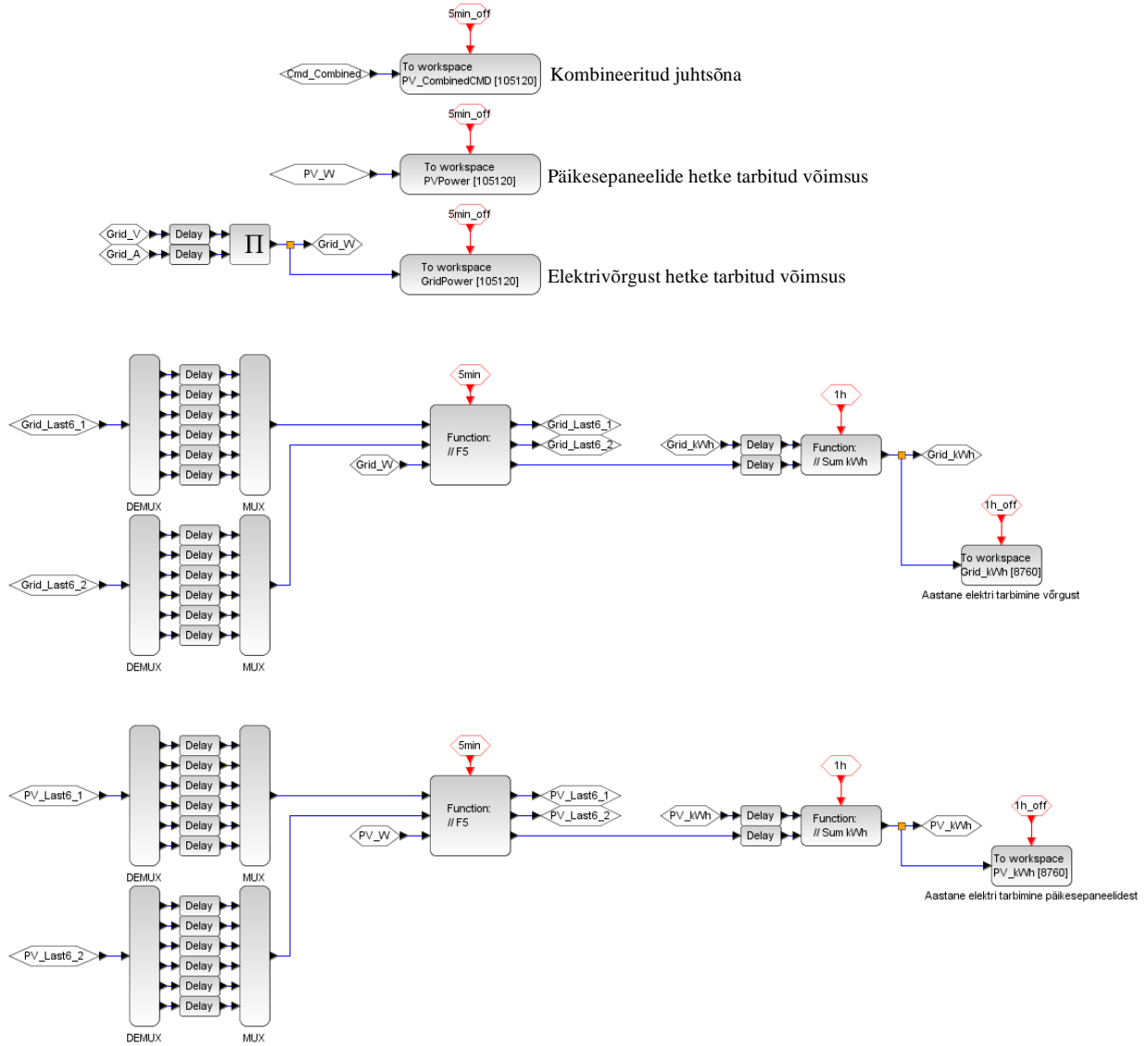
Lisa 3. Küttelelemendi ühendusviisi lülite valiku funktsioon

```
if (u1 == 1) then
  y1 = 0; // 1
  y2 = 0; // 2
  y3 = 1; // 3
  y4 = 0; // 5
elseif (u1 == 2) then
  y1 = 0; // 1
  y2 = 1; // 2
  y3 = 0; // 3
  y4 = 0; // 5
elseif (u1 == 3) then
  y1 = 0; // 1
  y2 = 0; // 2
  y3 = 0; // 3
  y4 = 1; // 5
elseif (u1 == 4) then
  y1 = 0; // 1
  y2 = 1; // 2
  y3 = 0; // 3
  y4 = 1; // 5
elseif (u1 == 5) then
  y1 = 1; // 1
  y2 = 0; // 2
  y3 = 1; // 3
  y4 = 1; // 5
else
  y1 = 0; // 1
  y2 = 0; // 2
  y3 = 0; // 3
  y4 = 0; // 5
end
```

Lisa 4. Mudeli üldskeem



Lisa 5. Andmete salvestamine



Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Steven Visla,
sünniaeg 05.06.1996,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö Elekterveesoojendi kasutamine hoone küttesüsteemis PV paneelide otseühendusega , mille juhendaja(d) on Janar Kalder,
 - 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
 - 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
 - 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor Steven Visla (allkirjastatud digitaalselt)

Tartu, 05.06.2021

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

Janar Kalder (allkirjastatud digitaalselt)

05.06.2021