EESTI MAAÜLIKOOL
Tehnikainstituut

**Jane Müller**

# NUTITEHNIKA MAJAPIDAMISTES NING SELLE MÕJU ELEKTRITARBIMISE ÜHTLUSTAMISELE

SMART APPLIANCES AND THEIR EFFECT ON SHIFTING HOUSEHOLDS' ELECTRICITY DEMAND

Bakalaureusetöö
Energiakasutuse õppekavas

Juhendaja: lektor Maido Märss, *MSc*

Tartu 2016

# LÜHIKOKKUVÕTE

www.emu.ee
Eesti Maaülikool
Estonian University of Life Sciences

| | | | |
|---|---|---|---|
| Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014 | | Bakalaureusetöö lühikokkuvõte | |
| Autor: Jane Müller | | Õppekava: Tehnika ja tehnoloogia (384) | |
| Pealkiri: Nutitehnika majapidamistes ning selle mõju elektritarbimise ühtlustamisele | | | |
| Lehekülgi:35 | Jooniseid: 10 | Tabeleid: 0 | Lisasid: 1 |
| Osakond: Energeetika<br>Uurimisvaldkond: 4. Loodusteadused ja tehnika; 4.17 Energeetikaalased uuringud; CERCS ERIALA: T140 Energeetika<br>Juhendaja: Lektor Maido Märss<br>Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu 2016 | | | |
| Seoses elektritarbimise jätkuva tugeva kasvamisega on nõudluse rahuldamiseks vaja leida tarkasid ja jätkusuutlikumaid lahendusi. Tehnoloogia areng võimaldab tänapäeval elektritarbimist üha paremini analüüsida ning juhtida. Võrguettevõtted on loonud tarbija jaoks programme, mis innustaksid teda elektrit kasutama ajal, mil võrgu koormus on väike.<br>Töö eesmärgiks on uurida erinevaid võrgu koormuse juhtimise meetodeid ning selgitada, milline neist sobib kõige paremini eramajapidamistes kasutatava nutitehnika jaoks.<br>Uurimuse käigus on kasutatud eesti keelse kirjanduse puudumise tõttu valdavalt võõrkeelseid raamatuid ja teadusartikleid. Võrgus toimunud muutuste kujutamisel on kasutatud peamiselt Eesti võrguettevõtete ning Statistikaameti andmeid.<br>Kuigi soojusprotsessides osalevate seadmete mõju võrgule on kõige tugevam, on nende poolt tekitatud võrgu koormuse juhtimine tarbijale sobival viisil raske, sest optimaalne juhtimisprogramm eeldaks võrguettevõtete kontrolli seadmetele. Lisaks on soojus- ja jahutusseadmete töö kõige olulisem ajal, mil võrgu koormus on kõrgeim. Teiste seadmete puhul nõuab koormuse juhtimine palju tarbija poolset osalust. Põhjalikumalt tuleks uurida, kuidas kombineerida seadmete kaugjuhitavat koormusjuhtimise poolautomatiseerimist ning kuidas vältida uute koormustippude teket võrgus. Antud töö on sobilik edasiste uurimustööde ja projektide tutvustavaks materjaliks. | | | |
| Märksõnad: Juhtimine, võrk, koormus, stabiilsus, tarkvõrk | | | |

# ABSTRACT

www.emu.ee
Eesti Maaülikool
Estonian University of Life Sciences

| | | | |
|---|---|---|---|
| Estonian University of Life Sciences<br>Kreutzwaldi 1, Tartu 51014 | | Bachelor's Thesis | |
| Author: Jane Müller | | Speciality: Engineering | |
| Title: Smart Appliances and their Effect on Shifting Households' Electricity Demand | | | |
| Pages: 35 | Figures: 10 | Tables: 0 | Appendixes: 1 |
| Department: Energy Engineering<br>Field of research: 4. Natural Sciences and Engineering; 4.17 Energetic Research; CERCS<br>SPECIALTY: T140 Energy research<br>Supervisor: Lecturer Maido Märss<br>Place and date: Tartu 2016 | | | |
| In connection with the continually growing power consumption a smarter and sustainable way has to be sought out to meet the rising demand. The development in technology today allows us to better analyze and manage the consumption of power. Utility companies have developed demand response programs to incentivize customers to shift their power consumption from times of high demand to a time where the grid load is lesser.<br>The aim of this thesis is to analyze different demand response programs and to find out which one of these is the most suitable for the use with residential smart appliances.<br>Due to the lack of Estonian literature in this field, mostly English books and research articles have been used. Data from Estonian utility companies and Statistics Estonia have been used in presenting the load shifts of the grid.<br>Although appliances, which partake in thermal processes, have the highest residential impact on the grid, they are fairly unsuitable to use as means of effective demand response in a way which will satisfy the customer. This is due to the fact, that the optimal control program would require remote access for the utility company over the appliance. Furthermore heating and cooling processes are most needed during times of high demand. Other devices require quite a lot costumer participation in demand response. Further research should be done to investigate how to combine remotely controllable semi-automated residential load performances and how to mitigate and avoid peak rebounds in the grid. This thesis is suitable as an introduction in this field for further research. | | | |
| Keywords: Demand, response, residential, smart, appliances | | | |

# SISUKORD

LÜHIKOKKUVÕTE ..... 1
ABSTRACT ..... 2
SISSEJUHATUS ..... 5
1. ELEKTRITARBIMINE JA VÕRGUKOORMUS ..... 6
1.1. Elektritarbimise areng Euroopas ..... 6
1.2. Elektritarbimise areng Eestis ..... 7
1.3. Võrgu stabiilsus ..... 8
1.4. Võrgukoormuse kõikumine ..... 9
1.5. Elektrihinna muutused ..... 11
1.6. Tarkvõrk ..... 12
2. MEETMEID KOORMUSE JUHTIMISEKS ..... 14
2.1. Hinnal baseeruvad võrgu koormuse juhtimismeetmed ..... 14
2.1.1. Kahetariifne ..... 14
2.1.2. Reaalaja tariif ..... 14
2.1.3. Kriitilise koormustipu tariif ..... 15
2.2. Stiimulipõhised võrgu koormuse juhtimismeetmed ..... 15
2.2.1. Otsene koormuse kontroll ..... 15
2.2.2. Katkestava/kärpiva talituse programm ..... 16
2.2.3. Avariiolukorra nõudluse juhtimine ..... 16
2.2.4. Mahtuvusturu programm ..... 16
2.2.5. Abiteenuste turu programm ..... 16
3. NUTITEHNIKA ..... 17
3.1. Tarbimise juhtimine läbi nutitehnika ..... 17
3.2. Potentsiaal võrgu koormuse ühtlustamisel ..... 17
3.3. Nutitehnika tööpõhimõte ..... 19
4. ERINEVATE NUTITEHNIKA SEADMETE LAHENDUSED ..... 20
4.1. Ventilatsiooni-, kütte- ja jahutusseadmed ..... 20
4.2. Vee soojendamise seadmed ..... 21
4.3. Pesukuivatid ..... 22
4.4. Pesumasinad ..... 23
4.5. Nõudepesumasinad ..... 24
5. NUTITEHNIKAGA SEOTUD PROBLEEMID JA ..... 26
KASUTUSEL OLEVAD SEADMED ..... 26

5.1. Nutitehnikaga seotud probleemid ..... 26
5.2. Muud kasutusel olevad seadmed ja lahendused ..... 27
KOKKUVÕTE ..... 29
KASUTATUD KIRJANDUS ..... 31
SUMMARY ..... 34

# SISSEJUHATUS

Tehnoloogia arengu ning maailma populatsiooni kasvuga seoses on tõusnud elektritarve aastate jooksul märkimisväärselt. Selle vastu üritab Euroopa Liit aktiivselt meetmeid rakendada olles koostanud Euroopa 2020 majanduskasvu strateegia. Selle eesmärgiks on vähendada kasvuhoonegaaside emissiooni 1990. aastaga võrreldes 20% võrra aastaks 2020. Selle hulka kuulub ka energiatõhususe suurendamine kuni 20% võrra.

Kodumajapidamiste elektritarbimine sõltub geograafilisest asukohast, perede sissetulekutest, leibkondade suurusest ja kommetest. Üldiselt on aga regionaalses võrgus ühtne nädalane tarbimismuster, kus tavaliselt tarbitakse tööpäevadel kella kaheksast 17ni rohkem energiat ja siis uuesti hilisemal õhtupoolikul. Nädalavahetusel on tarbimine mõnevõrra väikesem ning kõikide päevade öötundidel toimub veelgi väikesem tarbimine. Selline koormuse kõikumine sunnib elektritootjaid võrkudes palju kommutatsioone sooritama.

Antud töö eesmärgiks on selgitada tarkvõrgu ja nutitehnika kasutamisega kaasnevate võimalustega eramajapidamiste poolt tekitatud võrgu koormuse ühtlustamiseks. Lisaks selgitatakse kas säärasel koormuse nihutamisel on potentsiaal säästa keskkonda ja vähendada kulutusi energiale.

Selleks tutvutakse esmalt võrgu koormuse kõikumistega ning muutustega elektritarbimises. Selgitatakse välja miks võrgu koormus kõigub ning kuidas see hinnaga seotud on. Uuritakse võrguettevõtete poolsete võimalustega majapidamiste tarbimisharjumuste muutmiseks. Selgitatakse välja millised seadmed majapidamistes kõige rohkem energiat tarbivad ning mis meetodiga saaks nende poolt tekitatud koormust nihutada.

Tegemist on üpris uudse valdkonnaga, kus tuleb teha laiahaardelisi uuringuid, mis hõlmaksid paljusid tarbijaid, et näha nende reaalset osalust koormuse nihutamises. Andmete kättesaadavus ning kasutuslitsentsid on piiratud ja seetõttu on erinevate seadmegruppide kirjeldamisel kontsentreeritud peamiselt General Electricu simulatsiooni andmetele.

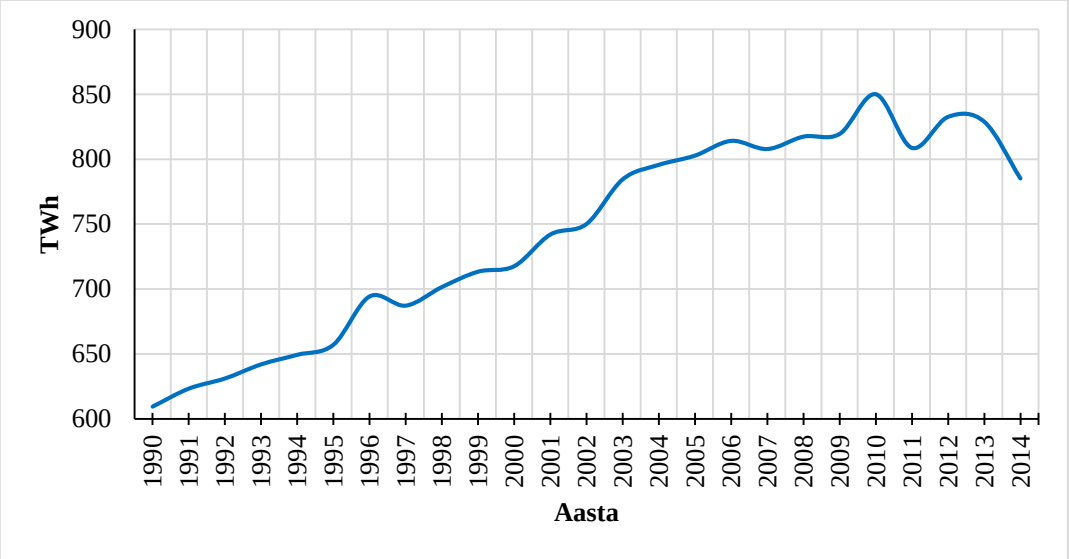
Töö koostamisel on kasutatud IEEE numbrilist viitamissüsteemi.

# 1. ELEKTRITARBIMINE JA VÕRGUKOORMUS

## 1.1. Elektritarbimise areng Euroopas

Vahemikus 2003 kuni 2013 kasvas Euroopa Liidu 28 liikmesriigi kodumajapidamiste elektritarbimine 5,1 %. Osade riikide, eriti Rumeenia, Läti, Leedu ja Hispaania, tarbimine tõusis märkimisväärselt— vähemalt 25 %. Majapidamiste elektritarve langes seitsmes liikmesriigis (vähem kui 10%). Suurim langus oli Belgias, nimelt 23,9 %. Nende eramajapidamiste elektritarbe langus võib olla tingitud muutustest rahvastikuarengus, kus leibkondades elab varasemaga võrreldes keskmisest vähem inimesi, ka võib tarbimise muutus olla tingitud energiatõhusamate seadmete soetamisest. [1]

Joonisel 1.1. on kujutatud Euroopa Liidu 28 riigi eramajapidamiste elektritarbimise muutus teravatt-tundides aastast 1990 kuni 2014.




**Joonis 1.1.** EU-28 eramajapidamiste elektritarbimise muutus [2]

## 1.2. Elektritarbimise areng Eestis

Eestis tarbib üks leibkond 2010. aasta seisuga keskmiselt 3465 kWh elektrienergiat aastas. Elektriga köetakse 8% eluruumidest, millest 4,3% on statsionaarse elektriküttega. Soojuspumpadega köetakse 3,1% eluruumidest, kuid need on enamasti lisaküttesüsteemid ning primaarseks soojusallikaks on kas puit, keskküttesüsteemid vms. Elektrilist põrandakütet kasutab 15,3% ning vesi-põrandakütet 2,8% Eesti majapidamistest. [3]

2014. aastal oli majapidamiste elektrienergia lõpptarve 1739 GWh, mis on poole suurem kui 1990. aasta tarbimine. Siinkohal tuleb silmas pidada, et 1990ndate alguse madalatel väärtustel on ka poliitilised põhjused, mil Eesti Vabariik iseseisvus ning toimusid suured tarbimismuutused nii tööstuses kui ka kodudes.

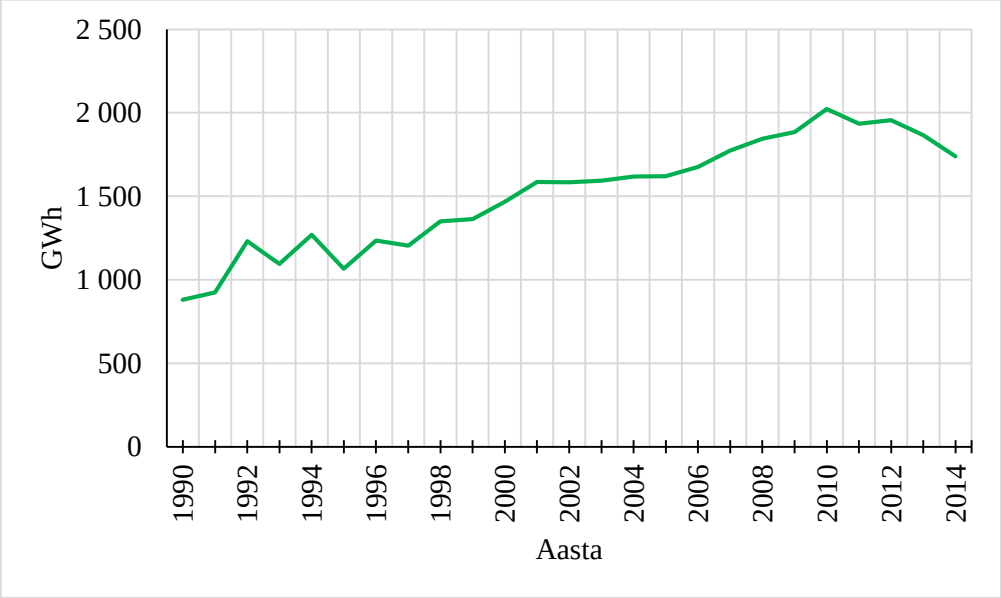
Vaadates joonist 1.2., ilmneb et elektritarbimise kasv stabiliseerus umbes 1996. aastaks. Sellest ajast kuni 2014. aastani on toimunud 71% kasv tarbimises (valem 1.1.).

$$k = \frac{a_1 \cdot 100\%}{a_2} = \frac{1234 \cdot 100\%}{1739} = 71\%, \tag{1.1.}$$

kus $k$ on tarbimise kasv %;

$a_1$ – elektritarbimine 1996. aastal GWh;

$a_2$ – elektritarbimine 2014. aastal GWh.




**Joonis 1.2.** Eesti eramajapidamiste elektritarbimise muutus [2]

## 1.3. Võrgu stabiilsus

Nõudluse kasvamisega tõuseb ka energia varustuskindluse roll. Kui elektrikatkestus hõlmab suuremat või logistiliselt olulist piirkonda, siis võib katkeda transport (näiteks trammid, trollid ja lennundus) ning tööstus- ja teenindussektori töö. Nõudmised toitestabiilsusele on tõusnud ka keerukama ning tundlikuma tehnoloogia kasutuselevõtuga era- ja ärisektoris. Ärisektoris võib näiteks tööstus- või sereveripargis paari minutiline katkestus tuua kaasa suuri rahalisi kahjusid.

Elektrisüsteemi kui terviku toimimise eest vastutavad riikide süsteemihaldurid ehk põhivõrguettevõtted (ingl *Transmission System Operator* ehk TSO). Nende ülesandeks on hoida pidevat tasakaalu elektri tootmise ja tarbimise vahel. Samuti peavad nad hoidma võimsusreservi juhuks, kui esineb tootmis- või võrguhäireid või toimub ootamatu tarbimisvõimsuse muutus. Süsteemi operaator peab koordineerima tootmisjaamade tööd, andes ette kuna ja kui palju elektrienergiat võrku anda. Tehniliselt tähendab see, et süsteemi toitepinge sagedust tuleb hoida 50 Hz. Samuti tuleb tagada reaktiivvõimsuse bilanss, generaatorite faaside sünkroonsus ning ülekandeliinide pingenivoo. Elektrisüsteemi stabiilsust võivad häirida lühised, süsteemi põhielementide kommutatsioon või järsud koormustõuked [4]. Ühendsüsteemis võib avariisituatsioon kanduda ühest süsteemi osast teise väga kiiresti, põhjustades avarii laviinitaolise laienemise [5]. Tarbijate pingenivoo tagamisega tegelevad jaotusvõrgu ettevõtted.

Elektrisüsteem peab tervikuna olema tasakaalus, ehk toodetud elektrienergia kogus peab vastama tarbitud elektrienergia kogusele. Vastasel juhul tekivad süsteemis toitepinge ning toitesageduse probleemid ning lõpptulemusena võib kogu süsteem kustuda. Piirkondade ehk elektrituru osade bilansi tagamise eest vastutavad süsteemihaldurid.

Olukorras, kus süsteemi elektrienergia tarbimine ületab jaamade tootmismahtusid, langeb elektrisüsteemi sagedus alla nimisageduse 50 Hz. Tasakaalu hoidmiseks tuleb sooritada süsteemi ülesreguleerimist, mille tulemusena üks või mitu tootjat suurendavad võrku antavat

energiahulka, või käivitavad avariireservid. Juhul kui tootmisvõimsus ületab tarbimisvõimsuse, tõuseb sagedus üle nimisageduse. Nüüd peab süsteemihaldur tegema süsteemi allareguleerimist, mille tulemusena üks või mitu tootjat vähendavad võrku antavat energiahulka.

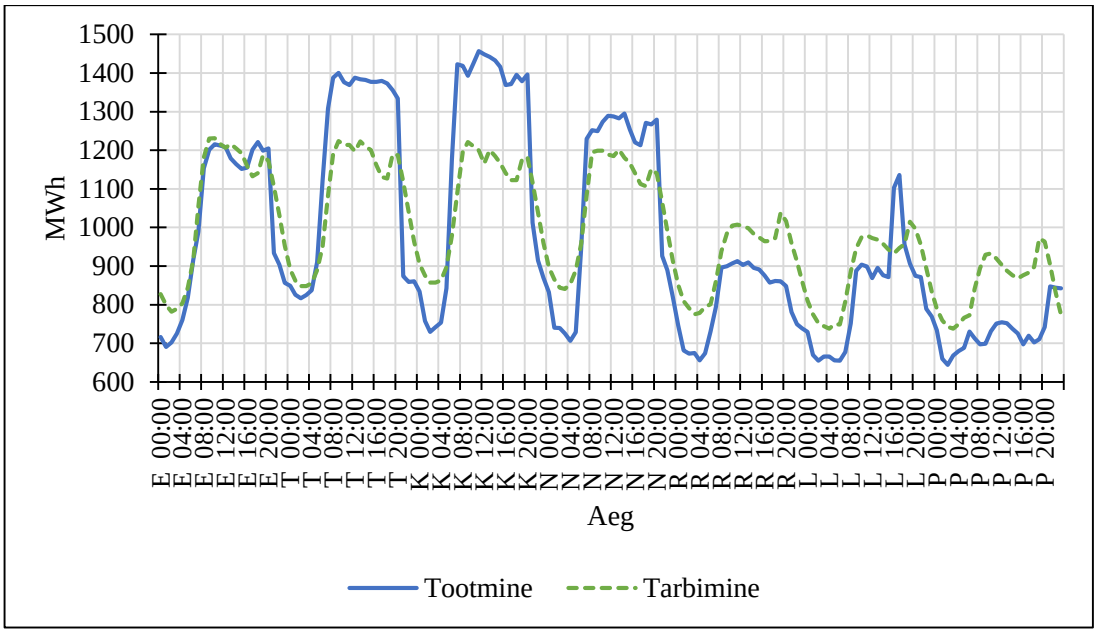
Katkestuste suhtes ülitundlike koormuste osakaalu jätkuva suurenemise tõttu on elektriettevõtetes hakatud töökindluse nivood väljendama üheksate arvuga toite kasutatavuse väärtuses. Paljud ettevõtted nõuavad töökindlust "kuus üheksat", see tähendab toite kasutatavust 99,9999%. Interneti andmekeskused nõuavad oma serverite varustuskindluseks isegi "üheksa üheksat", mis tähendab katkestuste kogukestust alla kahe vahelduvvoolu perioodi aastas. [6]

Tüüpiliseks elektrivarustuse töökindluse nõudeks tänapäeval on "viis üheksat", see tähendab, et aastast võib toitekatkestuse kestust olla kuni 5,3 min [7].

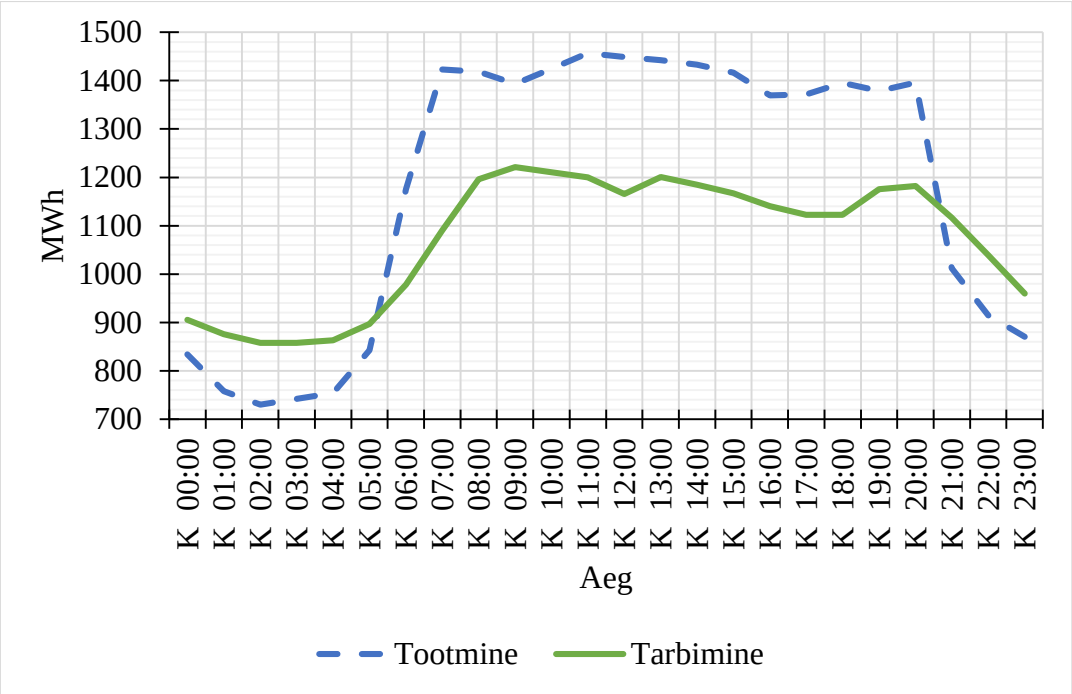
## 1.4. Võrgukoormuse kõikumine

Võrgu koormus kõigub nädalas ning ööpäevas erinevalt vastavalt tarbijate üldisele elurütmile. Tootja jaoks on võimalik mingil määral ennustada vaja minevat elektri kogust analüüsides tarbimist ning üritades sellest reeglipärasust leida. Joonisel 1.3. on kujutatud võrgust tarbitav ning võrku toodetud võimsus ühe nädala jooksul, mis näitab, et kõige suurem tarbimine on teisipäevast neljapäevani. Võrku ei saa toota nõudlusest rohkem võimsust, aga kuna Eesti müüb elektrit ka teistesse riikidesse, siis on joonistel tootmise ja tarbimise vahel ebakõla. Kui võrku toodetakse nõudlusest vähem võimsust, siis ostetakse seda välismaalt sisse ja vastupidi.

Vastavalt joonisele 1.4. toimub suurim elektritarbimine ööpäeva jooksul vahemikus 08:00 kuni 20:00. Mõne võrra väheneb tarbimine lõuna paiku ning suurem koormuse langus toimub vahemikus 16:00 kuni 18:00, mil tarbijad töölt koju sõidavad. Sealt edasi algab tarbimise järsk tõus, mis on tingitud sellest, et suurem osa tarbijaid on jõudnud koju ning hakkavad süüa tegema, pesu pesema jms. Alates kella 20st toimub üpris järsk tarbimise langus, mis kestab kella kolmeni hommikul.




**Joonis 1.3.** Energiavoog vahemikus 21.03.16 kuni 27.03.16 [8]

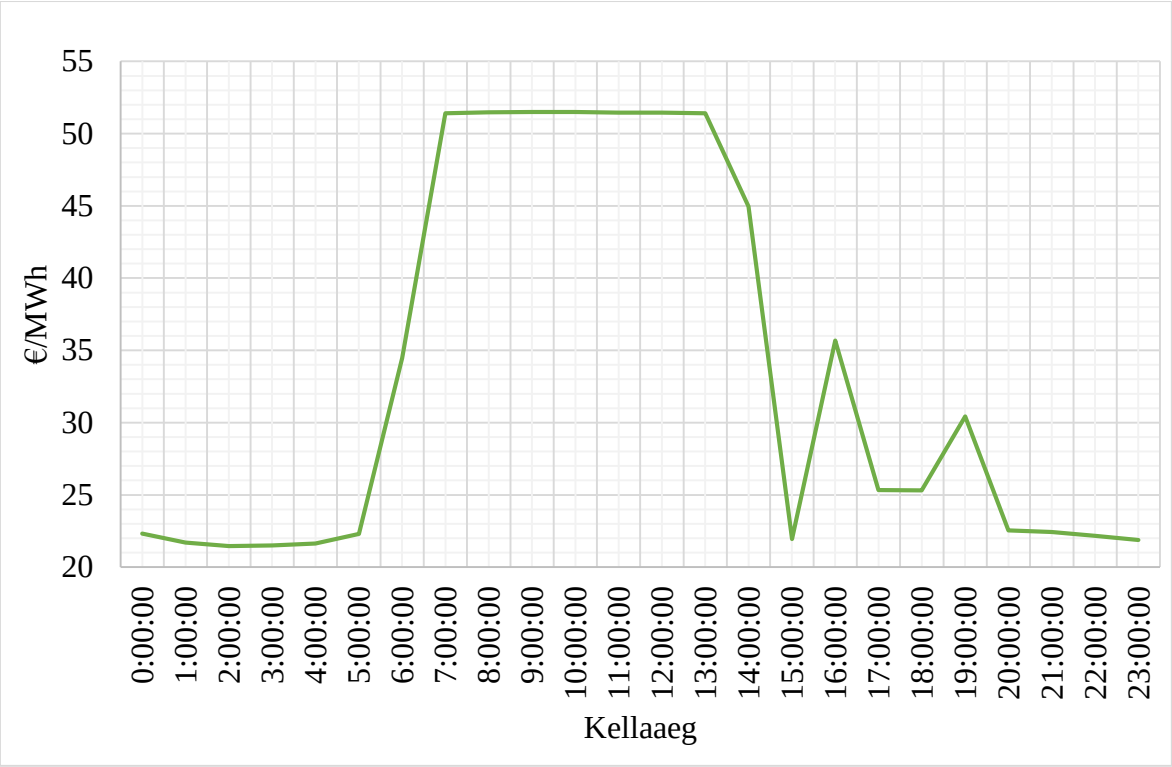



**Joonis 1.4.** Ööpäevane koormusgraafik 23.03.16 [8]

Tarbimisele ehk võrgu koormusele vastavalt kujuneb ka elektri börsihind. Kui tarbijale on enne kõike oluline hind, siis tootja poolt lisanduvad sellele ka tooraine hind, seadmete kulumine ning käidukulud, mis kaasnevad seadmete töökoormuse muutmise ning ümber lülitamisega.

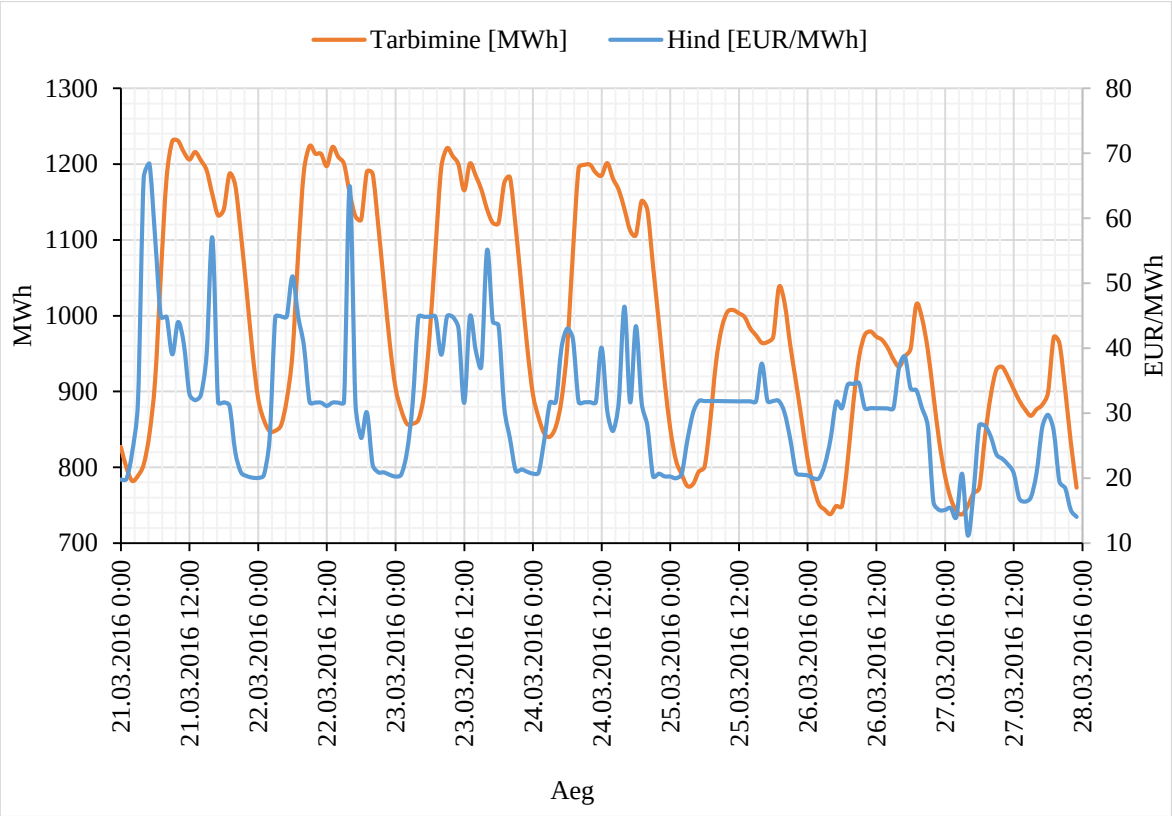
## 1.5. Elektrihinna muutused

Joonisel 1.5. on kujutatud Nord Pool Spoti andmetel baseeruv ööpäevane (tunnine intervall) elektri hinna muutus börsil. Tarbijale lisanduvad arvele ka taastuvenergia tasu, elektriaktsiis ja võrgutasu. Viimane moodustab ligi 40% tavamajapidamise elektri arvest ning seda reguleerib Konkurentsiamet [9]. Esitatud hinnad on CET aja järgi, mis tähendab, et Eesti aja saamiseks tuleb sellele lisada kaks tundi.




**Joonis 1.5.** Ööpäevane elektri börsihinna muutus 29.04.16 [10]

Tuginedes joonisele 1.6., on näha otsest seost tarbitava elektri koguse ning hinna vahel. Eesti tarbimise ning börsi hindade vaheline nihe tuleneb ajavööndi vahest. Joonisel 1.6. on hinna ning tarbimise väärtused välja toodu Eesti aja järgi. Hindade muutmisega saab juhtida nõudlust ja seega võrgu koormust. Siin ilmneb ka nutitehnika kasutuspotentsiaal — nimelt saaks seadmeid seadistada nõnda, et osa või suurem osa elektritarbest toimuks madalama koormuse ja hinna ajal või muudaks oma elektritarvet võrguettevõtte päringu korral.




**Joonis 1.6.** Korrelatsioon hinna ning tarbimise vahel [8] [10]

Seda, kui palju kliendid ühes tunnis elektrit tarbivad, mõõdavad võrguettevõtjad. Selleks näeb seadus praegu ette kaht võimalust – võrguettevõtja mõõdab kogused tunnipõhise kaugloetava arvestiga või määrab tunnikogused arvestuslikult tüüpkoormusgraafiku järgi. Tüüpkoormusgraafikud on levinud ka teistes Euroopa riikides, kus pole veel kauglugemisele üle mindud. Tüüpkoormusgraafik jagab kliendi kuu jooksul tarbitud kilovatt-tunnid tundide vahel laiali statistilise keskmise tarbimise järgi. Iga võrguettevõtja kooskõlastab oma tüüpkoormusgraafikud Konkurentsiametiga. [11]

## 1.6. Tarkvõrk

*Smart grid* ehk tarkvõrk on nutitehnika kasutuselevõtu üheks eelduseks. Tänu kahepoolsele kommunikatsioonile annab see tootjale ülevaate tarbimises ja võrgus toimuvast ning võimaldab tootmist täpsemini nõudlusele vastavalt kohandada. Tarkvõrgu üheks oluliseks komponendiks on kaugloetavad arvestid, mis võimaldavad igakuist tarbitud elektri näitu ilma tarbija poolse aktiivse osaluseta teenusepakkujale edastada. Lisaks saadab see võrguettevõttele

infot aktuaalse võrgu koormuse ning seisukorra kohta. Rikete puhul lubab kauglugerite tagasiside (või selle puudumine) probleemi olemust ja asukohta kiiremini tuvastada ning vastavate meetmete käsile võtmist.

Eestis on kaugloetavate arvestite kasutusele võtu kord eeskirjadega määratletud. 01.07.2003 jõustunud Võrgueeskirja § 39 kohaselt peab võrguettevõtja alates 01.01.2017 alla 1000 V pingel elektritarbimise korral kasutama mõõteseadet, mis võimaldab alla 63 A liitumispunkti korral aktiivenergiat (kWh) kauglugemisseadmega mõõta. Alates 01.01.2013 peab mõõtesüsteem suurema kui 63 A liitumispunkti kaitse korral võimaldama mõõta aktiivenergiat ja reaktiivenergiat (vajadusel kahesuunaliselt) kauglugemisseadmega. Reaktiivenergia mõõtmise nõue ei rakendu korterelamutele ja korteriühistutele, kus lõpptarbijaks on koduklient. Mõõtesüsteem peab alates 01.01.2017 võimaldama korteris mõõta aktiivenergiat kauglugemisseadmega. [12]

2014. aastaks oli Eesti suurim jaotusvõrguettevõtja, Elektrilevi, paigaldanud 335 000 kaugloetavat arvestit, mis on hinnanguliselt pool nende võrgus olevatest arvestitest (624 000). [13]. Meil kasutusel olevad kauglugemisseadmed mõõdavad elektritarbimist tunni kaupa.

Tänu tarkvõrgu võimele elektritootjad, -edastajad ja –tarbijad ühtsesse süsteemi kokku viia saab rakendada energia ulatuslikku hajatootmist, optimeerida energiakasutust, vähendada kulusid ning suurendada töökindlust ja energia ostu-müügitehingute läbipaistvust [14]. Massiivse infovahetuse tõttu tuleb siin kohal tegeleda ka infotehnoloogilise arenduse ning ohutusega.

# 2. MEETMEID KOORMUSE JUHTIMISEKS

## 2.1. Hinnal baseeruvad võrgu koormuse juhtimismeetmed

Hinnal baseeruvateks võrgu koormuse juhtimismeetmeteks on kahetariifne, reaalaja ja kriitilise koormustipu tariifid. Need põhinevad ajas muutuvatel hindadel, mis peegeldavad elektri väärtust ja hinda erinevatel aegadel [15]. Hinnal baseeruvaid programme peetakse turu või stabiilsuse poolt juhitud programmideks [16].

Hinnapõhised koormuse juhtimismeetmed võimaldavad tarbijal oma elektritarbimist hinna järgi muuta, vähendades sellega oma elektriarvet kuid mitte tarbitud elektri kogust. Nõnda saavad tarbijad kasu madalama hinna perioodist, mil üldine võrgu koormus on madalam. See tähendab, et võrguettevõtted saavad tarbijaid motiveerida elektrit muul ajal kui koormuse tippajal kasutada.

### 2.1.1. Kahetariifne

Kahetariifsel (ingl *time-of-use* ehk TOU) programmil on erinevad hinnad erinevatel ajaplokkidel— tavaliselt on need määratud 24 tunniks. TOU tariifid kajastavad keskmist elektri tootmisele ja üle kandmisele tehtud kulutusi ühe teatava perioodi jooksul. [15]

Eestis saab selle hinnatüübi valida, kui tarbimiskohas on tunniarvesti või kahetariifne arvesti ehk arvesti, mis mõõdab eraldi päeva ja öö elektritarbimist. Eesti Energial kehtib päevahind esmaspäevast reedeni suvel kella 08:00 kuni 24:00, talvel kella 07:00 kuni 23:00. Ülejäänud aegadel kehtib ööhind, sealhulgas ka kõigil laupäevadel ja pühapäevadel. Argipäevadele langevatel riiklikel pühadel kehtivad samad hinnad, mis tavalistel argipäevadel. [11]

### 2.1.2. Reaalaja tariif

Reaalaja tariifi (ingl *real-time pricing* ehk RTP) puhul muutub elektri hind tavaliselt tunni kaupa, peegeldades energia hulgimüügi hinda. Tavaliselt teavitatakse tarbijaid hinnast kas üks päev või üks tund ette [15]. Eestis müüakse elektrit Nord Pool Spot EE hinnapiirkonna

börsihindadega, millele lisandub pakkuja müügimarginaal. Kui marginaal peaks lepingu kehtivuse ajal muutuma, teavitatakse tarbijat sellest 30 päeva ette [11].

### 2.1.3. Kriitilise koormustipu tariif

Kriitilise koormustipu tariif (ingl *critical-peak pricing* ehk CPP) on kombinatsioon kahetariifsest ja reaalaja tariifist. Peamine elektri hind baseerub kahetariifsel paketil, kuid võrguettevõttel on õigus võrgu koormuse järsu tõusu aeg hinda tavalisest kõrgemaks tõsta, et tarbijat vähesemale elektri kasutamisele motiveerida. Seda kasutatakse peamiselt olukordades, kus võrgu stabiilsus on ohus või tooraine hind on väga kõrgel. [15]

## 2.2. Stiimulipõhised võrgu koormuse juhtimismeetmed

Stiimulipõhiste võrgu koormuse juhtimismeetmete puhul makstakse osalevatele tarbijatele, et nad oma koormust vähendaksid. Seda tehakse aegadel, mil võrgu stabiilsus on ohus või kui elektri tootmise tooraine on tavalisest kallim. Neid juhtimismeetmeid kasutavad ja kujundavad võrguettevõtted, võrgu koormust teenindavad üksused või piirkondlikud võrguettevõtjad. Need on tarbija tavalisele ühe- või kahetariifsele paketile kas lisaks või eraldi seisvad stiimulid. Mõned ettevõtted trahvivad tarbijaid, kes on selle programmiga liitunud kuid ei reageeri koormuse vähendamise päringule. [15]

### 2.2.1. Otsene koormuse kontroll

Otsese koormuse kontrolli (ingl *direct load control*) puhul on võrguettevõttel või süsteemi operaatoril võimalus kaugjuhtimise teel tarbija elektriseadmeid täielikult või perioodiliselt välja lülitada. Sellistest otsustest antakse tarbijale eelnevalt teada ning ta saab koormuse vähendamise eest tasu kas väljamakse või oma elektriarve krediidi näol. [17]

Tavaliselt on välja lülitatavateks seadmeteks näiteks õhu konditsioneerid, boilerid vms kütteseadmed. Seda sorti juhtimismeedet kasutatakse eelkõige eramajapidamiste või väikeste ettevõtete puhul. [15]

### 2.2.2. Katkestava/kärpiva talituse programm

Kärpiva talituse programm (ingl *interruptible/curtailable service* ehk I/C) on integreeritud jaemüügitariifidesse, mis pakuvad hinnaalandust või arve krediiti, kui tarbija on valmis süsteemi ettenägematute olukordade puhul oma võrgu koormust vähendama [18]. Võimetus oma tarbimises kärpeid teha võib tarbijale trahve tuua. Kärpeprogramme pakutakse ainult suurimatele tööstus- või kommertsettevõtetele. [15]

### 2.2.3. Avariiolukorra nõudluse juhtimine

Avariiolukorra nõudluse juhtimise programm (ingl *emergency demand response*) pakub hüvesid selle eest, et tarbijad on valmis oma hetkelist elektritarbimist kärpima ajal, mil võrgus on vähe reservi. [15]

### 2.2.4. Mahtuvusturu programm

Mahtuvusturu programmis (ingl *capacity market*) osalevatele tarbijatele makstakse kindel summa selle eest, kui nad oma tarbimist võrguettevõtte korraldusel vähendada suudavad [18]. Selle programmi korral saab tarbija tavaliselt võrguettevõttelt tarbimise kärpimiseks teate ning, kui ta ei ole võimeline oma osalust lubatud koormuse vähendamisse andma saab ta leppetrahvi [15]. Nõusolek majapidamise ajutise tarbimise vähendamiseks leevendab mingil määral vajadust tavapärase elektri lisagenereerimise või ülekanderessursside tõstmise järele.

### 2.2.5. Abiteenuste turu programm

Abiteenuste turu programmi (ingl *ancillary services market*) puhul teevad tarbijad ISO (ingl *Independent System Operator* ehk iseseisev süsteemioperaator) ja RTO (ingl *Regional Transmission Organization* ehk regionaalne ülekande-ettevõte) turul kärpepakkumisi. Kui nende pakkumised vastu võetakse, makstakse neile turuhinda selle eest, et nad on vajadusel valmis iga kell oma tarbimist kärpima. Kui kärbete läbi viimist on reaalselt vaja võetakse tarbijaga ISO/RTO poolt ühendust ning neile makstakse hetketuru elektrihinda. [15]

# 3. NUTITEHNIKA

## 3.1. Tarbimise juhtimine läbi nutitehnika

Tarbimise juhtimise tuumaks on kliendi tarbimisharjumuste muutuste motiveerimine läbi võrguettevõtete poolt pakutavate erinevate stiimulite [19]. Võrguettevõte saab tänu tarkvõrgule näha võrgu aktuaalset ja regionaalset koormust ning kliendile vajadusele vastavalt signaali saata, et tema tarbimist juhtida või tarbimiskäitumise suhtes ettepanekuid teha. Suhtlus võrguettevõtja ja tarbija seadmete vahel toimub läbi nutitehnika ja kauglugerite, mis on asjade interneti (ingl *Internet of Things* ehk IoT) ja kohaliku võrgu (ingl *Local Area Network* ehk LAN) kaudu ühenduses.

Eelnevas peatükis käsitletud tarbimise juhtimismeetmete efektiivsus oleneb tarbija reaktsioonist ehk sellest, mil määral lubatakse seadmetel programmeeritud käskudele ja signaalidele alluda. Tavaliselt ei soovi tarbija oma käitumisharjumusi muuta ega selles mööndusi teha. See tähendab aga, et seadmete tootjad peavad leidma optimaalse lahenduse, mis rahuldaks nii võrguettevõtete kui ka tarbijate vajadusi ja soove.

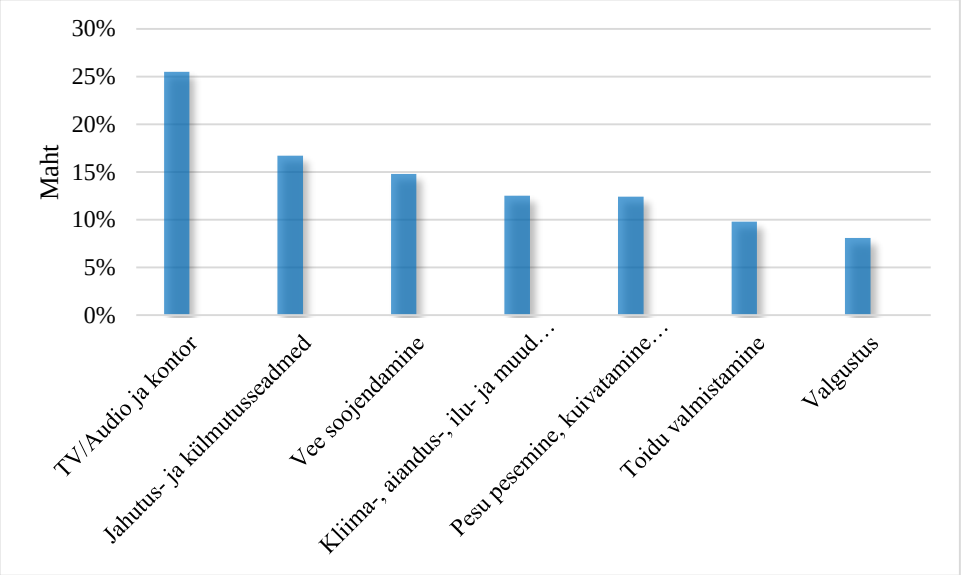
## 3.2. Potentsiaal võrgu koormuse ühtlustamisel

Kuna tänapäeval ei ole veel piisavalt efektiivseid ning odavaid elektri salvestusseadmeid, siis tuleb seda toota vastavalt jooksvale vajadusele. Suure elektrijaama käivitamine nõuab märkimisväärset aega ning see on kallis protseduur. Kuigi suuremaid elektrijaamasid on ökonoomsem käigus pidada, lülitatakse võrku paaritunnistel tippkoormustel väikesemaid generaatoreid. Tippkoormusel kasutatavad lisageneraatorid ei ole nii tõhusad kui suuremad põhigeneraatorid ning nende kasutamine on kulukam, kuid neil on madalamad käivituskulud. [20]

Nutitehnika kasutamine majapidamistes annab võimaluse võrgu koormusgraafiku tipu alandamiseks ehk lühiajalise koormuse vähendamiseks võrgu tippkoormuse ajal. Siinkohal ei vähene üldine tarbitav elektrikogus vaid muutub aeg, millal tarbimine toimub. Näiteks saaks

osade seadmete tööd lükata koormusmiinimumi ajale, mil võrgu koormus on väikesem ning hind soodsam. Joonisel 3.1. on kujutatud 2011. aasta Saksamaa kodumajapidamiste keskmise elektriarve kulupunktid, mis on tekitatud [21]:

1) 26% ulatuses TV/audio ja kontoriseadmete poolt;
2) 17% ulatuses jahutus- ja külmutusseadmete poolt;
3) 15% ulatuses vee soojendamise poolt;
4) 13% ulatuses kliima-, aiandus- ja ilu- jm elektriseadmete poolt;
5) 12% ulatuses nõude ja pesu pesemise ning kuivatamise poolt;
6) 10% ulatuses toidu valmistamise poolt;
7) 8% ulatuses valgustuse poolt .




**Joonis 3.1.** Erinevate seadmete elektritarve osakaal kodumajapidamistes

TV/audio ja kontori seadmete all mõistetakse siinkohal koduste televiisorite, tahvelarvutite, sülearvutite jms tarvet. Siin ei anna elektritarbimise aega eriti muuta, kuna tegemist on tarbija kindla käitumismustriga, mis on tingitud tema loomulikust päeva rütmist. Sama kehtib ka toidu valmistamisele kulutatud elektri puhul. Valgustuse elektritarvet ei ole antud töö käsitluses võimalik märkimisväärselt kahandada—abiks võivad olla teadlikumalt lisatud liikumisandurid.

## 3.3. Nutitehnika tööpõhimõte

Võrgu koormuse kõikumine on ökonoomsuse aspektist oluline ning seda saaks ühtlustada kasutades nutitehnikat mida juhib juhtsignaal nagu näiteks börsi hind. Järgnevas peatükis tutvustatakse nutitehnika tööpõhimõtet kasutades General Electric (edaspidi GE) seadmete programmide võimalusi.

GE seadmed on kavandatud nõnda, et need reageeriks automaatselt juhtsignaalile, kaasates samal ajal tarbijat ning andes talle visuaalse liidese kaudu mitmeid võimalusi seadme otsuseid muuta või tühistada. Viimane on oluline, et tõsta seadmete vastuvõetavust tarbijatele. Vaadeldavas olukorras vastavad kõik seadmed normaalsele (ingl *Normal*), kõrgele *(ingl High*) ja kriitilisele (*ingl Critical*) juhtsignaalile kriitilise koormustipu tariifil. Andmed on saadud kasutades GridLAB-D tarkvara. Simulatsioonides jälgis GE 646 majapidamisega võrku, et näha mis oleks nende mõju nutitehnika kasutamisel kolme juhtsignaali korral. Esimene signaal oli kriitiline ning see oli kella 18:00 kuni 20:00, teine signaal oli kõrge ning kestis 15:30 kuni 18:00 ja 20:00 kuni 21:00 ning kolmas signaal oli normaalne ning kestis ülejäänud aja. Tarbijate valmisolekut, oma toiminguid hinnale vastavalt muuta, on raske ennustada sestap kasutati simulatsioonis 90% valmidust programmi käivitamise viivitamiseks. [22]

Üldiselt on tarbijal elektri hinna tõusmisel järgnevad valikuvõimalused:

1) Viivitada tegevusega kuni elektri hind on madalam;
2) Minna üle energiasäästu programmile (*ES-mode*), kuid jätkates tööd;
3) Lükata ümber koormuse vähendamine ehk ignoreerida kõrgemat hinda ning lasta seadmel töötada normaaltalitluses.

Tarbija kohaloleku puudumisel valib seade vaikimisi, olenevalt juhtsignaalist ning konkreetse seadme seadistusest, kas energiasäästu programmi või viivitab tööga. [22]

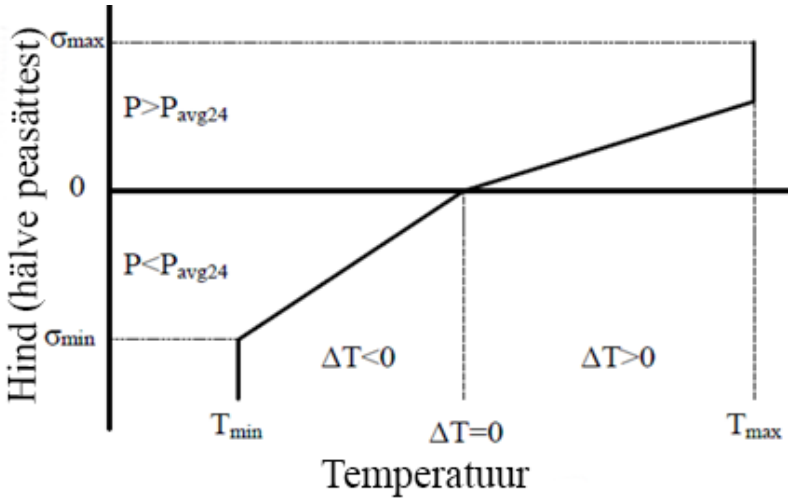
Võimalus nutitehnika töötamisotsuseid ja sellega ka elektritarbimist muuta on oluline, kuna see teeb seadme kasutajasõbralikumaks. Tähtis on, et tarbija ei peaks enda harjumuspäraseid tegevusi seadme töö järgi sättima, vaid et muutused majapidamistehnika talitluses ei oleks märkimisväärsed.

# 4. ERINEVATE NUTITEHNIKA SEADMETE LAHENDUSED

## 4.1. Ventilatsiooni-, kütte- ja jahutusseadmed

Üks energiakulukamaid protsesse majapidamistes on ruumi ja vee soojendamine. Palavatel aegadel lisandub sellele veel ka ruumi jahutamine. Kliimaseadmete protsessid on lisaks energiakulukusele ka veel pikad, kestes vastavatel hooaegadel isegi päevi, kui tarbija temperatuuri valikus muudatusi ei tee.

Joonis 4.1. kujutab kliimaseadme automatiseeritud termostaadi reaktsiooni, kuid sama efekti saab ka soojusseadmetel kasutada. Sisuliselt tõlgib termostaat elektri hinna kõikumise süsteemi temperatuuri sättepunkti muutuseks. Kui elektri hind peaks võrdlemisi kõrgel olema tõstetakse jahutuse sättepunkti. Hinna alanemisel reageerib seade vastavalt, lubades ruumi rohkem jahutada. Tarbijale jääb kontroll seadme reaktsioonitaseme üle määrates maksimaalse üles ning alla nihke ($T_{min}$ ja $T_{max}$) soovitud sättepunkti ($\Delta T=0$) suhtes, mil määral seade peaks reageerima (joone kumerus) ning kas ruumidele peaks enne tarbija koju naasmist lisajahutamist/-soojendamist tegema. [22]




**Joonis 4.1.** Automatiseeritud termostaadi tagasiside [22]

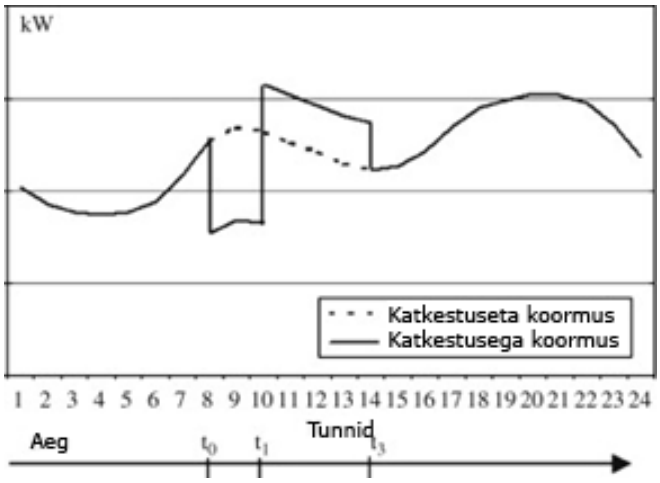
See lahendus ei ole sobilik tarbijatele, kes kasutavad börsihinnaga elektripaketti, sest siis toimuks öösel, mil hinnad on madalamad, suurem elektritarbimine. Võrgukoormuse aspektist on maja nn eelsoojendamine/-jahutamine kasulik, sest seda saaks rakendada ajal, mil tarbijad töölt kodu poole suunduvad ehk pärastlõunasel koormuslohul (joonis 1.5. ja joonis 1.4.). See aga eeldaks, et seadmed ei tööta täisvõimsusel ajal mil tarbijaid kodus ei ole ehk tippkoormusel.

Parem lahendus oleks programmeeritavate ventilatsiooni-, soojus- ja kliimaseadmete kasutamine kahetariifsete pakettide puhul. Päevasel ajal, mil elektri hind on kõrgem ja tarbija on tööl, toimuks siis väiksem tarbimine ja ruumide temperatuurile lubataks suurem nihe sättetemperatuurist. Enne tarbija koju jõudmist toimuks seadmete lineaarne koormuse tõus ning sellega seoses ka tasane normaaltalitlusele naasmine.

## 4.2. Vee soojendamise seadmed

Vee soojendamise seadmeid nagu boilereid saab võrgu koormuse ühtlustamisel hästi kasutada, sest neil on soojusinerts. Keskmine boiler mahutab 200 l vett ning selle võimsuseks on 2 kW. Sellise seadme soojuskadu hea isolatsiooni korral on 75 °C juures umbes 0,1 kWh/h. Sooja vee tarbimise puudumisel, ehk olles ooterežiimis, kulub täidetud paagi puhul 2,3 h selleks, et vee temperatuur langeks ühe kraadi võrra. Termostaat hakkab vett 73 °C juures soojendama ja lõpetab oma töö 77 °C juures. Eelneva põhjal selgub, et soojuskao tõttu lülitab termostaat küttekeha umbes 9 tunni pärast sisse. Enamus boilerite küttekehasid töötab vee tarbimise, mitte soojuskao tõttu. [23]

Suurim veetarve ja sellega seoses ka vee soojendamisele kuluv elekter toimub hommikul, mil enamus tarbijatest enne tööle minekut dušši all käib. Teine, väikesem, vee tarbimise tõus on õhtupoolikul kui tehakse süüa ja käiakse dušši all. Suurem pere võib kasutada umbes 14 kWh elektrit, kui kõik dušši all käiksid—tarbitud vee soojendamisele kuluks 7 tundi [23].




**Joonis 4.2.** Pereelamu tarbimise koormusgraafik boileri säästva koormuste korral [23]

Joonisel 4.2. on illustreeritud boileri poolt tekitatud võrgukoormuse muutust üle kogu päeva. Koormus muutub vastavalt vee tarbimisele, sest sooja vee vähenemisel hakkab boiler lisatud jahedamat vett uuesti soojendama. Sellest on ka tingitud kumer koormuse tõus pärastlõunasel ajal. Kui pereliikmed hommikul dušši all ära käiks, võiks kella kaheksast kuni kümneni boileri välja lülitada ning sellega säästaks ühe elamu pealt 2 kWh. Peale seda faasi lülituks boiler uuesti sisse, et taastada normaaltemperatuur enne elanike koju saabumist. Seadme tagasi võrku lülitumine tekitab väikese koormustipu ning seda tuleb suuremas mastaabis arvestada. Kuna öösel üldiselt sooja vee tarbimist ei toimu, saaks siin kasutada lisaprogramme, kus boiler vahetult enne hommikust perioodi, kuid siiski soodsamal ajal, vett ette valmistama hakkab.

Osad tootjad, nagu Whirlpool, pakuvad nutikaid lahendusi kus kasutatakse otsese koormuse kontrolli programmi, kuid tarbijatel on võimalus koormuse vähendamise päring tagasi lükata ning oma boilerit tavapäraselt kasutada. Lisaks on võimalik boileritele tarbimisharjumustele vastavalt soojendamisprogramme seadistada, mis muudab need veelgi ökonoomsemateks.

## 4.3. Pesukuivatid

Elektriliste pesukuivatite puhul kasutavad kõige rohkem toidet trumli mootor ning õhku soojendavad kütteelemendid. Tavaliselt kulub ühe pesu koguse kuivatamiseks umber 60 minutit. Kuna tegemist on energiakulukate seadmetega, siis on nende kasutamine võrgukoormuse seisukohalt märgatav.

Järgnevalt on toodud välja pesukuivati GE poolt simuleeritud näitest, mis analüüsib seadmete mõju võrgu koormusele.

Kui kuivati alustab oma tööd normaalse signaali aeg, siis töötab see selles režiimis seni kuni ta saab kõrge või kriitilise signaali. Kui seade käivitatakse kõrge või kriitilise signaali ajal teavitatakse tarbijat kuvari kaudu sellest et elektri hind on hetkel kõrgem. Sellisel juhul on tarbijal kolm toimingu võimalust. Esimene võimalus, mis on ka eelseadistatud, on kuivatustsükli alustamist viivitada kuniks elektri hind on normaliseerunud. Teine võimalus on käivitada kuivati energiasäästuprogrammis, mis vähendaks seadme võimsust, kuid pikendaks kuivatustsükli aega. Sellisel juhul ei toimu kohest pesu kuivatamist, vaid seadme trummel pöörleks küttekehasid kasutamata seni kuni hind on langenud ning alustab siis oma tavapärast programmi. Selle programmiga vähendataks pea 10 % kuivatite poolt tekitatud võrgukoormusest. Kolmas programm on kohene käivitus normaaltalitlusel. [22]

Energianõudluse taastumise perioodil, ehk ajal, mil antud kontekstis toimub hinna langus alustaksid kõik võrgus olevad ja signaalile reageerivad seadmed oma töö korraga ning see põhjustaks märkimisväärse võrgukoormuse tõusu. Siin saab kuivatite puhul edukalt kasutada juhuslikkuse strateegiat (ingl *randomize*). See tähendab, et seadmed ei alusta oma tööd odavama hinna saabudes korraga, vaid iga seade hakkab tööle mingil ette antud perioodil (näiteks 20 minuti jooksul). Sellisel juhul tuleks kasutada kas otsese koormuse kontrolli programmi või tuleks seadmele tootja poolt vastav programm integreerida. Nimelt kui kõik seadmed hakkaksid odavama hinna saabudes korraga töötama, tõstaks see võrgukoormust kuni 8,5 korda, samas integreeritud leevendamismeetoditega alaneks koormustipp kaks kuni kolm korda [22].

## 4.4. Pesumasinad

Pesumasinatel on tavalistel programmidel 3 loputust ning 3 tsentrifuugi tsüklit. Suurem energia kulub vee soojendamisele ning trumli mootori tööle. Pesu pesemisel on probleemiks see, et pesu ei saa kauaks masinasse jätta, kuna see põhjustaks pesu kortsumise ning kogunenud niiskuse mõju ei ole tekstiilile hea. See tähendab, et selle seadme kasutamine nõuab mõningast tarbija poolset osalust—pesu pesemine nädalavahetustel või pesu programmi käivita-

mine viivitusega nii, et pesu saaks hommikuks valmis. Kombineerides viivitusega pesutsüklit juhtsignaalidega, võib juhtuda et kõrgema hinna signaal saabus tarbija jaoks ebasoodsal ajal ning masin käivitus liiga hilja.

GE poolt katsetatud stsenaariumis töötasid pesumasinad normaalses režiimis käivitades normaaltalitluses lõpuni ka siis kui poole programmi peal tuli kõrge või kriitiline signaal. Kui aga pesuprogrammi üritati kõrge või kriitilise hinnasignaali jooksul käivitada, anti tarbijale võimalus valida viivitusega start. Siis ootas seade pesutsükli alustamisega seni, kuni kõrge või kriitiline signaal möödus. Viivitamist oli tarbijal võimalik ka eirata ning kõrgemast hinnast hoolimata valida normaaltalitluses stardi. Kõrge signaali korral oli tarbijal võimalik valida energiasäästu või kõrge energiasäästu režiimi vahel, mis kõrvaldas vee soojendamisega seotud kulud (olenevalt programmist kulub kuni 40 % pesu pesemisel tarbitavast energiast vee soojendamisele). Kriitilise signaali korral loobus pesumasin vee soojendamisest ning pikendas pesutsüklit, et tarbitava energia kogust vähendada. Kõik need pesu programmid kasutasid ühe töötsükli jooksul sama koguse energiat. Kui kõik seadmed reageeriksid odava hinna peale korraga ehk alustaksid oma tööd, siis tõuseks võrgu koormustipp 2,4 kordselt. Juhuslikkuse strateegiat kasutades saadakse tippu 1,1 kordse peale vähendada. [22]

Sellise lahendusega ei säästeta oluliselt energiat, kuid vee soojendamise ära jätmise tõttu toimub võrgu koormuse ümber jaotamine. Arvestades, et tavaliselt toimub pesu pesemine vara hommikuti või pärastlõunal, mil hinnad on üpris kõrgel, siis tuleb tarbijal oma käitumismustrit muuta.

## 4.5. Nõudepesumasinad

Nõudepesumasina puhul tarbivad enim energiat tiivikuid keerutavad mootorid, vett sisse ja välja pumpavad pumbad, küttekeha, mis vett soojendab ning termostaat, mis vee temperatuuri kontrollib. Osadel seadmetel on võimalik küttekeha ka nõude kuivatamiseks kasutada.

GE kasutab ka nõudepesumasinate puhul sama strateegiat nagu pesumasinatel, lubades kriitilise või kõrge signaali korral masinat kas viivituse või energiasäästu programmiga kasu-

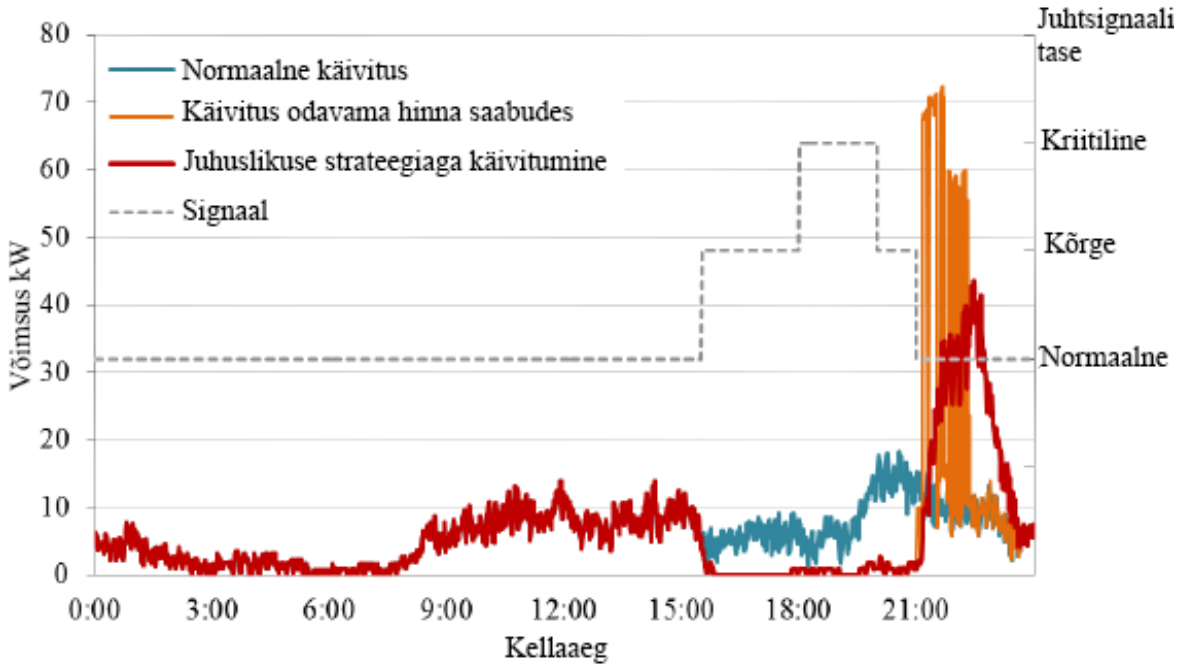
tada. Seadme eelseadistatud toiming kõrge või kriitilise käivituse korral on viivitamine kuniks soodsama hinna signaal saabub. Tarbijal on võimalik ka seadme seadistusi eirata ning see kohe käivitada. Energiasäästu programmi korral loobub seade nõude kuivatamisest. [22]

Kuna nõud ei ole niiskuse suhtes nii tundlikud kui riided, siis on siin koormuse ühtlustamisel suurem potentsiaal—tarbija saab masina ka kõrgema hinna perioodil käivitada ning hinna langemisel käivitub seade ise. Kui nõud peaks ka näiteks öö otsa masinas olema, ei oleks sellest lugu.

# 5. NUTITEHNIKAGA SEOTUD PROBLEEMID JA KASUTUSEL OLEVAD SEADMED

## 5.1. Nutitehnikaga seotud probleemid

Joonisel 5.3. on kujutatud nõudepesumasinate poolt tekitatav võrgu koormuse muutust erinevatel käivitusprogrammidel. Tipu intensiivsus oleneb kasutatavate seadmete võimsusest, kuid on omane kõigile nutitehnika seadmetele. Isegi kui koormus on näiteks kõrgema hinnaga ajalt madalama koormusega ajale viidud, tekib probleem seadmete võrku lülitamisel ajal, mil saabub madalama hinna periood. Nimelt kui võrguettevõte saadab seadmetele odavama hinna signaali või seade saab selle signaali börsilt, lülituvad seadmed kõik korraga sisse, tekitades sellega uue koormustipu. Olenevalt oma võimsusest, võib see koormustipp ohustada võrgu stabiilsust. Seega tuleb seadmete tootjatel töötada lahenduste kallal, mis takistaks kõikide seadmete korraga tööle rakendumist.




**Joonis 5.3.** Võrgu koormusgraafik nõudepesumasinate erinevate käivitusolukordade simulatsioonis [22]

Teine lahendus oleks anda võrguettevõttele kontroll seadmete tööle lülitamisel nagu seda saab otsese koormuse kontroll või kärpiva talituse programmide puhul teha. Siin saaks võrguettevõtte poolse programmeerimise korral seadmete tööle lülitumise aega ajaliselt hajutada. Tavaliste majapidamiste tarbijatele võib selline väline juurdepääs muret tekitada ja sellisel juhul on uue tehnoloogia kodudesse juurutamine raskendatud.

Isegi kui suudetakse välja töötada tehnoloogia, mis töötaks tarbija ja võrguettevõtte jaoks sobival viisil oleks uue tehnoloogia kasutuselevõtt aega nõudev protsess, sest majapidamisseadmete tööiga on pikk. Samas on just pikk tööiga üks argumentidest, mis õigustab nutikama tehnika soetamisel tehetavaid lisakulutusi.

## 5.2. Muud kasutusel olevad seadmed ja lahendused

Suuremad majapidamisseadmete tootjad pakuvad tänapäeval tarkvõrgu valmidusega seadmeid, mis on võimelised oma tööd ümber seadistama. Näiteks on LG-l ja Samsungil külmkapid, mis sätivad oma sulatusprogrammi tööd kas võrgu koormuse või elektri hinna järgi (olenevalt tarbija poolsetest seadistusest). Need seadmed saavad oma signaali interneti kaudu. Whirlpoolil on viivitus-stardi funktsiooniga kuivatid ja pesumasinad, millega tarbijal on võimalik vältida võrgu tippkoormuse aegasid—säästes sellega loodust ning vastava tariifiga kombineerides ka raha.

Lisaks on võimalik kasutada nutitehnikat kombineeritult Nest kontrollseadmega. See on eraldi seade, mida on võimalik kodudesse lisaks paigaldada. Nest on nutikas ja ise õppiv andur ning juhtseade mille kaudu saab majapidamisseadmeid juhtida. See õpib paari päeva jooksul ära, millal tarbijad kodus on ning mis on nende elektritarbimisharjumused. Näiteks kui tarbijad on kodust lahkunud, lülitab Nest kontrollseade boilerid ja kliimaseadmed säästurežiimi ning taastab nende töö ja temperatuuri enne tarbija naasmist. Lisaks automatiseeritud tegevusele on Nest seamega võimalik ka kodunt eemal olles majapidamistehnikat kontrollida kasutades selleks telefonis olevat äppi.

Saksamaal on T-Mobile pakkunud aastaid teenust nimega Magenta SmartHome, millega on võimalik kodunt eemal olles oma äppi või internetilehe kaudu nutikaid pistikseadmeid kontrollida. Selleks aga peavad tarbijad omale soetama lisaseadmeid nagu näiteks nutikaid pistikuid, liikumisandureid, lüliteid ja radiaatorite termostaate.

Mõeldes tuleviku trendidele on Itron ja ClipperCreek koostöös eMotorWerks'iga hakanud valmistama nutikaid elektriautode laadimiskeskuseid mis on mõeldud eramajapidamistele. Ka siin kasutatakse kauglugeritega suheldes saadud infot ning seatakse sellele vastavalt auto laadimine. Lisaks on tarbijal võimalik kontrollida laadimisprotsessi ka läbi oma telefoni.

Äppidega juhitavad seadmed on tarbija jaoks kõige mugavamad ja kasutussõbralikumad, kuid sellega langeb ära võrguettevõtte otsesem kontroll võrgu koormuse üle. Seega saab eramajapidamiste poolt tekitatud võrgu koormust vaid hinnaga mõjutada.

# KOKKUVÕTE

Koormuse lükkamine madalama nõudlusega ajale ei vähenda tarbitud elektri kogust, vaid tarbija poolseid kilovatt-tundide peale tehtavaid kulutusi. Sammuti langevad tootja poolsed kulutused, sest väheneb lisageneraatorite kasutamise vajadus, mis omakorda tähendab ressursside paremad kasutamist ning vähendab negatiivset mõju keskkonnale. Lisaks vähendab võrgu koormuse ühtlustamine võrguettevõtete kapitalikulu investeeringuid ning lükkab edasi vajadust võrku uuendada. Ka nutitehnika puudumisel majapidamistest on võimalik tarkvõrgu eeliseid kasutada, sest kauglugerid võimaldavad jaotusvõrgu kiiremat rikkeanalüüsi ning automaatset tarbimise edastamist.

Probleemne on aga mõlema osapoole jaoks sobiva lahenduse leidmine. Tavaliselt ei soovi tarbija säästmisega aktiivselt tegeleda ega oma argipäevast käitumist, nagu näiteks pesu pesemist, muuta. Tänapäeval kasutatavad tarbimist juhivad programmid nõuavad tarbija aktiivset osalust ja suhtlust võrguettevõttega nutitehnika kadu. Kui tarbija soovib näiteks kallima hinna perioodil pesu pesta, siis peab ta tegema lisaotsuse selle kohta kas käivitada masin kohe ning mis režiimis see toimuma peaks. Sisuliselt on see võrguettevõtte poolne päring kliendile, et ta oma tarbimise hilisemal ajal sooritaks. Nende programmide puhul, mil tarbijad saavad ise otsustada, mis hinna piiri juures nende seadmed oma tööd alustama peaks, tekib võrku uus koormustipp, mis ei ole suurtel koormustel võrgu stabiilsusele hea.

Nutitehnika poolt tekitatud koormustippu saaks vähendada kui seadmetel oleks juhuslikkuse programm, mis väldiks suurel hulgal kõikide seadmete ühel ja samal ajal hinnale reageerimise ehk oma tööga alustamist. See omakord vähendab mingil määral tarbija võimet otsustada, millal tema poolt soovitud toimingud lõpule viiakse. Koormustipu kontrollimiseks on hetkel kõige tõhusamad programmid need, mille puhul on võrguettevõtetel otsustusvõime tarbija seadmete üle, kuid need võivad tarbija jaoks liiga invasiivsed tunduda.

Suurim potentsiaal võrgu koormuse juhtimisel on vee ventilatsiooni-, kütte- ning jahutusseadmetel. Soojusprotsesside energiakulukuse tõttu on nende mõju võrgus märgatav. Nende seadmete puhul piisab juba sellest, kui tarbija oma seadmed võimaluse korral teadlikumalt

seadistaks — minnes näiteks kodust ära, ei ole vaja esimese paari tunni jooksul õhku ja vett soojendada. Selle tulemusena väheneks tarbimine kõrgema hinna perioodil vähemalt esimesel kahel hommikutunnil. Erinevalt teistest seadmetest on võimalik soojus-, ventilatsiooni- ja jahutusseadmete puhul vältida olulisel määral võrgu koormustipu teket tõstes nende koormus lineaarselt seniks kuni on saavutatud soovitud temperatuur.

Tarbimise juhtimise aspektist vaadelduna on soojus-, ventilatsiooni- ja jahutusseadmetele parima programmi leidmine keeruline, sest tihti on elektri hind just öösel soodne, kuid siis ei toimu ka intensiivset soojuse tarbimis. Ka nende seadmete puhul tasub kaaluda programmeeritavuse võimalust. Sellega saaks langetada üleüldist elektritarbimist, sest langeks ära seadmete poole konstantse temperatuuri hoidmise vajadus ning seda just päevasel ajal, mil tarbija ei ole kodus ning hind on kõrge.

Antud töös oli tarbijate rolli võrgu koormuse ühtlustamisel raske hinnata, sest see nõuaks suure mahuga reaalseid katseid, mis hõlmaks osavõtjate tegelikke otsuseid. Seni tehtud katsed, mis on avalikusele kätte saadavad, on liiga väikese mahulised. Tarbijate valmidust end elektri hinna järgi kohanda võib tõsta parema kommunikatsiooniga. Kui suhtlus toimuks läbi nutitelefoni, ei peaks ta majapidamises asuvate seadmete juurde minema, et oma tarbimisotsusest teada anda, vaid saaks seda otse äpis teha.

# KASUTATUD KIRJANDUS


[1] eurostat, „http://ec.europa.eu/,“ European Commission, 28.10.2015. [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Electricity_production,_consumption_and_market_overview/de. [Kasutatud 04.02.2016].

[2] eurostat, „http://europa.eu/,“ European Commission , 28.01.2016. [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?query=BOOKMARK_DS-053532_QID_-282856CC_UID_-3F171EB0&layout=TIME,C,X,0;GEO,L,Y,0;UNIT,L,Z,0;PRODUCT,L,Z,1;INDIC_NRG,L,Z,2;INDICATORS,C,Z,3;&zSelection=DS-053532UNIT,GWH;DS-053532INDIC_NRG,B_102010;DS-053532I. [Kasutatud 11.04.2016].

[3] Eesti Statistika, „www.stat.ee,“ 2012. [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: https://www.stat.ee/dokumendid/67933. [Kasutatud 04.03.2016].

[4] M. Meldorf, Elektrisüsteemie stabiilsus, Tallinn: TTÜ kirjastus, 2000.

[5] R. Teemets, „http://www.ene.ttu.ee/,“ 2010. [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: http://www.ene.ttu.ee/elektriajamid/oppeinfo/materjal/AAV3340/ElVar_1._Elektrisysteem._Konspekt_2010kevad.pdf. [Kasutatud 14.02.2016].

[6] R. E. Brown, Electric Power Distribution Reliability, New York: Marcel Dekker, Inc., 2002.

[7] H. Tammoja , „http://www.energiatalgud.ee/,“ 2013. [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: http://www.energiatalgud.ee/img_auth.php/0/0c/Elektrilevi_O%C3%9C_kask-ja_madalpingev%C3%B5rgu_varustuskindluse_n%C3%A4itajad_ja_muutuste_m%C3%B5jurid_erinevates_varustuskindluse_piirkondades_%C3%BCleminekul_kaabliv%C3%B5rgule.pdf. [Kasutatud 27.02.2016].

[8] Elering AS, „http://elering.ee/,“ Elering AS, 03.2016. [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: http://elering.ee/tarbimine-ja-tootmine-3/?period=week&chart=&step=-6. [Kasutatud 03.05.2016].

[9] Elering AS, „http://elering.ee/,“ Elering AS, 2016. [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: http://elering.ee/elektrienergia-hinna-kujunemine/. [Kasutatud 29.04.2016].

[10] Nord Pool AS, „http://www.nordpoolspot.com/,“ Nord Pool AS, 05.05.2016. [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: http://www.nordpoolspot.com/Market-data1/Elspot/Area-Prices/EE/Hourly/?view=table. [Kasutatud 05.05.2016].

[11] Eesti Energia AS, „https://www.energia.ee," Eesti Energia AS, [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: https://www.energia.ee/elektripaketid. [Kasutatud 13.05.2016].

[12] Vabariigi Valitsus, „Riigiteataja," Vabariigi Valitsus, 19.02.2016. [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: https://www.riigiteataja.ee/akt/116022016014. [Kasutatud 02.03.2016].

[13] Elektrilevi OÜ, „https://www.elektrilevi.ee," 2014. [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: https://www.elektrilevi.ee/-/doc/6305157/ettevottest/el_majandusaasta_aruanne_2014.pdf. [Kasutatud 13.04.2016].

[14] T. Lehtla, „Energeetika," *Horisont,* lk 6, 02.2012.

[15] U.S. Department of Energy, „http://energy.gov/," 02.2006. [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: http://energy.gov/sites/prod/files/oeprod/DocumentsandMedia/DOE_Benefits_of_Demand_Response_in_Electricity_Markets_and_Recommendations_for_Achieving_Them_Report_to_Congress.pdf. [Kasutatud 13.04.2016].

[16] C. J. Tang, M. R. Dai, C. C. Chuang, Y. S. Chiu ja W. S. Lin, „http://ac.els-cdn.com/," 09.08.2013. [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: http://ac.els-cdn.com/S0167739X13001659/1-s2.0-S0167739X13001659-main.pdf?_tid=d5b02d74-1922-11e6-9943-00000aacb360&acdnat=1463154988_3101e72274a0db9344948bf2a86d43d4. [Kasutatud 01.05.2016].

[17] H. A. Aalami, M. Parsa Moghaddam ja G. R. Yousefi, „http://www.sciencedirect.com/," 13.11.2009. [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: http://ac.els-cdn.com/S0378779609002399/1-s2.0-S0378779609002399-main.pdf?_tid=e8d2d9f6-1acb-11e6-b932-00000aab0f02&acdnat=1463337556_f452e9782cbc5043f3234f547de717f8. [Kasutatud 13.05.2016].

[18] H. A. Aalami, M. Parsa Moghaddam ja G. R. Yousefi, „http://www.sciencedirect.com/," 07.07.2009. [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: http://ac.els-cdn.com/S030626190900244X/1-s2.0-S030626190900244X-main.pdf?_tid=8b519e94-1ad4-11e6-a1f4-00000aab0f02&acdnat=1463341265_31e2e1ac2633b51bbafa70ff198c0607. [Kasutatud 05.05.2016].

[19] H. T. Haider, O. H. See ja W. Elmenreich, „ScienceDirect," 19.01.2016. [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116000447. [Kasutatud 09.05.2016].

[20] R. D. Schultz ja R. A. Smith, Introduction to electric power engineering, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1988.

[21] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., „https://www.bdew.de,“ 09.2014. [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: https://www.bdew.de/internet.nsf/id/6966C7CB65D8D8FAC1257D5E0043D565/$file/705_BDEW_Stromverbrauch%20im%20Haushalt_Stand_September%202014.pdf. [Kasutatud 12.01.2016].

[22] J. C. Fuller, B. Vyakaranam, N. Prakash Kumar, S. M. Leistritz ja G. B. Parker, „https://www.researchgate.net,“ 04.2012. [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: https://www.researchgate.net/profile/Jason_Fuller3/publication/255001766_Modeling_of_GE_Appliances_in_GridLAB-D_Peak_Demand_Reduction/links/5548e31f0cf205bce7abfb6b.pdf. [Kasutatud 16.01.2016].

[23] T. Ericson, „http://www.sciencedirect.com/,“ 17.05.2009. [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: http://ac.els-cdn.com/S0301421509002201/1-s2.0-S0301421509002201-main.pdf?_tid=926e4000-1af3-11e6-bb62-00000aab0f26&acdnat=1463354592_d7d998362d1e057e59006681e85660a1. [Kasutatud 05.03.2016].

[24] Energia Juhtimiskeskus OÜ, „http://juhtimiskeskus.ee/,“ 2016. [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: http://juhtimiskeskus.ee/tarbimise-juhtimine/mis-on-tarbimise-juhtimine#block-1. [Kasutatud 08.05.2016].

[25] R. Raudjärv ja L. Kuskova, „https://www.stat.ee,“ 2010. [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:Em8fA39FfeAJ:https://www.stat.ee/dokumendid/68623+&cd=1&hl=et&ct=clnk&gl=ee. [Kasutatud 11.04.2016].

# SMART APPLIANCES AND THEIR EFFECT ON SHIFTING HOUSEHOLDS' ELECTRICITY DEMAND

## SUMMARY

The aim of this thesis is to analyze the different capabilities of smart appliances in residential households and their potential in load shifting through different demand response programs. For this purpose the following has been studied:

1) overall development of demand on power;
2) fluctuations in the power grids;
3) price correlations to the shifting demand;
4) necessity of a stable grid;
5) what a smart grid is;
6) means of shifting demand;
7) potential of different smart appliances in load shifting.

The study shows that it is difficult to provide the consumer with an intuitive solution for load shifting without being intrusive. Effective means of demand response are the ones where the utility company has remote access to the appliances. Even with the capability of controlling the load of the grid through remote on and off switching of the appliances the problem of rebound peaks in the grid arises. It is evident that participation of load shifting is profitable for the customer, the utility company and the environment— through the even distribution of the load on the grid the need to produce higher back-up power is reduce, therefore the need for fossil fuel is lessened.

Further research should be done to find the best way of non-intrusive load shifting and it’s implementations for the customer as well as how to mitigate rebound peaks in the grid.

# LISAD

**Lisa A. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Jane Müller,

sünniaeg 12.07.1987,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö

"Nutitehnika majapidamistes ning selle mõju elektritarbimise ühtlustamisele",

mille juhendaja on Maido Märss

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____
(*allkiri*)

Tartu, _____
(*kuupäev*)

---

**Juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Luban lõputöö kaitsmisele.

_____ _____
(*juhendaja nimi ja allkiri*) (*kuupäev*)

_____ _____
(*juhendaja nimi ja allkiri*) (*kuupäev*)