

**TAL
TECH**

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

**ELEKTRITARBIMISE JUHTIMISALGORITMID
KODUMAJAPIDAMISTES
DEMAND-SIDE CONTROL ALGORITHMS IN
HOUSEHOLDS**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Jaakob Lambot

Üliõpilaskood: 206372EAAB

Juhendaja: Vahur Maask, teadur

Kaasjuhendaja: Argo Rosin, kaasprofessor
tenuuris

Tallinn 2024

(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: Jaakob Lambot

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 2024

Juhendaja: Vahur Maask

/ allkiri /

Kaasjuhendaja: Argo Rosin

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."2024.

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Jaakob Lambot,

1. annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Elektritarbimise juhtimisalgoritmid kodumajapidamistes“, mille juhendaja on Vahur Maask,
 - 1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
 2. olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
 3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.
-

_____ (kuupäev)

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

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Jaakob Lambot, 206372EAAB

Õppekava, peeriala: EAAB16/17 Elektroenergeetika ja mehhatroonika, Mehhatroonika

Juhendaja(d): Teadur, Vahur Maask, Kaasprofessor tenuuris, Argo Rosin

Lõputöö teema:

(eesti keeles) ELEKTRITARBIMISE JUHTIMISALGORITMID KODUMAJAPIDAMISTES

(inglise keeles) DEMAND-SIDE CONTROL ALGORITHMS IN HOUSEHOLDS

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Kodumajapidamisseadmete liigitamine tarbimise juhtimise kontekstis
2. Kodumajapidamisseadmete elektritarbimise juhtimisalgoritmide uurimine ja katsetamine
3. Juhtimisalgoritmide liidestamine elektritarbimise juhtimise platvormi prototüüplahendusega

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjanduse läbitöötamine	01.2024
2.	Juhtimisalgoritmide koostamine	02.2024
3.	Elektritarbimise juhtimise platvormiga liidestamine	02.2024
4.	Katsete läbi viimine	03.2024
5.	Tulemuste analüüs	03.2024
6.	Järelduste ja kokkuvõtte kirjutamine	04.2024
7.	Lõputöö juhendajale ülevaatamiseks	04.2024
8.	Lõputöö lõplik versioon	05.2024

Töö keel: **Lõputöö esitamise tähtaeg:** ".....".....20.....a

Üliõpilane: ".....".....20.....a
/allkiri/

Juhendaja: ".....".....20.....a
/allkiri/

Kaasjuhendaja: ".....".....20.....a
/allkiri/

Konsultant: ".....".....20.....a
/allkiri/

Programmijuht: ".....".....20.....a
/allkiri/

SISUKORD

EESSÕNA	6
Lühendite ja tähiste loetelu	7
SISSEJUHATUS	8
1. JUHITAVATE KODUMAJAPIDAMISSEADMETE VALIK	9
1.1 Kodumajapidamiseadmete liigitus tarbimise juhtimise kontekstis	9
1.1.1 Mittejuhitavad seadmed	10
1.1.2 Osaliselt juhitud seadmed	10
1.1.3 Juhitud seadmed	10
1.2 Valitud kodumajapidamiseadmed	11
1.2.1 Põrandaküte	11
1.2.2 Soojaveeboiler	12
1.2.3 Elektriauto	13
2. ÜLEVADE JUHTIMISLAHENDUSEST JA ERINEVATEST JUHTIMISALGORITMIDEST .	14
2.1 Juhtimislahendus ja sellest tulenevad nõuded	14
2.2 Eelnevas töös kasutatud juhtimisalgoritmid	16
2.2.1 Geneetiline algoritm	17
2.2.2 Osakeste parvega optimeerimine	19
2.2.3 Lineaarne programmeerimine	20
2.2.4 Masinõpe	20
2.2.5 Reeglipõhised algoritmid	21
2.3 Valitud juhtimisalgoritmid	23
2.3.1 Soojussalvestite juhtimisalgoritmid	23
2.3.2 Elektriauto juhtimisalgoritmid	26
3. JUHTIMISALGORITMIDE KATSETAMINE KODUMAJAPIDAMISSEADMETEL	29
3.1 Põrandakütte katsed ja tulemused	30
3.2 Soojaveeboileri katsed ja tulemused	32
3.3 Elektriauto katse ja tulemused	34
3.4 Katsete kokkuvõte	37
4. JUHTIMISALGORITMI RAKENDAMINE TARBIMISE JUHTIMISE PLATVORMIS	39
4.1 Juhtimise kontseptsioon	39
4.2 Juhtimisalgoritmide rakendamine	40
KOKKUVÕTE	43
SUMMARY	45
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	47

EESSÕNA

Käesoleva lõputöö teema sõnastati Tallinna Tehnikaülikooli mikrovõrkude ja metroloogia uurimisrühma liikmete Vahur Maaski ja Argo Rosina algatusel. Lõputöö koostati Tallinnas ja põhilised algandmed koguti samuti Tallinnas.

Avaldan tänu enda lõputöö juhendajatele Vahur Maaskile ja Argo Rosinale põhjaliku, pideva ja konstruktiivse tagasiside eest.

Lõputöö oluliseks eesmärgiks oli teada saada, milliseid juhtimisalgoritme saab kasutada elektritarbimise juhtimise platvormi prototüüp lahendusel, et juhtida kodumajapidamisseadmete elektritarbimist. Lisaks katsetada välja valitud juhtimisalgoritme kodumajapidamisseadmetel ja võrrelda tulemusi energia- ja kulutõhususe vaatest.

Lõputöö on jaotatud neljaks põhipeatükiks.

- Esimeses peatükis tuuakse välja kodumajapidamisseadmed, millega edaspidi katseid tehakse.
- Teises peatükis tehakse ülevaade juhtimislahendusest ja eelnevates töodes kasutatud juhtimisalgoritmidest ja esitatakse edaspidiseks tööks valitud juhtimisalgoritmide.
- Kolmandas peatükis kirjeldatakse kodumajapidamisseadmetega tehtud katseid ja analüüsitakse saadud tulemusi.
- Neljandas peatükis antakse ülevaade, kuidas liidestati valitud juhtimisalgoritmide elektritarbimise juhtimise platvormi prototüüp lahendusega.

Lõputöö kokkuvõtteks võib väita, et kõige energia- ja kulutõhusama juhtimisalgoritmiga on soojussalvestite puhul võimalik tekitada kuni 12% energiasäästu ja kuni 15% kulusäästu ning elektriauto puhul umbes 30% kulusäästu.

Võtmesõnad: tarbimise juhtimine, kodumajapidamisseadmed, juhtimisalgoritmide, elektritarbimise juhtimise platvorm, bakalaureusetöö.

Lühendite ja tähiste loetelu

GA – geneetiline algoritm (ingl k *Genetic Algorithm*)

PSO – osakeste parvega optimeerimine (ingl k *Particle Swarm Optimization*)

SISSEJUHATUS

Praegu liigub ühiskond üha enam taastuenergia kasutusele võtmise ja rohelisema energeetika poole. Selle taustal on kodumajapidamiste elektritarbimise juhtimine muutunud oluliseks väljakutseks elektrikulude kasvu ja globaalselt suurenenud elektritarbimise tõttu. Kodumajapidamiste efektiivne elektritarbimise juhtimine lubaks kodutarbijatele olulist kokkuhoidu energia- ja kulutõhususe arvelt ning lisaks aitaks see kaasa laiemate jätkusuutlike eesmärkide saavutamisele. Lõputöö eesmärgiks on välja selgitada erinevaid elektritarbimise juhtimisalgoritme ja valida neist energia- ja kulutõhususe vaates sobivaimad kodumajapidamisseadmete juhtimiseks.

Lõputöö põhjendus tuleneb nutikodude lahenduste järjest laialdasemast levikust ning vajadusest suurendada energia- ja kulutõhusust kodumajapidamistes. Taastuenergiaallikatest tuleneva elektrienergia kasutuselevõtuga suureneb keerukus hoida võimsusbilanssi Eesti elektrivõrgus. Kodumajapidamiste osakaal Eesti elektritarbimises moodustab uurimuste alusel ligikaudu 28% [1]. See tähendab, et kodumajapidamisseadmete tarbimise juhtimisega oleks võimalik aidata ka kaasa Eesti elektrivõrgu võimsusbilansi tagamisele.

Erinevad nutipistikud ja -releed võimaldavad muuta kodumajapidamisseadmete elektritarbimise mustrit vastavalt elektri börsihinnale ja võrguteenustasu tariifile. Siiski nõuab nende efektiivne kasutamine erinevate juhtimisalgoritmide rakendamist, mis suudaksid teha otsuseid vastavalt elektrihinnale ja kodutarbija vajadustele. Lisaks oleks vaja muuta nende juhtimisalgoritmide kasutamine kodutarbijale kättesaadavaks ja mugavaks. Selle jaoks liidestatakse välja valitud juhtimisalgoritmide elektritarbimise juhtimise platvormi prototüüplahendusega.

Käesolev lõputöö on jagatud neljaks peatükiks. Esimeses peatükis liigitatakse kodumajapidamisseadmeid tarbimise juhtimise kontekstis ja tuuakse välja seadmed, mida edaspidi töös kasutatakse. Teises peatükis tehakse ülevaade erinevatest juhtimisalgoritmidest, mida on varasemates töödes kasutatud kodumajapidamisseadmete tarbimise juhtimiseks. Lisaks tuuakse välja need juhtimisalgoritmide, mida edaspidi katsetamiseks kasutatakse. Kolmandas peatükis tehakse ülevaade tehtud katsetest, kus valitud kodumajapidamisseadmete tarbimist juhti juhtimisalgoritmidega ja tehakse analüüs katsete tulemustest. Analüüsiks kasutatakse Microsoft Excelit ja MatLabit. Neljandas peatükis näidatakse, kuidas juhtimisalgoritmide kasutamist liidestati elektritarbimise juhtimise platvormi prototüüplahendusega.

1. JUHITAVATE KODUMAJAPIDAMISSEADMETE VALIK

Järgnevat esitatakse ülevaade erinevatest kodumajapidamisseadmete liikidest tarbimise juhtimise kontekstis. Välja on toodud kodumajapidamisseadmete liigitamise põhimõtte ning näited seadmetest. Lisaks on esitatud edaspidise töö jaoks valitud kodumajapidamisseadmed koos valiku põhjendusega.

1.1 Kodumajapidamisseadmete liigitus tarbimise juhtimise kontekstis

Kodumajapidamisseadmeid saab liigitada mitme erineva näitaja järgi. Näiteks saab seadmeid liigitada nende energiatõhususe klassi ja füüsiliste omaduste järgi. Käesolevas töös liigitatakse kodumajapidamisseadmeid elektritarbimise juhitavuse kontekstis. Elektritarbimise juhitavuse all mõeldakse seda, kas kodumajapidamisseadet saab juhtida nii, et selle tarbimiskõver muutuks. See tähendab elektritarbimise nihutamist mingile muule perioodile ja võimsuse tõstmist või langetamist. Näiteks kodumajapidamisseadme elektritarbimise nihutamine kõrgemalt elektri börsihinna perioodilt madalamale elektri börsihinna perioodile [2].

Kodumajapidamisseadmeid saab elektritarbimise juhitavuse järgi liigitada kolme gruppi: mittejuhitavad, osaliselt juhitavad ja juhitavad seadmed. Mittejuhitavad seadmed on kodumajapidamisseadmed, mille elektritarbimist ei saa juhtida nende tarbimise iseloomu ja kasutaja vajaduste tõttu. Osaliselt juhitavad seadmed on juhitavad seadmed, mille elektritarbimist saab lühiajaliselt nihutada. Juhitavate kodumajapidamisseadmete elektritarbimist saab juhtida ehk elektritarbimist katkestada või nihutada muule perioodile [2]. Tabelis 1.1 on esile toodud erinevad mittejuhitavad, osaliselt juhitavad ja juhitavad kodumajapidamisseadmed.

Tabel 1.1 Kodumajapidamisseadmete liigitamine tarbimise juhtimise kontekstis

Mittejuhitavad	Osaliselt juhitavad	Juhitavad	
		Mittekatkestatavad	Katkestatavad
Televiisor	Nutikas külmik	Õhksoojuspump	Elektriradiaator
Arvuti	Valgustus	Pesumasin	Põrandaküte
Vannitoa valgustus	Kohvimasin	Konditsioneer	Ventilatsioon
Vannitoa ventilatsioon	Robottolmuimeja	Kuivati	Elektriauto
Ahi			Õhuniisuti
Köögipliit			Õhukuivati
Mikrolaineahi			Kuumaveeboiler
Veekeedukann			Elektritõukeratas
Röster			
Triikraud			

1.1.1 Mittejuhitavad seadmed

Mittejuhitavad kodumajapidamisseadmed on seadmed, mida ei saa juhtida nende tarbimise iseloomu ja kasutaja vajaduste tõttu. Tegu on kodumajapidamisseadmetega, mille töörežiim allub otse kasutajale ning seadmete elektritarbimine sõltub otseselt kasutaja vajadusest. Sellest tulenevalt ei saa niisuguste kodumajapidamisseadmete elektritarbimist juhtida ega nihutada. Näiteks keedukann, elektripliit ja -ahi on seadmed, mida kasutatakse toiduvalmistamiseks, mistõttu määrab kasutaja seadmetele ise tööaja ja elektritarbimise. Televiisor, arvuti, vannitoa valgustus ja ventilatsioon järgivad sama põhimõtet, sest nende elektritarbimine on otseselt seotud kasutaja aktiivsuse ja vajadustega [2]. Mittejuhitavate kodumajapidamisseadmete elektritarbimise osakaal eluhoones on ligi 36% [3].

1.1.2 Osaliselt juhitavad seadmed

Kodumajapidamisseadmed, mis on osaliselt juhitavad, on seadmed, mis võimaldavad tarbimist lühiajaliselt nihutada. Sellisteks seadmeteks on näiteks valgustus, nutikas külmik, kohvimasin ja robottolmuimeja. Neid seadmeid on võimalik osaliselt juhtida, sest nende tarbimist saab üldjuhul paar tundi nihutada või nende võimsust saab reguleerida. Näiteks saab külmiku töötemperatuuri vähendada, mis omakorda vähendab energiatarbimist ning töötemperatuuri saab jällegi suurendada, kui on madalama elektri hinnaga periood [2]. Osaliselt juhitavate kodumajapidamisseadmete elektritarbimise osakaal eluhoones on umbes 10% [3].

1.1.3 Juhitavad seadmed

Juhitavad kodumajapidamisseadmed on seadmed, mille elektritarbimist saab otseselt juhtida. Selliseid kodumajapidamisseadmeid on võimalik juhtida, kuna nende elektritarbimine ei sõltu kasutaja kohestest vajadusest ning üldjuhul ei ole tegemist aegkriitilise ülesandega. Sellised kodumajapidamisseadmed on näiteks pesumasinad, õhksoojuspumbad, põrandaküte kütte eesmärgil, elektriradiaator, veeboilerid, elektriautod, ventilatsioonid [2]. Juhitavate kodumajapidamisseadmete osakaal eluhoones on ligi 54% [3]. Juhitavad kodumajapidamisseadmed saab veel omakorda jagada kahte gruppi: katkestatavad ja mittekatkestatavad [4].

Katkestatavad kodumajapidamisseadmed on seadmed, mille elektritarbimist saab katkestada ilma seadme tehnilist seisundit rikkumata. Tegemist on seadmetega, mis on tehnilisest küljest lihtsa ülesehitusega ning järsk elektrikatkestus ei kahjusta seadme

tehnilist seisundit ega vähenda eluiga. Sellised seadmed on näiteks elektriradiaator, pörandaküte kütte eesmärgil, ventilatsioon ja elektriauto.

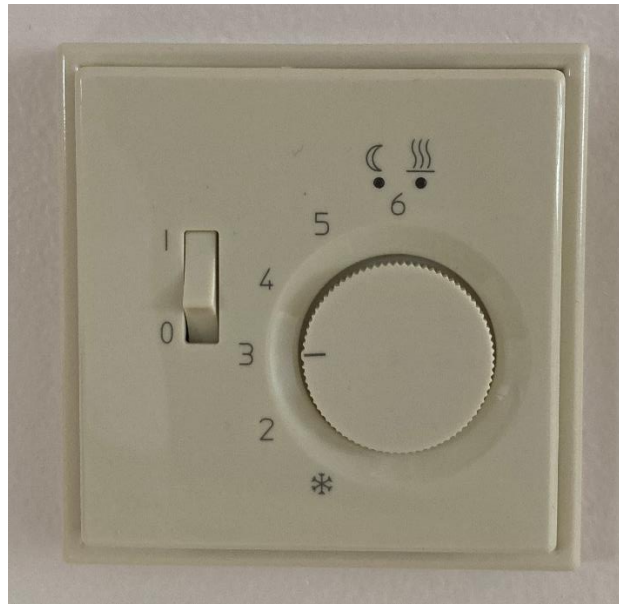
Mittekatkestatavad kodumajapidamisseadmed on seadmed, mille tehniline seisund võib saada kahjustada, kui selle elektritarbimine järsult katkestada. Sellisteks seadmeteks on näiteks soojuspump, pesumasin ja konditsioneer.

1.2 Valitud kodumajapidamisseadmed

Edaspidise töö jaoks valiti välja erinevad kodumajapidamisseadmed, millele keskenduda, et nendega saaks teha konkreetseid katseid. Kodumajapidamisseadmete valikul lähtuti mitmest kriteeriumist. Esimeseks kriteeriumiks oli kodumajapidamisseadme juhitavus. See oli oluline, kuna töö eesmärgiks oli välja selgitada elektritarbimise juhtimisalgoritmid ja valida neist energia- ja kulutõhususe vaates sobivaimad kodumajapidamisseadmete juhtimiseks. Seda ei võimalik teha, kui kodumajapidamisseade ei ole juhitav. Teiseks oluliseks kriteeriumiks oli kodumajapidamisseadme elektritarbimise katkestamise võime. See oli tähtis kriteerium, sest käesoleva töö käigus juhti kodumajapidamisseadmeid elektritarbimise katkestamise abil. Kolmandaks kriteeriumiks oli kodumajapidamisseadme kasutamissagedus. See oli tähtis, kuna ei olnud mõistlik katsetada seadet, mida kasutatakse vähe või mille energiatarbimine moodustab kodumajapidamise kogutarbimisest väikese osa.

1.2.1 Pörandaküte

Pörandaküte (joonis 1.1) valiti esimeseks kodumajapidamisseadmeiks, kuna see vastab kõikidele algselt seatud kriteeriumitele, mis olid määratud seadme valikul. Pörandaküte on juhitav, sest tegu on kodumajapidamisseadmega, mille töörežiim ei allu otseselt kasutajale ning seadme elektritarbimine ei sõltu otseselt kasutaja vajadusest. Lisaks saab pörandakütte elektritarbimist katkestada, sest tegu on lihtsa küttekehaga, mistõttu ei halvene tema tehniline seisnud juhul, kui toimub elektritarbimise katkestus. Eelnevalt läbi viidud küsitluse [5] põhjal saab öelda, et pörandakütte tarbimise juhtimisega oleksid nõus 40% küsimistikule vastajatest. Lisaks tuleb välja, et 8% vastajate kodudes tarbib pörandaküte kõige enam elektrit.



Joonis 1.1 Põrandaküte

1.2.2 Soojaveeboiler

Teiseks kodumajapidamisseadmeks valiti soojaveeboiler (joonis 1.2). Üheks põhjuseks, miks soojaveeboiler valiti, on see, et elektrikütel põhineval soojaveeboileril võib olla elektritarbimise osakaal kodumajapidamistest kuni 50% [6]. Lisaks täidab soojaveeboiler eelnevalt püstitatud kriteeriumeid. See seade on juhitav ja selle tööd saab optimeerida energia- ja kulutõhususe vaates, määrates elektritarbimist näiteks ajale, kus elektribörsi hind on keskmisest odavam. Samuti on soojaveeboileri elektritarbimist võimalik katkestada lühiajaliseks perioodiks, ilma et see mõjutaks seadme üldist seisundit ja kasutaja mugavust, sest vesi jääb boileris veel teatud ajaks soojaks pärast kütteelementide välja lülitamist.



Joonis 1.2 Atlantic 2000W soojaveeboiler

1.2.3 Elektriauto

Kolmandaks seadmeks valiti Mitsubishi i-MiEV elektriauto (joonis 1.3). See seade vastab esitatud kriteeriumitele ning tegu on kodumajapidamisseadmega, mille elektritarbimise osakaal on kodumajapidamistes tõusmas [7]. 2023. aastal moodustasid elektriautod 6,3% kõigist Eestis müüdud uutest autodest [8]. Selle seadme elektritarbimist on võimalik paindlikult juhtida, lähtudes nii kodumajapidamise vajadustest kui ka elektrihinnast. See loob võimaluse laadida elektriautot ajal, mil elektrihind on madalam. Lisaks on tegu seadmega, mille elektritarbimist saab katkestada, ilma et see mõjutaks sõiduki tehnilist seisundit negatiivselt. Siin on aga oluline, et elektritarbimise katkestamine ei segaks kasutaja mugavust. Näiteks ei tohiks tekkida olukorda, kus elektritarbimise katkestamise tõttu ei ole elektriauto aku piisavalt täis laetud hetkeks, mil kasutaja soovib elektriautoga sõitma minna.



Joonis 1.3 Mitsubishi i-MiEV elektriauto

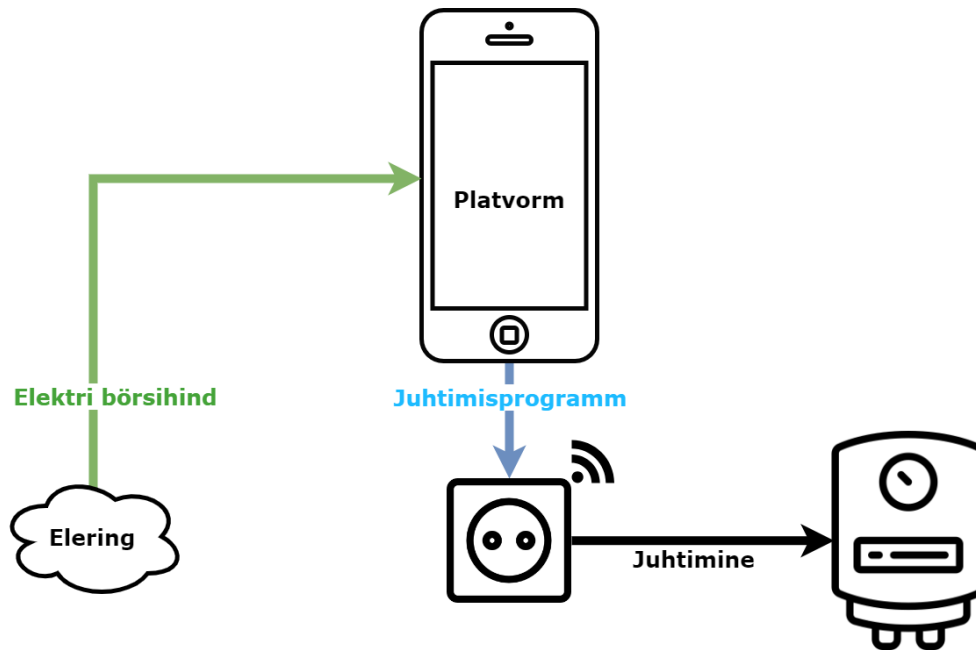
2. ÜLEVAADE JUHTIMISLAHENDUSEST JA ERINEVATEST JUHTIMISALGORITMIDEST

Selleks, et valitud kodumajapidamisseadmeid saaks energia- ja kulutõhusalt juhtida, oli neile vaja luua sobiv juhtimislahendus, mis suudaks kasutada erinevaid juhtimisalgoritme kodumajapidamisseadmete juhtimiseks. Näiteks juhtimisalgoritm, kus tarbimise juhtimisel arvestatakse erinevaid parameetreid nagu näiteks elektrienergia või toatemperatuuri. Käesoleva lõputöö üheks eesmärgiks oli täiendada olemasolevat elektritarbimise juhtimise platvormi prototüüplahendust.

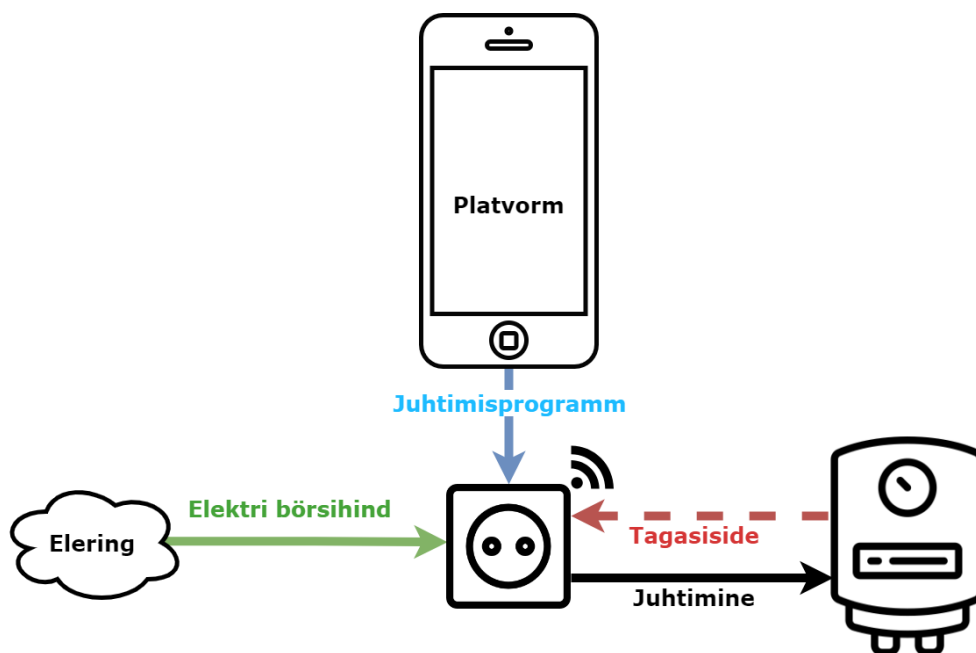
Selles peatükis tehakse ülevaade lõputöö käigus loodud juhtimislahendusest ja tuuakse välja nõuded, millele juhtimislahendus pidi vastama. Samuti tuuakse välja erinevad juhtimisalgoritmid, mida on varasemates töödes kasutatud. Lisaks tuuakse välja lõputöö jaoks valitud juhtimisalgoritmid, mida edaspidi kasutati.

2.1 Juhtimislahendus ja sellest tulenevad nõuded

Eelnevalt oli elektritarbimise juhtimise platvormi abil võimalik seadmeid ainult manuaalselt juhtida, ehk kasutaja pidi iga päev juhtimisseadmele ise uue juhtimisprogrammi sisestama. Manuaalne juhtimine on esitatud lihtsustatud kujul joonise 2.1 skeemil, kus platvorm saab kätte elektri börsihinna ja selle põhjal saadab kasutaja juhtimisseadmele juhtimisprogrammi. Lõputöö käigus loodi automaatne juhtimislahendus, mis suudab kasutada erinevaid juhtimisalgoritme. Automaatne juhtimine on välja toodud joonisel 2.2, kus kasutaja saadab ühe korra juhtimisseadmele juhtimisprogrammi, milles on juhtimisalgoritm, ja pärast seda hakkab juhtimisseade ise saama vajaminevaid parameetreid, näiteks elektri börsihinda. Lisaks loodi võimalus, kus juhtimisseade on võimeline saama kodumajapidamisseadmelt tagasisidet. Näiteks soojaveeboileri puhul saaks juhtimisseade teada boileri temperatuuri ja sellega juhtimisel arvestada.



Joonis 2.1 Elektritarbimise juhtimise platvormi manuaalne juhtimine



Joonis 2.2 Elektritarbimise juhtimise platvormi automaatne juhtimine

Eelnevalt väljatoodud juhtimislahendusega tulid kaasa ka nõuded, millele juhtimislahendus vastama pidi. Nõuded tulid kolmest kohast: platvormist, juhtimisseadmest ja kodumajapidamisseadmest.

Elektritarbimise juhtimise platvormi puhul tulenesid nõuded sellest, et tegu oli platvormi prototüüplahendusega. See tähendas, et juhtimisseadmeteks olid ainult tootja Shelly [9] seadmed. See määras ära, mis juhtimisseadmetega tuli juhtimislahendust luua.

Lisaks pidi automaatjuhtimine töötama Shelly seadmetel, kuna platvormiga ei olnud liidestatud ühtegi lisariistvara, näiteks serverit, kust saaks automaatjuhtimist teostada.

Juhtimisseadmest tulenevad nõuded, st tootja Shelly seadmetest tulenevad nõuded on tingitud seadmete piiratud programmeerimisvõimekusest. Selle all mõeldakse, et juhtimisprogramm, mis Shelly seadmetele sisestati, pidi olema ülesehituse ja arvutusvõimsuse poolest lihtne. Shelly programmeerimiseks kasutatakse nimelt modifitseeritud JavaScripti versiooni, mille võimekust on oluliselt piiratud. Seetõttu ei saa kasutada paljusid muidu saadaval olevaid JavaScripti funktsioone. Lisaks ei saa keerulisemaid funktsioone käsitsi luua, sest programmikood ei tohi olla liiga pikk, kuna Shelly seadmetel on piiratud mälu maht [10].

Kodumajapidamisseadmete nõuded tulenevad nende juhtimisest. Nagu eelnevalt mainitud, pidi tegu olema juhitavate kodumajapidamisseadmetega. Kuna juhtimisseadmeks olid määratud tootja Shelly seadmed, pidid kodumajapidamisseadmed olema juhitavad elektritoite katkestamise kaudu. Kuna Shelly seadmed on releetüüpi, siis seetõttu ei ole neil võimekust näiteks pinget või voolu reguleerida.

Pärast juhtimislahenduse nõuete kaardistamist hakati uurima, milliseid juhtimisalgoritme saaks selle juhtimislahenduse puhul kasutada. Järgnevas peatükis tehakse ülevaade nendest juhtimisalgoritmidest, mida on eelnevates töödes kasutatud kodumajapidamisseadmete juhtimiseks. Lisaks tuuakse välja need juhtimisalgoritmide, mida edaspidi lõputöö jaoks kasutati.

2.2 Eelnevates töödes kasutatud juhtimisalgoritmide

Kodumajapidamisseadmete tarbimise juhtimiseks on võimalik kasutada palju erinevaid juhtimisalgoritme. Juhtimisalgoritmidel saab olla palju erinevaid eesmärke. Eelnevalt tehtud tööde juures on peamiseks eesmärkideks olnud elektri hinnast tuleneva kulu, elektritarbimise ja tippkoormuse vähendamine, elektritarbimise ühtlustamine, taastuenergia maksimaalne kasutamine ja kasvuhoonegaaside vähendamine [11]. Lõputöö käigus on kasutatavate juhtimisalgoritmide eesmärgiks olla võimalikult energia- ja kulutõhusad, säilitades samal ajal kasutaja mugavust.

Alapeatükkides 2.1.1–2.1.4 tehakse ülevaade nendest juhtimisalgoritmidest, mis olid osa eelnevast uurimistööst, kus võrreldi 81 erinevas uuringus kasutatud juhtimisalgoritme [11]. Tabel 2.1 on ülevaatlik tabel uurimistööst, kus näidatakse, kui tihti kasutatakse teatud juhtimisalgoritme käesoleva töö raames valitud seadmete

juhtimiseks, ning tabelis 2.2 on näha, mitu korda erinevad juhtimisalgoritmid esinesid uuringutes. Lisaks alapeatükis 2.1.5 tehakse ülevaade reeglipõhistest juhtimisalgoritmidest.

Tabel 2.1 Uuringus esinenud juhtimisalgoritmide kasutamine kodumajapidamisseadmetel

Juhtimisalgoritm	Seade		
	Kütte-, ventilatsiooni- ja kliimaseadmed	Elektriauto	Kuuma vee süsteem
Geneetiline algoritm	2	0	1
Osakeste parvega optimeerimine	1	1	2
Lineaarne programmeerimine	4	4	2
Stiimulõpe	3	3	1
Mänguteooria	3	4	1
Muud	5	5	4
Kokku	18	17	11

Tabel 2.2 Uuringus esinenud juhtimisalgoritmide esinemissagedus

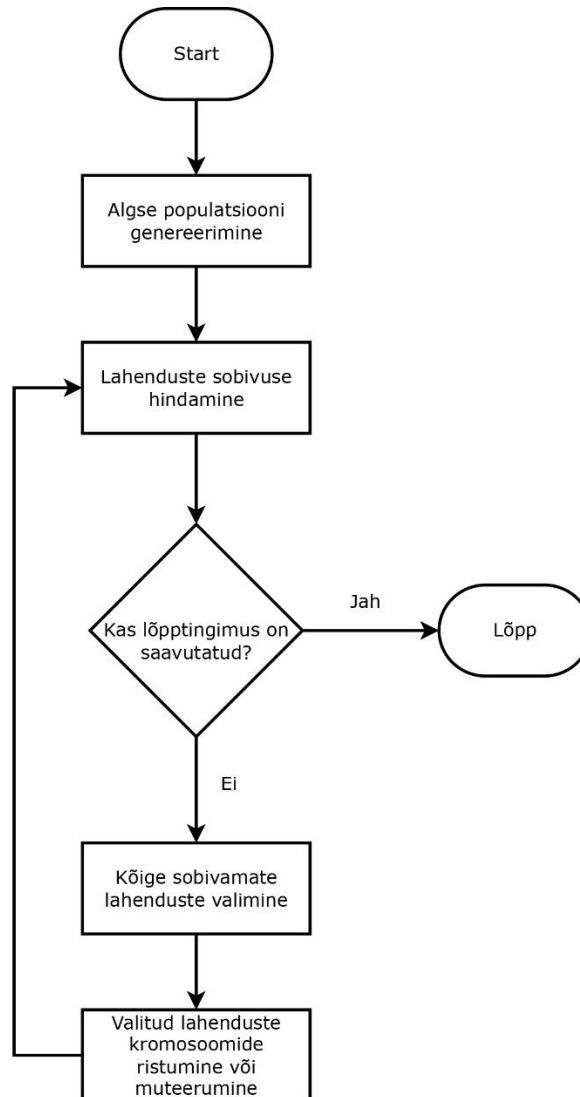
Juhtimisalgoritm	Korduste arv uuringutes
Geneetiline algoritm	10
Osakeste parvega optimeerimine	5
Lineaarne programmeerimine	20
Stiimulõpe	13
Mänguteooria	14
Muud	19
Kokku	81

2.2.1 Geneetiline algoritm

Geneetilist algoritmi (GA) kasutatakse piirangute ja piiranguteta optimeerimise probleemide lahendamiseks. GA põhineb Charles Darwini evolutsiooniteoorial, kus kõige paremini kohanduvad jäävad ellu ja annavad edasi oma geenid enda järglastele [12], [13]. GA-d kasutatakse erinevates valdkondades, näiteks masinõppes, pilditöötlemises, transportsõidukite marsruutide planeerimises, majandusteaduses ja bioinformaatikas [14]. GA-d on kasutatud käesoleva tööga sarnaseid probleeme lahendades [15], [16].

GA algab enamjaolt suvaliselt genereeritud lahendustega, mida kutsutakse algseks populatsiooniks, kus igal lahendusel on vähemalt üks iseloomulik omadus, mida kutsutakse kromosoomiks. Uute populatsioonide loomise protsess on iteratiivne ning iga iteratsiooni populatsiooni kutsutakse generatsiooniks. Igal generatsioonil tehakse sobivuse hindamine nii uute lahenduste kui ka hetkel olemasolevate kromosoomide kohta. Sobivamate lahenduste kromosoomidega toimub kas ristumine või muteerumine ning need antakse edasi järgmisele generatsioonile. Edukate generatsioonide abil

jõutakse lõpuks välja optimaalse lahenduse. Enamjaolt lõpetab algoritm töötamise, kui on saavutatud lõpitingimus, milleks võib olla maksimum arv generatsioone või kasutaja määratud optimaalse lahenduse sobivuse taseme saavutamine [12], [13], [17]. Tüüpilise GA lihtsustatud protsessi diagramm on toodud välja joonisel 2.3.



Joonis 2.3 Geneetiline algoritm

GA kasutamise eeliste hulka kuuluvad[18]

- paindlikkus – GA on võimalik kasutada paljudes erinevates valdkondades ja erinevate optimeerimise probleemide lahendamiseks;
- lai otsinguruum – suurte ja keerukate andmete korral suudab GA tõhusalt leida potentsiaalseid lahendusi;
- robustsus – GA suudab efektiivselt hakkama saada mürarohketes ja muutuvates keskkondades.

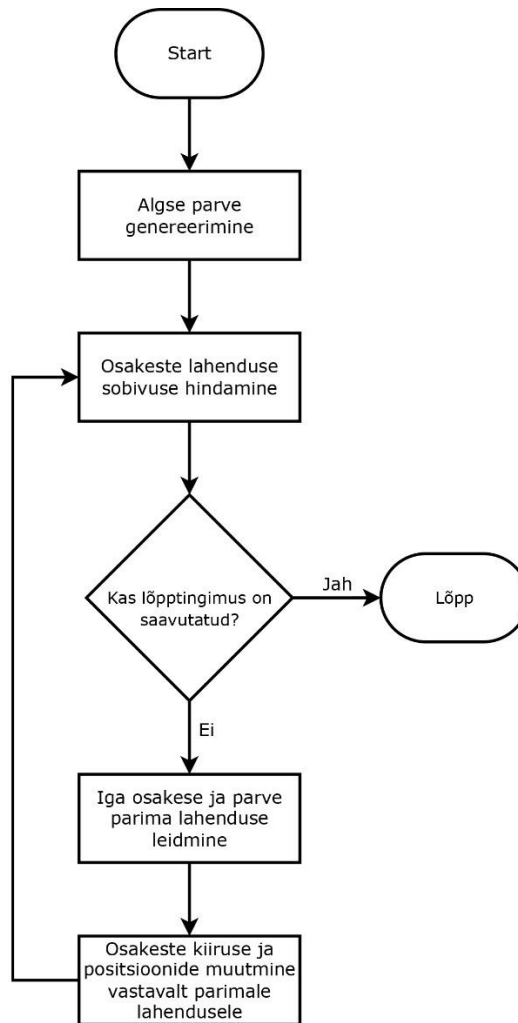
GA puuduste hulka kuuluvad

- erinevate parameetrite määramine – GA võimekus ja efektiivsus sõltuvad suuresti kasutaja poolt määratud parameetritest, milleks on näiteks populatsiooni suurus ning ristumis- ja muteerumissagedus. Sobivate parameetrite määramine tihti osutab keerukaks ja aeganõudvaks;
- optimaalse lahenduse täpsus – GA on heuristiline algoritm, mis tähendab, et algoritm otsib sobivat lahendust, aga mitte alati kõige optimaalsemat.

2.2.2 Osakeste parvega optimeerimine

Particle swarm optimization (PSO) ehk osakeste parvega optimeerimine on heuristiline optimeerimise meetod, mida kasutatakse keerukate ja mittelineaarsete probleemide lahendamiseks. PSO põhineb linnuparvede, kalade ja putukate sotsiaalsel käitumisel, kus näiteks linnud teevad linnuparves koostööd, et leida kõige parem toiduallikas. Iga lind tugineb nii enda kui ka teiste lindude kogemusele, et leida uusi ja paremaid toiduallikaid [19]. PSO-d kasutatakse automaatjuhtimissüsteemides, ehitusprojektide planeerimisel ja elektri- ja elektroonikaseadmete valdkonnas [20]. Lisaks on PSO-d kasutatud kodumajapidamisseadmete juhtimiseks [16], [21].

PSO algab osakeste parve genereerimisega, kus iga osake esindab potentsiaalset lahendust püstitatud optimeerimise probleemile. Osakese omadusteks on tema positsioon ja kiirus. Seejärel algab PSO lahendamise iteratiivne protsess. Protsessi alguses hinnatakse iga osakese lahenduse sobivust püstitatud probleemile. Pärast seda leitakse iga osakese ja parve seni leitud parim lahendus. Viimaks toimub osakeste kiiruse ja positsiooni muutmine vastavalt nende isiklikule ja parve parimale lahendusele. Lisaks kaasatakse viimases sammus mõned juhuslikud kõrvalekalded, et kogu otsinguruumi efektiivselt läbida. PSO lõpetab töötamise, kui on saavutatud lõpptingimus, mis võib näiteks olla maksimaalse iteratsioonide arvuni jõudmine või kasutaja määratud optimaalse lahenduse sobivuse taseme saavutamine [19]. Tüüpilise PSO lihtsustatud protsessi diagramm on toodud välja joonisel 2.4.



Joonis 2.4 Osakeste parvega optimeerimine

2.2.3 Lineaarne programmeerimine

Lineaarne programmeerimine, tuntud ka kui lineaarne optimeerimine, on matemaatikas optimeerimise meetod, millega leitakse lineaarse funktsiooni muutujate väärtused, mille puhul funktsiooni väärtus on minimaalne või maksimaalne. Optimeerimise käigus võetakse arvesse võrdsuse ja ebavõrdsuse piirangud, mis on määratud muutujate väärtustele [22], [23]. Lineaarset programmeerimist on kasutatud eelnevates töodes kodumajapidamisseadmete tarbimise juhtimiseks, et olla võimalikult nii energia- ja kulutõhus kui ka samal ajal säilitada kodumajapidamistes tarbija mugavus [24].

2.2.4 Masinõpe

Masinõpe on üks andmeanalüüsi meetoditest, mille abil saab automatiseerida analüütilise mudeli koostamist. Samuti on tegu tehisintellekti ühe haruga, mis keskendub arvutisüsteemide ehitamisele, mis saavad õppida ja teha otsuseid

olemasolevate andmete põhjal. Masinõppe algoritmid on treenitud leidma andmetest seoseid ja mustreid, et teha ennustusi andmete põhjal, klassifitseerida informatsiooni, grupeerida andmepunkte ja genereerida uut sisu [25], [26]. Kodumajapidamiste elektritarbimise juhtimiseks on eelnevates töodes kasutatud masinõppe liike nagu näiteks stiimulõpe [27] ja mänguteooria [28].

Masinõpe töötab mudeli ülesehitamise põhimõttel. Masinõppes kasutatavad algoritmid ehitatakse üles mudelile olemasolevate treeningandmete põhjal. Uute sisendandmete puhul kasutab treenitud masinõpe algoritm loodud mudelit, et teha prognoos. Prognoosi korral kontrollitakse täpsust, et hinnata, kas masinõpe algoritm on soovitud täpsusega. Vajadusel treenitakse seda täiendatud koolitusandmetega [29]. Masinõppel on tänapäeval palju erinevaid rakendusi. Näiteks kasutatakse masinõpet erinevates valdkondades: sotsiaalmeedias, näo- ja hääletuvastussüsteemides, navigatsioonisüsteemides, spämmi filtrites, autopilootsüsteemides ja ilmaprognoosides [30].

Masinõppe eelisteks on olemasolevate mudelite kasutamine, pidev areng ja mitmekülgsus. Masinõppe mudelid nõuavad tihti suure hulga andmeid ja ressursse mudeli treenimiseks. Olemasolevate mudelite kasutamisega saab kasutada eelnevalt treenitud masinõppe mudeleid. Eelnevalt treenitud mudelit saab vastavalt oma nõuetele ja soovidele konfigurereida, et saada endale sobiv mudel. Niisugust tehnikat kasutatakse selleks, et säästa aega ja ressursi uue mudeli koostamisel [31]. Masinõppe mudelid on dünaamilised ning võimelised õppima ja kohanduma aja jooksul, kui neile antakse juurde uusi andmeid. See omadus tuleb kasuks näiteks pidevalt muutuv keskkonnas, kus uute andmete abil võivad esile tulla uued mustrid või seosed, millest mudel saab õppida. Masinõppe mitmekülgsus tuleb sellest, et masinõppe mudeleid saab kasutada mitmesugustes valdkondades. See tuleneb masinõppe algoritmide võimest töödelda erinevaid tüüpi andmeid nagu näiteks teksti, pilti, heli ja numbrilisi andmeid [30].

2.2.5 Reeglipõhised algoritmid

Reeglipõhine algoritm koosneb „kui-siis“ jadast, mis tugineb teatud tingimustele. Tingimuste põhjal koostatakse reeglid, mis kirjeldavad, kuidas käituda iga tingimuse korral. Tähtsuse „kui-siis“ all mõeldakse, et kui mingi tingimus on tõene või väär, siis mis on järgnev tegevus (joonis 2.5). Reeglipõhised algoritmid võimaldavad kasutada lihtsat lahendamismeetodit, mis sobib mitmesuguste erinevate probleemide lahendamiseks. Need sobivad valdkondadesse, kus probleemiala saab väljendada „kui-siis“ reeglitega ning probleemiala pole liialt mahukas ega suur. Juhul kui kasutatakse

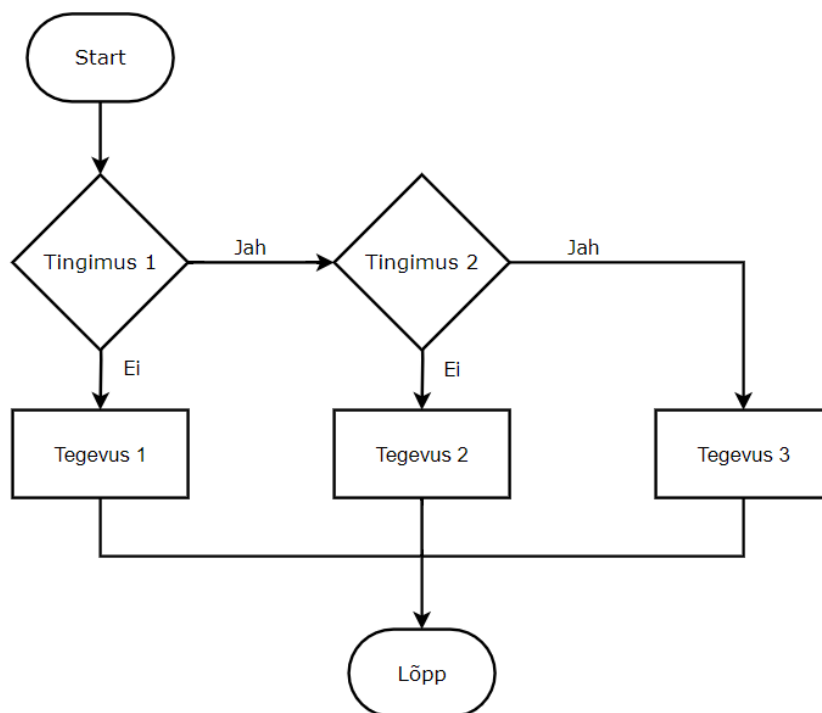
liiga palju reegleid või probleemiala on liiga suur, muutub süsteem liialt keerukas ning selle hooldamine ja dokumenteerimine ebapraktiliselt töömahukaks [32].

Reeglipõhiseid algoritme kasutamise eelised on [33], [34]

- täpsus, mis tuleneb sellest, et reeglipõhised algoritmid toimivad põhjuse ja tagajärje alusel ning ainult oma eelnevalt määratud reeglite piires. Seega toimivad reeglid piiridena, et tagada täpsus ja korrektsus;
- lihtne kasutus, sest need vajavad töötamiseks väiksel määral andmeid ning nende töökaik on korduv protsess. Tänu sellele on reeglipõhiseid algoritme lihtne luua, kasutada ja täiendada;
- otsekohene loogika, mis käsitleb püsitatud probleemi ilma suuremate arvutusteta. See tagab reeglipõhiste algoritmide kasutamise kiiruse.

Reeglipõhiste algoritmide miinusteks on [33], [34]

- kohandumisvõime ja piiratud kasutamisulatus. Reeglipõhised algoritmid töötavad ainult nende probleemi lahendamiseks, milleks nad olid loodud. Seega on nende puhul vaja igaks uueks probleemiks reegleid välja mõelda ja neid rakendada. See toob kaasa pideva ümberkujundamise ja täiendamise. Seetõttu on reeglipõhistel algoritmidel kehv kohandumisvõime ja piiratud kasutamisulatus.



Joonis 2.5 Reeglipõhine algoritm

2.3 Valitud juhtimisalgoritmid

Tulenevalt välja toodud juhtimislahenduse nõuetest ei sobi selles töös kasutada juhtimisalgoritme, milleks on masinõpe, geneetiline algoritm, osakeste parvega optimeerimine ja lineaarne programmeerimine. Väljatoodud juhtimisalgoritmide rakendamine ei ole teostatav, sest need vajavad rohkem programmeerimisvõimekust, kui Shelly seadmed suudavad pakkuda. Samuti vajavad väljatoodud juhtimisalgoritmid kasutajalt palju sisendparameetreid, et efektiivselt toimida. Samuti ei ole töös kasutatava elektritarbimise juhtimise platvormiga liidestatud hetkel ühtegi lisariistavara, nagu näiteks serverit, kus oleks võimalik keerulisemaid juhtimisalgoritme rakendada. Lisaks arvestati sellega, et tegu on esmase prototüüplahendusega juhtimisalgoritmide rakendamiseks. Sellest tulenevalt otsustati töös kasutada lihtsamaid reeglipõhiseid juhtimisalgoritme.

Siiski tuleviku vaates oleks vaja kindlasti lisaks uurida ja katsetada, kuidas teostada keerulisemate juhtimisalgoritmide, nagu stiimulõpe, kasutamist elektritarbimise juhtimise platvormil. Seejärel võiks neid katsetada ja analüüsida, kuidas need on võrreldavad selles lõputöös kasutatud juhtimisalgoritmidega.

2.3.1 Soojussalvestite juhtimisalgoritmid

Kuna töö jaoks valiti kaheks juhitavaks kodumajapidamisseadmeks soojaveeboiler ja pörandaküte, mida saab käsitleda kui soojussalvestitena, siis seetõttu uuriti juhtimisalgoritme, mis on mõeldud soojussalvestite tarbimise juhtimiseks. Aluseks võeti uuring [35], kus analüüsiti ja simuleeriti erinevaid juhtimisalgoritme soojussalvestite juhtimiseks. Uurimistöös simuleeriti kaheksat erinevat juhtimisalgoritmi ning võrreldi neid energia- ja kulutõhususe vaates. Lõputöös tuuakse välja kaks juhtimisalgoritmi, mis eelnevas uuringus tehtud simulatsiooni põhjal näitasid häid tulemusi. Edaspidises töös tähistatakse neid kui mudel A (valem 2.1) ja mudel B (valem 2.2). Käesoleva töö jaoks mõlemat mudelit lihtsustati temperatuuri piiride määramise osas. Varasemas uuringus kasutati temperatuuri piiride arvutamiseks eelnevat defineeritud hüstereesi, aga selle töö jaoks lasti kasutajal valida temperatuuri piirid manuaalselt.

Mudel A on kirjeldatav järgneva valemiga:

$$p_i \geq p_i^{avg} \rightarrow T_i^{set} = T^{min}; \quad p_i < p_i^{avg} \rightarrow T_i^{set} = T^{max} \quad (2.1)$$

kus p_i – elektrihind aja hetkel i , €/kWh,

p_i^{avg} – 24 tunni keskmine elektri hind, €/kWh,

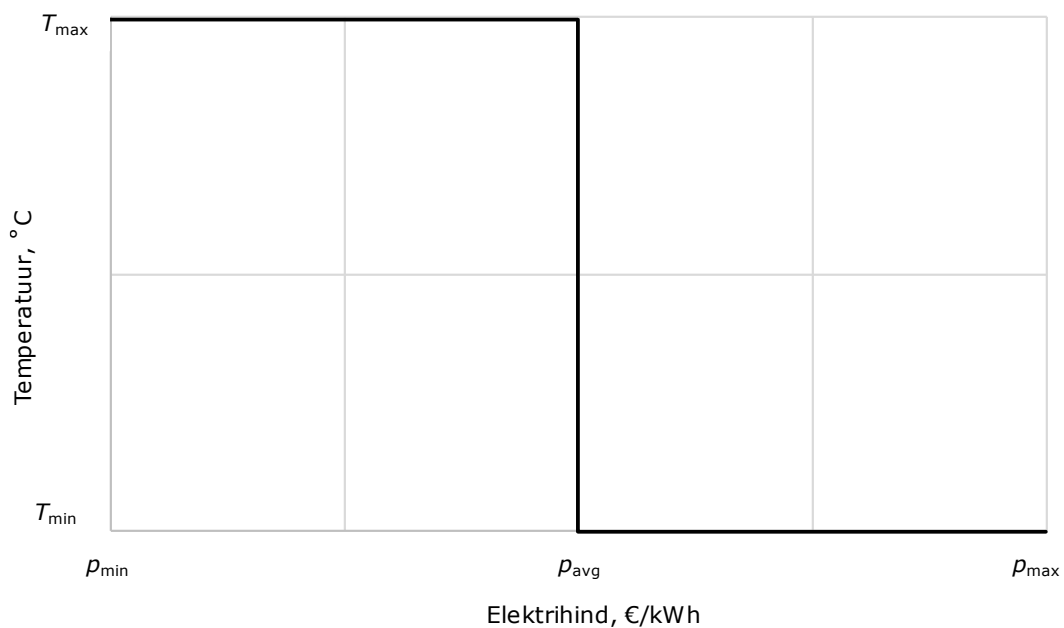
T_i^{set} – määratud temperatuur ajahetkel i , °C,

T^{min} – lubatud madalaim temperatuur, °C,

T^{max} – lubatud kõrgeim temperatuur, °C.

Mudel A eesmärgiks on olla võimalikult kulutõhus ehk vältida kütmist tundidel, kus elektri börsihind on keskmisest kõrgem. Juhtimisalgoritmiga kontrollitakse, kas hetke elektri hinna väärtus on madalam, võrdne või kõrgem võrreldes 24 tunni keskmise elektri hinnaga. Juhul kui on suurem või võrdne, määratakse temperatuuriks lubatud madalaim temperatuur. Kui on väiksem, siis määratakse temperatuuriks lubatud kõrgeim temperatuur. Niisugusel kujul on sisuliselt tegemist reeglipõhise mittelineaarse juhtimisalgoritmiga, kus juhul, kui elektri hind on madalam keskmisest hinnast, siis $T_i^{set} = T^{max}$ ja kui ei ole, siis $T_i^{set} = T^{min}$. Mudel A seletatav graafik on välja toodud joonisel 2.6.

Selle mudeli sisendparameetriteks on p_i , p_i^{avg} , T^{min} ja T^{max} , kus T^{min} ja T^{max} on kasutaja määratud parameetrid ning p_i ja p_i^{avg} on väliselt määratud parameetrid. Väljundparameetriks on T_i^{set} , millele vastavalt ka soojussalvestit juhitakse määratud temperatuurini.



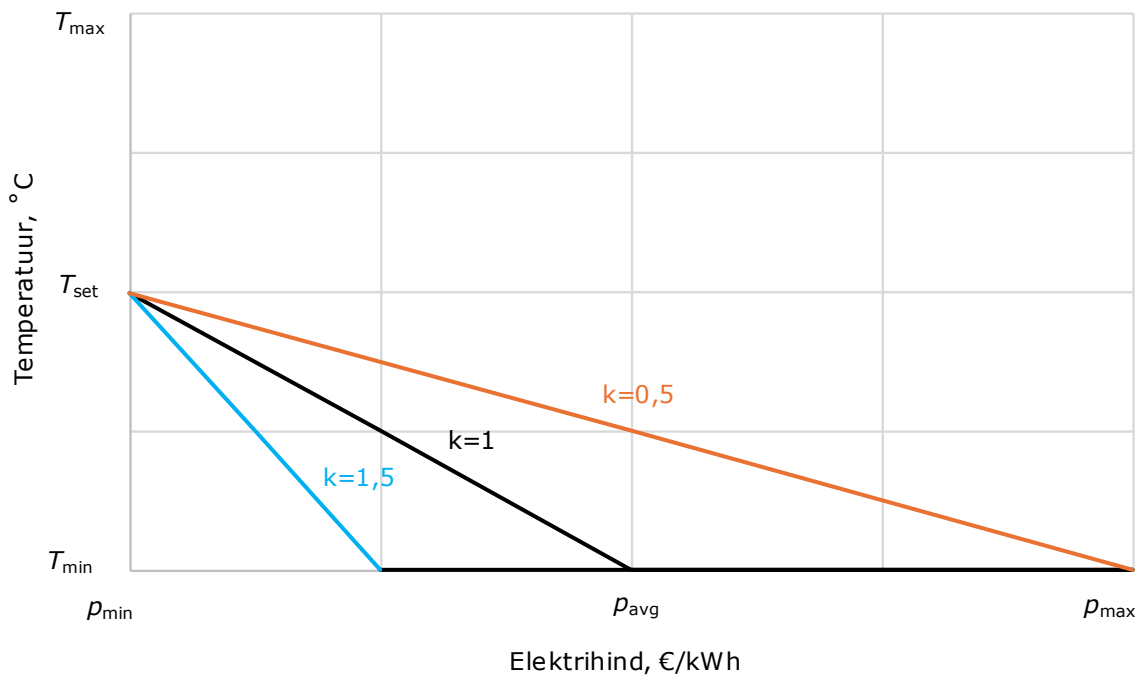
Joonis 2.6 Mudel A graafik

Mudel B on kirjeldatav järgneva valemiga:

$$T_i^{set} = T^{set} - k \cdot \frac{(p_i - p_i^{min})(T^{min} - T^{set})}{(p_i^{min} - p_i^{avg})} \quad (2.2)$$

- kus p_i – elektri hind aja hetkel i , €/kWh,
- p_i^{avg} – 24 tunni keskmine elektri hind, €/kWh,
- p_i^{min} – 24 tunni madalaim elektri hind, €/kWh,
- T_i^{set} – määratud temperatuur ajahetkel i , °C,
- T^{min} – lubatud madalaim temperatuur, °C,
- T^{set} – seadistatud temperatuur, °C,
- k - mugavuse (ökonoomsuse) koefitsient.

Mudel B eesmärgiks on olla võimalikult energiasäästlik, aga samal ajal ka hoida temperatuuri mugavuse piires. Juhtimisalgoritmiga vähendatakse määratud temperatuuri mingi osa võrra. Lahutava osa suurus on määratud lubatud temperatuuri ja elektri börsihinna järgi. Mida kallim on vastaval ajahetkel elektri börsihind, seda rohkem vähendatakse määratud temperatuuri. Juhul kui ajahetke elektri hinnaks on selle päeva madalaim elektri hind, on lahutatav osa null. Mugavuse koefitsient määrab ära tõusu nurga ehk kui järsult langeb temperatuur elektri hinna kasvades. Joonisel 2.7 on välja toodud mudel B lihtsustatud graafik erinevate mugavuse koefitsiendi väärtustega. Lõputöös on edaspidi mugavuse koefitsient võrdne ühega.



Joonis 2.7 Mudel B lihtsustatud graafik

Mudel B puhul on sisendparameetriteks p_i , p_i^{min} , p_i^{avg} , T^{min} ja T^{set} , kus T^{min} ja T^{set} on kasutaja määratud parameetrid ja p_i , p_i^{min} ja p_i^{avg} on väliselt määratud parameetrid. Samamoodi nagu mudel A puhul on väljundparameetriks T_i^{set} . Lisaks tuleb välja tuua, et tulenevalt valemist 2.2 on võimalik olukord, kus $T_i^{set} < T^{min}$. Sarnaselt koostatud uuringule [35] seatakse selles lõputöös piir, et niisugust olukorda vältida. Juhul kui $T_i^{set} < T^{min}$, siis $T_i^{set} = T^{min}$ ehk kui temperatuur peaks olema alla miinimumtemperatuuri, siis on temperatuur võrdne miinimumtemperatuuriga.

2.3.2 Elektriauto juhtimisalgoritmid

Elektriauto juhtimisel lähtuti sellest, et katsetatav elektriauto on pidevalt kasutusel ning tulenevalt valitud juhtimisseadmest ei ole võimalik määrata elektriauto tarbimisvõimsust, vaid on ainult võimalik tarbimise sisse- ja väljalülitamine. Pidevast kasutusest tuleneb ka see, et elektriautol on kindel laadimisaeg ning elektriauto peab olema mingiks määratud ajaks täiesti täis laetud. Lähtuvalt nendest piirangutest otsustati kasutusele võtta mudel A (valem 2.3) ja mudel B (valem 2.4), aga neid muudeti, et need sobiksid paremini elektriauto tarbimise juhtimiseks.

Elektriauto jaoks muudetud mudel A valem on kirjeldatud järgnevalt:

$$p_i \geq p_i^{avg} \rightarrow E_i^{set} = E^{off}; \quad p_i < p_i^{avg} \rightarrow E_i^{set} = E^{on} \quad (2.3)$$

kus p_i – elektri hind aja hetkel i , €/kWh,

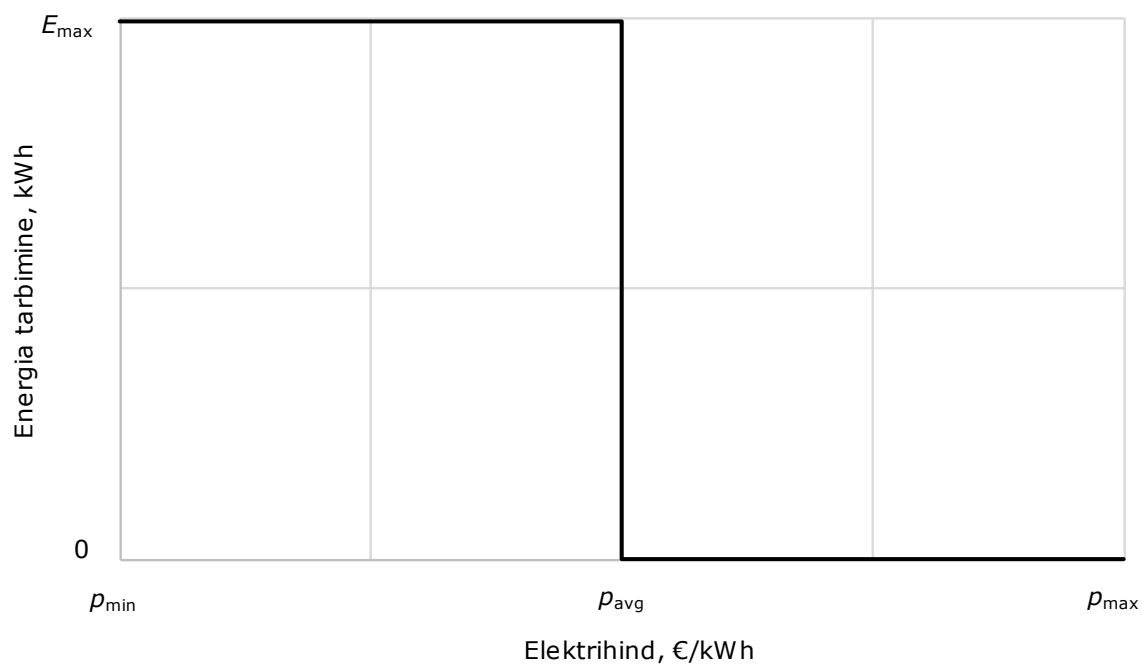
p_i^{avg} – laadimisakna vahemiku keskmine elektri hind, €/kWh,

E_i^{set} – määratud seadme olek ajahetkel i ,

E^{off} – seadme tarbimine on välja lülitatud,

E^{on} – seadme tarbimine on sisse lülitatud.

Elektriauto puhul on samuti mudel A eesmärgiks olla võimalikult kulusäästlik ehk elektriauto laadimine toimub ainult tundidel, kus elektri börsihind on keskmisest odavam. See mudel arvestab kasutaja määratud ajavahemikuga, kus elektriautot soovitakse laadida, ning seda vahemikku kutsutakse laadimisaknaks. See tähendab, et laadimine toimub ainult laadimisakna vahemikus. Juhtimisalgoritmiga kontrollitakse, kas ajahetke elektri hinna väärtus on madalam, võrdne või kõrgem võrreldes kasutaja määratud laadimisakna vahemiku keskmise elektri hinnaga. Juhul kui väärtus on suurem või võrdne, siis katkestatakse elektriauto laadimine. Kui elektri hind on keskmisest väiksem, siis lülitatakse elektriauto laadimine sisse. Mudel A valem on kirjeldatud graafiku kujul joonisel 2.8.



Joonis 2.8 Elektriauto mudel A graafik

Elektriauto jaoks muudetud mudel B valem on kirjeldatud järgnevalt:

$$E_i^{set} = E^{max} - \frac{(p_i - p_i^{min})(E^{min} - E^{max})}{(p_i^{min} - p_i^{avg})} \quad (2.4)$$

$$E^{min} = \frac{E^{mahu}}{x} \quad (2.5)$$

$$E^{max} = I \cdot U \quad (2.6)$$

kus p_i – elektrihind aja hetkel i , €/MWh,

p_i^{avg} – laadimisakna vahemiku keskmine elektrihind, €/MWh,

p_i^{min} – laadimisakna vahemiku madalaim elektrihind, €/MWh,

E_i^{set} – määratud seadme olek ajahetkel i ,

E^{min} – elektriauto soovitud miinimum tarbimine ühe tunni jooksul, kWh,

E^{max} – elektriauto maksimaalne tarbimine ühe tunni jooksul, kWh,

E^{mahu} – elektriauto aku mahutavus, kWh,

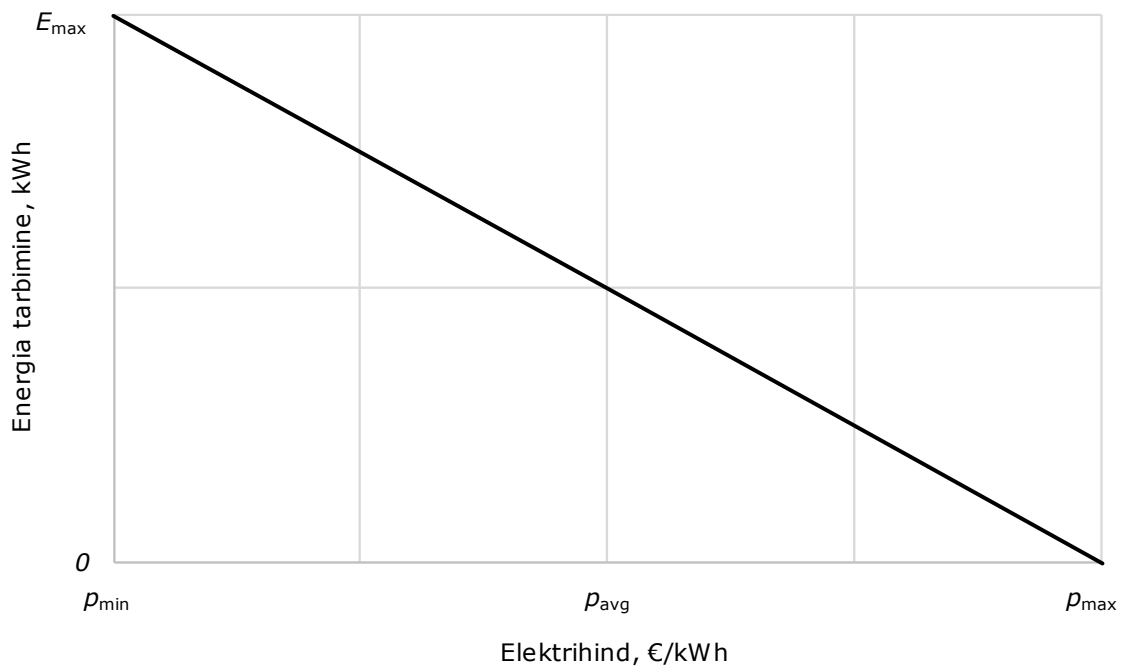
x – laadimisakna vahemiku pikkus,

I – elektriauto laadija vool, A,

U – elektriauto laadija pinge, V.

Mudel B kasutuselevõtu põhjenduseks oli see, et elektriauto laadimine mudel A-ga võib osutada teatud tingimustel liialt piiravaks. Kuna mudel A puhul laetakse elektriauto akut juhul, kui elektri hind on alla keskmise, võib tekkida olukord, kus tunde, millal akut laetakse, ei ole piisavalt. See tähendab, et akut ei suudeta soovitud koguses täis laadida. Selle jaoks saaks kasutada elektriauto laadimiseks mudelit B, sest see arvestab aku mahutavusega ja jagab laadimise tundide vahel ära nii, et aku saaks täiesti täis laetud. Arvutuslikul kujul saab mudel B lõpptulemust väljendada, kui $\sum E_i^{set} = E^{mahu}$.

Antud juhtimisalgoritmiga piiratakse seda, kui palju elektriauto ühe tunni jooksul enda akut laeb. Elektritarbimise piiramist teostatakse elektritarbimise katkestamisega. Igal uuel ajahetkel vähendatakse lubatud maksimaalset tarbimist teatud osa võrra. Vähendatava osa suurus sõltub elektriauto ja selle laadija võimekusest ning lisaks ka kasutaja määratud laadimisaknast. Mida kallim on ajahetkel elektri hind, seda enam piiratakse elektriauto laadimist sellel tunnil. Elektriauto laadimise piiramist teostatakse elektritarbimise katkestamisega. Mudel B valem on kirjeldatud graafiku kujul joonisel 2.9.

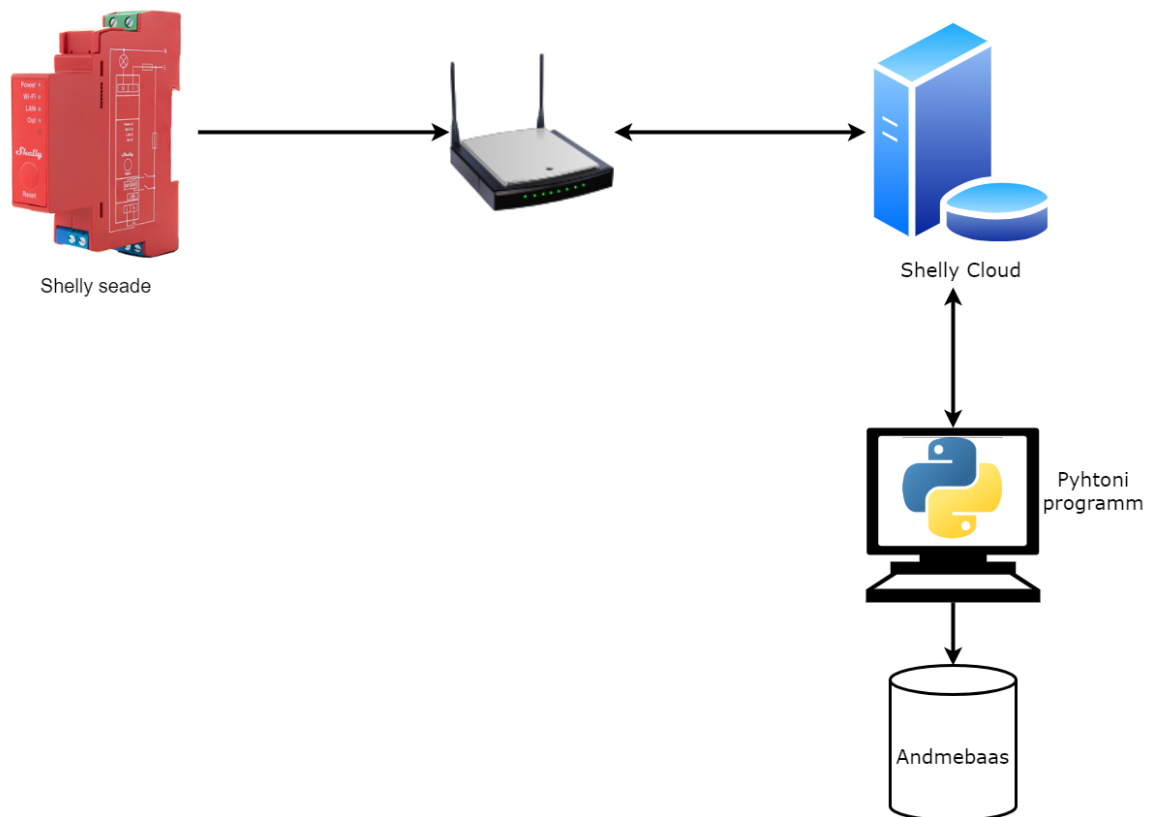


Joonis 2.9 Elektriauto mudel B

Elektriauto jaoks muudetud mudel B sisendparameetriteks on E^{mahu} , E^{max} , x , I , p_i^{min} , p_i^{avg} ja p_i , millest E^{mahu} , E^{max} , x ja I on kasutaja määratud sisendparameetrid ning p_i^{min} , p_i^{avg} ja p_i on väliselt määratud sisendparameetrid. Väljundparameetriks on sellel juhul E_i^{set} .

3. JUHTIMISALGORITMIDE KATSETAMINE KODUMAJAPIDAMISSEADMETEL

Selleks, et valitud juhtimisalgoritme saaks omavahel paremini võrrelda, viidi läbi katsed. Iga kodumajapidamisseadmega viidi läbi kolm erinevat katset, kus iga katse kestis üks nädal. Kõikide katsete jaoks kasutati sarnast hinnaprofiili, mis saadi Eleringi veebilehelt [36]. Soojaveeboileri ja pörandakütte hinnaprofiiliks võeti kuupäevade vahemik 21.03.2024–28.03.2024 ja elektriauto hinnaprofiiliks võeti vahemik 30.03.2024–06.04.2024. Võrguteenustasu puhul tehti lihtsustus ja valiti võrguteenuspakett 1, mis on ühetariifne. Seadmete juhtimiseks kasutati Shelly seadmete skriptimise võimekust. Energia andmete salvestamiseks kasutati Shelly Cloudi teenust [9] ja nii võimsuse kui ka temperatuuri salvestamiseks koostati Pyhtoni programm, mis logis Shelly-lt saadud andmeid. Kasutatavad seadmed ja nendevahelised ühendused on esitatud joonisel 3.1.



Joonis 3.1 Katseandmete logimine

Pörandakütte ja soojaveeboileri tarbimise juhtimiseks tehti kolm katset. Esimeseks katseks oli tavaolekus juhtimine, kus kodumajapidamisseadme elektritarbimist juhtiti vastavalt temperatuurile. Kui temperatuur oli võrdne või üle kasutaja määratud temperatuuri, lülitati seade välja ja kui temperatuur oli väiksem, lülitati seade sisse.

Teises ja kolmandas katses kasutati peatükis 2.2.1 välja toodud juhtimisalgoritmide mudelit A ja mudelit B.

Elektriauto puhul viidi läbi kolm katset. Esimeses katses vaadati, kuidas elektriauto tavaolekus laeb. Teises ja kolmandas katses kasutati peatükis 2.2.2 välja toodud ja elektriauto modifitseeritud laadimise jaoks kasutatavaid mudel A ja mudel B juhtimisalgoritme.

Katsete tulemusi analüüsiti ja võrreldi energia- ja kulutõhususe vaates. Järgnevatel alapeatükkides kirjeldatakse iga kodumajapidamisseadme katseid lähemalt ning lisaks tehakse analüüs katsete tulemustest.

3.1 Põrandakütte katsed ja tulemused

Põrandakütte tarbimise juhtimiseks kasutati Shelly Plus 1PM Mini. Maksimaalne võimsus, mida see seade suudab lülitada, on 2000 W ning kuna katsetatava põrandakütte võimsuseks oli ligikaudu 1500 W, siis oli Shelly seade piisav, et elektritarbimist juhtida. Põrandakütte temperatuuri mõõtmiseks kasutati Shelly Plus H&T termostaati ja mõõtmine tehti põranda pealt.

Põrandakütte elektritarbimise juhtimiseks määrati alguses algandmed, mida kasutati igas katses. Iga katse alguseks lasti põrandaküttele jahtuda 24°C juurde, seda tehti selleks, et kõik katsed algaksid võimalikult sarnasest punktist, mis tagab parema võrdluse. Teiste algandmete suhtes lähtuti tavakasutusest, st et hinnati, kuidas tavalistel päevadel kodumajapidamisseadet kasutatakse. Põrandakütte katse algandmed koos selgitustega on esitatud tabelis 3.1. Kõikide katsete tulemused on välja toodud tabelis 3.2.

Tabel 3.1 Põrandakütte katsete algandmed

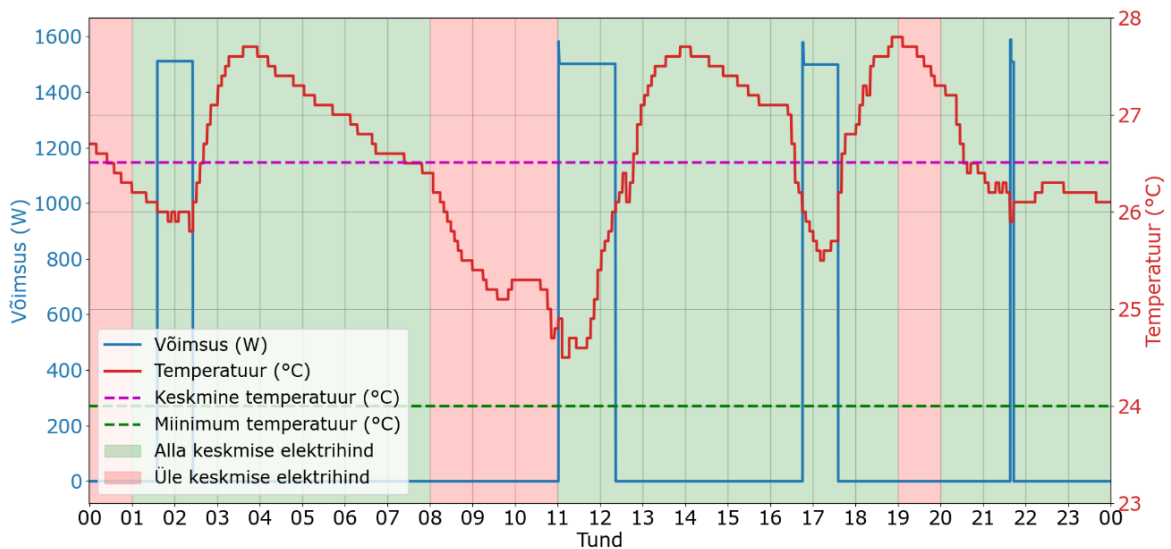
Tähis	Väärtus	Selgitus
T_{set}	25°C	Kasutaja määratud temperatuur
T_{min}	24°C	Lubatud madalaim temperatuur
T_{max}	26°C	Lubatud kõrgeim temperatuur

Tabeli 3.2 põhjal saab öelda, et põrandakütte tarbimise juhtimiseks töötas kõige energia- ja kulutõhusamalt mudel B. Energiatõhususe vaatest oli mudel B võrreldes tavaolekuga 6% võrra energiasäästlikum. See erinevus tuleneb sellest, et võrreldes tavaolekuga oli mudel B keskmine temperatuur 2% võrra madalam, mis tähendabki energiasäästu kütmise arvelt.

Tabel 3.2 Põrandakütte katsete tulemused

Suurus	Juhtimisalgoritm	Väärtus	Erinevus tavaolekust
Keskmine temperatuur, °C	Tavaolek	25,38	-
	Mudel A	26,12	3%
	Mudel B	24,87	-2%
Madalaim temperatuur, °C	Tavaolek	24	-
	Mudel A	23,9	0%
	Mudel B	23,5	-2%
Kõrgeim temperatuur, °C	Tavaolek	26,7	-
	Mudel A	27,8	4%
	Mudel B	26,5	-1%
Tarbimine kokku, kWh	Tavaolek	40,01	-
	Mudel A	42,82	7%
	Mudel B	37,6	-6%
Börsihinna maksumus, €	Tavaolek	3,03	-
	Mudel A	2,52	-17%
	Mudel B	2,35	-22%
Võrguteenustasu maksumus, €	Tavaolek	3,52	-
	Mudel A	3,77	7%
	Mudel B	3,31	-6%
Maksumus kokku, €	Tavaolek	6,55	-
	Mudel A	6,29	-4%
	Mudel B	5,66	-14%
Keskmine hind €/kWh	Tavaolek	0,164	-
	Mudel A	0,147	-10%
	Mudel B	0,151	-8%

Sarnaselt on tulemuste põhjal näha, et mudel A keskmine temperatuur oli 3% võrra suurem tavaolekust, mis omakorda põhjustas 7% tarbimise kasvu. Keskmise temperatuuri kasv on mudel A puhul põhjustatud kahest asjast. Esiteks, selle katse puhul mõõdeti põrandakütte temperatuuri põranda pealt. See tekitab olukorra, kus toimub ülekütmine, sest temperatuurianduri ja põrandakütte vahel on niivõrd suur mahtvuslik takistus. Kui temperatuuriandur on soovitud temperatuuri saavutanud, tõuseb inertsiga lõpptemperatuur veel märkimisväärselt (keskmiselt umbes 1,5 kraadi). Teiseks põhjuseks on graafikult (joonis 3.2) näha, et tulenevalt mudel A ja katse omadustest, tihti ei jõuagi põrandakütte temperatuur langeda miinimumtemperatuurini, vaid põrandat köetakse pidevalt kõrgemal temperatuuril, mis omakorda tõstab energia tarbimist.



Joonis 3.2 Põrandakütte katse graafik, mudel A, kuupäev 03.04.2024

Kulutõhususe poolest oli mudel B abil põrandakütte kütmine kokku 14% kulusäästlikum kui tavaolekus kütmine. Peamine kulu kokkuhoid tuleb elektri börsihinna maksimumusest. Võrreldes tavaolekuga oli elektri börsihinna kulu 22% väiksem. See tähendab, et mudel B suutis kütta tundidel, kus elektri börsihind oli madal ja samal ajal suutis hoida keskmist temperatuuritaset kasutaja määratud piirides. Samas tuleb välja tuua, et mudel A oli samuti efektiivne börsihinna maksimumuse langetamise poolest, aga suurenenud kogutarbimise tõttu kogumaksumus vähenes ainult 4% võrra. Siiski suutis mudel A hoida kõrgemat keskmist temperatuuri kui tavaolekus ja seda väiksema kogukuluga.

3.2 Soojaveeboileri katsed ja tulemused

Soojaveeboileri tarbimise juhtimiseks kasutati Shelly Plus 1PM, mis suudab maksimaalselt lülitada 4480W [37]. Kuna boileri võimsuseks oli 2000W, oli seade sobilik selle elektritarbimise juhtimiseks. Soojaveeboileri temperatuuri mõõtmiseks kasutati Shelly Plus 1PM-ga ühendatavat lisaosa Shelly Plus Add-on. Temperatuuri mõõtmiseks paigaldati Shelly DS18B20 digitaalne temperatuuriandur vastu boileri korpust. Sellest tulenes vahe mõõdetava temperatuuri ja soojaveeboileri reaalse temperatuuri vahel.

Soojaveeboileri elektritarbimise juhtimiseks määrati esmalt algandmed, mida kasutati iga katse puhul. Kuna temperatuuri mõõdeti soojaveeboileri korpuse seest (joonis 3.3), siis vaadati, mis temperatuuri juures soojaveeboiler tavaolekus töötab ja selle põhjal määrati katsete algandmed, mis on välja toodud tabelis 3.3. Kuna mõõtmine ei toimu boileri sees, on seetõttu määratud temperatuurid madalamad, kui reaalsed temperatuurid oleksid. Sarnaselt põrandakütte katsetele lasti soojaveeboileril iga katse

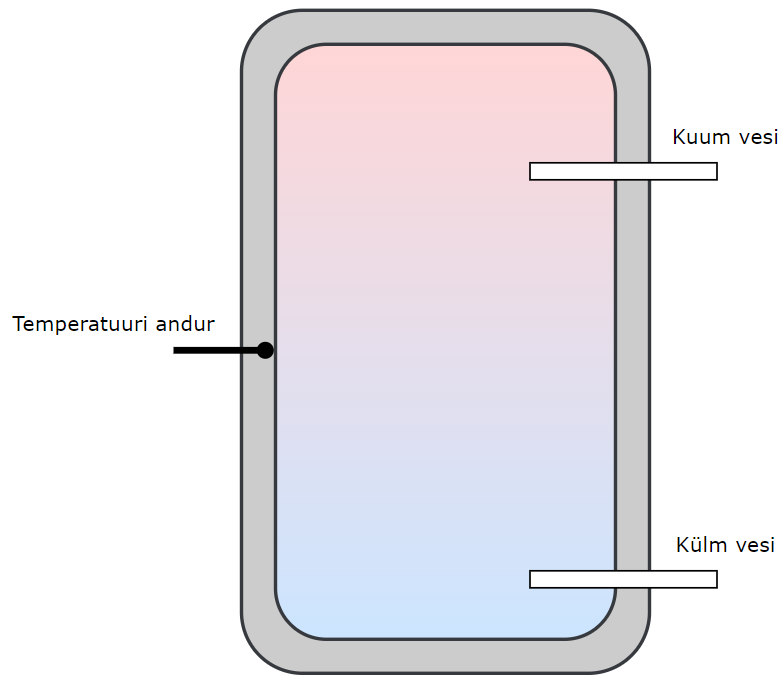
alguses jahtuda maha 28 kraadi juurde. Kõikide soojaveeboileri katsete tulemused on välja toodud tabelis 3.4.

Tabel 3.3 Soojaveeboileri katsete algandmed

Tähis	Väärtus	Selgitus
T_{set}	30 °C	Kasutaja määratud temperatuur
T_{min}	28 °C	Lubatud madalaim temperatuur
T_{max}	32 °C	Lubatud kõrgeim temperatuur

Tabel 3.4 Soojaveeboileri katsete tulemused

Suurus	Juhtimisalgoritm	Väärtus	Erinevus tavaolekust
Keskmise temperatuur, °C	Tavaolek	31,05	-
	Mudel A	31,7	2%
	Mudel B	29,77	-4%
Madalaim temperatuur, °C	Tavaolek	27,75	-
	Mudel A	26,44	-5%
	Mudel B	26,9	-3%
Kõrgeim temperatuur, °C	Tavaolek	33,44	-
	Mudel A	35,03	5%
	Mudel B	32,66	-2%
Tarbimine kokku, kWh	Tavaolek	7,46	-
	Mudel A	7,38	-1%
	Mudel B	6,59	-12%
Börsihinna maksumus, €	Tavaolek	0,54	-
	Mudel A	0,48	-11%
	Mudel B	0,44	-19%
Võrguteenustasu maksumus, €	Tavaolek	0,66	-
	Mudel A	0,65	-1%
	Mudel B	0,58	-12%
Maksumus kokku, €	Tavaolek	1,20	-
	Mudel A	1,13	-6%
	Mudel B	1,02	-15%
Keskmise hind €/kWh	Tavaolek	0,160	-
	Mudel A	0,153	-5%
	Mudel B	0,155	-4%



Joonis 3.3 Soojaveeboileri temperatuuri mõõtmine

Katsete tulemused näitavad, et soojaveeboileri juhtimiseks oli kõige energia- ja kulutõhusam mudel B. Energiatõhususe poolest vähenes mudel B abil kogutarbimine 12% võrra. Mudeli A puhul on näha, et selle katse puhul ei suutnud antud mudel olulist energiasäästu tekitada. See tulemus kattub põrandakütte katsetel saadud tulemustega, kus samuti mudel A juhtimisega ei suudetud energiasäästu tekitada. Siiski sarnaselt põrandakütte tulemustele suutis mudel A hoida kõrgemat keskmist temperatuuri kui tavaolekus ja seda väiksema kogukuluga.

Kulutõhususe vaates oli samuti mudel B kõige paremate tulemustega. Mudel B tarbimise juhtimisega suudeti kogumaksumust vähendada 15% võrra ja samas vähendades keskmist temperatuuri ainult 2% võrra. Need tulemused on võrreldavad nii põrandakütte tulemustega kui ka uuringus [35] tehtud simulatsiooni tulemustega, kus saadi kulusäästuks umbes 14%.

3.3 Elektriauto katse ja tulemused

Elektriauto tarbimise juhtimiseks kasutati seadet Shelly 1PM Pro, mille maksimaalne lülitamisvõimsus on 4480W ning kuna valitud elektriauto laadimisvõimsuseks oli 2300W, sobis see seade elektriauto tarbimise juhtimiseks.

Katsete puhul oli üheks määratud nõudeks see, et elektriauto oleks igal hommikul täiesti täis laetud. Seetõttu ei olnud katsete puhul võimalik kogutarbimist piirata. Katsete jaoks

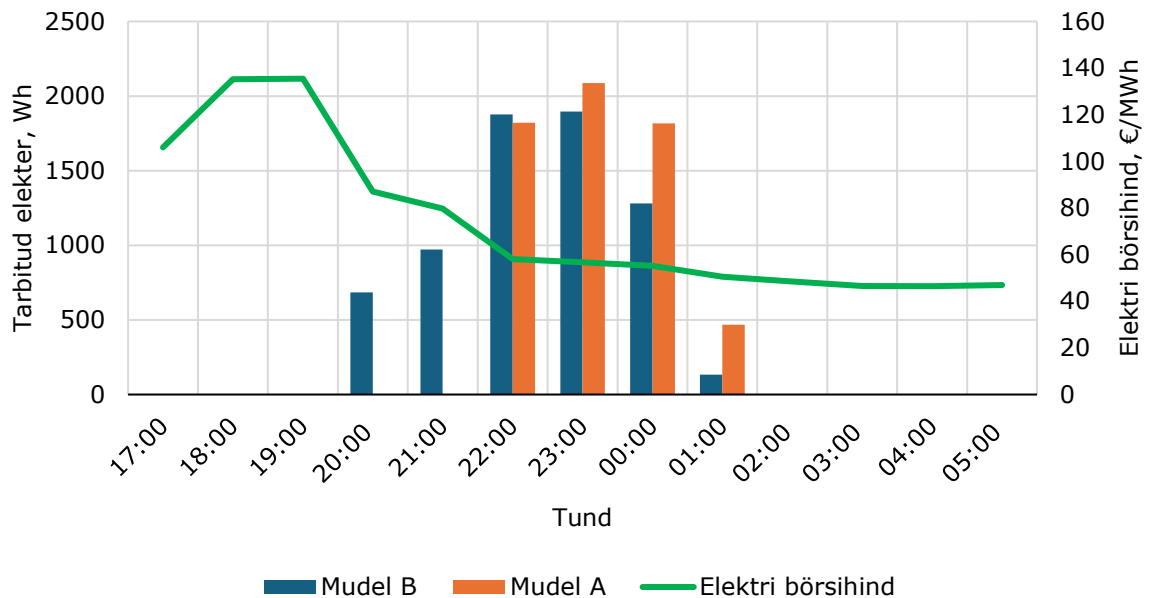
oli elektriauto laadimiseks määratud ajavahemik kell 17.00–6.00. Lisaks kasutati osa katsete jooksul hommikul elektriauto soojendamist, mida arvutustel arvesse ei võetud, sest eesmärgiks oli võrrelda elektriauto aku laadimist. Seega, katse eesmärgiks ei olnud kogutarbimist kokku hoida, vaid võimalikult kulusäästlikult elektriautot laadida. Tabelis 3.5 on välja toodud kõikide elektriauto katsete tulemused.

Tabel 3.5 Elektriauto katsete tulemused

Suurus	Juhtimisalgoritm	Väärtus	Erinevus tavaolekust
Tarbimine kokku, kWh	Tavaolek	32,60	-
	Mudel A	30,80	-6%
	Mudel B	31,01	-5%
Börsihinna maksumus, €	Tavaolek	2,43	-
	Mudel A	1,59	-35%
	Mudel B	1,63	-33%
Keskmine hind €/kWh	Tavaolek	0,075	-
	Mudel A	0,052	-31%
	Mudel B	0,053	-29%

Nagu eelnevalt mainitud, oli antud katsete eesmärgiks võimalikult soodsalt elektriauto täis laadida, mitte elektrienergia kogutarbimist vähendada. Katsete tulemuste põhjal saab öelda, et keskmise hinna järgi osutus kõige kulutõhusamaks mudel A, säästes umbes 31% võrreldes tavaolekuga. Samas tuleb välja tuua, et mudel B töötas ka efektiivselt ja kulutõhusalt 29%-lise säästuga. Katsed õnnestusid ka selle poolest, et kõikidel päevadel suudeti elektriauto hommikuks piisavalt täis laadida.

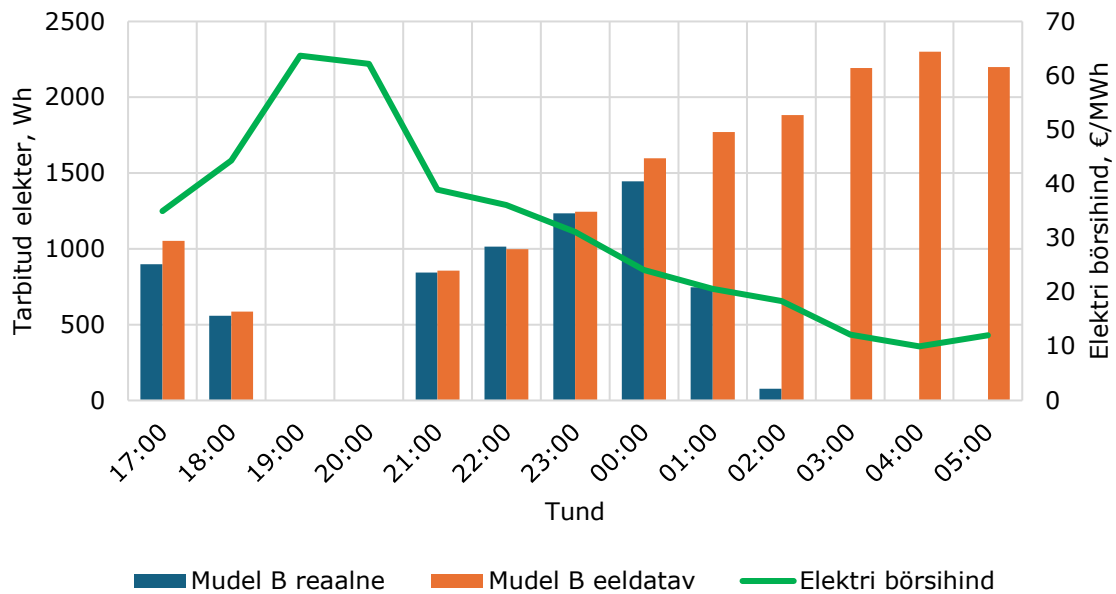
Mudel A ja mudel B võrdluse puhul (joonis 3.4) on näha, kuidas mudel B alustab laadimist alati varem, isegi kui tegu on keskmisest kallima elektri börsihinnaga, sest mudel B eesmärgiks oligi pidevalt teostada elektriauto laadimist ja mudel A eesmärgiks laadida ainult keskmisest elektrihinnast odavamatel tundidel. Siit tuleb välja, miks mudel B oli kallim keskmise hinna poolest võrreldes mudeliga A.



Joonis 3.4 Elektriauto mudel A ja B

Siiski oli elektriauto aku mahutavus ainult 16 kWh, mis võrreldes paljude teiste elektriautodega on väike. Transpordiameti andmetel on 01.04.2024 seisuga kõige levinumaks elektriautoks Eestis Tesla Model 3 [38]. See elektriauto standardversiooni aku mahutavuseks on 60 kWh [39], seega antud aku laadimiseks kulub rohkem aega, mistõttu võib tekkida olukord, kus mudel A kasutamisega ei suudeta antud elektriautot nõuete kohaselt täis laadida. Seetõttu oleks tulevikus mõistlik määrata mudel A juhtimiseks miinimum arv tunde, millal peab elektriautot laadima.

Mudel B tulemuste andmete analüüsi põhjal saab öelda, et antud katse puhul juhtimisalgoritm töötas ootuspäraselt ja täitis oma eesmärgi, milleks oli kallimatel tundidel elektriauto laadimise piiramine. Siiski tuleb graafiku (joonis 3.5) põhjal jällegi esile põhjus, miks mudel B ei suuda olla nii kulutõhus kui mudel A. Põhjuseks on see, et kui peaks toimuma suurem laadimine elektrihinna poolest odavamatel tundidel, on elektriauto ennast sageli kallimatel tundidel nii palju juba täis laadinud, et odavamatel tundidel laadimist ei toimugi. Lisaks on graafikult näha elektriautodele iseloomulikke laadimiskõverat, kus laadimisvõimsus ajas väheneb [40].



Joonis 3.5 Mudel B eeldatav ja reaalne tulemus

Tulevikus oleks mõistlik muuta laadimisakna algus dünaamiliseks, ehk kasutaja peaks määrama ainult laadimisakna lõpu, st ajahetke, kus elektriauto peaks nõuete kohaselt täis olema. Laadimisakna alguse dünaamiliseks muutmist saaks teostada Shelly seadmete abil, kus Shelly seade tuvastab ära, millal elektriauto peaks laadima hakkama.

Samuti oleks Shelly seadmete abil võimalik automaatselt määrata ära valemis 2.6 väljatoodud E^{max} väärtus. Osal Shelly seadmetel (näiteks Shelly 1PM Pro) on võime mõõta nii pinget kui ka voolu, mille abil saaks ilma kasutaja abita määrata ära elektriauto maksimaalse laadimisvõimsuse. Selline muudatus teeks kasutajale juhtimisalgoritmide rakendamise mugavamaks ning lisaks aitaks vältida olukorda, kus kasutaja võib näiteks kogemata sisestada valed andmed.

3.4 Katsete kokkuvõte

Katsete tulemusi võrreldes ja analüüsid tuleb meeles pidada, et tegu oli reaalsete katsetega, seega katsetingimused ei olnud erinevate katsete puhul läbivalt samad, mis võib põhjustada kõikumisi kodumajapidamisseadme kasutamisel ja energia tarbimisel. Siiski on võimalik saadud tulemuste põhjal hinnata üldist juhtimisalgoritmide kasutamise efektiivust. All toodud ülevaatliku tabeli (tabel 3.6) põhjal saab öelda, et pörandakütte ja soojaveeboileri juhtimiseks sobib kõige paremini mudel B ja elektriauto tarbimise juhtimiseks mudel A.

Tabel 3.6 Katsete tulemuste koondtabel

Seade	Energiasääst		Kulusääst		Keskmise hinna erinevus	
	Mudel A	Mudel B	Mudel A	Mudel B	Mudel A	Mudel B
Põrandaküte	7%	-6%	-4%	-14%	-10%	-8%
Soojaveeboiler	-1%	-12%	-6%	-15%	-5%	-4%
Elektriauto	-	-	-35%	-33%	-31%	-29%

Samuti oleks mõistlik võrrelda põrandakütte ja soojaveeboileri katsetuste tulemusi eelnevalt tehtud uuringu [35] simulatsioonitulemustega. All välja toodud tabeli 3.7 põhjal saab öelda, et mudel B töötas sarnaselt eelnevas uuringus tehtud simulatsioonile, aga mudel A puhul oli erinevus märkimisväärselt suur. Seda võis põhjustada antud katse jaoks tehtud lihtsustused temperatuuri piiride määramisel. Uuringu simulatsiooni jaoks arvutati temperatuuri piirid välja vastavalt valemitele, aga lõputöö jaoks tehti lihtsustus ja lasti kasutajal temperatuuri piirid manuaalselt määrata.

Tabel 3.7 Katse tulemused ja simulatsiooni tulemused

Seade	Energiasääst				Kulusääst			
	Katse tulemused		Simuleeritud tulemused		Katse tulemused		Simuleeritud tulemused	
	Mudel A	Mudel B	Mudel A	Mudel B	Mudel A	Mudel B	Mudel A	Mudel B
Põrandaküte	7%	-6%	-6%	-9%	-4%	-14%	-17%	-14%
Soojaveeboiler	-1%	-12%			-6%	-15%		

Juhtimisalgoritmide edasiarenguks oleks kindlasti vaja määrata elektriauto mudel A juhtimisele miinimaalsete tundide arv, kus elektriauto peab ennast laadima. Selle abil saaks vältida olukorda, kus elektriauto laadimisel ei laeta akut kasutamiskooste kohaselt piisavalt täis.

4. JUHTIMISALGORITMI RAKENDAMINE TARBIMISE JUHTIMISE PLATVORMIS

Lõputöö üheks eesmärgiks oli rakendada valitud juhtimisalgoritme elektritarbimise juhtimise platvormis. Niisugune lahendus võimaldaks kodutarbijal kasutada enda kodumajapidamisseadmete juhtimiseks juhtimisalgoritme, mille kasutamine oleks muidu kodutarbija jaoks liialt keerukas ja aeganõudev. Käesoleva töö käigus otsustati luua prototüüplahendus, millele oleks võimalik tulevikus lisafunktsionaalsust lisada või mida saaks erinevates suundades laiendada. Näiteks saaks tulevikus võtta juurde lisisisendparameetreid, nagu ilmaennustus. Selles peatükis käsitletakse juhtimise kontseptsiooni ehk kuidas lahendus kasutaja jaoks välja näeb. Lisaks tehakse ülevaade sellest, kuidas juhtimisalgoritmide rakendamine käib ja kuidas näeb välja juhtimisalgoritmide põhiprotsess.

4.1 Juhtimise kontseptsioon

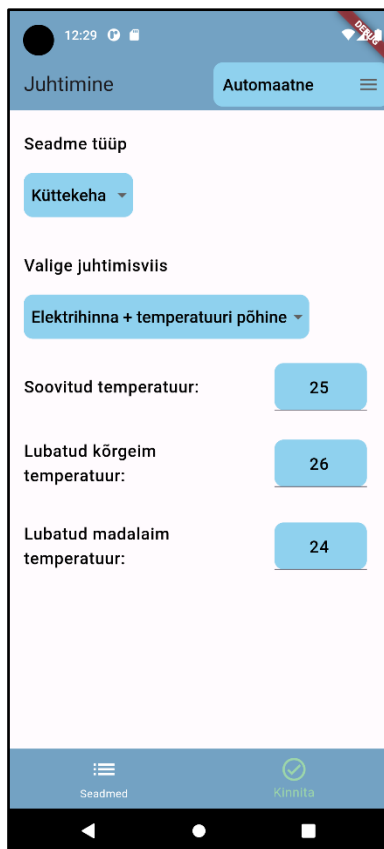
Juhtimisalgoritmide rakendamise puhul arvestati mitmete erinevate asjaoludega, et loodud lahendus oleks tavakasutajale võimalikult mugav, ja samas, et lahendust saaks hõlpsasti edasi arendada ilma suurema vaevata. Selleks, et kasutajal oleks lihtne ja mugav juhtimisalgoritmide rakendada, peab nende valimine ja modifitseerimine olema võimalikult intuitiivne. Antud lahenduse puhul peab kasutaja määrama kolm peamist sisendparameetrit: seadme tüüp, juhtimisviis ja juhtimise parameetrid. Loodud lahendus on toodud välja joonisel 4.1.

Seadme tüüp määrab ära, mis seadmega on tegu, ja vastavalt sellele saab kindlaks teha, mismoodi seda seadet juhtida tuleb. Näiteks kui on tegu küttekehaga, peab juhtimisalgoritmile määrama, et elektritarbimise abil temperatuuri tõstetakse ning vastupidi, kui on tegu jahutusseadmega (näiteks ventilatsiooniseade), siis elektritarbimisega temperatuuri alandatakse.

Juhtimisviisi abil määratakse ära, milliste väliselt määratud sisendparameetritega juhtimisalgoritm peab arvestama seadme juhtimisel. Antud lahenduse puhul kasutatakse kahte sisendit: elektri hind ja temperatuur. Nendest tehti kolm juhtimisviisi: temperatuuripõhine, elektri hinnapõhine ja nende kombinatsioon, st elektri hinna ja temperatuuri põhine.

Juhtimise parameetrite kaudu määratakse ära piirid, mille vahel juhtimisalgoritm peab töötama. Näiteks, kui kasutaja valib seadme tüübiks küttekeha ning elektri hinna ja

temperatuuri põhise juhtimisviisi, siis kasutaja peab ära määrama temperatuuri vahemiku, mille raames seade võib töötada.



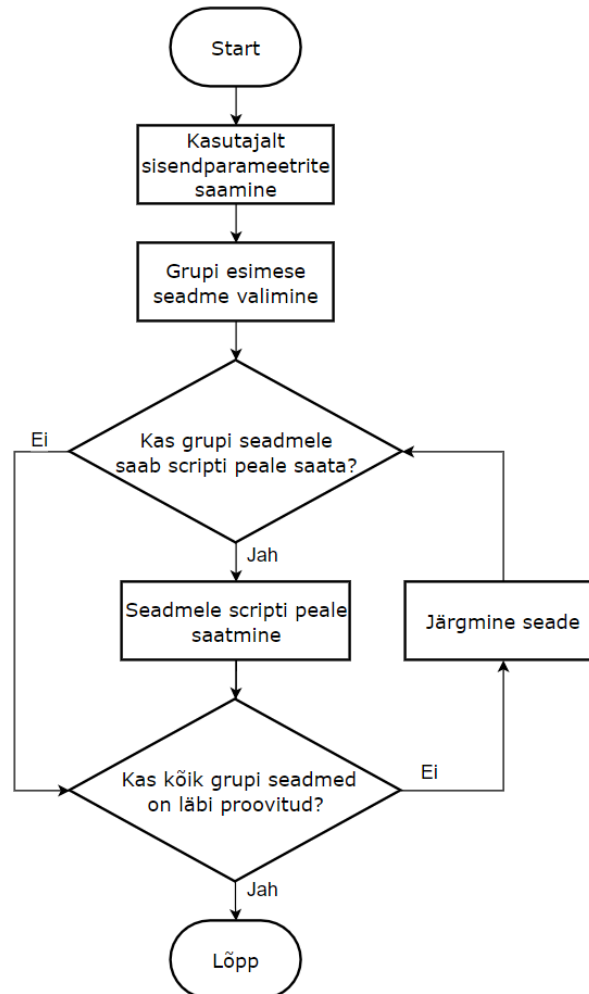
Joonis 4.1 Loodud lahendus

4.2 Juhtimisalgoritmide rakendamine

Prototüüplahenduse üheks omaduseks pidi olema see, et antud lahendust oleks võimalikult lihtne laiendada ja vajadusel saaks lisafunktsionaalsust lisada. Seega peaks juhtimisalgoritmi saatmine seadmele toimuma loogilises järjekorras. Arvestati sellega, et juhul kui tavakasutaja soovib juhtida seadet temperatuuri põhjal, siis selleks on vaja siduda seade temperatuurianduriga. Sidumiseks kasutati elektritarbimise juhtimise platvormis grupi loomise võimekust, kus saab ühe või mitu seadet siduda ühe temperatuurianduriga.

Juhtimisalgoritmi saatmine juhitavatele seadmetele toimub järgnevalt. Esmalt võetakse kasutajalt määratud sisendparameetrid, mille abil määratakse ära, kuidas juhtimisalgoritm töötama peaks. Seejärel hakkab pihta korduv protsess, mille käigus käiakse läbi kõik grupi seadmed. Protsessi alguses kontrollitakse, kas seadmele on üldse võimalik juhtimisalgoritmi saata. Seda tehakse selleks, et näiteks kui seade ei ole sisselülitatud või tal puudub võrguühendus, siis ei ole võimalik sellele juhtimisalgoritmi

saata. Programmi saatmiseks kasutatakse Shelly Cloudi teenust [9]. Pärast seda vaadatakse, kas kõik grupi seadmed on läbi käidud. Juhul, kui ei ole, siis minnakse järgmise seadme juurde ning juhul, kui on kõik läbi käidud, siis protsess lõpetatakse. Protsessi on kirjeldatud joonisel 4.2.

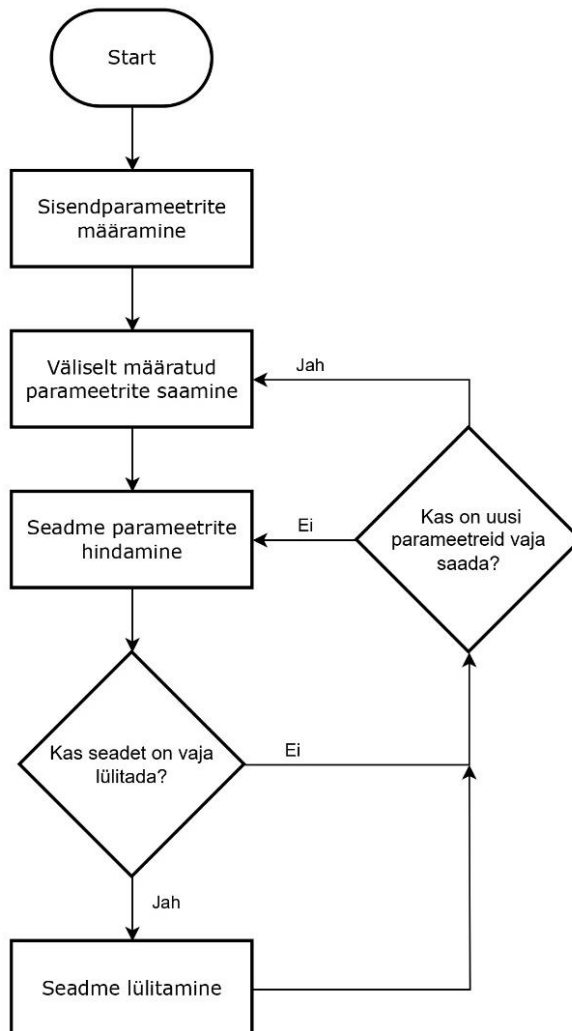


Joonis 4.2 Juhtimisalgoritmi saatmine seadmetele

Selleks, et juhtimisalgoritm seadme peal korralikult töötaks, oli oluline luua iga juhtimisalgoritmi jaoks sarnane põhiprotsess, mida programm läbib. Kui põhiprotsess on loogiliselt ja lihtsalt üles ehitatud, on seda tulevikus vajadusel lihtsam laiendada ja täiendada.

Juhtimisalgoritmi põhiprotsess toimub järgnevalt: esmalt määratakse ära sisendparameetrid, mis on kasutaja sisestatud. Pärast seda algab korduv protsess, mis algab väliselt määratud parameetrite saamisega, selleks võib olla näiteks elektrihind. Pärast seda toimub seadme parameetrite hindamine. Selle käigus vaadatakse, kas seade on näiteks sees, või vaadatakse, mida näitab seadmega seotud temperatuuriandur. Pärast seda hinnatakse erinevate parameetrite abil, kas seaded on

vaja sisse või välja lülitada. Juhul, kui on vaja, siis lülitatakse. Pärast seda kontrollitakse, kas uusi väliselt määratud parameetreid on vaja juurde saada. See võib juhtuda näiteks siis, kui on tulnud uus päev ja on vaja saada uusi elektrihindu. Programmi töötamise diagramm on esitatud joonisel 4.3.



Joonis 4.3 Programmi töötamise põhiprotsess

KOKKUVÕTE

Käesolev lõputöö keskendus elektritarbimise erinevate juhtimisalgoritmide uurimisele ja nende hulgast valitud algoritmide energia- ja kulutõhususe analüüsile. Töö alguses käsitleti erinevaid kodumajapidamisseadmeid ning liigitati need tarbimise juhtimise kontekstis järgnevalt: mittejuhitavad, osaliselt juhitavad ja juhitavad. Juhitavateks seadeteks, millega edaspidi katsetati, valiti elektriauto, pörandaküte ja soojaveeboiler. Samuti uuriti erinevaid varasemates uurimustes kasutatud juhtimisalgoritme, mida on kasutatud kodumajapidamisseadmete elektritarbimise juhtimiseks. Tulenevalt elektritarbimise juhtimise platvormi prototüüplahenduse piirangutest ja lõputöö ühest eesmärgist luua esmane juhtimisalgoritmide kasutamise lahendus, valiti katsetamiseks lihtsamad juhtimisalgoritmide mudelid, mida tähistati kui mudel A ja mudel B. Seejärel viidi läbi iga kodumajapidamisseadmega katsed, et võrrelda valitud juhtimisalgoritmide omavahel ja tavaolekuga energia- ja kulutõhususe vaatest. Viimaks lisati juhtimisalgoritmide kasutamise esmane lahendus elektritarbimise juhtimise platvormi.

Lõputöö käigus tehtud katsete tulemuste analüüsi põhjal selgus, et soojaveeboileri ja pörandakütte juhtimiseks sobib kõige paremini mudel B juhtimisalgoritm. Antud katsete käigus oli selle juhtimisalgoritmiga võimalik tekitada pörandakütte puhul 6% ja soojaveeboileri puhul 12% energiasäästu ning kulutõhususe poolest oli pörandaküte 14% ja soojaveeboiler 15% kulusäästlikum. Elektriauto puhul osutus kõige kulutõhusamaks mudel A, millega suudeti vähendada tarbimise keskmist hinda 31% võrra. Samuti töötati välja esmane lahendus juhtimisalgoritmide kasutamiseks elektritarbimise juhtimise platvormil. Platvormi kasutajale loodi võimalus määrata ära seadmetüüp ja piirid, mille vahemikus kodumajapidamisseade elektritarbimise juhtimine peab toimima. Lisaks saab kasutaja otsustada, mille põhjal kodumajapidamisseadmeid hakatakse juhtima. Praegu on valikute hulgas elektri börsihinna, temperatuuri või mõlema alusel juhtimine.

Edaspidi võiks edasi arendada elektriauto mudel A juhtimisalgoritmi, et see töötaks efektiivselt ka suuremate akumahutavustega elektriautode puhul. Lisaks oleks mõistlik kasutada Shelly seadmete võimekust, et muuta elektriauto laadimisakna algusaja määramine automaatseks ning ka pinge ja voolu mõõtmisega määrata ära elektriauto laadimisvõimekus. Need lahendused teeksid kasutajale juhtimisalgoritmide määramise mugavamaks ning tõstaksid juhtimisalgoritmide töötamise efektiivsust.

Soojussalvestite puhul võiks vabaneda temperatuuri ülereguleerimisest. Temperatuuri mõõtmist tuleks täiendada selliselt, et arvestatakse ka inertsiga ja sellega saaks vähendada temperatuuri ülereguleerimist. Lisaks tuleks uurida lahendusi, kuidas saaks Shelly seadmetega efektiivselt kasutada olemasolevaid temperatuuriandureid. Näiteks

põrandakütte puhul võiks saada kasutada juba olemasolevat temperatuuriandurit. See aitaks vähendada temperatuuri ülereguleerimist. Samuti võiks tulevikus katsetada ja uurida, kuidas oleks teostatav keerulisemate juhtimisalgoritmide (näiteks masinõppe või geneetilise algoritmi) rakendamine platvormi kaudu. Lisaks tuleks kindlasti viia läbi küsitlus, milles küsitakse kasutajatelt tagasisidet elektritarbimise juhtimise platvormi kaudu juhtimisalgoritmide rakendamise kohta. Selle põhjal saaks juhtimisalgoritmide kasutamise muuta võimalikult intuitiivseks ja mugavaks.

Autori hinnangul olid tulemused suuremas osas ootuspärased. Soojussalvestite puhul töötas mudel B sarnaselt eelnevas uuringus [35] tehtud simulatsiooni tulemustega, aga mudeli A juures oodati rohkem energiasäästu. Elektriauto puhul oli oodata, et mudel A töötab kõige kulutõhusamalt, aga mudel B töötas kulutõhususe vaatest eeldatavast paremini.

SUMMARY

This thesis focused on the study of various electricity demand-side control algorithms and analyzed the energy and cost efficiency of certain selected algorithms. At the beginning different household appliances were categorized in the context of demand-side management as non-controllable, partially controllable and controllable. For experiments controllable devices were chosen, which were an electric car, underfloor heating and a hot water heater. Different control algorithms previously used in studies for managing household appliances electricity consumption were also examined. Because of the limitations of the prototype solution of the demand-side management platform and one of the thesis's objectives to create a primary solution for using control algorithms, simpler algorithms, named model A and model B, were used. Experiments were done with each household appliance and the selected control algorithms were compared with each other and with the normal state. Also an initial solution for using control algorithms was added to the demand-side management platform.

The result of the experiments revealed that the model B control algorithm was best suited for controlling the hot water heater and underfloor heating. In these experiments model B achieved a 6% energy savings for underfloor heating and 12% for the hot water heater, while from the cost perspective, underfloor heating was 14% more cost-effective and the 15% more cost-effective. Model A was the most cost-effective for charging the electric car reducing the average consumption cost by 31%. An initial solution for using control algorithms on the demand-side management platform was also developed. The platform allows users to define the type of device and the limits within which the household appliance's electricity consumption management should operate. Additionally, users can decide the basis on which household appliances will be managed, currently including options such as electricity market prices, temperature, or both.

Future works would include further development of model A's control algorithm for electric cars to work more efficiently with larger batteries. It would also be beneficial to use the capabilities of the Shelly devices to automate the start time of the charging window for electric cars and to measure voltage and current to determine the charging capability. These solutions would make it easier for users to set control algorithms and improve the efficiency of their operation.

For the thermal storage devices, it would be beneficial to eliminate overregulation of the temperature. Temperature measurements should account for inertia, which could reduce the temperature overregulation. Furthermore, solutions should be studied to use existing temperature sensors to help reduce temperature overregulation. Future

experiments and research could also explore how to implement more complex control algorithms, such as machine learning or genetic algorithms. Additionally, a survey should be conducted asking user feedback on using the control algorithms through the demand-side management platform. Based on this, the use of control algorithms could be made as intuitive and convenient as possible.

In the author's opinion, the results were largely as expected. For the thermal storage devices, model B performed similarly to the simulation results of a previous study, but more energy saving were expected from model A. For the electric car, model A was expected to be the most cost-effective, but also model B performed better than expected.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Statistikaamet, „Avaleht | Statistikaamet“. Vaadatud: 14. aprill 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.stat.ee/et>
- [2] A. Rosin, A. Auvaart, ja D. Lebedev, „Analysis of operation times and electrical storage dimensioning for energy consumption shifting and balancing in residential areas“, *Elektronika ir Elektrotehnika*, nr 4, lk 15–20, 2012, doi: 10.5755/j01.eee.120.4.1444.
- [3] A. Rosin, H. Hõimoja, T. Möller, ja M. Lehtla, „Residential electricity consumption and loads pattern analysis“, *PQ2010: 7th International Conference - 2010 Electric Power Quality and Supply Reliability, Conference Proceedings*, 2010, lk 111–116. doi: 10.1109/PQ.2010.5550009.
- [4] A. R. Jordehi, „Binary particle swarm optimisation with quadratic transfer function: A new binary optimisation algorithm for optimal scheduling of appliances in smart homes“, *Appl Soft Comput*, kd 78, lk 465–480, mai 2019, doi: 10.1016/J.ASOC.2019.03.002.
- [5] M. Metsik, „Prosumerite paindlikkuse ja selle rakendamise võimaluste uurimine“, 2023.
- [6] A. Rosin, „Energiahaldus elektri tarkvõrkudes“, 2019.
- [7] J. Kilumets, „Autoekspert: mõne aastaga kasvab ka Eestis elektriautode müük kümnendikuni | Majandus | ERR“. Vaadatud: 10. aprill 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.err.ee/1608891158/autoekspert-mone-aastaga-kasvab-ka-eestis-elektriautode-muuk-kumnendikuni>
- [8] G. Tõnis, „Automüüjad: kalliduse tõttu elektriautod Eestis veel massidesse ei jõua | Majandus | ERR“. Vaadatud: 10. aprill 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.err.ee/1609225269/automuujad-kalliduse-tottu-elektriautod-eestis-veel-massidesse-ei-joua>
- [9] Allterco Robotics OOD, „Easy Smart Home Automation“. Vaadatud: 28. märts 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.shelly.com/en>
- [10] Allterco Robotics, „Welcome to Shelly Technical Documentation | Shelly Technical Documentation“. Vaadatud: 24. aprill 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://shelly-api-docs.shelly.cloud/>
- [11] K. Kaspar, M. Ouf, ja U. Eicker, „A critical review of control schemes for demand-side energy management of building clusters“, *Energy Build*, kd 257, lk 111731, veebr 2022, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2021.111731.
- [12] MathWorks, „What Is the Genetic Algorithm? - MATLAB & Simulink - MathWorks Nordic“. Vaadatud: 29. veebruar 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://se.mathworks.com/help/gads/what-is-the-genetic-algorithm.html>
- [13] M. J. Kochenderfer ja T. A. Wheeler, „Algorithms for Optimization“, 2019, Vaadatud: 28. veebruar 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://mitpress.mit.edu>.

- [14] T. Alam, S. Qamar, A. Dixit, ja M. Benaida, „Genetic Algorithm: Reviews, Implementations, and Applications“, *International Journal of Engineering Pedagogy*, kd 10, nr 6, lk 57–77, juuni 2020, doi: 10.3991/IJEP.V10I6.14567.
- [15] B. Celik, R. Roche, D. Bouquain, ja A. Miraoui, „Decentralized neighborhood energy management with coordinated smart home energy sharing“, *IEEE Trans Smart Grid*, kd 9, nr 6, lk 6387–6397, nov 2018, doi: 10.1109/TSG.2017.2710358.
- [16] N. Javid *et al.*, „A new heuristically optimized Home Energy Management controller for smart grid“, *Sustain Cities Soc*, kd 34, lk 211–227, okt 2017, doi: 10.1016/J.SCS.2017.06.009.
- [17] S. D. Immanuel ja U. K. Chakraborty, „Genetic Algorithm: An Approach on Optimization“, *Proceedings of the 4th International Conference on Communication and Electronics Systems, ICCES 2019*, lk 701–708, juuli 2019, doi: 10.1109/ICCES45898.2019.9002372.
- [18] S. N. Deepa ja S. N. Sivanandam, *Introduction to Genetic Algorithms*. Berlin: Springer Berlin, Heidelberg, 2008.
- [19] D. Wang, D. Tan, ja L. Liu, „Particle swarm optimization algorithm: an overview“, *Soft comput*, kd 22, nr 2, lk 387–408, jaan 2018, doi: 10.1007/S00500-016-2474-6/METRICS.
- [20] Y. Zhang, S. Wang, ja G. Ji, „A Comprehensive Survey on Particle Swarm Optimization Algorithm and Its Applications“, *Math Probl Eng*, kd 2015, 2015, doi: 10.1155/2015/931256.
- [21] Y. Chen ja M. Hu, „Swarm intelligence–based distributed stochastic model predictive control for transactive operation of networked building clusters“, *Energy Build*, kd 198, lk 207–215, sept 2019, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2019.06.010.
- [22] M. Goemans, „Linear programming“, kd 17, 2015.
- [23] MathWorks, „Linear Programming - MATLAB & Simulink“. Vaadatud: 16. aprill 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://se.mathworks.com/discovery/linear-programming.html>
- [24] M. P. Fanti, A. M. Mangini, M. Roccotelli, ja W. Ukovich, „A District Energy Management Based on Thermal Comfort Satisfaction and Real-Time Power Balancing“, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, kd 12, nr 4, lk 1271–1284, okt 2015, doi: 10.1109/TASE.2015.2472956.
- [25] L. Tucci, „What is Machine Learning and How Does It Work? In-Depth Guide“. Vaadatud: 17. aprill 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.techtarget.com/searchenterpriseai/definition/machine-learning-ML>
- [26] S. Brown, „Machine learning, explained | MIT Sloan“. Vaadatud: 17. aprill 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://mitsloan.mit.edu/ideas-made-to-matter/machine-learning-explained>
- [27] S. Ahmed ja F. Bouffard, „Building load management clusters using reinforcement learning“, *2017 8th IEEE Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference, IEMCON 2017*, lk 372–377, nov 2017, doi: 10.1109/IEMCON.2017.8117147.

- [28] R. Deng, Z. Yang, J. Chen, N. R. Asr, ja M. Y. Chow, „Residential energy consumption scheduling: A coupled-constraint game approach“, *IEEE Trans Smart Grid*, kd 5, nr 3, lk 1340–1350, 2014, doi: 10.1109/TSG.2013.2287494.
- [29] V. Kanade, „What is machine learning? Understanding types & applications“. Vaadatud: 17. aprill 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.spiceworks.com/tech/artificial-intelligence/articles/what-is-ml/>
- [30] Learn eTutorial, „Applications of Machine Learning with Examples | Learn eTutorials“. Vaadatud: 17. aprill 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://learnetutorials.com/machine-learning/machine-learning-applications>
- [31] J. Brownlee, „A Gentle Introduction to Transfer Learning for Deep Learning - MachineLearningMastery.com“. Vaadatud: 17. aprill 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://machinelearningmastery.com/transfer-learning-for-deep-learning/>
- [32] L. Lengyel, „Validating Rule-based Algorithms“, *Acta Polytechnica Hungarica*, kd 12, nr 4, lk 2015–59.
- [33] E. Foster, „Choosing between a rule-based vs. machine learning system | TechTarget“. Vaadatud: 17. aprill 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.techtarget.com/searchenterpriseai/feature/How-to-choose-between-a-rules-based-vs-machine-learning-system>
- [34] K. Gülen, „Rule-based System In Artificial Intelligence Explained - Dataconomy“. Vaadatud: 17. aprill 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://dataconomy.com/2023/04/25/rule-based-system-in-artificial-intelligence/>
- [35] A. Rosin, S. Link, M. Lehtla, J. Martins, I. Drovtar, ja I. Roasto, „Performance and feasibility analysis of electricity price based control models for thermal storages in households“, *Sustain Cities Soc*, kd 32, lk 366–374, juuli 2017, doi: 10.1016/j.scs.2017.04.008.
- [36] Elering AS, „Elering Live“. Vaadatud: 28. märts 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://dashboard.elering.ee/en>
- [37] Allterco Robotics OOD, „Welcome to Shelly Knowledge Base!“ Vaadatud: 15. aprill 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://kb.shelly.cloud/knowledge-base/?l=en>
- [38] Transpordiamet, „Sõidukite statistika | Transpordiamet“. Vaadatud: 15. aprill 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.transpordiamet.ee/soidukite-statistika>
- [39] Electrical Vehicle Database, „Tesla Model 3 (2023-2024) price and specifications - EV Database“. Vaadatud: 15. aprill 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://ev-database.org/car/1991/Tesla-Model-3>
- [40] J. Finnerty, „GRIDSERVE | What is an electric car charging curve?“ Vaadatud: 17. aprill 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.gridserve.com/2023/02/17/what-is-an-electric-car-charging-curve/>