



INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**HOONE TEHNOSÜSTEEMIDE ELEKTRIENERGIA
PAINDLIKKUSE HINDAMINE NING
PAINDLIKKUSTEENUSE RAKENDATAVUSE
ANALÜÜS BÜROOHOONE NÄITEL**

**EVALUATION OF A BUILDING TECHNICAL SYSTEMS'
ELECTRICAL ENERGY FLEXIBILITY AND
IMPLEMENTATION ANALYSIS OF FLEXIBILITY SERVICE
ON AN EXAMPLE OFFICE BUILDING**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Karl-Erik Timmer

Üliõpilaskood: AAAM204139

Juhendaja: Vahur Maask, MSc

Kaasjuhendaja: Tarmo Korõtko, PhD

Tallinn 2022

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

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

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

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

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

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Karl-Erik Timmer

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Hoone tehnosüsteemide elektrienergia paindlikkuse hindamine ning paindlikkusteenuse rakendatavuse analüüs büroohoone näitel”,

mille juhendaja on Vahur Maask ning kaasjuhendaja Tarmo Korõtko,

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.

06.05.2022

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

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Karl-Erik Timmer

Lõputöö liik: Magistritöö

Töö pealkiri: Hoone tehnosüsteemide elektrienergia paindlikkuse hindamine ning paindlikkusteenuse rakendatavuse analüüs büroohoone näitel

Kuupäev:
12.05.2022

65 lk

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendajad: MSc Vahur Maask, PhD Tarmo Korõtko

Sisu kirjeldus:

Antud magistritöö eesmärgiks on välja töötada arvutusmudel, mille abil lihtsustada energiapaindlikkusteenuse pakkumise majandusliku otstarbekuse hindamist hoonetes. Mudeli põhjal on võimalik hinnata kaudselt ka teiste sarnaste hoonete energiapaindlikkust ning projekti tasuvust ilma mahukaid arvutusi läbi viimata.

Töö raames analüüsiti näidishoone tehnosüsteeme ning nende elektrienergia tarbimisi, tuvastati paindlikud seadmed ning tehti ettepanekud muudatusteks tehnosüsteemide riistvaras ning juhtsüsteemides, et paindlikkusteenuse rakendamine käsitletavas hoones oleks võimalik. Muudatuste põhjal koostati mudel paindlikkusteenuse tasuvuse hindamiseks, ning hinnati mudeli tulemusel alusel näidishoone paindlikkusteenuse rakendatavuse majanduslikku tasuvusaega.

Kuna hoones energiapaindlikkuse rakendamine võib tuua kaasa lisakulutusi, kontrollib autor töö tulemusena järgmist hüpoteesi: näidishoone energiapaindlikkuse rakendamiseks vajalike muudatuste tasuvusaeg on vähem kui 5 aastat. Töö tulemusena koostati arvutusmudel, mis lihtsustab hoonesse energiapaindlikkusteenuse rakendamiseks vajalike muudatuste tasuvusaja arvutust, arvestades nii muudatustest tekkinud energiasäästu kui ka energiapaindlikkusteenusest saadavat lisatulu. Seega töö eesmärk täideti.

Märksõnad: energiapaindlikkus, tarbimise juhtimine, juhitavad koormused, arvutusmudel, büroohoone

ABSTRACT

Author: Karl-Erik Timmer

Type of the work: Master Thesis

Title: Evaluation of a building technical systems' electrical energy flexibility and implementation analysis of flexibility service on an example office building

Date: 12.05.2022

65 pages

University: Tallinn University of Technology

School: School of Engineering

Department: Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

Supervisors of the thesis: MSc Vahur Maask, PhD Tarmo Korõtko

Abstract:

The aim of this master's thesis is to develop a calculation model that will facilitate the assessment of the economic feasibility of providing energy flexibility services in buildings. Based on the model, it is also possible to indirectly estimate the energy flexibility and profitability of other similar buildings without performing extensive calculations.

In this thesis the technical systems of the demonstration building and their electricity consumption were analyzed, flexible devices were identified and the author proposed changes to the hardware and control systems of the technical systems to enable the implementation of the flexibility service in the building in question. Based on the changes, a model was developed to assess the profitability of the flexibility service, and based on the results of the model, the economic payback period of the implementation of the flexibility service of the demonstration building was assessed.

As the implementation of energy flexibility in a building can lead to additional costs, the author tests the following hypothesis as a result of the work: the payback period of the changes required to implement the energy flexibility of a demonstration building is less than 5 years. As a result of the work, a calculation model was developed that simplifies the calculation of the payback period of the changes required to implement the energy flexibility service in the building, taking into account both the energy savings resulting from the changes and the additional revenue from the energy flexibility service. Thus, the purpose of the work was fulfilled.

Keywords: Energy flexibility, demand response, flexible loads, calculation model, office building

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema: **Hoone tehnosüsteemide elektrienergia paindlikkuse hindamine ning paindlikkusteenuse rakendatavuse analüüs büroohoone näitel**

Lõputöö teema inglise keeles: **Evaluation of a building technical systems' electrical energy flexibility and implementation analysis of flexibility service on an example office building**

Üliõpilane: **Karl-Erik Timmer, AAAM204139**

Eriala: **Energiamuundus- ja juhtimissüsteemid**

Lõputöö liik: **Magistritöö**

Lõputöö juhendaja: **MSc Vahur Maask**

Lõputöö kaasjuhendaja: **PhD Tarmo Korõtko**

Lõputöö ülesande kehtivusaeg: 2021/2022 2022/2023 Sügis

Lõputöö esitamise tähtaeg: **18.05.2022**

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

Kaasjuhendaja (allkiri)

1. Teema põhjendus

Pariisi kliimakokkuleppe kohaselt on Eesti lubanud pühendada seatud eesmärkide täideviimisele – saavutada Euroopa Liidu kliimanetraalsus aastaks 2050 ning aastaks 2030 vähendada heitkoguseid võrreldes 1990. aasta tasemega 55%. Riikidele sätestatud eesmärkide täitmiseks võetakse laialdasemalt tarvitusele taastuenergiaallikad. Oma muutliku tootmisvõimsuse tõttu tekitab roheenergia elektrivõrgus ebastabiilsust – tootmist ja tarbimist on elektrisüsteemis üha raskem tasakaalustada. Probleemi laiendavad elektriautode laialdasem kasutuselevõtt ning 1. jaanuaril 2026. aastal plaanitav Venemaa võrgust desünkroniseerimine.

Antud probleemiga seisavad silmitsi elektrisüsteemi operaatorid. Juhtides tootmist ja tarbimist võrgus, on võimalik võrku stabiilsemana hoida. Mida suuremat energiamahu on võimalik juhtida, seda rohkem on võimalik võrgus üleliigset või puuduolevat energiat kompenseerida. Kuna hooned tarbivad globaalsel tasandil ligi 76% toodetavast energiast, on mõistlik elektrisüsteemi kompensatsioonimehhanismina kasutada hoonetes paiknevat juhitavat elektriseadmeid. Antud lõputöös käsitletakse sellist lähenemist energiapaindlikkuse teenuse pakkumisena, kus pakkujateks on hooned haldavad ettevõtted ning klientideks on elektrisüsteemi operaatorid. Elektrisüsteemi operaatoritele pakub paindlikkusteenus lisavõimaluse süsteemi tasakaalustada ning hooned haldavatele ettevõtetele annab see võimaluse majanduslikku kasu saada.

Käesolevas lõputöös selgitatakse energiapaindlikkuse ja energiapaindlikkuse teenuse mõisteid, uuritakse milliseid muudatusi on autori valitud büroohoones vaja teha, et võimaldada paindlikkusteenuse pakkumist. Viiakse läbi tasuvusanalüüs ning luuakse lihtsustatud mudel, mille alusel oleks võimalik hinnata paindlikkusteenuse rakendamise majanduslikku otstarbekust.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on välja töötada arvutusmudel, mille abil lihtsustada energiapaindlikkusteenuse pakkumise majanduslikku otstarbekuse hindamist hoonetes.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

1. Millised näidishoone seadmed on võimalik rakendada energiapaindlikkuse teenuse pakkumisel?
2. Milliseid muudatusi tuleb teha energiapaindlike seadmete juhtsüsteemide riist- ja tarkvarades, et võimaldada paindlikkusteenuse pakkumist?
3. Milline on paindlikkusteenuse võimaldamiseks vajalike muudatuste majanduslik otstarbekus?
4. Lihtsustatud mudel büroohonete majandusliku tasuvuse hindamiseks paindlikkusteenuse rakendamisel.
5. Kas lihtsustatud arvutusmudel võimaldab hinnata paindlikkusteenuse pakkumise majanduslikku otstarbekust näidishoones?

4. Lähteandmed

Antud eesmärgi lahendamiseks läheb tarvis näidishoone elektripaigaldise projektdokumentatsiooni ning üldiseid toimimispõhimõtteid. Samuti läheb tarvis juhtimiseks vajalikke põhimõtteskeeme. Tarvis läheb ka energiatarbimise näitajaid. Antud andmed hangitakse näidishoone haldurilt.

5. Uurimismeetodid

Analüüsitakse antud hoone projektdokumentatsiooni ning küsitletakse hoone haldurit, mille alusel valitakse paindlikkusteenuse jaoks sobilikud seadmed. Teostatakse erinevate tehnosüsteemide sõlmede (küte, jahutus, ventilatsioon ja valgustus) elektrienergia tarbimise mõõtmised. Elektrienergia tarbimise mõõtmiste ning tehnosüsteemide juhtsüsteemi analüüsi alusel modelleeritakse valitud seadmeid Matlabis. Saadud mudelite põhjal teostatakse simulatsioon, mille põhjal hinnatakse seadmete paindlikkust. Sooritatakse tabelarvutused Excelis, et hinnata paindlikkusteenuse majanduslikku otstarbekust antud hoones.

6. Graafiline osa

Olulisimateks joonisteks on energiatarbimise graafikud erinevatel ajaskaaladel. Olulisimad tabelid on elektripaigaldiste loetelud koos tarvitate nimiandmetega. Skeemidest on olulisemad hoone elektripaigaldiste põhimõtteskeem ning automaatikaseadmete struktuurskeem. Peamiselt on graafiline osa töö põhiosas, illustreerimaks paindlikke elektripaigaldisi, juhtimispõhimõtteid ning elektritarbimist.

7. Töö struktuur

1. Sissejuhatus
2. Energiapaindlikkus ja paindlikud seadmed büroohoones
 - 2.1. Ülevaade energiapaindlikkusest
 - 2.2. Ülevaade energiapaindlikkusteenustest
 - 2.3. Ülevaade näidishoonest ja selle elektripaigaldisest
 - 2.4. Näidishoone elektritarvitid ning paindlikud seadmed
3. Paindlikkusteenuse rakendamine
 - 3.1. Ülevaade paindlike seadmete juhtimisest
 - 3.2. Paindlikkusteenuste ülesehitus
 - 3.3. Paindlike seadmete juhtimispõhimõtted ning algoritmid
 - 3.4. Paindlikkusteenuse rakendamiseks vajalikud muudatused paindlike koormuste juhtsüsteemidesse näidishoones
4. Paindlikkusteenuse rakendatavuse analüüs
 - 4.1. Simulatsioonide kirjeldus
 - 4.2. Simulatsioonide tulemused ning analüüs
 - 4.3. Tasuvusanalüüs
 - 4.4. Lihtsustatud arvutusmodel paindlikkusteenuse tasuvuse hindamiseks büroohonetes
5. Kokkuvõte

Töö struktuur võib töö käigus muutuda.

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Peamiselt kasutatavad allikad antud magistritöös on teadusartiklid ning aruanded.

[1] A. Fraetan, P. Dobra. **The impact of control strategies upon the energy flexibility of nearly zero-energy buildings: Energy consumption minimization versus indoor thermal comfort maximization.** AQTR. 2018

[2] H. Nosair, F. Bouffard, **Energy-centric flexibility management in power systems.** IEEE Power & Energy Society General Meeting. 2017

[3] C. He, Y. Ling, P. Sun, X. Tan, J. An. **Dynamic Evaluation of Controllable Ability of Building Energy System.** EI2. 2020

[4] R. Li, S. You. **Exploring potential of energy flexibility in buildings for energy system services.** CSEE Journal of Power and Energy Systems, Vol. 4, Issue 4. PP 434-443. 2018

9. Lõputöö konsultandid

Hetkel konsultandid puuduvad

10. Töö etapid ja ajakava

- Kirjanduse läbitöötamine (20.12.2021)
- Lähteandmete ja skeemide kogumine (20.01.2022)
- Teoreetilise osa kirjutamine (20.02.2022)
- Simulatsiooni ja arvutuste teostamine (15.03.2022)
- Uuringu tulemuste ja järelduste kirjutamine (05.04.2022)
- Esimene versioon valmis (01.05.2022)
- Paranduste sisseviimine ja teine versioon valmis (17.05.2022)

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	6
EESSÕNA	13
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	14
1. SISSEJUHATUS.....	16
2. ENERGIAPAINDLIKKUS JA PAINDLIKUD SEADMED BÜROOHOONES.....	18
2.1 Ülevaade energiapaindlikkusest	18
2.1.1 Energiapaindlikkus	18
2.1.2 Energiapaindlikud elektriseadmed	20
2.1.3 Energiapaindlike elektripaigaldiste juhtimine ja mudelid	21
2.2 Ülevaade energiapaindlikkusteenusest.....	23
2.2.1 Energiapaindlikkusteenus	23
2.2.2 Energiapaindlikkusteenuse vajadus.....	26
2.2.3 Paindlikkusteenuse strateegiad	27
2.2.4 Energiapaindlikkusturg	30
2.3 Ülevaade näidishoonest ja selle elektriseadmetest	31
2.4 Näidishoone elektritarvitid ning energiapaindlikud seadmed	36
2.4.1 Valgustuse elektrienergia tarbimine ja seadmed	36
2.4.2 Ventilatsiooni elektrienergia tarbimine ja seadmed	37
3. PAINDLIKKUSTEENUSE RAKENDAMINE.....	40
3.1 Ülevaade energiapaindlike seadmete juhtimisest näidishoones	40
3.1.1 Valgustuse juhtimine	40
3.1.2 Ventilatsiooni juhtimine.....	41
3.2 Energiapaindlikkusteenuse ülesehitus	43
3.3 Energiapaindlike seadmete juhtimispõhimõtted energiapaindlikkusteenuse pakkumise otstarbel	44
3.4 Energiapaindlikkusteenuse rakendamiseks vajalikud muudatused paindlikes seadmetes ning nende juhtsüsteemides	45
4. ARVUTUSMUDELI KOOSTAMINE.....	47
4.1 Hoone tehnosüsteemide energiapaindlikkuse arvutus	47
4.1.1 Valgustuse elektrienergia paindlikkuse arvutus	47
4.1.2 Ventilatsiooni elektrienergia paindlikkuse arvutus.....	48
4.2 Tasuvusanalüüs	49

4.3 Kokkuvõte arvutusmudelist	50
5. PAINDLIKKUSTEENUSE RAKENDATAVUSE ANALÜÜS	53
5.1 Mudeli tulemused näidishoone kohta	53
5.2 Mudeli tulemuste analüüs ja järeldused	55
KOKKUVÕTE	57
SUMMARY	59
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	61
Lisa 1. Näidishoone struktuurskeem	65

EESSÕNA

Käesoleva lõputöö teema pakkus välja minu juhendaja Vahur Maask. Teema valiku põhjuseks oli minu isiklik huvi hooneautomaatika ning energiatarbimise kohta, mis on suuresti seotud energiapaindlikkusega ning paindlikkusteenusega. Lõputöö koostamisel oli suureks abiks juhendaja Vahur Maask ning kaasjuhendaja Tarmo Korõtko. Samuti soovin tänada lõputöö jaoks vajalike andmete eest DeltaE Inseneribüroost Marti Arakut ning Karl Kürsat.

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

aFRR	Automaatse aktiveerimisega sageduse taastamise reserv
A_r	Hoone suletud netopind
BAS	Building Automation System
BEMS	Building Energy Management System
CEN	Mandri-Euroopa elektrivõrk
$i_{\%}$	Aastane laenuintress
IPS/UPS	Venemaa elektrivõrk
mFRR	Käsitsi aktiveerimisega sageduse taastamise reserv
MPC	Model Predictive Control
n_{hetk}	Hetkel hoones viibivate inimeste arv
n_{mFRR}	Aktiveerimiste arv aastas
n_{opt}	Optimaalne inimeste arv hoones
n_{sta}	Standardist tulenev optimaalne arv ruutmeetreid ühe inimese kohta
$n_{töö}$	Töötundide arv aastas
P_{in}	Elektrienergia tarbimine inimese kohta
$P_{sääst}$	Aastas säästetud elektrienergia
P_{VAL0}	Valgustuse aastane elektrienergia tarbimine enne juhtimist
P_{VAL1}	Valgustuse aastane elektrienergia tarbimine peale juhtimist
$P_{VAL0tund}$	Valgustuse tunni maksimaalne võimalik tarbimine
$P_{VAL1tund}$	Valgustuse tunnitarbimine
$P_{VALPtund}$	Valgustuse tunni energiapaindlik võimsus
P_{VEN0}	Ventilatsiooni elektrienergia tunnitarbimine enne muutust

P_{VEN1}	Ventilatsiooni elektrienergia tarbimine peale muutust
q_0	Ventilatsiooni kogu õhuvoolu hulk enne muutust
q_1	Kogu õhuvoolu hulk peale juhtimise sisseviimist hoonesse
q_B	Õhuvoolu heitgaaside hoonest väljaviimise kiirus pindala kohta
q_p	Õhuvoolu kiirus ühe inimese kohta
RBC	Rule-Based Control
RL	Reinforcement Learning
R_n	Kumulatiivne aastane rahavoog
$R_{n\%}$	Kumulatiivne aastane rahavoog laenu puhul
$R_{n-1\%}$	Aegrea eelneva aasta aastane rahavoog laenu puhul
ROI	Return On Investment
$X_{elekter}$	Elektri hind
X_{hind}	Ühe aktiveerimise hind
$X_{i\%}$	Elektrienergia aastane hinnatõus
X_n	Aastas säästetud elektrienergia maksumus
X_{n-1}	Aegrea eelneva aasta aastane säästetud elektrienergia hind
$X_{paindlik}$	Energiapaindlikkusteenusest saadud aastane tulu

1. SISSEJUHATUS

Nõudlus uute tehnoloogiate ning tehnoloogiaseadmete vastu kasvab iga aastaga nii era- kui ka avalikus sektoris, kuna tehnoloogia areng on majandusliku arengu üks alustalasid. Nõudluse täitmiseks tõuseb pakkumise osakaal vastavalt nõudlusseadusele. Sellega koos kasvab aga ka elektrienergia tarbimine. Aastaks 2030 on Elering AS prognoosinud Eestis ligi 10 TWh suurust elektrienergia tarbimist, täna on Eesti elektrienergia tarbimine 8,44 TWh [1]. Üheks taoliseks tehnoloogiliseks uuenduseks, mis mõjutab suurel määral elektrienergia tarbimisgraafikut, on laialdane elektriautode kasutuselevõtt. Kuna elektrisüsteemis peab sageduse stabiilsena hoidmise jaoks olema elektrienergia tootmine balansis energia tarbimisega, tuleb vastavalt tarbimisele suurendada või vähendada ka elektrienergia tootmist. Elektrisüsteemi võimsusbilansi suurenedes on üha keerulisem hoida elektrisüsteemi sagedust stabiilsena.

Tulenevalt 2015. aastal sõlmitud ning ÜRO kliimakonverentsil 2021. aastal uuendatud Pariisi kokkulepest on Eesti kliimaeesmärgiks aastaks 2030 vähendada kasvuhoonegaaside heitkoguseid 40% võrra võrreldes 1990. aastaga ning aastaks 2050 saavutada kliimanetraalsus, et võidelda globaalse kliimasoojenemisega [2]. Üheks peamiseks meetmeks, mis antud eesmärgi saavutamiseks aitaks saavutada, on taastuvenergia kasutusele võtmine. Eesti riikliku energia- ja kliimakava kohaselt peaks ületama taastuvenergia osakaal aastaks 2030 elektrienergia lõpptarbimisest vähemalt 40% [3]. Suurimaks negatiivseks küljeks tuule- ning päikeseenergia puhul on energia tootlikkuse volatiilsus ning raskesti prognoositav tootlikkus. Taastuvenergia osakaalu suurenedes suureneb aga ka elektrisüsteemi stabiilsena hoidmise probleem. Kuna hetkel ei ole leiutatud piisavalt efektiivset energiasalvestustehnoloogiat, peab ebastabiilsuse probleemi lahendama kuidagi teistmoodi [4].

Lisaks eelnevatele välja toodud suurtele muudatustele, mis põhjustavad elektrisüsteemides ebastabiilsust, desünkroniseerivad Balti riigid 2026. aasta jaanuaris geopoliitiliste riskide maandamiseks Venemaa elektrisüsteemist (IPS/UPS) ning sünkroniseerivad Mandri-Euroopa elektrisüsteemiga (CEN) [5]. Liitudes Mandri-Euroopa sagedusalaga, jääb Eesti elektriliini lõppu ning sageduse stabiilsus ja inerts tagamise võimekus võivad saada suuremaks probleemiks, kui see on praegu IPS/UPS süsteemis [6].

Eelmainitud probleemid loovad väljakutseid elektrisüsteemi operaatoritele. Võrgusageduse stabiilsuse hoidmise osas võib üheks võimalikuks lahenduseks olla energiapaindlikkuse teenus. Eestis tarbivad hooned ligi 45% Eestis kasutatavast energiast [7]. Kuna hoonete elektrienergia tarbimise maht on väga suur, oleks mõistlik

võrguoperaatoritel kasutada elektrisüsteemi kompenseerimismehhanismina hoonetes paiknevaid juhitavaid elektriseadmeid. Antud lõputöös käsitletaksegi sellist lähenemist energiapaindlikkuse teenusena, kus võrguoperaator kasutab hoonetes paiknevaid elektriseadmeid võrguparameetrite, nagu näiteks sagedus, stabiilsena hoidmiseks.

Hoone rakendamisel energiapaindlikkuse teenuse otstarbel on tähtsaks elemendiks süsteemioperaatorilt signaali vastuvõtmine ning sellele reageerimine läbi elektrienergia tarbimise muutmise. Selleks on hoones tarvis aga piisavalt võimekat juhtsüsteemi, mis võimaldaks vastavalt signaalidele juhtida tehnosüsteemide elektrienergia tarbimist. Kui hoone seda ei võimalda, tuleb teha hoone tehnosüsteemides ning juhtsüsteemis muudatusi.

Käesoleva töö eesmärk on välja töötada arvutusmudel, millega oleks võimalik kaudselt hinnata energiapaindlikkusteenuse pakkumise majanduslikku otstarbekust näidishoones. Selleks analüüsis autor näidishoones olevate elektriseadmete tarbimisi ja potentsiaalset paindlikkust, et tuvastada seadmed mida oleks võimalik energiapaindlikkusteenuse eesmärgil kasutada ning tõi välja omapoolsed ettepanekud muudatusteks, et oleks võimalik osaleda energiapaindlikkuse turul. Seejärel koostas autor arvutusmudeli, millega oleks võimalik kaudselt hinnata majanduslikku otstarbekust muudatuste siseseviimiseks hoonesse. Antud töö tulemusena kontrollitakse järgmist hüpoteesi: energiapaindlikkuse rakendamiseks vajalike muudatuste tasuvusaeg näidishoones on vähem kui 5 aastat.

Töö teises ja kolmandas peatükis antakse ülevaade energiapaindlikkusest ja energiapaindlikkusteenusest. Samuti kirjeldatakse näidishoonet ja antakse ülevaade paindlikest seadmetest näidishoones ning uuritakse paindlike seadmete juhtimist ja analüüsitakse paindlikkusteenuse rakendamiseks vajalike muudatusi tehnosüsteemides ning juhtsüsteemides. Neljandas peatükis koostab autor järk-järgult arvutusmudeli hoonesse energiapaindlikkusteenuse rakendamisest tekkivate kulude tasuvusaja ning majandusliku mõtteksude hindamiseks. Viiendas peatükis hindab autor, kasutades koostatud mudelit, näidishoones vajalike muudatuste tasuvusaega ning paindlikkusteenuse rakendatavuse majanduslikku mõttekust.

Antud näidishoone tehnilised andmed ning andmed tehnosüsteemide ja nende elektrienergia tarbimiste kohta on saadud DeltaE Inseneribüroo koostatud elektrienergia tarbimise auditist, mis on koostatud M. Araku ning K. Kürsa poolt. Antud audit on seotud konfidentsiaalsuslepinguga ning ei kuulu avaldamisele, mistõttu nimetatakse käsitletavat hoonet edaspidi näidishooneks.

2. ENERGIAPAINDLIKKUS JA PAINDLIKUD SEADMED BÜROOHOONES

Käesolevas peatükis antakse ülevaade energiapaindlikkusest, energiapaindlikest elektriseadmetest ning selgitatakse energiapaindlike elektriseadmete juhtimismeetodeid ning selleks kasutatavaid mudeleid. Samuti selgitatakse energiapaindlikkusteenuse olemust ning selle vajadust. Peatüki viimases osas tehakse ülevaade näidishoone elektriseadmetest ning tuuakse välja energiapaindlikud seadmed, mida oleks võimalik rakendada paindlikkusteenuse eesmärgil.

2.1 Ülevaade energiapaindlikkusest

2.1.1 Energiapaindlikkus

Energiapaindlikkuse mõiste elektrisüsteemis tähendab laias mõistes elektrivõrgu kontekstis elektrisüsteemi võimet tulla toime muutustega tarbimises ja tootmises. Selle mõiste tähendust saab skaleerida ka madalamale tasandile nagu näiteks hooned. Järgnevalt toob autor välja mõningad definitsioonid.

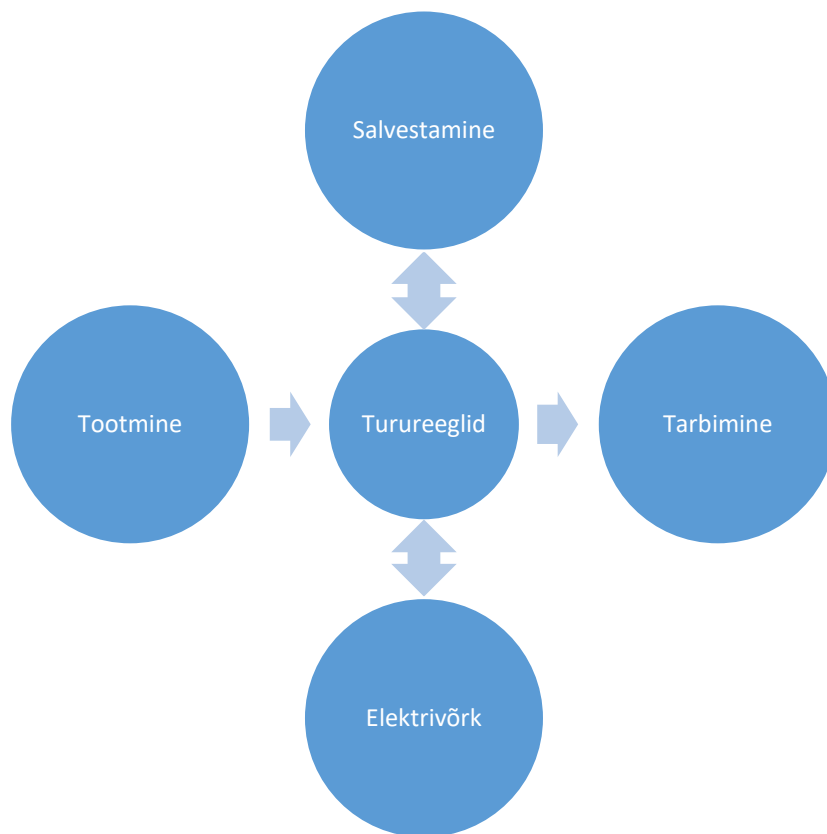
"Energiapaindlikkus on hoone võime kohaldada enda energia nõudlust ning tootlust vastavalt kliimale, kasutaja vajadustele ning võrgu vajadustele". [8]

"Energiasüsteemi paindlikkus on võime adapteeruda dünaamilistele ja muutuvatele seisunditele, nagu näiteks, et tasakaalustada nõudlust ja pakkumist minutiks või tunniks ajaks, genereerides ja kandes üle elektrienergia ressursi" [9]

"Nõudlusepoolset energiapaindlikkust saab defineerida mingi elektrienergia osana, mida on võimalik vähendada, suurendada või muuta mingi kindla ajaperioodi jooksul" [10]

Kui tarbimise poole peal tekib äkiliselt suur nõudlus võimsuse vastu, peab elektrisüsteemi stabiilsena hoidmise nimel vastama tootmise pool samaväärse tootmisvõimsuse muutusega. Sama kehtib ka vastupidi – kui tootmise poole peal tekivad muudatused, näiteks mõni elektrijaam lakkab töötamast, tuleb muudatusi teha tarbimise poolel. Elektrisüsteemis on alati mingi teatud hulk paindlikkust, mida saab kasutada.

Paindlikkust võivad pakkuda viis peamist elektrisüsteemi elementi: turureeglid, tootmine, tarbimine, salvestamine ja elektrivõrk [11]. Joonisel 2.1 on välja toodud elementide omavahelised seosed paindlikkuse pakkumisel.



Joonis 2.1 Elektrivõrgu elementide seosed teineteisega paindlikkuse mõistes [11]

Tootmise poolel on erinevat tüüpi elektrijaamad paindlikkuse pakkujateks. Nendeks elektrijaamadeks on peamiselt konventsionaalsetel kütustel põhinevad jaamad. Aeglase käivitumise tõttu ei suuda need jaamad pakkuda suurel määral paindlikkust. Langetades aga elektrijaama töökoormust, väheneb ka selle kasutegur. Viimastel aastakümnetel on tootmise poolel suurenenud taastuenergia põhinevate elektrijaamade osakaal. Tarbimise poolel on võimelised pakkuma paindlikkust tööstused, büroohooned või büroohoonete klastrid ning ka majapidamiste klastrid. Salvestamist võib vaadelda elektrisüsteemis ning tootmise kui tarbimisenä, kuna tarbijana salvesti salvestab elektrienergia ning tootes vabastab salvestatud elektrienergia. Peamiselt kasutatakse salvestina pumphüdroelektrijaamasid, kus näiteks odavama elektrihinna korral pumbatakse vesi maapinnast kõrgemal asuvasse salvestisse ning kallima hinna korral käivitatakse langeva veega turbiin ning müüakse saadav elektrienergia võrku. Elektrivõrk (ülekandevõrk ning jaotusvõrk) on üks peamise tähtsusega element elektrienergia paindlikkuse võimaldamisel. Sealjuures peab süsteem olema tugev ning

madalate võrgupiirangutega. Kõik eelmainitud elemendid on omavahel seotud turureeglite keskkonnas [11]. Antud töös käsitletakse energiapaindlikkust tarbimise poole pealt vaadatuna. Hoone võimekus pakkuda energiapaindlikkust sõltub peamiselt neljast suuremast faktorite grupist [12].

Füüsilistest omadustest:

- Termiline mass
- Soojustus
- Arhitektuuriline ehitus ja hoonetüüp

Kasutatavatest elektriseadmetest:

- Valgustus
- Ventilatsioon
- Kütteseadmed
- Jahutus
- Elektrienergia salvestamiseks mõeldud tehnoloogiad

Juhtimissüsteemist:

- Kas juhtimine lubab kasutajapoolset muutmist
- Võimalus vastata ja reageerida välistele signaalidele nagu elektri hind või CO_2 emissiooni näitajatele

Hoones viibivatest inimestest:

- Inimeste käitumis- ning töömustritest
- Mugavusnõuetest

Hoone potentsiaali energiapaindlikkuseks võib leida kasutades simulatsiooniprogramme, statistilise aegridade analüüsi teel või deduktiivsel viisil. Peamiselt on tarbimisvõimsuse vähendamine ning suurendamine hoonetes piiritletud paindlike seadmete olemasoluga, nende juhtimise võimalustega, lubatud võimsuse vähendamise või suurendamise kõrvalekaldumise kestvusega normist ning hoone mugavuste säilitamise piiriga [12].

2.1.2 Energiapaindlikud elektriseadmed

Eestis tarbivad hooned ligikaudu 45% kogu elektrienergiast ning globaalsel tasandil tarbivad hooned ligi 40%. Suur osakaal elektrienergia tarbimises viitab sellele, et hoonetes on palju seadmeid, mis tarbivad palju elektrienergiat. Mingi osa sellest tarbitavast elektrienergiast hoones võib olla paindlik [12].

Energiapaindlikud seadmed, vastavalt energiapaindlikkuse definitsioonile, on seadmed, mis võimaldavad koormuse suurendamist või vähendamist vastavalt vajadusele mingi

teatud aja jooksul. Mida suurem on seadme võimaliku koormuse muutuse amplituud, seda suuremat energiapaindlikkuse potentsiaali antud seade omab. Paindlikud elektriseadmed on hoone energiapaindlikkuse üheks alustalaks. Ilma paindlike seadmeteta ei oleks ka paindlikku võimsust, mida oleks võimalik juhtida. Paindlike seadmete üheks eelduseks on see, et nad on juhitavad. Nendeks seadmeteks on jahedamates kliimavöötmetes peamiselt mitmete uuringute kohaselt soojendus- ja jahutusseadmed, ventilatsiooniseadmed (HVAC) ja valgustusega seonduvad seadmed. Paindlikkust võivad pakkuda aga ka näiteks elektriautode laadimispunktid, salvestades või suunates juba salvestatud elektrienergia vastavalt vajadusele elektrisüsteemi tagasi [13].

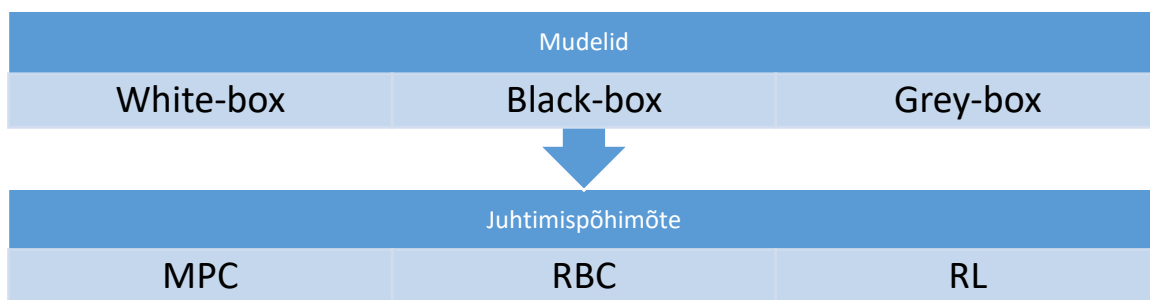
Kuna termomassi oma salvestava iseloomu tõttu on võimalik hoonete puhul kasutada ka piltlikult öeldes elektrienergia salvestina, peetakse üheks suuremaks paindlikkusreserviga juhitavaks elementideks hoone energiatarbijate puhul just HVAC süsteemi. HVAC süsteem on selline elektriline koormus, läbi mille juhtimise on võimalik muuta ka hoone termilisi koormusi, tõstes ja langetades kütte- ja jahutusvõimsust. HVAC seadmete paindlikkusvõimekus on suurem hoonetes, millel on kõrge termoinerts. Hästi isoleeritud hoonete puhul säilitab hoone kauemaks ajaks sisetemperatuuri ning temperatuuri reguleerivate seadmete töö on seetõttu paindlikum [13]. HVAC seadmete roll büroohoonete energiatarbimisest, Eestiga sarnases kliimavöötmes Poolas, on ligikaudu 50%. HVAC seadmete hulgast tarbivad kõige rohkem soojendusega seotud seadmed, lausa 45%. Valgustus büroohoonetes tarbib aga ligi 15% kogu tarbitavast elektrivõimsusest [14].

2.1.3 Energiapaindlike elektripaigaldiste juhtimine ja mudelid

Kuna paindlikuks muudab elektriseadmed nende juhitavus, on oluline aspekt hoone juures BAS (*Building Automation System*) ning (BEMS) (*Building Energy Management System*). Kui seadmed on liidestatud hooneautomaatika juhtimise algoritmiga, võivad need olla võimelised reageerima elektrivõrgu signaalidele. Üheks peamiseks kitsenduseks juhtimise juures on inimeste kohalolu hoones. See on oluline seetõttu, kuna HVAC seadmed on inimeste kesksed seadmed. Lisaks kitsenduste arvestamisele on juhtimiseks tarvilikud ka andmed, mille alusel juhtida. Peab olema kindel raamistik, mis määrab ära piirid paindlikkuse kasutamise ning inimeste mugavuse vahel. Üheks selliseks raamistikuks on erinevad mudelid. Mudelite eesmärgiks on ennustada hoone energiatarbimist ning selle sisetemperatuuri, niiskuse ja õhukvaliteedi muutusi hoone komponentide, süsteemide ja alam-süsteemide alusel [15].

Mudelid jagunevad suures pildis kolme rühma. *White-box* mudelid keskenduvad peamiselt füüsiliste andmete alusel modelleerimisele, simuleerides hoone

energiatarbimist programmidega nagu EnergyPlus, IESVE ning TRYNSYS. Mudelid võivad baseeruda staatilistel kui ka dünaamilistel võrranditel, mis kirjeldavad hoone sisekliima muutusi ajas. Mudel on küllaltki täpne, kuid nõuab väga täpseid andmeid hoone geomeetria, materjalide, ehituse jms kohta. Kuna mudeli sisendiks on väga suur andmemahut, siis selle jaoks kuluva arvutusvõimsuse tõttu ei sobi see mudel väga hästi võrgu teel juhitavaks. *Black-box* mudelid on täielikult empiirilised mudelid. Nende mudelite peamiseks sisenditeks on andmed HVAC süsteemide energia tarbimisest, sise- ja välistemperatuuride andmed ning seadeväärtused. Andmed peavad olema mahukad ning katma kõik aastaajad. Kasutada saaks ka väga täpseid simulatsioonidest saadud andmeid, kui need on olemas. *Grey-box* mudelid on *white-box* ning *black-box* mudelite hübriidid ning sisaldavad elemente nii füüsikalistest kui ka empiirilistest mudelitest. Siin kasutatakse stohhastilisi diferentsiaalvõrrandeid kui ka süsteemituvastuse tehnikaid parameetrite prognoosimiseks. Antud mudelid on sobilikud hoonetele, mis ei ole üleliia keerulised [15]. Järgneval joonisel 2.2 on välja toodud skeem illustreerimaks mudelite ning juhtimisühimõtete omavahelist suhet.



Joonis 2.2 Energiapaindlike seadmete mudelid ja juhtimisühimõtted [15]

Mudeli prognoosi alusel on võimalik rakendada juhtimisühimõtet hoone elektriseadmete juhtimiseks. Juhtimisühimõtete kolm laiemat rühma on järgmised:

- *Model Predictive Control* (MPC)
- *Rule-Based Control* (RBC)
- *Reinforcement Learning* (RL).

RBC tänu oma lihtsusele on laialt levinud juhtimisühimõtte hooneautomaatikas. Antud juhtimises kasutatakse palju *ladder logic* programmeerimiskeelel põhinevaid juhtimisalgoritme, et määrata ära parimad viisid talitlemiseks. Automaatika täiturite tasandil kasutatakse *on/off* kontrollereid ning PID kontrollereid. Sellel juhtimisühimõttel on oluline roll hoone halduri oskustel ja teadmistel. Mida keerulisemate süsteemidega on hoone, seda rohkem vajab RBC juhtimisühimõtte

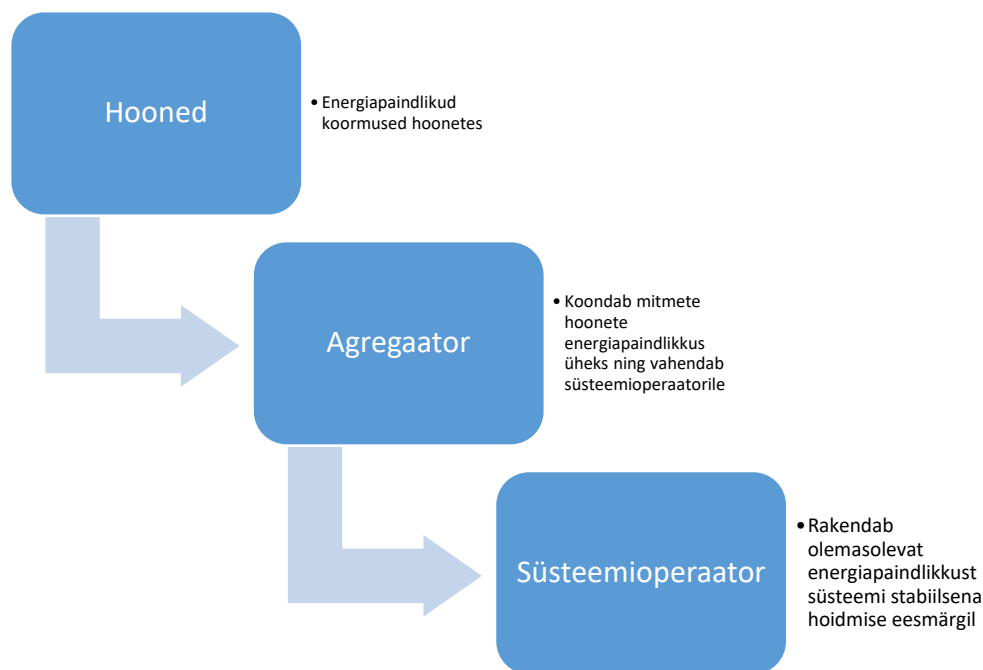
inimese sekkumist ning seadistamist. MPC põhimõte on leida igal ajasammul optimaalne lahenduste jada juhtimise osas, arvestades antud ajahetkel olevaid kitsendusi. Kuna rakendatakse lahenduste jada esimest sammu ning selle sammu rakendumisel kalkuleeritakse uus lahenduste jada ehk horisont, siis see juhtimispõhimõte on robustne ning mudeli vead ja välised tegurid ei mõjuta selle talitlust väga palju. MPC sobib hästi hoone optimaalse talitluse juhtimiseks, optimeerides näiteks kulusid või energia tarbimist. Samuti sobib MPC hästi utiliseerima talletatud passiivset või aktiivset soojus- või elektrienergiat, et liigutada energiatarbimist ühest sektorist teise. Mudel, mille alusel antud juhtimispõhimõte peaks toimima, peab olema juhtimisele suunitletud mudel süsteemist, mis arvestab hoone dünaamilisi protsesse. Seda on vaja juhitavate ning juhitamatute seadmete käitumise ennustamiseks. Mudel võib olla nii füüsikal põhinev kui ka empiiriline. Peamine probleem MPC-le sobiva mudeli leidmisel on leida mudel, mis suudaks kirjeldada hoone termodünaamikat lähtuvalt optimaalse lahendi leidmiseseisukohalt, kuid suudaks kirjeldada ka hoone termiliste protsesside käitumist. Antud juhtimispõhimõtte nõrkadeks külgedeks on see, et MPC ei pruugi hästi toime tulla ootamatute häiringutega, millega mudel ei ole osanud arvestada. MPC juhtimispõhimõte sobib keerulisemate hoonete korral. RL juhtimispõhimõte toimib masinõppimise põhjal, kus operaatorprogramm õpib optimaalsed lahenduskäigud interaktiivsel viisil dünaamilises keskkonnas, näiteks reageerima erinevatele ilmastikuoludele, redigeerima seadmeid vastavalt kohal viibivate inimeste arvule jne. Suurim eelis antud juhtimispõhimõtte juures on see, et RL-i korral ei ole tarvis mudelit hoone kohta. See muudab antud juhtimispõhimõtte laialdasemalt kasutatavaks, kuna iga hoone kohta ei ole tarvis koostada mudelit ning seda saab rakendada laialdasemalt ja lihtsamini [15].

2.2 Ülevaade energiapaindlikkusteenusest

2.2.1 Energiapaindlikkusteenus

Hoonetes peituvat energiapaindlikkuse potentsiaali on võimalik rakendada, et pakkuda energiapaindlikkusteenust ning seeläbi teenida lisatulu. Energiapaindlikkusteenus tähendab tarbimise juhtimise teenust. See tähendab teenuse pakkuja ning teenuse ostja omavahelist ning vahetut koostööd. Teenuse pakkujaks võivad olla hoonete haldurid nii kodu-, teenindus-, tööstus- kui ka avaliku sektori tarbijad. Teenuse ostjaks aga elektrisüsteemi haldav ettevõtte, näiteks Elering. Kuna süsteemioperaatoril ei ole mõttekas hallata ning hoomata üksikuid hooneid, kasutab süsteemioperaator agregatori teenust. Agregator koondab hooned ja nende energiapaindlikkuse üheks ning vahendab mitmete hoonete energiapaindlikkust süsteemioperaatorile korruga. Eestis pakub sellist teenust näiteks Fusebox OÜ. Paindlikkusteenus hõlmab laiemas

vaates põhivõrgu operaatorid, energia tarnijad, bilansihaldurid, agregatorid ning tarbijad. Tarbimise juhtimine paindlikkusteenusena pakub mitmeid erinevaid võimalusi nii teenuse pakkujale kui ka tarbijale. Järgneval joonisel 2.3 on välja toodud energiapaindlikkusteenuse ülesehitus lihtsustatud kujul [16].



Joonis 2.3 Lihtsustatud energiapaindlikkusteenuse ülesehitus

Paindlikkusteenuse puhul võib rääkida kahest suuremast rühmast, staatilistest ning dünaamilistest tarbimise juhtimise meetmetest. Staatilised tarbimise juhtimise meetmed avaldavad enda mõju peamiselt pikema aja vältel ning on seotud energia efektiivsusega. Selliseid teenuseid kasutatakse peamiselt nendes sektorites või nende hoonete puhul, kus efektiivsus võib tuua kaasa märkimisväärsed säästud tegevuskuludes, nagu näiteks avalikus sektoris, äripindades või majapidamistes. Dünaamiliste meetmete korral aga on fookuses lühiajalised tegevused, mis on suunitletud elektrisüsteemi ning elektrituru toetamiseks. Nendest meetmetest tulenevad tegevused on lühiajalise mõjuga ning tarbimise energiaefektiivsusele ei avalda need väga suurt mõju. Nende meetmete peamine eesmärk on toetada elektrisüsteemi ning turu efektiivsust. Selliseid meetmeid rakendavad näiteks kas suure tarbimisvõimsusega tööstused või klastrisse kogunenud tarbijagrupid, mis kokku omavad elektrisüsteemile piisavat mõju avaldavat paindlikkusressurssi ning mida on võimalik ühtselt juhtida vastavalt elektrivõrgu vajadusele. Dünaamiliste meetmete alla kuuluvad näiteks hinnapõhine võimsuse juhtimine või süsteemioperaatorile abistamine.

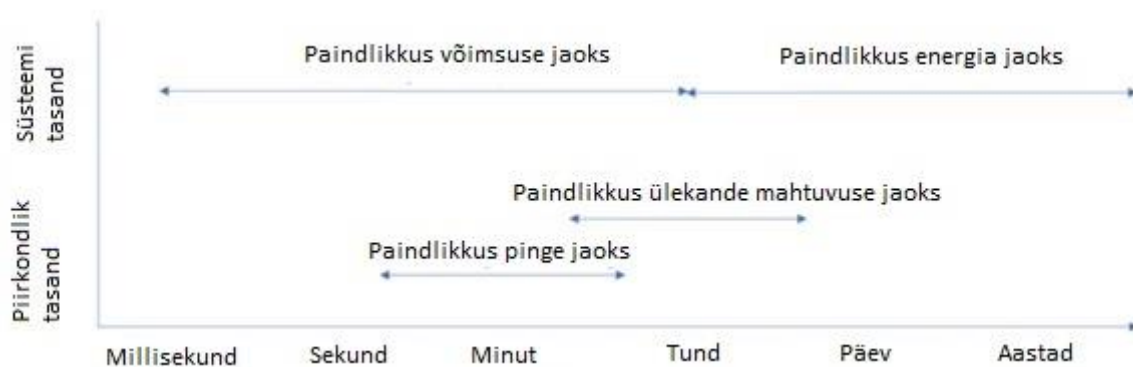
Nii staatiliste kui ka dünaamiliste meetmete puhul võib eristada kahte peamist suunda – aktiivne või passiivne tarbija sekkumine protsessi. Aktiivse sekkumise korral valib tarbija ise, kas soovib osaleda antud teenusega antud ajahetkel (hinnapõhine tarbimise juhtimine), passiivse korral tuleb initsiatiiv elektrisüsteemi poolt, kus elektrisüsteem dikteerib läbi automaatika, millal, kuidas ja millisel määral tarbijate võimsust juhtida ning paindlikkuse ressursi rakendada [16]. Järgnevas tabelis 2.1 on välja toodud nõudluse poole juhtimise meetmed koos neid iseloomustavate selgitustega.

Tabel 2.1 Nõudlusepoolsed juhtimise meetmed, klassifitseerumine, kestvus ning näited [16]

	Tarbimise juhtimine			
Meede	Staatiline (pikaajaline mõju)		Dünaamiline (lühiajaline mõju)	
Mõju makro-tasandil	Energiaefektiivsuse täienemine ning energia sääst		Turu efektiivsuse täienemine ning süsteemi juhtimine. Vähene mõju energiaefektiivsusele ning säästule.	
Tarbija sekkumine protsessi	Passiivne (võrguregulaator või kolmas osapool)	Aktiivne (Tarbija valikul)	Passiivne (Automaatika või leping kohustab sekkuma)	Aktiivne (tarbija reageerib)
Tarbijapoolne tegevus ning terminoloogia	Energia efektiivsus (seadusandlus)	Energia efektiivsus (tarbija investeeringud)	Tarbijapoolne juhtimine (DSM)	Tarbijapoolne osalus (DSP)
	Energia sääst (seadusandlus)	Energia sääst (tarbija piirab energiakasutust)	Tarbija juhtimine (võrguoperaatori initsiatiiv)	Tarbija juhtimine (hinnasignaali alusel)
	Integreeritud ressursi-planeerimine		Nõudlusepoolne juhtimine	Reaalajatariif
	Lepinguline alltöövõtt (Energy Performance Contracting - EPC)			Elektritariif
			Tiputariif	
Näide	Energia efektiivsuse standardid seadmetes	Hoone soojustamine	Koormuspaindlikkuse kasutamine reservina	Koormuse nihutamine vastavalt hinnasignaaledele
Tarbija osalusvajaduse nivoo	Madal/Keskmine	Keskmine	Keskmine/Kõrge	Kõrge
	Üleüldine tarbija nõudlus on juhitud läbi kolma osapoolte regulatsioonide	Tarbija teeb aegajalt mõne otsuse lähtudes pikaajalisest energiaefektiivsusest	Tarbija nõudlus on juhitud läbi kolmandate osapoolte, teenus võib aegajalt	Tarbija juhib enda energiatarbimist ise vastavalt hinna- ja süsteemisignaale

2.2.2 Energiapaindlikkusteenuse vajadus

Energiapaindlikkusteenuse vajadus elektrisüsteemi seisukohast seisneb mitmes aspektis. Elektrisüsteemi on tarvis hoida stabiilsena. Tarbimine ja tootmine peavad olema igal ajahetkel võrdsed. Läbi paindlikkusteenuse on võimalik hoida koormust reguleerides vastavalt vajadusele ning seeläbi hoida sagedust süsteemis vajalikes piirides. Modernsed elektripaigaldised ei talu väga suuri hälbeid elektrisüsteemi nimisagedusest. Võrgusageduse hoidmine stabiilsena on üks peamisi väljundeid paindlikkusteenuse juures. Selle otstarbeks on vajalik hoida energiapaindlikkuse ressursi reservis. Eesti elektrisüsteemi hoiab tänasel päeval Venemaa elektrisüsteem stabiilsena, kuid aastal 2026 on planeeritud Venemaa elektrisüsteemist desünkroniseerimine [16]. Lisaks sageduse hoidmisele on võimalik süsteemioperaatoril läbi paindlikkusteenuse kompenseerida ka muid parameetreid. Järgneval joonisel 2.4 on välja toodud paindlikkuse vajadus elektrisüsteemi ajalises vaates.



Joonis 2.4 Paindlikkuse vajadus elektrisüsteemi ajalises vaates [17]

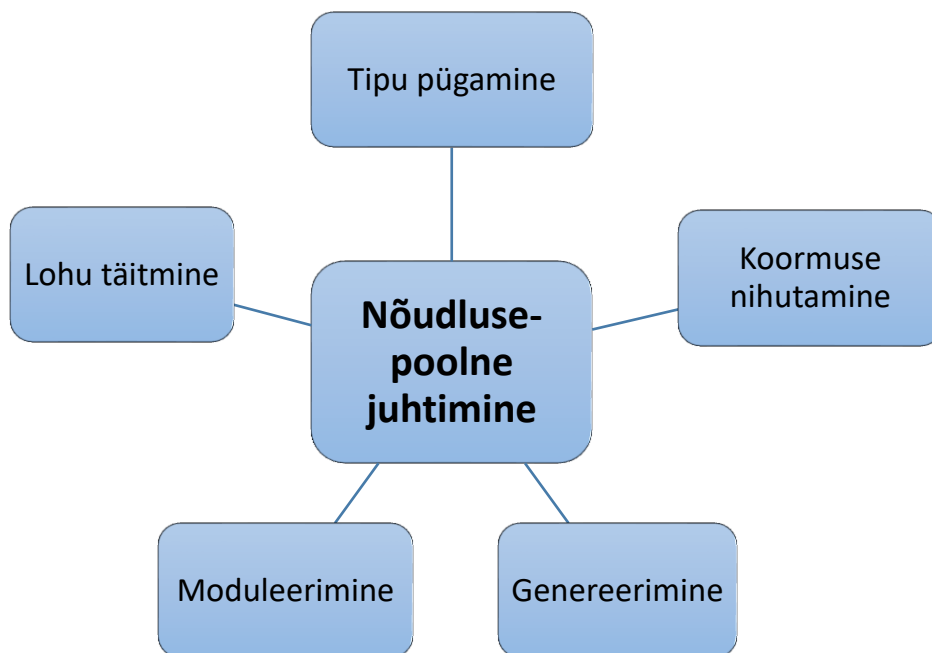
- Paindlikkuse vajadus võimsuse jaoks on lühiajalises vaates väga oluline, kuna läbi tarbimise ning tootmise võimsuse tasakaalu on võimalik hoida sagedust elektrisüsteemis stabiilsena. Peamine vajadus tekib roheenergia ebamääraselt ennustatava tootlikkuse tõttu. Paindlikkusreservi kasutuselevõtu vajadus võib tekkida murdosajundi kuni tunni aja jooksul.
- Paindlikkuse vajadus energia tasakaalu hoidmiseks on keskmise kuni pikaajalise vajadusega. Peamine vajadus tekib fossiilkütusel baseeruva elektrienergia osakaalu vähenemisest. Paindlikkuse vajadus on tunni kuni mitme aasta vältel.
- Paindlikkuse vajadus ülekande mahu jaoks on lühikese kuni keskmise aja vajadusega. Vajadus tekib lokaalsel või regionaalsel tasandil elektrisüsteemist tekkinud ülekandevõimsuse piirangutega. Peamiselt seotud üha enam

suurenevate tipukoormustega ning tiputarbimise ajal vähese elektrienergia tootlikkusega. Paindlikkuse vajadus on minuti kuni mõne tunni vältel.

- Paindlikkuse vajadus pinge hoidmiseks on samuti ülimalt vajalik. Pinge peab elektrivõrgu sõlmedes olema nimipinge lähedal. Põhjuseks peamiselt aina enam jaotunud elektrienergia tootmine ning sellest tulenevad kahe-suunalised voolud. Paindlikkuse vajaduse ajaline vaade on mõnest sekundist kuni paarikümne minutini [17].

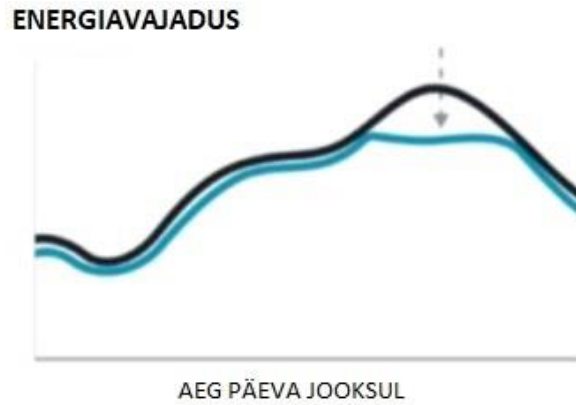
2.2.3 Paindlikkusteenuse strateegiad

Juhtides tarbimist ning kasutades erinevaid juhtimise strateegiaid, on võimalik elektrienergia tarbimiskõverat vastavalt elektrisüsteemi vajadustele mitut moodi muuta, kasutades ära olemasolevat energiapaindlikkuse ressursi. Järgneval joonisel 2.5 on välja toodud peamised paindlikkuse rakendamise strateegiad.



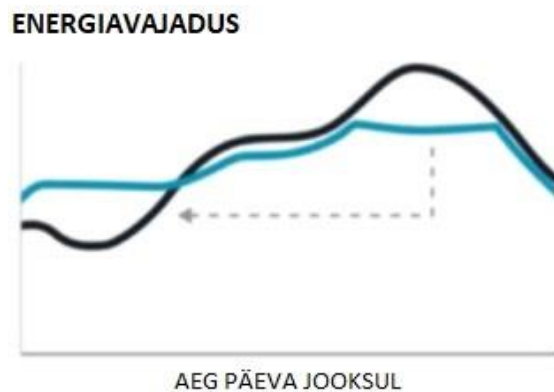
Joonis 2.5 Paindlikkuse strateegiad [18]

Tipu pügamine (*Peak shaving*) on strateegia, kus koormusgraafiku tipukoormust vähendatakse läbi paindlike elektripaigaldiste väljalülitamisega või töövõimsuse vähendamise, näiteks HVAC süsteemi puhul ventilatsiooni sissepuhke ning väljatõmbe ventilaatorite kiiruse vähendamise või kütte või jahutusvõimsuse vähendamise. Hoone peaks olema võimeline vähendama tarbimisvõimsust minutiga ning säilitama madalat tarbimist vähemalt tund aega. Järgneval joonisel 2.6 on kujutatud tipu pügamise strateegia koormusgraafikul.



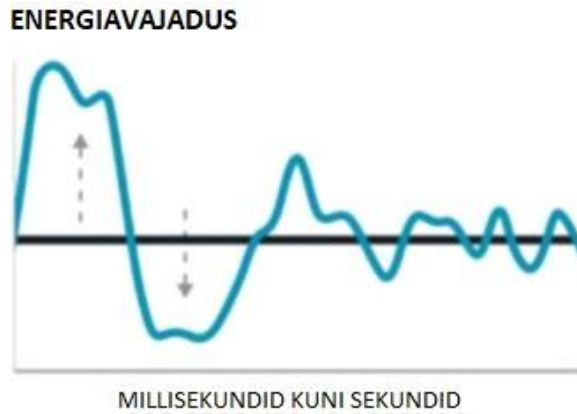
Joonis 2.6 Tipu pügamise strateegia

Koormuse nihutamine (*Load shifting*) on strateegia, kus hoone ajastab tarbimiskoormuse nendele aegadele, mil koormusgraafik on madalamal tasemel. Kõrge tarbimisega tundidel tarbib hoone vähem energiat, kasutab salvestatud energiat või kasutab päikesepaneelidest genereeritavat elektrienergiat. Hoone peaks selle strateegia puhul reageerima minutite jooksul ning tavaliselt kestab 2-4 tundi. Joonisel 2.7 on välja toodud koormuse nihutamise strateegia.



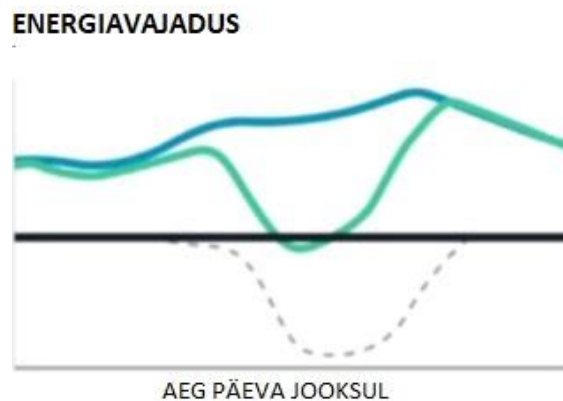
Joonis 2.7 Koormuse nihutamise strateegia

Moduleerimise (*Modulation*) strateegia puhul saab hoone signaali, ning olenemata ajast suudab kohaldada enda tarbimist. Antud signaalile peaks hoone reageerima sekunditega. Joonisel 2.8 on välja toodud moduleerimise strateegia.



Joonis 2.8 Moduleerimise strateegia

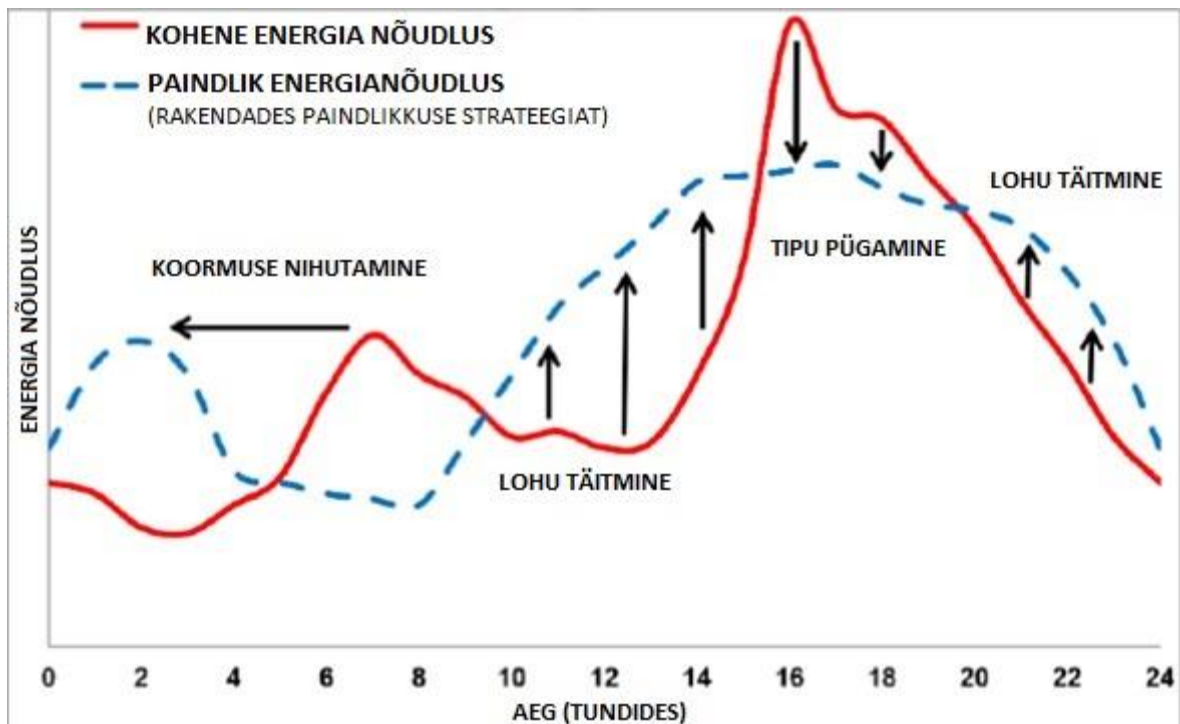
Genereerimise (*Generation*) strateegia puhul peaks hoone genereerima tiputarbimise ajal elektrienergiat, millega suudaks katta ära hoone enda tarbimise või vähemalt mingi osa sellest. Hoone peaks olema võimeline seda nõuet täitma paari minuti jooksul ning hoidma seda strateegiat kaks kuni neli tundi. Joonisel 2.9 on välja toodud genereerimise strateegia.



Joonis 2.9 Genereerimise strateegia

Lohu täitmine (*Valley filling*) on strateegia, kus peale signaali saamist suurendab hoone tarbimisvõimsust, tõstes elektripaigaldiste tarbimisvõimsust.

Eeltoodud strateegiatest on valdavalt kasutatavaks strateegiaks koormuse nihutamine, mida kasutatakse 60% seadmete puhul. Tipu pügamist 19%, genereerimist 16% ning moduleerimist 6% seadmete puhul [19]. Järgneval joonisel 2.10 on välja toodud näide, kuidas rakendatakse eelmainitud strateegiaid terve päeva vältel, kaasaarvatud lohu täitmise strateegia.



Joonis 2.10 Näide, kuidas rakendada erinevaid paindlikkuse strateegiaid koormusgraafiku muutmiseks terve päeva vältel [20]

Süsteemioperaator suunab tarbijaid muutma enda tarbimist läbi hinnasignaalide või aktiveerimiste. Vastavalt strateegiatele, silutakse tipukoormust, täidetakse koormusgraafiku lohku või hoopis nihutatakse koormust. Reageerides hinnasignaalidele või aktiveerimistele, on võimalik hoonehalduritel tekitada majanduslikku kasumlikkust. Tarbijal on võimalik juba ostetud energia elektrisüsteemi tagasi müüa ostuhinnast kõrgema hinnaga, optimeerides seeläbi kulusid elektrienergia tarbimisele.

2.2.4 Energiapaindlikkusturg

Turgu, kus üheks pooleks on tarbijad, kes muudavad vastavalt elektrisüsteemi vajadusele enda energiatarbimist, kasutades eelmainitud strateegiaid ehk pakuvad energiapaindlikkusteenust, ning kus teiseks pooleks on võrguhaldur, kes antud teenust ostab, nimetatakse paindlikkusturuks. Vahendaja tarbija ning süsteemihalduri vahel on agregaat. Agregaatore eesmärk on kokku koondada väiksemad tarbijad või tootjad üheks, et osaleda paindlikkusturul.

Antud kontseptsioon on Eesti mõistes küllaltki värske, kuid aina enam populaarsust koguv. Antud turg võib laieneda ka regioonipõhiseks, kus turul osalevad näiteks ka Läti ning Soome. Kaugemas perspektiivis peaks olema sellist turuplatvormi võimalik geograafiliselt laiendada, sest mida suurem on turg, seda rohkem on võimalusi rahuldada paindlikkuse vajadused hulgituru, päevasisese turu, reguleerimisturu ning

reservide turu lõikes. Paindlikkusteenuste ja seda toetava turuplatvormi väljaarendamise eesmärgil Eestis osaleb näiteks Elering AS Horizon2020 raames kolmes üle-euroopalises paindlikkuse projektis, EU-Sysflex, INTERFACE ning OneNet [21].

Baltikumis käivitus ühine paindlikkusturg 01.01.2018. Paralleelselt hakkasid Baltimaad süsteemi võimsusbilanssi koordineeritult juhtima, et suurendada elektrisüsteemi kuluefektiivsust juhtimise osas. Tasakaalustamine toimub nomineeritud süsteemihalduri juhtimisel ning roteerub Baltikumi süsteemihaldurite vahel kord kvartalis.

Baltikumi paindlikkusturul kasutatakse mitmeid reguleerimisreservide tooteid, käsitsi aktiveeritavat sageduse taastamise reservi mFRR ning avariireservi ER mFRR. Paindlikkusteenuse pakkujad kauplevad hetkel Eestis Baltikumi reguleerimisturul COBA platvormil mFRR-iga. Käesoleval aastal planeerib Eesti ühineda Euroopa paindlikkusturu platvormiga (MARI) ning 2024. aastal automaatse aktiveerimisega sageduse taastamise reservi (aFRR) platvormiga (PICASSO). See võiks anda paindlikkusturul kauplejatele praegusega võrreldes rohkem võimalusi turul osalemiseks. Aastal 2020 kirjutatud L. Hõraku magistritöös tehtud analüüsi tulemusel ei osale Eesti turuosalised aktiivselt veel paindlikkusturul. 2019. aastal oli Eestis keskmiseks tunnipõhiseks üles reguleerimise suuruseks 28MW ning alla 30MW. 17% (1486 tundi) tundidel olid üles reguleerimise pakkumised puuduvad ning alla 33,7% (3948 tundi) [22]. Järelduseks võib tuua selle, et paindlikkusteenuse pakkujaid ei ole turul piisavalt, et ära täita paindlikkuse vajadust.

2.3 Ülevaade näidishoonest ja selle elektriseadmetest

Antud töös käsitletakse ühte Eestis asuvat büroohoonet. Andmed antud hoone kohta on saadud DeltaE Inseneribüroost ning andmeid kasutatakse käesolevas töös sisendina. Autor on sõlminud DeltaE Inseneribürooga konfidentsiaalsuslepingu ning antud hoone ei kuulu avaldamisele.

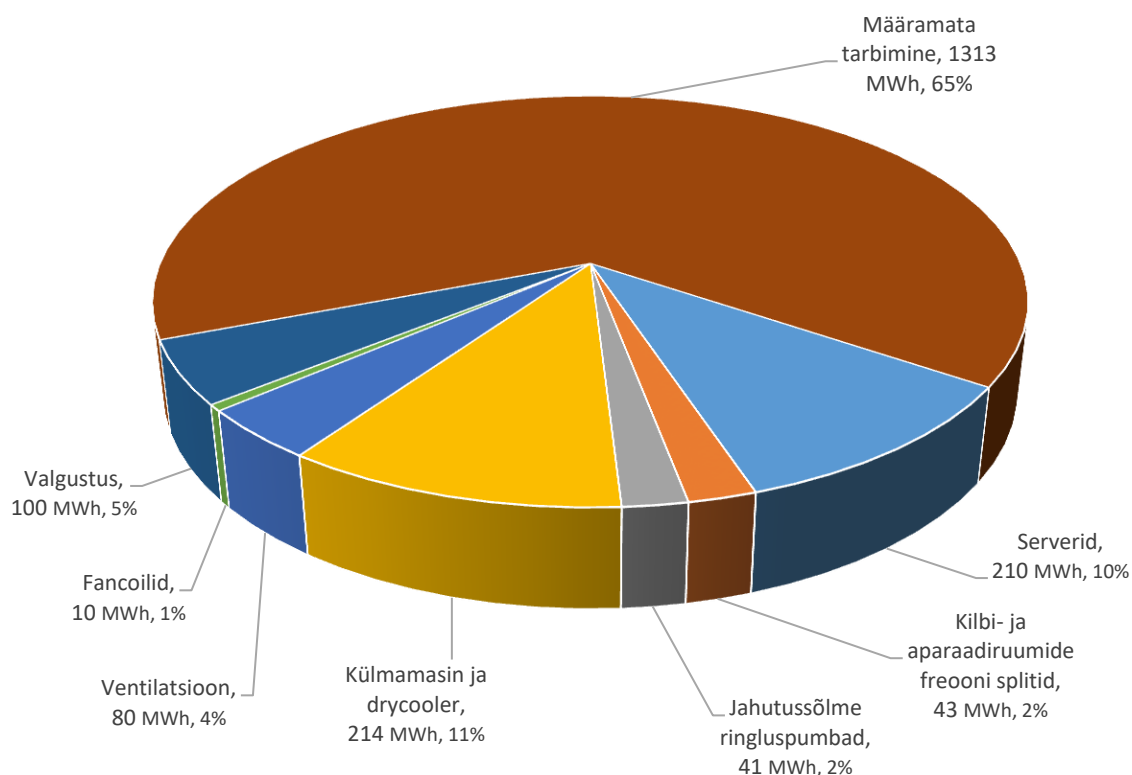
Näidishoone on ehitatud aastal 1972. Hoone ehitusalane pind on $750 m^2$ ning suletud netopind $4017 m^2$. Hoone tööaeg on peamiselt tööpäevadel 9.00-17.00. Töövälisel ajal kasutatakse hoonet mõningal määral eriotstarbeliselt. Hoone saab toite hoonele kuuluvast alajaamast. Elektrienergia tarbeks on kaks liitumist keskpinge poolel. Üks liitumine on pidevalt koormatud, teine on reservis. Alajaamas on kaks 630 kVA võimsusega jõutrafot. Hoone elektripaigaldiste struktuurne jagunemine on loogiline ning erinevad tehnosüsteemid ning elektritarbijad on liigitatud gruppidesse. Hoone struktuurskeemi on näha lisas 1 [23]. Järgnevas tabelis 2.2 on välja toodud kaitseautomaadid.

Tabel 2.2 Elektripaigaldiste jagunemine hoone peajaotlast/alajaamast [23]

Kaitseautomaat	Peamised tarvitid
315A	Külmamasin
100A	Küttesüsteemid, ventilatsioon ja liftid
100A	Korrusekilpide valgustus
250A	Korruste üldtarbijad
250A	Serveriruumide omatarve
100A	Jaotuskilpide UPS seksioonid
80A	Serverikilpide seksioonid
200A	Suitsuvent, sprinkler ja tuletõrjeevee pumbakeskus

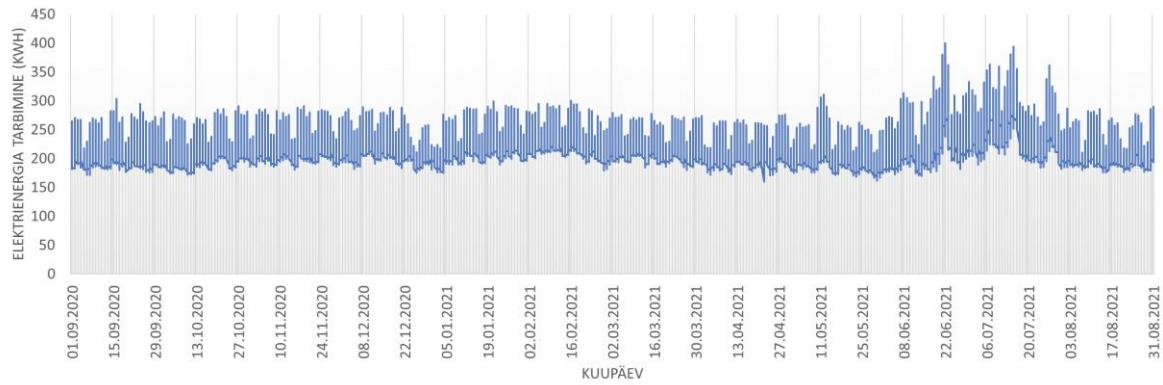
Hoone aastane elektritarbimine kokku oli 2020. aastal 2004 MWh. Peamisteks elektrienergia tarbijateks olid serverid 10% elektritarbimisest, külmamasin 11%, valgustus 5% ning ventilatsioon 4%. Määramata tarbimine moodustas ligi 65%, mille alla kuuluvad peamiselt pistikupesade tarbimised. Elektrienergia ostetakse börsihinnaga. Reaktiivenergia tarbimist kompenseeritakse lokaalselt kompenseerimisseadmete abil. Reaktiivenergia tarbimise eest igakuiselt tasu maksmata hoone ei pea [23].

Järgneval joonisel 2.12 on välja toodud elektriseadmete aastased tarbimised ja nende osakaal kogutarbimisest.



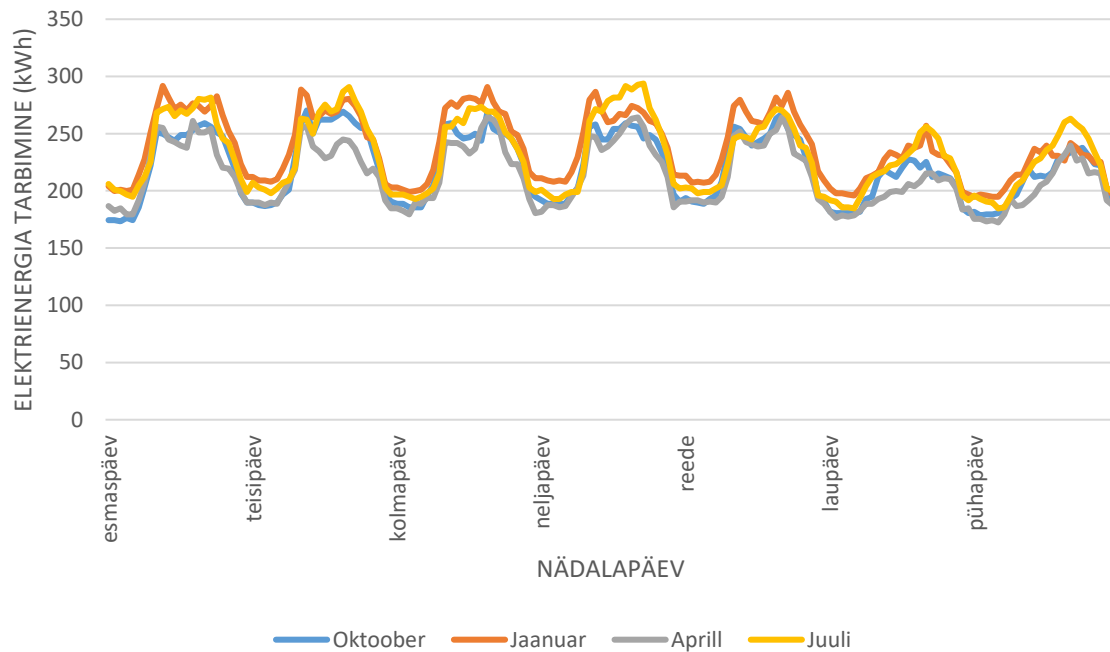
Joonis 2.11 Elektrienergia aastane arvutuslik tarbimine näidishoones [23]

Elektrienergia tarbimine terve aasta lõikes on stabiilne. Märkatavaim erinevus tarbimisgraafikul esineb suvekuudel juuni–august, mil jahutusseadmed jahutavad vähesel määral hoonet ning servereid. Kevadkuudel märts–juuni on märgata ligi 10% langust elektrienergia tarbimises võrreldes talvekuudega. Talveperioodil elektrienergia tarbimises märgatavaid muutusi ei ole, kuna näidishoones kasutatakse ruumide kütmiseks kaugkütet. Järgneval joonisel 2.13 on välja toodud aastane näidishoone kogutarbimise graafik. Mõõtmised on teostatud ajavahemikus 2020. a oktoober kuni 2021. a september.



Joonis 2.12 Näidishoone elektrienergia aastane tarbimine [23]

Järgneval joonisel 2.14 on välja toodud nädalased elektrienergia koormusgraafikud neljal erineval aastaajal, oktoobris, jaanuaris, aprillis ning juulis aastatel 2020-2021.



Joonis 2.13 Nelja erineva aastaaja nädalane kogutarbimise koormusgraafik [23]

Aastaegade võrdluses on erinevused väiksed. Aprilli ning oktoobri koormusgraafikud on omavahel sarnased ning samamoodi on sarnased omavahel jaanuari ning juuli koormusgraafikud. See tuleneb sellest, et suvel on hoone keske külmamasina koormus suurem, et jahutada hoones olevaid mitmeid serveriruumi. Talvel aga kasutatakse lisaks keskküttele mingil määral ka elektrikütet.

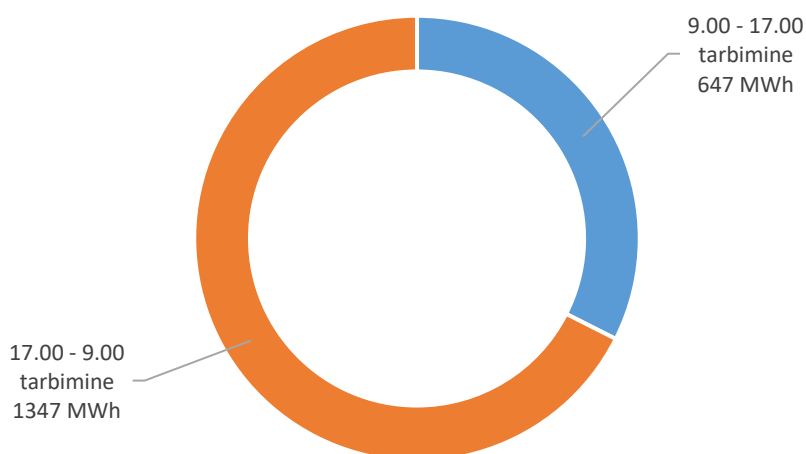
Järgnevas tabelis 2.3 on välja toodud nelja erineva aastaaja nädalase elektrienergia tarbimise kokkuvõte.

Tabel 2.3 Kõigi aastaegade tunnitarbimiste kokkuvõte [23]

Töönädal	Oktoober 2020	Jaanuar 2021	Aprill 2021	Juuli 2021
Tunni tarbimismaksimum (kWh)	276	292	264	294
Tunni tarbimismiinum (kWh)	172	195	172	182
Tunni tarbimismaksimum töövälisel ajal (kWh)	266	286	256	294
Nädala keskmine koormus (kW)	217	238	214	232
Nädala jooksul tarbitud elektrienergia (MWh)	37	40	36	39
Töövälise aja osakaal (%)	67%	68%	68%	67%

Tabelist selgub, et tunnised tarbimismiinumid ja tarbimismaksimumid on suhteliselt sarnased, koormus kõigub ligi 10% ulatuses. Samuti on töövälise aja kui ka tööaja koormused sarnased.

Järgmisel joonisel 2.14 on välja toodud elektrienergia tarbimine tööajal ning töövälisel ajal.



Joonis 2.14 Elektrienergia aastane tarbimine tööajal ning töövälisel ajal [23]

Töövälise aja tarbimine on 1347 MWh ning tööaja tarbimine on 647 MWh terve aasta vältel. Tööaja välise aja elektrienergia tarbimine on rohkem kui kaks korda suurem kui tööaja tarbimine. Sellist tarbimiste erinevust võib põhjendada sellega, et hoone tehnosüsteemid töötavad ka töövälisel ajal ning töövälise aeg on kaks korda pikem kui tööaeg. See viitab potentsiaalsele energiapaindlikkusele, mida oleks võimalik kasutada paindlikkusteenuses.

2.4 Näidishoone elektritarvitid ning energiapaindlikud seadmed

Näidishoone aastane elektritarbimine on 2004 MWh. Teatud osa näidishoonete elektriseadmetest võimaldavad energiapaindlikkust ning seeläbi energiapaindlikusteenuse rakendamist. Paindlikkuse hindamiseks tuleb tuvastada energiapaindlikud seadmed. Energiapaindlikud seadmed on defineeritud kui seadmed, mis võimaldavad elektrienergia tarbimise muutust baastaseme tarbimisest ilma sisekliima kvaliteeti ohverdamata. Seadme baastaseme tarbimine on tarbimine ilma elektrivõrgu signaalidele reageerimata [24]. Toetudes antud definitsioonile ning töö varasemates osades väljatoodule, on näidishoones energiapaindlikeks tehnosüsteemideks valgustus ning ventilatsioon. Muid näidishoone tehnosüsteeme antud töös ei käsitleta, kuna need ole juhitavad või ei vasta eelmainitud definitsioonile.

2.4.1 Valgustuse elektrienergia tarbimine ja seadmed

Valgustus moodustab hoone aastasest elektrienergia tarbimisest 5% ehk 100 MWh. Järgnevas tabelis on välja toodud näidishoones kaardistatud valgustid.

Tabel 2.4 Näidishoones kaardistatud valgustid nimivõimsustega [23]

Valgusti	Võimsus (W)	Kogus (tk)	Võimsus kokku (W)
2x18W kompaktluminofoorvalgusti	40	187	7480
1x26W kompaktluminofoorvalgusti	29	23	667
2x26W kompaktluminofoorvalgusti	57	27	1539
1x32W kompaktluminofoorvalgusti	35	24	840
1x18W kompaktluminofoorvalgusti	20	60	1200
2x14W kompaktluminofoorvalgusti	29	4	116
1x26W kompaktluminofoorvalgusti	29	7	203
2x28W T5 luminofoorvalgusti	62	75	4650
1x14W T5 luminofoorvalgusti	15	26	390
1x28W T5 luminofoorvalgusti	31	35	1085
4x14W T5 luminofoorvalgusti	60	225	13500
2x35W T5 luminofoorvalgusti	77	8	616
4x24W T5 luminofoorvalgusti	106	40	4240
1x35W T5 luminofoorvalgusti	39	38	1482
1x54W T5 luminofoorvalgusti	59	6	354
4x55W luminofoorvalgusti	242	10	2420
4x36W luminofoorvalgusti	158	14	2212
1x40W luminofoorvalgusti	44	21	924
2x24W+2x54W luminofoorvalgusti	172	9	1548
20W leedvalgusti	20	2	40
80W leedvalgusti	80	1	80
60W leedvalgusti	60	3	180
40W leedvalgusti	40	1	40
15W leedvalgusti	15	6	90
9W leedvalgusti	9	6	54
52W leedvalgusti	52	19	988
20W leedvalgusti	20	16	320
24W leedvalgusti	24	36	864
KOKKU		929	48122

Näidishoones on valgusteid kokku 929 tükki, installeeritud koguvõimsusega 48,12 W. Peamised kasutatavad valgustid on luminofoorvalgustid, kompaktluminofoorvalgustid ning leedvalgustid. Järgneval joonisel 2.16 on välja toodud üks hoone valgustitest.



Joonis 2.15 Kompaktluminofoorlamp näidishoones [23]

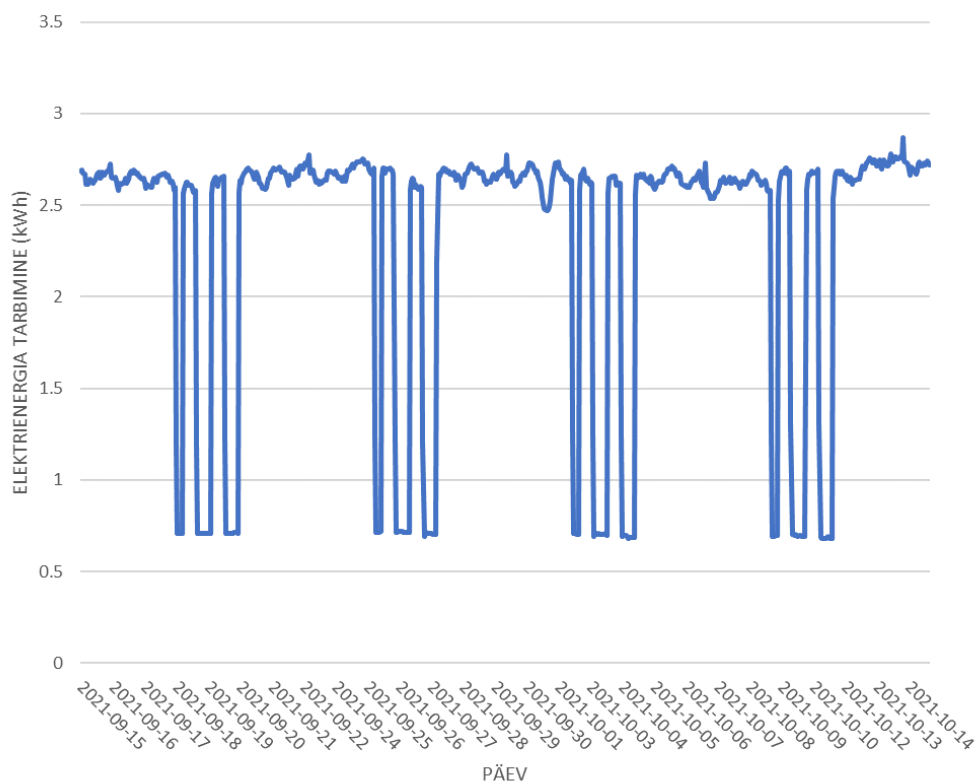
2.4.2 Ventilatsiooni elektrienergia tarbimine ja seadmed

Ventilatsiooni aastane tarbimine moodustab näidishoone kogutarbimisest 4% ehk 80 MWh. Peamiselt kasutatakse hoones soojustagastusega sissepuhke - ja väljatõmbeventilatsiooni. Ventilatsiooniseadmeid on kokku 6, millest igaüks on erineva võimsusega ning teenindab hoone erinevaid korruseid või kindla eesmärgiga ruume. Järgnevas tabelis 2.5 on välja toodud kaardistatud ventilatsiooniseadmed.

Tabel 2.5 Näidishoones kaardistatud ventilatsiooniseadmed [23]

Seade nr	SV1	SV2	SV3	SV4	SV5	SV6	
Seade	Komfovent Verso R40 XL	Komfovent Verso R50 XL	Komfovent Verso R40 XL	Komfovent Verso P10C	Komfovent REGO 2500L	Komfovent Verso R10 XL	
Tööaeg	24/7	kaks režiimi	24/7	24/7	24/7	24/7	
Juhtimine	Juhtpult	Juhtpult	Juhtpult	Juhtpult	Juhtpult	Juhtpult	
Küttekalorifeer	Vesi	Vesi	Vesi	Vesi	Vesi	Vesi	
Jahutuskalorifeer	Jah	Jah	Jah	Ei	Jah	Jah	
Soojustagastus	Rooror	Rooror	Rooror	Plaat	Rooror	Rooror	
Ventilaatorite juhtimine	PM-mootor	PM-mootor	PM-mootor	PM-mootor	PM-mootor	PM-mootor	
Juhtimisloogika	Sissepuhke temperatuuri järgi	Sissepuhke temperatuuri järgi	Sissepuhke temperatuuri järgi	Sissepuhke temperatuuri järgi	Sissepuhke temperatuuri järgi	Sissepuhke temperatuuri järgi	
Õhuvoolu- hulgad	Sissepuhe	1500 l/s	2170 l/s	1480 l/s	360 l/s	500 l/s	160 l/s
	Väljatõmme	1500 l/s	1900 l/s	1140 l/s	560 l/s	420 l/s	120 l/s
Seade- väärtused	Sissepuhe	20 C	21 C	20 C	18 C	20	21
	Väljatõmme	-	-	-	-	-	-

Ventilatsiooniseadmed on kõik erinevad, kuid tööpõhimõte ning tööaeg on kõigil sama. Järgneval joonisel 2.17 on välja toodud kõige võimsama ventilatsiooniseadme SV2 ühe kuu elektrienergia koormusgraafik.



Joonis 2.16 Komfovent Verso R50 XL SV2 ühe kuu koormusgraafik [23]

Ventilatsiooniseadme koormusgraafikust nähtub, et SV2 seade tarbib päevasel ajal stabiilselt 2,6 kWh elektrienergiat tunnis. Nädala lõpus lülitub peale töövälisest aegast sisse seadme teine režiim ning tarbimine väheneb ligi 73%, võrreldes päevase tarbimisega. SV2 ventilatsiooniseade on ainus seade, mis töötab vahepeal ka teisel režiimil. Ülejäänud ventilatsiooniseadmed töötavad pidevalt täis võimsusel. Järgnevas tabelis 2.6 on välja toodud ventilatsiooniseadme SV2 andmed elektrienergia tarbimise kohta.

Tabel 2.6 Ventilatsiooniseadme SV2 andmed elektrienergia tarbimise kohta [23]

Tarbimismaksimum (kWh)	2.87
Tarbimismiinum (kWh)	0.68
Keskmine võimsustegur	0.97
Ligikaudne suurim vool (A)	4.27
Kaitse nimivool	40
Kuu tarbimine kokku (kWh)	1547
Päeva keskmine tarbimine (kWh)	55

Ventilatsioonisüsteemi kogutarbimine päevas on 219 kWh ning kuus 6570 kWh.

3. PAINDLIKKUSTEENUSE RAKENDAMINE

Energiapaindlikud tehnosüsteemid näidishoones on valgustus ning ventilatsioon. Käesolevas peatükis selgitatakse paindlike tehnosüsteemide juhtimist, analüüsitakse paindlikkusteenuse rakendatavust näidishoones ning peatüki viimases osas toob autor välja soovitud muudatuste osas, et paindlikkusteenuse rakendamine oleks näidishoones võimalik.

3.1 Ülevaade energiapaindlike seadmete juhtimisest näidishoones

Näidishoone hooneautomaatika süsteem on üles ehitatud Niagara AX baasil, mis hõlmab Java baasil ülesehitatud graafikat. Süsteem on amortiseerunud ning süsteemile uuendusi saada ei ole enam võimalik. Hoones on kasutatud eelprogrammeeritud kontrollereid. Käesolevas peatükis on käsitletud näidishoones olevate tehnosüsteemide juhtsüsteeme.

3.1.1 Valgustuse juhtimine

Antud hoones kasutatakse T5, T8 ning T16 luminofoorvalgustust, kompaktluminofoorvalgustust ning mõningal määral ka leedvalgusteid. Valgustid on osaliselt üld- ja tööaladel juhitud HDL Dali baasil. Ülejäänud ruumides on valgustite juhtimine lülitiga. Mõningates koridorides on valgustus juhitud liikumisanduriga [23].

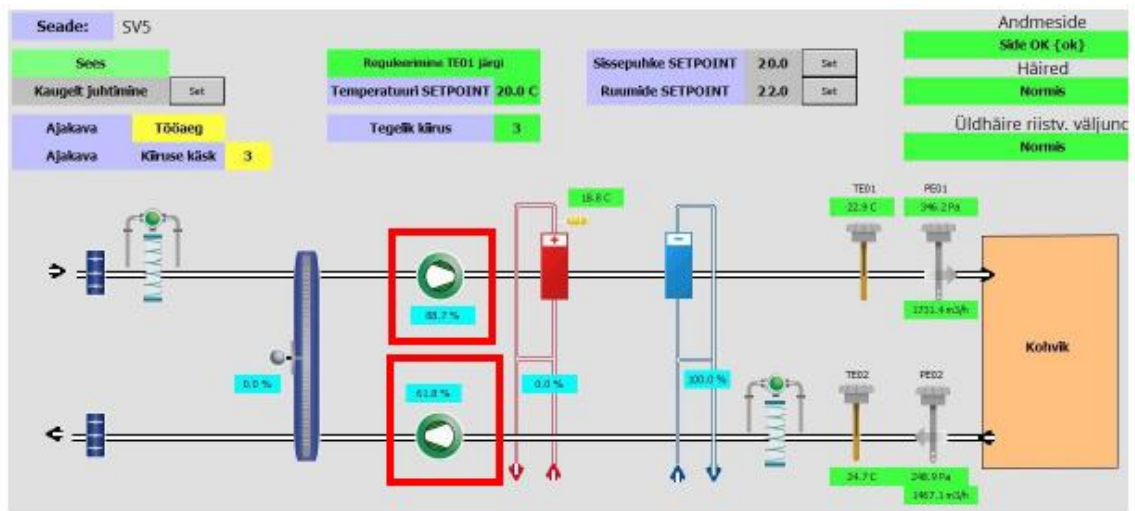
Valgustuse juhtimises on kasutatud HDL Dali seadmeid, mis on suhteliselt vanad ning amortiseerunud. Selle tõttu esineb hoones ka probleeme – valgustid jäävad põlema ja andurid ei tööta nii nagu peaks. Samuti ei ole valgustuse juhtimine ühendatud ühtsesse hooneautomaatika süsteemi, seega sellisel kujul valgustuse kasutamine paindlikkusteenuse otstarbel ei ole võimalik. Järgnevatel joonisel 3.1 on välja toodud HDL Dali juhtimisseadmed [23].



Joonis 3.1 HDL Dali valgustuse juhtimisseadmed näidishoones [23]

3.1.2 Ventilatsiooni juhtimine

Ventilatsiooniseadmed on ühendatud kesksesse hooneautomaatika süsteemi, kuid ei ole programmeeritud töötama vastavalt vajadusele. Ventilatsiooniseadmed töötavad pidevalt ning täisvõimsusel peale SV2 ventilatsiooniseadme, mis lülitub nädalavahetuse päevadel töövälisel ajal teise režiimi. Seadmed on juhitud Komfovent C3 juhtpuldil. Kesksest hooneautomaatika süsteemist on võimalik jälgida visualiseeritult. Järgneval joonisel 3.2 on välja toodud väljavõtte näidishoone hooneautomaatika visualiseerimise kuvast SV5 ventilatsiooniseadme kohta [23].



Joonis 3.2 Ventilatsiooniseadme SV5 visualiseering Komfovent REGO 2500L [23]

Antud ventilatsiooniseade on märgitud töötama 88,7% ning 51,8% ventilaatorite kiirusega, kuid realsuses töötab seade 100% töökiirusel. Hoonet kasutatakse vahelduvalt mõnedes hoone osades ka töövälisel ajal, kuid samal ajal ventileerivad antud seadmed ka neid osasid, mida ei peaks töövälisel ajal ventileerima. Näidishoone keskne hooneautomaatika süsteem laseb ventilatsiooniseadmete puhul seadistada sissepuhke temperatuuri ning ajagraafikuid. Kohalolu järgi juhtimist antud hoones ventilatsioonisüsteemi puhul ei rakendata. Paindlikkusteenuse rakendamiseks peaks olema ventilatsioonisüsteem juhitav kohalolu järgi. Järgneval joonisel 3.4 on välja toodud ventilatsioonisüsteemi ringluspump [23].



Joonis 3.3 Ventilatsioonisüsteemi ringluspump [23]

3.2 Energiapaindlikkusteenuse ülesehitus

Näidishoone profiil on teenindav ärihoone. Hoone sobib osalema nii reservvõimsuste turul mFRR tootega kauplemisel, Euroopa paindlikkusturu platvormil MARI või planeeritavatel sageduse reguleerimise turul ning platvormil PICASSO kauplemaks aFRR-iga. Paindlikkusturgudel osalemiseks peaks näidishoone puhul rakendama eelnevalt vastavaid juhtimise meetmeid. Antud hoone puhul on võimalik rakendada nii staatilisi kui ka dünaamilisi tarbimise juhtimise meetmeid. Staatilised meetmed omavad pikaajalisi mõjusid ning seostub energiatõhususega. Dünaamilisel juhtimisel on lühiajalised mõjud ning vajab arvestatava efekti omamiseks üksikhoonena küllaltki suurt juhitavat võimsust. Nii staatilised kui ka dünaamilised meetmed on kaudselt teineteisest sõltuvad [25].

Staatiliste meetmete mõjud avalduvad pikema aja jooksul ning on peamiselt seatud energiaefektiivsusega. Võttes kasutusele tõhusamaid seadmeid, kasutades ära olemasolevaid ressursse targemalt ning tõstes inimeste teadlikkust, on võimalik märkimisväärne energia kokkuhoid saavutada, läbi mille avaneb ka võimalus vabastatud võimsust paindlikkusturul ära kasutada. Staatilisi meetmeid on võimalik näidishoones rakendada kõikvõimalike elektriajamite, valgustuse ja ventilatsioonisüsteemi juures. Meetmeid saab rakendada valgustuse puhul uuendades olemasolev valgustus efektiivsema ja juhitava vastu [25].

Dünaamilised meetmed on kiire tulemiga meetmed. Peamisteks mehhanismideks dünaamiliste meetmete puhul on hinnapõhine tarbimise juhtimine ning reguleerimisteenuste pakkumine süsteemihaldurile. Tänauses elektriturul olukorras, kus elektrienergia hind võib muutuda iga tunni aja tagant, avab võimaluse optimeerimiseks. Hinnapõhise juhtimise korral võrreldakse hetkehinda mingi perioodi jooksva keskmise hinnaga. Kui hind erineb jooksvast keskmisest, arvutab hoone BMS süsteem seadmetele uued seadeväärtused. Kõrgema hinna korral juhitav valgustus hämardatakse ja ventilatsiooni korral vähendatakse ruumidesse puhutava õhu hulka või temperatuur reguleeritakse kõrgemaks. Reguleerimisvõimsuste pakkumise puhul on praegune turg kallutatud rohkem energiamahukate tööstustarbijate poole, kuid lähitulevikus kui Eesti desünkroniseerib Venemaa elektrisüsteemist, tuleb turule rohkem tooteid. Näidishoones on kiiresti reageeriv paindlikkuse potentsiaal olemas ning peale staatiliste meetmete rakendamist on võimalik seda ka reguleerimisvõimsuste turul pakkuda. Kuna hoone asub piirkonnas, kus on ka teisi sarnaseid hooneid, on tulevikus võimalus kompenseerida lokaalselt teiste sarnaste hoonete tarbimist või koondada sarnaste hoonete juhitavad tarbimisvõimsused üheks [25].

Käesolevas töös käsitletakse näidishoone rakendamist energiapaindlikkusturul mFRR-iga kauplemiseks. Antud toode aktiveeritakse vastavalt pakkumistele. Aktiveerimisaeg on 15 minutit kuni täisvõimsuseni. Antud toodet vahendab Eestis otseselt tarbijalt süsteemioperaatorile agregaat, kes kogub suurema mahu eesmärgil kokku mitmete hoonete energiapaindlikkuse ning rakendab seda [26].

3.3 Energiapaindlike seadmete juhtimispõhimõtted energiapaindlikkusteenuse pakkumise otstarbel

Energiapaindlikkusteenuse pakkumise jaoks on kriitilise tähtsusega seadmete juhtimise võimalus, kuna läbi juhtimise on võimalik hoone seadmeid muuta energiapaindlikeks. Paindlikud seadmed peavad olema võimelised tarbimisvõimsuseid ümber lülitama vastavalt võrgusignaalidele.

Kuna hoones ei ole väga keerulist hooneautomaatikasüsteemi või väga spetsiifilisi tarbijaid, sobib hoonesse rakendamiseks *grey-box* või *black-box tüüpi* mudel. *White-box* mudel ei sobi hästi, kuna andmete edastamine läbi võrgu on väga oluline, mistõttu suuri andmemahte jooksvalt töödelda ei ole paindlikkusteenuse otstarbel kuigi mõttekas.

Juhtimispõhimõtetest sobiks antud hoonesse rakendamiseks RL (*Reinforcement Learning*) kui ka RBC (*Rule Based Control*). Juhtimispõhimõtte valik peaks baseeruma tulevikuvaatel, sõltuvalt sellest kui suures mahus ning mis kujul energiapaindlikkusturul on plaan osaleda. RBC sobiks enda lihtsuse poolest juhtima mitte väga dünaamilist osalemist energiapaindlikkusturul. Mida keerulisemaks muutuvad protsessid, seda kõrgem peab olema hoonehalduri kompetents antud valdkonnas või ostma sisse kaughaldusteenust, et RBC juhtimispõhimõtet korrigeerida vastavalt olukordadele jooksvalt. RL juhtimispõhimõtte vajab küll kõrget kompetentsi haldamise poolelt, kuid ei vaja aktiivsed seadistamist.

3.4 Energiapaindlikkusteenuse rakendamiseks vajalikud muudatused paindlikes seadmetes ning nende juhtsüsteemides

Arvestades, et juhtimine on energiapaindlikkusteenuse rakendamise osas üks olulisimaid aspekte, peaks esmalt liidestama võimalikult palju tehnosüsteeme hoone keskse hooneautomaatika süsteemiga. Need tehnosüsteemid mis ei ole juhitavad või ei võimalda liidestamist vajavad uuendamist. Järgnevalt toob autor välja mõningad soovitusel muudatusteks näidishoones energiapaindlikkusteenuse rakendamise eesmärgil.

Valgustuse installeeritud nimivõimsus on hetkel 48 kW. Installeeritud nimivõimsusest 12,05 kW ei ole juhitav. Et muuta antud süsteem juhitavamaks, oleks mõistlik antud valgustid välja vahetada juhitavate vastu. Järgnevas tabelis 3.1 on välja toodud valgustite muudatused.

Tabel 3.1 Valgustite muudatused [23]

Valgusti	Tarbimine (W)	Kogus (tk)	Võimsus kokku (W)	Muudatus		
				Uus valgusti	Tarbimine (W)	Uus tarbimine kokku (W)
2x18W kompaktluminofoorvalgusti	40	187	7480	14W leed	14	2618
1x26W kompaktluminofoorvalgusti	29	23	667	14W leed	14	322
2x26W kompaktluminofoorvalgusti	57	27	1539	14W leed	14	378
1x32W kompaktluminofoorvalgusti	35	24	840	14W leed	14	336
1x18W kompaktluminofoorvalgusti	20	60	1200	14W leed	14	840
2x14W kompaktluminofoorvalgusti	29	4	116	14W leed	14	56
1x26W kompaktluminofoorvalgusti	29	7	203	14W leed	14	98
Kokku		332	12045		Kokku	4648

Kokku peaks vahetama 332 valgustit. Uueks valgustuse installeeritud võimsuseks on 40,72 kW, mis on 15% madalam kui varasemalt. Uueks aastaseks elektrienergia tarbimiseks on 85 MWh. Lisaks sellele, et võimalik on juhtida suuremat hulka valgusteid, on ka aastane elektrienergia tarve madalam.

Valgustus antud hoones praegusel hetkel ei võimalda juhtimist kuigi dünaamilisel kujul. Praegu on juhitavad vaid mõned osad hoonest liikumisanduriga ning praegune HDL DALI juhtsüsteem on amortiseerunud, mistõttu mõned valgustid põlevad kogu aeg ning mõned valgustid ei põle üldse. Praegune valgustuse juhtsüsteem HDL DALI peaks vahetama uuema DALI2 vastu ning selle süsteemiga peaks liidestama kõik juhitavad valgustid. Valgustus peaks olema liidestatud ühtsesse hooneautomaatika süsteemi. Kuna hoone on pigem kitsas ja kõrge ning hoonel on suured aknad iga külje peal, oleks mõttekas seda ära kasutada ning juhtida valgustust päevavalguse ning kohalolu järgi. Valgustus peaks ruumides olema hämardatav vastavalt päevavalgusele, mis viiks tehnosüsteemi baastarbimise madalamale tasemele ning seetõttu vabastaks rohkem

võimsust paindlikkusteenuses kasutamiseks. Valgustuse juhtimine peaks olema määratud lülitusgruppidesse. Lülitusgruppide määramise juures peaks arvestama hoonete kasutamisaegadega, kuna osasid hoonest kasutatakse ka töövälisel aegadel. Kitsenduseks valgustuse juhtimisele on standard EVS-EN 12464-1:2021 mis määrab ära valgustustiheduse nõuded ruumides vastavalt nende kasutamise eesmärgile.

Ventilatsiooniseadmed juhtimise ning seadmete seisukohast praegusel hetkel on energiapaindlikkusteenuse seisukohast lähtudes sobilikud. Juhtsüsteemi seisukohast oleks tarvis juhtida ventilatsiooni kohalolu järgi, et mitte teenindada neid piirkondi, kus inimesed antud ajahetkel ei viibi. Ruumikliima kontrollid peaksid olema määratud lülitusgruppidesse samadel alustel nagu valgus. Ventilatsiooni juhtimisele on kitsenduseks standard EN 16798.

Lisaks eelmainitule tuleks pöörata tähelepanu ka keskse hooneautomaatika uuendamisele, kuna praegu kasutuses olev Niagara AX süsteem on amortiseerunud ning praegusel hetkel seda enam uuendustega ei toetata. Hooneautomaatika süsteemi uuendamise juures oleks tarvilik paigaldada server, mis näidishoone süsteeme haldaks ning võimaldaks võrgusignaale reageerimist.

4. ARVUTUSMUDELI KOOSTAMINE

Käesolevas peatükis koostab autor järk-järgult arvutusmudeli, et hinnata kaudselt hoonetes paindlikkusteenuse rakendatavuse tasuvusaega. Mudel koostati programmis Microsoft Excel.

4.1 Hoone tehnosüsteemide energiapaindlikkuse arvutus

4.1.1 Valgustuse elektrienergia paindlikkuse arvutus

Varasemalt väljatoodud definitsiooni järgi on energiapaindlikud seadmed, mis suudavad enda elektrienergia tarbimist muuta baastaseme tarbimise suhtes [24]. Paindlik võimsus on seega võimsus, mis on baastaseme tarbimise ning reguleeritud tarbimise vahe.

Esmalt on tarvis leida tehnosüsteemide tarbimine peale muudatusi juhtsüsteemides ning seadmetes. Valgustuse elektrienergia aastase tarbimise peale muudatusi on võimalik leida valemiga 4.1.

$$P_{VAL1} = P_{VAL0} - (P_{VAL0} * 0,38) \quad (4.1)$$

Kus P_{VAL1} - valgustuse aastane elektrienergia tarbimine peale juhtimist, kWh,
 P_{VAL0} - valgustuse aastane elektrienergia tarbimine enne juhtimist, kWh.

Väärtus 0,38 tuleneb uurimistööst [27], mille alusel vähendab valgustuse elektrienergia tarbimine peale kohalolu ning päikesevalguse järgi juhtimist keskmiselt 38% võrra. Uurimistöös on analüüsitud 240 büroohoonet, kuhu on sellist valgustuse juhtimist rakendatud. Soovides täpsemat tulemust saada, peaks tuvastama päikese järgi juhtimist võimaldava ruumid hoones, simuleerides hoonet programmis DIALux [28].

Tulenevalt standardist EN 16798-1 on võimalik leida optimaalne ruutmeetrite arv ühe inimese kohta. Valemi 4.2 järgi on võimalik leida optimaalne inimeste arv büroohoones.

$$n_{opt} = A_r/n_{sta} \quad (4.2)$$

Kus n_{opt} - optimaalne inimeste arv hoones,
 A_r - hoone suletud netopind, m^2 ,
 n_{sta} - standardist tulenev optimaalne arv ruutmeetreid ühe inimese kohta.

Teades optimaalset inimeste arvu hoones, on võimalik leida optimaalne elektrienergia tarbimine ühe inimese kohta, avaldades see valemist 4.3. Antud valemi eesmärk on siduda valgustuse elektrienergia tarbimine inimeste arvuga hoones.

$$P_{VAL1} = P_{in} * n_{opt} * n_{töö} \quad (4.3)$$

Kus P_{VAL1} - valgustuse aastane elektrienergia tarbimine, kWh,
 P_{in} - elektrienergia tarbimine inimese kohta, kWh/in,
 n_{opt} - optimaalne hoones viibivate inimeste arv,
 $n_{töö}$ - töötundide arv aastas.

Asendades valemis 4.3 n_{opt} inimeste arvuga käesoleval hetkel hoones n_{hetk} , on võimalik leida valgustuse elektrienergia tarbimine jooksvalt igal ajahetkel.

Valgustuse paindlikkuse, mida on võimalik antud ajahetkel kasutada energiapaindlikkusteenuse jaoks, on võimalik leida lahutades hetke suurimast võimalikust valgustuse tunnitarbimisest käesoleval hetkel olev elektrienergia tunnitarbimine. Käesoleval hetkel elektrienergia tunnitarbimine on sõltuvuses inimeste arvuga hoones, seega mida rohkem on inimesi antud ajahetkel hoones, seda kõrgem on elektrienergia tarbimine ning seda vähem on energiapaindlikku vaba võimsust. Matemaatilised seosed on väljendatud järgnevates valemities 4.4 ja 4.5.

$$P_{VAL1tund} = P_{in} * n_{hetk} \quad (4.4)$$

$$P_{VALPtund} = P_{VAL0tund} - P_{VAL1tund} \quad (4.5)$$

Kus $P_{VAL1tund}$ - valgustuse tunnitarbimine, kWh,
 $P_{VALPtund}$ - valgustuse tunni energiapaindlik võimsus, kWh,
 $P_{VAL0tund}$ - valgustuse tunni maksimaalne võimalik tarbimine, kWh,
 n_{hetk} - hetkel hoones viibivate inimeste arv.

4.1.2 Ventilatsiooni elektrienergia paindlikkuse arvutus

Ventilatsiooni energiapaindlikkus on arvutatav samadel alustel nagu valgustuse energiapaindlikkus, kus on tarvilik leida antud ajahetke maksimaalne võimalik elektrienergia tarbimise ning käesoleva ajahetke tarbimise vahe. Paindlikkuse arvutamiseks on tarvilik esmalt leida ventilatsiooni õhuvoolu kiirus peale kohaolu järgi juhtimist. Valemis 4.6 on välja toodud õhuvooluhulga sõltuvus inimeste arvust hoones, mis tuleneb standardist EN 16798.

$$q_1 = (n_{hetk} * q_p) + (A_r * q_B) \quad (4.6)$$

Kus q_1 - kogu õhuvoolu hulk peale juhtimise sisseviimist hoonesse, l/s,
 q_p - õhuvoolu kiirus ühe inimese kohta, l/(s*inimene),
 q_B - õhuvoolu heitgaaside hoonest väljaviimise kiirus pindala kohta, l/(s,m²).

Leides kogu õhuvoolu hulk sõltuvalt inimeste arvust hoones, on võimalik arvutada elektrienergia tarbimine peale muudatust $P_{VEN1tund}$, kasutades järgnevat valemit 4.7. Antud valem kujutab seosust õhuvooluhulkade muutuse ning ventilatsiooniseadmete elektrienergia tarbimise muutuste osas.

$$\frac{P_{VEN0}}{P_{VEN1}} = \left(\frac{q_0}{q_1}\right)^3 \quad (4.7)$$

Kus P_{VEN0} - ventilatsiooni elektrienergia tunnitarbimine enne muutust, kWh,
 P_{VEN1} - ventilatsiooni elektrienergia tarbimine peale muutust, kWh,
 q_0 - ventilatsiooni kogu õhuvoolu hulk enne muutust, l/s.

Ventilatsioonisüsteemi energiapaindlik võimsus on leitav samamoodi nagu valgustusegi energiapaindlik võimsus, leides maksimaalse võimaliku tarbimise ning hetketarbimise vahe.

4.2 Tasuvusanalüüs

Tasuvusanalüüsis arvestatakse projekti pikkuseks 10 aastat. Selle raames on tarvis leida elektrienergia väiksemast elektrienergia tarbimisest tulenev sääst ning energiapaindlikkusteenusest tulenev lisatulu. Elektrienergia säästust tekkinud tulu ning energiapaindlikkusteenuse aastase tulu summat saab arvestada aastase säästuna. Antud tehet kirjeldab järgnev valem 4.8.

$$X_n = X_{elekter} * P_{sääst} + X_{paindlik} \quad (4.8)$$

Kus X_n - aastas säästetud elektrienergia maksumus, EUR,
 $X_{elekter}$ - elektri hind, EUR/kWh,
 $P_{sääst}$ - aastas säästetud elektrienergia, kWh.
 $X_{paindlik}$ - energiapaindlikkusteenusest saadud aastane tulu.

Energiapaindlikkusteenusest saadud aastane tulu arvutatakse aktiveerimiste arvu ning hinna korrutisena, kasutades hindade leidmiseks *Baltic transparency dashboardi* [29]. Järgnev valem 4.9 kirjeldab paindlikkusteenusest saadavat aastast tulu.

$$X_{p\text{aindlik}} = n_{mFRR} * X_{hind} \quad (4.9)$$

Kus n_{mFRR} – aktiveerimiste arv aastas,
 X_{hind} – ühe aktiveerimise hind, EUR.

Mudel arvestab elektrienergia hinnatõusu, mistõttu arvutatakse iga aegrea järgmine väärtus valemi 4.9 järgi.

$$X_n = X_{n-1} + (X_{n-1} * X_{i\%}) \quad (4.10)$$

Kus X_n - aegrea aasta aastane säästetud elektrienergia hind, EUR,
 X_{n-1} - aegrea eelneva aasta aastane säästetud elektrienergia hind, EUR,
 $X_{i\%}$ - elektrienergia aastane hinnatõus.

Mudeli kaudu on võimalik arvutada ka kumulatiivset rahavoogude bilanssi aegrea iga aasta kohta nii laenuintressiga kui ka ilma laenuintressita. Järgnev valem 4.10 kirjeldab kumulatiivseid rahavooge ilma laenuintressita ning 4.11 koos laenuintressiga. Mudel arvutab intressi summa laenujäägi pealt, lihtsustuse mõttes kord aastas.

$$R_n = R_{n-1} + X_n \quad (4.11)$$

$$R_{n\%} = R_{n-1\%} + X_n + (X_n * i_{\%}) \quad (4.12)$$

Kus R_n - kumulatiivne aastane rahavoog,
 $R_{n\%}$ - kumulatiivne aastane rahavoog laenu puhul,
 $R_{n-1\%}$ - aegrea eelneva aasta aastane rahavoog laenu puhul,
 $i_{\%}$ - aastane laenuintress.

Siinkohal tuleb ära mainida, et rahavoog esimesel aastal ehk R_0 on võrdne projekti maksumuse kogusummaga.

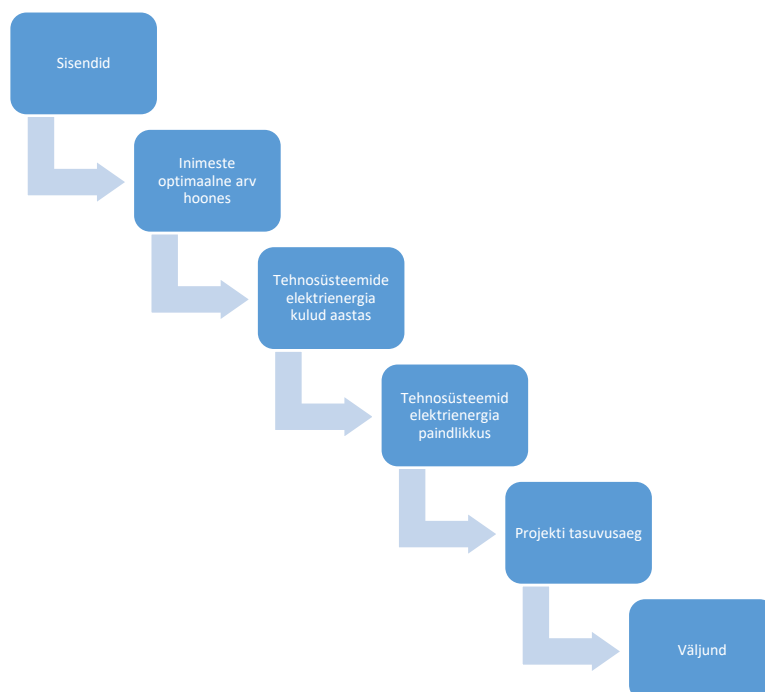
4.3 Kokkuvõtte arvutusmudelid

Arvutusmudelisse peab kasutaja sisestama sisendid, mille alusel mudel kalkuleerib väljundväärtused. Järgnevas tabelis 4.1 on välja toodud kokkuvõttev tabel sisenditest, mis on arvutusmudeli jaoks vajalikud lähteandmed.

Tabel 4.1 Mudeli sisendid

Sisendid	
Suletud netopind (m2)	
Inimeste arv	
Tundide arv aastas (töötunnid)	
Elektrienergia kogutarbimine aastas (MWh)	
Valgustuse elektrienergia tarbimine aastas (MWh)	
Ventilatsiooni elektrienergia tarbimine aastas (MWh)	
Elektrienergia hind (EUR/MWh)	
Allareguleerimise aktiveerimise keskmine hind (EUR/MWh)	
Allareguleerimise 1h kestvusega aktiveerimiste arv aastas tööajal	
Allareguleerimise 1h kestvusega aktiveerimiste arv aastas töövälisel ajal	
Esialgne investeeering kokku (EUR)	
Laenu intress (%)	

Mudel arvestab tehnosüsteemide arvutuste juurde inimeste arvuga hoones, mistõttu on võimalik arvutada tehnosüsteemide tarbimist tunniajase täpsusega. Tunniajase täpsusega elektrienergia tarbimise arvutamine on oluline just energiapaindlikkusteenuse seisukohast. Järgneval joonisel on kujutatud mudeli arvutuste protsess.



Joonis 4.1 Mudeli arvutuste protsess mudeli sisendist väljundini

Mudeli väljundiks on mitmed parameetrid, sealhulgas ka graafik, mis kujutab tasuvusaega kahel juhul, kus laenu on võetud ning kus laenu ei ole võetud. Järgnevas tabelis 4.2 on välja toodud mudeli väljundid.

Tabel 4.2 Mudeli väljundid

Väljundid	
Optimaalne inimeste arv hoones	
Valgustuse uus elektrienergia tarbimine aastas (MWh)	
Ventilatsiooni uus elektrienergia tarbimine aastas (MWh)	
Valgustuse elektrienergia tarbimine tunnis päevasel ajal (kWh)	
Ventilatsiooni elektrienergia tarbimine tunnis päevasel ajal (kWh)	
Säästetud elektrienergia aastas (MWh)	
Tehnosüsteemide elektrienergia paindlikkus tööajal tunnis kokku (kWh)	
Tehnosüsteemide elektrienergia paindlikkus töövälisel ajal tunnis kokku (kWh)	
Valgustuse elektrienergia paindlikkus tööajal tunnis (kWh)	
Ventilatsiooni elektrienergia paindlikkus tööajal tunnis (kWh)	
Valgustuse elektrienergia paindlikkus töövälisel ajal tunnis (kWh)	
Ventilatsiooni elektrienergia paindlikkus töövälisel ajal tunnis (kWh)	
Tasuvusanalüüs	
Säästetud elektrienergia maksumus esimesel aastal (EUR)	
Paindlikkusteenusest tulev kasu aastas (EUR)	
Kokku	
Kumulatiivne sääst projekti jooksul kokku (EUR)	
ROI (%)	

Mudeliga on võimalik anda hinnang tehnoseadmete elektrienergia tarbimise muudule aastas, teada saada paindlik võimsus tehnosüsteemide lõikes nii tööajal kui ka töövälisel ajal sõltuvalt inimeste arvust hoones käesoleval ajahetkel tunniajase täpsusega ning hinnata kaudselt projekti tasuvusaega arvestades muudatustest juhtsüsteemis ja seadmetes tekkinud aastast energiasäästu ning energiapaindlikkusteenusest tulenevat tulu. Tunnipõhine elektrienergia tarbimise ning elektrienergia paindlikkuse hinnang on kasulik seetõttu, et paindlikkusturul arvestatakse mFRR aktiveerimisi tunnipõhiselt. Mudel annab hinnangu ka esmasest investeeringust tingitud kasumi (ROI) kohta.

5. PAINDLIKKUSTEENUSE RAKENDATAVUSE ANALÜÜS

Käesolevas peatükis rakendatakse koostatud mudelit näidishoonele ning seeläbi hinnatakse paindlikkusteenuse rakendamise majanduslikku otstarbekust ning tasuvusaega.

5.1 Mudeli tulemused näidishoone kohta

Mudellisse on esmase asjana vajalik sisestada õiged lähteandmed. Järgneval tabelis 5.1 on välja toodud sisendid näidishoone arvutuste läbiviimiseks.

Tabel 5.1 Näidishoone sisendid mudeli arvutuste jaoks

Sisendid	
Suletud netopind (m ²)	4017
Inimeste arv	236
Tundide arv aastas (töötunnid)	2080
Elektrienergia kogutarbimine aastas (MWh)	2004
Valgustuse elektrienergia tarbimine aastas (MWh)	85
Ventilatsiooni elektrienergia tarbimine aastas (MWh)	80
Elektrienergia hind (EUR/MWh)	142.68
Allareguleerimise aktiveerimise keskmine hind (EUR/MWh)	15.85
Allareguleerimise 1h kestvusega aktiveerimiste arv aastas tööajal	260
Allareguleerimise 1h kestvusega aktiveerimiste arv aastas töövälisel ajal	365
Esialgne investering kokku (EUR)	95740
Laenu intress (%)	0.06

Tundide arvuks aastas on võetud kaheksatunnised tööpäevad ning viis tööpäeva nädalas, mis kokku teeb 2080 töötundi aastas. Elektrienergia hinna arvutuste juures on mitmeid komponente. Järgnevas tabelis 5.2 on välja toodud elektrienergia hinna komponendid.

Tabel 5.2 Elektrienergia hinna arvutus

Elektrienergia maksumus		
Elektrienergia kogutarbimine aastas	2004	MWh
Elektrienergia hind	125.08	EUR/MWh
Elektri edastamine	8.7	EUR/MWh
Kuutasu	1.5	EUR/MWh
Kasutusvõimsuse tasu	6.4	EUR/MWh
Elektriaktsiis	1	EUR/MWh
Kokku	142.68	EUR/MWh

Tabelis 5.2 on võetud elektrienergia hinnaks käesoleva aasta 2022 algusest kuni maikuuni keskmine elektrienergia hind.

Allareguleerimiste hinnaks on võtnud autor käesoleva aasta algusest kuni maikuuni reguleerimiste keskmised hinnad, arvestamata null hinnaga reguleerimisi. Mudeliga on võimalik arvutada nii tööaja reguleerimisi ajavahemikus 9.00–17.00 kui ka tööaja väliseid reguleerimisi ajavahemikus 17.00–9.00. Reguleerimiste arvuks on autor võtnud üks reguleerimine päevasel ajal tööpäevadel ning üks reguleerimine töövälisel ajal iga päev aasta jooksul. Esialgne investeering sisaldab endas tehnosüsteemide seadmete kui ka juhtsüsteemide muudatuste hinda kokku. Autor konsulteeris eriala spetsialistiga ning koostas ligikaudse hinna. Mudeli edasine kasutaja saab konkreetsema hinna, küsides hinnapakumisi selliste tööde teostajatelt.

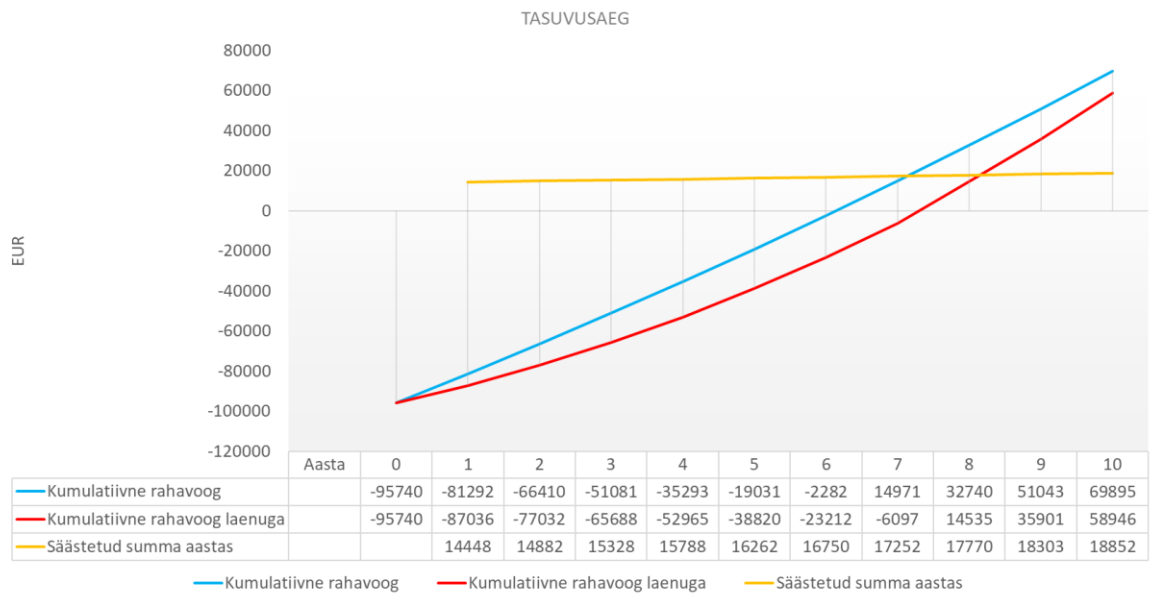
Järgnevas tabelis 5.3 on välja toodud mudeli tulemus näidishoone kohta.

Tabel 5.3 Mudeli tulemus näidishoone kohta

Väljundid	
Optimaalne inimeste arv hoones	236
Valgustuse uus elektrienergia tarbimine aastas (MWh)	52.63
Ventilatsiooni uus elektrienergia tarbimine aastas (MWh)	30.30
Valgustuse elektrienergia tarbimine tunnis päevasel ajal (kWh)	25.31
Ventilatsiooni elektrienergia tarbimine tunnis päevasel ajal (kWh)	14.57
Säästetud elektrienergia aastas (MWh)	97.07
Tehnosüsteemide elektrienergia paindlikkus tööajal tunnis kokku (kWh)	39.46
Tehnosüsteemide elektrienergia paindlikkus töövälisel ajal tunnis kokku (kWh)	75.34
Valgustuse elektrienergia paindlikkus tööajal tunnis (kWh)	15.56
Ventilatsiooni elektrienergia paindlikkus tööajal tunnis (kWh)	23.90
Valgustuse elektrienergia paindlikkus töövälisel ajal tunnis (kWh)	38.33
Ventilatsiooni elektrienergia paindlikkus töövälisel ajal tunnis (kWh)	37.01
Tasuvusanalüüs	
Säästetud elektrienergia maksumus esimesel aastal (EUR)	13850
Paindlikkusteenusest tulev kasu aastas (EUR)	598
Kokku	14448
Kumulatiivne sääst projekti jooksul kokku (EUR)	165635
ROI (%)	73

Tabelist 5.3 nähtub, et aastane kasum energiapaindlikkusteenuse jaoks tehtud muudatustest on 14448 eurot esimesel aastal. Paindlikkusteenusest saadav tulu on 598 eurot aastas. Tehnosüsteemide paindlik võimsus tööajal on 39,46 kWh tunnis ning töövälisel ajal 75,34 kWh tunnis. Aastas säästetud elektrienergia on 97,07 MWh. Kumulatiivne sääst 10 aasta jooksul on 165635 eurot ning kasum esialgselt investeeringult (ROI) on 73%.

Järgneval joonisel 5.1 on välja toodud tasuvusanalüüsi tulemus koos rahavoogudega iga perioodi kohta.



Joonis 5.1 Tasuvusanalüüs näidishoone kohta

Jooniselt 5.1 nähtub, et tasuvuspunkt jõuab kätte, rakendades paindlikkusteenust antud hoones ilma laenuta, ligi 6 aastaga. Tasudes aga tekkinud kulude eest laenuga, nihkub tasuvusaeg natukene rohkem kui aasta võrra edasi. Märgata on ka mõningast tõusu iga-aastases säästetud summas, mida võib põhjendada elektrienergia hinna tõusuga.

5.2 Mudeli tulemuste analüüs ja järeldused

Eelnevas peatükis väljatoodud tulemustest on näha, et näidishoone puhul tehtud 95 740 euro suurune kulutus optimaalse hoone kasutamise korral tasub ära ilma laenu võtmata kuuendaks aastaks ning laenu võttes intressiga 6% tasub projekt ära seitsmendaks aastaks.

Tasuvusaega mõjutab kõige enam tehnosüsteemide optimaalne kasutus. Näidishoones varasemalt valgustust ning ventilatsiooni ei juhitud ning seetõttu oli ventilatsiooni ja valgustuse töökoormus üledimensioneeritud. Peale juhtsüsteemide muutmist langes elektrienergia aastane tarbimine tehnosüsteemide lõikes on 97 MWh madalam ja elektrienergia hind. Tehnosüsteemide optimaalne kasutus on sõltuvuses hoones viibivate inimeste arvus.

Elektrienergia paindlikkus ning paindlikkusteenuse pakkumine paraku suurt rolli tasuvusaja osas ei mängi. Energiapaindlikkusteenuse pakkumisest on aastane tulu ligi 600 eurot. Nagu L. Hõraku magistritöös [22] selgus, siis praegusel hetkel on tarbijate osalus energiapaindlikkusturul madal. Samuti ei ole paindlikkusturul kuigi palju

erinevaid tooteid ning mFRR aktiveerimise hinnad on madalad. Võib arvata, et peale sünkroniseerimist Mandri-Euroopa sagedusvõrguga võib olukord muutuda ning energiapaindlikkusturule tuleb tooteid juurde ja elektrisüsteemi stabiilsena hoidmine hakkab muutuma lokaalsemaks ning olulisemaks.

Antud projekti tasuvusaeg ei ole mudeli kohaselt vähem kui viis aastat, kuid võib öelda, et projekt on majanduslikult otstarbekas. Majanduslikult otstarbekaks muudab selle projekti peamiselt elektrienergia säästust tulenev kasu. Energiapaindlikkusteenus tasuvuse osas praegusel kujul tasuvusaega suurel määral ei muuda.

KOKKUVÕTE

Taastuenergia osakaalu suurenemine toob kaasa väljakutsed elektrisüsteemis tarbimise ning tootmise tasakaalu säilitamise osas, kuna taastuenergia ei ole lihtsasti prognoositav. Lisaks muudab elektrisüsteemis stabiilsuse hoidmise probleemi tõsisemaks 2026. aastal planeeritav Venemaa elektrisüsteemist desünkroniseerimine. Hetkel hoiab Eesti elektrisüsteemi stabiilsena Venemaa elektrisüsteem, kuid peale sünkroniseerimist Mandri-Euroopa elektrisüsteemiga, jääb Eesti elektriliini lõppu, mistõttu muutub võrgu sageduse hoidmine keerulisemaks ning Eesti peab probleemiga peamiselt lokaalsel tasandil tegelema.

Üheks võimalikuks lahenduseks on energiapaindlikkusteenuse pakkumine. Energiapaindlikkusteenuse puhul kompenseerivad elektrisüsteemi puudujääke süsteemi stabiilsuse hoidmise eesmärgil hoonetes paiknevad elektrienergia tarbijad, kohaldades tarbimist vastavalt elektrisüsteemi vajadusele järgides võrgusignaale. Mitmete hoonete tarbijad koondab kokku agregator, mis vahendab antud teenust süsteemioperaatorile.

Käesolev magistritöö käsitleb energiapaindlikkusteenuse rakendatavust büroohoones, selleks vajalike muudatuste tegemist ning teenuse rakendamise majanduslikku mõttekust. Töö käigus tuvastati, et antud hoones sobivad valgustuse ning ventilatsioonisüsteemi seadmed energiapaindlikkusteenuse pakkumiseks. Nende tehnosüsteemide elektrienergia tarbimine moodustab ligi 9% hoone kogutarbimisest. Kuna nende tehnosüsteemide seadmed ning juhtsüsteemid on amortiseerunud, soovitab autor välja vahetada juhitamatud valgustid juhitavate vastu ning juhtida valgustust kohalolu ning päikesevalguse järgi. Ventilatsiooniseadmetes muudatusi teha ei ole tarvis, kuid muudatused on vaja sisse viia juhtsüsteemidesse, et juhtida ventilatsiooni kohalolu järgi.

Muudatuste majandusliku otstarbekuse hindamiseks koostas autor arvutusmudeli, mis võimaldab hinnata kaudselt energiapaindlikkusteenuse jaoks tehtavate muudatuste tasuvusaega. Mudeli sisenditeks on peamiselt valgustuse ja ventilatsiooni aastane elektrienergia tarbimine, inimeste arv hoones, elektrienergia hind, mFRR reguleerimiste hind ja tehnosüsteemides tehtud muudatuste maksumus. Mudeli väljunditeks on peamiselt elektrienergia pealt säästetud summa suurus, energiapaindlikkuse potentsiaal tehnosüsteemides ning sellest tulenev majanduslik tulu. Samuti on väljundi põhjal võimalik hinnata tasuvusaega võttes esmase investeeringu tegemiseks laenu, kui viia muudatused tehnosüsteemidesse sisse ka ilma laenuta. Mudelis on kitsendusteks normdokumentidest tulenevad mugavuspiirid hoone sisekliimale.

Näidishoones energiapaindlikkusteenuse rakendamise tulemusena väheneb elektrienergia tarbimine valgustuse ja ventilatsioonisüsteemi lõikes ligi 54%, mistõttu on võimalik elektrienergialt säästa ligi 13 850 eurot esimesel aastal. Energiapaindlikkusteenusest saadav tulu on 598 eurot. Tasuvusajaks on ilma laenuta esmase investeeringu finantseerimise korral 6 aastat ning laenuga finantseerimise korral natukene üle 7 aasta, seega töös püstitatud hüpotees ei leidnud kinnitust - tasuvusaeg ei ole vähem kui 5 aastat. Energiapaindlikkusteenusest tulenev majanduslik kasu on marginaalne ning tasuvusaeg ei sõltu energiapaindlikkusteenusest kuigi palju, kuid siiski on projekt tasuv ning majanduslikult mõttekas. Toetudes väljatoodud tulemustele on võimalik öelda, et töö eesmärk on edukalt täidetud ning mudeliga on võimalik kaudselt hinnata energiapaindlikkusteenuse pakkumise majanduslikku otstarbekust büroohoones.

Töö edasiarenduseks tuleks muuta mudelit dünaamilisemaks, et sellega oleks võimalik hinnata erineva kasutusotstarbega hooneid ning rohkemaid tehnosüsteeme peale valgustuse ja ventilatsiooni. Selleks tuleks analüüsida teiste tehnosüsteemidega seonduvaid normdokumentides väljatoodud kitsendusi, juhtimispõhimõtteid ning uurida elektrienergia tarbimise sõltuvust hoones viibivate inimeste arvust.

SUMMARY

The increase in the share of renewable energy poses challenges in terms of maintaining the balance of consumption and production in the electricity system, as renewable energy is not easy to predict. In addition, the problem of maintaining stability in the electricity system will be exacerbated by the desynchronization of the Russian electricity system planned for 2026. At the moment, the Russian electricity system keeps the Estonian electricity system stable, but after synchronization with the Continental European electricity system, Estonia will be in the end of the power grid, which will make it more difficult to maintain the network frequency, and Estonia will have to deal with the problem mainly at the local level.

One possible solution is to provide an energy flexibility service. In the case of the energy flexibility service, the shortcomings of the electricity system shall be compensated by the electricity consumers located in the buildings in order to maintain the stability of the system, changing the energy consumption according to the needs of the electricity system following the network signals. Consumers of several buildings are brought together by an aggregator who mediates this service to the system operator.

This master's thesis analyzed the applicability of the energy flexibility service in an office building, making the necessary changes and the economic feasibility of implementing the service. In the course of the work, it was established that the lighting and ventilation system equipment in the demonstration building is suitable for providing energy flexibility services. The electricity consumption of these technical systems makes up almost 9% of the total consumption of the building. As the hardware and control systems of these technical systems are depreciated, the author recommends replacing uncontrolled luminaires with controllable ones and controlling the lighting according to presence and sunlight. No changes need to be made to the ventilation hardware, but changes need to be made to the control systems to control the ventilation by presence.

In order to assess the economic feasibility of the changes, the author developed a calculation model that allows estimating the payback period of the changes made for the energy flexibility service. The inputs to the model are mainly the annual electricity consumption for lighting and ventilation, the number of people in the building, the price of electricity, the cost of mFRR activations and the cost of changes to the technical systems. The outputs of the model are mainly the amount saved on electricity, the potential for energy flexibility in technical systems and the resulting economic benefits. Based on the output, it is possible to estimate the payback period in case of financing the project with a loan, or in case of not financing the project with a loan. The restrictions

in the model are the comfort limits for the indoor climate of the building, set in the normative documents.

As a result of the implementation of the energy flexibility service in the demonstration building, the consumption of electricity in terms of lighting and ventilation system will be reduced by almost 54%, which will save almost 13,850 euros in electricity in the first year. The revenue from the energy flexibility service is 598 euros. The payback period is 6 years in the case of financing the initial investment without a loan and a little over 7 years in the case of financing with a loan, so the hypothesis set in the work was not confirmed and the payback period of the project is not less than 5 years. The economic benefits of the energy flexibility service are marginal and the payback period does not depend much on the energy flexibility service, but the project is still cost-effective and economically viable. Based on the presented results, it is possible to say that the aim of the work has been successfully fulfilled and the model can indirectly assess the economic feasibility of providing energy flexibility services in an office building.

To further develop the work, the model should be made more dynamic so that it can evaluate buildings with different profiles and more technical systems besides lighting and ventilation. To this end, the restrictions set out in the normative documents related to other technical systems, management principles and the dependence of electricity consumption on the number of people in the building should be analyzed.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] „Energiamajanduse arengukava aastani 2030“. 20.10.2017. [Võrgumaterjal].
https://www.mkm.ee/sites/default/files/enmak_2030.pdf.
[Kasutatud 02.02.2022].
- [2] Euroopa Parlament, „EL ja Pariisi kliimakokkulepe: kliimaneutraalsuse saavutamine“.
21.10.2021. [Võrgumaterjal].
<https://www.europarl.europa.eu/news/et/headlines/society/20191115STO66603/el-ja-pariisi-kliimalepe-kliimaneutraalsuse-saavutamine>. [Kasutatud 02.02.2022].
- [3] „Eesti riiklik energia- ja kliimakava aastani 2030 (REKK 2030)“. 19.12.2019.
[Võrgumaterjal].
https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/ee_final_necp_main_ee.pdf. [Kasutatud 02.02.2022].
- [4] H. Lustfeld, „Controlling volatility of wind-solar power“ **European Economic Review**, Peter Grünberg Institut (PGI- 1), Jülich, Saksamaa, 2021.
- [5] Elering „Sünkroniseerimine Mandri-Euroopaga“. [Võrgumaterjal].
<https://elering.ee/sunkroniseerimine>. [Kasutatud 03.02.2022].
- [6] E. Valgemäe, „EESTI ELEKTRISÜSTEEMI ÜMBERSÜNKRONISEERIMISE VÕIMALIKUD RISKID“, Magistritöö, Eesti maaülikool, Tartu, 2019. [Kasutatud 03.02.2022].
- [7] Tarbijakaitse- ja tehnilise järelevalve amet, „Hoonete energiatõhusus“ 16.12.2020.
[Võrgumaterjal].
<https://ttja.ee/ariklient/ehitised-ehitamine/energiatohusus> [Kasutatud 05.02.2022].
- [8] I. Vigna, R. Perneti, W. Pasut, R. Lollini, „Literature review on energy flexibility definitions and indicators for building clusters“, **IEA EBC Annex 67**, 2018.
- [9] Electric Power Research Institute EPRI, „Electric power system flexibility challenges and opportunities“ [Võrgumaterjal].
<https://www.naseo.org/Data/Sites/1/flexibility-white-paper.pdf> [Kasutatud 07.05.2022].

- [10] International Renewable Energy Agency IRENA, „Demand-side Flexibility For Power Sector Transformation“ [Võrgumaterjal] https://www.irena.org/-/62utuur/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Dec/IRENA_Demand-side_flexibility_2019.pdf [Kasutatud 07.05.2022]
- [11] Dr. G. Papaefthymiou, K. Grave, K. Dragoon, „Flexibility options in electricity systems“, **Ecofys**, POWDE14426, 2014.
- [12] R. G. Junker, A. G. Azar, R. A. Lopes, K. B. Lindberg, G. Reynders, R. Relan, H. Madson, „Characterizing the energy flexibility of buildings and districts“ **Applied Energy**, 225, pp 175-182, 2018.
- [13] A. Mugnini, F. Polonara, A. Arteconi, „Energy flexibility in residential buildings clusters“, E3S Web of Conferences, 197, 2020.
- [14] J. Mikulik, „Energy Demand Patterns in an Office Building: A Case Study in Kraków“, Sustainability, 10 (8), 2018.
- [15] A. Kathirgamanathan, M. De Rose, E. Mangina, D. P. Finn, „Data-driven predictive 62utuure for unlocking building energy flexibility: A review“, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 135, 2021.
- [16] I. Drovtar, „Demand Side Management Possibilities and Viability for Voltage Support Services in Estonia“, **THESIS ON POWER ENGINEERING, ELECTRICAL ENGINEERING, MINING ENGINEERING D78**, 2016.
- [17] International Smart Grid Action, „Flexibility needs in the 62utuure power system,“ 2019. [Võrgumaterjal]. http://www.iea-isgan.org/wp-content/uploads/2019/03/ISGAN_DiscussionPaper_Flexibility_Needs_In_Future_Power_Systems_2019.pdf [Kasutatud 01.03.2022].
- [18] L. Gelazanskas, K. A. A. Gamage, „Demand side management in smart grid: A review and proposals for future direction“, **Sustainable Cities and Society**, 11, pp 22-30, 2014.
- [19] H. Li, Z. Wang, T. Hong, M. A. Piette, „Energy flexibility of residential buildings: A systematic review of characterization and quantification methods and applications“, **Advances in Applied Energy**, 3, 2021.
- [20] P. V. K. Andersen, S. Georg, K. Gram-Hanssen, P. K. Heiselberg, A. Horsbøl, K. Johansen, H. Johra, A. Marszal-Pomianowska, E. S. Møller, „Using residential buildings to manage flexibility in the district heating network: perspectives and 62utuure visions from sector professionals“, **Conference: Nordic Conference on Zero Emission and Plus Energy Buildings**, 2019.

- [21] Elering, „Paindlikkusturg“ [Võrgumaterjal]. <https://elering.ee/paindlikkusturg>. [Kasutatud 04.02.2022].
- [22] L. Hõrak, „Paindlikkuse rakendamise võimalused ja kasutamine Eesti elektrisüsteemis“, Magistritöö, 2020.
- [23] K. Kürsa, M. Arak „Näidishoone energiasäästmislahenduste audit“ (pealkiri muudetud), Audit, 2021.
- [24] A. R. Coffman, Z. Guo, P. Barooah, „Characterizing capacity of flexible loads for providing grid support“, University of Florida, 2020.
- [25] A. Rosin, I. Drovtar, S. Link, H. Hõimoja, H. Mölder, T. Möller, „Tarbimise juhtimine“, **Elering**, 2014.
- [26] K. Pääbo, „Agregaatorite osalemine võimsusturul ja süsteemiteenustes“, Bakalaureusetöö, 2019.
- [27] A. A. Williams, B. A. Atkinson, K. Garbesi, F. M. Rubinstein, E. Page, „A Meta-Analysis of Energy Savings from Lighting Controls in Commercial Buildings“, **Energy Efficiency Standards Group**, 2011.
- [28] S. Levašov, „Ühiskondliku hoone üldvalgustus ja selle energiaefektiivsuse parendamine“, Magistritöö, 2014.
- [29] Baltic Transparency Dashboard, „Normal activations – mFRR“ [Võrgumaterjal]. <https://baltic.transparency-dashboard.eu/node/36>. [Kasutatud 02.05.2022].

LISAD

Lisa 1. Näidishoone struktuurskeem

