



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
ELEKTROENERGEETIKA INSTITUUT

Börsihinna põhine elektrienergiatarbe juhtimise analüüs koduste tarbijate näitel

Elektroenergeetika õppekava

Kõrgepingetehnika õppetool

Magistritöö

Õppetooli juhataja

prof Ivo Palu

Juhendaja

vanemteadur Paul Taklaja

Konsultant

Tambet Liiv

Lõpetaja

Martin Koppel

Tallinn 2016

Autorideklaratsioon

Deklareerin, et käesolev lõputöö, mis on minu iseseisva töö tulemus, on esitatud Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika instituudile haridusastme lõpudiplomi taotlemiseks elektroenergeetika erialal. Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Lõpetaja (allkiri ja kuupäev) _____

Lõputöö kokkuvõte

<i>Autor:</i> Martin Koppel	<i>Lõputöö liik:</i> Magistritöö
<i>Töö pealkiri:</i> Börsihinna põhine elektrienergiatarbe juhtimise analüüs koduste tarbijate näitel	
<i>Kuupäev:</i> 22.05.2016	61 lk
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool <i>Teaduskond:</i> Energeetikateaduskond <i>Instituut:</i> Elektroenergeetika instituut <i>Õppetool:</i> Kõrgepingetehnika õppetool	
<i>Töö juhendaja(d):</i> vanemteadur Paul Taklaja <i>Töö konsultant (konsultandid):</i> Tambet Liiv	
<i>Sisu kirjeldus:</i> Töö eesmärgiks on koostada börsihinna põhine elektrienergiatarbe juhtimise süsteem, et katsetada seda kodumajapidamises laialt levinud tarbijatega nagu elektriboiler ja elektriline põrandaküte ning analüüsida saadud tulemusi. Töö on jaotatud seitsmeks osaks. Esimeses ja teises osas tutvustatakse elektriturgu, kirjeldatakse elektrihindade kujunemist ja nende mõjureid. Kolmandas osas kirjeldatakse tarbimise juhtimise meetmeid üleüldiselt ja ka töös kasutatud juhtimisloogikat. Töö neljandas osas kirjeldatakse juhtimiseadeldise ehitust ja komponente. Viiendas osas selgitatakse lahti PHP koodi osad, mis seadeldise tööd juhivad. Kuuendas osas antakse ülevaade tarbijatega tehtud katsete tulemustest. Töö järeldused tuuakse välja seitsmendas osas. Järeldustes selgub, et elektriboileri hinnapõhise juhtimisega kallines tarbitud elektri kogumaksumus 5,598% ja põrandakütteil tekkis kokkuhoid 3,803%.	
<i>Märksõnad:</i> elektriturg, elektrienergia hind, energia tarbimise juhtimine, juhtseadeldis, programmeerimine, säästmine	

Summary of the Diploma Work

<i>Author:</i> Martin Koppel	<i>Kind of the work:</i> Master thesis
<i>Title:</i> Analysis of market price based energy demand management using domestic consumers	
<i>Date:</i> 22.05.2016	61 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>Faculty:</i> Faculty of Power Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering	
<i>Chair:</i> High Voltage Engineering	
<i>Tutor(s) of the work:</i> Paul Taklaja	
<i>Consultant(s):</i> Tambet Liiv	
<i>Abstract:</i> The aim of this thesis is to create automatic system of market price based demand management to test it on widespread consumers like electric water heater and underfloor heating and to analyse the results. The main part of the thesis consists of six chapters. Electricity market and formation of electricity prices are described in chapter one and two. The third chapter describes measures of consumption management used in thesis and also in general. The fourth chapter describes the design of the control device and its components. PHP code that controls the device is explained in fifth chapter. The sixth chapter gives an overview of the tests carried out in this current thesis. Conclusions are in seventh chapter. The conclusions reveal that the price of electricity consumed by electric water heater is 5,598% more expensive then without price based demand management. The price of electricity consumed by underfloor heating is 3,803% cheaper using price based demand management.	
<i>Key words:</i> electricity market, the price of electricity, energy demand management, control device, programming, saving	

Sisukord

Lõputöö ülesanne.....	7
Eessõna	9
Sissejuhatus.....	10
1. Elektriturg.....	12
1.1 Elspot.....	13
1.2 Elbas	14
2. Elektri hind	15
2.1 Elektrienergia hinna mõjutegurid	18
3. Tarbimise juhtimine.....	20
3.1 Elektriboileri juhtimine.....	22
3.2 Põrandakütte juhtimine.....	22
4. Juhtseadeldis.....	23
4.1 Raspberry Pi 2 mudel B.....	24
4.2 Relee	25
4.3 Temperatuuri andur	25
5. Programmeerimine	26
6. Tulemused	29
6.1 Elektriboiler	30
6.1.1 Katse 1.....	30
6.1.2 Katse 2.....	32
6.1.3 Katse 3.....	34
6.2 Põrandaküte	36
6.2.1 Katse 1.....	36
6.2.2 Katse 2.....	38
6.2.3 Katse 3.....	40
7. Järeldused	43

7.1	Tarbimine.....	43
7.2	Elektrienergia maksumus	44
7.3	Elektri kogumaksumus	47
7.4	Puudused ja võimalused	49
7.4.1	Elektri maksumus	49
7.4.2	Juhtimisloogika	50
	Lõputöö kokkuvõte	51
	Kirjandus	55
	Lisad	57
L.1.	Töös kasutatud PHP kood	58
L.2.	Töös kasutatud elektrienergia hinnad.....	61

Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema:	Börsihinna põhine elektrienergiatarbe juhtimise analüüs koduste tarbijate näitel
Üliõpilane:	Martin Koppel, 132434
Lõputöö juhendaja:	Paul Taklaja
Õppetool:	Kõrgepingetehnika
Õppetooli juhataja:	Ivo Palu
Lõputöö esitamise tähtaeg:	27.05.2016

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppetooli juhataja (allkiri)

Teema põhjendus:

Energiasäästlikkus on muutumas aina tähtsamaks teemaks tänapäeva ühiskonnas. Elektrienergia börsihinnad võivad erineda ööpäeva jooksul mitmekordselt, samuti on pidevas muutumises ka elektrienergia üleüldine tarbimine, mis on probleemiks nii elektrienergia tootjatele kui ka tarbijatele. Antud lõputöö annab ülevaate autori valmistatud juhtseadeldisest ja püüab anda hinnangut börsihinna põhise elektrienergiatarbimise juhtimise otstarbekusele kodumaja-pidamises.

Töö eesmärk:

Töö eesmärgiks on koostada börsihinna põhine elektrienergiatarbe juhtimise süsteem, et katsetada seda elektriboileri ja elektrilise põrandaküttega ning analüüsida saadud tulemusi.

Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

1. Kas on võimalik säästa?
2. Kui palju on võimalik säästa?
3. Kuidas on tarbimist otstarbekas juhtida?

Lähteandmed:

Lähteandmeteks on elektrienergia börsihinnad ja katsete tulemused.

Lõputöö konsultandid:

Tambet Liiv (allkiri, kuupäev)

Eessõna

Käesoleva töö algidee tekkis töö autoril, kui tõusis päevakorda üleminek börsihinnapõhisele elektripaketile autori elukohas. Kuna rahalise säästu saavutamine on aktuaalne igal ajal ja igas valdkonnas, otsustati leida ka säästmisvõimalusi elektri maksumuse arvelt. Kõik töös sisalduvad katsed ja andmete kogumised toimusid autori alalises elukohas Lindamäe talus, Kärbu külas, Audru vallas, Pärnumaal.

Sissejuhatus

Eestis on alates 2013. aastast elektriturgu täielikult avatud kuuludes Nord Pool Spoti kauplemisspiirkonda. Sellest ajast alates saavad kõik tavatarbijad osta elektrienergiat börsihinnast sõltuva paketi. 2017. aastaks peavad võrguettevõtjad tulenevalt elektrituruseadusest panema kõikidele tarbijatele kaugloetavad arvestid. See annab kõigile võimaluse tarbimist vastavalt elektrienergia hindadele optimeerida. Kuna rahaline kokkuhoid on igas valdkonnas alati aktuaalne on ka energia tarbimise juhtimine säästmise eesmärgil üha rohkem päevakorras.

2014. aastal Tallinna Tehnikaülikooli ja Eleringi koostöös valminud teadusuuringu „Tarbimise juhtimine – suurtarbijate koormusgraafikute salvestamine ning analüüs tarbimise juhtimise rakendamise võimaluste tuvastamiseks“ lõpparuannet, mida ka käesolevas töös on kasutatud, võib lugeda selle heaks näiteks.

Käesolev töö on vastupidiselt eespool mainitud teadusuuringule keskendunud elektrienergia tarbimise juhtimisele kodumajapidamise, mida näitab ka töö eesmärk - koostada börsihinna põhine elektrienergiatarbe juhtimise süsteem, et katsetada seda kodumajapidamises laialt levinud tarbijatega nagu elektriboiler ja elektriline pörandaküte ning analüüsida saadud tulemusi. Analüüsi eesmärgiks on määrata tekkinud rahaline kokkuhoid ja leida võimalusi sobivaima juhtimisloogika koostamiseks kodustele tarbijatele, et ei tekiks kadusid seadmete kasutusmugavuses ja saavutataks maksimaalne kokkuhoid.

Analüüsiks vajalike andmete saamiseks ehitatakse seadeldis, mille jaoks kirjutatakse PHP kood, mis sisaldab vajalikku juhtimisloogikat. Seadeldis peab hankima Nord Pool Spoti koduleheküljelt Eesti hinnapiirkonna tunnipõhised elektrienergia hinnad, mõõtma juhtimiseks vajalikud temperatuurid ja vastavalt juhtimisloogikale lülitama relee abil tarbijaid sisse või välja. Andmed vajaliku informatsiooniga hangitakse iga minuti aja tagant.

Iga tarbijaga tehakse neli katset, millest kolm on hinnapõhise juhtimisega ja üks ilma, et tekkiks võrdlusmoment. Võrreldakse tarbitud elektrienergia kogust ja aega, elektrienergia maksumust ning elektrienergia kogumaksumust.

Töö ise on jaotatud seitsmeks osaks. Esimeses osas tutvustatakse elektriturgu ja selle ajalugu. Teises osas keskendutakse elektrihindadele. Kirjeldatakse nende kujunemist ja hindade

mõjutegureid. Kolmandas osas kirjeldatakse erinevaid tarbimise juhtimise meetmeid ja tutvustatakse töös kasutatud hinnapõhise tarbimise juhtimise loogikat. Lisaks antakse ülevaade töös kasutatud elektritarbijatest. Töö neljandas osas kirjeldatakse juhtimisseadeldist ning selle komponente ja nende omadusi. Viiendas osas tegeletakse juhtseadeldise programmeerimisega. Tuuakse välja PHP koodi tähtsamad osad ja selgitatakse kuidas need töötavad. Kuuendas osas antakse ülevaade tarbijatega tehtud katsete tulemustest. Tulemused tuuakse välja iga katse lõikes. Töö järeldused esitatakse seitsmendas osas, kus selgub elektrienergia maksumuselt saavutatud rahaline kokkuhoid ja võimalused juhtimissüsteemi täiustamiseks.

1. Elektriturg

Eesti kuulub Nord Pool Spot (NPS) elektrituru kauplemisspiirkonda. Lisaks Eestile kuuluvad Nord Pool Spoti kauplemisspiirkonda ka Norra, Rootsi, Soome, Taani, Läti ja Leedu. Nord Pool Spotis määratakse elektri hind eraldi igaks tunniks ja iga piirkonna jaoks eraldi. Igas riigis on vähemalt üks hinnapiirkond, suurema pindalaga riikides, kus esineb ka riigisisest elektri ülekandevõrgust olulisi pudelikaelu, võib neid olla ka mitu. Eesti koosneb ühest terviklikust hinnapiirkonnast. Kogu Nord Pool Spoti süsteem hinnapiirkondadeks jaotatuna on kujutatud joonisel 1.1 [1].



Joonis 1.1. Nord Pool Spot kauplemisspiirkond ja kõik hinnapiirkonnad [1]

Joonisel on näha, et Norra koosneb viiest hinnapiirkonnast, Rootsi neljast, Taani kahest ja Soome, Eesti, Läti ning Leedu ühest hinnapiirkonnast.

Ülevaade sündmustes Nord Pool Spoti ajaloost on esitatud kronoloogilises järjekorras:

- Norra on esimene riik Põhjamaades, kus elektriturg 1991. aastal parlamendi otsusega ümber korraldati. Statnett Market AS asutati Norra ettevõttena 1993. aastal;
- 1996. aastal liitus Norra turupiiranguga ka Rootsi piirkond. Börsiettevõtte sai uue nime Nord Pool ASA;
- 1999. aastal alustas tegevust Elbas-turg. Tänapäevaks selle liikmed Soome, Rootsi, Ida- ja Lääne-Taani, Norra, Eesti, laiendatud on ka Saksamaale. Eesti liitus Elbas-turuplatvormiga 2010. aasta oktoobris;
- 2002. aastal alustas Nord Pool Spot AS eraldi ettevõttena, mille omanikeringi kuuluvad Põhjamaade süsteemihaldurid ja Nord Pool ASA;
- 2005. aastal avati KONTEK'i hinnapiirkond Saksamaal;
- 2010. aastal avati koos NASDAQ OMX Commodities'iga turukoht N2EX Inglismaal;
- 2010. aastal avati hinnapiirkond Eestis;
- 2012. aastal avati hinnapiirkond Leedus;
- 2012. aastal liitusid Nord Pool Spoti omanikeringiga ka Baltimaade süsteemihaldurid, sealhulgas ka Elering [1].

1.1 Elspot

Elspot on päev ette turg, kus määratakse elektri turuhind ning kauplemiskogused. Iga päev kella 12.00 CET on tähtaeg turupakkumiste tegemiseks järgmise ööpäeva elektri turutehingute jaoks. Selleks ajaks teevad nii elektrit turule müüvad osapooled kui ka elektrit turult ostvad osapooled kõik oma pakkumised. Pakkumised tehakse eraldi iga täistunni jaoks ja seega koosneb ööpäev 24 tükist, kus igal tunnil määratakse eraldi elektri turuhind vastavalt pakkumistele sellel tunnil [1].

Kõik pakkumised edastatakse Nord Pool Spoti serverisse, kus elektrienergia hind tuvastatakse iga ajaperioodi jaoks ja iga hinnapiirkonna jaoks eraldi. Hinna määramine toimub elektri nõudluse ja pakkumise tasakaalupunkti leidmise põhimõttel, kuid hinna tuvastamise algoritm peab veel lisaks arvestama paljusid nüansse, näiteks elektrienergia liikumist hinnapiirkondade vahel [1].

Vastavalt kauplemispakkumistele leitud elektrienergia hind avalikustatakse Nord Pool Spoti kodulehel hiljemalt kella 13-ks CET. Tehtud turupakkumised, mis pääsesid turule (näiteks elektri müügipakkumine, mille pakutud hind oli madalam kui kujunenud turuhind), realiseeruvad järgmise ööpäeva jooksul. Kõik elektriturule pääsenud müüjad saavad ning ostjad peavad maksma selgitatud turuhinda [1].

Kui pakkumise teinud ja turule pääsenud kaupleja leiab pärast hinna selgumist, et ta ei suuda turule anda energiat või tarbida vastavalt oma pakkumisele, on tal võimalus teha paranduspakkumisi päevasisesel turul Elbas [1].

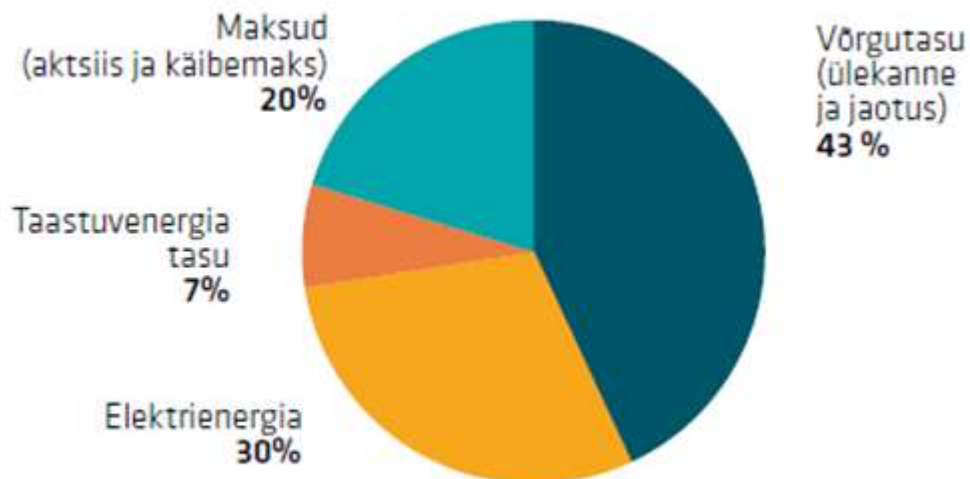
1.2 Elbas

Enamus elektriturul toimuvat kauplemist toimub Elspot päev-ette turul. Samas on tihti vaja korrigeerida oma pakkumisi pärast Elspot turuhinna selgumist. Selline vajadus võib tulla mõne elektriijaama ootamatust rikkest või tuuleenergia varasemalt täpsemast tootmisprognoosist. Kui kaupleja on juba teinud päev-ette turul pakkumise, kuid osutub vajalikuks teha korrigeerivaid pakkumisi, on seda võimalik teha Elbas turul [1].

Elbas toimib sarnaselt Elspotile, kus kogutakse igaks tunniseks perioodiks reguleeritavad pakkumised ning selgitatakse neile vastavalt Elbas hind. Elbasi reguleerimisturule saab kindla ajaperioodi jaoks pakkumisi teha alates hetkest, kui Elspot turul on selgunud elektri hind selleks ajaperioodiks kuni üks tund enne seda ajaperioodi [1].

2. Elektri hind

Elektriteenuse kogumaksumuse puhul on oluline eristada selle erinevaid komponente (joonis 2.1). Lisaks elektrienergia enda hinnale sisaldab elektriarve ka võrgutasu, elektriaktsiisi, taastuenergia tasu ning käibemaksu. Võrgutasu, mille kooskõlastab Konkurentsiamet, moodustab tüüpilise kodutarbija elektriarvest ligikaudu 40%, kulud elektrienergiale moodustavad arvest umbes viiendiku. Võrgutasu ja elektrienergia osakaal konkreetse kliendi puhul sõltub sellest, millise võrguteenuse pakkuja võrgupiirkonnas klient asub ja millise paketi on ta võrguteenuse ja elektrienergia tarbimiseks valinud. Lisaks moodustavad suure osa elektriarvest taastuenergia tasu ning elektriaktsiis, mille suurust aga turu avanemine ei mõjuta [2].



Joonis 2.1. Elektriarve komponendid väiketarbija näitel [2]

Tavatarbijal on võimalik osta elektrienergiat kolmes variandis:

- börsihinnast sõltuva paketiga;
- fikseeritud hindadega paketiga;
- üldteenuse korras, kui müüjat ei valita [2].

Börsihinnast sõltuvat paketti saab valida, kui tarbijal on kaugloetav arvesti. 2017. aastaks peavad võrguettevõtjad paigaldama kõikidele tarbijatele kaugloetavad arvestid [2].

Just börsihinnast sõltuvat paketti kasutades püütakse käesolevas töös selgitada kas ja kui palju on võimalik päevast elektri hinna kõikumist majanduslikult ära kasutada. Kuna elektri

kogumaksumus sõltub paljudest komponentidest, mõjutab tarbimise hinnapõhine juhtimine kogumaksumust kõige enam just siis, kui elektrienergia hinnad on kõrgemad, ehk elektrienergia osatähtsus kogumaksumuse suhtes on suurem. Veel suuremat rolli mängib maksimaalne päevane elektrienergia turuhinna vahe. Mida suurem on vahe, seda rohkem tekib säästu elektrienergia maksumuse arvelt. 2015. aasta keskmine maksimaalne päevane elektrienergia turuhinna vahe on 31,70 EUR/MWh [3]. Tabelis 2.1 on välja toodud 2015. aasta elektrienergia keskmised hinnad ja keskmised maksimaalsed päevased turuhinna vahed kuude lõikes.

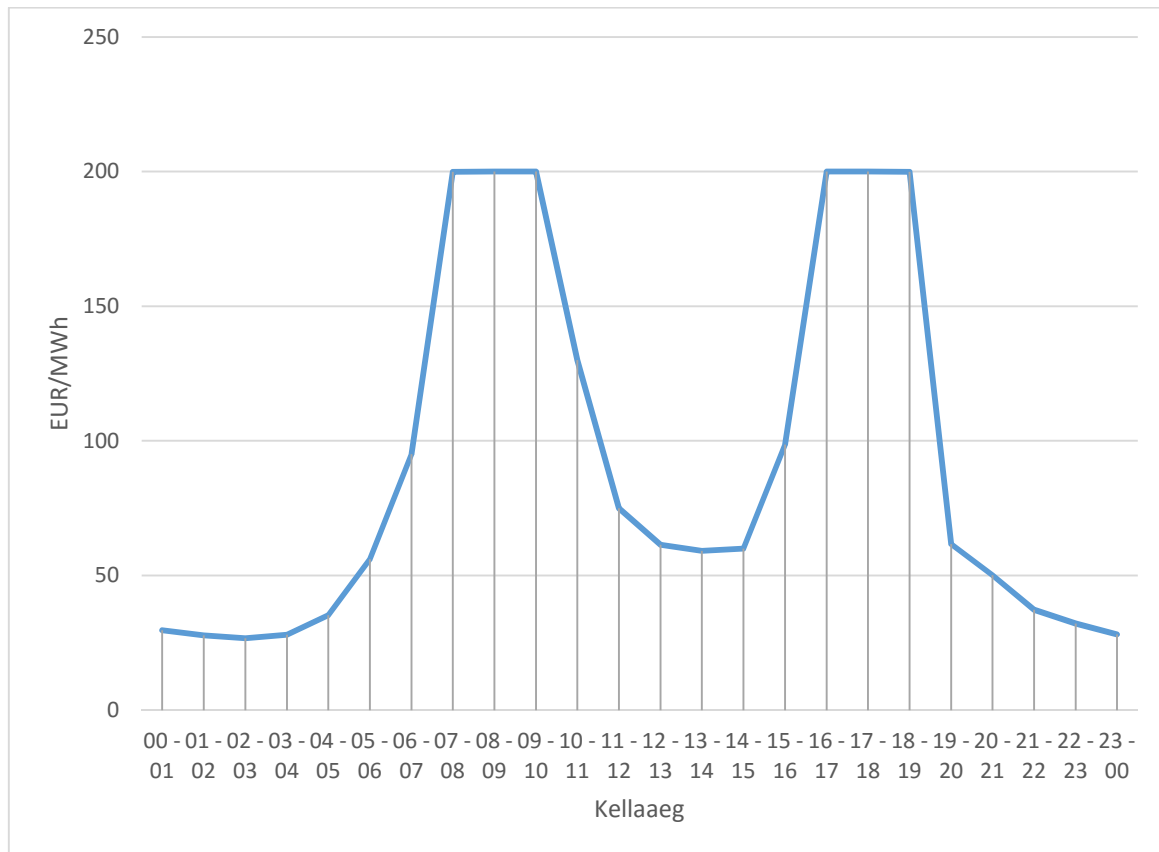
Tabel 2.1. 2015. aasta keskmised elektrienergia hinnad ja maksimaalsed päevased turuhinna vahed kuude lõikes EUR/MWh [3]

2015	Keskmine hind	Keskmine maksimaalne päevane turuhinna vahe
Jaanuar	33,84	19,12
Veebruar	33,42	22,40
Märts	30,31	18,38
Aprill	30,5	21,34
Mai	32,3	27,15
Juuni	27,26	44,26
Juuli	28,06	43,44
August	31,2	41,44
September	31,7	38,55
Oktoober	34,97	41,88
November	32,88	31,46
Detsember	26,72	29,83

Tabelis olevate keskmiste maksimaalsete päevaste turuhindade vahe leidmiseks on arvutatud 2015. aasta iga päeva miinimumide ja maksimumide vahe ning leitud aritmeetiline keskmine

iga kuu lõikes. Selgus, et 2015. aastal oli suurim keskmine vahe päevaste hindade vahel suvekuudel küündides juunikuus 44,26 euronit megavatt-tunni kohta.

Elektrihinna päevast kõikumist iseloomustab joonis 2.2, millel kajastuvad 2016. aasta 21. jaanuari hinnad.



Joonis 2.2. Eesti hinnapiirkonna elektrienergia hinnad 21. jaanuaril 2016 [3]

Jooniselt võib näha, et elektrienergia hind muutus 21. jaanuaril päeva jooksul rohkem kui seitsmekordselt. Madalaim hind 26,65 EUR/MWh oli öösel kella kahest kuni kolmeni ja kõige kõrgem hind 200,06 EUR/MWh oli hommikul kella kahest üheksani [3].

Antud päev on valitud, et näidata kui palju võib hind kõikuda ekstreemsetes olukordades. 21. jaanuari elektribörsi hindu dikteeris Soome defitsiit. Sinna imporditi elektrit nii Põhjamaadest, Eestist kui ka Lätist. Elektrinõudlus kasvas ja Soomes oli 200 MW tootmisvõimsusi avarii tõttu tööst väljas, mistõttu olid turul konkurentsivõimelisemad kallima marginaalkuluga turule pakkumisi tegevad elektrijaamad [4].

2.1 Elektrienergia hinna mõjutegurid

Peamisteks elektrienergia hinna mõjuteguriks võib lugeda tootmisvõimsuse koosseisu, mis tagab tarbijatele elektri igal ajahetkel. Elektrienergia liikumise tagamiseks nii riigisiselt kui ka naaberriikidega, on vaja ülekandevõimsusi, mis aitavadki kujundada ühtset Euroopa elektrienergia turgu. Kõige olulistemaks teguriteks Eesti elektrienergia hinna kujunemisel võib pidada ülekandevõimsuseid, lisanduvaid tootmisvõimsuseid regioonis, kliima ning sealhulgas hüdroenergia taset Põhjamaades ja Lätis ning primaarkütuste hindasid koos CO₂ hindadega [2].

Eestil on praegusel hetkel olemas elektriühendused nii Soome, Venemaa kui ka Lätiga. Mida rohkem on ülekandevõimsuseid, seda suuremaks muutub konkurents ning selliselt on tarbijatele tagatud parim elektri hind. Tugevam ühendus Põhjamaadega ning erinevate elektrienergia tootmisviiside kasutamine toob kaasa ka ühtlasema hinnataseme erinevate piirkondade vahel [2].

Tootmisvõimsuste lisamine suurendab pakkujate arvu ja kogupakkumust ning tekitab konkurentsi, mis omakorda „surub“ elektri hinda madalamaks. See omakorda muudab aga uute jaamade investeringu tasuvust ning vähendab uute lisanduvate tootmisvõimsuste tulekut turule, kuni nõudlus hakkab hinda taas tõstma ehk tegemist on tavalise loomuliku pakkumise ja nõudluse suhtega. Tähtis on tõdeda, et erinevad toetus-skeemid tootjatele, nagu näiteks taastuvenergia toetus, võivad pakkumuse ja nõudluse suhet moonutada, mis omakorda pärsib õigete hinnasignaali teket [2].

Järgmiseks suureks elektrienergia hinna mõjutajaks on kliima. Kliima mõjutab elektrienergia hinda eelkõige läbi sellest tingitud nõudluse suurenemise või vähenemise tõttu. Põhjamaades on tarbimine suurem just külmemate temperatuuride korral, sest siis kasutatakse suurt osa elektrienergiast kütmise peale. Lõunapoolsetes piirkondades on jällegi vastupidi. Seal kõrgemate temperatuuride tõttu elektrienergia tarbimine kasvab, kuna energia kulub hoonete jahutamiseks [2].

Kliima mõjutab elektritootmist ka taastuvenergia tootmisseedmete kaudu nagu näiteks päikesepaneelide, tuulikute ja hüdroelektrijaamade. Nagu teada on hüdroenergia kõige odavam elektrienergia ning seda on Põhjamaade – Balti regioonis saadaval suurel hulgal. Seetõttu on see meie regioonis elektrienergia hinna tugev mõjutaja [2].

Primaarkütuse hindade seos elektrienergia hindadega on kergesti arusaadav, sest nagu iga toodangu puhul, nii ka elektrienergia puhul sõltub lõpptoodangu hind tooraine hinnast. On ka oluline rõhutada, et osade primaarkütuste puhul on elektrienergia tootjad lisaks kütuse hinnale kohustatud maksma ka täiendavaid tasusid nagu näiteks heitmete tasu [2].

3. Tarbimise juhtimine

Tarbimise juhtimise meetmed on sõltuvalt kestusest jagatud kahte kategooriasse: staatiliseks ja dünaamiliseks, kokkuvõtte meetmete jagunemisest on esitatud joonisel 3.1 [5].

Liik ja kestus	Staatiline (pikaajaline)		Dünaamiline (lühiajaline)	
Süsteemi-ülene mõju	Suurendab energiatõhusust ja annab mõningast energiasäästu		Tõhustab turumehhanisme ja süsteemi juhtimist. Suurendab mõningal määral energiatõhusust ja annab mõningast energiasäästu	
Tarbija tegutsemine	Passiivne (seadusandlus või kolmas osapool)	Aktiivne (tarbija valikud)	Passiivne (automaatne/lepingud)	Aktiivne (tarbija tegutsemine)
Tarbimise juhtimise tegevus või seostatud terminoloogia	Energiatõhusus (seadusandlus)	Energiatõhusus (tarbija palgaldab / ostab energia-tõhusamaid tehnoloogiaid)	Tarbimise juhtimine	Tarbijapoolne osalemine
	Energiasääst (seadusandlus)	Energiasääst (tarbija piirab energia tarbimist)	Tarbimise muutmise (tellitakse süsteemihalduri poolt)	Tarbimise muutmise (toimub hinnasignaalide alusel)
	Ressursside integreeritud planeerimine		Tarbimise reguleerimine	Reaalajatariif
	Rohelised riigihanked (energiatõhusus)			Elektritariifid
			Tiputariifid	
Näited	Seadmete energiatõhususe standardid	Soojustamine	Väljalülitavate koormuste kasutamine reservõimsusteks	Koormuste nihutamine vastavalt hinna indikatsioonidele
Nõutud tarbija osalemise tase	Madal/Keskmine	Keskmine	Keskmine/Kõrge	Kõrge
	Üldiselt juhitakse tarbijate osalemist, kas seadusandluse või kolmandate isikute poolt	Tarbija teeb aegajalt või üksikuid otsuseid, mis pikema aja jooksul annavad energiasäästu	Tarbijate koormust juhitakse kolmandate isikute poolt: tellitud või etteteatatud muudatused teenustes	Tarbija teeb regulaarselt tarbimist mõjutavaid otsuseid, mis juhinduvad hinna- ja võrguolukorra signaalidest

Joonis 3.1. Ülevaade tarbimise juhtimisest ja selle mõjudest elektrisüsteemis [5]

Staatilise tarbimise juhtimise mõjud avalduvad pikema aja jooksul ja on seotud energiasäästuga. Staatiline juhtimine on kasulik eelkõige nendes sektorites, kus energiatõhusus pakub märkimisväärset kokkuhoidu (tegevus)kuludelt, s.o kodumajapidamistes ning äri- ja avaliku teeninduse sektoris [5].

Dünaamiline tarbimise juhtimine on seevastu seotud lühiajaliste tegevustega, mille eesmärgiks on pakkuda teenuseid elektriturule ja -süsteemile. Sellise tarbimise reguleerimise mõjud on

lühiajalised ja nendega ei kaasne ka märkimisväärsed energiasäästu. Dünaamiliste meetmetega tarbimise juhtimist suudavad pakkuda ainult suured ühiktarbijad nagu näiteks tööstused või koondatud võimsustega tarbijate grupid, kes on üheaegselt ja tsentraalselt juhitavad. See kõik aga ei välista ka nende teenuste laiendamist näiteks kodumajapidamistele ning äri- ja avaliku teeninduse sektorile. Lisaks jaguneb nii staatiline kui ka dünaamiline tarbimise juhtimine omakorda aktiivseks ja passiivseks. Jaotus sõltub sellest, kui tihedalt ja mil moel on need seotud tarbijaga [5].

Nagu juba eelmises jaotises mainiti, siis fikseeritud hindadega paketti kasutades ei ole tarbimise juhtimiseks vajadust ega majanduslikku põhjendust. Seega, kui lähtuda tegelikest elektrienergia hindadest avatud elektrituru tingimustes, kus tunni hind muutub ööpäeva lõikes märgatavalt ja arvestades ka võrguettevõtete ajatariife, siis muutub tarbimise optimeerimine tasuvaks [5].

Hinnapõhise juhtimise mudeleid leidub mitmeid. Sõltuvalt parameetrite häälestamisest, juhtimismudeli valikust, reaktsiooniajast ja muudest parameetritest võib saavutada kulu- ja energiatõhususe osas erinevaid tulemusi. Ühe võimalusena, kontrollitakse hinnapõhise temperatuuri juhtimise korral, kas hinna väärtus on võrdne jooksva keskmise hinnaga või mitte. Juhul kui väärtused on võrdsed, siis juhtimist ei toimu. Kui ei ole võrdsed, arvutatakse hetke hinna, jooksva keskmise hinna ja temperatuuri seadeparameetrite piirväärtuste alusel uus temperatuuri seadeväärtus. Näiteks, sõltuvalt sesoonsusest, vähendatakse hinna tõustes kütte või jahutuse intensiivsust ning suurendatakse hinna langedes [5].

Ventilatsiooni ja jahutamise hinnapõhise juhtimise loogika seisneb selles, et kõrgema hinna korral vähendatakse puhutava õhu hulka ruumidesse või lubatakse jahutatavatel seadmetel töötada kõrgemal temperatuuril. Näiteks reguleeritakse ruumides temperatuuri vahemikus 18...24 °C ning veeboilerite puhul reguleeritakse temperatuuri vahemikus 50...65 °C [5].

Jahutamisega sarnast juhtimise loogikat saab rakendada ka reguleeritava heledusega valgustite või ventilatsioonisüsteemi koormuse juhtimiseks. Esimese variandi puhul vähendatakse valgustite heledust lubatud vahemikus proportsionaalselt elektri hinna tõusuga. Kuna elektri turuhinda muudetakse iga tunni tagant, siis on selline juhtimise kasutamine täiesti mõeldav. Valgustuse puhul võib kasutada ka keskmise hinna järgi juhtimist, mille puhul on valgustitele määratud vaid kaks heleduse astet „hele“ ja „hämar“. Kui hind ületab keskmist hinda, siis määratakse valgusti heledusastmeks „hämar“ ning vastupidises olukorras määratakse „hele“. Kõige lihtsam valgustuse hinnapõhine juhtimine võib toimuda selliselt, et katkestatakse teatud

osakaalus vähetähtsate seadmete ja valgustite toide. Viimast on mõistlik kombineerida koos kellaajalise juhtimisloogikaga [5].

Käesolevas töös kasutatav hinnapõhine juhtimise mudel põhineb mediaanhinnal. See tähendab, et valitakse välja ööpäevastest elektrienergia hindadest 12 madalaimat, mille korral toimub juhtimine. Kui antud ajahetkel on elektrienergia hind mediaanväärtusest kõrgem, siis juhtimist ei toimu.

3.1 Elektriboileri juhtimine

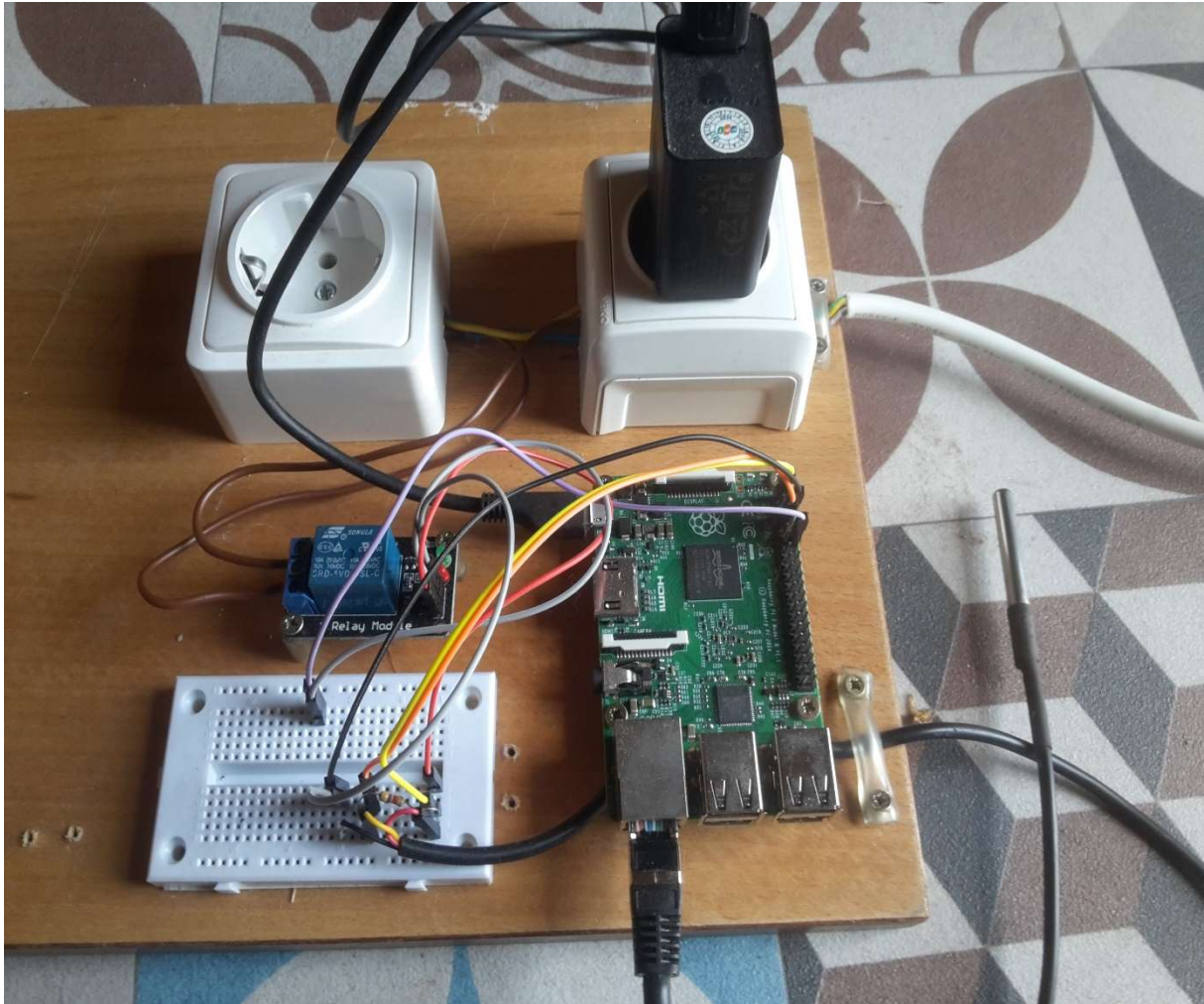
Töö jaoks tehtud katsetes on kasutatud 25 liitrise mahuga elektriboilerit võimsusega 1200 W. Elamutes kulub sooja vett temperatuuriga 45 °C inimese kohta keskmiselt 30 liitrit ööpäevas, mille soojendamiseks on vaja keskmiselt 1,2 kWh soojusenergiat [6]. Sellest tulenevalt on katsete ühesugusteks mõõtmistingimusteks valitud pidev voolukiirus läbi termostaat seguventiili 30 liitrit ööpäevas. Seguventiil on seatud temperatuurile 45 °C. Tarbimise juhtimiseks on kasutatud temperatuurivahemikku 55...70 °C. See tähendab, et elektrihindade puhul, mis on madalamad kui ööpäevane mediaanhind, soojendatakse vett temperatuurini 70 °C ja kõrgemate hindade puhul lubatakse temperatuuril langeda 55 °C.

3.2 Põrandakütte juhtimine

Põrandakütte juhtimiseks on kasutatud 3 m² suuruse põrandapindalaga tualettruumi, mille põrandasse on paigaldatud küttekabel võimsusega 250 W. Tarbimise juhtimiseks on kasutatud põranda temperatuurivahemikku 25...30 °C. See tähendab, et elektrihindade puhul, mis on madalamad kui ööpäevane mediaanhind, soojendatakse põrandat temperatuurini 30 °C ja mediaanhinnast kõrgemate hindade puhul lubatakse temperatuuril langeda 25 °C.

4. Juhtseadeldis

Hinnapõhiseks juhtimiseks on vajalik interneti ühendust võimaldav arvuti. Antud töös on selleks valitud Raspberry Pi 2 mudel B, mille külge ühendati tarbijate lülitamiseks relee. Kasutades seadeldist elektriboileri ja elektrilise pörandakütte juhtimiseks, on vajalikud temperatuuri andmed. Selleks on seadeldisega ühendatud temperatuuriandur. Töös kasutatud seadeldis on kujutatud joonisel 4.1.

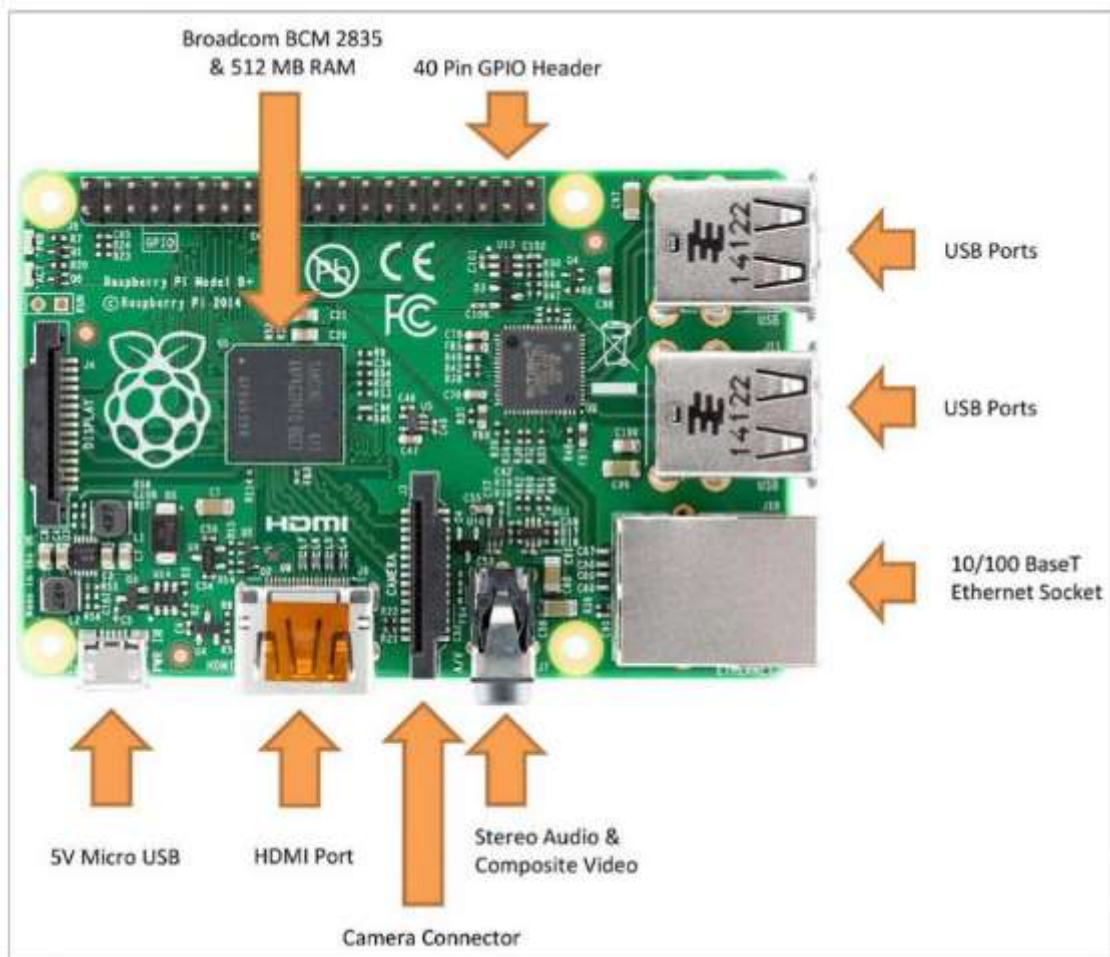


Joonis 4.1. Tarbimise juhtimise seadeldis

Joonisel nähtav juhtseadeldis on paigaldatud kompaktselt ühele alusele. Alusele on paigutatud kaks pistikupesast. Esimesest pistikupesast saab toite arvuti ning läbi relee saab toite ka teine pistikupesast, kuhu ühendatakse tarbija. Veekindel temperatuuri andur paikneb joonisel paremal.

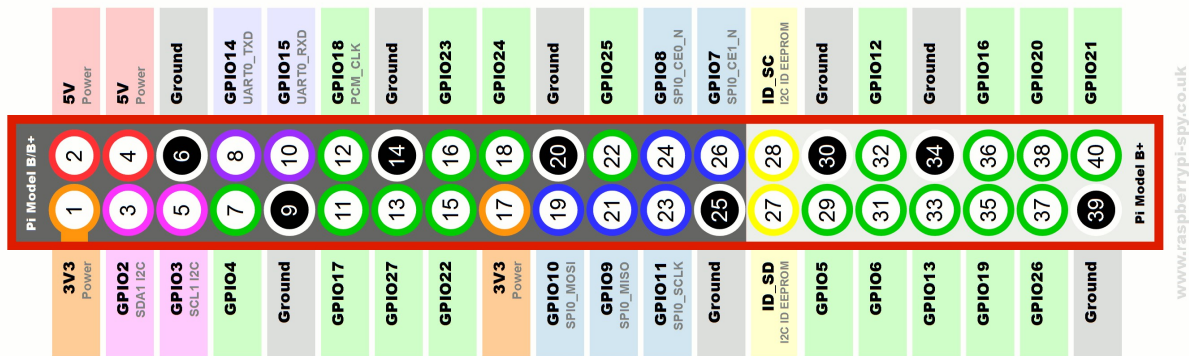
4.1 Raspberry Pi 2 mudel B

Raspberry Pi (joonis 4.2) on odav, väikeste mõõtmetega, ühest trükiplaadist koosnev arvuti, mis on välja töötatud Suurbritannias Raspberry Pi Foundationi poolt [7]. Raspberry Pi'l on olemas sarnased omadused nagu igal lauaarvutil. Selle külge saab ühendada hiire, klaviatuuri ja monitори ning see võimaldab võrguühendust.



Joonis 4.2. Raspberry Pi mudel B+ [7]

Raspberry Pi 2 mudel B üldotstarbeline sisend-väljund (GPIO) sisaldab 40 klemmi, millest 26 klemmi on sisend-väljund klemmid ja ülejäänud on miinus või pluss klemmid. Klemmide jaotus on välja toodud joonisel 4.3.



Joonis 4.3. Raspberry Pi 2 mudel B GPIO klemmide jaotus [8]

GPIO ehk üldotstarbeline sisend-väljund annab arvutile võimaluse suhelda väliste seadmetega. Kasutades GPIO klemmi väljundrežiimis on see nagu lüliti, millel on kaks asendit – sees või väljas [9]. Kui asendiks on „sees“, siis tekib klemmile pinge 3,3 V. Sedasi on antud töös ühendatud ka rele. Temperatuuri anduri ühendamiseks tuleb vajalik klemm panna sisendrežiimile.

4.2 Relee

Juhtseadeldise koostamiseks on valitud rele SONGLE SRD - 05VDC – SL – C. Relee sisendsignaali nominaalpinge mähisele on 5 V. Väljundvooluahela maksimaalne pinge on vahelduvvoolu puhul 250 V ja maksimaalne vool 10 A [10].

4.3 Temperatuuri andur

Töös on kasutatud veekindlat temperatuuriandurit DS18B20, mille mõõtmispiirkond on -55...+125 °C. Mõõtmistäpsus vahemikus - 10...+ 85 °C on ±0,5 °C [11]. Temperatuuriandur paigaldatakse vastavalt juhitavale seadmele elektri boilerisse vette või köetava põranda pinnale.

5. Programmeerimine

Käesoleva töö tarbimise juhtimisloogika on koostatud kasutades PHP koodi. PHP on serveripoolne skriptikeel, millega on võimalik genereerida dünaamilisi veebilehekülgi. Nimi PHP pärineb selle kõige esimesest versioonist, mida nimetati "Personal Home Page Tools". Praegu nimetatakse seda kui "PHP: Hypertext Preprocessor" (hüperteksti-eeltöötleja). PHP on vabavara ja seda levitatakse *Open Source* litsentsi all avaliku lähtekoodina. PHP's on võimalik luua ka *command-line* tarkvara ning visuaalse kasutajaliidesega tarkvara [12].

Järgnevalt tuuakse välja tähtsaimad käsud antud koodis ning seletatakse nende funktsioone. Kogu kood on nähtav töö esimese lisas.

Joonisel 5.1 on lõik PHP koodist, mis hangib ööpäeva tunnipõhised hinnad.

```
41 function tomba_hinnad(){
42     $jsonData = json_decode(file_get_contents('http://www.nordpoolspot.com/api/
         marketdata/page/10'));
43     if(!empty($jsonData)){
44         $aHinnad = array();
45         $i = 0;
46         foreach ($jsonData->data->Rows as $oRow) {
47             //echo 'Kell: '.$oRow->Name;
48
49             foreach ($oRow->Columns as $oAndmed) {
50                 if($oAndmed->Name == 'EE'){
51                     $aHinnad[$i] = (float)str_replace(",",".", $oAndmed->Value);
52                     //echo ' Hind: '.$oAndmed->Value.'  
';
53                 }
54             }
55             if($i == 23){
56                 break;
57             }
58             $i++;
59         }
60     }
61
62     $string_data = serialize($aHinnad);
63     file_put_contents("/tmp/hinnad_".date('Ymd')." ".txt", $string_data);
```

Joonis 5.1. PHP kood Eesti hinnapiirkonna hindade hankimiseks

Joonise 42. koodirealt on näha veebiaadress, kust vajalikud hinnaandmed alla laetakse. Järgnevad read paigutavad andmed soovitud vormingusse ja valivad välja Eesti hinnapiirkonna hinnad. Koodi 63. rida käsib hinnad salvestada eraldi failina ja paigutada need valitud kausta.

Joonisel 5.2 nähtavas koodilõigus arvutatakse ööpäeva elektrienergiahindade mediaanväärtus.

```
11 function calculate_median($arr) {
12     $count = count($arr); //total numbers in array
13     $middleval = floor(($count-1)/2); // find the middle value, or the lowest
    middle value
14     rsort($arr);
15     if($count % 2) { // odd number, middle is the median
16         $median = $arr[$middleval];
17     } else { // even number, calculate avg of 2 medians
18         $low = $arr[$middleval];
19         $high = $arr[$middleval+1];
20         $median = (($low+$high)/2);
21     }
22     return $median;
}
```

Joonis 5.2. PHP kood mediaanväärtuse leidmiseks [13]

Koodis on näha loogika, kuidas mediaanväärtus leitakse. Kuna ööpäevas on 24 tundi, siis valib antud kood välja kaks mediaani ja määrab nende kahe aritmeetilise keskmise mediaanväärtuseks. Sellisel moel saab elektritarbijate juhtimiseks kasutada 12 odavama hinnaga tundi.

Joonisel 5.3 olev PHP koodi lõik hangib temperatuuri väärtuse temperatuuri andurist ning määrab tarbija juhtimiseks vajaliku temperatuuri vahemiku.

```
67 $file = '/sys/bus/w1/devices/28-80000003b483/w1_slave';
68 $lines = file($file);
69 $temp = explode('=', $lines[1]);
70 $dTemp = (float)number_format($temp[1] / 1000, 1, '.', '');
71
72
73 $iTempAlumine = 25;
74 $iTempYlemine = 30;
75 $iReleePin = 18;
76 $dHetkelineTemp = $dTemp;
77 //pa($dHetkelineTemp);
```

Joonis 5.3. PHP kood relee juhtimiseks elektrienergia hinna ja temperatuuri järgi

Joonisel nähtavad 67...70 koodiread määravad temperatuurianduri tähisega 28-80000003b483 mõõtmistulemusi sisaldava faili asukoha ning hangivad sealt temperatuuri hetkeväärtuse. 73. ja 74. koodirida määrab temperatuuri vahemiku tarbija juhtimiseks. Joonisel 5.3 olev vahemik on valitud käesoleva töö pörandakütte juhtimiseks. 75. koodirida määrab Raspberry Pi GPIO klemmi, mis releed rakendab.

Joonisel 5.4 olev PHP koodi lõik juhib vastavalt elektrihindadele ja temperatuurile releed.

```
83 if(file_exists("/tmp/hinnad_".date('Ymd')." ".txt")){
84     $string_data = file_get_contents("/tmp/hinnad_".date('Ymd')." ".txt");
85     $aHinnad = unserialize($string_data);
86     $dMediaan = calculate_median($aHinnad);
87     if(($aHinnad[date('G')] <= $dMediaan && $dHetkelineTemp < $
        iTempYlemine) || ($dHetkelineTemp < $iTempALumine)){
88         relee_sisse($iReleePin);
89         $sRelee = '1';
90     } else {
91         relee_v2lja($iReleePin);
92         $sRelee = '0';
93     }
94
95 } else {
96     if($dHetkelineTemp < $iTempALumine){
97         relee_sisse($iReleePin);
98         $sRelee = '1';
99     } else {
100         relee_v2lja($iReleePin);
101         $sRelee = '0';
```

Joonis 5.4. PHP kood relee juhtimiseks elektrienergia hinna ja temperatuuri järgi

Joonisel 5.3 näha olev 83. koodirida kontrollib elektri hindu sisaldava faili olemasolu. Sellele järgnev rida hangib leitud failist hinnaandmed.

87. kuni 92. koodirida kontrollib olemasoleval ajahetkel olevat elektri hindu ja temperatuuri. Kui antud tunni elektri hind on madalam kui mediaanhind ja temperatuur on madalam kui määratud temperatuuri ülemine väärtus, siis lülitub relee sisse. Kui temperatuur või elektrienergia hind on kõrgem, lülitub relee välja.

95. kuni 101. koodirida rakendub siis, kui olemasoleval ajahetkel olev elektri hind on kõrgem kui mediaanhind. Sellisel juhul lülitub relee sisse siis, kui temperatuur on madalam määratud temperatuuri alumisest väärtusest.

6. Tulemused

Tarbimist juhtiti elektriboileril ja põrandakütteseadmel. Mõlema seadmega tehti tulemuste saamiseks kolm katset. Iga katse kestis ööpäeva ja juhtimine toimus iga minuti aja tagant. Nii loodi ühe katse kohta 1440 rida andmeid. Lisaks salvestati andmed tarbimise kohta ühe ööpäeva jooksul, kui hinnapõhist juhtimist ei toimunud. Siis oli elektriboileri püsivaks temperatuuriks kogu ööpäeva jooksul määratud 60 °C ja põrandaküttel 27 °C . Saadud andmed pandi vastavusse iga juhitud katsega nii, et kasutati samu elektrienergia hindasid ja arvestati välja ööpäevane elektri maksumus. Selleks arvestati lisaks elektrienergiale kõiki teisi kilovatt-tunni põhiseid elektriarve komponente, mille maksumused Lindamäe talu 2016. aasta aprillikuu elektriarve alusel on järgmised:

- võrgutasu – 0,0318 EUR/kWh;
- elektriaktsiis – 0,00447 EUR/kWh;
- taastuvenegiatasu – 0,0096 EUR/kWh.

Joonisel 6.1 on näiteks toodud lõik salvestatud andmetest.

12574	2016-04-22	05:57:01;28.7;1;25.2;30.725
12575	2016-04-22	05:58:01;28.7;1;25.2;30.725
12576	2016-04-22	05:59:01;28.7;1;25.2;30.725
12577	2016-04-22	06:00:02;28.7;0;30.75;30.725
12578	2016-04-22	06:01:01;28.7;0;30.75;30.725
12579	2016-04-22	06:02:01;28.7;0;30.75;30.725

Joonis 6.1. Lõik põrandakütte katse andmetest

Joonisel on näha, et üks rida koosneb viiest järgnevast osast:

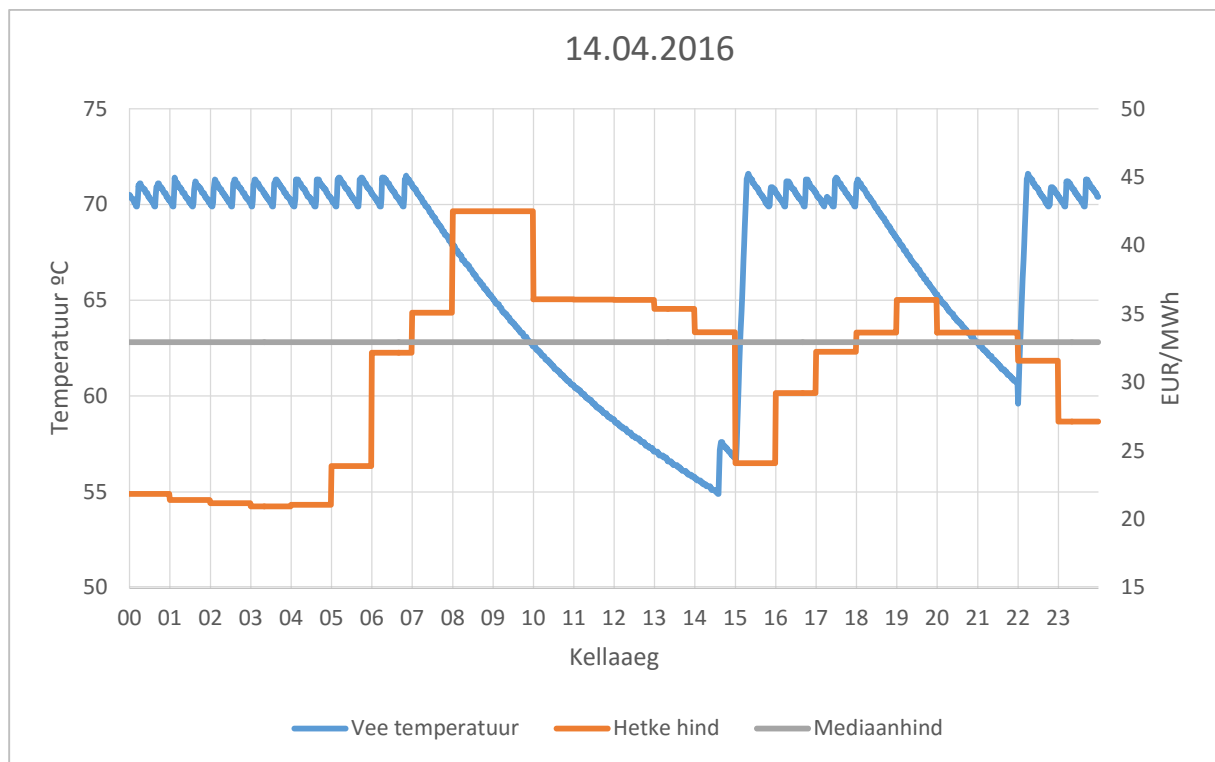
- kuupäev ja kellaaeg;
- temperatuur;
- relee asend;
- elektrienergia hind antud tunnil;
- elektrienergia mediaanhind.

Relee asendi fikseerimine on vajalik, et määratleda tarbija erinevatel tundidel töötatud minutite arv. Relee asend saab olla üks või null.

6.1 Elektriboiler

6.1.1 Katse 1

Järgnevalt on ära toodud elektriboileri katsete tulemused kolme ööpäeva lõikes. Joonisel 6.2 kajastub 14. aprillil sooritatud katse. Kõik katsete toimumise ajal kehtinud hinnad on esitatud lisas 2.



Joonis 6.2. Vee temperatuur elektriboileris ja elektrienergiahinnad 14. aprillil 2016

Mediaanhinda iseloomustab hall joon. Tunnipõhist elektrienergiahinda iseloomustab oranž joon. Sinine joon näitab vee temperatuuri elektriboileris. Kui elektri hind oli alla mediaanhinna, tõusis vee temperatuur 70 °C-ni ja püsis selle läheduses. Kell 7.00 kuni 15.00 olid elektrienergia hinnad järjestikku kõrgemad kui mediaanhind. Selle tulemusel langes vee temperatuur 55 °C-ni, mille tõttu lülitus elektriboiler ainsa korrana ööpäeva jooksul kõrgema hinna jooksul sisse. Teine mediaanhinnast kallimate elektrienergia hindadega periood oli kell 18.00 kuni 22.00. Sel perioodil langes vee temperatuur 59,6 °C-ni, mistõttu küttekeha sisselülitamist ei toimunud. Vee keskmine temperatuur ööpäeva jooksul oli 66,6 °C. Ööpäeva keskmine hind 14. aprillil 2016 oli 30,87 ja mediaanhind 32,935 EUR/MWh. Päeva maksimum- ja miinimumhind olid vastavalt 42,50 ja 20,94 EUR/MWh [3].

14. aprilli katse tulemused võtab kokku tabel 6.1.

Tabel 6.1. 14. aprilli 2016 katse tulemused

	Ühik	Reguleeritud	Reguleerimata
Tarbimise kestus odavatel tundidel	min	73	36
Tarbimise kestus kallitel tundidel	min	2	34
Tarbimise kestus kokku	min	75	70
Tarbitud energia	kWh	1,5	1,4
Energia maksumus	senti	3,959	4,229
Võrgutasu	senti	4,770	4,452
Elektriaktsiis	senti	0,671	0,626
Taastuenergia tasu	senti	1,035	0,966
Maksumus kokku	senti	10,435	10,273
Maksumus koos käibemaksuga	senti	12,522	12,328

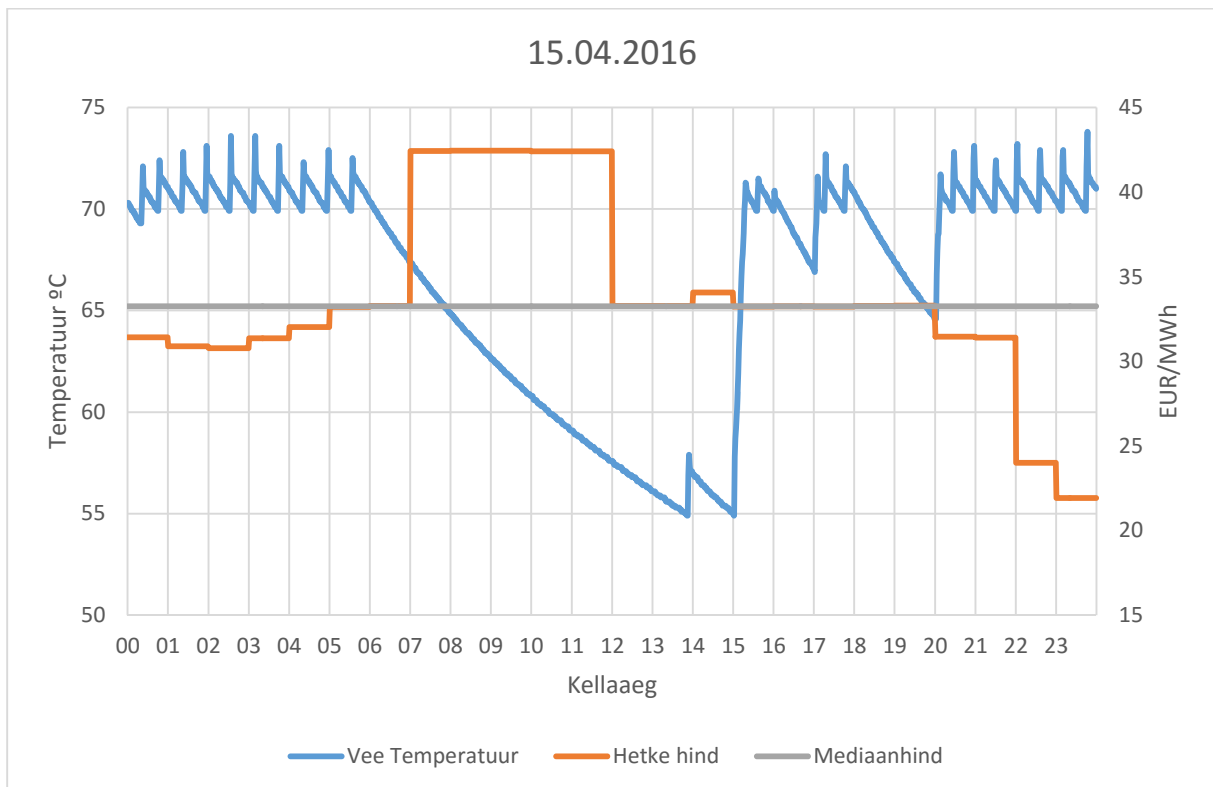
Tulemused tabelis näitavad, et hinnapõhiselt juhitud ehk reguleeritud juhtimise korral oli elektriboileri küttekeha ööpäeva jooksul sisse lülitatud kokku 75 minutit, millest 73 minutit odavate hindade ajal ja kaks minutit mediaanhinnast kallimate hindadega tundide ajal. Selle ajaga tarbis elektriboiler kokku 1,5 kWh elektrienergiat, mille maksumuseks kujunes 3,959 eurosent. Koos lisanduvate kilovatt-tunni põhiste elektriarsevkomponentide ja käibemaksuga kujunes ööpäevaseks elektri hinnaks 12,522 eurosent.

Reguleerimata juhtimise puhul oli elektriboileri küttekeha ööpäeva jooksul sisse lülitatud kokku 70 minutit, millest 36 minutit odavate hindade ajal ja 34 minutit kallite hindade ajal. 24

tunni jooksul tarbiti 1,4 kWh elektrienergiat ja selle maksumuseks kujunes 4,229 euro senti. Koos lisanduvate kilovatt-tunni põhiste elektriarvekomponentide ja käibemaksuga kujunes ööpäevaseks elektri hinnaks 12,328 euro senti.

6.1.2 Katse 2

Teine elektri boileri juhtimise katse toimus 15. aprillil 2016, mida iseloomustab joonis 6.3.



Joonis 6.3. Vee temperatuur elektri boileris ja elektrienergiahinnad 15. aprillil 2016

Joonisel kajastub, et kell 6.00 kuni 15.00 olid elektrienergia hinnad järjestikku kõrgemad kui mediaanhind. Selle tulemusel langes vee temperatuur 55 °C-ni, mille tõttu lülitus elektri boiler ainsa korrana ööpäeva jooksul kõrgema hinna jooksul sisse. Teine mediaanhinnast kallimate elektrienergia hindadega periood oli kell 16.00 kuni 17.00 ja kolmas periood kell 18.00 kuni 20.00. Kolmandal perioodil langes vee temperatuur 64,6 °C-ni, mistõttu küttekeha sisselülitust ei toimunud. Vee keskmine temperatuur ööpäeva jooksul oli nagu esimeselgi katsel 66,6 °C. Ööpäeva keskmine hind 15. aprillil 2016 oli 33,78 ja mediaanhind 33,245 EUR/MWh. Päeva maksimum- ja miinimumhind olid vastavalt 42,45 ja 21,92 EUR/MWh [3].

15. aprilli katse tulemused võetakse kokku tabelis 6.1.

Tabel 6.2. 15. aprilli 2016 katse tulemused

	Ühik	Reguleeritud	Reguleerimata
Tarbimise kestus odavatel tundidel	min	82	38
Tarbimise kestus kallitel tundidel	min	2	32
Tarbimise kestus kokku	min	84	70
Tarbitud energia	kWh	1,68	1,4
Energia maksumus	sent	5,273	4,703
Võrgutasu	sent	5,342	4,452
Elektriaktsiis	sent	0,751	0,626
Taastuenergia tasu	sent	1,159	0,966
Maksumus kokku	sent	12,526	10,747
Maksumus koos käibemaksuga	sent	15,031	12,896

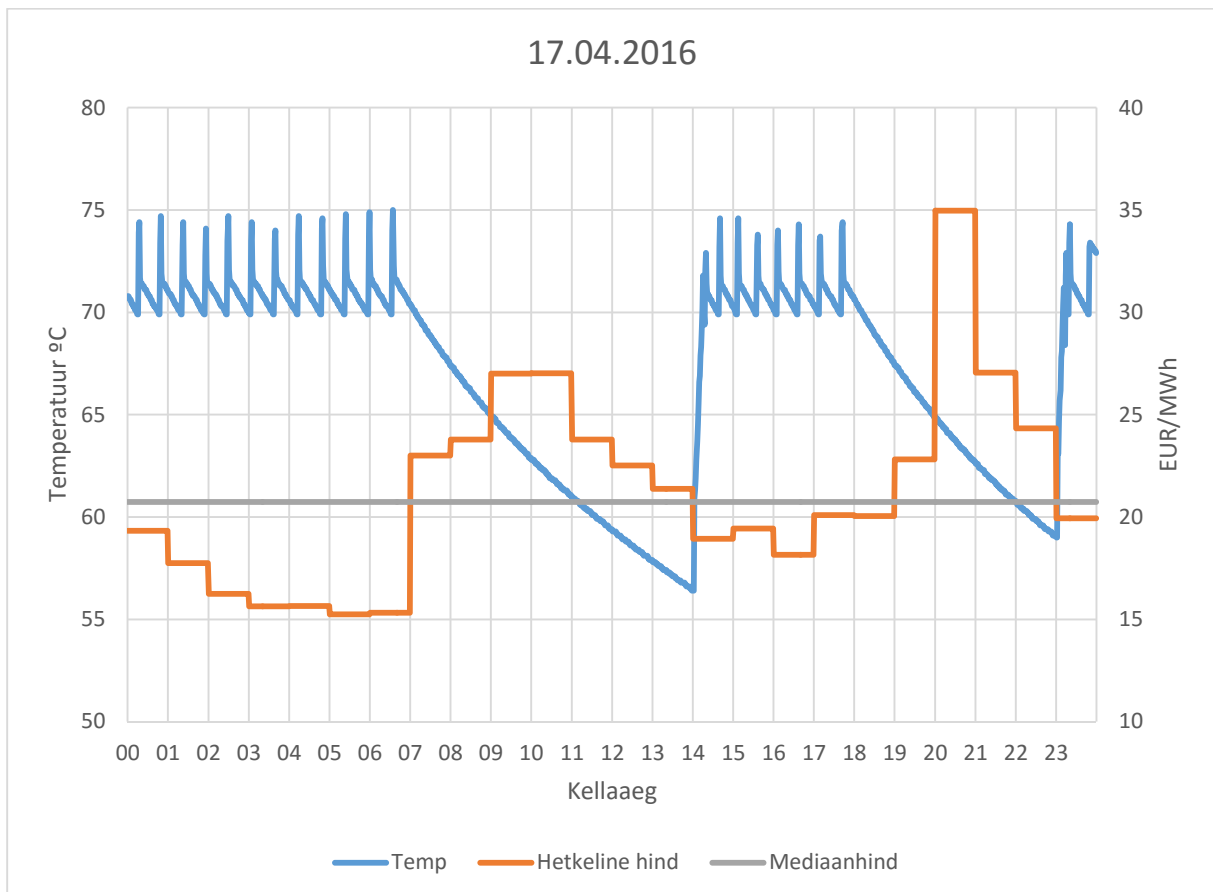
Tulemused tabelis näitavad, et hinnapõhiselt juhitud ehk reguleeritud juhtimise korral oli elektriboileri küttekeha ööpäeva jooksul sisse lülitatud kokku 84 minutit, millest 82 minutit odavate hindade ajal ja kaks minutit mediaanhinnast kallimate hindadega tundide ajal. Selle ajaga tarbis elektriboiler kokku 1,68 kWh elektrienergiat, mille maksumuseks kujunes 5,273 eurosent. Koos lisanduvate kilovatt-tunni põhiste elektriarsevkomponentide ja käibemaksuga kujunes ööpäevaseks elektri hinnaks 15,031 eurosent.

Reguleerimata juhtimise puhul oli elektriboileri küttekeha ööpäeva jooksul sisse lülitatud kokku 70 minutit, millest 38 minutit odavate hindade ajal ja 32 minutit kallite hindade ajal. 24

tunni jooksul tarbiti 1,4 kWh elektrienergiat ja selle maksumuseks kujunes 4,703 euro senti. Koos lisanduvate kilovatt-tunni põhiste elektriarvekomponentide ja käibemaksuga kujunes ööpäevaseks elektri hinnaks 12,896 euro senti.

6.1.3 Katse 3

Kolmas elektriboileri juhtimise katse toimus 17. aprillil 2016, mida iseloomustab joonis 6.4.



Joonis 6.4. Vee temperatuur elektriboileris ja elektrienergiahinnad 17. aprillil 2016

Joonisel kajastub, et kell 7.00 kuni 14.00 olid elektrienergia hinnad järjestikku kõrgemad kui mediaanhind. Selle tulemusel langes vee temperatuur 56,4 °C-ni, mille tõttu sellel perioodil polnud juhtimine vajalik. Teine mediaanhinnast kallimate elektrienergia hindadega periood oli kell 20.00 kuni 23.00, mille vältel langes vee temperatuur elektriboileris 59,1 °C-ni, mis jääb määratud vahemikku ja küttekeha sisselülitust ei toimunud. Vee keskmine temperatuur ööpäeva jooksul oli 66,9 °C. Ööpäeva keskmine hind 17. aprillil 2016 oli 21,31 ja mediaanhind 20,73 EUR/MWh. Päeva maksimum- ja miinimumhind on vastavalt 34,97 ja 15,24 EUR/MWh [3].

17. aprilli katse tulemused võetakse kokku tabelis 6.3.

Tabel 6.3. 17. aprilli 2016 katse tulemused

	Ühik	Reguleeritud	Reguleerimata
Tarbimise kestus odavatel tundidel	min	70	36
Tarbimise kestus kallitel tundidel	min	0	34
Tarbimise kestus kokku	min	70	70
Tarbitud energia	kWh	1,4	1,4
Energia maksumus	senti	2,576	2,997
Võrgutasu	senti	4,452	4,452
Elektriaktsiis	senti	0,626	0,626
Taastuenergia tasu	senti	0,966	0,966
Maksumus kokku	senti	8,620	9,041
Maksumus koos käibemaksuga	senti	10,344	10,849

Tulemused tabelis näitavad, et hinnapõhiselt juhitud ehk reguleeritud juhtimise korral oli elektriboileri küttekeha ööpäeva jooksul sisse lülitatud kokku 70 minutit, mis toimus kõik odavate hindadega tundidel. Mediaanhinnast kallimatel tundidel tarbimist ei toimunud. Selle ajaga tarbis elektriboiler kokku 1,4 kWh elektrienergiat, mille maksumuseks kujunes 2,579 eurosentit. Koos lisanduvate kilovatt-tunni põhiste elektriarsevõrkude ja käibemaksuga kujunes ööpäevaseks elektri hinnaks 10,344 eurosentit.

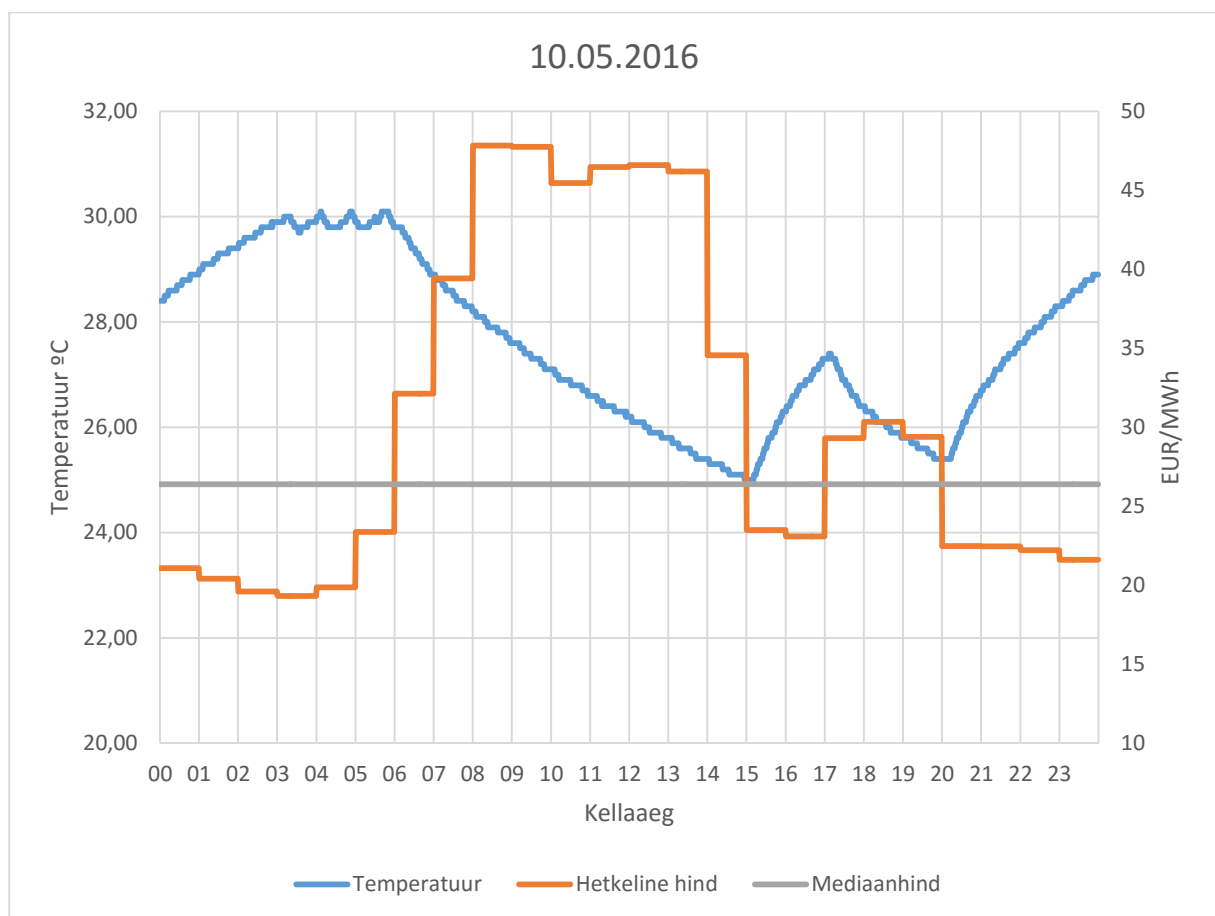
Reguleerimata juhtimise puhul oli elektriboileri küttekeha ööpäeva jooksul sisse lülitatud kokku 70 minutit, millest 36 minutit odavate hindade ajal ja 34 minutit kallite hindade ajal. 24

tunni jooksul tarbiti 1,4 kWh elektrienergiat ja selle maksumuseks kujunes 2,997 euro senti. Koos lisanduvate kilovatt-tunni põhiste elektriarvekomponentide ja käibemaksuga kujunes ööpäevaseks elektri hinnaks 10,849 euro senti.

6.2 Põrandaküte

6.2.1 Katse 1

Järgnevalt on ära toodud põrandakütte katsete tulemused kolme ööpäeva lõikes. Joonisel 6.5 kajastub 10. mail 2016 sooritatud katse.



Joonis 6.5. Põranda temperatuur ja elektrienergiahinnad 10. mail 2016

Joonisel kajastub, et kell 7.00 kuni 15.00 olid elektrienergia hinnad järjestikku kõrgemad kui mediaanhind. Selle tulemusel langes põranda temperatuur 25,1 °C-ni, mille tõttu sellel perioodil polnud lisasoojendamise vajalik. Teine mediaanhinnast kallimate elektrienergia hindadega periood oli kell 17.00 kuni 20.00, mille vältel langes põranda temperatuur 25,4 °C-ni, mis jääb samuti määratud vahemikku ja soojendamist ei toimunud. Põranda keskmine temperatuur

ööpäeva jooksul oli 27,55 °C. Ööpäeva keskmine hind 10. mail 2016 oli 30,67 ja mediaanhind 26,405 EUR/MWh. Päeva maksimum- ja miinimumhind on vastavalt 47,83 ja 19,33 EUR/MWh [3].

10. mai katse tulemused võetakse kokku tabelis 6.4.

Tabel 6.4. 10. mai 2016 katse tulemused

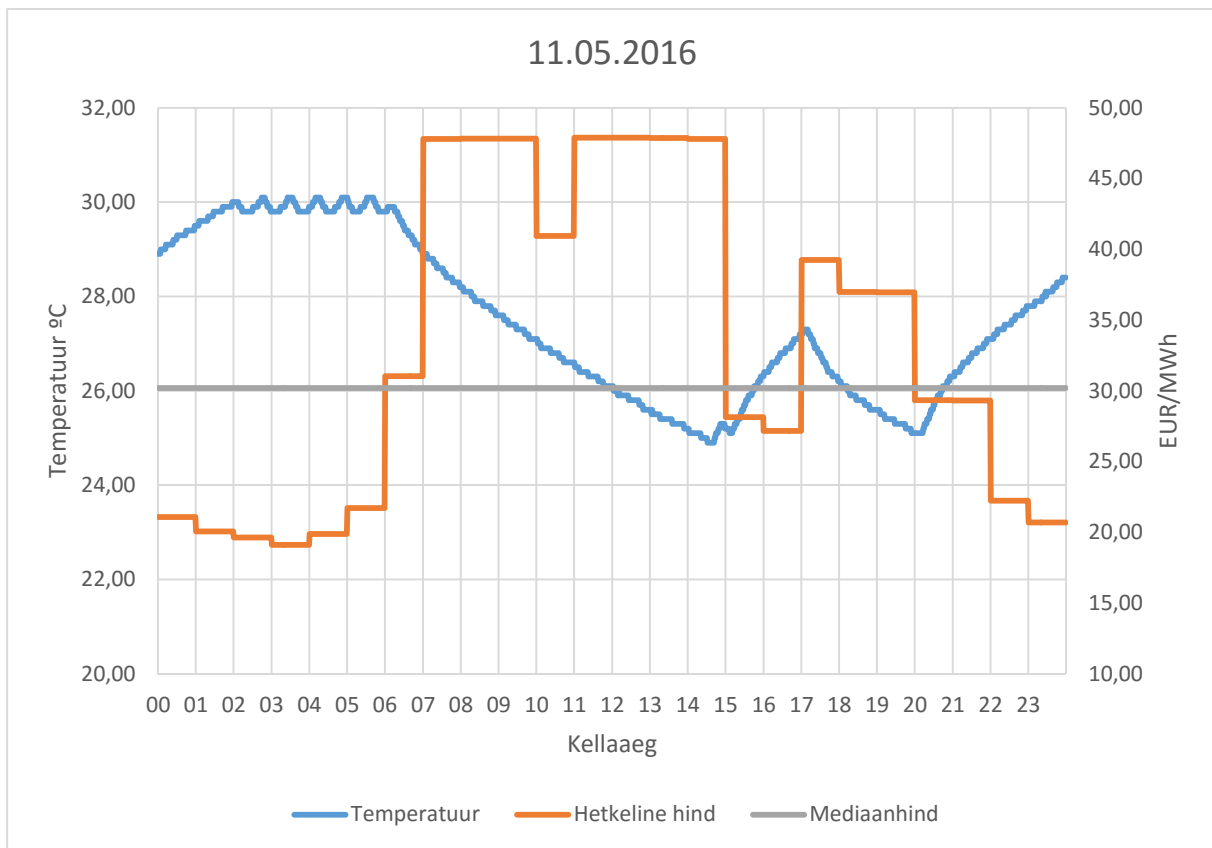
	Ühik	Reguleeritud	Reguleerimata
Tarbimise kestus odavatel tundidel	min	666	317
Tarbimise kestus kallitel tundidel	min	0	300
Tarbimise kestus kokku	min	666	617
Tarbitud energia	kWh	2,775	2,571
Energia maksumus	senti	6,006	7,843
Võrgutasu	senti	8,825	8,176
Elektriaktsiis	senti	1,240	1,149
Taastuenergia tasu	senti	1,915	1,774
Maksumus kokku	senti	17,986	18,942
Maksumus koos käibemaksuga	senti	21,583	22,730

Tulemused tabelis näitavad, et hinnapõhiselt juhitud ehk reguleeritud juhtimise korral oli pörandaküttekaabel ööpäeva jooksul sisse lülitatud kokku 666 minutit, mis toimus odavate hindadega tundidel. Mediaanhinnast kallimatel tundidel tarbimist ei toimunud. Selle ajaga tarbis pörandaküte kokku 2,775 kWh elektrienergiat, mille maksumuseks kujunes 6,006 euro senti. Koos lisanduvate kilovatt-tunni põhiste elektriarvekomponentide ja käibemaksuga kujunes ööpäevaseks elektri hinnaks 21,583 euro senti.

Reguleerimata juhtimise puhul oli põrandaküttekaabel ööpäeva jooksul sisse lülitatud kokku 617 minutit, millest 317 minutit odavate hindade ajal ja 300 minutit kallite hindade ajal. 24 tunni jooksul tarbiti 2,571 kWh elektrienergiat ja selle maksumuseks kujunes 7,843 eurosentit. Koos lisanduvate kilovatt-tunni põhiste elektriarvekomponentide ja käibemaksuga kujunes ööpäevaseks elektri hinnaks 22,73 eurosentit.

6.2.2 Katse 2

Joonisel 6.6 kajastub 11. mail 2016 sooritatud katse.



Joonis 6.6. Põranda temperatuur ja elektrienergiahinnad 11. mail 2016

Joonisel kajastub, et kell 7.00 kuni 15.00 olid elektrienergia hinnad järjestikku kõrgemad kui mediaanhind. Selle tulemusel langes põranda temperatuur 24,9 °C-ni, mis on madalam kui valitud temperatuuri vahemiku alumine väärtus ja põrandaküte lülitus 11 minutiks sisse. Teine mediaanhinnast kallimate elektrienergia hindadega periood oli kell 17.00 kuni 20.00, mille vältel langes põranda temperatuur 25,1 °C-ni, mis jääb määratud vahemikku ja lisasoojendamist ei toimunud. Põranda keskmine temperatuur ööpäeva jooksul oli 27,48 °C. Ööpäeva keskmine

hind 11. mail 2016 oli 33,27 ja mediaanhind 30,19 EUR/MWh. Päeva maksimum- ja miinimumhind olid vastavalt 47,89 ja 19,11 EUR/MWh [3].

11. mai katse tulemused võetakse kokku tabeli 6.5.

Tabel 6.5. 11. mai 2016 katse tulemused

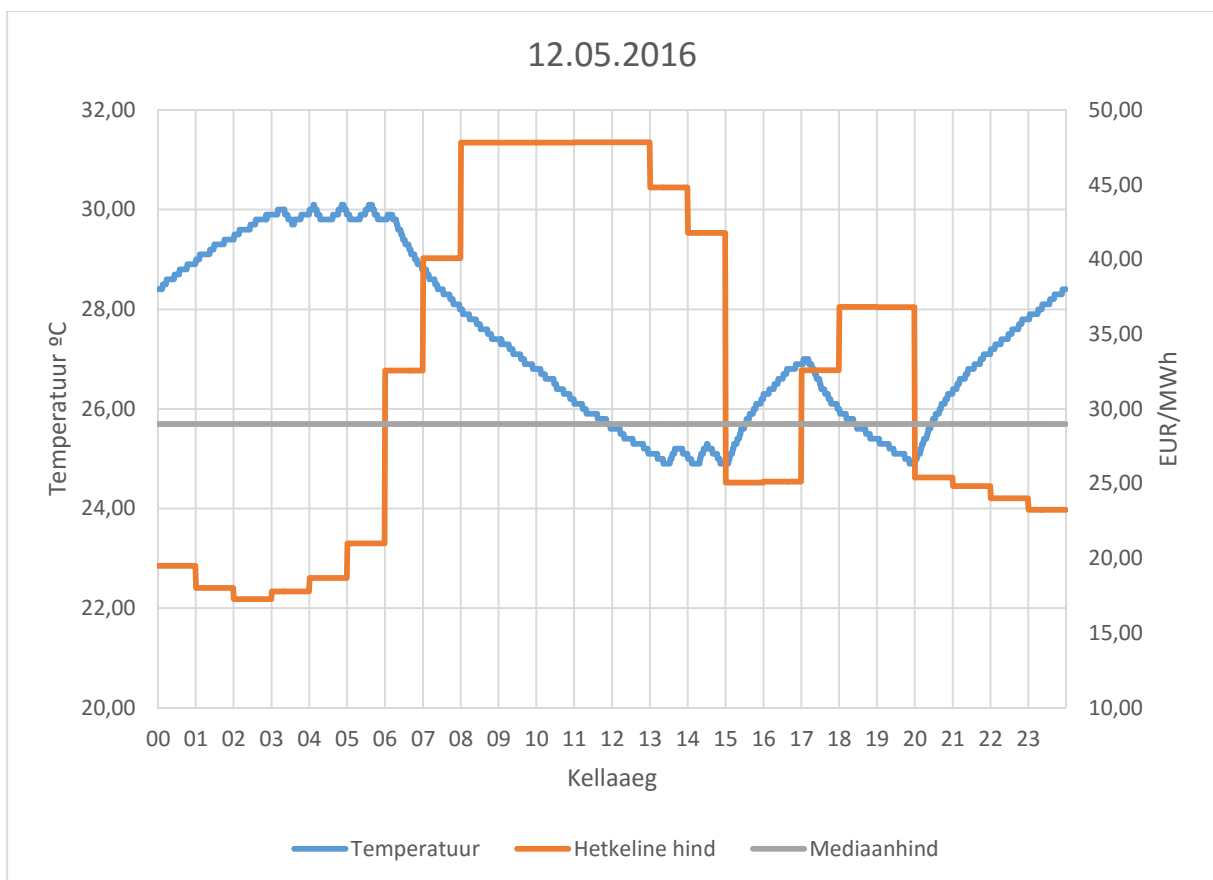
	Ühik	Reguleeritud	Reguleerimata
Tarbimise kestus odavatel tundidel	min	630	317
Tarbimise kestus kallitel tundidel	min	11	300
Tarbimise kestus kokku	min	641	617
Tarbitud energia	kWh	2,671	2,571
Energia maksumus	senti	6,424	8,513
Võrgutasu	senti	8,494	8,176
Elektriaktsiis	senti	1,194	1,149
Taastuenergia tasu	senti	1,843	1,774
Maksumus kokku	senti	17,955	19,612
Maksumus koos käibemaksuga	senti	21,546	23,534

Tulemused tabelis näitavad, et hinnapõhiselt juhitud ehk reguleeritud juhtimise korral oli põrandaküttekaabel ööpäeva jooksul sisse lülitatud kokku 641 minutit, millest 630 minutit toimus odavate hindadega tundidel ja 11 minutit kallite hindadega tundidel. Selle ajaga tarbis põrandaküte kokku 2,671 kWh elektrienergiat, mille maksumuseks kujunes 6,424 eurosentit. Koos lisanduvate kilovatt-tunni põhiste elektriarvekomponentide ja käibemaksuga kujunes ööpäevaseks elektri hinnaks 21,546 eurosentit.

Reguleerimata juhtimise puhul oli põrandaküttegaabel ööpäeva jooksul sisse lülitatud kokku 617 minutit, millest 317 minutit odavate hindade ajal ja 300 minutit kallite hindade ajal. 24 tunni jooksul tarbiti 2,571 kWh elektrienergiat ja selle maksumuseks kujunes 8,513 eurosentit. Koos lisanduvate kilovatt-tunni põhiste elektriarkomponentide ja käibemaksuga kujunes ööpäevaseks elektri hinnaks 23,534 eurosentit.

6.2.3 Katse 3

Joonisel 6.7 kajastub 12. mail 2016 sooritatud katse.



Joonis 6.7. Põranda temperatuur ja elektrienergiahind 12. mail 2016

Joonisel kajastub, et kell 7.00 kuni 15.00 olid elektrienergia hinnad järjestikku kõrgemad kui mediaanhind. Selle tulemusel langes põranda temperatuur alla 25 °C-i ja põrandaküte lülitus sisse kahel korral kestvusega kokku 33 minutit. Teine mediaanhinnast kallimate elektrienergia hindadega periood oli kell 17.00 kuni 20.00, mille vältel langes põranda temperatuur samuti alla 25 °C-i ja põrandaküte oli sisse lülitatud kokku 9 minutit. Põranda keskmine temperatuur ööpäeva jooksul oli 27,31 °C. Ööpäeva keskmine hind 12. mail 2016 oli 31,86 ja mediaanhind

28,99 EUR/MWh. Päeva maksimum- ja miinimumhind olid vastavalt 47,83 ja 17,28 EUR/MWh [3].

12. mai katse tulemused võetakse kokku tabeli 6.6.

Tabel 6.6. 12. mai 2016 katse tulemused

	Ühik	Reguleeritud	Reguleerimata
Tarbimise kestus odavatel tundidel	min	670	317
Tarbimise kestus kallitel tundidel	min	42	300
Tarbimise kestus kokku	min	712	617
Tarbitud energia	kWh	2,967	2,571
Energia maksumus	senti	6,828	8,137
Võrgutasu	senti	9,435	8,176
Elektriaktsiis	senti	1,326	1,149
Taastuenergia tasu	senti	2,047	1,774
Maksumus kokku	senti	19,637	19,236
Maksumus koos käibemaksuga	senti	23,564	23,083

Tulemused tabelis näitavad, et reguleeritud juhtimise korral oli põrandaküttegaabel ööpäeva jooksul sisse lülitatud kokku 712 minutit, millest 670 minutit toimus odavate hindadega tundidel ja 42 minutit kallite hindadega tundidel. Selle ajaga tarbis põrandaküte kokku 2,967 kWh elektrienergiat, mille maksumuseks kujunes 6,828 eurosent. Koos lisanduvate kilovatt-tunni põhiste elektriarkomponentide ja käibemaksuga kujunes ööpäevaseks elektri hinnaks 23,564 eurosent.

Reguleerimata juhtimise puhul oli põrandaküttegaabel ööpäeva jooksul sisse lülitatud kokku 617 minutit, millest 317 minutit odavate hindade ajal ja 300 minutit kallite hindade ajal. 24 tunni jooksul tarbiti 2,571 kWh elektrienergiat ja selle maksumuseks kujunes 8,137 eurosentit. Koos lisanduvate kilovatt-tunni põhiste elektriarvekomponentide ja käibemaksuga kujunes ööpäevaseks elektri hinnaks 23,083 eurosentit.

7. Järeldused

7.1 Tarbimine

Järgnevalt võrreldakse tarbimiste erinevust reguleeritud ja reguleerimata juhtimise korral. Elektriboileri tarbimise võrdlus on välja toodud tabelis 7.1.

Tabel 7.1. Elektrienergia tarbimise võrdlus reguleeritud ja reguleerimata elektriboileri tarbimisest

	Ühik	Katse 1		Katse 2		Katse 3	
		Reguleeritud	Reguleerimata	Reguleeritud	Reguleerimata	Reguleeritud	Reguleerimata
Tarbitud energia	kWh	1,5	1,4	1,68	1,4	1,4	1,4
Tarbimiste vahe	kWh	0,1		0,28		0	
Suhteline tarbimiste vahe	%	+7,143		+20,000		0	
Suhteline tarbimiste vahe keskmiselt	%	+9,048					

Juhtides elektriboileri tarbimist oli elektrienergiatarve kolme katse keskmiselt 9,048% suurem kui reguleerimata tarbimise puhul. Suurem tarbimine on tingitud kõrgemast vee temperatuurist elektriboileris. Keskmiselt oli vee temperatuur reguleeritud tarbimise puhul 66,7 °C ja reguleerimata tarbimise korral 60,99 °C. Kuigi valitud temperatuuri vahemik oli juhtimise puhul 55...70 °C ja reguleerimata tarbimise puhul määratud 60 °C, tõusid temperatuurid ühe minutilisest mõõteintervallist tekkiva inertsitõttu kohati 75 °C ja 65 °C. Sellest tingituna ka kõrged keskmised temperatuuri väärtused. Katse tulemustest selgub, et vee temperatuuri tõstmiseks 60,9 °C-lt kuni 66,7 °C-ni peab elektriboileri küttekeha olema sisse lülitatud 8 min. Selle ajaga tarbitakse 0,16 kWh elektrienergiat. Kõrgema temperatuuri juures on ka suuremad soojuskaod, mis suurendavad tarbimist veelgi.

Põrandakütte tarbimise erinevust reguleeritud ja reguleerimata tarbimise korral kajastab tabel 7.2.

Tabel 7.2. Elektrienergia tarbimise võrdlus reguleeritud ja reguleerimata põrandakütte tarbimisest

	Ühik	Katse 1		Katse 2		Katse 3	
		Reguleeritud	Reguleerimata	Reguleeritud	Reguleerimata	Reguleeritud	Reguleerimata
Tarbitud energia	kWh	2,775	2,571	2,671	2,571	2,967	2,571
Tarbimiste vahe	kWh	0,204		0,1		0,396	
Suhteline tarbimiste vahe	%	+7,935		+3,890		+15,403	
Suhteline tarbimiste vahe keskmiselt	%	+9,076					

Juhtides elektriboileri tarbimist oli elektrienergiatarve kolme katse keskmiselt 9,076 % suurem kui reguleerimata tarbimise puhul. Suurem tarbimine on tingitud kõrgemast põranda temperatuurist. Keskmiselt oli põranda temperatuur reguleeritud tarbimise puhul 27,45 °C ja reguleerimata tarbimise korral 27,00 °C. Katse tulemustest selgub, et põranda temperatuuri tõstmiseks 0,45 °C võrra peab küttekaabel olema sisse lülitatud 40 min. Selle ajaga tarbitakse 0,167 kWh elektrienergiat. Kõrgema temperatuuri juures toimub ka jahtumine kiiremini, mis suurendab tarbimist veelgi.

7.2 Elektrienergia maksumus

Järgnevalt võrreldakse, milliseks kujunes elektrienergia maksumus reguleeritud ja reguleerimata tarbimise puhul.

Tabelis 7.3 on võrreldud tulemusi hinnapõhiselt reguleeritud ja reguleerimata elektriboileri tarbitud elektrienergia maksumuse kohta.

Tabel 7.3. Elektrienergia maksumuse võrdlus reguleerimata ja reguleeritud elektriboileri tarbimisest

	Ühik	Katse 1		Katse 2		Katse 3	
		Reguleeritud	Reguleerimata	Reguleeritud	Reguleerimata	Reguleeritud	Reguleerimata
Elektrienergia maksumus	senti	3,959	4,229	5,273	4,703	2,576	2,997
Kokkuvõid elektrienergialt	senti	+0,27		-0,57		+0,421	
Suhteline kokkuvõid	%	+6,384		-12,120		+14,047	
Keskmine suhteline kokkuvõid	%	+2,77					

Tabelis on välja toodud võrdlus reguleeritud ja reguleerimata juhtimise korral kujunenud elektrienergia maksumuse kohta iga elektriboileriga tehtud katse lõikes. Tulemuste põhjal on arvatud suhteline kokkuvõid iga katse kohta eraldi ja leitud keskmine suhteline kokkuvõid. Esimesel katsel kujunes elektrienergia maksumus hinnapõhiselt juhitud tarbimise puhul 6,384% odavamaks kui reguleerimata tarbimise puhul. Teisel katsel kujunes maksumus 12,12% kallimaks ja kolmandal katsel 14,047% odavamaks. Kolme katse keskmiselt kujunes kokkuvõiuks elektrienergia maksumuselt 2,77%.

Tabelis 7.4 on võrreldud tulemusi hinnapõhiselt reguleeritud ja reguleerimata põrandakütte tarbitud elektrienergia maksumuse kohta.

Tabel 7.4. Elektrienergia maksumuse võrdlus reguleerimata ja reguleeritud põrandakütte tarbimisest

	Ühik	Katse 1		Katse 2		Katse 3	
		Reguleeritud	Reguleerimata	Reguleeritud	Reguleerimata	Reguleeritud	Reguleerimata
Elektrienergia maksumus	senti	6,006	7,843	6,424	8,513	6,828	8,137
Kokkuvõid elektrienergialt	senti	+1,837		+2,089		+1,309	
Suhteline kokkuvõid	%	+23,422		+24,539		+16,087	
Keskmine suhteline kokkuvõid	%	+21,356					

Tabelis on välja toodud võrdlus reguleeritud ja reguleerimata juhtimise korral kujunenud elektrienergia maksumuse kohta iga põrandaküttega tehtud katse lõikes. Tulemuste põhjal on arvutatud suhteline kokkuvõid iga katse kohta eraldi ja leitud keskmine suhteline kokkuvõid. Esimesel katsel kujunes elektrienergia maksumus hinnapõhiselt juhitud tarbimise puhul 23,422% odavamaks kui reguleerimata tarbimise puhul. Teisel katsel kujunes maksumus 24,539 % odavamaks ja kolmandal katsel 16,087% odavamaks. Kolme katse keskmiselt kujunes kokkuvõid elektrienergia maksumuselt 21,356%.

7.3 Elektri kogumaksumus

Käesolevas alajaotuses võrreldakse, milliseks kujunes elektrienergia kogumaksumus reguleeritud ja reguleerimata tarbimise puhul.

Tabelis 7.5 on võrreldud tulemusi hinnapõhiselt reguleeritud ja reguleerimata elektriboileri poolt tarbitud elektri kogumaksumuse kohta

Tabel 7.5. Elektri kogumaksumuse võrdlus reguleeritud ja reguleerimata elektriboileri tarbimisest

	Ühik	Katse 1		Katse 2		Katse 3	
		Reguleeritud	Reguleerimata	Reguleeritud	Reguleerimata	Reguleeritud	Reguleerimata
Elektri kogumaksumus	sent	12,522	12,328	15,031	12,896	10,704	10,849
Kokkuhoid elektri kogumaksumuselt	sent	-0,194		-2,135		+0,145	
Suhteline kokkuhoid	%	-1,574		-16,556		+1,337	
Keskmine suhteline kokkuhoid	%	-5,598					

Tabelis on välja toodud võrdlus reguleeritud ja reguleerimata juhtimise korral kujunenud elektri kogumaksumuse kohta iga elektriboileriga tehtud katse lõikes. Tulemuste põhjal on arvatud suhteline kokkuhoid iga katse kohta eraldi ja leitud keskmine suhteline kokkuhoid. Esimesel katsel kujunes elektri kogumaksumus hinnapõhiselt juhitud tarbimise puhul 1,574% kallimaks kui reguleerimata tarbimise puhul. Teisel katsel kujunes maksumus 16,556% kallimaks ja kolmandal katsel 1,337% odavamaks. Kolme katse keskmiselt kujunes elektri kogumaksumus juhitud tarbimise puhul 5,598% kallimaks.

Kuigi elektrienergia arvelt tuli tarbimise juhtimisega 2,77% rahalist kokkuvõidu, kujunes elektrienergia kogumaksumus 5,598% kallimaks kui reguleerimata tarbimise puhul. Seda seetõttu, et juhtimise puhul tarbis elektriboiler rohkem elektrienergiat kui reguleerimata tarbimise puhul ja ülejäänud elektriarve komponendid tõstsid kogumaksumust. Sooritatud kolme katse põhjal võib järeldada, et töös valitud juhtimisloogika alusel pole elektriboileri juhtimine otstarbekas.

Tabelis 7.6 on võrreldud tulemusi hinnapõhiselt reguleeritud ja reguleerimata põrandakütte poolt tarbitud elektri kogumaksumuse kohta

Tabel 7.6. Elektri kogumaksumuse võrdlus reguleeritud ja reguleerimata põrandakütte tarbimisest

	Ühik	Katse 1		Katse 2		Katse 3	
		Reguleeritud	Reguleerimata	Reguleeritud	Reguleerimata	Reguleeritud	Reguleerimata
Elektri kogumaksumus	sent	21,583	22,730	21,546	23,534	23,564	23,083
Kokkuvõid elektri kogumaksumuselt	sent	+0,956		+1,988		-0,481	
Suhteline kokkuvõid	%	+5,046		+8,447		-2,084	
Keskmine suhteline kokkuvõid	%	+3,803					

Tabelis on välja toodud võrdlus reguleeritud ja reguleerimata juhtimise korral kujunenud elektri kogumaksumuse kohta iga põrandaküttega tehtud katse lõikes. Tulemuste põhjal on arvatud suhteline kokkuvõid iga katse kohta eraldi ja leitud keskmine suhteline kokkuvõid. Esimesel katsel kujunes elektri kogumaksumus hinnapõhiselt juhitud tarbimise puhul 5,046% odavamaks kui reguleerimata tarbimise puhul. Teisel katsel kujunes maksumus 8,447% odavamaks ja

kolmandal katsel 2,084% kallimaks. Kolme katse keskmiselt kujunes kokkuhoid elektri kogumaksumuselt juhitud tarbimise puhul 3,803%.

Kuigi elektrienergia arvelt tuli põrandakütte tarbimise juhtimisega 21,356% rahalist kokkuhoidu, kujunes elektrienergia kogumaksumus vaid 3,803% odavamaks kui reguleerimata tarbimise puhul. Seda seetõttu, et juhtimise puhul tarbis põranda küttegaabel rohkem elektrienergiat kui reguleerimata tarbimise puhul ja ülejäänud elektriarve komponendid tõstsid kogumaksumust. Siiski võib sooritatud kolme katse põhjal järeldada, et töös valitud juhtimisloogika võimaldab põrandaküttelt saavutada rahalist säästu, sõltumata elektrienergia tarbe suurenemisest.

7.4 Puudused ja võimalused

Käesolevas alajaotises antakse hinnang tehtud katsetele, saavutatud tulemustele ja juhtimisloogikale. Püütakse leida võimalusi tulemuste parandamiseks.

Selgus, et kolm katset ei võimalda teha adekvaatseid järeldusi tarbimise kohta, kuna nii elektriboileriga kui ka põrandaküttega tehtud katsete tulemused erinevad iga päev suurel määral, sõltumata elektrienergiahindade sarnasusele. Hooajati erinevad ka elektrienergia hinnad. Seetõttu tuleks sarnased katsed läbi viia terve aasta vältel.

7.4.1 Elektri maksumus

Kuna elektri kogumaksumusest on energia maksumus vaid üks osa, siis annab hinnapõhine juhtimine suurema efekti just siis, kui hinnad on kallimad nagu näiteks külmadel kuudel, mil nõudlus on suurem. Käesoleva töö katsed on aga tehtud aprilli- ja maikuus, mil elektrienergia hind on madalam. Eesti hinnapiirkonna keskmine elektrienergia hind 2016. aasta jaanuaris 37,63 EUR/MWh ja aprillis 29,73 EUR/MWh [3].

Samuti mängib suurt rolli maksimaalne päevane elektrienergia turuhinna vahe. Mida suurem on vahe, seda rohkem säästab elektrienergia maksumuse arvelt. 2015. aasta keskmine maksimaalne päevane elektrienergia turuhinna vahe on 31,70 EUR/MWh. Elektriboileriga tehtud katsete ajal, oli kolme päeva keskmine maksimaalne elektrienergia turuhinna vahe 20,61 EUR/MWh. Põrandaküttega tehtud katsete ajal, oli kolme päeva keskmine maksimaalne elektrienergia turuhinna vahe 29,28 EUR/MWh [3]. Viimane on lähedane 2015. aasta keskmisega. See ka põhjus, miks põrandakütet hinnapõhiselt juhtides tekkis kordades suurem rahaline kokkuhoid kui elektriboileril ning seda vaatamata asjaolule, et mõlemad tarbisid

hinnapõhiselt juhituna protsentuaalselt samaväärselt rohkem energiat kui reguleerimata juhtimise puhul.

7.4.2 Juhtimisloogika

Elektriboileri juhtimiseks valiti temperatuuri vahemik 55...70 °C. Seejuures ei arvestatud minutilisest mõõteintervallist tekkivat inertsi, mille tõttu tõusis vee temperatuur elektriboileris kohati 75 °C-ni. Seetõttu tuleks elektriboileri juhtimiseks kasutada lühemat mõõteintervalli. Elektrienergia kokkuhoiu mõttes tuleks kasutada madalamat temperatuuri vahemikku 50...65 °C. Samuti võib kasutada loogikat, mille tulemusel tõstetakse vee temperatuuri vahetult enne kalli elektrienergiainnaga tundi.

Katsete jaoks ühesuguste tingimuste loomise eesmärgil määrati ühtlane soojavee tarbimine, mis aga ei anna adekvaatseid tulemusi elektriboileri kasutamise kohta. Usaldusväärsete tulemuste jaoks tuleks katseta reaalselt kasutuse olevat elektriboilerit ning seda pikema aja vältel. Antud töös tehtud katse sarnaneb pigem elektrilise salvestusküttega. Lähtudes saadud tulemustest, ei ole hinnapõhine juhtimine majanduslikult mõistlik.

Põrandakütteks tuleks 25...30 °C temperatuurivahemiku asemel kasutada vahemikku 24...30 °C, et temperatuur ei langeks kallite tundide jooksul alumise piirväärtuseni ja küttegaabel ei rakenduks tööle. Sõltumata sellest saavutati põrandakütet hinnapõhiselt juhtides elektrikogumaksumuselt rahalist kokkuhoidu 3,803%.

Lõputöö kokkuvõte

Elektri kogumaksumus koosneb järgnevatest komponentidest:

- elektrienergia hind;
- võrgutasu;
- taastuenergia tasu;
- elektriaktsiis;
- käibemaks.

Tavatarbijal on võimalik osta elektrienergiat kolmes variandis:

- börsihinnast sõltuva paketiga;
- fikseeritud hindadega paketiga;
- üldteenuse korras, kui müüjat ei valita.

Börsihinnast sõltuvat paketti saab valida, kui tarbijal on kaugloetav arvesti. 2017. aastaks peavad võrguettevõtjad paigaldama kõikidele tarbijatele kaugloetavad arvestid. Börsihinnast sõltuvat paketti kasutades püütigi käesolevas töös selgitada kas ja kui palju on võimalik päevast elektrienergia kõikumist majanduslikult ära kasutada. Selleks kasutati kodumajapidamises levinud tarbijaid, millel on soojust salvestav omadus nagu elektriboiler ja põrandaküte. Nende hinnapõhiseks juhtimiseks koostati automaatne juhtimissüsteem.

Hinnapõhise juhtimise mudeleid on mitmeid. Sõltuvalt parameetrite häälestamisest, juhtimismudeli valikust, reaktsiooniajast ja muudest parameetritest võib saavutada kulu- ja energiatõhususe osas erinevaid tulemusi. Näiteks, kontrollitakse hinnapõhise temperatuuri juhtimise korral, kas hinna väärtus on võrdne jooksva keskmise hinnaga. Juhul kui need on võrdsed, siis juhtimist ei toimu. Kui ei ole võrdsed, siis arvutatakse hetke, jooksva keskmise hinna ja temperatuuri seadeparameetrite piirväärtuste alusel uus temperatuuri seadeväärtus. Näiteks, sõltuvalt sesoonsusest, vähendatakse hinna tõustes kütte või jahutuse intensiivsust ja suurendatakse hinna langedes.

Käesolevas töös kasutatud hinnapõhine juhtimise mudel põhineb mediaanhinnal. See tähendab, et valiti välja ööpäevastest elektrienergia hindadest 12 madalaimat, mille korral juhtimist rakendati. Kui olemasoleval ajahetkel oli elektrienergia hind mediaanväärtusest kõrgem, juhtimist ei toimunud.

Töös kasutatud elektriboileri maht on 25 liitrit ja võimsus 1200 W. Selle tarbimise juhtimiseks kasutati temperatuurivahemikku 55...70 °C. See tähendab, et elektrihindade puhul, mis olid madalamad kui ööpäevane mediaanhind, soojendati vett temperatuurini 70 °C ja kõrgemate hindade puhul lubati temperatuuril langeda 55 °C-ni. Põrandakütte puhul, mida juhiti sama loogika alusel kui elektriboileritki, valiti temperatuurivahemikuks 25...30 °C. Töös kasutatud põrandakütte küttekaabel on võimsusega 250 W, mis soojendab 3 m² põrandapindalaga tualettruumi.

Automaatse hinnapõhise juhtimissüsteemi loomiseks ehitati juhtseadeldis, mis koosneb pisikesest internetiühendust võimaldavast arvutis Raspberry Pi 2 mudel B, releest ja temperatuuriandurist. Juhtimiseks kirjutati PHP koodi kasutades programm, mis hangib elektrienergiahinnad ja viib ellu juhtimisloogika.

Tulemuste saamiseks, tehti kumbagi tarbijaga neli katset, millest kolm olid hinnapõhiselt juhitud ja üks reguleerimata katse. Reguleerimata katse tarbimise tulemused paigutati iga hinnapõhiselt juhitud katse päevale nii, et tekiks võrdlus tarbitud energia ja elektri maksumuse vahel. Iga katse kestis 24 tundi. Mõõtmised toimusid iga minuti tagant ehk ühe katse kohta tekkis 1440 andmerida, mis sisaldasid:

- kuupäeva ja kellaaega;
- temperatuuri;
- relee asendit;
- hetke hinda;
- mediaanhinda.

Elektriboiler tarbis reguleerimata katse jooksul 1,4 kWh elektrienergiat. Hinnapõhiselt juhitud tarbimise puhul oli tarbimine esimesel katsel 0,1 ja teisel katsel 0,28 kWh suurem. Kolmandal katsel oli tarbimine reguleerimata katsega sama. Keskmiselt tarbis elektriboiler hinnapõhiselt juhtides 9,048% rohkem elektrienergiat.

Elektriboileri poolt tarbitud elektrienergia maksumus kujunes hinnapõhiselt juhitud esimesel ja kolmandal katsel vastavalt 6,384% ja 14,047% odavamaks. Teisel katsel kujunes elektrienergia maksumus 12,120% kallimaks. Kolme katse keskmiseks kokkuhoiuks elektrienergia maksumuselt kujunes 2,77%.

Põrandakütte küttekaabel tarbis reguleerimata katse jooksul 2,571 kWh elektrienergiat. Hinnapõhiselt juhitud tarbimise puhul oli tarbimine esimesel katsel 0,204 kWh, teisel katsel 0,1

kWh ja kolmandal katsel 0,396 kWh suurem. Keskmiselt tarbis põrandaküte hinnapõhiselt juhtides 9,076% rohkem elektrienergiat.

Põrandakütte poolt tarbitud elektrienergia maksumus kujunes hinnapõhiselt juhituna kõigil kolmel katsel vastavalt 23,422%; 24,539% ja 16,087% odavamaks. Kolme katse keskmiseks kokkuhoiuks elektrienergia maksumuselt kujunes 21,356%.

Kuna elektrienergia maksumus on elektri kogumaksumusest vaid üks komponent, siis tuli üleüldise säästu leidmiseks arvestada ka teisi kilovatt-tunni põhiseid komponente ja käibemaksu.

Elektriboileri poolt tarbitud elektri kogumaksumus kujunes hinnapõhiselt juhituna esimesel kahel katsel vastavalt 1,574% ja 16,556% kallimaks ning vaid kolmandal katsel 1,337% odavamaks. Kolme katse keskmiselt kujunes elektriboileri poolt tarbitud elektrienergia kogumaksumus 5,598% kallimaks.

Põrandakütte poolt tarbitud elektri kogumaksumus kujunes hinnapõhiselt juhituna esimesel kahel katsel vastavalt 5,046% ja 8,447% odavamaks ning kolmandal katsel 3,803% kallimaks. Kolme katse keskmiseks rahaliseks kokkuhoiuks elektri kogumaksumuselt kujunes 3,803%.

Tulemusi analüüsides leidis käesoleva töö autor, et sooritatud kolm katset ei võimalda teha adekvaatseid järeldusi hinnapõhise juhtimise tulemuste kohta, kuna nii elektriboileriga kui ka põrandaküttega tehtud katsete tulemused erinevad iga päev suurel määral, sõltumata elektrienergihindade sarnasusele. Hooajati erinevad ka elektrienergia hinnad.

Suurt rolli tulemustes mängib ka maksimaalne päevane elektrienergia turuhinna vahe. Mida suurem on vahe, seda rohkem säästab elektrienergia maksumuse arvelt. 2015. aasta keskmine maksimaalne päevane elektrienergia turuhinna vahe on 31,70 EUR/MWh. Elektriboileriga tehtud katsete ajal, oli kolme päeva keskmine maksimaalne elektrienergia turuhinna vahe 20,61 EUR/MWh. Põrandaküttega tehtud katsete ajal, oli kolme päeva keskmine maksimaalne elektrienergia turuhinna vahe 29,28 EUR/MWh. Seetõttu saab usaldusväärseid tulemusi alles pikemal perioodil, näiteks aasta, tehtud katseid analüüsides.

Paremate tulemuste saamiseks on töös välja toodud erinevad võimalused. Elektriboileri juhtimisel ei arvestatud minutilisest mõõteintervallist tekkivat inertsi, mille tõttu tõusis vee temperatuur elektriboileris kohati 75 °C-ni. Seetõttu tuleks elektriboileri juhtimiseks kasutada lühemat mõõteintervalli, et ei tekiks ülearust tarbimist. Elektrienergia kokkuhoiu mõttes tuleks

ka kasutada madalamat temperatuuri vahemikku 50...65 °C. Samuti võib kasutada loogikat, mille tulemusel tõstetakse vee temperatuuri vahetult enne kalli elektrienergia hinnaga tundi.

Katsete jaoks ühesuguste tingimuste loomise eesmärgil määrati ühtlane soojavee tarbimine, mis aga ei anna adekvaatseid tulemusi elektri boileri kasutamise kohta. Usaldusväärsete tulemuste jaoks tuleks katsetada reaalselt kasutuses olevat elektri boilerit ning seda pikema aja vältel. Antud töös tehtud katse sarnaneb pigem elektrilise salvestusküttega. Lähtudes saadud tulemustest, ei ole hinnapõhine elektri boileri juhtimine majanduslikult mõistlik.

Põrandakütteks tuleks 25...30 °C temperatuurivahemiku asemel kasutada vahemikku 24...30 °C, et temperatuur ei langeks kallite tundide jooksul alumise piirväärtuseni ja küttegaabel ei rakenduks tööle. Sõltumata sellest saavutati põrandakütet hinnapõhiselt juhtides elektrikogumaksumuselt rahalist kokkuhoidu 3,803%.

Kogu töö tulemusena valmis elektrienergia hinnapõhine juhtimissüsteem, mis osaliselt täitis oma eesmärgi. Leiti võimalused kuidas oleks otstarbekas süsteemi edasi arendada, et saavutada paremad tulemused.

Kirjandus

- [1] Energiatalgud kodulehekül. [WWW]
<http://www.energiatalgud.ee/index.php?title=Elektriturg#label-NPsys> (28.04.2016)
- [2] Elektrituru käsiraamat. (2016). Tallinn : Elering
- [3] Nord Pool Spot kodulehekül. [WWW]
<http://www.nordpoolspot.com/historical-market-data/> (28.04.2016)
- [4] Hansalu, K. Elektri hind on homme Eestis erakordselt kõrge. [WWW]
<http://majandus24.postimees.ee/3475813/elektri-hind-on-homme-eestis-erakordselt-korge> (28.04.2016)
- [5] Tarbimise juhtimine – suurtarbijate koormusgraafikute salvestamine ning analüüs tarbimise juhtimise rakendamise võimaluste tuvastamiseks. (2014). / A. Rosin, S. Link, H. Hõimoja, H. Mölder, T. Möller. Tallinn : Elering
- [6] Elamute elektripaigaldised. (2004). / A. Jaroshevich, J. Johannson, Ü. Kala, U. Leitmäe, M. Leoste, U. Mahlapuu, J. Mell, M. Mägi, T. Mägi, L. Põldoja, E. Risthein, R. Roasto, M. Roosnurm, M. Sirel, R. Teemets, J. Väli. Tallinn : EETEL-EKSPERT OÜ
- [7] Pajankar, A. (2015). Raspberry Pi Computer Vision Programming. Birmingham: Packt Publishing Ltd
- [8] Simple Guide to the RPi GPIO Header and Pins. [WWW]
<http://www.raspberrypi-spy.co.uk/2012/06/simple-guide-to-the-rpi-gpio-header-and-pins/> (3.05.2016)
- [9] An introduction to GPIO and physical computing on the Raspberry Pi. [WWW]
<https://www.raspberrypi.org/documentation/usage/gpio/> (3.05.2016)

- [10] SRD-05VDC-SL-C Datasheet PDF – SRD RELAY – SONGLE. [WWW]
<http://www.datasheetcafe.com/srd-05vdc-sl-c-datasheet-pdf/> (5.05.2016)
- [11] DS18B20. [WWW] <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>
(5.05.2016)
- [12] Porõvkin, A. Programmeerimine keeles PHP. [WWW]
http://dspace.ut.ee/bitstream/handle/10062/14220/Programmeerimine_PHP.pdf?sequence=1 (6.05.2016)
- [13] GitHub Gist kodulehekül. [WWW] <https://gist.github.com/ischenkodv/262906>
(25.02.2016)

Lisad

L.1. Töös kasutatud PHP kood

L.2. Töös kasutatud elektrienergia hinnad

L.1. Töös kasutatud PHP kood

```
1      <?php
2      error_reporting(E_ALL);
3      ini_set('display_errors', 1);
4
5      function pa($array){
6          echo '<pre>';
7          print_r($array);
8          echo '</pre>';
9      }
10
11     function calculate_median($arr) {
12         $count = count($arr); //total numbers in array
13         $middleval = floor(($count-1)/2); // find the middle value,
or the lowest middle value
14         rsort($arr);
15         if($count % 2) { // odd number, middle is the median
16             $median = $arr[$middleval];
17         } else { // even number, calculate avg of 2 medians
18             $low = $arr[$middleval];
19             $high = $arr[$middleval+1];
20             $median = (($low+$high)/2);
21         }
22         return $median;
23     }
24
25     function relee_sisse($pin){
26         shell_exec("/usr/bin/gpio -g mode ".$pin." out");
27         return shell_exec("/usr/bin/gpio -g write ".$pin." 0");
28     }
29     function relee_v2lja($pin){
30         return shell_exec("/usr/bin/gpio -g write ".$pin." 1");
31     }
32     function relee_kontroll($pin){
33         //return shell_exec("/usr/bin/gpio -g read 18");
34         if(shell_exec("/usr/bin/gpio -g read ".$pin) == 0){
35             return True;
36         } else {
37             return False;
38         }
39     }
40
41     function tomba_hinnad(){
42         $jsonData = json_decode(file_get_contents('http://www.nord
poolspot.com/api/marketdata/page/10'));
43         if(!empty($jsonData)){
44             $aHinnad = array();
45             $i = 0;
46             foreach ($jsonData->data->Rows as $oRow) {
```

```

47         //echo 'Kell: ' . $oRow->Name;
48
49         foreach ($oRow->Columns as $oAndmed) {
50             if($oAndmed->Name == 'EE'){
51                 $aHinnad[$i] = (float)str_replace(",", ".",
$oAndmed->Value);
52                 //echo ' Hind: ' . $oAndmed->Value . '<br>';
53             }
54         }
55         if($i == 23){
56             break;
57         }
58         $i++;
59     }
60 }
61
62     $string_data = serialize($aHinnad);
63     file_put_contents("/tmp/hinnad_".date('Ymd')." .txt",
$string_data);
64 }
65 }
66
67 $file = '/sys/bus/w1/devices/28-80000003b483/w1_slave';
68 $lines = file($file);
69 $temp = explode('=', $lines[1]);
70 $dTemp = (float)number_format($temp[1] / 1000, 1, '.', '');
71
72
73 $iTempAlumine = 25;
74 $iTempYlemine = 30;
75 $iReleePin = 18;
76 $dHetkelineTemp = $dTemp;
77 //pa($dHetkelineTemp);
78
79 if(!file_exists("/tmp/hinnad_".date('Ymd')." .txt")){
80     tomba_hinnad();
81 }
82
83 if(file_exists("/tmp/hinnad_".date('Ymd')." .txt")){
84     $string_data = file_get_contents("/tmp/hinnad_".date('Ymd')." .
txt");
85     $aHinnad = unserialize($string_data);
86     $dMediaan = calculate_median($aHinnad);
87     if(($aHinnad[date('G')] <= $dMediaan && $dHetkelineTemp <
$iTempYlemine) || ($dHetkelineTemp < $iTempAlumine)){
88         relee_sisse($iReleePin);
89         $sRelee = '1';
90     } else {
91         relee_v2lja($iReleePin);
92         $sRelee = '0';
93     }
94 }
95 } else {
96     if($dHetkelineTemp < $iTempAlumine){

```

```
97         relee_sisse($iReleePin);
98         $sRelee = '1';
99     } else {
100         relee_v2lja($iReleePin);
101         $sRelee = '0';
102     }
103 }
104
105
106 echo date('Y-m-d H:i:s').";".$dHetkelineTemp.";".$sRelee.";".
$aHinnad[date('G')].";".$dMediaan."\n";
107
108 ?>
```

L.2. Töös kasutatud elektrienergia hinnad

Kellaeg	14.04.2016	15.04.2016	17.04.2016	10.05.2016	11.05.2016	12.05.2016
00 - 01	21,84	31,42	19,33	21,09	21,08	19,5
01 - 02	21,4	30,89	17,74	20,42	20,05	18,02
02 - 03	21,18	30,77	16,24	19,61	19,62	17,28
03 - 04	20,94	31,37	15,63	19,33	19,11	17,79
04 - 05	21,06	32,02	15,65	19,87	19,87	18,68
05 - 06	23,89	33,21	15,24	23,38	21,71	21,01
06 - 07	32,17	33,28	15,33	32,14	31,04	32,56
07 - 08	35,09	42,43	23,01	39,43	47,81	40,08
08 - 09	42,5	42,45	23,78	47,83	47,82	47,82
09 - 10	42,5	42,44	27,01	47,75	47,82	47,81
10 - 11	36,08	42,41	27,02	45,47	40,95	47,82
11 - 12	36,04	42,4	23,78	46,47	47,89	47,83
12 - 13	36,02	33,28	22,52	46,61	47,88	47,83
13 - 14	35,38	33,28	21,37	46,2	47,86	44,82
14 - 15	33,67	34,07	18,93	34,56	47,81	41,78
15 - 16	24,09	33,24	19,43	23,49	28,13	25,07
16 - 17	29,23	33,25	18,16	23,1	27,17	25,14
17 - 18	32,23	33,23	20,09	29,32	39,25	32,58
18 - 19	33,64	33,27	22,05	30,34	36,99	36,82
19 - 20	36,03	33,3	22,82	29,39	36,96	36,81
20 - 21	33,64	31,46	34,97	22,48	29,34	25,41
21 - 22	33,64	31,41	27,06	22,46	29,31	24,83
22 - 23	31,58	24,01	24,34	22,23	22,23	24,03
23 - 00	27,13	21,92	19,93	21,61	20,69	23,26