



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

TALTECH NRG ÕPPEHOONE ELEKTRI KVALITEEDI JA REAKTIIVENERGIA KOMPENSEERIMISE VAJADUSE ANALÜÜS

ANALYSIS OF POWER QUALITY AND REACTIVE ENERGY COMPENSATION
NECESSITY FOR TALTECH NRG STUDY BUILDING

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Aleksandr Mesilane

Üliõpilaskood: 111095

Juhendaja: Vahur Maask, doktorant-nooremteadur

Kaasjuhendaja: Argo Rosin, professor

Tallinn, 2020

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi ega inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

20.05.2020

Autor: /allkirjastatud digitaalselt/

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetööle esitatud nõuetele

“.....” 2020

Juhendaja: /allkirjastatud digitaalselt/

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”2020

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Aleksandr Mesilane

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: TalTech NRG õppehoone elektri kvaliteedi ja reaktiivenergia kompenseerimise vajaduse analüüs

Kuupäev: 20.05.2020

60 lk

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: inseneriteaduskond

Instituut: elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendajad: doktorant-nooremteadur Vahur Maask, professor ja teadusprodekaan Argo Rosin (kaasjuhendaja).

Töö konsultandid: Toomas Vinnal – insener, TTÜ elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut. Aleksandr Böstrov – tootegrupijuht, AS Viru Elektribandus.

Sisukirjeldus:

Lõputöö eesmärk on uurida TalTech NRG õppehoone elektri kvaliteeti ja reaktiivenergia tarbimist, hinnata reaktiivenergia kompenseerimise vajadust ja pakkuda meetmeid, mida võib rakendada elektri kvaliteedi parendamiseks.

Mõõtmiseks kasutati peamiselt võrguanalüsaatorit Chauvin Arnoux C.A 8334B. Saadud mõõtmistulemuste põhjal tehakse tarbitud võimsuste analüüs ning elektri kvaliteedi mõõdetud näitajate standardile (EVS-EN 50160:2010 Avalike elektrivõrkude pinge tunnussuurused) vastavuse analüüs.

Lõputöö koosneb kolmest osast. Esimeses osas on uuritava hoone elektripaigaldise ülevaade, kasutuses olevate elektriseadmete liigitus ja tarbimise ajalugu. Teises osas on kirjeldatud valitud mõõtemetoodika, mõõtmiste teostamine ja toodud tulemused. Kolmandas osas pakutakse lahendusi, mis aitaksid teha NRG õppehoone reaktiivenergia võimsustegurit ja elektri kvaliteeti paremaks. Lõputöös tehtavat analüüsi saab kasutada tehnikaülikoolis elektritarbimistasude vähendamiseks ja rikete ennetamiseks elektripaigaldises.

Märksõnad: reaktiivenergia, elektri kvaliteet, kompenseerimine, harmoonikud, kogumoonutustegur, võimsustegur, asümmeetria, reaktiivvõimsus, standard

ABSTRACT

Author: Aleksandr Mesilane

Type of the work: Bachelor Thesis

Title: Analysis power quality and reactive energy compensation necessity for TalTech NRG Study Building

Date: 20.05.2020

60 pages

University: Tallinn University of Technology

School: School of Engineering

Department: Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

Supervisor(s) of the thesis: Professor and Vice-Dean for Research Argo Rosin, Early Stage Researcher Vahur Maask

Consultant(s): Toomas Vinnal – engineer, Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics; Aleksandr Böstrov – product group manager, AS Viru Elekrikaubandus.

Abstract: The aim of the following thesis, Analysis of power quality and reactive energy compensation necessity for TalTech NRG Study Building, was to study power quality and reactive energy consumption, to evaluate the need for reactive energy compensation and offer measures that can be taken to improve power quality.

Chauvin Arnoux C.A 8334B network analyzer was mainly used for measurements. Based on the obtained measurement results, the power consumption is analyzed and based on standard's measured quality of electricity (EVS-EN 50160:2010 Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks), compliance analysis is made.

The main part of the thesis consists of three parts. The first part gives an overview of the electrical installation of the building that is under study, classification and history of electrical equipment being in use. The second part describes the chosen measurement methodology, the performed measurements and the results. The third part offers solutions that would help to improve the reactive energy power factor and power quality of the NRG study building. The analysis performed in the thesis can be used by TalTech to reduce electricity consumption charges and prevent faults in the electrical installations.

Keywords: reactive energy, power quality, compensating, harmonics, THD, total harmonics distortion, power factor, voltage unbalance, reactive power, standard

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	TalTech NRG õppehoone elektri kvaliteedi ja reaktiivenergia kompenseerimise vajaduse analüüs
Lõputöö teema inglise keeles:	Analysis of power quality and reactive energy compensation necessity for TalTech NRG building
Üliõpilane:	Aleksandr Mesilane, 111095
Eriala:	elektriamid ja jõuelektroonika
Lõputöö liik:	bakalaureusetöö
Lõputöö juhendaja:	Vahur Maask
Lõputöö kaasjuhendaja	Argo Rosin
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	27.05.2020
Lõputöö esitamise tähtaeg:	20.05.2020

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

1. Teema põhjendus

Elektri kvaliteedi madal tase mõjutab elektripaigaldise stabiilsust, -tarbimist, -seadmete töökorda ja eluiga, olles majandusliku kahju tekitamise põhjuseks. Reaktiivenergia tarbimise tasud kuuluvad ettevõtte võrgutasude hulka, selle eest makstava tasu vähendamiseks võib paigaldada tarbimiskohta reaktiivenergia kompensaatori.

Õppekorpuses elektritöid teostavate ning seadmeid haldavate isikute hinnangul on hoones elektri kvaliteet puudulik. Antud lõputöö selgitab välja Tallinna Tehnikaülikooli (TTÜ) NRG õppehoone (edaspidi NRG õppehoone) elektri kvaliteedi olukorra, hindab selle nõuetele vastavust ning pakub välja võimalikke lahendusi selle parandamiseks. NRG õppehoone elektripaigaldises ei kasutata

reaktiivenergia kompenseerimist, mistõttu antud lõputöö hindab selle vajalikkust ning teostab kompensaatorite lisamise majandusliku analüüsi. NRG õppehoones ei ole varasemalt teostatud sarnast hinnangut elektri kvaliteedi suhtes ning puudub ülevaade energiatarbimise kohta. Antud lõputöös tehtavat analüüsi saab kasutada TTÜs elektritarbimise tasude vähendamiseks ning rikete ennetamiseks elektripaigaldises.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärk on uurida NRG õppehoone elektri kvaliteeti ja reaktiivenergia tarbimist.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

1. Analüüsida NRG õppehoone elektrienergia tarbimist.
2. Analüüsida NRG õppehoone elektri kvaliteeti.
3. Hinnang hoone energiatõhususe tõstmiseks reaktiivenergia kompenseerimise abil.
4. Hinnang elektri kvaliteedi parendamisele filtri abil.

4. Lähteandmed

1. Hoone elektripaigaldise projektdokumentatsioon.
2. Objekti tarbimisajalugu jaotusvõrgu ettevõtte andmelaost.
3. Teemaga seotud juhendid, raamatud ja teadusartiklid.

5. Uurimismeetodid

NRG õppehoone projektdokumentatsiooni kogumine ja objekti vaatlus.

Elektri kvaliteedi ja reaktiivenergia mõõtmine madalpinge liitumispunktis.

Mõõtmistulemuste analüüs.

NRG hoones töötavate isikute ankeetküsitlus.

Mõõtetulemuste esmaseks analüüsiks kasutatakse mõõteriistade tarkvarasid.

Vajalike arvutuste teostamiseks plaanitakse põhiliselt kasutada tabelarvutustarkvara MS Excel.

6. Graafiline osa

Valitud elektripaigaldise kirjeldamiseks ja tasuvusanalüüsi tulemuste kujutamiseks kasutatakse tabelleid ning jooniseid. Graafika paikneb peamiselt töö põhiosas, kuid osa on ka lisades.

Graafilise osa täpne loetelu (joonised, tabelid ja skeemid) selgub töö käigus.

7. Töö struktuur

Sisukord

Lõputöö ülesanne

Eessõna

Sissejuhatus

1. Objekti kirjeldus
 - 1.1 Elektripaigaldis
 - 1.2 Õppekorpuses kasutatavad tarvitid
 - 1.3 Elektritarbimise ajalugu
2. Mõõtmised ja mõõtetulemuste analüüs
 - 2.1 Mõõtemetoodika ja -seadmed
 - 2.1.1 Mõõteseade
 - 2.1.2 Analüüsiks vajalik tarkvara
 - 2.1.3 Mõõtmiste teostamine
 - 2.2 Reaktiivenergia
 - 2.2.1 Reaktiivenergia teoreetiline käsitlus
 - 2.2.2 Reaktiivenergia mõõtmised
 - 2.3 Elektri kvaliteet
 - 2.3.1 Elektri kvaliteeti teoreetiline käsitlus
 - 2.3.2 Elektri kvaliteeti mõõtmised
3. Ettepanekud energiatõhususe tagamiseks
 - 3.1 Kondensaatorseadmed
 - 3.2 Harmoonikute filtrid
4. Kokkuvõte

Kasutatud kirjandus

Lisad

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Lõputöös on plaanitud kasutada järgmised allikad: raamatud, juhendid, küsitlus.

Lõplikus versioonis kasutatud kirjanduse allikate nimekiri saab täiendatud.

1. Jaotusvõrgud. Mati Meldorf, Heiki Tammoja, Ülo Treufeldt, Jako Kilter. Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2007.

2. EATON Technical Data SA02607001E (Effective August 2014).
3. Aruanne Nr 19062. Toitepinge kvaliteet Eesti 0,4 kV madalpingevõrkudes ja tarbijapaigaldiste liitumispunktides. Toomas Vinnal. Tallinn, 2013.
4. Electricity Consumption Analysis and Power Quality Monitoring in Commercial Buildings. Drovtar, I.; Niitsoo, J.; Rosin, A.; Kilter, J.; Palu, I. Tallinna Tehnikaülikool, energeetikateaduskond, elektroenergeetika instituut, kõrgepingetehnika õppetool; Tallinna Tehnikaülikool, energeetikateaduskond, elektrotehnika instituut, elektriagamite ja jõuelektroonika instituut; Elering AS, 2012 (https://www.etis.ee/CV/Argo_Rosin/est?tabId=Publications).

9. Lõputöö konsultandid

Toomas Vinnal: insener, TTÜ elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut.

Aleksandr Böstrov: tootegrupijuht, AS Viru Elektribandus.

10. Töö etapid ja ajakava

- Lähteandmete kogumine (10.02.2020)
- Objekti kirjeldus (17.02.2020)
- Lõputöö ülesande esitamine (02.03.2020)
- Mõõtmised ja mõõtmistulemuste analüüs (24.04.2020)
- Eksternina lõputöö kaitsja: bakalaureusetöö kaitsmiseks eksterni lepingu sõlmimine dekanaadis (04.05.2020)
- Kokkuvõtte koostamine (08.05.2020)
- Juhendajale läbilugemiseks saatmine (08.05.2020)
- Bakalaureusetöö kaitsmistaotluse esitamine ÕIS-s (11.05.2020)
- Paranduste sisseviimine (15.05.2020)
- Juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine (15.05.2020)
- Töö lõplik versioon valmis (18.05.2020)
- Lõputöö (elektroonne versioon) esitamise tähtaeg (20.05.2020)

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE.....	3
ABSTRACT	4
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	5
EESSÕNA.....	11
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	12
SISSEJUHATUS	13
1. OBJEKTI KIRJELDUS.....	15
1.1 Elektripaigaldis.....	16
1.2 Õppekorpuses kasutatavad tarvitid.....	17
1.3 Elektritarbimise ajalugu	18
2. MÕÕTMISED JA MÕÕTETULEMUSTE ANALÜÜS	22
2.1 Mõõtemetoodika ja -seadmed	22
2.1.1 Mõõteseade	23
2.1.2 Analüüsiks vajalik tarkvara	25
2.1.3 Mõõtmiste teostamine	26
2.2 Reaktiivenergia	28
2.2.1 Reaktiivenergia teoreetiline käsitlus.....	28
2.2.2 Aktiiv- ja reaktiivenergia mõõtmised	30
2.3 Elektri kvaliteet	33
2.3.1 Elektri kvaliteedi teoreetiline käsitlus.....	33
2.3.2 Elektri kvaliteedi mõõtmised	33
3. ETTEPANEKUD ENERGIATÕHUSUSE TAGAMISEKS.....	41
3.1 Kondensaatorseadmed	41
3.2 Harmoonikute filtrid	44
KOKKUVÕTE	48

SUMMARY	49
KASUTATUD KIRJANDUS	50
LISAD	55
Lisa 1 NRG õppehoones kasutatavad tarvitid	56
Lisa 2 NRG õppehoone vent.seadmete töögraafik	57
Lisa 3 Hinnapakkumine I sektsiooni passiivfiltrile.....	58
Lisa 4 Hinnapakkumine II sektsiooni passiivfiltrile.....	59
Lisa 5 Aktiivfiltri hinnapakkumine	60

EESSÕNA

Tallinna Tehnikaülikooli (TalTech) kodulehel avaldati TTÜ õppekorpuste energiasäästu ja/või tarbimise juhtimisvõimaluste analüüs. Juhendajaks valiti Tallinna Tehnikaülikooli doktorant-nooremteadur Vahur Maask ja kaasjuhendajaks professor Argo Rosin. TTÜ energeetikamaja õppekorpuses (edaspidi NRG õppehoone) elektritoid teostavate ning seadmeid haldavate isikute hinnangul on hoones elektri kvaliteet puudulik. Lõputöö juhendaja ja kaasjuhendajaga toimunud koosolekutel täpsustati lõputöö teema. Uueks lõputöö teemaks sai TTÜ NRG õppekorpuse elektri kvaliteedi ja reaktiivenergia kompenseerimise vajaduse analüüs.

Põhilised algandmed (projektid, elektrienergia arved) kogus lõputöö autor ülikooli hooldustalituse hoolduse peaspetsialist Andres Beek'i ja doktorant-nooremteadur Vahur Maask'i abiga. Lõputöö autor teostas mõõtmised NRG õppekorpuse peajaotuskeskuses TTÜ hooldustalituse hooldusspetsialisti Arvi Lugenberg ja doktorant-nooremteaduri Vahur Maask järele vaatamisel. Mõõteriistade edastamise eest avaldab töö autor tänu doktorant-nooremteadur Vahur Maask'ile. Lõputöö autor tänab samuti Viru Elektribandus AS-i (tooterühmajuht Aleksandr Böstrov) mõõtmisteks antud kaasaskantava võrguanalüsaatori CIR-e3 eest. Konsultatsioonidega aitasid Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi insener Toomas Vinnal ja Viru Elektribandus AS-i tooterühmajuht Aleksandr Böstrov.

Autor tänab kõiki, kes käesoleva lõputöö valmimisele kaasa aitasid. Erilised tänusõnad doktorant-nooremteadur Vahur Maask'ile kui töö juhendajale ja professor Argo Rosin'ale kui töö kaasjuhendajale asjakohaste märkuste ja nõuannete eest, mis on olnud suureks abiks lõputöö kirjutamisel.

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

<i>BMS</i>	Building Managment System - hoone haldus- juhtimissüsteem
<i>DPF</i>	põhiharmooniku võimsustegur, ehk $\cos \phi$
<i>Mõõtur</i>	Mõõteseade. Antud juhul võrguanalüsaator
<i>PJK</i>	Peajaotuskilp - elektrotehniliste komponentide kokkupandud üksus. Tavaliselt koosneb mitmest põrandale paigaldatud kapidest. Seda kasutatakse elektrienergia vastuvõtmiseks, mõõtmiseks ja jaotamiseks. [1]
<i>Tarviti</i>	mistahes elektriseade, milles toimub elektrivälja energia muundamine mehaaniliseks, soojuslikuks või mõneks teiseks energialiigiks. Tarvititeks on näiteks elektrilised valgustid ja küttekehad, pesumasinad, elektrimootorid, arvutid, raadiod ja mõõteriistad. Vooluallikad ise ei ole tarvited. Tarviteid on võimalik ühendada vooluvõrku kas jadamisi või rööbiti. [2]
<i>TalTech</i>	Tallinna Tehnikaülikool
<i>THD</i>	kogumoonutustegur (<i>total harmonic distortion</i>)
<i>TPF</i>	tegelik võimsustegur (<i>true power factor</i>)
<i>1P2W</i>	Ühe faasiline kahejuhtmeline (<i>Single-phase two-wire</i>)
<i>3P3W</i>	Kolme faasiline kolmejuhtmeline (<i>Three-phase three-wire</i>)
<i>3P4W</i>	Kolme faasiline neljajuhtmeline (<i>Three-phase four-wire</i>)

SISSEJUHATUS

Elektri kvaliteet mõjutab majanduslikult elektrisüsteemi, võrguettevõtete seadmete ja kõigi elektritarbijate tööd. [3] Elektri kvaliteedi madal tase mõjutab elektripaigaldise stabiilsust, -tarbimist, -seadmete töökorda ja eluiga, olles sageli majandusliku kahju tekitamise põhjuseks. Kõrgeimate harmoonikute levimine elektrivõrgus mõjutab elektritarbijate elektrivarustuskindlust. Harmoonikute olemasolu elektrivõrgus räägib voolu või pinget moonutatud kujust. Voolu või pinget moonutamine tähendab aga häirete olemasolu jaotusvõrgus, mis halvendab elektri kvaliteeti. Harmoonikute allikatena on mittelineaarsed koormused, mis on ühendatud elektri jaotusvõrku. Vooluharmooniliste voog võrgus, millel on näivtakistus, viib pingeharmoonikute ilmumise ja vastavalt toitepinge kuju muutumiseni. [4]

Elektrisüsteemi töökindluse ja investeeringute paremaks hindamiseks on vajalik reaktiivenergia kompenseerimise analüüs. Reaktiivenergia kompenseerimise vajalikkust rõhutati energeetikateaduskonna hoone tehnilise projekti elektritööde tehnilises kirjelduses: „Kondensaatorseadmete paigaldamise otstarbekus ja reaktorite vajadus neis otsustatakse peale objekti eksploatatsiooni andmist mõõtmistulemuste ja majandusliku analüüsi põhjal [5, p. 4.6].“ Teema on **aktuaalne**, kuna seni ei ole nimetatud analüüsi tehtud ega õppekorpuse elektripaigaldises reaktiivenergia kompenseerimist kasutatud.

Käesolevas lõputöö **eesmärk** on uurida NRG õppehoone elektri kvaliteeti ja reaktiivenergia tarbimist ja hinnata kompenseerimise vajadust.

Eesmärgi saavutamiseks on püstitatud järgmised **uurimisülesanded**:

1. Analüüsida NRG õppehoone elektrienergia tarbimist.
2. Analüüsida NRG õppehoone elektri kvaliteeti.
3. Hinnang hoone energiatõhususe tõstmiseks reaktiivenergia kompenseerimise abil.
4. Hinnang elektri kvaliteedi parendamisele filtri abil.

Lõputöö koosneb **kolmest osast**. Esimeses osas kirjeldatakse objekti ja selle elektrisüsteeme. Teises osas räägitakse mõõtmisest, **mõõtemetoodikast**, tutvustatakse mõõteseadet ning teostatakse mõõteandmete põhjal elektri kvaliteedi ja reaktiivenergia kompenseerimise vajaduse analüüs. Kolmandas osas esitatakse ettepanekud energiatõhususe tagamiseks erinevate meetmetega.

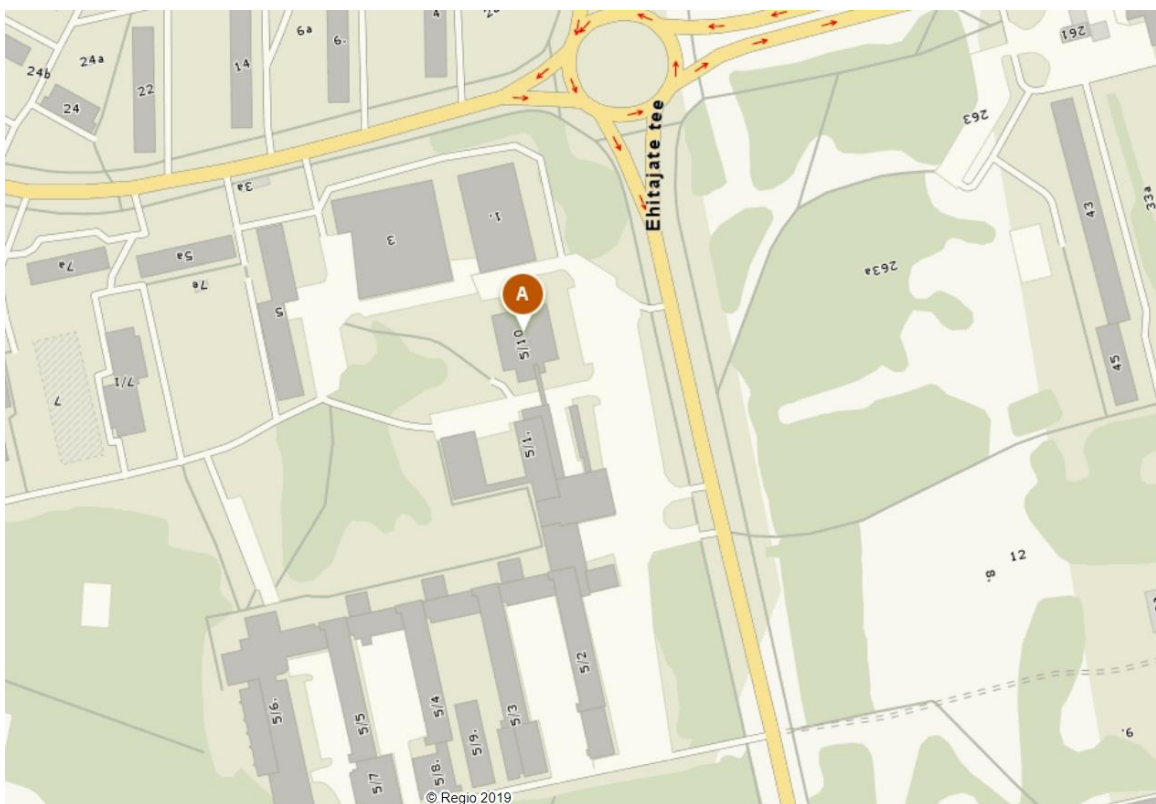
Tekstis olevates lisades on toodud jaotuskilpide loetelu, joonised ja tabelid. Graafiline osa esitatakse peamiselt töö põhiosas ning osaliselt ka lisades.

Käesolevas lõputöös püüab autor leida lahendusi, mis aitaksid teha NRG õppehoone reaktiivenergia võimsustegurit ja elektri kvaliteeti paremaks. Lõputöös tehtavat analüüsi saab kasutada TTÜs elektritarbimise tasude vähendamiseks ning rikete ennetamiseks elektripaigaldises.

1. OBJEKTI KIRJELDUS

Elektri kvaliteedi uurimiseks lõputöö autor valis NRG õppekorpuse.

NRG õppekorpuse ehitustööid Tallinna aadressil Ehitajate tee 5 [joonis 1] alustati 2002. ja lõpetati 2004. aastal. Kahe aasta jooksul valmis Tallinna Tehnikaülikooli peamaja kõrval energeetikateaduskonna maja, VII õppehoone. Ehitusprojekti maksumus oli 4,3 miljonit eurot ning õpperuumide ja teaduslaborite kaasagseks sisustamiseks kavatseni investeerida veel ligi 1,3 miljonit eurot. [6]



Joonis 1. Uuritav hoone kaardil [7]

Kuuekorruselises energeetikamajas asuvad elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut, inseneriteaduskonna dekanaat, rektoraat ja nõukogu saal. [8]

Hoone üldpindala on 5855 m², ruumid asuvad seitsmel tasemel, 0 - 5 korrusel asuvad kabinetid, laborid ja õppeklassid. Kuuendal korrusel on rektoraat ning ventilatsiooni- ja jahutusseadmed. [9]

NRG maja elektripaigaldise projekteeris Contactus AS, kes koostas 2002. aastal nõutud dokumentatsiooni, sh tehnilise kirjelduse [5] ja projekti. Remet AS ehitas NRG maja elektripaigaldise.

Ehitisregistri andmete järgi ehitisealune pind on 1396 m² ja suletud netopind on 5940 m². [10]

1.1 Elektripaigaldis

Elektripaigaldis on elektrienergia tootmiseks, edastamiseks, muundamiseks, mõõtmiseks, müügiks või tarbimiseks kasutatavate seadmete, juhtide ja tarvikute paigaldatud talitluslik kogum. [11]

Elektripaigaldise ülevaade põhineb NRG õppehoone elektroonsel projektdokumentatsioonil, joonistel TTÜ arhiivist ning paber kandjal elektrikilpide juures. Tööprojektid ja teostusjoonised elektroonilises vormis. Projektdokumentatsiooni alusel lõputöö autor koostas kilpide loetelu, kuhu sisestas kilpide nimetused ja projektijärgsed asukohad. Reeglina kilbi nimi numbriline osa vastab NRG õppehoone ruumi numbrile, kuid on ka erandeid. Autor kontrollis kilpide loetelu järgi kõik elektrikilbid, kuhu pääses ligi, ning vajadusel täiendas kilpide loetelu. Kohapeal oli kontrollitud kilbijooniste olemasolu ja vastavus tegelikkusele.

Elektrivarustus

NRG õppehoone elektrivarustus on teostatud hoonesse sisseehitatud alajaamast nr 784 kahest õlijahutusega trafost (6/0,4 kV; 630 kVA) kaabelliinidega pingel 3x230/400 V. Alajaam ning 0,4 kV jaotla asuvad hoone esimesel korrusel. Vastavalt tehnilistele tingimustele asub liitumispunkt projekteeritava alajaama 6 kV jaotusseadmes trafode toitekaablite väljundklemmidel. Alajaam 784 saab toite jaotusalajaama nr 1212 (Ehitajate tee 5) 6 kV jaotusseadmest. [5]

Elektrienergia arvestus

Elektrienergia kommertsarvestus toimub alajaama 6 kV poolel trafode toitekaablite väljundklemmidel. [5]

Peajaotuskilp

Alajaama 0,4 kV jaotusseade on NRG õppehoone peajaotuskilp (PJK). PJK on kahesektsiooniline. Mõlemal sektsioonil on trafofiidrites 3-pooluselised kaitselülitid. PJK-s jäetakse reservkohad kondensaatorseadmete ühendamiseks ja kondensaatorseadmete paigaldamiseks. PJK-st saavad toidet omatarbekilp, grupivõrgu kilbid (grupivõrgu kilpide alla kuuluvad korrusekilbid, rühmakilbid, laborikilbid) ja tarbijad (seadmekilbid või otseühendus).

Grupivõrgu kilbid

Igale laboratooriumile ja töökojale paigaldatud oma grupivõrgu kilp. Omaette grupivõrgu kilbid paigaldatud ka suurtele auditooriumitele (ruumid 131 ja 226) ja arvutiklassile, samuti ventilatsiooniseadmetele, soojusõlmele ning veemõõdusõlmele. Ülejäänud elektrijõuseadmed ja

valgustus on jagatud korruste kaupa gruppidesse, igale korrusele paigaldatud grupivõrgu kilp. Üldjuhul korrusekilpidest saab toite ka laboratooriumite üldvalgustus. Erandiks on kõrgepinge ja elektri kvaliteedi laboratooriumid ning suured auditooriumid 131 ja 226, mille valgustust toidetakse nende grupikilpidest. Grupivõrgu kilbid varustatud 3x16 A ja 1x16 A pistikupesadega. [5]

Reaktiivenergia kompenseerimine

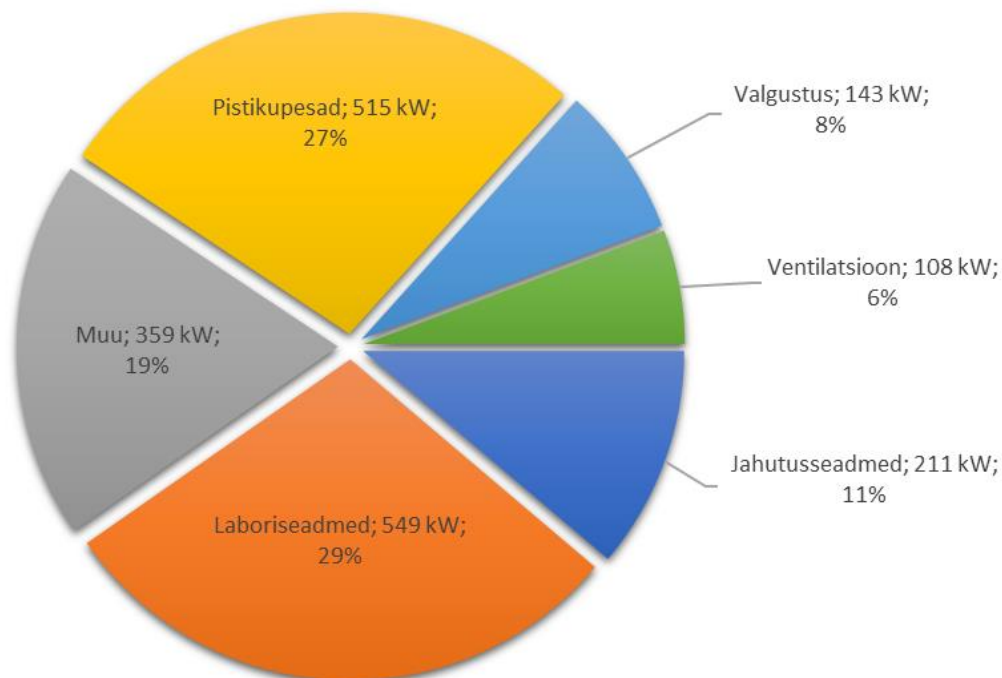
Üle 18 W võimsusega lahenduslampide reaktiivenergia kompenseeritakse valgustites paiknevate kondensaatoritega. Suurte tarbijate reaktiivenergia kompenseerimine pidi toimuma kondensaatorseadmetega alajaamas ning suure võimsusega laboratooriumites ja ventilatsioonikambris grupikilpide juures. Kuid kondensaatorseadmete paigaldamise otstarbekus ja reaktorite vajadus neis otsustatakse pärast objekti eksploatatsiooni andmist mõõtmistulemuste ja majandusliku analüüsi põhjal. [5]

1.2 Õppekorpuses kasutatavad tarvitid

NRG õppehoone kilpide ülevaatamisel saadud jaotuskilpide jooniseid (paber kandjal) ning digitaalsel andmekandjal saadud jooniseid kasutas lõputöö autor NRG õppehoone tarvitite grupeerimisel. Tarvitid on grupeeritud vastavalt tarbija liigile, ehk siis aktiivkoormusega tarvitid on ühes grupis, reaktiivkoormusega teises, valgustus on eraldi grupis jne. Autor koostas tabeli andmetega jaotuskilpide joonistest (kaitsme number, tarbija nimetus, võimsus, kaitsme suurus, juhtmestiku tehnilised andmed) ning liigitas need. Tarbijad ehk tarvitid on liigitatud järgmiselt [joonis 2]:

- Pistikupesad (aktiivenergia tarbijad) – töökoha, koristaja- ja üldpistikupesad, elektrikütteseadmed.
- Pumbad, ventilatsioon, jahutus (mootoriga aktiiv- ja reaktiivenergia tarbijad) – jahutusseadmed, *fancoilid* (jahutusseade), pumbad ja ventilatsiooniseadmed.
- Valgustus (mootorita aktiiv- ja reaktiivenergia tarbijad) – ruumide ja üldalade valgustus, välisvalgustus (sh reklaamvalgustus). Elektritööde tehnilise kirjelduse järgi peavad kõik valgustid olema varustatud kompensaatorseadmega ehk tegelikult valgustuse võimsustegur peaks olema ligikaudu 1.
- Laboriseadmed (erinevad tarbijad laborites) – eriliiki seadmed nagu impulssgeneraatori toide, kõrgepingetrafo, induktsioonigeneraator ja stendikilbid.
- Muu (liigitamata tarbijad) – lift, üliõpilasmaja toide, 0,4 kV jaotla omatarbekilp, välisekraan, hooneautomaatika.

Tarbijate liigitamine on tehtud tarvitite tabeli põhjal [Lisa 1].



Joonis 2. NRG õppehoone arvestuslik võimsus

NRG õppehoone arvestuslik võimsus on kõige suurem laboriseadmetel (549 kW), järgnevad pistikupesad (515 kW) ja muud (liigitamata tarbijad nagu lift, üliõpilasmaja toide, 0,4 kV jaotla omatarbekilp, välisekraan, hooneautomaatika), mille võimsus on 359 kW.

1.3 Elektritarbimise ajalugu

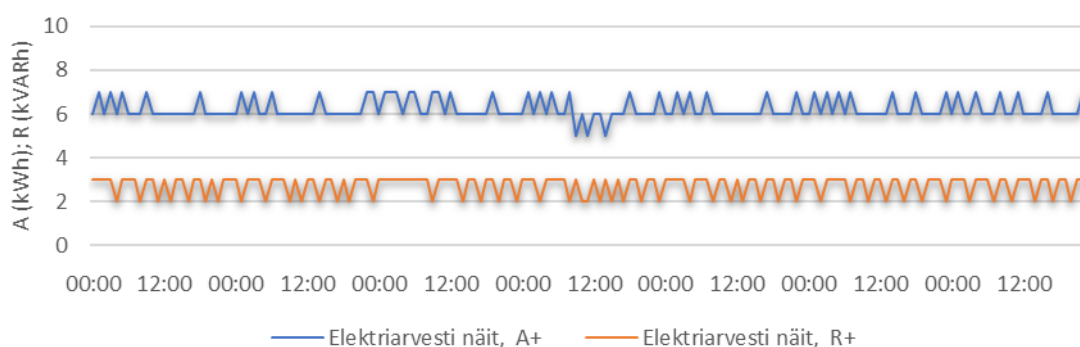
Elektritarbimise ajaloo joonised on tehtud Elektrilevi OÜ NRG õppehoone elektriarvesti näitude põhjal ning 0,4 kV jaotlas sektiooni I ja II sisenditel paigaldatud võrguanalüsaatorite mõõtmiste tulemustel. Elektrilevi andmete järgi mõõdab NRG õppehoone alajaama 784 arvesti nr 38ZEE-00000756-5 NRG õppehoone trafo 1 tarbimist ja arvesti nr 38ZEE-00000759-X trafo 2 tarbimist. [12]

2019. aastal teostas autor NRG õppehoone kogu hoone mõõtmised 7 päeva jooksul alates 20.03 kella 11:00st kuni 27.03 kell 15:00ni. Mõõtmiseks kasutati kahte võrguanalüsaatorit korraga. Pärast mõõtmiste teostamist sai autor TTÜ-st NRG õppehoone Elektrilevi OÜ arvestite näidud tunni

täpsusega perioodil alates 01.2018 kuni 05.2019. Antud perioodil oli reaktiivenergia võrku andmise näit kokku vaid 25 kVARh (04.2018 - 22 kVARh ja 05.2018 -3 kVARh), mis on aasta lõikes väga madal, seepärast jätab autor võrku andmise joonised tegemata.

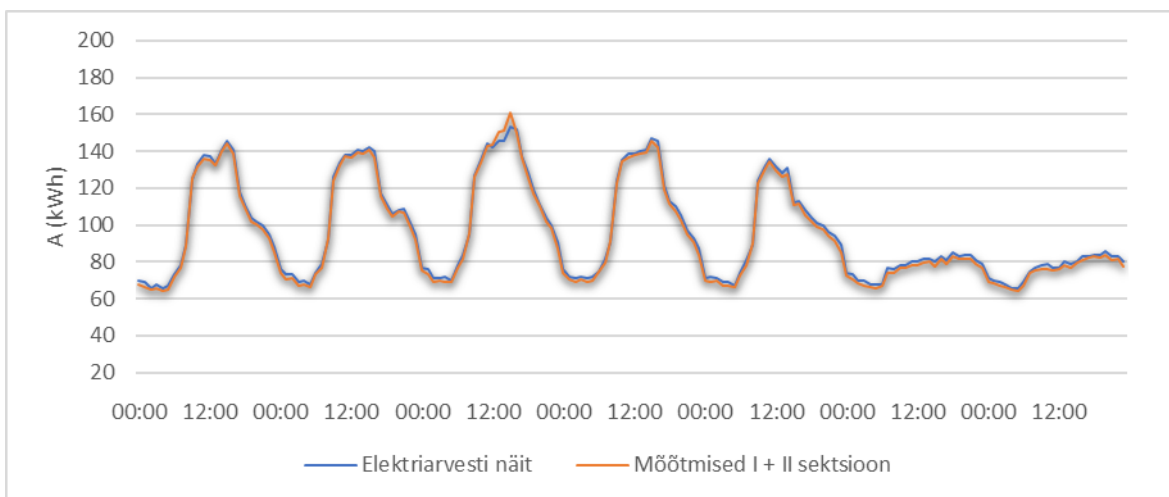
Arvestite näitude analüüsimisel ja võrguanalüsaatori tulemustega võrdlemisest saab järeldada, et kogu NRG õppehoone tarbimine mõõdetaval perioodil toimus läbi Trafo 2 ning läbi Trafo 1 NRG õppehoone 0,4 kV võrgus tarbimist ei olnud.

Trafo 1. Autori hinnangul on Trafo 1 tühijooksu omatarve või muu tarbija autorile teadmata (vt Trafo 1 ligilähedaselt lineaarne tarbimine, joonis 3).



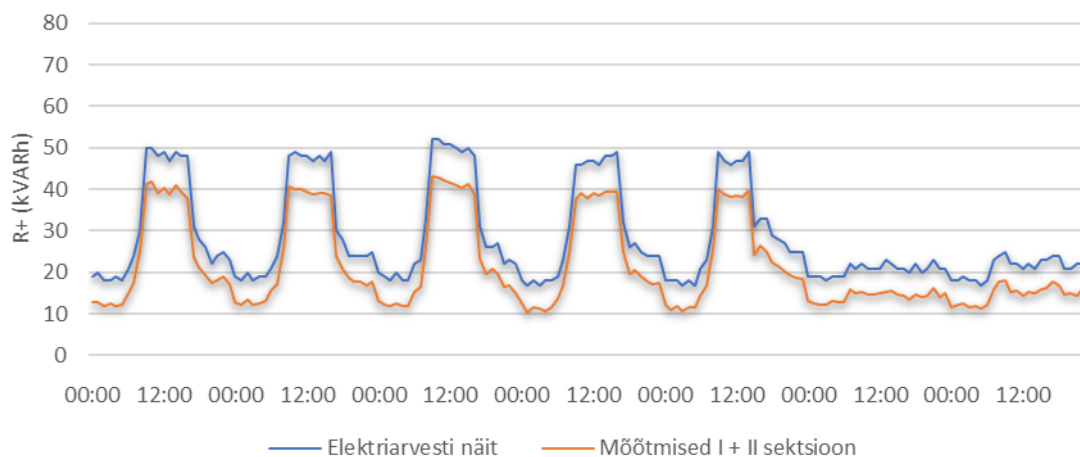
Joonis 3. NRG õppehoone Trafo 1 aktiiv- ja reaktiivenergia, 2019

Trafo 2. Võrguanalüsaatorite mõõtmiste tulemuste ja arvesti näitude analüüsimine näitas, et sektsioonide I ja II mõõtmiste tulemused ei vasta Trafo 1 või Trafo 2 näitudele. Iga 0,4 kV jaotla sektsiooni mõõtetulemus oli suurem kui Trafo 1 näidud ning samal ajal väiksem kui Trafo 2 näidud. Autor liitis kokku sektsioonide mõõtetulemused ja aktiivenergia tulemus sarnanes Trafo 2 arvesti aktiivenergia tarbimise näitudele [joonis 4].



Joonis 4. NRG õppehoone Trafo 2 aktiivenergia, 03.2019

Reaktiivenergia mõõtmiste tulemused on väiksemad kui trafo 2 arvesti näidud [joonis 5]. Joonisel on näha, et liidetud mõõtmiste tulemused kordavad arvestinäidu trendi ca 6 kVARh nihkega alla poole. Autori arvates on nihke põhjuseks trafo 2 energiakadu, sest mõõtmised on teostatud 0,4 kV jaotla sisendil, aga arvesti mõõdab tarbimist keskpinge liinil.

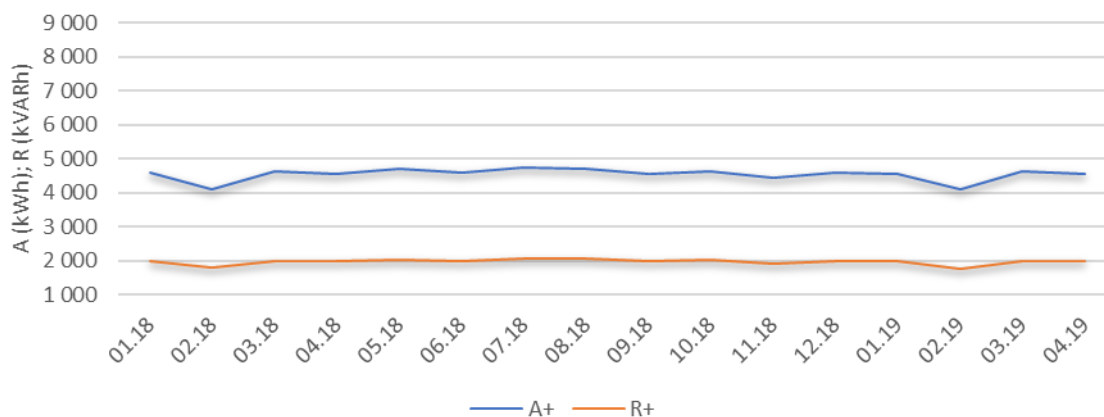


Joonis 5. NRG õppehoone trafo 2 reaktiivenergia, 03.2019

Trafo 2 tarbimise joonistel on tarbimise tõusud ja langused sõltuvalt nädalapäevast ja kellaajast. Reeglina on kõige madalam tarbimine nädalavahetustel ööpäevaringselt ja tööpäevadel kella 23:00-st kuni 7:00-ni. Tööpäevadel kella 7:00-st kuni kella 10:00-ni tarbimine tõuseb keskmiselt 2–2,5 korda ja püsib kõrgel tasemel kuni kella 16:00-ni. Alates kella 16:00-st tarbimine hakkab langema. Tarbimise langus on aeglasem kui hommikune tõus ja lõpeb kell 23:00.

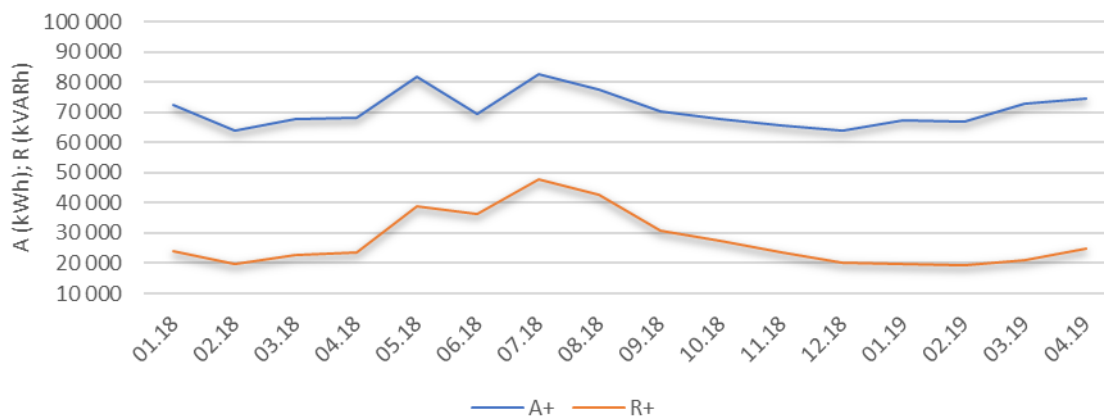
TTÜ ametlik tööpäev on kella 8:30-st kuni kella 17:00-ni. Autori arvates algab NRG õppehoone energiatarbimise tõus kella 7:00-st ventilatsiooniseadmete täiskiirusele käivitamise tõttu vastavalt BMS sätetele, mis on näidatud NRG õppehoone ventilatsiooniseadmete töögraafiku tabelis [Lisa 2].

Aastatarbimise kuude lõikes Trafo 1 joonisel on ligilähedaselt lineaarne tarbimine [joonis 6].



Joonis 6. NRG õppehoone trafo 1 aktiiv- ja reaktiivenergia, 01.2018-04.2019

Trafo 2 kuude lõikes aastatarbimise joonisel märgatav tarbimise tõus suve hooajal ja tarbimise langus sügisel ning talvel [joonis 7]. Tarbimise tõus suveajal on suure tõenäosusega seotud jahutusseadmete suurendatud tarbimisega.



Joonis 7. NRG õppehoone trafo 2 aktiiv- ja reaktiivenergia, 01.2018-04.2019

2. MÕÕTMISED JA MÕÕTETULEMUSTE ANALÜÜS

2.1 Mõõtemetoodika ja -seadmed

Euroopa standardi EVS-EN 61000-4-30:2015 kohaselt kasutatakse tänapäeval kahte mõõteklassi. Enne elektri kvaliteedi mõõtmiste teostamist tuleb valida mõõteklass A või S. Iga klass sisaldab mõõtemetodeid ja asjakohaseid kasutusnõudeid.

A-klassi kasutatakse vajalikeks täppismõõtmiseks, standarditele vastavuse kontrollimiseks jne. Selle klassi mõõtmised viiakse läbi kahe erineva mõõteseadmega (mõõturiga).

S-klassi kasutatakse elektri kvaliteedi hindamiseks staatilistel rakendustel või kontrollülevaatustel ning võimalik, et piiratud parameetrite hulgaga. Vaatamata sellele, et S-klass kasutab samu mõõteintervalle kui A-klass, on S-klassi mõõteandmete töötlemise nõuded madalamad.

Käesoleva lõputöö raames mõõtmiste teostamiseks valis autor S-klassi ilma mõõtemääramatust arvesse võtmata. Mõõtur ise arvutab keskmised suurused iga intervalli kohta.

Autor valis mõõtekohaks NRG õppehoone jaotla 0,4 kV võrguga liitumispunkti. Lõputöö konsultant kinnitas valiku ning andis asjakohaseid juhiseid mõõtmiste teostamisest ja mõõdetavate tunnussuuruste valikust.

2020 a. elektri kvaliteedi ning aktiiv- ja reaktiivvõimsuste mõõtmiseks oli valitud ja kasutatud mõõtur Chauvin Arnoux C.A 8334B, mis registreerib pinge kvaliteedi parameetrid vastavalt standardile EVS-EN 50160:2010. [13] Elektri kvaliteedi mõõtevahendite paigaldamisel jälgis autor, et oleks tagatud paigaldaja ja teiste isikute ohutus, monitooritava süsteemi terviklikkus ning mõõtevahendi enda korrasolek. Lõputöö autoril on olemas kehtiv elektriala B-klassi pädevustunnistus ning TTÜ energeetika valdkonna eest vastutav isik andis loa iseseisva mõõturi paigaldamiseks. Autor paigaldas ja seadistas mõõturi uuritavad tunnussuurused vastavalt uurimistöö vajadustele.

Mõõdetavad tunnussuurused:

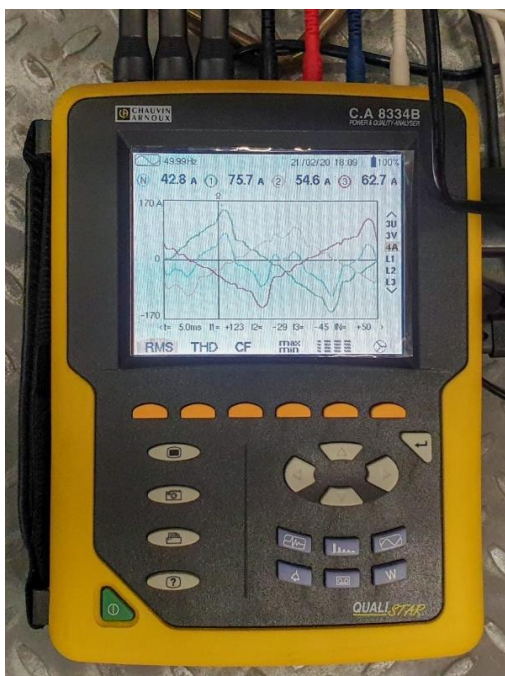
- Aktiiv- ja reaktiivvõimsus summaarne kolmes faasis
- Voolud eraldi kolmes faasis
- Võimsustegur
- Paaritud vooluharmonikud eraldi (3...19) ja THD
- Pinged

- Paaritud pingeharmonoonikud eraldi (3...19) ja THD
- Faasipingete asümmeetria kolmes faasis

2.1.1 Mõõteseade

Elektri kvaliteedi mõõtmiseks kasutas lõputöö autor Tallinna Tehnikaülikooli võrguanalüsaatorit Chauvin Arnoux Tree Phase Power Quality Analyzer C.A 8334B [joonis 8]. Valitud mõõteriist võimaldab kasutajal saada võrgu põhiparameetritest kohest pilti ning registreerida ja jälgida parameetrite muutumist valitud ajavahemiku jooksul.

Võrguanalüsaator C.A 8334B on ette nähtud tööstuses ja ettevõtete halduses töötavate katse- ja hooldusmeeskondade tehnikutele ja inseneridele mõõtmiseks, võimaldades neil kontrollida ja diagnoosida ühefaasilisi ja kolmefaasilisi madalpingevõrke. [13]



Joonis 8. Võrguanalüsaator C.A 8334B

Peamised mõõdetavad parameetrid on [13]:

- Vahelduvpinge efektiivväärtuse mõõtmine kuni faasipingeni 480 V ja liinipingeni kuni 830 V kahejuhtmelistes, kolmejuhtmelistes ning neljajuhtmelistes võrkudes.
- Vahelduvvoolu efektiivväärtuse mõõtmine kuni vooludeni 3000 A.
- Sageduse mõõtmine 50 Hz ja 60 Hz elektrivõrkudes.
- Neutraalahela voolu arvutamine kolme faasivoolu alusel tähtlülituses elektrivõrgus.
- Tippväärtuste (maksimumväärtuste) arvutamine pinges ja voolus.
- Voolude moonutusteguri ehk K-teguri arvutamine trafode jaoks.

- Lühiajalise väreluse arvutamine pinges.
- Pingete ja voolude asümmeetria arvutamine.
- Harmoonikute suuruse ja nihkenurga arvutamine pinge- ja vooluharmoonikutes kas põhisagedusliku pinge (voolu) suhtes või tegeliku efektiivväärtuse suhtes kuni harmoonikute järguni h50.
- Harmoonikute kogumoonutustegurite THD arvutamine.
- Aktiiv-, reaktiiv-, ja näivvõimsuse arvutamine igas faasis eraldi ja summaarselt.
- Tarbitud energiahulkade arvutamine.
- Iga valitud parameetri registreerimine (monitoorimine) intervallides alates 1 s kuni 2 h etteantud ajavahemiku vältel.
- Häiringute salvestamine koos ajamärgiga ja häiringu ulatusega – pingelohud, pingemuhud, katkestused.
- Siirdeliigpingete registreerimine koos lainekujudega.

[13]

Mõõteseadme mõõdetavad suurused, mõõtevahemikud ning mõõtetäpsused on toodud mõõteseadme karakteristikute tabelis [tabel 2.1].

Tabel 2.1 Mõõteseadme karakteristikud [13]

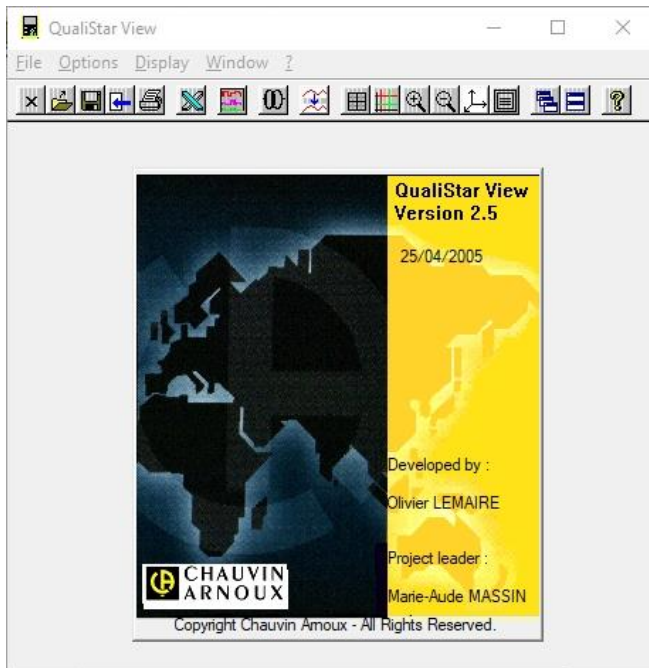
Mõõdetav parameeter	Mõõtevahemik	Näidiku eraldusvõime	Mõõteviga lähte vahemikus
Sagedus	40...69 Hz	0.01 Hz	±0.01 Hz
Pinge efektiivväärtus	6V...480V	0.1 V	±0.5%
RMS composite voltages (U _{RMS} , U _{dem})	10 V...830V	0.1 V	±0.5%
Pinge alaliskomponent	6V...100V	0.1 V	±1%
Pinge maksimumväärtused (V)	6V...680V	1 V	±(1% +5 V)
Peak composite voltages (U _{pp} , U _{pm})	10 V...1360 V	1 V	±(1% +5 V)
Voolu efektiivväärtused (A)	I _{max} /1000...I _{max}	0.1 A kui I < 1000 A 1A kui I ≥ 1000 A	±0.5%
Vooluandurite AmpFLEX ahelas voolu efektiivväärtus	I _{max} /1000...I _{max}	0.1 A kui I < 1000 A 1 A kui I ≥ 1000 A	±(0.5% +1A)
Voolu alaliskomponent DC	I _{max} /1000...I _{max} /10	0.1 A	±(1% +1A)
Voolu maksimumväärtus	0...2 x I _{max}	1A	±(1% +I _{max} /200)
Maksimumitegur	1.00...9.99	0.01	±(1% +0.02)
Aktiivvõimsused (W) Voolutangid ja AmpFLEX Voolutangid AmpFLEX	0...9999 kW Cos Φ ≥ 0.8 0.2 ≤ Cos Φ < 0.8 0.5 ≤ Cos Φ < 0.8	4 digits (10000 counts)	±1% ±(1.5% +10 counts) ±(1.5% +10 counts)
Reaktiivvõimsus (VAR) Voolutangid	0...9999 kVAR Sin Φ ≥ 0.5 0.2 ≤ Cos Φ < 0.5	4 digits	±1% ±(1.5% +10 counts)
Reaktiivvõimsus (VAR) AmpFLEX	0...9999 kVAR Sin Φ ≥ 0.5	4 digits	±1.5% ±(2.5% +20 counts)

Mõõdetav parameeter	Mõõtevahemik	Näidiku eraldusvõime	Mõõteviga lähtevahemikus
	$0.2 \leq \cos \Phi < 0.5$		
Näivvõimsus (VA)	0...9999 kVA	4 digits	±1%
Võimsustegur (PF, DPF)	-1.000...1.000 $\cos \Phi \geq 0.5$ $0.2 \leq \cos \Phi < 0.5$	0.001	±1,5% ±(1.5%+0.01)
Tangens (Tan)	-1.732...1,732 for $S > 50VA$	0.001	±1o
Aktiivenergia (Wh) Voolutangid ja AmpFLEX Voolutangid AmpFLEX	0...9999 MWh $\cos \Phi \geq 0.8$ $0.2 \leq \cos \Phi < 0.8$ $0.5 \leq \cos \Phi < 0.8$	4 digits (10000 counts)	±1% ±1.5% ±1.5%
Reaktiivenergia (VARh) Voolutangid	0...9999 MVARh $\sin \Phi \geq 0.5$ $0.2 \leq \cos \Phi < 0.5$	4 digits	±1% ±1.5%
Reaktiivenergia (VARh) AmpFLEX	0...9999 MVARh $\sin \Phi \geq 0.5$ $0.2 \leq \cos \Phi < 0.5$	4 digits	±1.5% ±2.5%
Asümmeetria	Kolmefaasilises võrgus	0.1%	±1%
Phase angle (V/1; I/I; V/V)	-179o...+180o	1o	±2o
Harmonikute suurused	orders 1..50	0.1%	±1% +5 pt
Harmonikute nihkenurgad	orders 1..25 orders 26..50	1o	±3o ±10o
Harmonikute kogumoonutustegurid THD	Limited harmonics at order 50	0.1%	±1% +5 pt
Voolukuju tegur K-tegur	1..99.99	0.01	±5%
Pinge väreelus	0.00..9.99	0.01	±5% +5 pt

[13]

2.1.2 Analüüsiks vajalik tarkvara

Mõõteseadmega kaasas oli arvuti tarkvara QualiStar View 2.5, mille abil autor tegi eelanalüüsi ning kasutas mõõtmisandmeid eksportimiseks Microsoft Excel tabelisse [joonis 9].



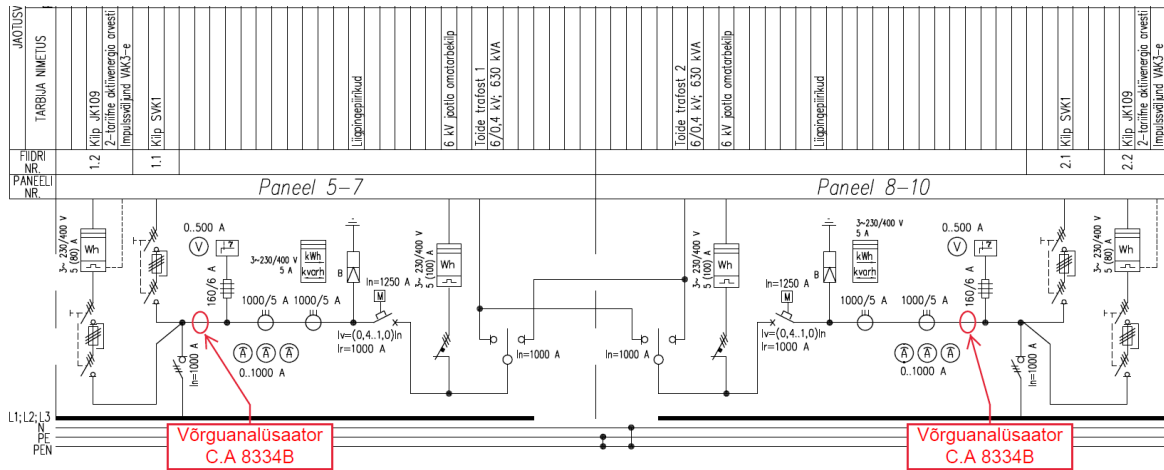
Joonis 9. Võrguanalüsaatori komplektne tarkvara

Eelanalüüsi kuulus mõõdetud andmete kiirülevaade graafilisel kujul. Graafikud on võimalik vaadata mitmel kujul sõltuvalt mõõdetud parameetrist – iga faasi eraldi, kõik kolm faasi korraga või faaside summat.

Analüüsi ja joonised lõputöö jaoks tegi autor Microsoft Excel tarkvara abil. Microsoft Excel abil analüüsimisel autor võrdles erinevate aastate ja seksioonide mõõtetulemuste andmeid, tegi vajalikud arvutused ja saadud analüüsi tulemustest tegi vajalikud joonised.

2.1.3 Mõõtmiste teostamine

Objektiivseks elektri kvaliteedi hindamiseks tegi lõputöö autor asjakohaseid mõõtmisi teiseldatava mõõturiga. Koormuste ja toitepinge kvaliteedi 2020. a mõõtmistel on salvestatud iga 1 min intervalli keskmised parameetrid mõlemas 0,4 kV jaotla seksioonis ning 2019. a mõõtmistel 2 min intervalli keskmised parameetrid I seksioonis ja 1 min intervalli keskmised parameetrid II seksioonis. Samuti käsitletakse töös pinge asümmeetria 10-minutilistes keskmistes efektiivväärtustes. Mõõtmiste elektriohutuse tagamiseks valis autor mõõtekohaks suhteliselt suure vaba ruumiga 0,4 kV jaotla alumise paneeli. Jaotla madalpinge osa joonisel on mõõturi paigalduskoht märgistatud punase ovaaliga [joonis 10]. Tingituna mõõturi paigalduskohast jäi mõõtmata 6 kV jaotla omatarbekilp.



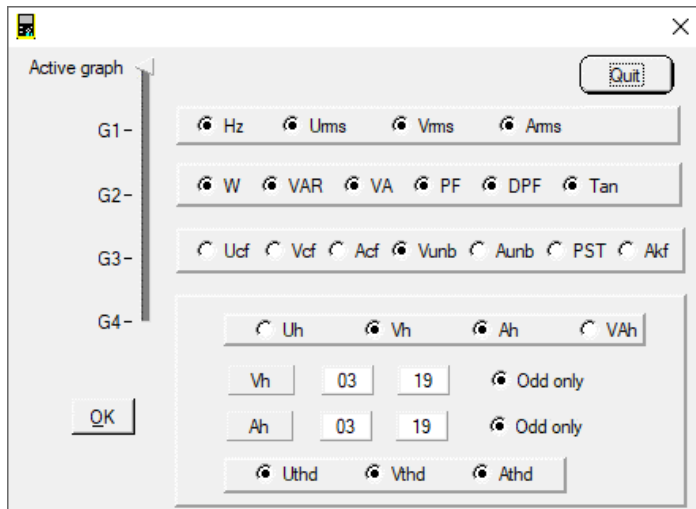
Joonis 10. Võrguanalüsaatori paigalduskoht

Autori foto 0,4 kV jaotla II sektsiooni paigaldatud mõõturist [joonis 11]:



Joonis 11. Mõõtur 0,4 kV jaotla II sektsiooni sisendil

Lõputöö raames mõõdetud tunnussuurused [joonis 12] on kuvatud ka mõõturi kompleksis arvuti tarkvaras.



Joonis 12. Mõõdetud tunnussuurused

2.2 Reaktiivenergia

2.2.1 Reaktiivenergia teoreetiline käsitlus

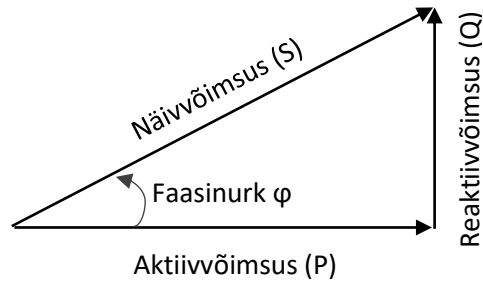
Kadude vähendamiseks elektrienergia ülekandmisel kasutatakse vahelduvpinget ja -voolu. Vahelduvpinge ja -voolu eripäraks on siinuseline ehk perioodiline muutus, mis tingib elektrienergia ülekandmiseks ja muundamiseks vajaliku elektri- ja magnetväljaahelad. Elektrivõrkudes iseloomustatakse elektritarvitite koguvõimsust mõistega näivvõimsus (S) ning selle ühik on megavoltamper (MVA). Näivvõimsus on aktiiv- ja reaktiivvõimsuse geomeetiline summa ehk vektoriaalne suurus. Aktiivvõimsust (P) iseloomustakse võimsusühikuga vatt (W), mis on reaalne võimsus, mida saab muuta vajadusel kasulikuks tööks. Vahelduvvooluvõrkudes iseloomustab reaktiivvõimsus (Q) kiirust, millega elektrienergiat salvestatakse kondensaatori elektrivälja ning induktiivpooli magnetvälja. Reaktiivvõimsus põhjustab kadusid ja vähendab seadme võimalikku aktiivvõimsust. [14]

Vahelduvvoolu elektriseadmed tarbivad võrgust aktiiv- ja reaktiivvõimsust. Aktiivvõimsus muundatakse kasulikuks tööks – mehaaniliseks tööks mootorites, soojuseks kütteseadmetes ja valguseks valgustites. Reaktiivvõimsus on vajalik elektri- ja magnetväljade tekitamiseks mootorites, trafodes, kondensaatorites jne. Tarbija poolt tarbitav näivvõimsus (S) [15]:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \text{ mida võib arvutada ka seosega [15]:}$$

$$S = U * I, \text{ kus } U \text{ ja } I \text{ on pinge ja vool. [15]}$$

Aktiiv-, reaktiiv- ja näivvõimsuse vahelised seosed kirjeldatakse läbi täisnurkse võimsuste kolmnurga. Kaatet x-teljel iseloomustab aktiivvõimsust vektorina ja aktiivvõimsusega risti olev kaatet reaktiivvõimsust vektorina. Aktiiv- ja reaktiivvõimsuse vektoriaalne summa on näivvõimsus. [14]



Reaktiivvõimsuse tegurid võimsuste alusel [15]:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad \tan \varphi = \frac{Q}{P},$$

kus P (kW) on tarbitav aktiivvõimsus, Q (kVAR) on reaktiivvõimsus ja S (kVA) on näivvõimsus [15].

Kuu keskmised reaktiivvõimsuse tegurid saab arvutada kuus tarbitud reaktiivenergia R (kvarh) ja aktiivenergia A (kWh) alusel [15]:

$$\cos \varphi = \frac{A}{\sqrt{A^2 + R^2}} \quad \tan \varphi = \frac{R}{A}$$

Aktiivvõimsuse P ja näivvõimsuse S suhet nimetatakse võimsusteguriks (ka "koosinus fiiks") [15].

Võimsustegur ehk DPF ehk $\cos \varphi$ (DPF - displacement power factor) iseloomustab nurka põhisagedusliku faasipinge ja faasivoolu vahel ja on arvuliselt võrdne põhisagedusliku aktiivvõimsuse P_1 ja näivvõimsuse S_1 suhtega [15]:

$$\cos \varphi = DPF = \cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1},$$

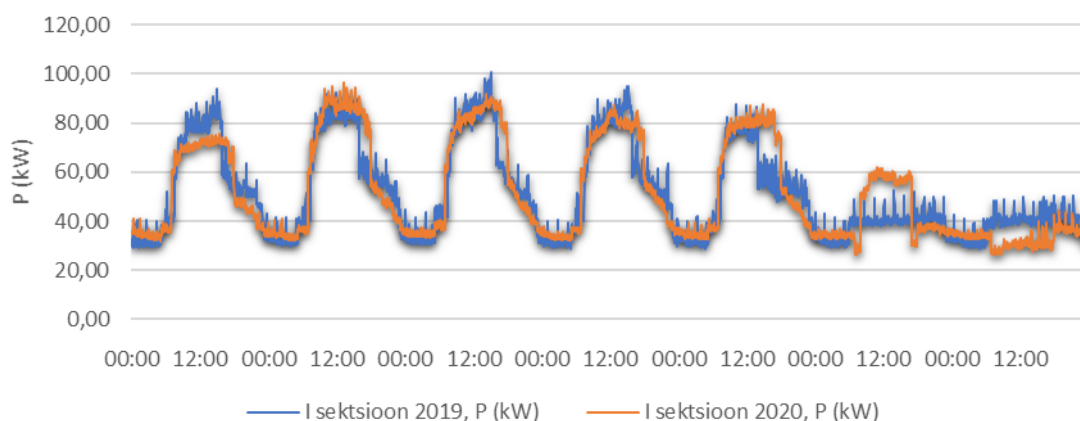
kus S_1 on põhisageduslik näivvõimsus P_1 on põhisageduslik aktiivvõimsus.

Võimsusteguri väärtus on vahemikus 0 kuni 1. Ideaalne väärtus ahela võimsustegurile on 1,00. Tarbija elektrisüsteem on tavaliselt induktiiv-aktiivne, st vool jääb faasis pingest maha. Selle põhjuseks on induktiivsed koormused (mootorid), mis tarbivad reaktiivenergiat magnetvälja tekitamiseks. [15]

Näiteks on nimikoormusel töötava asünkroonmootori võimsustegur 0,87...0,93. Juhul, kui sama mootor on tühijooksul, on tema võimsustegur ainult 0,3...0,4. Ilma kompensatsioonita olukorras on tarbija kogu elektrisüsteemi võimsustegur tavaliselt 0,7... 0,9. Kui koormuseks on kondensaatorid, siis vool on pingest faasis ees ja võimsusteguri väärtused on miinusmärgiga. [15]

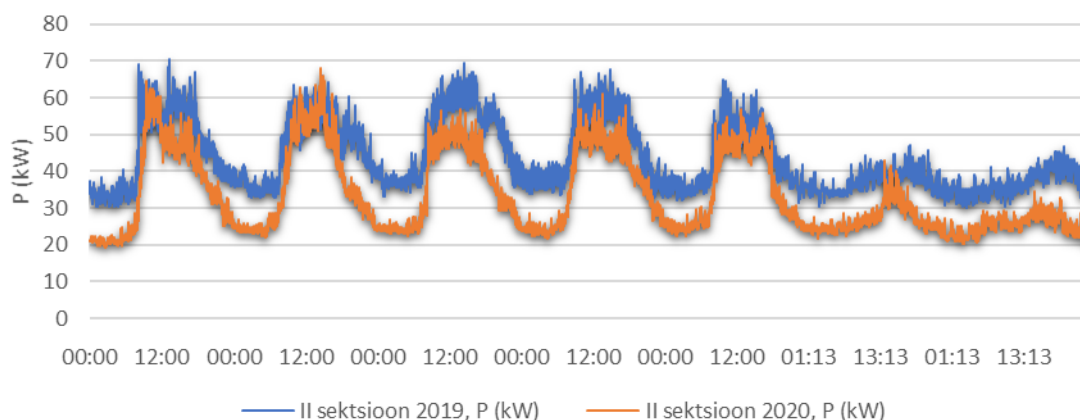
2.2.2 Aktiiv- ja reaktiivenergia mõõtmised

Aktiivvõimsuse tarbimine I sektsioonis on 2020. aastal jäänud samale tasemele nagu 2019. aastal [joonis 13].



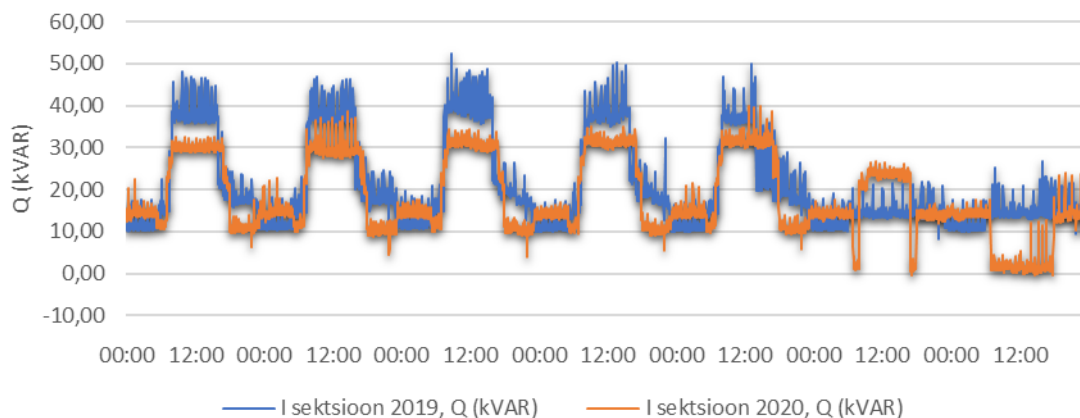
Joonis 13. NRG õppehoone 0,4 kV jaotla I sektsioon, aktiivvõimsus

Aktiivvõimsuse tarbimine II sektsioonis on 2020. aastal vähenenud võrreldes 2019. aastaga [joonis 14]. Põhjuseks võib olla vananenud valgusallikate vahetus LED-tüüpi valgustite vastu.



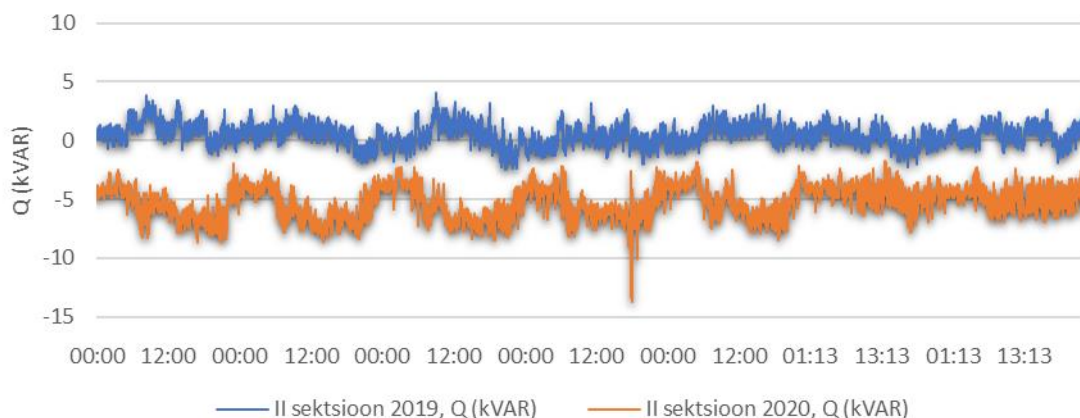
Joonis 14. NRG õppehoone 0,4 kV jaotla II sektsioon, aktiivvõimsus

Reaktiivvõimsuse tarbimine I sektsioonis on 2020. aastal vähenenud võrreldes 2019. aastaga [joonis 15].



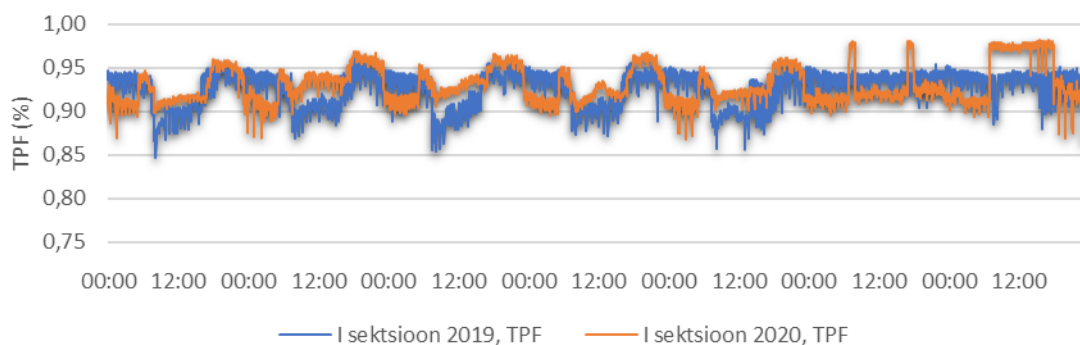
Joonis 15. NRG õppehoone 0,4 kV jaotla I sektsioon, reaktiivvõimsus

Reaktiivvõimsuse tarbimine II sektsioonis on 2020. aastal vähenenud võrreldes 2019. aastaga [joonis 16]. Kui 2019. aastal oli reaktiivvõimsuse tarbimine nullilähedane, kuid võrgust võetav (induktiivne reaktiivenergia komponent), siis 2020. aastal sai reaktiivvõimsus võrku kantavaks (mahtuvuslik reaktiivenergia komponent).



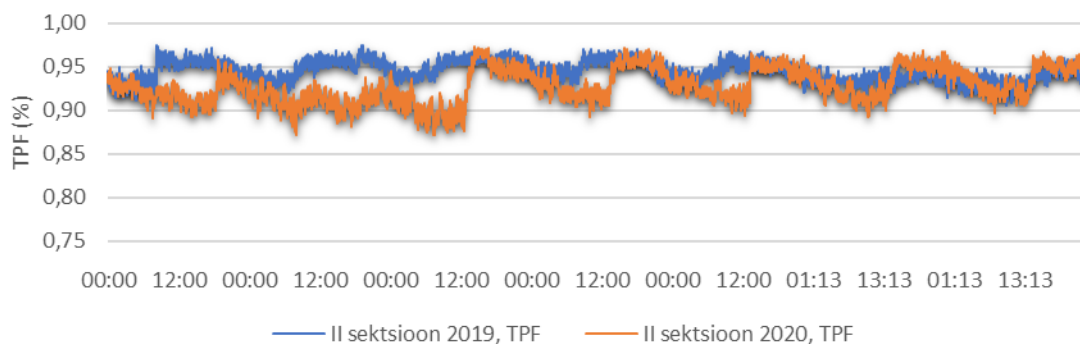
Joonis 16. NRG õppehoone 0,4 kV jaotla II sektsioon, reaktiivvõimsus

Tegelik võimsustegur I sektsioonis on 2020. aastal jäänud sarnasele tasemele nagu 2019. aastal [joonis 17].



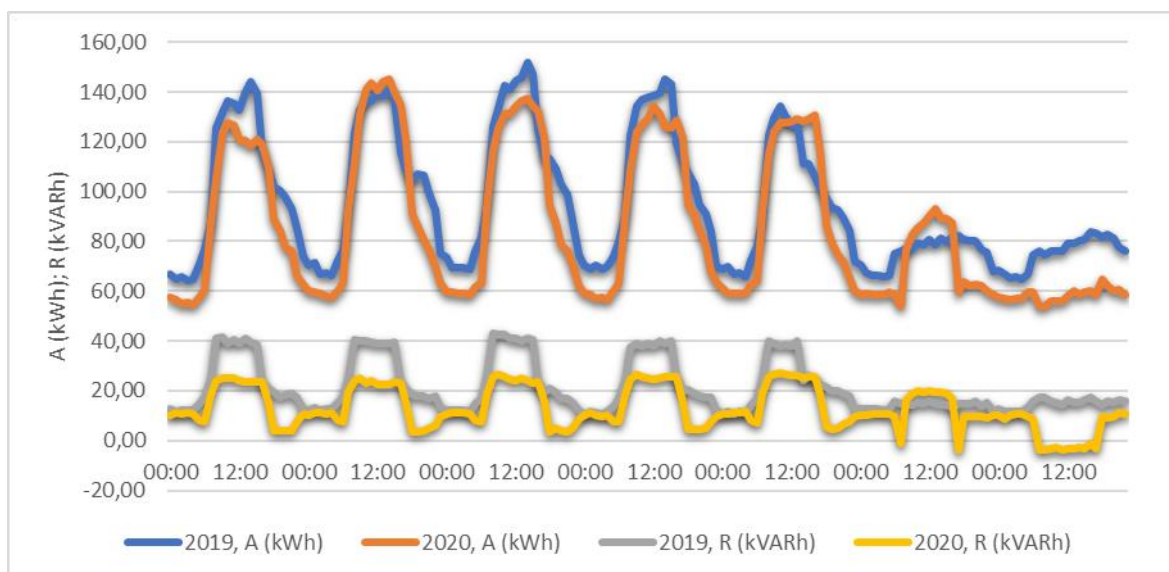
Joonis 17. NRG õppehoone 0,4 kV jaotla I sektsioon, tegelik võimsustegur

Tegeliku võimsusteguri väärtused II sektsioonis on 2020. aastal saanud miinusemärgi. Põhjuseks võib olla kondensaatoreid sisalduva koormuse suurendamine. Mõõtur salvestas tegeliku võimsusteguri väärtused ilma märgita ja mugavamaks esitluseks panin need graafikule miinusemärgita [joonis 18].



Joonis 18. NRG õppehoone 0,4 kV jaotla II sektsioon, tegelik võimsustegur

Liites I ja II sektsioonide aktiiv- ja reaktiivvõimsuste tarbimise, sai autor 2019. aastaga sarnased tulemused, mis viitab sellele, et tarbimine toimus läbi Trafo 2 [joonis 19].



Joonis 19. Energia tarbimine 2019. ja 2020. aastatel

2.3 Elektri kvaliteet

2.3.1 Elektri kvaliteedi teoreetiline käsitlus

Pinge asümmeetria on mitmefaasilise võrgu seisund, mille puhul faasipingete efektiivväärtused või faasidevahelised nihkenurgad pole võrdsed. Asümmeetriat iseloomustavaks näitajaks on pinge vastujärgnevus- ja pärijärgnevuskomponendi suhe – asümmeetriategur [3]

$$k_a = \frac{U_2}{U_1} * 100\%$$

Asümmeetriateguri võib arvutada ka faasidevaheliste pingete kaudu [3]

$$k_a = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}}, \quad kus \beta = \frac{U_{12}^4 + U_{23}^4 + U_{31}^4}{(U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{31}^2)^2}$$

Normaaltalitusel ei tohi vastujärgnevuskomponendi efektiivväärtuse 10-minutiline keskvärtus madal- ja keskpingel ületada 2% pärijärgnevuskomponendist iganädalastel mõõtmistel 95% juhtudest. Mõnes piirkonnas, kus tarbijapaigaldised on ositi ühendatud ühe- või kahefaasiliselt, võib 3-faasilises liitumispunktis asümmeetria olla kuni 3%. Kui vaadelda ka kvaliteedi kõrg- ja normaaltaset, siis on nädalas [3]

kõrgtase, kui kõik $k_a \leq 1\%$

normaaltase, kui kõik $k_a \leq 1.5\%$

standardtase, kui 95% ajast $k_a \leq 2\%$ [3].

Vastujärgnevuskomponent häirib tarvitite, eriti mootorite talitlust. Nulljärgnevuskomponent tekitab neutraalnihke – pingetõusu keskpingevõrkude faasijuhtmete ja maa vahel, lisakoormuse isolatsioonile ja pingetrafode magnetahelatele. Nulljärgnevuskomponenti pole seni normeeritud. [3]

2.3.2 Elektri kvaliteedi mõõtmised

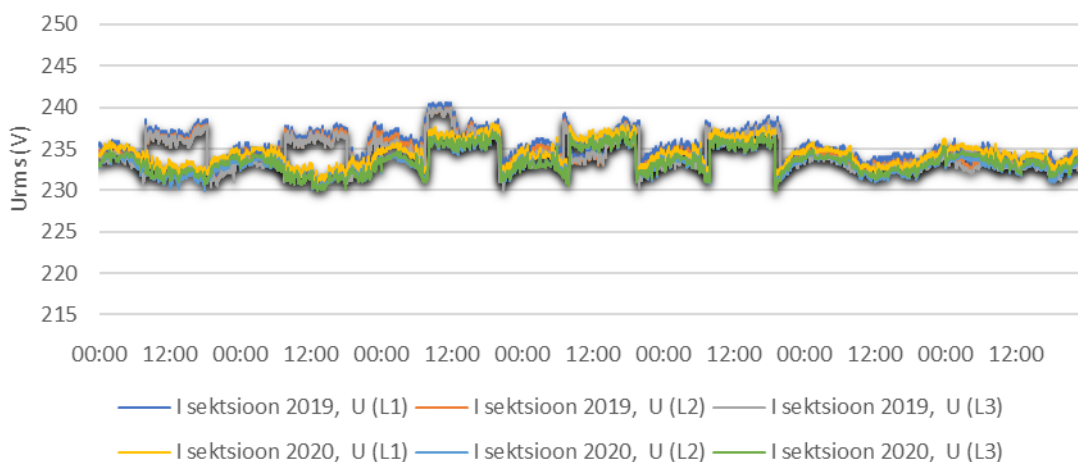
Vastavalt standardile EVS-EN 50160:2010 peab normaaltingimustel iga nädalase ajavahemiku kestel 95% toitepinge vastujärgnevuskomponendi K_{2U} keskmistest väärtustest olema alla 2% pärijärgnevuskomponendist, ehk $K_{2U} \leq 2\%$. Soovitatakse, et asümmeetriategur oleks alla 1% ehk $K_{2U} \leq 1\%$. [16]

Mõõdetud NRG õppehoone 0,4 kV jaotla I ja II sektiooni asümmeetriateguri K_{2U} 10-minutilised keskmised väärtused 2019. aastal ei ületanud 0,4 % ja 2020. aastal 0,3 % ehk jäid standardis sätestatud vahemikku.

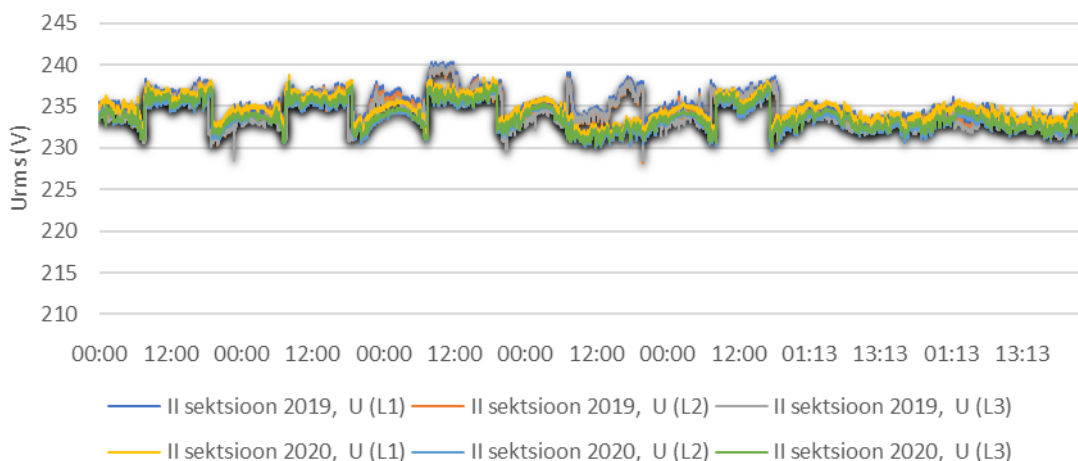
Kuna 2019. aastal pinge asümmeetria mõõtmisi ei teostatud, siis arvutas autor asümmeetriateguri faasidevaheliste pingete kaudu, kasutades järgmist valemit:

$$k_a = \sqrt{\frac{1-\sqrt{3-6\beta}}{1+\sqrt{3-6\beta}}}, \text{ kus } \beta = \frac{U_{12}^4 + U_{23}^4 + U_{31}^4}{(U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{31}^2)^2} \quad [3]$$

2020. aasta I ja II sektsiooni mõõtmistulemuste järgi oli toitepinge efektiivväärtus minimaalselt 229,6 V, maksimaalselt 238,8 V ja keskmiselt 234 V [joonis 20] ja [joonis 21]. Standard EVS- EN 50160:2010 sätestab, et normaaltingimustel peab toitepinge nädalase ajavahemiku jooksul olema 10-minutilistest keskmisest efektiivväärtusest 95% vahemikus $U_n \pm 10$. Nädalasel mõõteperioodil toitepinge aeglane muutus vastas standardile.

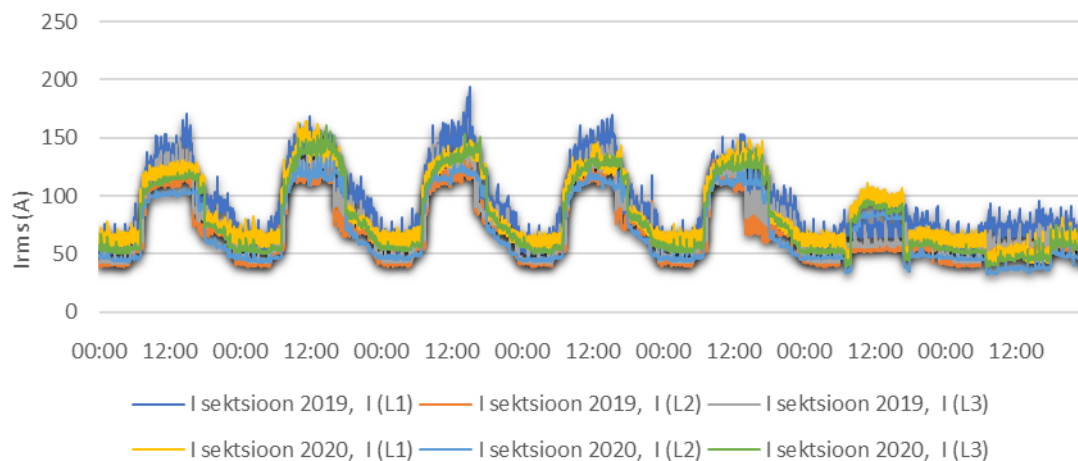


Joonis 20. NRG õppehoone 0,4 kV jaotla I sektsioon, pinge efektiivväärtus



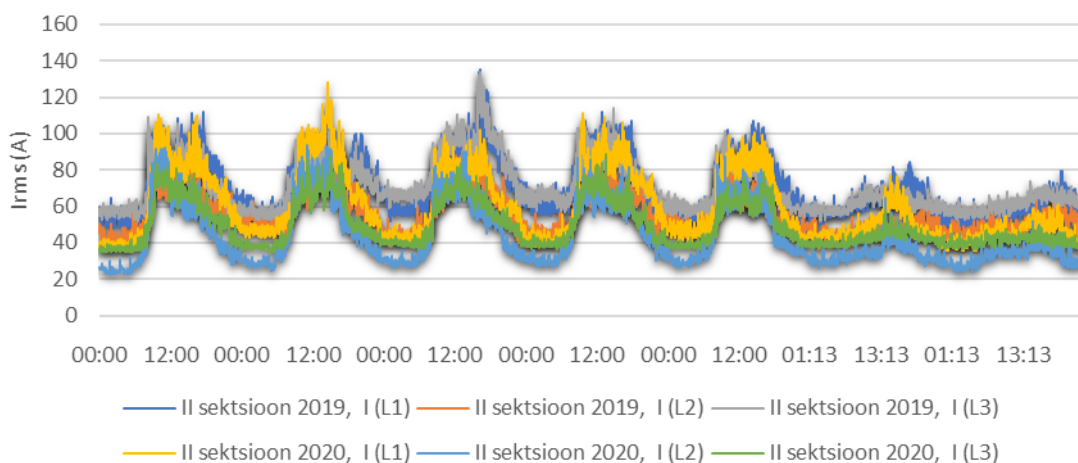
Joonis 21. NRG õppehoone 0,4 kV jaotla II sektsioon, pinge efektiivväärtus

Voolu efektiivväärtused tarbimine I sektsioonis on 2020. aastal jäänud sarnasele tasemele nagu 2019. aastal [joonis 22]



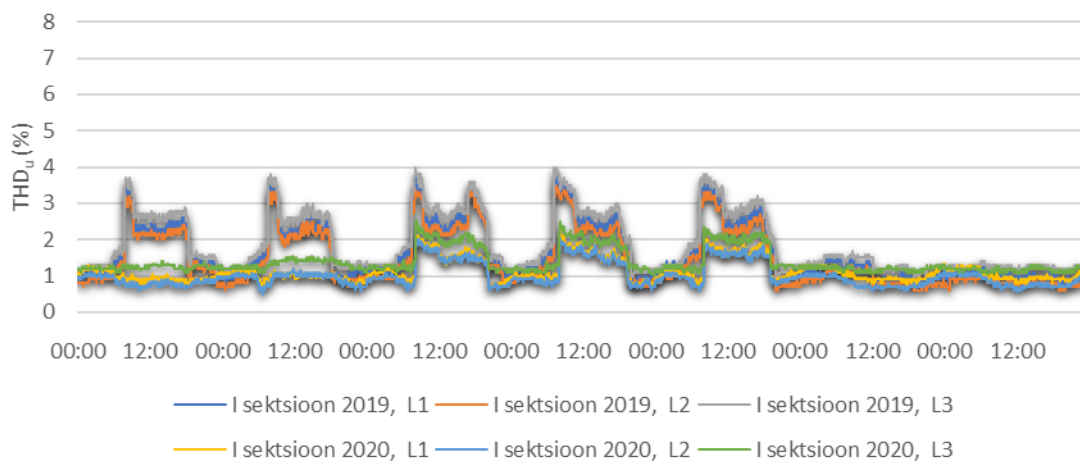
Joonis 22. NRG õppehoone 0,4 kV jaotla I sektsioon, voolu efektiivväärtus

Voolu efektiivväärtused II sektsioonis on 2020. aastal vähenenud võrreldes 2019. aastaga. Põhjuseks võib olla vananenud valgusallikate vahetus LED-tüüpi valgustite vastu [joonis 23].

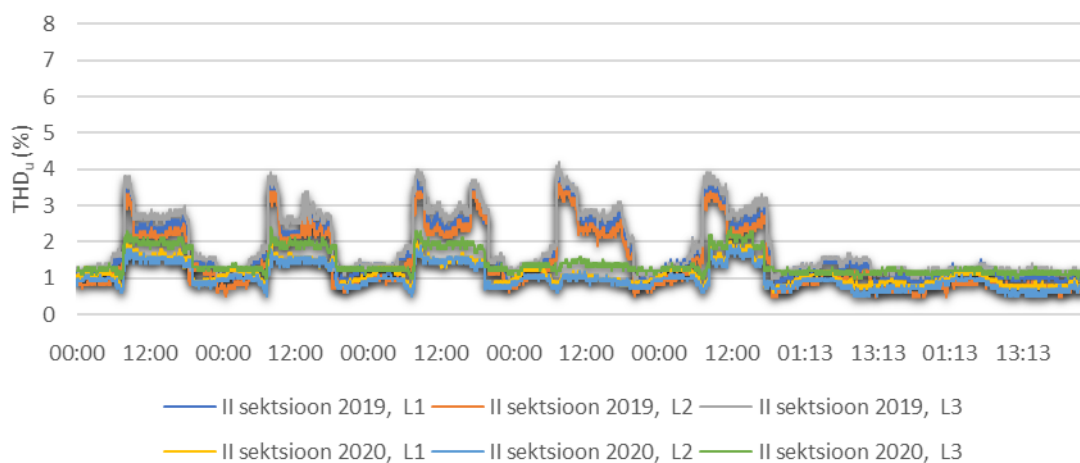


Joonis 23. NRG õppehoone 0,4 kV jaotla II sektsioon, voolu efektiivväärtus

Pinge harmoonmoonutustegur I ja II sektsioonis on 2020. aastal vähenenud võrreldes 2019. aastaga ja maksimaalne registreeritud väärtus oli 2,55% ehk ei ületanud standardis EVS-EN 50160:2010 sätestatud piirväärtuse suurust 8% [joonis 24] ja [joonis 25].

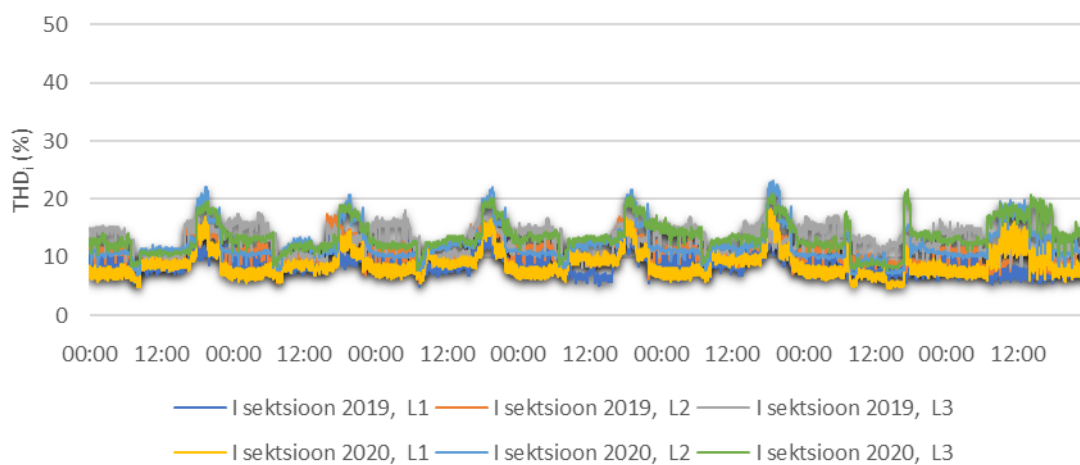


Joonis 24. NRG õppehoone 0,4 kV jaotla I sektioon, pingeline harmoonmoonutustegur



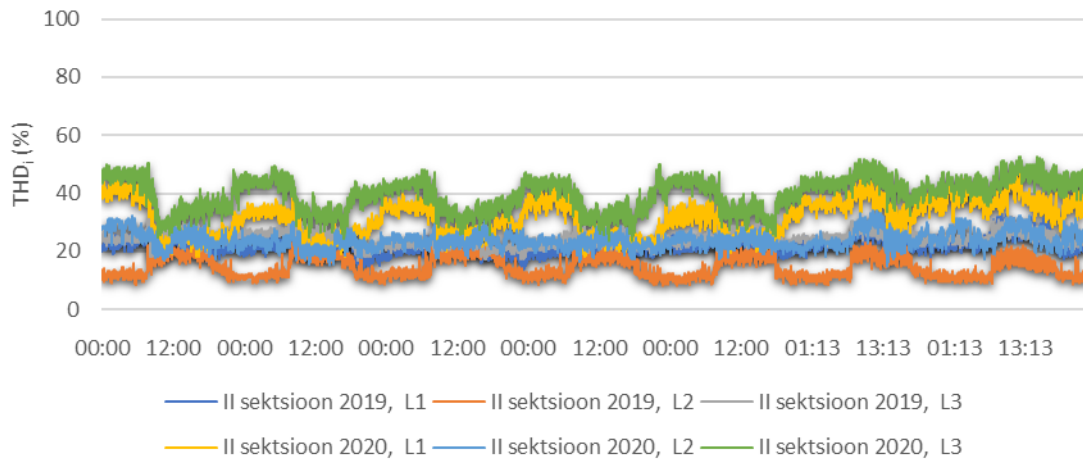
Joonis 25. NRG õppehoone 0,4 kV jaotla II sektioon, pingeline harmoonmoonutustegur

Voolu harmoonmoonutustegur I sektioonis on 2020. aastal jäänud sarnasele tasemele nagu 2019. aastal [joonis 26].



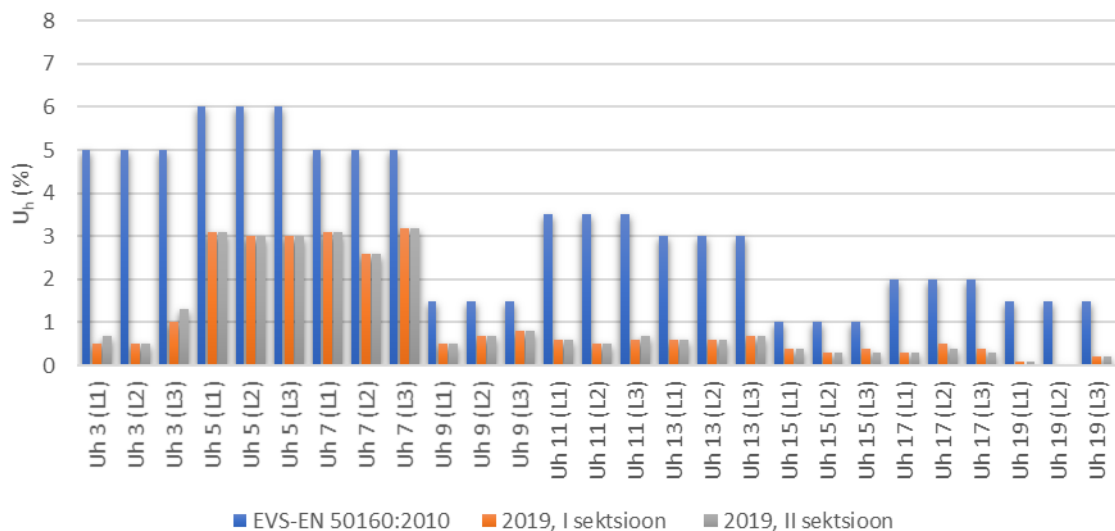
Joonis 26. NRG õppehoone 0,4 kV jaotla I sektioon, voolu harmoonmoonutustegur

Voolu harmoonmoonutustegur II sektsioonis 2020. aastal suurenes võrreldes 2019. aastaga. [joonis 27] Põhjuseks võib olla lineaarse koormusega tarbijate kasv, näiteks vananenud valgusallikate vahetusel LED-tüüpi valgustite vastu.

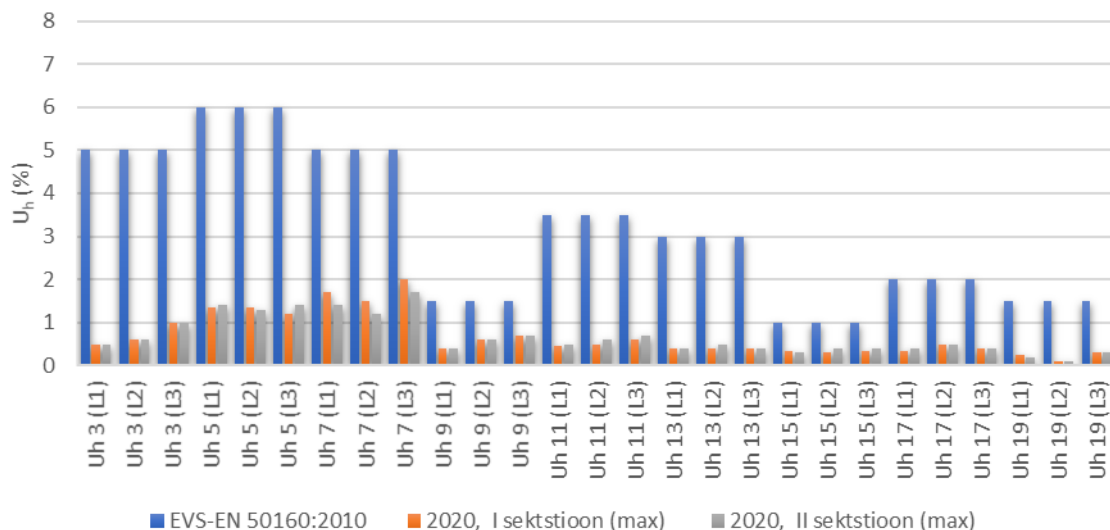


Joonis 27. NRG õppehoone 0,4 kV jaotla II sektsioon, voolu harmoonmoonutustegur

Üksikud paaritud pinge harmoonikud kuni järguni 19 nädala lõikes ei ületa standardis EVS-EN 50160:2010 sätestatud lubatud suhtelisi väärtusi. Mugavamaks esitluseks on kuni järguni 19 pinge harmoonikute maksimaalsete väärtuste võrdlus standardis sätestatud väärtustega 2019. aasta oma esitatud ühel joonisel [joonis 28] ja 2020. aasta oma teisel joonisel [joonis 29].

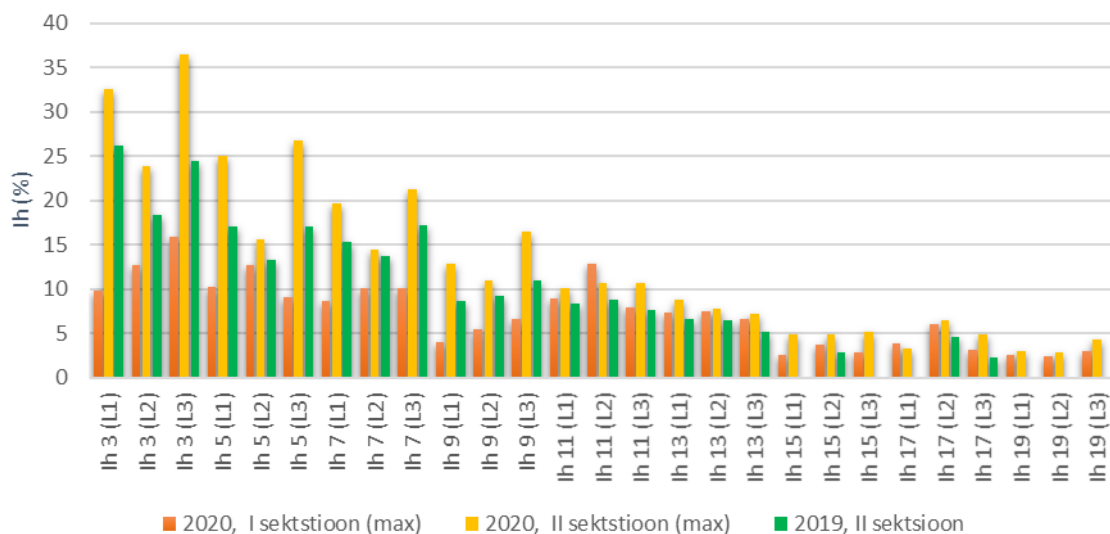


Joonis 28. NRG õppehoone 0,4 kV jaotla 2019. aasta pinge harmoonikute mõõtetulemuste maksimaalsed väärtused võrreldes standardis lubatud väärtustega



Joonis 29. NRG õppehoone 0,4 kV jaotla 2020. aasta pinge harmoonikute mõõtetulemuste maksimaalsed väärtused võrreldes standardis lubatud väärtustega

2019. aasta mõõtmistel sai autor mõõdistatud voolu harmoonikud kuni järguni 19 vaid NRG 0,4 kV jaotla II sektsioonis ja 2020. aasta mõõtmistel mõlemas sektsioonis. Mugavamaks esitluseks kuni järguni 19 voolu harmoonikute 2019. ja 2020. aasta väärtused on esitatud ühel joonisel [joonis 30].

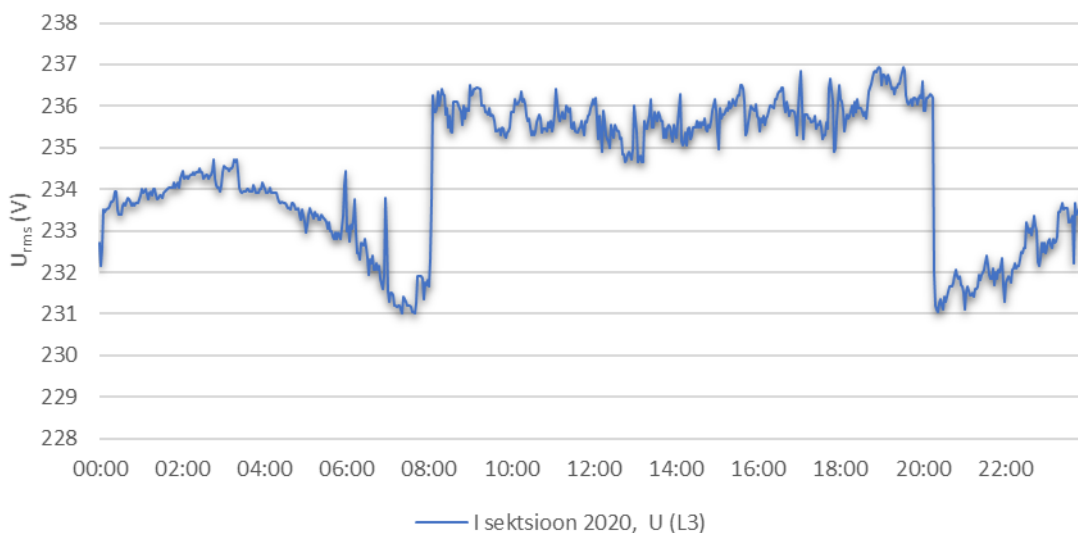


Joonis 30. NRG õppehoone 0,4 kV jaotla 2020 a. voolu harmoonikute mõõtetulemuste maksimaalsed väärtused

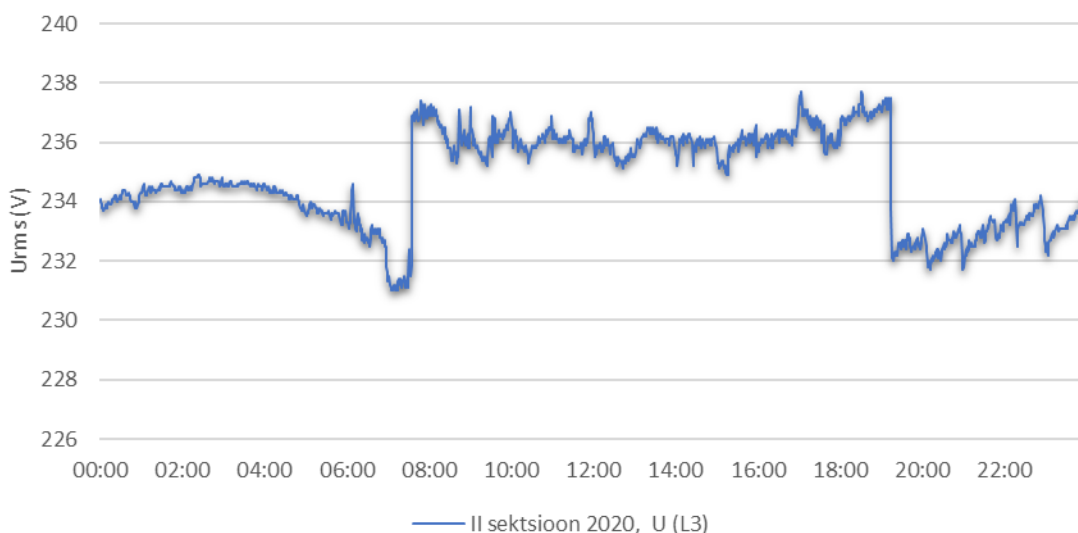
Joonisest on näha, et võrreldes 2019. aastaga on voolu harmoonikute suhteline arv suurenenud. Põhjuseks võib olla vananenud valgusallikate vahetus LED-tüüpi valgustite vastu NRG õppehoone teisel, viiendal, kuuendal korrustel või õpperuumides ja auditooriumites, ehk mittelineaarse voolu tarbijate arvu suurendamine. Samuti põhjuseks võib olla sagedusmuundurite arvu suurendamine.

Samuti uuris autor elektri kvaliteeti näitajad ööpäeva lõikes. Uurimiseks valis autor kolmapäeva, sest kolmapäev mõlemal mõõtmiste nädalal oli tööpäev.

I sektsioonis toitepinge efektiivväärtuste aeglase muutuste analüüsimisel märkas autor efektiivväärtuste hüppelisi muutusi hommikul ja õhtul, mille ilmselt põhjustas pinge reguleerimine alajaamas [joonis 31]. Sama muutus toimus ka II sektsioonis [joonis 32]. Autor alustas II sektsiooni mõõtmistega 14. veebruaril ja I sektsiooni mõõtmisi 21. veebruaril. Pinge reguleerimine toimus peaaegu samal ajal, kui ajaline nihe võib olla tekitatud valge päeva igapäevase pikenemisega.



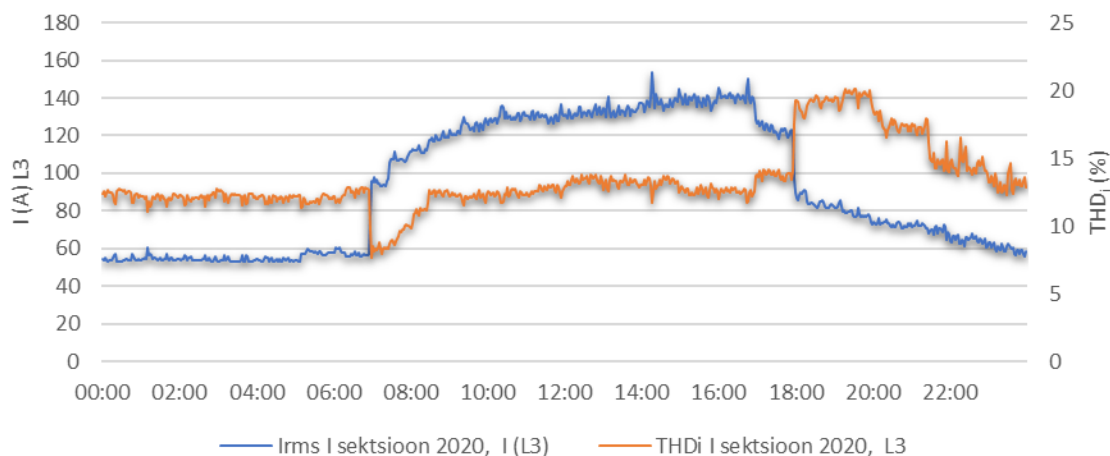
Joonis 31. Toitepinge efektiivväärtuste aeglased muutused ööpäeva lõikes I sektsioonis



Joonis 32. Toitepinge efektiivväärtuste aeglased muutused ööpäeva lõikes II sektsioonis

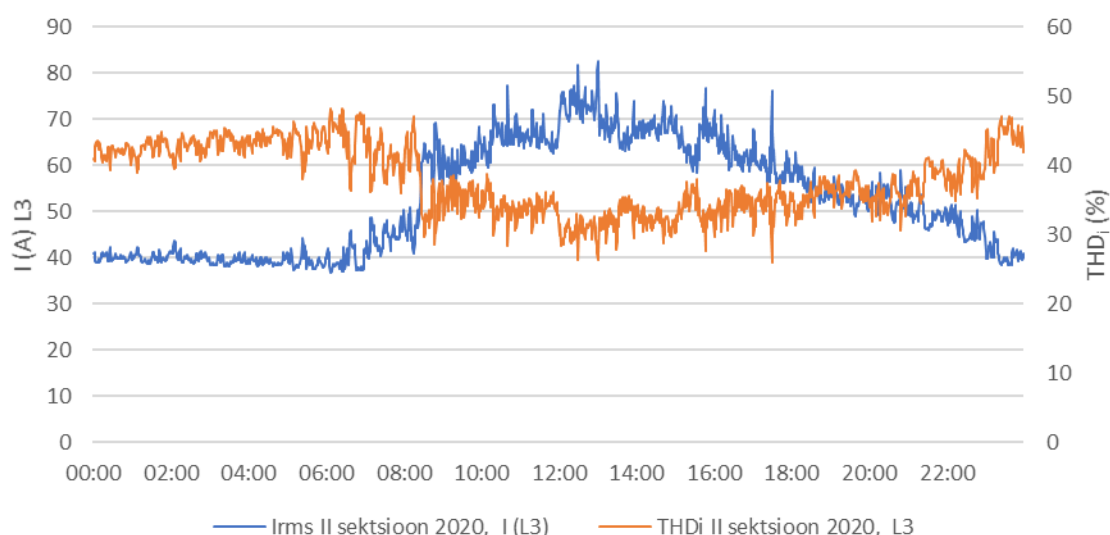
Analüüsidest voolu efektiivväärtuste ja voolu kogumoonutusteguri muutuseid päeva lõikes märkas autor kogumoonutusteguri sõltuvust tarbitava voolu efektiivväärtuse suuruselt. Sektsioonis I jäi voolu kolmekordsel suurendamisel voolu moonutustegur peaaegu muutumatuks. Seda võiks seletada sellega, et voolu harmoonikute allikas töötab pideva koormusega ühel kindlal töörežiimil,

kuid samal ajal suurendas voolu tarbimine lineaarsetel tarbijatel või reaktiivvõimsuse tarbijal, mis ei mõju nii voolu kogumoonutustegurile [joonis 33].



Joonis 33. I sektsiooni voolu kogumoonutuse sõltuvus tarbitava voolu efektiivväärtustest

Sektsioonis II on sõltuvus märgatav ja voolu kahekordsel suurenemisel voolu kogumoonutustegur väheneb umbes 1,5 korda [joonis 34]. Siin võis olla, et voolu efektiivväärtuste tõus suurendas mittelineaarsete tarbijate arvu. Teine sõltuvus oleks võimalik ka sellisel juhul, kui sagedusmuunduritega ventilaatorid töötasid töövälisel ajal poolkiirusel, siis oli voolu kogumoonutuste osakaal suurem ja ventilaatorite täiskiirusele ümberlülitamine tõi kaasa voolu kogumoonutusteguri osakaalu vähenemise. Kui kogu NRG õppehoone töötab ühe trafo peal, siis on võimalik, et sektsioonidevahelised voolumoonutused vähenevad.

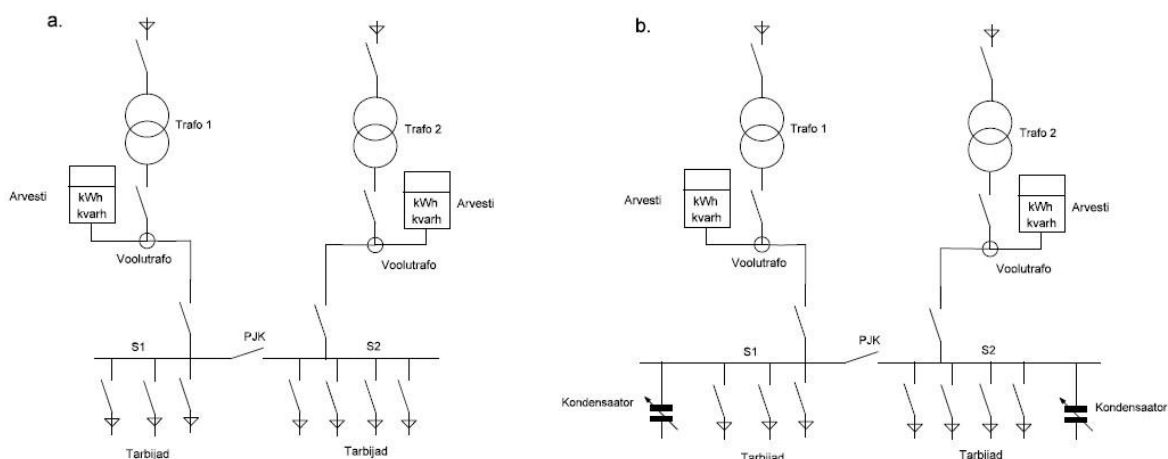


Joonis 34. II sektsiooni voolu kogumoonutuse sõltuvus tarbitava voolu efektiivväärtustest

3. ETTEPANEKUD ENERGIATÕHUSUSE TAGAMISEKS

3.1 Kondensaatorseadmed

Reaktiivenergia kompenseerimiseks kasutatakse reaktiivvõimsuse kompenseerimisseadet. Neid seadmeid on mõistlik kasutada seal, kus tarbija maksab nii aktiivse kui ka reaktiivse energia eest. On olemas automaatsed ja mitteautomaatsed seadmed. Madalpinge liitumispunkti üldskeem ilma reaktiivvõimsuse kompenseerimisseadmeta ja koos sellega on toodud alloleval joonisel [joonis 37].



Joonis 35. Üldskeem ilma reaktiivvõimsuse kompenseerimisseadmeta (a) ja reaktiivvõimsuse kompenseerimisseadmega (b)

Mitteautomaatsed reaktiivvõimsuse kompenseerimisseadme [joonis 36] põhielemendid on pealüliti, kaitselüliti iga kompensatsiooni astme jõuahelas, kontaktorid, kondensaatorid ja juhtahela kaitse juhtlülititega.

Mitteautomaatse seadme eelised on tema lihtsus ja madal hind. Miinused: madal efektiivsus võrreldes automaatsete seadmetega, vajadus kontrollida seadmete töörežiimi, võimalik ülekompenseerimine. [17] Ülekompenseerimine kondensaatorseadmetega toob reaktiivenergia võrku kandmist, kuid sel juhul on ühe kVARh hind ca 30 % kallim. [18]



Joonis 36. Mitteaumaatsed reaktiivvõimsuse kompenseerimisseadmed [17]

Automaatne reaktiivvõimsuse kompensatsiooniseade [joonis 37] koosneb järgmistest osadest: kaitselülitid, sulavkaitsmed, kontaktorid, kondensaatorid ja juhtimisseade. Sisse lülitatud kontaktor ühendab elektrivõrguga teatud mahtuvusega kondensaatori. Kontaktorite arv ja nendega ühendatud kondensaatorid määravad juhtimisastmete arvu. Igat juhtimisastmet iseloomustab võimsus kVAR-is. Kompensatsiooniseadet iseloomustab ka minimaalne ning maksimaalne reguleerimisastme võimsus ja astmete arv. [19]



Joonis 37. Reaktiivvõimsuse automaatne kompensatsiooniseade. [19]

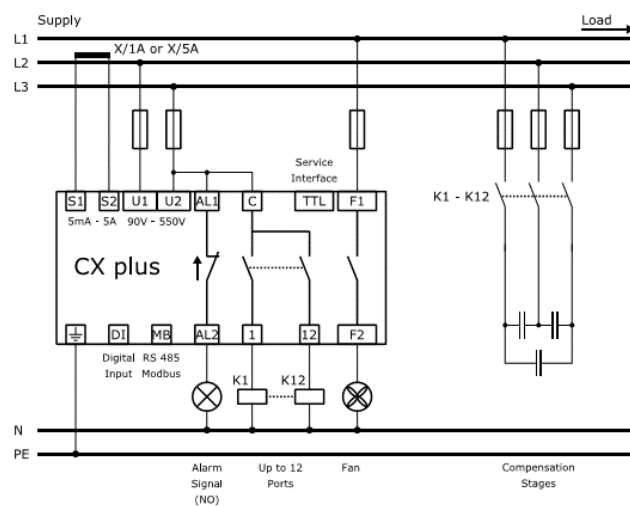
Peamine seade on võimsusteguri kontrollier (Power factor controller) [joonis 38].



Joonis 38. Võimsusteguri kontrolleri *Power Factor Controller CX plus*. [20]

Võimsusteguri regulaator peab arvutada reguleeritava võrgu hetke võimsusteguri väärtuse. Selleks on vaja mõõta võrgu pinget ja voolu. Madalpingevõrgus võetakse pinge voolulattidest ja voolu jaoks paigaldatakse voolutrafid reguleeritava liini lattidele või juhtmetele [joonis 39]. Esmakordsel sisselülitamisel teeb kontrolleri ekraanikontrolli, kuvab kõik sümbolid mitmeks sekundiks ja pakub esimese seadistamise valiku. Eeldusel, et kõik on õigesti ühendatud, alustab seade pärast testimistoimingute edukat lõppemist tööd normaalalitusel. [20]

Connection diagram: CX plus -12R



NOTE: The CX plus is designed to control **capacitive or inductive** stages. Operating both stage types simultaneously is not possible.

Joonis 39. Võimsusteguri kontrolleri ühendusskeem [20]

Töö algoritm on järgmine: seade arvutab võimsusteguri väärtuse; kui väärtus on väike, siis lülitab järgmise astme sisse. Seade arvutab võimsusteguri reaajas ja kui tekib vajadus, lülitab seade sisse

järgmise astme jne, kuni võimsusteguri seadearvu väärtuseni jõudmiseni. Kui võimsustegur ületatakse, lülitab seade viimase astme välja. Niimoodi jälgib seade võimsustegurit reaajas ja töötab automaatrežiimil.

Kondensaatorit saab uuesti sisse lülitada alles pärast tema tühjenemist. Kondensaatoril on omadus laengut hoida, seetõttu veel üks vajalik parameeter on tühjenemise aeg. Kui seade peab pärast astme väljalülitamist sama astme uuesti sisse lülitama, ei saa seade seda teha enne kondensaatori tühjenemist. Toite katkestuse korral saab seade reaktiivvõimsust kompenseerima hakata alles siis, kui kõik kondensaatorid on tühjad.

Kondensaatori tühjendamiseks kasutatakse takisteid, mis on paigaldatud otse kondensaatorile [21] või kontaktorile [22]. Takisti valitakse nii, et ta ei häiriks seadme tööd ja teiseks peab ta teatud aja jooksul tühjendama kondensaatori. Remonttööde tegemisel on oluline seda meeles pidada, et inimene peab ootama teatud aja, kuni kondensaator tühjeneb ja alles siis saab töödega alustada.

Automaatsete seadmete eelisteks on autonoomsus, suurem tõhusus võrreldes mitteautomaatsetega, energiatarbimise säästmine ja seadmete tööiga pikenemine. Puudusteks on kallim hind võrreldes mitteautomaatsete kompensatsiooniseadmetega.

Kuna NRG õppehoone võrgus on pinge- ja vooluharmonikud, siis tavaline kompensatsiooniseade ei sobi paigaldamiseks. Ilma harmoonikute filtrita on võimalik elektrisüsteemi talitus kõrge harmooniliste taseme juures nii voolus kui ka pinges või talitus isegi paralleelresonantsi tingimustes. See on elektriseadmetele kahjulik ja suurendab võimsuskadusid. [16]

3.2 Harmoonikute filtrid

Passiivsed harmoonilised filtrid klassifitseeritakse vastavalt järgmistele kriteeriumidele. 1. Filtride järkus – määratakse kindlaks vooluahela järkude järgi, st kondensaatorite ja reaktorite koguarvuga. Lihtsaimal juhul kasutatakse esimese järgu filtreid. 2. Ühendamise tüüp – koormusega paralleelselt, jadamisi või kombineeritud. Paralleelühendusega filtrite osakaal on suurem, sest läbi selle lülitatakse vaid koormusvoolu väike osa. Samal ajal jadaühendusega filter (jadafilter) peab olema kavandatud täiskoormusvoolu jaoks. 3. Faaside arv ja madalpinge süsteem – ühefaasiline kahejuhtmeline, nimipinge 230 V; kolmefaasiline kolmejuhtmeline ja kolmefaasiline neljuhtmeline. 4. Sagedusvahemik – ühe harmoonilise summutamiseks häälestatud passiivfiltrid ja suures sagedusvahemikus summutavad filtrid. [23]

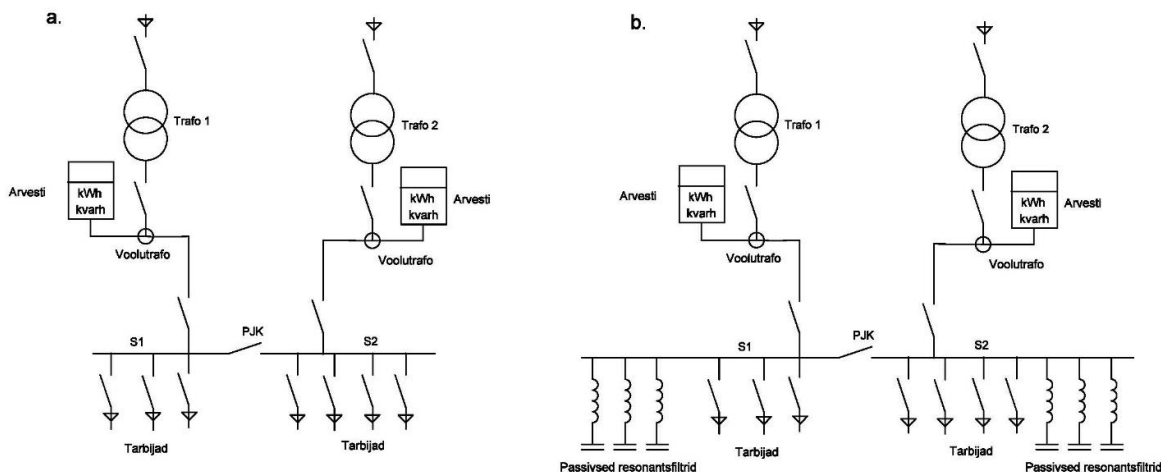
Harmonikuid saab vähendada, suurendades võrgu lühisevoolu, näiteks võrgu takistuse vähendamisega, piirates samal ajal töötavate harmooniliste allikate jõudlust või arvu, tasakaalustades ühefaasiliste koormuste tasakaalustatud ühendamist kolme faasiga, kasutades efektiivsemaid seadmeid (näiteks kasutades 12- või 18-impulsilist sagedusmuundurit 6-impulsilise asemel), kasutades passiiv- või aktiivfiltrit. [24] Üldskeem ilma passivse resonantsfiltrita ja passivse resonantsfiltriga (b) on toodud joonisel [joonis 40]

Passiivfiltrid üks peamistest filtrikompensatsiooniseadmete tüüpe ja need kujutavad endast passiivne sageduse selektiivskeemi, mis tagab mittelineaarse koormuse tekitatud kõrgemate harmoonikute summutamise. Nende peamised eelised on lihtsus ja kasumlikkus. Need ei vaja regulaarset hooldust ning võivad samaaegselt pakkuda harmoonilist summutust ja võimsusteguri korrigeerimist. [23]

Passiivsed harmoonilised filtrid klassifitseeritakse vastavalt järgmistele kriteeriumidele. 1. Filtride järk – määratakse kindlaks vooluahela järkude järgi, st kondensaatorite ja reaktorite koguarvuga. Lihtsaimal juhul kasutatakse esimese järgu filtreid. 2. Ühendamise tüüp – koormusega paralleelselt, jadamisi või kombineeritud. Paralleelühendusega filtrite osakaal on suurem, sest läbi selle lülitatakse vaid koormusvoolu väike osa. Samal ajal jadaühendusega filter (jadafilter) peab olema kavandatud täiskoormusvoolu jaoks. 3. Faaside arv – ühefaasiline, kolmeefaasiline kolmejuhtmeline, kolmeefaasiline neljajuhtmeline. 4. Sagedusvahemik – ühe harmoonilise filtri summutamiseks häälestatud passiivfiltreid või suures sagedusvahemikus harmoonilisi filtreid summutavad filtrid. [23]

Passiivfiltrite põhikomponendid on kondensaatorid, reaktorid (kasutusel on ka termin „induktorid“), takistid ning juhtahela kontroll- ja kommutatsiooniseadmed. Passiivfiltri võib paigaldada konkreetse tarbija häirete vähendamiseks või jaotlas tarbijate kogumi tõttu tekkinud häirete vältimiseks. [25]

Passiivsete resonantsfiltrite peamine eelis aktiivsete filtrite ees on suurem voolupiirkond, soodsam maksumus ning parem töökindlus. Peamiseks puuduseks on vajadus võrgu põhjalikuks analüüsiks projekteerimise ajal, individuaalse filtri valmimiseks, ülekoormus ja muude moonutuste allikate ilmnemise. [25]



Joonis 40. Üldskeem ilma passiivse resonantsfiltrita (a) ja passiivse resonantsfiltriga (b).

Aktiivfiltrid [joonis 41] on loodud mittelineaarsete koormuste harmooniliste taseme vähendamiseks ja vastavalt vajadusele reaktiivvõimsuse muutuste suure dünaamika tagamiseks. Aktiivsetel harmoonilistel filtritel on erinevad põhistruktuurid: jadaühendus, paralleelühendus ja nende kombinatsioon. [25]

Harmoonikate aktiivfilter on reguleeritav vooluallikas, mis ühendatakse paralleelselt koormusega. Kõrgeimaid moonutusi kompenseeritakse võrgus esinevate harmooniliste voolude mõõtmisel ning samaväärse vastasfaasis voolu genereerimisel. Aktiivfiltrite eeliseks on väiksemad gabariidid ja kaal, lihtsam projekteerimine ja paigaldus, lihtne seadistus suures sagedusvahemikus ja see, et neid ei ole võimalik ülekoormata. Puuduseks on see, et aktiivfilter võib olla ise harmooniliste häirete allikas, vähendavad häireid filtri liitumispunktis, elektroonikakomponentidest tulenev suurem rikete oht ja suhteliselt kõrgem hind. [25]

Jadaühenduse korral ühendatakse aktiivne harmooniline filter võrguga trafo mähise kaudu. Selle lahenduse eeliseks on see, et harmoonilist pinget on võimalik otseselt mõjutada ja pingelangusi vähendada, kuna sellises konstruktsioonis toimib filter pingesallikana. [23]

Vaatamata jadaühendusega harmooniliste filtrite tehnilistele eelistele on kõige sagedamini kasutatavad paralleelühendusega filtrid. [26]



Joonis 41. Aktiivne harmoonilise filter. Tootja Merus Power [27]

Mõõtmiste tulemuste analüüsi järgi 2020. aasta veebruaris oli reaktiivvõimsuse osakaal aktiivvõimsuse kõrval 15,4% ehk suhteliselt väike. Ühe nädala lõikes oli kogu tarbitud aktiivenergia 14 216 kWh ja reaktiivenergia 2 185 kVARh. Tarbitud energia arvutus ei pruugi olla täpne, kuna mõõtmised olid teostatud iga sektsiooni kohta järjest erinevatel nädalatel ja pärast tulemused liideti kokku, sest autor on arvamisel, et kogu tarbimine toimub läbi ühe trafo, mistõttu kompenseeritakse II sektsioonist võrku antav reaktiivenergia võrgust tarbitava I sektsiooni energiaga. Samas mõjutab lõpptulemust see, et mõõtmiste ajal üks tööpäevadest oli riigipüha ja sel päeval tarbimine oli võrdne puhkepäeva tarbimisega.

Võttes arvesse ligikaudse reaktiivenergia tarbimist võib arvutada võimaliku aasta tarbimise hinna järgmise valemiga:

$$R * 20\% * h_{kvarh} * 52 = 2185 * 20\% * 0,0051 * 52 \approx 695,35 \text{ €},$$

kus R on mõõtmistest arvatud reaktiivvõimsus kvarh ühikutes, 20% on parandustegur, h_{kvarh} – ühe kvarh hind eurodes vastavalt Elektrilevi kehtivale hinnakirjale [18] ja 52 – nädalate kogus 2020. aastal.

Ehk arveststulik kulu reaktiivenergia eest oleks 695 € + km.

KOKKUVÕTE

Käesoleva töö eesmärk on analüüsida NRG õppehoone elektri kvaliteedi ja reaktiivenergia kompenseerimise vajadust. Töö käigus teostas autor mõõtmised ja nende tulemuste järgi tegi elektritarbimise ja elektri kvaliteedi analüüsi. Antud lõputöös tehtud analüüsi saab kasutada alusena põhjalikuma uuringu teostamiseks või elektrisüsteemi tõhususe tõstmiseks pakutud meetmete rakendamiseks.

Mõõtmised uuritava õppehoone 0,4 kV jaotlas olid teostatud 2019. ja 2020. aastal. Lisaks sai autor kätte energia ettevõtte arvesti registreeritud andmed tunni täpsusega 2019. aasta kohta. Saadud andmete põhjal järeldas autor, et uuritava õppehoone sisseehitatud alajaama kahest trafost oli 2019. aastal koormuse all vaid üks – Trafo 2. Seega, tarbimist läbi Trafo 1 NRG õppehoone 0,4 kV võrgus ei olnud. 2019. ja 2020. aasta mõõtmistulemuste võrdlemisel sai autor sarnased tulemused, mis viitab sellele, et tarbimine toimus läbi Trafo 2.

Mõõdetud elektri kvaliteedi tunnussuuruste analüüs ja eelmise ehk 2019. aasta tulemustega võrdlus näitas, et pinge harmoonmoonutus THD_u tegur ja paaritud harmoonikud U_h kuni 19. järgus ei ületanud standardis EVS-EN 50160:2010 sätestatud nõudeid ning jooksva aastal muutusid väiksemaks. Voolu kogumoonutustegur mõõdetavas punktis oli lubatavuse piires. Kuid oleks hea teha vooluharmoonikute mõõtmised eraldi tarbijate liinidel, sest kui suurem harmoonikute osakaal on vaid ühel tarbijal väikese liini takistusega, siis see võib olla sellele tarbijale kahjulik.

Töö raames saatis autor hinnapäringud passiiv- ja aktiivfiltri maksumusele igale sektsioonile eraldi.

Vastavalt hinnapakumisele I ja II sektsioonile on passiivfiltrite maksumus ilma paigalduseta 4 630 € + km [lisa 3][lisa 4].

Aktiivfiltrite maksumus I ja II sektsioonile oleks 10 082 € + km. Kui nüüd lülitada sektsioonid lahku igaüks oma trafode ehk koormata trafo 1 ja trafo 2, siis II sektsioonile oleks vaja võrku kantava võimsuse kompenseerimiseks reaktorit lisamaksumusega kuni 5 000 € + km [lisa 5].

Autori hinnangul otsest vajadust reaktiivenergia kompenseerimiseks ja harmoonikute filtreerimiseks ei ole. Sektsioonide lahku lülitamisel oleks odavam lülitada II sektsioonile reaktiivvõimsuse tarbijad I sektsioonist, siis kompenseerib see võrku kantava energiat ilma suurte kuludeta.

SUMMARY

The aim of this thesis is to analyze the need for compensation of power quality and reactive energy in NRG study building. In the course of the work, the author performed measurements and based on their results made an analysis of electricity consumption and power quality. The analysis in this thesis can be used as a basis for conducting a more in-depth study or to implement the proposed measures to increase the efficiency of the electricity system.

Measurements in the 0.4 kV switchgear of the study building were performed in 2019 and 2020. In addition, the author received the data recorded by the energy company's meter with hourly accuracy for the year of 2019. Based on the received data, the author concluded that only Transformer 2, one of the two transformers in the built-in substation of the study building, was under load in 2019. Thus there was no consumption through the Transformer 1 NRG study building in the 0.4 kV network. Comparing measurement results of 2019 and 2020, the author obtained similar results, which suggests that the consumption took place through Transformer 2.

The analysis of the measured power quality characteristics and comparison with the results of the previous or results of 2019 showed that the harmonic voltage distortion THDu factor and the paired harmonics U_h up to the 19th stage did not exceed the requirements set in the standard EVS-EN 50160: 2010 and decreased in the current year. The total current distortion factor at the measured point was within acceptable limits. However, it would be a good idea to measure current harmonics on separate consumer lines, because it can be detrimental for a consumer if they have a higher proportion of harmonics with a low line resistance.

As a part of the work, the author sent price inquiries for the cost of the passive and active filters to each section separately.

According to the price offer [annex 3], the cost of passive filters without installation is 4 630 € + VAT.

The cost of active filters for section I and II would be 10 082 € + VAT. If you separate now the sections for each of your transformers, ie load transformer 1 and transformer 2, then section II would need a reactor to compensate for the power supplied to the network for an additional cost of up to 5 000 € + VAT.

KASUTATUD KIRJANDUS

[„Main switchboard (MSB),“ "Ezerkalni", Melnova, Veremu pagasts, Rezeknes novads, LV 4604, 1 Latvia, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.irbis-technology.lv/en/main-switchboard-msb>.] [Kasutatud 16 02 2020].

[füüsikaleksikon.ee, „Tarviti,“ 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://xn--fsikaleksikon-2woba.ee/artikkel/alalisvool/elektritarviti/>.] [Kasutatud 18 01 2020].

]

[H. T. Ü. T. J. K. Mati Meldorf, Jaotusvõrgud, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2007.

3

]

[„Причины появления гармонических искажений,“ [Võrgumaterjal]. Available: 4 <https://ru.electrical-installation.org/ruwiki/>.] [Kasutatud 23 01 2020].

]

[R. Sepaste, „Elektritööde tehniline kirjeldus,“ Contactus AS, Tallinn, 2001.

5

]

[Aktuaalne kaamera, „Tallinna Tehnikaülikool avas energeetikamaja | Arhiiv | ERR,“ Eesti 6 Rahvusringhääling, 27 08 2004. [Võrgumaterjal]. Available:] <https://www.err.ee/422775/tallinna-tehnikaulikool-avas-energeetikamaja>. [Kasutatud 18 03 2019].

[A. R. -. k. j. geinfosüsteemid, „Delfi kaart,“ 2019. [Võrgumaterjal]. Available: 7 <https://kaart.delfi.ee/>.] [Kasutatud 22 04 2019].

]

[T. Tehnikaülikool, „Ülikooli campuse kaart,“ 4 9 2019. [Võrgumaterjal]. Available: 8 https://www.ttu.ee/public/u/ulikool/Kontaktid/kuidas_tulla_TTUsse/Campus_2019_EST-] ENG.pdf.

[T. Tehnikaülikool, „Tulekahju korral tegutsemise plaan (NRG),“ 17 10 2017. [Võrgumaterjal].
9 Available: https://www.ttu.ee/public/h/haldusosakond/TKTP_NRG.pdf.

]

[M.-. j. Kommunikatsiooniministeerium, „Ehitisregistri kood 120224494,“ Majandus- ja
1 Kommunikatsiooniministeerium, [Võrgumaterjal]. Available:
0 <https://www.ehr.ee/app/esileht?15>.

]

[K. Michal ja M. Saks, „Elektripaigaldise käidule ja elektritööle esitatavad nõuded,“ Majandus- ja
1 taristuministeerium, [Võrgumaterjal]. Available:
1 <https://www.riigiteataja.ee/akt/128062015008>.

]

[TalTech, „Taltech - kehtivad võrgulepingud“.

1

2

]

[C. Arnoux, „TREE PHASE POWER QUALITY ANALYSER C.A 8332 C.A 8334,“ Chauvin Arnoux, PARIS,
1 2002.

3

]

[K. Kürsa, „Elektrijaotusvõrkude reaktiivvõimsuse reguleerimisvõimaluste ja mõjude analüüs,“
1 Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2018.

4

]

[T. Vinnal, „Reaktiivvõimsuse kompensatsioon MP tarbijate võrgus,“ TTÜ, Tallinn, 2018.

1

5

]

[T. Vinnal, „Aruanne Nr 19062: Toitepinge kvaliteet Eesti 0,4 kV madalpingevõrkudes ja
1 tarbijapaigaldiste liitumispunktides,“ 2013. [Võrgumaterjal]. Available:
https://energiatalgud.ee/img_auth.php/a/af/Toitepinge_kvaliteet_Toomas_Vinnal.pdf.

6

]

[Naftaenergoprom, „ООО НПП "НафтаЭнергоПром" Производство промышленного
1 оборудования," [Võrgumaterjal]. Available: <http://naftaenergoprom.com/>. [Kasutatud 2020].

7

]

[Elektrilevi, „Elektrilevi võrguteenuse hinnakiri," 1 1 2020. [Võrgumaterjal]. Available:
1 <https://www.elektrilevi.ee/->

8 /doc/8644141/kliendile/Elektrilevi_hinnakiri_vorguteenuse_hinnad_alates_1_jaanuarist_2020

] _EST.pdf. [Kasutatud 2020].

[е. Ш. д. Электрика, „Школа для электрика: электротехника и электроника," [Võrgumaterjal].

1 Available: <http://electricalschool.info>. [Kasutatud 2020].

9

]

[B. GmbH, „Reference Manual CX plus," 03 2019. [Võrgumaterjal]. Available:

2 https://beluk.de/media/custom/2964_340_2.PDF?1563974889. [Kasutatud 2020].

0

]

[d. ETI Elektroelement, „Three phase low voltage power capacitors LPC," [Võrgumaterjal].

2 Available:

<http://www.etigroup.eu/images/userfiles/en->

1 GB/documents/products/building_industry/Three-phase-capacitor.pdf. [Kasutatud 2020].

]

[S. Electric, „Tesy contactors for switching 3 phase capacitor banks," [Võrgumaterjal]. Available:

2 <https://www.industricals.com/download/pdf/schneider-switchgear-brochure-series-8.pdf>.

2 [Kasutatud 2020].

]

[В. П. Довгун, Н. П. Боярская, Д. Э. Егоров, С. А. Темербаев ja Е. С. Шевченко, „Синтез

2 фильтрокомпенсирующих устройств для систем электроснабжения," Сибирский

3 Федеральный университет, 2014.

]

[A. F. Technology, „6 pulse vs. 12 and 18 pulse harmonics effect reduction,“ 06 2015.
2 [Võrgumaterjal]. Available: https://armstrongfluidtechnology.com/~media/documents/sales-4-and-marketing/white-papers/94_22_harmonic_effect_reduction_whitepaper.pdf?la=en.
] [Kasutatud 2020].

[M. F. OÜ, „Harmoonikute filtrid,“ Mainor Fredi OÜ, [Võrgumaterjal]. Available:
2 <http://www.fredi.ee/harmoonikute-filtrid.html>. [Kasutatud 2020].

5

]

[ABB, „Активные фильтры PQFI – PQFM – PQFK – PQFS,“ 2008. [Võrgumaterjal]. Available:
2 [https://search-
6 ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK105713A0351&LanguageCode=ru&Do
\] cumentPartId=&Action=Launch](https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK105713A0351&LanguageCode=ru&DocumentPartId=&Action=Launch). [Kasutatud 2020].

[M. P. D. Oy, „Merus™ Active Harmonic Filters,“ [Võrgumaterjal]. Available:
2 <https://www.meruspowers.fi/products/active-harmonic-filters/>. [Kasutatud 2020].

7

]

[Eaton, „Technical Data SA02607001E. Power factor correction: a guide for the plant engineer,“
2 08 2014. [Võrgumaterjal]. Available:
8 [https://www.eaton.com/ecm/groups/public/@pub/@electrical/documents/content/sa026070
\] 01e.pdf](https://www.eaton.com/ecm/groups/public/@pub/@electrical/documents/content/sa02607001e.pdf). [Kasutatud 04 03 2019].

[EKF, „EKF – российский производитель низковольтной электротехники,“ [Võrgumaterjal].
2 Available: <https://ekfgroup.com/>. [Kasutatud 2020].

9

]

[K. Systems, „KMB Systems,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.kmb.cz>. [Kasutatud 2020].

3

0

]

[ABB, „Активные фильтры PQFI-PQFM-PQFS,“ 2020. [Võrgumaterjal]. Available:
3 [https://new.abb.com/high-voltage/ru/kondensatory-i-filtry/silovyje-condensatory-i-filtry-dla-](https://new.abb.com/high-voltage/ru/kondensatory-i-filtry/silovyje-condensatory-i-filtry-dla-1-setej-nizkogo-napriazheniya/filtry-garmonik)
1 [setej-nizkogo-napriazheniya/filtry-garmonik](https://new.abb.com/high-voltage/ru/kondensatory-i-filtry/silovyje-condensatory-i-filtry-dla-1-setej-nizkogo-napriazheniya/filtry-garmonik). [Kasutatud 2020].

]

[К. Замула, Соколов Ю.В. ja Карманов А.В., „Активный фильтр гармоник как средство
3 повышения качества электрической энергии,“ ООО «Энергия-Т», [Võrgumaterjal]. Available:
2 [https://www.energy-t.ru/about/articles/aktivnyij-filtr-garmonik-kak-sredstvo-povyisheniya-](https://www.energy-t.ru/about/articles/aktivnyij-filtr-garmonik-kak-sredstvo-povyisheniya-2ahUKEwifs4OIs7_pAhVJr4sKHVj5AVMQ6AEwCnoECAoQAQ#v=onepage&q&f=false)
] [kachestva-elektricheskoy-energii.html](https://www.energy-t.ru/about/articles/aktivnyij-filtr-garmonik-kak-sredstvo-povyisheniya-kachestva-elektricheskoy-energii.html).

[T. Suntio ja T. Messo, „Power Electronics in Renewable Energy Systems,“ [Võrgumaterjal].
3 Available:
3 [https://books.google.ee/books?id=gVGgDwAAQBAJ&pg=PA118&lpg=PA118&dq=3P3W+filter&](https://books.google.ee/books?id=gVGgDwAAQBAJ&pg=PA118&lpg=PA118&dq=3P3W+filter&source=bl&ots=RzC5ThjL0v&sig=ACfU3U3CA4T1LL6Q_c0yY9P3dscCMey5IA&hl=en&sa=X&ved=2ahUKEwifs4OIs7_pAhVJr4sKHVj5AVMQ6AEwCnoECAoQAQ#v=onepage&q&f=false)
] [source=bl&ots=RzC5ThjL0v&sig=ACfU3U3CA4T1LL6Q_c0yY9P3dscCMey5IA&hl=en&sa=X&ved=](https://books.google.ee/books?id=gVGgDwAAQBAJ&pg=PA118&lpg=PA118&dq=3P3W+filter&source=bl&ots=RzC5ThjL0v&sig=ACfU3U3CA4T1LL6Q_c0yY9P3dscCMey5IA&hl=en&sa=X&ved=2ahUKEwifs4OIs7_pAhVJr4sKHVj5AVMQ6AEwCnoECAoQAQ#v=onepage&q&f=false)
2ahUKEwifs4OIs7_pAhVJr4sKHVj5AVMQ6AEwCnoECAoQAQ#v=onepage&q&f=false.
[Kasutatud 2020].

[E. Electronics, „Harmonic Filter Reactors,“ [Võrgumaterjal]. Available:
3 http://www.enteselectronics.com/dosyalar/harmonic_filter.pdf. [Kasutatud 2020].

4

]

[Circutor, „Technical article. AFQevo Multifunction Active Filter,“ [Võrgumaterjal]. Available:
3 http://docs.circutor.com/docs/CIR_Article_AFQevo_EN.pdf. [Kasutatud 2020].

5

]

LISAD

Lisa 1 NRG õppehoones kasutatavad tarvid

Tarviti liik	Arvestuslik võimsus, kW
Jahutusseadmed	211
Laboriseadmed	549
Muu	409
Pistikupesad	515
Valgustus	143
Ventilatsioon	108

Lisa 2 NRG õppehoone vent.seadmete töögraafik

	Tööpäeviti		Laupäeviti		Pühapäeviti		Tuulutus
	50%	100%	50%	100%	50%	100%	
301 SV1		7:30- 18:00		9:30- 17:00			E-P 0:00- 5:00
302 SV2	18:00- 07:00	7:00- 18:00	18:00- 07:00	8:00- 17:00	18:00- 07:00		E-L 0:00- 5:00
303 SV3	18:00- 07:00	7:00- 18:00	18:00- 07:00	8:00- 17:00	18:00- 07:00		E-P 0:00- 5:00
304 SV4	7:45- 17:00	7:00- 20:00		09:00- 14:00		09:00- 14:00	E-R 0:00- 6:30
305 SV5		7:00- 17:00					E-L 0:00- 5:00
306 SV6		8:00- 17:00		8:00- 17:00		8:00- 17:00	
304 SV7	7:30- 18:00		7:30- 18:00		7:30- 18:00		

Lisa 3 Hinnapakumine I sektsiooni passiivfiltrile

Projekt : -	19/05/2020
Kliendi viide : Sektsioon 1	
Klient : Aleksandr Mesilane	
Telefon :	Mobiil : 55545963
E-mail : aleksandr.mesilane@gmail.com	
Aadress	
Tänav :	Indeks :
Linn : Tallinn	Maakond : Harju

Spetsifikatsioon

KOK8114 50 kvar 400V 50Hz p=7%

Nimipinge: 400V
Nimisagedus: 50Hz
Nimivõimsus: 50kvar
Astmete võimsus ja arv: 5kvar + 10kvar + 10kvar + 25kvar
Juhtpinge: 230/400V, 50Hz
Moonutus: p=7% (fr=189Hz)
Kondensaatorid: KNK3053 480V 50Hz (vastupidav raskes töörežiimis)
Filterreaktorid: 3UI p=7%
Kontroller: PFC-CX
Kontaktorid: KC AC-6b
Lubatud ülekoormus: 1,1xUn 8 tundi päevas
1,3xIn pidevalt
Temperatuur: -10°C do +40°C
Kondensaatori kaod: < 0.4W/kvar
Seadme kogukaod: < 5W/kvar
Mehaaniline kaitseklass: IP30
Gabaariidid: 600x800x500mm (WxHxD)
Värv: RAL7035
Paigaldus: sise, seinale
Voolutrafo signaal: X/5A
Standardid: IEC60831-1/2, IEC60439

Seade on varustatud sobivate sulavkaitsmetega, vasklatistusega, koomuslülitiga, kaabeldusega, jahutusega ja jahutuse termostaadiga.

Hind: 2485,00 eur

Hind sisaldab transpordi Eesti piires
Hinnale lisandub käibemaks
Paigaldamine ja häälestamine ei ole hinnas

Lk. 1/1

Lisa 4 Hinnapakumine II sektsiooni passiivfiltrile

Projekt : -	19/05/2020
Kliendi viide : Sektsioon 2	
Klient : Aleksandr Mesilane	
Telefon :	Mobiil : 55545963
E-mail : aleksandr.mesilane@gmail.com	
Aadress	
Tänav :	Indeks :
Linn : Tallinn	Maakond : Harju

Spetsifikatsioon

KOK8113 40kvar 400V 50Hz p=7% - põrandale

Nimipinge:	400V
Nimisagedus:	50Hz
Nimivõimsus:	40kvar
Astmete võimsus ja arv:	5kvar + 5kvar + 10kvar + 20kvar
Juhtpinge:	230/400V, 50Hz
Moonutus:	p=5,67% (fr=210Hz)
Kondensaatorid:	KNK3053 480V 50Hz (vastupidav raskes töörežiimis)
Filterreaktorid:	3UI p=7%
Kontroller:	PFC-CX
Kontaktorid:	KC AC-6b
Lubatud ülekoormus:	1,1xUn 8 tundi päevas
Temperatuur:	-10°C do +40°C
Kondensaatori kaod:	< 0.4W/kvar
Seadme kogukaod:	< 5W/kvar
Mehaaniline kaitseklass:	IP30
Gabariidid:	600x800x500mm (WxHxD)
Värv:	RAL7035
Paigaldus:	sise, seinale
Voolutrafo signaal:	X/5A
Standardid:	IEC60831-1/2, IEC60439

Seade on varustatud sobivate sulavkaitsmetega, vasklatistusega, koomuslülitiga, kaabeldusega, jahutusega ja jahutuse termostaadiga.

Hind: 2145,00 eur

Hind sisaldab transpordi Eesti piires
Hinnale lisandub käibemaks
Paigaldamine ja häälestamine ei ole hinnas

Lisa 5 Aktiivfiltri hinnapakumine

Subject: RE: analüsaator

Date: 2020-05-18 23:52

From: Aleksandr Bõstrov <Aleksandr.Bostrov@ve.ee>

To: Aleksandr Mesilane <info@elektritaip.ee>

Пассивного фильтра нет предложить, есть активный с функцией компенсации реактивной мощности:

<http://circuitor.com/en/products/power-factor-correction-and-harmonic-filtering/harmonic-and-emi-filters/afqm-series-detail#documentation>

AFQm-3WF-030M-480 R7MM0F. 3 wires, 230...480 V 30 60A цена 5947eur+km

AFQm -4WF-030M-400 R7RM0F. 4 wires, 230...400 V 30 60A 90A(N) 5041eur+km – в случае надобности компенсации больших токов/гармоник в нейтрали У Circuitor есть готовые стандартные решения, например 3 ступенчатый 50kvar 400V 10 + 20 + 20Kvar с реакторами, цена со скидкой 2585eur+km, комбинация 5, 10, 10, 25 kVAR будет стоить примерно 2900Eur, 5 ступенчатый 5, 10, 10, 10, 15 kVAR около 3300eur

<http://circuitor.com/en/products/power-factor-correction-and-harmonic-filtering/automatic-capacitor-banks/optim-fr-p-p-series-detail>

Т.к. максимальная реактивная мощность около 5kVar, то конденсаторная установка не окупится.

То что реактив идет обратно в сеть, возможно ставить индукторы, но таких мальнких не встречал, цена 25kVar индуктора будет около 5000eur