

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Elektrotehnika instituut

ATV70LT

Mikk Soha

**Kodumajapidamise energiasalvesti
reaalajahinnapõhise juhtimise modelleerimine**

Magistritöö

Instituudi direktor prof. Tõnu Lehtla

Juhendaja vanemteadur Argo Rosin

Kaasjuhendaja doktorant Denis Lebedev

Lõpetaja Mikk Soha

Tallinn 2016

AUTORIDEKLARATSIOON

Kinnitan, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus. Kõik selle koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud. Varem ei ole selle alusel kutse- ega teaduskraadi ega inseneridiplomit taotletud. Töö on koostatud litsenseeritud tarkvara abil.

Tallinn, 6.05.2016.a.

..... Mikk Soha

SISUKORD

MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE	7
1. SISSEJUHATUS.....	8
2. OLEMASOLEVA LABORISÜSTEEMI KIRJELDUS	11
2.1. Raudvara.....	11
2.2. Tarkvara	14
3. PÄEV-ETTE HINNAL PÕHINEV JUHTIMINE	18
4. TUND-ETTE HINNAL PÕHINEV JUHTIMINE.....	21
4.1 Üldist	21
4.2. Hinnapõhine algoritm.....	21
4.3. Ajapõhine kombineeritud algoritm	24
4.3.1. Ajal põhineva statistika kasutamine	24
4.3.2. Algoritmi töö kirjeldus	26
4.4. Algoritm Matlab Simulink-is	28
5. ENERGISALVESTI JUHTIMISALGORITMIDE TASUVUSE VÕRDLUS.....	34
5.1. Algandmed	34
5.2. Elektriarvete võrdlus kasutades erinevaid algoritme.....	36
5.3. Kasuteguri arvestamine	40
5.4. Süsteemi tasuvusaeg.....	41
6. KOKKUVÕTE.....	45
KASUTATUD KIRJANDUS	47

ATV70LT

Kodumajapidamise energiasalvesti reaalahinnapõhise juhtimise modelleerimine

Mikk Soha, üliõpilaskood 144382 AAAM, mai 2016. – 47 lk.

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Energeetikateaduskond

Elektrotehnika instituut, elektriagamite ja elektrivarustuse õppetool

Töö juhendaja: vanemteadur Argo Rosin

kaasjuhendaja: doktorant Denis Lebedev

Võtmesõnad: elekter, salvestamine, akud, tühjendamine, laadimine, hind, börs, algoritmid, tasuvus

Referaat:

Lõputöö on 48 lehel, sisaldab 8 tabelit ja 36 joonist.

Lõputöö eesmärgiks on uurida kodumajapidamises elektri arvelt raha säästmise võimalusi kasutades elektri salvestamise süsteemi erinevate elektri laadimise ja kasutamise algoritmidega. Peamiselt on vaatluse all reaalahinnapõhiste algoritmide kasutamine. Lisaks algoritmide koostamisele uuritakse töös ka nende viimist Matlab Simulink keskkonda. Lõpuks leitakse kõikide uuritud algoritmide kasutamisel saadud rahaline sääst.

Lõputöö eripäraks on reaalahinnapõhiste algoritmide tasuvuse uurimine kodumajapidamise näitel ja nende algoritmide kasutamine Matlab Simulink tarkvaras. Siiani on peamiselt uuritud algoritme, kus elektri hindasid teatakse 24 tundi ette.

Seletuskirjas on antud ülevaade hetkel toimivast energia salvestamise süsteemist. Töös uuritakse ka päev-ette elektri hindade algoritme, et hiljem nende poolt saadud tulemusi võrrelda reaalahinnapõhiste algoritmidega. Peamine rõhk on kahel reaalahinnapõhisel algoritmil, millest esimene toetub hinna statistikale ja teine aja statistikale. Aja statistikale toetuvat algoritmi kasutatakse Simulink mudeli loomiseks. Lõpuks on võrreldud erinevate algoritmide poolt säästetud raha elektri arvelt aasta 2015. aasta elektri hindadele tuginedes. Kokkuvõtteks, süsteem ei ole praeguste elektri hindade juures rahaliselt tasuv.

ATV70LT

Моделирование управления накопителем энергии на базе цен на электричество для домохозяйства в реальном времени

Mikk Soha, код студента 144382 АААМ, май 2016. – 47 стр.

ТАЛЛИНСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ * Энергетический факультет

Электротехнический институт

Кафедра электропривода и электроснабжения

Руководитель работы: старший научный сотрудник Argo Rosin

Консультант работы: докторант Denis Lebedev

Ключевые слова: электричество, накопители энергии, аккумуляторы, зарядка, разрядка, цены, алгоритм, сбережение, счёт

Реферат:

Работа состоит из 48 страниц, включает 8 таблиц и 36 рисунков.

Целью работы было установить возможность экономии денег в домохозяйстве, используя накопители энергии с различными алгоритмами зарядки и разрядки. Главный упор в работе делается на алгоритм, который основан на цене на электричество в реальном времени. Также в работе используется программное обеспечение Matlab Simulink для расчетов и их визуализации. В конце проводится сравнительный анализ результатов всех алгоритмов для заданного отрезка времени.

Особенность работы в исследовании окупаемости алгоритма основанного на цене на электричество в реальном времени и использование алгоритма в программном обеспечении Matlab Simulink. До этой работы исследования в основном касались алгоритмов, где цена на электричество известна на 24 часа вперед.

Главная часть описывает имеющуюся в лаборатории систему с накопителем энергии в виде аккумуляторов. Также производится анализ алгоритма основанного на ценах получаемых на день вперед. В последующем результат сравниваются с результатом алгоритма основанного на цене на электричество в реальном времени. Последний будет спроектирован в двух видах. Первый основан на статистике по ценам, второй на статистике по времени и с него будет создана модель в Simulink. Затем проводится сравнение всех результатов для данных 2015 года.

ATV70LT

Modeling of real-time electricity price based control of household energy storage system

Mikk Soha, student code 144382 AAAM, May 2016. – 47 pages

TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY * Faculty of Power Engineering

Department of Electrical Engineering

Chair of Electrical Drives and Electricity Supply

Tutors of the work: Senior research scientist Argo Rosin

PhD student Denis Lebedev

Key words: electricity, storage, system, batteries, charging, discharging, prices, algorithm, profitability, saving, money, bill.

Summary:

Thesis consists of 48 pages, includes 8 tables and 36 figures.

The main goal of this thesis is to explore ways to save money in households using electricity storage system with different electricity charging and discharging algorithms. Main focus is on algorithms that are based on real-time electricity prices. Also trying to use software Matlab Simulink to visualize and calculate savings. Finally it will find and compare savings from electricity bill using the energy storage system with different algorithms during a set time.

The peculiarity of this thesis is exploring real-time based algorithms of household energy storage systems and to calculate them in Matlab Simulink software. Until now the main focus has been on algorithms that use day-ahead electricity prices.

The main body starts with giving an overview of the battery energy storage system that is based in the laboratory. It will also look into day-ahead prices based algorithms, so it can compare their results with real-time based algorithms later. There are formed two different real-time algorithms. First one uses electricity prices statistics and second one uses statistics of the minimum value placement in time. Based on that is made a Simulink model. Finally there are found savings from using the system with all the different algorithms. It concludes that electricity prices must rise for the system to be profitable.

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Elektrotehnika instituut

KOOSKÕLASTATUD

Prof. T. Lehtla.....

..... 2016

MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE

Mikk Soha, üliõpilaskood 144382AAAM

Magistritöö teema: Kodumajapidamise energiasalvesti reaalajahinnapõhise juhtimise modelleerimine.

Ülesanne: Töötada välja energiasalvesti laadimis- ja tühjendamisalgoritmid, et rahaline kasumlikkus oleks võimalikult suur. Leida millise elektri hinna juures oleks salvesti kasutamine mõistlik.

Lähteandmed:

1. Energiasalvesti andmed, skeemid, tööpõhimõte
2. Elektri tunnihindade viimaste aastate statistika
3. Seni tehtud uuringud, algoritmid, artiklid energiasalvestite kohta

Lahendamisele kuuluvate probleemide loetelu:

1. Olemasoleva laborisüsteemi riistvaraline kirjeldus (struktuurskeemid, elektriskeemid)
2. Juhtimismudeli koostamine MatLABis
3. Süsteemi tasuvuse uurimine

Magistritöö esitada eesti keeles kahes eksemplaris koos eesti- ja kahe võõrkeelse referaadiga hiljemalt 03.06.2016.

Juhendajad:

Vanemteadur A. Rosin

Doktorant D. Lebedev

Ülesande vastu võtnud:

Üliõpilane M. Soha

1. SISSEJUHATUS

2013. aasta 1. jaanuaril läks Eesti üle avatud elektriturule. Sellega lõppes olukord, kus tarbijatel oli võimalik osta reguleeritud hinnaga elektrit ainult ühelt monopoolselt ettevõttelt. Nüüd on kõigil elektri tarbijatel võimalik liituda vabalt valitud elektri müüja börsipaketiga, kus elektri hinda arvestatakse tunnipõhiselt. See annab tarbijatele uudse võimaluse säästa raha elektriarvetelt, kui nad on valmis muutma oma elektri tarbimise harjumusi.

Alates sellest hakati välja vahetama väiketarbijate elektriarvesteid. Vanad arvestid, mis fikseerisid vaid tarbitava elektri koguse, pole enam piisavad selleks, et pakkuda tarbijatele erinevaid võimalusi elektriturul osalemiseks. Kaugloetavate elektriarvestite tulekuga on lõppenud ajad, kus iga kuu lõpus tuleb arvesti näidud edastada elektri müüjale. Kõik toimub automaatselt ning kogu tunnipõhine tarbimisstatistika edastatakse elektri müüjale, kes arvutab välja arve vastavalt tunnis tarbitud elektri võimsusele ning vastava tunni elektri hinnale.

Nüüd on tekkinud olukord, kus tänu kaugloetavatele elektriarvestitele on inimestel võimalik maksta elektri eest vastavalt börsihinnale. Kui eelnevalt erinesid öö- ja päevatariif vaid paarkümmend protsenti, siis nüüd on päevase maksimum- ja miinimumhinna vahe tihti üle kahe korra. Seega võib elektriarve suurus erineda parimal juhul isegi kordades, kuigi tarbijad kasutavad sama palju elektrienergiat kui enne.

Kuna elektri börsihinnad on avalikud saavad inimesed tarbida elektrit siis, kui see on soodsaim. Sellega kaasneb aga probleem, kuna inimestel on väga tüütu kogu oma elu seada vastavalt börsi kõikumisele. On olemas vähe seadmeid, mille puhul ei ole määrava tähtsusega ajaline aspekt, ehk mis kell neid päeva jooksul kasutatakse. Nende hulka kuuluvad peamiselt elektrikütteseadmed ning boiler, mida saab taimeri abil tööle seada. Samas väga raske oleks tõusta hommikul kell 3, kui on selle päeva odavaim elekter, et hakata pirukaid küpsetama säästes vaid paar senti. Selleks on see sääst liiga väike, et ohverdada oma und. Samas, liites kuu aja peale kõik need sendid kokku võib sääst olla märkimisväärne. Seega oleks vaja mingit seadet, mida võimaldab ära kasutada börsihinna kõikumist ilma, et peaks muutma tarbimisharjumusi.

Selliseid elektri salvestamise seadmeid on mitmeid, kus elektrienergia salvestatakse mehhaaniliselt hoorattas, laenguna kondensaatorites või keemiliselt akudes.

Kodumajapidamiste jaoks on hetkel kõige sobilikumad akudel põhinevad elektri salvestamise süsteemid, lühidalt BES (*battery energy storage*) süsteemid, nende hinna ja energia salvestamise omaduste tõttu. BES süsteem sarnaneb ülesehituselt katkematu toiteallikaga (UPS seadmega), mis tagab voolu elektrikatkestuste korral. Erinevus nende kahe vahel seisneb selles, et kui UPS seadme akud on pidevalt laetud oodates võimalikku elektrikatkestust, siis BES süsteemi akude laadimine toimub tsükliliselt vastavalt seadme kontrolleri ette antud algoritmidest. Seega töös analüüsitava algoritmi eesmärk on leida elektri akudes salvestamisel võimalikult suur rahaline võit.

Lõputöö peamine eesmärk on energia salvestamise süsteemis kasutatavate algoritmide modelleerimine ning nende abil saadava rahalise säästu leidmine. Sealhulgas töötada välja algoritmid, mille puhul on pikas perspektiivis süsteemi kasutamine kõige tulusam. Samuti võrrelda erinevate algoritmide tasuvusaegasid ning uurida milliste algoritmide kasutamine on kõige mõistlikum.

Kui siiani on peamiselt uuritud algoritme, kus on ette teada järgmise 24 tunni elektri hinnad, siis käesolevas töös pööratakse peamiselt rõhku algoritmidele, mis töötavad reaalajas saadavate elektri börsihindade alusel, mis on vaid tunni jagu ette teada. See tähendab, et elektri hind tehakse teatavaks vahetult enne elektri tarbimist. Kuna suures osas tugineb nende algoritmide töö elektri hinna ennustamisele, siis tuleb koguda ja talletada infot eelnevate päevade hinna kõikumise kohta. Neid andmeid statistiliselt töödelda ning leida parimad viisid, kuna elektrit akupanka salvestada ja kuna kasutada.

Lisaks reaalajapõhiste algoritmide uurimisele on töö eesmärk Matlab Simulink tarkvara abiga katsetada ja võrrelda erinevaid algoritme ning leida nende abil saadav rahaline sääst elektri arvelt. Reaalajapõhised algoritmid tuginevad suures osas erinevatele elektri hinna ja tarbimise statistikatele ja tulevaste hindade ennustamisele, mistõttu Matlab Simulink keskkond peaks olema modelleerimiseks sobiv.

Käesoleva töö idee tuleneb Tallinna Tehnikaülikooli energeetikamaja laboris asuvast energia salvestamise süsteemist, mis kasutab energia salvestamiseks akusid. See süsteem koosneb arvutist, inverterist, programmeeritavast controllerist, akudest ja muudetavast koormusest, et oleks võimalik uurida erinevate energia salvestamise algoritmide tööd reaalses keskkonnas. Elektri börsihinnad tulenevad Eleringi veebiserverist, ning neid on ette teada 24 tundi. Lisaks

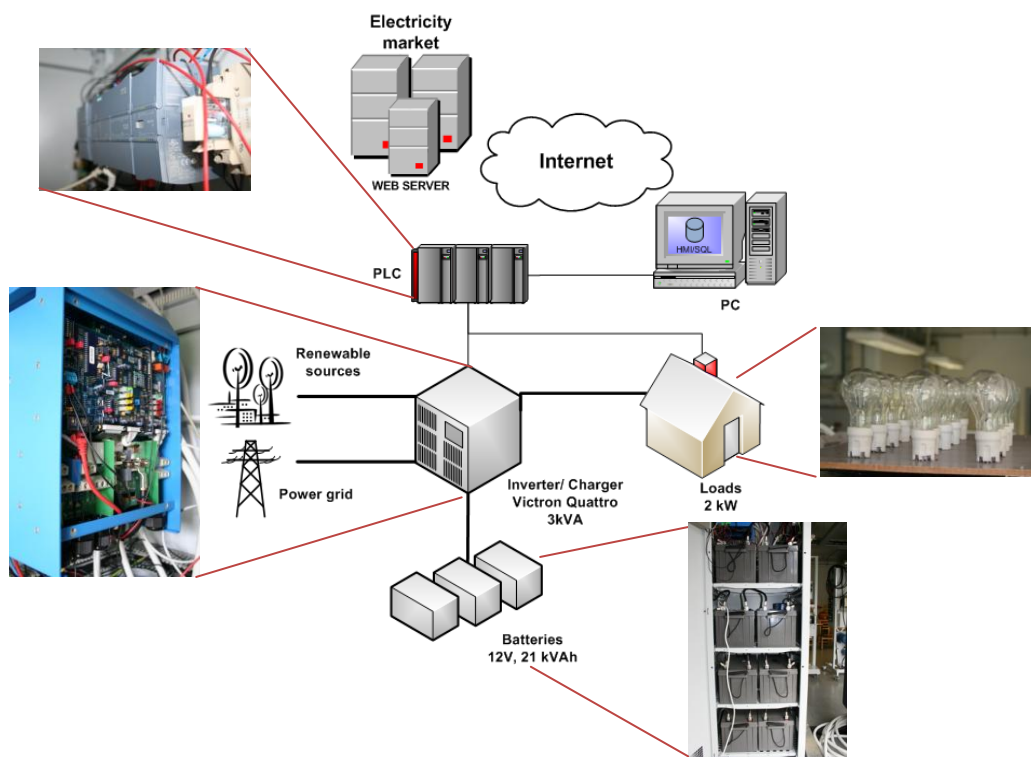
on süsteemi salvestatud ühe keskmise majapidamise 24 tunni koormused nii tööpäevadel, kui ka puhkepäevadel, et saada võimalikult tõepäraseid tulemusi. Kogu süsteem töötab automaatselt.

Lõpuks on vaja leida selle elektri salvestamise süsteemiga saavutatav sääst kasutades erinevaid algoritme, ning võrrelda nende erinevust. Eesmärk on võrrelda erinevaid algoritme, kus on teada ette 24 tunni elektri hinnad ning neid algoritme, mis teavad ainult selle hetke elektri hinda. Võib ette ennustada, et teades ette järgmise 24 tunni elektri hinnad on tulemus parem, kuid täpsustamist vajab paremuse suurus. Lisaks sellele on vaja leida selle BES süsteemi tasuvuse periood kasutades erinevaid algoritme. Juhul, kui süsteem ei teeni enda investeeringut oma eluajal tagasi, siis tuleb leida elektri hind, mille puhul oleks süsteem mõistlik investeering.

2. OLEMASOLEVA LABORISÜSTEEMI KIRJELDUS

2.1. Raudvara

Selleks, et realselt katsetada erinevaid elektrienergia salvestamise algoritme on Denis Lebedevi doktoritöö raames valminud reaalne BES süsteem, mis asub TTÜ energeetikamaja esimesel korrusel asuvas laboris. Süsteem koosneb nii raudvarast, kui ka tarkvarast, mis on vajalik elektri laadimise ja tühjendamise juhtimiseks (joonis 2.1). Kogu elektri salvestamise süsteem, va andmete töötlemiseks vajalik arvuti, asub elektrikilbis (joonis 2.2).



Joonis 2.1. BES süsteem [1]

Kogu süsteemi südameks on muundur Victron energy Quattro Inverter/Charger 3kVA, mille ülesandeks on akude laadimine ja tühjendamine (joonis 2.3). See on seadmekompleks, mis ühendab endas kahesuunalist muundurit, mis töötab nii alaldi, kui ka inverteri talitluses. Inverteri maksimaalseks kasuteguriks on märgitud $\eta = 0.94$ [2]. Kahesuunalise muunduri töö juhtimine toimub läbi programmeeritava kontrolleri, mis saadab vastavad juhtsignaalid. Inverteri väljund on ühefaasiline.

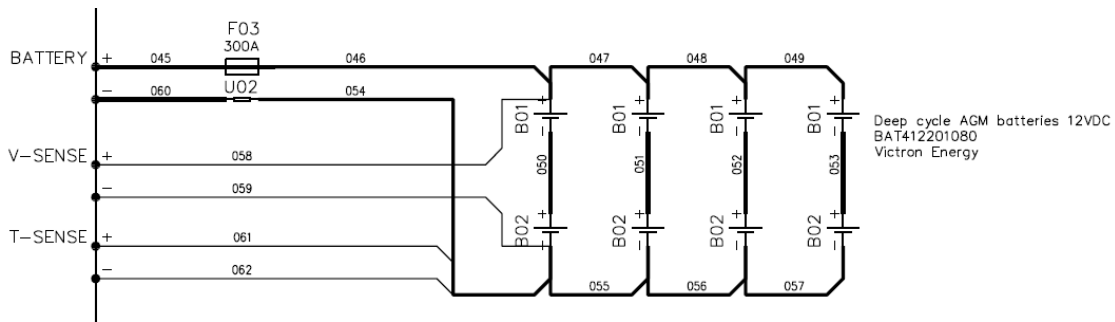


Joonis 2.2. Energia salvestamise süsteem

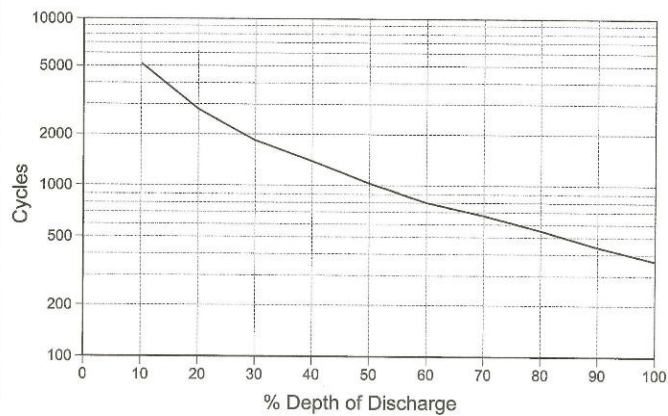


Joonis 2.3. Süsteemis olev inverter Victron energy Quattro

Süsteemis kasutatakse Deep cycle AGM akusid. Kokku on kasutuses 8 akut, mille mahutavus kokku on 880 Ah. Akud on ühendatud kahe kaupa jadamisi neljas rööbiti ahelas, et tõsta nende pinget 12 V juurest 24 V juurde, mis on kasutuses kogu süsteemis (joonis 2.4). Olenevalt akude vähimast laetuse tasemest SOCmin muutub akude eeldatav eluiga töötüklites, kusjuures akude eluea lõpuks loetakse kui nende mahutavus langeb alla 80 % esialgsest väärtuses.. Hetkel on süsteemis plaanitud akude tühjendamissügavus $DoD = 30\%$, mis teoreetiliselt annab süsteemis olevate akude elueaks kuni 1500 töötüklit (joonis 2.5) [3]. Siinkohal arvutatakse tühjendamissügavus nii: $DoD = SOC_{max} - SOC_{min}$.

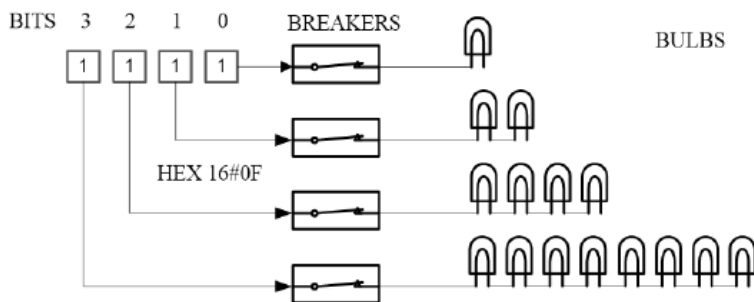


Joonis 1.4. Akude paigutus [1]



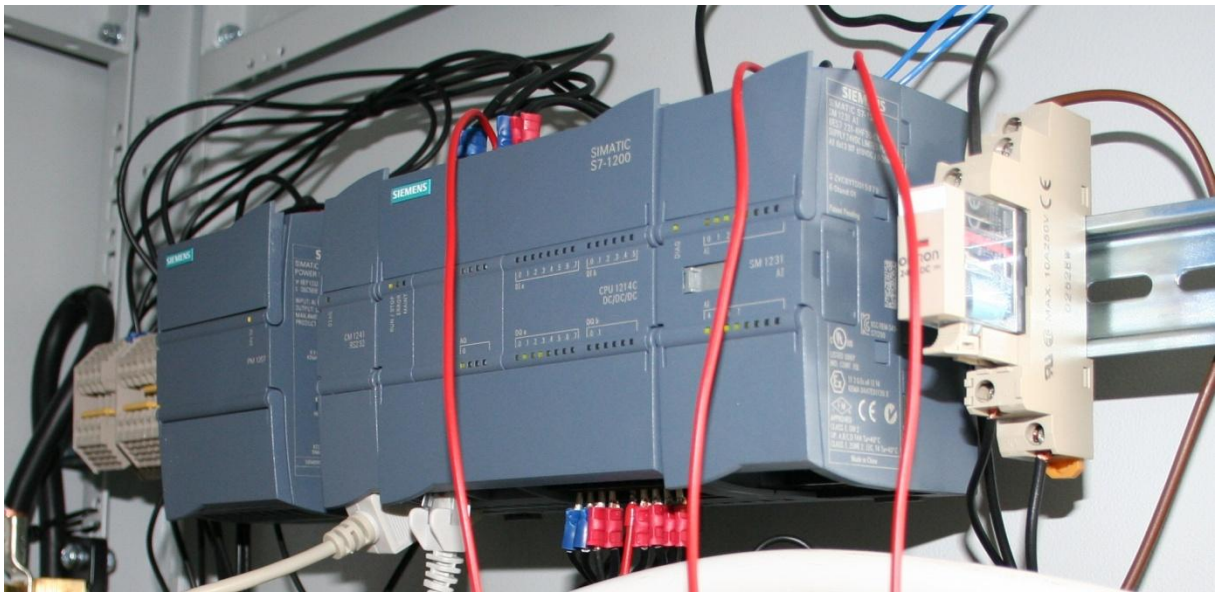
Joonis 2.5. Akud ja nende eeldatav tsüklilise eluea tühjendussügavuse DoD sõltuvus [3]

Koormuse imiteerimiseks ja akude laadimis- ja tühjendamisalgoritme testimiseks on kasutuses 15 hõõglambist koosnev muudetav koormus koguvõimsusega 1,5 kW. Hõõglampide sisselülitamine toimub programmeeritavasse kontrollerrisse salvestatud koormusgraafiku alusel. See võimaldab iga tunni järel sisse lülitada erineva arvu lampe, et simuleerida tüüpilise kodumajapidamise koormuskõverat. Lülitused toimuvad 4 bitise binaarkoodi alusel (joonis 2.6) sammuga 100W. Kui iga lambi võimsus on 100 W ning sellel tunnil on vaja simuleerida koormust 1100 W, siis tuleb süsteemile ette anda binaarkood 1011.



Joonis 2.6. Lampide sisselülitamine binaarkoodis [4]

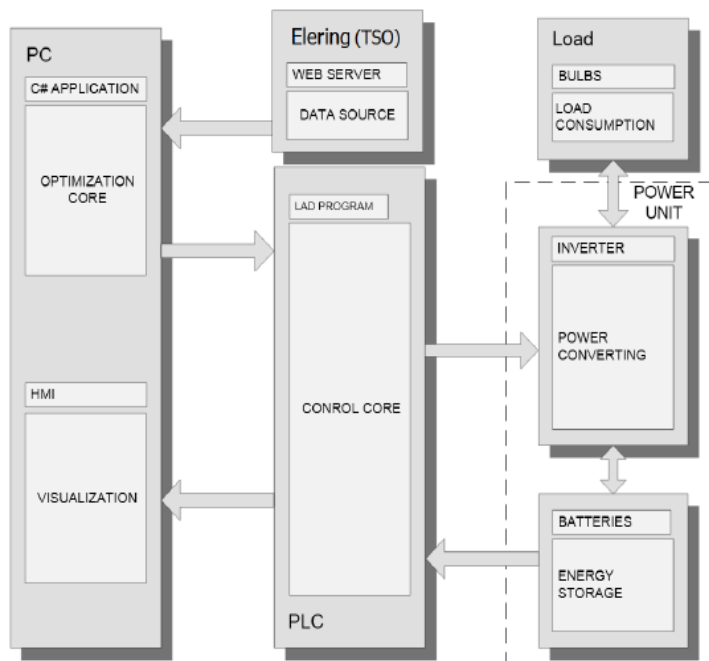
Süsteemi juhtimiseks kasutatakse programmeeritavat kontrolleri Siemens CPU seeria S7-1200 (joonis 2.7). Kontrolleri peamine ülesanne on juhtida muunduri Victron energy Quattro Inverter/Charger 3kVA tööd ja käivitada akude laadimis- või tühjendamistalitus. Akude laadimis- ja tühjendamistsüklid leitakse vastavalt loodud arvuti tarkvara abiga ning sealt tulenevad signaalid saadetakse edasi kontrollerrisse, mis selle muundurile vahendab. Antud seadme teine tähtis ülesanne on hõõglampidel põhinevate koormuste lülitamine. Selleks on seadme CPU-sse laaditud kaks andmebaasi, kuhu on salvestatud keskmise kodumajapidamise tunnipõhised koormuskõverad. Esimeses andmebaasis on tööpäevade ja teises puhkepäevade näitajad. Kuna need erinevad üksteisest oluliselt, siis tuleb süsteemi tasuvuse arvutamisel mõlemaga arvestada [4].



Joonis 2.7. Kogu süsteemi juhtiv programmeeritav loogika kontrolleri

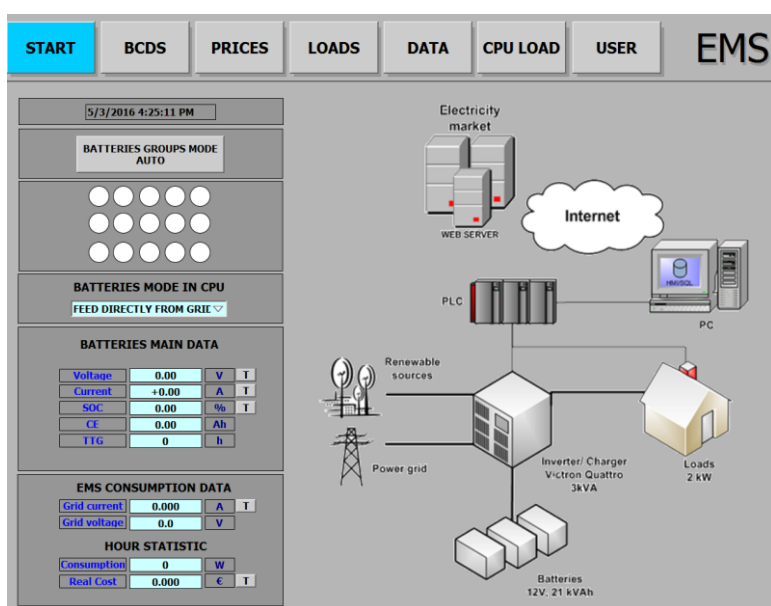
2.2. Tarkvara

Kogu süsteem toimib vastavalt joonisele 2.8 Saamaks teada järgmise 24 tunni elektri hinnad saadab tarkvara kell 00:00 esmalt päringu võrguettevõttele Elering. Teades elektri hindu, on C# koodis kirjutatud tarkvaral võimalik lahendada optimeerimisülesanded ja leida millal on energiasalvestussüsteemil ajaliselt kõige mõistlikum akusid laadida ja neid tühjendada.



Joonis 2.8. Süsteem ja andmete liikumise suunad [5]

Arvuti ekraanile on kuvatud visualisatsiooniprogramm HMI (*Human Machine Interface*), mis kogub ja talletab süsteemist tulevat infot pingete, voolude ja akude laetuse taseme SOC (*State of charge*) kohta (joonis 2.9). Vastavalt nendele suurustele saab tarkvara täpselt välja arvutada, millal on vaja akusid laadida ja kuna tühjendada ning seejärel edastada signaalid kontrollerile. Süsteem koostab akude laadimise ja tühjendamise ajakava BCDS (*Batteries Charge-Discharge-Schedule*) [1]. Kogu protsess toimub üks kord 24 tunni jooksul [5].

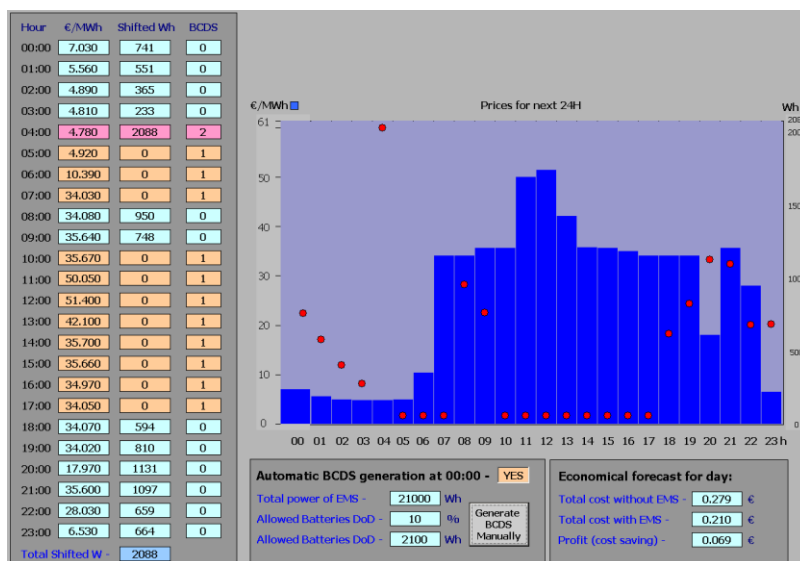


Joonis 2.9. BES süsteemi HMI [1]

Akude laadimise ja tühjendamise ajakava saadab arvuti kontrollerrisse kasutades ETHERNET ühendust. Kasutades järgmise 24 tunni elektri hindasid ja eeldatavat koormust leiab süsteem need tunnid, kuna on kõige mõistlikum olla ootetalitluses, laadida või tühjendada akusid nii, et võimalik sääst oleks suurim. Kokku on kolm erinevat BCDS talitlust:

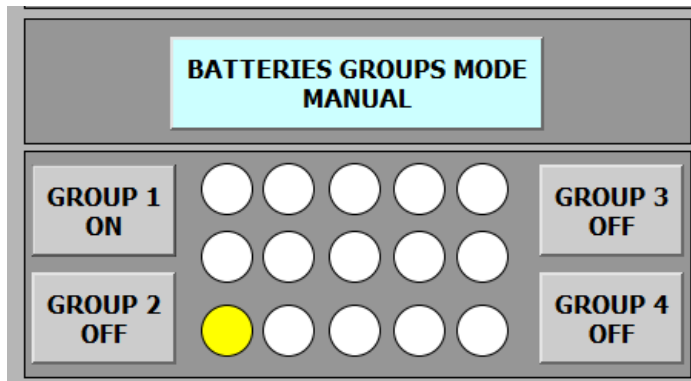
- 0 – ootetalitus. Ei toimu akude laadimist ega tühjendamist, koormus võetakse võrgust.
- 1 – tühjendamine. Koormus võetakse akudest.
- 2 – laadimine. Akusid laetakse, koormus võetakse võrgust.

Joonisel 2.10 on kujutatud süsteemi HMI ekraani, mis visualiseerib BCDS. Nagu näha on kell 4.00 kõige odavam elektri hind ning selleks ajaks on märgitud ka akude laadimine. Punased punktid graafikul märgivad elektri tarbimist võrgust. On näha, et tundidel kus elektri hind on piisavalt kõrge kasutatakse akudesse salvestatud elektrit, mistõttu on võrgust tarbitav võimsus 0.



Joonis 2.10. Süsteemi BCDS ülevaade [1]

Samal ajal, kuid eraldiseisvalt toimub kontrolleri poolt edastatud signaalidega hõõglambi gruppide sisse- ja väljalülitamine vastavalt antud tunni koormuse suurusele. Koormusi on võimalik vastavalt vajadusele visualisatsiooniprogrammi kasutades ka ise sisse ja välja lülitada (joonis 2.11). Pidevalt on arvuti ekraanile kuvatud ka erinevad süsteemis olevate väärtuste suurused ning päevaste laadimis- ja tühjendamisperioodide graafikud, et operaatoril oleks süsteemist täielik ülevaade.



Joonis 2.11. Käsitsi koormusgruppide sisse- ja väljalülitamine [1]

Viimastel süsteemi katsetustel arvutati tühjendamiseks sobiv aeg vastavalt valemile 2.1 [5]. Selle eesmärk on leida suurim rahaline võit arvestades ainult täistunde. Antud juhul polnud kõige olulisem elektri hind, vaid täistunni jooksul saadud rahaline võit. See tähendab, et kui elektri hind on kõrge, aga akudes on teoreetiliselt järel vaid 59 minuti jagu elektrienergiat siis sellel tunnil tühjendamist ei toimu.

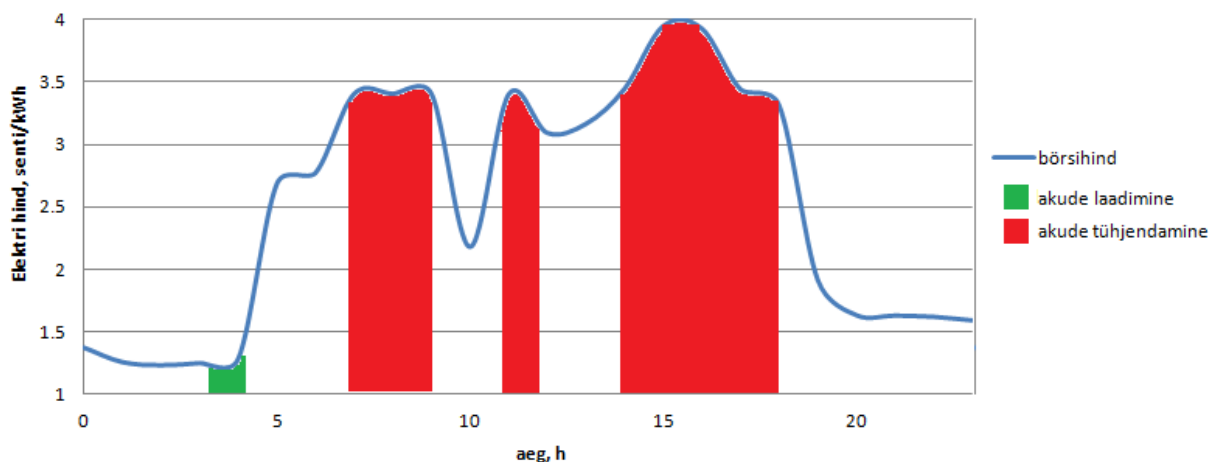
$$\begin{cases} P_{load}(t) \cdot F(t) - (P_{load}(t_c) + P_{load}(t)) \cdot F(t_c) \geq 0 \\ T > t_c > t \end{cases} \quad (2.1)$$

kus P_{load} - koormus,
 Fp - elektri hind,
 t - aeg hetkel,
 t_c - järgmise hetke aeg,
 T - kogu ajaperiood (24).

3. PÄEV-ETTE HINNAL PÕHINEV JUHTIMINE

Kindlasti kõige efektiivsem viis BESS (battery energy saving system) juhtimiseks on ette teada järgmise 24 tunni elektri ostu hindasid. Sellisel juhul ei toimu börsihindade ennustamist, sest alati on täpselt ette teada madalaima hinna aeg, millal akusid laadida ning kõrgeima hinna aeg, millal kõige kasumlikum akudesse salvestatud elektrit tarbida. Seega võib juba päeva alguses hinnata täpselt milline on selle päeva rahaline võit elektri arvelt, kus hälve oleneb vaid võimalikust koormuse kõikumisest erinevate päevade lõikes.

Joonisel 3.1 on kujutatud ühe tööpäeva elektri börsihinna graafikut. Märgitud on akude laadimisaeg ning periood millal kodumajapidamise tarbimine on lülitatud ümber akutoitele. Hommikul on juba täpselt ette teada, et selle päeva kõige odavam elekter on kell 3:00 kuni 4:00. Toimub akude laadimine. Vastavalt tavapärasele koormuse jaotamisele tööpäevas saab süsteem ära jagada akudesse laetud elektrienergia erinevate tundide vahel, kus on elektri hind kõrgeim. Antud juhul on kõrgeim hind kell 7:00 – 9:00, 11:00 – 12:00 ja 14:00 – 18:00.



Joonis 3.1. Näide akudesse elektrienergia ostmise ja kasutamise kohta

Pidevalt toimub kontroll, et kehtiks võrratus $SOC_{min} < SOC(t) < SOC_{max}$. Akude laetuse tase peab jääma ette antud miinimum ja maksimum väärtuste vahele, et tagada süsteemile pikem eluiga. Kui erandkorras peaks kell 7:00 – 8:00 olema erakordelt suur elektri tarbimine, mille järgselt $SOC(t) = SOC_{min}$, siis sellel päeval süsteem enam akudest elektrit ei tarbi ning jääb ootama järgmist päeva. Kui aga tarbimine on liiga madal ja kella 18:00 ei ole tingimus $SOC(t) = SOC_{min}$ täidetud, siis tühjendatakse akusid olenemata kellaajast edasi.

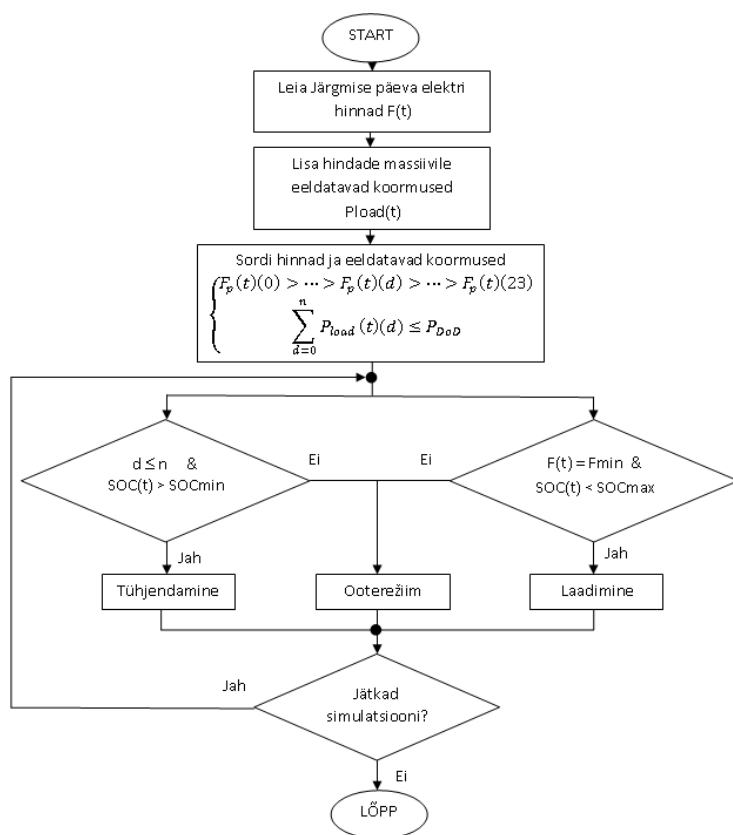
Süsteemil on kerge leida akude laadimise aega otsides päeva 24 tunni seest madalaima hinnaga perioodi ning lükates laadimise sinna. Akudest energia kasutamise aegade leidmine on natuke keerulisem. Selleks tuleb ette teada kui palju elektrit iga tunni jooksul järgmise 24 tunni jooksul tarbitakse. Mida täpsemalt on seda võimalik ette ennustada, seda täpsem on süsteemi algoritmide töö tulemus ning seda suurem rahaline võit tuleb lõppkokkuvõttes elektri arvelt. Elektri hindade massiivi tuleb lisada tarbimise koormused ning sortida need hinna alusel alustades suurimast (valem 3.1) [5]. Pärast sortimist tuleb liita järjekorras koormused kokku, kuni aku saab täis. Nüüd saab võtta kõik ajad t millal koormusi liideti ning määrata nendeks perioodideks akude tühjendamine.

$$\begin{cases} F_p(t)(0) > \dots > F_p(t)(d) > \dots > F_p(t)(23) \\ \sum_{d=0}^n P_{load}(t)(d) \leq P_{DoD} \end{cases} \quad (3.1)$$

kus P_{load} - koormus,
 F_p - elektri hind,
 t - aeg,
 d - järjekorranumber pärast sortimist,
 P_{DoD} - akudest kasutatava elektrienergia maht.

Nüüd, kui on teada mis aegadel toimub süsteemis akude tühjendamine ja laadimine algab süsteemi tsükliline töö, kus siis vastavalt kellaajale otsustatakse kas akusid laadida, tühjendada või püsida ootetalitluses. Loomulikult toimub samaaegselt ka kontroll, et akude laetuse tase (SOC) jääks sellel ajahetkel ette antud miinimum ja maksimum väärtuste vahele. Päev-ette algoritmi plokk skeem asub joonisel 3.2.

Üks probleem, mis võib tekkida selle algoritmi kasutamisega on juhtudel, kus päevane miinimumhind jääb öhtutundidesse. Kuigi ka hommikutundidel on elekter odav, siis otsib algoritm vaid kõige odavamat börsihinda. Põhimõtteliselt tähendab see seda, et süsteemi töötükkel jääb antud päeval vahele. Laadimine öhtusel ajal küll toimub, kuid elektri hinnad on järgmise hommikuni nii madalad, et pole mõistlik neid tühjaks laadida. Seega akud laetakse täis ning need tühjendatakse alles järgmise päeva öhtuks. Kui akud oleks täis laetud sama päeva hommikusel miinimumhinnaga tunnil, siis pole tegemist küll kõige madalama hinnaga kuid süsteemi töötükkel ei jääks vahele ning selle kasutamisest võib saada märkimisväärse säästu kuludelt.



Joonis 2.2. Päev-ette algoritmi plokk skeem

Et vältida süsteemi töösüklite vahele jäämist, tuleks seada ajaline piir, mille jooksul otsitakse odavaimat elektri börsihinda. Sellega saab kindlalt määrata, et akude laadimine toimuks hommikul ajal võimaldades õhtul kõrgema hinnaga akusid tühjendada. 2014. ja 2015. aasta elektrihindade statistikast selgus, et selleks sobib 8 hommikust tundi. Seega algoritm otsib madalaimat elektri hindu vahemikust kell 0:00 – 8:00. Igaks juhuks võib lisada ka kontrolli, et kindel olla kas hommikul tõesti on võimalik elektrit osta nii, et õhtul selle tarbimine oleks kasumlik (valem 3.2). Kui kontroll tuvastab, et see ei kehti, siis võib taastada miinimumhinna otsimine terve päeva ehk 24 tunni seest või lihtsalt jätta see päev vahele ja oodata järgmist. Siiski sellised olukorrad, kus 8 hommikuse tunni jooksul ei ole võimalik kasumlikult elektrit talletada on erandlikud ning elektri börsi 2014. ja 2015. aasta andmete alusel seda Eestis ei esinenud.

$$\text{MIN}(F_p(0); F_p(1); \dots; F_p(7)) < \text{MAX}(F_p(8); F_p(9); \dots; F_p(23)) \quad (3.2)$$

kus F_p - elektri börsihind sellel tunnil.

4. TUND-ETTE HINNAL PÕHINEV JUHTIMINE

4.1 Üldist

Siiski võib ette tulla ka juhuseid, kus pole ette teada terve järgmise päeva elektri hindasid, kuid on teada elektri hind, mis valitseb praegusel tunnil. Siinkohal muutub kogu loogika, kuna faktipõhiselt akude laadimiselt ja tühjendamiselt minnakse üle ennustamisele ja prognoosidele. Süsteemi juhtivate algoritmide aluseks tuleb võtta statistika eelnevate päevade, nädalate või isegi aastate elektrihindade kõikumisest tundide lõikes. Kuna elektri hinnad kõiguvad kordades nii tundide, kui ka päevade lõikes, on raske jõuda tulemusteni, mis on ligilähedased sellega, kui oleks elektri hinnad 24 tundi ette teada.

Kindlasti on mingis mahus võimalik elektri hindade muutumist ennustada. Näiteks on teada, et kui mõni Eesti Energia elektrijaama energiablokk või Soome tuumajaama reaktor hoolduseks suletakse, tõuseb selleks perioodiks elektri hind kogu NPS (*nord pool spot*) regioonis. Ilmateadete järgi on võimalik ennustada hüdroelektrijaamade suuremat võimsust lume sulamisega. Sama kehtib nii PV paneelide kui ka elektrituulikute kohta. Esineb ka palju selliseid tegureid, mida pole võimalik ette ennustada – enamasti rikked elektrijaamades või riike ühendavates kaablites.

Olemas on kaks erinevat statistilist parameetrit, millele on võimalik üles ehitada elektri salvestamine ja salvestist tarbimine. Esimene neist, hinnapõhine algoritm arvestab elektri vähimaid ja suurimaid hindasid mingi perioodi vältel ning leiab selle järgi statistiliselt keskmised hinnad, millest väiksema korral on tulus akusid laadida ning suurema korral tarbida elektrit akudest. Teine on ajapõhine, ehk leitakse perioodid päevas, kus asub kõige tõenäolisemalt päeva madalaim elektri hind. Mõlemal neist on olemas omad plussid ja miinused, mis erinevates olukordades toovad endaga kaasa erinevad tulemused.

4.2. Hinnapõhine algoritm

Tund-ette elektri salvestamise meetodi kasutamisel, mis toetub elektri hinna statistikale, on kaks tähtsat suurust: päevane vähim ja suurim hind. Kasutades neid andmeid, leitakse mingi eelneva perioodi jooksul kaks hinnanivood (valemid 4.1 ja 4.2). Kogu süsteemi põhimõte on see, et elektrit ostetakse salvestamiseks akudesse siis, kui elektri börsihind on alla leitud

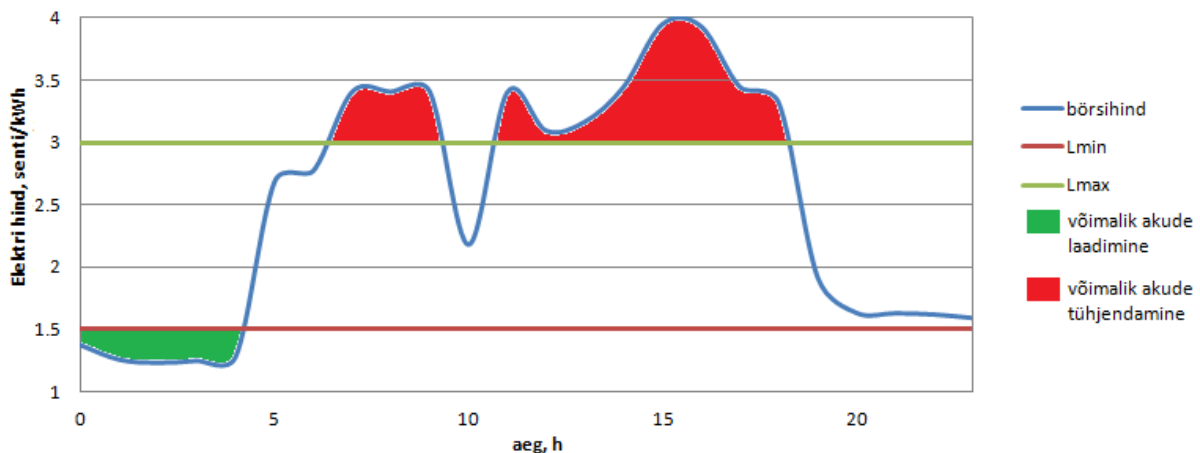
hinnanivoo L_{min} ning kasutatakse akudest siis kui hind ületab teist hinnanivood L_{max} (joonis 4.1). Tuleb arvestada, et igal ajahetkel peab kehtima võrratus $SOC_{min} < SOC(t) < SOC_{max}$.

$$L_{max} = F_{max} \cdot a \quad (4.1)$$

kus L_{max} - ülemine hinnanivoo,
 F_{max} - suurim elektri börsihind uuritava perioodil,
 a - suurima hinna kordaja, $a < 1$.

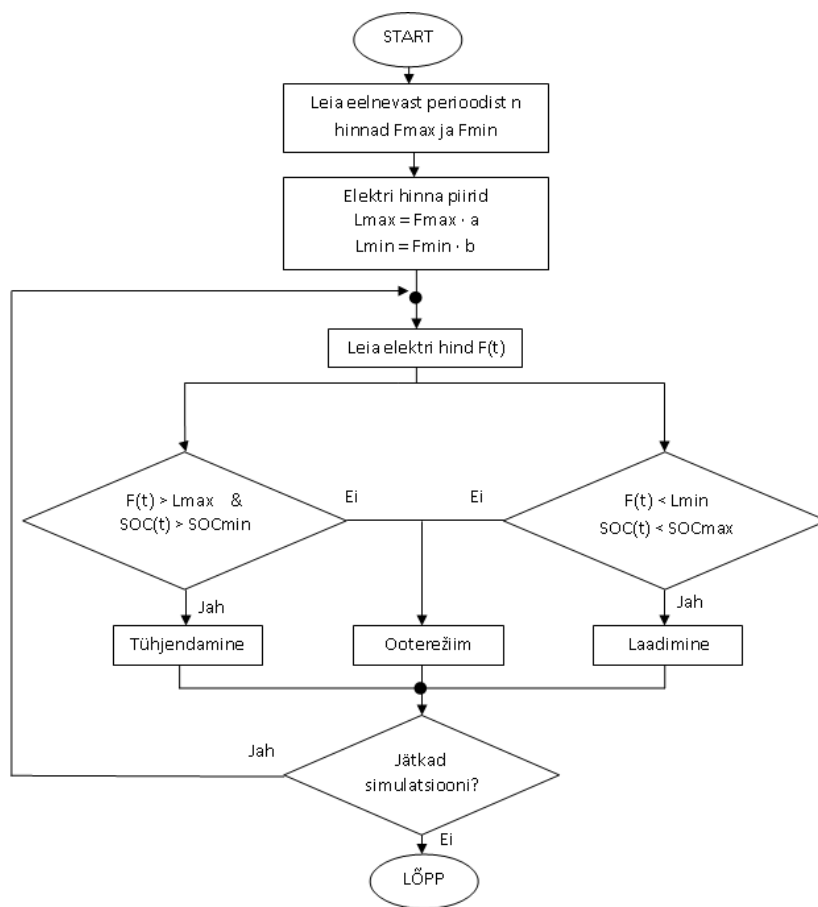
$$L_{min} = F_{min} \cdot b \quad (4.2)$$

kus L_{min} - alumine hinnanivoo,
 F_{min} - vähim elektri börsihind uuritava perioodil,
 b - vähima hinna kordaja, $b > 1$.



Joonis 4.1. Aku laadimise ja tühjendamise võimalikud perioodid kasutades hinnapõhist algoritmi

Nüüd on võimalik leida ajad, millal toimub akude laadimine ja tühjendamine (joonis 4.2). Päevased vähimad ja suurimad hinnad tuleb talletada mingi perioodi (näiteks nädala) vältel ning seejärel leida nende aritmeetilised keskmised. Peale keskmiste leidmist tuleks need läbi korrutada kordajatega, mis nihutavad energia akudesse salvestamise ja tühjendamise hinna piire vastavalt vajadusele. Aritmeetilise keskmise asemel on võimalik kasutada ka selle perioodi vähimat ja suurimat hinda, kuid kuna tihti esineb anomaaliaid, kus elektri hind on ebatavaliselt odav või väga kallis on täpsuse huvides mõistlikum toetuda keskmistele väärtustele.



Joonis 4.2. Reaalajapõhine algoritm, mis toetub hinna statistikale

Kordajate a ja b leidmiseks, mille korral on võimalik sääst suurim, tuleb läbi proovida mitmeid väärtusi. Aluseks võib võtta mingi eelneva perioodi ja proovida mis väärtuste korral oleks võimalik kõige rohkem elektri arvelt kokku hoida. Üpris raske on kordajaid täpselt paika saada, sest erinevate päevade lõikes muutub elektri börsihind suures ulatuses. Erinevate päevade kordajad a ja b , mille puhul tekib suurim rahaline sääst võivad erineda üksteisest drastiliselt. Siin esineb ka selle algoritmi peamine probleem. Kui leitavad nivood L_{max} ja L_{min} ei vasta osade päevade börsihindadega, siis jäävad need päevad vahele.

Tabeli 4.1 näitena selgub, et laupäeval toimub elektri laadimine akudesse, kuna $L_{min} > F(t)$. Samas akudest elektri kasutust ei toimu, kuna mitte ühelgi hetkel selle päeva jooksul ei kehti võrratus $L_{max} < F(t)$. Pühapäevaks on akudes järel 3 kWh elektrienergiat, kuid ka siis ei kehti ühelgi tunnil eelnev võrratus. Alles esmaspäeval kehtib see taas ning akud saab tühjaks laadida. Nii jäi vahele kaks süsteemi töötuklit ning nendel kahel päeval see algoritm raha ei säästa, sest on ootetalitluses.

Tabel 4.1. Näide võimalikust probleemist

	ost (senti)	kasutus (senti)	Kasum (senti)	Jääk (kWh)
reede	7.7	16.8	9.1	0
laupäev	7.8	0	-7.8	3
pühapäev	0	0	0	3
esmaspäev	0	17.3	17.3	0
teisipäev	6.1	11.2	5.0	0

Vaadates neid andmeid terve uuritud 2014. ja 2015. aasta ulatuses, jäävad tihti vahele nädalavahetuste ja ka osade tööpäevade energia salvestamise/tühjendamise töötsüklid. Nädalavahetustele võib ka eraldiseisvad nivood L_{max} ja L_{min} määrata, kuid ka siis erinevad erinevate nädalavahetuste vähimad ja suurimad hinnad kordades ning taaskord jäävad osad päevad vahele. Seega erilist säästu sealt ei teki.

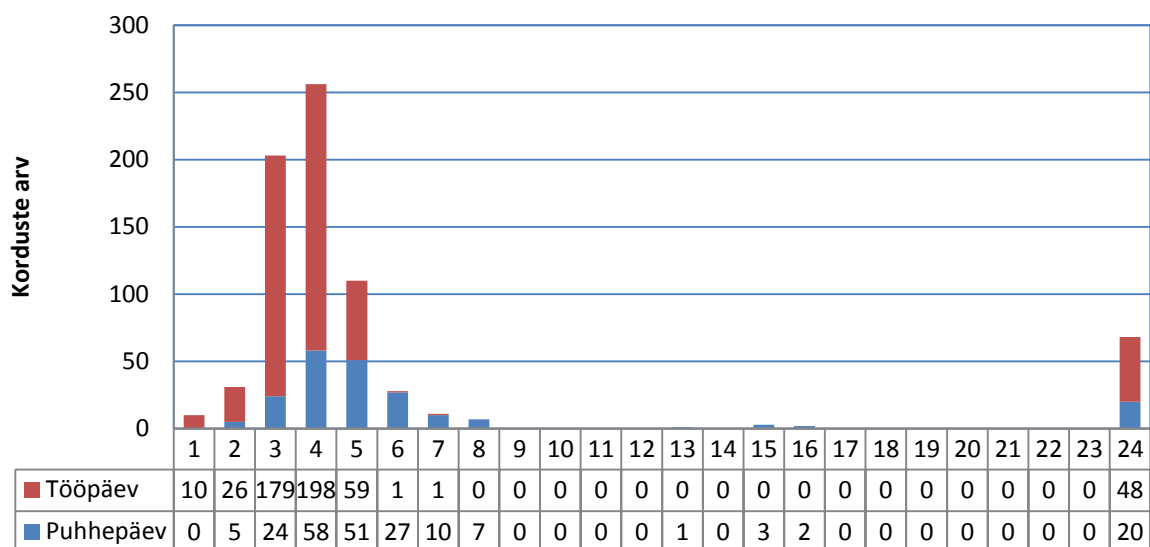
Teine probleem tekib siis, kui L_{min} suurus on viidud liiga kõrgeka sooviga vähendada vahelejäävate töötsüklite hulka. Kuigi süsteemi töötsükel toimub, siis tihti asutakse akusid laadima päeva esimesel tunnil, kus elektri hind on enamasti tunduvalt kõrgem kui päevane vähim hind, kuid sellegi poolest kehtib $L_{min} > F(t)$. Visuaalselt on see hästi nähtaval joonisel 4.1. Süsteemi laadimine toimub esimesel hetkel kui börsihind on alla madalama hinnanivoo L_{min} . Süsteem laeb akud täis kell 0:00 – 1:00, kuid odavaim elektri börsihind on sellel päeval kell 3:00 – 4:00.

4.3. Ajapõhine kombineeritud algoritm

4.3.1. Ajal põhineva statistika kasutamine

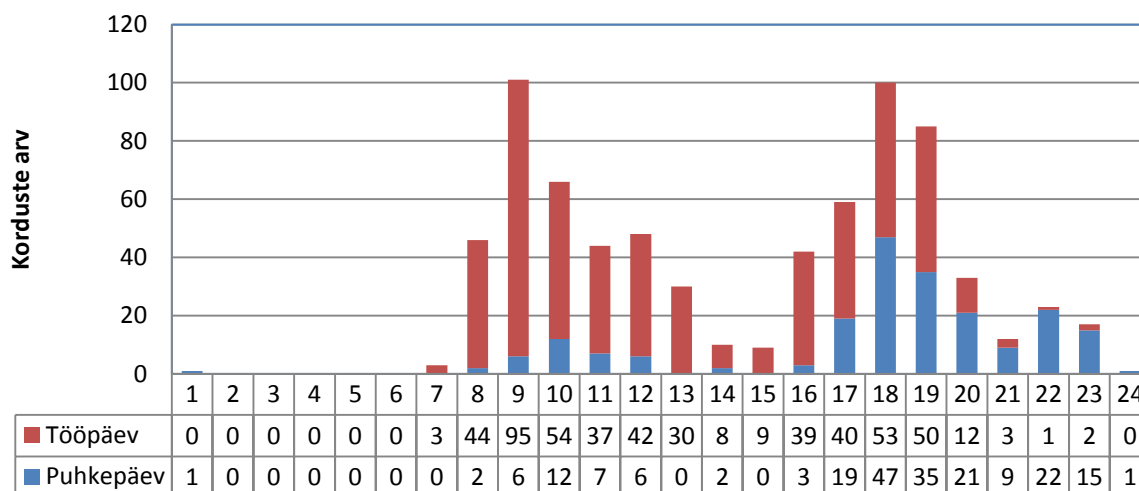
Teine viis tund-ette reaaliajapõhiselt elektrit osta on kasutades ajal põhinevat statistikat. See tähendab, et elektri ostmiseks tuleb määrata kindlaks kindel kellaaeg kuna on statistiliselt kõige suurem tõenäosus, et elektri hind on madalaim. Võrreldes seda meetodit elektri hinna statistika kasutamisega on tulemus täpsem, kuna elektri hind kõigub erinevate päevade lõikes kordades, kuid madalaim hind jääb enamasti samasse aega olenemata päevast. Suurima tõenäosusega võib väita, et järgmise päeva odavaima elektri periood on hommikul enne inimeste ärkamist.

Tuginedes leitud statistilistele tulemustele võib päevas ära märkida ka mitmeid kellaaegu, millal on elektri ost võrgust kõige kasulikum. Samas on võimalik erinevused sisse viia ka tööpäevade ja puhkepäevade eristamisega, kui nendel päevadel langeb madalaim hind statistiliselt erinevasse aega. Siiski leiti töös, et Eesti NPS elektri hinna miinimum aastatel 2014 - 2016 ei erine eriti palju päevade lõikes (joonis 4.3). Statistiliselt on kõige kasulikum elektrit salvestada hommikul kell 3:00 kuni 4:00. Selles vahemikus asub elektri vähim hind 35% kõigist päevadest, ehk 2 aasta jooksul 256 korda. Selgus ka see, et tööpäevade ja puhkepäevade puhul asub statistiliselt madalaim elektri hind samal kellaajal. Juhul, kui akude laadimine võtab rohkem aega kui 1 tund, siis on mõistlik seada laadimise ajaks kell 2:00 kuni 5:00 vastavalt vajadusele.



Joonis 3.3. Elektri madalaima hinna paiknemine ööpäevas aastatel 2014 ja 2015

Kuna päeva suurima hinna kellaaeg kõigub palju suuremas vahemikus kui madalaim hind, on aku tühendamisel mõistlik ajalist perioodi mitte määrata. Üpris suur vahe on ka puhkepäevade ja tööpäevade maksimum hinna paiknemises ajaliselt (joonis 4.4). Tööpäevadel jääb maksimum hind kella 8:00 ja 9:00 vahele hommikuperioodil, puhkepäevadel seevastu aga 17:00 kuni 18:00 õhtusel perioodil. Pikema perioodi jooksul annab suurema säästu, kui jätta meelde akude laadimisel olev elektri hind. Seda arvestades toimida hinnapõhiselt ning nihutada elektri hinda, millal toimub akude tühendamine ülespoole vastavalt akude mahule ja elektri börsihinna kõikumisele.



Joonis 4.4. Suurima hinna paiknemine ööpäevas aastatel 2014 ja 2015

4.3.2. Algoritmi töö kirjeldus

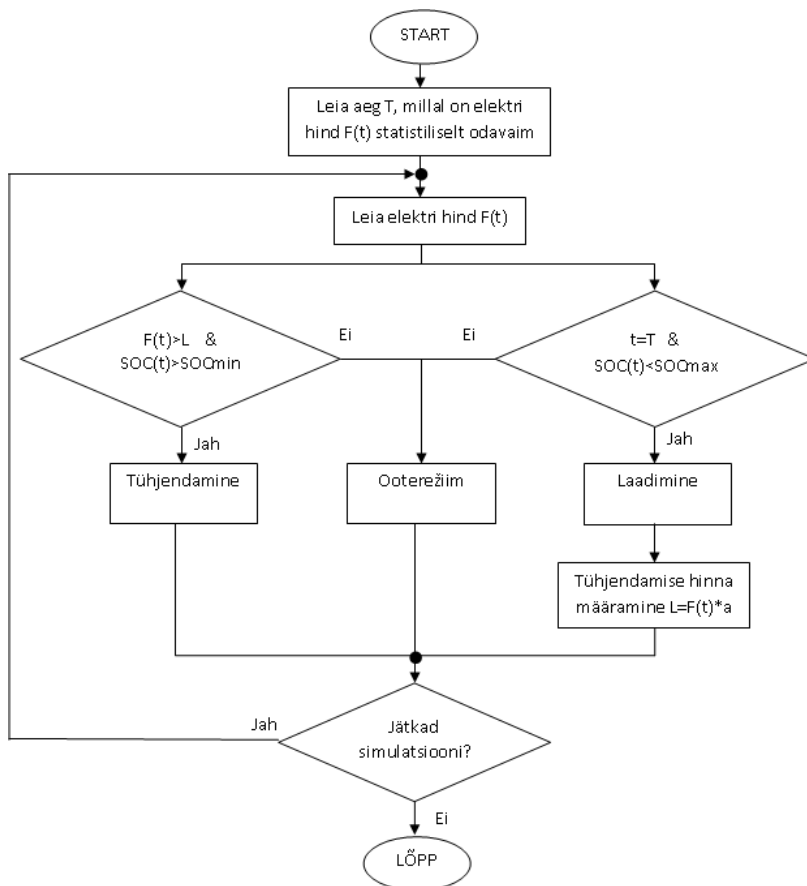
Esmalt leitakse kellaaeg T , mille korral on statistiliselt kõige tõenäolisem, et elektri hind $F(t)$ on selle päeva madalaima väärtusega. Selleks võib aja T algoritmile ette anda manuaalselt või toetudes statistikale (joonis 4.3), kus leitakse mingi kindla eelnenud perioodi jooksul, näiteks aasta, $F(t)_{\min}$ kõige tõenäolisem paiknemine. Sellele järgneb algoritmi tsükliline osa. Esmalt leitakse elektri hetkehind $F(t)$. Kontrollitakse, kas kellaaeg vastab statistiliselt madalaima elektri hinnaga ajale, mille korral otsustatakse kas akusid asutakse laadima või tühjendama. Seejärel oodatakse järgmist tundi ning tsüklil kordub otsust peale.

Juhul, kui $t = T$ ehk hetke aeg on sama mis leitud statistiliselt madalaima hinnaga aeg, on võimalik jätkata akude laadimisega võrgust. Esmalt toimub kontroll kas $SOC(t)$ (*state of charge*) on madalam kui SOC_{\max} , mis väljendab maksimaalset akude laetust, mida ei tohi ületada, sest muidu võib akude eeldatav eluiga lüheneda. Kui $SOC(t) < SOC_{\max}$ kehtib, alustatakse laadimisega ning alaldi ühendatakse akudega. Samal ajal arvutab süsteem välja elektri hinnaläve L , millest suurema hetkehinna korral on akude tühjendamine mõistlik valemiga (4.3). Kordaja a on leitud katseliselt ning see jääb enamasti vahemikku $1 < a < 2$. Mida suurem on päevane elektri hinna kõikumine seda suurem on a . Kui päevase F_{\min} ja F_{\max} vahe on kahekordne, siis katsetustel jääb see väärtus vahemikku $1,2 < a < 1,5$ olenevalt akude mahust. Kui akud on täis ehk $SOC(t) < SOC_{\max}$ ei kehti, siis akusid ei laeta ning süsteem läheb üle ootetalitlusele, kus oodatakse järgmist tundi.

$$L = F(T) \cdot a \quad (4.3)$$

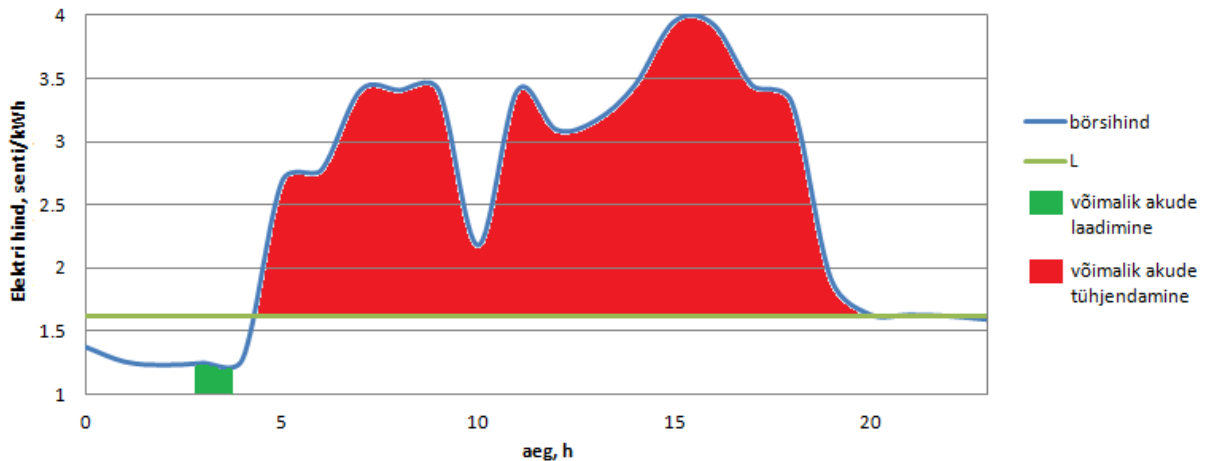
kus L - elektri kasutuse ehk salvesti tühjendamise hinnanivoo,
 $F(T)$ - akude laadimisaja T elektri hind,
 a - vähima hinna kordaja, $a > 1$.

Juhul, kui $t \neq T$, siis kontrollitakse kas akusid on võimalik sellel ajahetkel tühjendada. Selleks peab kehtima kaks võrratust. Esmalt, kas hetkehind $F(t)$ on suurem kui laadimisel arvutatud hinnalävi L . Teiseks, peab kehtima $SOC(t) > SOC_{min}$. SOC_{min} tähistab akudele seatud minimaalset laetuse taset, mis on vajalik kuna akude täiesti tühjaks laadimisel on nende eluiga tunduvalt lühem. Pliiakude puhul on SOC_{min} väärtus enamasti 70% või suurem, et tagada kulutõhusam tulemus. Kui need võrratused kehtivad ühendatakse akudega inverter ning kodumajapidamise elektrivarustuse tagavad akud elektrivõrgu asemel. Kui võrratused ei kehti liigub süsteem ooteseisundisse ning ootab järgmist tundi, kus suurema elektri hinna korral oleks võimalik akusid tühjaks laadida. Algoritmi plokk skeem on kujutatud joonisel 4.5.



Joonis 4.5. Ajapõhine tund-ette salvestamise algoritm

Näide ajapõhise algoritmi kasutamisest asub joonisel 4.6. Salvesti laadimine toimub, kui kehtib $SOC(t) < SOC_{max}$. Selles näites kordaja $a = 1,3$. Võimalik elektri kasutamine akudest ehk akude tühjendamine algab kohe, kui $F(t) > L$ ning toimub kuni kehtib $SOC(t) > SOC_{min}$. Kui selle konkreetse päeva ajapõhist algoritmi võrrelda hinnapõhise algoritmiga saab ilmselt suurema rahalise võidu kasutades hinnapõhist algoritmi. Siiski, kui liita kokku kõikide päevade säästud on tulemus vastupidine, kuna ajapõhine algoritm töötab palju stabiilsemalt.

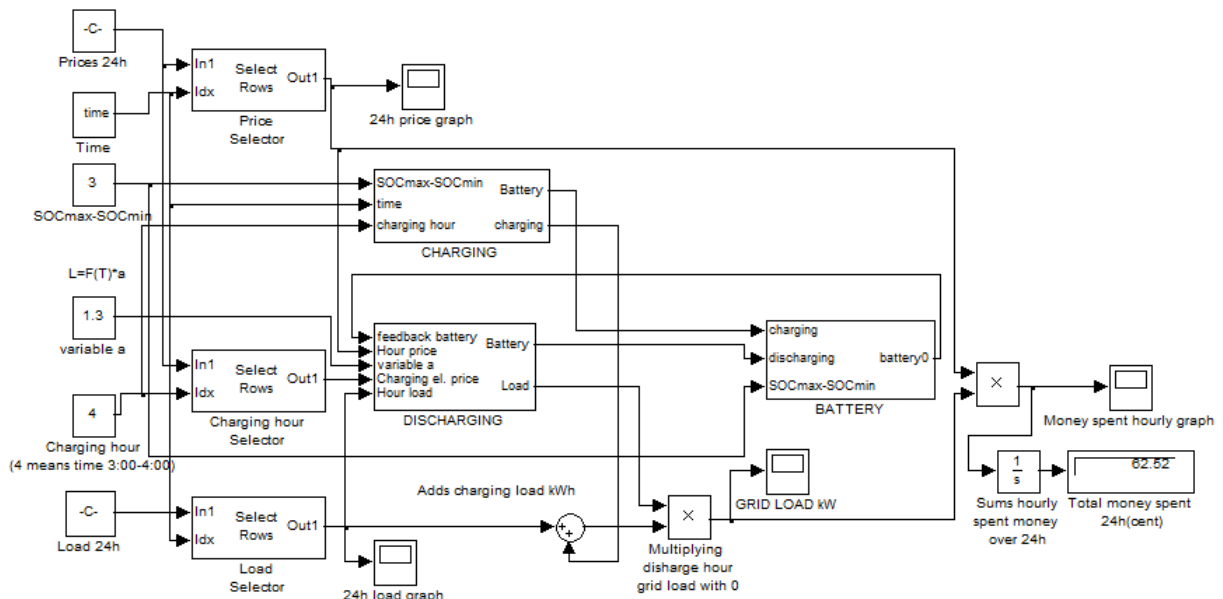


Joonis 4.6. Näide ajapõhise algoritmi kasutamisest

4.4. Algoritm Matlab Simulink-is

Üheks selle lõputöö ülesandeks oli uurida matemaatika tarkvara Matlab Simulink kasutamist BCDS juhtimise algoritmi koostamisel. Leida, kas see annab sarnased tulemused võrreldes teiste programmidega. Lisaks võrrelda Simulinkis saadud tulemusi teiste programmidega ning vaadata, kas päevased säästud on samad, kui kasutada sama algoritmi. Teine programm, mida varsemalt kasutati ja millega võrreldi tulemusi oli MS Excel.

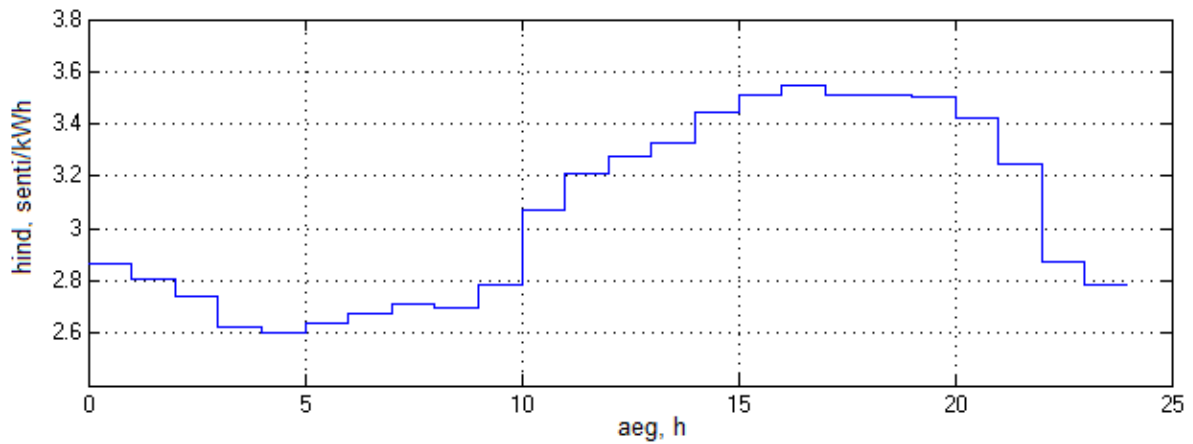
Selleks, et saada parem ülevaade seadme tööst, kasutades reaaliajapõhist tund-ette juhtimist ning ajapõhist statistikat sai koostatud programm Matlab Simulinkis kasutades (joonis 4.7). Selle programmiga on võimalik jälgida kõiki signaale ja nende suurus. Hea ülevaate saab ka erinevatest hinna ja koormuse graafikutest terve päeva lõikes.



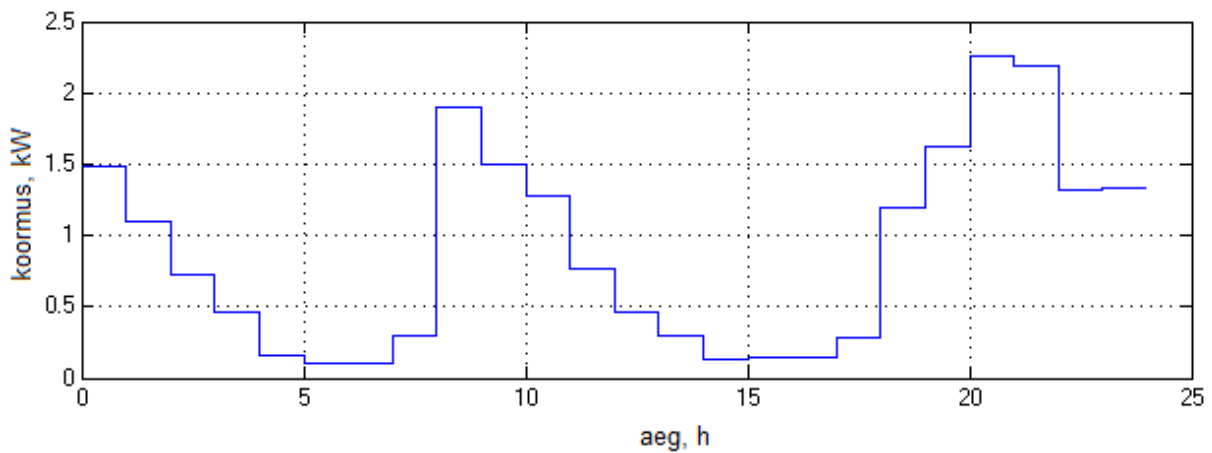
Joonis 4.7. Reaalajapõhine tund-ette energiasalvestamise algoritm Matlab Simulink-is, mis kasutab ajapõhist statistikat

Algoritmi tööks on vaja ette anda kaks massiivi: päeva elektri hinnad (*Prices 24h*) ja elektri tarbimise koormused (*Load 24h*) 24 tunni jooksul. Kui nendele massiividele lisada ajalised parameetrid, siis graafiliselt on need välja toodud vastavalt joonisel 4.8 ja joonisel 4.9. Kuigi ette on antud kõigi 24 tunni elektri hinnad, siis programm arvestab ainult elektri hetkehinda, ehk süsteem toimib reaalajapõhiselt ühe tunni kaupa. Selleks on kasutusel *price selector*, *charging hour selector* ja *load selector*, mis valivad vastavalt ajale elektri hinna, laadimistunni ja koormuse. Lisaks tuleb süsteemile ette anda tühjendamise sügavus, ehk mitu kWh on võimalik ühe töötükli jooksul akusid laadida.

Antud juhul on akupanga mahuks märgitud 21 kWh. Süsteemi SOCmax – SOCmin = 3kWh mis on võimalik ühe töötükliga laadida, seega SOCmin on 86% ehk 18 kWh. Süsteemi DoD on 14%, mis teoorias annab sellele maksimaalse eluea. Hinna kordaja, valemite a , abil leitakse elektri hind $L = F(t) * a$, millest kõrgema hinnaga perioodil toimub energia kasutamine akudest. Laadimistund 4 tähistab seda, et kella 3:00 kuni 4:00 toimub akude laadimine, kuna siis on statistiliselt kõige odavam elektri hind (vt peatükk 4.3). Kui seda päeva eraldiseisvalt vaadata, oleks natuke odavam laadida kell 4:00 kuni 5:00, kuid reaalajapõhisel tund-ette programmil pole seda võimalik ette teada. Statistiliselt madalaima elektri hinna aeg on leitud eelnevalt selle aasta elektrihindade statistikale tuginedes.

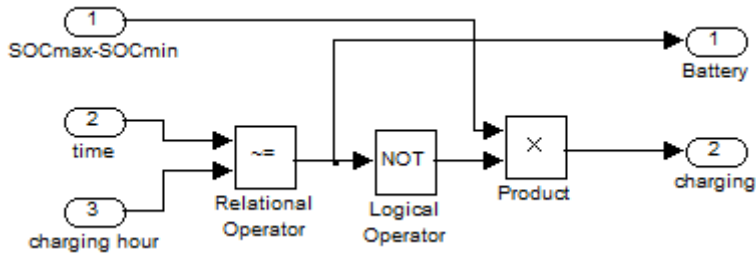


Joonis 4.8. Programmile ette antud elektri hinna päevane kõikumine börsil



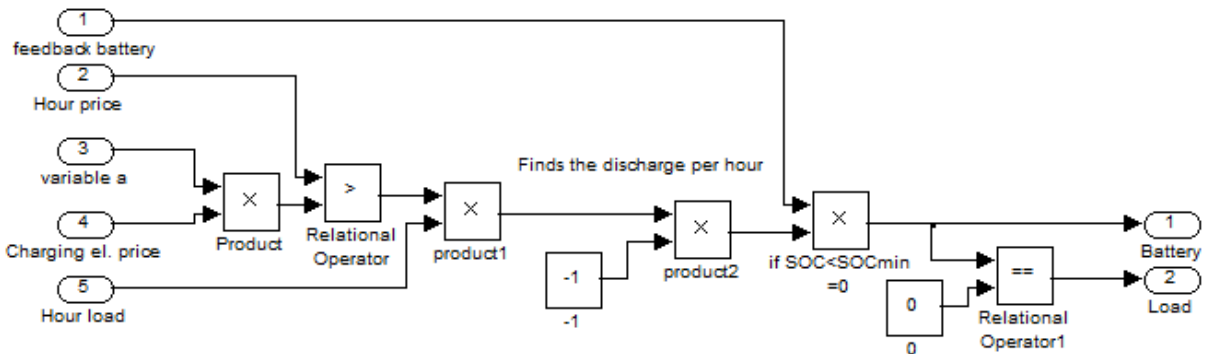
Joonis 4.9. Tüüpilise tööpäeva korteri elektritarvitite tarbimise võimsus võrgust

Et süsteem oleks paremini jälgitav kasutades laadimise, tühjendamise ja aku jaoks alamsüsteeme. Alamsüsteemi *CHARGING* eesmärgiks on sobitada ette antud laadimistund ajaga (joonis 4.10). Kui aeg (*time*) ja laadimistund (*charging hour*) kattuvad, katkeb signaal mis saadetakse akusse (*battery*). Loogikatehte NOT abil tekib signaal, mis võimaldab edasi saata laadimise mahu $SOC_{max} - SOC_{min}$ akude laadimisele (*charging*). Süsteem on üles ehitatud nii, et laadimine kestab iga päev ühe tunni aku laadimise mahu ulatuses. Nii saab leida lõpliku elektri tarbimise võrgust ning arvutada võimalikku rahalise säästu, mis tuleneb elektri salvestamise süsteemi kasutamisest.



Joonis 4.10. Alamsüsteem *CHARGING*

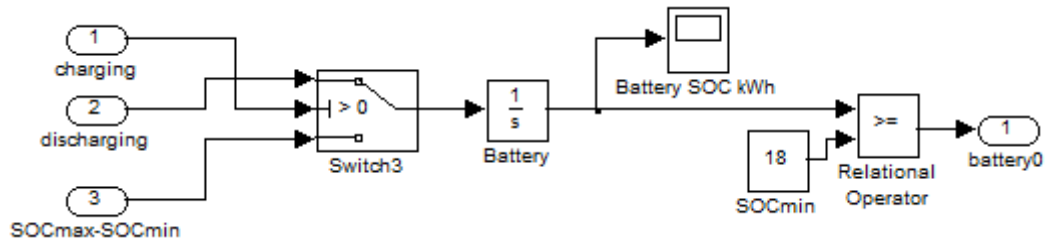
Alamsüsteemi *DISCHARGING* eesmärgiks on leida periood, millal toimub akude tühjaks laadimine ning samal ajal edastada akule ka tarbimise koormused ehk kui kiiresti akut selle perioodi jooksul tühjaks laetakse (joonis 4.11). Esmalt leitakse hinna kordaja a ja laadimistunni hinna $F(t)$ abil elektri hind $L = F(t) * a$ kasutades plokki *product*. Kui selle tunni elektri hind (*hour price*) on suurem kui eelnevalt leitud L on võimalik edasi saata signaal, mis tähendab et akusid on võimalik tühjaks laadida. Kasutades plokki *product1* leitakse selle tunni koormus, mis seejärel ploki *product2* abil korrutatakse läbi -1 , kuna tegemist on tühjendamise mitte laadimisega. Seejärel toimub kontroll akust tuleneva info (*feedback battery*) põhjal ega $SOC(t) < SOCmin$. Edasi saadetakse vastavad tühjendamise koormuse signaalid akule (*battery*). Kui võrratus $SOC(t) < SOCmin$ kehtib saadetakse *relational operator1* abil edasi signaal, et koormus võetakse võrgust, mitte akudest.



Joonis 4.11. Alamsüsteem *DISCHARGING*

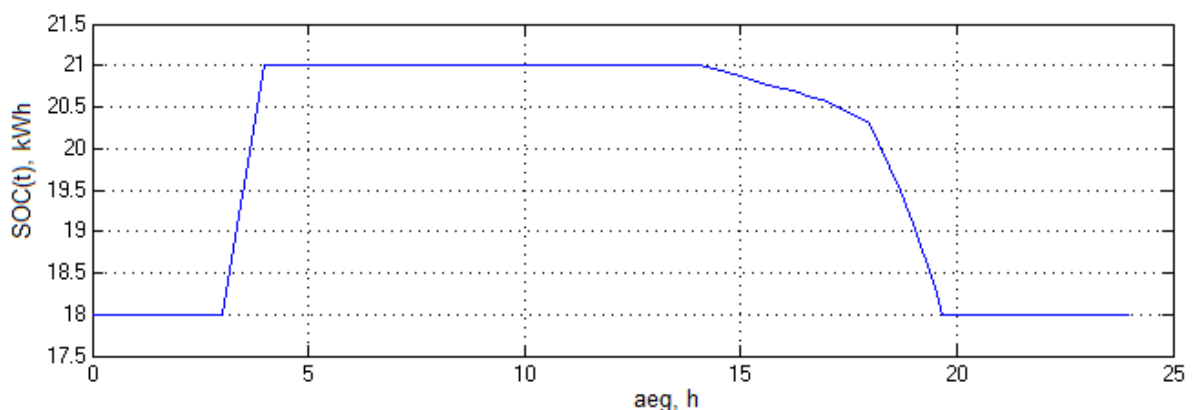
Alamsüsteemi *BATTERY* eesmärk on jälgida aku laetuse taset $SOC(t)$ (joonis 4.12). Akut iseloomustab selles süsteemis integraator (*battery*), kus $SOC(t)$ muutub vastavalt lüliti *switch3* väljundile. Lülitit juhitakse signaaliga, mis tuleb alamsüsteemilt *CHARGING*. Juhul, kui juhtsignaal puudub laetakse akut vastavalt laadimise mahule $SOCmax - SOCmin$. Kui juhtsignaal tekib, siis lülitub lüliti ümber tühjendamisele ning tühjenduse koormused tulenevad alamsüsteemilt *DISCHARGING*. Pidevalt toimub kontroll, et aku maht ei langeks

alla SOCmin, mis on piiratud hetkel 18 kWh. Juhul, kui SOCmin langeb alla 18 kWh, siis saadab *relational operator* signaali alamsüsteemi *DISCHARGING*, mis lõpetab tarbimise akudest ning taastab elektri tarbimise võrgust.



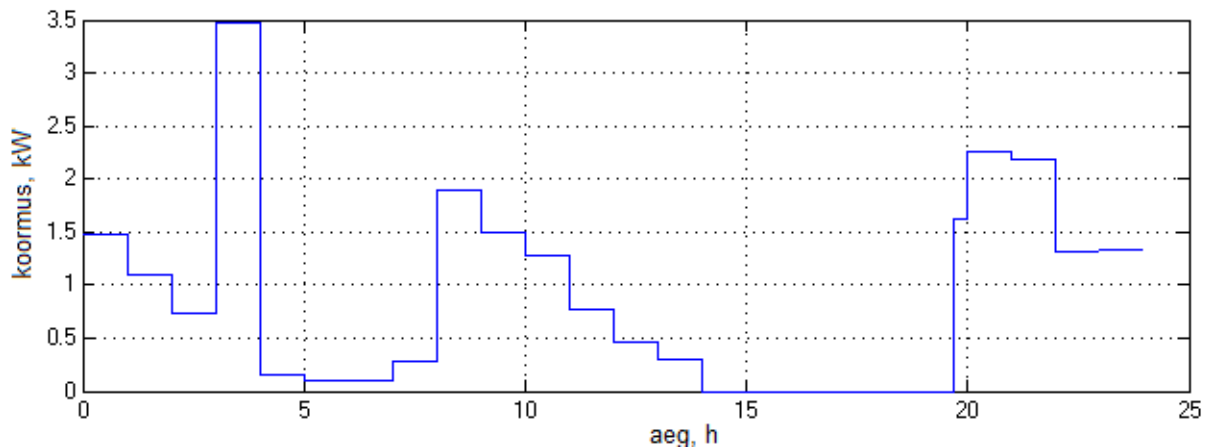
Joonis 4.12. Alamsüsteem *BATTERY*

Aku laetuse tase ajas on näha jooniselt 4.13. Kui arvestada, et SOCmax = 100% siis sellele vastab 21 kWh elektrienergiat. Kuna SOCmin = 86%, siis seab see alumiseks piiriks 18 kWh. Päeva alguses kehtib võrdlus $SOC(t) = SOCmin$. Laadimise ajaks on määratud neljas tund, kus statistiliselt asub kõige tihedamini päeva madalaim elektri hind. Aku laadimine algab kell 3:00 ning lõpeb 4:00. Laadimise lõppedes eeldatakse, et $SOC(t) = SOCmax$ ehk akud on maksimaalselt täis laetud. Edasi jääb süsteem ootama aega millal elektri hetkehind ületab akude tühendamise hinnataset $F(t) > L$. Kuna kella 4:00 kuni kella 14:00 see võrratus ei kehti, püsib süsteem ooteseisundis. Alates kella 14:00 ületab hetkehind hinnataseme L ning tarbimine lülitatakse ümber võrgust akudele. Nagu jooniselt on näha, siis pärastlõunane elektri tarbimine on madal ning aku tühjeneb aeglaselt. Alates õhtul kella 18:00 tõuseb märgatavalt elektri tarbimine akudest kuna elektri tarbimine kodus kasvab märgatavalt. Paarkümmend minutit enne kella 20 lõpetab süsteem akude tühendamise, kuna $SOC(t) > SOCmin$ ei kehti enam ning elektri tarbimine lülitatakse akudelt tagasi võrku.



Joonis 4.13. Aku laetuse tase ajas

Võrgust tarbitava elektri võimsus ajas on välja toodud joonisel 4.14. Graafikult on näha, et kell 3:00 kuni 4:00 on süsteemi tarbimisvõimsus 3,47 kW, millest 3 kW moodustab akude laadimine ning 0,47 kW teised elektriseadmed, mis tavaolukorras sel perioodil elektrit tarbivad. Alates kell 14:00 on võrgust tarbitav võimsus 0 kW, kuna elektri hind on piisavalt kõrge, et efektiivselt süsteemi kasutada.



Joonis 4.14. Võrgust tarbitav võimsus kasutades reaaliajapõhist tund-ette algoritmi

Korrutades elektri hinnad ja tarbimine võrgust selgub, et uuritava päeva jooksul kulub elektrile 62,52 senti kui on kasutatud reaaliajapõhist tund-ette algoritmi akude laadimisel ja tühendamisel. Ilma BES süsteemi kasutamata oleks elektrile kulunud 65,17 senti, seega säästeti antud päeval 2,65 senti ehk 4% elektriarvest. See sääst on väike kuna päevane vähima ja suurima hinna vahe on uuritud päeval vaid 0,95 senti.

Täpselt samasugused tulemused sain ka kasutades MS Excelit. Võrreldes Exceliga on *Scope* kasutades võimalik saada kiirelt ülevaade mis toimub erinevates süsteemi sõlmedes.

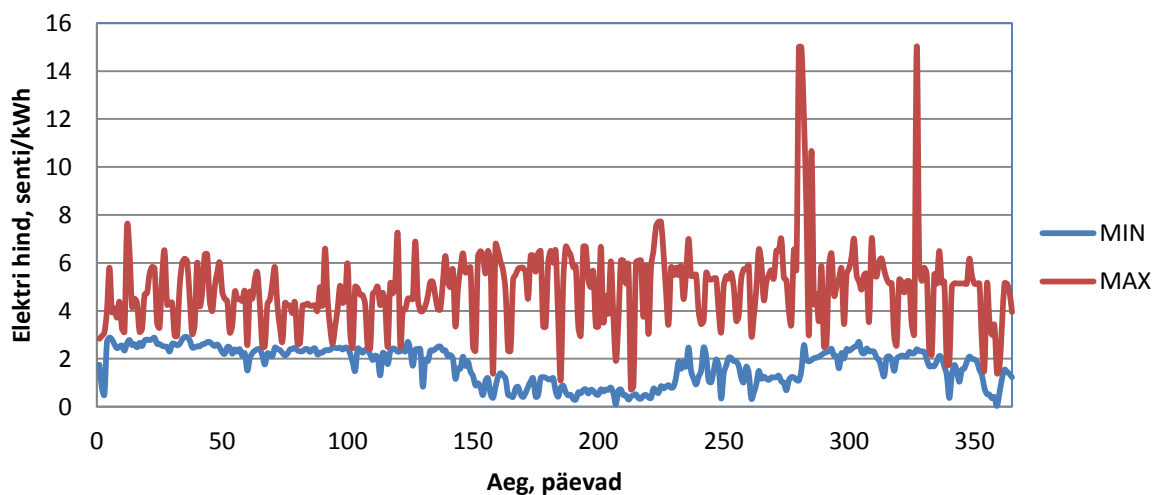
5. ENERGISALVESTI JUHTIMISALGORITMIDE TASUVUSE VÕRDLUS

5.1. Algandmed

Kuna pikema perioodi andmeid on oluliselt lihtsam analüüsida MS Excelit kasutades, siis tasuvusarvutused viidi läbi eelnimetatud tarkvara kasutades. Võrreldes MatLab-iga on MS Excelit kasutades tunduvalt lihtsam ning ülevaatlikum teha statistilisi arvutusi. Lisaks eelnimetatule on mugavam kasutada andmemassiive graafikute tegemiseks ning on rohkem võimalusi nende graafikute edaspidisel töötlemisel. Mõlemat programmi kasutades on lõpptulemused samad.

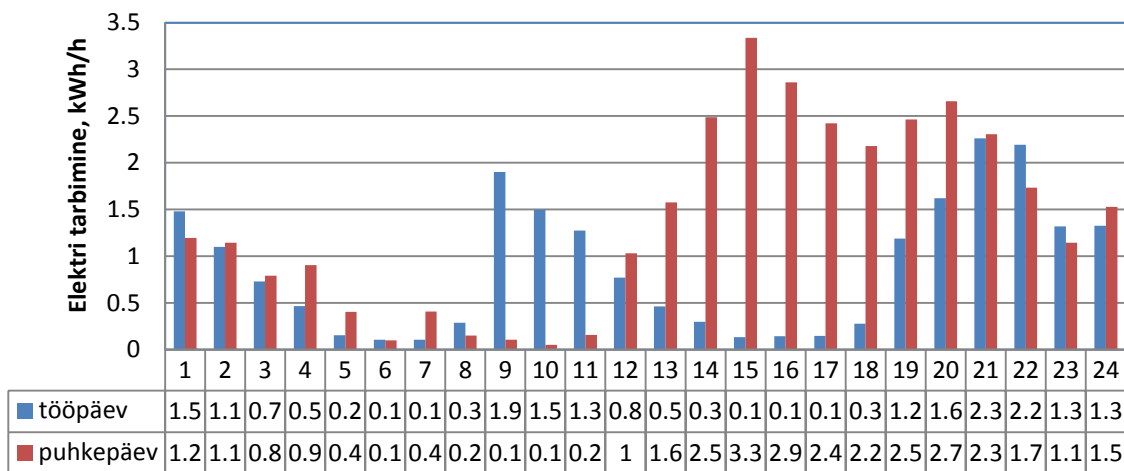
Peamine tegur, mis määrab kõikide uuritud algoritmide tasuvuse, on elektri hind. Selleks, et saada võimalikult suur võit elektri arvelt on vaja suurt elektri hinna kõikumist päeva lõikes. Kui arvestada, et päevase vähima ja suurima hinna vahe on 1 sent/kWh, siis tähendab see, et 3 kWh salvestamismahu juures on ideaalolukorras matemaatiliselt suurim võit vaid 3 senti. Reaalses olukorras on ilmselt võimalik säästa 1,5 senti selle päeva elektri hinnalt.

Kuna elektri hind muutub päevade lõikes kordades ei ole võimalik erinevate algoritmide tasuvuse üle otsustada ühte päeva kasutades. Kuna elektri hinnad on sõltuvas nii aastaegadest, kui ka töö- ja puhkepäevadest võtan kõikide algoritmide tasuvuse arvutamise aluseks 2015. aasta elektri hinnad Eestis. Joonisel 5.1 on välja toodud 2015. aasta vähimad ja suurimad hinnad [6].



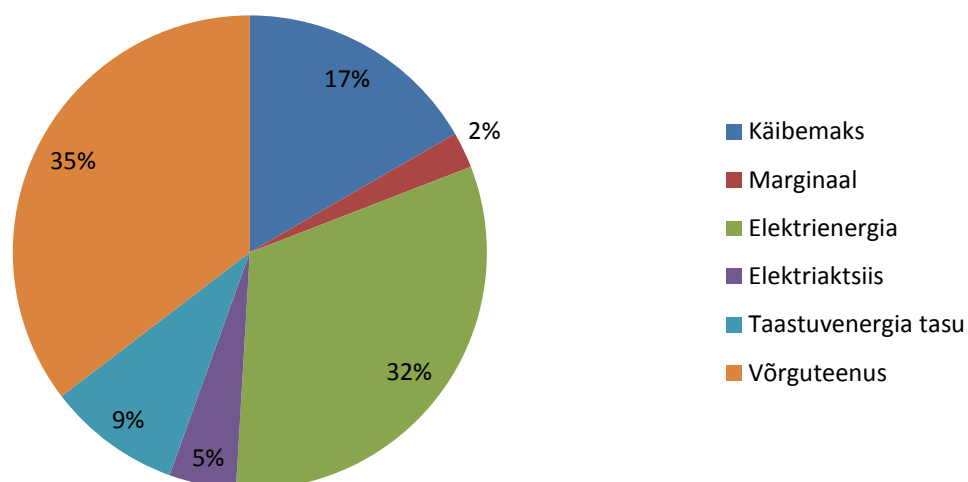
Joonis 5.1. Miinimum ja maksimum elektri hinnad Eestis aastal 2015

Lisaks elektri hinna kõikumisele on erinevate algoritmide kasutamisel tähtis arvestada ka koormust, ehk inimeste elektri tarbimisharjumusi (joonis 5.2). Kuna enamasti inimesi käib tööl või koolis, siis on tööpäevade ja puhkepäevade elektri tarbimisharjumused täiesti erinevad. Tööpäevadel asuvad koormuse tipud hommikul kell 8:00-10:00 ning õhtusel perioodil kell 20:00-22:00. Samas nädalavahetustel on elektri tarbimise tipp pärastlõunal kell 14:00-15:00. Kuna puhkepäevadel on inimesed enamasti pikemat aega kodus, siis nad kasutavad rohkem ka erinevaid elektriseadmeid. Tänu sellele on puhkepäevade elektri tarbimise suurus enamasti suurem kui tööpäevade omad.



Joonis 5.2. Tööpäeva ja puhkepäeva energia tarbimise suurus. [7]

Tuleb arvestada sellega, et elektri börsihind moodustab vaid osa elektri arvest. Lõpliku elektriarve moodustavad: elekter, võrguteenus, käibemaks, aktsiis, taastuenergia tasu ning elektri müüja lisatud marginaal (joonis 5.3) [8]. Siiski elektri hinnad erinevad olenevalt müüjast ja elektripaketist. Lisaks erinevad erinevates Eesti piirkondades ka võrguteenuste hinnad. Seetõttu pole võimalik täiesti täpselt elektri börsihinna suhet elektriarvesse välja tuua, kuid rusikareegilina moodustab see arvest 1/3. Seega lõpliku säästu leidmiseks tuleb elektri börsihinnalt saadud sääst korrutada kolmega.



Joonis 5.3. Elektri lõpphinna moodustamine tarbijale

5.2. Elektriarvete võrdlus kasutades erinevaid algoritme

Selleks, et võrrelda erinevate algoritmide kasutamist süsteemis akude laadimisel ja tühendamisel kasutatakse töös Excelit ning kõikide algoritmide koodid on kirjutatud kasutades Visual Basicut. Arvutamisel on võetud aluseks 2015. aasta NPS elektri börsihinnad Eestis. Elektri koormusena arvestatakse tavalise kodumajapidamise elektri tarbimise graafikut, kusjuures eristatakse elektri tarbimise harjumusi tööpäevadel ning puhkepäevadel. Kokku võrreldakse nelja erinevat algoritmi juhuga, kus BES süsteemi ei kasutata (tabel 5.1).

Tabel 5.1. Erinevate algoritmide kasutamise mõju ainult elektri eest tasumisele

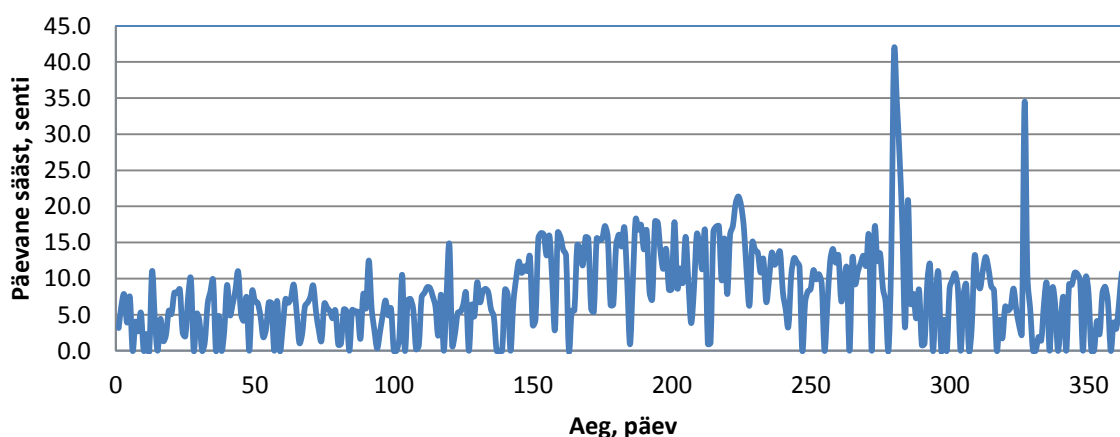
	2015. aasta elektri tasu kasutades erinevaid algoritme (sentides)				
	ilma	päev-ette		tund-ette	
		8 esimest tundi	min kõigi seast	hinnapõhine	ajapõhine
KOKKU	27362.0	24147.5	24466.3	24889.5	24744.8
SÄÄST	0.0	3214.5	2895.6	2472.5	2617.2
sääst (%)	0.0	11.7	10.6	9.0	9.6

Eelnevas tabelis on arvestatud ainult elektri komponendi hinda tervest lõpptarbijale mõeldud elektriarvest. Et arvud oleks selgemad, on muudetud sendid eurodeks ning lisatud võrguteenus, riigimaksud ja müüja marginaal, et saada umbkaudne ülevaade, milline on selle majapidamise reaalne elektriarve 2015. aastal (tabel 5.2).

Tabel 5.2. Erinevate algoritmide kasutamise mõju lõpptarbija elektriarvele

	2015. aasta elektriarve kasutades erinevaid algoritme (€)				
	ilma	päev-ette		tund-ette	
		8 esimest tundi	min kõigi seast	hinnapõhine	ajapõhine
KOKKU	820.9	724.4	734.0	746.7	742.3
SÄÄST	0.0	96.4	86.9	74.2	78.5
sääst (%)	0.0	11.7	10.6	9.0	9.6

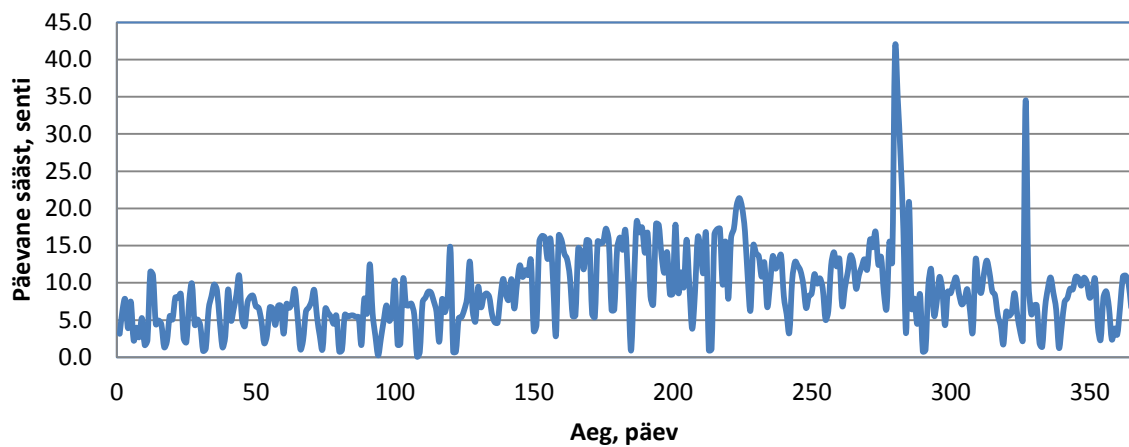
Kogu 2015. aastal kulub elektrile selle majapidamise tarbimist arvestades 820,90 eurot, mis tähendab, et keskmine elektriarve kuus on 68.40 eurot. Nagu eeldati on võimalik saada parim sääst elektriarvelt kui elektri hinnad on päev ette teada, sest alati on teada eeloleva päeva odavaima elektri paiknemine ajas, et akusid laadida. Samuti on eelnevalt teada perioodid, millal on kõige kõrgem hind ning paigutada akude tühjaks laadimine sellese perioodi. Päev-ette algoritmide omavahelises võrdluses on kõige suurem sääst, kui vähima hinna paiknemine otsitakse päeva esimese 8 tunni seast. Seda algoritmi kasutades on arvutuste kohaselt võimalik säästa 11,7% elektriarvelt, mis on aastas 96,40€. Kui algoritm otsib vähima hinna kõigi 24 tunni hulgast, siis leidub palju päevi, kus see on kell 23:00 kuni 24:00. See tähendab seda, et antud päeva laadimistsükkel jääb vahele, kuna akud laetakse täis sellel päeval ning tühjaks järgmisel päeval. Selgema pildi saab vaadates päevaste säästude statistikat (joonis 5.4). Terve 2015. aasta jooksul esineb päevi kus selle tulemusena süsteemi töösükkel jääb vahele. Siiski suvel on neid mõnevõrra vähem kui talvekuudel.



Joonis 5.4. 2015. aasta päevaste säästude graafik kasutades päev-ette algoritmi 24h

Kasutades 2015. aastal BES süsteemi juhtimiseks päev-ette algoritmi, mis otsib päevase elektri miinimumhinna esimese 8 tunni seast töösükleid vahele ei jää (joonis 5.5). Graafikul

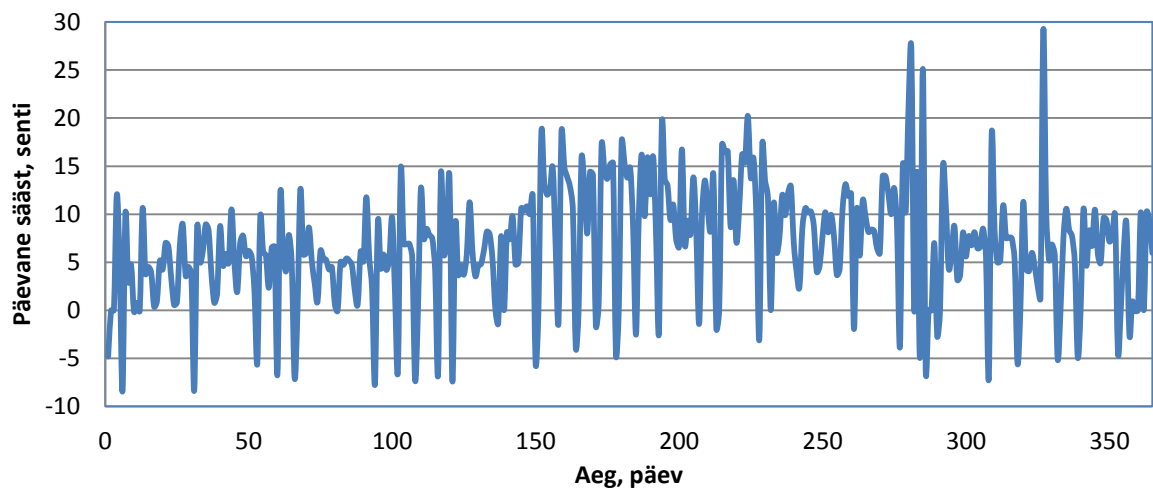
on näha küll madalama säästmise võimalusega perioode, kuid need ei lange kunagi allapoole 0,1 senti.



Joonis 5.5. 2015. aasta päevaste säästude graafik kasutades päev-ette algoritmi 8h

Kuigi esialgsel vaatlusel võib päevaste säästude graafik tunduda korrapäratu, toimuvad mitmed asjad vägagi korrapäraste intervallide järel. Selgelt on eristatavad 7 päevased tsüklid. Puhkepäevadel on süsteemi kasutamisega saadud säästud reeglina kordades madalamad, kui tööpäevade säästud. Kuni maikuu keskpaigani säästab süsteem keskmiselt 5 senti elektri hinnalt päevas. Suvekuudel elektri päevane vähima ja suurima hinna vahe aga suureneb, mis tagab võimaluse säästa rohkem raha kasutades elektri salvestamise lahendusi. Rahaline võit on natuke üle 10 senti päevas. Sügiskuudel kõiguvad erinevate põhjuste tõttu elektri hinnad ning sinna jäid 2015. aastal ka erakordselt kõrged hinnad. Kõrgeim tipp asub 7. oktoobril.

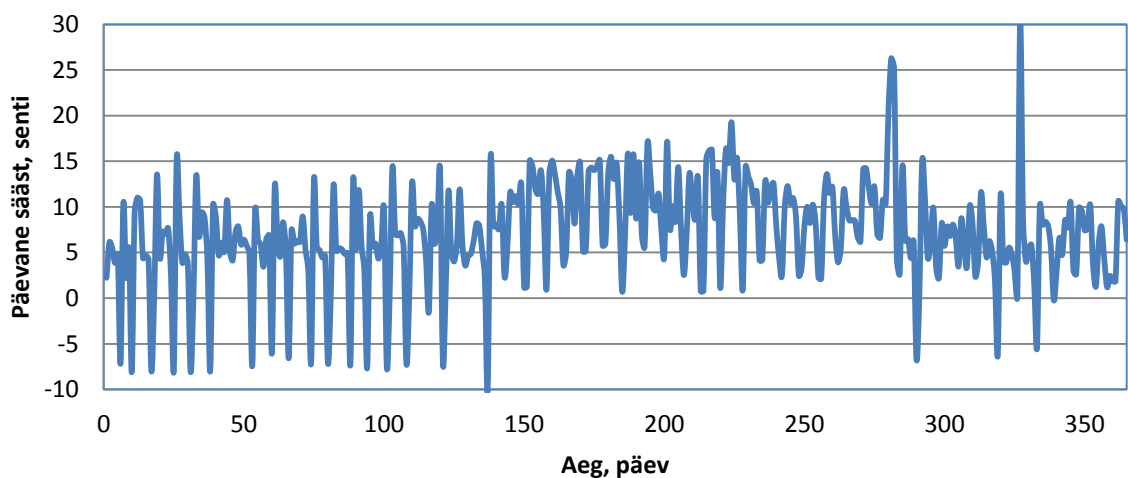
Minule üllatuseks toimisid raha säästmisel ka tund-ette algoritmid. Erinevalt päev-ette algoritmidest, kus on hinnad terve ööpäeva täpselt ette teada, kuna on odav elekter ja kuna kallis elekter, tegelevad reaaliajapõhised tund-ette algoritmid ennustamisega. Kuna ennustused põhinevad eelneval statistikal, leidub sageli päevi, kus ennustus ja reaalne tulemus ei lange kokku ning rahaline sääst puudub. Siiski kasutades hinnapõhist statistikat on võimalik aasta jooksul säästa 74,20€, mis teeb 9% elektriarest. Hinnapõhise statistika abil töötava algoritmi päevaste säästude graafik 2015. aasta jooksul asub joonisel 5.6. Selgelt on näha, et terve aasta jooksul esineb ühtlaselt selliseid päevi, kus akusid küll laaditakse, kuid ei tühjendata. Enamik nendest jääb nädalavahetuste perioodi.



Joonis 5.6. 2015. aasta rahalised säästud kasutades tund-ette hinnapõhist statistika

Veel parema tulemuse saab kui kasutada ajapõhist statistikat. Kui seada igapäevane akude laadimise periood vahemikku kell 3:00 kuni 4:00, on võimalik aasta lõppedes kokku säästa 78,50 € ehk 9,6% elektrikuludest.

Päevaste säästude graafikult on näha kui palju iga päev reaaliajapõhine tund-ette süsteem, mis kasutab ajapõhist statistikat raha säästab (joonis 5.7). Selgelt eristuvad ka suvine ja talvine periood. Talvel on päevased säästud väiksemad ning tihti leidub päevi, kus toimub laadimine, kuid tühjendamise jaoks jäävad hinnad liiga madalaks. Graafikul iseloomustab seda negatiivne sääst. Aku tühjendamine toimub enamasti järgmisel päeval, millega tekib väike säästu tipp, kuna sellel päeval elektrit akudesse ei osteta. Erinevalt hinnapõhise algoritmi kasutamisest ei esine siinkohal suvekuudel ühtegi päeva, kus süsteemi töösükkel jääb vahele.



Joonis 5.7. 2015. aasta rahalised säästud kasutades tund-ette ajapõhist statistika

5.3. Kasuteguri arvestamine

Kuna me ei ela ideaalses maailmas tuleb elektri salvestamise süsteemide juures arvestada ka kasuteguriga. Erinevate termiliste ning keemiliste protsesside tulemusel mingi osa elektrienergiast mis süsteemi juhitakse muundub ning hiljem saab vaid osa sellest elektrienergiast tagasi. Akude laadimisel ja tühjendamisel kehtib valem 5.1 [5]. Kuna eesmärk on vaadata süsteemi kui tervikut on kasutusel ainult üks kasutegur laadimise juures. Selles on liidetud kokku kõik energia salvestamisel, hoiustamisel ja tühjendamisel tekkivad kaod akudes, inverteris, juhtmetes jne.

$$SOC(t) = SOC(t - 1) + \eta * P_C(t) - P_D(t) \quad (5.1)$$

kus $SOC(t)$ - aku laetuse tase,
 $SOC(t - 1)$ - aku laetuse tase eelneval perioodil,
 η - kasutegur,
 $P_C(t)$ - laadimise võimsus,
 $P_D(t)$ - tühjendamise võimsus.

Ideaalses maailmas oleks kasuteguri η väärtus 1. Reaalselt jääb süsteemi kasuteguri suurus hinnanguliselt vahemikku 0,7 - 0,9, mille suurust mõjutab peamiselt valitud akude tüüp. Kuna erinevad akud on ka erinevate karakteristikutega ning need muutuvad ajas sh sõltuvad temperatuurist, on raske hinnata täpselt nende elektri laadimise, hoiustamise ja tühjendamise kasutegureid ilma konkreetsete süsteemis olevate akude puhul mõõtmisi tegemata.

Muutes elektri salvestamise süsteemi kasutegurit muutub ka rahaline sääst (tabel 5.3). Vähendades süsteemi kasutegurit muutuvad oodatult ka säästud elektriarvelt väiksemaks. Päev-ette algoritmide puhul muutub sääst negatiivseks, kui süsteemi kasutegur on umbes 0,35. Tund-ette reaalaja hinna algoritmide puhul muutub sääst negatiivseks kui kasutegur on 0,4. See tähendab, et kui süsteemi kasutegur on alla selle numbri, siis tuleb elektri eest lõpuks rohkem tasuda kui see oli enne BES süsteemi kasutamist.

Tabel 5.3. Säätatud raha sõltuvus süsteemi kasutegurist

KASUTEGUR	2015. aasta sääst elektriarvelt muutes süsteemi kasutegurit (€)			
	päev-ette		tund-ette	
	8 esimest tundi	min kõigi seast	hinnapõhine	ajapõhine
1	96.5	86.9	74.2	78.6
0.95	93.5	84.2	71.3	75.8
0.9	90.1	81.1	68.1	72.6
0.85	86.4	77.7	64.6	69.2
0.8	82.2	73.9	60.5	65.3
0.75	77.4	69.5	56.0	60.8
0.7	72.0	64.6	50.8	55.8

5.4. Süsteemi tasuvusaeg

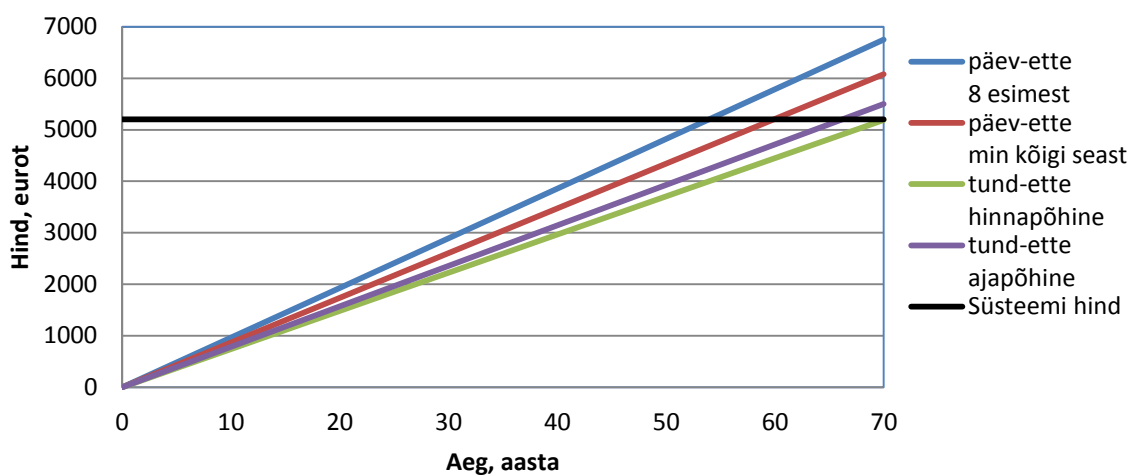
Tasuvusaja arvutuste aluseks võtan BES süsteemi, mille akude maht on 21 kWh hinnaga umbes 5200 eurot [5]. Arvestades, et akude eluiga on 14% (3 kWh) tühendamise juures 4000 töötükli teeb see süsteemi elueaks umbes 11 aastat eeldusel, et ühe päeva jooksul toimub üks laadimise ja tühendamise tsüklid ehk töötükkel. Kuna puuduvad andmed hoolduse, võimalike liseseadmete ja muude kulude kohta, siis on võetud arvesse vaid süsteemi maksumus. Kuna lähitulevikus pole oodata erilisi muudatusi elektri maksude osas ning Balti regiooni ei kerki ka uusi suuri elektri tootmise võimsusi, tuumaelektrijaamu, siis võib eeldada, et lähitulevikus sarnanevad elektri hinnad 2015. aasta elektri hindadele.

5200 eurone investeering 11 aasta peale tähendab, et süsteem peab aastas säästma üle 473 euro jõudmaks kinni maksta süsteemi ostuhinda. See tähendab, et elektri salvestamise süsteemiga saavutatav päevane sääst elektriarvelt peab olema vähemalt 1,3 eurot. Reaalselt on need arvud tunduvalt väiksemad isegi juhul, kui süsteemi kasutegurit mitte arvestada (tabel 5.4). Selgub, et isegi parimat algoritmi kasutades on praeguste elektri hindade juures võimalik säästa vaid 0,26 eurot päevas. Ainult nulli jõudmiseks on vajalik, et päevane vähima ja suurima elektri börsihinna vahe kasvaks keskmiselt 5 korda päev-ette algoritme kasutades ning 6 korda kasutades tund-ette reaalajapõhiseid algoritme. Seega kui 2015. aastal oli elektri vähima ja suurima börsihinna vahe keskmiselt 3,18 senti, siis süsteemi tasuvuse seisukohast peaks see olema vähemalt 16 senti.

Tabel 5.4. Süsteemi tasumiseks vajalikud ja reaalselt leitud säästud aastas, kuus ja päevas

Periood	Vajalik sääst (€)	Reaalsed säästud (€)			
		päev-ette		tund-ette	
		8 esimest tundi	min kõigi seast	hinnapõhine	ajapõhine
Aasta	472.73	96.50	86.90	74.20	78.60
Kuu	39.39	8.04	7.24	6.18	6.55
Päev	1.30	0.26	0.24	0.20	0.22

Ideaalsel juhul, kui elektri salvestamise süsteemi kasutegur on $\eta=1$ kuluks 54 aastat, et elektriaretelt saadud rahaline sääst ületaks 5200 eurot, mis on vajalik seadme soetamiseks (joonis 5.8). Parima tund-ette algoritmi kasutamise puhul kulub raha tagasi teenimisele 66 aastat.

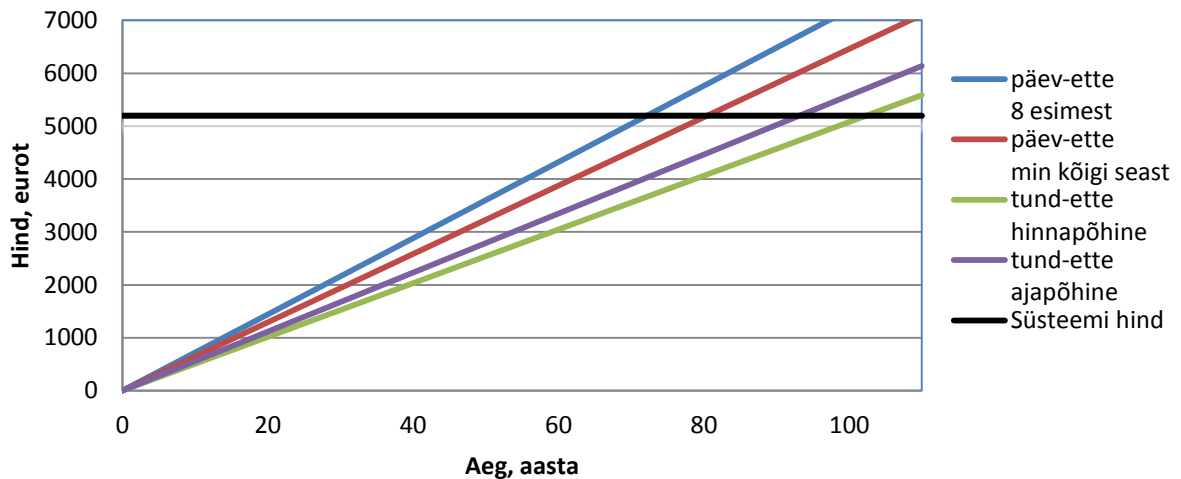


Joonis 5.8. Erinevate algoritmidega süsteemi tasuvusajad aastates kui $\eta=1$

Olles realistlikum on selle süsteemi kasutegur $\eta=0,7$. Kasuteguri vähendamisel muutuvad kõikide algoritmide kasutamisega saadud säästud tunduvalt väiksemaks (tabel 5.5). Tänu säästude vähenemisele pikenevad süsteemi tasuvusajad (joonis 5.9).

Tabel 5.5. Vajalik sääst ja reaalsed säästud, kui süsteemi kasutegur on $\eta=0,7$

Periood	Vajalik sääst (€)	Reaalsed säästud (€)			
		päev-ette		tund-ette	
		8 esimest tundi	min kõigi seast	hinnapõhine	ajapõhine
Aasta	472.73	72.00	64.60	50.80	55.80
Kuu	39.39	6.00	5.38	4.23	4.65
Päev	1.30	0.20	0.18	0.14	0.15



Joonis 5.9. Erinevate algoritmidega süsteemi tasuvusajad aastates kui $\eta=0,7$

Kasuteguri vähendamisel on suurem mõju reaalajapõhistele tund-ette algoritmidele. Kui kasuteguri $\eta=1$ juures oli parima ja halvima algoritmi tasuvuse vahe 16 aastat siis kasuteguriga 0,7 on nende vahe 30 aastat (tabel 5.6).

Tabel 5.6. Erinevate algoritmidega BES süsteemi tasuvusaeg, kui kasutegur $\eta=0,7$

	päev-ette		tund-ette	
	8 esimest tundi	min kõigi seast	hinnapõhine	ajapõhine
Tasuvusaeg (aastates)	72	81	102	93

Siin tuleb arvestada, et tegelik süsteemi eluiga on 11 aastat. Minimaalselt peaks elektri börsihinnad kasvama 6,5 korda oletades, et tarbimisnäitajad ja hinna graafik jäävad samaks. Kui hetkel kulub selle kodu elektriarvele 821 eurot aastas, siis selleks et homme oleks hea investeering see süsteem osta peaks aastane elektriarve olema samade tarbimisnäitajate juures üle 5000 euro. Nagu seda on ka eelnevalt maininud, siis lähiajal pole minu hinnangul selliseid elektrienergia hinnatõuse Eestis oodata.

2015. aastal oli päevase vähima ning suurima elektri hinna vahe keskmiselt 3,2 senti/kWh. Tüüpilise päeva madalaim elektri börsihind oli 1,7 senti/kWh ning kõrgeim hind 4,9 senti/kWh. Eespool asuvates tabelites on selgelt kirjas, et selline vahe pole piisav, et elektri salvestamise süsteem oleks tasuv oma eluea jooksul. Eeldades, et inimeste elektri tarbimisharjumused jäävad samaks peab kogu süsteemi tasuvuse seisukohast päevane elektri hinna vahe tunduvalt tõusma (tabel 5.7).

Tabel 5.7. BES süsteemi tasuvuseks vajalik päevane elektri hinnavahe, kui $\eta = 1$

Tegelik hinnavahe 2015. aastal (senti/kWh)	Vajalik hinnavahe (senti/kWh)			
	päev-ette		tund-ette	
	8 esimest tundi	min kõigi seast	hinnapõhine	ajapõhine
3.2	15.7	17.4	20.4	19.3

Kui arvestada ka süsteemi kasuteguriga, kus 30% elektrienergiast, mis võrgust akudesse laetakse muundub teisteks energia liikideks on vajalik hinnavahe veelgi kõrgem (tabel 5.8). Parimal juhul, kasutades päev-ette algoritmi, mis otsib päevast vähimat hinda 8 esimese tunni seast peaks päevase vähima ja suurima elektri hinna vahe olema vähemalt 21 senti. Halvimal juhul kasutades reaalaja tund-ette algoritmi, mis tugineb elektri hinna statistikale peab päevane hinnavahe tõusma vähemalt 9 korda võrreldes 2015. aasta keskmise hinnavahega, et BES süsteem oleks tasuv.

Tabel 5.8. BES süsteemi tasuvuseks vajalik päevane elektri hinnavahe, kui $\eta = 0.7$

Tegelik hinnavahe 2015. aastal (senti/kWh)	Vajalik hinnavahe (senti/kWh)			
	päev-ette		tund-ette	
	8 esimest tundi	min kõigi seast	hinnapõhine	ajapõhine
3.2	21.0	23.4	29.8	27.1

6. KOKKUVÕTE

Lõputöö eesmärk oli töötada välja energiasalvesti laadimis- ja tühjendamisalgoritmid, et rahaline kasumlikkus oleks võimalikult suur. Samuti leida millise elektri hinna juures oleks salvesti kasutamine mõistlik. Peamiselt keskendus töö 24 tundi ette ja tund ette hindasid teadvatele algoritmidele. Lisaks algoritmidele on ülevaade ka süsteemi reaalsest ehitusest ja selle toimimise protsessidest. Lõpuks tuuakse välja erinevate algoritmide kasutamisega tulenev sääst elektri arvelt ning elektri salvestamise süsteemi tasuvusajad.

Kogu töö põhineb energia salvestamise süsteemil, mis asub Tallinna Tehnikaülikooli energeetikamaja esimese korruse laboris. See on valminud Denis Lebedevi doktoritöö käigus ning uurib kulusäästu võimalust kasutades elektrituru muutuvat hinda. Lühidalt on süsteemi tööpõhimõtteks osta elektrit akudesse kui elektri hind on odav ja kasutada seda akudest siis kui elekter on kallid.

Töö käigus on vaatluse all nelja erineva algoritmi kasutamine võimalikult suure rahalise säästu saamiseks. Kaks algoritmi on koostatud teades ette järgneva 24 tunni elektri hindasid ning kaks algoritmi, mis teavad vaid selle tunni elektri hinda börsil.

Päev-ette algoritmid erinevad üksteisest vähima hinna otsimise poolest. Esimesel juhul „min kõigi seast“ otsib algoritm päevase madalaima elektri hinna kõigi 24 tunni seast. Kuna selgus, et mitmetel päevadel jääb madalaim elektri hind vahemikku kell 23:00-24:00 ei toimu nendel päevadel süsteemi terviklik töötuskiik. Et see probleem lahendada on kasutusel teine algoritm „8 esimest tundi“, kus akude laadimiseks sobilik tund otsitakse päeva esimese 8 tunni seast. Seda algoritmi kasutades ei jää ühegi päeva energia salvestamise süsteemi töötuskiik vahele, mis tagab suurema säästu pikema perioodi jooksul.

Tund-ette algoritmid põhinevad kahel erineval statistikal, et leida parimad ajad akude laadimiseks ja tühjendamiseks. Hinnapõhine algoritm toetub elektri hinna statistikale. Eelnevate päevade madalaima ning kõrgeima hinna alusel leitakse kaks hinnaniivood, mille alusel toimub akude laadimine ja tühjendamine. Teine, ajapõhine algoritm toetub aja statistikale, kus on määrava tähtsusega madalaima hinna paiknemine ajas. Võrreldes hinnapõhise algoritmiga on ajapõhine algoritm efektiivsem, kuna salvesti töötuskiik toimuvad iga päev olenemata elektri hinna kõikumisest erinevate päevade lõikes.

Veel üks selle lõputöö ülesanne oli uurida Matlab Simulink kasutamist süsteemi laadimis- ja tühjenemisalgoritmide uurimisel. Selle tarkvaraga on koostatud tund-ette algoritm, mis toetub ajapõhisele statistikale. Simulink annab hea ülevaate erinevatest koormuse ja hinna graafikutest ning kuidas signaalid erinevate süsteemi osade vahel liiguvad. Samas ma leian, et Matlab Simulink pole andmete töötamiseks kõige mugavam programm. Kuna tund-ette algoritmid vajavad suure hulga eelneva info töötlemist on palju kiirem ning lihtsam kasutada MS Excelit, milles on võimalik koguda, salvestada ja töödelda andmeid Visual Basic koodi abil. Mõlemat eelnimetatud programmi kasutades on lõpptulemused samad.

Kasutades erinevaid algoritme muutuvad elektri arved lõpptarbijale. Tavatarbimise korral oli uuritud kodumajapidamise 2015. aasta elektriarve 820,90 €. Nagu oli oodata saab kõige suurema rahalise võidu kasutades algoritme, mis teavad ette järgmise 24 tunni elektri hindasid. Kui madalaima hinna otsimise perioodi ei piirata, on aastane sääst 86,90 €. Kui aega piirata hommikuse 8 tunniga on sääst 96,40 €. Üllatavalt hästi toimisid ka reaaliajapõhised tund-ette algoritmid, kus hinnapõhise algoritmi sääst oli 74,20 € ja ajapõhise algoritmi sääst 78,50 € aastas.

Kõik eelnevad arvud kehtivad ideaalse süsteemi kohta, kus pole arvestatud süsteemi võimaliku kasuteguriga. Vastavalt süsteemis kasutatavate akude ja inverteri tüübile võib eeldada, et kogu süsteemi kasutegur on umbes 0,7. Tänu sellele vähenevad kõikide algoritmide säästud umbes 20 € võrra aastas. Kasuteguri vähenemine mõjutab rohkem tund-ette algoritme.

Tööst selgus, et 2015. aasta elektri hindasid arvestades pole võimalik, et BES süsteem ennast ära tasub. Parimal juhul on päev-ette juhtimisalgoritmi kasutades kogu süsteemi tasuvusaeg 54 aastat. Reaalselt vajalik tasuvusaeg peab olema väiksem kui 11 aastat, et vaadelda seda süsteemi kui investeeringut. Kui hetkel on keskmiselt päevase madalaima ja kõrgeima elektri börsihinna vahe 3,2 senti, siis tasuvuse seisukohast peaks see olema vähemalt 21 senti. Nii suurt elektrienergia hinna tõusu pole lähitulevikus oodata.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] Lebedev, D. Elektrienergia tarbimise juhtimise modelleerimise süsteemi kasutusjuhend. – Tallinn, 2016. – 20 lk.
- [2] Inverteri andmeleht <https://www.victronenergy.com/upload/documents/Datasheet-Quattro-3kVA-10kVA-EN.pdf>. Vaadatud 14.04.2016.a.
- [3] AGM akude eeldatav eluiga töötsükklites <http://ecee.colorado.edu/~ecen4517/components/agmexpectedlife.pdf>. Vaadatud 10.05.2016.a.
- [4] Lebedev, D.; Rosin, A. Modelling of Electricity Spot Price and Load Forecast Based New Energy Management System for Households. *Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), 2014 55th International Scientific Conference*. – Riia: Riga Technical University, 2014, Lk. 222-226.
- [5] Lebedev, D.; Rosin, A. Practical Use of the Energy Management System with Day-Ahead Electricity Prices. *2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG)*. - Riia, 2015, lk. 394-398.
- [6] Elektri börsihind <http://elering.ee/nps-hinnad/>. Vaadatud 04.04.2016.a.
- [7] Rosin, A.; Möller, T.; Lehtla, M.; Hõimoja, H. Analysis of household electricity consumption patterns and economy of water heating shifting and saving bulbs. *Scientific Journal of Riga Technical University. Power and Electrical Engineering, Volume 26, Issue - I*. – Riia, 2010, lk.15-20.
- [8] Elektri hind lõpptarbijale http://www.energiatalgud.ee/index.php?title=Elektri_hind_1%C3%B5pptarbijale. Vaadatud 08.04.2016.a.