



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroeneergeetika ja mehhatroonika instituut

ERAMU ELEKTRILISE KÜTTESÜSTEEMI JA VEEBOILERI ELEKTRIENERGIA HINNAPÕHISE JUHTIMISLAHENDUSE PROTOTÜÜP

PROTOTYPE OF ELECTRICITY PRICE BASED CONTROL SOLUTION FOR A ELECTRIC BOILER AND HEATING SYSTEM

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Mihhail Zautin

Üliõpilaskood: 213768 EAAB

Juhendaja: Vahur Maask, teadur

Kaasjuhendaja: Argo Rosin, kaasprofessor tenuuris

(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: Mihhail Zautin

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

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

Juhendaja: Vahur Maask

/ allkiri /

Kaasjuhendaja: Argo Rosin

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Mihhail Zautin

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Eramu elektrilise küttesüsteemi ja veeboileri elektrienergia hinnapõhise juhtimislahenduse prototüüp,

mille juhendaja on Vahur Maask ja kaasjuhendaja Argo Rosin,

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.

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Mihhail Zautin, 213768EAAB

Õppekava, peeriala: EAAB16/17 , Elektroenergeetika

Juhendaja: Teadur, Vahur Maask, 6203703

Kaasjuhendaja: Kaasprofessor tenuuris, Argo Rosin, 6203810

Lõputöö teema:

Eramu elektrilise küttesüsteemi ja veeboileri elektrienergia hinnapõhise juhtimislahenduse prototüüp

Prototype of electricity price based control solution for a electric boiler and heating system

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Olemasolevate juhtimislahenduste analüüsi tegemine.
2. Elektritarbimise juhtimise kontseptsiooni loomine ja kontseptsiooni aluselise juhtimise majandusliku arvutuse tegemine.
3. Juhtimislahenduse prototüübi väljatöötamine.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Ülevaade küttesüsteemide ja veeboilerite juhtimislahendustest	(12.02.2024)
2.	Ülevaade küttesüsteemide ja veeboilerite hinnapõhistest juhtimisalgoritmidest	(19.02.2024)
3.	Eramu kirjeldus	(26.02.2024)
4.	Tarbimisgraafikute mõõtmine	(04.03.2024)
5.	Juhtimislahenduse kontseptsiooni loomine	(11.03.2024)
6.	Juhtimislahenduse prototüübi arendus	(25.03.2023)
7.	Hinnapõhise juhtimisalgoritmi valik ja katsetus	(08.04.2024)
8.	Kokkuvõtte tegemine	(15.04.2024)
9.	Töö lõplik versioon	(29.04.2024)
10.	Töö esitamine	(13.05.2024)

Töö keel: Eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: "13."mai 2024 a

Üliõpilane: ".....".....20.....a

/allkiri/

Juhendaja: ".....".....20.....a

/allkiri/

Kaasjuhendaja: ".....".....20.....a

/allkiri/

Programmijuht: ".....".....20.....a

/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA	8
Lühendite ja tähiste loetelu	9
1 SISSEJUHATUS.....	10
2 ÜLEVAADE KÜTTESÜSTEEMIDE JA VEEBOILERITE JUHTIMISLAHENDUSTEST	11
2.1 Seadmete tarbimise juhtimise võimalused	11
2.2 Integreeritud funktsioonid.....	12
2.2.1 Nutikad soojuspumbad	12
2.2.2 Targad veeboilerid.....	13
2.3 Välised juhtimisseadmed	15
2.3.1 Turul pakutavad lahendused	15
2.3.2 Isetehtud lahendused	16
2.4 Juhtimislahenduste võrdlus	16
3 ÜLEVAADE ELEKTRITARBIMISE JUHTIMISALGORITMIDEST	18
3.1 Tarbimisgraafiku muutumise võimalused	18
3.2 Ajaliste intervallide algoritm	19
3.3 Geneetiline algoritm	20
3.4 Tarbimist ennustav algoritm.....	21
3.5 Reeglipõhine algoritm.....	21
4 ERAMU KIRJELDUS.....	23
4.1 Arhitektuurne kirjeldus	23
4.2 Energiatõhususe arv	23
4.3 Soojuskadu.....	26
4.4 Elektrilised seadmed	27
5 JUHTIMISLAHENDUSE KONTSEPTSIOON.....	28
5.1 Juhtimise kontseptsioon	28
5.2 Elektritarbimise juhtimise majandusliku arvutuse lähteandmed	29
5.3 Elektritarbimise juhtimise majandusliku arvutuse tulemused	33
6 JUHTIMISLAHENDUSE PROTOTÜÜBI ARENDUS	35
6.1 Töötlev tuum.....	35
6.1.1 Miniarvuti.....	35
6.1.2 Arduino nano ja WIFI moodul	36
6.1.3 ESP8266 kontrolleri.....	37
6.2 Relee	37
6.3 Toiteplokk.....	38
6.4 Elektriskeemi komponendid.....	39
6.5 Prototüübi tasuvuse analüüs	40

7 HINNAPÕHISE JUHTIMISALGORITMI VALIK JA KATSETUS	42
7.1 Juhtimise algoritm	42
7.2 Automaatne elektrienergia hindade saamine	43
7.3 Katsetus	44
8 KOKKUVÕTE EESTI KEELES.....	47
9 KOKKUVÕTE INGLISE KEELES	49
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	51

EESSÕNA

2022/2023 aasta kevadsemestril sooritatud Tallinna Tehnikaülikooli "Automaatjuhtimine ja programmeeritavad juhtseadmed (ATR0020)" aine raames tutvusin juhtseadmete programmeerimise võimalusega. Just selles aines sain teada, et on olemas võimalus automaatselt saavutada Internetist elektrienergia hindade andmeid mikrokontrollerite eesmärkideks. Kooskõlas juba olemasolevate teadmistega ja programmeerimisoskusega andis võimaluse uus info koostada proovi programmi mikrokontrollerile ESP8266, mis andis võimalust katsetada elektrienergia hindade automaatset saavutamist Elering API serverist, nende uuendamist ja töötlemist. Proovi positiivne tulemus andis aluse selle lõputööle.

Tahan tänada Eleringi API arendajaid mugava ja kasutajasõbraliku keskkonda arendamise eest. Ilma selleta suure tõenäosusega ei ilmunudki seda tööd. Lisaks avaldan suurt tänu juhendajatele Vahur Maaskile ja Argo Rosinale suunamise ja töökäigu kontrollimise eest. Ilma nende juhendamiseta ei suutnudki teha sellisel kujul elektrilise veeboileri või soojuspumba juhtimislahenduse töötavat prototüübi oma bakalaureusetöö raames.

Elektritarbimine, börsihind, tarbimise juhtimine, juhtimise algoritm, bakalaureusetöö.

Lühendite ja tähiste loetelu

kWh – elektriline energia, kilovatt-tunnid

W – elektriline võimsus, Vattid

V ja kV – pinge, Voldid ja kilovoldid

VAC ja VDC– vahelduv- ja alalisvool

A ja mA– elektriline vool, Amper ja milliamper

kWh/m^2a – aastane energiatarbimine köetava pindalaühiku kohta

ΣH – soojuserikadu

ΔT – temperatuuride vahe

T_{sees} ja $T_{väljas}$ – temperatuur hoone sees ja hoone väljas

W/K – soojuserikao ühik

COP – soojustegur

NC ja NO– normaalselt suletud kontakt ja normaalselt avatud kontakt

WiFi – juhtmevaba side tehnoloogia, mis võimaldab luua ühendust Internetiga

SD kaart – mälukaart

DIY – isetehtud

ToU – ajaliste intervallide algoritm

GA – geneetiline algoritm

HEMS – energiat juhtiv süsteem kodus

IF – THEN – loogiline lause kui (...), siis (...)

ETA – energiatõhususe arv

TTJA – Tarbijakaitse ja tehnilise järelevalve amet

GPIO – üldotstarbelised sisend- ja väljundpordid

GB – mälu ühik

ESP8266 – mikrokontroller

NodeMCU või WeMos – ESP8266 mikrokontrolleri emaplaatide nimetused

N-Mosfet – N tüüpi Mosfet transistor

CET – Kesk-Euroopa aeg

URL – Internetiaadress ehk üldine infoallika asukohamääraja

1 SISSEJUHATUS

Suured elektriarved on eramajade omanikele mureks. Viimastel aastatel tegi seda olukorda veelgi keerulisemaks nii elektrienergia keskmise hinna suurenemine, kui ka elektrienergia hinnakõikumiste suurenemine NordPool elektribörsil.

Iseenesest kõrgemad elektri hinnad ja suuremad hinnakõikumised tekitavad ainult elektriarve suurenemist. Kuid probleemiks on ebaratsionaalsed seadmete elektri tarbimisgraafikud, mis näiteks soojuspumpadel või elektrilistel veeboileritel langevad kokku elektrienergia tipuhinnaga põhjustades liigset rahalist kulu.

Selle lõputöö eesmärgiks on just liigsete rahaliste kulude vähendamise võimaluse uurimine. Lõputöö raames uuritakse eramu elektrilise küttesüsteemi ja veeboileri elektrienergia hinnapõhise juhtimise mõistlikkust, ning pakutakse välja juhtimislahenduse prototüüp. Vaatamata sellele, et Eesti turul leidub automaatseid elektritarbimist juhtivaid elektriseadmeid, oma kõrge maksumuse tõttu nende kasutamine pole väga levinud.

Uurimisteema tähtsust määrab koos maksimaalse elektrienergia hinnaga kasvav võimalus säästa raha ilma suurte kulutusteta ja mugavuseta. Aktuaalsuse poolest hakkab see teema olema aktuaalne sinnamaani, kuni hakkab eksisteerima märkimisväärne tunnipõhise elektrienergia hinna erinevus tippu- ja lohuajal.

Tähtsamateks ülesanneteks on olemasolevate veeboilerite ja soojuspumpade juhtimislahenduste ja juhtimisalgoritmide ülevaadete tegemine. Seejärel juhtimislahenduse kontseptsiooni loomine ja kontseptsiooni järgse juhtimise majandusliku arvutuse tegemine. Ja juba siis juhtimislahenduse prototüübi arendus ja selle katsetus.

Töös olid kasutusel Excel ja EnergyPro tarkvarad tunnipõhiste andmete saavutamiseks ja arvutamiseks. Elektrienergia tunnipõhise hinna saamiseks kasutatakse ametlikku Elering Live portaali, Prototüübi elektrilist skeemi koostetakse EasyEDA arenduskeskkonnas. Elektrilise veeboileri tarbimisgraafikute muutmiseks kasutatakse Sonoff ühefaasilist WIFI elektriarvestit.

Antud töö peatükkides 2 ja 3 tehakse ülevaadet olemasolevatest juhtimislahendustest ja algoritmidest. Peale seda tehakse juhtimislahenduse kontseptsioon peatükis 5 ja siis peatükkides 6 - 7 kirjeldatakse prototüübi arendust ja katsetust.

2 ÜLEVAADE KÜTTESÜSTEEMIDE JA VEEBOILERITE JUHTIMISLAHENDUSTEST

Selles peatükis vaadeldakse olemasolevaid võimalusi elektriliste küttesüsteemide ja elektrilise veeboilerite juhtimisseadmetest.

2.1 Seadmete tarbimise juhtimise võimalused

Mitte kõiki kodus asuvaid elektriseadmeid on mugav juhtida elektri energiahinna järgi.

Kodu elektriseadmeid saab liigitada kolme gruppi:

- Statsionaarsed seadmed
- Katkematud seadmed
- Katkestatavad seadmed

Statsionaarsed seadmed – seadmed, mille tarbimisgraafikuid ei saa muuta. Nad töötavad kindlalt määratud ajavahemikel.

Katkematud seadmed – seadmeid, mis peavad oma tööd teha kindlalt määratud ajapikkusega perioodidel. Neid seadmeid pole võimalik välja lülitada, kui nad on oma tööd juba alustanud.

Katkestatavad seadmed – seadmed, mida saab töö käigus välja lülitada ilma tagajärgedeta ja samuti igal hetkel tööle tagasi panna.

Elektriseadmete näited on toodud tabelis 2.1 Andud tabelist selgub, et juhtida saab katkestatavaid ka katkematuid seadmeid suhteliselt suure elektritarbimisega. Vee boilerid ja soojuspumbad kuuluvad ka nende gruppide hulka [1].

Tabel 2.1. Kodu elektriseadmete näited [1]

Grupp	Seade	Kasutatud energia päevas, kWh	Töö aeg päevas, h
Statsionaarsed seadmed	Külmkapp	1,666	24
	TV	0,300	6,75
	Telefon	0,005	24
Katkematud seadmed	Õhu jahutusseade	1,140	7,25
	Valgustus	0,100	6,15
	Pesumasin	1,400	1,00
Katkestatavad seadmed	Triikraud	2,400	0,50
	Mikrolaineahi	1,200	1,50
	Ahi	1,140	0,50
	Teekann	2,000	0,50

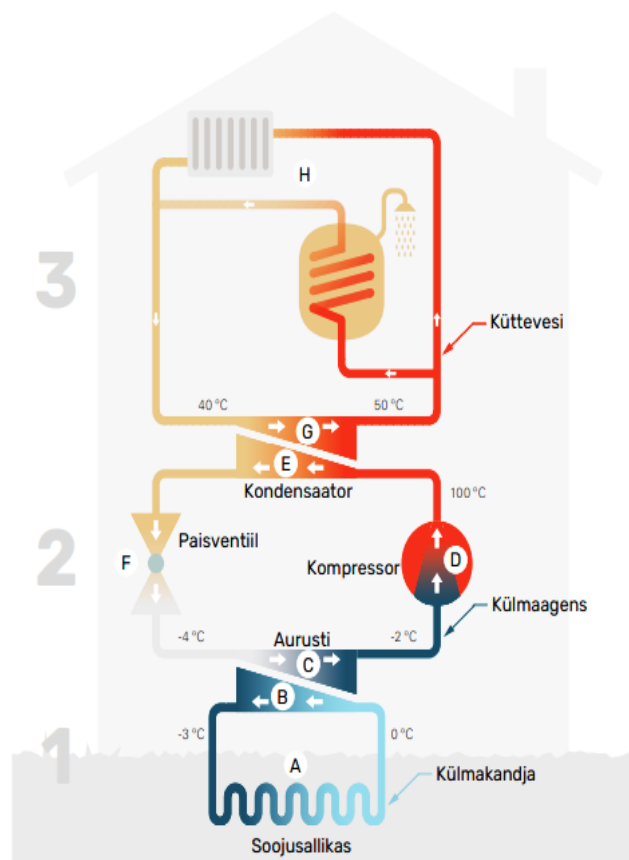
2.2 Integreeritud funktsioonid

On olemas elektriseadmeid, kus arendajate poolt on sisseehitatud elektritarbimist juhitavad lahendused. Nendeks lahendusteks võivad olla näiteks bimetall-lülitid veeketjatel või termoreleed veeboilerites. Aga selles osas vaadeldakse automaatseid elektriarvet vähendavaid seadmeid.

2.2.1 Nutikad soojuspumbad

Enne soojuspumba elektrienergia tarbimisgraafiku integreeritud tehnoloogia kirjeldamist, joonise 2.1 abil tuletame meelde soojuspumba tööpõhimõtet. Joonisel 2.1 on toodud NIBE S1156/S1256 maasoojuspumba tööd selgitav skeem.

Üldjuhul saab vaadelda soojuspumpade soojusallikaks keskkonda, mille temperatuur on madalam, kui köetava aine temperatuur [2].



Joonis 2.1. Soojuspumba tööpõhimõte [3]

Soojuspumba tööpõhimõte:

- Maasoojuspumba soojusallikaks on maa seest tulenev soojuslik energia.
- Maa sees paigaldatud torudes voolav külmakandja annab üle seda energiat läbi soojusvahetit, mille nimi on aurusti, spetsiaalsele gaasile – freoonile.
- Freoonil on oma kontuur (vt joonisel 2.1 aste 2), mis koosneb kompressorist, aurustist, paisuventiilist ja kondensaatorist.
- Kui freoon on saanud endale külmakandjast aurustis energiat, muutub tema agregaatolek. Freoon aurustub.
- Pärast aurustit juhitakse freoon kompressorisse, kus kasvab tema rõhk ja temperatuur. Siis sattub kuumenenud aur kondensaatorisse, kus annab oma soojuslikku energiat kütteveele, mille tagajärjel muutub tagasi vedelikuks.
- Freooni kontuuris võimaldam kompressoril rõhku tõsta paisuventiil. Kondensaatorist tulenev kõrge rõhuga vedelik läbib ventiili, mille tõttu langeb tema rõhk ja temperatuur. Freooni tsüklil kordub.

Enamus uuematest soojuspumpadest on varustatud WIFI mooduliga. Selle mooduli abil saab neid seadistada mobiiltelefonis asuva rakenduse kaudu. Samuti selle mooduli abil omavad nad ühendust Internetis asuva tootja serveriga.

Serveri abil saab soojuspump elektrienergia tunnipõhiseid hindu. Pärast seda oma algoritmi abil saab soojuspump muuta oma tööaega rahaliste kulude vähendamiseks.

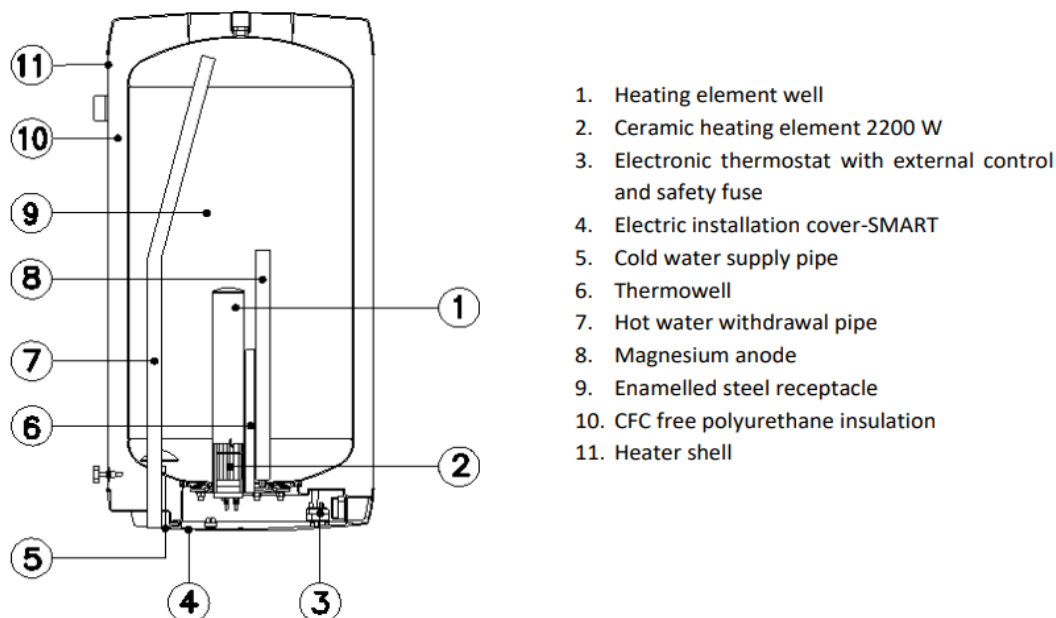
Näiteks üleval mainitud soojuspump NIBE S1156 omab võimalust nihutada oma elektri tarbimist elektrihinna järgi. Selleks on vajalik WIFI ühendus, börsihinna põhine energia ostuleping ja ligipääs Internetisse [3].

2.2.2 Targad veeboilerid

Elektri veeboilerid on sooja tarbevee tootvad allikad, mis on võimelised muuta elektrienergiat soojusenergiaks ilma fossiilsete kütuste kasutamata. Tööpõhimõtteks on soojuse eraldumine aktiivse elektritakistusega elemendil (küttekehal) elektrivoolu läbimise tagajärjel [4].

Turul on olemas lahendusi, mis tootja väitel saavad säästa kuni 37,5% elektrienergiat nädalas. On loogiline, et energiasäästuga väheneb ka rahaline kulu elektrienergiale.

Näiteks "OKHE SMART" intelligentse boileri sisseehitatud juhtimisseadmel on piisavalt palju võimekust omaniku sooja vee kasutamise harjumuste analüüsimiseks ning sooja tarbevee tarbimise adapteerimiseks läbi küttegraafiku optimeerimisele. Joonisel 2.2 on toodud OKHE SMART 160 veeboileri näidispilt, kus on näha antud veeboileri 2200 W keraamilist küttekeha (2), sooja vee toru (7) ja külma vee toru (5).



Joonis 2.2. OKHE SMART 160 [5]

Energiasäästmise funktsioonid on veeboileril järgmised:

- HDO režiimis elektriboiler saab kütta tarbevett vahemikus 5...65°C. Energiasäästu tekitab elektritarbimise juhtimine võrgutasu kellaajalist tariifi järgi.
- SMART režiim, mille algul boiler kogub kasutaja käitumisharjumusi, mida töödeldes saab elektriboiler enne sooja tarbevee kasutamist kütta vaid piisav kogus vett.
- SMART HDO režiimis ühe päeva kasutamata jäänud vesi salvestatakse järgmise päevani alandades öiseks ajaks selle temperatuuri. Ning juhul, kui kogu soendatud vesi kasutati ära, tõstab regulaator vee temperatuuri [5].

2.3 Välised juhtimisseadmed

Olemasolevate elektriseadmete juhtimiseks on võimalik kasutada automaatseid vaheseadmeid, mille ülesandeks on põhiseadme (näiteks elektrilise veeboileri) elektritarbimise juhtimine.

2.3.1 Turul pakutavad lahendused

Idee juhtida elektrilist koormust tekkis inimestel juba mitu aastat tagasi. Praegu on võimalik osta endale juba disainitud juhtimisseadet koos integreeritud juhtimisalgoritmiga ning mugava kasutajaliidesega.

Firma Celeon pakub lahendusi nii soojuspumpade, kui ka muude elektritarbijate jaoks. Juhtimise vajalikus seisneb elektrienergia Nord Pool elektribörsi tunnipõhise energiahinna kümnekordses muutumises ühe päeva jooksul. Juhtimise jaoks kasutatakse päev ette elektribörsi poolt andvaid elektrienergia hindu. Kasu saadakse tänu elektritarbimise piiramisele tundidel, mil elektrienergia hind on kallim.

Celeoni seadmed on võimelised ajastada tarbimist hommikuse hinnatõusu eelsesse ning õhtuse hinnalangu järgsesse intervalli [6].

Celeonil on pakutavad "targad pistikud koos voolumõõdikuga" tarbimise juhtimiseks (vt joonis 2.3).



Tark pistikupesa
voolumõõdikuga
€129,00 (sis. KM)



Miniatuurne tark
pistikupesa
voolumõõdikuga
€99,00 (sis. KM)

Joonis 2.3. Targad pistikud [6]

Need pistikud on võimelised vältida elektrit tarbival seadmel elektritarbimist kindlalt määratud päevase kogusega kõrge elektrienergia hinnaga tundidel. Aastatel 2020–2022 Eesti elektrituru hinnatsoonis võimaldasid need seadmed säästa 25% juhitavate seadmete elektriarvest [7].

2.3.2 Isetehtud lahendused

Internetis võib leida ka juhiseid iseseisvast börsihinda jälgivast kontrolleri tegemisest. Sellised kontrollid vajavad täielikku programmi arusaamist ja programmeerimisoskusi. Antud peatükis kirjeldatakse Riho Kirsi poolt pakutud börsihinda jälgivat kontrolleri.

Kasu saamise põhimõtte on sama, mis Celeoni kontrolleri. Elektritarbimist katkestatakse kallima elektrienergia tundidel. Ja lubatakse seadmel energiat kasutada odavama elektriga tundidel.

Tarbimise kontrolleriks vajalikud elemendid:

- Raspberry Pi 3 või Raspberry Pi 4
- Relee moodul
- Juhtmed
- SD kaart

Installeerides tarkvara Raspberry Pi miniarvutisse on võimalik internetist "tõmmata" tunnipõhiseid energiahindu ja prognoositavaid õhutemperatuuride andmeid. Siis algoritmi järgi arvutada vajalikku kütetundide kogust ning teostada õigeaegset relee ümberlülitamist [8].

2.4 Juhtimislahenduste võrdlus

Ülaltoodud lahendusi on raske omavahel hinnata, kuid kõik nendest ei vaja inimese osalemist automaatse juhtimise protsessi käigus.

Kuid peamine nende puudus on suhteliselt kõrge maksumus. Hindade loetelu on toodud tabelis 2.2. Kuna antud töö raames pole autoril eesmärgiks disainida soojuspump, põhiline aktsent on suunatud välistele juhtimise kontrolleritele.

Tabel 2.2. Juhtimislahenduste maksumuse võrdlus

Mudel	Juhtimislahenduse tüüp	Hind	Allikas
NIBE S1156	Integreeritud	10 265,70 €	[9]
OKHE SMART 160	Integreeritud	417,00 €	[10]
Celeoni tark pistik	Väline	129,00 €	[7]
Celeoni tark pistik miniatuurne	Väline	99,00 €	[7]
DIY juhtimisseade	Väline	65,50 €	[8]

Võrdluseks lihtsama juhtimisega veeboiler võib maksta Tesy BiLight 150 näitel vaid 201,60 €. Mis on kaks korda odavam, kui tabelis 2.2 toodud veeboiler OKHE SMART 160 [11].

Sarnane lugu on ka soojuspumpadega, näiteks NIBE S1156 sarnaste parameetritega soojuspump Stiebel-Eltron WPE-I 13 H 400 Plus maksab 8128 €, mis on peaaegu 2000€ odavam [12].

Isegi kõige odavama DIY lahenduse hind võiks olla väiksem juhul, kui kasutada odavamat töötlemistuuma.

3 ÜLEVAADE ELEKTRITARBIMISE JUHTIMISALGORITMIDEST

Elektri tunnipõhise energiahinna automaatseks saavutamiseks ja töötlemiseks kasutab enamus juhtimislahendustest mikrokontroller- või mikroprotsessortehnikat. Sellise elektrooniliste ja programmiliste meetodite kasutamine on vajalik selle tõttu, et tahetav info asub Internetis olevates serverites või veebilehtede peal. Internetiühenduse loomiseks ja sideprotokollide tegemiseks kasutatakse elektroonilisi lahendusi.

Samuti mikrokontrollerid ja mikroprotsessorid on võimelised küsitleda andureid ja anda juhtimiskäsk. Järjestust, mille alusel hakatakse küsitleva andureid, väljastama juhtimiskäsk, teha matemaatilisi arvutusi ja salvestama vajaliku infot nimetatakse programmiks. Programm baseerub töötamise algoritmil [13].

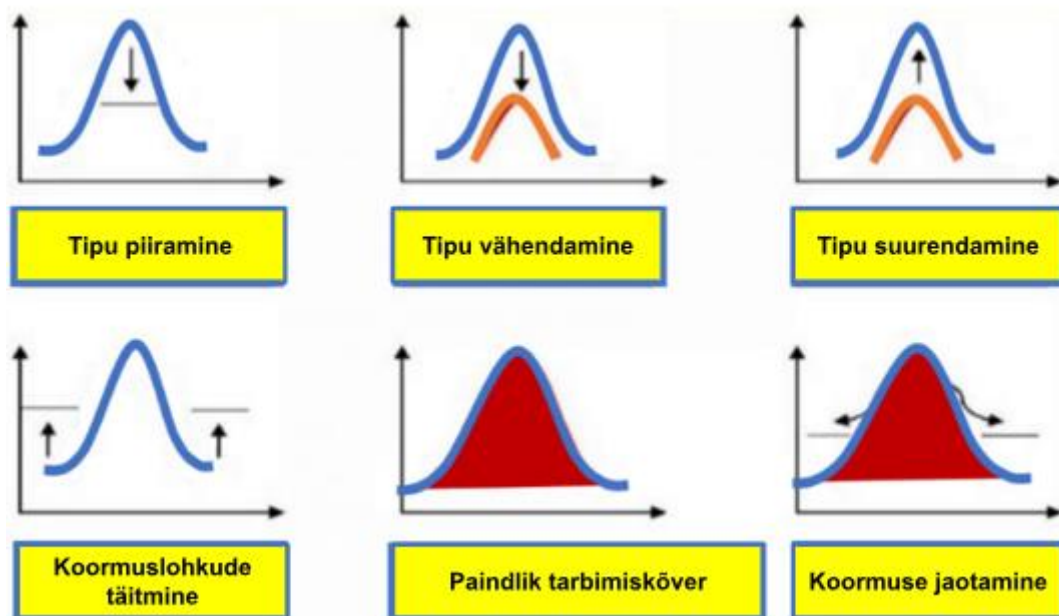
Eksisteerib mitmeid meetodeid ja algoritme, mis on võimelised seadmete elektrilist tarbimisgraafikut muuta. Nendest tuleb juttu järgmistes alampunktides.

Prototüübi jaoks algoritmi valikut tehakse peatükkis 7.

3.1 Tarbimisgraafiku muutumise võimalused

Eristatakse mitut erinevat seadmete elektri tarbimisgraafiku muundamise võimalust (vt joonis 3.1), mis võimaldavad paremini jaotada elektrilist koormust elektrivõrgus. Nendeks võimalusteks on:

- tipu piiramine (inglise keeles *peak clipping*),
- tipu vähendamine tarbiskõvera kuju säilitamisega (inglise keeles *conservation*),
- tipu suurendamine (inglise keeles *load growth*),
- koormuslohkude täitmine (inglise keeles *valley filling*),
- paindlik tarbiskõver (inglise keeles *flexible load shape*),
- koormuse jaotamine tippkoormusega hetkedest koormuslohkudesse (inglise keeles *load shifting*) [14].



Joonis 3.1. Tarbimisgraafiku muundamise võimalused [15]

Tippu piiramisel mõistetakse elektrilise koormuse tipptarbimise tunduvat vähenemist. Selle mõjul väheneb tippkoormuse tundidel genereeritav võimsus ja väheneb kogu kasutatud energiahulk. Tavaliselt tippu piiramine väljendub mõnede elektriseadmete otseses väljalülitamises [16].

Koormuse jaotamine on elektritarbimise juhtimise meetod, mille põhimõtteks on koormuse ümbertõstmine elektrienergia tipphinnaga tundidest, madalama hinnaga tundidesse. Teiste sõnadega tähendab see koormuse sisselülitamisaja ehk tarbimise algaja nihutamist, tarbitud energia maksumuse vähendamiseks [17].

Eksisteerib ka võimalus teha kogu tarbimist paindlikuks. Seda võimaldab paindliku tarbimisgraafiku ehk paindliku koormuse meetod. Kuigi sellel meetodil muutub elektriseadmete töötamise kvaliteet. Tööpõhimõttes tähendab see elektritarbimise koguajalist juhtimist vastavalt kasutaja poolt valitud parameetritele [18].

3.2 Ajaliste intervallide algoritm

Ajaliste intervallide algoritmi (inglise keele *Time-of-use algorithm* ehk *ToU*) all mõistetakse algoritmi, mis adapteerub ajalisele hinnatariifile. Tarbimise juhtimise kontekstis saab ToU all mõista ka mingi seadme töö jaoks eraldatud ajavahemikku. Tööpõhimõtteks on ajaliste tariifide olemasolu nagu näiteks võrguteenuse tariifid.

Ajaliste tariifide jälgimiseks ToU algoritm otsib vastuse kahele küsimusele:

- Milliseid ajavahemikke töö tegemiseks valida?
- Kuidas planeerida nende intervallide valikut?

Vastates nendele küsimustele omatakse ajaliselt planeeritud tunniplaan, mis on võimaldab teha tööd optimaalsel ajal saavutades sellega väiksemat rahalist kulu [19].

3.3 Geneetiline algoritm

Geneetilised algoritmid (inglise keeles *Genetic Algorithm ehk GA*) kujundavad endast protsesside optimeerimise eesmärkideks loodud algoritme. Need algoritmid olid inspireeritud loodusest ning kasutavad loodusliku valiku ja evolutsiooni printsiipe. Need algoritmid on väga universaalsed ja neid saab kasutada erinevate eesmärkide saavutamiseks.

Kõik geneetilised algoritmid omavad endas järgmisi üheks samme:

1. Parameetrite kodeerimine geenidena lahendamise jaoks.
2. Geenide pakkimine kromosoomidesse.
3. Algpulatsiooni initsialiseerimine.
4. Indiviidide kohanemuse määramine ja selle hinnang.
5. Pulatsiooni reproduktsioon vastavalt indiviidide kohanemusele.
6. Rekombinatsioon, mille käigus moodustuvad rekombineeritud indiviidid.
7. Rekombineeritud indiviidide mutatsioon ja järgmise pulatsiooni põlvkonna moodustamine.
8. Uue põlvkonna indiviidide kohanemuse määramine ja selle hinnang.
9. Koonduvuse kontroll [20].

3.4 Tarbimist ennustav algoritm

Elektrisüsteemides tarbimise ennustamist kasutatakse elektrienergia hindade koostamiseks. Aastate jooksul inimkond oli välja töötanud mitmeid ennustamise meetodeid. Eelnevalt kogutud elektritarbimise andmetest tehakse keskmist tarbimisgraafikut ja juba selle aluselt tehakse ennetusi.

Kuid eramutes tänu väikese elektritarbijate kogusele ja juhusliku kasutus graafikule tarbimise ennustamine on muutunud raskemaks protsessiks. Kuid kodu energiajuhtimissüsteemis (inglise keeles HEMS ehk *Home Energy Management System*) tarbimise ennustamine ja selle planeerimine võimaldab vähendada kulusid ja heitgaaside koguse vähendamist.

HEMS süsteemis tähtsat rolli mängib elektri tarbimisgraafiku kuju muutmine, mida saavutatakse elektrit tarbitavate seadmete töögraafiku planeerimisega. Sellega tuleb kaasa vajadus omada juhtimisseadet, mis:

- arhiveeriks tegelikke tarbimisgraafikuid
- analüüsiks energiatarbimise vajadust reaalajas
- tegeleks elektriseadmete optimaalsete tarbimisgraafikute koostamisega
- oleks võimeline võtta ühendust Internetis asuvate agregaatoriga
- saavutaks Internetist elektrihindade graafikut
- analüüsiks päikesetoodangut eramu elektrisüsteemis
- võimeldaks kasutajal muuta seadistusi [21].

3.5 Reeglipõhine algoritm

Uuemates hoonetes on paigaldatud erinevaid abisüsteeme ja andureid, mis aitavad luua targa kodu süsteemi. Siin HEMS omab põhilist rolli energialiikumise juhtimises ja kasutaja komforti tagamises.

Reeglipõhine algoritm (inglise keeles *Rule-Based algorithm*) on algoritm, mida saaks kasutada HEMS algoritmina nii ühe kui ka mitme seadme juhtimiseks erinevate sisendite abil. Antud algoritmis kasutatakse iga seadme jaoks koostatud reeglistikku,

kus on kirjeldatud mis tingimustel peab olema antud seade töös. Programmeerimiskeeles tähendab see IF - THEN (kui - siis) lausete kasutamist, kus IF osas on kirjeldatud tingimus ja THEN osas HEMS süsteemi väljundi(-te) olekut.

Oma lihtsa algoritmi tõttu on sellised HEMS süsteemid lihtsasti skaleeritavad ja andurite osas kiiresti laiendatavad. Optimaalse reeglistiku koostamisel on need süsteemid võimelised juhtida elektrienergiat rahalise säästu saavutamiseks [22].

4 ERAMU KIRJELDUS

Uuringu jaoks oli valitud 2 korruseline eramaja. Antud peatükis kirjeldatakse valitud maja parameetreid nagu:

- hoone arhitektuurne kirjeldus,
- arvutatud energiatõhususe arv,
- soojuskadu graafik,
- elektrit tarbivad seadmed.

Konfidentsiaalsuse säilitamiseks maja aadressi ei avaldata.

4.1 Arhitektuurne kirjeldus

Joonisel 4.1 toodud elamu summaarne köetav pind on 191 ruutmeetrit. Kahel korrusel asuvad 4 magamistuba ja 1 kabinet. Hoone elektriboiler ja maasoojuspump asuvad tehnoruumis. Majal on põrandaküte. Samuti asuvad tehnoruumis põrandakütte kollektorid ja nende ajamid [23].



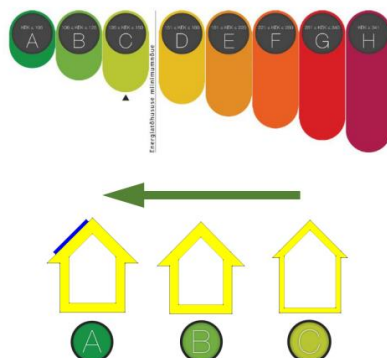
Joonis 4.1. Valitud hoone eestvaade [23]

4.2 Energiatõhususe arv

Kõike energia muundamise protsesse saab hinnata nende kasuteguri järgi. Kasuteguri all mõistetakse kasuliku töö ja kogu tehtud töö suhet. Kuid aga juhul, kui tahetakse hinnata ühe ja sama vajaduseks rahuldamiseks kasutatud energiat, kasutatakse

energiatõhususe mõistet. Mida kõrgem energiatõhusus on, seda vähem energiat hajub ümbritsevasse keskkonda [24].

Euroopa liidus on vastuvõetud üldised standardid energiatõhususest. Hoonete jaoks eksisteerivad ka energiatõhususe klassid (vt joonis 4.2).



Joonis 4.2. Energiatõhususe klassid [25]

Hooneid jaotatakse erinevatesse energiatõhususe klassidesse vastavalt nende aastase energiatarbimisele köetava pindalaühiku kohta (kWh/m^2a). Sellest suurusel lähtudes omistatakse hoonele energiamärgis H → A. Hoonete energiatõhususe klasside nõuded on toodud tabelis 4.1 [25].

Tabel 4.1. Hoone energiatõhususe klassid [25]

Hoone	Energiatõhususe klass.
Oluliselt rekonstrueeritud hoone	C
Madalenergiahoone ehk energiatõhususe ja taastuvenergiatehnoloogia mõistes mõistlikult ehitatud hoone, millel ei pea olema lokaalset elektri tootmist.	B
Liginullenergiahoone on energiatõhususe ja taastuvenergiatehnoloogia mõistes mõistlikult ehitatud hoone	A

Valitud elamu jaoks oli tellitud 18.07.2019 aastal energiatõhususearvu (ETA) arvutus.

Arvutus koosnes:

- Energiaarvutuse lähteandmete esitamisest
- Energiaarvutuste tulemuste esitamisest
- Suvised ruumitemperatuuri kontrolli tulemuste esitamisest

Joonistel 4.3. ja 4.4. on toodud ETA arvutuse lähteandmed ja arvutuste tulemused.

Energiaarvutuse lähteandmete esitamine											
Energiaarvutuse lähteandmed											
Arvustusoonide arv	10										
Küttesüsteemi tüüp	Maasoojuspump Thermia Inverter Mini										
-soojuse tootmine ja kütus	Põrandaküte										
-soojuse jaotamine	Soojustagastusega ventilatsioon Komfovent CF 400 V										
Ventilatsioonisüsteemi tüüp	ei ole										
Jahutussüsteem (on/ei ole)	VV määrus nr 58 "Hoone energiatõhususe arvutamise meetodika", § 9.Tabel 6										
Õhulekkearvu väärtuse allikas	EVS-EN ISO 10211, THERM 7 programm										
Soojuskaod läbi piirdetarindite											
Piirdetarind	g	U _i W/(m ² ·K)	A _i m ²	H _{piirdet} W/K	Soojuskaod läbi külmasildade				Soojuskaod läbi õhulekkekohtade		
					Külmasild	ψ _p W/(m·K)	l _p m	H _{külmasild} W/K	Omadus	Suurus	
Välissein		0,166	208,3	34,6	Välisseina välisnurk	0,043	22,2	1,0	Õhulekkearv q _{0,0}	4,0	
Pööningulagi		0,10	106,6	10,7	Välissein-vaheklapp	0,023	40,6	0,9	m ³ /(h·m ²)		
Põrand pinnasel		0,15	105,2	15,8	Pööningulagi-välissein	0,040	40,8	1,6	A _{0,0}	454,2	
Välisuks		0,90	2,1	1,9	Põrand pinnasel-välissein	0,056	40,6	2,3	V _{0,0}		
Aken (N)	0,6	0,80	3,2	2,6	Akna seinakinnitus	0,014	87,4	1,2	Korruste arv (täisarv)	2	
Aken (E)	0,6	0,80	4,5	3,6	Ukse seinakinnitus	0,014	6,2	0,1	V _{0,0} , m ³ /s	0,0210	
Aken (S)	0,6	0,80	13,9	11,1							
Aken (W)	0,6	0,80	10,4	8,3							
Kokku: H _{piirdet} , W/K				88,5	H _{külmasild} , W/K				7,1	H _{0,0} , W/K	
Välispiirete summaarne soojuserikadu				ΣH, W/K					121,0		
Välispiirete keskmine soojaläbivus				ΣH/A _{sp}					0,27		
Hoone kōetav pind				A _{kōetav} , m ²					191,1		
Hoone madala temperatuuriseadega pind				A _{madal} , m ²					0,0		
Välispiirete summaarne soojuserikadu kōetava pinna kohta				ΣH/A _{kōetav} , W/(m ² ·K)					0,63		

Joonis 4.3. ETA arvutuse lähteandmed [26]

Energiaarvutuste tulemuste esitamine							
Andmed hoone kohta							
Hoone kasutusotstarve	Üksikelamu (11101)						<input checked="" type="checkbox"/> Uusehitis
Address							<input type="checkbox"/> Oluline rekonstrueerimine
Ehitusaasta	2019						<input type="checkbox"/> Rekonstrueerimine
Kōetav pind	191,1	m ²					<input type="checkbox"/> Olemasolev hoone
Madala temp.seadega pind	0,0	m ²					
Netopind	212,4	m ²					
Energiaarvutusarv	99	kWh/(m²·a)	(kWh kōetava pinna ruutmeetri kohta)				
Energiaarvutusarv B	99	kWh/(m²·a)	(kWh kōetava pinna ruutmeetri kohta)				
^b Energiaarvutusarv ilma lokaalselt toodetud elektri							
Energiaarvutusarv	Hangitud kütused	Tarnitud energia	Tarnitud energia	Eksporditud energia	Eksporditud energia	Kaalumis-tegur	Kaalutud energiasutus
kokkuvõte	massi või kogus/a	mahuühik	kWh/a	kWh/(a·m ²)	kWh/a	kWh/(a·m ²)	- kWh/(a·m ²)
Elekter			5 841	30,6			2,0
Soojuspump			3 635	19,0			2,0
Küttepuid	0,00	m ³	0	0,0			0,65
Summa			9 476	49,6			99,2

Joonis 4.4. ETA arvutuse tulemused [27]

Tähtsamateks andmeteks on:

- Soojust tootvaks seadmeks oli valitud maasoojuspump Thermia Inverter Mini.
- Soojust jaotav süsteem on põrandaküte.
- Välispiirete summaarne soojuserikadu on võrdne 121 W/K.
- Energiaarvutuse arv 99 kWh/(m²·a) ehk kWh kōetava pinna ruutmeetri kohta.

4.3 Soojuskadu

ETA arvutusest tuleneb, et välispiirete summaarne soojuskadu kraadi kohta on 121,0 W/K (joonisest 4.3).

Seega kui on teada soojuserikadu ja temperatuuride erinevus, summaarne soojuskadu väljendub valemiga:

$$P_{sk} = \Sigma H \times \Delta T \quad (4.1)$$

Kus:

ΣH on soojuskadu kraadi kohta,

ΔT on temperatuuride erinevus kodus ka õues.

Kui avaldada ΔT , siis kogu valem hakkab välja nägema:

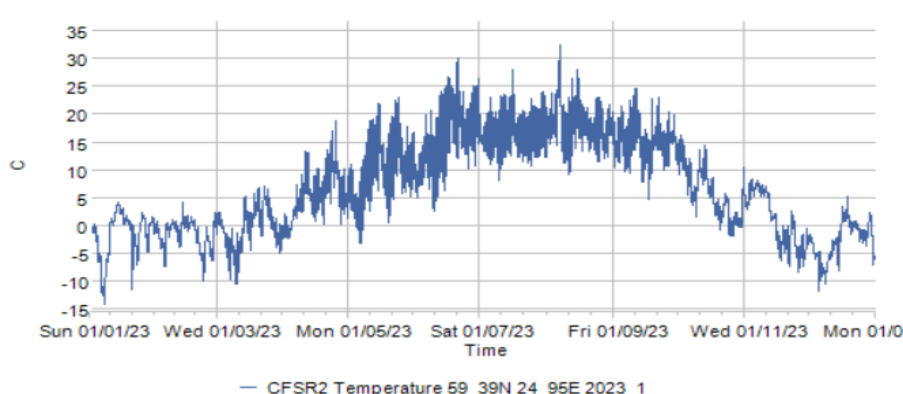
$$P_{sk} = \Sigma H \times (T_{sees} - T_{väljas}) \quad (4.2)$$

Kus:

T_{sees} on temperatuur hoone sees

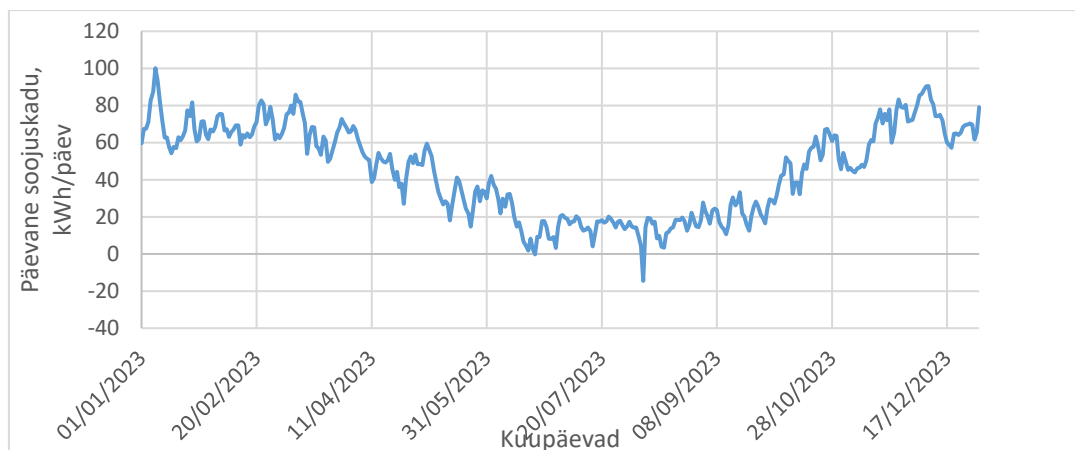
$T_{väljas}$ on temperatuur õues

Kasutades EnergyPro tarkvara saab laadida 2023 aasta tunnipõhiseid õhutemperatuure. Joonisel 4.5 on toodud EnergyPro tarkvarast saadud tunnipõhine 2023 aasta õhutemperatuuri graafik. Ja eeldades, et hoone sisene temperatuur on konstantne (lihtsustuse mõttes 22,5°C), saab valemi 2 abil koostada aastane soojuskao graafik.



Joonis 4.5. 2023 aasta õhutemperatuur [28]

Joonisel 4.6 soojuskao graafikul, kui soojuskadu on näidatud positiivselt, siis soojus hajub väliskeskkonda ja negatiivselt, kui soojus liigub väliskeskkonnast hoonesse.



Joonis 4.6. Arvutuslik soojuskadu aastal 2023

4.4 Elektrilised seadmed

Tarbijakaitse ja tehnilise järelevalve ameti kodulehel artiklis „TTJA nõuanded elektri teadlikumaks tarbimiseks“ on kirjeldatud erinevate kodu elektriseadmete aastane energiatarbimine (vt tabel 4.2) ja rahaline kulu aastas elektri hinnaga 12 senti/kWh [29].

Tabel 4.2. Mõnede kodus olevate seadmete elektritarbimine [29]

Elektriseade	Keskmine kasutusaeg aastas	Aastane tarbimine, kWh	Rahaline kulu aastas hinnaga 12 senti/ kWh
Külmik (D energiaklass)	365 päeva 24 h	200	24 €
Veekeetja 1500 W	5 min päevas	45	5,4 €
Elektripliit 2500 W	2 x päevas	360	43,2 €
Valgusti, LED 12 W	5 h päevas	20	2,4 €
Elektriboiler 100 l 2200 W	365 päeva 24 h	1700	204 €
Elektriradiaator 2000 W	2h x 150 päeva	600	72 €

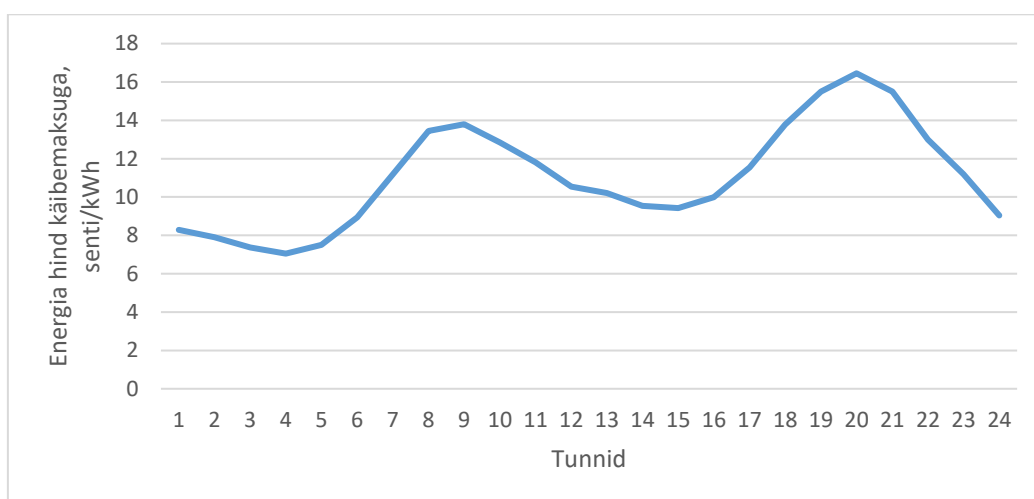
On selgelt näha, et suurima energiatarbimisega seadmed on soojust tootvad seadmed nagu elektriboiler, elektriradiaator ja elektripliit.

5 JUHTIMISLAHENDUSE KONTSEPTSIOON

Nagu selgus eelnevas peatükis elamutes kõige suurema elektritarbimisega seadmed on elektrilised veeboilerid ja soojuspumbad. Nende seadmete elektritarbimist saab juhtida nii, et tagada inimeste mugavust ja elektriarve vähenemist, kuna need on katkestatavad seadmed.

5.1 Juhtimise kontseptsioon

Vaadates keskmisele energiahinna graafikule joonisel 5.1 on märgata hinnatõusu hommikul ja õhtul. Keskmiselt aastal 2023 võis minimaalse ja maksimaalse hinna erinevus olla kahekordne, kuid eksisteerisid päevad, kus minimaalse ja maksimaalse hinnad erinesid 83,69 senti/kWh võrra.



Joonis 5.1. Päevakeskmine elektrienergia maksumus käibemaksuga 2023 aasta andmetel

Lähtudes sellest infost võib panna küttesüsteemid töösse ainult odava elektrihinna ajal, et omada rahalist kokkuhoidu. Kuna inimese poolt hindade jälgimine ja juhtimise signaalide andmine on aega nõutav protsess, on ratsionaalne seda automatiseerida. Selle jaoks on vaja anda elektriline signaal boileri küttekehale või soojuspumba kontrollerile. Lihtsamal juhul seda signaali saab anda elektromagnetiline rele, mis hakkab rakenduma kontrollerist tuleneva signaali mõjul. Kontroller aga peab Internetist päev-ette energiaturust saadud elektrienergia tunnipõhiste hindade seast valima odavamaid ning anda odavamal ajal käsku rele rakendamisele.

Enne kontrolleri prototüübi arendamist analüüsitakse juhtimise majandusliku osa.

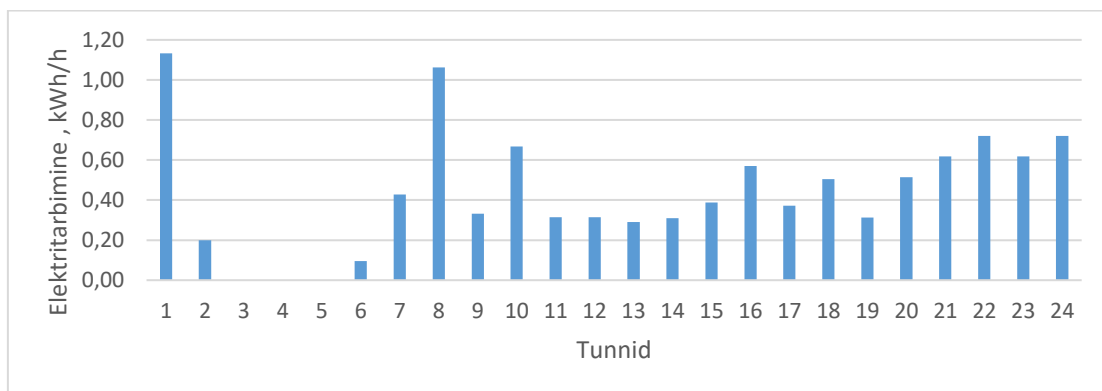
5.2 Elektritarbimise juhtimise majandusliku arvutuse lähteandmed

Kasutades Elering Live veebilehes võimalust alla laadida 2023 aasta tunnipõhiseid energiahindu, EnergyPro programmist saadud tunnipõhiseid õhutemperatuuri andmeid ja elektri boileri tarbimisgraafikut on võimalik Excelis arvutada tarbimise juhtimise mõju elektriarvele.

Elektri boileri ja soojuspumba elektritarbimise arvutamiseks on vaja teada järgmisi parameetreid:

- Boileri elektri tarbimisgraafik
- Soojuspumba elektri tarbimisgraafik
- Aastased tunnipõhised elektrienergia hinnad
- Võrguteenuse maksumus
- Boileri küttekeha võimsus
- Soojuspumba elektriline võimsus

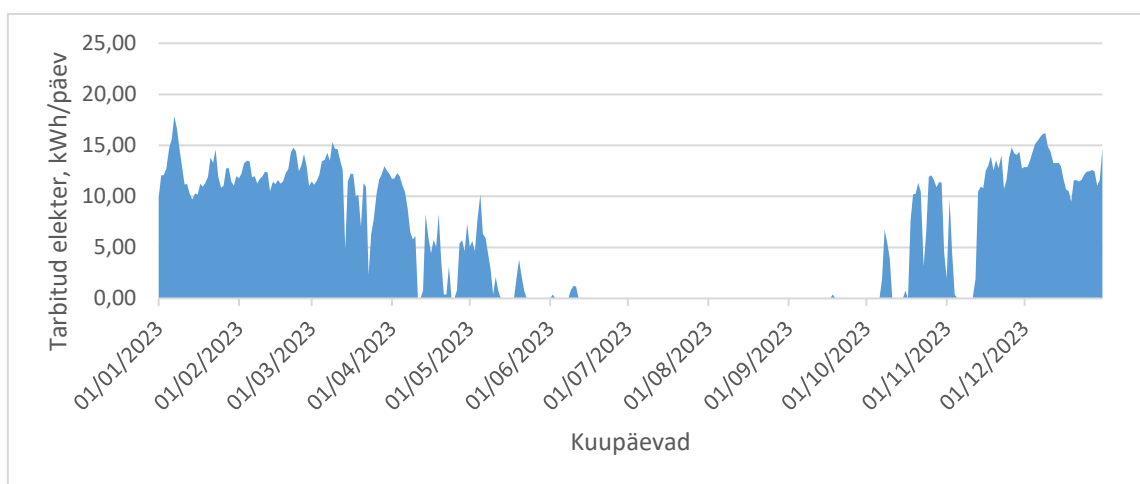
Nendest andmetest olid katseliselt mõõdetud elektrilise boileri tunnipõhine elektri tarbimisgraafik Sonoff POWR320D arvesti abil. Mõõtmised olid tehtud septembris 2023 aastal. Sooja vett kasutas viieliikmeline pere. Saadud tulemustest tehti päevakeskmine tarbimiskõver, mis on esitatud joonisel 5.2. Päevakeskmine tarbimine oli 10,485 kWh ja septembri kuus boileri elektritarbimine oli 314,55 kWh. Arvutuse lihtsustuse jaoks eeldati, et sooja tarbevee päevakeskmine tarbimiskõver ei sõltu aastaajast ning boileri küttekeha võimsus 1,7 kW.



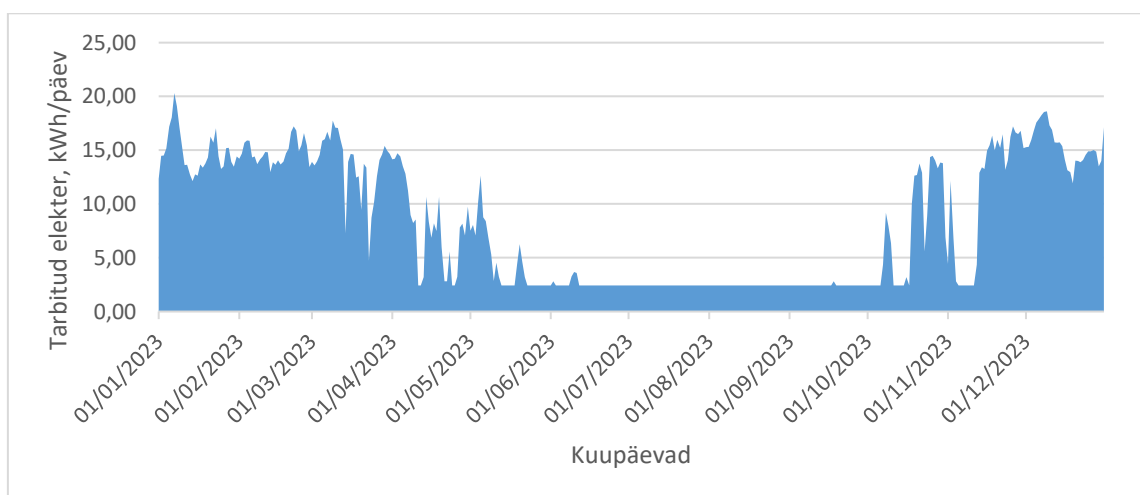
Joonis 5.2. Keskmine veeboileri päevane elektritarbimine

Otseselt saada soojuspumba elektritarbimise andmeid polnud võimalust. Selle tõttu kasutati soojuskadu graafikut peatükist 4. Lihtsustuse mõttes eeldati, et soojuspump hakkab käivitama nende soojuskadude kompenseerimiseks. Sellest tuleneb võimalus saada soojuspumba elektri tarbimisgraafik teades selle soojuspumba COP parameeter. Arvutuse jaoks oli valitud konstantne COP, mis oli võetud maasoojuspumba Thermia Diplomat Inverter M andmelehest ning võrdus sooja põrandate jaoks (veetemperatuur 35 °C) 5,6 ja radiaatorkütte jaoks (veetemperatuur 55°C) 4,3. Samuti sellest andmelehest maksimaalne tarbitav elektriline võimsus oli 4,6 kW [30]. Kuna soojuspump saab asendada veeboilerit, mudelis lihtsustuse mõttes võeti selle COP parameeter võrdne 4,3 ja soojuskadude kompenseerimise COP 5,6. Suvisel ajal või kui temperatuur tõuseb üle 5°C, soojuspump lõpetab soojuskadude kompenseerimist.

Soojuspumba elektritarbimis graafikud on toodud joonistel 5.3 ja 5.4.

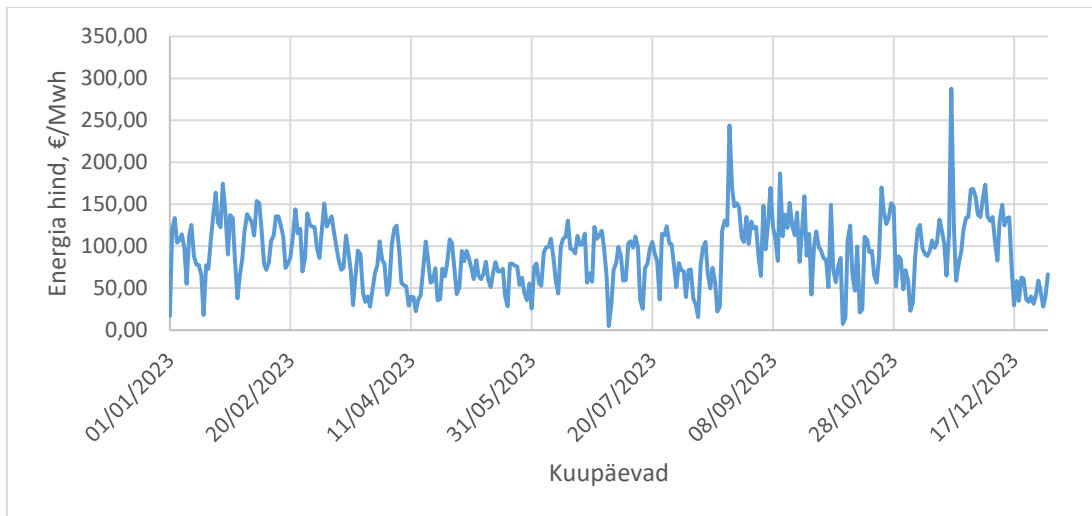


Joonis 5.3. Maasoojuspumba päevane elektritarbimine maja soendamiseks (COP 5,6)



Joonis 5.4. Maasoojuspumba päevane elektritarbimine maja soendamiseks koos tarbeveega

2023 tuunipõhised elektrienergia hinnad on võetud Elering Live veebilehelt ja on toodud joonisel 5.5.



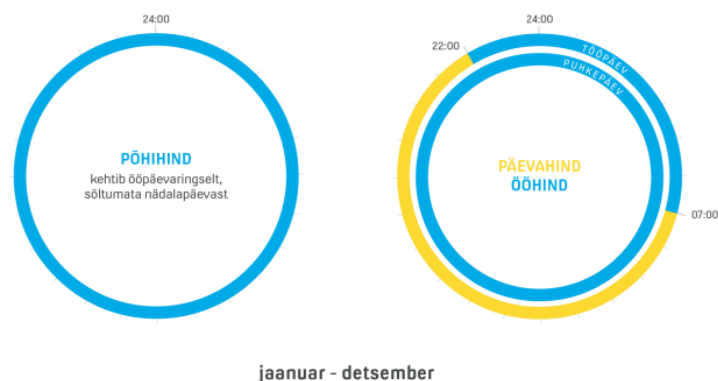
Joonis 5.5. Tunnipõhised elektrienergia hinnad aastal 2023 [31]

Selleks, et määrata juhtimise mudelis võrguteenuse maksumuse, saab pöörduda näiteks Elektrilevi OÜ võrguteenuse hinnakirjale, mis kehtib alates 1. jaanuarist 2024.

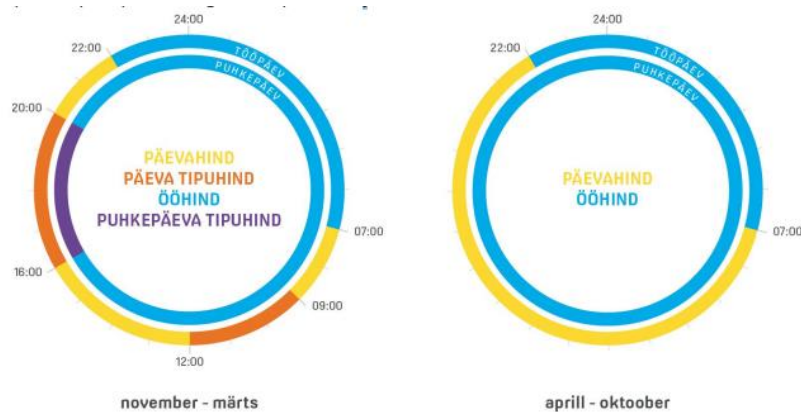
Sealt selgitatud, et eramute jaoks eristatakse 5 tüüpi hindu:

- Põhihind
- Päevahind
- Ööhind
- Päevatarbimise tipuaja hind
- Puhkepäeva tipuaja hind [32]

Hinnad ajaliselt on jaotatud joonistel 5.6 ja 5.7 toodud diagrammidel.



Joonis 5.6. Võrguteenuse hinnad vahemikus jaanuar – detsember [32]



Joonis 5.7. Võrguteenuse hinnad vahemikus november – märts ja aprill – oktoober [32]

Valitud hoonel on olemas liitumispunkt Elektrilevi 0,4 kV võrguga. Peakaitse automaat on 20 A.

Madalpingevõrkudes liitumispunktis kuni 63 A eksisteerib viis võrguteenuse paketti:

- Võrk 1 – elektri edastamine 7,21 senti/kWh + KM.
- Võrk 2 – elektri edastamine päeval 8,68 senti/kWh + KM; elektri edastamine ööl 5,05 senti/kWh + KM.
- Võrk 2 kuutasuga – elektri edastamine päeval 5,67 senti/kWh + KM; elektri edastamine ööl 3,28 senti/kWh + KM; lisandub ka kuutasu, mis on määratud vastavalt peakaitsmele (20A jaoks on see 5,93 €/kuu + KM).
- Võrk 4 – elektri edastamine päeval 3,69 senti/kWh + KM; elektri edastamine ööl 2,10 senti/kWh + KM; lisandub ka kuutasu, mis on määratud vastavalt peakaitsmele (20A jaoks on see 16,45 €/kuu + KM).
- Võrk 5 – elektri edastamine päeval 5,14 senti/kWh + KM; elektri edastamine päeva tippuhind 7,94 senti/kWh + KM; elektri edastamine ööl 2,95 senti /kWh + KM; elektri edastamine puhkepäeva tippajal 4,60 senti/kWh + KM; lisandub ka kuutasu, mis on määratud vastavalt peakaitsmele (20A jaoks on see 6,47 €/kuu + KM). [32]

Lisanduvad ka riiklikud maksud ja tasud:

- Taastuvenergia tasu alates 01.01.2024 – 1,05 senti/kWh
- Elektriaktsiis alates 01.05.2020 – 0,10 senti/kWh [32]

Arvutuse lihtsustamise jaoks võrguteenuse paketi jaoks oli valitud "Võrk 1" konstantse hinnaga 7,21 senti/kWh + KM, millele lisanduvad ka taastuenergia tasu ja elektriaktsiis. Summaarselt see annab 10,2 senti/kWh koos käibemaksuga 22%.

5.3 Elektritarbimise juhtimise majandusliku arvutuse tulemused

Excel programmi abil saab arvutada tuunipõhiste andmete alusel tarbitud energiat ja selle maksumust. Arvutus oli tunnipõhine ja ilma juhtimiseta arvutuses oli korrutatud tunnipõhine elektri hind ja tunnipõhiline tarbimine. Koos juhtimisega kontseptsiooni alusel arvutamisel kogu päevane tarbitud energia oli nihutatud odavama elektri hinnaga tundidesse. Tundide arvu määras juhitava seadme elektriline võimsus ja päevane energiahulk. Arvutuste tulemused on toodud tabelites 5.1 kuni 5.3.

Tabel 5.1. Veeboileri juhtimise arvutuse tulemused

KOOS juhtimisega	ILMA juhtimiseta
Aasta summaarne elektritarbimine, kWh	
3827,03	3827,03
Summaarne kulu aastas, €	
672,99	888,90
Elektri aastakeskmise maksumus, senti/kWh	
18	23
Aastane rahaline kokkuhoid, €	
215,91	
Sääst	
24%	

Tabel 5.2. Soojuspumba juhtimise arvutuse tulemused ilma sooja tarbeveeta

KOOS juhtimisega	ILMA juhtimiseta
Aasta summaarne elektritarbimine, kWh	
2118,81	2118,81
Summaarne kulu aastas, €	
400,28	520,63
Elektri aastakeskmise maksumus, senti/kWh	
19	25
Aastane rahaline kokkuhoid, €	
120,36	
Sääst	
23%	

Tabel 5.3. Soojuspumba juhtimise arvutuse tulemused koos sooja tarbeveega

KOOS juhtimisega	ILMA juhtimiseta
Aasta summaarne elektritarbimine, kWh	
3008,65	3008,65
Summaarne kulu aastas, €	
537,81	716,01
Elektri aastakeskmise maksumus, senti/kWh	
18	24
Aastane rahaline kokkuhoid, €	
178,20	
Sääst	
24%	

Ülaltoodud tabelitest selgub, et kontseptsiooni aluseline elektritarbimise juhtimine on efektiivne võimalus säästa vähemalt 120 € aastas ainult elektriseadmete sisse ja välja lülitamisel õigel ajal. Kõige odavam lahendus on soojuse tootmine soojuspumbaga nii soojuskadude kompenseerimiseks, kui ka sooja tarbevee tootmiseks. Sääst oli arvutatud nagu rahalise kokkuhoiu ja ilma juhtimiseta rahaliste kulude suhe.

6 JUHTIMISLAHENDUSE PROTOTÜÜBI ARENDUS

Peatükis 5 kirjeldatud kontseptsiooni aluselise prototüübi arendamiseks on vajalik:

- Kontroller ehk töötlev tuum
- Relee
- Toiteplokk
- Lisakomponendid

6.1 Töötlev tuum

Antud prototüübis töötlev tuum peab automaatset võtma Internetist elektrienergia hindade tunnipõhilist graafikut, valima odavama energiaga perioode ning andma käsku relee rakendumisele.

Oma võimekusest võivad kontrolleriks sobida nii miniarvutid, kuna nad omavad võimalust ühendada Internetiga, kui ka väiksemad mikrokontrollerid koos WIFI mooduliga.

6.1.1 Miniarvuti

Populaarsemateks miniarvutiteks on Raspberry Pi brändi nimelised elektroonilised mikroprotsessor seadmed, millistel on programmeeritavad üldotstarbelised sisend- ja väljundpordid (inglise keeles *General Purpose Input Output - GPIO*).

Uuema mudeli Raspberry Pi 5 (joonisel 6.1) näitel miniarvuti eelisteks võib nimetada 40 GPIO olemasolu, kuhu saab ühendada lisaandureid. Samuti suureks eeliseks on võimalus ühendada seda miniarvutit WIFI või Ethernet kaabli kaudu Internetiga [33].

Puudusteks võib nimetada aga suure toiteplokki vajadus (5 V, 5 A) ja kõrget maksumust (seisuga 15.04.2024 veebipoes omipood.ee maksis Raspberry PI 5 8 GB Model B 129.00 € ilma toiteplokit [34]). Samuti puuduseks on vajadus kasutada lisamoodulit relee lülitamiseks, sest GPIO väljundvõimsust ei piisa relee rakendumiseks.

Prototüübina sellist arvutit saab kasutada, aga võrreldes järgmistes punktides kirjeldatud kontrolleritega on see liiga kallis lahendus.



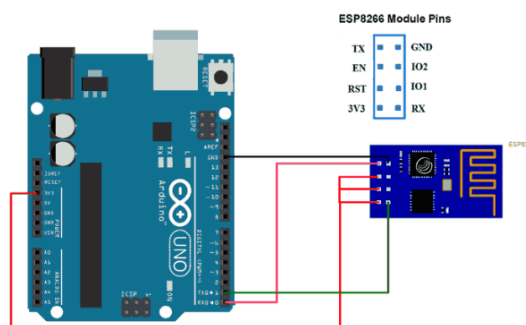
Joonis 6.1. Miniarvuti Raspberry Pi 5 [34]

6.1.2 Arduino nano ja WIFI moodul

Odavamaks lahenduseks on aga populaarse Arduino brändi kontrollereid kasutada. Need kontrollid samuti omavad programmeeritavaid sisendeid ja väljundeid, kuid aga mitte kõik nendest omavad sisseehitatud Internetiühenduse võimalust. Selle probleemil lahendamiseks saab kasutada kas sisseehitatud WIFI mooduliga lahendusi või kasutada sellist moodulit välise moodulina. Just välise mooduliga lahendus on toodud joonisel 6.2.

Sellise skeemi eeliseks on väiksem maksumus, mis originaalse kontrolleri kasutamisel (Arduino Uno Rev3) on umbes 24 € [35] + 2 € ESP8266 WIFI mooduli maksumusest [36]. Teiseks eeliseks on aga võimalus kasutada väiksemat toiteplokki laiemal pingevahemikuga.

Puuduseks on vajadus kasutada lisamoodulit relee lülitamiseks ja lisamoodulit Internetiga ühenduse loomiseks.



Joonis 6.2. Arduino Uno ja ESP8266 WIFI mooduli ühendusskeem [37]

6.1.3 ESP8266 kontrolleri

Punktis 6.1.2 oli kasutatud WIFI moodulina ESP8266. Seda moodulit saab kasutada iseseisva kontrollina. Eksisteerivad lahendused, mida saab programmeerida ühendades neid läbi kaabli arvutiga. Mis kordades lihtsustab prototüübi arendamise võimalust. Selliseks kontrolliks on näiteks ESP8266 NodeMCU või WeMos mudelid. Joonisel 6.3 on toodud ESP8266 NodeMCU emaplaat.

Nende mudelite eeliseks on kõigepealt väike maksumus (Aliexpress.com nende kontrollite hinnad jäävad vahemikku 2 € – 4 €) ja sisseehitatud WIFI ja Bluetooth moodul. Puuduseks on aga vajadus kontrolleri väljundsignaali võimendada relee rakendamiseks [38].



Joonis 6.3. ESP8266 NodeMCU emaplaat [39]

Oma väikese maksumuse ja programmeerimise lihtsuse tõttu prototüübi kontrollina oli valitud just ESP8266 NodeMCU kontrolleri.

6.2 Relee

Kontseptsiooni järgi skeemis peab olema ka elektromagnetiline relee. Selle valimisel võib lähtuda kontrollist tulenevast signalist ja lülitavast voolust.

ESP8266 kontrolleri nimipinge on 3.3 V ja ühe GPIO maksimaalne väljundvool on 12 mA [40].

Kuna relee mähis vajab suuremat toitepinget, on vaja kontrollit tulenevat signaali võimendada. Signaali võimendamiseks saab kasutada N-Mosfet transistorit. Ühendusskeem on toodud punktis 6.4.

Samuti relee valimisel on vaja otsustada millises asendis on releel kontaktid, kui mähisele ei anta toitepinget. Universaalsuse mõttes saab valida releed, kus on nii normaalselt suletud kontakt (*inglise keeles Normally Closed - NC*) ja normaalselt avatud kontakt (*inglise keeles Normally Open - NO*).

Valitud relee parameetrid:

- Mähise nimipinge 12V DC
- Mähise vool 54mA DC
- Lülituspinge/vool 250 VAC/10 A
- Maksumus Lemona.ee veebipoes 2,88 €/tk (seisuga 15.04.2024)



Joonis 6.4. Relee [41]

Valitud transistori parameetrid:

- Mudel RFD14N05
- Juhtimispinge 10 VDC
- Nimipinge 50 VDC
- Nimivool 14 A

6.3 Toiteplokk

Kuna rele nimipingeks on 12 VDC peab ka toiteplokki nimipinge olema sellele võrdne. Toiteplokki väljundi vool peab olema piisav rele ja kontrolleri toitmiseks. Väikese varuga võttes vähemalt 200 mA.

Valitud toiteplokki parameetrid:

- Sisendpinge 230 VAC
- Väljundpinge 12 VDC
- Väljundvool 300 mA
- Maksumus Aliexpress.com 1,67 €/tk (seisuga 15.04.2024) [42]



Joonis 6.5. 12V toiteplokk [42]

6.4 Elektriskeemi komponendid

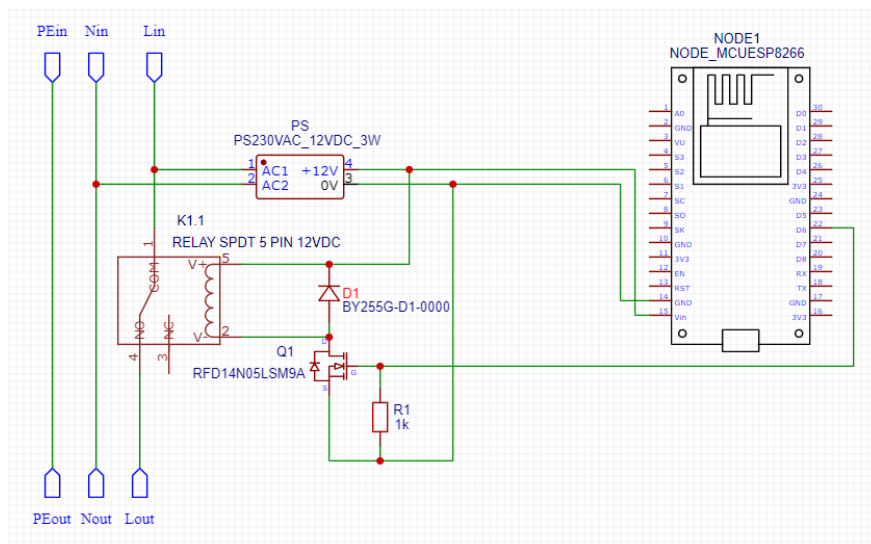
Elektriskeem koosneb:

- Kontrollerist ESP8266 NodeMCU (skeemil NODE1)
- Releest (skeemil K1.1)
- Toiteplokkist (skeemil PS)
- Transistorist RFD14N05 (skeemil Q1)
- Resistorist (skeemil R1)
- Diodist P6KE400CA (skeemil D1)
- Sisenditest (skeemis L in, N in, PE in)
- Väljunditest (skeemis L out, N out, PE out)

Joonisel 6.6 toodud elektriskeemis toiteplokk saab toidet 230 VAC võrgust. Faasi juhtmes asuvas relees töökindluse tõstmiseks on kasutatud NC kontakt. See vajab reverseeritud signaali kontrollerist. Ehk kui tahetakse releed välja lülitada, antakse relele mähisele pinget (kontrolleri väljundis on loogiline 1).

Samuti skeemi on pandud takisti R1. Selle ülesandeks on transistori kindel kinni panemine. Vastasel juhul võib transistor olla poolavatud, mis toob kaasa selle kuumenemist.

Relee mähisel on olemas induktiivsus. Relee välja lülitamisel tekitab selle induktiivsus liigpinget, mis võib kahjustada transistorit. Liigpinge vähendamiseks on skeemi pandud vastastiku ühenduses diod D1.



Joonis 6.6. Prototüübi elektriskeem

6.5 Prototüübi tasuvuse analüüs

Prototüübi summaarne maksumus:

- ESP8266 NodeMCU 1,97 €/tk (seisuga 18.01.2023) [43]
- Relee 2,88 €/tk (seisuga 15.04.2024) [44]
- Toitplokk 1,67 €/tk (seisuga 11.11.2023) [45]
- Transistor 0,75 €/tk (seisuga 05.05.2022) [46]
- Diod 0,17 €/tk (seisuga 15.04.2024) [47]
- Takisti 0,06 €/tk (seisuga 15.04.2024) [48]

Korpuseks on harukarbid 2 tükki 90*90*40 hinnaga 0,92 €/tk (seisuga 15.04.2024) [49].

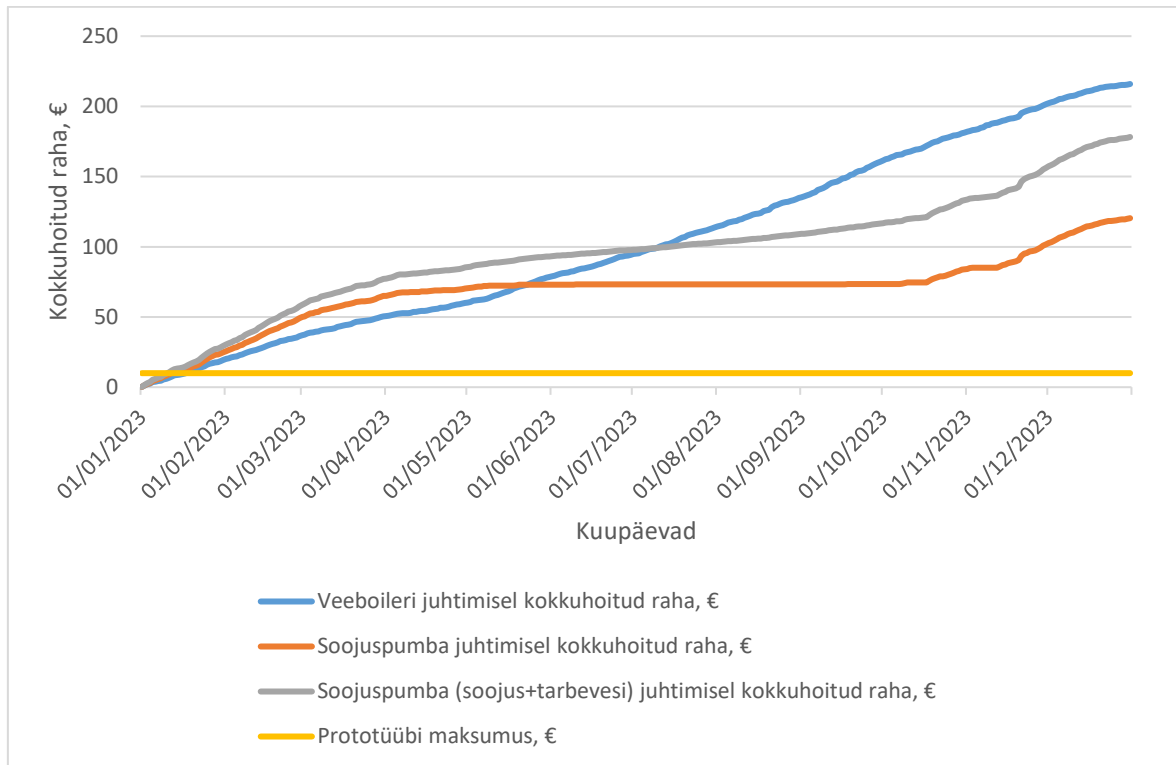
Ja juhtmete ühendamiseks kasutatakse kruviklemme hinnaga 0,65 €/12tk [50].

Kokku maksab prototüüp 9,99 €.

Punktis 5.3 esitatud andmete põhjal selgub, et veeboileri rahaline kokkuhoid on 215,91 €/aasta ja soojuspumbal 120,36 €/aasta päeva ilma sooja tarbeveeta ja 178,20 €/aasta sooja tarbeveega. Siis teades prototüübi maksumust on võimalik arvutada, et juhul, kui

prototüüp hakkab juhtima boileri elektritarbimist tasub see ennast 21,61 korda ühe aasta jooksul.

Joonistel 6.7 toodud graafikuid, tõestavad, et juhtides boileri elektritarbimist tasub prototüüp ennast 18 päeva jooksul arvestades, et juhtimist alustati 01.01.2023 kell 00:00:00. Juhtides soojuspumba elektritarbimist tasuvuse aeg on 12 päeva ilma sooja tarbevee tootmiseta ja 10 päeva koos sooja tarbevee tootmisega. Veeboileri ja soojuspumba aastakeskmised elektrihinnad on toodud tabelites 5.1 kuni 5.3.



Joonis 6.7. Prototüübi abil arvutuslik kokkuhoitud raha võrreldes prototüübi maksumusega

7 HINNAPÕHISE JUHTIMISALGORITMI VALIK JA KATSETUS

Peatükist 3 kirjeldatud tarbimiskõvera muutumise võimalustest kogu hoone kontseptsiooni järgse juhtimise mõistes on tegu *load shifting* meetodiga. Kuid vaadates ainult veeboileri või soojuspumba tööd on tegu *flexible load shape* meetodiga.

Algoritmi poolest valitud kontrolleri jaoks geneetiline algoritm on päris keeruline ja arvutuste mahukas, kuna vajab parima tulemuse saamiseks mitmekordsed optimeerimisülesande täitmist.

Elektrienergia hinnajärgse juhtimise eesmärkide saavutamiseks ajaliste intervallide põhine algoritmi (ToU) parima tulemuse saavutamiseks on vaja valida iga päeva jaoks uus seadme töö intervall. Tegelikult sellise tulemuseni viib ka reeglipõhine algoritm, mille reeglits on „Lülita seadet sisse, siis kui praegu elektri hind kuulub minimaalse elektrihindade hulka“.

7.1 Juhtimise algoritm

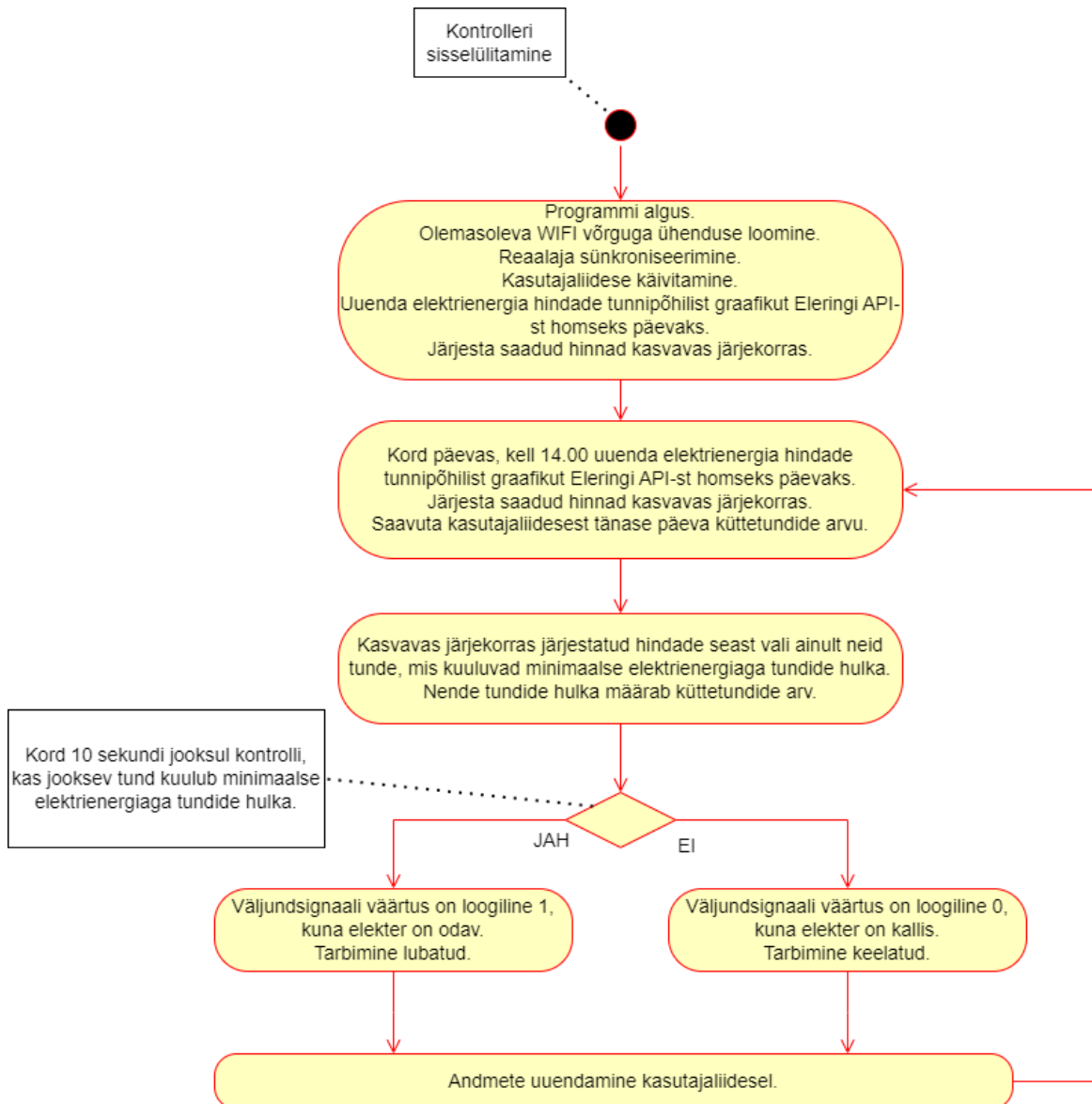
Algoritmi UML diagramm on toodud joonisel 7.1. Elektrienergia andmeid uuendatakse kord päevas kell 14.00. Sellel ajal saadakse Päev-ette turust elektrienergia hinnad järgmiseks päevaks.

Tegelikult „Päev-ette“ hinnad postitatakse 12:45 CET (inglise keeles *CET on Central Europe time*). Eesti piirkonnas kuulutatakse neid hindu välja kell 13:45. Võttes väikese varuga on võimalik algoritmi alusel uuendada hindu kell 14:00 [51].

Lihtsamal juhul päevane kütetundide arv on kasutaja poolt määratud suurus. See suurus sõltub juhitava seadme elektrilisest võimsusest, päevasest elektritarbimisest ja veeboileri või hoone soojusmahtuvusest.

Kuna tegu on peamiselt reeglipõhise algoritmiga, peab kontroller mõne aja jooksul kontrollima kas jooksev tund kuulub minimaalse elektrienergiaga tundide hulka või mitte. Kümne sekundiline kontrollimiste intervall on piisav nii õigeaegse seadme sisse- või väljalülitamise jaoks, kui ka vajadusel lisaarvutuste tegemiseks.

Et kasutajal oleks võimalus omada juhtimislahendusest tagasisidet, võib lokaalvõrku luua veebilehekülge, kuhu saata kõike kasutajale vajalikku infot.



Joonis 7.1. Juhtimise algoritm

7.2 Automaatne elektrienergia hindade saamine

Elektrienergia info saamiseks saab kasutada kontroller Eleringi API serverit.

API server on selline server, mis täidab vahelüli rolli kasutaja ja infopakkuja vahel. Selline server lihtsustab info edastust ja andmetöötlust [52].

Elering API võimaldab saada elektrienergia hindu saates serverile spetsiaalselt vormistatud URL päringut. Näiteks juhul, kui on soov teada saada elektrienergia hindu ajavahemikus 15.04.2024 23:59:59 kuni 16.04.2024 23:59:59 (kõik hinnad 16. aprillil 2024) URL päring hakkab nägema välja järgnevalt:

„<https://dashboard.elering.ee/api/nps/price?start=2024-04-15T20%3A59%3A59.999Z&end=2024-04-16T20%3A59%3A59.999Z>” [53].

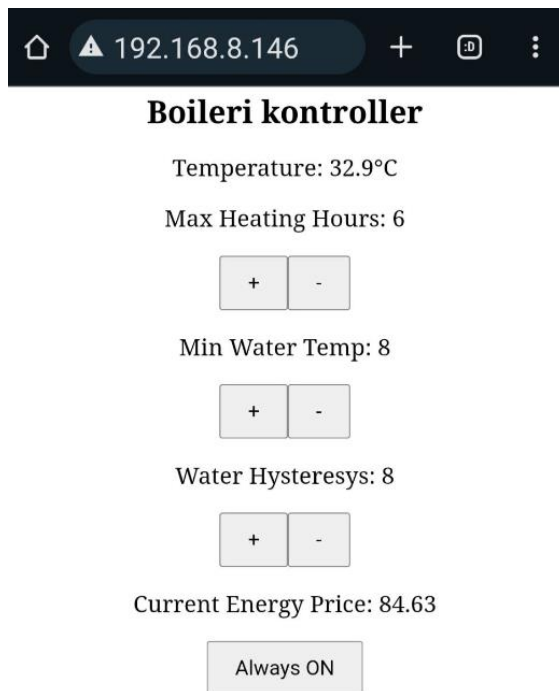
Serveri vastuseks saab kontroller andmerea, mille teisendamine andmete massiiviks võimaldab automaatselt kasutada saadud andmeid elektritarbimise juhtimise eesmärkide saavutamiseks.

7.3 Katsetus

Prototüübi katsetamiseks oli sellega ühendatud järjestikku Sonoff POWR320D ühefaasiline arvesti ja koostatud katsestend (joonisel 7.2). Katsetamisel juhtis prototüüp veeboileri elektritarbimist. Sooja tarbevee temperatuuri jälgimiseks oli ühendatud prototüübiga ka digitaalne temperatuuri andur DS18B20. Ja loodud primitiivne kasutajaliides (joonisel 7.3).



Joonis 7.2. Katsestend



Joonis 7.3. Boileri juhtimiseks adopteeritud prototüübi kasutajaliides

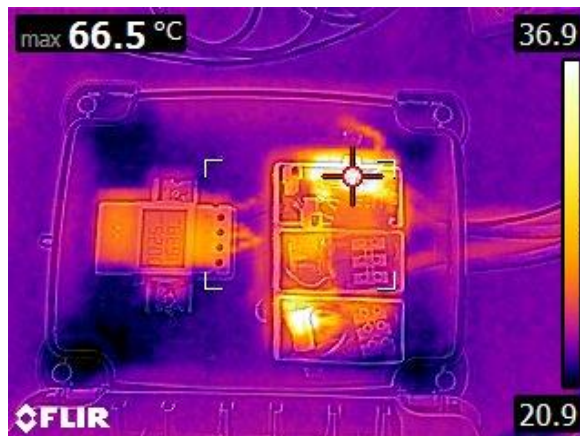
Kasutajaliidesel on olemas järgmised muutujad:

- „Temperature“ muutuja näitab sooja tarbevee temperatuuri.
- „Max Heating Hours“ muutuja määrab veeboileri maksimaalse päevase kütetundide arvu.
- „Min Water Temp“ muutuja määrab minimaalse sooja tarbevee temperatuuri. Juhul, kui „Temperature“ langeb alla „Min Water Temp“, lülitab kontrollor küttekeha sisse isegi kui elekter on kallis.
- „Water Hysteresys“ määrab temperatuuride vahemikku, millal veeboiler hakkab soendama vett peale „Min Water Temp“ rakendumist.
- „Current Energy Price“ näitab praeguse energiahinda €/MWh.
- Nupp „Always ON“ võimaldab vee soendamist kogu aeg isegi siis kui elekter on kallis.

Katsetuse jooksul suutis prototüübi kontrollor võtta ühendust Elering API serveriga, saada sellelt reaalajas energiahindade andmeid ja anda välja relee rakendumisele juhtimiskäsk. Relee kasetatud maksimaalne koormus oli 1721 W, mis võrdus veeboileri küttekeha võimsusega Sonoff POWR320D arvesti järgi.

Kuna katsetava elektrilise veeboileri kõrval tootis sooja tarbevett ka puidukatel, polnud võimalust korraldada täiel määral koormuskatseid. Kuid sooritatud katsed näitavad, et tipphinnaga tundidel prototüüp ei võimaldanud boileril elektrit tarbida, mis viidab õigele kontseptsiooni töötamisele.

Tööajal prototüüp kuumenes. Kuumenemiskohti saab näha joonisel 7.4.



Joonis 7.4. Katsestendi termopilt koormusel 1,7 kW

Kõige kuumem koht asub prototüübi kontrolleri emaplaadil, selle maksimaalne mõõdetud temperatuur 2 tunni töötamise pärast oli 66,5°C. Kontrolleriis kuumeneb mitte töötlemistuum, vaid selle 3,3 V lineaarstabilisaator AMS1117. Selle kuumenemine ei sõltu prototüübi läbivast võimsusest. Kuid temperatuuri vähendamiseks võiks tulevikus vähendada emaplaadi toitepinget.

Samuti tulevikus on vaja korraldada koormuskatseid, et uurida prototüübi pikaajalist elektritarbimisejuhtimist ja teha järeldusi prototüübi reaalsest tasuvuseajast.

8 KOKKUVÕTE EESTI KEELES

Bakalaureuse lõputöö tulemuseks on automaatne elektrilist koormust juhtiv seade, mis omab võimalust saavutama reaalajas elektrienergia hindu päev-ette elektriturust ning seejärel anda juhtimiskäsk juhitavale seadmele töö alustamiseks või katkemiseks.

Lõputöö käigus olid uuritud Eesti turul olemasolevad elektriliste küttesüsteemide ja veeboilerite juhtimislahendused, mis saavutavad rahalist kokkuhoidu elektrienergia automaatse juhtimise abil. Suuremates seadmetes, nagu soojuspumbad, või kohata soojuspumba kontrollerrisse integreeritud elektrienergia hinna järgset juhtimisalgoritmi. Kuid kui olemasolev elektriseade ei oma sellist algoritmi, võib turul leida välist juhtimisseadet või valmistada seda iseseisvalt. Aga peamiseks probleemiks selliste seadmete vähesest masslevikust on nende suhteliselt kõrge maksumus. Punktis 2.4 toodud andmetest selgub, et vaadeldud seadmetest odavaim oli isevalmistatud juhtimislahendus, mille hinnaks oli 65,50 €. Aga kasutades odavamat töötlemistuuma saab ka seda hinda langetada.

Juhtimisalgoritmide poolest valik on mitmekesine. Alates lihtsamatest reeglipõhistest algoritmides kuni keeruliste optimeerimisalgoritmideni. Algoritmi valik sõltub tahetavast tarbimisgraafiku muundamise meetmest ja juhtimisseadme töötlemistuuma võimekusest.

Enne juhtimislahenduse prototüübi arendamist on vaja sõnastada juhtimise kontseptsioon. Lähtudes joonisel 5.1 toodud päevakeskmisest elektrienergia maksumusest 2023 aastal võib panna elektrilised küttesüsteemid ja veeboilerid töösse ainult odava elektri hinna ajal, et omada rahalist kokkuhoidu. Protsessi automatiseerimiseks annab kontroller juhtsignaali elektromagnetilise relee kaudu.

Kontseptsiooni aluselisel juhtimise majanduslikust arvutusest selgus, et juhtides veeboileri elektritarbimist saab saavutada umbes 215 € rahalist kokkuhoidu aastas eeldades, et sooja tarbevee kasutamine on kogu aasta jooksul ühesugune ja võrdne joonisel 5.2 toodud päevasele elektri tarbimisgraafikuga, küttekeha võimsus on 1,7 kW ja veepaagi energiamahutuvus on piisav sooja tarbevee päevasele vajaduse katmisele.

Soojuspumba juhtimise majanduslikul arvutusel eeldati, et soojuspump hakkab tootama hoone soojuskadude kompenseerimiseks ja sooja tarbevee tootmiseks. Soojuspumba COP soojuskadude kompenseerimiseks on 5,6 ja sooja tarbevee tootmiseks 4,3. Sellisel juhul ainult soojuskadude katmiseks on aastane kokkuhoid on 120 € ja koos tarbevee katmisega 178 €.

Arvutuse tulemustest selgus märkimisväärne kokkuhoiutud rahaline suurus, mille alusel otsustati luua juhtimislahenduse prototüüp. Prototüüp koosneb:

- Kontrollerist ESP8266 NodeMCU
- Releest
- Toiteplokkist
- Transistorist RFD14N05
- Resistorist
- Diodist P6KE400CA

Prototüüp saab toidet 230 V võrgust ja suudab lülitada kuni 10 A koormust pingel 250 V. Komponentide maksumus on 9,99 €.

Prototüübi juhtimisalgoritmiks on reeglipõhine algoritm, mis automaatselt kord päevas kell 14:00 uuendab järgmise päeva elektrienergia hindu ja sorteerib neid kasvavas järjekorras. Teades reaalsel ajahetke saab prototüübi kontroller otsustada jooksva päeva sorteeritud elektrihindade andmebaasis, kas on vaja anda signaal tarbimise alustamiseks või lõpetamiseks. Tehtes prototüübiga katseid, selgus, et prototüüp on võimeline juhtida 1,7 kW koormust ja lülitada veeboilerit välja kõrge elektrienergia hinnaga tundidel. Reaalseid pikaajalisi töökatseteks polnud piisavalt võimalust korraldada katla küttesüsteemi töötamise tõttu.

Lõputöö tulemused on saavutatud ja majandusliku arvutuse alusel prototüübi tasuvuseaeg on väiksem kui 20 talvist päeva. Elektrilise veeboileri juhtimisel on tasuvuseaeg 18 päeva ja soojuspumba juhtimisel 10-12 päeva. Tulevikus saab lahendada prototüübi elementide kuumenemisega seotuid probleeme ja viia läbi täisväärtuslikke koormuskatseid.

9 KOKKUVÕTE INGLISE KEELES

The result of the bachelor's thesis is an automatic electrical load controlling device that has the ability to obtain real-time electricity prices from the day-ahead electricity market and then give control commands to the controlled device to start or stop work.

In the course of the thesis, control solutions for electric heating systems and water boilers available on the Estonian market were studied, which achieve financial savings by means of automatic control of electricity. In larger devices, such as heat pumps, you can find a control algorithm based on the electricity price integrated into the heat pump controller. But if the existing electrical device does not have such an algorithm, an external control device can be found on the market or made independently. But the main problem with the lack of mass distribution of such devices is their relatively high cost. From the data given in point 2.4, it is clear that the cheapest of the observed devices was a self-made control solution, the price of which was 65.50 €. But by using a cheaper processing core, this price can also be lowered.

In terms of control algorithms, the choice is diverse. From simpler rule-based algorithms to complex optimization algorithms. The choice of algorithm depends on the desired consumption graph transformation measure and the capability of the processing core of the control unit.

Before developing a control solution prototype, it is necessary to formulate a control concept. Based on the average daily cost of electricity in Figure 5.1 in 2023, electric heating systems and water boilers can be put into operation only during cheap electricity prices in order to have financial savings. To automate the process, the controller provides a control signal via an electromagnetic relay.

Based on the economic calculation of the management of the concept, it was found that by managing the electricity consumption of the water boiler, financial savings of about 215 € can be achieved per year, assuming that the use of domestic hot water is the same throughout the year and is equal to the daily electricity consumption schedule shown in Figure 5.2, the power of the heater is 1,7 kW and the energy capacity of the water tank is sufficient to cover the daily need for domestic hot water.

In the economic calculation of the heat pump management, it was assumed that the heat pump will produce to compensate for the building's heat losses and to produce domestic hot water. The COP of the heat pump is 5,6 for heat loss compensation and 4,3 for domestic hot water production. In this case, the annual savings is 120 € for covering only heat losses and 178 € with covering domestic water.

The results of the calculation revealed a significant financial amount saved, on the basis of which it was decided to create a prototype of the control solution. The prototype consists of:

- From the ESP8266 NodeMCU controller
- From the relay
- From the power supply unit
- Transistor RFD14N05
- From the resistor
- From diode P6KE400CA

The prototype is powered by a 230 V network and can switch a load of up to 10 A at a voltage of 250 V. The cost of the components is 9.99 €.

The control algorithm of the prototype is a rule-based algorithm that automatically updates the next day's electricity prices once a day at 14:00 and sorts them in ascending order. Knowing the real time, the controller of the prototype can decide in the current day's sorted electricity price database whether it is necessary to give a signal to start or stop consumption. By conducting tests with the prototype, it was found that the prototype is capable of controlling a load of 1,7 kW and turning off the water boiler during hours of high electricity price. There was not enough opportunity to organize real long-term operational tests due to the operation of the boiler heating system.

The results of the thesis have been achieved and, based on the economic calculation, the payback time of the prototype is less than 20 winter days. The payback period is 18 days when operating an electric water boiler and 10-12 days when operating a heat pump. In the future, the problems related to the heating of the elements of the prototype can be solved and full-fledged load tests can be carried out.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

[1] Abdul Mateen, Muhammad Wasim, Abdul Ahad, Tehreem Ashfaq, Muddesar Iqbal, Amjad Ali. „Smart energy management system for minimizing electricity cost and peak to average ratio in residential areas with hybrid genetic flower pollination algorithm“, [Võrgumaterjal]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016823005288>. [Kasutatud 15.04.2024].

[2] Vilpra. „Mis on soojuspump ja kuidas see toimib?“. [Võrgumaterjal]. URL: <https://www.vilpra.ee/et/page/mis-on-soojuspump-ja-kuidas-see-toimib> . [Kasutatud 24.04.2024].

[3] NIBE ENERGY SYSTEMS. „Kasutusjuhend. Maasoojuspump NIBE S1155/S1255“. [Võrgumaterjal]. URL: https://www.kliimaseade.ee/wp-content/uploads/2020/04/S1155_1255_kasutusjuhend.pdf. [Kasutatud 17.04.2024].

[4] Viessmann. „Electric Boilers – Heating Without Fossil Fuels“. [Võrgumaterjal]. URL: <https://www.viessmann-us.com/en/products/electric-boilers.html#:~:text=Electric%20boilers%20are%20compact%20devices,water%20without%20burning%20fossil%20fuels>. [Kasutatud 20.03.2024].

[5] „Manual OKHE SMART“. [Võrgumaterjal]. URL: <https://www.dzd.cz/en/component/phocadownload/category/106-en-106-okhe-smart?download=1396:manual-okhe-smart> . [Kasutatud 10.04.2024].

[6] CELEON.ee. „KUIDAS TÖÖTAB CELEONI NUTIKAS JUHTIMINE?“. [Võrgumaterjal]. URL: <https://celeon.eu/kuidas-tootab-celeoni-nutikas-juhtimine/>. [Kasutatud 01.04.2024].

[7] E-pood. „celeon.eu“. [Võrgumaterjal]. URL: <https://celeon.eu/shop/>. [Kasutatud 01.04.2024].

[8] Riho Kirss. „KUIDAS ISE VALMISTADA BÖRSIHINDA JÄLGIV KONTROLLER?“. [Võrgumaterjal]. URL: <https://www.itk-ib.ee/kuidas-ise-valmistada-borsihinda-jalgiv-kontroller/>. [Kasutatud 11.04.2024].

[9] ABC kliima e-pood . „Inverteriga ilma veeboilerita mudel: S1156-13 EM INVERTER 13 kW“. [Võrgumaterjal]. URL: <https://www.abckliima.ee/tooted/maasoojuspumbad/1941>. [Kasutatud 18.04.2024].

- [10] K-Rauta e-pood . „Veesoojendi Dražice OKHE 160, 152 l“. [Võrgumaterjal]. URL: https://www.k-rauta.ee/p/veesoojendi-drazice-okhe-160-152-l/f5n8?utm_source=hind.ee&utm_medium=referral. [Kasutatud 18.04.2024].
- [11] K-Rauta e-pood. „Veesoojendi Tesy BiLight 150, 143 l“. [Võrgumaterjal]. URL: <https://www.k-rauta.ee/p/veesoojendi-tesy-bilight-150-143-l/8zqb>. [Kasutatud 18.04.2024].
- [12] KliimaMarket.ee. „Stiebel-Eltron WPE-I 13 H 400 Plus“. [Võrgumaterjal]. URL: <https://kliimamarket.ee/maasoojuspumbad/stiebel-eltron-wpe-i-13-h-400-plus>. [Kasutatud 18.04.2024].
- [13] Vladimir Viies. „Mis on algoritm?“. [Võrgumaterjal]. URL: https://www.tud.ttu.ee/im/Vladimir.Viies/materials/YLDINEkaust/Helena_materjalid/objektid/objekt01/osa04.html. [Kasutatud 24.04.2024].
- [14] Power systems loss. „Load profile shape objectives for demand side management tutorials“. [võrgumaterjal]. URL: <https://powersystemsloss.blogspot.com/2012/02/load-profile-shape-objectives-for.html>. [Kasutatud 07.03.2024].
- [15] Ali M. Jasim, Basil H. Jasim, Bogdan-Constantin Neagu, Bilal Naji Alhasnawi. „Efficient Optimization Algorithm-Based Demand-Side Management Program for Smart Grid Residential Load“. [Võrgumaterjal]. URL: <https://www.mdpi.com/2075-1680/12/1/33>. [Kasutatud 07.03.2024].
- [16] „Demand Side Management“. [Võrgumaterjal]. URL: <https://egyankosh.ac.in/bitstream/123456789/26355/1/Unit-4.pdf>. [Kasutatud 14.04.2024].
- [17] „Load Shifting: What Is It and How Does It Work?“. [Võrgumaterjal]. URL: <https://www.exro.com/industry-insights/load-shifting#:~:text=Load%20shifting%20is%20an%20electricity%20load%20management%20technique%20in%20which, but%20total%20consumption%20remains%20constant>. [Kasutatud 14.04.2024].
- [18] Enefit. „Paindlik energia juhtimine“. [Võrgumaterjal]. URL: <https://www.energia.ee/ari/energiatooted/paindlikenergia>. [Kasutatud 24.04.2024].
- [19] Spencer Fields. „Nimetus“. [Võrgumaterjal]. URL: <https://www.energysage.com/electricity/understanding-time-of-use-rates/>. [Kasutatud 14.04.2024].

- [20] Reda El Makroum, Ahmed Khallaayoun, Rachid Lghoul, Kedar Mehta, Wilfried Zörner. „Home Energy Management System Based on Genetic Algorithm for Load Scheduling: A Case Study Based on Real Life Consumption Data“. [Võrgumaterjal]. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/6/2698#:~:text=The%20system%2C%20based%20on%20the,as%20well%20as%20user%20comfort.> [Kasutatud 14.04.2024].
- [21] Hong-Tzer Yang, Jian-Tang Liao, Che-I Lin. „A load forecasting method for HEMS applications“. [Võrgumaterjal]. URL: [https://ieeexplore.ieee.org/document/6652195/authors#authors.](https://ieeexplore.ieee.org/document/6652195/authors#authors) [Kasutatud 14.04.2024].
- [22] Tomoya Kawakami, Tomoki Yoshihisa, Naotaka Fujita, Masahiko Tsukamoto. „A rule-based Home Energy Management System using the Rete algorithm“. [Võrgumaterjal]. URL: [https://ieeexplore.ieee.org/document/6664785.](https://ieeexplore.ieee.org/document/6664785) [Kasutatud 14.04.2024].
- [23] Andrei Malinin. „Üksielamu Eelprojekt“. [Koostatud 20.05.2019].
- [24] Euroopa Liidu ametlik veebisait. „Mis on energiatõhusus?“. [Võrgumaterjal]. URL: [https://learning-corner.learning.europa.eu/learning-materials/eu-energy-policy/what-energy-efficiency_et.](https://learning-corner.learning.europa.eu/learning-materials/eu-energy-policy/what-energy-efficiency_et) [Kasutatud 01.04.2024].
- [25] Kredex. „Hoonete energiatõhusus“. [Võrgumaterjal]. URL: [https://kredex.ee/sites/default/files/2021-05/Hoonete%20energiat%C3%B5husus%2004.05.2021.pdf.](https://kredex.ee/sites/default/files/2021-05/Hoonete%20energiat%C3%B5husus%2004.05.2021.pdf) [Kasutatud 01.04.2024].
- [26] Olga Prants. „Energiaarvutuse lähteandmete esitamine“. [Koostatud 18.07.2019].
- [27] Olga Prants. „Energiaarvutuste tulemuste esitamine“. [Koostatud 18.07.2019].
- [28] EnergyPro. „CFSR2 Temperature 59_39N 24_95E 2023_1“. Õhutemperatuur. [Kasutatud 08.04.2024].
- [29] Tarbijakaitse ja tehnilise järelevalve amet. „TTJA nõuanded elektri teadlikumaks tarbimiseks“. [Võrgumaterjal]. URL: [https://ttja.ee/uudised/ttja-nouanded-elektri-teadlikumaks-tarbimiseks.](https://ttja.ee/uudised/ttja-nouanded-elektri-teadlikumaks-tarbimiseks) [Kasutatud 28.03.2024].
- [30] Andmeleht. „Thermia Diplomat Inverter“. [Võrgumaterjal]. URL: https://www.tcmadmin.thermia.se/docroot/dokumentbank/Thermia_Inverter_datasheet_EN_10_2019.pdf . [Kasutatud 20.04.2024].

- [31] Elering Live. „Börsihinnad (Eesti ajas, EET/EEST)“. [Võrgumaterjal]. URL: <https://dashboard.elering.ee/et/nps/price?interval=minute&period=search&start=2022-12-31T22:00:00.000Z&end=2023-12-31T21:59:59.000Z&show=table> . [Kasutatud 20.04.2024].
- [32] Elektrilevi. „ Elektrilevi võrguteenuse hinnakiri“. [Võrgumaterjal]. URL: https://elektrilevi.ee/files/el_vorguteenuse_hinnakiri_01.01.2024.pdf . [Kasutatud 20.04.2024].
- [33] Tomisin Olujinmi. „ Raspberry Pi 5 vs. Orange Pi 5“. [Võrgumaterjal]. URL: <https://www.makeuseof.com/raspberry-pi-5-vs-orange-pi-5-sbc-comparison/> . [Kasutatud 20.04.2024].
- [34] Omipood.ee. „ Raspberry PI 5 8GB Model B RPI5-8GB-SINGLE“. [Võrgumaterjal]. URL: https://www.oomipood.ee/ru/product/raspberry_pi_5_8gb_model_b_rpi58gbsingle . [Kasutatud 20.04.2024].
- [35] store.arduino.cc. „ Arduino Uno Rev3“. [Võrgumaterjal]. URL: <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3?queryID=undefined> . [Kasutatud 20.04.2024].
- [36] Aliexpress. „Arduino ESP8266 WIFI moodul“. [Võrgumaterjal]. URL: <https://www.aliexpress.com/w/wholesale-esp8266-wifi-module-for-arduino-ESP-01.html?spm=a2g0o.productlist.search.0> . [Kasutatud 24.04.2024].
- [37] Electronicwings. „ESP8266 WiFi Module Interfacing with Arduino UNO“. [Võrgumaterjal]. URL: <https://www.electronicwings.com/arduino/esp8266-wifi-module-interfacing-with-arduino-uno> . [Kasutatud 20.04.2024].
- [38] Aliexpress. „ESP8266 NodeMCU“. [Võrgumaterjal]. URL: <https://www.aliexpress.com/w/wholesale-esp8266-nodemcu.html?spm=a2g0o.productlist.search.0> . [Kasutatud 24.04.2024].
- [39] components101.com. „NodeMCU ESP8266“. [Võrgumaterjal]. URL: <https://components101.com/development-boards/nodemcu-esp8266-pinout-features-and-datasheet> . [Kasutatud 20.04.2024].
- [40] Jharwin Barrozo. „ESP8266 Pinout“. [Võrgumaterjal]. URL: <https://www.flux.ai/p/blog/esp8266-pinout-everything-you-need-to-know#:~:text=Maximum%20Current%20Output%3A%20The%20ESP8266,connections%20accordingly%20to%20avoid%20overloading.> . [Kasutatud 20.04.2024].

- [41] Flinder relee andmeleht. „ Flinder 40 series“. [Võrgumaterjal]. URL: <https://www.lemona.lt/Files/Instrukcijas/Pdf/40.31.8.230.0000.pdf> . [Kasutatud 20.04.2024].
- [42] Aliexpress. „AC-DC converter 12V“. [Võrgumaterjal]. URL: https://www.aliexpress.com/item/4000837048338.html?spm=a2g0o.order_list.order_list_main.15.7e3318023yFiSL . [Kasutatud 15.04.2024].
- [43] Aliexpress tellimus. „ESP8266 NodeMCU “. [PDF materjal]. [Kasutatud 18.01.2023].
- [44] Lemona elektroonika. „12V Relee“. [Võrgumaterjal]. URL: <https://www.lemona.ee/relee-12vdc-1co-16a-agsno2.html> . [Kasutatud 20.04.2024].
- [45] Aliexpress tellimus. „AC-DC converter 12V“. [PDF materjal]. [Kasutatud 11.11.2023].
- [46] Lemona elektroonika tellimus. „ Tellimus nr 700000XXXX“. [PDF materjal]. [Kasutatud 05.05.2022].
- [47] Lemona elektroonika. „Diod BY255G-YAN “. [Võrgumaterjal]. URL: <https://www.lemona.ee/tht-universal-diodes-by255g-yan.html> . [Kasutatud 20.04.2024].
- [48] Lemona elektroonika. „Takisti 1W 1K0 5% “. [Võrgumaterjal]. URL: <https://www.lemona.ee/takisti-1w-1k0-5.html> . [Kasutatud].
- [49] Depo online. „Ühilduv ristkülikukujuline harukarp“. [Võrgumaterjal]. URL: <https://online.depo-diy.ee/product/34096> . [Kasutatud 15.04.2024].
- [50] Depo online. „ Klemmliist 6mm“. [Võrgumaterjal]. URL: <https://online.depo-diy.ee/product/379405> . [Kasutatud 15.04.2024].
- [51] Nord Pool. „Day-ahead market“. [Võrgumaterjal]. URL: <https://www.nordpoolgroup.com/en/the-power-market/Day-ahead-market/#:~:text=Hourly%20clearing%20prices%20are%20typically,to%20each%20buyer%20and%20seller>. [Kasutatud 15.04.2024].
- [52] SilmBooks. „Mis on API ja kuidas see toimib?“. [Võrgumaterjal]. URL: <https://support.simplbooks.ee/kasutusjuhendid/mis-on-api-ja-kuidas-see-toimib/> . [Kasutatud 24.04.2024].

[53] Elering dashboard API. „NPS-controller“. [Võrgumaterjal]. URL: <https://dashboard.elering.ee/assets/api-doc.html#/nps-controller/getPriceUsingGET> . [Kasutatud 20.04.2024].