



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

ELEKTRITARBIMISE JA ELEKTRIKULUDE OPTIMEERIMINE TÖÖSTUSETEVÖTTES ÜHE ETTEVÖTTE NÄITEL

OPTIMIZING ELECTRICITY CONSUMPTION AND ELECTRICITY COSTS IN AN INDUSTRIAL COMPANY ON THE EXAMPLE OF ONE COMPANY

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Alar Kööbi
/nimi/
Üliõpilaskood: 192177AAVM
Juhendaja: Toomas Vinnal, PhD
/nimi, amet/
Kaasjuhendaja: Victor Astapov, PhD
/nimi, amet/

Tallinn 2022

(Tiitellehe pöördel)

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 Detsember 2022.

Autor: Alar Kööbi

/ allkiri digitaalselt/

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

20 Detsember 2022.

Juhendaja: Toomas Vinnal

/ allkiri digitaalselt/

Kaitsmisele lubatud

"....."2022.

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Alar Kööbi (autor) annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Elektritarbimise ja elektrikulude optimeerimine tööstusettevõttes ühe ettevõtte näitel,

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja on Toomas Vinnal,

(juhendaja nimi)

- 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.
- 1.3 Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
- 1.4 Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

20.12.2022 *(kuupäev)*

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 loomingulise 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: Alar Kõöbi

Lõputöö liik: Magistritöö

Töö pealkiri: Elektritarbimise ja elektrikulude optimeerimine tööstusettevõttes ühe ettevõtte näitel

Kuupäev:
20.12.2022

68 lk (*lõputöö lehekülgede arv koos lisadega*)

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): Toomas Vinnal, Victor Astapov

Töö konsultant (konsultandid): Tõnis Tammemägi

Sisu kirjeldus: Käesolevas magistritöös analüüsiti tootmisettevõtte Lasita Maja OÜ toitepinge kvaliteeti, kasutatavaid võimsuseid ja elektritarbimist. Sellega seoses otsiti lahendusi elektrienergiat säästvatele võimalustele, mis otseselt ei mõjutaks tehase tootmisprotsessi.

Töö esimeses osas teostati mitmeid mõõdistusi ettevõtte elektrivõrgu erinevates kohtades. Analüüsiti koormusi, pingekvaliteeti, reaktiivvõimsuse kompenseerimist ja selle mõju toitepingele ning töökorralduslikku mõju elektritarbimisele.

Teises osas analüüsiti elektrienergia liitumislepinguid ja valitud elektripaketi sobivust ettevõtte struktuurile ning töö iseloomule.

Viimases osas loodi mudel ettevõtte elektrivõrgust ja vaadeldi reaktiivvõimsuse kompenseerimist kogumahus ning selle mõju pingele kvaliteedile.

Kokkuvõtvalt toodi välja meetmetd punktidenä, mis võimaldavad ettevõttel saavutada elektritarbimises ilma tootmisprotsessi mahtu vähendamata mõningane kokkuhoid. Lisaks elektrienergia kokkuhoiule on võimalik saavutada ka rahaline sääst.

Märksõnad: magistritöö, pingekvaliteet, reaktiivvõimsuse kompenseerimine, DigSILENT, PQ Log, elektriliitumise leping.

ABSTRACT

Author: Alar Kööbi

Type of the work: Master Thesis

Title: Optimizing electricity consumption and electricity costs in an industrial company on the example of one company

Date: 20.12.2022

68 pages (the number of thesis pages including appendices)

University: Tallinn University of Technology

School: School of Engineering

Department: Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

Supervisor(s) of the thesis: Toomas Vinnal, Victor Astapov

Consultant(s): Tõnis Tammemägi

Abstract: In this master's thesis, the quality of the supply voltage used capacities, and electricity consumption of the production company Lasita Maja OÜ was analyzed. In this regard, solutions were sought for energy-saving options that would not directly harm the factory's production process.

In the first part of the work, several measurements were carried out in different places of the electrical network. Voltage quality, reactive power compensation, and its effect on electricity consumption's supply voltage and operational nature were analyzed.

In the second part, electricity connection contracts and the suitability of the selected electricity package for the company's structure and working nature were analyzed.

In the last part, a model of the company's power grid was created and the compensation of reactive power in the total volume and its effect on voltage quality were observed.

In summary, the points that allow the company to achieve some electricity consumption savings without reducing the production process volume were brought out. In addition to saving electricity, financial savings can also be performed.

Keywords: master's thesis, voltage quality, reactive power compensation, DigSILENT, PQ Log, electricity connection agreement.

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	Elektritarbimise ja elektrikulude optimeerimine tööstusettevõttes ühe ettevõtte näitel
Lõputöö teema inglise keeles:	Optimizing electricity consumption and electricity costs in an industrial company on the example of one company
Üliõpilane:	Alar Kööbi, 192177AAVM
Eriala:	Elektroenergeetika
Lõputöö liik:	Magistritöö
Lõputöö juhendaja:	Toomas Vinnal
Lõputöö kaasjuhendaja:	Viktor Astapov
Lõputöö ülesande kehtivusaeg: (kehtivusaja annab juhendaja)	31.12.2023
Lõputöö esitamise tähtaeg:	21.12.2022

/allkirjastatud digitaalsel/ /allkirjastatud digitaalsel/ /allkirjastatud digitaalsel/

Üliõpilane (allkiri) Juhendaja (allkiri) Õppekava juht (allkiri)

/allkirjastatud digitaalsel/

Kaasjuhendaja (allkiri)

1. Teema põhjendus

Seoses kasvavate elektrienergia hindadega otsivad tootmisettevõtted kohti elektrikulude optimeerimiseks, üheks selliseks võimaluseks on elektritarbimise optimeerimine ja sellega seoses ka kulude kokkuhoidu. Lisaks soovib ettevõtte analüüsida elektripinge stabiilsust tööstusseadmete erinevatel koormustel, et tagada seadmete efektiivne tõrgeteta töö ja kasutegur.

2. Töö eesmärk

Töö põhieesmärk on uurida ühe tööstusettevõtte näitel elektrienergia tarbimist ja leida võimalusi tarbimise optimeerimiseks ja elektrienergiale kuuluvate kulude vähendamist.

Töös uuritakse tööstusettevõtte madalpingevõrgu pinge kvaliteeti sõltuvalt tarbimise iseloomust ja pingekvaliteeti mõjutavaid tegureid ning elektritarbimise iseloomu. Töö eesmärgiks on pakkuda ettevõttele välja võimalikud kokkuhoiu kohad elektrienergia säästlikumaks tarbimiseks. Lisaks analüüsitakse valitud elektrienergia pakettide sobivust vastavalt tarbimise iseloomule. Töös luuakse mudel, millega võrreldakse mõõdetud tulemusi ja mudeli poolt loodud tarbimist, see võimaldab analüüsida ning vajadusel ette näha erinevate elektrienergia tarbimis viisidel tekkivaid kulusid.

3. Lähteandmed

Ettevõtte elektritarbimise ja pingekvaliteedi parameetrite mõõtmine ja mõõdetud andmete kogumine. Mõõtepunktideks valitakse ettevõtte madalpinge poolel trafo klemmid. Trafo klemmidel tehakse täpsemad mõõtmised ühe tööpäeva jooksul ja ühe töönädala jooksu. Mõõtmised teostatakse lisaks mõlemas kilbiruumis ja ühe suurema tarbija elektrikilbis.

Elektrilevi OÜ-lt küsitakse tarbimisandmete analüüs vastavalt tarbitud võimsustele pikema perioodi kohta.

Elektriarvete analüüsimiseks kasutatakse viimase aasta elektriarveid.

4. Ülesanne ja uurimismeetodid

Töös teostatakse mõõtmised tööstusettevõtte madalpingevõrgus. Uuritakse toitepinge kvaliteeti ja ettevõtte tarbimist mõjutavaid tegureid, tarbijate käivitusmomentidest ja kaablite ülekoormatusest tekkivaid pinge languseid, tipukoormuseid, võimsuste analüüsi ja tühijooksul olevate tarbijate osakaalu. Uuritakse koormuseid, reaktiivvõimsuse osakaalu ja reaktiivvõimsuse kompenseerimist. Pingete juures uuritakse pinge hälbeid vastavalt tarbimise iseloomale. Uuritakse pinge ja voolu harmoonilisi moonutusi ettevõtte madalpingevõrgus.

Luuakse mudel ettevõtte tarbimise võrdlemiseks ja optimeerimiseks, mudeli loomiseks kasutatakse modelleerimisprogrammi **DigSILENT**. Võrreldakse ja analüüsitakse mõõdetud tulemusi ja mudelis arvutatud tulemusi. Esitatakse võimalikud ettepanekud tarbimise parandamiseks lähtudes võrdlustulemustest.

Analüüsitakse ettevõtte elektriarveid ja sõlmitud elektrienergia ja võrguteenuse lepingut. Uuritakse võimalikke rahalise kokkuhoiu võimalusi erinevates lepingu osades.

5. Graafiline osa

Suuremad graafilised joonised on esitatud töö lõpu osa. Peamised joonised on esitatud töö sees teksti osa vahel.

6. Töö struktuur

Töös analüüsitakse tööstusettevõtte Lasita Maja OÜ elektritarbimise iseloomu.

Sissejuhatus

1. Teooria
 - 1.1. Ettevõtte struktuur
 - 1.2. Pinge-, voolu- ja võimsusparameetrid
 - 1.3. Elektri kvaliteet ja mõjutavad tegurid
 2. Elektri tarbimiste mõõtmine ja analüüs
 - 2.1. Mõõtepunktid
 - 2.2. Mõõdetud tarbimised
 - 2.3. Tarbimiste ajalugu ja valitud elektripaketid
 - 2.4. Tarbimiste analüüs
 3. Tarbimisvõimsuste modelleerimine
 - 3.1. Modelleerimiste meetodid
 - 3.2. Võrguarvutuse modelleerimine ja mudeli koostamine
 4. Tulemuste võrdlusmoment ja analüüs
 5. Elektrienergia ja võrguteenuse lepingud ning valitud paketid
 - 5.1. Elektriarvete analüüs
 - 5.2. Soovitused elektrienergia ja võrguteenuse paketi valitus
 6. Järeldused ja soovitused elektritarbimise ning elektrikulude vähendamiseks
- Lõputöö kokkuvõte
- Kasutatud kirjandus

8. Kasutatud kirjanduse allikad

1. M. Meldorf, H. Tammoja, Ü. Treufeldt ja J. Kilter. 2007. Jaotusvõrgud. TTÜ kirjastus. Tallinn.
2. T. Vinnal. 2011. Eesti ettevõtete elektritarbimise uurimine ja soovituste väljatöötamine tarbimise optimeerimiseks. Tallinn
3. M. Meldorf. 2008. Electrical network load monitoring. Tallinn
4. R. Teemets ja T. Vinnal. 2013. Elektrienergia säästlik kasutamine hoonetes. TTÜ kirjastus.
5. R. Teemets ja J. Tomson. 1995. Ventilaatorid. Tallinn
6. T. Lehtla ja T. Vinnal. 2015. Elektrivarustuse tulevikuvisioonid. Tallinn

9. Lõputöö konsultandid

Victor Astapov – TalTech teadur

Tõnis Tammemägi – Ettevõtte majandusjuht.

Elektrilevi OÜ kliendihaldur.

10. Töö etapid ja ajakava

1. Lõputöö ülesande esitamine – 01.10.2022
2. Ettevõtte tarbimise mõõdistamine – 01.07.2022 – 01.10.2022
3. Teoreetilise osa kirjutamine – 15.10.2022
4. Töö esimene versioon valmis – 01.11.2022
 - 4.1. Uuringu tulemuste kirjeldamine
 - 4.2. Järelduste ja kokkuvõtte kirjutamine
5. Juhendajale läbilugemiseks saatmine – 15.11.2022
 - 5.1. Paranduste sisseviimine
6. Kaitsmistaotluse esitamine – 12.12.2022
7. Töö lõplik versioon valmis – 15.12.2022
8. Lõputöö esitamine – 21.01.2023

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
EESSÕNA	11
SISSEJUHATUS	12
1 ELEKTRITARBIMINE ETTEVÕTTES JA SEDA ISELOOMUSTAVAD TEGURID	13
1.1 Ettevõtte struktuur	14
1.2 Pinge-, voolu- ja võimsusparameetrid	20
1.3 Elektri kvaliteet ja seda mõjutavad tegurid	25
2 ELEKTRI TARBIMISE MÕÕTMINE JA ANALÜÜS	26
2.1 Mõõtepunktid	26
2.2 Mõõdetud tarbimised	28
2.2.1 Nimipinge vastavus ettevõtte tarbimisele, pingelohud ja pingemuhud	28
2.2.2 Pingeharmonilised moonutused	38
2.2.3 Reaktiivvõimsuse osakaal ja selle kompenseerimine	41
2.2.4 Tipuvõimsused ja selle vähendamise võimalused	43
2.2.5 Alajaama trafo koormatus ja trafokaod	46
2.3 Tarbimiste ajalugu ja valitud elektripaketid	48
2.4 Elektriarvete analüüs	51
2.5 Tarbimiste analüüs	55
3 TARBIMISVÕIMSUSTE MODELLEERIMINE	57
3.1 Modelleerimiste meetodid	58
3.2 Võrguarvutuse modelleerimine ja mudeli koostamine	58
4 JÄRELDUSED JA SOOVITUSED ELEKTRITARBIMISE NING ELEKTRIKULUDE VÄHENDAMISEKS	63
LÕPUTÖÖ KOKKUVÕTE	65
SUMMARY	67
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	69
LISA 1	71

EESSÕNA

Lõputöö teema sai leitud TalTechi Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi poolt pakutavate lõputööteemade nimekirjast. Teema mõte haalus koheselt maailmas toimuva reaalse olukorraga. Vahetult aasta 2021 lõpus hakkasid elektrienergiainnad hüppeliselt kasvama ja see mõjutas tugevalt paljusid eratarbijaid ja ettevõtteid üle kogu Eesti. Lõputöös vaadeldud ettevõtte Lasita Maja OÜ sai sarnaselt teiste tarbijatega suurenenud elektrienergia hindadest pihta, mis hakkas pärssima lõpptooodangute hindu. Suurenev väljaminek tootmise kuludele, mille üheks märkimisväärseks osaks on elektrienergia, hakkas tõstma ka valmis toodangu hinda. Ettevõttes hakati otsima kõikvõimalike lahendusi kokku hoiuks ja elektrienergia säästlikum kasutamine haalus koheselt ka valitud lõputöö teemaga.

Koos juhendaja Toomas Vinnaliga sai sõnastatud lõputöö teema vastavalt reaalsele olukorrale, mida saab uurida ja millised järeldused võiksid ka hiljem ettevõttele tegelikult kasulikud olla. Eesmärk sai püstitatud selliselt, et lõputöös vaadeldakse neid võimalusi elektrienergia säästmiseks, mis ei nõua otsest tehase masina pargi kapitaalset uuendamist. Kuidas töökorralduslikud protsessid võimaldavad kokkuvõttes elektrienergiat säästlikumalt kasutada.

Enne kõike soovin tänada lõputöö tegemisel, juhendajat Toomas Vinnalit, kelle konstruktiivsed märkused, innustavad mõtted, kuid mitte survestav suhtumine, aitasid selle lõputöö valmis saada. Samuti soovin tänada kaasjuhendajat Victor Astapovit, kes aitas kaasa modelleerimistarkvara tundma õppimisel, lõputöös loodud mudeli valmimisele ja analüüside tegemisele. Veel soovin eraldi tänada ettevõtte majandusjuhti Tõnis Tammemägi, kes võimaldas kogu seda protsessi tehniliselt teostada, lisaks hankis terve aasta elektriarvete väljavõtted ja oli ettevõtte poolne tugiisik. Veel tahaksin tänada DigSILENTi esindajat, kes aitas kaasa modelleerimistarkvara hankimisel ja Elering AS klienditeenindajaid ning veel ka käidujuhti Risto Pooli.

Kõiki inimesi, kes lõputöö valmimisel kaasa aitasid ei jõua siin eessõnas üles lugeda, aga eriline tänu kuulub minu perekonnale, kes pingelistel hetkedel nõu ja jõuga toeks olid.

SISSEJUHATUS

Seoses Euroopa majandusliku olukorra ja üha enam kasvavate elektrienergiainhindadega otsitakse kõiki võimalike kohti kulude kokku hoidmiseks. Üheks võimalikuks kohaks tootmis ettevõtetes on elektrienergia tarbimise vähendamine ja sellega kaasnevalt ka kulude kokku hoidmine. Käesolevas lõputöös analüüsitakse puitmaju tootva ettevõtte Lasita Maja OÜ elektrienergia tarbimist nii tootmis protsessi käigus, kui ka tehase eksploatatsiooniks kuluva elektrienergia kulu tehase seimise ajal. Selleks kasutatakse elektrivõrgu analüsaatorit Fluke 1745 Power Quality Logger Memobox ja tarkvara PQ Log. Mõõtetulemusi kogutakse tehases erinevates tarbimis kohtades, et oleks võimalik analüüsida kogu tehase ja erinevate lõikude elektrienergia tarbimist. Lisaks luuakse mudel tehase elektrisüsteemist elektritarbimise modelleerimiseks võrguarvutus programmiga DigSILENT Power Factory 2023. Loodud mudeliga saadud arvutustulemusi võrreldakse tehases tehtud mõõtmistega ja analüüsitakse kohti, kus elektrienergia tarbimist on võimalik optimeerida. Lisaks saab analüüsida, kui palju on võimalik elektrienergia tarbimist kokku võttes säästa, kui muuta elektripaigaldisese mõningaid passiivseid osi. Näiteks, kui suurendada reaktiivvõimsuse kompenseerimist, siis millist efekti see annab tehase koguvõimsusele, toitepinge kvaliteedile ja kokkuvõttes elektri hinnale.

Lõputöös analüüsitakse ettevõtte viimase kümne kuu elektri arveid ja elektripakette. Võrreldakse alternatiivseid pakutavaid elektripakette ja antakse soovitusel elektri arvetele kuluva summa vähendamiseks.

1 ELEKTRITARBIMINE ETTEVÖTTES JA SEDA

ISELOOMUSTAVAD TEGURID

Elektrienergia tarbijaid jaotatakse era- ja äritarbijateks. Eratarbijateks on enamasti elumajad või korterelamud. Eratarbijaid antud lõputöös pole käsitletud.

Äritarbijateks võivad olla nii tehased, kaubanduskeskused, büroohooned, koolid, haiglad jne. Äritarbijate tarbimisharjumusi peab analüüsima erinevalt, vastavalt tarbimis iseloomule. Kui büroohoonetes ja kaubanduskeskustes võivad valdava osa koormusest kujundada valgustus ja kütte seadmed, väiksemal määral ventilatsiooni seadmed, siis tootmisettevõtetes moodustavad suurema osa tarbijatest tööstusmasinad. Tarbimis harjumusi tuleb kindlasti vaadelda ka ajalises graafikus, kas tarbimine on mingitel kindlatel kellaaegadel või on tarbimine jaotatud kogu päeva ulatuses ühtlaselt. Jaotatud tarbimine toob alla tipu tarbimist ja vähendab üksikute hetkede suuremaid koormuseid. Veel tuleb vaadelda, kas on võimalik osa tarbimist jaotada soodsama elektrienergia hinnaga ajale, näiteks öisele ajale.

Tehastes toimub töö kindlate tööajagraafikute alusel, sellisel juhul saab ennustada seadmete käivitamist vastavate kellaaegade järgi. Tarbimine kasvab normaalkoormusele, kui tehases töö toimub täis võimsusel. Seadmete käivitamisel üheaegselt võivad koormused kasvada üle lubatud normaalkoormuse ja halvimal juhul rakendub kaitseseade. Seega on mõistlik tipukoormuste vähendamiseks suuremaid seadmeid, mille valdav osa tarbijatest moodustavad elektri mootorid, käivitada ajalise viitega. Kindlasti pole otstarbekas kõiki elektrimootoreid eraldi käivitada, seda on mõistlik eelnevalt majanduslikult hinnata, kui ühe suurema mootori käivitamine võib võtta aega kuni üks minut, siis kümne mootori käivitamine oleks sellisel juhul kümme korda kauem. Kas tootmisliini kümne minutiline käivitamiseks kuluv aeg kaalub üles selle hinna, mis maksab tekkiv lisa kulu tipu koormuse korral. Tipukoormust arvutatakse ühe kuu kõige suurema tarbimisega tunni keskmise võimsuse järgi. Selle tõttu, kui soovida tipukoormust hoida madalal, siis peab see toimuma kogu mõõteperioodi vältel. Antud töös ei vaadelda seda, kui palju on võimalik tehases toota valmis toodangut mingi kindla koguse elektrienergia hulgaga. Kuna tootmisprotsessid ja toodetav materjal on erinev, ei saa materjali tootmisele kuluvat elektrienergiat kogust hinnata.

Töös vaadeldakse enne kõike ettevõtte elektrienergia kulude optimeerimist ja otseselt sellega tulenevat rahalist kokkuhoidu. Töös ei vaadelda üldisemat ettevõtte elektripaigalduse toimimist nagu tõrked, katkestused, elektrijuhtmete sobivad ristlõiked jne. Kuna ettevõtte tehas on suhteliselt uus ja masinapark kaasaegne, selle tõttu eeldatakse, et tegemist on toimiva ettevõttega, mille elektripaigaldis vastab elektriprojektis välja arvutatud nimi koormustele.

Antud töös vaadeldakse järgmisi elektrienergia kulude kokkuhoiu võimalusi:

- Nimipinge ja pingeniivo vastavus ettevõtte elektriseadmetele ja nende koormusele
- Pingelohud ja pingemuhud
- Pinge harmoonilised moonutused
- Reaktiivvõimsuse osakaal ja selle vähendamise võimalused
- Tipuvõimsused ja selle vähendamine
- Alajaama trafo koormatus ja trafokaod
- Elektrienergia liitumisleping ja selle sobivus ettevõtte tarbimise struktuurile

1.1 Ettevõtte struktuur

Tööstusettevõtte OÜ Lasita Maja (töös nimetatud ka lihtsalt ettevõtte) puhul on tegemist puitmaju tootva tehasega. Ettevõtte asutati aastal 1998 ja on tänaseks tõusnud Euroopa üheks suurimaks puitmaju tootvaks ettevõtteks. Tehas asub Tartu lähedal Pihva külas. Ettevõttes töötab enam kui 250 inimest ja toote valikusse kuulub ligi 500 erinevat puitehitist. [1]

Ettevõttel on kolm tootmishoonet, põhi toodang toodetakse Tartu lähedal Pihva külas asuvas tootmishoones (vt Joonis 1), erimajad toodetakse Tartus Tähe tänava tootmishoones ja väiksem tootmisüksus asub ka Tartumaal Lääniste külas, hoides sellega üleval regionaal elu ja pakkudes töökohti väljaspool Eesti suurlinnasid.



Joonis 1. Lasita Maja OÜ ettevõtte Pihva tootmishoone [2]

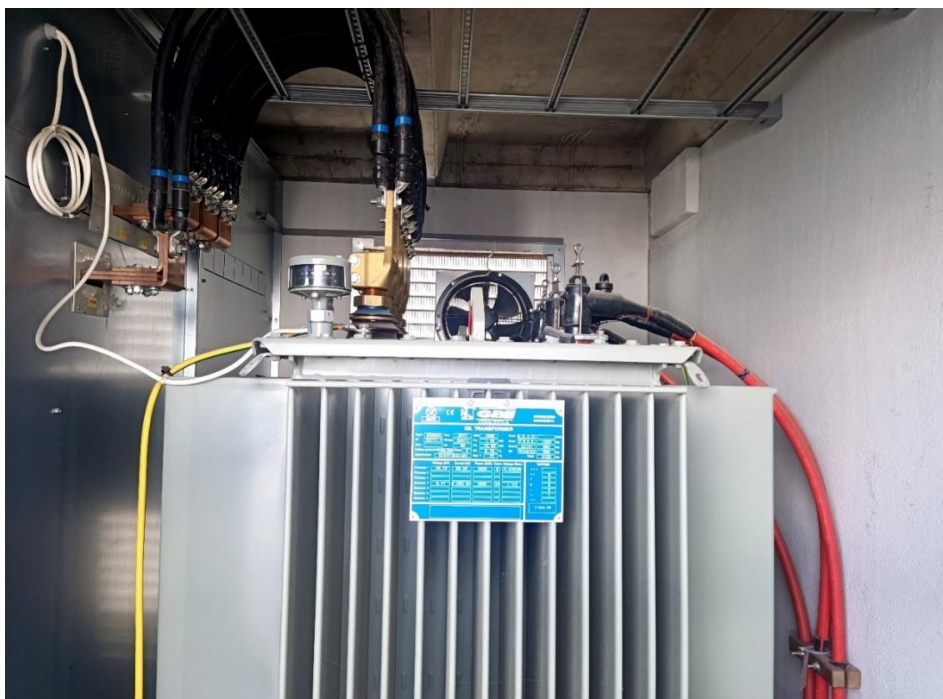
Ettevõtte põhi tootmine kolis Pihval asuvasse tootmishoonesse 2011 aasta augusti kuus. Viis aastat tagasi ehitati olemasolev tootmishoone kaks korda suuremaks, mille järel tekkis vajadus lisa elektrienergia võimsusele. Rajati uus 15/0,4[kV] alajaam ja teine kilbiruum uue hoone toiteks. Ettevõtte tehases paigaldati ümber tootmiseseadmed selliselt, et suurimad tarbijad saavad toite uuest rajatud kilbiruumist.

Ettevõtte toitealajaamas on trafo pingega 15/0,4[kV]. Ettevõtte madalpinge poole peal on kaks eraldi seisvat toiteliin. Kummagi toiteliini lõpus on eraldi seisev kilbiruum. Ettevõtte hoone on piltlikult jaotatud kaheks osaks. Vana hoone kilbiruumi toiteks on kasutatud kuus paralleel kaablit, mille mark on MCMK 4G240. Uue hoone kilbiruumi toiteks on kasutatud kaheksa paralleelset kaablit, mille mark on AXPK 4G240.

Alajaama toitrafo parameetrid on järgmised:

- Ühendusgrupp Dyn11
- Sagedus 50 [Hz]
- Primaarpinge $U_{pri} = 15,75$ [kV]
- Sekundaarpinge $U_{sek} = 0,41$ [kV]
- Primaarvool $I_{pri} = 59,69$ [A]
- Sekundaarvool $I_{sek} = 2253,07$ [A]
- Nimivõimsus $S_T = 1600$ [kVA]
- Trafo tühijooksuvool $I_{tT\%} = 0,6$ [%]
- Trafo lühispinge $U_{kT\%} = 4,5$ [%]
- Trafo tühijooksukadu $\Delta P_{tT} = 1,64$ [kW]
- Trafo lühiskadu $\Delta P_{kT} = 14,5$ [kW]
- ΔP_T - trafo aktiivvõimsuskadu [kW]
- ΔQ_T - trafo reaktiivvõimsuskadu [kvar]

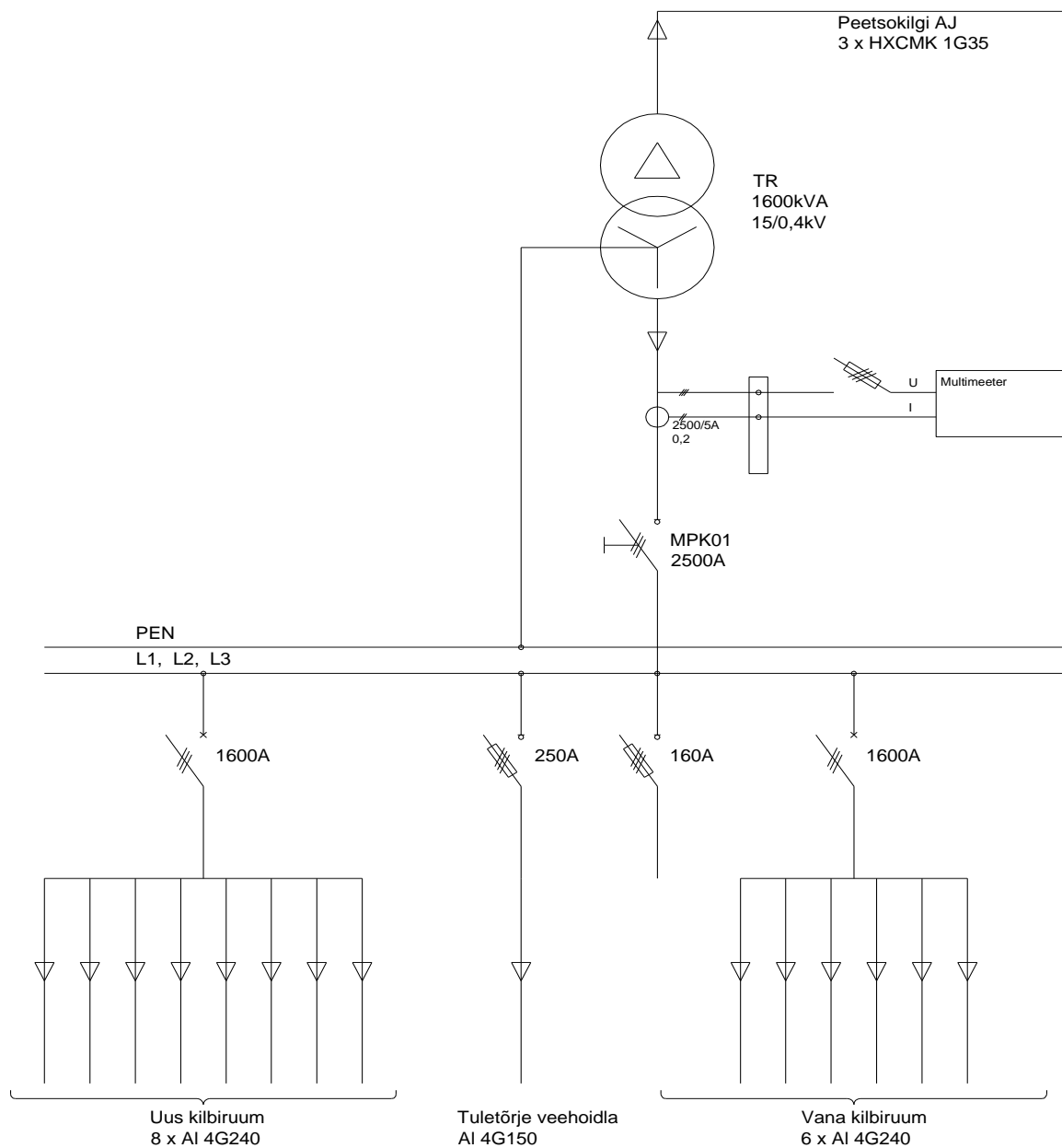
Alajaama trafo on näidatud joonisel 2



Joonis 2. Peetsokilgi alajaama trafo 15/0,4[kV]

Lisaks on alajaama tarbijateks veel tuletõrje ehk sprinklersüsteem. Kuna tulekustutussüsteem tarbib elektrit ainult tulekustutuse faasis, kontroll rõhu hoidmiseks ja talvel hoone kütteks, siis selle hoone püsikoormus võrreldes kogu tehasega on marginaalne. On ka alajaama omatarve, milleks on alajaama valgustus ja ventilatsioon, need moodustavad samuti alajaama kogu koormusest marginaalse osa ja lõpu töös eraldi neid ei vaadelda.

Alajaama madalpinge poole elektriskeem on toodud joonisel 3.



Joonis 3. Alajaama madalpinge kaablite jaotus kilbiruumide vahel.

Ettevõtte kontori elektritarbimine võrreldes tehase osa elektritarbimisega on marginaalne. Tehase suurimad elektritarbijad on toodud tabelis 1.

Tabel 1. Tehase suuremad tarbijad, nimivõimsused ja peakaitse nimivoolud

Hoone	Tarbija nimetus	Võimsus kW	Kaitse nimivool A	Juhtmestik
Uus	Höövel H3500		1250	2x(AXQJ4x150/41)
Uus	Kilp BJK1	210	400	AXMK 4G240
Uus	Kilp BJK2	200	400	AXMK 4G240
Uus	Kilp BJK3	100	160	AXPK 4G95
Uus	Kilp BJK4	80	160	AXPK 4G95
Uus	Kilp BJK5	230	400	AXMK 4G240
Uus	Höövel Hydromat 23		200	AXPK 4G120
Uus	Papiliini kilp1	138	250	AXPK 4G120
Uus	Höövel H3500 sisse söötja		160	AXQJ 4x50/16
Uus	Höövel H3500 väljasöötja		160	AMCMK 4x50/16
Uus	Kilp BJK11		160	AXPK 4G95
Uus	Tapiliin Kilp2		160	MCMK 4x70/35
Uus	Uus hoone aspiratsioon		160	AXMK 4G70
Uus	Jaotuskilp BJK13		200	XPK 4G70
Uus	Kilp BJK6		315	XPK 4G240
Uus	Värviliini ahi		250	AXPK 4G240
Uus	Uue hoone Kompressor		160	AXPK 4G120
Uus	Värviliini UV ahi		80	AXPK 4G70
Vana	Kondensaatorseade	300kvar	630	2x(MCMK 4x185/95)
Vana	Vana hoone Aspiratsioon	228	630	2x(AMCMK 4x240Al/72Cu)
Vana	Katlamaja ja kuivati	155	315	2x(AMCMK 4x185Al/57Cu)
Vana	Kontori JK2	141	250	2x(AMCMK 4x150Al/41Cu)
Vana	Vana hoone valgustus	80	160	AMCMK 4x120Al/41Cu
Vana	Välisvalgustus	25	40	AMCMK 4x70Al/21Cu
Vana	Ventilatsiooni keskus VJK2	16	40	AMCMK 4x50Al/16Cu
Vana	Kilp PPK1	8,2	50	MMJ 5x16
Vana	Kilp PPK2	9,2	50	MMJ 5x16
Vana	AMD kelbatapp		50	MMJ 5x16
Vana	Kilp PPK5		50	MMJ 5x16
Vana	Kilp PPK7	21	50	MMJ 5x16
Vana	Kilp PPK8	16	50	MMJ 5x25
Vana	PP Liistusae juures	14,1	50	MMJ 5x25
Vana	Kilp PPK11	9,6	50	MMJ 5x25
Vana	AMD suur tapimasin		125	MMJ 5x50
Vana	Kilp PPK13	16,8	80	MMJ 5x25
Vana	Jaotuskilp JK-S2	13,5	25	MMJ 5x4
Vana	Jaotuskilp JK-M	25	50	MMJ 5x10
Vana	Spliti saag Stenner	35	80	AMCMK 4x50Al/16Cu
Vana	Opticut	37	40	AMCMK 4x50Al/16Cu
Vana	Jaotuskilp JK- S1	40	80	AMCMK 4x95Al/29Cu
Vana	Auer		125	MMJ 5x50
Vana	Jaotuskilp PPK-12		64	MMJ 5x16
Vana	Kompressor		160	AMCMK 4x95Al/29Cu

Ettevõttes on kokku üle saja tööstusseadme, neist suurimad elektritarbijad on üks täisautomaatne hõõvelliin, lisaks kolm väiksemat hõõvelliini. Ettevõttes on kaks täisautomaatset tapiliini ja üks täisautomaatne värviliin. Ettevõttes on veel kaks saepuru eraldus- ehk aspiratsioonisüsteemi. Mõlemas aspiratsioonisüsteemis on viis saepuru eraldus kanalit ventilaatori mootorite võimsused kuni 37 kW ja saepuru kogumis süsteem kahe lint konveieriga ja viie automaatse konteineritesse tühjaks laadimis süsteemiga. Ettevõttes on veel lisaks hulk väiksemaid elektriseadmeid. Enamus tootmisliine kasutavad töötamiseks elektrimootoreid, selle tõttu on ettevõttes tarbitava aktiivvõimsuse kõrval ka reaktiivvõimsus.

Ettevõtte puhtalt aktiivvõimsuse tarbijad moodustavad tehases väiksema osa kogu elektrienergia koormusest, milleks on hoone valgustus ja muud väiksemad elektritarbijad. Suur osa ettevõtte elektrienergia tarbijatest on asünkroonmootorid ja servomootorid. Seadmete põhiselt on mootorite käitamine erinev aga sagedusmuunduritega juhitavaid mootoreid on tehases hinnanguliselt 70 %. Ainult ühe suurema tarbija hõõvel H3500 elektrikilpides on kokku 57 sagedusmuundurit mootorite juhtimiseks. Otsatapiliinil Sacot on elektrikilpides kokku 96 sagedusmuundurit, mis juhivad erinevaid mootoreid. Kõikide liiniseadmete sagedusmuundurite kogu arvu pole kokku loetud, aga hinnang vastab eelmainitule. Joonisel 4 on kujutatud hõõvel H3500 kilbiruum.



Joonis 4. Hõõvel H3500 üks kolmest elektrikilbist.

Joonisel 5 on näha osade mootorite juhtimiseks mõeldud sagedusmuundureid. Vasak poolsel pildil on näha sagedusmuundurid hõövel H3500 mootorite juhtimiseks ja parempoolsel pildil on näha otsatapiliini Sacot elektrikiibi sagedusmuundureid.

Joonisel 6 on näha hõövel H3500 peamise osa hõövli seadme mootoreid.



Joonis 5. Hõövel H3500 (vasakul) ja otsatapiliini Sacot (paremal) sagedusmuundurid.



Joonis 6. Hõövel H3500, hõöveldus sektsiooni põhi mootorid.

1.2 Pinge-, voolu- ja võimsusparameetrid

Toitepingele ja selle kvaliteedile on sätestatud nõuded standardiga EVS-EN:50160:2010+A1+A2+A3:2019 [3]. Antud standard sätestab, et madalpingevõrkude standardnimipinge on $U_n=230[V]$, mis on mõõdetud faasi ja neutraali vahel. Normaolukorras ei tohi standardpinge kõikuda rohkem kui $\pm 10[\%]$ nimipingest.

Standard EVS-EN:50160 järgi normaaltalituse olukorras:

- peab igas nädalases ajavahemikus toitepinge 10-minutilistest keskmistest efektiivväärtustest 95% olema vahemikus $U_n \pm 10[\%]$ [3]
- kõik toitepinge 10-minutilised keskmised väärtused peavad olema vahemikus $U_n + 10[\%]$ kuni $-15[\%]$. [3]

Pingelohud ja pingemuhud on olukorrad, kus pinge väärtus on üle või alla lubatud 10% piiri nimipingest.

Harmonikute pinge standardi EVS-EN:50160 järgi normaaltalitustingimustes peab igas nädalases ajavahemikus iga harmoonika pinge kümne minutilistest keskmistest efektiivväärtustest 95 % olema väiksemad või võrdsed tabelis 2 antud väärtustes. Toitepinge harmoonmoonutustegur THD (*Total Harmonic Distortion*) ehk pingeharmonik ei tohi olla suurem kui 8 %. Harmonikaid üle 25. järgu ei määratleta, kuna nad on enamasti liiga väikesed. [3]

Tabel 2. Pinge harmoonikute väärtused liitumispunktis nimipinge U_n suhtes. [3]

Paaritud harmoonilised				Paarisharmonilised	
3-ga jagamatud		3-ga jaguvad			
Järk h	Suhteline pinge u_h	Järk h	Suhteline pinge u_h	Järk h	Suhteline pinge u_h
5	6,0[%]	3	5,0[%]	2	2,0[%]
7	5,0[%]	9	1,5[%]	4	1,0[%]
11	3,5[%]	15	0,5[%]	6 kuni 24	0,5[%]
13	3,0[%]	21	0,5[%]		
17	2,0[%]				
19	1,5[%]				
23	1,5[%]				
25	1,5[%]				

Harmonilisi moonutusi põhjustavad kõik mittelineaarsed elektritarvitid, milleks on näiteks sagedusmuundurid, sujuvkäivitid, alaldid, keevitusseadmed, reaktiivvõimsuse kompenseerimisseadmed jne. Mittelineaarsetel elektritarvititel on voolu kõver moonutatud kujuga ja erineb siinuselisest.

Vaadeldavas ettevõttes on üks reaktiivvõimsuse kompenseerimise seade, milles on neli eraldi lülitatavat kondensaatorite plokki. Põhilise osa harmoonilisi moonutusi vaadeldavas tehases

võivad tekitada suur sagedusmuundurite kogus, mida kasutatakse liiniseadmete elektrimootorite juhtimiseks.

Aktiivvõimsus, reaktiivvõimsus ja võimsuskaod on otseses sõltuvuses toitepingest. Aktiivvõimsus on kasutatav võimsus, mis läheb vajaliku töö tegemiseks. Ideaalselt oleks jaotusvõrk lõpmata tugev ja jaotusvõrgu takistus null ja sellisel juhul tarbija liitumispunktis oleks toitepinge konstantne sõltumata tarbitavast võimsusest. Reaalses olukorras sellist varianti aga ei eksisteeri ja jaotusvõrgul on olemas oma kogutakistus, mille moodustavad liini takistuste, alajaama takistuste, trafode takistuste jne. summa. Jaotusvõrgu kogutakistus on üldjuhul muutumatu ja selle tulemusel tarbitava võimsuse suurenedes suurenevad ka võimsuskaod jaotusvõrgus. Ülekandeliinide võimsuskadude seosed sõltuvalt pingest ja avalduvad valemiga 1 [4].

$$\begin{cases} \Delta P_l = \frac{R_l P^2}{U_2^2} + \frac{R_l Q^2}{U_2^2} \\ \Delta Q_l = \frac{X_l P^2}{U_2^2} + \frac{X_l Q^2}{U_2^2} \end{cases} \quad (1)$$

Valemis: ΔP_l – aktiivvõimsuskadu ülekandeliinis [W]
 ΔQ_l – reaktiivvõimsuskadu ülekandeliinis [var]
 P – aktiivvõimsus [W]
 Q – reaktiivvõimsus [var]
 R_l – ülekandeliini aktiivtakistus [Ω]
 X_l – ülekandeliini reaktiivtakistus [Ω]
 U_2 – toitepinge tarbijapoolsetel klemmidel [V]

Antud seosest on näha, kuidas tarbija võimsuse tõustes kasvavad ka võimsuskaod ülekandeliinides. Jaotusvõrgu liinide toitepinget reguleeritakse jaotusvõrgu alajaamast trafode astmiklülitite kaudu. Kuna pikematel liinidel on erinevatel kaugustel liini takistused ja see tõttu ka liinipinge erinev, siis vastavalt arvutustele on valitud ka tarbijate alajaamadesse kesk/madalpinge trafodeks sobiva primaarpinge astmega trafod. Pikematel keskpingeliinide võib liini toitealajaama poolses otsas ja liini lõpus olla märkimisväärne pinge erinevus.

Tarbija toitepinge sõltub kõikide võimsuste summadest, mis toiteliini koormavad. Selle tõttu on liini võimsuskadusid väga raske arvutada, kuna on teadmata kõigi teiste klientide tarbitavad võimsused, mis sama aegselt seda toite liini kasutavad.

Võimsuste ja võimsuskadude suurenemine põhjustab otseselt ka pingekadu toiteliinis. Liinide pingekaod avalduvad valemiga 2 [4].

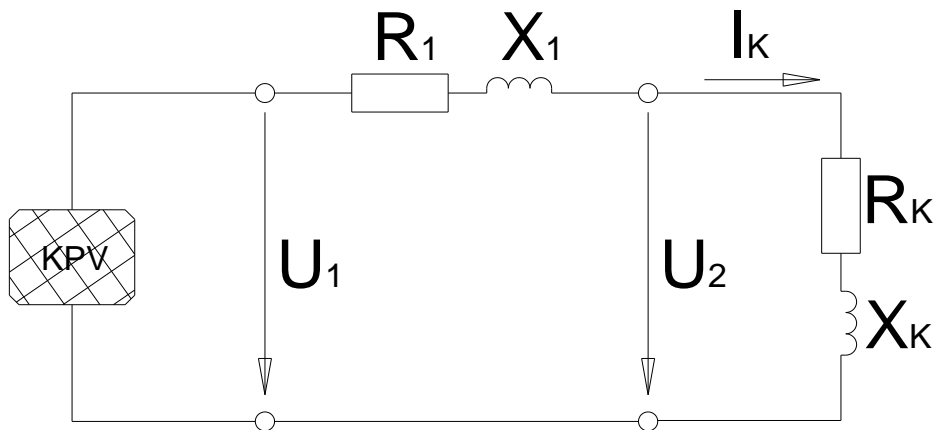
$$\Delta U = \frac{P_k R_l + Q_k X_l}{U} \quad (2)$$

Valemis: ΔU – pingekadu ülekandeliinis [V]
 U – nimipinge [V]
 P_k – kogu aktiivvõimsus [W]

Q_k - kogu reaktiivvõimsus [var]
 R_1 - ülekandeliini aktiivtakistus [Ω]
 X_1 - ülekandeliini reaktiivtakistus [Ω]

Kogu jaotusvõrgu takistust on võimalik leida katseliselt mõõtes kahe erineva koormuse olukorras tarbija liitumis punktis voolu ja pinget. Kuna võib eeldada, et jaotusvõrgu takistus ei muutu ja pinge toite alajaamas on samuti konstantne, siis koormuse suurenedes suureneb ka vool ja pinge langeb. Sellest tulenevalt saab tuua välja üldtuntud seose, mis avaldatakse valemiga 3. Lihtsustatud aseskeem on toodud joonisel 7. [5]

Valemis 3 ja joonisel 7 toodud kogu keskpingevõrgu aktiivtakistus ja reaktiivtakistus on takistuste summa, mille hulka kuuluvad nii keskpingevõrgu-, ülekandeliinide-, kui ka alajaama trafo takistused.



Joonis 7. Pingelangu mõõtmise tarbija koormuse olukorras

Joonisel 7: KPV – keskpingevõrk
 U_1 – keskpingevõrgu toitepinge [kV]
 U_2 – pinge tarbija alajaama 0,4kV klemmidel [kV]
 I_k – koormusvool [A]
 R_1 – kogu keskpingevõrgu aktiivtakistus [Ω]
 X_1 – kogu keskpingevõrgu reaktiivtakistus [Ω]
 R_k – tarbija aktiivtakistus [Ω]
 X_k – tarbija reaktiivtakistus [Ω]

$$U_1 - U_2 = I_k(R_1 + jX_1) \quad (2)$$

Valemis 2: U_1 – keskpingevõrgu toitepinge [kV]
 U_2 – pinge tarbija alajaama 0,4kV klemmidel [kV]
 I_k – koormusvool [A]
 R_1 – kogu keskpingevõrgu aktiivtakistus [Ω]
 X_1 – kogu keskpingevõrgu reaktiivtakistus [Ω]

Eeldusel, et keskpingeliini- ja trafotakistused ning võrgu toitepinge ja ei muutu, vaid muutub ainult tarbija takistus. Sellest seosest saab võrgu takistuste summa kuni tarbija 0,4 kV klemmideni leida valemit 2 lihtsustades järgnevalt:

$$U_1 = konst \quad (3)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + jX^2}$$

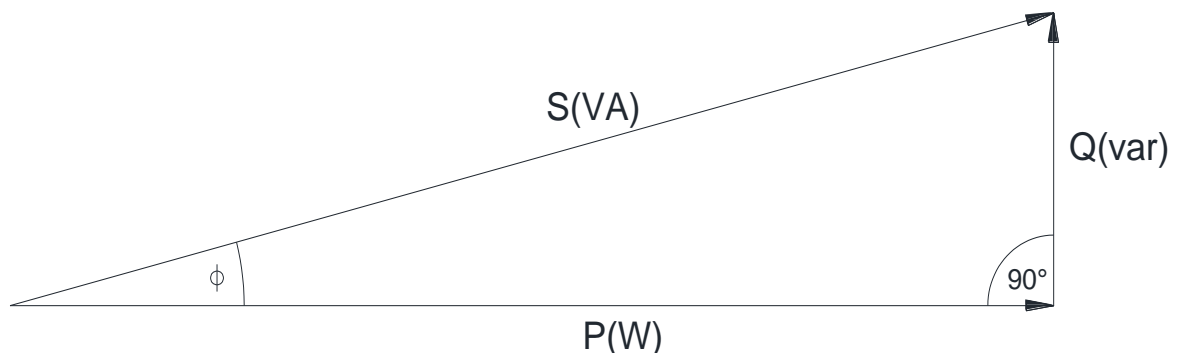
$$\begin{cases} U_1 = I'_k(R + jX) + U'_2 \\ U_1 = I''_k(R + jX) + U''_2 \end{cases}$$

$$I'_k(R + jX) + U'_2 = I''_k(R + jX) + U''_2$$

$$(R + jX) = \frac{U'_2 - U''_2}{I''_k - I'_k}$$

Valemis 3: U'_2 – pinge tarbija klemmidel enne koormuse suurendamist [V]
 U''_2 – pinge tarbija klemmidel pärast koormuse suurendamist [V]
 I'_k – vool enne koormuse suurendamist [A]
 I''_k – vool pärast koormuse suurendamist [A]
 Z – keskpingevõrgu näivtakistus [Ω]
 R – keskpingevõrgu aktiivtakistus [Ω]
 X – keskpingevõrgu reaktiivtakistus [Ω]

Reaktiivvõimsuse osakaal tööstusettevõtetes on alati märkimisväärsel kohal. Aktiivkoormuse korral on pinge ja vool siinuseline ning samas faasis. Reaktiivvõimsuse korral, kus voolu siinuskõver on pinge siinuskõverast ees nimetatakse mahtuvuslikuks koormuseks ja see kui voolu siinuskõver on pinge siinuskõverast taga nimetatakse induktiivseks koormuseks. Tööstuses kasutatavatel elektrimootoritel on lisaks kasulikule aktiivvõimsusele ka reaktiivvõimsus. Reaktiivvõimsus suurendab näivvõimsuse osakaalu üldtuntud vektordiagrammi alusel, vt. joonis 8. Induktiivkoormust saab vähendada lisades elektrisüsteemi mahtuvuslikud elemendid, milleks on kondensaatorseadmed.



Joonis 8. Võimsuste kolmnurk. P – Aktiivvõimsus, Q – Reaktiivvõimsus, S – Näivvõimsus ja $\cos\phi$ – Võimsustegur

Reaktiivvõimsus on kasulik kompenseerida võimalikult tarbija lähedal, et vähendada reaktiivvõimsuse poolt tekitatud kadusid elektrivõrgus. Reaktiivvõimsuse kompenseerimine kasulik järgmistel põhjustel: [6]

- vähenevad voolud ülekandeliinides ja alajaama seadmetes.
- väiksemad reaktiivenergiakulud elektriarvetel
- väiksemad pingelangud liinides ja trafodes
- väiksemad võimsuskadod reaktiivvõimsuse ülekandmisel liinides ja trafodes.

Alajaama trafo koormatus peab vastama valitud trafo võimsusele. Selleks, et vähendada trafo kadusid peab trafo olema koormatud vähemalt 40–60 % [5] ulatuses trafo nimivõimsusest. Trafot ei saa ka üle koormata. Iga trafo tootja väljastab trafo nimivõimsuse ja võimaliku ülekoormuse suuruse vastava aja kestel. Trafo kadude arvutamiseks saab kasutada valemeid 4 ja 5 [7].

$$\Delta P_T = \Delta P_{kT} * \left(\frac{S_k}{S_T}\right)^2 + \Delta P_{tT} \quad (4)$$

$$\Delta Q_T = \frac{Z_{kT}\% * S_k^2}{100 * S_T} + \frac{I_{tT}\% * S_T}{100} \quad (5)$$

Valemis: ΔP_T - trafo aktiivvõimsuskadu [kW]
 ΔQ_T - trafo reaktiivvõimsuskadu [kvar]
 ΔP_{tT} - trafo tühijooksukadu [kW]
 ΔP_{kT} - trafo lühiskadu [kW]
 S_T - trafo nimivõimsus [MVA]
 S_k - trafo kogu koormus [MVA]
 $I_{tT}\%$ - trafo tühijooksuvool [%]
 $Z_{kT}\%$ - trafo lühistakistus [%]

Elektrienergia liitumislepingus kogu tasu koosneb mitmest komponendist, millest osad moodustavad fikseeritud hinnaga püsikomponendid ja teised sõltuvad tarbimise iseloomust. Muutuvad komponendid, mille kogu maksumus sõltub elektri tarbimisest on:

- Kulutatud elektrienergia
- Võrgutasud päeval ja öösel
- Võrguteenuse kasutusvõimsus
- Reaktiivenergia
- Taastuenergia
- Elektriaktsiis

Püsikomponendid ei sõltu elektri tarbimisest ja sõltuvad liitumislepingus kokkulepitud osadest. Püsikomponendid moodustuvad:

- Kuutasu
- Läbilaskevõime tasu
- Alajaama hooldus tasu
- Haldus tasu

1.3 Elektri kvaliteet ja seda mõjutavad tegurid

Elektrikvaliteeti puudutavad tegurid on kirja pandud majandus- ja kommunikatsiooniministri 6. aprilli 2005. a määruse nr 42 „**Võrguteenuste kvaliteedinõuded ja võrgutasude vähendamise tingimused kvaliteedinõuete rikkumise korral**” [8] määrus sätestab nõuded elektri katkestuste kohta, aga teistes pinge kvaliteedi näitajates soovib lähtuda standardist EVS-EN:50160. Standardis EVS-EN:50160 on ära toodud soovituselised elektripinge kvaliteedile, kuid jaotusvõrguettevõtted pole otseselt huvitatud väiksemate häiringutega tegelema.

Elektrikvaliteet tootmisettevõtetes mõjutab enne kõike erinevaid jõuelektroonika seadmeid, nagu sagedusmuundurid ja sujuvkäivimid. Sellised seadmed on eriti tundlikud pingekõverate suhtes. Suuremad pingelangud võivad jõuelektroonika seadmetes põhjustada erinevaid tõrkeid ja voolude suurenemist üle lubatud määra. Seadmed lülituvad välja, kuumenevad üle ja liini seadmed seiskuvad. Suuremad häired võivad põhjustada seadmete eluea vähenemist või purunemist. Vanemad kontaktor juhtimisel olevad seadmed pole nii tundlikud elektrikvaliteedi häiretele. Pingelange võivad põhjustada koormusele valesti dimensioneeritud või liiga pikad toitekaablid, faaside ebaühtlane koormatus, seadmete tööle lülitamisest tekkiv impulsskoormus, mitte piisava võimsusega alajaama trafo.

Pinge langudele on vähem tundlikumad nõrkvooluseadmed, kuna uuemad toitealaldid on juba loodud suuremaid pinget kõikumisi taluma ja enamasti töötavad pingevahemikus 110-250 VAC. Nõrkvoolu seadmed on aga tundlikud pinget hälvete suhtes, mis võivad põhjustada häireid nõrkvoolu seadmetes ja andmesides.

Ettevõttes on elektrienergia kvaliteedi tagamiseks rajatud alajaam vahetult ettevõtte tootmishoone kõrvale, et madalpinge kaablid oleksid võimalikult lühikesed ja sellega seoses vähendada kadusid madalpinge kaablites. Uue hoone kilbiruumi ja alajaama vaheliste toitekaablite pikkus on umbes 70 m ja vana kilbiruumi ning alajaama vaheliste toite kaablite pikkus on umbes 65 m.

2 ELEKTRI TARBIMISE MÕÕTMINE JA ANALÜÜS

Ettevõtte tehases on teostatud mõõtmisi kolme kuu vältel. Mõõtmiste teostamiseks on kasutatud mõõteseadet Fluke 1745 Power Quality Logger Memobox.

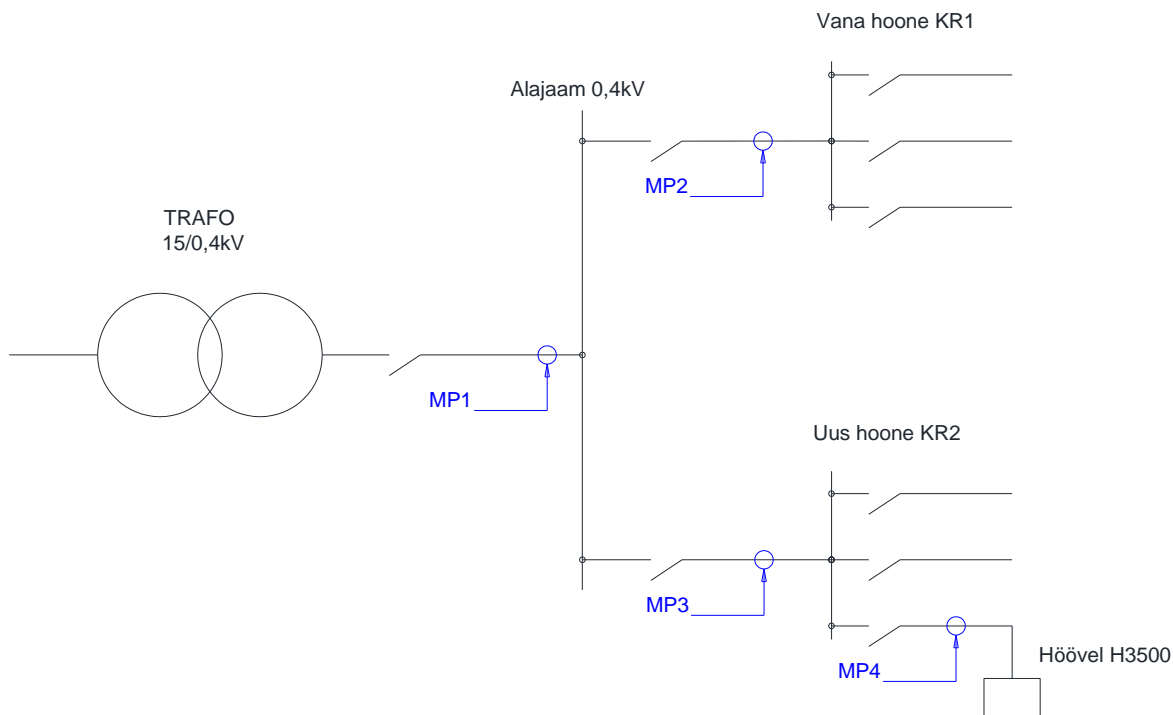
Mõõteseadme iseärasusi arvestades teostati mõõtmisi erinevates kohtades ja erineva ajalise täpsusega. Kuna seadme andmemaht on piiratud, siis suurema täpsusega mõõtmisi sai teostada lühema aja vältel, ühe sekundilise täpsusega mõõtmine on sobiv teostada kuni kolme tunni pikkust mõõtmist. Pikematel ühe nädala pikkustel mõõtmistel, oli vaja valida väiksem täpsus, näiteks 30-ne sekundi pikkune mõõteintervall.

Täpsemad ühe sekundilise intervalliga mõõtmised teostati sellistel aegadel, kus tehases toimusid suuremad võimalikud tarbimis muutused, nagu hommikune tehase seadmete käivitamine. Sellistel aegadel on võimalik analüüsida, milline on voolu hüpe ja pingelang, kui kõik tootmisliini operaatorid käivitavad oma seadmed vastavalt tööplaanile.

Pikemate mõõtmistega saab jälgida tehase tarbimist, kui tehas on töö välisel ajal, nagu öösel või nädalavahetustel.

2.1 Mõõtepunktid

Ettevõtte tootmishoones on kokku üle saja tootmisliiniseadme, millest iga seade koosneb veel väiksematest lõikudes nagu materjali etteandeliini osa, tööd teostava liini osa ja valmis toodangu ladustamis liini osa. Kui tahta saada täit ülevaadet, siis peaks kõik osad eraldi mõõdistama. Selline mõõdistamine oleks aga väga töömahukas ja kõik kogutud andmed vajavad ka eraldi analüüsimist. Seega antud töös on võetud vaatluse alla neli põhilist mõõdistus kohta, et analüüsida tehase elektri tarbimist. Esimeseks on valitud mõõtepunkt **MP1**, mis asub alajaamas 0,4 kV lattidel. Teine mõõtepunkt **MP2** on valitud vana kilbiruumi **KR1** toite lattidelt. Kolmas mõõtepunkt **MP3** on valitud uue kilbiruumi **KR2** toite lattidelt. Neljandaks mõõtepunktiks **MP4** on valitud ühe suurima tarbija hõövel Hydromat 3500 (edaspidi H3500) elektrikilbist toitekaabli klemmidelt. Kõikide mõõtepunktide asukohad on näidatud joonisel 9.



Joonis 9. Valitud mõõtepunktide asukohad. MP1 – alajaama 0,4kV latid, MP2 – vana kilbiruumi latid, MP3 – uue kilbiruumi latid ja MP4 – höövel H3500 toite klemmid.

Mõõtepunktides teostatud mõõtmiste ajad on toodud tabelis 3.

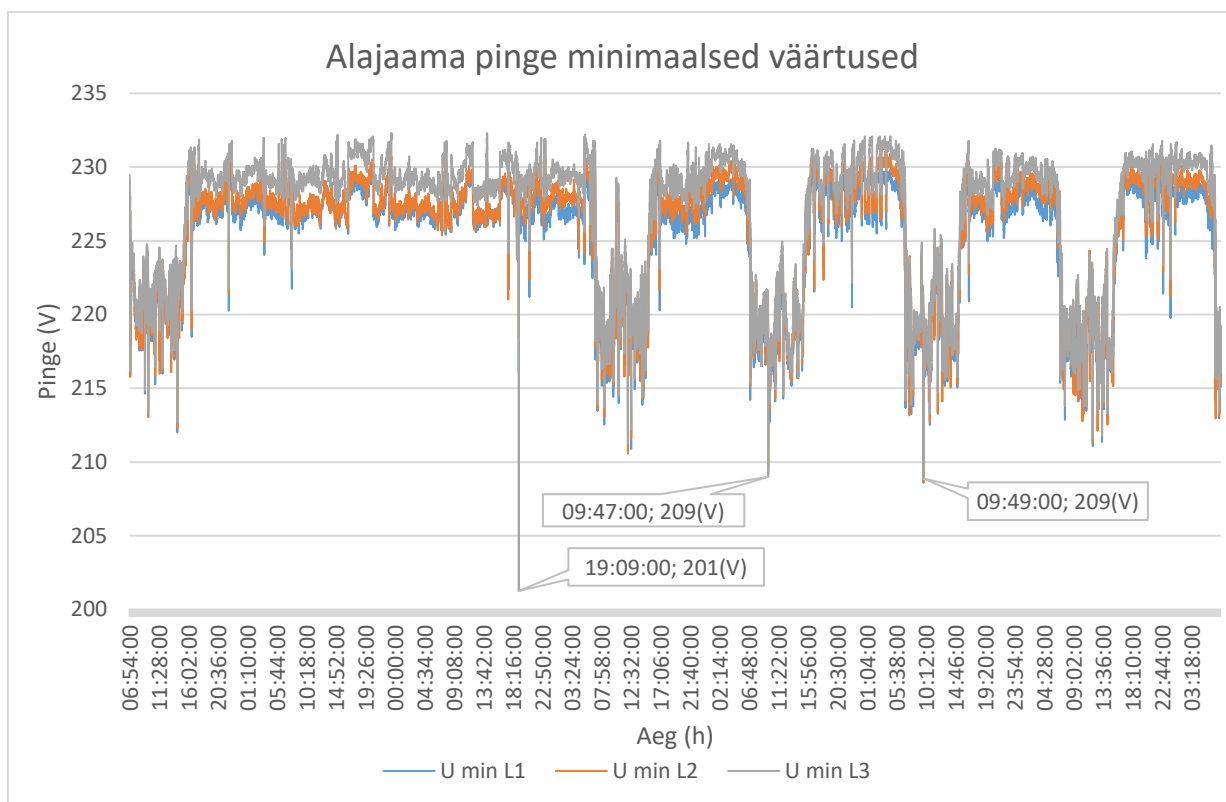
Tabel 3. Teostatud mõõtmiste aeg ja koht

Mõõtmiste koht	Mõõtmiste algus		Mõõtmiste lõpp		Mõõtmiste täpsus	Mida uuriti
	Päev	Aeg	Päev	Aeg		
MP1	15.09.2022	06:34:23	15.09.2022	16:30:00	3s	Ühe tööpäeva tarbimine
MP1	16.09.2022	06:53:40	23.09.2022	07:50:00	1min	Nädala tarbimine
MP1	29.09.2022	07:45:00	29.09.2022	08:02:25	1s	Reaktiivvõimsuse kompenseerimine
MP1	21.07.2022	06:12:56	28.07.2022	05:38:07	10min	Suvine tarbimine
MP2	12.07.2022	18:35:14	20.07.2022	02:30:00	10min	Vana kilbiruumi suvine tarbimine
MP3	10.09.2022	10:32:43	10.09.2022	11:48:12	1s	Uue tehase aspiratsioon ja valgustus
MP3	13.09.2022	06:30:00	13.09.2022	07:42:29	1s	Uue tehase käivitamine
MP3	13.09.2022	07:51:23	13.09.2022	17:00:00	3s	Uue tehase päevane tarbimine
MP3	05.07.2022	08:00:27	12.07.2022	18:01:28	1min	Uue tehase suvine tarbimine
MP4	14.09.2022	09:04:40	14.09.2022	15:20:57	3s	H3500 tarbimine

2.2 Mõõtetulemused ja analüüs

2.2.1 Nimipinge vastavus ettevõtte tarbimisele, pinge lohud ja pinge muhud

Vastavalt standardis EVS-EN:50160 on sätestatud, et pinge väärtused ei tohi erineda nimipingest rohkem kui 10 %, mis on 230[V] ± 10[%]. See tähendab, et pinge peab jääma vahemiku 207 kuni 253 V. Alajaama minimaalse pinge mõõtetulemus ühe nädala jooksul ajavahemikul 16.09 kuni 23.09, on toodud välja joonisel 10. Mõõdetud andmetest tuleneb, et minimaalsed pinge väärtused vastavad standardile EVS-EN:50160. Erandiks on 18.09.2022 kell 19:09 mõõdetud kolmanda faasi pinge väärtus, mis ühe sekundi vältel oli 201 V. Sellise ühe faasi lühiajalise pinge languse põhjus võib olla keskpingevõrgus toimunud kolmanda faasi ja maa lühisest. Pinge langus oli lühiajaline ja toitepinge taastus koheselt.

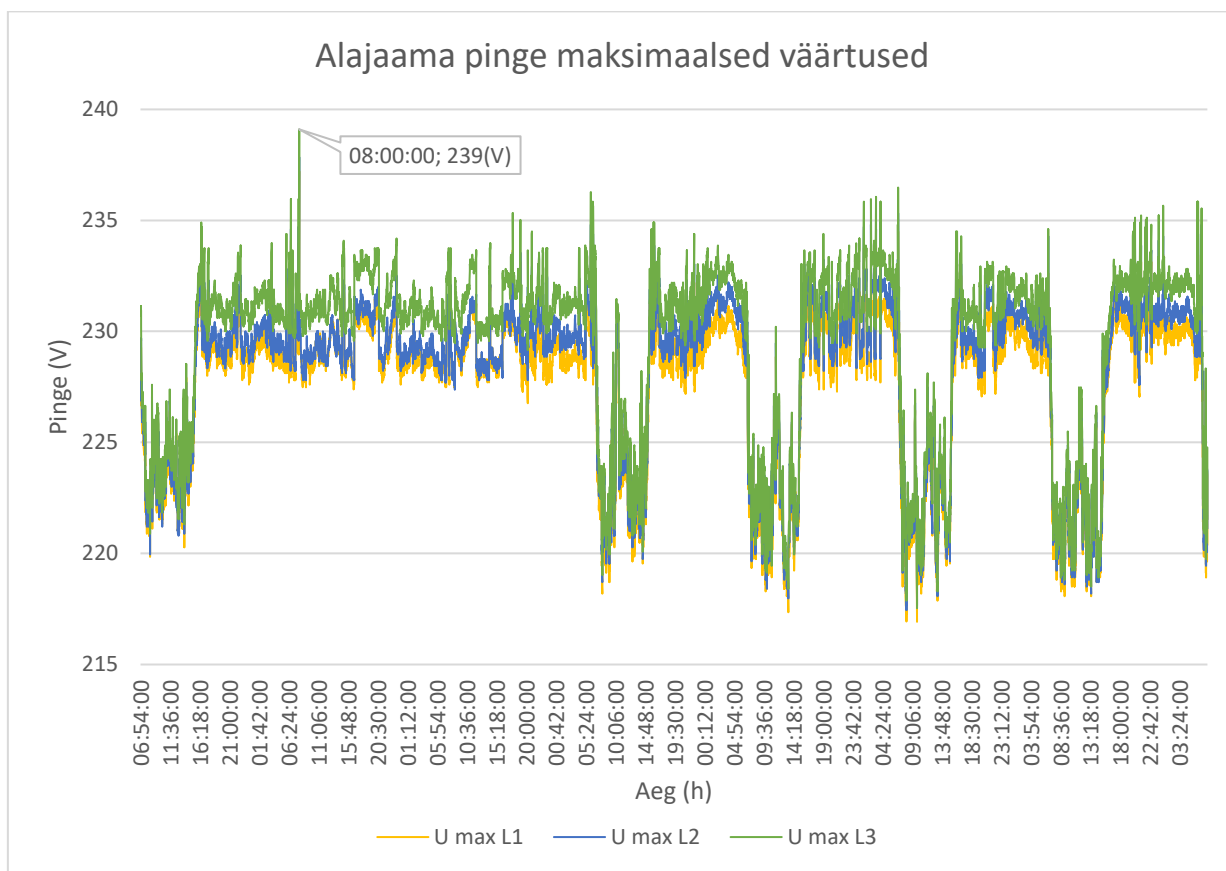


Joonis 10. Alajaama minimaalse pinge mõõtmine ajavahemikul 16.09 kuni 23.09.

Mõõdetud pinge väärtuste puhul on tegemist mõõteintervallis registreeritud minimaalse pingega ja see erineb pinge keskväärtustest.

Alajaama pinge maksimaalsed väärtused on toodud joonisel 11. Mõõdetud andmetest selgub, et pinge ei tõuse üle lubatud suurima väärtuse. Maksimaalne pinge mõõdeti 17.09 kell 18:00 kolmandas faasis, mis oli ühe sekundi vältel 239 V.

Järelikult keskpinge võrk ja alajaam tagavad ettevõtte tarbimiskohas nimipinge vastavalt standardile EVS-EN:50160.



Joonis 11. Alajaama maksimaalse pinged mõõtmine ajavahemikul 16.09 kuni 23.09.

Kõik mõõdetud alajaama pinged keskväärtused jäävad standardis EVS-EN:50160 sätestatud pinged vahemikku. Kogu mõõteperioodil, milles teostati ühe sekundi pikkuste mõõte intervallidega keskmiste väärtuste mõõtmised ja selle tulemusel saadud minimaalsed, maksimaalsed ja kogu mõõteperioodi keskmine väärtus on toodud tabelis 4.

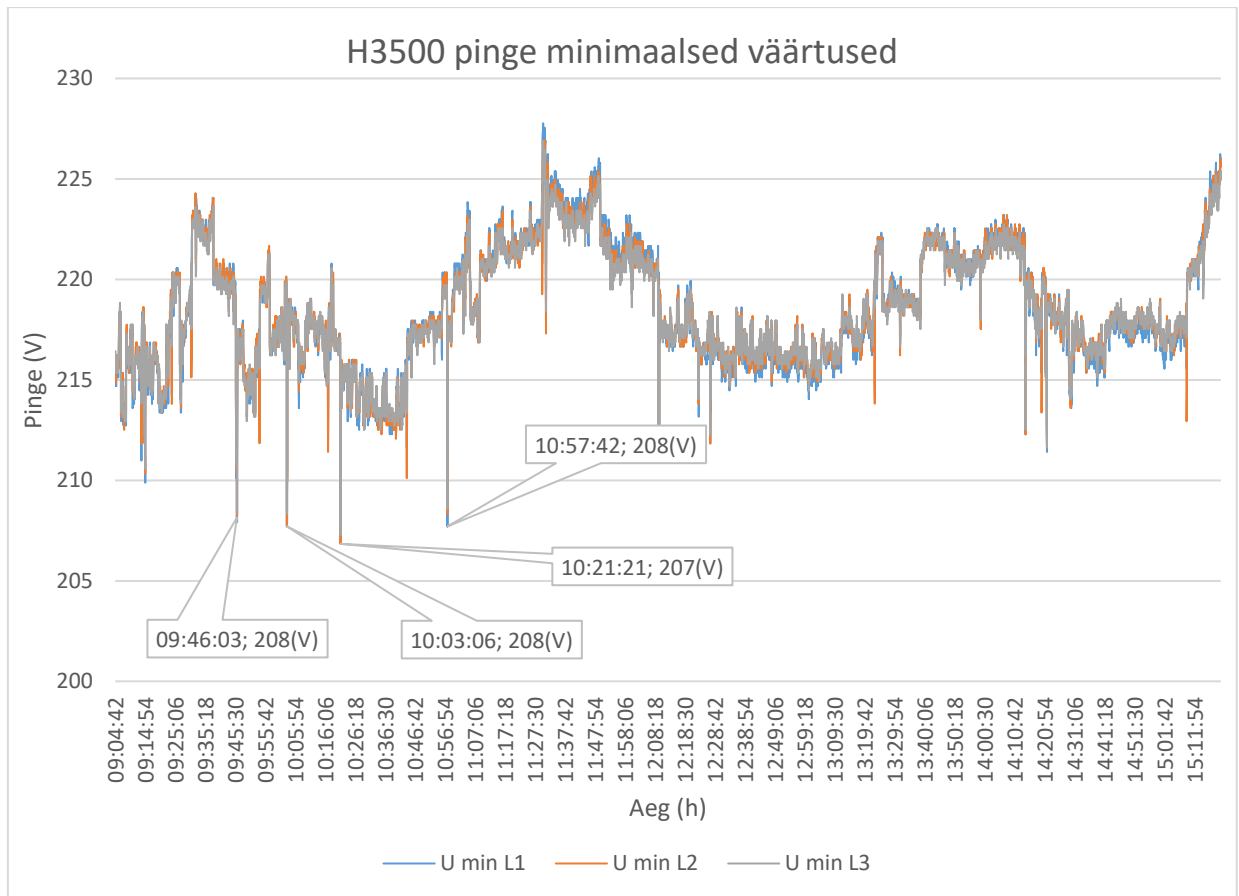
Tabel 4. Alajaama pingete minimaalsed, maksimaalsed ja keskmine väärtus.

	Pinge L1 [V]	Pinge L2 [V]	Pinge L3 [V]
Max	231,91	232,8	234,08
Keskmine	226,64	227,24	228,40
Min	215,69	216,34	216,54

Pinged langused tekkivad ka ettevõttesiseselt madalpinge kaablites, kaitseseadmetes, ühenduskontaktides jne. Kõikide seadmete toiteklappid ei ole antud töö mahtu arvestades otstarbekas mõõtmisi teostada. Mõõtmistel on valitud välja üks suurematest tarbijatest hõõvel H3500 ja on teostatud pinged mõõtmine seadme kilbis, mis on tähistatud joonisel 9 mõõtepunkt MP4. Mõõtmiste tulemus näitab, et pinged langeb seadme suurema tarbimise hetkel kuni 207 V. Mõõte tulemused on toodud joonisel 12. Suurim tarbimine avaldub seadme

käivitamise hetkel, kui operaatorid käivitavad hõvli kõik mootorid sama aegselt. Selleks, et vähendada pingelangust ja koormusvoolu piike, peavad operaatorid käivitama seadmete mootorid viitega selliselt, et iga mootor saavutab oma täis kiiruse ja see järel käivitatakse järgmine mootor.

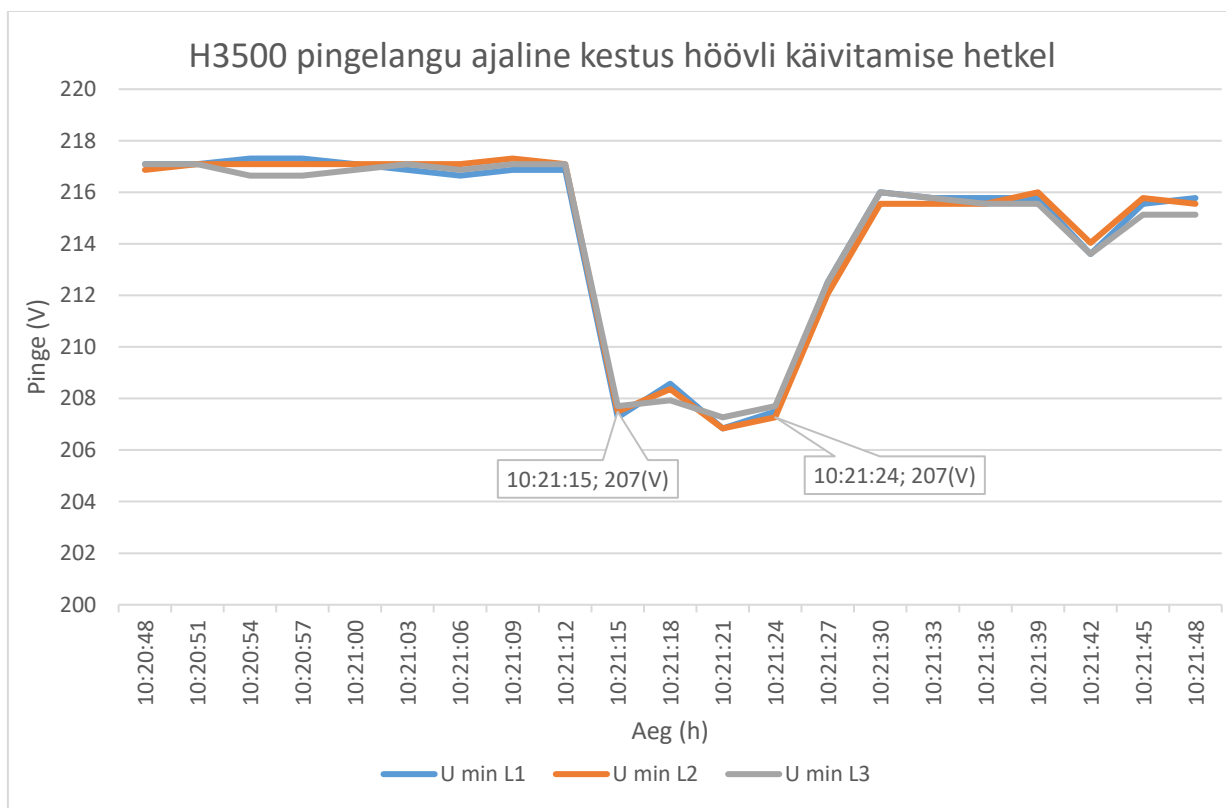
Kõik registreeritud avaladunud pingelangu hetked on tekkinud hõvli taas käivitamisest. Vastavalt töö iseloomule peavad masina operaatorid erinevate toote profiilide vahel seadmeid ümber häälestama. Iga häälestamise ajal masin seisatakse ja töö jätkamiseks masin taas käivitatakse. Ühes tööpäevas võib seadme käivitamine toimuda mitmeid kordi.



Joonis 12. Hõvel H3500 pinge miinimum väärtused ajavahemikul 14.09.2022 kella 09:04 kuni 15:16

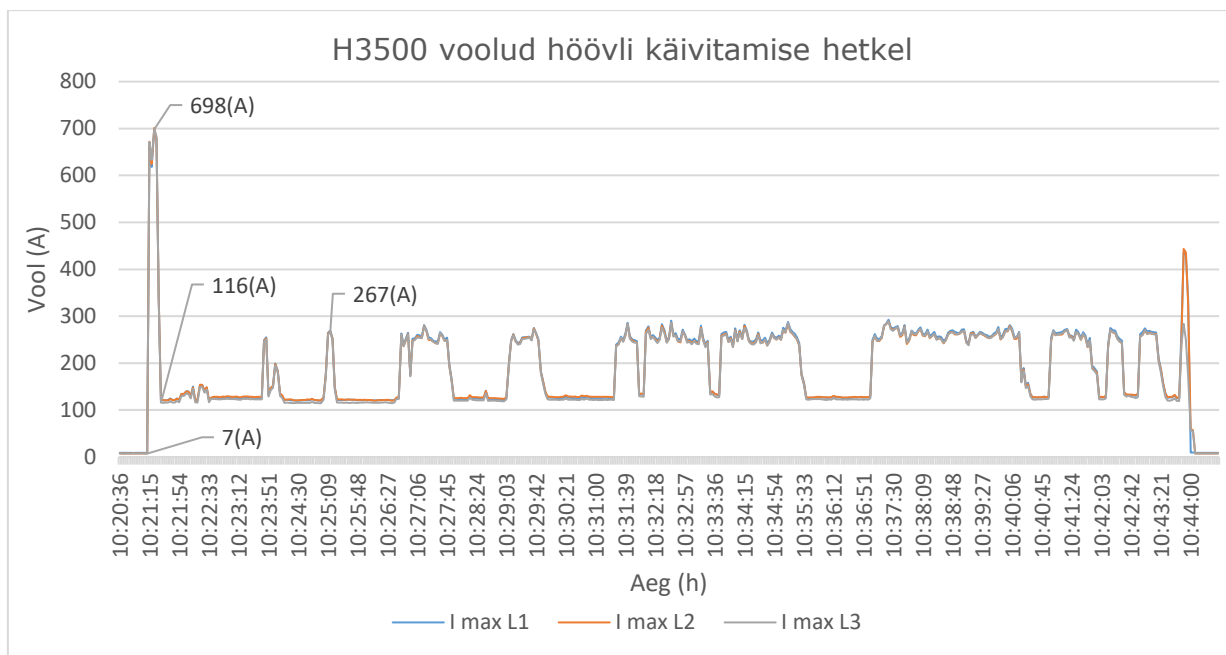
Pingelangu ajaline kestus varieerub ja on sõltuvuses operaatori poolt seadme käivitamiseks vajaminevate protseduuridega. Alati ei ole vajadust käivitada seadme kõiki tarbijaid üheaegselt või mõnel töö protsessil kasutataksegi ainult osasid töötavaid tarbijaid. Näiteks hõvliil, kus on lisaks kaheksale lõiketerale, veel ka materjali läbiveomootorid, siis alati ei ole vaja kasutada kõiki kaheksat tera materjali hõveldamiseks.

Mõõdetud hõvli H3500 käivitus kestus kõigi kaheksa tera korral, jääb vähemalt kümne sekundi piiridesse ja sõltub suuresti masina operaatorist. Ühe tava käivituse kestus ja pinge langused on toodud joonisel 13.



Joonis 13. Hõvel H3500 pingelangu ajaline kestus seadme ühe käivituse jooksul

Hõvli H3500 käivitusvoolud võivad kerkida kuus korda suuremaks hõvli tühijooksuvooludest. Vastavalt mõõtmistele tõusis hõvli käivitusvool ligi 700 A-ni, kui samas tühijooksuvool on hõvliil 116 A. Hõvel tarbib voolu ka tootmis protsessi vahelisel ajal, nendeks tarbijateks on juht elektroonika ja peakilbi jahutusseade. See tarbimine on töö protsesside vahelisel ajal stabiilne ja üsna marginaalne 7 A võrreldes kogu hõvli tarbimisega. Töö protsessi ajal on hõvli voolud 270 A. Hõvli käivitusvoolud, tühijooksuvoolud, voolud töö protsessi ajal ja seisatud hõvli voolud on toodud joonisel 14.



Joonis 14. Hõövel H3500 käivitusvoolud, tühijooksuvoolud, voolud töö ajal ja seisatud seadme voolud.

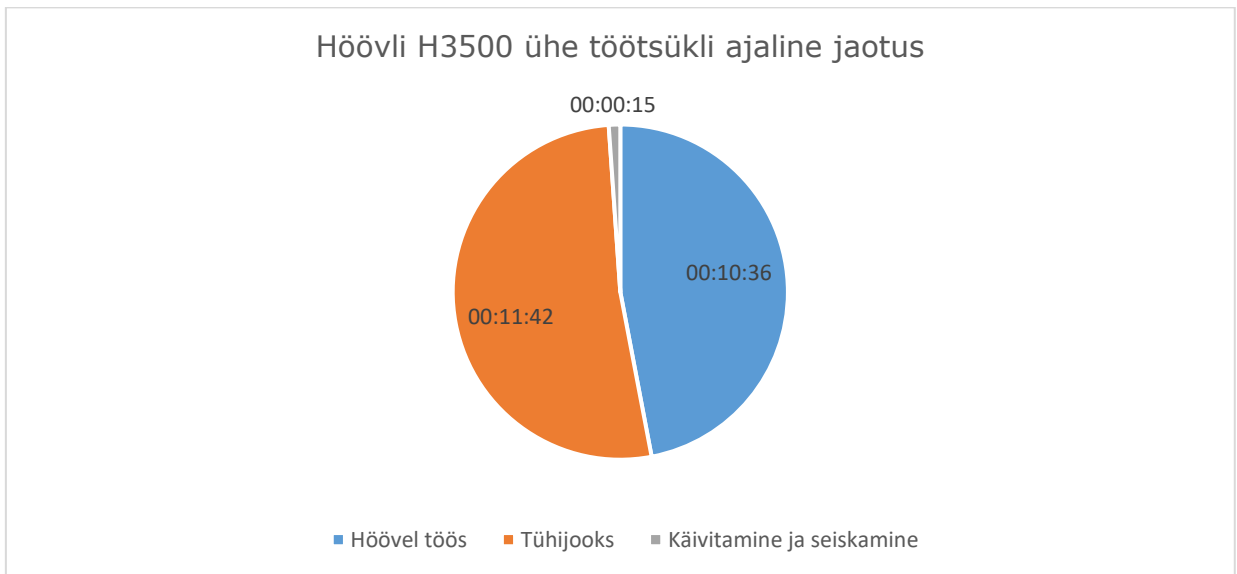
Teostatud mõõtmiste perioodidel ei täheldatud pinget kõrvalekaldeid standardis EVS-EN:50160 sätestatud piirväärtustest. Alajaama madalpinge klemmidelt mõõdetud tulemustes esines üks kord, kui pinge langes alla standardis sätestatud lubatud väärtuse, kuid pingelangu ajaline kestus oli üks sekund ja sellist juhtumit ei saa käsitleda püsiva olukorrana.

Tehase siseselt vahetult seadme toiteklemmidel on mõõtmiste käigus täheldatud koormuse tõusust sõltuvaid pingelanguid, mis lähenevad standardis sätestatud miinimumväärtustele, kuid standard sätestab ainult liitumispunkti pingeväärtuseid ja ei sea piire kliendi enda tarbimispunkti sisesele elektripaigaldisele. Sellised olukorrad tekkivad ennekõike liiniseadmete käivitusmomentidel ja on valdavalt mõnekümne sekundilise kestusega. Kui samasse käivitushetke ajaaknasse peaksid juhtuma üheaegselt mitme erineva seadme käivitamine üheaegselt, siis võib pinge langeda ohtlikult madalale ja selline olukord võib rikkuda seadmeid.

Kogu mõõtmiste perioodil ei täheldatud kordagi pingetõusu standardis lubatud piirväärtuse lähedale.

Jooniselt 15 on näha ühe toote tööprotsessi ajaline jaotus. Siin juures on vaadeldud ühe toote tootmiseks kuluvat aega ja toote protsessi erinevaid osasid. Antud vaadeldava toote protsessi aeg kokku on 22 minutit ja 33 sekundit. Sellest olukorrast on näha, et toote tootmiseks on realselt kulunud aega 10 minutit ja 36 sekundit. Hõövel tühikäigul, kus masin töötab aga toodangut ei toodeta, sellise töötamise aeg on 11 minutit ja 42 sekundit. Hõövli käivitamiseks ja seiskamiseks kulunud aeg on 15 sekundit. Tootmisprotsessi ajaline jaotus on toodud

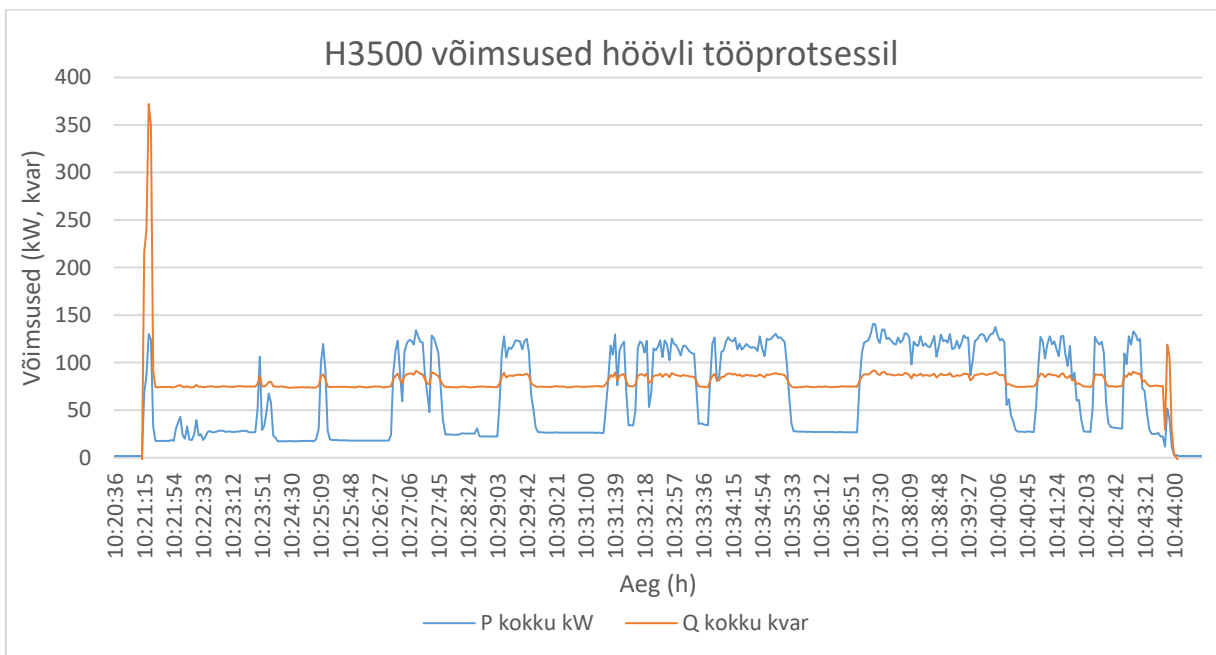
joonisel 15. Tabelis 5 ja joonisel 16 on toodud vaadeldud tootmisprotsessi kasutatud võimsused.



Joonis 15. Höövel H3500 ühe töötsükli ajaline jaotus

Tabel 5. Höövel H3500 tööprotsessi ajad ja tarbitud võimsused

	Kokku	Höövel töös	Tühijooks	Käivitamine ja seiskamine
Aeg min	22:33	10:36	11:42	00:15
Aktiivvõimsus (kW)	48	23	25	0,002
Reaktiivvõimsus (kvar)	53	23	30	0,000



Joonis 16. Höövel H3500 töötsükli tarbitavad võimsused

Tühijooksu võimsuste vähendamine, muutes töökorraldust tooks iga toote tootmise juures märkimisväärset elektrienergia kokkuhoidu. Kindlasti pole otstarbekas iga tühijooksu ajal hoovel seisata ja hiljem taas käivitada. Kui analüüsid tööprotsessi, siis pikemad tühijooksud on kestnud ligi kaks minutit ja keskmiselt on tühijooksu aeg olnud üks minut.

Höövli seiskamine tühijooksu aegadel pole otstarbekas, kuna korduvad seadme seiskamise ja taas käivitamis tsüklid mõjuvad halvasti jõuelektroonikale ja seadme mehhaanilistele osadele. Lisaks käivitus hetkel mootori mähis kuumeneb ja korduvate käivituste korral võib tekkida rikked mähise isolatsioonis. Seega on tähtis operaatoritel ja meistritel vaadelda üle tööprotsess selliselt, et hoovli ei hakata seadistama ja materjali varuma alles siis, kui hoovel juba töötab. Kõik eelnevad toimingud peaksid olema tehtud selleks ajaks, kui hoovel käivitatakse ja hoovli töötamise aeg kulub peamiselt toote tootmiseks.

Siin juures vaadeldi ainult ühe kõige suurema hoovli H3500 tööprotsessi, kuid tehases on lisaks veel kolm väiksemat hoovli, mille töökorraldus sarnaneb eelvaadeldud hoovlile.

Kogu tehases on liiniseadmeid kokku üle saja. Enamus seadmeid on väiksemad ja volutarve jääb maksimaalselt 16 A piiridesse, kuid tehases on veel kolm suurt tarbijat, milleks on täisautomaatne Macor värviliin, otsatapiliinid Sacot ja AMD.

Värviliini põhilise elektrienergia tarbimise moodustavad kuivatus ahjude konveierliinid ja nende ventilaatorid. Värvitavad lauad liiguvad läbi värvikambri ja see järel kuivatus konveierile. Kogu värviliin koosneb kahest osast kruntvärviliin ja kattevärviliin. Värviliini ahjude kütteks kasutatakse küll keskkütet, kuid kattevärvi kõvendus protsess toimub aga ultraviolettlampide valguses. Värviliini tööprotsess saab alguse laudadest materjali sisestamisega seadmesse, seejärel lauad harjatakse ja liiguvad läbi värvikambri kuivatuskonveierile. Pärast kuivatus konveierit on ala, kus operaator saab jälgida värvikvaliteeti ja praagi eemaldada liinilt. Seejärel liiguvad lauad läbi harjamise ja kattevärvi kambri teisele kuivatus konveierile. Pärast kattevärvi kuivatust eemaldatakse värvitud lauad värviliinilt. Kogu protsess ühe laua värvimiseks kulub ligi kümme minutit. Liiniseade on kõige efektiivsem, kui ühevärvi tooniga värvitakse võimalikult pikki laudu ja seade töötab kogu vahetuse aja. Seadme muudab ebaefektiivseks, kui värvitakse väikeseid koguseid ja pidevalt värvitoone vahetades. Sellisel juhul kõik seadme ahjud käivitatakse ja kulub ligi kümme minutit, kui toode jõuab viimasest konveierist välja. Lisaks peab kogu liin olema töös, kuni viimase laua väljumiseni seadmest. Antud liini juures annaks kindlasti suurt elektrienergia kokku hoidu, kui liini automaatikat muuta selliselt, et jälgitakse toote paigutust liinil ja kui mingi osa liinist on tühi, siis selle osa ahjud lülituvad välja. Need mõtted tasub ettevõttel võtta arvesse, kuid antud uurimus töös ei vaadelda otseselt liiniseadmete ümberehitust.

Üheks märkimisväärseks elektrienergia tarbijaks tehases on aspiratsiooniseadmed, ehk purueraldus süsteem. Kuna puidu tööstuses on jääkproduktiks puidu tolm, saepuru ja

hõõvlilaast. Selle eemaldamiseks on iga liini seadme juurde paigaldatud aspiratsiooni torud, millesse tekitatud alarõhk imeb puru ära kogumis seadmesse. Tehases on kaks eraldi seisvat aspiratsiooni seadet. Uue tehase hoone aspiratsioon on ülesehituselt lihtsam ja väiksema võimsusega, mis koosneb neljast aspiratsiooni torude liinist (vt. Joonis 17).

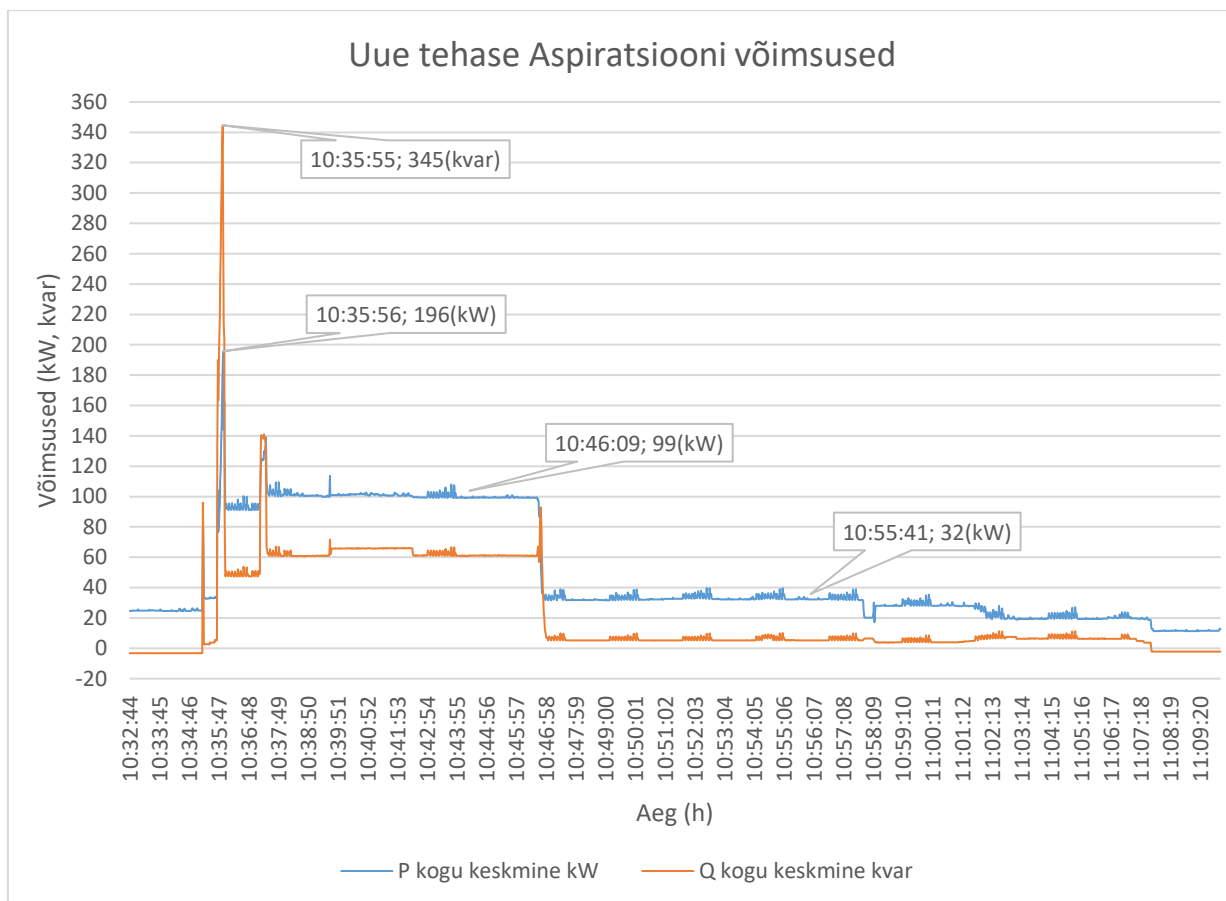


Joonis 17. Uue tehase aspiratsioonisüsteem

Torudesse tekitatakse alarõhk radiaalventilaatorite abil. Uue tehase aspiratsiooni ventilaatorimootorite võimsused on 22, 30, 30 ja 37 kW. Tühjendusventilaatoreid on kaks ja nende võimsused on 11 kW. Ventilaatorite mootorite juhtimine toimub läbi kontaktorite ja sujuvkäivitite. Lisaks ventilaatoritele mis tekitavad alarõhku on aspiratsioonisüsteemis veel teisi seadmeid, millest kõiki käitavad elektrimootorid.

Aksiaalventilaatorid, kus õhk liigub ventilaatori teljega samasuunaliselt on küll suurema kasuteguriga kui radiaalventilaatorid, milles õhk liigub risti ventilaatori teljega, kuid radiaalventilaatorid suudavad tekitada samas suuremat rõhku [9]. Selle tõttu on kasutusel tehase puru eralduses ainult radiaalventilaatorid. Filtrite läbi puhkeks ja puhastuseks samas kasutatakse aksiaalventilaatoreid.

Uue tehase osa aspiratsioonisüsteemi käivitus ja seiskamis protsessi aeg ning kasutatavad võimsused on toodud joonisel 18.



Joonis 18. Uue tehase aspiratsioonisüsteemi võimsused

Uues tehase osas on lihtsam ja väiksema koguvõimsusega aspiratsioonisüsteem. Sellel süsteemil puudub vahe kogumispunker ja puru laaditakse otse konteineritesse. Vana tehase aspiratsioonisüsteemis kogutakse esmalt puru vahe kogumispunkrisse ja see järel osa purust laaditakse konteineritesse ja osa kasutatakse katlamajas soojuse tootmiseks.

Joonisel 18 on näha, et uue tehase aspiratsioonisüsteemi käivitamisele kuluv aktiivvõimsus on 200 kW, tööolukorras on aspiratsiooni võimsus 100 kW ja seiskamis ehk puhastusprotsessi võimsus on 32 kW.

Kindlasti on otstarbekas pauside ajal aspiratsioonisüsteemi imemisventilaatorid seisata, see tagab ligi 70 kW kokku hoitavat võimsust. Filtrisüsteemi seiskamine sõltub aga pauside pikkusest. Lõuna pausidel, mille kestus on enamasti 30 minutit, on mõistlik kogu aspiratsioonisüsteem seisata. Samas lühemate pauside, kui 20 minutit korral võib filtri hoida töös.

Vana tehase aspiratsioonisüsteem on mõnevõrra keerukam ja süsteemi on lisatud ka purule vahe kogumispunker (vt. joonis 19). Lisaks kasutatakse puru ka katla kütmiseks.



Joonis 19. Vana tehase aspiratsioonisüsteem.

Vanatehase aspiratsioonisüsteemis on kokku viis aspiratsiooni torude liini, milles kõigi imemisventilaatorite mootorite võimsused on 37 kW. Sarnaselt uuetehasega juhitakse ventilaatorite mootoreid läbi kontaktorite ja sujuvkäivitite. Kogu süsteem on märksa keerukam ja koosneb neljast eraldiseisvast üksusest aspiratsioonisüsteem, filtrisüsteem, puru tühjendus süsteem ja katlamaja. Kõiki seadme osasid käitavad elektrimootorid, millest põhi osad moodustavad alarõhu- ehk imemisventilaatorid, filtrite puhastus ventilaatorid, sulgsöötjad, stokkerkruvid, kettkonveierid, tühjendus ventilaatorid, pressi mootor ja mitmed teised vahe ülesandeid täitvad mootorid.

Vana tehase aspiratsioonisüsteem on märksa keerukam ja täielikult automatiseeritud. Kui pealevooluventilaatorid ja filter on seisatud, toimub vahepunkrist puru konteineritesse edasi laadimine ja katla kütmine. Sarnaselt uuetehase aspiratsiooniga on pauside ajal soovitatav elektrienergia kokku hoidmiseks imemisventilaatorid seisata ja pikemate pauside ajal seisata ka filter.

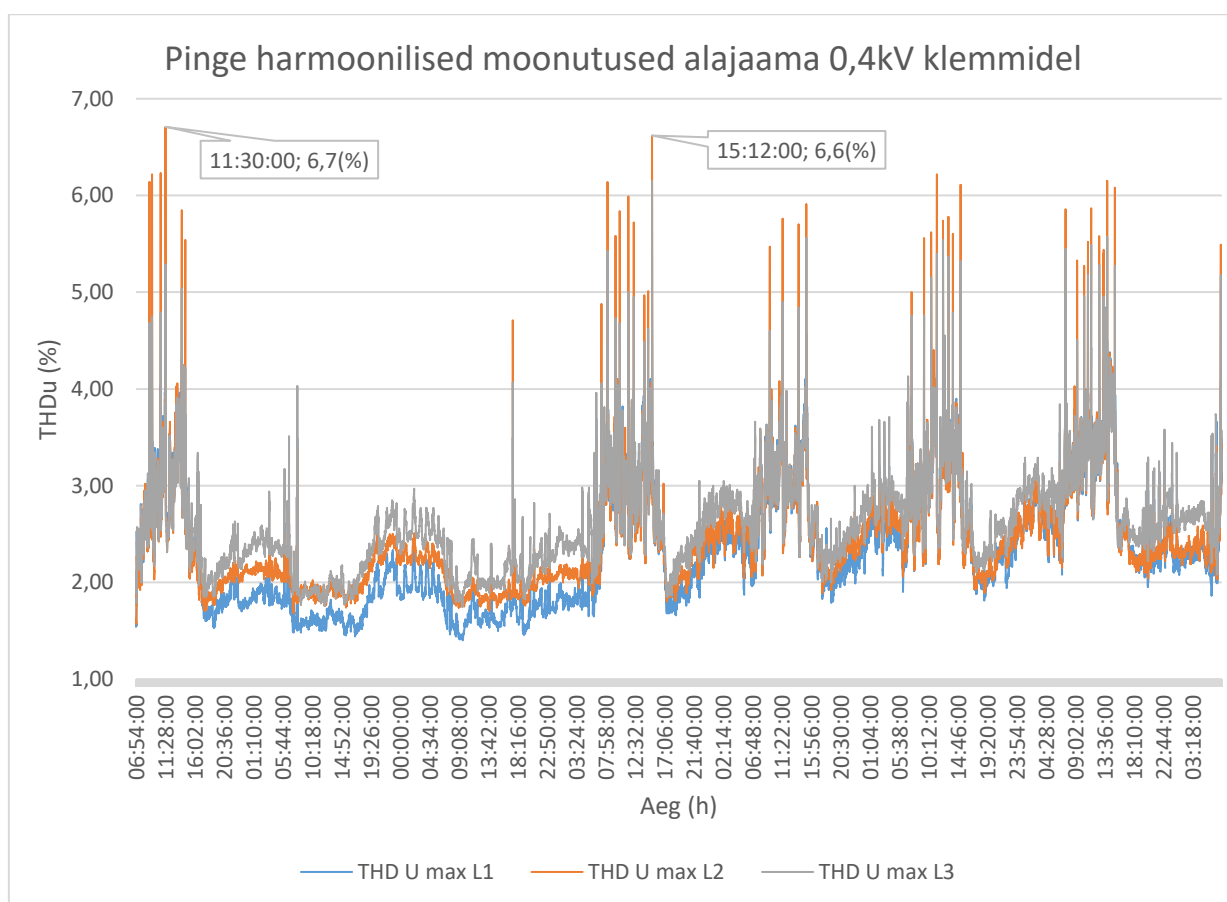
Töökorralduslikult on antud soovitus pauside ajaks osa aspiratsioonisüsteemist välja lülitada, kuna puru sellel ajal juurde ei teki. Kogu seadme välja lülitamine pole samas otstarbekas, kuna seadme seiskamisel on viiteaeg. Seade suudab ennast uuesti taaskäivitada samuti

viiteajaga. Seadme seiskamis viide eeldab, et kogu seadmes liikuv puru on kogumispunkrisse tühjendatud. Seadme käivituseks kulub kaks kuni kümme minutit ja seadme seiskamiseks kulub 20 kuni 30 minutit. Selle seiskamise aja jooksul pealevooluventilaatorid seiskuvad ühe minuti jooksul, mille järel algab kogu seadme puhastussükkel, mis kestab kokku umbes 20 minutit.

2.2.2 Pingeharmonilised moonutused

Pingeharmonilised moonutused on mõõdetud alajaama madalpinge klemmidelt mõõtepunktist MP1 (vt. joonis 9). Standardis EVS EN:50160 on sätestatud, et pingeharmonilised moonutused peavad olema alla 8 %, $THD_U \leq 8[\%]$. Pingeharmoniliste maksimaalsed väärtused vastavalt standardile EVS EN:50160 on toodud tabelis 2.

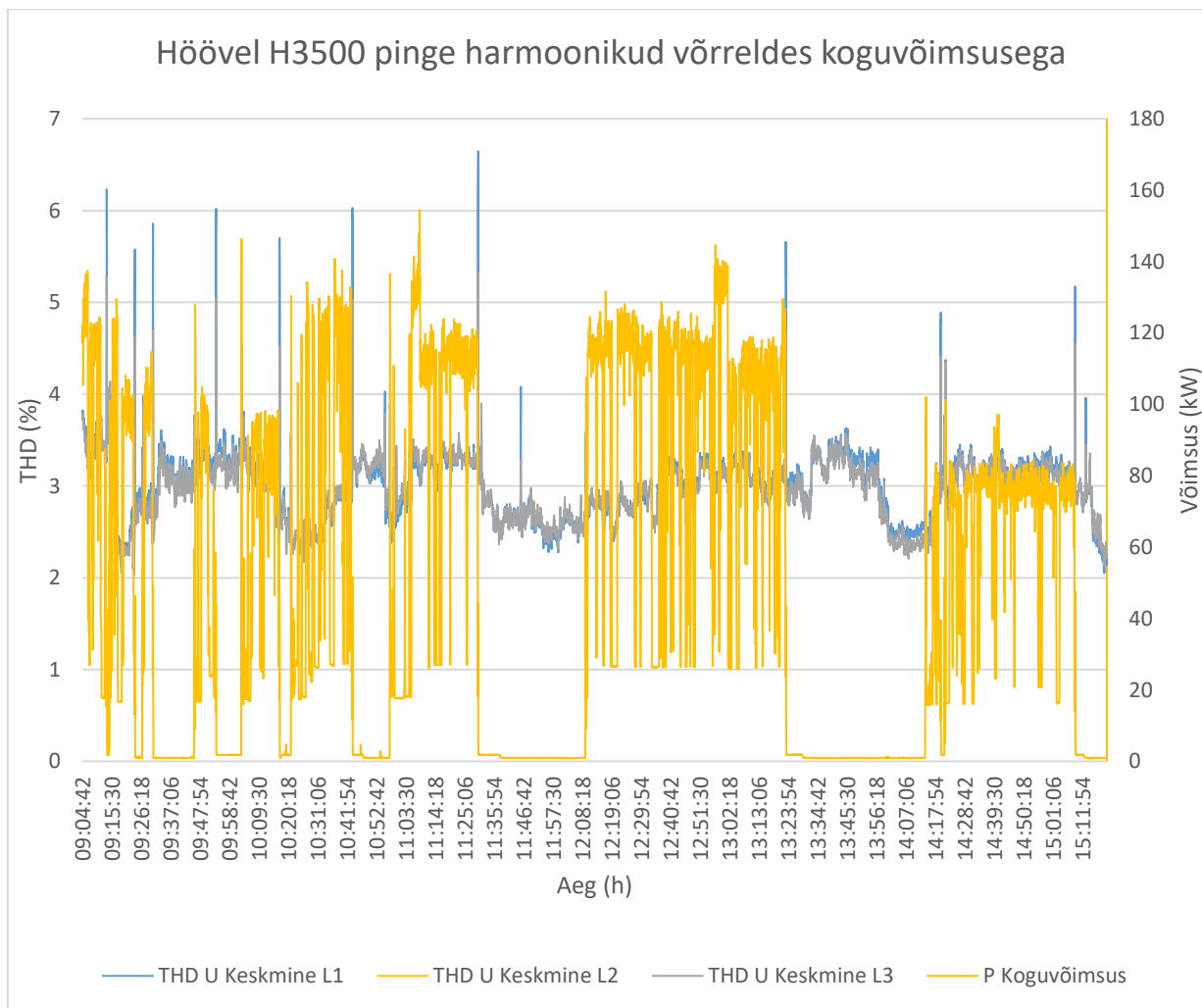
Pingeharmoniliste moonutiste juures uurin maksimaalset väärtust, et leida kõige halvemad olukorrad. Pingeharmoniliste moonutiste mõõtmiste tulemused näitavad, et suurim väärtus jääb alla kaheksa protsendi. Üks nädal kestnud mõõtmiste tulemusel tõusis pingeharmoniline väärtus kahel korral kuni 6,7 %. Pingeharmonikute väärtused kuni on toodud töö lisas 1. Pingeharmonilised moonutused on toodud joonisel 20.



Joonis 20. Pingeharmonilised kogumoonutused alajaama madalpinge klemmidel, ajavahemikul 16-23.09.22.

Kogu mõõtmiste perioodil kogutud andmetel on näha, et vähemalt 50 % ajast on pingeharmonikute osakaal kolm kuni neli protsenti. Pingeharmonilisi moonutusi põhjustavad mittelineaarsed tarbijad.

Vaadeldes pingeharmonilisi moonutusi ühe päeva lõikes ja võrreldes nende tipuväärtusi võimsustega, siis on selgelt näha, kuidas suurimad harmooniliste põhjustajad on elektrimootorite juhtimine läbi sagedusmuundurite. Joonisel 21 on toodud hõvel H3500 mootorite käivitus ja seiskamine, võrdluses on pingeharmonikud koos aktiivvõimsuse muutustega.



Joonis 21. Pingeharmonikute tõus, koormuste muutusel.

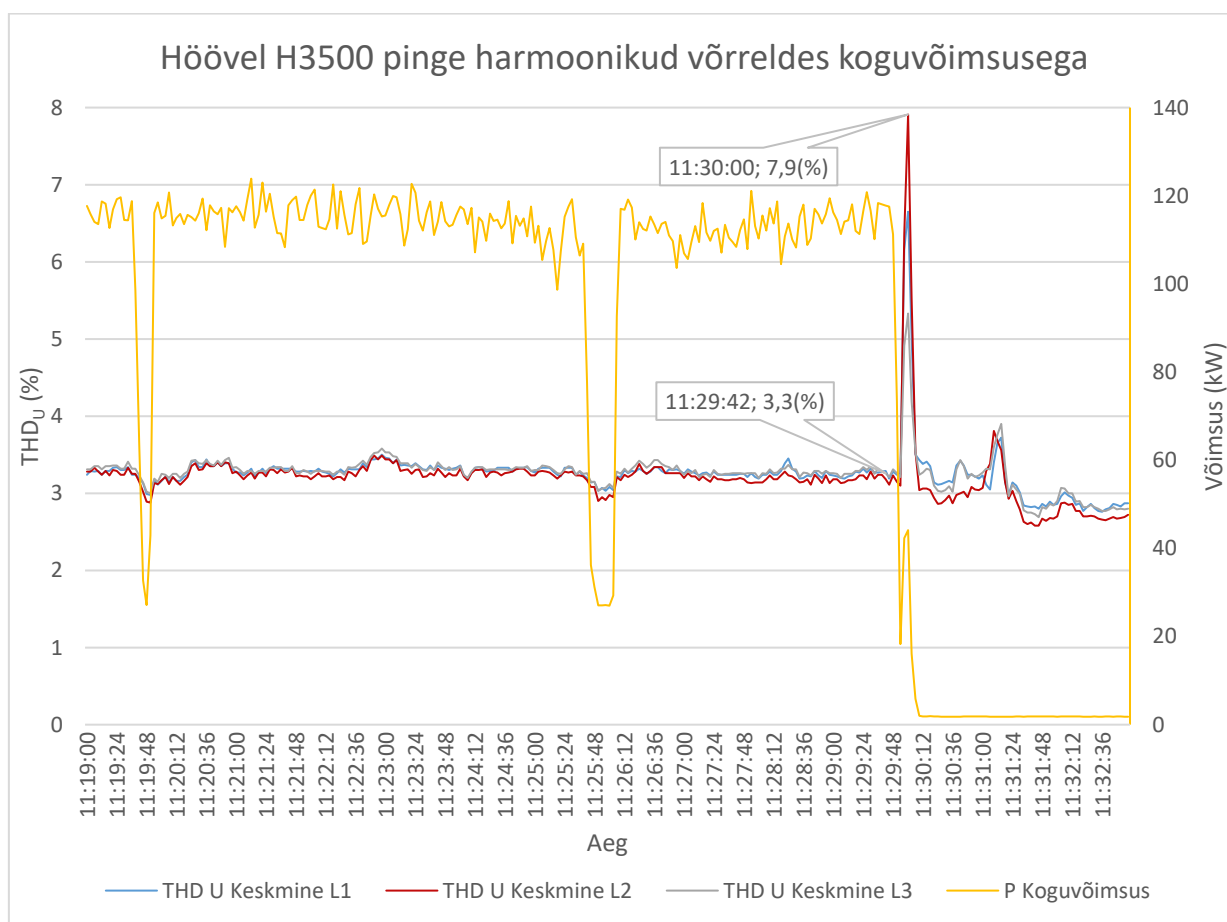
Parim näide pingeharmonikute tõusu kohta on näha tööpäeval vahetult enne lõuna pausi, kui kõik liini seadmed koheselt seisatakse. Joonisel 22 on näha hetk vahetult enne lõuna pausi, kus hõvliil H3500 esmalt liini tootmine lõpetatakse kell 11:29:45. Hõvel jõuab tühikäigule kell 11:29:54, siin juures THD_U väärtus on 3,21 %. Järgnevalt seisatakse hõvli mootorid, mootorite seiskamine toimub elektroonilise piduriga läbi sagedusmuundurite.

Mootorite seiskamise hetkel tõuseb pingeharmonikute väärtus 7,91 %. Pärast hõvli mootorite seiskumist THD_U väärtus langeb algele tasemele tagasi, väärtusele 3,04 %.

Mõõdetud pingeharmonikute tipu väärtus 7,91 % on küll vähem, kui standardis EVS-EN:50160 ette nähtud 8 %, kuid halvimal juhul võib olla ka üle lubatud väärtuse.

Pingeharmonikute vähendamiseks, hõvli H3500 näite varal on võimalik teha järgmised toimingud:

- Hõvli mootorite väljalülitamine üks haaval ja viitega, see toob esile operaatoritele lisareeglid seadmete seiskamiseks.
- Mootoritel kasutada mehhaanilisi pidureid, kui on võimalik. Suuremate mootorite pidurdamine mehhaaniliste piduritega eriti, kui masina seadistus protseduurid nõuavad masina korduvaid käivitamisi ja seiskamisi, ei ole mõeldav. Sellisel juhul pidurid kuumenevad ja kuluvad kiiresti.
- Mootoritel, millel ei ole turvalisusega nõutud kiirendatud seiskamine, võib lasta hool vaba jooksuga peatuda.



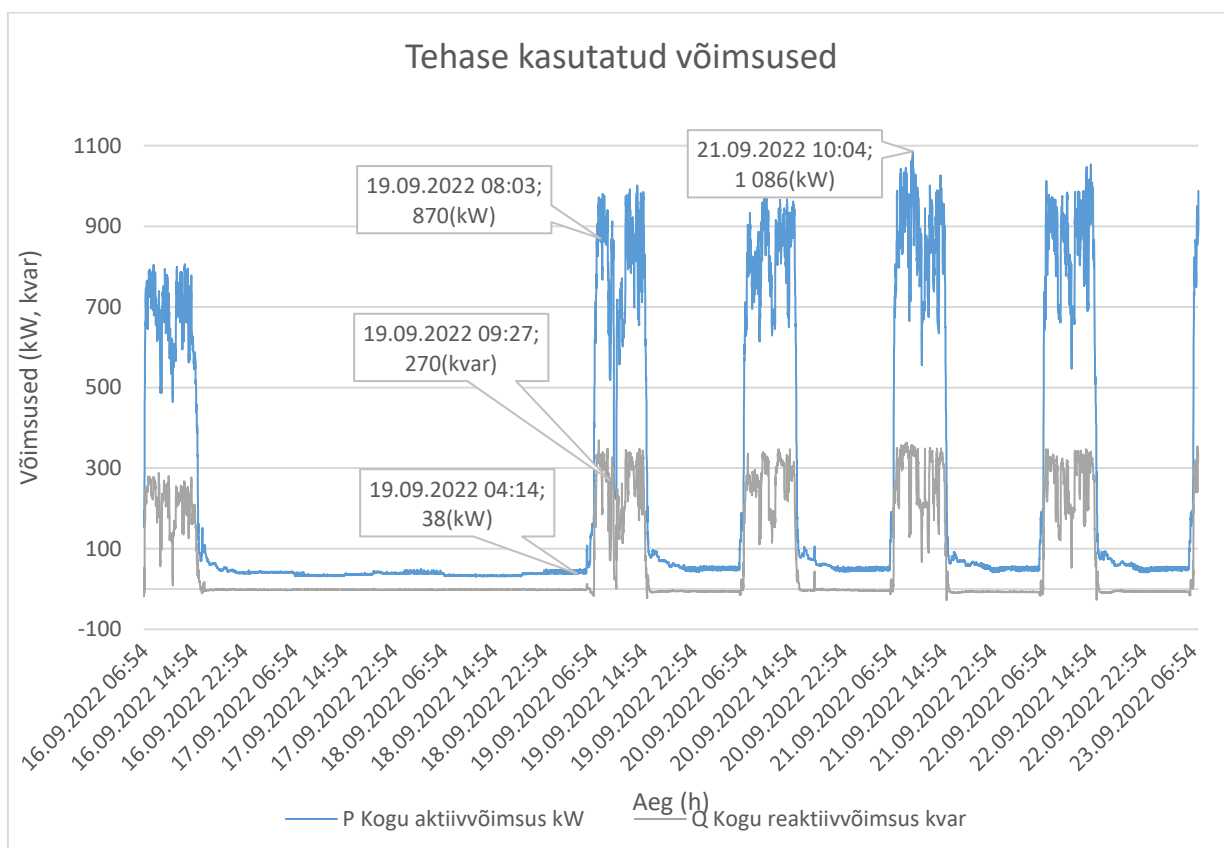
Joonis 22. Pingeharmonikute tõus hõvel H3500 seiskamisel.

2.2.3 Reaktiivvõimsuse osakaal ja selle kompenseerimine

Puidu tööstuse tootmine põhineb suures osas mehhaanilistel protsessidel, mida käitavad elektrijamid ja mis muudavad selle üldjoontes energiamahukaks. Kuna elektrienergiaga seotud kulutused mõjutavad tööstuses otseselt konkurentsivõimet siis on puidu- ja metsatööstust koondavalt erialaliidult tulnud signaale, et ollakse huvitatud suuremast omavahelisest koostööst elektrienergihindade teemadel. [10]

Ettevõtte põhilise osa elektritarbijatest moodustavad elektrimootorid, see tõttu on tarbitaval võimsusel suur osa induktiivsel reaktiivvõimsusel. Ettevõtte tarbitavad võimsused ühe mõõtenädala jooksul on toodud joonisel 23. Keskmiselt kasutab tehas tööajal 800 kW aktiivvõimsust, tipuvõimsused tõusevad üle 1000 kW ja seisva tehase tarbimine on 40 kW. Reaktiivvõimsuse osakaal tehase tööajal on keskmiselt 450 kvar. Koos töötava kompenseerimis seadmega on see 300 kvar. Tehasesse on paigaldatud reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks kondensaatorseade. Tehase kondensaatorseade on näidatud joonisel 24.

Reaktiivvõimsuse kompenseerimisseadmes on kasutusel neli plokki, kogu võimsusega 180 kvar (Joonis20). Üks kondensaatorseadme kabinet võimaldab kasutada kuni seitse plokki, koguvõimsusega 315 kvar [11]. Kondensaatorseadme juhtseade on Merlin Gerin Varlogic NR6 (Joonis 24) ja võimaldab juhtida kuni 12 kondensaatorseadme plokki [12].

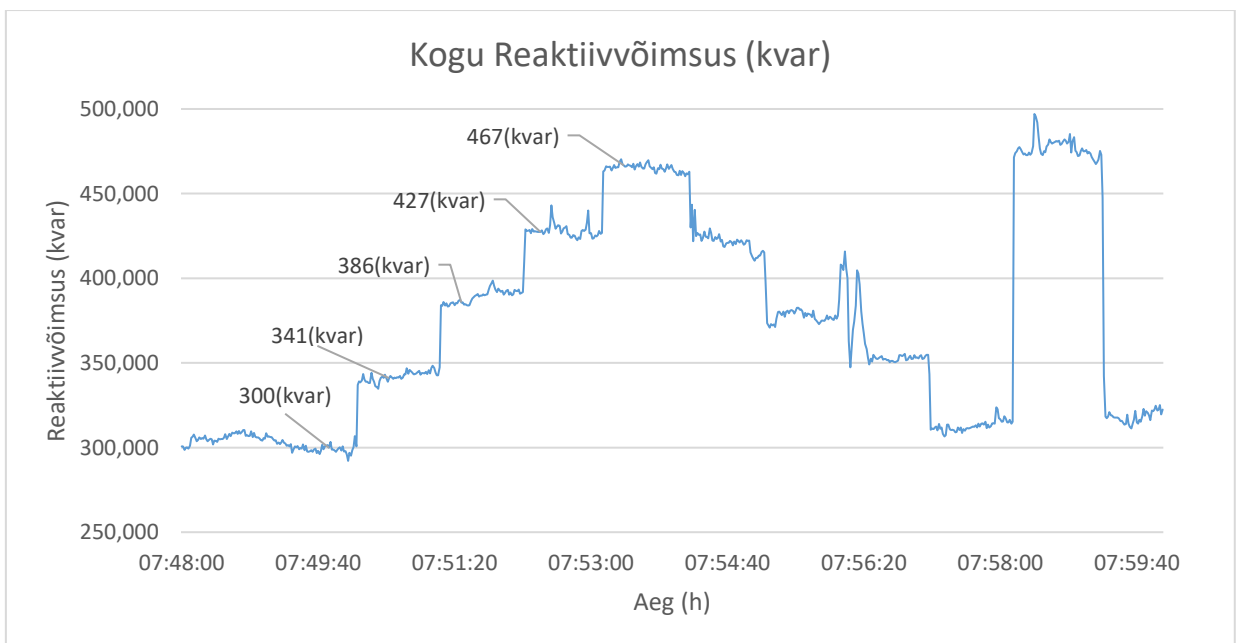


Joonis 23. Kogu tehase aktiiv- ja reaktiivvõimsused, mõõdetud ühe nädala jooksul



Joonis 24. Reaktiivvõimsus kompenseerimiseks kondensaatorseadmed

Kondensaatorseadmete toimimine ja lülitus on toodud joonisel 25. Teostatud mõõtmistel on näha, kuidas kõik neli plokki välja ja sisse lülitatakse. Mõõtmine ja lülitused on teostatud tehases põhi töö olukorras, kus enamus suuremaid tarbijaid töötavad. Katse käigus esmalt lülitatakse üks haaval kõik neli plokki välja, see järel lülitatakse üks haaval sisse tagasi ja viimasena lülitatakse kõik korruga välja.



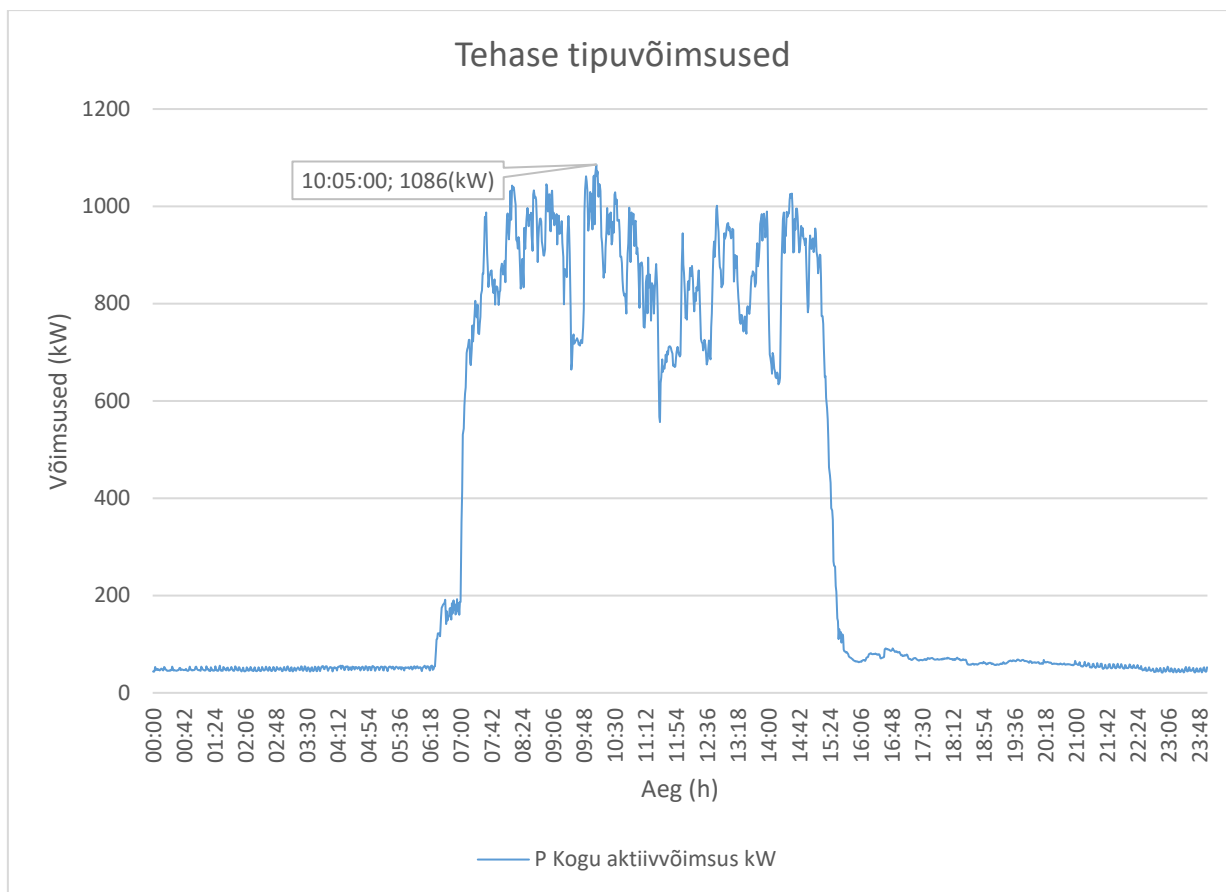
Joonis 25. Reaktiivvõimsuse kompenseerimine kasutades kondensaatorseadmeid.

Mõõdetud tulemustest on näha, et reaktiivvõimsuse kompensatori kõik plokid töötavad ja reaktiivvõimsust kompenseeritakse 167 kvar osas. Mõõtmised teostati, kui tehas töötas täisvõimsusel, mis on ligikaudu 70 % ulatuses alajaama koguvõimsusest. Tehase maksimaalne võimalik tarbitav näivvõimsus on 1600 kVA ja mõõtmiste teostamise hetkel oli tehase tarbitav näivvõimsus 1100 kVA. Kui arvestada, et selline olukord, kus tehase töö moodustab 100 % alajaama trafo koormusest on antud seadmete olukorras välistatud. Teoreetilises olukorras, kui kõigi osakondade liinilõigud on töös, siis jääb tehase elektriline koormus maksimaalselt 80 % lähedale. Praktika näitab seda, et kui tehas töötab siis jääb tarbitav võimsus 70 % juurde, mille näivvõimsus on ligi kaudu 1100 kVA ja aktiivvõimsus 1000 kW.

Ettevõttes on mõistlik tõsta reaktiivvõimsuse kompenseerimist 300 kvar võrra. Ettevõtte siseselt juhtkonna tasemel on tõstatatud küsimus reaktiivvõimsuse kompenseerimis võimekuse suurendamiseks. Kuna käesoleval aastal ei võimalda maailma majanduslik olukord ettevõtte infrastruktuuri suuri investeeringuid, siis planeeritavad muudatused on lükatud tulevikku.

2.2.4 Tipuvõimsused ja selle vähendamise võimalused

Tipuvõimsused kajastuvad ettevõtte elektriarvetel, kus maksustatakse iga kuu ühe suurima tarbimisega tunni keskmise võimsuse väärtust. Elektriarvete näitel maksab ettevõttele $1[\text{kWh}] = 1,99[\text{€}]$. Vaadeldud ühe nädala mõõtmistulemused näitavad, et tehase seadmete käivitusmomentidel tipuvõimsused kasvavad üle 1000 kW. Joonisel 19 on näha, et suurimate tiputarbimistega päev mõõdetud nädalas oli kolmapäev 21.09.22 ja nädala suurim tipuvõimsus oli 1100 kW. Üksik suurim võimsuse hetk ei määra veel elektriarvetel kajastuvat läbilaskevõime tasu. Läbilaskevõime tasu mõõdetakse ühe kuu ühe kõige suurema tarbimisega tunni keskmise väärtusena. Kolmapäeva elektritarbimiste võimsused on toodud joonisel 26.



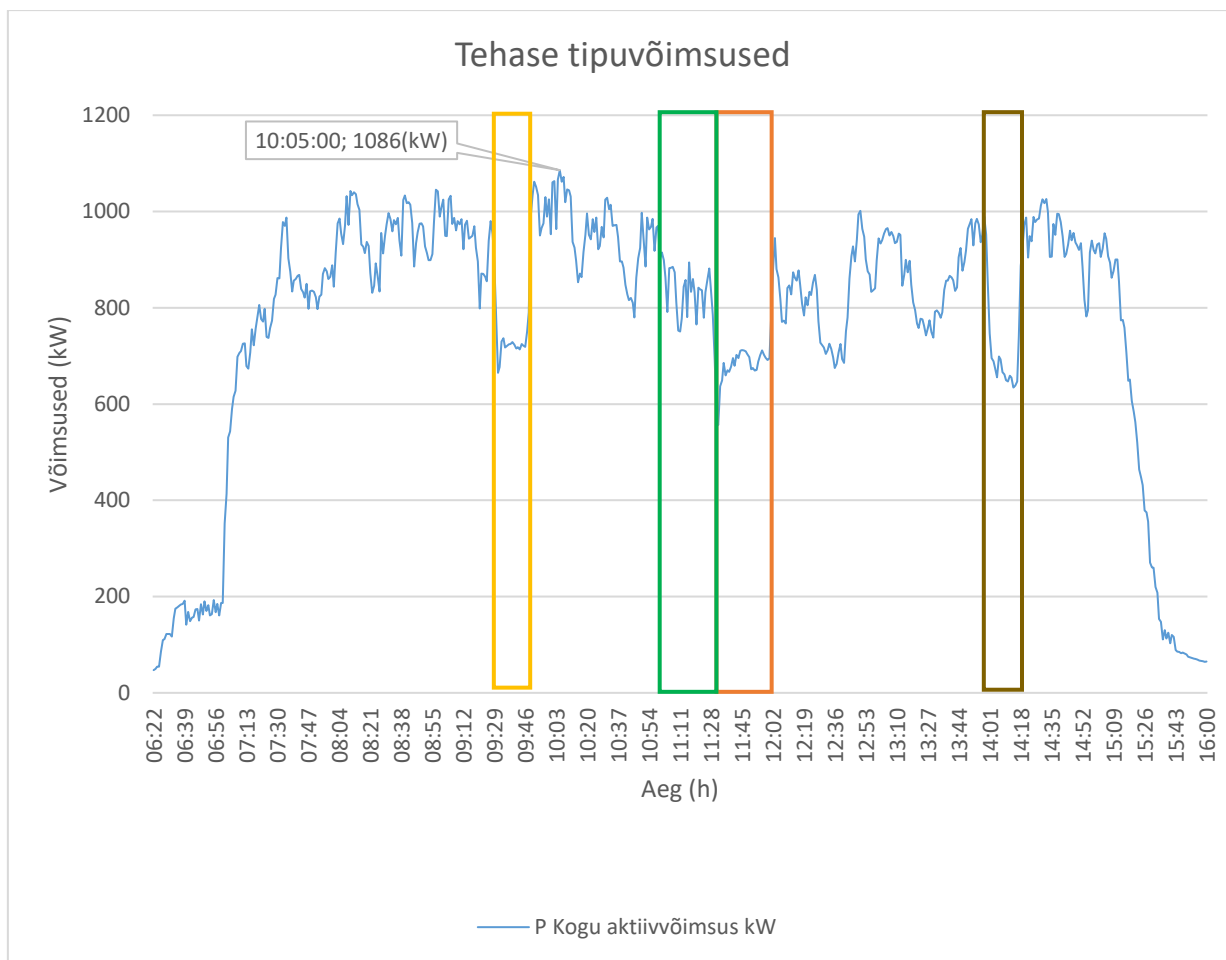
Joonis 26. Tehase tipuvõimsused kolmapäeval 21.09.22 (mõõdetud 10 sekundilise intervalliga).

Veel aastal 2021 juhtus olukordi, kus tööpäeva alguses kell 07:00 rakendus tehase uue kilbiruumi peakaitse, mille nimivool on seatud 1600 A. Põhjuseks oli masina operaatoritele esitatud nõue tööga alustada täpselt kell 07:00, see tõi kaasa olukorra, kus kogu tehase liiniseadmed käivitati ühe aegselt ja see järel alustati töö planeerimist töökohal. Seadmete käivitusvoolud summeerusid ja kell 07:00 hommikul sai mõõta tööpäevade kõige suuremaid kasutusvõimsuseid.

Töökorralduslikult tehti seadmete operaatoritele nõue, et liinide seadmed käivitatakse alles pärast eel seadistuste ja töö planeerimise lõpetamist. Selline reegel hajutas tehase hommikused käivitusvõimsused pikema aja peale.

Tööpäeva siseselt on kolm pausi, millest lõunapausi kasutamiseks jagati tehase tootmisosakond kaheks osaks. Pooltel tehase töölistel on lõunapaus kell 11:00 – 11:30 (vt. Joonis 27, tähistatud roheliselt) ja teise poole tehase töölistel on lõunapaus kell 11:30 – 12:00 (vt. Joonis 27, tähistatud punaselt).

Kaks vahe puhke pausi on kogu tehases samadel aegadel kella 09:30 – 09:45 (vt. Joonis 27, tähistatud oranž) ja 14:00 – 14:15 (vt. Joonis 27, tähistatud pruun).



Joonis 27. Tehase tipuvõimsused jagunenud vastavalt tööaegadele.

Tipuvõimsuseid saab vähendada, kui tööaeg ja puhkepausid päeval jaotada ühtlasemalt. Hea näide on lõunapausi aegade jagamine tehases kaheks osaks. Sama on mõistlik teha ka hommikuse ja pärastlõunase pausiga, kus tehase üksused peavad pausi erinevatel aegadel.

Tipuvõimsused tekkivad enamasti tehase maksimaalsete tootmis voogude ajal. Need on hetked, kui kõik peamised liiniüksused on töös ja elektrienergiale kulutatud rahaline summa kajastub toodangu hinnas. Parim viis tipuvõimsuseid vähendada on tööaja otstarbekam planeerimine.

Kuna antud uurimustöös ei vaadelda seadmete põhist elektrienergia kokkuhoidu ja ei tehta ettepanekuid uuemate ja säästlikumate masinate kasutamisele või olemasolevate seadmete moderniseerimisele energiasäästu põhimõtteid silmas pidades. Vaadeldakse ainult tehase töökorralduslikke muudatusi ja sellega seoses tehakse vastavad ettepanekud elektrienergia säästmiseks. Kogu tehase liiniseadmete park on valitud teostama tootmises kindlaks määratud protseduure ja selle uurimustöö raamidesse ei mahuks kõigi seadmete põhine eraldiseisev elektrienergia tarbimise analüüs. Lisaks eeldaks see põhjalikumaid teadmisi veel automaatika, mehhatroonika ja mehhaanika alal.

2.2.5 Alajaama trafo koormatus ja trafokaod

Alajaama trafo nimi võimsus on 1600 kVA ja tööajal on enamasti trafo nominaalne koormus 70 %, ehk 1100 kVA. Trafo kadude arvutamiseks on kasutatud valemeid 4 ja 5. Trafo parameetrid on järgmised:

- Nimivõimsus $S_T = 1600$ [kVA]
- Trafo tühijooksuvool $I_{tT\%} = 0,6$ [%]
- Trafo lühistakistus $z_{kT\%} = 4,5$ [%]
- Trafo tühijooksukadu $\Delta P_{tT} = 1,64$ [kW]
- Trafo lühiskadu $\Delta P_{kT} = 14,5$ [kW]

Trafo võimsuskaod tööajal avalduvad järgmiselt:

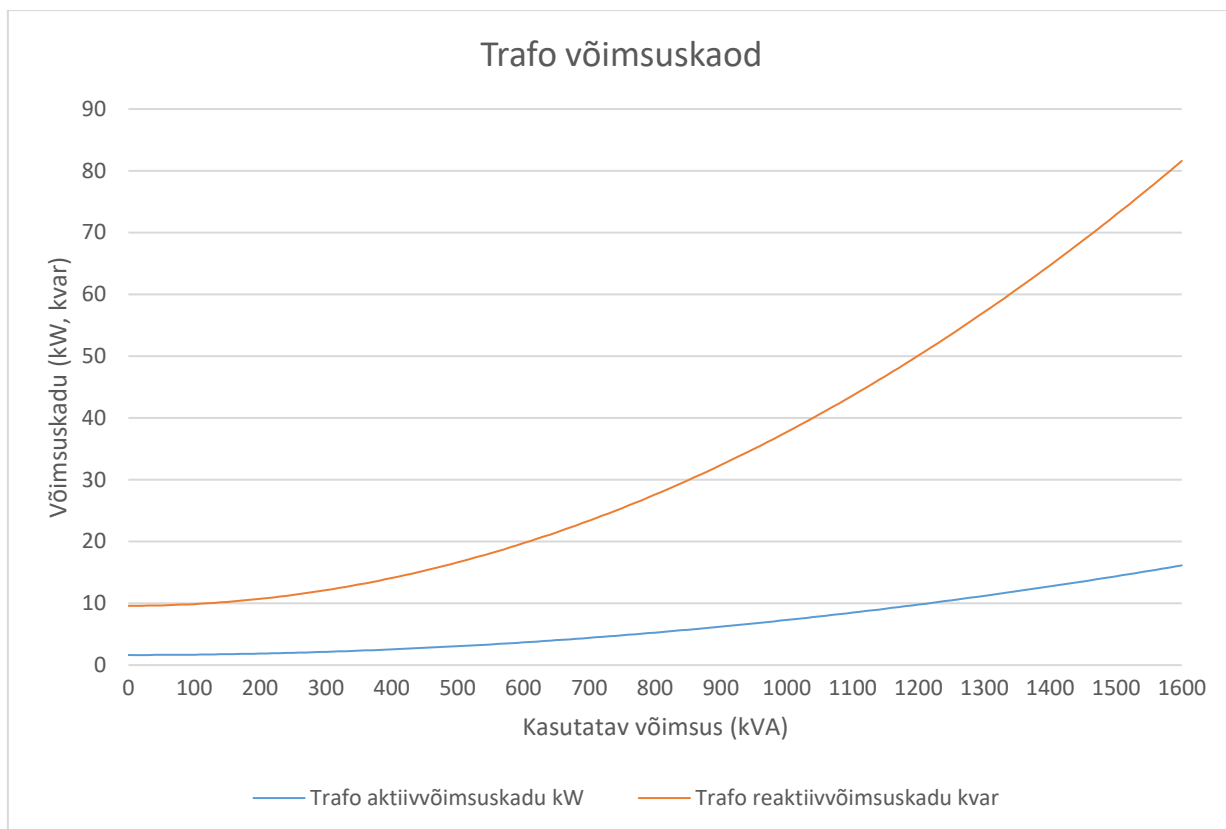
$$\Delta P_T = \Delta P_{kT} * \left(\frac{S_k}{S_T}\right)^2 + \Delta P_{tT} = 14,5 * \left(\frac{1100}{1600}\right)^2 + 1,64 = 8,49[kW]$$

$$\Delta Q_T = \frac{Z_{kT\%} * S_k^2}{100 * S_T} + \frac{I_{tT\%} * S_T}{100} = \frac{4,5 * 1100^2}{100 * 1600} + \frac{0,6 * 1600}{100} = 43,63[kvar]$$

Valemis:

- ΔP_T - trafo aktiivvõimsuskadu [kW]
- ΔQ_T - trafo reaktiivvõimsuskadu [kvar]

Trafo võimsuskaod erinevate koormuste korral on toodud joonisel 28.



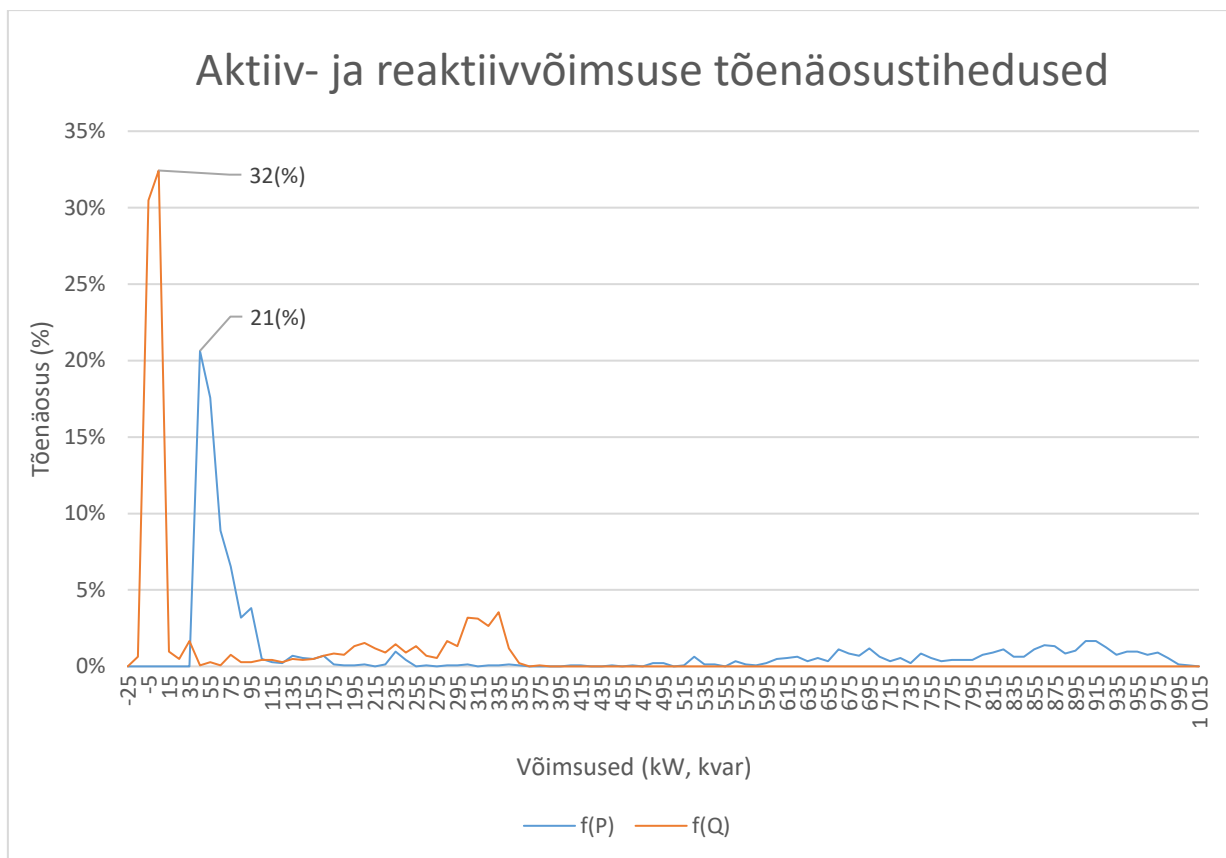
Joonis 28. Trafo võimsus kaod sõltuvalt trafo koormatusest

Trafo aktiivvõimsuskao tõus võrreldes kasutatava koormusega on sedavõrd marginaalne ja antud töös seda rohkem ei vaadelda.

Reaktiivvõimsuskadu kasvab koormuse tõustes aktiivvõimsuskaoga võrreldes viis korda enam ja siin juures on mõistlik otsida lahendusi. Kuna trafo asub elektrienergia tarbimise mõõtepunktiga võrreldes ettevõtte poolel ja trafo kaod kajastuvad ka elektriarvel, siis on mõistlik reaktiivvõimsuskadu koormusolukordades kompenseerida. Eelnevad analüüsid antud töös on näidanud, et ettevõtte poolne reaktiivvõimsus kompensaator kondensaatorseadme näol pole piisav kogu ettevõtte induktiivse reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks. Antud punktis leitud trafo reaktiivvõimsuskaod saab liita juurde kogu ettevõtte reaktiivvõimsusele tehase töö olukorras.

Kindlasti on ettevõttel mõistlik kaaluda suurema võimsusega reaktiivvõimsuse-kompensaatori paigaldamist.

Trafo koormatust on võimalik vaadelda võimsuste tõenäosustihedusefunktsiooni kasutades. Jooniselt 29 on näha, kuidas alajaama trafo on koormatud ühe tööpäeva jooksul. Ööpäevast 20 % on trafo aktiivvõimsus 55 kW ja 32 % on reaktiivvõimsus 0 kvar. Ööpäeva tiputarbimise juures on trafo reaktiivvõimsus 335 kvar ja päevane aktiivvõimsus kõigub vahemikus 600 kuni 1000 kW.



Joonis 29. Kogu tehase võimsuste tõenäosustihedus, mis on mõõdetud ühe tööpäeva (19.09.2022) jooksul

2.3 Tarbimiste ajalugu ja valitud elektripaketid

Tarbimiste ajalugu on kogutud kümne kuu jooksul ajavahemikus 01 november 2021 kuni 31 september 2022. Elektri arvetel kajastuvad püsिमaksed, mis ei sõltu tarbimisest ja need maksed, mis otseselt sõltuvad tarbimisest.

Püsिमaksete alla kuuluvad kuutasu, läbilaskevõime tasu, alajaama hooldus ja haldustasu.

Tarbimisest sõltuvad tasud on kulutatud elektrienergia tasu, võrguteenuse kasutusvõimsus tasu, reaktiivenergia tasu, taastuvenergia tasu ja elektriaktsiis. Lisanduvad veel ka pumpla elekter ja pumpla hooldus tasu.

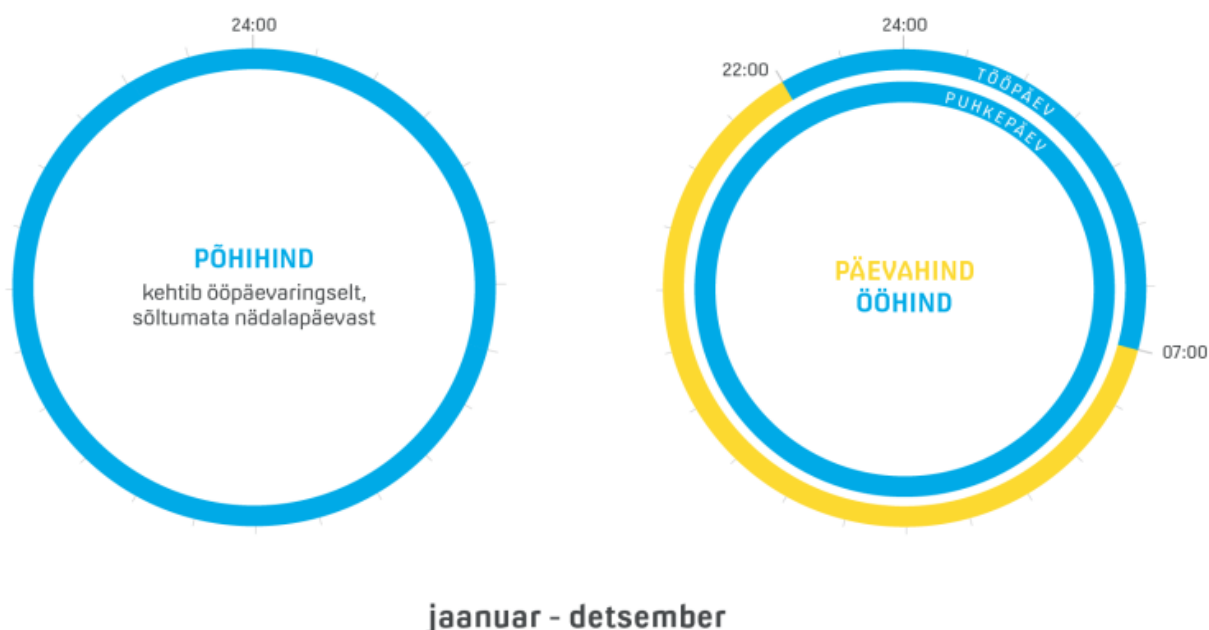
Elektrienergia tasustamine on vastavalt sõlmitud lepingule määratletud kolme osalisena, mis koosneb tarbitud elektrienergiast, päevasest võrgutasust ja öisest võrgutasust.

Elektripakette on võimalik valida vastavalt tarbimisele, kus on määratud ära öise ja päevase elektritarbimise osakaal. Elektri hind koosneb tarbitud elektrist ja elektri edastustasust. Võimalik on valida põhihinnaga elektripakett, kus öise ja päevase elektri edastustasu on sama

ja on võimalik valida, elektripakett, kus elektriedastustasu on öisel ja päevasel ajal erinev. Erinevate elektripakettide ajaline jaotus on toodud järgnevalt:

- **Põhihind** (elektri edastamine) kehtib ööpäevaringselt, sõltumata nädalapäevast. [13]
- **Päevahind** (elektri edastamine: päev) kehtib esmaspäevast reedeni (v.a riiklik püha) kell 7.00-22.00 (kui hinnapaketi ei ole määratud teisiti). [13]
- **Ööhind** (elektri edastamine: öö) kehtib esmaspäevast reedeni (v.a riiklik püha) kell 22.00-7.00 ning laupäeval, pühapäeval ning riiklikul pühal kogu ööpäeva jooksul (kui hinnapaketi ei ole määratud teisiti). [13]

Elektri edastus pakettide ajaline jaotus on toodud joonisel 30.

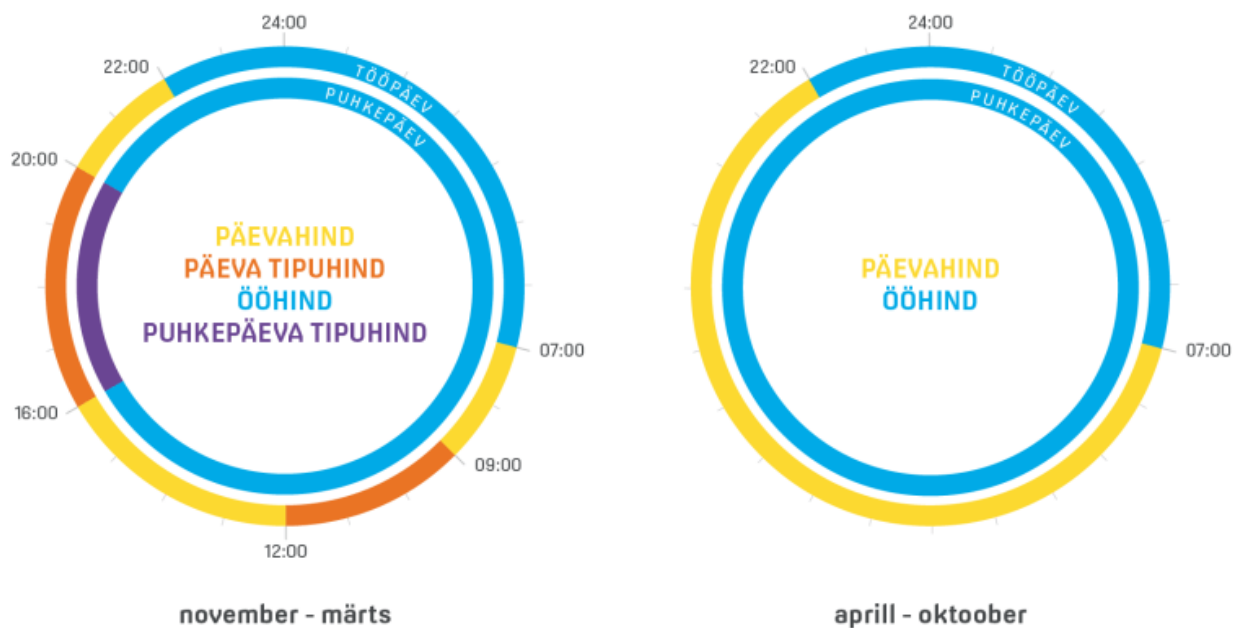


Joonis 30. Elektripakettide elektriedastustasu ajaline jaotus. [13]

Uutel mitmetariifsetel elektripakettidel **Keskpingel liinil Aeg VKL5** ja **Keskpingel Alajaamas Aeg VKA5** on määratud päeva tarbimised järgnevalt:

- **Päevatarbimise tipuaja hind** (elektri edastamine: päev tipuaeg) kehtib perioodil novembrist märtsini: esmaspäevast reedeni (v.a riiklik püha) ajavahemikus kell 9.00 kuni 12.00 ja 16.00 kuni 20.00; [13]
- **Puhkepäeva tipuaja hind** (elektri edastamine: puhkepäeva tipuaeg) kehtib perioodil novembrist märtsini laupäeval, pühapäeval ning riiklikel pühadel ajavahemikus kell 16.00 kuni kell 20.00. [13]

Tiputarbimise ajaline jaotus on toodud joonisel 31.



Joonis 31. Uute mitmetariifsete elektriktripakettide tiputarbimise ajaline jaotus [13].

Vaadeldud ettevõttes on kasutatud elektrikpaketti **Keskpingel liinil Mega VKL4**. Elektripaketi moodustavad hinnad on toodud tabelis 6, tegemist on elektrilevi pakutavate tüüp hindadega ja võivad mõne võrra erineda kliendi ja elektrilevi poolsetest kokkuleppelistest hindadest.

Tabel 6. Võrguteenuse hinnakiri Keskpingel liinil Mega VKL4 [13]

Nimetus	Mõõteühik	Võrgutasu käibemaksuta
Võrguühenduse kuutasu	€ kuus	602,00
Võrguühenduse läbilaskevõime	€ / kW kuus	1,18
Võrguühenduse kasutusvõimsus	€ / kW kuus	1,99
Tarbimiskoha kasutusvõimsus	€ / kW kuus	2,16
Elektri edastamine päev	Senti/kWh	0,77
Elektriedastamine öö	Senti/kWh	0,45

Töös vaadeldud ettevõttes moodustab ühe kuu päevase elektrienergia osakaal keskel läbi 80 % ja öise ning puhkepäevade elektrienergia osakaal 20 % kogu kasutatud elektrienergiast. Tabelis 6 toodud hinnad kehtisid vaatlus perioodi keskel ja töö valmimiseks võivad olla juba muutunud.

Võrgu läbilaskevõimsus on soovitatav valida ja fikseerida elektrilepingus vastav ettevõtte tegelikule tarbimisele. See osa kasutusvõimsusest, mis ületab läbilaskevõimsust tasustatakse viie kordse tasuga. [14]

2.4 Elektriarvete analüüs

Ettevõtte elektriarved koosnevad tarbimisest sõltuvatest ehk muutuvad ja tarbimisest sõltumatutest ehk püsikomponentidest. Lisaks on veel liitumispunkti eripära arvestavad komponendid, mis lisanduvad ka elektriarvetel. Nendeks komponentideks on pumbajaama, ehk pumpla elekter ja hooldus. Pumpla, millest ettevõtte saab oma tarbevee on ühine ka naaber ettevõtete ja hoonetega, siis pumpla hooldus ja tarbitav elekter on jagatud ja sõltub vee tarbimisest. Pumpla elekter kajastub elektriarvetel, kuid ei puutu otseselt ettevõtte tootmisprotsessi, siis seda osa põhjalikumalt ei analüüsita. Alates jaanuar 2022 on muutunud ettevõtte poolne pumpla elektri osamakse, kuna pumpla vee tarbijate hulka lisandus veel üks klient naabruses, see alandas ettevõtte pumpla osamakset tarbeveele.

Pumpla elekter on toodud tabelis 7.

Tabel 7. Pumpla elektri- ja hooldustasu

Aasta	Kuu	Nimetus	Ühiku hind €/m ²	Tarbitud kogus	Hind kokku €
2021	NOVEMBER	Pumpla elekter	9324	0,00043	4,01
		Pumpla hooldus	9324	0,03940	367,38
	DETSEMBER	Pumpla elekter	9324	0,00841	78,44
		Pumpla hooldus	9324	0,03131	291,93
2022	JAANUAR	Pumpla elekter	9041	0,00358	32,34
		Pumpla hooldus	9041	0,02822	255,13
	VEEBRUAR	Pumpla elekter	9041	0,02507	226,64
		Pumpla hooldus	9041	0,03198	289,11
	MÄRTS	Pumpla elekter	9041	0,00953	86,12
		Pumpla hooldus	9041	0,03198	289,09
	APRILL	Pumpla elekter	9041	0,02752	248,85
		Pumpla hooldus	9041	0,03198	289,09
	MAI	Pumpla elekter	9041	0,00527	47,66
		Pumpla hooldus	9041	0,03198	289,09
	JUUNI	Pumpla elekter	9041	0,04193	379,10
		Pumpla hooldus	9041	0,02822	255,13
	JUULI	Pumpla elekter	9041	0,02396	216,62
		Pumpla hooldus	9041	0,04676	422,75
	AUGUST	Pumpla elekter	9041	0,01476	133,46
		Pumpla hooldus	9041	0,02822	255,13
	SEPT.	Pumpla elekter	9041	0,03943	356,45
		Pumpla hooldus	9041	0,03047	275,51

Püsimumaksetena kajastuvad arvetel veel kuutasu, alajaama hooldustasu ja kasutusvõimsustasu. Kuutasu ja alajaama hooldustasu on ühikupõhised, kasutusvõimsustasu on vastavalt elektrimüüglingus sõlmitud kasutusvõimsusele ja antud liitumispunktis on see

870 kW. Kogu võimsus maksustatakse lisaks läbilaskevõime tasuga, mis arvestatakse ühe maksimaalse tunni keskmise aktiivvõimsusega ja võimsus mis ületab 870 kW maksustatakse viiekordselt.

Kuutasu, alajaama hooldustasu ja kasutusvõimsustasu on toodud tabelis 8.

Tabel 8. Kuutasu, alajaama hooldustasu ja kasutusvõimsuse tasu.

Aeg	Teenus	Ühik	Ühiku hind €	Hind kokku €
nov.2021-dets.2021	Alajaama hooldus	1 kuu	66,000	66,00
jaan.2022-sept.2022		1 kuu	69,000	69,00
nov.2021-veeb.2022	Kuutasu	1 kuu	121,000	121,00
märts.2022-sept.2022		1 kuu	602,000	602,00
nov.2021-veeb.2022	Kasutusvõimsuse tasu	870kW	0,170	147,90
märts.2022-sept.2022		870kW	1,180	1026,60

Alajaama hooldustasu tõusis aasta alguses kolm eurot. Alates märtsist 2022 muutis ettevõtte elektri lepingut ja sellega seoses tõusid ka kuutasu ja kasutusvõimsusetasu.

Tarbimisest sõltuvad tasud on tarbitud elekter, võrgutasud, võrguteenuse läbilaskevõimetasu, reaktiivenergiatasu, taastuenergiatasu ja elektriaktsiis.

Reaktiivenergiatasu kajastub ettevõtte poolt võrku antavast reaktiivenergiast. Mida rohkem suudab ettevõtte reaktiivenergiat kohapeal kompenseerida seda väiksem on reaktiivenergiatasu. Ettevõttes on olemas reaktiivenergia kompenseerimiseks kondensaatorseade ja tulevikus on plaanis kompenseeritava võimsuse hulka suurendada. Kui kogu reaktiivenergia ettevõttes kompenseeritakse, siis on võimalik aastas elektriarvete pealt kokku hoida ligi kaudu 3700 €.

Vaadeldud perioodi seisuga on kompenseerimata reaktiivenergiatasu toodud tabelis 9.

Tabel 9. Reaktiivenergiatasud

Kuu	Nimetus	Ühiku hind €	Tarbitud kogus kvarh	Hind kokku €
NOVEMBER	Reaktiivenergia	0,004	104058	374,61
DETSEMBER	Reaktiivenergia	0,004	78462	282,46
JAANUAR	Reaktiivenergia	0,004	64436	231,97
VEEBRUAR	Reaktiivenergia	0,004	70542	253,95
MÄRTS	Reaktiivenergia	0,004	97513	360,80
APRILL	Reaktiivenergia	0,004	89919	332,70
MAI	Reaktiivenergia	0,004	93070	344,36
JUUNI	Reaktiivenergia	0,004	67227	275,63
JUULI	Reaktiivenergia	0,004	71035	291,24
AUGUST	Reaktiivenergia	0,004	26389	108,19
SEPTEMBER	Reaktiivenergia	0,004	55164	226,17

Võrguteenuse läbilaskevõime tasu on ettevõtte elektritarbimise võimsusest sõltuv. Tasu suurus sõltub elektrimüügilepingus määratud kasutusvõimsusest ja seda võimsust ületavast osast. Tasustatakse suurima maksimaalse võimsusega, mis arvestatakse ühe tunni keskmise aktiivvõimsusega ja vaadeldud perioodi pikkus on üks kuu. See osa, mis ületab kasutusvõimsusele määratud piiri tasustatakse viie kordselt. Hind sõltub otseselt ühe kuu tipuvõimsusest ja kui tipuvõimsused on hajutatud pikema aja peale siis toob see ka läbilaskevõimetasu alla. Lõpliku ühiku hinna määrab elektripakkuja.

Läbilaskevõimetasud on toodud tabelis 10.

Tabel 10. Võrguteenuse läbilaskevõime tasud.

Kuu	Nimetus	Ühiku hind €	Tarbitud kogus kW	Hind kokku €
NOVEMBER	Võrguteenuse läbilaskevõime	2,680	1017	2725,56
DETSEMBER	Võrguteenuse läbilaskevõime	2,680	1002	2685,36
JAANUAR	Võrguteenuse läbilaskevõime	2,680	1041	2789,88
VEEBRUAR	Võrguteenuse läbilaskevõime	2,680	981	2629,08
MÄRTS	Võrguteenuse läbilaskevõime	1,990	1010	2009,90
APRILL	Võrguteenuse läbilaskevõime	1,990	1027	2043,73
MAI	Võrguteenuse läbilaskevõime	1,990	995	1980,05
JUUNI	Võrguteenuse läbilaskevõime	2,190	998	2185,62
JUULI	Võrguteenuse läbilaskevõime	2,190	1014	2220,66
AUGUST	Võrguteenuse läbilaskevõime	2,190	979	2144,01
SEPT.	Võrguteenuse läbilaskevõime	2,190	976	2137,44

Tarbitud elekterenergia, võrgutasud, taastuenergiatasu ja elektriaktsiis sõltuvad otseselt ühes kuus tarbitud elektrienergia kogusest ja tasu hind on kokkulepitud elektrienergia müüjaga. Ainus erisus on võrgutasu, kus saab valida erinevate elektripakettide vahel. Elektripakettidest on pikemalt kirjutatud punktis **2.3 Tarbimiste ajalugu ja valitud elektripaketid**. Ettevõtte muutis oma elektripaketti selliselt, et alates märts 2022 arvestatakse öö ja päeva tarbimist eraldi, enne seda oli põhipakett, kus öö ja päeva tarbimisel oli ühine hind.

Uurimustöö on teostatud ajal, kus maailmas on majanduslikult keerulised ajad on ja elektrienergiat hinnad on olnud pidevas muutumises. Vaadeldud periood jääb suurte kriiside vahelisse aega ja sellega seoses on teinud elektrihind kogu aastaväljel hüppelise kasvu.

Tabelist 11 on näha kuidas vaatlusperioodi jooksul on elektrienergia hind kasvanud üle kahe korra. Kui 2021 novembris oli hind 0,0425 €/kWh siis 2022 septembris maksis juba elektrienergia 0,0865 €/kWh.

Elekterenergia hinnad on toodud tabelis 11.

Tabel 11. Elekterenergia

Kuu	Nimetus	Ühiku hind €	Tarbitud kogus kWh	Hind kokku €
NOVEMBER	Elekter	0,0425	310122	13173,98
DETSEMBER	Elekter	0,0425	270599	11495,05
JAANUAR	Elekter	0,0462	223059	10300,86
VEEBRUAR	Elekter	0,0462	236882	10939,21
MÄRTS	Elekter	0,0462	312068	14411,30
APRILL	Elekter	0,0720	279468	20110,52
MAI	Elekter	0,0720	288016	20725,63
JUUNI	Elekter	0,0720	222293	15996,20
JUULI	Elekter	0,0720	241452	17374,89
AUGUST	Elekter	0,0720	111930	8054,48
SEPT.	Elekter	0,0865	181082	15670,84

Võrgutasud on toodud tabelis 12.

Tabel 12. Võrgutasud

Kuu	Nimetus	Ühiku hind €	Tarbitud kogus kWh	Hind kokku €
NOVEMBER	Võrgutasu	0,0090	310122	2791,10
DETSEMBER	Võrgutasu	0,0090	206000	1854,00
JAANUAR	Võrgutasu	0,0090	223059	2007,53
VEEBRUAR	Võrgutasu	0,0090	236882	2131,94
MÄRTS	Võrgutasu päev	0,0077	246677	1899,41
MÄRTS	Võrgutasu öö	0,0045	65391	294,26
APRILL	Võrgutasu päev	0,0077	214265	1649,84
APRILL	Võrgutasu öö	0,0045	65203	293,41
MAI	Võrgutasu päev	0,0077	238397	1835,66
MAI	Võrgutasu öö	0,0045	49619	223,29
JUUNI	Võrgutasu päev	0,0085	180603	1535,13
JUUNI	Võrgutasu öö	0,0049	41690	204,28
JUULI	Võrgutasu päev	0,0085	203269	1727,79
JUULI	Võrgutasu öö	0,0049	38183	187,10
AUGUST	Võrgutasu päev	0,0085	94761	805,47
AUGUST	Võrgutasu öö	0,0049	17169	84,13
SEPT.	Võrgutasu päev	0,0085	161936	1376,46
SEPT.	Võrgutasu öö	0,0049	19146	93,82

Tabelis 12 on näha, et alates märts 2022 muutis ettevõtte elektrikpaketti ja võrgutasudel mindi põhipaketilt üle ööd ja päeva eristavale pakatile. Võrgutasude hind kokkuvõttes langes võrreldes veebruar 2022. Samas tõusid tabelis 8 toodud kuutasu ja kasutusvõimsus tasu. Kui vaadelda kahte kuud veebruari ja märtsi ning võtta arvesse lepingu muutusega kaasnenud kuutasu ja kasutusvõimsuse tasu tõus, siis lepingu muutusega tõusis kokkuvõttes tasu 745 €/kuus.

Taastuenergiatasu ja elektriaktsiisi tasud on ühiku põhised ja sõltuvad tarbitud elektrienergiast, nende tasude suurus pole vaadeldud perioodi jooksul muutunud. Taastuenergiatasu ja elektriaktsiisi tasud on toodud tabelites 13 ja 14.

Tabel 13. Taastuenergiatasu

Kuu	Nimetus	Ühiku hind €	Tarbitud kogus kWh	Hind kokku €
NOVEMBER	Taastuenergia	0,0113	310122	3504,38
DETSEMBER	Taastuenergia	0,0113	206000	2327,80
JAANUAR	Taastuenergia	0,0113	223059	2520,57
VEEBRUAR	Taastuenergia	0,0113	236882	2676,77
MÄRTS	Taastuenergia	0,0113	312068	3526,37
APRILL	Taastuenergia	0,0113	279468	3157,99
MAI	Taastuenergia	0,0113	288016	3254,58
JUUNI	Taastuenergia	0,0113	222293	2511,91
JUULI	Taastuenergia	0,0113	241452	2728,41
AUGUST	Taastuenergia	0,0113	111930	1264,81
SEPT.	Taastuenergia	0,0113	181082	2046,23

Tabel 14. Elektriaktsiis

Kuu	Nimetus	Ühiku hind €	Tarbitud kogus kWh	Hind kokku €
NOVEMBER	Elektriaktsiis	0,0010	310122	310,12
DETSEMBER	Elektriaktsiis	0,0010	206000	206,00
JAANUAR	Elektriaktsiis	0,0010	223059	223,06
VEEBRUAR	Elektriaktsiis	0,0010	236882	236,88
MÄRTS	Elektriaktsiis	0,0010	312068	312,07
APRILL	Elektriaktsiis	0,0010	279468	279,47
MAI	Elektriaktsiis	0,0010	288016	288,02
JUUNI	Elektriaktsiis	0,0010	222293	222,29
JUULI	Elektriaktsiis	0,0010	241452	241,45
AUGUST	Elektriaktsiis	0,0010	111930	111,93
SEPT.	Elektriaktsiis	0,0010	181082	181,08

2.5 Tarbimiste analüüs

Töös on vaadeldud kümne kuu elektriarveid ja analüüsitud elektrienergia tarbimist november 2021 kuni september 2022. Töös vaadeldud kümne kuu elektriarvetelt on näha, kuidas mitmete komponentide hinnad on selle perioodi jooksul muutunud. Püsikomponentide hinnad on määratud elektriliitumislepingus ja neid muuta ühepoolset pole võimalik.

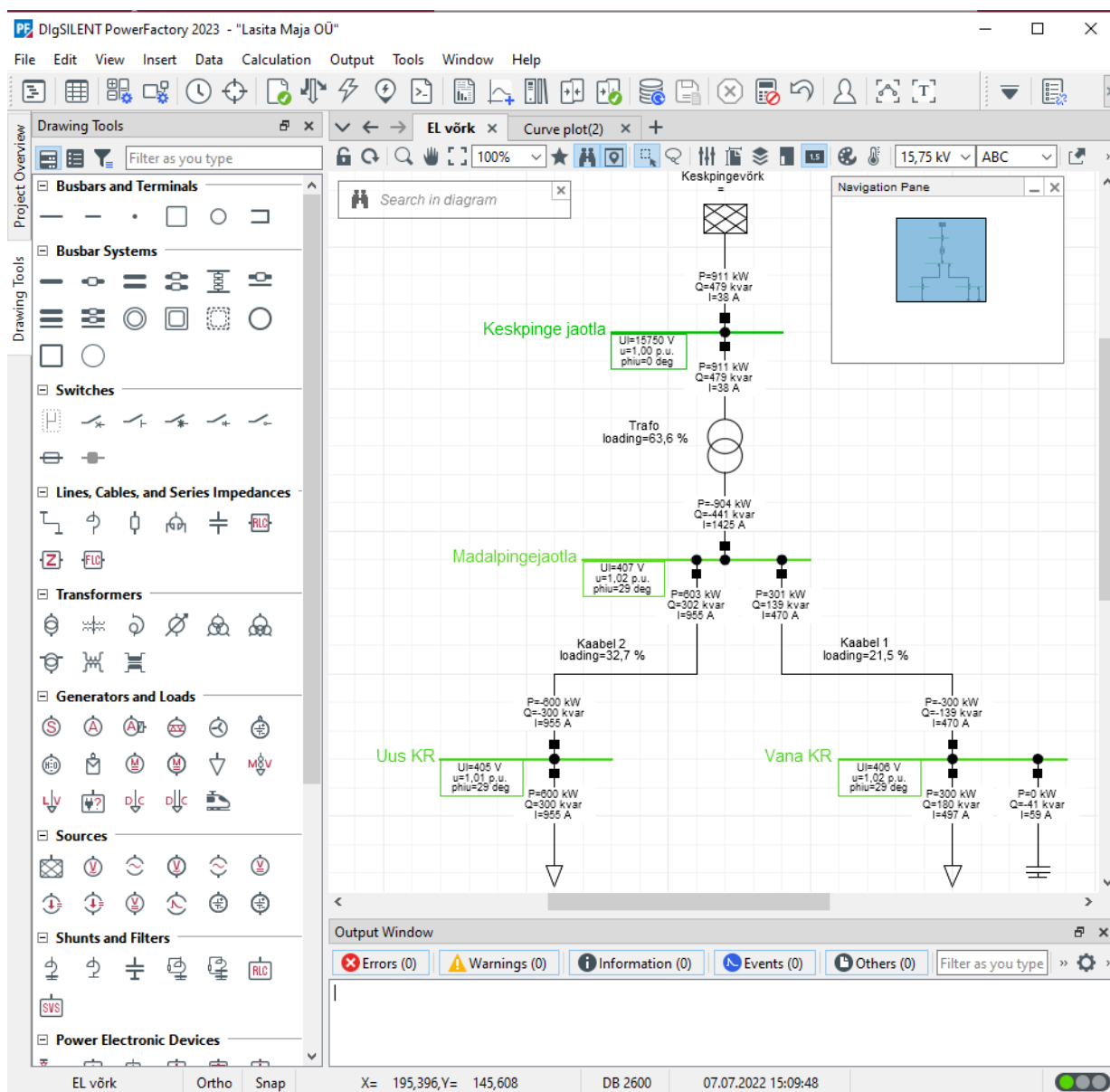
Järgnevalt on toodud välja komponendid, mis aitavad elektrikulusid kokku hoida:

- Kulu reaktiivvõimsusele ühes kuus on keskmiselt 74347 kvarh ja **280 €**. Ühe aasta kulu reaktiivenergiale on keskmiselt **3500 €**.
- Aasta keskmine kuu läbilaskevõimsus on 1000 kW, samas on elektrilepingus määratud kasutusvõimsus 870 kW. Läbilaskevõimsus kuni kasutusvõimsuseni on tasustatud ühekordselt. Läbilaskevõimsus, mis ületab kasutusvõimsust maksustatakse viie kordselt. Suurendades elektrilepingus kasutusvõimsust 1000 kW-ni, tõuseb kasutusvõimsusetasu 1131 € -> 1300 €, kuid samas on võimalik hoida kokku läbilaskevõimsus tasu pealt, mis vaadeldud perioodil on ületanud kasutusvõimele määratud piiri. Kui läbilaskevõimsus jääb tavapärase 1000 kWh tasemele, siis tuleb tasu umbes **800 €/kuus** soodsam.
- Ettevõttel on kokkuvõttes soodsam kasutada põhipaketti, kus võrgutasu on 24/7 h sama hinnaga. Võrreldes veebruari arvet, kui kasutati põhipaketti ja märtsi arvet, kus kasutati öö ja päeva erisust, tuleb põhipaketti kasutades keskmise tarbimise juures elektri arve umbes **750 €/kuus** soodsam.

3 TARBIMISVÕIMSUSTE MODELLEERIMINE

Mudeli koostamiseks on kasutatud modelleerimistarkvara **DigSILENT Power Factory 2023**. Tarkvara võimaldab luua uuritavast elektrivõrgust graafilise mudeli koos kõigi elektrivõrgu parameetritega. Antud magistritöös sai tarkvara jaoks taotletud tudengi litsents, mis võimaldab kasutada tarkvara mitte kommertslikul eesmärgil piiratud aja jooksul.

Modelleerimis tarkvara esmakordne kasutamine nõuab pikemat harjumist. Parameetreid, mis elektrivõrgu mudeli loomiseks on vaja, tuleb sisestada täpselt ja esmasel kasutamisel on programmist raske üles leida õigeid kohad. Tarkvara visuaalne väljanägemine on toodud joonisel 32.



Joonis 32. DigSilent Power Factory 2023

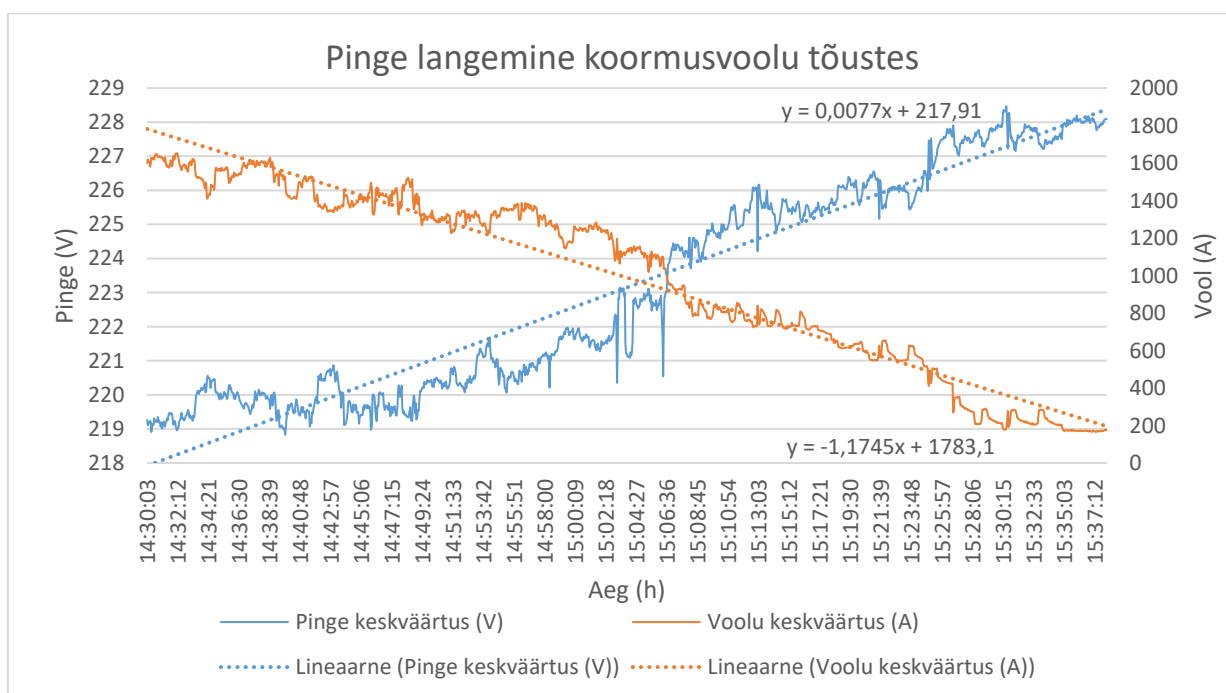
3.1 Modelleerimiste meetodid

Mudelina luuakse olukord, mis ettevõtte elektrivõrku hetkel iseloomustab ja vaadeldakse erinevaid koormusolukordi. Vaadeldakse elektrivõrgu toimimist maksimaalse koormuse olukorras.

Mudelis on reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks nelja astmeline kondensaatorseade, milles vaadeldakse reaktiivvõimsuse kompenseerimist ja sellega seonduvalt toitepinge muutuseid. See järel luuakse mudelisse täiendav kondensaatorseade ja vaadeldakse, kui ettevõtte kogu reaktiivvõimsus kompenseerida, siis millist mõju see avaldab pingele kvaliteedile.

3.2 Võrguarvutuse modelleerimine ja mudeli koostamine

Mudeli koostamisel on vaja eelteavet mitmete võrguparameetrite kohta, üheks parameetrik on võrgu nimipinge ja teiseks parameetrik on võrgu takistused, et saaks mudeli koostamisel leida võimalik pingelang koormuse tõustes. Pinget saab mõõta alajaama 0,4 kV klemmidelt. Selleks et leida võrgu takistus on võimalik teostada pingele ja voolu mõõtmised erinevate koormuste olukordades kahel või enamal juhul. Tulemuste saamiseks kasutada valemis 3 toodud seost. Jooniselt 33 on selgelt näha koormusvoolu muutusest kaasnev pingele muutus.



Joonis 33. Koormusvoolu muutuse seos pingele muutusega alajaama trafo 0,4 kV klemmidel.

Selleks, et vähendada viga ja suurendada mõõtetäpsust, teostati tabelarvutusprogrammis 300 tehet kasutades valemit 3 ja valiti keskmine väärtus. Kuna mõõtmisi teostati alajaama trafo madalpinge lattidel, siis lisandub liini takistusele ka alajaama trafo sisetakistused.

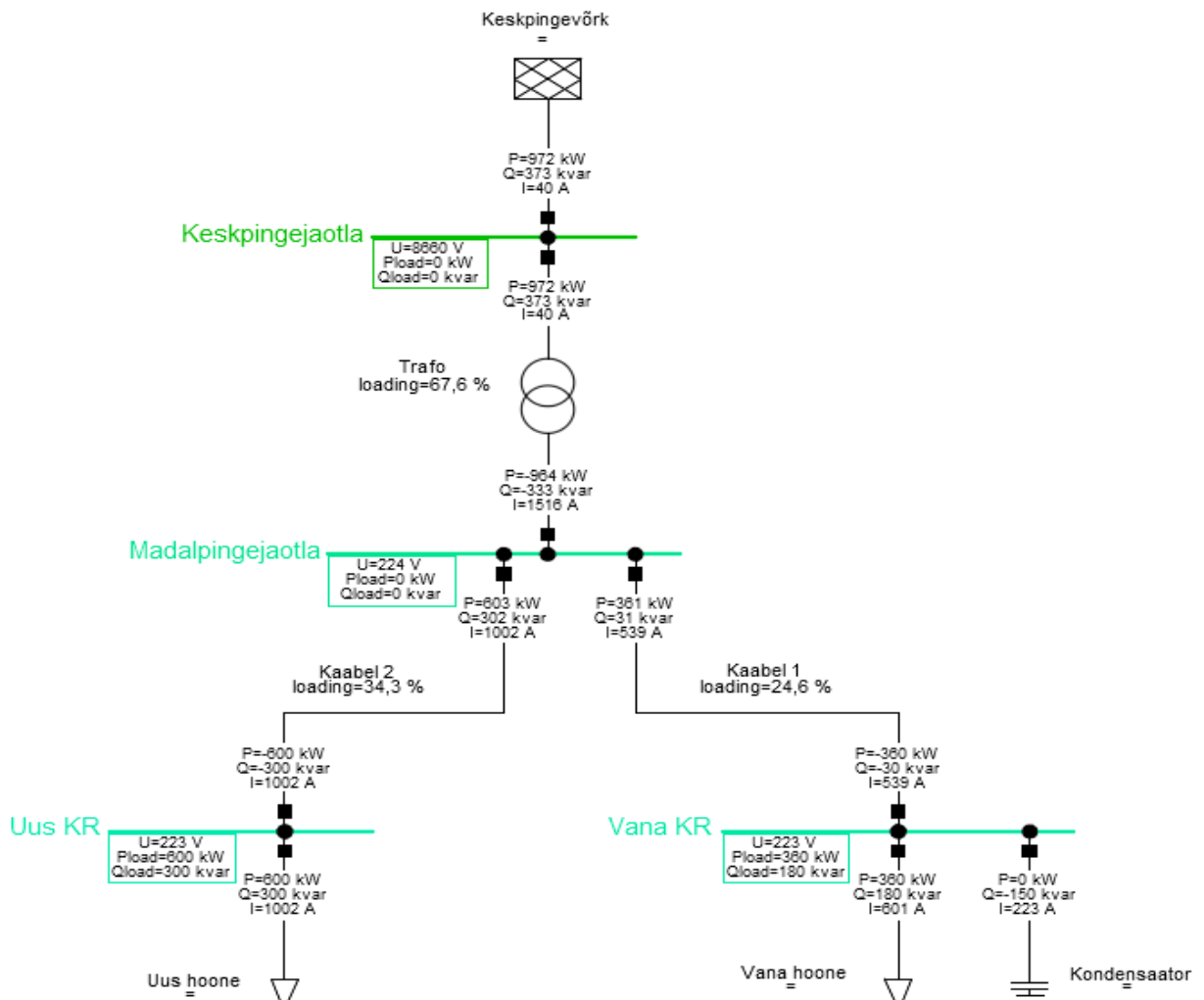
Elektrivõrgu takistused koos trafo takistustega tarbija liitumispunktis on:

- Näivtakistus **Z = 0,00612[Ω]**
- Aktiivtakistus **R = 0,00581[Ω]**
- Reaktiivtakistus **X = 0,00187[Ω]**

Esimesena on vaadeldud olukorda, kus tehas töötab 60 % võimsusega. Eelnevalt teostatud mõõtmised trafo madalpinge klemmidel andsid järgmised tulemused:

- Aktiivvõimsus **P = 960[kW]**
- Reaktiivvõimsus **Q = 340[kvar]**
- Faasipinge **U_f = 220[V]**

Sarnane 60 % tehase võimsusega loodud mudel on toodud joonisel 34. Mudelil on näha, et trafo madalpinge klemmidel on aktiivvõimsus **P = 964[kW]**, reaktiivvõimsus **Q = 333[kvar]** ja faasipinge **U_f = 224[V]**.



Joonis 34. Loodud mudel, kus tehase võimsus 60 %.

Teises olukorras on mudelit muudetud ja vaadeldakse tehase sama 60 % koormuse olukorda, kus järkjärgult muudetakse reaktiivvõimsuse kompenseerimisseadme võimsust. Kondensaatorseadme võimsust hakatakse tõstma nullist kuni võimsuseni, kus kogu induktiivne reaktiivvõimsus on kompenseeritud.

Tulemused näitavad, et kondensaatorpatareid muutes **0 ... 560 kvar** on võimalik pinge tõus **3,7 V** ja voolu langus **190 A**.

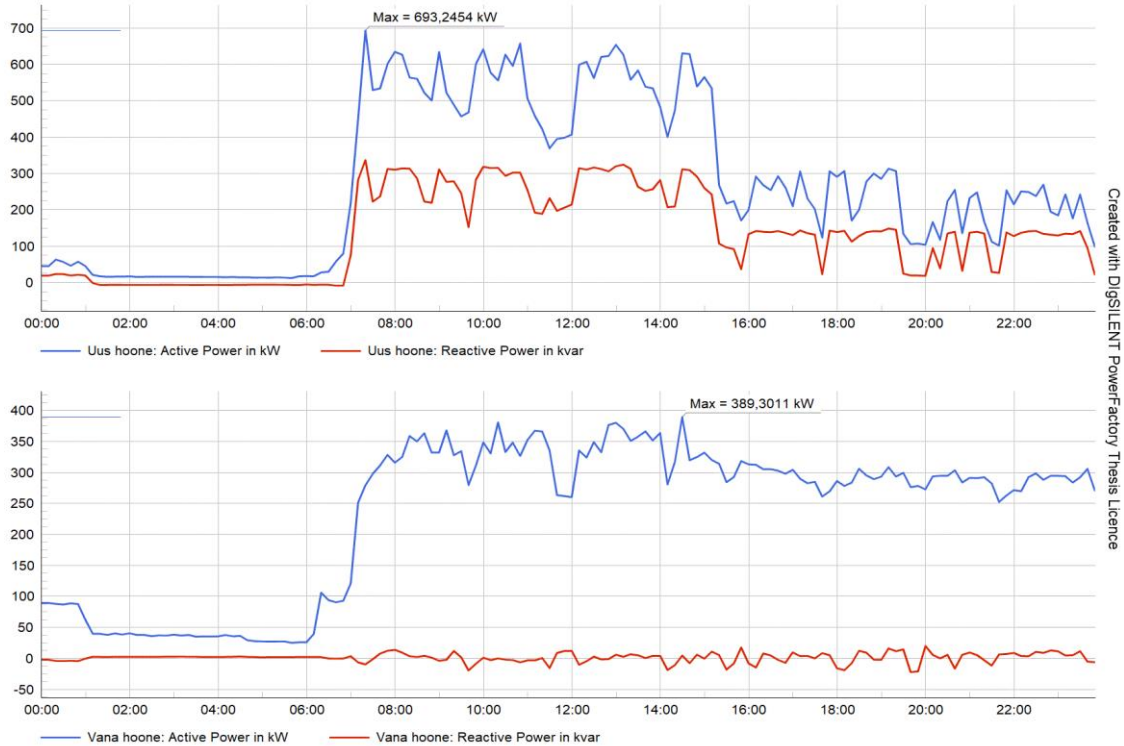
Saadud tulemused on toodud tabelis 15.

Tabel 15. Reaktiivvõimsuse kompenseerimise suurendamine 60 % tehase koormuse juures.

Kondensaatori moodulite arv	Kondensaator Q (kvar)	Trafo P (kW)	Trafo Q (kvar)	Trafo U (V)	Trafo I (A)
0	0	965	483	223,20	1611
1	40	965	445	223,46	1585
2	80	965	408	223,72	1560
3	120	964	370	223,99	1538
4	160	964	333	224,25	1516
5	200	964	295	224,51	1497
6	240	964	257	224,78	1480
7	280	964	218	225,04	1465
8	320	964	180	225,31	1451
9	360	965	141	225,58	1440
10	400	965	102	225,84	1432
11	440	965	63	226,11	1425
12	480	965	23	226,38	1421
13	520	965	-16	226,65	1420
14	560	966	-56	226,92	1421

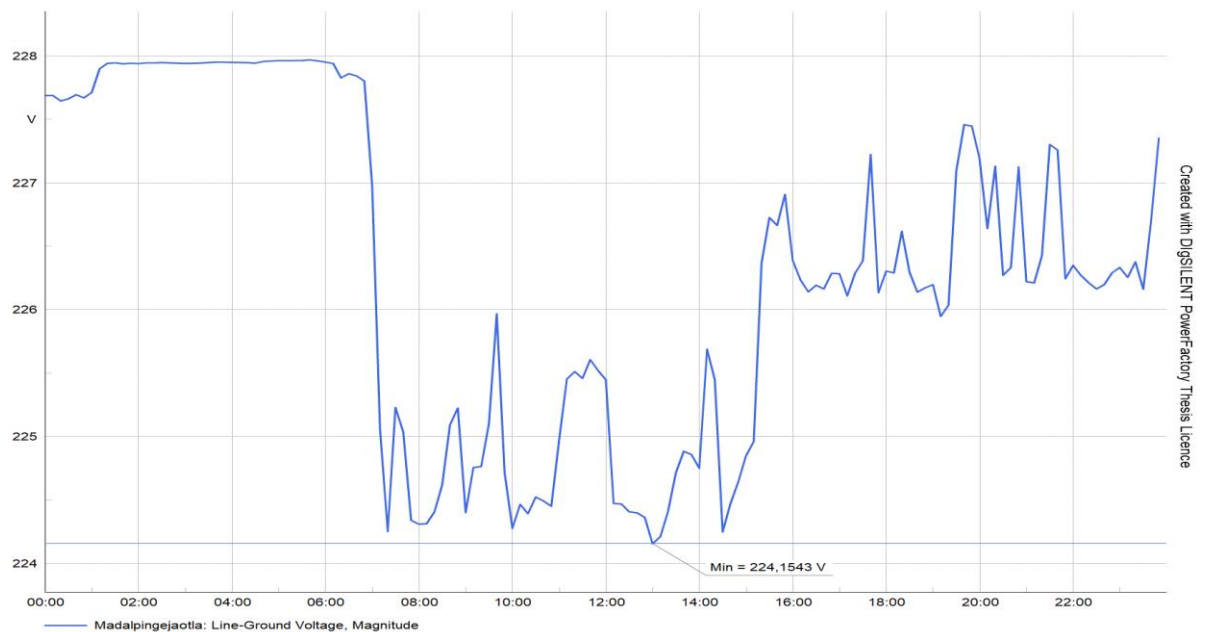
Järgnevas mudelis vaadeldakse ühe tavalise tööpäeva tarbimist. Modelleerimisprogrammis on selleks eraldi vahend Quasi-Dynamic Simulation. Tarbimis koormuseid on võimalik sisestada ajalise intervallina tabeli kujul, laadida andmed andmefailist või andmebaasist. Selle mudeli koostamiseks kasutatakse eelnevalt mõõdetud Uue ja Vana kilbiruumi koormusvõimsuseid. PQ Log tarkvarast on võimalik andmed salvestada andmefailina ja pärast tabelarvutusprogrammis Excel andmete puhastamist mittevajalikest andmeväljadest, saab andmed laadida DigSILENTI tarkvarasse. Andmed lisatakse mudeli koormustele ja programmi saab kasutada uuritavate olukordade loomiseks. Joonisel 35 on näha 07. Juuli 2022 võimsusvoogusid nii uues, kui ka vanas kilbiruumis.

Vanas kilbiruumis (joonisel 35 alumine) paiknev reaktiivvõimsuse kompensaator suudab kogu vana hoone reaktiivvõimsuse kompenseerida. Uues kilbiruumis (joonisel 35 üleval) kondensaatorseade puudub ja reaktiiv võimsust ei kompenseerita.



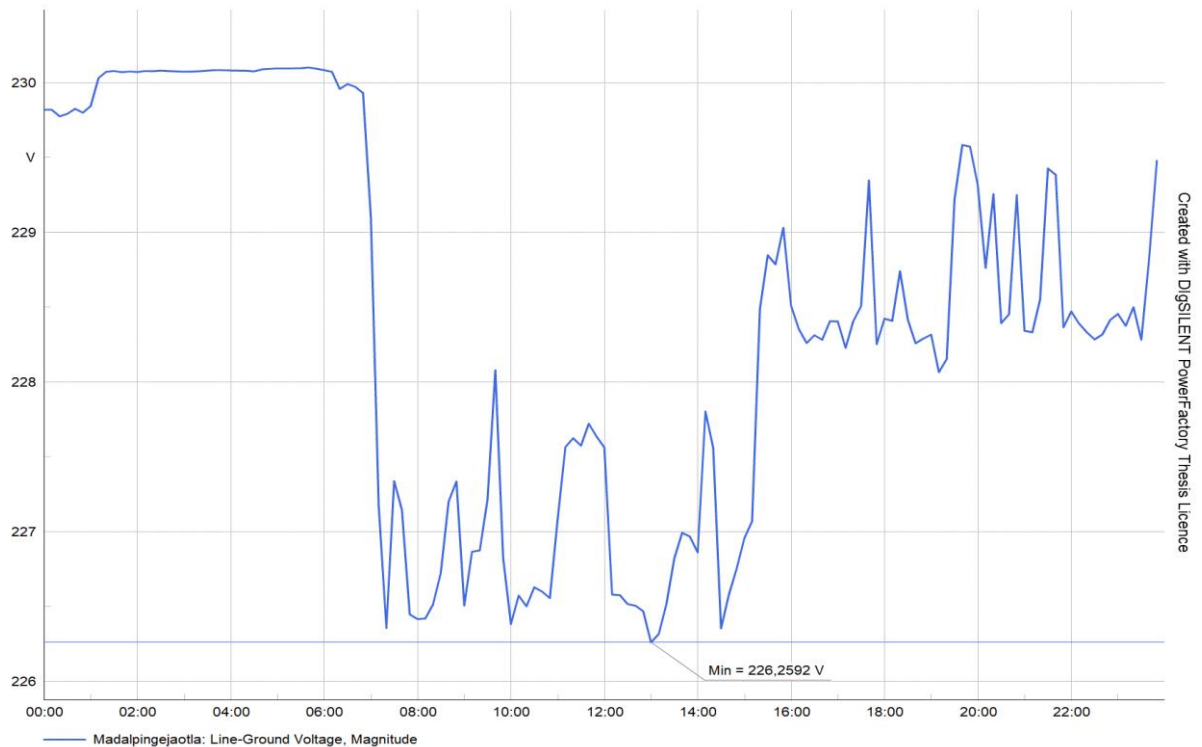
Joonis 35. Ühe tööpäeva uuritavad võimsused

Jooniselt 36 ja 37 on näha kuidas mõjutab toitepinget reaktiivvõimsuse kompenseerimine. Mudelis on võimalik katseliselt paigaldada uue hoone kilbiruumi kondensaatorseade ja uurida selle mõju toitepingel. Joonisel 36 on alajaama pinge mõõdetud ilma mudelisse lisatud reaktiivvõimsuse kondensaatorseadmeta.



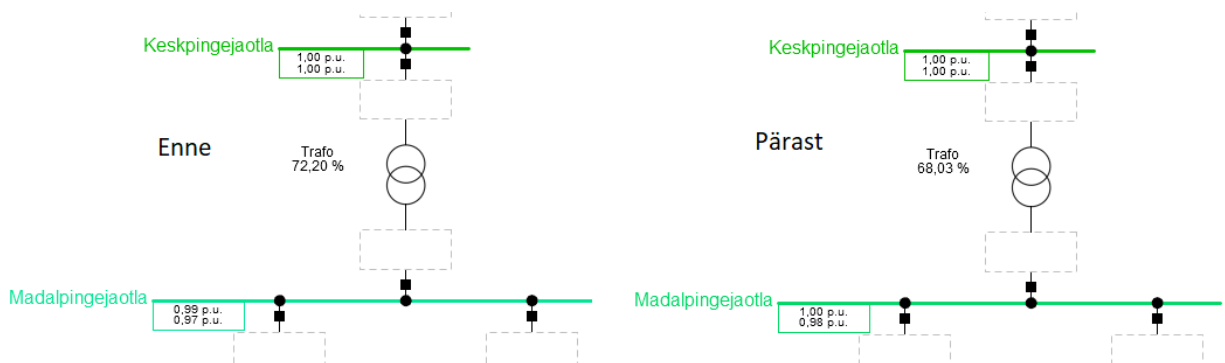
Joonis 36. Pinge alajaama madalpinge klemmidel enne lisa kondensaatorpatareid.

Kui suurendada kondensaatorseadmega reaktiivvõimsuse kompenseerimist kuni 320 kvar võrra, siis pinge miinimum väärtus tõusis 2 V võrra. Joonisel 37 on näha madalpinge klemmidel pinget pärast lisa kondensaatorseadme paigaldust.



Joonis 37. Pinge alajaama madalpinge klemmidel pärast lisa kondensaatorpatareid

Reaktiivvõimsuse kompenseerimine ettevõtte siseselt vähendab alajaama trafo koormust 4,2 %. Trafo koormuste võrdlus on toodud joonisel 38.



Joonis 38. Alajaama trafo koormus enne ja pärast reaktiivvõimsuse kompenseerimist.

Joonistelt 36 ja 37 on näha, et investering kondensaatorpatareisse ei too märkimisväärset võitu pinge kvaliteeti. Samas võimaldab ettevõttes kompenseeritud reaktiivenergia hoida kokku iga kuistelt elektriarvetelt reaktiivenergia maksu pealt ja vähendab alajaama trafo kadusid.

4 JÄRELDUSED JA SOOVITUSED ELEKTRITARBIMISE NING ELEKTRIKULUDE VÄHENDAMISEKS

Käesolevas magistritöös on läbi viidud ettevõtte Lasita Maja OÜ 0,4 kV elektripaigaldise ja ettevõtte elektritarbimise analüüs. Selleks esmalt teostati mitmed mõõtmised erinevates elektrivõrgu osades, teise osana analüüsiti ettevõtte elektriliitumise lepinguid võrguettevõttega ja kolmanda osana loodi ettevõtte elektrivõrgu mudel.

Ettevõtte hooned ja elektripaigaldis on rajatud kahes etapis, vanem osa on pisut üle kümne aasta vana ja uus osa on veidi üle viie aasta vana. Kogu hoone elektrivõrk on rajatud vastavalt läbimõeldud elektriprojektile ja selle tõttu halbu üllatusi uurimise käigus ei tekkinud. Töö ajalist mahtu arvestades uuriti küll ainult nelja sõlme ettevõtte elektrisüsteemis:

- alajaama 0,4 kV liitumisklemmid;
- uue tootmishoone 0,4 kV kilbiruumi peaklemmid;
- vana tootmishoone 0,4 kV kilbiruumi peaklemmid;
- ühe kõige suurema võimsusega tootmiseseadme - hõövel H3500 toiteklemmid.

Kogu tehases on üle saja erineva tootmiseseadme ja -liini, mis kõik tarbivad elektrit ja kõiki seadmeid uurimistöö ajalist mahtu arvestades pole käsitletud.

Kokkuvõtvalt on allpool välja toodud mõned punktid, mis aitavad optimeerida ettevõtte elektritarbimist ja hoida sellega seoses kokku elektrienergia kulusid

- **Tootmiseseadmete tühijooksude vähendamine.** Seadmete operaatorid, meistrid ja protsessi planeerijad saavad vaadata üle töö korraldusliku osa, et tõsta seadmete töö protsessi tõhusust ja vähendada seadmete tühijooksule kuluvat aega. Ühe vaadeldud tootmiseseadme hõövel H3500 alusel selgus, et kui vähendada tühijooksude summasest aega kuus on võimalik elektrienergiat säästa kuni 40 %.
- **Seadmete koosteosade käivitamine viitega,** sellega seoses on võimalik vähendada käivitusvoolude tipuväärtusi. Siinjuures on operaatorite juhendamine ja neile sobiva tööalgoritmi andmine otsustava tähtsusega. Suuremate seadmete erinevad mootorid on võimalik käivitada selliselt, et enne järgmist mootorit ei käivitata, kui eelmine mootor on saavutanud enda täiskiiruse.
- **Pikemate pauside ajal mittevajalikud ja/või mittevajalikus olukorras töötavad seadmed seisata.** Näiteks seadmete operaatorid ei pööra tähelepanu sellele, kui tööpauside ajaks jääb aspiratsioonisüsteem tööle. Aspiratsiooni seiskamist ja käivitamist peab kontrollima vastutava ala meister. Ilmselt on seda võimalik ka automatiseerida.

- **Pinge harmooniliste moonutuste vähendamiseks seisata suurte tarbijate sagedusmuunduritega mootorid ükshaaval.** Seadmetel, mille mootoritel on kasutatud elektroonilist pidurdamist läbi sagedusmuundurite, on soovitatav kasutada mootorite seiskamine viitega selliselt, et kui üks mootor on peatunud, siis seisatakse järgmine jne. Sellega saab vähendada harmoonilisi moonutusi ettevõtte elektrivõrgus, mis tekivad mootorite pidurduse ajal.
- **Tehase tipuvõimsuse ehk kasutusvõimsuse hajutamine.** Töökorralduslikult on tehas jaotatud kaheks osaks ja lõunapausi ajad omavahel ei kattu. Samasugust hajutamist on mõistlik kasutada ka hommikuse ja pealelõunase puhkepausiga. See võimaldab vähendada ka pärast puhkepausi tekkivaid seadmete üheaegseid käivitusi ja käivitusvoolusid.
- **Reaktiivvõimsuse kompenseerimise täiendamine ja suurendamine.** Tehases on vana tootmishoone kilbiruumi paigaldatud reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks automaatne kondensaatorseade, mille võimsus on piisav, et kompenseerida vana hoone seadmete tekitatud reaktiivvõimsus. Uue tootmishoone kilbiruumi on samuti soovitatav paigaldada reaktiivvõimsust kompenseeriv seade. Kui kogu tarbitav reaktiivvõimsus ettevõttes ära kompenseerida, siis on võimalik aastas kokku hoida umbes 3500 €.
- **Ettevõttel on kasulikum vahetada elektrilepingus liitumispakett põhipaketi vastu,** kuna ettevõtte tootmise eripära arvestades on öine elektritarbimine võrreldes päevase tarbimisega suhtes 20/80 %. Selle tõttu ei tule öö ja päeva elektritariife kasutades olukord ettevõttele kokkuvõttes soodsam, kui põhitariifi hinda kasutades. Kui vaadelda elektripakettide muutust kahe vaadeldud kuu näitel, siis tuleb ettevõttel keskmise kasutusvõimsuse juures umbes 750 € soodsam, kui kasutada põhitariifi.
- **Kasutusvõimsuse suurendamine elektriliitumise lepingus.** Hetkel on ettevõtte kasutusvõimsus liitumislepingus 870 kW. Ettevõtte tipuvõimsused ja seetõttu ka läbilaskevõimsus on tunduvalt suurem, kuni ca 1000 kW. Lubatud kasutusvõimsuse suurendamine aitab vähendada läbilaskevõimsuse kallima hinnaga maksustatud osa, mis jääb üle kasutusvõimsusele määratud piirmäära. Kui tõsta kasutusvõimsuse tasu 1000 kW on võimalik kokkuvõttes säästu saavutada ühes kuus kuni 600 €.

Eelnevalt loetletud punktide näol on välja toodud mõned võimalused, mis aitavad ettevõttel elektrienergia tarbimist ja rahalisi kulusid optimeerida. Lisaks paraneb ka pinge kvaliteet ettevõtte 0,4 kV elektrivõrgus.

LÕPUTÖÖ KOKKUVÕTE

Ettevõtte Lasita Maja OÜ puhul on Eesti mõistes tegemist keskmise või natuke üle keskmise suurusega ettevõtte. Ettevõtte struktuur on hästi mehitatud ja igas valdkonnas töötavad oma ala asjatundjad. Tegemist on ettevõttega, kus toodangu hind sõltub suuresti tarbitud toorme ja elektrienergia hinnast ning tööjõu kulust. Ettevõttes pole mitte midagi jäetud juhuse hooleks ja kogu tööprotsess on põhjalikult läbi mõeldud ning struktuuris toimub pidev edasi arenemine ja seadmete kaasajastamine. PRIA ja Euroopaliidu kaasrahastuse abil soetati aastal 2019 uus ja täisautomaatne värviliin. Teiste seadmete moderniseerimine käib pidevalt edasi. Ettevõtte kogu toimimisele võib anda hindeks hea, kuid alati saab veel paremini.

Antud magistritöös vaadeldi ettevõtte toitepinge kvaliteeti vastavalt standardites ette nähtud nõuetele. Ühe osana uuriti võimalusi elektrienergia tarbimise optimeerimist ja sellega võimalikke elektri kulude kokkuhoidu. Enamus tootmis seadmeid kasutavad tööks elektrimootoreid ja sellega kaasnevalt tekkib suur reaktiivenergia osakaal, mille vähendamiseks on ettevõttes paigaldatud reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks kondensaatorseade. Töös uuriti, kui efektiivselt kondensaatorseade töötab ja kas on piisava võimsusega.

Järgmise osana analüüsiti ettevõtte viimase kümne kuu elektriarveid ja arvetel sisalduvaid kulukomponente.

Viimases osas loodi programmi DigSILENT Power Factory abil ettevõtte elektri tarbimisest mudel. Loodud mudeli abil analüüsiti reaktiivvõimsuse kompenseerimise mõju toitepingele. Uuriti, kui palju mõjutab pinget, kui kogu reaktiivvõimsus kompenseeritakse ettevõtte siseselt.

Lõputöö teema sai valitud, kuna autor asus tööle vaadeldud ettevõttes ja sellega kaasnevalt tekkis soov anda panus ettevõtte elektritarbimise optimeerimiseks. Tööd alustades ei olnud autoril reaalselt ettekujutust ettevõtte elektrienergia tarbimisest ja sellega seoses puudus igasugune ettekujutus, millised on need tulemused, mis antud töö lõpuks ilmnevad.

Ettevõtte elektritarbimisele võib anda hindeks hea ja positiivne on see, et töö tegemise ajal on ettevõtte juba mõningaid soovitusi kuulda võtnud ja tegutseb probleemsetele kohtadele lahenduste otsimisega.

Kokkuvõttes ettevõtte elektripaigaldis on igati korrektselt ehitatud ja toimib vastavalt kõigile nõuetele. Töö korraldusliku osa ja tööprotsessi parema juhtimisega võib saavutada ühe vaadeldud tootmiseseadme - hõövel H3500 juures ligi 40 % elektrienergia kokkuhoidu. Vastava ala meistrid ja tootmisprotsessi koordinaatorid otsivad selleks paremaid lahendusi.

Teiste tootmis seadmete juures sellist analüüsi eraldi ei tehtud, aga sama protsessi juhtimise põhimõtte laieneb ka teistele seadmetele.

Lõputöö osas annab autor endale hinnangu hea, kuna sai tundma õpitud praktilise kogemusena seadet elektrivõrgu analüsaatorit *Fluke 1745 Power Quality Logger Memobox*, tarkvara *PQ Log* ja *DigSILENT Power Factory*. Kindlasti on ettevõtte elektrivõrgus ja tarbimises veel kohti, mida saab muuta paremaks ja mis ei mahtunud selle magistritöö sisse. Autor töötab ettevõttes edasi ja see tõttu saab ka nendele probleemidele tulevikus tähelepanu pöörata.

SUMMARY

The company Lasita Maja OÜ, is an average or slightly above average company in the Estonian sense. The company's structure is well-rounded and there are field experts in each field. Because it is a company where the price of production largely depends on the cost of consumed raw materials and energy. In the company, nothing is left to chance, the entire work process is especially thought out, and the structure is constantly developing and modernizing. With the co-financing of PRIA and the European Union, a new and fully automatic paint line was acquired in 2019. Modernization of other devices is constantly progressing. The company's overall performance can be assessed as good, but there is always room for improvement.

In this master's thesis, the quality of the company's supply voltage was investigated in accordance with the requirements prescribed by the standards. As one part, the optimization of significant electricity consumption and possible savings in electricity costs were investigated. Most of the production equipment runs on electric motors. As a result, a large part of reactive energy is generated, to reduce which the company has installed capacitor batteries to compensate for reactive power. The work effectively investigated capacitor batteries and their sufficient capacity.

In the third part, we analyzed the company's electricity bills for the last ten months and the cost components included in the bills.

In the fourth and last part, a model of the company's electricity consumption was created using the DigSILENT Power Factory program. Using the created model, the effect of reactive power compensation on the supply voltage was analyzed. Find out what is the voltage when all reactive power is internally compensated.

The topic of the thesis was chosen because the author started working in the company under review, and with that came the desire to make a small contribution to the improvement of the company. When starting the work, the author had no real idea of the company's electricity consumption, and in this regard, he had no idea what results would be found at the end of this work.

The company's electricity consumption can be rated as good, and it is positive that the company has listened to some of the company's recommendations during the work and is working on finding solutions to problem areas.

In summary, it can be said that the company's electrical installation is built correctly in every way and works according to everyone's needs. The part of work organization and control of the work process or any separately considered device together with the planer H3500 save

nearly 40 % of electricity. Masters and production process coordinators are looking for better solutions. No separate analysis was performed for other production equipment, but the same process principles apply to other equipment.

Regarding the thesis, the author gives himself a good assessment, because as a practical experience he got to know the power network analyzer Fluke 1745 Power Quality Logger Memobox, PQ Log software, and DigSILENT Power Factory. There are certainly still places in the company's electricity network and consumption that can be improved and that did not fit into this master's thesis. The author continues to work in the company, and thanks to this, attention can also be paid to these problems.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] „Ettevõtte tutvustus,” Lasita Maja OÜ, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.lasita.com/ettevote>. [Kasutatud 24 07 2022].
- [2] „Lasita Maja OÜ,” 22 10 2022. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.lasita.com/ettevote>.
- [3] Euroopa standard, „Avalike elektrivõrkude pingetunnussuurused,” 15 10 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-50160-2010%2Ba1%2Ba2%2Ba3-2019>. [Kasutatud 24 09 2022].
- [4] Meldorf M., Tammoja H., Treufeldt Ü., Kilter J., Jaotusvõrgud, Tallinn: TTÜ kirjastus, 2007.
- [5] T. Vinnal, Eesti ettevõtete elektritarbimise uurimine ja soovitude välja töötamine tarbimise optimeerimiseks, Tallinn: TUT press, 2011.
- [6] R. Teemets ja T. Vinnal, Elektrienergia säästlik kasutamine hoonetes, Tallinn: TTÜ kirjastus, 2013.
- [7] P. Raesaar ja E. Tiigimägi, Elektrivõrkude projekteerimine, 2011.
- [8] M. P. Urve Palo, „Riigi teataja,” 16 06 2014. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/113062014012>. [Kasutatud 24 09 2022].
- [9] J. T. Raivo Teemets, Ventilaatorid, Tallinn, 1995.
- [10] A. Rosin, I. Drovtar, S. Link, H. Hõimoja, H. Möldre ja T. Möller, Tarbimise juhtimine. Suurtarbijate koormusgraafikute ning analüüs tarbimise juhtimise rakendamise võimaluste tuvastamiseks., Tallinn: TTÜ, 2014.
- [11] Schneider, „Capacitor Bank 400/415V - 315kvar,” Schneider Electric, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.se.com/ww/en/product/65524/capacitor-bank-varset-comfort-400-415v-315kvar-step-7x45-cubicle-a3/>. [Kasutatud 01 11 2022].

- [12] M. Gerin, „MERLIN GERIN Varlogic NR6 Kasutusjuhend,“ Merlin Gerin, [Võrgumaterjal]. Available: <https://manualzz.com/doc/7167863/merlin-gerin-varlogic-nr6-user-manual>. [Kasutatud 01 11 2022].
- [13] Elektrilevi, „Elektrilevi võrguteenuse hinnakiri,“ Elektrilevi AS, 01 03 2022. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.elektrilevi.ee/-/doc/8644141/kliendile/Elektrilevi_hinnakiri_vorguteenuse_hinnad_alates_1_marts_2022_EST.pdf. [Kasutatud 12 07 2022].
- [14] E. AS, „Elektrilevi võrgulepingud,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.elektrilevi.ee/et/vorguleping?modal=business-packages&network-contract=contract_signing&tabgroup_3=medium-voltage&vorgupaketid=large-business. [Kasutatud 26 11 2022].

Lisa 1.

Pinge harmoonilised moonutused mõõtepunktis MP1 ühe nädala kestel.

Phase L1						
Quantity	Nominal value	5 % value	95 % value	Max-value	Unit	Date and time
U h1	100.00	95.21	100.06	100.82	% [Un]	23.09.2022 06:23
U h2	10.0	0.0	0.0	0.4	% [Un]	18.09.2022 17:32
U h3	10.0	0.2	0.6	0.9	% [Un]	20.09.2022 11:31
U h4	10.0	0.0	0.0	0.5	% [Un]	18.09.2022 17:32
U h5	10.0	0.2	2.8	3.7	% [Un]	22.09.2022 14:25
U h6	10.0	0.0	0.0	0.5	% [Un]	22.09.2022 22:55
U h7	10.0	0.6	2.3	2.6	% [Un]	22.09.2022 03:13
U h8	10.0	0.0	0.0	0.2	% [Un]	16.09.2022 11:30
U h9	10.0	0.1	0.5	0.6	% [Un]	20.09.2022 07:59
U h10	10.0	0.0	0.0	0.2	% [Un]	19.09.2022 08:20
U h11	10.0	0.1	0.8	1.2	% [Un]	21.09.2022 07:06
U h12	10.0	0.0	0.0	0.2	% [Un]	19.09.2022 09:30
U h13	10.0	0.0	0.2	0.7	% [Un]	21.09.2022 15:25
U h14	10.0	0.0	0.0	0.1	% [Un]	16.09.2022 11:30
U h15	10.0	0.0	0.4	0.6	% [Un]	20.09.2022 08:06
U h16	10.0	0.0	0.0	0.1	% [Un]	16.09.2022 09:24
U h17	10.0	0.0	0.2	0.3	% [Un]	16.09.2022 06:59
U h18	10.0	0.0	0.0	0.1	% [Un]	16.09.2022 16:28
U h19	10.0	0.0	0.1	0.2	% [Un]	20.09.2022 14:08
U h20	10.0	0.0	0.0	0.1	% [Un]	16.09.2022 16:29

Phase L2						
Quantity	Nominal value	5 % value	95 % value	Max-value	Unit	Date and time
U h1	100.00	95.40	100.39	101.20	% [Un]	23.09.2022 06:23
U h2	10.0	0.0	0.0	0.4	% [Un]	18.09.2022 17:32
U h3	10.0	0.3	0.7	0.8	% [Un]	16.09.2022 11:30
U h4	10.0	0.0	0.0	1.0	% [Un]	16.09.2022 11:30
U h5	10.0	0.2	2.8	3.8	% [Un]	22.09.2022 14:25
U h6	10.0	0.0	0.0	1.1	% [Un]	16.09.2022 11:30
U h7	10.0	0.6	2.3	2.7	% [Un]	22.09.2022 03:13
U h8	10.0	0.0	0.0	0.6	% [Un]	16.09.2022 11:30
U h9	10.0	0.1	0.6	0.8	% [Un]	20.09.2022 15:11
U h10	10.0	0.0	0.0	0.4	% [Un]	16.09.2022 11:30
U h11	10.0	0.1	1.0	1.5	% [Un]	21.09.2022 07:05
U h12	10.0	0.0	0.0	0.4	% [Un]	20.09.2022 15:11
U h13	10.0	0.1	0.3	0.7	% [Un]	21.09.2022 15:25
U h14	10.0	0.0	0.0	0.2	% [Un]	20.09.2022 15:11

U h15	10.0	0.0	0.3	0.4	% [Un]	19.09.2022 15:05
U h16	10.0	0.0	0.0	0.1	% [Un]	20.09.2022 15:11
U h17	10.0	0.0	0.2	0.4	% [Un]	20.09.2022 06:59
U h18	10.0	0.0	0.0	0.1	% [Un]	20.09.2022 15:11
U h19	10.0	0.0	0.2	0.3	% [Un]	20.09.2022 07:00
U h20	10.0	0.0	0.0	0.1	% [Un]	16.09.2022 14:00

Phase L3						
Quantity	Nominal value	5 % value	95 % value	Max-value	Unit	Date and time
U h1	100.00	95.57	100.96	101.76	% [Un]	23.09.2022 06:23
U h2	10.0	0.0	0.0	0.4	% [Un]	19.09.2022 09:30
U h3	10.0	0.3	0.6	0.8	% [Un]	21.09.2022 13:28
U h4	10.0	0.0	0.0	0.5	% [Un]	18.09.2022 17:32
U h5	10.0	0.2	2.7	3.7	% [Un]	22.09.2022 14:25
U h6	10.0	0.0	0.0	0.7	% [Un]	18.09.2022 17:32
U h7	10.0	0.7	2.7	3.1	% [Un]	22.09.2022 03:11
U h8	10.0	0.0	0.0	0.4	% [Un]	19.09.2022 10:11
U h9	10.0	0.0	0.5	0.6	% [Un]	22.09.2022 11:30
U h10	10.0	0.0	0.0	0.2	% [Un]	16.09.2022 11:30
U h11	10.0	0.2	0.9	1.7	% [Un]	21.09.2022 07:06
U h12	10.0	0.0	0.0	0.3	% [Un]	16.09.2022 11:30
U h13	10.0	0.0	0.3	0.7	% [Un]	21.09.2022 15:25
U h14	10.0	0.0	0.0	0.1	% [Un]	16.09.2022 11:30
U h15	10.0	0.0	0.4	0.6	% [Un]	20.09.2022 08:06
U h16	10.0	0.0	0.0	0.1	% [Un]	21.09.2022 12:28
U h17	10.0	0.0	0.2	0.3	% [Un]	20.09.2022 06:59
U h18	10.0	0.0	0.0	0.1	% [Un]	16.09.2022 16:28
U h19	10.0	0.0	0.1	0.2	% [Un]	16.09.2022 06:59
U h20	10.0	0.0	0.0	0.1	% [Un]	16.09.2022 16:28