



TALLINNA TEHNICAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND  
ELEKTROENERGEETIKA JA MEHHATROONIKA INSTITUUT

**MITMIKAGENDIL PÕHINEV  
ENERGIAJUHTIMISSÜSTEEM  
KODUMAJAPIDAMISTELE**

**MULTI-AGENT BASED ENERGY MANAGEMENT SYSTEM  
FOR HOUSEHOLDS**  
MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Taisto Roosipuu

Üliõpilaskood: 211678

Juhendaja: Vahur Maask, teadur

Kaasjuhendaja: Tarmo Korõtko, vanemteadur

# AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"13." Mai 2024

Autor: Taisto Roosipuu

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele.

"13." Mai 2024

Juhendajad: Vahur Maask

/ allkirjastatud digitaalselt /

Tarmo Korõtko

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees: .....

/ nimi ja allkiri /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina Taisto Roosipuu

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

MITMIKAGENDIL PÕHINEV ENERGIAJUHTIMISSÜSTEEM KODUMAJAPIDAMISTELE

mille juhendaja on Vahur Maask,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

---

13. Mai 2024

---

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

# Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Taisto Roosipuu, 211678  
Õppekava, peeriala: Energiamuundus ja juhtimissüsteemid, AAAM  
**Juhendaja(d):** Vahur Maask, teadur  
**Kaasjuhendaja:** Tarmo Korõtko, vanemteadur

### Lõputöö teema:

MITMIKAGENDIL PÕHINEV ENERGIAJUHTIMISSÜSTEEM KODUMAJAPIDAMISTELE  
MULTI-AGENT BASED ENERGY MANAGEMENT SYSTEM FOR HOUSEHOLDS

### Lõputöö põhieesmärgid:

- Välja töötada tarkvaralahendus kodumajapidamise elektriseadmete juhtimiseks
- Vähendada rahalisi kulusid, kasutades mitmikagendil põhinevat juhtimissüsteemi

### Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Teoreetiline osa	25.02
2.	Mudeli loomine	17.03
3.	Kontseptsiooni kirjeldus	07.04
4.	Tulemuste analüüs	21.04
6.	Töö lõplik verisoon valmis	13.05

**Töö keel:** Eesti **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "13" Mai 2024a

**Üliõpilane:** Taisto Roosipuu / allkirjastatud digitaalselt / "13" Mai 2024a  
/allkiri/

**Juhendaja:** Vahur Maask / allkirjastatud digitaalselt / "13" Mai 2024a  
/allkiri/

**Kaasjuhendaja:** Tarmo Korõtko / allkirjastatud digitaalselt / "13" Mai 2024a  
/allkiri/

**Programmijuht:** Toomas Vaimann / allkirjastatud digitaalselt / "13" Mai 2024a  
/allkiri/

*Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöörde*

# SISUKORD

EESSÕNA .....	7
Lühendite ja tähiste loetelu .....	8
1 SISSEJUHATUS.....	9
2 ÜLEVAADE MITMIKAGENDI PÕHISEST JUHTIMISEST .....	11
2.1 Mitmikagendisüsteemi implementeerimine kodumajapidamisse .....	12
2.2 Mitmikagendisüsteemi erinevus tsentraalsest energijuhtimissüsteemist .....	15
3 KODUMAJAPIDAMISE ELEKTRISEADMETE KLASSIFITSEERIMINE.....	17
3.1 Mitte nihutatavad ehk pidevalt töötavad elektriseadmed .....	17
3.2 Nihutatavad elektriseadmed .....	18
3.3 Muutuva võimsusega juhitavad elektriseadmed .....	20
4 ELEKTRIENERGIA HINNASTAMINE KODUMAJAPIDAMISES .....	21
4.1 Elektriarve kujunemine.....	22
4.1.1 Elektri hind Nord Pool Spotist .....	23
4.1.2 Võrguteenuse tasu .....	24
4.1.3 Muud tasud ja maksud.....	25
4.1.4 Elektrienergia müümine .....	25
4.2 Rahareserv .....	27
5 LÄHTEANDMED .....	29
5.1 Kasutatavad seadmed ning sisendsuurused.....	29
5.1.1 Ventilatsioon .....	30
5.1.2 Elektriauto .....	30
5.1.3 Pesumasin ja kuivati.....	31
5.1.4 Põrandaküte .....	31
5.1.5 Elektriboiler .....	32
5.1.6 Päikesepaneelid .....	32
5.2 Seadmete tarbimise mõõteandmed ja järeldused .....	32
6 ENERGIAJUHTIMISSÜSTEEMI KONTSEPTSIOON.....	35
6.1 Objekt-orienteeritud programmeerimine .....	35
6.2 Energiajuhtimissüsteemi kontseptsioon .....	36
6.3 Elektri hinna klass.....	38
6.4 Päikesepaneeli klass.....	40
6.5 Seadme klass.....	41
6.6 Halduri klass .....	43
7 Energiajuhtimissüsteemi simulatsioon .....	45
7.1 Energiajuhtimissüsteemi simulatsiooni lähteandmed .....	47
7.2 Talvine prognoos .....	48

7.3 Suvine prognoos.....	49
7.4 Rahareservi ja normaaltundide rakendamine.....	49
8 TULEMUSTE ANALÜÜS.....	51
8.1 Talvine prognoos.....	53
8.2 Suvine prognoos.....	55
8.3 Eriolukordade analüüs.....	57
8.4 Normaaltundide ja rahareservi kasutamise analüüs.....	59
KOKKUVÕTE.....	60
SUMMARY.....	62
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU.....	64

# EESSÕNA

Energiajuhtimine kodumajapidamises on muutunud aina olulisemaks, kuna see aitab oluliselt vähendada energiakulusid ja minimeerida keskkonna jalajälge. Efektiivne energiajuhtimine ei aita mitte ainult kokku hoida raha, vaid toetab ka laiemat eesmärki suunata meie eluviise keskkonnasõbralikumaks ja ressursitõhusamaks, tagades jätkusuutlikuma tuleviku.

Lõputöö teema on sõnastatud Tallinna Tehnikaülikooli teadur Vahur Maask algatusel. Töös kasutatavad algandmed ning mõõtetulemused on pärit autori poolt sooritatud mõõtmistelt. Lisaks on osa mõõtetulemusi saadud teadur Vahur Maask abiga. Autor tänab juhendajaid Vahur Maaski ning Tarmo Korõtkot abi eest lõputöö koostamisel.

Magistritöoga seonduvad märksõnad: energiajuhtimine, mitmikagendisüsteem, taastuenergia, kodumajapidamine, elektriseadmed.

## **Lühendite ja tähiste loetelu**

EJS – energiajuhtimissüsteem

kW - kilovatt

kWh – kilovatt-tundi

MAS – mitmikagendisüsteem

€/kWh – eurot kilovatt-tunni kohta

€/MWh – eurot Megavatt-tunni kohta



# 1 SISSEJUHATUS

Globaalse kliimamuutusega kaasnevad teadaolevad ning ettearvamatud tagajärjed on laialdaselt arutletud ja tähelepanu keskmes, mille tõttu on tekkinud vajadus kiirete ning tõhusate meetmete järele, eesmärgiga leevendada inimtegevusest põhjustatud negatiivseid trende kliimamuutuste valdkonnas. Üheks oluliseks abinõuks on energijahtimissüsteemid, mis aitavad vähendada liigset energiaressursside kasutust, juhtida energiakasutust ja seeläbi vähendada survet planeedi ökosüsteemidele. Päikesepaneelide üha laiem kasutamine on aidanud vähendada sõltuvust fossiilsetest kütustest ja edendada rohelisema energia tarbimist. Energijahtimissüsteemi lisamisel kodumajapidamisse, kus on kasutusel päikesepaneelid, on võimalik parendada jälgimist ning kontrolli energiatarbimise üle. Optimeerides elektrienergia tarbimist vastavalt majapidamise vajadustele saab vähendada elektrienergia kulutusi ning vältida või vähendada tarbimist hetketel, kus elektri hind on kõrgel tasemel.

Mõjutatuna mitmetest teguritest nii kohalikul kui ka rahvusvahelisel tasandil on Eesti elektri hindade ebastabiilsus viimasel ajal olnud märkimisväärne. Üheks peamiseks põhjuseks on olnud EstLink kaablite rikked, mis on piiranud elektri liikumist Soome ja Eesti vahel. EstLink1 ja EstLink2 on olulised ühendused, mis võimaldavad Põhjamaade ja balti elektriturgudel integreeruda, parandades seeläbi varustuskindlust ning elektri hinna stabiilsust. Rikete puhul on Eesti elektrisüsteem sunnitud sõltuma rohkem kohalikust tootmisest, mis ei pruugi alati katta kõrget nõudlust ning seeläbi põhjustab kõrgemaid elektri hindu. Suurenenud sõltuvus taastuvenergia allikatest põhjustab äärmuslikke ilmastikunähtuste puhul samuti kõrge nendunud elektri hindu, sest elektri tootmine fossiilkütusega on kulukam.

Sellest lähtuvalt antakse antud töö käigus panus leidmaks tõhusat energijahtimissüsteemi, mis võtab arvesse mitmeid erinevaid tegureid, sealhulgas Eesti kliima eripärasid päikesepaneelide tootmisel, päev-ette turu hetkeseisu ning viimase äärmuslikke olukordi elektri hinna osas. Nii energia- kui ka rahalise säästu saavutamiseks kasutatakse *Matlab*'i programmi, kus objektorienteeritud programmeerimise abil luuakse mitmikagendil põhinev energijahtimissüsteem. Süsteemi eesmärk on vähendada tarbimist ning suunata elektrienergia tarbimist odavamatele hetkedele. Seeläbi saavutatakse kodumajapidamisele majanduslikku säästu.

Töö esimese osas käsitletakse mitmikagendisüsteemide ülevaadet ning nende rakendamist kodumajapidamistes. Lisaks tuuakse välja mitmikagendil põhineva

energiajuhtimissüsteemi erinevus tavapärasest tsentraalsest juhtimissüsteemist. Seejärel antakse ülevaade elektri ostu- ja müügihinna kujunemisest Eestis lähtudes *Nord Pool Spot*'i börsihinnast. Lisaks selgitatakse rahareservi kontseptsiooni energiajuhtimise rakendamisel. Järgnevalt analüüsitakse mudeli toimivuse valideerimiseks kasutatavaid elektriseadmeid ning algandmeid. Analüüsitakse ka märtsi nädalast tarbimist ning selle murekohti. Pärast teooria ülevaadet ning lähteandmete kirjeldamist selgitatakse energiajuhtimissüsteemi kontseptsiooni ning selle simuleerimist. Simulatsiooni põhjal saadud tulemusi analüüsitakse ning tuuakse välja saavutatud majanduslikud näitajad.

## 2 ÜLEVAADE MITMIKAGENDI PÕHISEST JUHTIMISEST

Mitmikagendi süsteem (edaspidi MAS) on tehisintellekti mudel, kus mitmed autonoomsed agendid töötavad koostöös, eesmärgiga saavutada ühiseid eesmärke. Selliseid mudeleid on võetud kasutusele mitmetes erinevates valdkondades nagu transport, finants ja energeetika. Agentideks võib olla arvutipõhine programm, robot või süsteem. Eelnevalt nimetatud valdkondades kasutatakse agente liiklusjuhtimises, autonoomsetes sõidukites, algoritmilistes kauplemissüsteemides ja elektrienergia turgudel. MAS puhul on väga tähtsal kohal just autonoomsus, mis tähendab, et iga agent on võimeline iseseisvalt otsustama ning tegutsema vastavalt etteantud eesmärkidele. Tänu sellele on võrreldes üksikagendi süsteemiga MAS tõhusam töötlemaks suuremaid andmemahte ning lahendamaks keerukamaid ülesandeid. MAS-i eelistama panevad omadused tulenevad agentide omavahelisest suhtlusest informatsiooni jagamiseks, iseseisvast otsustamisest ning kohanemisvõimest. Omavaheline suhtlus võib hõlmata erinevaid meetodeid nagu info edastamine ja vastuvõtmine, kokkulepete sõlmimine ja muud vastastikused tegevused. Suhtluse abil tekib eelis üksikagendi süsteemi ees, kus süsteemi osad võivad jääda piiratud teadmiste või ressursiga [1].

MAS-i roll võib olla eriti oluline energiajuhtimissüsteemi (edaspidi EJS) kontekstis, kus on vaja arvesse võtta mitmeid tegureid. Nendeks võivad olla energiahinnad, tarbimisgraafikud, erinevate elektriseadmete tüübid ning nende optimeerimine. MAS abil on võimalik energiaressursse tõhusamalt jagada, leides kokkuhoidvamaid lahendusi muutuvates elektrituru olukordades. Lisaks saab igale agendile määrata erinevaid nõudmisi ning seeläbi suurendada EJS-i efektiivsust. MAS-i abil on EJS dünaamilisem, suutes seadmete koostöö abil reageerida paremini näiteks energiahindadele ning olemasolevale ressursile.

Probleemide lahendamiseks on mitmeid võimalusi kasutades MAS-i abi. Üks viis on juhendada agente koostööd tegema parima lahenduse leidmiseks. See tähendab agendid proovivad kasutada erinevaid teid eesmärgini jõudmiseks ning jagavad enda proovitud lahendusi. Selline käitumisprofiil vähendab aja kulutamist sarnaste lahenduste mitmekordsel uurimisel ehk lahendusi, mida on pakutud enam uuesti ei proovita. Teine võimalus on tekitada agentite vaheline võistlus, kus grupp agente üritavad kõik leida parimat lahendust. Parima lahenduse leidnud agent jagab seda teistega, et teised saaksid leida samasuguse või veel enam tõhusama viisi [2].

MAS-i rakendamine võib aga eelnimetatud eelistele välja tuua ka tõsisid probleeme. MAS-is on oluline rõhku panna agentide koordineerimisele, omavahelisele suhtlusele ning konkurentsile. Koordineerimises võib probleeme esineda väga mahukate süsteemide puhul, kus on väga palju agente. Kõikide agentide töö peab olema eesmärgipärane ning aitama kaasa süsteemi edukale toimimisele. See nõuab süsteemi kavandamisel hoolikust ning läbi katsetamist erinevate olukordade suhtes. Teisalt võib agentide omavahelisest suhtlusest tekkida info üleküllus, kui edastatav info maht muutub ülekoormavaks. Kavandamisel võib tekkida ka olukordi, kus agentide eesmärgid on vastuolulised või agentide hierarhia ei ole loogiliselt ülesehitatud. Sellisel juhul võib tekkida eesmärgipäratu konkurents ning saavutatakse ebaoptimaalsed tulemused, sest agendid prioritseerivad oma eesmärgid rohkem kui ühiseid [2].

## **2.1 Mitmikagendisüsteemi implementeerimine kodumajapidamisse**

Kodumajapidamisest võib leida väga palju mitmesuguseid elektriseadmeid. Sõltuvalt inimeste vajadustest, elustiilist ja võimekusest on seadmeid, mis on mõeldud erinevate ülesannete täitmiseks, kuid samas ka tihtipeale mugavuste loomiseks. Need on saanud inimeste lahutamatuks osaks igapäeva elus ning seetõttu on tarbimise vähendamine väga keerukas. Efektivsemate seadmete kasutuselevõtt on küll levinud, aga ülejäänud keskkonnasõbralikumad lähenemised on tihtipeale seotud just käitumisharjumustega. Viimased võivad olla aga raskesti muudetavad, sest käitumisharjumuste muutmiseks on sageli vaja teadlikult panustada aega. Kõige olulisem on olla teadlik võimalustest, kuidas teatud käitumisega on võimalik vähendada koormust keskkonnale. Tihti jääb puudu motivatsioonist, sest harjumuste muutmine on aeganõudev ning tulemused ei ole koheselt nähtavad. Lisaks seadmete välja vahetamisele ja käitumisharjumuste muutmisele on võimalik kasutada energiajuhtimissüsteeme (edaspidi EJS) [3].

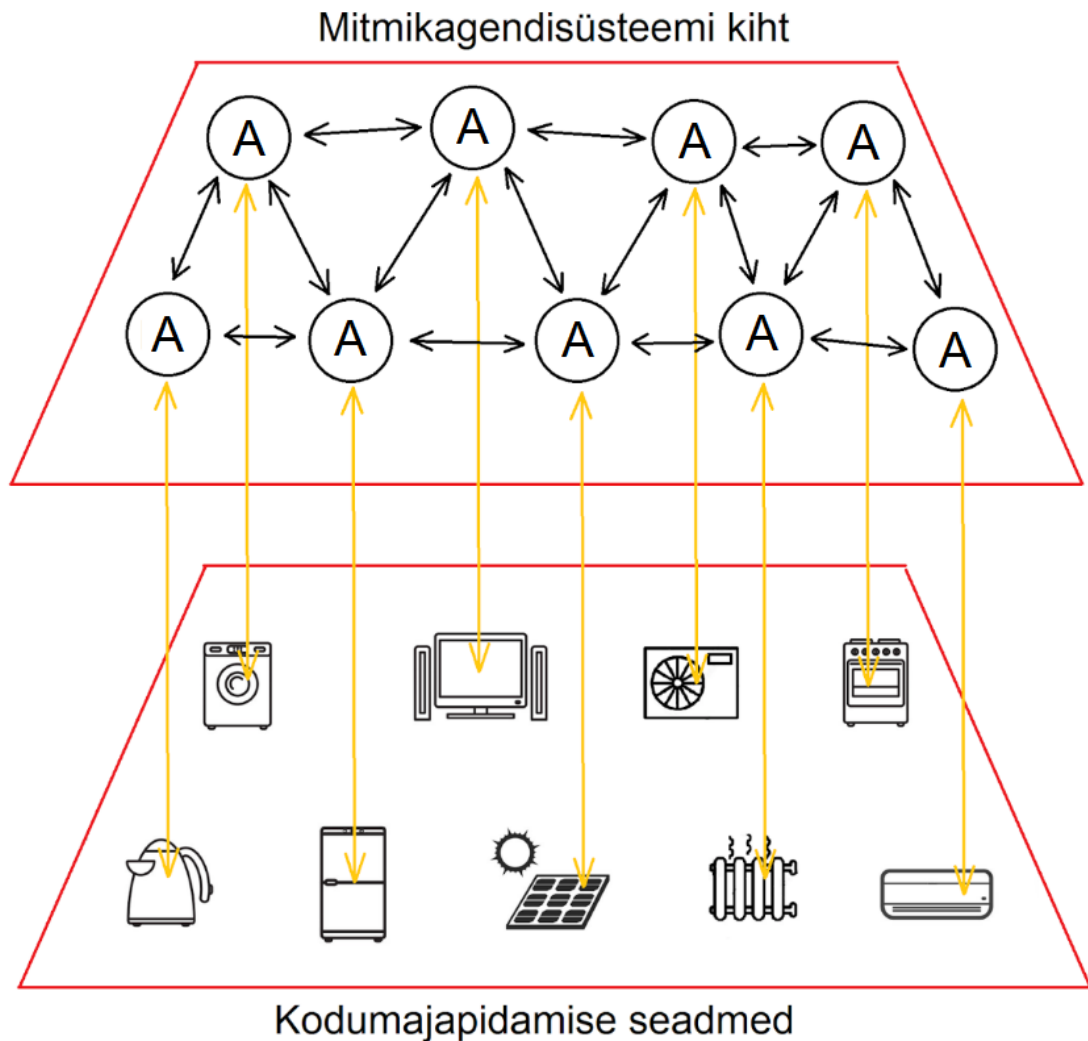
Juhtimissüsteemid kui nutikad lahendused aitavad koduenergia tarbimist jälgida, hallata ja optimeerida. Energiatõhususe suurendamine, energiakulu ning keskkonnamõjude vähendamine on eesmärgid, mida läbi juhtimise saavutada üritatakse. Süsteemides võetakse kasutusele tark maja, kus on võimalik kontrollida valgustust, kütet, jahutust ja muid elektriseadmeid. Tark maja põhineb tehnoloogial, mis võimaldab seadmetel omavahel suhelda ja reageerida erinevatele olukordadele. Termostaatide abil on võimalik aktiivselt jälgida temperatuuri olukorda erinevates tubades ning seeläbi juhtida kütet või jahutust sektsiooniti. Lisaks kaasatakse tavaliselt kaugjuhtimise võimalus, et oleks võimalik kasutajal jälgida ja juhtida koduseid seadmeid ning seeläbi kontrollida

energiatarbimist. Selleks on tihti loodud mugavad variandid läbi nutitelefonide või veebipõhiseid platvorme. Tänu sellele on võimalik olla paindlikumad kodust eemal olles [4].

Elektriseadmete juhtimine tüüpilises nutikodus ei ole sageli väga kõrgelt arenenud, kui üldsegi on automatiseeritud juhtimist rakendatud. Tihtipeale on targa maja süsteemid piiratud lihtsa kaugjuhtimise võimekusega. See tähendab, et sageli on targa maja süsteemid võetud kasutusele lihtsalt haldamiseks ning kontrollimiseks nagu näiteks temperatuuri juhtimine termostaatide abil ning valguse lülitamine kaugelt. Mitmikagendi süsteemi rakendamisel saab kasutusele võtta täpsemat autoriseerimist ning paremat kohanemisvõimet muutuvatele keskkonningimustele. Lisaks on võimalik luua isikupärastatud mudelid vastavalt kasutaja vajadustele ja eelistustele. MAS kasutusele võtmisel kodumajapidamises tekib olukord, kus elektriseadmed teevad koostööd ühise eesmärgi nimel olemasoleva ressursi efektiivseks kasutamiseks. Tarbijaid kodumajapidamises võib kvalifitseerida juhitavateks ja mittejuhitavateks tarbijateks. Juhitavate tarbijate puhul saab rääkida näiteks ventilatsioonist, jahutusest või küttest. Mittejuhitavate ehk baaskoormuse alla kuuluvad elektriseadmed, mis pidevalt on kasutuses või nende kasutusaega ei ole võimalik automatiseerida. Nendeks on põhilised kodumasinad, nagu näiteks külmkapp, mida pole võimalik välja lülitada. Lisaks näiteks pliitide, ahjude ja kohvimasinate kasutamise hetke ei ole võimalik ette määrata ehk nende puhul puudub paindlikkus tarbimise juhtimiseks. Küll aga saab analüüsida ning õppida kasutaja käitumismustreid, mis annab võimaluse süsteemil arvesse võtta, millal teatud seadmed kasutusel võiksid olla. Andmete kogumise ja analüüsi abil on võimalik tuvastada mustreid, millel on oluline roll mitmikagendi süsteemis. Seega saab kodumajapidamise elektriseadmed klassifitseerida juhitavateks ja mittejuhitavateks ning määrata need agentideks. Olulisemal kohal on juhitavad agendid, sest läbi nende on võimalik rohkem paindlikkust saavutada. Agentide struktuuri mõistmiseks on loodud joonis, kus on välja toodud põhilisemad kodumajapidamise elektriseadmed [5].

Elektriseadmed tavalises kodumajapidamises töötavad sageli iseseisvalt ning suhtlus teiste seadmetega puudub. Omavahelise infovahetuse saavutamiseks, luuakse seadmetele mitmikagendi süsteem ehk igale seadmele määratakse oma agent. Iga agent on võimeline töötlemas informatsiooni ning seda teistega jagama. Seeläbi mitmikagendi kiht tekitab võimaluse elektriseadmetel omavahel suhelda. Iga agent vastutab oma seadme funktsionaalsuse eest ning koos luuakse optimeeritud ning terviklik süsteem. Lisaks elektriseadmetele on vaja kesksel kontrollisüsteemil, millena saab kasutada arvutit või kontrolleri. Kontrollisüsteemi ülesandeks on hallata ja koordineerida kõikide seadmete omavahelist suhtlust. Iga agendile ja kesksel

juhtimissüsteemile paigaldatakse spetsiaalne tarkvara, mis määrab ära suhtlusviisi, info jagamise ning ülesannete täitmise vastavalt seatud eesmärkidele. Seadmete või agentide vaheliseks suhtlemiseks on vaja kasutusele võtta ka sideprotokoll, olgu selleks siis traadita tehnoloogia nagu Wi-Fi, Bluetooth või juhtmega ühendus. Viimaseks on vaja, et elektriseadmed oleks varustatud nutikate tarkvaradega või tuleb selle asemel lisada erinevaid andureid elektriseadme töö jälgimiseks kui ka juhtimiseks [6].



Joonis 2.1 Mitmikagendi süsteemi lihtsustatud ülesehitus koos elektriseadmete ja agentidega. (tähistus A – agent)

## 2.2 Mitmikagendisüsteemi erinevus tsentraalsest energiajuhtimissüsteemist

MAS ja tsentraalsed energiajuhtimissüsteemid on kaks erinevat energiajuhtimiseks kasutatavat lähenemisviisi. Mõlemad neist pakuvad erinevaid eeliseid ja puudujääke. Valdkonnas levinumad tsentraalsed süsteemid keskenduvad ülevaate, juhtimise ja kontrolli koondamisele ühtsesse keskpunkti. MAS puhul on eesmärk saavutada agentide autonoomsus ning samas ka üksteise vaheline koostöö, et saavutada rohkem paindlikkust ja tõhusust [7].

Tsentraalses EJS-is tehakse kõik olulised otsused ja plaanitavad korraldused ühest juhtimiskeskusest, mis koordineerib seadmete tööd ühtse struktuuri ja reeglite järgi. Selle süsteemi suur eelis MAS-i ees on selle lihtsus, sest kogu oluline info käib läbi keskse juhtimiskeskuse. Tänu sellele on võimalik teha otsuseid kiiresti ja üheselt ning seeläbi säilitatakse süsteemi selge ja koordineeritud ülesehitus. Selline juhtimisviis sobib hästi keskkondadesse, kus energiahaldamine toimib kindlate normide või eeskirjade järgi. Sellest võib tekkida aga murekohti, kuna kõik otsused peavad läbima juhtimiskeskuse ning seeläbi pole ühegi otsuse tegemisel paindlikkust. Juhtimise tsentraliseerimisega kaasneb sageli autonoomia puudumine, mis tähendab, et ükski seade ise otsuseid ei tee. Kui juhtimiskeskusel peaks tekkima tõrge või mõni muu probleem, siis võib süsteemi toimimine olla raskendatud ning äärmisel juhul isegi olematu.

Mitmikagendisüsteem pakub alternatiivset lähenemist selleks, et seadmetel oleks võime ise otsuseid vastu võtta ning üksteise vahel suhelda. Selline struktuur võimaldab suuremat paindlikkust olles võimeline reageerima erinevatele olukordadele ilma, et juhtimiskeskus korraldusi saatma peaks. Tänu sellele on MAS ka tõrkekindlam, mis tähendab, et agendid peaksid olema võimelised töötama, kui mõni teine agentidest ära kaob või suhtluskanalid täielikult ei toimi. Samuti on võimalik MAS-i lihtsasti laiendada, lisades uusi agente, ilma, et see põhjustaks olemasoleva süsteemile häiringuid või destabiliseerimist. MAS kasutamine võimaldab tekitada seadmete vahelist konkurentsi ning luua kodumajapidamise seadmete vaheline turg. See tähendab, et kodumajapidamise elektriseadmed ning näiteks päikesepaneelid suhtlevad omavahel ning seadmed konkureerivad omavahel päikeseenergia kasutamise nimel [7].

Mitmetest erinavatest autonoomsest komponendist koosnemine suurendab aga igatpidi ka süsteemi ülesehituse keerukust. Lisaks sellele peab seadmete omavaheline koordinatsioon olema piisavalt reguleeritud, et ei tekiks lõpmatuid lahenduse või otsuse

otsimisi. Seetõttu võib olla ka MAS märkimisväärselt nõudlikum suurema andmemahu töötlemise võimekuse üle. Andmemahu kasv ja suurem töötlemismaht nõuavad võimsamat infrastruktuuri ning seeläbi ka suuremaid rahalisi kulutusi. Hoolimata nendest väljakutsetest on mitmikagendisüsteemi kasutades rohkem võimalusi efektiivsema ja keerukama energiajuhtimissüsteemi loomiseks. Kui keskkond nõuab keerukamat ja vastupidavamat lahendust, siis MAS omab eeliseid tsentraalse juhtimissüsteemi üle [8].



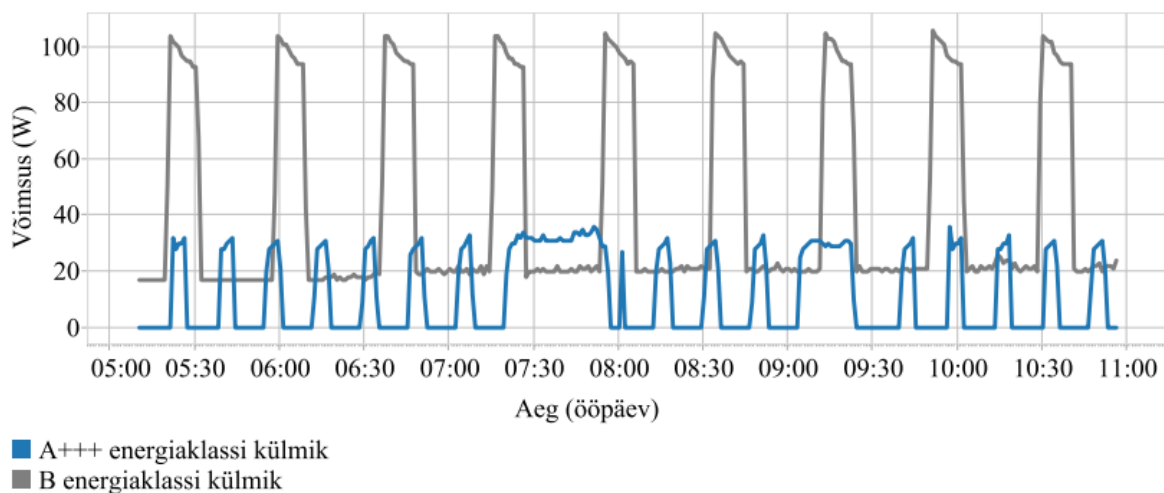
## **3 KODUMAJAPIDAMISE ELEKTRISEADMETE KLASSIFITSEERIMINE**

Viimastel aastatel on tehnoloogia arengu ja elektrienergia nõudluse kasvu tõttu hakatud huvi tundma energiasäästu ning efektiivsemate elektriseadmete vastu. Üha kasvav üleminek traditsioonilistelt elektrimasinatelt nutikamatele seadmetele tekitab uusi võimalusi kokkuhoiduks ning suundasid uurimustöödeks. Oluliseks jäävad siiski seadmete kasutusmustrid, millest suuresti oleneb energiatarbimise efektiivsus. Sellest tuleneb ka tähtis küsimus, kuidas saavutada energiasäästu, säilitades samaaegselt elektriseadmete poolt saavutatav mugavus ja funktsionaalsus. Seadmete juhtimine vastavalt kasutaja eelistustele ja käitumismustritele võimaldab optimeerida kasutust tegelikele vajadustele. Elektriseadmete klassifitseerimine on oluline aspekt energiasektoris, tänu millele on võimalik süstematiseerida ning mõista seadmete omadusi ning nende mõju energiatarbimisele. Elektriseadmete klassifitseerimist saab liigitada kui pidevalt töötavad, sisse-välja lülitatavad ning mitme erineva võimsusega juhitavad seadmed. Teisisõnu saab neid liigitada tarbimise järgi, kas tarbimine on nihutatav, mitte-nihutatav või juhitav. Seadmed võivad kuuluda mitmesse klassi korraga. Kokkuvõttes võimaldab süstemaatiline lähenemine seadmete klassifitseerimisel suurendada ülevaadet energiatarbimise, efektiivsuse ning käitumismustrite valdkonnas [9].

### **3.1 Mitte nihutatavad ehk pidevalt töötavad elektriseadmed**

Pidevalt töötavad elektriseadmed moodustavad olulise osa kodumajapidamise igapäeva elust. Need on sellised koormused, mis peavad konstantselt töötama ning nende välja lülitamine pole võimalik või tekitab kasutajale kahju. Mõiste „mitte nihutatav“ tähendab seda, et seadme tööd ei ole võimalik peatada ega teatud aja võrra edasi või tagasi nihutada. Sellest tulenevalt sõltuvus ajaga puudub ning pidev töörežiim tagab, et seadme funktsionaalsus säiliks ning olulised kasutaja mugavused ei katke. Pidevalt töötavate seadmete alla saab kodumajapidamises lugeda enamlevinuks külmkappi. Lisaks sellele on ka teisi elektriseadmeid, millele tavaliselt tagatakse pidev elektritoide, nagu näiteks tark maja, võrguseadmed ning turvasüsteemid. Mitte nihutatavate seadmete energiatarbimine on suuresti enamikel tarbimiste hetkedel võrdeline nende võimsusega. Külmkapi energiatarbimine võib sõltuda, mitmest erinevast aspektist nagu mahutavus, energiatõhusus või tüüp, kuid igas kodumajapidamises on see praktiliselt konstantne vastavalt mudelile. Koormuse kõikumine tekib enamasti sõltuvalt

kasutajast, vastavalt kui palju ja kui kaua ust lahti hoitakse. Kui ust ei avataks tuleb siiski aeg ajalt temperatuuri hoidmiseks jahutusprogramm tööle lülitada. Kuid isegi see ei võimaldaks kodumajapidamises külmkappi käsitleda kui juhitav tarbija, sest toidu riknemise vältimiseks tuleb säilitada pidev temperatuur. Külmkappide võimsus võib jääda klassikalisemate külmkappide puhul umbes 100-400 vatti. Kahe erineva külmkapi koormusgraafik on leitav järgneval jooniselt. Mõlema külmkapi puhul on näha, kuidas teatud ajaintervalli tagant toimub külmutusprotsess, mis nõuab rohkem energiat. Vähem energiatõhusama külmkapi ehk halli kõveraga tähistatud seadme tarbimine ei lange kunagi nulli, vaid käib aktiivselt ka temperatuuri hoidmine. Energiatõhusam ehk sinise joonega külmkapp teostab tihedamalt jahutamist, kuid samas on ka selle tiputarbimine kõvasti madalam. Olenevalt külmkapi mudelist, mis määrab, kui tihti jahutusprogrammi teostakse, saab tekitada nihutusmomente vaid nii palju, et jahutusprogramm nihkub kogu päeva ulatuses teatud ajasammu võrra edasi või tagasi. See aga nõuab külmkapi integreerimisel mitmikagendi süsteemi iga kord vastavalt koormuskõverale uue arvutusmetoodika loomist. Nutikamatel külmkappidel, millel on integreeritud Wi-Fi tugi, on võimalik kaugelt juhtida temperatuure, sulatus- ja külmutusprogramme ning seeläbi saavutada kõrgetel energiahindadel väiksem tarbimine [10].



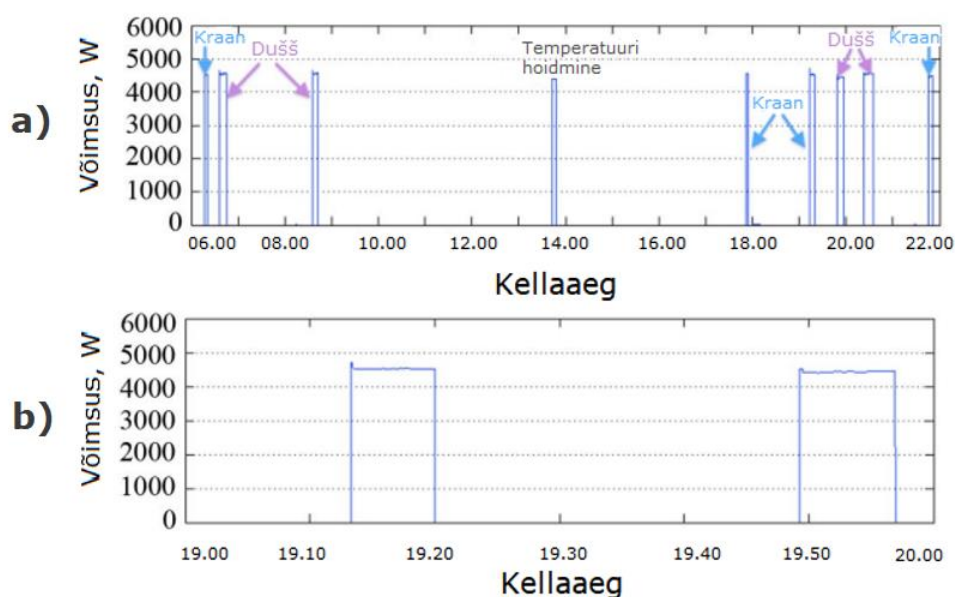
Joonis 3.1 Kahe erineva energiatõhususklassiga külmkapi tarbimiskõverad minutilises vaates [11].

### 3.2 Nihutatavad elektriseadmed

Nihutatavad elektriseadmed erinevad eelmistest seeläbi, et nende funktsionaalsuse säilitamiseks ei pea seadmed pidevalt töötama ning nende tööaega on võimalik nihutada. Seadme töö ajaline kohandamine tekitab võimaluse vältida hetki, kus elektri hinnad on tavapärasest kõrgemad. Nihutatavate elektriseadmete puhul saab enamasti rääkida seadmetest, millel on kaks töörežiimi „sees“ ja „väljas“. Sellesse klassi

kuuluvad kodumajapidamise seadmed, mille tööülesanne ei ole aegkriitiline ehk ülesande täitmist saab nihutada varasemaks või hilisemaks. Näiteks saab tuua seadmed nagu soojaveeboiler, pesumasin ja nõudepesumasin. Nihutatavate elektriseadmete puhul on kasutajal võimalus kohandada nende tööaega vastavalt kasutaja eelistustele ning energiahindadele, millest tekib paindlikkus energiatarbimise optimeerimiseks.

Olenevalt mudelist, konstruktsioonist ja paigaldusest on soojaveeboilerid võimelised teatud aja jooksul vee temperatuuri hoidma ilma, et peaks täiendavalt kütma. Temperatuuri hoidmise võimekus sõltub isolatsioonist, suurusest, vee algtemperatuurist ning keskkonna temperatuurist. Sellest olenevalt on võimalik leida, kui tihti soojaveeboiler end tööle lülitab temperatuuri hoidmiseks. Juhtudel, kus sooja vett kasutatakse, on soojaveeboileril kohustus sisse lülituda üsna kiiresti peale tarbimist ning seetõttu sellest aspektist on keeruline juhtimist luua. Seda seetõttu, et soojavee tarbimise käitumismustrist on praktiliselt väga keeruline modelleerida. Küll aga saab leida vahemikud, kus tarbimine tõenäoliselt puudub või on minimaalne. Nendeks hetkedeks võivad olla öötunnid ning päevased tööajad, kus kedagi pole kodus. Järgnevalt jooniselt 3.2 on näha, kuidas peale igat tarbimist nagu kraanist sooja vee laskmine või duši all käimine kutsub esile soojaveeboileri sisselülitamise. Joonise keskel on aga näha päevane tööaeg, kus tarbimisest tingitult boiler sisse lülitama ei pea, kuid temperatuuri hoidmiseks korra lülitub. Energiajuhtimissüsteemi koha pealt on just oluline määrata hetked, kus temperatuuri hoidmiseks boiler sisse lülitatakse. Seeläbi on lihtsaim viis boileri töö juhtimiseks ning kõrgetelt energiahindadelt nihutamiseks odavamatele just temperatuuri hoidmise protsessi nihutamiseks. Lisaks on variant määrata boileri töötama ajahetkel, mis on lähemal vahemikule, kui on tarbimist oodata.



Joonis 3.2 Soojaveeboileri a) vahemikus kell 06.00 kuni 22.00 ja b) vahemikus kell 19.00 kuni 20.00 [10].

### **3.3 Muutuva võimsusega juhitavad elektriseadmed**

Energiajuhtimissüsteemi puhul saab pidada kõige olulisemaks elektriseadmeid, mille tööaega ning töövõimsust saab vastavalt keskkonnale muuta. Kasutaja seatud eesmärkide täitmine on lihtsustatud, sest seadmete tööaeg on paindlik ning kohandatav. Selline mitmekülgsus saavutatakse enamasti seadmesiseste juhtimissüsteemidega, mis võimaldavad tuvastada andurite ja andmete abil muutusi keskkonnas või kasutusmustrites. Seadme võimsust ja tööaega reguleerides kohanetakse keskkonnamuutustega automaatselt ning samaaegselt säilitatakse optimaalne tarbimiskõver. Seadmed on varustatud anduritega, mis koguvad andmeid erinevate parameetrite kohta, nagu temperatuur, valgustus, niiskus ja inimese kohalolek. Analüüsides neid andmeid, saavad juhtimissüsteemid automaatselt kohandada seadme võimsust ja tööaega, et vastata hetkelistele vajadustele ilma kasutaja sekkumiseta.

Muutuva võimsusega juhitavate elektriseadmete roll energiakasutuse optimeerimisel ja energiajuhtimissüsteemides muutub üha olulisemaks tänapäeva energiateadlikus maailmas. Näiteks intelligentne kliimaseade, mis suudab tuvastada ruumi temperatuuri ja kohalviibijate inimeste arvu, reguleerib automaatselt oma jahutusvõimsust, et tagada optimaalne sisekliima minimaalse energiakuluga. Sarnaselt võivad nutikad valgustussüsteemid kohandada valgusti võimsust vastavalt loomulikule valguse tasemele ruumis, et säilitada vajalik valgustustase ja samal ajal vähendada energiakasutust. Lisaks sellele võimaldavad muutuva võimsusega juhitavad elektriseadmed integreerida taastuenergia allikaid, nagu päikesepaneelid ja tuulegeneraatorid, et veelgi vähendada energiakasutust. Energiajuhtimissüsteem saab näiteks suunata päikesepaneelidest saadud energia üleliigset tootmist energiamahukate seadmete, nagu soojaveeboilerid või akulaadid, töötamiseks ajal, mil päikeseenergia tootmine on maksimaalne.

Kokkuvõttes on muutuva võimsusega juhitavad elektriseadmed energiajuhtimissüsteemi oluline komponent, võimaldades reageerida dünaamiliselt ja automaatselt keskkonnatingimustele ja kasutajate vajadustele. See mitte ainult ei suurenda energiakasutuse efektiivsust ja säästlikkust, vaid toetab ka jätkusuutlikkuse eesmärke, vähendades keskkonnamõju ja toetades taastuenergia integratsiooni.

## **4 ELEKTRIENERGIA HINNASTAMINE KODUMAJAPIDAMISES**

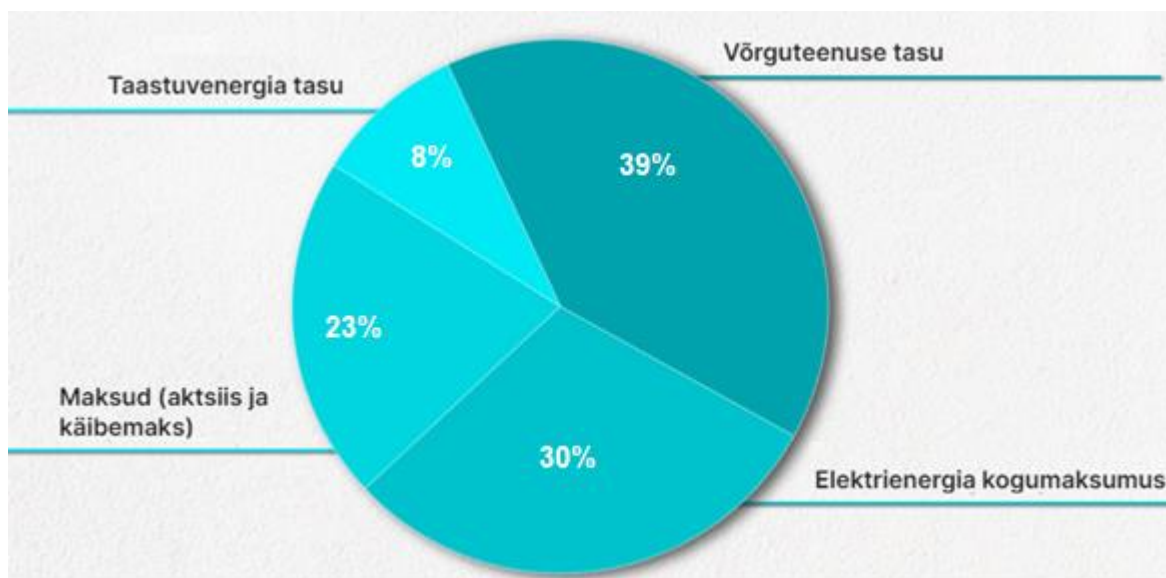
Tänapäeval on koduomanikel mitmeid võimalusi elektrihindade määramiseks, milleks võivad olla näiteks fikseeritud hinnad või börsihinnad. Valik sõltub kodumajapidamise eelistustest ja riskitaluvusest, kuid elektriinna sidumine börsihindadega pakub kõige rohkem paindlikkust ja võimalusi kulude kokkuhoiuks. See tähendab, et elektri hind võib muutuda iga tund sõltuvalt energiaturu nõudlusest ja pakkumisest. Sellises keskkonnas võivad hinnad kõikuda märkimisväärselt lühikese aja jooksul, mõjutades otseselt tarbijate elektriarveid. Selle dünaamilise hinnastamise mõistmine ja sellele vastavalt tegutsemine võib pakkuda kodumajapidamistele võimalusi elektrikulude kokkuhoiuks. Üks oluline strateegia nii energia- kui ka rahalise säästu saavutamiseks on energiatarbimise kohandamine vastavalt elektriinna kõikumistele. See tähendab, et kasutaja peaks suunama energiamahukate seadmete kasutamise madalama hinnaga perioodidele. Näiteks, pesumasina, nõudepesumasina või elektrikütte kasutamine öösel või varahommikul, kui nõudlus energiaturul on väiksem ja seega ka hinnad tavaliselt madalamad. Selline tegevus nõuab tarbijatelt teadlikkust päeva elektrihindadest ja valmisolekut kohandada oma harjumusi vastavalt.

Intelligentne kodutehnoloogia ja energiajuhtimissüsteemid võivad selles oluliselt abiks olla, võimaldades automatiseerida seadmete tööd vastavalt reaalajas elektrihindadele. Näiteks nutikad termostaadid, mis reguleerivad kütte või jahutuse intensiivsust sõltuvalt hetkehindadest, või nutikad pistikud, mis lülitavad seadmeid automaatselt sisse ja välja, kui elektri hind ületab kasutaja määratud piiri. Tänu sellele ei pea kasutaja aktiivselt jälgima elektri hindu ning saab olla kindel, et kõrgemate hindade puhul on tarbimist alandatud. Lisaks sellele võivad kodumajapidamised investeerida energiasalvestuslahendustesse, nagu kodused akud, mis võimaldavad elektrienergiat salvestada odavamate hindadega perioodidel ja kasutada seda kõrgemate hindadega aegadel. See mitte ainult ei aita vähendada elektrikuluseid, vaid ka tasakaalustada võrgukoormust, aidates kaasa üldisele energiasüsteemi efektiivsusele. Kõige levinum variant on investeerida taastuvenergialahendustesse. Taastuvenergia lahenduste, nagu päikesepaneelide, kasutuselevõtt võib samuti aidata kodumajapidamistel vähendada sõltuvust võrguenergiast ja seeläbi vähendada kuluseid. Päikesepaneelidest toodetud energia võimaldab tarbijatel vähendada ostetava elektri hulka tipphinnaga aegadel, pakkudes pikemas perspektiivis märkimisväärselt säästu.

Kokkuvõttes, kui elektri hind on börsihindadest sõltuv, on tarbijatel võimalik elektrikulude vähendamiseks kasutada mitmeid strateegiaid, sealhulgas energiatarbimise ajastamine, nutikas kodutehnoloogia ja energiasalvestuslahendused ning taastuenergia lahenduste integreerimine. Need meetmed nõuavad algset investeeringut ja teadlikkuse suurendamist, kuid pikemas perspektiivis võivad need pakkuda olulist majanduslikku kokkuhoidu ja panustada jätkusuutlikumasse energiakasutusse.

## 4.1 Elektriarve kujunemine

Elektriarve koosneb mitmest erinevast osast nagu elektrienergia enda hind, võrguteenuse tasu, taastuenergia tasu ja erinevad maksud. Need elemendid koos mõjutavad tarbijatele esitatava elektriarve lõpphinda. Elektrienergia hind peegeldab tootmise ja turult ostmise kulusid, võrguteenuse tasu katab elektri edastamist ja jaotamist. Taastuenergia tasu aitab toetada roheline energia tootmist ning maksud hõlmavad aktsiise ja muid riiklikke tasusid. Kokku kujundavad need komponendid elektrienergia lõpphinna ning peegeldavad energiasektori keerukust. Järgneval joonisel 4.1 on välja toodud umbkaudselt erinevate elektriarve komponentide protsentuaalse määra. Vastavalt tarbijale liigile ning tarbitavale mahule, võivad need suurused mingil määral erineda.

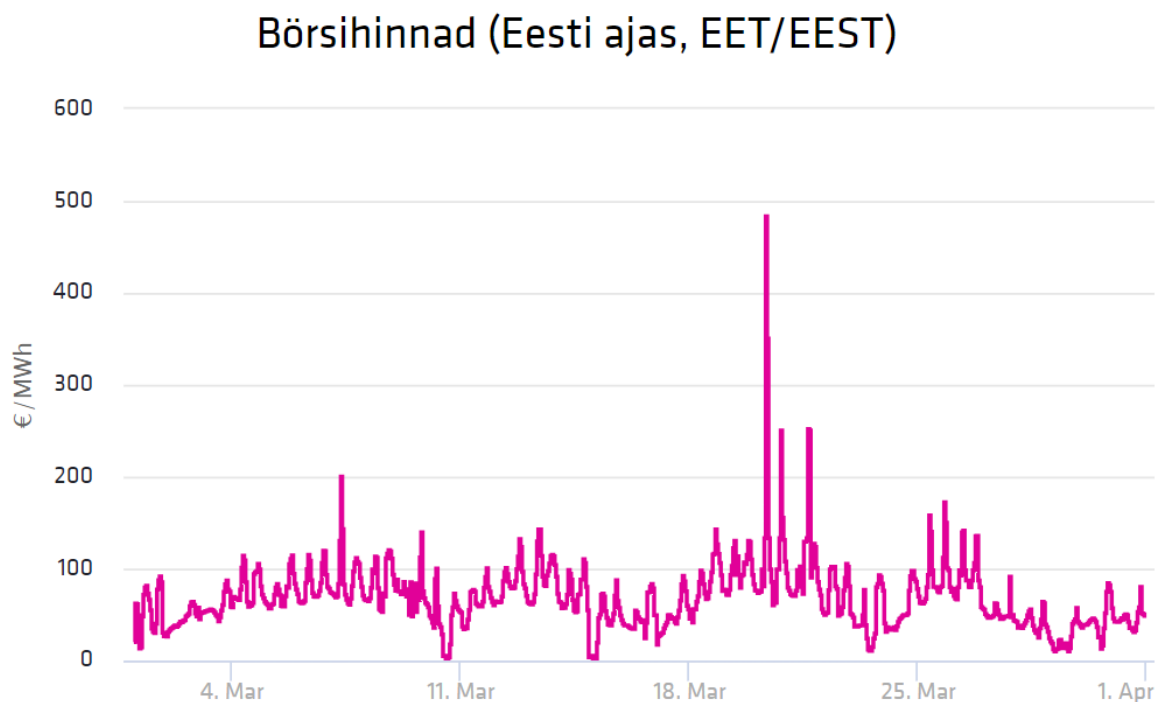


Joonis 4.1 Elektriarve ligikaudne kujunemine protsentuaalselt [12].

### 4.1.1 Elektrihind Nord Pool Spotist

Eesti on osa Nord Poolist, mis on Põhjamaade ja Baltimaade elektriturg. Nord Pool Spot (Nord Pooli turu segment) on üks maailma suurimaid elektrienergia turge, kus elektrienergia hindu kujundatakse pakkumise ja nõudluse põhjal. Nord Pool võimaldab energiakauplemist erinevate piirkondade vahel, muutes selle turu väga dünaamiliseks. Nord Poolis põhineb elektrienergia hind oksjonipõhisel mehhanismil, kus elektritootjad teevad pakkumise oma toodangu kohta ning ostjad esitavad oma nõudmised. Hinnakujundus toimub iga tunni kohta, võttes arvesse elektritootmise kulusid, tarbimisnõudlust, ülekandevõimsust ja muid turgu mõjutavaid tegureid. See tähendab, et hind võib varieeruda päeva jooksul ning erinevates piirkondades, sõltuvalt sellest, kuidas energiavoog on korraldatud ja kui suured on ressursid. See süsteem võimaldab Eesti tarbijatel osta elektrienergiat konkurentsivõimeliste hindadega, kuid samas võib see viia ka hinna kõikumiseni, kuna see sõltub paljudest muutuvatest teguritest, nagu ilmastikutingimused, kütusehinnad ja taastuvenergia tootmine. Nord Poolis elektrihinna kujunemist mõistes saavad tarbijad paremini planeerida oma energiatarbimist ja vähendada elektrikulutusi.

Elektrihinnad väljendatuna eurodes megavatt-tunni kohta (€/MWh) on ühine viis energia hinda väljendada, eriti suurte mahtude ja energiaturgude puhul, nagu Nord Pool Spot. Järgneval joonisel 4.2 on välja toodud Eesti 2024. aasta aprillikuu elektri hinnad tunni seisuga.



Joonis 4.2 Eesti 2024. aasta aprillikuu elektri hinnad eurot Megavati kohta [13].

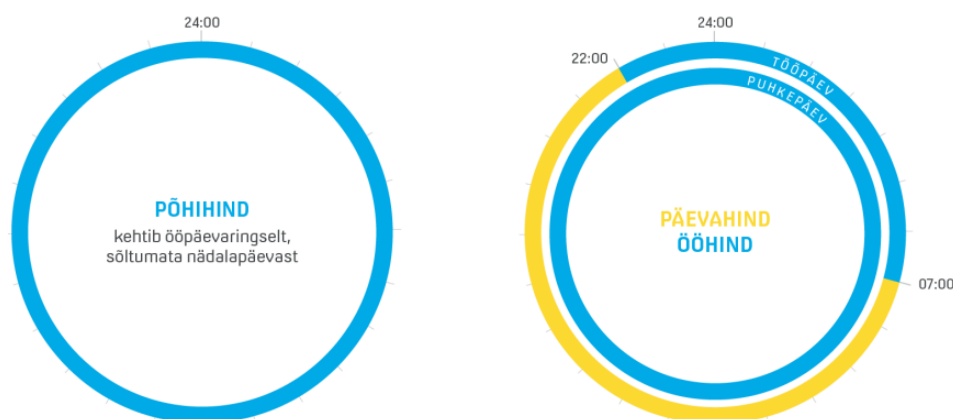
Üks megavatt-tund (MWh) võrdub 1 000 kilovatt-tunniga (kWh). Kui hind on antud €/MWh, viitab see sellele, kui palju maksab ühe MWh elektrienergia ostmine. Kuna kodumajapidamistes on levinumad suurused kilovatt ja kilovatt-tund, tuleb antud hinnad jagada 1000-ga. Jagades €/MWh hinna 1000-ga leitakse kilovatt-tunni hind sentides ehk senti/kWh. Lisaks on jooniselt näha olukordi, kus on elektrihind küündib kordades kõrgemale, kui on tavaline. Aprillikuu keskmine elektrihind oli 68,23 €/MWh ehk 6,82 senti/kWh. Sellele lisanduvad veel erinevad tasud ning riiklikud maksud [14].

#### 4.1.1.1 Elektrituru üleminek 15-minutilistele intervallidele

Alates 2025. aastast muutub Euroopa direktiivi järgi elektriarvestus 15-minutilisteks intervallideks, mis nõuab Eestis umbes pool miljoni elektriarvesti vahetust. Elektrilevi, peamine elektrivõrkude haldaja, peab arvestite vahetust praegu ebaapraktiliseks ja kulukaks ning seetõttu on taotletud ajapikendust kuni 2031. aastani. See võimaldaks järkjärgulist vahetust, vähendades kulusid ja koormust, samal ajal parandades elektrisüsteemi efektiivsust ja tarbijate kaitset. Uue 15-minuti arvestusmetoodika eesmärk on parandada elektrisüsteemi efektiivsust ja paindlikkust, võimaldades täpsemat tarbimise jälgimist ja paremat energiahindade kõikumiste juhtimist [15].

#### 4.1.2 Võrguteenuse tasu

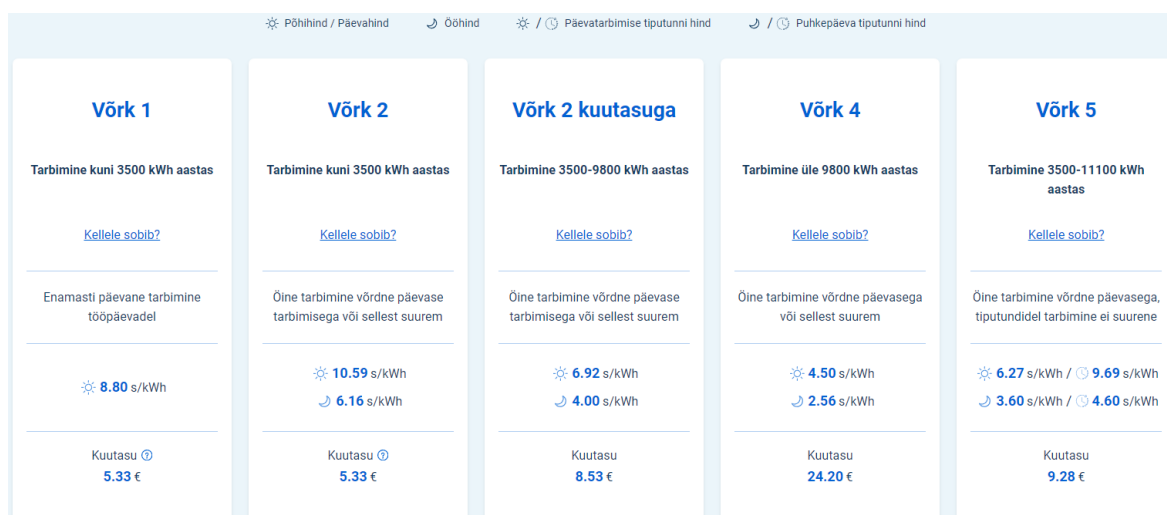
Võrguteenuse tasu on järgmine oluline komponent, mis katab elektrienergia ülekande ja jaotuse kulusid tarbijateni. See tasu on vajalik, et hooldada ja arendada elektrivõrku, tagades elektri stabiilse kohaletoimetamise tarbijateni. Võrguteenuse tasu sõltub võrgupaketi valikust, mille valimisel tuleb lähtuda elamu tüübist ja peakaitsme suurusest, tarbimise mahust (kWh aastas) ning peamistest tarbimise vahemikest, kas öösel, päeval või tiputundidel. Võrguteenuse tasu rakendub enamasti kodumajapidamistes olenevalt kellaajast erinevalt. Päevahind kehtib tööpäeviti kella 7st kuni 22ni ning ülejäänud aegadel kehtib ööhind. Ajavahemike paremaks mõistmiseks on välja toodud joonis 4.3 [16].



Joonis 4.3 Elektrilevi võrguteenuse rakendumise ajavahemikud [16].



Päevahind, mis on joonisel 4.4 päiksega märgitud, kehtib esmaspäevast reedeni, v.a riiklik püha kell 7.00-22.00. Ööhind, mis on joonisel 4.4 kuuga märgitud, kehtib tööpäevadel kell 22.00-7.00 ning laupäevadel, pühapäeval ning riiklikul pühal kogu ööpäeva jooksul [16].



Joonis 4.4 Elektrilevi erinevad võrgupaketid, kus on välja toodud ka võrgutasud [16].

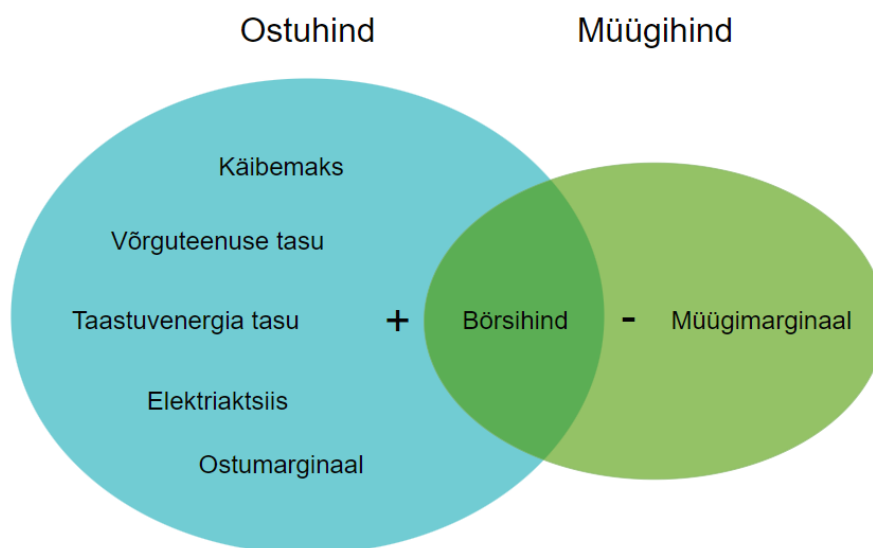
### 4.1.3 Muud tasud ja maksud

Taastuvenergia tasu on mõeldud toetama taastuvatest allikatest (näiteks päike, tuul või biomass) elektrienergia tootmist. Selle tasu eesmärk on edendada puhtamate energiaallikate kasutuselevõttu, aidates sellega vähendada sõltuvust fossiilsetest kütustest ja toetada keskkonnasõbralikumaid tootmisviise. Taastuvenergia tasu suurus võib aja jooksul muutuda, sõltuvalt riiklikust energiapoliitikast ja taastuvenergia sektori vajadustest. Aastaks 2024. on määratud Eestis taastuvenergia tasuks 1,28 senti/kWh kohta. Lõpuks lisanduvad elektrienergia kogumaksumusele maksud, sealhulgas aktsiis ja käibemaks. Aktsiis on riiklik maks, mis on kehtestatud elektrienergiale, eesmärgiga reguleerida selle tarbimist. Elektriaktsiis on alates 01.05.2020 Eestis 0,18 senti/ kWh kohta. Lisaks on veel võrguettevõtte poolt määratud elektri müüginõu, mis on elektrienergia müüja poolt paika pandud. Viimase suurus jääb enamasti alla 1 senti/kWh kohta. Kõikides eelnimetatud maksudes ja tasudes on sisse arvestatud Eesti käibemaks, mille määr on 22% [17].

### 4.1.4 Elektrienergia müümine

Kodumajapidamises elektrienergia müümine on muutunud üha populaarsemaks, sest taastuvenergia lahendused, nagu näiteks päikesepaneelid ja tuulegeneraatorid on üha lihtsamini kättesaadavamad ja paigaldatavad. Elektrienergia müümine tähendabki, et kodumajapidamine toodab varasemalt välja toodud lahenduste abil kodus toodetud

elektrit ning annab seda võrku. Olles sõlminud võrguettevõttega müügi lepingu on võimalik oma üleliigne ehk tootmisest üle jäänud energia võrgule tagasi müüa. Selleks on vajalik ka spetsiaalne elektriarvesti, mis suudab mõõta elektrienergia liikumist mõlemat pidi. Elektrienergia hind müümisel sisaldab palju vähem makse. Müügihind kujuneb börsihinnast, kust müümisel arvestatakse maha müügi marginaal. Elektrienergia müümine on eriti kasulik just siis, kui tarbimist saab suunata müügi hinnast madalama ostuhinnaga tundidele. Hindade kujunemine on paremaks mõistmiseks toodud järgneval joonisele 4.5.



Joonis 4.5 Elektri ostu- ja müügihinna kujunemine.

Näide 2024. aasta märtsikuu elektri arvest on välja toodud järgneval joonisel 4.6. Joonisel on näha, kuidas kõik eelnimetatud maksud ja tasud mõjutavad lõpphinna kujunemist. See süsteem peegeldab energiasektori keerukust, kus tarbijatele kohaletoimetatava elektri hind sõltub mitmest erinevast tegurist alates tootmiskuludest kuni riiklike maksupoliitikateni.

ARVE			
Nimetus	Kogus	Ühik	Maksumus (EUR)
<b>Elektrienergia</b>			
Elektrienergia	1525.963	kWh	104.53
Elektrienergia, mikrotootja	-339.469	kWh	-18.75
Börsihinna müügi marginaal	1525.963	kWh	4.03
Börsihinna müügi marginaal, mikrotootja	339.469	kWh	0.72
Kuutasu	1.000	tk.	0.00
<b>Võrguteenus</b>			
Elektri edastamine: päev	553.756	kWh	27.41
Elektri edastamine: öö	972.207	kWh	23.38
Kuutasu	0.964		19.13
<b>§ Taastuenergia tasu ja elektriaktsiis</b>			
Elektriaktsiis	1525.963	kWh	1.53
Taastuenergia tasu	1525.963	kWh	16.02
Müügisumma käibemaksuta (EUR)			196.75
Müügi käibemaks 22% (EUR)			43.29
Ostusumma käibemaksuta (EUR)			-18.75
<b>Arve summa kokku (EUR)</b>			<b>221.29</b>
<b>Tasumisele kuulub (EUR)</b>			<b>221.29</b>

Joonis 4.6 2024. aasta märtsikuu elektri arve koos erinevate tasude ja maksudega.

Kokkuvõttes koosneb elektrienergia kogumaksumus Eestis mitmest erinevast komponendist: elektrienergia enda hind, võrguteenuse tasu, taastuenergia tasu ja erinevad maksud. Kõik need elemendid mõjutavad üksteist ning kokku kujundavad need tarbijatele esitatava elektriarve lõppsumma.

## 4.2 Rahareserv

Tänapäeval, kui elektri hinnad kõiguvad tihti ja ettearvamatult, otsivad kodumajapidamised võimalusi oma energiakulude juhtimiseks ja optimeerimiseks. Üks innovaatiline lähenemine sellele probleemile on rahareservi kasutamine elektriseadmete ekstratundide planeerimiseks, et ära kasutada madalamaid elektri hindu. See meetod mitte ainult ei aita vähendada kulusid, vaid toetab ka energia efektiivsemat kasutamist, aidates kaasa jätkusuutlikkuse eesmärkide saavutamisele. Kodumajapidamiste elektriseadmed, nagu pesumasinad, nõudepesumasinad ja kliimaseadmed, nõuavad olulist osa igapäevasest energiatarbimisest. Traditsiooniliselt on nende seadmete kasutamist juhitud vajaduspõhiselt, ilma arvestamata elektri hinna kõikumist turul. Kuid elektri hinna muutlikkuse tõttu võivad kodumajapidamiste energiakulud oluliselt erineda sõltuvalt tarbimise ajast.

Rahareservi kasutamise strateegia põhineb igapäevase eelarve eraldamisel, mida saab kasutada seadmete tööajaks ajal, mil elektri hinnad on madalamad. See süsteem eeldab, et seadmetel on kindlaks määratud minimaalsed töötunnid, mis tagavad nende põhifunktsioonide täitmise, ja võimalikud ekstratunnid, mida saab täita, kui rahaline eelarve ja madalad elektri hinnad seda võimaldavad. Energiatarbimise optimeerimine rahareservi meetodi abil nõuab reaajas andmete analüüsi elektri hindade kõikumiste kohta ja võimet kohandada seadmete töötamist vastavalt. See tähendab, et kodumajapidamised peavad olema varustatud nutikate energiajuhtimissüsteemidega, mis suudavad automaatselt tuvastada soodsaimad tarbimisajad ja kohandada seadmete tööd vastavalt.

See lähenemine võimaldab mitte ainult säästa energiakuludelt, valides seadmete töötamiseks odavamad tunnid, vaid aitab ka tasakaalustada energiavõrgu koormust, vähendades nõudlust kõrge tarbimisega tippaegadel. Lisaks sellele toetab see lähenemine jätkusuutlikkuse põhimõtteid, vähendades üldist energiatarbimist ja soodustades taastuenergia allikate efektiivsemat kasutamist.

Kokkuvõttes pakub rahareservi kasutamine elektriseadmete ekstratundide juhtimiseks kodumajapidamistele paindlikku ja efektiivset viisi energiakulude vähendamiseks. See nõuab siiski teadlikkust turuhindade muutlikkusest ja investeeringuid nutikasse kodutehnoloogiasse, mis võimaldab seda strateegiat edukalt rakendada. Selline lähenemine esindab energiatarbimise tulevikku, kus teadlikud ja tehnoloogiliselt varustatud kodumajapidamised suudavad aktiivselt juhtida oma energiakasutust, saavutades nii majanduslikke kui ka keskkonnaalaseid eeliseid.

## 5 LÄHTEANDMED

Mudeli loomiseks on lähtutud kodumajapidamisest, kus elektritarbimine kõrgem kui tavalises perekonnas. See viitab suuremale elamispinna ja rohkematele pereliikmetele, mis tähendab, et kodumasinad on suuremad ning kasutusel sagedamini. Peamisteks elektritarbijateks on pesumasin, kuivati, ventilatsioon, põrandaküte ja veeboiler. Täiendavalt lisandub veel elektriauto, mis vajab igapäevast laadimist, tõstes elektritarbimise veelgi kõrgemale tasemele. Lisaks on selles kodumajapidamises kasutusel päikesepaneelide abil taastuenergia tootmine. See aitab vähendada üldist elektritarbimist ja toota osa energiast kohapeal, mis võib vähendada sõltuvust võrguelektrist ja samal ajal vähendada elektriarveid.

Lisaks suuremale elektritarbimisele ja taastuenergia kasutamisele peavad sellises kodumajapidamises seadmed olema varustatud võrgujuhtimisega, et tagada energiatõhus ja paindlik kasutus. Võrgujuhtimisega seadmed võimaldavad automaatselt või kaugelt juhtides kohandada elektritarbimist vastavalt energiaturu tingimustele, nagu elektrihinna kõikumised ja energiavõrgu koormus. Võrgujuhtimisega seadmed võivad sisaldada nutikaid termostaate, mis reguleerivad kütet ja jahutust vastavalt elektri hinnale või kasutaja eelistustele. Lisaks võivad kasutusel olla nutikaid pesumasinaid, mis võimaldavad suunata pesemist madalama elektri hinnaga tundidele. Samuti võimaldavad need seadmed jälgida energiakasutust reaalselt, aidates kodumajapidamistel paremini mõista oma elektritarbimist ja leida viise selle optimeerimiseks. Selliseid funktsioone omavaid seadmeid on võimalik juhtida ka energiajuhtimissüsteemi abil.

### 5.1 Kasutatavad seadmed ning sisendsuurused

Mudelis lähte kodumajapidamiseks võetud eramu elektritarbimine ületab 10 000 kWh aastas, mistõttu on kasutusel Elektrilevi võrgupakett „Võrk 4“. Võrk 4 öine võrguteenusetasu on 2,56 s/kWh ning päevane 4,50 s/kWh. Käesoleva töö hetkel on kehtestatud elektriaktsiis 0,18 s/kWh ning taastuenergia tasu 1,28 s/kWh. Lisaks on elektripaketti pakkuja Elektrumi poolt kehtestatud ostu- ja müügi marginaal vastavalt 0,26 ja 0,32 s/kWh. Eelnevatele tasudele ja maksudele on juba lisatud käibemaks. Järgnevalt on välja toodud eramus kasutatavad mudeli loomisel kasutatavad elektriseadmed. Need seadmed on valitud, kuna need on antud kodumajapidamises kõige efektiivsemalt tarbimisajaga nihutatavad ilma, et suuri ebamugavusi tekitataks. Lisaks on nende seadmete kohta saadaval mõõteandmed, mis võimaldavad täpsemalt analüüsida ja optimeerida energiakasutust [17].

### **5.1.1 Ventilatsioon**

Tänapäeva hooned ehitatakse üha õhutihedamaks, et parandada energiatõhusust ja vähendada soojuskadu. Kuigi õhutihedus aitab hoida hooned soojemana talvel ja jahedamana suvel, toob see kaasa ka väljakutseid, eriti seoses siseõhu kvaliteediga. Korralik ventilatsioon muutub kriitiliseks, kuna õhutihedamad hooned võivad koguda niiskust ja saasteaineid, mis mõjutavad elanike tervist ja mugavust.

Kodumajapidamise ventilatsioonisüsteemide tavalised töötunnid võivad olenevalt süsteemi tüübist ja paigalduskohast erineda. Paljudes kodudes töötab ventilatsioonisüsteem pidevalt, et tagada värske õhu pidev liikumine ja kasutatud õhu eemaldamine. Mõnedes kodudes võidakse ventilatsioonisüsteemi tööd ajastada, et see töötaks ainult teatud tundidel, näiteks päeval või öösel, sõltuvalt inimeste viibimisest kodus või energiakulude kokkuhoiu eesmärkidest. Mõnes majapidamises võivad elanikud ise otsustada, millal ja kui kaua ventilatsioonisüsteem töötab, kasutades selleks lüliteid või kaugjuhtimispulte. Üldiselt on soovitatav, et ventilatsioonisüsteem töötaks piisavalt kaua, et tagada piisav õhuvahetus ja hoida siseõhu kvaliteet kõrge.

Ventilatsiooniseade Domekt R 700 V, millel on rootorsoojusvahetiga saavutatud 83%-line soojustagastus, sobib suurepäraselt kuni 330 m<sup>2</sup> suuruste ruumide jaoks. Täiskiirusel töötades tarbib see seade 0,179 kW elektrienergiat, kuid vähendatud kiirusel langeb tarbimine 0,073 kW peale. Kiiruse vähendamine võimaldab oluliselt vähendada elektritarbimist, muutes seadme energiatõhusamaks ja säästlikumaks. Eriti mõistlik on kasutada vähendatud kiirust kõrgendatud elektrihindade ajal, kuna see aitab veelgi rohkem energiakulusid kokku hoida ja seeläbi vähendada kogukulu [18].

### **5.1.2 Elektriauto**

Elektrisõiduki laadimine on lihtne ja seda saab teha nii kodus kui ka avalikes laadimisjaamades. Elektriautode laadimise töövahemikud päeva jooksul võivad varieeruda sõltuvalt mitmest tegurist, sealhulgas kasutaja isiklikust ajakavast, laadimisvõimalustest ja elektrihinnast erinevatel aegadel. Paljud elektriauto omanikud eelistavad laadida oma sõidukeid öösel. See on sageli soodsam, kuna elektri hind võib olla madalam öisel ajal madalama nõudluse tõttu. Lisaks on öösel laadimine mugav, kuna auto seisab tõenäoliselt pikema aja jooksul kasutamata. Laadimistsükli tavaliselt on lühemad kui ööd ning seetõttu võimaldab elektriauto laadimist ka just odavaimatele öötundidele juhtida [19].

Mitsubishi i-MiEV on kompaktne täiselektriline auto, mis on loodud pakkuma keskkonnasõbralikku ja energiatõhusat liikumist linnas ja selle ümbruses. Tootjapoolse

andmelehe järgi võtab elektriauto „aku tase madal“ hoiatusest täislaadimiseni vahemikus 6-10 tundi. Elektriauto laadimiskiirus sõltub lubatud võimsusest. Kodumajapidamise klassikalisest pistikupesast, mis on kaitstud 16 amprilise automaatkaitselülitiga, laadimisel kestab laadimistsükkel maksimaalselt umbes 6 tundi. Maksimaalne laadimisvõimekus on ligikaudu 2,5 kilovatti [20].

### **5.1.3 Pesumasin ja kuivati**

Pesumasina ja kuivati kasutamise ajad päeva jooksul varieeruvad sõltuvalt pereliikmete ajakavadest ja energiakuludest. Tavaliselt pestakse pesu hommikul enne tööle või kooli minekut, õhtul pärast päevaseid tegemisi või nädalavahetustel, kui on rohkem aega majapidamistöode jaoks. Ajastatud pesu on suurepärane viis pesumasina kasutamise optimeerimiseks, eriti kui soovitakse ära kasutada madalamaid elektrihindu või planeerida pesu pesemist mugavamateks aegadeks. Ajastatud pesu võimaldab kasutajatel seadistada pesumasinat nii, et see alustaks pesutsüklit eelseadistatud ajal. Energiajuhtimissüsteemi kasutamine nõuab kasutajalt aktiivset osalemist ja jälgimist, kuid pakub vastutasuks suuremat kontrolli energia tarbimise ja kulude üle.

Pesumasin-kuivati V700 seeria, mille mahutavus on 11,6 kg, on disainitud energiatõhusust silmas pidades. Selle seadme keskmine energiakulu pesutsükli kohta on 0,48 kWh. Kombineeritud pesu- ja kuivatusrežiimi korral, mis võib kesta keskmiselt 4 kuni 7 tundi sõltuvalt valitud programmist ja pesu koormusest, on energiakulu keskmiselt kokku 3,08 kWh. Tsüklite kestvus ja energiakasutus võivad varieeruda olenevalt konkreetsetest kasutustingimustest ja valitud seadetest [21].

### **5.1.4 Põrandaküte**

Põrandakütte süsteemid on enamjaolt varustatud termostaatidega, mis võimaldavad kasutajal hõlpsasti seadistada ja hoida soovitud temperatuuri. Nutikad termostaadid toovad kaasa täiendavaid hüvesid, integreerudes koduautomaatikasüsteemidega, mis võimaldavad küttelehendust distantsilt juhtida ning suunata töövahemike, reageerides muutuvatele energiahindadele. See süsteem ei aita ainult hoida kodu soojana külmematel kuudel, vaid pakub ka majanduslikku säästu, muutes energiatarbimise efektiivsemaks ja kulutõhusamaks.

Antud kodumajapidamises on kasutusel kaks küttelehendust: põhiküttena puiduahi ning lisakütteallikana paigaldatud elektriline põrandaküte. DEVIflex™ 18T, kahejuhtmeline kütetraat, mis tagab ruumide ühtlase soojuse ja suurendab mugavust. Kogu põrandakütte süsteemi võimsus on ligikaudu 2 kW, mis võimaldab küttevajadusi paindlikult ja efektiivselt juhtida [22] [23].

### **5.1.5 Elektriboiler**

ZENEO keraamiliste küttekehaga hooldusvabad boilerid, mille energiatõhususe klass on C, pakuvad suurusi vahemikus 50 kuni 300 liitrit. Konkreetselt on selles majapidamises kasutusel 100-liitrine mudel, mille võimsus on 1,2 kW ja päevane energiakulu temperatuuri hoiderežiimil on umbes 1,34 kWh. Lisandub energia, mis kulub soojavee kasutamisele tegevustes nagu pesemine või söögitegemine. Elektrooniline termostaat tagab boileri korrektse paigalduse jälgimise ja temperatuuri kontrolli. Kvaliteetne soojustuskiht aitab vähendada energiakulu, hoides soojust boileri sees. Lisaks on ZENEO boilerid juhitavad võrgu kaudu, kasutades nutikaid termostaate, mis võimaldavad reguleerida soojust seadest kaugelt. See süsteem tagab mugava juhtimise ja tõhusa energiakasutuse, võimaldades kasutajal igal ajal ja kohas hoida kontrolli boileri temperatuuri ja energiakulu üle [24].

### **5.1.6 Päikesepaneelid**

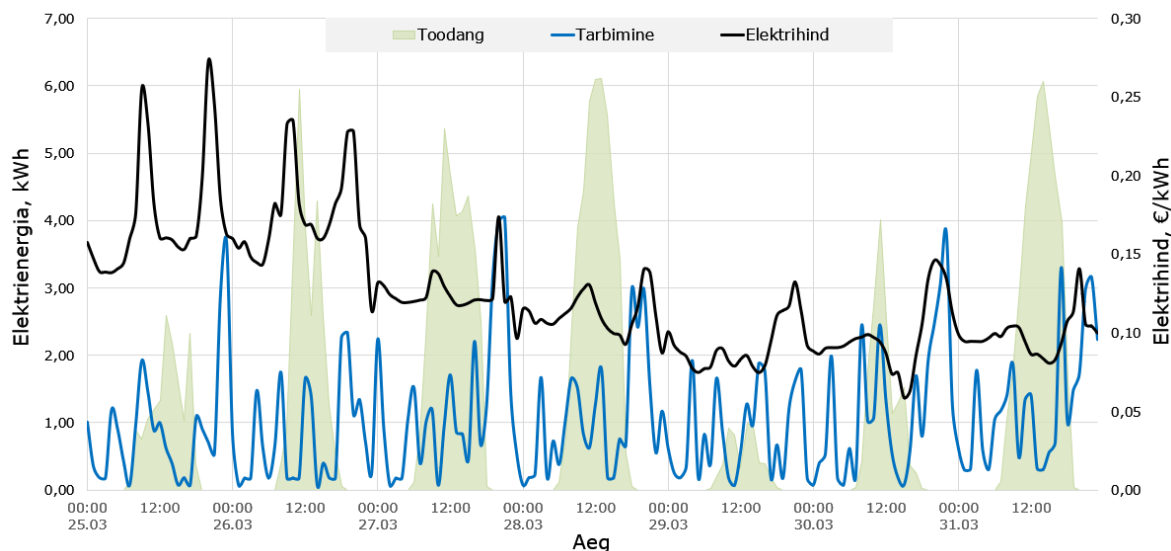
12 kW kodumajapidamise päikesepaneelide süsteem sisaldab 29 tükki JA Solar JAM54S30-415/MR päikesepaneeli, mille igapäevase võimsus on 415 vatti. Need kõrgtehnoloogilised paneelid on mõeldud suure efektiivsuse ja pika elueaga, tagades majapidamisele usaldusväärse ja jätkusuutliku energialahenduse. Süsteemi koguvõimsus võimaldab toota elektrienergiat, et katta päeval ajal suurema osa kodumajapidamise igapäevastest energiavajadustest. Lisaks sellele aitab lahendus vähendada traditsioonilisele elektrivõrgule tuginevaid energiakulusid ning aitab leevendada keskkonnamõju, kasutades taastuvaid energiaallikaid [25].

## **5.2 Seadmete tarbimise mõõteandmed ja järeldused**

Lähteandmete juures on analüüsitud viit seadet, mis hõlmavad ventilatsioonisüsteemi, elektriautot, pesumasina/kuivati kombinatsiooni, põrandakütet ja elektriboilerit. Nende seadmete nädalased tunnipõhised energiatarbimised on kogutud nii õppejõu kui iseseisvalt läbiviidud mõõtmiste ning seadmete andmelehtede põhjal.



Päikesepaneelide varasem toodang oli antud juhul kättesaadav *SolarEdge* monitooringu leheküljelt. *Excel*'i abiga on ühendatud järgnevale joonisele 5.5 seadmete koondatud nädalane tarbimine, toodang ning elektri hind koos tasudega [26].



Joonis 5.1 Eelnimetatud seadmete koondatud tarbimine koos päikesepaneelide toodangu ning elektri hinnaga.

Elektritarbimine (sinine joon) näib tõusevat eelkõige öhtustel aegadel, mis on üsna tavaline muster, kuna inimesed on öhtuti rohkem kodus ning kasutavad rohkem koduelektroonikat ja muid seadmeid. Joonisel on näha, et tarbimise tippajad kattuvad tavaliselt öhtuste tundidega (umbes kl 18:00 kuni 23:00). Elektri hind järgib suuresti tarbimise mustrit, olles kõrgem tarbimise tipphetkedel ja madalam siis, kui tarbimine väheneb. See on tüüpiline näide nõudlusest juhitud hinnakujundusest, kus elektri hinnad tõusevad koos nõudlusega. Lisaks on taustal näha päikesepaneelide toodang (roheline), mis antud nädala puhul jõudis maksimaalselt 6 kilovattini. Keskmiselt antud nädala jooksul jäävad päikesepaneelide tootmisvahemikud kella 7-st hommikul öhtul kella 18-ni. Kuna koduelanikud pole tihtipeale kodus selle vahemikus, siis on ka tarbimine väiksem antud aegadel. Järgnevasse tabelisse 5.1 on koondatud seadmete nädala kogutarbimine ning selle maksumus.

Tabel 5.1 Elektriseadmete nädalased tarbimised ning selle maksumus.

Elektriseade	Nädalane tarbimine, kWh	Maksumus, €
Ventilatsioon	24,77	3,37
Elektriauto	38,5	5,08
Pesumasin/kuivati	22,05	2,96
Põrandaküte	63,00	7,54
Elektriboiler	25,20	3,36
<b>Summa</b>	<b>173,52</b>	<b>22,30</b>

Seadmete maksumused on leitud korrutades elektri hind koos tasudega vastava tunni elektriseadme tarbimisega. Eelnimetatud 5 seadme nädalane kogukulu ilma päikesepaneelideta on 22,30 eurot. Antud arvutuste puhul pole arvesse võetud päikesepaneelide toodangut, mis oli nädala lõikes 188,73 kWh. Kui võtta arvesse ka päikesepaneeli toodangut ning arvestades, et seadmed tarbivad esimesena lokaalset toodangut, siis tegelikkuses tarbitakse võrgust vaid 118,76 kWh. Päikesepaneelide toodangut jääb üle 132,52 kWh, mis müüakse võrku tagasi. Tarbitava energia arvelt tasutakse kokku 15,56 € ning müüdava energia arvelt teenitakse 8,95 €. See tähendab, et seadmete tarbimise kulu vähendatakse päikesepaneelidega umbes 7 € ning pisut rohkem, peaaegu 9 € teenitakse elektrimüügi pealt. Kokkuvõttes on nende elektriseadmete ning päikesepaneelide nädala kuluks 6,62 €.

## 6 ENERGIAJUHTIMISSÜSTEEMI KONTSEPTSIOON

Mitmikagendisüsteemi loomine nõuab programmeerimiskeele kasutamist, mis toetab autonoomseid agente ja nende omavahelist suhtlust. Need süsteemid on sageli keerukad ning võivad nõuda märkimisväärseid ressursse ja aega, et neid põhjalikult kavandada, rakendada ja testida. Seetõttu on enne täieliku süsteemi juurutamist oluline läbi viia põhjalik analüüs, et hinnata selle elujõulisust ja võimalikke majanduslikke eeliseid.

Mitmikagendisüsteemide arendamiseks on olemas mitmeid programmeerimiskeeli ja raamistikke, mis toetavad autonoomsete agentide loomist ja nende vahelist suhtlust. Valik sõltub sageli inseneri või arendaja oskustest ja kogemustest, kuna erinevad keeled pakuvad erinevaid võimalusi ja tööriistu. Üldlevinud valikud hõlmavad *Python*'i, Java ja C++, aga ka spetsialiseeritud raamistikke, nagu JADE või MESA, mis on loodud agentide programmeerimiseks ja simuleerimiseks.

Siiski võib analüüsi ja süsteemi simulatsiooni eesmärgil osutada väga kasulikuks kasutada *Matlab*'i. See levinud analüüsi- ja simulatsioonivahend on mitmesugustes akadeemilistes ja inseneriprojektides laialdaselt kasutusel ning pakub tugevat tuge arvutustele, visualiseerimisele ja andmetöötlusele. Kasutades *Matlab*'i MAS analüüsimiseks ja simuleerimiseks, saate uurida erinevaid stsenaariume ning analüüsida süsteemi käitumist ja tõhusust ilma vajaduseta investeerida keerulistesse riistvaralistesse seadmetesse või reaalses keskkonnas katsetada.

*Matlab* võimaldab ka agentide käitumise dünaamikat põhjalikult analüüsida ning pakub tööriistu, mis lihtsustavad keerukate süsteemide optimeerimist. Tänu oma populaarsusele akadeemilises maailmas võib *Matlab* olla valitud just seetõttu, et seda kasutatakse koolides laialdaselt, pakkudes programmeerijatele tuttavat keskkonda ja mugavaid tööriistu MAS-i väärtuste hindamiseks ja täiustamiseks [27].

### 6.1 Objekt-orienteeritud programmeerimine

Objekt-orienteeritud programmeerimine (OOP) on lähenemine *Matlab*'is, kus programmi elemente käsitletakse objektidena. Need objektid võivad olla asjad või abstraktsed mõisted, millel on omadused ja tegevused. OOP erineb traditsioonilisest programmeerimisest, kus rõhk on funktsioonidel ja protseduuridel. Objektorienteeritus

võimaldab programmeerijal luua klasse, mis kirjeldavad, milliseid andmeid ja tegevusi objektid peaksid omama. Kui klass on loodud, saab selle põhjal luua objekte. Klassid annavad struktuuri ja objekti moodustamine nende põhjal on nagu konkreetse eseme loomine vormi abil. OOP suurim tugevus on andmete ja käitumise kokku koondamine. Klass sisaldab nii andmeid kui ka funktsioone, mis määravad, kuidas objekt peaks käituma. Seeläbi saabki tänu klassidele ja objektidele rääkida agendi põhisest süsteemist.

Teine oluline aspekt OOP-st on pärilikkus, mis tähendab, et üks klass võib kasutada teise klassi omadusi ja funktsioone. See võimaldab korduvkasutada koodi ja programmi mitmekordset läbimist vähendada. Sellega on võimalik vähendada vajalikku andmetöötlus võimekust ja ressursi. Kapseldamine, veel üks OOP põhimõte, keskendub andmete kaitsele ja kontrollile, kes saab neile juurde pääseda. Sellega hoitakse olulised andmed turvalisena ja välditakse soovimatuid muudatusi.

*Matlab* toetab OOP-d, võimaldades luua klasse ja objekte ning kasutada nende eeliseid. See võimaldab programmeerijal koodi struktureerida ja hallata tõhusalt ning luua keerulisi süsteeme, nagu mitmikagendisüsteemid, kasutades OOP kontseptsioone.

## 6.2 Energiajuhtimissüsteemi kontseptsioon

Energiajuhtimissüsteemi väljatöötamine *Matlab*'i objektorienteeritud programmeerimiskeskkonnas on oluline samm kodumajapidamiste energia ja rahasäästuks. Iga klass süsteemis täidab kindlat funktsiooni, et muuta energiatarbimine tõhusamaks alates seadmete tööaja ja energiakulu juhtimisest kuni energiahindade analüüsi ja päikeseenergia haldamiseni. Süsteemi simulatsioon võimaldab modelleerida ja hinnata energiajuhtimise lahenduste efektiivsust enne nende tegelikku rakendamist, aidates sellega kindlaks teha optimaalsed strateegiad energia tarbimise vähendamiseks ja kulude kokkuhoiuks. Mudeli loomisel on pandud suurimat rõhku rahalisele kokkuhoiule, tagades, et igas süsteemi etapis kaalutakse kõige odavamaid tarbimisvõimalusi. Süsteem prioriteediks on saavutada rahalist kokkuhoidu ning see võib toimuda mugavuse ehk seadmete töötundide arvelt. Mudeli ülesehituse ja tööpõhimõtete mõistmiseks on oluline tutvuda järgnevate mõistetega:

- **Miinimum-tunnid:** seadme töötundide minimaalne arv, mis on vajalik seadme põhifunktsioonide säilitamiseks.

- **Normaal-tunnid:** lisatunnid, mis tagavad seadme töötamise abil kasutajale täiendava mugavuse, nagu kliimaseadme pikem tööaeg ruumitemperatuuri optimaalse hoidmiseks.
- **Võimsus:** seadme maksimaalne elektrienergia tarbimine kilovattides, mis määrab selle energianõudluse tippkoormuse ajal.
- **Vähendatud võimsus:** seadme madalam elektrienergia tarbimine kilovattides, mis saavutatakse energiasäästurežiimides või madalama nõudluse perioodidel.
- **Prioriteetsus:** seadme tähtsus majapidamises, mis määrab, millises järjekorras seadmed energiat tarbivad. Näiteks kõrge prioriteediga seadmed, nagu soojaveeboilerid, saavad energiatarbimises eelisjärjekorra.
- **Hinnapiir:** parameeter, mis määrab energiahinna ülempiiri, mille juures süsteem peab energiatarbimist vähendama või nullima, et hoida kulusid kontrolli all.
- **Rahareserv:** rahareserv on finantspuhver, mis on ette nähtud katma seadmete normaaltundide töövahemike.
- **Päevane jaotus:** strateegia, mis hõlmab seadme miinimumtundide hajutamist kogu päeva vältel.

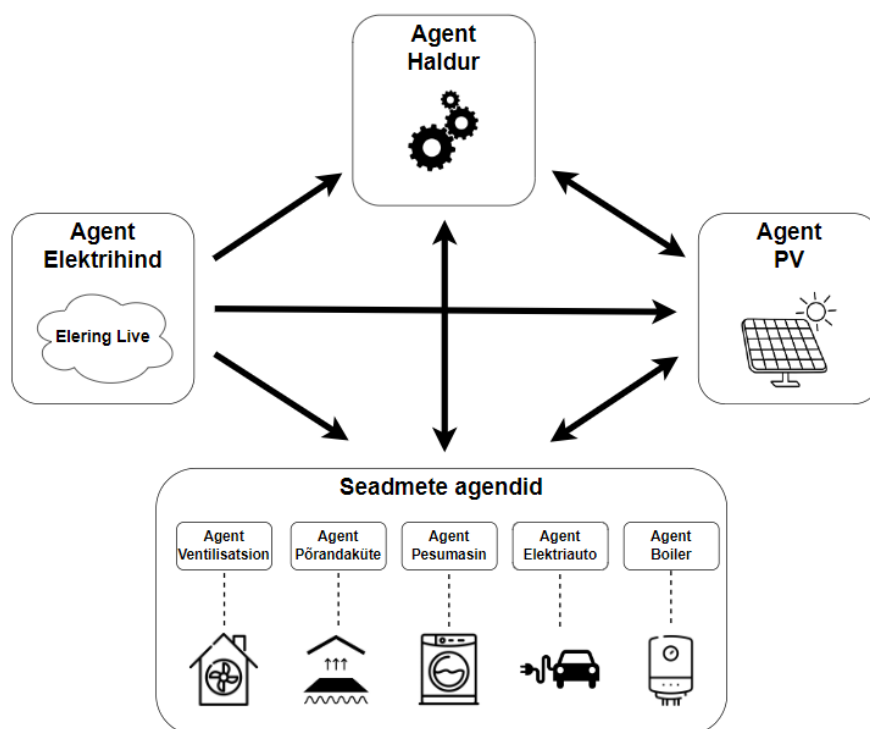
Need mõisted aitavad mõista paremini energiajuhtimissüsteemi loomist, mis suudab prognoosida seadmete töövahemike vastavalt muutuvatele energiahindadele, tagades sellega energiakulu optimeerimise ja majapidamise energiatõhususe.

Mudeli loomisel on kasutatud agentide kujutamiseks *Matlab*'i klasse. Energiajuhtimissüsteem koosneb mitmest erinevast klassist: energiahind, PV, seadmed ja energiahaldur. Need komponendid töötavad koos, et vähendada energiakasutust, juhtida kulusi odavamatele vahemikele ja tagada energiajuhtimise süsteemi tõhusus ja jätkusuutlikkus. Järgnevalt on välja toodud klasside lühikirjeldus:

- „Elektrihind“ klass pakub ajakohastatud ja korrigeeritud energiahindade teavet, arvestades erinevaid makse ja tasusid.
- „PV“ klass keskendub päikeseenergia andmete haldamisele, kogudes ja töödeldes informatsiooni päikeseenergia tootmise kohta.
- Klass „Seadmed“ on loodud kodumasinade ja muude energiat tarbivate seadmete haldamiseks energiajuhtimissüsteemis. Klassi eesmärk on luua igale elektriseadmele oma agent. Klass sisaldab mitmeid meetodeid, mis aitavad defineerida seadmete töötunde, optimeerida energiakasutust ja vähendada energiakulusid.

- „Haldur“ klass on süsteemi osa, mis koondab kõikide klasside andmed ja funktsionaalsused eesmärgiga juhtida seadmete normaal-töötunde.

Mitmikagendissüsteemis nimetatakse eelnevalt välja toodud klasse agentideks. Energiajuhtimissüsteemi struktuur koos agentidega on välja toodud järgneval joonisel 6.1. Iga agendi roll on erinevate seadmete või protsesside juhtimine ja monitoorimine. Süsteem on projekteeritud selliselt, et kõik agendid suudavad omavahel suhelda, andes edasi olulist informatsiooni ja võttes vastu juhiseid kesk-agendilt, mis võimaldab süsteemi kui terviku efektiivset toimimist.



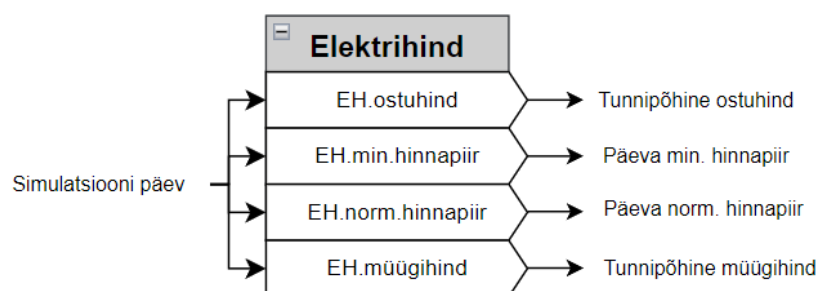
Joonis 6.1 Energiajuhtimissüsteemi struktuurskeem koos kasutatud agentidega.

### 6.3 Elektri hinna klass

Klass „Elektri hind“ on loodud energiahindade haldamiseks ja töötlemiseks, mida kasutatakse energiajuhtimissüsteemis. Klassi peamine ülesanne on energia hinnaandmete kogumine, töötlemine ja analüüsimine. Allpool on üksikasjalikumalt kirjeldatud iga selle klassi meetodi tööpõhimõtteid ja kasutusalasid. Elektri hinna klass vajab sisendina ainult simulatsioonipäeva. Normaalolekus on selleks järgmine päev, kui päevane kell on ületanud 15.00 piiri. See on tingitud sellest, et päev-ette elektrituru järgmise päeva hinnad on avalikud alates peale kella 15.00.

- Meetod „**EH.ostuhind**” vastutab energiahindade kogumise eest Eleringi kodulehelt. Meetodi tööjärjekord on järgmine:
  1. Vastavalt simulatsiooni päevale määratletakse päeva algus ning lõppkellaeg.
  2. Ehitatakse Eleringi veebiaadress vastavalt eelnevatele kellaegadele, kus on välja toodud antud vahemiku kohta salvestatud infokogum.
  3. Valib infokogumist *Nordpoolspot*’i Eesti elektri börsihinnad ning salvestab need.
  4. Lisab energiahindadele võrguteenuse tasu vastavalt kellaajale ning taastuvenergiatasu, elektriaktsiisi ning ostumarginaali.
  5. Lõpphinnale lisatakse ka käibemaks.
- Meetodid „**EH.Min.hinnapiir**” ja „**EH.Norm.hinnapiir**” vastutavad energijahtimissüsteemi hinnapiiride leidmiseks. Viimased vastavalt keelavad või vähendavad seadmete miinimum või normaal-tundide täitmist, et suurendada rahalist kokkuhoidu. Meetodite tööjärjekord on järgmine:
  1. Samamoodi nagu meetod „Hinnapäring” leitakse vastavalt simulatsioonipäevale elektri hinnad.
  2. „Min. hinnapiir” meetod leiab simulatsioonipäevale eelneva 7 päeva ning „Norm. hinnapiir” leiab eelneva 30 päeva hinnad.
  3. Seejärel leitakse vastavate vahemike keskmised hinnad ning lisatakse neile tasud ning maksud.
- Meetod „**EH.müügihind**” vastutab elektri müügihinna salvestamise eest. Müügihind koosneb varasemalt „EH.ostuhind” meetodis saadud börsihinnast, millelt on maha arvestatud müügi marginaal.

Elektrihinna klass vajab sisendina ainult simulatsioonipäeva. Meetodite abil väljastab klass tunnipõhist ostu- ja müügi hind ning päeva min. ja norm. hinnapiiri. Nende abil on võimalik teistel klassidel elektrihinna põhjal otsuseid vastu võtta. Elektrihinna klassi meetodid koos vastavate sisendite ja väljunditega on toodud järgneval joonisel 6.2



Joonis 6.2 Elektrihinna klassi meetodid koos sisendi ja väljunditega.

## 6.4 Päikesepaneeli klass

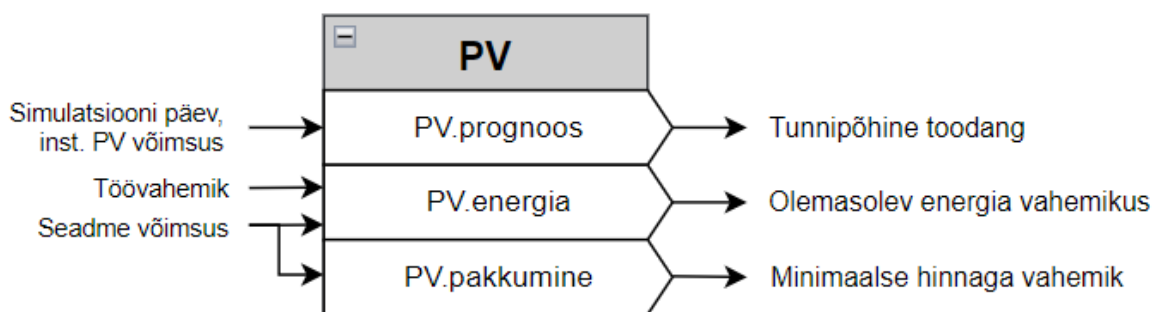
Klass „PV“ on loodud päikeseenergia tootmise prognooside kogumiseks ja haldamiseks. Klassi ülesanded hõlmavad päikeseenergia tootmise prognoosimist ja töötlemist, ülevaate andmist saadaoleva päikeseenergia kohta ning päikeseenergia hinna ja kättesaadavuse jälgimist. Klass kasutab erinevaid andmeallikaid, sealhulgas veebipõhiseid tarkvaraliideseid ja kohalikke andmefailide lugemisi. Sisendina vajab „PV“ klass installeeritud päikesepaneelide võimsust, simulatsiooni päeva ning seadmete tarbitud energiat koos töövahemikuga. Allpool on kirjeldatud iga klassi meetodit ja nende funktsioone:

- Meetod „**PV.prognoos**“ on klassi keskne funktsioon, mis tegeleb päikeseenergia tootmise andmete kogumise ja töötlemisega:
  1. Meetod otsustab, kas andmeid kogutakse veebist või kohalikust failist, sõltuvalt määratletud andmeallikast.
  2. Veebipõhises andmekogumises konstrueeritakse aadressiriba päikeseenergia prognoosi kogumiseks ja kasutatakse *Matlab*'i funktsioone andmete veebist lugemiseks. Saadud andmed töödeldakse ja salvestatakse.
  3. Kohaliku faili põhises andmekogumises loetakse andmed Exceli failist, mis on vajalik, kui veebiinfo pole saadaval või kui eelistatakse kohalikku andmete abil simuleerimist.
  4. Päikeseenergia toodangu prognoosid suurused muudetakse vastavalt paigaldatud võimsusele ja konverteeritakse kilovatt-tundidesse.
- Meetod „**PV.energia**“ võimaldab maha arvata teatud hulga energiat määratud ajavahemikus:
  1. Kontrollitakse, kas antud töövahemiku jaoks on piisavalt saadaolevat energiat.
  2. Kui energia on saadaval, vähendatakse vastavat energiahulka seadme poolt tarbitava energiaga.
  3. Meetod tagab, et päikesepaneelide prognoositavat energiat ei kasutata rohkem kui soovitud ega hetkedel, kus paneelid ei tooda energiat.
- Meetod „**PV.pakkumine**“ otsib odavaimat päikeseenergia kasutamise vahemikku, mis suudab pakkuda elektriseadmele vajalikku energiahulka:
  1. Alustuseks filtreeritakse välja ajavahemikud, kus on piisavalt energiat ja mis pole seadme poolt juba kasutusel.
  2. Väljavalitud ajavahemikest otsitakse minimaalse hinnaga vahemik.



3. Elektriseadmele tagastatakse võimalusel odavaima töövahemiku pakkumine. Pakkumise hind saadakse elektrihinna klassist meetodist „EH.müügihind“.

Kokkuvõttes „PV“ klass võimaldab prognoosida, hallata ja optimeerida päikeseenergia kasutamist energiajuhtimissüsteemis, tagades energia tõhusa kasutamise ja kulude optimeerimise. Klassi meetodid koos vastavate sisendite ja väljunditega on toodud järgneval joonisel 6.3



Joonis 6.3 PV klassi meetodid koos sisendi ja väljunditega.

## 6.5 Seadme klass

Klass „Seadmed“ on loodud kodumasinade ja muude energiat tarbivate seadmete haldamiseks energiajuhtimissüsteemis. See klass sisaldab mitmeid meetodeid, mis aitavad defineerida seadmete töötunde, juhtida energiakasutust ja vähendada energiakulusid. Klassi omadused ja meetodid võimaldavad efektiivselt hallata seadmete tööaega, arvestades energiahindu ja saadaolevat päikeseenergiat. Klass „Seadmed“ nõuab kõige rohkem kasutaja poolt määratud sisendsuurusi, milleks on:

- seadme nimi,
- seadme miinimum-töötunnid,
- seadme normaal-töötunnid,
- prioriteetsus,
- päeva jaotus,
- võimsus ja vähendatud võimsus.

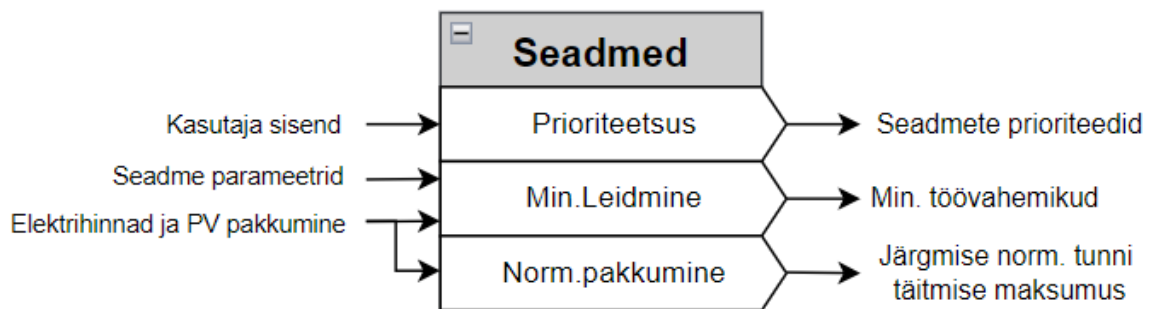
Seadme miinimum ja normaal-tunnid on kasutaja poolt subjektiivne hinnang tundide arvule, millega minimaalne ning optimaalne mugavustase saavutatakse. Samamoodi peab kasutaja hindama seadmete omavahelist konkurentsi, millega määratakse eelisjärjekorras seadmete töö. Samas on ka võimalik igale seadmele määrata sama prioriteetsusklass, mis tähendab, et proovitakse kõikide seadmete eesmärged korrigeerida täita. Päeva jaotus tagab selle, et elektriseadmed ei täidaks päevas vajalikke tunde ainult kõige odavamatel hetkedel. Viimane ohustab seda, et elektriseade lülitatakse

sisse kogu ööks, kui elektri hind on tõenäoliselt odavam, või päikesepaneeli toodangu ajale ning seeläbi täites oma eesmärgi pärasel tunnil korraga. Näiteks pörandakütte ööseks mitmeks tunniks sisselülitamisel tõuseb temperatuur väga kõrgeks ning ebamugavaks ning õhtuks võib tuba juba külm olla. Seadmete infolehest võiks olla leitavad seadmete võimsus ning energiakulu. Seadmetel, millel on mitu töörežiimi, võiks olla ka vähendatud režiimil töötamise võimsus. Kasutaja poolt sisestatud suurused kontrollitakse ning kohandatakse vajadusel. Allpool on kirjeldatud iga klassi meetodit ja nende funktsioone:

- Meetod „**Prioriteetsus**“ järjestab seadmed vastavalt prioriteetsusele ning seejärel kutsub välja järgmise meetodi.
  1. Prioriteedi järgi sorteerimine: Loob prioriteedi järjekorra ja läbib kõik seadmed vastavalt nende prioriteedile, alustades kõrgeimast.
  2. Vastavalt seadmele kutsub välja „**Min.Leidmine**“.
- Meetod „**Min.Leidmine**“ leiab seadme miinimum-tundide täitmiseks sobivad intervallid ning salvestab selleks kulunud raha.
  1. Jaotab päeva osadeks ning leiab, kui mitu 15 minutist intervalli päeva osa kohta seade vähemalt täitma peab. Seda juhul, kui päeva jaotus on seadme parameetrites defineeritud.
  2. Kulude analüüs: Kogub vahemike hinnad võrgust „**EH.ostuhind**“ ja päikeseenergiast „**PV.pakkumine**“ ning sorteerib need alustades odavaimast. Kontrollib ka, et hinnad ei ületaks meetodist „**EH.Min.hinnapiir**“ saadud hinna nivood.
  3. Minimaalsete intervallide jaotamine: jaotab vastavalt minimaalsetele töötundidele intervalle päeva osade vahel. Arvutab ka vastavalt võimsusele kulu. Kui kasutatakse päikeseenergiat, märgitakse kuluks 0.
  4. Kui töötundide arv ei ole veel piisav, leiab järgmise odavaima töövahemiku päeva osi arvesse võtmata. Järjekordselt salvestab ka töövahemiku kulu.
  5. Salvestab seadme töövahemikud, et need ei korrataks normaal-tundide täitmisel.
- Meetod „**Norm.pakkumine**“ leiab vabad töövahemikud ning teeb nendest odavaima pakkumise.
  1. Vabade intervallide kindlakstegemine: Leiab ajavahemikud, mida ei ole veel kasutatud ja mis on seega saadaval järgmiseks töövahemikuks.

2. Odavaima intervalli valimine: Võrdleb saadaolevate intervallide energiahindu, valides nii võrgust kui ka päikeseenergiast kõige madalama hinna.
3. Intervalli pakkumine: Pakub välja odavaima töövahemiku. Lisaks määrab, millist energiaallikat kasutati, kas võrku või päikeseenergia ning viimasega kaasneva energiakulu.

Iga meetod toetab süsteemi üldist eesmärki vähendada energiakulu ja suunata seadmete töötamist, võttes arvesse nii energiahindu kui ka saadaolevat päikeseenergia. Klassi meetodid koos vastavate sisendite ja väljunditega on toodud järgneval joonisel 6.4



Joonis 6.4 Seadmed klassi meetodid koos sisendi ja väljunditega.

## 6.6 Halduri klass

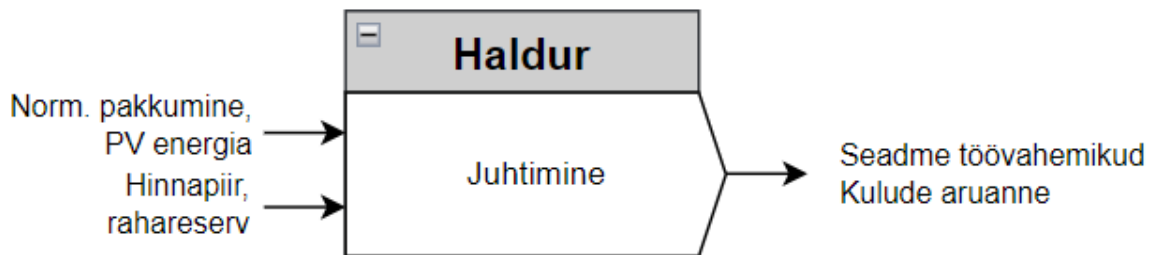
Klass „Haldur“ on energiajuhtimissüsteemi südameks, mis integreerib seadmeid, energiahindu ja päikeseenergia andmeid, et paremini juhtida energiakasutust ja hallata kulutusi. Klassi funktsionaalsus keskendub parima võimaliku energia tarbimise strateegia valimisele, võttes arvesse energia hinda, saadaolevat päikeseenergiat ja rahalisi ressursse. Klass kasutab sisendina teiste klasside tulemusi ning salvestatud suuruseid.

Energiahalduri klassi kuulub üks meetod „**Juhtimine**“, mille põhieesmärk on normaaltundide täitmiseks genereeritud pakkumiste sorteerimine ja rahuldamine.

1. Prioriteetide määramine: Sorteeri seadmed vastavalt prioriteetidele, et määrata, millises järjekorras seadmete pakkumisi rahuldada. Iga prioriteetsusklassi töödeldakse eraldi.
2. Pakkumiste genereerimine ja valik: Genereeri pakkumised kasutades meetodit „**Norm.pakkumine**“ iga seadme jaoks, mis leiab võimaliku tööaja ja arvutab

- selle kulu. Seejärel valib odavaima võimaliku pakkumise, kui see vastab meetodist „**EH.Norm.hinnapiir**“ saadud hinna nivoole.
3. Kulude ja energiaallikate haldamine: Kui kasutaja on määranud normaal-tundide täitmiseks rahareservi ning töövahemiku täitmine toimus läbi võrgust saadud elektri, lahutatakse töövahemiku täitmise kulu rahareservist. Kui kasutati päikeseenergiat, määratakse meetodi „**PV.energia**“ abil selleks kulunud energia vähenemine.
  4. Töötundide logimine: Salvestab iga seadme töötunnid ning arvutab, kui palju normaaltunde on täidetud võrreldes soovitud normaaltundidega.
  5. Kulude ja töötundide analüüs: Lõpus väljastatakse aruanne, mis näitab, kuvab seadmete tööajad, rahalised kulud ja reservijäägi.

„Haldur“ kasutab „Seadmed“, „PV“ ja „Elektrihind“ klasside poolt edastatud teavet, et teha strateegilisi otsuseid energiakasutuse kohta, arvestades rahareservi ja hinnapiire. See võimaldab süsteemil juhtida energiakasutust, vähendada kulusid ja suurendada süsteemi üldist tõhusust. Klassi meetod koos vastavate sisendite ja väljunditega on toodud järgneval joonisel 6.5



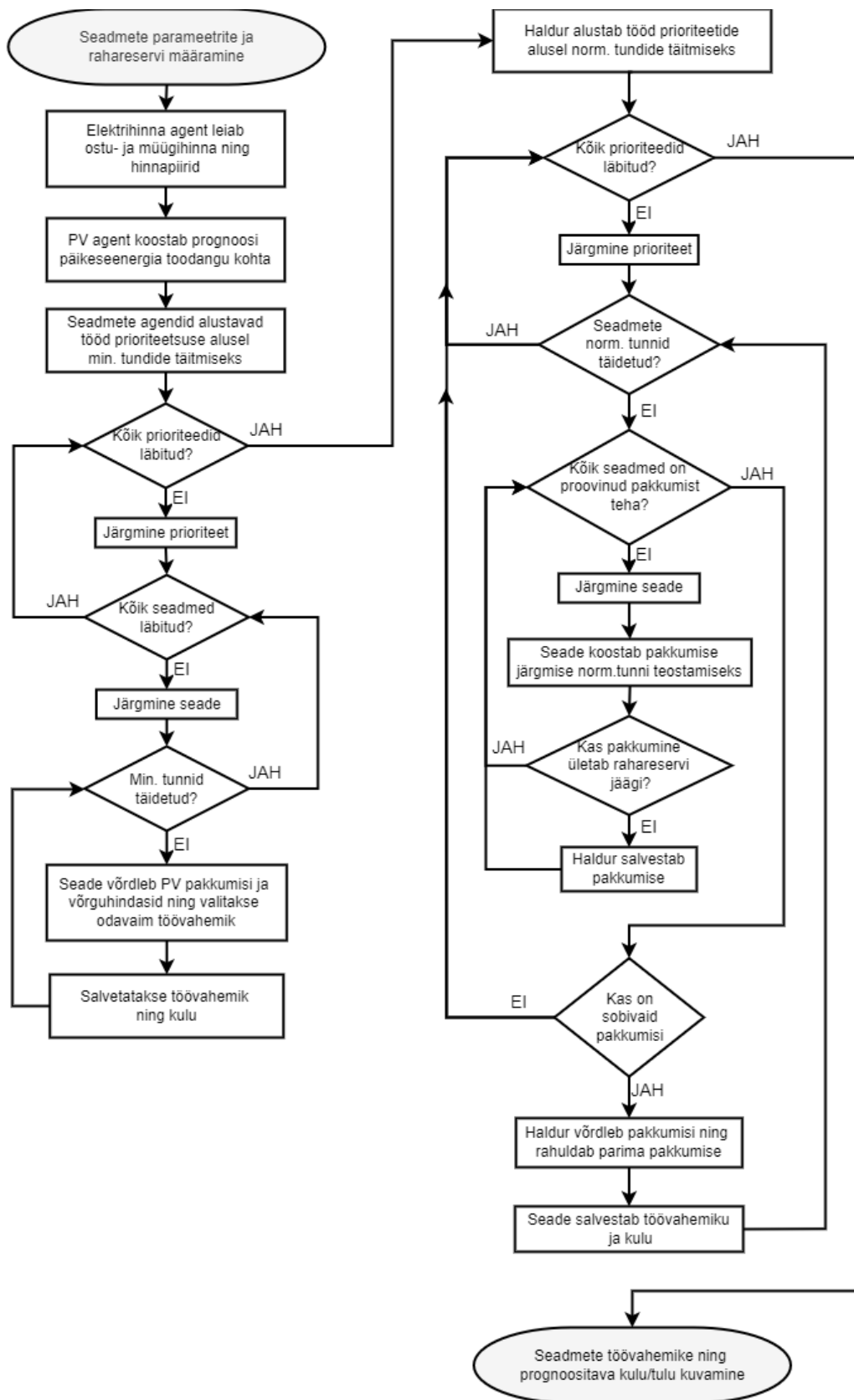
Joonis 6.5 Haldur klassi meetodid koos sisendi ja väljunditega.

## 7 Energiajuhtimissüsteemi simulatsioon

Energiajuhtimissüsteemi tööprotsess koosneb mitmest etapist, mille eesmärk on nihutada seadmete töövahemike rahalise võidu saavutamiseks. Erinevad tööetapid täidavad erinevaid ülesandeid, milleks on info kogumine, analüüsimine ning juhtimine. Süsteemi tööd alustatakse seadmete parameetrite ja rahareservi määramisega. Seadmete puhul on oluline sisestada seadme võimsus ning miinimum ja normaal-tunnid. Esimesena alustab tööd elektriinna agent, mis varustab simulatsiooni erinevate elektrituruga seonduvate suurustega. Viimastest kõige olulisem on elektri ostu- ja müügihind, millele lisaks leitakse ka miinimum- ja normaal-tundide täitmise hinnapiirid. Päikeseenergia prognoos ning energia haldamine on PV agendi vastutusala. Lisaks sellele annab infot seadmetele ka prognoositud päikeseenergia kohta ning vastavalt elektriinnale aitab seadmel normaal-tundide täitmiseks pakkumisi teha. Seejärel alustavad tööd seadmete agendid, kelle esimesteks ülesanneteks saab seadmete miinimum-tundide täitmine. Miinimumtundide täitmist alustatakse prioriteetsuse põhjal, kõrgeima prioriteetsusklassi seadmed saavad esimesena paika panna oma soovitud töövahemikud. Töövahemike täitmiseks võrreldakse võrguhindu ning vahemike, mil päikeseenergia on saadaval ning börsihinnad madalad. Sobiva pakkumise leidmisel salvestatakse töövahemik ning selleks kuluv raha. Kasutades olemasolevat päikeseenergiat loetakse kulu nulliks. Vastav protsess käib kuni kõik seadmed kõikides prioriteedi astmetes saavad oma miinimum-tunnid täidetud.

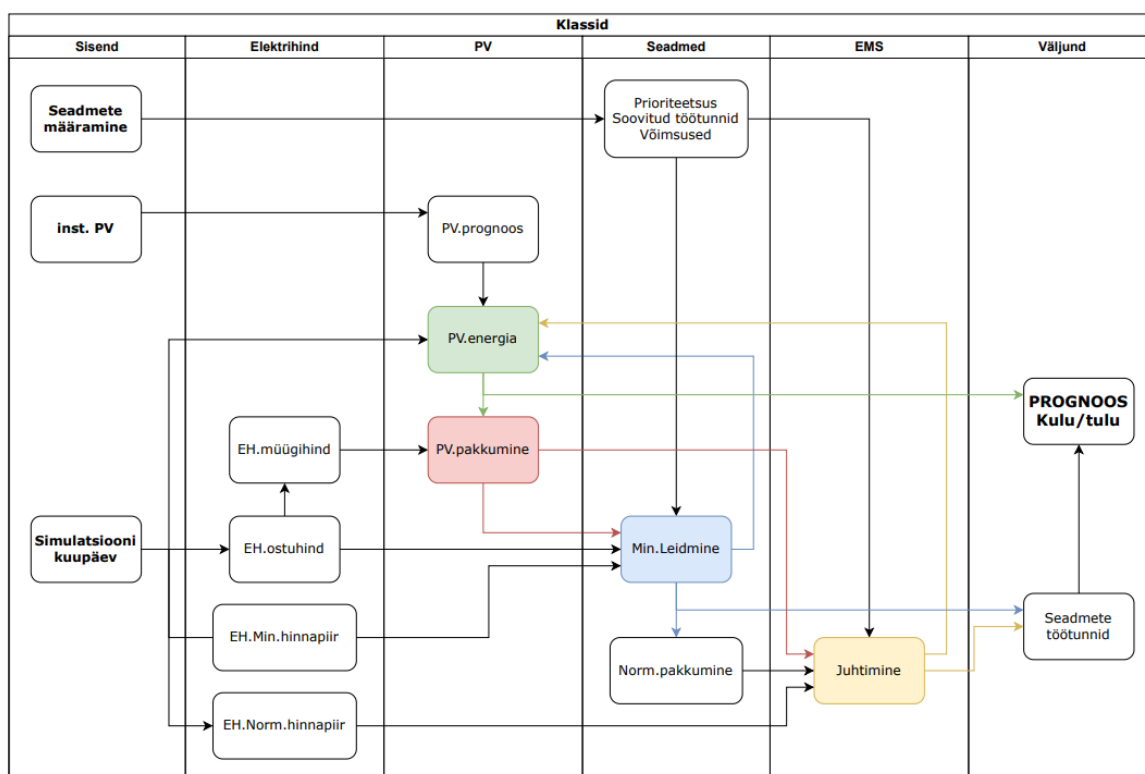
Miinimum-tundide täitumisel alustab tööd haldur, kes hakkab rahareservi ja prioriteetsuse põhjal seadmete normaal-tunde täitma. Protsessi alustatakse jälle kõrgemaist prioriteetsusklassist. Kõik sama prioriteediga seadmed leiavad järelejäänud päeva töövahemikest järgmise odavaima vahemiku normaal-tundide täitmiseks. Selleks võrreldakse jälle olemasoleva päikeseenergia müügihindu ning võrgust ostuhindu. Kui müügihind on kõrgem, kui mõne teise olemasoleva vahemiku ostuhind, siis on mõistlik töövahemiku täitmiseks võrgust energiat osta ning päikesepaneeli toodangut müüa. Iga seade koostab selle põhjal pakkumise, mis oleks tema järgmise töötunni kulu. Haldur koondab pakkumised ning rahuldab neist parima. Pakkumiste koostamine toimub, kuni kõik vastava prioriteetsusklassi seadmed saavad normaal-tunnid täidetud või rahareserv on tühi. Kui haldurini ei jõua ühtegi sobivat pakkumist, siis liigutakse edasi uue prioriteetsusastme juurde ning korratakse protsessi. Haldur valideerib ka pakkumisi, kontrollides pakkumiseks kasutatud elektriinna vastavust normaal-tundide hinnapiirile. Lisaks kontrollitakse ka kas pakkumisi rahuldamiseks rahareservist piisab. Sellega tagatakse, et madalama prioriteetsusega või madalama võimsusega seadmetel tekiks võimalus rahareservi täielikult ära kasutada. Kui rahareserv otsa lõppeb või

seadmete normaal-tunnid täidetud saavad, väljastatakse seadmete päeva töövahemikud koos prognoositava päeva kulu või tuluga. Antud protsess on välja toodud ka skeemina järgneval joonisel 7.1.



Joonis 7.1 Energiajuhtimissüsteemi protsessiskeem.

Energiajuhtimissüsteem põhineb mitme eri klasside ja meetodite vahelisel keerukal suhtlusel, et saavutada energiatõhusus, vähendada ressursside kasutamist ja kulusid. Erinevate andmeklasside integreerimine võimaldab süsteemil prognoosida energia tootmist ja tarbimist täpsemalt ning teha informeeritud otsuseid energia ostmiseks ja müümiseks. Klasside kasutamine võimaldab tekitada seadmete vahelist konkurentsi ning luua kodumajapidamise seadmete vaheline turg. See tähendab, et kodumajapidamise elektriseadmed ning näiteks päikesepaneelid suhtlevad omavahel ning seadmed konkureerivad omavahel päikeseenergia kasutamise nimel. Klasside omavaheline suhtlus on näidatud järgneval joonisel 7.2.



Joonis 7.2 Energiajuhtimissüsteemi klasside omavaheline andmevahetus.

## 7.1 Energiajuhtimissüsteemi simulatsiooni lähteandmed

Esmalt keskenduti energiajuhtimissüsteemi toimivuse valideerimisele, võrreldes süsteemi poolt genereeritud tulemusi lähteandmetes kirjeldatud seadmete mõõdetud energiatarbimisega. Selleks simuleeriti energiajuhtimissüsteemi kasutades samu seadmeid, nende võimsusi ning töötunde, mis tagas, et mudelis kasutatud nädalane elektritarbimine oli võrdne tegelikult mõõdetud tarbimisega märtsi viimasel nädalal.

Selline simulatsioon võimaldas mitte ainult kontrollida süsteemi toimivust energiataseme haldamisel, vaid ka anda usaldusväärne võrdlus päikeseenergia tootmise

prognooside täpsusele. See on oluline, sest päikeseenergia tootmine võib märkimisväärselt erineda sõltuvalt ilmastikuoludest ja aastaajast, mõjutades otseselt süsteemi efektiivsust. Valideerimisprotsess hõlmas ka majandusliku efektiivsuse hindamist, et teha kindlaks, kas süsteemi kasutamine toob kaasa oodatud rahalise kokkuhoiu pelgalt seadmete töövahemike juhtimisel või isegi siis, kui prognoosid eksivad mingil määral. See aspekt on eriti oluline süsteemi pikaajalise jätkusuutlikkuse ja usaldusväärsuse seisukohast, tagades, et isegi potentsiaalsete prognoosivigade korral on süsteem endiselt kasumlik.

Lähteandmetest tuletati seadmete päevased keskmised tööajad ning nädala kogutarbimine, mille põhjal määrati valideerimissimulatsiooni sisendväärtused. Sisendväärtused on välja toodud tabelis 7.1. Valideerimisprotsessis hinnapiire ning rahareservi ei rakendatud, sest need tooksid kaasa lisa kokkuhoidu ning seeläbi võiksid valideerimissimulatsiooni tulemused olla ekslikud. Lisaks pole oluline määrata normaaltunde, sest neid täidetakse vastavalt rahareservi jäägile. Seega on päevased keskmise seadmete töötunnid määratud miinimum-tundideks.

Tabel 7.1 Süsteemi valideerimiseks kasutatavad sisendsuurused.

Seade	Töötunnid, h	Päevane jaotus	Võimsus, kW	Vähendatud võimsus, kW
Ventilatsioon	18	Jah	0,179	0,073
Elektriauto	2,75	Ei	2	0
Pesumasin/kuivati	4,5	Ei	0,85	0
Boiler	3	Jah	1,2	0
Põrandaküte	4,5	Jah	2	0

## 7.2 Talvine prognoos

Energiajuhtimissüsteemi efektiivsuse hindamiseks talvistes tingimustes, kus seadmete tegelikud tarbimisandmed ei ole saadaval, viiakse läbi simulatsioon põhinedes prognoositavatele tarbimisnäitajatele. Selline lähenemine aitab hinnata süsteemi potentsiaalset toimivust kõrgema energiatarbimise perioodil, mis on talvekuudel tüüpiline. Arvestades, et märtsikuu tarbimisandmed on olemas, kasutatakse neid andmeid alusena ning nende põhjal luuakse talveperioodi tarbimise prognoosid, kohandades neid vastavalt oodatavale tarbimise suurenemisele. Talvise energiajuhtimise stsenaariumi loomisel tehakse eeldus, et teatud seadmete energiakasutus suureneb märkimisväärselt (tabel 7.2). Näiteks elektriauto laadimistsükli suurendatakse kaks korda võrreldes märtsikuu tegeliku tarbimisega. Põrandakütte ja boileri tarbimistunde suurendatakse 50 % võrra. Ventilatsioonile,



lisatakse ka väike küttekeha tarbimine, mis aitab ventilatsiooni temperatuuritaset hoida. Need eeldused põhinevad külmemate temperatuuride ja lühemate päevade mõjul, mis tavaliselt suurendavad soojusenergia ja elektrisõidukite laadimisvajadust.

Tabel 7.2 Süsteemi jaanuari kuu prognoosimiseks kasutatavad suurused.

Seade	Min.tunnid, h	Päevane jaotus	Võimsus, kW	Vähendatud võimsus, kW
Ventilatsioon	18	Jah	0,259	0,113
Elektriauto	5,5	Ei	2	0
Pesumasin/kuivati	4,5	Ei	0,7	0
Boiler	4,5	Jah	1,2	0
Põrandaküte	6	Jah	2	0

### 7.3 Suvine prognoos

Energiajuhtimissüsteemi tõhususe mõõtmiseks suveoludes, kus reaalsed seadmete energiakasutuse andmed puuduvad, teostatakse prognoositavate andmete põhjal simulatsioon. Antud simulatsioon võimaldab prognoosida süsteemi võimalikku efektiivsust perioodil, kui energiakasutus on tavapäraselt madalam ning päikeseenergia toodang väga kõrge. Märtsikuu tegelikke mõõtetulemuste põhjal on energiakasutust suvekuudes vähendatud ning simulatsiooniks kasutatavad algandmed on välja toodud tabelis 7.3.

Tabel 7.3 Süsteemi augusti kuu prognoosimiseks kasutatavad suurused.

Seade	Min.tunnid, h	Päevane jaotus	Võimsus, kW	Vähendatud võimsus, kW
Ventilatsioon	18	Jah	0,179	0,073
Elektriauto	2,75	Ei	2	0
Pesumasin/kuivati	4,5	Ei	0,7	0
Boiler	2,75	Jah	1,2	0
Põrandaküte	2	Jah	2	0

### 7.4 Rahareservi ja normaaltundide rakendamine

Energiajuhtimissüsteem on ülesehitatud võimaldamaks seadmetele määrata miinimum ja normaal-tunde. Miinimum-tunnid kujutavad seadmete põhifunktsioonide säilitamiseks minimaalselt päevas sooritatud tunde. Normaaltunnid annavad lisamugavust ning neid täidetakse rahareservi arvelt. Rahareservi määramisega saab kasutaja kindel olla, et normaaltundide täitmiseks päevas liigselt raha ei kulu. Kui hinnad on madalad, saavad seadmed ilmselt kõik oma soovitud tunnid täidetud. Kui aga

hinnad on kõrgemad tekib seadmete vaheline konkurents, milline seade saab ära kasutada päikesepaneelide toodangut või võrgust energiat ostes rahareservi. Lisaks saab seadmetele tekitada prioriteetsusklassi, millega saab tekitada eelisjärjekorda ning konkurentsi kindlate seadmete vahel. Vastasel juhul võistlevad kõik seadmed omavahel loomaks odavaimat pakkumist oma järgneva normaaltunni täitmiseks.

Rahareservi ja normaaltundide kasumlikkuse analüüsiks tekitatakse märtsikuu lähteandmete põhjal seadmetele normaal-tunnid. Seadmete miinimum-tunnid jaotatakse kaheks, ehk pooled tunnid on miinimum ning pooled normaal-tunnid. Sellega tagatakse, et süsteemil on piisav mänguruum. Lisaks määratakse seadmetele prioriteetsused, mis on subjektiivne hinnang seadmete tähtsusele. Rahareserviks on määratud 0,2 €. Lähteandmed on leitavad järgnevast tabelist 7.4.

Tabel 7.4 Rahareserviga süsteemi märtsi kuu prognoosimiseks kasutatavad suurused.

<b>Seade</b>	<b>Min. tunnid, h</b>	<b>Norm. tunnid, h</b>	<b>Päeva jaotus</b>	<b>Võimsus, kW</b>	<b>Vähendatud võimsus, kW</b>	<b>Prioriteet</b>
Ventilatsioon	9	9	Jah	0,179	0,073	Keskmine
Elektriauto	1,5	1,25	Ei	2	0	Kõrge
Pesumasin/ kuivati	2,25	2,25	Ei	0,7	0	Madal
Boiler	1,5	1,5	Jah	1,2	0	Keskmine
Põrandaküte	2,25	2,25	Jah	2	0	Kõrge

## 8 TULEMUSTE ANALÜÜS

Energiajuhtimissüsteemi simuleeritakse esmalt valideerimiseks kasutades sisendväärtusi tabelist 7.1 ajavahemikus 25-31. märts. Simulatsiooniga saavutatakse prognoositult säästu 3,35 €. Prognoositud säästuni on jõutud järgneval tabelis 7.2 välja toodud mudeliga arvutatud tulemuste põhjal. Kulu ja tulu on leitud võttes arvesse seadmete töötunde, prognoositud olemasolevat päikeseenergiat ning elektri hindu. Energiajuhtimissüsteem on salvestanud iga töövahemiku määramisel selle kulu ning üle jäänud toodangu müümisel saadud tulu. Ilma juhtimissüsteemita tulemuste saamiseks kasutatakse lähteandmetes välja toodud seadmete parameetreid ning seadmete tarbimiste mõõteandmeid.

Tabel 8.1 Simulatsiooniga saadud prognoositud tulemused ning potentsiaalne sääst.

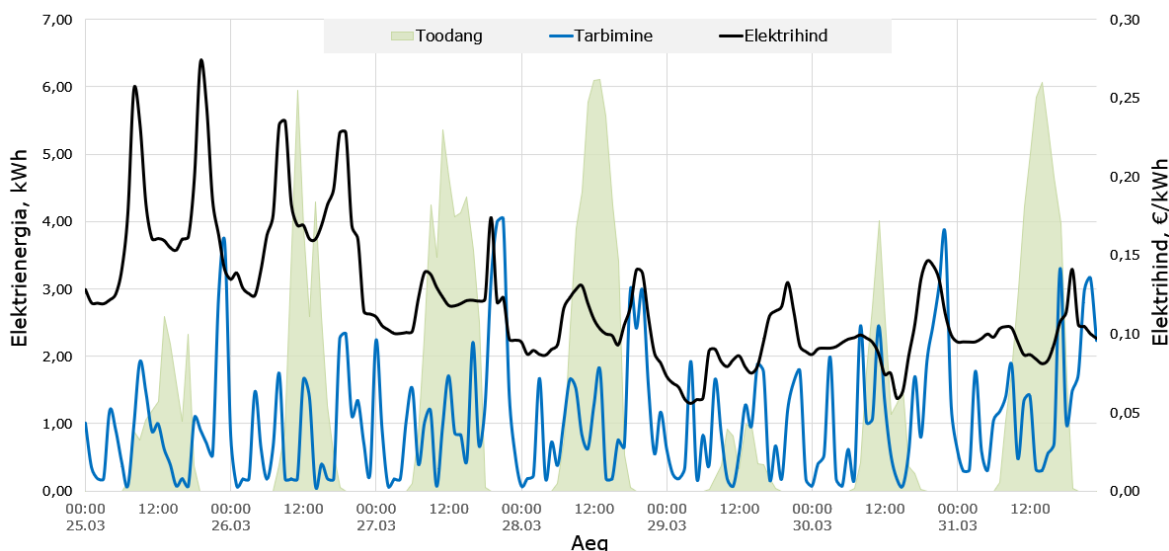
<b>Energia juhtimine</b>	<b>EI</b>	<b>JAH</b>
Päikeseenergia prognoos, kWh	182,64	
Kulu, €	14,46	9,85
Tulu, €	6,88	5,62
Kasum/kahju, €	-7,60	-4,25
<b>Potentsiaalne prognoositud sääst:</b>	<b>3,35</b>	

Süsteemi valideerimiseks võetakse kasutusele tegelikud seadmete elektritarbimise ning päikesepaneelide toodangu mõõteandmed ning leitakse samad majanduslikud suurused. Lihtsustatult kulu ja tulu leidmiseks on tunnipõhiselt seadmete kogutarbimiselt maha lahutatud päikeseenergia toodang ning selle põhjal leitud, kas energiat on võrgust juurde ostetud või võrku müüdnud. Päikesepaneelide toodangu prognoos oli 182,64 kWh nädala lõikes. Tegelikuses toodeti 188,73 kWh ehk prognoos eksis vaid 6 kWh võrra. Tabelitest on võimalik näha, et prognoositud sääst oli väiksem, kui tegelik sääst. See võib tingitud olla päikesepaneelide toodangu ning seadmete töötundide erinevusest.

Tabel 8.2 Simulatsiooniga saadud tulemused ning potentsiaalne sääst tegelike mõõteandmetega.

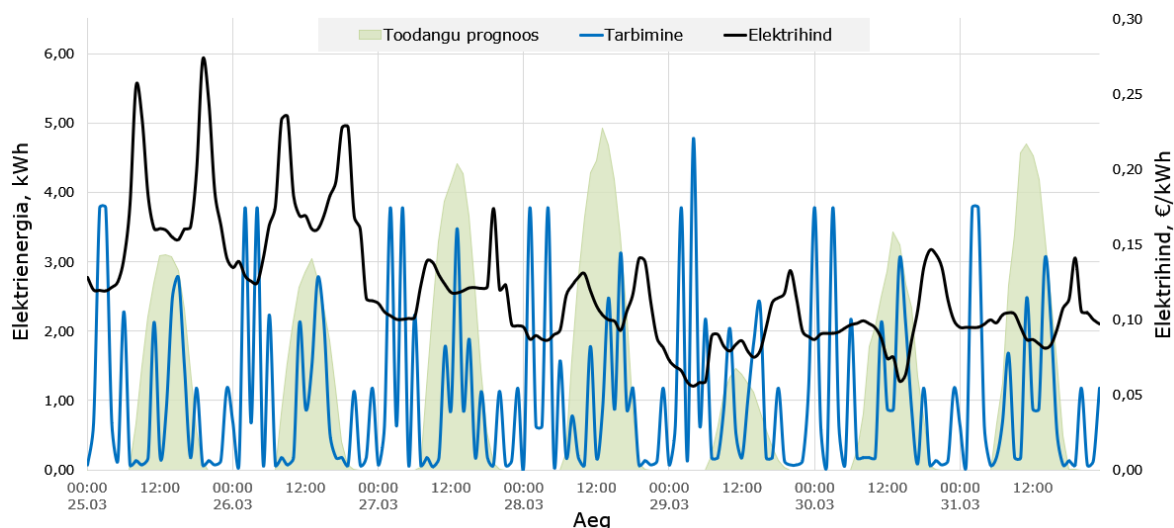
<b>Energia juhtimine</b>	<b>EI</b>	<b>JAH</b>
Päikeseenergia toodang, kWh	182,64	
Kulu, €	14,87	11,10
Tulu, €	6,33	6,14
Kasum/kahju, €	-8,54	-4,96
<b>Tegelik sääst:</b>	<b>3,57</b>	

Järgneval joonisel 8.1 on näha varasemalt välja toodud nädalane elektritarbimine ilma juhtimiseta. Nagu ka varasemalt mainitud on joonisel näha, kuidas tarbimise tippajad kattuvad enamjaolt õhtuste tundidega. Tarbimise muster järgib suuresti elektrihinda, mis näitab ära, et kui inimesed on kodus ehk tavalisematel tarbimisaegadel on ka elektrihind kallim. Antud joonisel on ka päikesepaneelide tegelik toodang välja toodud.



Joonis 8.1 Ilma juhtimiseta nädalane elektritarbimine ja -tootmine koos elektrihinnaga (25.-31. märts).

Järgneval joonisel 8.2 on rakendatud energiajuhtimissüsteemi ning kasutatud päikesepaneelide toodangu prognoosi. Prognoosid enamjaolt kattuvad tegelikkuga, kuid siiski tekib erinevusi. Näiteks prognoositud toodang ei ületa tiputundidel 5 kWh, kui tegelikkuses saavutati maksimaalselt pisut üle 6 kWh.



Joonis 7.2 Energiajuhtimissüsteemiga nädalane elektritarbimine ja -tootmine koos elektrihinnaga (25.-31. märts).

Tarbimise koha pealt on näha suuremat erinevust, sest elektrihinna ja tarbimise ühised hetked on vastupidised. Kui varasemalt oli suurem osa tarbimisest just kõrgemate hindadega hetkedel, siis kasutades juhtimissüsteemi on tarbimine liikunud just päeva elektrihinna madalamatesse hetkedesse. Samas on tarbimist ka just päikesepaneelide tootmishetkedele nihutatud. Seeläbi saavutataksegi eelmainitud rahaline sääst. Oluline on siinkohal see, et tarbimist ei vähendatud, vaid ainult nihutati odavamatele hetkedele.

## 8.1 Talvine prognoos

Energiajuhtimissüsteemi simuleerides tabelis 7.2 välja toodud sisendväärtusetega ajavahemikus 8-14. jaanuar saavutatakse prognoositult säästu 3,68 €. Prognoositud säästuni on jõutud järgnevas tabelis 8.3 välja toodud mudeliga arvutatud tulemuste põhjal.

Tabel 8.3 Simulatsiooniga saadud prognoositud tulemused ning potentsiaalne sääst.

<b>Energia juhtimine</b>	<b>EI</b>	<b>JAH</b>
Päikeseenergia prognoos, kWh	10,23	
Kulu, €	41,56	37,76
Tulu, €	0,70	0,60
Kasum/kahju, €	-40,87	-37,16
<b>Potentsiaalne prognoositud sääst:</b>	<b>3,68</b>	

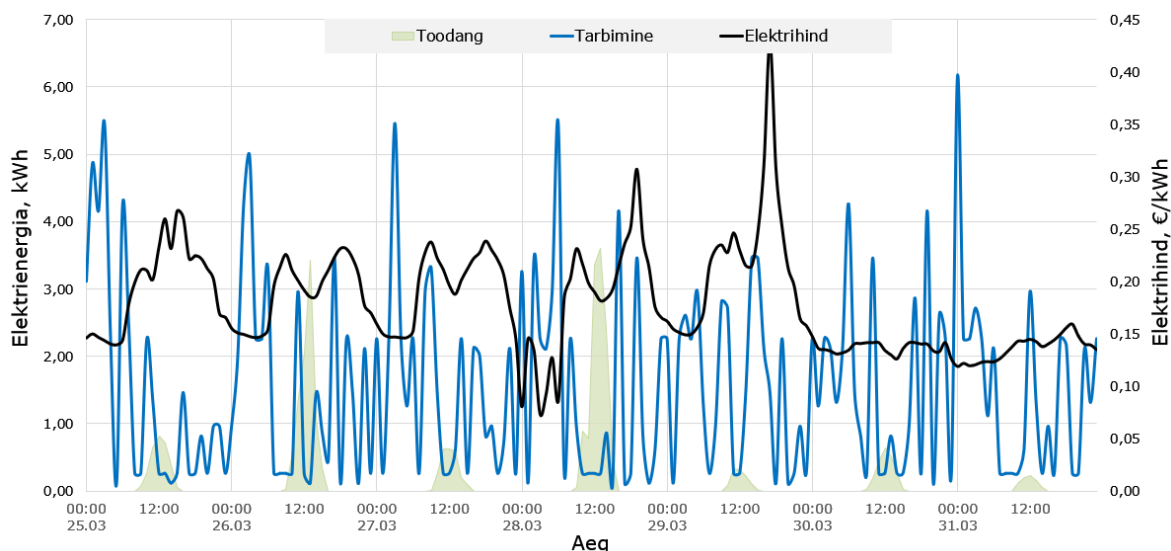
Tulemuste valideerimiseks võetakse kasutusele päikesepaneelide toodangu mõõteandmed ning leitakse samad majanduslikud suurused. Päikesepaneelide toodangu ajaloolised mõõteandmed on saadaval, millega on võimalik täpsemad majanduslikud tulemused saada. Tabelis 8.4 on välja toodud tulemused, kui päikeseenergia toodangu prognoos on asendatud tegelike mõõteandmetega. Päikeseenergia toodangu prognoos oli 10,23 kWh nädalas, kuid tegelikkuses toodeti 29,55 kWh. Erinevus on küll umbes 19 kWh, kuid suuresti süsteemi kasumlikust antud vahe väga ei muuda. Seda seetõttu, et ka päikeseenergiat tarbides leiab süsteem selleks kõige odavamad hetked. Elektrienergia müümiselt tekkiv tulu kasvab nii ilma kui ka koos juhtimissüsteemiga puhul enam-vähem proportsionaalselt ning seetõttu ka väga säästu ei muuda.

Tegelik sääst on pisut suurem 3,88 €, prognoositust umbes 5 % võrra. Kokkuhoid saavutatakse tarbimise juhtimisega odavamatele tundidele ning seeläbi on tarbimise rahaline kulu väiksem.

Tabel 8.4 Simulatsiooniga saadud tulemused ning potentsiaalne sääst kasutades tegelikke päikesetoodangu mõõteandmeid.

Energia juhtimine	EI	JAH
Päikeseenergia toodang, kWh	29,55	
Kulu, €	40,81	36,52
Tulu, €	1,81	1,40
Kasum/kahju, €	-39,00	-35,11
<b>Tegelik sääst:</b>	<b>3,88</b>	

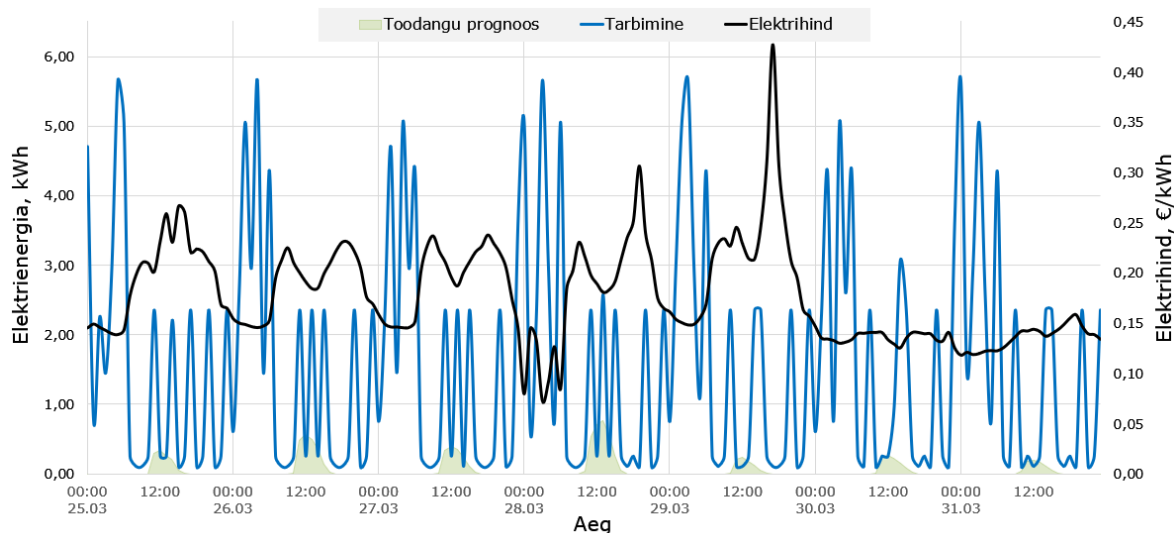
Joonistel 8.3 ja 8.4 on vastavalt välja toodud ilma juhtimiseta ja juhtimisega jaanuari kuu nädalane elektritarbimine koos elektriinna ja toodanguga.



Joonis 8.3 Ilma juhtimiseta nädalane elektritarbimine ja -tootmine koos elektriinnaga (8.-14. jaanuar).

Päikeseenergia prognoosid on väiksemad, kui tegelik toodang. Tegelikult tekkis ka päevi, kus toodang küündis peaaegu 3,5 kWh-ni. Prognooside tipuhetkedel on maksimaalne toodang umbes 0,5 kWh. Sellest tingitult on ka tekkinud vahe nädala prognoosi ja tegeliku toodangu vahel.

Tarbimiskõveralt on aga näha, kuidas jällegi kasutades juhtimissüsteemi saavutatakse muster, kus tarbimine toimub hetkedel, kus elektri hinnad on päeva lõikes kõige madalamad. Oluline on siinkohal see, et tarbimist ei vähendatud, vaid ainult nihutati odavamatele hetkedele.



Joonis 8.4 Energiajuhtimissüsteemiga nädalane elektritarbimine ja -tootmine koos elektri hinnaga (8.-14. jaanuar).

## 8.2 Suvine prognoos

Energiajuhtimissüsteemi simuleerides tabelis 7.3 välja toodud sisendväärtusetega ajavahemikus 14-21. august saavutatakse prognoositult säästu 4,41 €. Prognoositud säästuni on jõutud järgnevas tabelis 8.5 välja toodud mudeliga arvutatud tulemuste põhjal. Augusti kuus on näha, kuidas päikesepaneelidega teenitakse rohkem, kui tarbimisele raha kulub. Energiajuhtimissüsteemiga prognoositakse just tarbimise kulu vähenemist. Toodangult teenitu jääb umbes sama suureks.

Tabel 8.5 Simulatsiooniga saadud prognoositud tulemused ning potentsiaalne sääst.

Energia juhtimine	EI	JAH
Päikeseenergia prognoos, kWh	305,54	
Kulu, €	11,92	6,74
Tulu, €	15,84	15,08
Kasum/kahju, €	3,93	8,32
<b>Potentsiaalne prognoositud sääst:</b>	<b>4,41</b>	

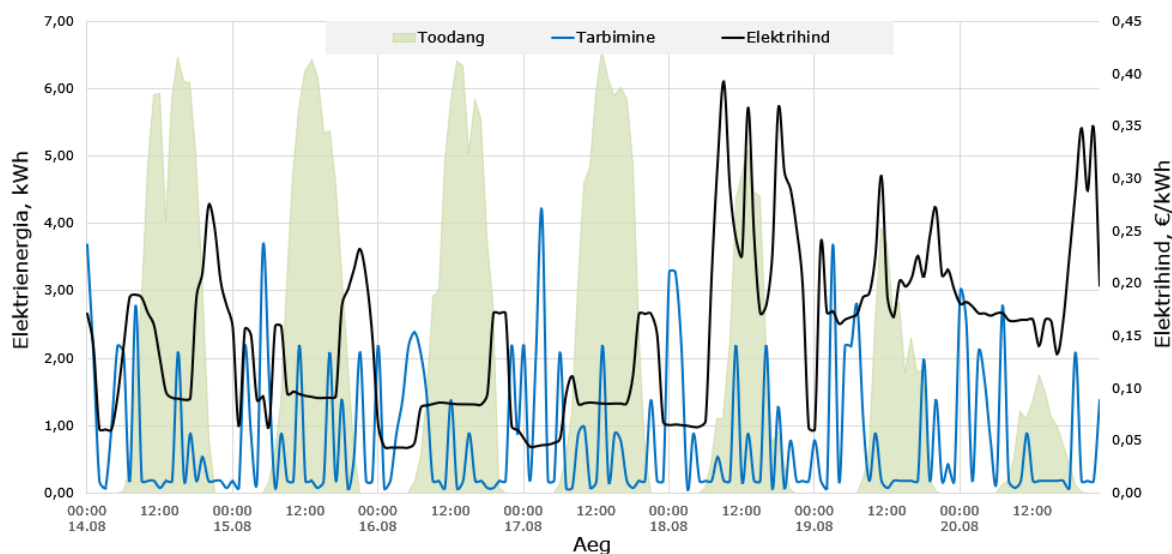
Tulemuste valideerimiseks võetakse kasutusele päikesepaneelide toodangu mõõtetulemused ning leitakse samad majanduslikud suurused. Päikesepaneelide toodangu ajaloolised mõõteandmed on saadaval, millega on võimalik täpsemad majanduslikud tulemused saada. Tabelis 8.6 on välja toodud tulemused, kui

päikeseenergia toodangu prognoos on asendatud tegelike mõõtetulemustega. Päikeseenergia prognoos oli 305,54 kWh, kuid tegelikkuses toodeti nädalaga 296,10 kWh. Erinevused tekivad ilmade prognoosi tõttu, kuid nii marginaalsed eksimused süsteemi kasumlikkust väga ei muuda. Tegelik sääst oli seekord umbes 10 % väiksem. See on tingitud päikeseenergia ja seadmete töötundide prognoosi eksimustest. Enamik kasu on jällegi saavutatud tarbimise kulu vähendamisega odavamatele tundidele tööle rakendamisega. Seadmete töötunde ei vähendatud kasumi saavutamiseks.

Tabel 8.6 Simulatsiooniga saadud tulemused ning potentsiaalne sääst kasutades tegelikke päikesetoodangu mõõtetulemusi.

Energia juhtimine	EI	JAH
Päikeseenergia toodang, kWh	296,10	
Kulu, €	11,97	7,81
Tulu, €	13,86	13,73
Kasum/kahju, €	1,89	5,92
<b>Tegelik sääst:</b>	<b>4,03</b>	

Joonistel 8.5 ja 8.6 on vastavalt välja toodud ilma juhtimiseta ja juhtimisega augusti nädalane elektritarbimine koos elektriinna ja toodanguga.

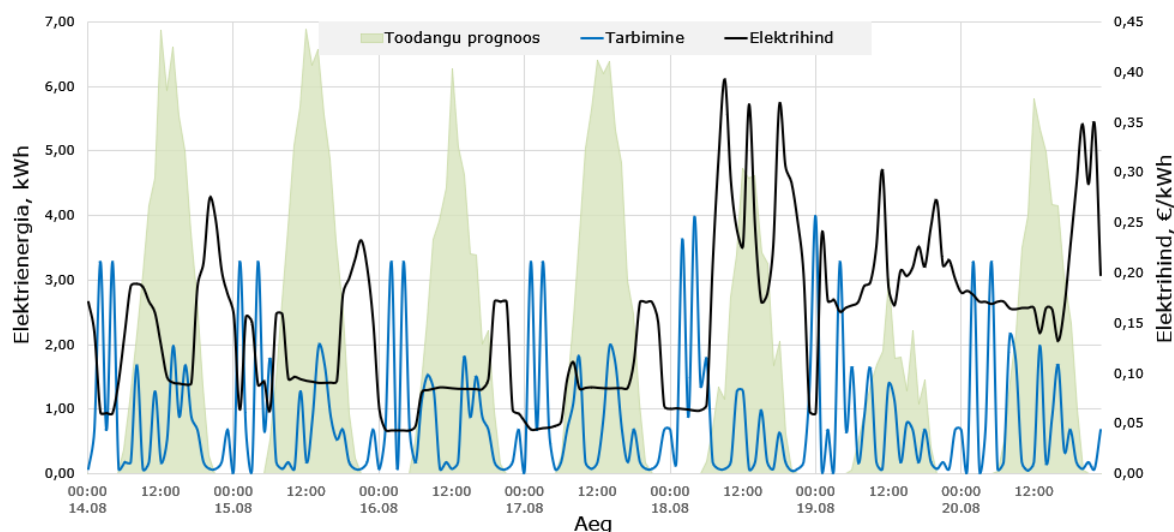


Joonis 8.5 Ilma juhtimiseta nädalane elektritarbimine ja -tootmine koos elektriinnaga (14.-21. august).

Päikesepaneelide toodangu prognoosid on üsna täpsed, kuid siiski on kohata mõningaid erinevusi. Energiajuhtimissüsteemi kasumlikkust see väga ei mõjuta, sest isegi kui kasutatakse päikeseenergia lokaalselt, tehakse seda kõige odavamate elektrihindade puhul. Ilma juhtimiseta on näha, kuidas osa seadmete tööaegu satub odavamatele tundidele ja osa just kallimatele.



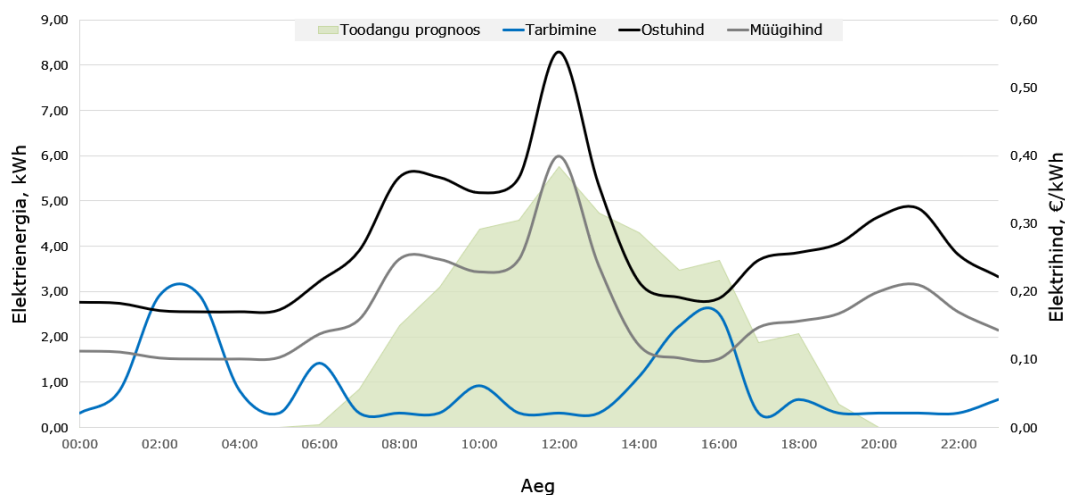
Kasutades juhtimist on näha, kuidas päeva lõikes odavamatel tundidel on tarbimine kõige kõrgem. Sellega saavutataksegi rahaline sääst ilma seadmete töötunde vähendamata.



Joonis 8.6 Energiajuhtimissüsteemiga nädalane elektritarbimine ja -tootmine koos elektrihinnaga (14.-21. august).

### 8.3 Eriolukordade analüüs

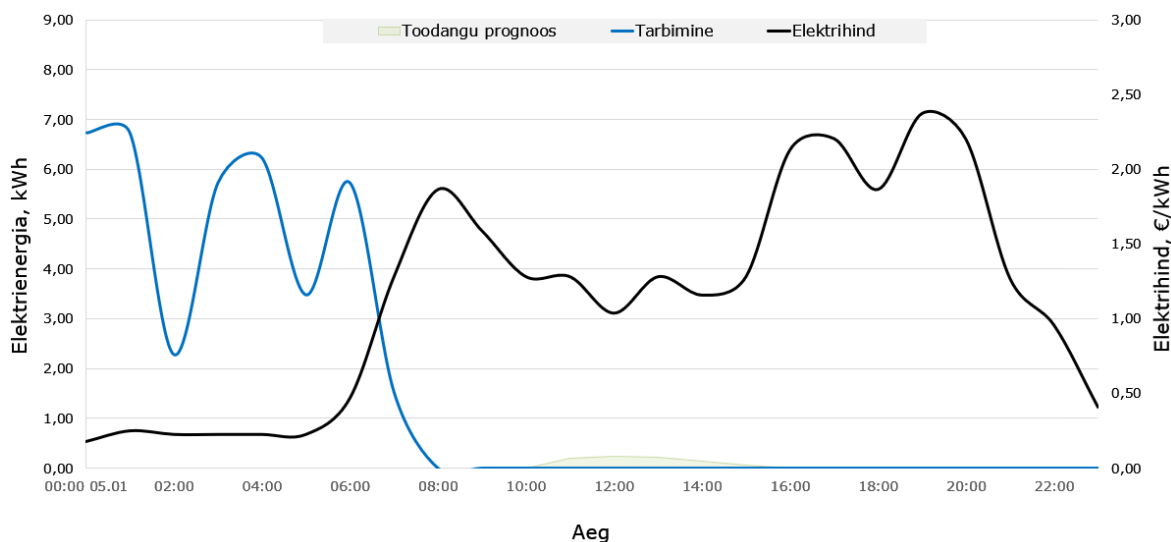
Eriolukordade all mõeldakse selliseid situatsioone, kus elektrihind ei järgi oma tavapärast mustrit või on keskmisest palju kõrgem. Need võivad olla tingitud näiteks rikestest või äärmuslikest ilmastikutingimustest. Lisaks võivad elektrihinnamustrid olla tavapärasest erinevad sõltuvalt nõudlusest ja pakkumisest. Järgneval joonisel 8.7 on kujutatud 22. augusti kuu elektri ostu- ja müügihinna koos prognoositud tarbimise ja toodanguga. Simulatsiooni teostamisel kasutati samu sisendsuursusi nagu suvise prognoosi puhul.



Joonis 8.7 Energiajuhtimissüsteemiga päevane elektritarbimine ja -tootmine koos elektrihinnaga (22. august 2023).

Antud päeva puhul on huvitav, et hommikul 8st kuni kella 12ni on elektri ostuhind päris kõrge ning maksimaalselt küündib üle 0,55 €/kWh kohta. Enamikel juhtudel on mõistlik võimalikult palju toodetud energiat lokaalselt ära tarbida, kuid siin on võimalik lisakasumit teenida. Ostuhind öösel ja kell 14-16 on väiksem kui müügihind vahemikus kell 8-12. Sellest tingitult proovitakse müüa viimases vahemikus võimalikult palju toodangut ehk tarbimist nihutakse odavamatele hetkedele. Niimoodi käitudes saavutatakse prognoositult kasumit 0,8 €.

Järgneval joonisel 8.8 on kujutatud 2024. aasta 5. jaanuari simuleeritud prognoosi. Elektri ostuhind kerkib alates kella 7 väga kõrgele ning jääb terveks päevaks praktiliselt üle 1 €/kWh kohta. Maksimaalne hind on õhtul kell 20.00 2,38 €/kWh kohta. Antud hinnad ületavad energiajuhtimissüsteemi poolt välja arvatud hinnapiiri ning seadmete töö keelatakse välja arvatud juhul, kui pole märgitud elektriseadme vähendatud võimsust. Ainsa seadmena saab vahemikus 07.00-00.00 töötada ventilatsioon oma vähendatud kiiruse juures. Teiste seadmete töö keelustatakse. Juhtimissüsteem on niimoodi ülesehitatud, et rahalist võitu prioritiseeritakse mugavusest rohkem. Võimalik on ka hinnapiire tõsta, et seadmed saaksid tööd jätkata. Seadmed teostavad võimalikult palju töötunde öösel ning tänu sellele saavutatakse prognoositult rahaline võit vahemikus 7€ - 18€ olenevalt, millal tegelikkuses seadmeid oleks kasutatud. Kahjuks pole antud vahemikus väga päikeseenergia toodangut, millega oleks isegi suurem kasum päevas võimalikuks saanud.



Joonis 8.8 Energiajuhtimissüsteemiga päevane elektritarbimine ja -tootmine koos elektrihinnaga (5. jaanuar 2024).

## 8.4 Normaaltundide ja rahareservi kasutamise analüüs

Rahareserviga lähenemine võimaldab kasutajal tekitada mänguruumi seadmete tööaegades ning saavutada lisa kokkuhoidu. Kasutajal on võimalik ka kõikide seadmete töötunnid määrata normaaltundideks ning seeläbi tekitada olukorda, kus päevane rahaline kulu ei ületa soovitud. Seadmete töötundide määramine on väga subjektiivne ning nõuab kasutajalt oskust hinnata, milliste tasemete juures ollakse nõus oma mugavusi loovutama rahalise kokkuhoiu nimel. Lisaks eelnevale on kasutajal võimalus lisada ja eemalda seadmeid nii palju kui soovitakse ilma juhtimissüsteemi tööd segamata. Kasutades tabelis 7.4 väljatoodud sisendsuursusi leitakse rahareservi kasutamisega uued simulatsioonitulemused, mis on välja toodud tabelis 8.5. Rahareservi kasutamisega vähendatakse seadmete nädalast tarbimist 20 kWh võrra. See vähendab võrgust ostetava elektrienergia kulu omakorda 3 € võrra. Kuna ka müügitulu natuke vähenes, siis tegelik sääst nädala kohta oli umbes 6 € kokku. Võrreldes ilma rahareservita juhtimissüsteemiga suurendati säästu ligikaudu 2,5 € võrra.

Tabel 8.7 Simulatsiooniga saadud prognoositud tulemused ning potentsiaalne sääst.

<b>Energia juhtimine</b>	<b>EI</b>	<b>JAH</b>	<b>RAHARESERVIGA</b>
Tarbitud energia, kWh	175		155
Päikeseenergia toodang, kWh	182,64		
Kulu, €	14,87	11,10	8,11
Tulu, €	6,33	6,14	5,61
Kasum/kahju, €	-8,54	-4,96	-2,50
<b>Tegelik sääst:</b>	<b>3,57</b>		<b>6,03 €</b>

Rahareserviga juhtimissüsteem võimaldab kasutajatel paindlikult hallata seadmete energiakasutust vastavalt reaajas muutuvatele energiahindadele, mis võib oluliselt suurendada energiatõhusust ja vähendada kulusid. Seadmete tarbimist vähendatakse vastavalt seadmete prioriteetidele ning rahareservi suurusele. Rahareservi määramisega võimaldatakse vähendada kallimate hindadega hetkedel seadmete tarbimist ning teenida lisasäästu.

## KOKKUVÕTE

Lõputöö teema, mis keskendub praegusele globaalsele energiakriisile ja keskkonnasäästlikkusele, on äärmiselt aktuaalne ja oluline. Arvestades, et suur osa energiatarbimisest toimub just kodumajapidamistes, on energiasäästlikus energiakriisi valguses muutunud üheks olulisemaks komponendiks energiasektoris. Umbes neljandik Euroopa kogutarbimisest kulub just kodumajapidamistes. Viimaste tarbimise vähendamine ei ole oluline ainult energia säästmise ning majandusliku kasu saamiseks, vaid mängib ka laiemalt keskkonna hoidmises rolli. Selles kontekstis on energijuhtimissüsteemid osutunud võtmeteguriks, mille abil suurendada energiatõhusust ja vähendada energiaressursside kasutamist kodudes.

Energijuhtimissüsteemid võimaldavad kodumajapidamistel jälgida ning juhtida elektriseadmete tööd ning nende tarbimist. Nutikad seadmed koos anduritega võimaldavad kasutajal ja süsteemil saada informatsiooni seadmete kasutusmustrite ning kasutatud energia kohta. Elektriseadmete tarbimise nihutamise või keelamisega kõrgemate hindade puhul saavutab tarbijale rahalist säästu ning elektrivõrgu koormuse vähenemist tipuhetkedel. Lisaks aitavad energijuhtimissüsteemid paremini reguleerida taastuvenergia allikatest lokaalselt toodetud elektrienergiat. Sellega on võimalik juhtida seadmete töövahemike nii, et vähendatakse sõltuvust võrgust ostetavale elektrile.

Käesolev magistritöö keskendus kodumajapidamistele mitmikagendil põhineva energijuhtimissüsteemi arendamisele. Töö eesmärk oli välja töötada tarkvaralahendus, mis võimaldab kodumajapidamises elektriseadmete kasutamist juhtida vähendades energiakulusid ja energiatarbimist. Esmalt koostatakse ülevaade ning analüüs mitmikagendil põhineva juhtimissüsteemi loomisest. Oluline osa tööst keskendus energijuhtimissüsteemi ülesehitusele ning simulatsioonile. Kasutades objektorienteeritud programmeerimist *Matlab*'i keskkonnas luuakse mitmikagendil põhinev juhtimissüsteem. Mudeli loomisel võetakse kasutusele viis elektriseadet, mis võimaldavad kodumajapidamises efektiivselt energiatarbimist nihutada. Vastavalt päikeseenergia toodangu prognoosile ning elektri müügi- ja ostuhinnale suunatakse seadmete töövahemike kõige odavamatele hetkedele.

Energijuhtimissüsteemi valideerimiseks võrreldi mudeli prognoosi ning tegelikke mõõtetulemusi märtsi viimase nädala kohta. Prognoosi kohaselt leidis mudel, et ilma juhtimiseta on nädalane rahaline kulu 7,6 €. Koos juhtimissüsteemiga prognoositi nädalaseks kuluks 4,25 €, mis tähendab, et potentsiaalne võit nädalas oleks 3,35 €. Tegelikke mõõteandmete abil leiti, et ilma juhtimiseta kulus 8,54 € ning juhtimisega

4,96 €, mis teeb säästuks 3,57 €. Väiksed erinevused on tingitud päikesepaneelide toodangu prognoosi eksimusest. Lisaks märtsile teostati ka prognoosid ka jaanuari ja augusti nädalatele. Talvine rahaline sääst küündis 3,88 euronit ning suvine kokkuhoid oli 4,03 €. Rahareservi rakendamise abil on võimalik vastavalt tarbija võimele leppida mugavuse loovutamise kaudu rohkem säästu. Märtsi nädala elektritarbimist vähendas rahareservi kasutamine pisut üle 10 %, kuid saavutas seeläbi lisa 2,5 € säästu.

Energiajuhtimissüsteem on võimeline saavutama ülesandes püstitatud säästu energiatarbimise nihutamise ja vähendamise kaudu. Tulevikus on oluline jätkata tööd süsteemi täiustamisega, mis võiks hõlmata ülejäänud taastuenergia tootmislahenduste integreerimist süsteemi. Lisaks oleks kasulik ka kasutusele võtta energiasalvestuslahendused ning analüüsida nende rakendamist energiajuhtimissüsteemi. Samuti on oluline katsetada süsteemi mitmesugustes keskkondades ning erinevate kodumajapidamiste puhul.

## SUMMARY

The thesis topic, which focuses on the current global energy crisis and sustainability, is extremely relevant and important. Considering that a sizeable portion of energy consumption occurs in households, energy efficiency has become one of the most crucial components in the energy sector considering the energy crisis. About a quarter of Europe's total consumption is used in households. Reducing this consumption is important not only for saving energy and gaining economic benefits but also plays a wider role in environmental conservation. In this context, energy management systems have proven to be a key factor in increasing energy efficiency and reducing the use of energy resources in homes.

Energy management systems allow households to monitor and control the operation and consumption of electrical devices. Smart devices, along with sensors, enable both the user and the system to obtain information about devices usage patterns and the energy consumption. By shifting or disabling the consumption of electrical devices during periods of higher prices, financial savings for the consumer and a reduction in the electrical grid load during peak times can be achieved. In addition, energy management systems help with regulating locally produced electricity from renewable energy sources. This allows by managing device operating ranges to reduce reliance on electricity purchased from the grid.

This master's thesis focused on developing a multi-agent-based energy management system for households. The goal was to develop a software solution that allows for the control of electrical devices in households, reducing their energy costs and consumption. Initially, an overview and analysis of creating a multi-agent-based control system is compiled. A significant part of the work focused on the construction and simulation of the energy management system. Using object-oriented programming in the Matlab environment, a multi-agent-based control system is created. The model uses five electrical devices that allow for effective shifting of energy consumption in households. According to the forecast of solar energy production and the selling and buying prices of electricity, device operating periods are directed to the most cost-effective times.

For the validation of the energy management system, the system's forecast and actual measurement results for the last week of March were compared. According to the forecast, the model found that without control, the weekly financial cost was 7,6 €. With the control system, a weekly cost of 4,25 € was achieved, indicating a potential savings of 3,35 € per week. Using actual measurement data, it was found that without control,

the cost was 8,54 €, and with control, it was 4,96 €, resulting in savings of 3,57 €. Minor differences are due to errors in the forecast of solar panel production. In addition to March, forecasts were also made for January and August weeks. The winter financial savings reached 3,88 euros, and the summer savings were 4,03 €. By implementing a cash reserve, it is possible to achieve significantly more savings according to the consumer's ability to compromise on comfort. The use of the cash reserve reduced March week's electricity consumption by just over 10%, but achieving an additional saving of 2,5 €.

The energy management system can achieve savings in energy consumption shifting and reduction set out in the task. In the future, it is important to continue improving the system, which could include integrating other renewable energy production solutions into the system. Additionally, it would be useful to implement energy storage solutions and analyse their application into the energy management system. It is also important to assess the system in various environments and with different households.

# KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] S. ABRAS, S. PLOIX, S. PESTY, and M. JACOMINO, 'A MULTI-AGENT HOME AUTOMATION APPROACH FOR POWER MANAGEMENT', *IFAC Proc. Vol.*, vol. 40, no. 8, pp. 93–98, 2007, doi: 10.3182/20070709-3-RO-4910.00014.
- [2] H. Mohammadzadeh and F. S. Gharehchopogh, 'A multi-agent system based for solving high-dimensional optimization problems: A case study on email spam detection', *Int. J. Commun. Syst.*, vol. 34, no. 3, p. n/a, 2021, doi: 10.1002/dac.4670.
- [3] 'Energiasääst - lihtsad nõuanded kokkuhoiduks'. Accessed: Feb. 28, 2024. [Online]. Available: <https://www.energia.ee/era/uudised/kokkuhoid>
- [4] F. P. Mota, C. R. Steffens, D. F. Adamatti, S. S. D. C. Botelho, and V. Rosa, 'A persuasive multi-agent simulator to improve electrical energy consumption', *J. Simul.*, vol. 17, no. 1, pp. 17–31, Jan. 2023, doi: 10.1080/17477778.2021.1931499.
- [5] K. Gram-Hanssen and S. J. Darby, "'Home is where the smart is"? Evaluating smart home research and approaches against the concept of home', *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 37, pp. 94–101, 2018, doi: 10.1016/j.erss.2017.09.037.
- [6] F. P. Mota, V. Rosa, S. S. da C. Botelho, I. Santos, and G. Dimuro, 'Simulating the Consumers' Energy Profiles Using Multiagent Systems', *IEEE*, 2013, pp. 394–401. doi: 10.1109/BRICS-CCI-CBIC.2013.72.
- [7] S. S. Ghazimirsaeid, M. S. Jonban, M. W. Mudiyansele, M. Marzband, J. L. R. Martinez, and A. Abusorrah, 'Multi-agent-based energy management of multiple grid-connected green buildings', *J. Build. Eng.*, vol. 74, p. 106866, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.job.2023.106866.
- [8] T. Ozden and H. I. Okumus, 'Designing a load agent for power management with a multi-agent home automation system', *IEEE*, 2012, pp. 1–5. doi: 10.1109/INISTA.2012.6247046.
- [9] D. Yan *et al.*, 'Household appliance recognition through a Bayes classification model', *Sustain. Cities Soc.*, vol. 46, pp. 101393–, 2019, doi: 10.1016/j.scs.2018.12.021.
- [10] M. Pipattanasomporn, M. Kuzlu, S. Rahman, and Y. Teklu, 'Load Profiles of Selected Major Household Appliances and Their Demand Response Opportunities', *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 2, pp. 742–750, 2014, doi: 10.1109/TSG.2013.2268664.
- [11] T. Muring, 'ELEKTRIENERGIA TARBIMISE AJALINE KATTUVUS PÄIKESEPANEELIDE TOOTLIKKUSEGA LIGINULLENERGIAHOONES'.
- [12] 'Millest koosneb elektriarve? Elektrienergia moodustab sellest vaid kolmandiku', *Ärileht*. Accessed: Apr. 23, 2024. [Online]. Available: <https://arileht.delfi.ee/artikkel/94596121/millest-koosneb-elektriarve-elektrienergia-moodustab-sellest-vaid-kolmandiku>
- [13] 'Elering Live'. Accessed: Apr. 23, 2024. [Online]. Available: <https://dashboard.elering.ee/et>
- [14] 'See what Nord Pool can offer you.' Accessed: Apr. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.nordpoolgroup.com/en/>
- [15] T. P. | ERR, 'Eurodirektiivi järgi tuleb pool miljonit elektriinvestit välja vahetada', *ERR*. Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: <https://www.err.ee/1609254651/eurodirektiivi-jargi-tuleb-pool-miljonit-elektriinvestit-valja-vahetada>
- [16] 'Elektrilevi\_hinnakiri\_vorguteenuse\_hinnad\_alates\_1\_jaanuar\_2023\_EST.pdf'. Accessed: Apr. 23, 2024. [Online]. Available: [https://www.elektrilevi.ee/documents/8644141/8658446/Elektrilevi\\_hinnakiri\\_vorguteenuse\\_hinnad\\_alates\\_1\\_jaanuar\\_2023\\_EST.pdf](https://www.elektrilevi.ee/documents/8644141/8658446/Elektrilevi_hinnakiri_vorguteenuse_hinnad_alates_1_jaanuar_2023_EST.pdf)
- [17] 'Hinnakirjad - Elektrilevi'. Accessed: Apr. 23, 2024. [Online]. Available: <https://elektrilevi.ee/et/hinnakirjad>
- [18] 'Domekt R 700 V (746m3/h; 207 l/s) | Vendipood.ee'. Accessed: May 07, 2024. [Online]. Available: [https://vendipood.ee/?page\\_id=808](https://vendipood.ee/?page_id=808)
- [19] 'i-MiEV Electric Car History, Specs & Future | Mitsubishi Motors', *Mitsubishi Motors US*. Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: <https://www.mitsubishicars.com/i-miev-electric-car>
- [20] '19MY\_i-MiEV\_EU\_LHD\_Catalog\_original-rev-1.pdf'. Accessed: Apr. 23, 2024. [Online]. Available: [https://www.mitsubishi-motors.com/content/dam/mitsubishi-motors/images/site-images/brochures/brochure\\_files/19MY\\_i-MiEV\\_EU\\_LHD\\_Catalog\\_original-rev-1.pdf](https://www.mitsubishi-motors.com/content/dam/mitsubishi-motors/images/site-images/brochures/brochure_files/19MY_i-MiEV_EU_LHD_Catalog_original-rev-1.pdf)
- [21] 'LG V700 seeria 11,6kg pesumasin kuivatiga, sügavus 56,5 cm', *LG Eesti*. Accessed: May 07, 2024. [Online]. Available: <https://www.lg.com/ee/pesumasinad/lg-f4dr711s2ba>
- [22] 'Heating Cables, DEVIflex™ 18T, 18 W/m, 68.00 m, Supply voltage [V] AC: 230 | Serial resistive heating cables | Heating cables | DEVI electric heating | Electric heating | Climate Solutions for heating | Danfoss Global Product Store'. Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: <https://store.danfoss.com/en/Climate-Solutions-for-heating/Electric-heating/DEVI-electric->



- heating/Heating-cables/Serial-resistive-heating-cables/Heating-Cables%2C-DEVIflex%E2%84%A2-18T%2C-18-W-m%2C-68-00-m%2C-Supply-voltage-%5BV%5D-AC%3A-230/p/140F1245
- [23] 'AI164786462912en-020309.pdf'. Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: <https://assets.danfoss.com/documents/366709/AI164786462912en-020309.pdf>
- [24] 'Boilerid ZENEO - võimsad soojaveeboilerid', AtlanticBaltic. Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: [https://www.atlanticbaltic.ee/pood/kat\\_atlantic-soojaveeboilerid/boilerid-zeneo-hooldusvabad-keramiline-kuttekeha-hubriidanood/vertikaalsed-ja-voimsad-seinaboilerid-zeneo/](https://www.atlanticbaltic.ee/pood/kat_atlantic-soojaveeboilerid/boilerid-zeneo-hooldusvabad-keramiline-kuttekeha-hubriidanood/vertikaalsed-ja-voimsad-seinaboilerid-zeneo/)
- [25] 'JA Solar JAM54S30-415/MR', Solar4you e-pood. Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: <https://pood.solar4you.ee/et/pood/tooted/jam415>
- [26] 'SolarEdge'. Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: <https://monitoring.solaredge.com/solaredge-web/p/login>
- [27] 'MATLAB'. Accessed: Apr. 23, 2024. [Online]. Available: <https://se.mathworks.com/products/matlab.html>