



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**REKONSTRUEERITUD
TÄNAVAVALGUSTUSPAIGALDISE MÕJU
ELEKTRILEVI 0,4 KV JAOTUSVÕRGULE TARTU
ANNELINNA PIIRKONDADE NÄITEL**

**EVALUATION OF THE IMPACT OF THE RECONSTRUCTED
STREET LIGHTING INSTALLATION ON THE ELEKTRILEVI
0,4KV DISTRIBUTION NETWORK ON THE EXAMPLE OF
TARTU, ANNELINNA DISTRICT**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Mattias Herzmann

Üliõpilaskood: 176657AAVM

Juhendaja: PhD Toomas Vinnal

Tallinn, 2022

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

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

"....." 202....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

"....." 202....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

".....".....202....

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Mattias Herzmann

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose
Rekonstreeritud tänavavalgustuspaigaldise mõju Elektrilevi 0,4 kV jaotusvõrgule
Tartu Annelinna piirkondade näitel,

mille juhendaja on Toomas Vinnal,

- 1.1. reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
 3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste inimeste intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

_____ (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 loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Mattias Herzmann *Lõputöö liik:* Magistritöö
Töö pealkiri: Rekonstrueeritud tänavavalgustuspaigaldise mõju Elektrilevi 0,4kV jaotusvõrgule Tartu Annelinna piirkondade näitel
Kuupäev: 18.05.2022 *82 lk (lõputöö lehekülgede arv koos lisadega)*

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool
Teaduskond: Inseneriteaduskond
Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): dotsent Toomas Vinnal
Töö konsultant (konsultandid):

Sisu kirjeldus:

Töö eesmärgiks on uurida Tartu linnas Annelinna piirkonnas rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgu mõju Elektrilevi 0,4 kV võrgule ning kontrollida kas energiatõhususe parameetrid vastavad planeeritule. Mõju hindamise võrdlusesse toodi ka rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgud, mis oleksid valgustite arvu poolest sarnased uuritavatele piirkondadele. Andmete saamiseks teostati mõõtmised tänavavalgustuse juhtimiskilpides ajavahemikus 2021.11-2022.01. Mõõtmisteks kasutati Tallinna Tehnikaülikooli mõõteseadet FLUKE 1745 POWER QUALITY LOGGER.

Mõõtmistest saadud andmete põhjal analüüsiti lähemalt faasipingeid, pingete asümmeetriat, pinge- ja vooluharmonikuid olukorras kus tänavavalgustus töötas nii 100% võimsusega kui ka hämardamisrežiimil. Mõõtetulemuste põhjal on võimalik arvutada ka rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgu energiatõhususnäitad.

Lõputöö tulemuseks on välja selgitada kas rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrk suurendab voolu-ja pingeharmonikute osakaalu võrgus, milline on vooluharmonikute spekter leedvalgustitega võrgus ning kuidas mõjub tänavavalgustustaristu pinge parameetritele ja kvaliteedile. Samuti tuuakse rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgu kõrvale võrdlusesse sarnase kõrgrõhu-naatrium lampide arvuga vanem tänavavalgustustaristu.

Märksõnad: leedvalgustid, kõrgrõhu-naatrium valgustid, elektrivõrk, energiatõhusus, elektrikvaliteet, tänavavalgustus

ABSTRACT

Author: Mattias Herzmann

Type of the work: Master Thesis

Title: Evaluation of the impact of the reconstructed street lighting installation on the Elektrilevi 0,4kV distribution network on the example of Tartu, Annelinna district

Date: 18.05.2022

82 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: Associate Professor Toomas Vinnal

Consultant(s):

Abstract:

The aim of the work is to study the impact of the reconstructed street lighting network in the Annelinna area of Tartu on Elektrilevi's 0.4 kV network and to check whether the energy efficiency parameters correspond to the planned ones. Non-reconstructed street lighting networks were also compared to the impact assessment. To obtain the data, measurements were performed on the street lighting control panels in the period from 2021.11-2022.01. The FLUKE 1745 POWER QUALITY LOGGER measuring device of Tallinn University of Technology was used for the measurements.

Based on the data obtained from the measurements, the phase voltages, voltage asymmetry, voltage and current harmonics in the situation where the street lighting was operating at both 100% and dimming mode were analyzed in more detail. Based on the measurement results, it is also possible to calculate the energy efficiency indicators of the reconstructed street lighting network. The result of the dissertation is to find out whether the reconstructed street lighting network increases the share of current and voltage harmonics in the network, what is the spectrum of current harmonics in the network with LED luminaires and how it affects the voltage parameters and quality of street lighting infrastructure. Older street lighting infrastructure with a similar number of high-pressure sodium lamps is also compared to the reconstructed street lighting network.

Keywords: LED luminaire, high-pressure sodium luminaire, power grid, energy efficiency, energy quality, street lighting

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema: **Rekonstrueeritud tänavavalgustuspaigaldise mõju Elektrilevi 0,4kV jaotusvõrgule Tartu Annelinna piirkondade näitel**

Lõputöö teema inglise keeles: **Evaluation of the impact of the reconstructed street lighting installation on the Elektrilevi 0,4kV distribution network on the example of Tartu, Annelinna district**

Üliõpilane: **Mattias Herzmann, 176657AAVM**

Eriala: **Elektroenergeetika**

Lõputöö liik: **Magistritöö**

Lõputöö juhendaja: **PhD Toomas Vinnal**

Lõputöö ülesande kehtivusaeg: **30.06.2022**

Lõputöö esitamise tähtaeg: **18.05.2022**

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

1. Teema põhjendus

Uutes ja rekonstrueeritavates tänavavalgustusvõrkudes paigaldatakse peamiselt leedvalgusteid, kuna need on muutunud kättesaadavamaks ja soodsamaks. Leedvalgustite kasutamine vähendab energiakulu, kuid võivad samal ajal mõjuda negatiivselt elektrivõrgu talitlusele. Antud töös on võetud Tartu linnas, Annelinna piirkonnas uurimise alla rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrk, kuhu on paigaldatud uued leedvalgustid.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on analüüsida Tartus, Annelinna piirkonnas rekonstrueeritud tänavavalgustuspaigaldiste mõju Elektrilevi 0,4kV elektrivõrgule.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

1. Kas Annelinnas rekonstrueeritud tänavavalgustuspaigaldiste tõhusus vastab planeeritule ja projekteeritule ning millised on tõhususe parameetrid võrreldes varasema valguspaigaldisega?
2. Kas rekonstrueeritud tänavavalgustuspaigaldised suurendavad voolu- ja pingeharmonikute osakaalu madalpingevõrgus? Milline on vooluharmonikute spekter sellistes võrkudes?
3. Kui suur on pinge keskvärtus ja pingekoikumised uuritavates madalpingevõrkudes?
4. Kas tänavavalgustusvõrkude rekonstrueerimine mõjutab pinge kvaliteeti madalpinge võrkudes?
5. Tänavavalgustuspaigaldise ja antud madalpinge võrguosa mudeli koostamine ning modelleerimistulemuste võrdlemine mõõtmistulemustega programmis PSCAD.

4. Lähteandmed

Mõõtmiste lähteandmed on võimalik saada võrguanalüsaatoriga tänavavalgustuse juhtimiskilpidest. Tänavavalgustuse võrgu ja seadmete lähteandmed on kättesaadavad Tartu linnavalitsuse andmebaasidest ning kohapeal vaatluse teel. Teoreetilise osa lähteandmed leitakse raamatutest, teadusartiklitest ja standarditest

5. Uurimismeetodid

Metoodika põhineb Tartu tänavavalgustuse võrgus tehtud mõõtmistel olukorras, kus tänavavalgustus süttib, põleb täisvõimsusel ning kui tänavavalgustus on hämardatud

vastavalt hämardamistabelile 50% peale oma nimivõimsusest. Tänavavalgustuse võrgus mõõdetakse pinget (keskmist pinget ja pingehälbeid), voolu- ja pingeharmonikuid ning võimsusi. Mõõtetulemuste põhjal uuritakse ja analüüsitakse, kuidas mõjutab rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrk pinge kvaliteeti madalpinge jaotusvõrkudes. Madalpinge võrguosa ja tänavavalgustuspaigaldise kohta koostatakse töö käigus mudel programmis PSCAD ning võrreldakse mõõtmistulemusi modelleerimistulemustega.

6. Graafiline osa

Põhiliseks osaks saavad mõõtetulemuste graafikud rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgu mõju hindamiseks madalpinge jaotusvõrgule ning PSCAD programmis koostatud mudel. Lisaks tänavavalgustuse juhtimis- ja liitumiskilpide skeemid, valgustusvõrgu asendiplaanid, alajaamade skeemid ning struktuurskeemid.

7. Töö struktuur

Sisukord

Lõputöö ülesanne

Eessõna

Sissejuhatus

1. Teooria, mõõtmised ja hüpotees
2. Mõõtetulemused ja analüüs
 - 2.1. Mõõtemetoodika ja seadmed
 - 2.2. Mõõtmiste teostamine tänavavalgustusvõrgus
 - 2.4. Mõõtetulemused ja analüüs
 - 2.5. Mudeli koostamine ja võrdlus mõõtetulemustega
4. Kokkuvõtte ja järeldused

Kasutatud kirjandus

Lisad

8. Kasutatud kirjanduse allikad

[1] A. Lange, M. Pasko, "The effects of LED light sources on the parameters defining the quality of electricity," *Computer Applications in Electrical Engineering*, vol. 19, 2018.

[2] E. Risthein, "Valgustehnika sõnastik," Tallinn: Tallinna kirjastus Valgus, 1982.

[3] E. Tiigimägi, "Elektrivõrgud: Loengukonspekt" Tallinna Tehnikaülikool.

[4] M. Meldorf, H. Tammoja, Ü. Treufeldt, J. Kilter, "Jaotusvõrgud," Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2007.

[5] R. M. Abdalaal, C. N. M. Ho, C. K. Leung, et al., "A Remotely Control Dimming System for LED Lamps with Power Factor Correction", *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) 2018 IEEE*, pp. 4721-4727, 2018, doi: 10.1109/EPEC.2017.8286200.

[6] R. Martinek, P. Bilik, J. Baros et al., "Design of a Measuring System for Electricity Quality Monitoring within the SMART Street Lighting Test Polygon: Pilot Study on Adaptive Current Control Strategy for Three-Phase Shunt Active Power Filters," *Sensors*, vol. 20, issue 6, 19 Mar. 2020, doi: 10.3390/s20061718.

[7] T. Lehtla, T. Vinnal, "Elektrivarustuse tulevikuvisionid," Tallinn: TTÜ Kirjastus 2016.

[8] T. Tamm, "Valgustustehnika I," Tallinn: TTÜ kirjastus, 2009.

[9] Tartu linna dokumendid ja standardid.

9. Lõputöö konsultandid

Andrus Reinmann (Tartu Linnavalitsus)

Toomas Vinnal

Karin Matsalu

10. Töö etapid ja ajakava

Mõõtmispiirkondade valik, analüüs ja lubade küsimine (Novembri keskpaik 2021)

Mõõtmiste teostamine (Novembri lõpp ja detsembri algus 2021)

Teoreetilise osa kirjutamine (Detsember 2021)

Mõõtetulemuste koondamine ja analüüs (Jaanuar-veebruar 2022)

Kokkuvõtte koostamine ja vormistus (märts 2022)

Töö esimese versiooni saatmine juhendajale (20.04.2022)

Paranduste sisseviimine (27.04.2022)

Juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine (05.05.2022)

Töö lõpliku versiooni esitamine (18.05.2022)

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE.....	4
ABSTRACT.....	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	6
EESSÕNA	11
SISSEJUHATUS	12
1. TEOREETILINE ALUS	13
2. TARTU TÄNAVAVALGUSTUSVÕRK.....	20
3. ANNELINNA TÄNAVAVALGUSTUSE ENERGIATÕHUSUSNÄITAJATE ARVUTAMINE	23
4. MÕÕTETULEMUSED JA ANALÜÜS	27
4.1 Mõõtmised rekonstrueeritud ja rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgus	27
4.1.1 Mõõtmised juhtimiskilpide piirkondades 36 Sangla ja 25 Sõpruse.....	29
4.1.2 Mõõtmised juhtimiskilpide piirkondades 146 Estakaadi ja 84 Torni	45
4.1.3 Mõõtmised juhtimiskilpide piirkondades 61 Fiiderpunkt ja 137 Epitar.....	58
KOKKUVÕTE	71
SUMMARY	74
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU.....	77
LISAD	80

EESSÕNA

Käesoleva lõputöö teema on sõnastatud koostöös professor Toomas Vinnaliga. Magistritöö idee oli uurida rekonstrueeritud tänavavalgustuse võrgu mõju elektrivõrgule võrreldes rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrguga. Põhilised andmed koguti antud magistritöö koostaja poolt mõõtmiste käigus Tartu tänavavalgustusvõrgu juhtimiskilpidest. Siinkohal sooviksin tänada juhendajat hea koostöö ja toetuse eest. Samuti tänaksin Tartu linnavalitsuse töötajaid võimaluse eest teostada mõõtmisi Tartu linna tänavavalgustusvõrgus ning võimalust kasutada Tartu linnavalitsuse andmebaase ja dokumente.

Töö autor Mattias Herzmann töötab Enefit Connect OÜ-s Tartu tänavavalgustuse varahaldurina. Küsimuste korral on võimalik kontakteeruda magistritöö autoriga emaili aadressil mattias.herzmann@gmail.com.

SISSEJUHATUS

Kodanike turvalise elukeskkonna tagamiseks on iga linna üheks oluliseks osaks tänavavalgustus, eriti piirkondades kus talveperioodil loojub päike juba keskpäeval. Üha kallineva elektrihinna juures on oluline tänavavalgustustaristut uuendada, et tagada kvaliteetne valgustus ja energiasääst. Seetõttu on üha rohkem hakatud amortiseerunud ning kõrge energia- ja hoolduskuluga tänavavalgustusvõrke rekonstrueerima. Tüüpiliselt on vanemat tüüpi tänavavalgustusvõrgus kasutusel kõrgrõhu-naatriumlambid mis asendatakse energiasäästlike leedvalgustitega.

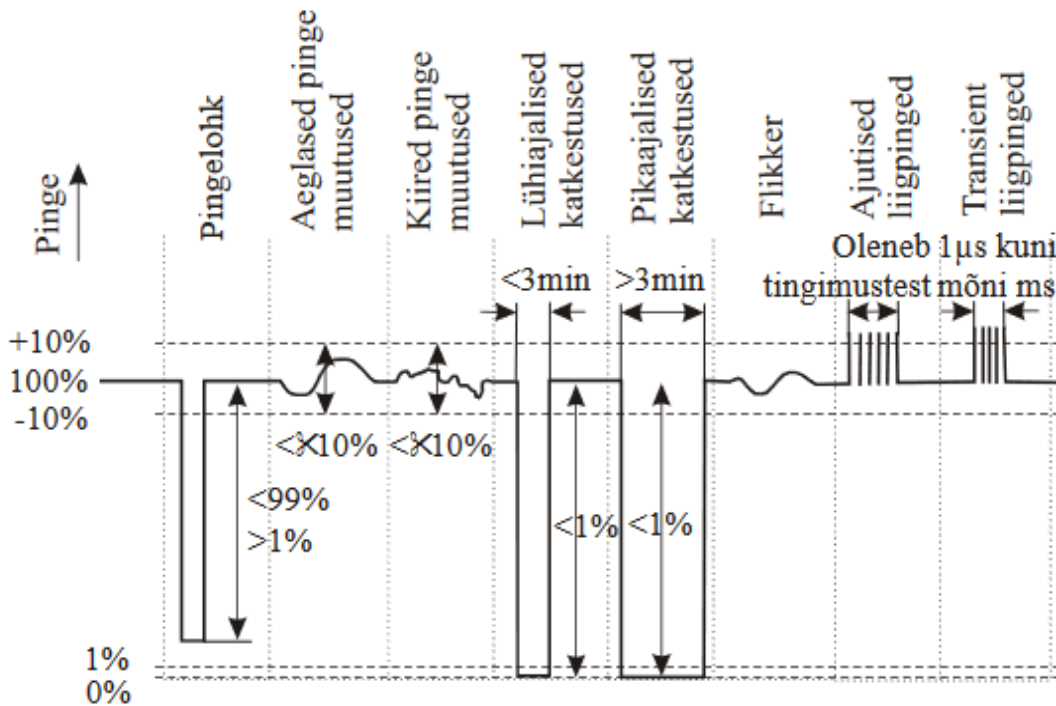
Käesoleva töö eesmärgiks on uurida kuidas mõjub rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrk Elektrilevi 0,4kV võrgule ning millised on selle energiatõhususnäitajad. Uurimine teostati praktiliselt mõõtmiste käigus 6 tänavavalgustuse juhtimiskilbipiirkonnas ajavahemikus 11.2021-01.2022. Kolm uuritavatest piirkondadest on KIK toetuse raames 2021 aastal rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrku. Igale leedvalgustitega piirkonnale valiti võrdluseks sama arvu kõrgrõhu-naatriumvalgustitega kilbipiirkonda, et oleks paari kaupa võrreldavad vana ja uus tänavavalgustusvõrk. Mõõdetud tulemustest analüüsiti faasipingeid, faasipingete miinimum/maksimumväärtuste vahe sõltuvust tänavavalgustusvõrgu võimsusest, pingete asümmeetria seost tänavavalgustuse süttimisega ja töötamisega, pinge- ja vooluharmonikuid, ning vooluharmonikute spektrit.

Töö on jaotatud neljaks osaks – teoreetiline osa, uuritavate objektide kirjeldus, energiatõhususe analüüs mõõdetud andmete põhjal ning kõige mahukam peatükk on mõõtmiste tulemused ja analüüs. Töö neljandas osas on kirjeldatud täpsemalt mõõtmisprotsessi ning välja toodud graafiliselt mõõtetulemused koos sisu kirjeldustega. Lisaks on töös kasutatud pildimaterjali, et lugejal oleks parem visualiseerida kuidas ja kus toimused mõõtmised. Töö lisadest leiab Tartu tänavavalgustuse juhtimiskilbi joonise ning tüüpskeemi kus on kasutatud Gridens kontrollereid.

1. TEOREETILINE ALUS

Ülemaailmne elektritarbimine on jõudmas märkimisväärse tasemeni ning kasvab umbes 3% aastas. Tänavavalgustuse osakaal aastasest elektritarbimisest kogu maakeral on hinnanguliselt 15-19%. Hinnanguliselt tarbivad linnad 75% maakera energiast ning ainuüksi tänavavalgustus võib moodustada 20-40% linna eelarvekuludest. Võrreldes vanemate tänavavalgustustehnoloogiatega, võivad leedvalgustid saavutada 50-70% energiasäästu. leedvalgustitele üleminek võib linna eelarvesse tuua märkimisväärse majandusliku säästu. [9] On mitmeid meetodeid, kuidas vähendada majanduslikke kadusid. Kõige radikaalsem meetod on vanema tehnoloogia valgustid välja vahetada kaasaegsete valgustite vastu. [10] Laialdane tänavavalgustuse rekonstrueerimine vähendab oluliselt tänavavalgustuse energiatarbimist ning seetõttu jääb tänavavalgustuse taristu potentsiaal kasutamata. Innovatiivsete avalike teenuste kasutamiseks on vaja püsitoidet, mille rajamine on kulukas. Selle probleemi aga suudaks lahendada üledimensioneeritud tänavavalgustustaristu, mis katab enamus linnade tänavatest ja kuuluvad enamasti linna omandusse. [14] Uue põlvkonna leedvalgusteid iseloomustab kõrge töötõhusus nii maksimaalse võimsusega töötamisel kui ka olukorras, kus valgustuse intensiivsus on reguleeritud madalamale tasemele. Esimese põlvkonna leedvalgustite võimsustegur oli madal, vahemikus 0,4 kuni 0,6. Madal võimsusteguri väärtus tekitab olukorra, kus sama väljundiga seade tarbib rohkem elektrit kui seade mille võimsustegur on lähemal väärtusele 1. Uuema generatsiooni leedvalgustid on varustatud võimsusteguri korrigeerimise (PFC) ahelaga, mis tõstab võimsustegurit lähemale väärtusele 1. [10]

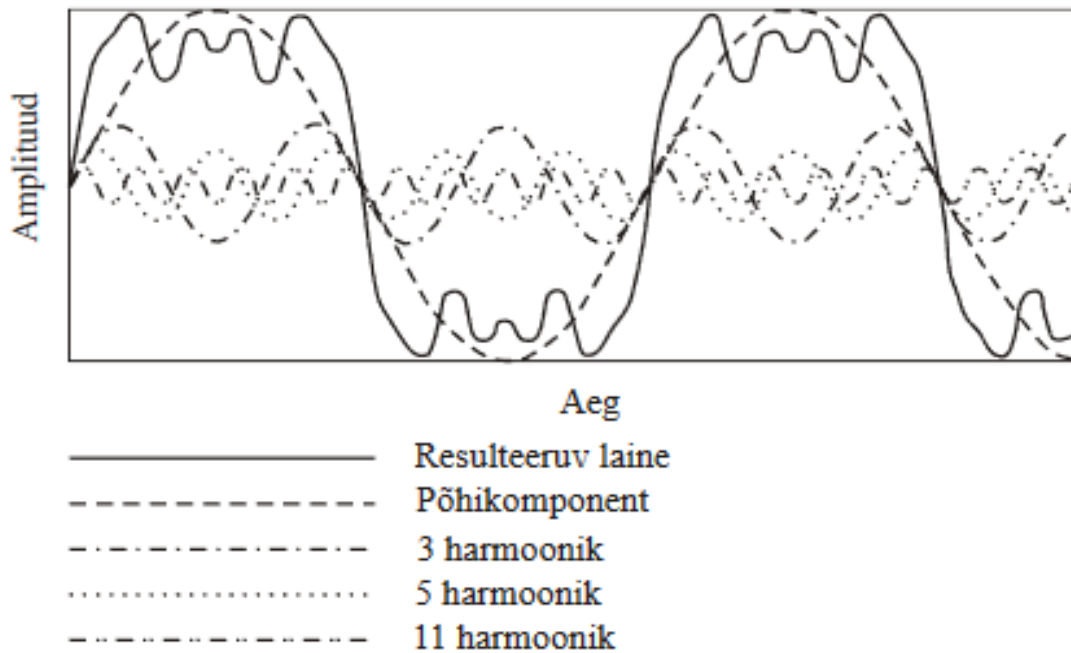
Elektrienergia kvaliteeti elektrivõrgus kahjustavad ühefaasilised ja mittelineaarseid komponente sisaldavad tarvitid, pingekaod võrgus jm. Elektri kvaliteet tähendab enamasti elektritarbijate elektrivarustuskindlust ning talitusparameetrite vastavust nimisuurustele. Elektri kvaliteedile seatud nõuded võivad vastavalt tarbijale erinevad olla. Kui elektrivõrk peab tagama tarbijale kvaliteetse elektri, siis samuti ei tohi tarbija ise risustada elektrivõrku enda seadmetega. Halba elektri kvaliteeti põhjustavad suuresti tarbijad ise. Tarbijate poolt tekitatud häiringute summutamine nõuab võrguettevõtjalt lisainvesteeringuid ning seoses sellega suurenevad ka käidukulud. [3] Elektrikvaliteet on muutumas üha tähtsamaks näitajaks elektrisüsteemi edasise arengu ja tuleviku seisukohalt. Üha rohkem lisatakse elektrivõrku uusi tarbijaid, mis sisaldavad jõuelektronikat ning on energiasäästuse optimeeritud. [1] Elektrivõrgu kvaliteeti mõjutab ka tänavavalgustus, mille madal elektrikvaliteet võib rikkuda võrgu seadmeid ja raisata elektrienergiat. [25] Tähtsamaid elektri kvaliteeti iseloomustavavaid näitajaid on välja toodud joonisel 1.1



Joonis 1.1 Kvaliteedinäitajate ülevaade elektrivõrgus [3]

Elektrikvaliteeti mõjutavad harmoonikud, mille moonutused võivad elektrisüsteemis tekitada tõrkeid, häiringuid ja lisakadusid. Elektrivõrgu pinge ja vool on eeldatavalt enamasti siinuselise lainekujuga, aga tihti esineb lainekujus ka moonutusi. Moonutusi siinuselises lainekujus põhjustavad mittelineaarsetest elektritarvititest tulenevad harmoonikud. Teadmine harmooniliste lisakadude suurustest ja nende vähendamisest on oluline nii tarbijale kui ka jaotusvõrgu haldajale. Tarbija elektrisüsteemis võivad harmooniliste moonutuste tagajärjel ette tulla erinevaid tõrkeid, häiringuid ning lisakaod. [1] Harmoonikud võivad näiteks isoleermaterjale kulutada kiiremini, tekitada lähedal asuvates sideliinides ja signaalsüsteemides elektromagnetilisi häiringuid, kaitseseadmetes tekitada valeoperatsioone ning tuua esile vibratsioone jõukondensaatorites. Harmoonikutest tulenevalt võivad tekkida ka võimalikud liigpinged ja -voolud ning soojakaod trafodes ja õhuliinides. [7]

Harmoonikuid sisaldavast lainekujust illustreeriv näidis on välja toodud joonisel 1.2. Joonisel on näide moonutatud lainekujust, kus on näha põhiharmoonikule lisaks kolme paaritu järjekorranumbriga kõrgemat harmoonikut $h = 3, 5$ ja 11 . [3]



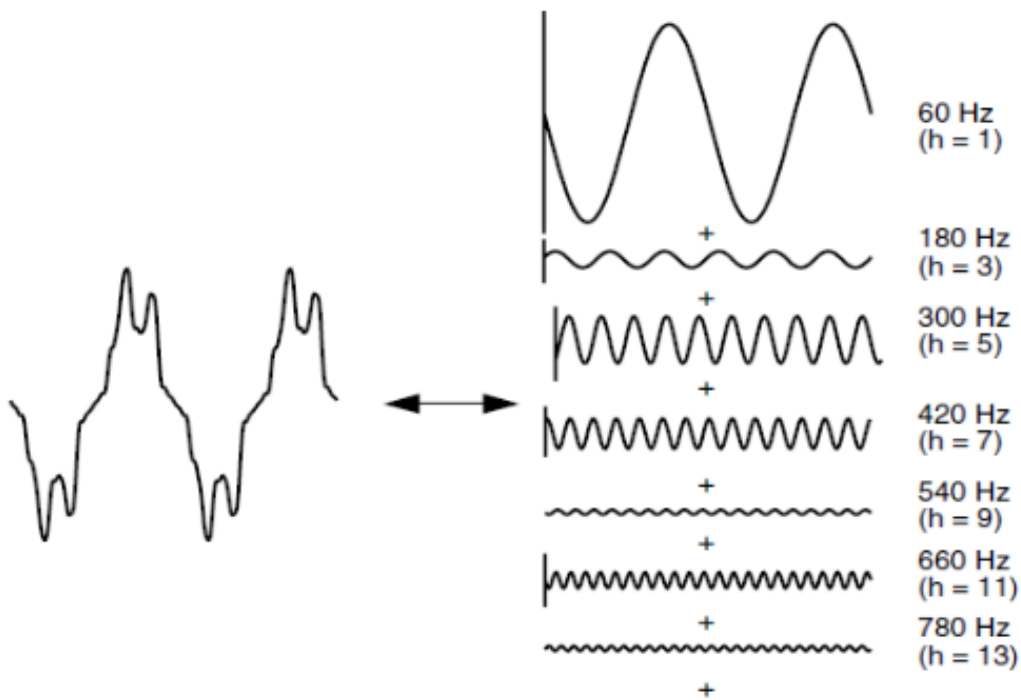
Joonis 1.2 Harmoonikute poolt moonutatud lainekuju [3]

Igasugust perioodilist funktsiooni $U(t)$ on võimalik Fourieri teisenduse põhjal kujutada ka reana, mis sisaldab muutuvaid komponente erineva sagedusega siinuseliselt. [3]

$$U(t) = \sum_{h=1}^{\infty} U_h \sin(h\omega_0 t + \Psi_h) \quad (1.1)$$

kus U_h = komponendi amplituud,
 $h\omega_0$ = sagedus,
 Ψ_h = faasinurk.

Fourieri teisenduse põhjal kujutatud rea deformeerunud lainekuju on välja toodud joonisel 1.2.



Joonis 1.2 Fourieri teisenduse põhjal moonutatud lainekeju visuaalselt [7]

Jaotusvõrgu omanikul ja tarbija huvides on vajalik koguda informatsiooni, kui suur on lisakadude maht ning kuidas neid vähendada. [1] Harmoonikute negatiivse mõju tõttu on elektrivõrgu omanikul kohustus minimeerida häiringute edastamist elektritarbijatele. Seega on elektrivõrgu omanikul oluline analüüsida ja määrata harmoonikute taset võrgus, et piirata nende kahjulikku mõju teistele tarbijatele. Harmoonikute taseme määramiseks kasutatakse harmoonmoonutustegurit. [7] Vastavalt Eestis kehtivale standardile EVS-EN 50160, kasutatakse harmoonmuutunusteguri leidmiseks järgmist avaldist 1.2: [8]

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} (U_h)^2}}{U_1} \quad (1.2)$$

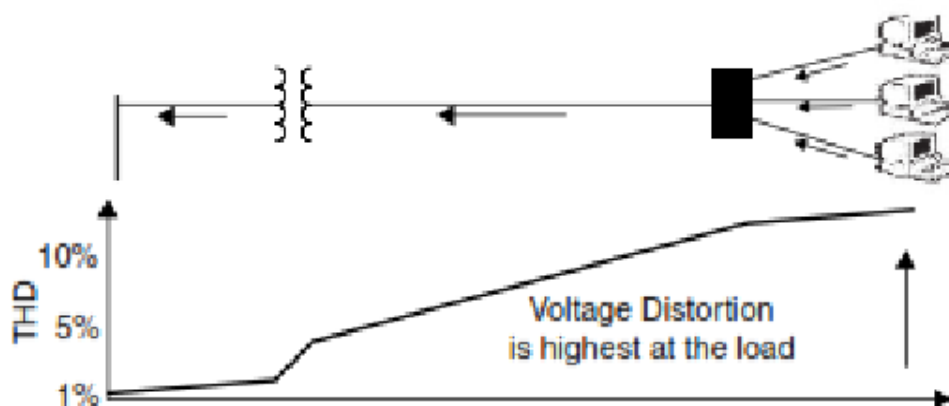
kus U_1 – põhiharmooniku amplituud,
 U_h - h -nda harmooniku amplituudiväärtus,
 h - kõrgema harmooniku järk.

Eestis määrab elektrikvaliteeti Euroopa standard EVS-EN:50160, mille kohaselt on standardnimipinge avalikes madalpingevõrkudes $U_N = 230V$ faasi ja neutraali vahel, nelja ja -

kolmejuhilises kolmefaasilises süsteemis. Nimisagedus elektrivõrgus on vastavalt standardile 50Hz normaaltingimustes. Mõõdetud keskmine sagedusvahemik 10 sekundi jooksul võrgus peab olema 50 Hz \pm 1% (49,5 Hz kuni 50,5 Hz) 99,5% aastast ning 47 kuni 52 Hz 100% ajast. Toitepinge nimipinge U_N aeglased muutused ei tohi normaaltingimustes ületada \pm 10%. Toitepinge poolt tekitatud värelustugevus P_{lt} peab olema väiksem või võrdne 1-ga 95% nädalases ajavahemikus. Enamasti klientide liitumispunktides mõõdetud pinge 10-minutilisi efektiivväärtuse keskvärtused peavad vastama 95% ajast tabelis 1.1 välja toodud väärtustele. [8]

Tabel 1.1 Harmoonikute pingete suurused kuni 25 järguni liitumispunktis protsentides nimipingest U_1

Paaritud harmoonikud				Paarisharmoonikud	
3-ga jagumatud		3-ga jaguvad		Järk h	Suhteline väärtus u_h , %
Järk h	Suhteline väärtus u_h , %	Järk h	Suhteline väärtus u_h , %		
5	5	3	3	2	1,9
7	4	9	1,3	4	1
11	3	15	0,5	6 kuni 24	0,5
13	2,5	21	0,5		
17	läbivaatamisel				
19	läbivaatamisel				
23	läbivaatamisel				
25	läbivaatamisel				



Joonis 1.3 Moonutuste levik piki toitefiidrit [13]

Valgust kiirgav diod ehk leedvalgusti võib olla kõige efektiivsem valgusallika tüüp, kuid leedvalgustid mõjuvad elektrivõrgule negatiivselt enda mittelineaarsete koormustega. [12] leedvalgustites on mitmeid elektroonikakomponente, mis tekitavad mittelineaarsetid koormusi, näiteks toiteahela komponendid, draiver, pingepiirik ja kontrollid. [15] Draiver ehk lülitusseade võib tekitada harmoonilisi ja elektomagnetilisi häireid, seega on oluline vähendada häirete hulka, et vältida negatiivseid mõjusid elektrisüsteemile. [16] leedvalgustite kõrgsageduslikud emissioonid vahemikus 2-150 kHz võivad tekitada probleeme ka arvestites. Neid võrku genereerivaid kõrgsageduslikke emissioone on võimalik limiteerida kasutades võimsusteguri korrigeerimise ahelat (PFC). Elektrivõrku tekitatud harmoonikute hulk sõltub suuresti elektroonikakomponentide kvaliteedist, mida on kasutatud leedvalgustites. [15] leedvalgustite draiveritele endile võivad negatiivselt mõjuda võrgust tulevad häiringud kõrgemate harmoonikute näol. Kõrgemad harmoonikud ehk "supraharmoonikud" on vahemikus 2-150kHz. [26]

Naatriumlampe kasutatakse tänavate ning avalike alade valgustamiseks nende pika eluea ja valgusviljakuse tõttu. Naatriumlambid vajavad starterit ehk ballasti, mis rakendab umbes 1222 kuni 5222 voldise pingega laengu väga lühikesel ajal (umbes 1 mikrosekund) lambipirnidesse, mis annab gaasile laengu ning seejärel hakkab lamp tööle. Naatriumlampide nõrk külg on aga mittelineaarne laeng käivituse hetkel ning võrku risustavad kolmandat järku harmoonikud. [17] Naatriumlampide kasutamiseks tuleks tähelepanu suunata harmooniliste moonutuste kompenseerimisele ning võimsusteguri parandamisele. [18] Kuigi naatriumlampide valgusviljakus on kõrge pole hele kollane/oranž valgus kvaliteetne ning ei sobi kodumajapidamistes kasutamiseks. [17]

Ideaalses kolmefaasilises elektrisüsteemis on pinged sümmeetrilised ehk faaside pingektorite nihkenurgad ja efektiivväärtused on võrdsed. Tegelikus elus on aga pinged asümmeetrilised. Pingete asümmeetriat tekitab peamiselt ebaühtlaselt koormatud faasid ja/või neutraaljuhi kõrgest takistusest. Viimasel juhul on tegemist neutraalnihkega. Pingete asümmeetriat tekitavad mingil määral kõik seadmed, mille lülitus ei ole sümmeetriliselt kolmefaasiline. [11]

Pingete asümmeetriast kui vaadeldavast suurusest räägitakse asümmeetriategurist. Selleks on vastujärgnevus- ja pärijärgnevuskomponendi suhe K_{2U} mida nimetatakse vastujärgnevusteguriks ning nulljärgnevus- ja pärijärgnevuskomponendi suhe K_{0U} , mida nimetatakse nulljärgnevusteguriks. Asümmeetriategurid arvutatakse järgmiste valemitega: [11]

$$TK_{2U} = \frac{U_2}{U_1} * 100\% \quad (1.3)$$

$$TK_{0U} = \frac{U_0}{U_1} * 100\% \quad (1.4)$$

EVS-EN: 50160 standardi järgi nädala pikkusel mõõtmisel peab normaalitalitusel 95% vastujärgnevusteguri keskmistest väärtustest olema alla 2%. Paljudes uurimustes soovitatakse aga, et see tegur võiks olla isegi alla 1%, kuna vastasel juhul tekivad kolmefaasilistes mootorites arvestatavad lisakaod. Standard käsitleb vastujärgnevuskomponendi piirväärtust just eelnimetatud põhjusel. EVS-EN: 50160 standardis aga ei ole nulljärgnevustegur normitud, kuid seda on tehtud näiteks Venemaa standardi GOST 13109. [11]

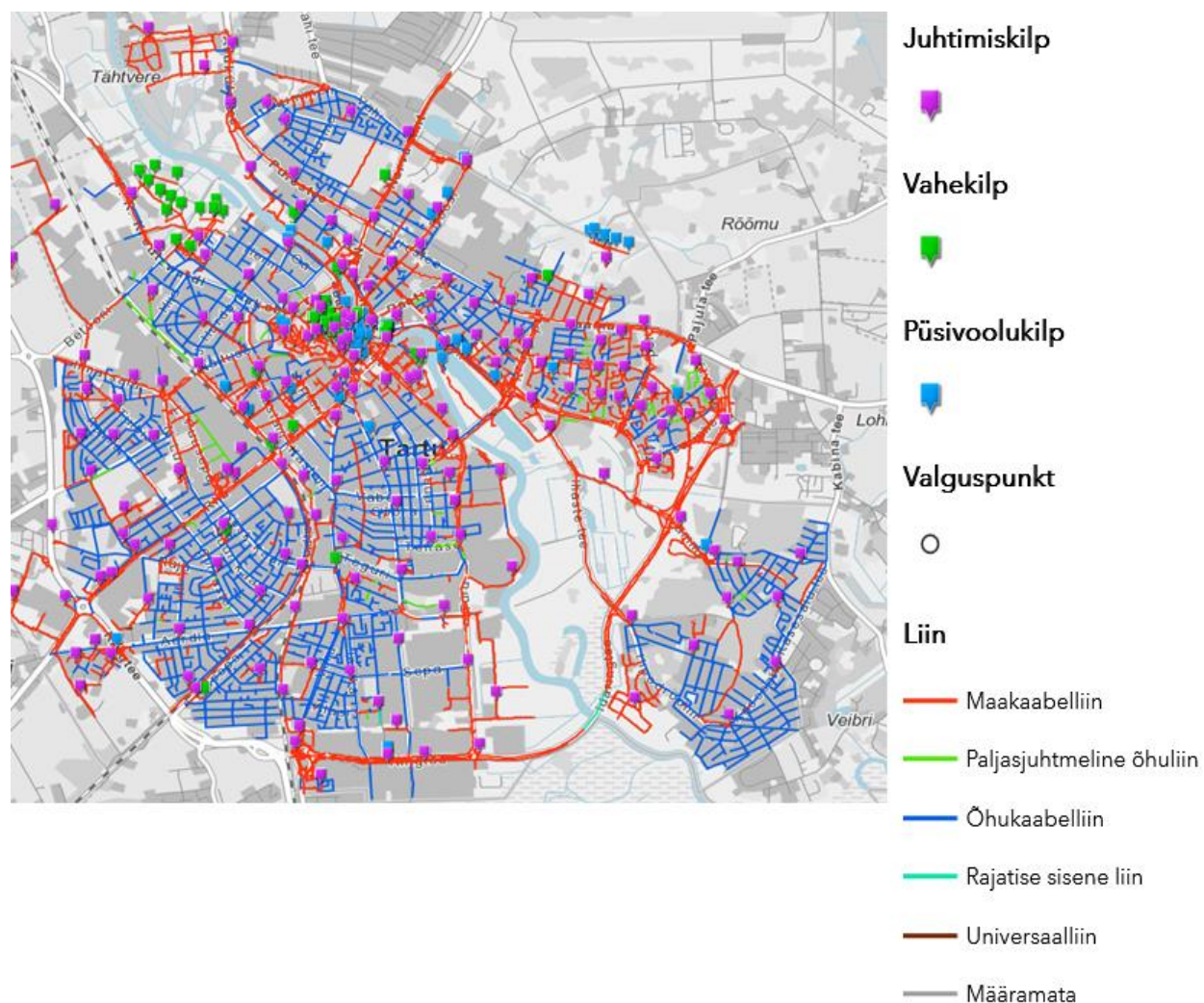
2. TARTU TÄNAVALGUSTUSVÕRK

Tartu linnas on 2022. aasta aprilli seisuga kokku umbes 15 000 valgustit, 13 700 masti, pea 500 000m õhu- ja maakaabelliine ning 350 kilpi. Vastavalt Tartu linna inventari töölauale on Tartus umbes 6300 leedvalgustit, 8500 Naatriumvalgustit ja 360 muud tüüpi valgustit (metallhaliid, luminofoorvalgustid ning hõõgniitvalgustid). Protsentuaalselt on Tartu linnas kasutusel umbes 41,4% leedvalgusteid, 56,2% naatriumvalgusteid ning 2,4% muud tüüpi valgusteid. Kilpidest on vastavalt andmebaasile 205 juhtimiskilbid, 80 püsivoolukilbid ning vahekilpe 62. [19]

Kolme aasta jooksul (2019-2021) uuendas Tartu linn Annelinna linnaosa tänavavalgustuse. Annelinn on rahvaarvu poolest Tartus suurim linnaosa ning 30-40 aastat tagasi rajatud tänavavalgustusvõrk oli nii füüsiliselt kui ka moraalselt ajale jalgu jäänud. Taristu uuendamise käigus demonteeriti vanad amortiseerunud mastid ja valgustid ning paigaldati säästlikud leedvalgustid, uued metallmastid ning kaabeldus. Projekti kogueelarve oli 2 008 837 eurot, millest omafinantseering 602 651 eurot ning SA Keskkonnainvesteeringute Keskuse poolt antav toetus 1 406 186 eurot. [20]

Uued ja projekteeritavad juhtimiskilbid peavad vastama "Nõuded Tartu linna 0,4 kV välisvalgustuse juhtimiskilbile" tingimustele. Tänavavalgustuse juhtimiskilbis peab olema kontrolleri, astronoomiline kell, minimaalselt kaks kontaktorit, kilbi valgustus, ukسلüliti, sireen, ümberlüliti jne. [21] Juhtimiskilbi tüüpjoonise ja tüüpskeemi leiab lisadest 2 ja 3. Tänavavalgustuse sisse ja välja lülitamine toimub tavaolukorras juhtimiskilpides läbi juhtimissüsteemide. Tartu linnavalitsuse katusel on kolm luksmeetrit, mis saavad info juhtimissüsteemidele. Kui kolmest kahe luksmeetri mõõtetulemused langevad alla 30lx, siis toimub lülitamine. Tartus on kasutusel põhiliselt kolm juhtimissüsteemi: Lumoflex City CMS, Gridens ja SmartELI. [22] Juhtimissüsteemid peavad võimaldama samaaegselt fiidrite ja valgustipõhist juhtimist, kontrollima väljundfiidrite kaitselülite asendeid ning muutuste korral informeerima juhtimissüsteemi, peab võimaldama juhtida vähemalt viit kontaktorit, säilitama töövoime vähemalt 12. tunniks elektritoite katkestuse puhul. Valgustite individuaalseks juhtimiseks ja kontrollimiseks tuleb valgustid varustada pistikupesaga valgustivälise kontrolleri ühendamiseks. Kontrolleri peab võimaldama suhtlust valgustis asuva DALI-2 liiteseadmega ning kontrolleri omavaheline sideraadius peab olema vähemalt 120m normaalsetes kliimatingimustes otsenähtavuse korral. [23] Projekteeritud ja paigaldatud valgustid peavad tootelehel esitatud andmete tõestamiseks omama CE ja ENEC+ märgist koos

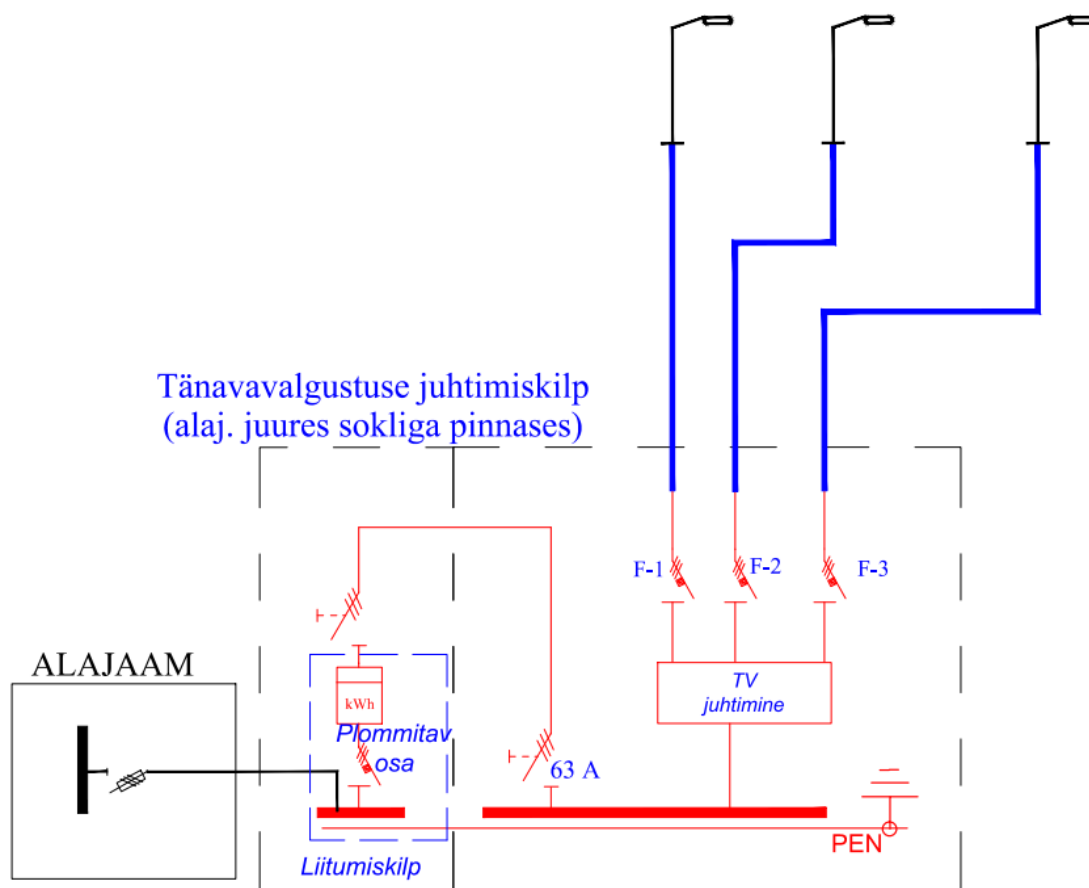
sertifikaatide ja labori numbritena. Valgustid peavad olema varustatud DALI liiteseadmega, mis võimaldaks tootjapoolset eelprogrammeerimist valgustite hämardamiseks. Hämardamisreegleid ei pea lisama valgustitele mille nimivõimsus jääb alla 35W. Valgustite toimimise jälgimiseks ja juhtimiseks peavad valgustid olema varustatud 24DC+DALI-2 liides pistikupesaga välise valgustikontrolleri ühendamiseks. Samuti peab olema võimalik valgustite käitumisreegleid muuta läbi pilveteenuse. [24] Joonisel 2.1 on välja toodud kogu Tartu linna tänavavalgustuse võrgu pilt kaardirakenduses ArcGIS. [19]



Joonis 2.1 Tartu tänavavalgustusvõrk ArcGIS andmebaasis

Joonisel 2.2 on välja toodud Tartu tänavavalgustuse tüüpne struktuurskeem. Üldjuhul asuvad juhtimiskilbid alajaama kõrval ning on paigaldatud sokliga pinnasesse. Liitumiskilp on enamasti juhtimiskilbis eraldi sektsioonis, kuid on ka erandeid, kus arvesti ja liitumine on

samas sektsioonis või liitumiskilp eraldi kilbina või liitumine alajaamas. Valgustuse fiidreid juhib kilbis üldjuhul kontrolleri, kuid on ka kilpe kus juhtimine käib läbi astronoomilise kella või hämaraanduri. Kõik kilbid on lisaks kontrolleri varustatud ka astronoomilise kella või hämaraanduriga juhuks, kui kontrolleri peaks lakkama töötamast. Igal fiidril on eraldi automaatkaitselülitiid faaside kaupa ning valgustid jaotatud ühtlaselt faaside kaupa fiidril. Eraldi automaatkaitselülitiid tagavad, et rikke korral ei kustu terve fiider vaid valgustid üle kolme. Lisaks on olenevalt juhtimissüsteemist kilbis ka fiidrite või kaitselülitiite eraldi monitoorimine.



Joonis 2.2 Tartu tänavavalgustuse struktuurskeem

3. ANNELINNA TÄNAVALGUSTUSE ENERGIATÕHUSUSNÄITAJATE ARVUTAMINE

Energiatõhususe võrdlemiseks rekonstrueerimata ja rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgus Annelinna piirkonnas võeti vaatluse alla juhtimiskilbi Fiiderpunkt 61 piirkond. Enne uue valgustustaristu ehitamist oli piirkonnas 38 naatriumvalgustit millest kõik olid võimsusega 150W. Piirkonna tänavavalgustuse toide oli ehitatud nii maa- kui õhukaabelliiniga. Mastidena oli kasutatud 10m raudbetoonmaste. Valgustusvõrgu rekonstrueerimisel kasutati sama piirkonna valgustamiseks 39 LED valgustit võimsustega 22W, 25W, 39,5W ning 51W. Uues võrgus on kasutatud maakaableid ning valgustid paigaldatud konsooliga metallist mastide otsa.

Energiatõhusus enne valgustite vahetamist ja peale valgustite vahetamist leitakse standardi EVS-EN 13201-5:2015 järgi. Energiatõhususe võrdlemiseks on vastavalt standardi järgi vaja leida uue ja vana tänavavalgustusvõrgu kohta aastane energiatarbimisnäitaja ja erivõimsusnäitaja. Valgustusvõrgu erivõimsusnäitaja on võrgu installeeritud koguvõimsus jagatud pindalaga mida valgustid valgustavad. Energiatarbimisnäitaja saadakse valgustusvõrgu aastase elektrienergia tarbimise ja valgustatava ala jagatisena. [27]

Aastane energiatarbimisnäitaja arvutatakse valemiga: [27]

$$D_E = \frac{\sum_{j=1}^m (P_j * t_j)}{A} \quad (2.1)$$

kus D_E – valgustustaristu aastane energiatarbimisnäitaja Wh*m⁻²

A – Valgustatava ala pindala m²,

P_j – Valgustusvõrgu talitlusvõimsus W,

t_j – Valgustuse töötamise aeg kogu aasta kestel tundides talitlusvõimsusega P_j ,

m – erineva talitlusvõimsusega P_j ajavahemike arv.

Erivõimsusnäitaja arvutatakse valemiga: [27]

$$D_P = \frac{P}{\sum_{i=1}^n (E_l * A_i)} \quad (2.2)$$

kus D_p – valgustustaristu võimsus W,
 A_i – Valgustatava ala pindala m^2 ,
 E_i – Valgustusvõrgu keskmine rõhttasandiline valgustustiheduse hooldeväärtus lx,
 t_j – Valgustuse töötamise aeg kogu aasta kestel tundides talitlusvõimsusega P_j ,
 n – valgustatud alapiirkondade arv.

Energiatarbimisinäitaja ja erivõimsusnäitaja arvutamiseks on vaja leida valgustatud ala pindala, valgustuse aastased töötamistunnid ja valgustusvõrgu võimsus. Arvutuste aluseks on võetud standardist EVS_EN_13201 eeldatav talitluskestus tänavavalgustusvõrgus aastas 4000 tundi. valgustatavate alade keskmisteks laiusteks on võetud 8m ning kokku on valgustatavate alade pikkus 1,2km. See tähendab, et valgustatud alade pindala saame laiuse ja pikkuse korrutisena $9600m^2$. Rekonstrueerimata võrgus oli kokku 38 naatriumvalgustit 150W valgusallikaga ning võrgu koguvõimsus 5700W. Rekonstrueeritud võrgus on 39 valgustit koguvõimsusega 1600W. Antud piirkonnas on kasutusel keskmise rõhttasandilise valgustustiheduse hooldeväärtus 10lx, mis on võetud Annelinna rekonstrueerimise projektidokumentatsioonist. Fiiderpunkt 61 piirkonnas on kasutatud ka valgusteid mis on programmeeritud hämardama vastavalt Tartu linna hämardamisgraafikule. Alates kella 22:00 hämardatakse valgustuse tase 80 protsendi peale ning alates 01:00 toimub hämardamine 50 protsendini. Analüsaatoriga mõõdetud tulemused näitavad, et hämardamine valgustuse 80% peale annab energiasäästu umbes 6% ning hämardamine 50% peale annab energiasäästu 10%. Energiatarbimisinäitaja arvutustes on vajalik arvestada ka erinevate talitlusvõimsuste ajavahemikega. Kui valgustus on hämardatud üle põlemistsükli jooksul 80% 4 tundi ja 50% 4 tundi, siis korrutame selle 365 päevaga läbi ning leiame talitlusvõimsuste ajavahemikud. Fiiderpunkt 61 piirkonnas töötavad valgustid valgustustasemel 100% - 1080h, 80% - 1460h ja 50% - 1460h.

Aastane energiatarbimisinäitaja rekonstrueerimata võrgus on vastavalt valemile 2.1:

$$D_E = \frac{5700W * 4000h}{9600m^2} = 2375 \frac{Wh}{m^2} = 2,38 \frac{kWh}{m^2}$$

Aastane energiatarbimisinäitaja rekonstrueeritud võrgus ilma hämardamisrežiimita on vastavalt valemile 2.1:

$$D_E = \frac{1600W * 4000h}{9600m^2} = 667 \frac{Wh}{m^2} = 0,67 \frac{kWh}{m^2}$$

Aastane energiatarbimisinäitaja rekonstrueeritud võrgus hämardamisega on vastavalt valemile 2.1:

$$D_E = \frac{(1600W * 1080h) + (1600W * 0,94 * 1460h) + (1600W * 0,90 * 1460h)}{9600m^2} = 628 \frac{Wh}{m^2} = 0,63 \frac{kWh}{m^2}$$

Erivõimsusnäitaja rekonstrueerimata võrgus arvutatakse valemiga 2.2:

$$D_P = \frac{5700W}{10lx * 0,9 * 9600} = 0,066 \frac{W}{m^2 * lx}$$

Erivõimsusnäitaja rekonstrueeritud võrgus arvutatakse valemiga 2.2:

$$D_P = \frac{1600W}{10lx * 0,9 * 9600} = 0,019 \frac{W}{m^2 * lx}$$

Arvutustulemused on välja toodud võrdluseks tabelisse 2.1.

Tabel 2.1 Fiiderpunkt 61 piirkonna energiatõhususnäitajad ja standardi tüüpväärtused.

	Erivõimsus- näitaja Naatrium- Valgustid $\frac{mW}{m^2 * lx}$	Erivõimsus- näitaja LED- Valgustid $\frac{mW}{m^2 * lx}$	Energiatarbimis- näitaja Naatrium- valgustid $\frac{kWh}{m^2}$	Energiatarbimis- näitaja LED- Valgustid $\frac{kWh}{m^2}$
Arvutatud väärtused	66	19	2,38	0,63
Standardi tüüpväärtus/ Valgustusklass: M5/P5	33	17	1,0	0,5

Arvutustulemuste järgi on aastane energiatarbimisinäitaja uuendatud valgustusvõrgus 3,5 korda madalam ning erivõimsusnäitaja 3,8 korda madalam. Tulemused on võrdlemiseks koondatud tabelisse 2.1. Rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgu energiatarbimisinäitaja ja

erivõimsusnäitaja on mõnevõrra kõrgemad kui standardis etteantud väärtused. Selle põhjuseks võib olla asjaolu, et Annelinna kortermajade vahel tänavate laiused ja tüübid muutuvad üsna palju ning valgustatavat ala on raske määrata. Antud töös on valitud valgustatud ala keskmiseks laiuseks 8m ning pikkuseks 1,2km mis teeb pindalaks 9600m². Seega ei saa kindlalt väita, et rekonstrueeritud tänavavalgustusse energiatõhususnäitajad on kõrgemad kui standardis ette antud. Siiski on arvutuste põhjal näha, et leedvalgustitega tänavavalgustusvõrk on kordades energiatõhusam kui naatriumlampidega võrk.

Viimase 12 kuu (seisuga aprill 2022) kaalutud keskmiseks elektri börsihinnaks käibemaksuta on 10,66 s/kWh. [28] Selle põhjal on võimalik arvutada uurimise alla võetud piirkonna rahaline kulu aastas ning kulu valgusti kohta.

Tabel 2.2 Elektri- ja rahalise kulu võrdlustabel Fiiderpunkt 61 piirkonna järgi

	Elektri hind käibemaksuta €/ kWh	Aastas tarbitav elektrienergia kWh	Aastas tarbitav elektrienergia valgusti kohta kWh	Rahaline kulu aastas €	Rahaline kulu valgusti kohta aastas €
Elektrienergia kulu Naatriumvalgustitega võrgus	0,11	22800	600	2508	66
Elektrikulu leedvalgustitega võrgus	0,11	6026	154	662	17

Keskkonnainvesteeringute keskuse Annelinna I etapi projekti tutvustuses on prognoositud aastane elektrienergia kokkuhoid valgustite vahetuse järel 371MWh. [29] Annelinna esimeses ehitusetapis demonteeriti 893 kõrgrõhu-naatrium valgusteid ning paigaldati 980 leedvalgustit. Fiiderpunkt 61 tänavavalgustuse juhtimiskilbi piirkonna järgi arvatud aastase tarbitava elektrienergia valgustite kohta on võimalik välja arvutada umbkaudne elektrienergia kokkuhoid. Naatriumvalgustite aastane tarbimine Annelinna I etapi piirkonnas oli 535MWh ning peale rekonstrueerimist leedvalgustitega 151MWh. Seega on aastane elektrienergia kokkuhoid leedvalgustite puhul 384MWh, mis on mõnevõrra kõrgem kui prognoositud.

4. MÕÕTETULEMUSED JA ANALÜÜS

4.1 Mõõtmised rekonstrueeritud ja rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgus

Käesoleva lõputöö raames teostati mõõtmisi Tartu linna tänavavalgustuse võrgus. Mõõtmisi teostati perioodil 2021 november kuni 2022 veebruar. Mõõtmisi teostati kahte tüüpi tänavavalgustusvõrgus. Esimesed mõõtmised teostati rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgus, kus on kasutusel leedvalgustid. Rekonstrueerimata ja rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgu võrdluseks valisin kolm sarnase arvuga naatriumvalgustitega tänavavalgustuse piirkonnad. Kokku teostati mõõtmisi 13 kilbi piirkonnas ning nendest valiti välja kolm rekonstrueeritud tänavavalgustuspiirkonda ning kolm rekonstrueerimata tänavavalgustuspiirkonda. Tartu linna tänavavalgustuse juhtimiskilpide eristamiseks ja andmebaasist leidmiseks on iga kilbil ka enda unikaalne number (näiteks 25 Sõpruse). Mõõtmiste teostamiseks kasutati Tallinna Tehnikaülikooli mõõteaparatuuri FLUKE 1745 POWER QUALITY LOGGER. Fluke 1745 mõõteseadmega on võimalik registreerida võrgus pingeid, koormusvoole, aktiiv- ja reaktiivvõimsuseid, pingete asümmeetriat ja voolu/pinge harmoonilisi komponente. Tulemusi registreerib mõõteaparatuur valitud perioodi keskvaartustena ning lisaks keskvaartustele salvestab mõõteperioodi jooksul esinenud minimaalsed ja maksimaalsed väärtused. Mõõteperioodiks valiti käesolevas magistritöös 10 minutiline intervall.



Joonis 4.1. Valgustuskilp alajaama kõrval

Joonisel 4.1 on näha, kuidas on Tartu linna tänavavalgustuse juhtimiskilbid paigaldatud. Enamus valgustuse juhtimiskilpidest asuvad alajaama kõrval või selle läheduses ning liitumiskilp on juhtimiskilbi kõrval või liitumine samas kestas juhtimiskilbi eraldi sektsioonis. Mõõteseadme paigaldamiseks sobisid tänavavalgustuse juhtimiskilbid, kuna on valve all, võtmega lukustatavad, ööpäevaringselt juhtimiskeskuse poolt jälgitavad ning kilbi sisu ilmastiku eest kaitstud.

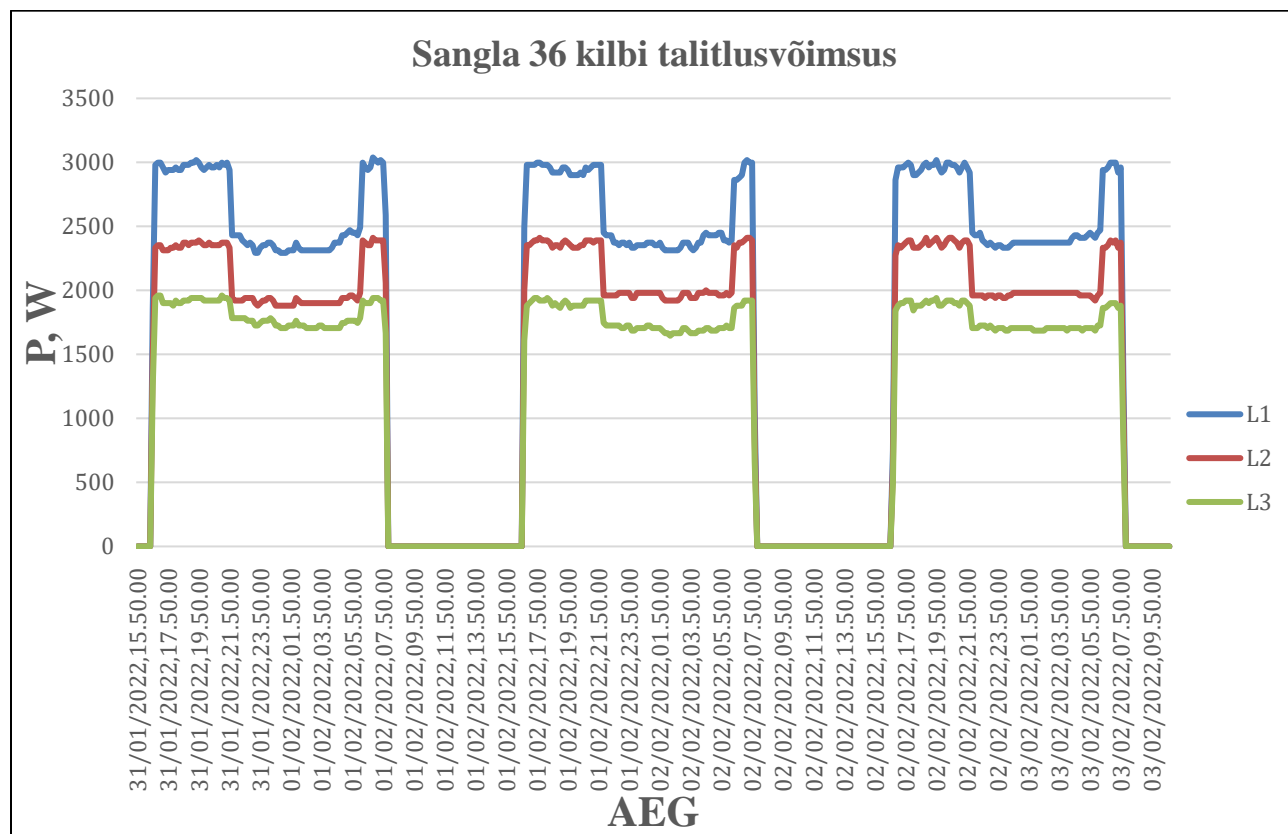


Joonis 4.2. Tartu tänavavalgustuse juhtimiskilbid

Joonise 4.2 piltidel on näha kuidas viidi läbi mõõtmised. Esmalt oli vaja mõõteaparatuur seadistada arvutis programmiga PQ log, kus tuli valida parameetrid mida mõõta soovitakse, mõõteintervall ja mõõtmise periood. Fluke 1745 seadistati mõõtma kõiki parameetreid, mida masin võimaldas ning mõõtmiste intervalliks sai 10 minuti keskvaartused ja miinimumid/maksimumid. Mõõtmiseks paigaldati seade igasse valgustuse juhtimiskilpi kolmeks ööpäevaks. Sisendkaabli ümber paigaldati ampertangid ning pingete mõõtmiseks ühendati pealüliti klemmidele ja PEN latile juhtmed. Mõõteseadmele võeti elektritoide valgustuse kilpide omatarbe pistikupesast, mis oli kaitstud nii liigvoolukaitsme kui ka rikkevoolukaitsmega. Kilbi piirkonnad, kus olid kasutuses vanema tehnoloogia naatriumlambid ning koormusvoolud kõrgemad, kasutati voolude mõõtmiseks Rogowski vööd.

4.1.1 Mõõtmised juhtimiskilpide piirkondades 36 Sangla ja 25 Sõpruse

Sangla ja Sõpruse juhtimiskilpide piirkonnad sai võrdlusesse valitud, kuna on valgustite arvu poolest sarnased. 36 Sangla piirkonnas on kokku 49 naatriumvalgustit ning 25 Sõpruse kilbi piirkonnas 47 leedvalgustit. Sõpruse tänavavalgustuse juhtimiskilp asub Annelinna magalapiirkonna südames, Anne tn 53 hoovis. Sangla tänavavalgustuse juhtimiskilp aga asub Sangla-Ravila ristmikul eramajade piirkonnas. Sangla kilbi piirkonnas kasutusel naatriumvalgustid puitmastidel ning kaabeldus on ehitatud õhukaabelliiniga EX 4x16. Enamus valgusteid on võimsusega 100W ning piirkonna installeeritud koguvõimsus Tartu linna andmebaasi järgi on 4900W. Sõpruse kilbi piirkonnas on kasutusel uued Philips leedvalgustid metallmastide otsas ning kaabeldus on ehitatud maakaabelliiniga AXPK 4G25. Valgustid on võimsusega 22 ja 51W ning piirkonna installeeritud koguvõimsus Tartu linna andmebaasi järgi on 2010W. Joonisel 4.3 ja 4.4 on välja toodud Sangla ja Sõpruse kilbi 3 ööpäeva tarbimisvõimsused vattides.



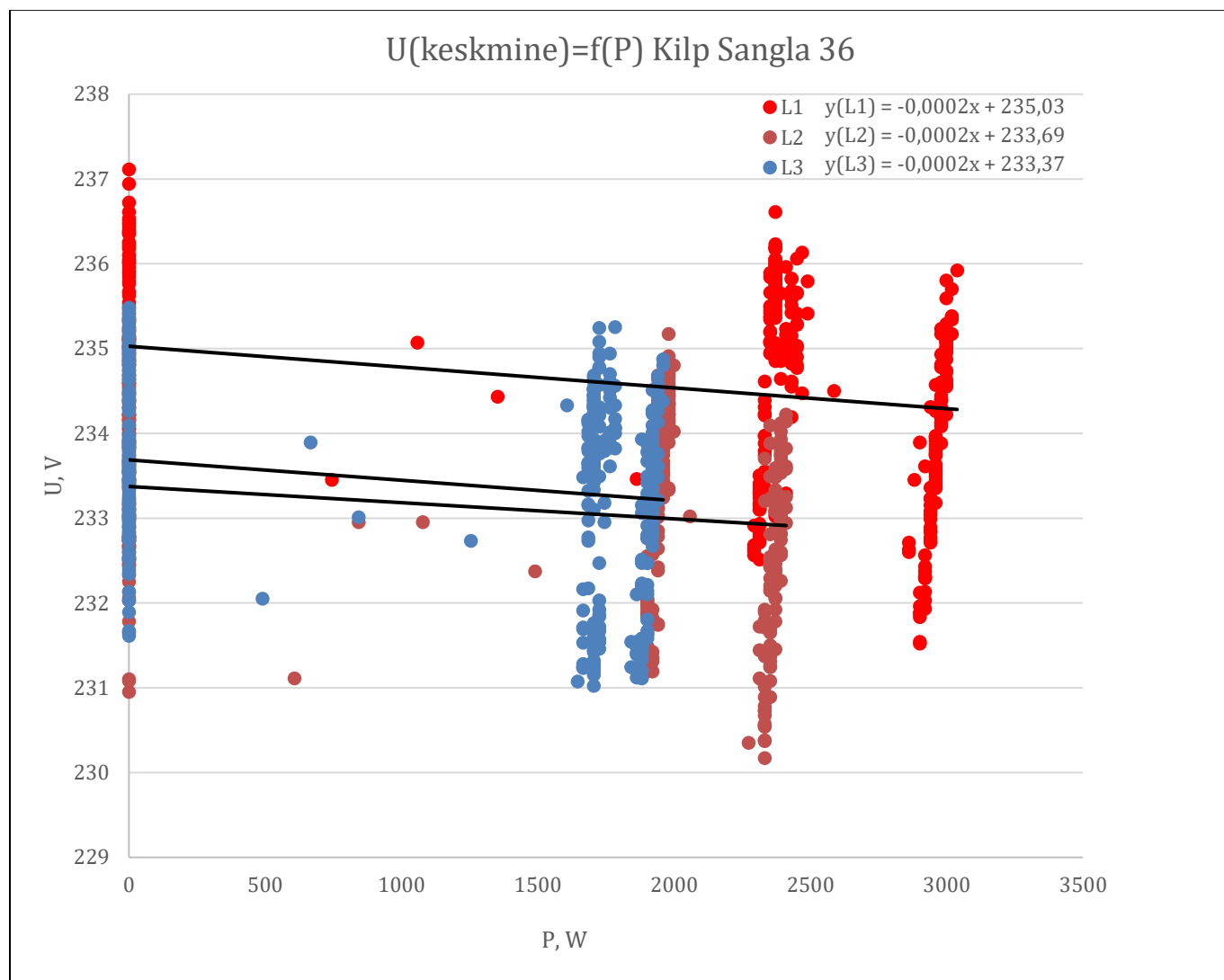
Joonis 4.3. Sangla kilbi talitlusvõimsus perioodil 31.01.2022-03.02.2022



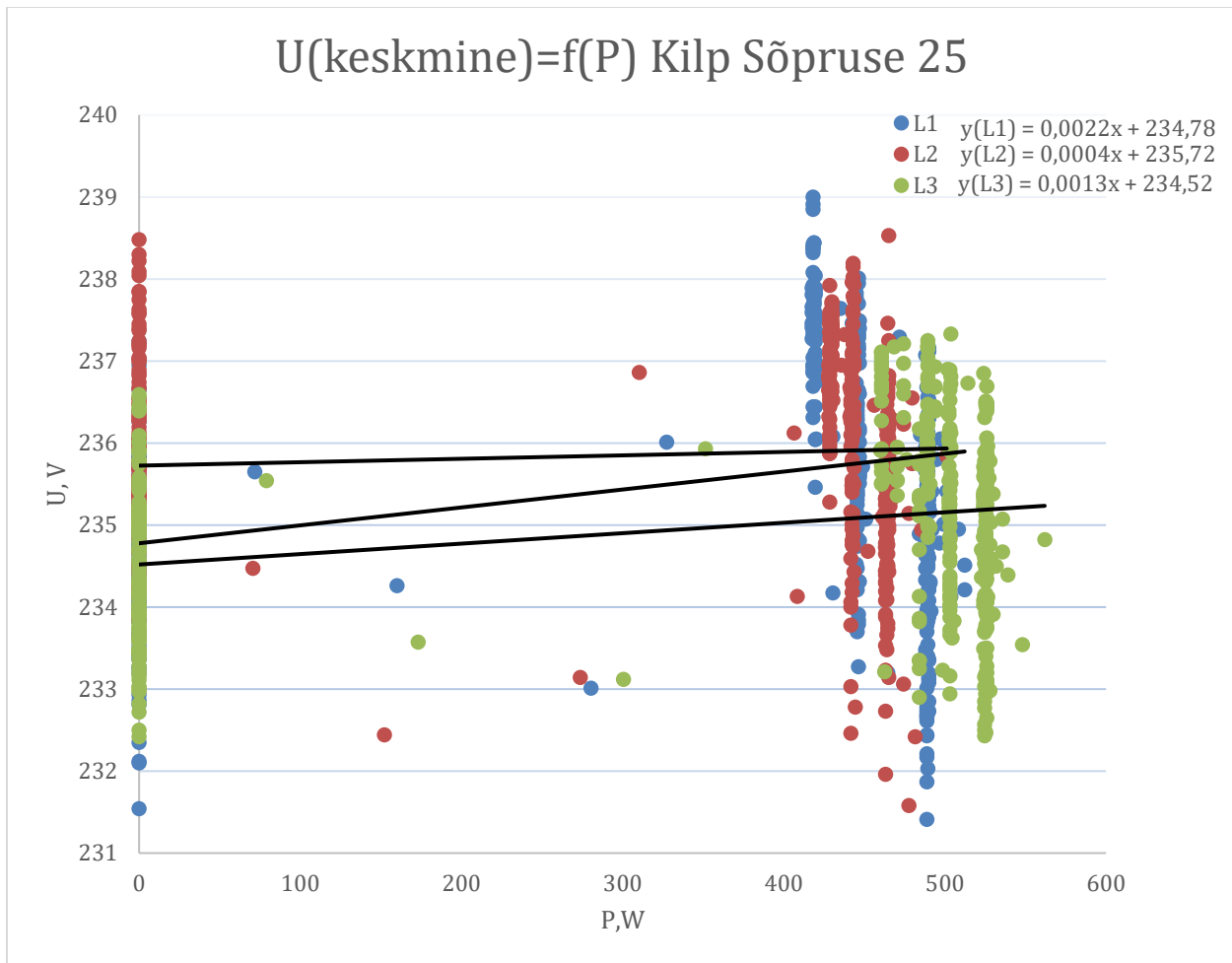
Joonis 4.4. Sõpruse kilbi talitlusvõimsus perioodil 31.01.2022-03.02.2022

Jooniselt 4.3 võib välja lugeda, et valgustus süttis Sangla kilbi piirkonnas umbes kell 16:40. Graafikult on näha, et faasid selles piirkonnas on ebaühtlaselt koormatud. L1 töötab täisvõimsusel 3kW; L2 2,35kW ning L3 1,9kW võimsusega. Samuti võib graafiku kohaselt välja tuua, et piirkonna naatriumvalgustid on varustatud kontrolleriga mis on tehases programmeeritud mingist ajahetkest valgustid töötama 70% võimsusel. Rootsist toodetud Coala kontrolleri pildi leiab lisas 4. Graafikult on näha, et valgustid lülituvad säästurežiimile kell 22:00 ning tagasi 100% võimsusega tööle kell 6:20 hommikul. Enamus naatriumvalgusteid töötavad Tartu linnas siiski alates süttimisest kuni kustumiseni 100% võimsusega.

Joonisel 4.4 on välja toodud rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgu võimsusgraafik Sõpruse kilbi piirkonnas. Kuna mõõtmised kilpides on teostatud erinevatel aegadel, siis valgustuse süttimise aeg erinevates kilbi piirkondades graafikutel võib muutuda üsna palju. Süttimisel töötavad leedvalgustid täisvõimsusel ning faasid on üsna võrdselt koormatud 460W kuni 525W-ni. Alates kella 21:00-st alustavad valgustid hämardamist vastavalt lisas 2 välja toodud Tartu linna välisvalgustuse hämardamistabelile. Hämardamine programmeeritakse tehases valgustitele tootja poolt vastavalt valgustusklassile.

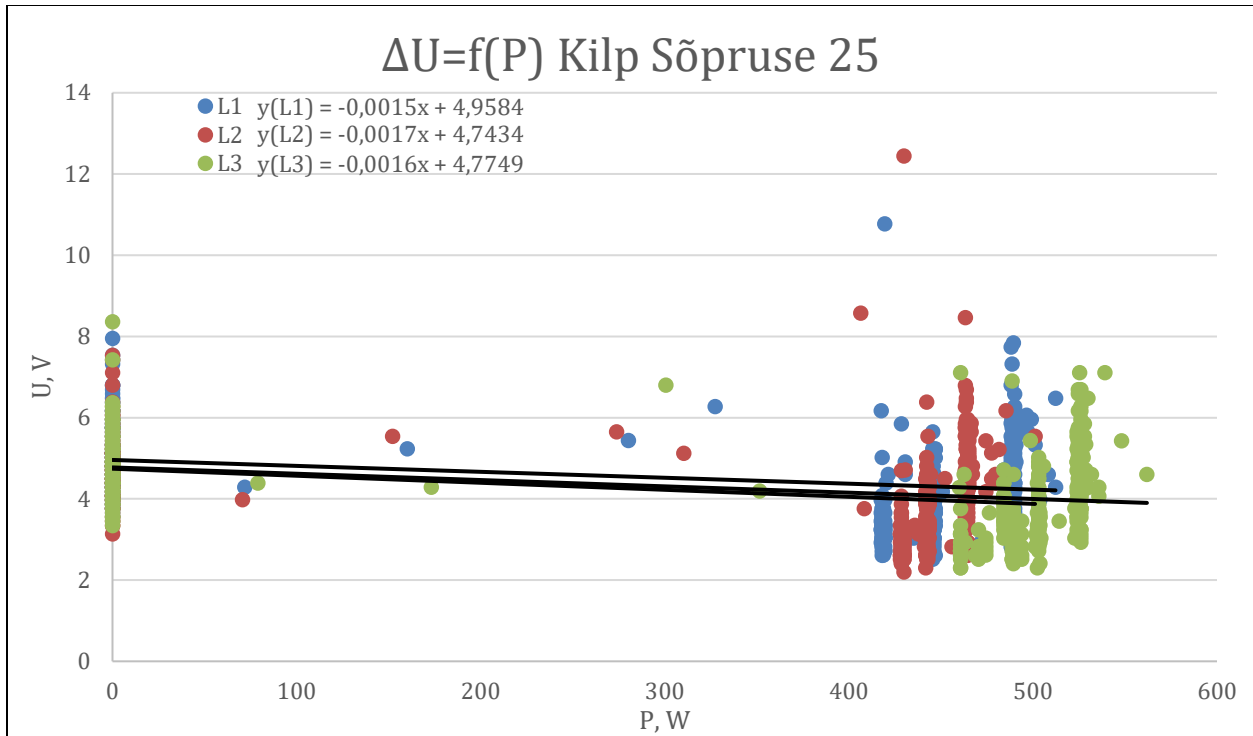


Joonis 4.5. Faasipingete sõltuvus rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgu talitlusvõimsusest

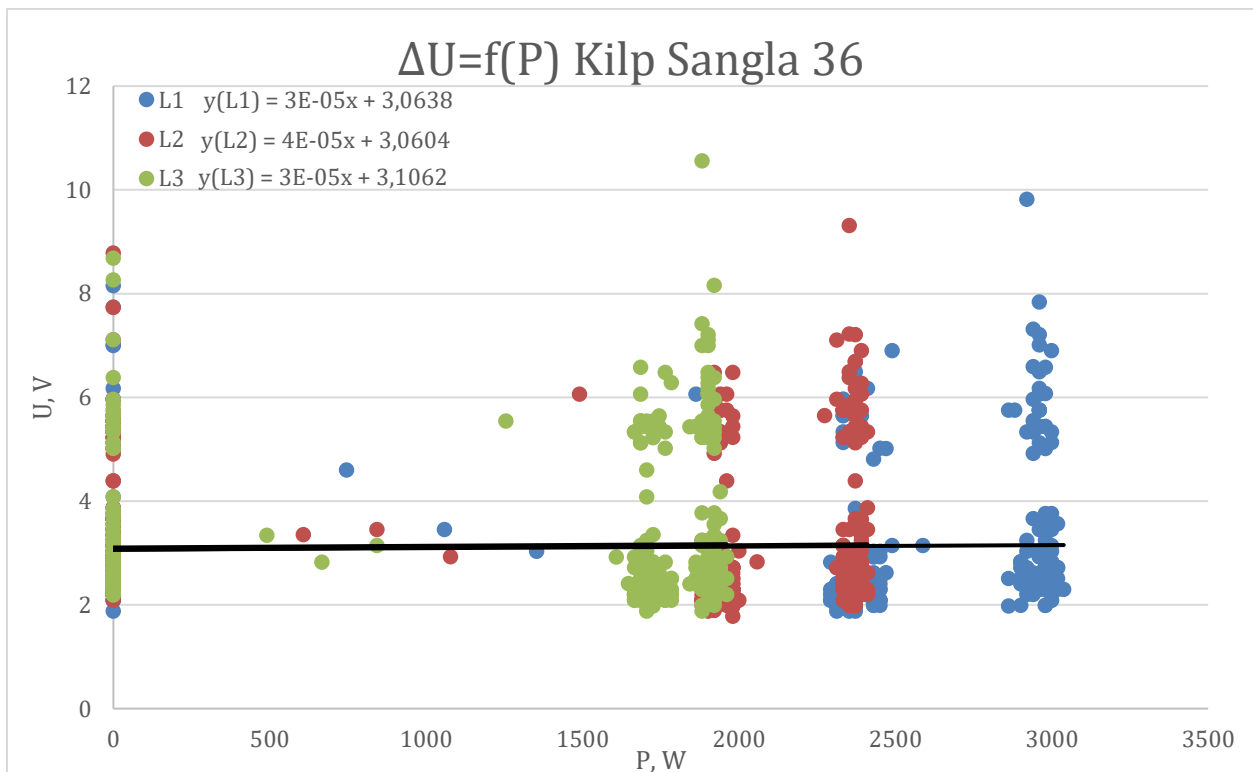


Joonis 4.6. Faasipingete sõltuvus rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgu talitlusvõimsusest

Joonistel 4.5 ja 4.6 on välja toodud pingete sõltuvus tänavavalgustusvõrgu võimsusest. Kui graafikuid vaadelda, siis rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgus toimus võimsuse kasvamisega võrgus väike pingelang ning rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgus kas pinge jäi samaks või kasvas 0,2-1,1V. Joonistel on välja toodud ka faaside kaupa lineaarsed trendijooned. Trendijoonete võrrandite järgi rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgus langeb pinge ühtlaselt kõikides faasides koormuse tõusmisel umbes 0,6V. Kuna tänavavalgustuse mõju faasipingetele on marginaalne ka teistes piirkondades, siis järgmiste piirkondade analüüsis faasipingete sõltuvust tänavavalgustusvõrgu võimsusest ei kajastata.

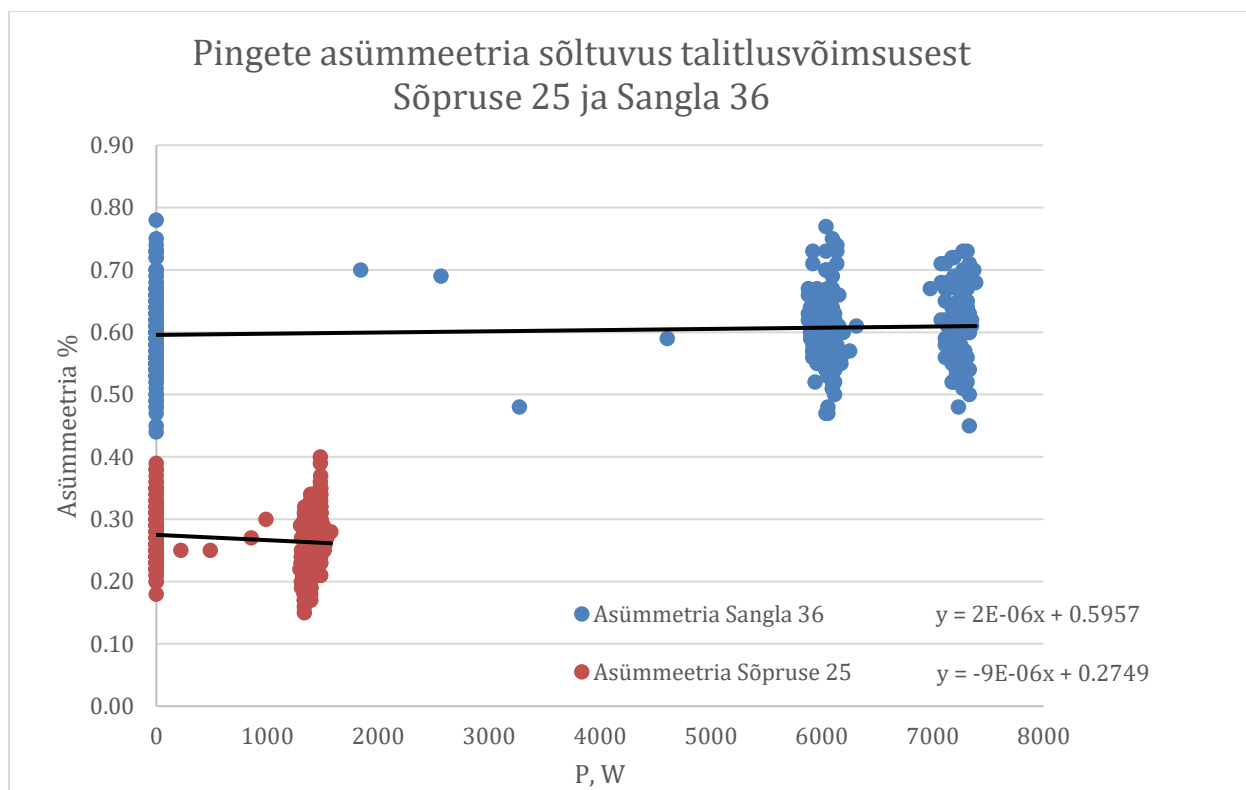


Joonis 4.7. Faasipingete miinimumi ja maksimumi väärtuste vahe sõltuvus rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgu talitlusvõimsusest



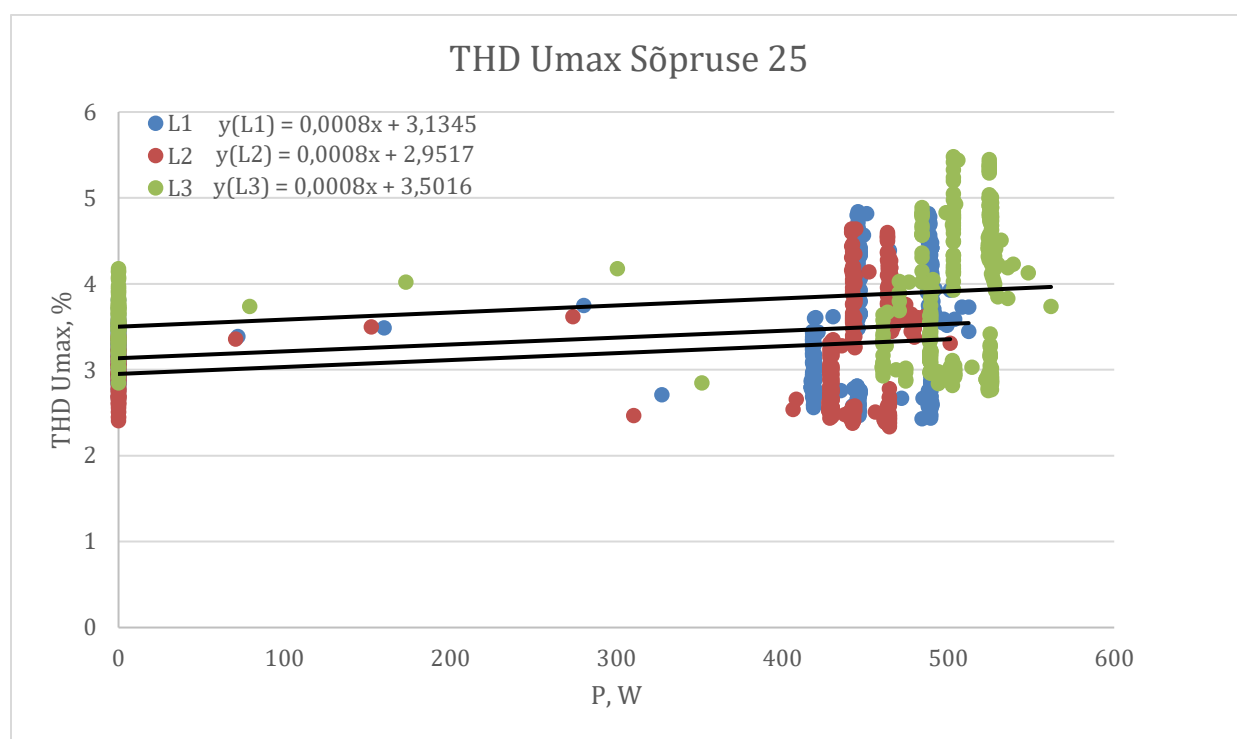
Joonis 4.8. Faasipingete miinimumi ja maksimumi väärtuste vahe sõltuvus rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgu talitlusvõimsusest

Mõõteaparatuur fikseeris ka lisaks 10 minutilistele keskväärtustele ja iga 10 minutilise perioodi pingete miinimum- ja maksimumväärtused. Joonisel 4.7 on välja toodud rekonstrueeritud tänavavalgustuse võrgu tarbimisvõimsuse mõju pingete miinimum- ja maksimumväärtuste vahe sõltuvusele. Joonisel 4.8 on näha aga rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgu tarbimisvõimsuse mõju pingete miinimum- ja maksimumväärtuste vahe sõltuvusele. Mõõteperioodil oli mõlemas mõõtepunktis pingete muutused 10 minuti jooksul vahemikus 2...12V. Trendijoonete järgi võib välja lugeda, et rekonstrueerimata ja rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgu tarbimisvõimsuste muutumisel ei ole otsest seost pingete kõikumisel. Joonisel 4.7 on näha, et rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgu trendijooned on langevad sirged aga langus on väga madal. Tulemustest võib järeldada, et nii rekonstrueeritud kui ka rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrk ei mõjuta pingete kõikumisi. Kuna tänavavalgustuse mõju pingete kõikumisele on marginaalne, siis järgmiste piirkondade analüüsis faasipingete miinimumi ja maksimumi väärtuste vahe sõltuvust tänavavalgustusvõrgu võimsusest ei kajastata.

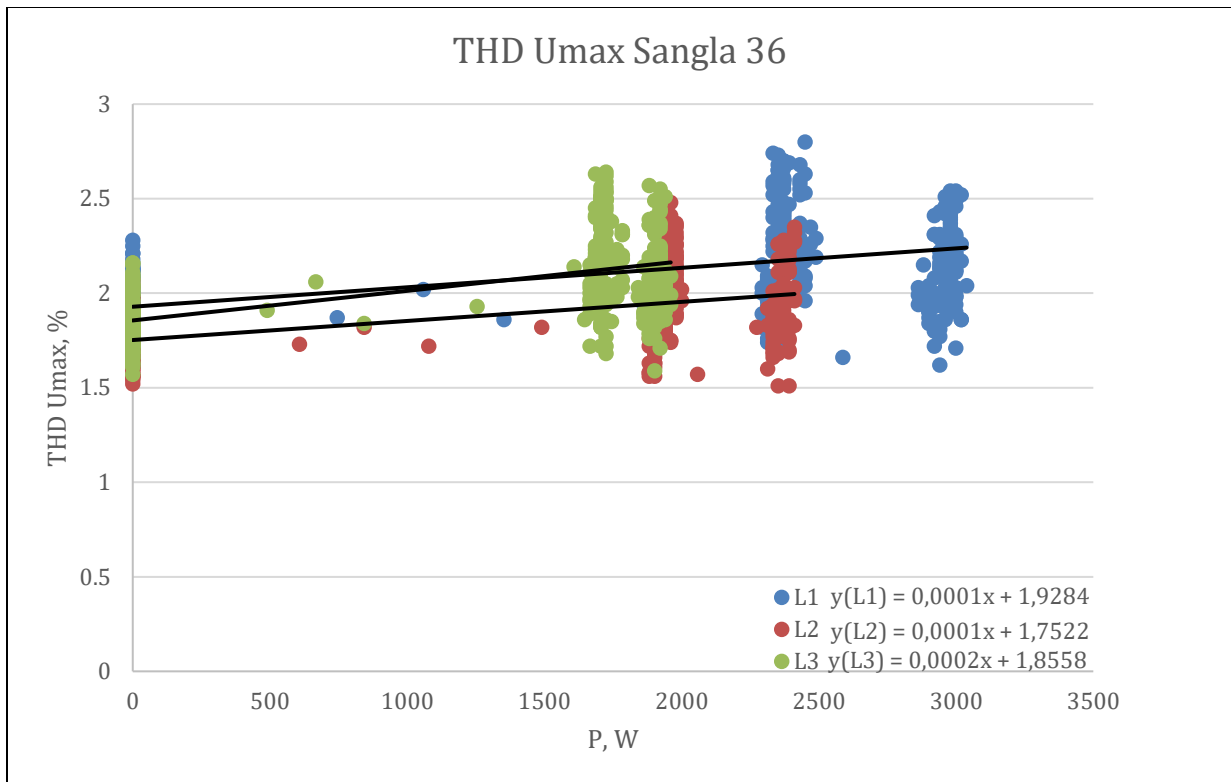


Joonis 4.9. Pingete asümmeetria seos rekonstrueeritud ja rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgu talitlusvõimusega

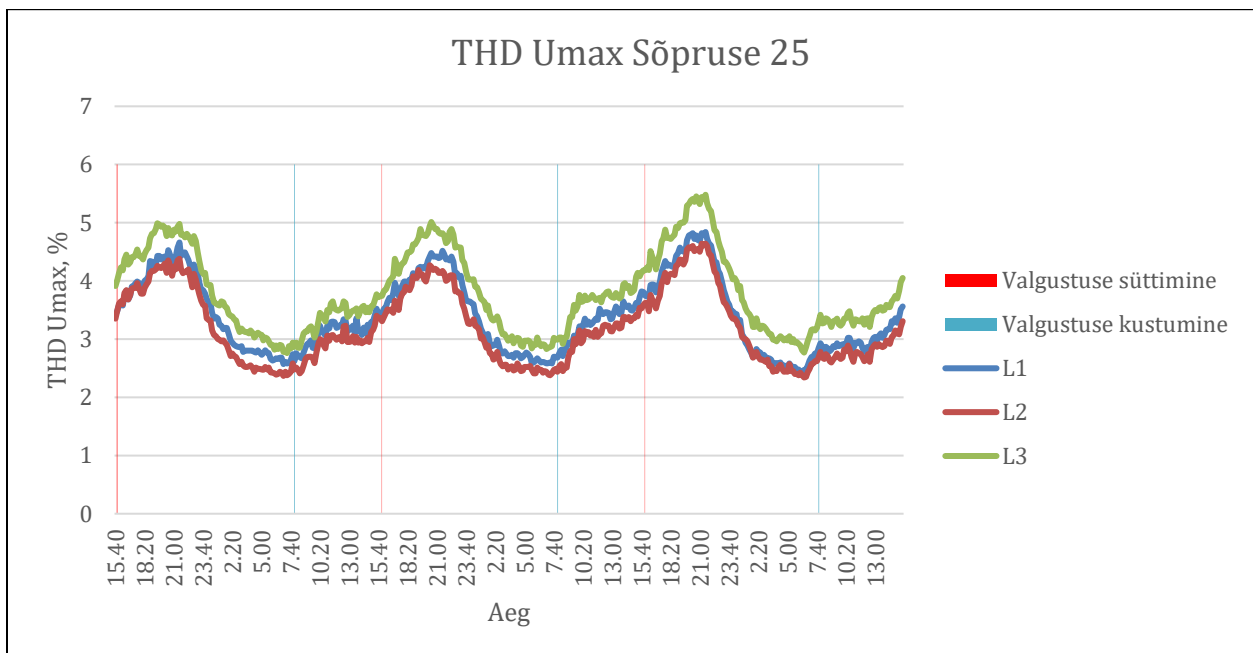
Joonisel 4.9 on välja toodud pingete asümmeetria seos tänavavalgustusvõrgu tarbimisvõimsustega. Graafiku järgi saab välja tuua, et pingete asümmeetria ei muutu tänavavalgustusvõrgu tarbimisvõimsuse tõusmisel. Antud joonisel on näha trendijoone langust rekonstrueeritud võrgus ning trendijoone tõusu rekonstrueerimata võrgus. Trendijoonte tõus ja langus on aga niivõrd madal, et tänavavalgustusvõrgu mõju elektrivõrgu asümmeetriale on minimaalne. Standardiga EVS-EN:50160 on lubatud vastujärgnevuskomponent kuni 2%. Soovituslikult ei tohiks mõõdetud tulemus ületada 1%. Seega antud võrgus mõõdetud asümmeetria tase vastab nii standardile kui ka soovituslikule väärtusele. Samuti on tänavavalgustusvõrgu elektriseadmed kõik ühefaasilised, ning asümmeetria iseenesest täiendavaid lisakadusid ei põhjusta.



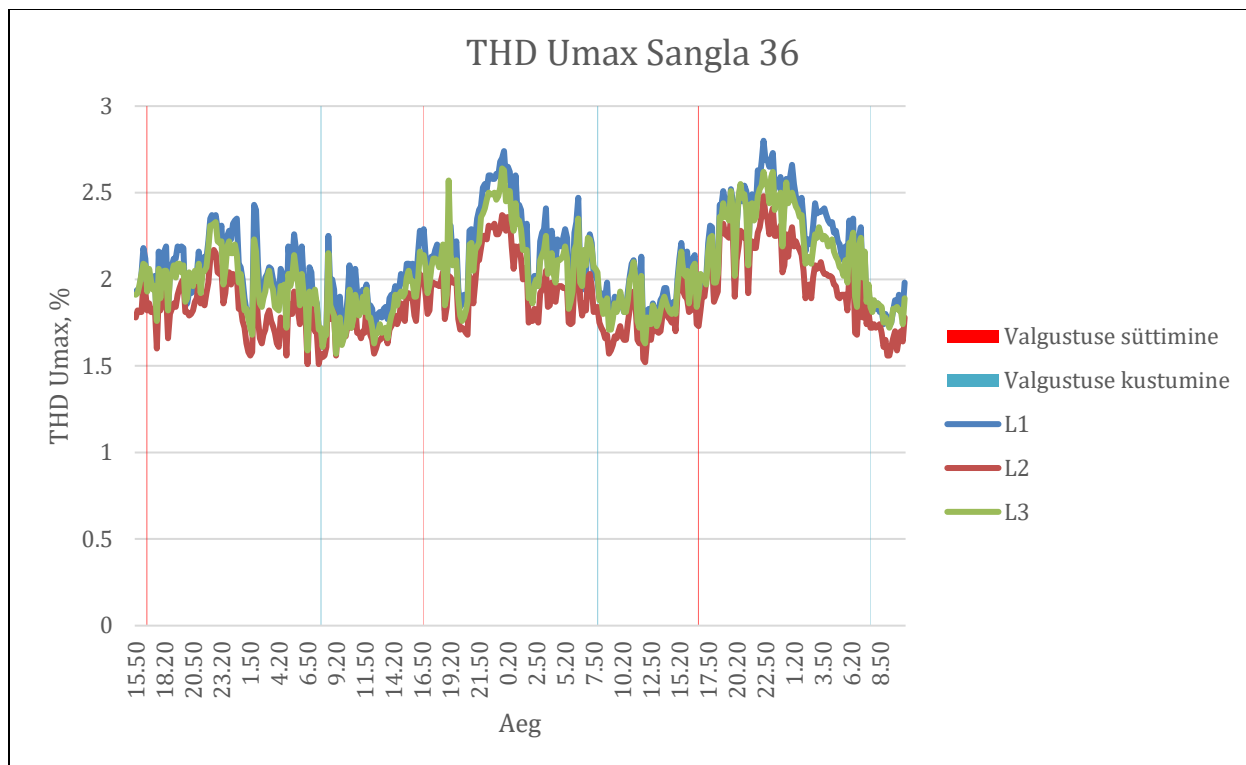
Joonis 4.10. Pinge harmoonmoonutusteguri seos rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgu talitlusvõimsusega



Joonis 4.11. Pinge harmoonmoonutusteguri seos rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgu talitlusvõimsusest



Joonis 4.12. Pinge harmoonmoonutustegur 3 ööpäeva jooksul rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgus

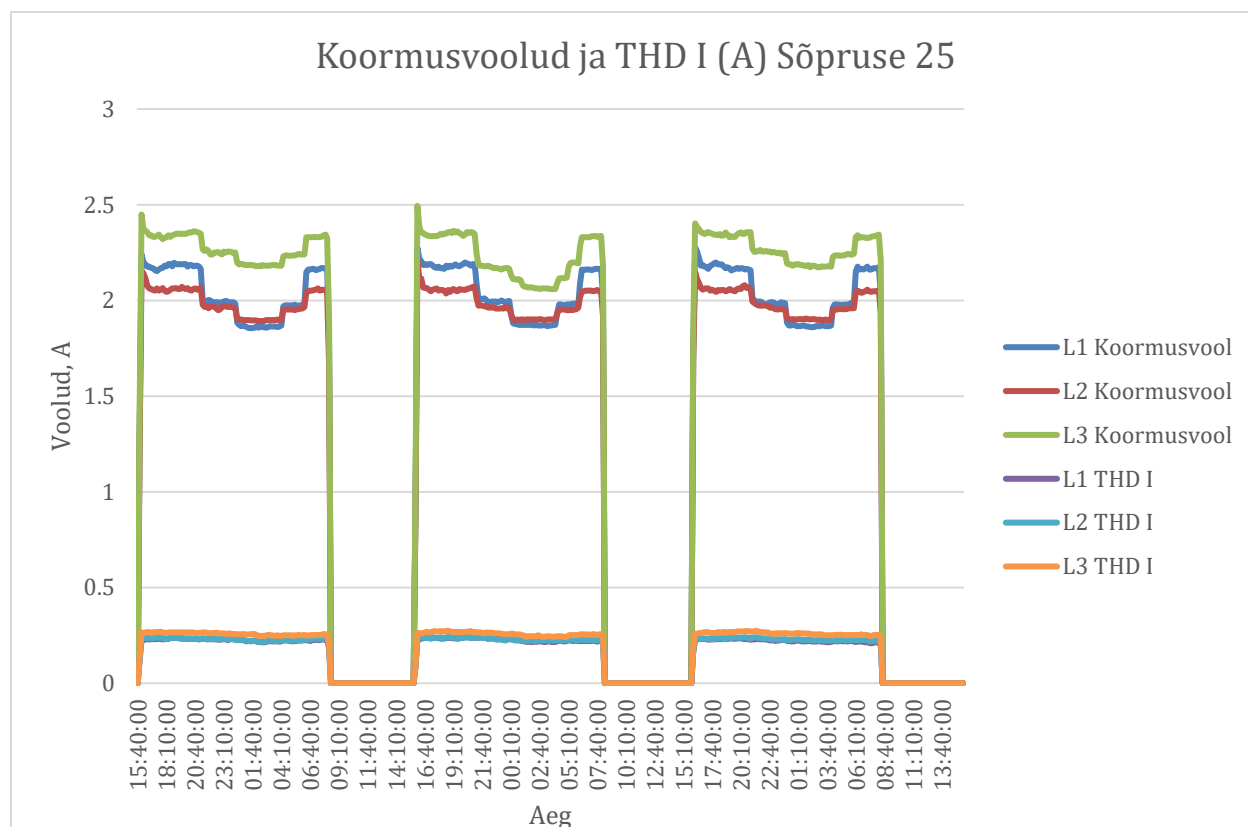


Joonis 4.13. Pinge harmoonmoonutustegur 3 ööpäeva jooksul rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgus

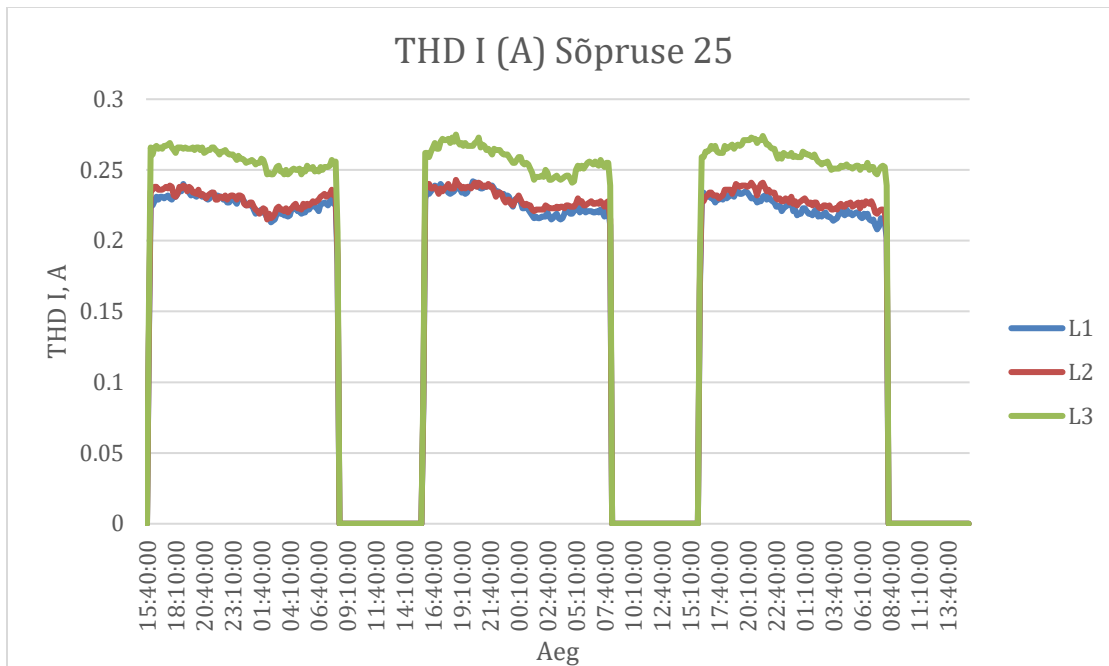
Joonisel 4.10 ja 4.11 on välja toodud rekonstrueeritud ja rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgu harmoonmoonutusteguri osakaalu sõltuvus tänavavalgustuse tarbimisvõimsusega. Graafikutelt võib välja lugeda, et mõlema tänavavalgustusvõrgu harmoonmoonutusteguri trendijoon on tõusvas suunas vastavalt tarbimisvõimsuse kasvule. Trendijoonte võrrandite järgi kasvas rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgus harmoonmoonutustegur peaaegu 0,44% ning rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgus 0,3-0,6%. Jooniselt 4.10 on samuti näha, et harmoonmoonutustegur võib tõusta kuni 5,5 protsendini, kuid seda ei saa seostada tänavavalgustusvõrgust tulevate harmoonilistega.

Joonistel 4.12 ja 4.13 on välja toodud harmoonmoonutustegurit rekonstrueeritud ja rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgus ajaliselt. Vertikaalsed jooned graafikutel näitavad valgustuse süttimise ja kustumise aega. Punase vertikaaljoonega on näidatud valgustuse süttimise hetk ning sinise vertikaalse joonega valgustuse kustumise hetk. Joonisel 4.13 on rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgu graafik, kus on näha ebakorrapärasest harmoonilistest moonutustest kõikumist. Sellest võib järeldada, et vanema tehnoloogia tänavavalgustuslambid võivad tekitada võrku harmoonilisi moonutusi, kuid need pole piisavalt

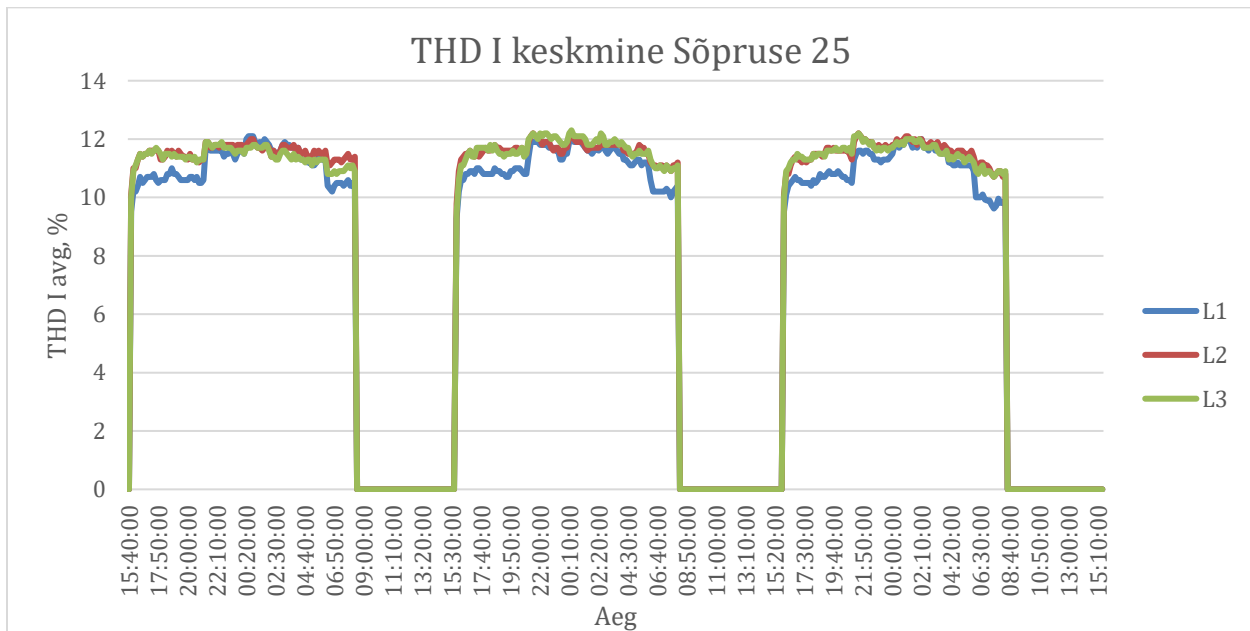
märkimisväärsed, et neid oleks võimalik graafikult selgelt välja lugeda. Oluline tähelepanek on see, et Sangla 36 kilbi piirkonnas on naatriumlambid, mis töötavad samuti keskööst alates hämardamisrežiimil läbi kontrolleri. Kui aga vaadelda joonist 4.12, kus on graafikul rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgu harmooniliste moonutuste osakaal ajaliselt, siis näeme korrapäraseid tõuse ja languseid. Alates leedvalgustite süttimise hetkest tõuseb harmooniliste moonutuste osakaal ning saavutab maksimumi umbes kell 22:00. Kui aga moonutused oleksid sõltuvuses tänavavalgustusvõrgust, siis näeksime graafikul terve põlemisperioodi jooksul ühtlast kõrget harmoonmoonutustegurit. Pigem on valgustuse süttimine kokku langenud ajaga, mil Annelinna piirkonna elanikud jõuavad töölt koju ning alustavad koduste toimetustega. Graafikult on ka selgelt näha, et öö saabudes langeb harmoonmoonutustase madalale. Mõõdetud piirkondade põhjal ei saa seostada harmoonmoonutusteguri muutumist tänavavalgustusvõrguga.



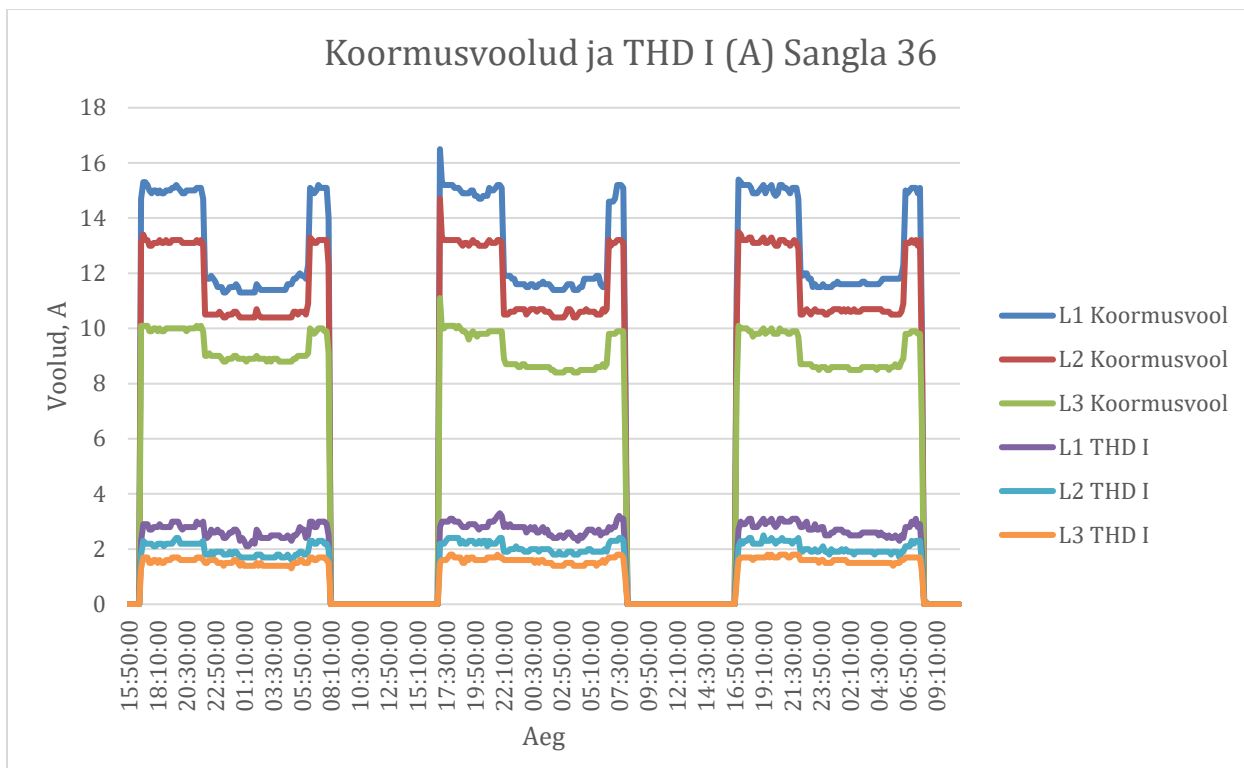
Joonis 4.14. Rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgu koormusvoolud ja vooluharmonikute summaarne moonutustegur (period 26.11.2021-29.11.2021)



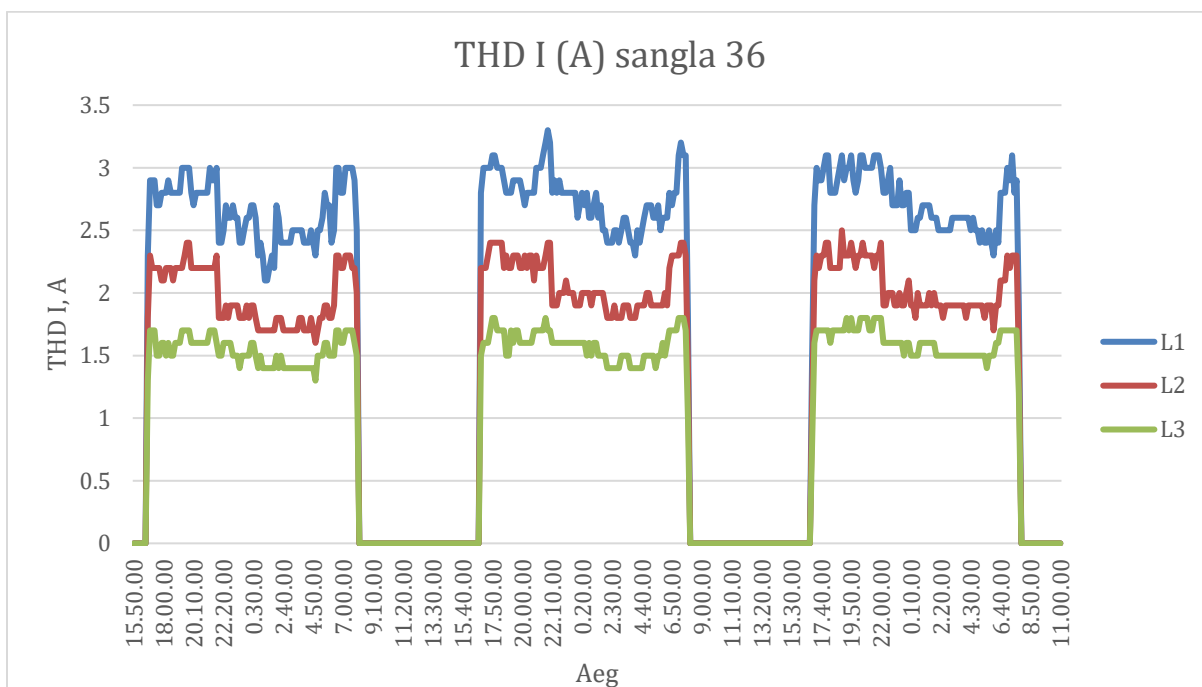
Joonis 4.15. Vooluharmonikute summaarne moonutustegur rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgus (periood 26.11.2021-29.11.2021)



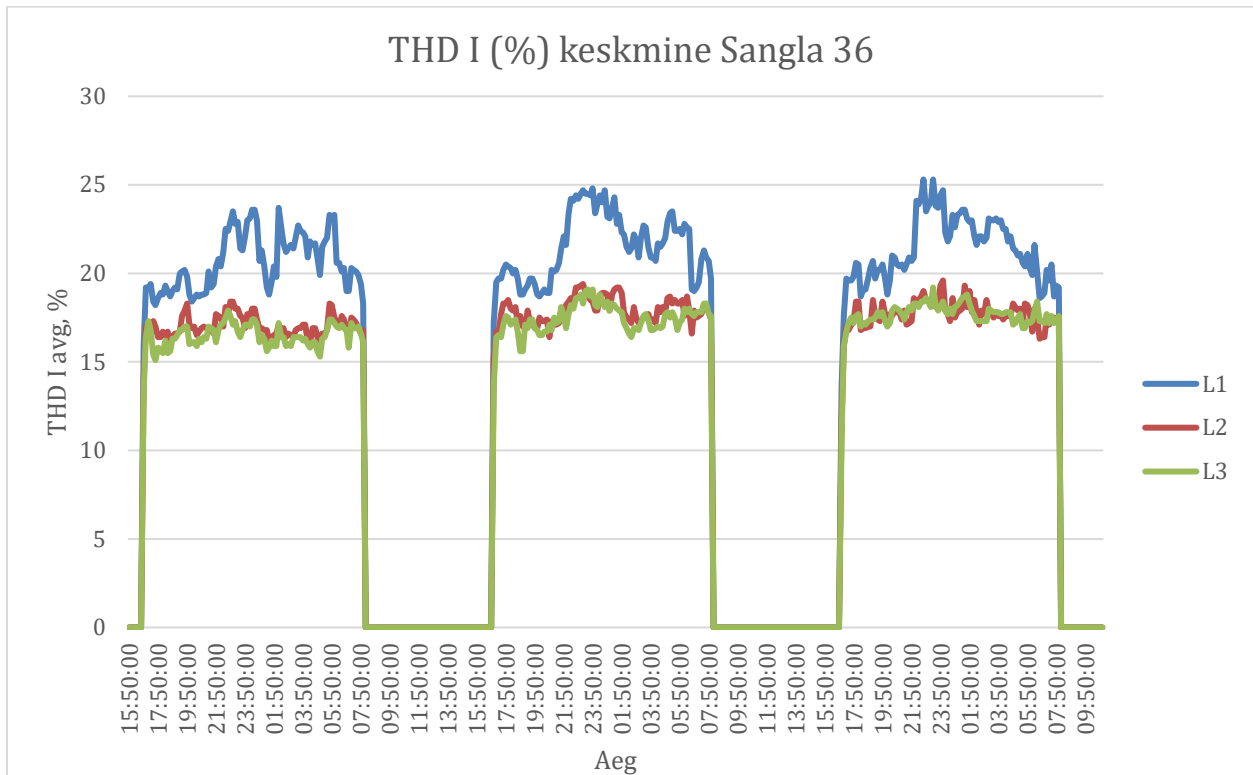
Joonis 4.16. Vooluharmonikute summaarse moonutusteguri osakaal protsentuaalselt rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgus (periood 26.11.2021-29.11.2021)



Joonis 4.17. Rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgu koormusvoolud ja vooluharmonoonikute summaarne moonutustegur (periood 31.01.2022-03.02.2022)



Joonis 4.18. Vooluharmonoonikute summaarne moonutustegur rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgus (periood 31.01.2022-03.02.2022)



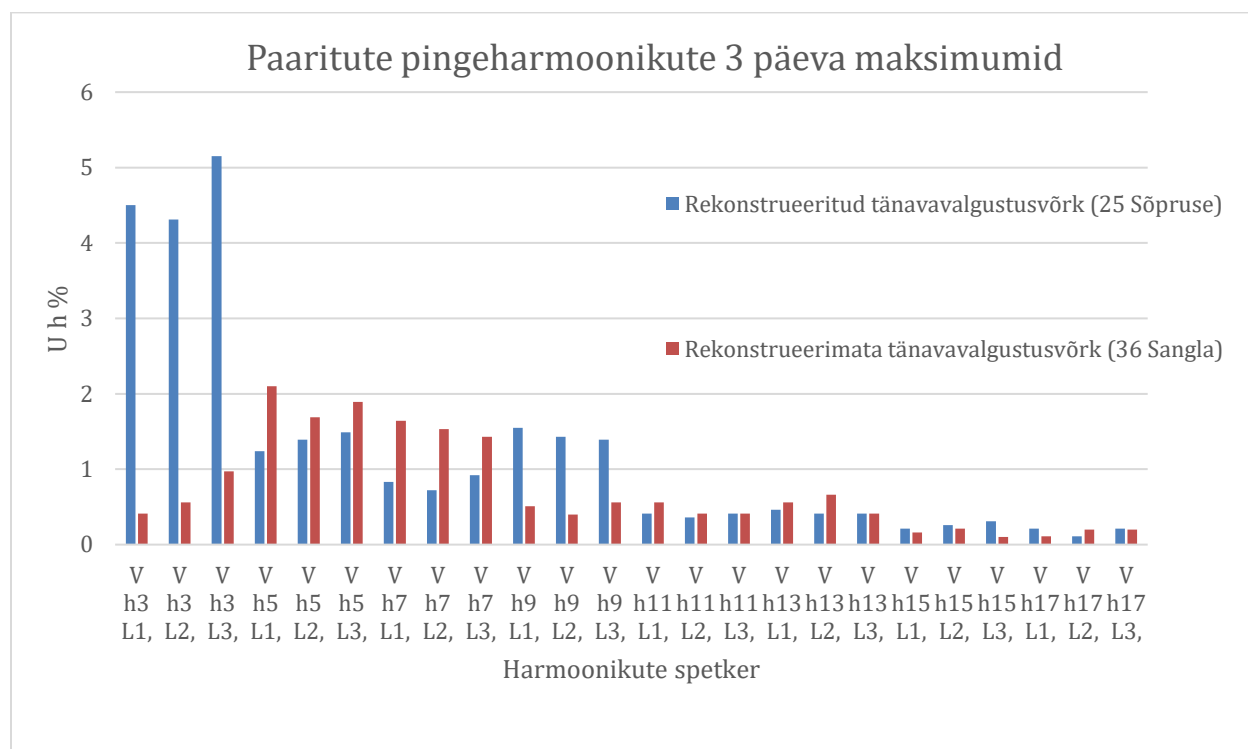
Joonis 4.19. Vooluharmonikute osakaal % rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgus (periood 31.01.2022-03.02.2022)

Joonisel 4.14 on välja toodud rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgu koormusvoolud ja vooluharmonikute summaarne moonutustegur 3 päeva jooksul. Jooniselt on näha, et uues tänavavalgustusvõrgus on koormusvoolud üsna madalad. Süttimise hetkel tõusevad voolud peaaegu 2,5 amprini kolmandas faasijuhis ning Keskmine koormusvool selles tänavavalgustusvõrgus on 2 amprit. Joonisel 4.15 on välja toodud eraldi vooluharmonikute summaarne moonutustegur 3 päeva jooksul. Vooluharmonikute osa jääb faasides vahemikku 0,22 kuni 0,27 amprit. Jooniselt 4.16 võib näha vooluharmonikute osakaalu koormusvooludest, 10-12%. Graafikult on näha koormusvoolude järgi, kuidas toimub eelprogrammeeritud valgustites hämardamine vastavalt Tartu linna hämardamisgraafikule. Uurides vooluharmonikute suhet valgustite hämardamisega, siis on näha graafikult 4.16, et leedvalgustite hämardamisel vooluharmonikute summaarne moonutustegur protsentuaalselt kasvab umbes 1% võrra.

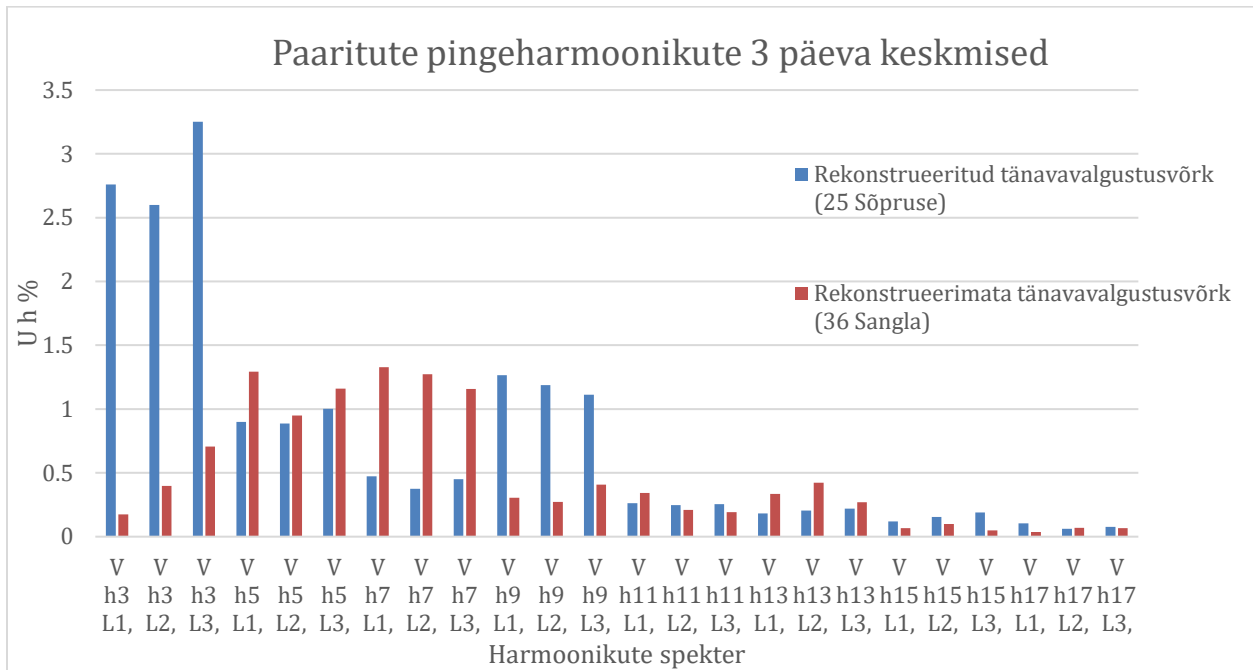
Joonisel 4.17 on välja toodud rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgu koormusvoolud ja vooluharmonikute summaarne moonutustegur 3 päeva jooksul. Joonisel on näha, et rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgus on koormusvoolud ootuspäraselt kõrgemad, kui

uues tänavavalgustusvõrgus. Süttimise hetkel tõusevad voolud peaaegu 16 amprini esimeses faasijuhis ning keskmine koormusvool selles tänavavalgustusvõrgus jääb 10-13 ampri juurde. Graafikult on ka näha koormusvoolude järgi, kuidas toimub valgustites hämardamine kontrolleriatega. Joonisel 4.18 on välja toodud eraldi vooluharmonoonikute summaarne moonutustegur 3 päeva jooksul. Vooluharmonoonikute osa jääb faasides vahemikku 1,5 kuni 3 amprit, kuna faasid on pigem ebaühtlaselt koormatud. Jooniselt 4.19 võib välja lugeda vooluharmonoonikute protsentuaalset osakaalu koormusvooludest. Protsentuaalselt on vooluharmonoonikuid koormusvoolus 15-25%. Kui uurida vooluharmonoonikute suhet valgustite hämardamisega, siis näeme graafikult 4.19, et hämardamisel vooluharmonoonikute summaarne moonutustegur protsentuaalselt hämardamisel kasvab.

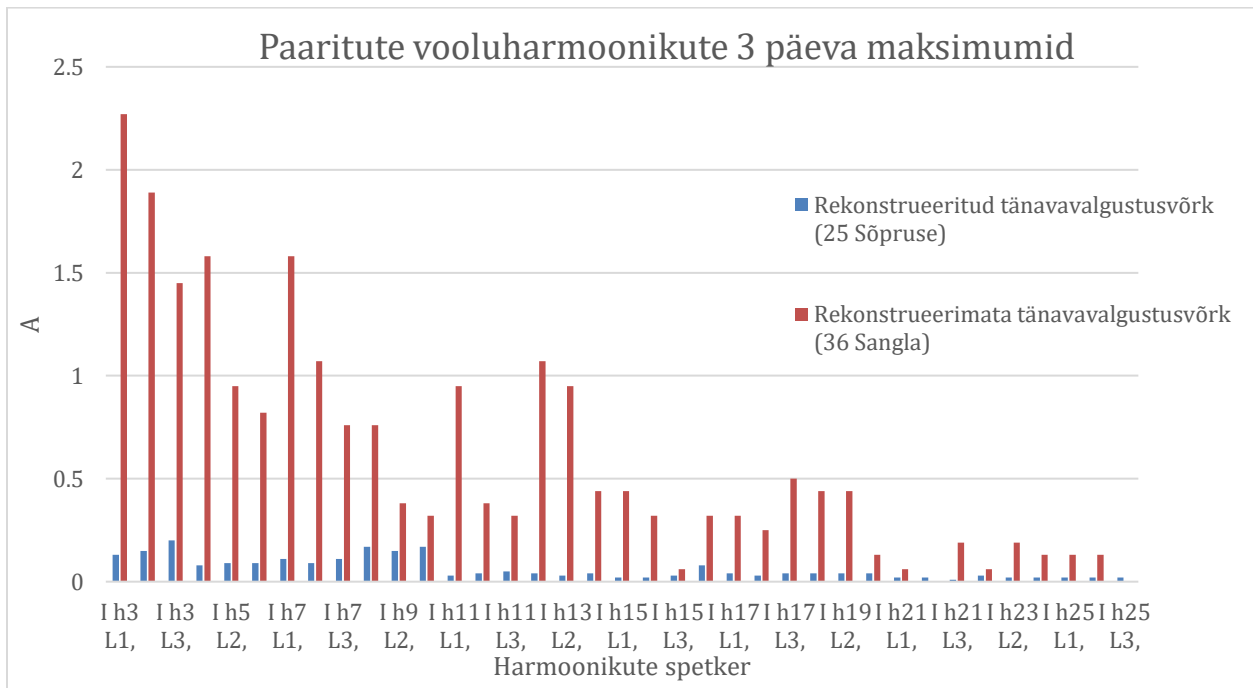
Võrreldes rekonstrueeritud ja rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrku Sõpruse 25 ja Sangla 36 piirkondade näitel, siis näeme, et rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgus on vooluharmonoonikute osakaal protsentuaalselt kaks korda kõrgem. Kui võrrelda summaarset vooluharmonoonikute moonutustegurit, on rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgus THD I pea kümme korda kõrgem. Kõrgem THD I rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgus on tingitud ka kõrgematest koormusvooludest.



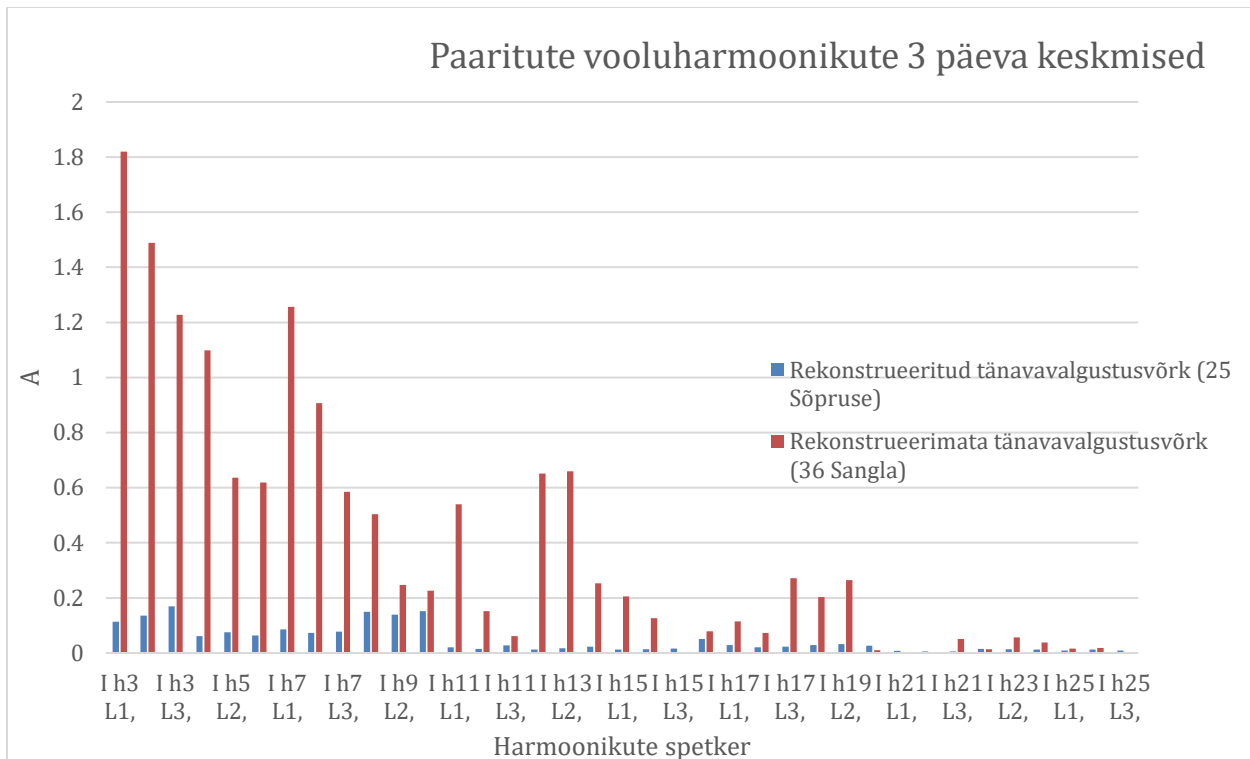
Joonis 4.20. Paaritute pingeharmonoonikute maksimumide spektri võrdlus rekonstrueerimata ja rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgus



Joonis 4.21. Kolme päeva keskmiste paaritute pingeharmonikute spektri võrdlus rekonstrueerimata ja rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgus



Joonis 4.22. Paaritute vooluharmonikute maksimumide spektri võrdlus rekonstrueerimata ja rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgus

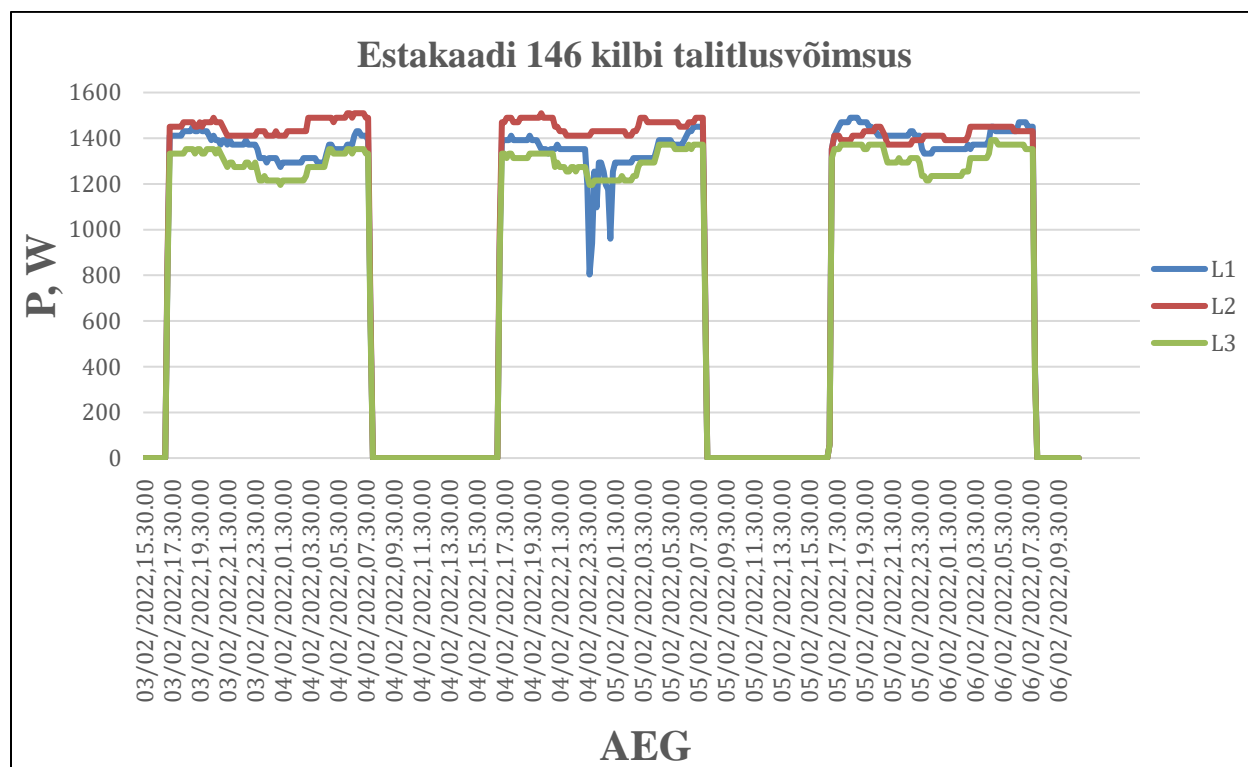


Joonis 4.23. Kolme päeva keskmiste paaritute vooluharmonikute spektri võrdlus rekonstrueerimata ja rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgus

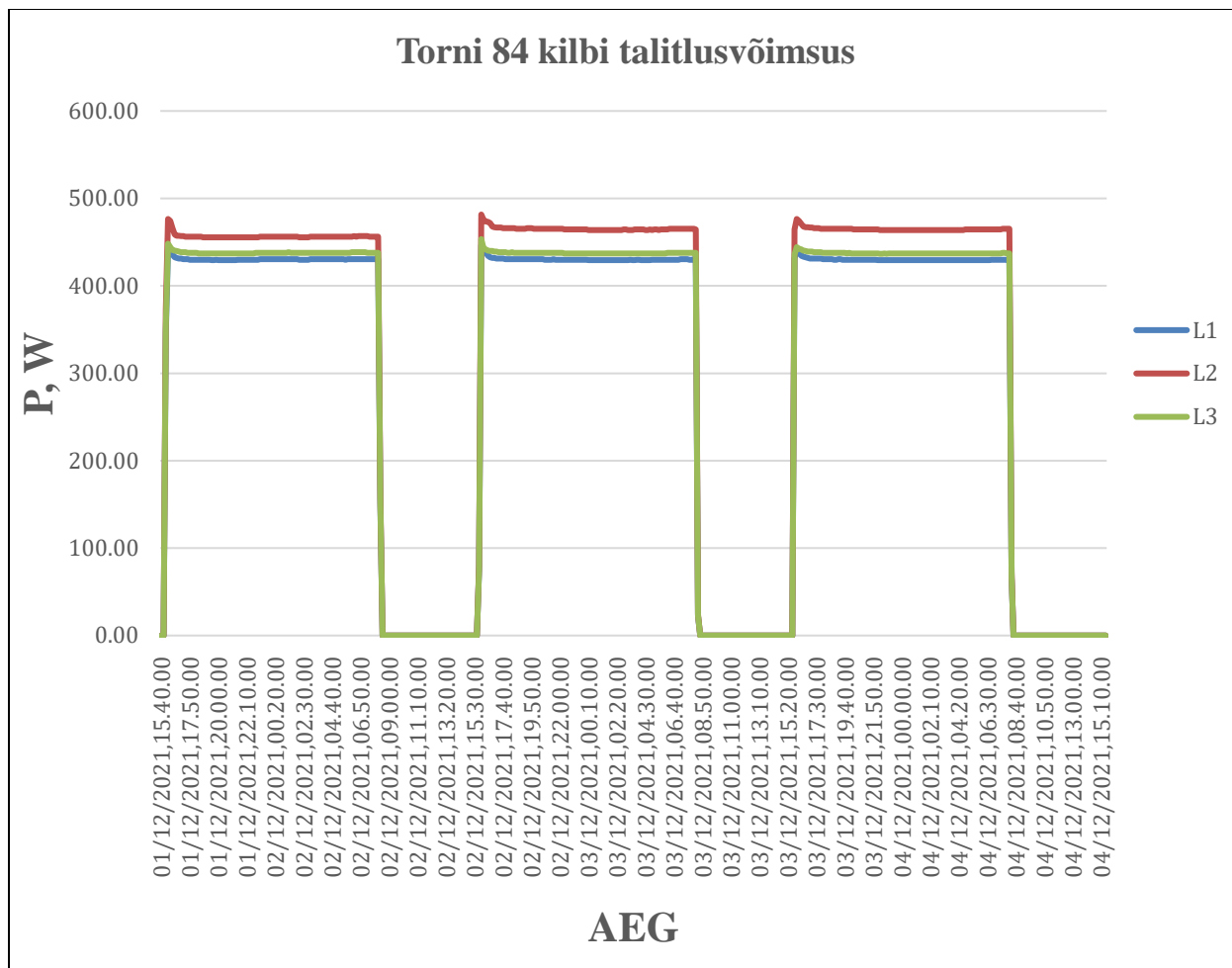
Joonistel 4.20 ja 4.21 on välja toodud paaritute pingeharmonikute 3. päeva keskmiseid ja maksimaalseid spektreid faaside kaupa. Tulpdiagrammilt võib välja lugeda, et protsentuaalselt on rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgus pingeharmonikuid rohkem kolmandat ja üheksandat järku ning rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgus viiendat ja seitsmendat järku. Pingeharmonikuid mõjutavad ka teised tarbijad võrgus. Kuna kilbipiirkond Sõpruse 25 asub Annelinnas kortermajade vahel, siis tõenäoliselt kõrged pingeharmonikud on tekitatud Annelinna elanike poolt. Kilbipiirkond Sangla 36 aga asub piirkonnas, kus on eramajad ning tarbimist vähem. Seetõttu pole võimalik võrrelda rekonstrueeritud ja rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrke eelnimetatud tulpdiagrammide põhjal. Joonistel 4.22 ja 4.23 on välja toodud paaritute vooluharmonikute kolme päeva keskmiseid ja maksimaalseid spektreid faaside kaupa. Tulpdiagrammidel on näha selget vooluharmonikute ülekaalu rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgus. Igas spektris on näha vanas valgustusvõrgus kordades rohkem vooluharmonikuid, kui seda on uues valgustusvõrgus. Kui vaadelda graafikutelt, millised harmoonikute spektreid leidub tänavavalgustusvõrgus, siis näeme, et põhiliselt esineb kolmandat, viiendat, seitsmendat ja üheksandat järku pinge- ja vooluharmonikuid.

4.1.2 Mõõtmised juhtimiskilpide piirkondades 146 Estakaadi ja 84 Tornis

Estakaadi ja Tornis juhtimiskilpide piirkonnad valiti võrdlusesse, kuna need on valgustite arvu poolest sarnased, Estakaadi piirkonnas on kokku 30 naatriumvalgustit metall- ja raudbetoonmastidel ning elektritoide nii õhu kui kaabelliiniga. Tornis kilbi piirkonnas 31 leedvalgustit metallist mastide otsas ning kaabeldus on ehitatud maakaabelliiniga AXPK 4G25. Tornis tänavavalgustuse juhtimiskilp asub Annelinna piirkonna südames, Anne tn 82 ja 84 hoovis. Estakaadi tänavavalgustuse juhtimiskilp asub Siili tänaval, kus on lisaks tänavavalgustusele ka kolm uuemat kortermaja. Estakaadi kilbi piirkonnas kasutusel naatriumvalgustid on võimsusega 70-150W. 70W valgusteid on 6 tk, 100W valgusteid on 16tk ning 150W valgusteid 8tk. Estakaadi piirkonna installeeritud koguvõimsus on 3220W. Tornis kilbi piirkonnas on kasutusel uued Philips leedvalgustid võimsusega 22 ja 51W ning piirkonna installeeritud koguvõimsus on 1348W. Joonisel 3.24 ja 3.25 on välja toodud Estakaadi ja Tornis kilbi 3-ööpäeva tarbimisvõimsused vattides.



Joonis 4.24. Estakaadi kilbi võimsus perioodil 01.12.2021-04.12.2021

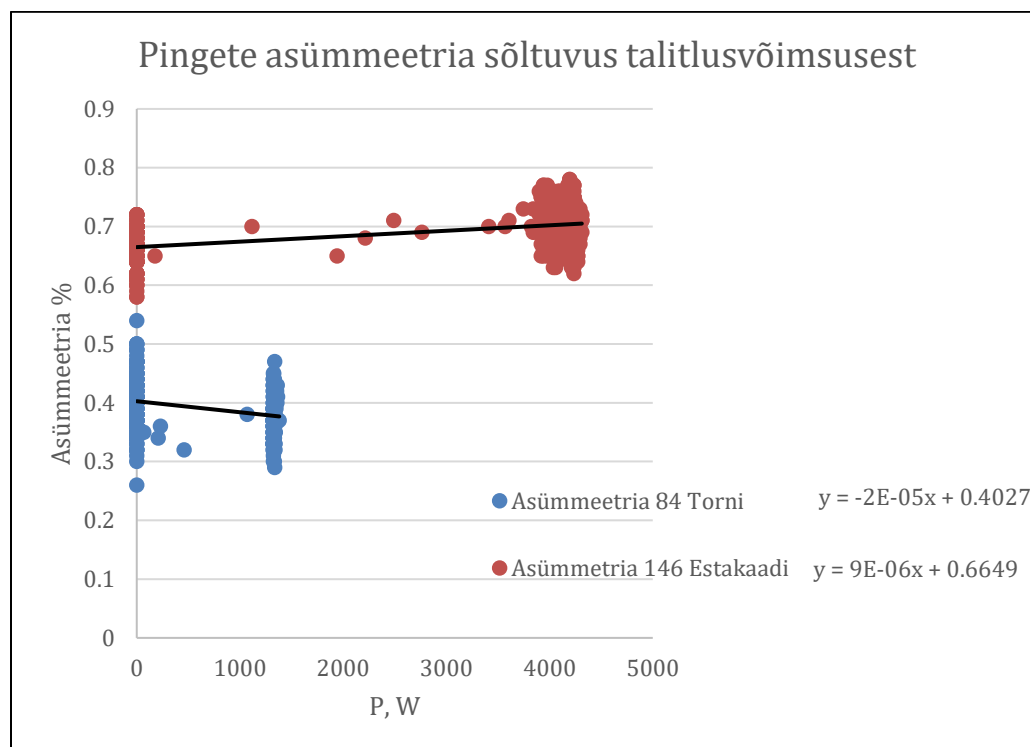


Joonis 4.25. Torni kilbi võimsus perioodil 01.12.2021-04.12.2021

Joonisel 4.24 on välja toodud, et valgustus süttis Estakaadi valgustuse kilbi piirkonnas umbes kell 17:20. Graafikult on näha, et faasid selles piirkonnas on üsna ühtlaselt koormatud. Kõik faasid on koormatud võimsusega 1200-1400W. Võrreldes eelnevalt uuritud Sangla piirkonnaga on näha, et hämardamise mõju võimsusele on öösel väiksem. See on põhjusel, et Estakaadi kilbi piirkonnas on varustatud ainult mõned naatriumvalgustid kontrollieriga. Rootsisis toodetud Coala kontrolleri pildi leiab lisas 2. Graafiku kohaselt lülituvad säästurežiimile kell 21-22:00 ning tagasi 100% võimsusega tööle varahommikul.

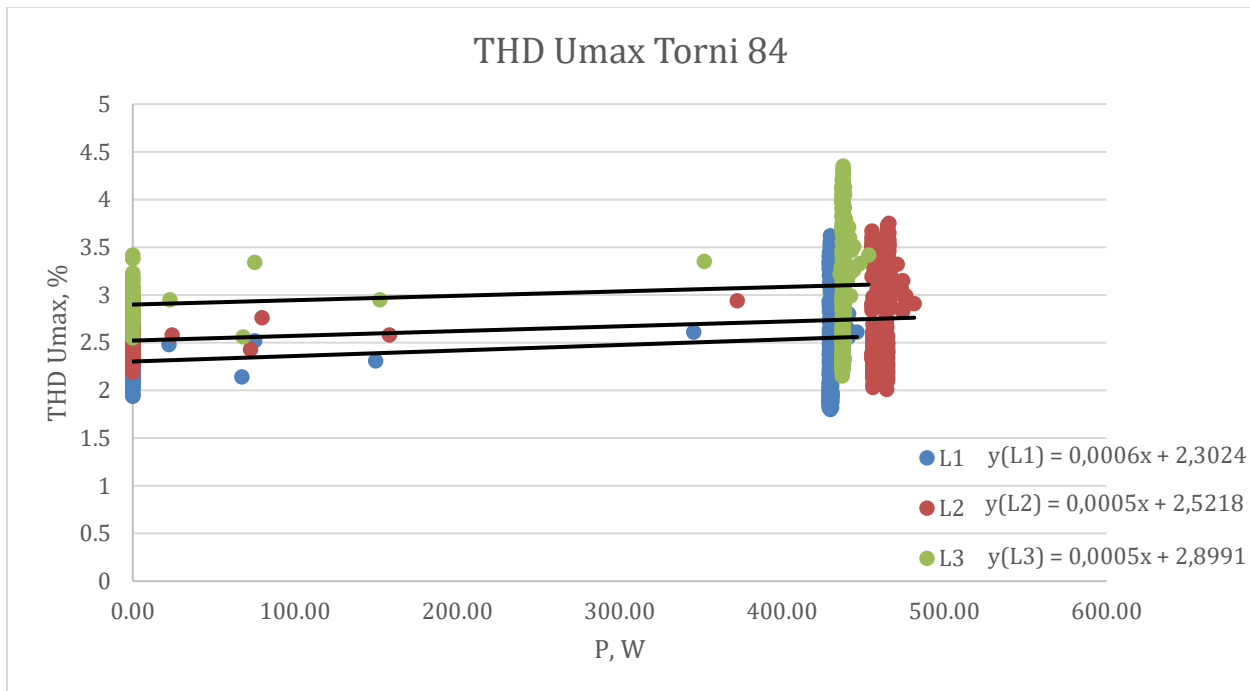
Joonisel 4.25 on kujutatud rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgu võimsusgraafik Torni kilbi piirkonnas. Kuna mõõtmised kilbipiirkonnas on teostatud erinevatel aegadel, siis valgustuse süttimise aeg erinevates kilbipiirkondades graafikutel võib muutuda mitme tunni võrra. Süttimisel töötavad leedvalgustid täisvõimsusel ning faasid on üsna võrdselt koormatud 430W kuni 450W-ni. Torni 84 kilbi piirkonda paigaldatud leedvalgustid töötavad kogu öö vältel 100%

võimsusega. See tähendab, et paigaldatud valgustitele pole tehase poolt hämardamisrežiimi programmeeritud.

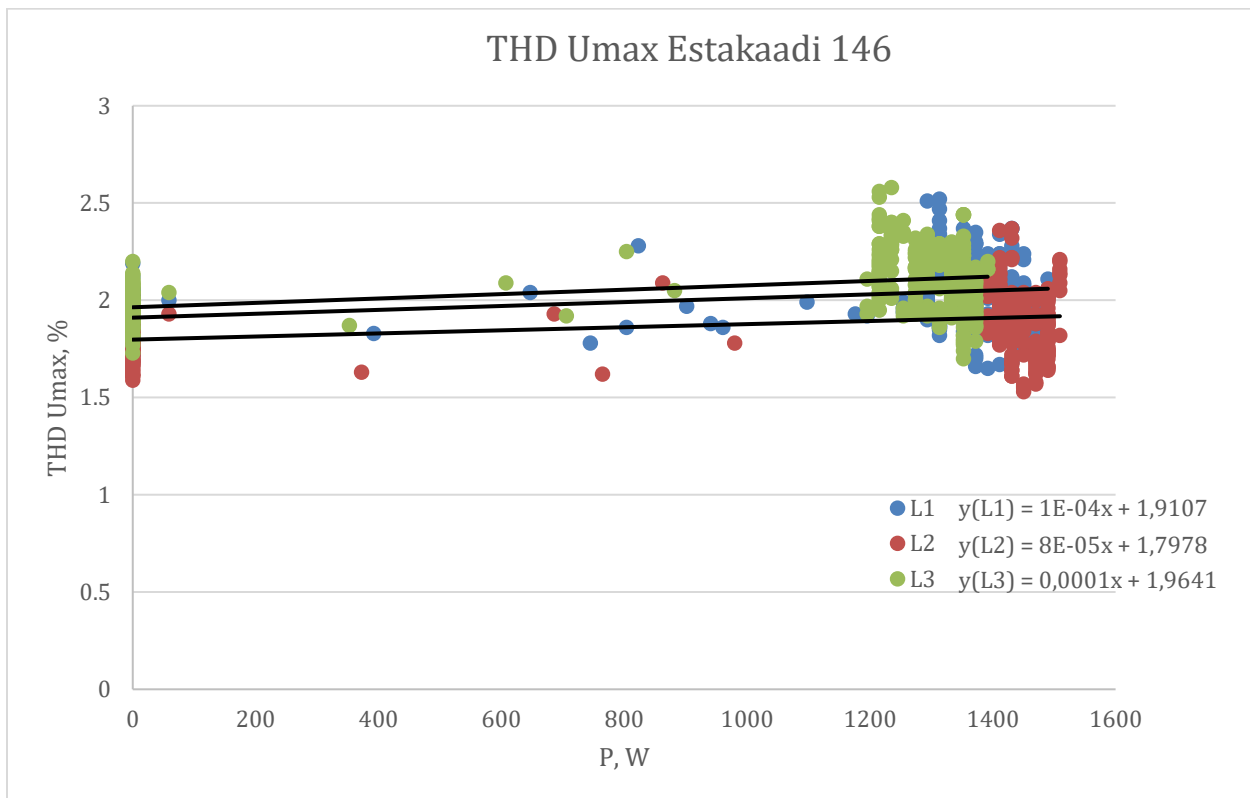


Joonis 4.26. Pingete asümmeetria seos rekonstrueeritud ja rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgu talitlusvõimusega

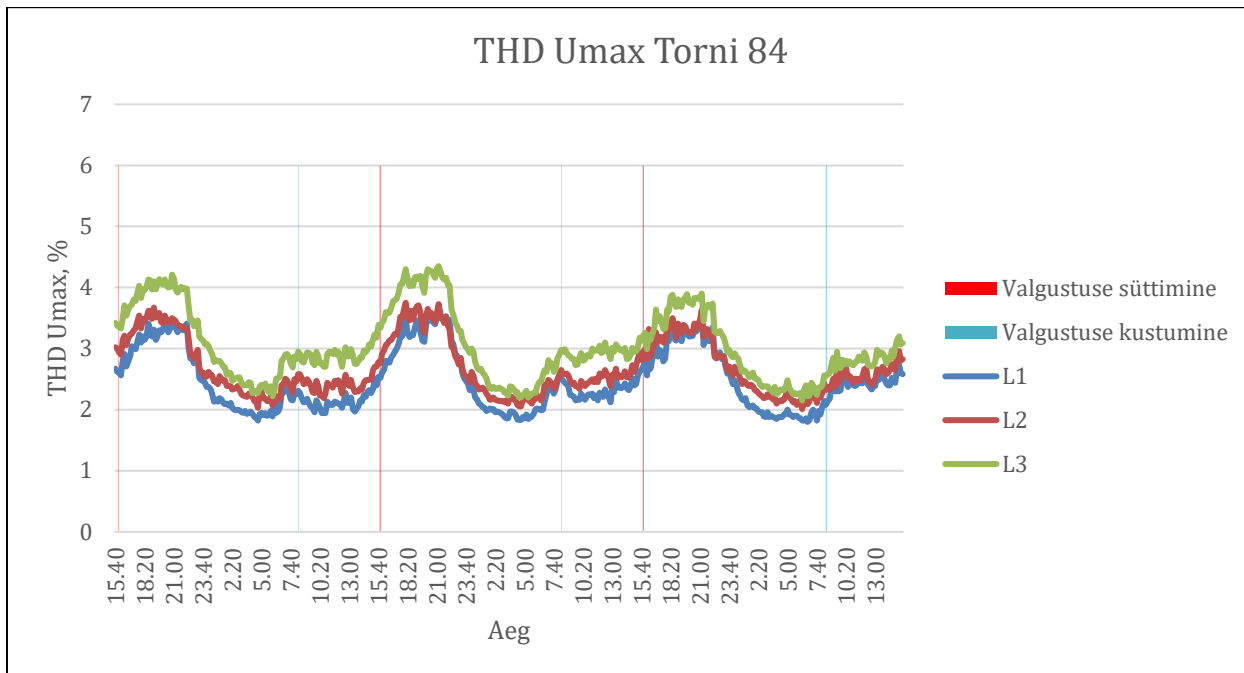
Joonistel 4.26 on välja toodud pingete asümmeetria seos tänavavalgustusvõrgu talitlusvõimsustega. Graafikul on näha, et pingete asümmeetria ei muutu tänavavalgustusvõrgu võimsuse tõusmisel. Joonisel on näha rekonstrueeritud võrgu trendijoone langust ning rekonstrueerimata võrgu trendijoone tõusu. Trendijoonte tõus ja langus on niivõrd madal, et tänavavalgustusvõrgu mõju elektrivõrgu asümmeetriale on minimaalne. Standardiga EVS-EN:50160 on lubatud vastujärgnevuskomponent kuni 2%. Soovituslikult ei tohiks mõõdetud tulemus ületada 1%. Seega antud võrgus mõõdetud asümmeetria tase vastab nii standardile kui ka soovituslikule väärtusele. Samuti on tänavavalgustusvõrgu elektriseadmed kõik ühefaasilised, ning asümmeetria iseenesest täiendavaid lisakadusid ei põhjusta.



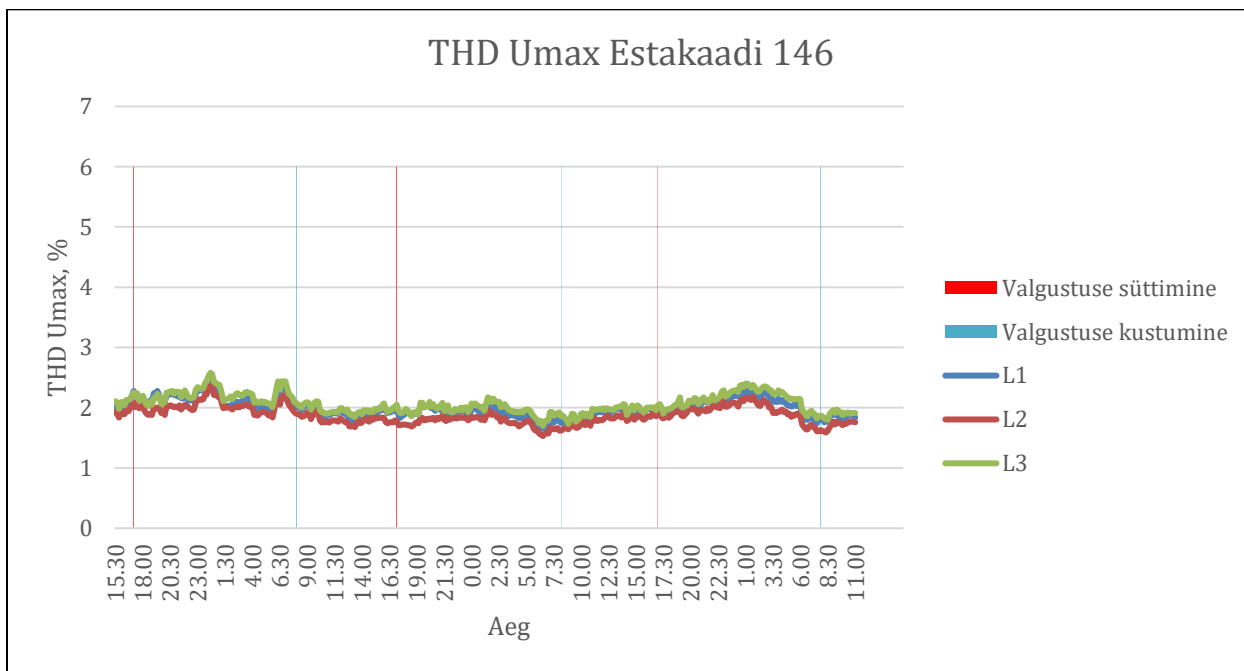
Joonis 4.27. Pinge harmoonmoonutusteguri seos rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgu talitlusvõimsusega



Joonis 4.28. Pinge harmoonmoonutusteguri seos rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgu talitlusvõimsusega



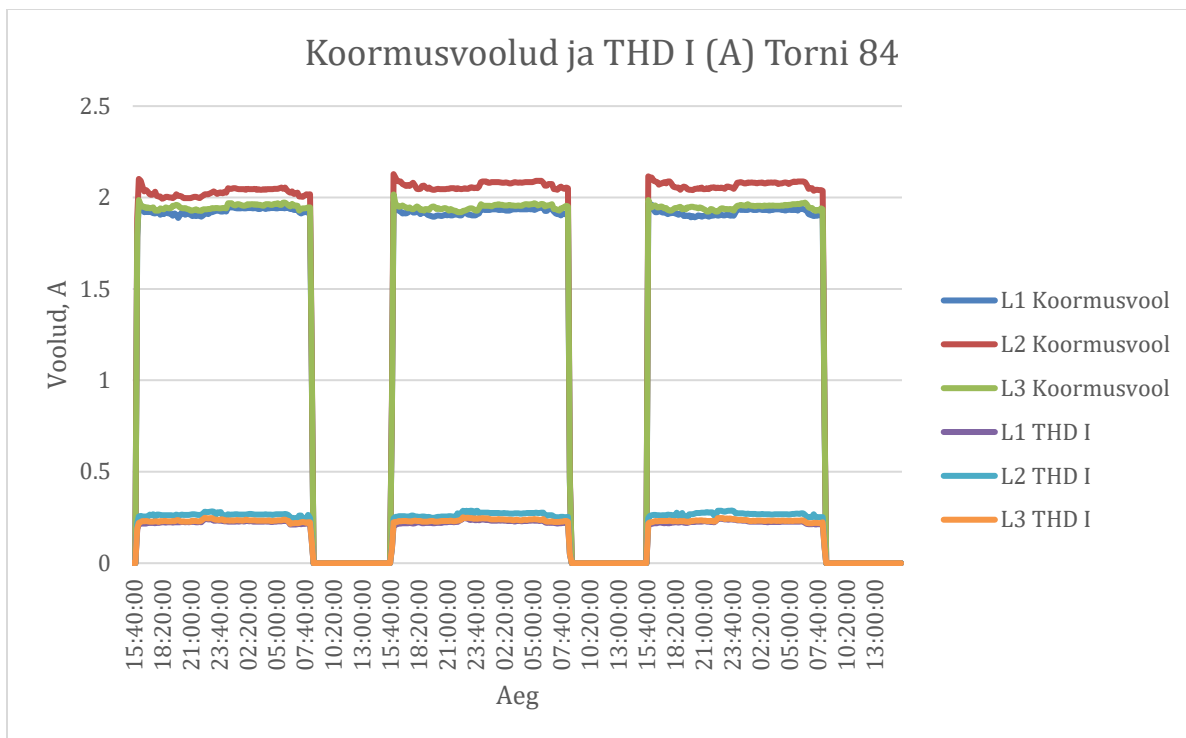
Joonis 4.29. Pinge harmoonmoonutustegur 3 \u00f6\u00f6p\u00e4eva jooksul rekonstrueeritud t\u00e4navavalgustusv\u00f6rgus



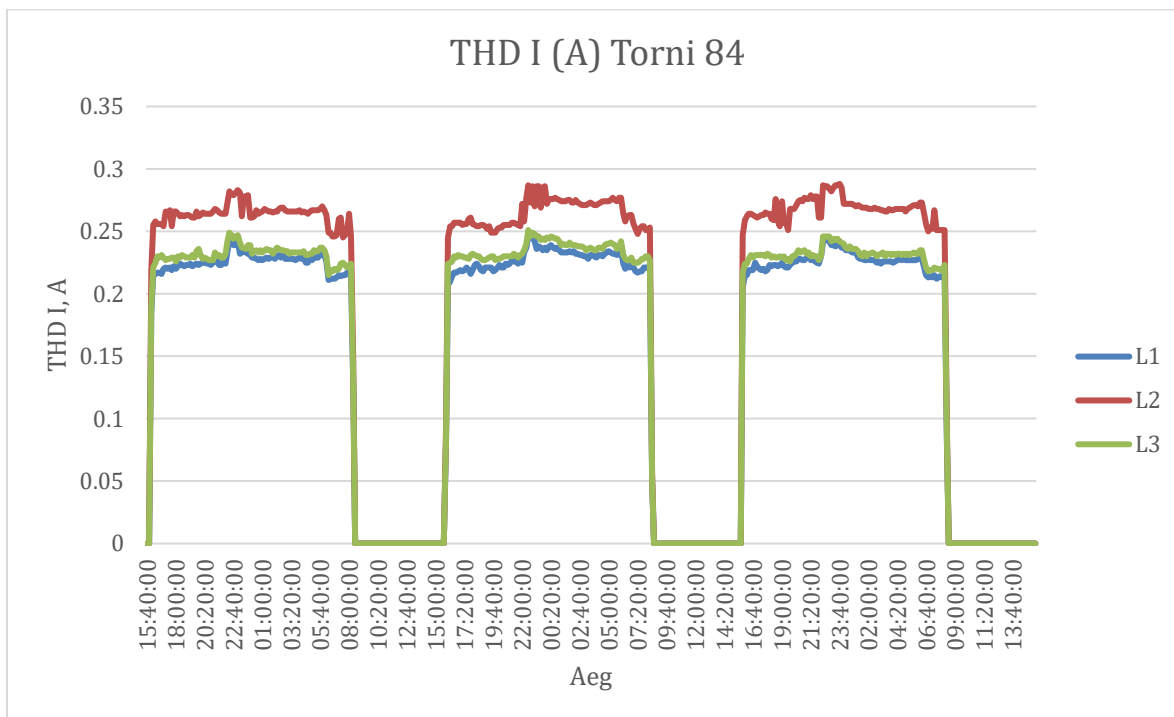
Joonis 4.30. Pinge harmoonmoonutustegur 3 \u00f6\u00f6p\u00e4eva jooksul rekonstrueerimata t\u00e4navavalgustusv\u00f6rgus

Joonisel 4.27 ja 4.28 on välja toodud rekonstrueeritud ja rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgu harmoonmoonutusteguri osakaalu sõltuvus tänavavalgustuse talitlusvõimsusega. Graafikutelt saab välja lugeda, et mõlema tänavavalgustusvõrgu harmoonmoonutusteguri trendijoon on tõusvas suunas vastavalt võimsuse kasvule. Trendijooone võrrandi järgi kasvas rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgus harmoonmoonutustegur 0,3% ning rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgus 0,15%. Jooniselt 3.29 on samuti näha, et harmoonmoonutustegur võib tõusta kuni 4,5 protsendini, kuid seda ei saa seostada tänavavalgustusvõrgust tulevate moonutustega.

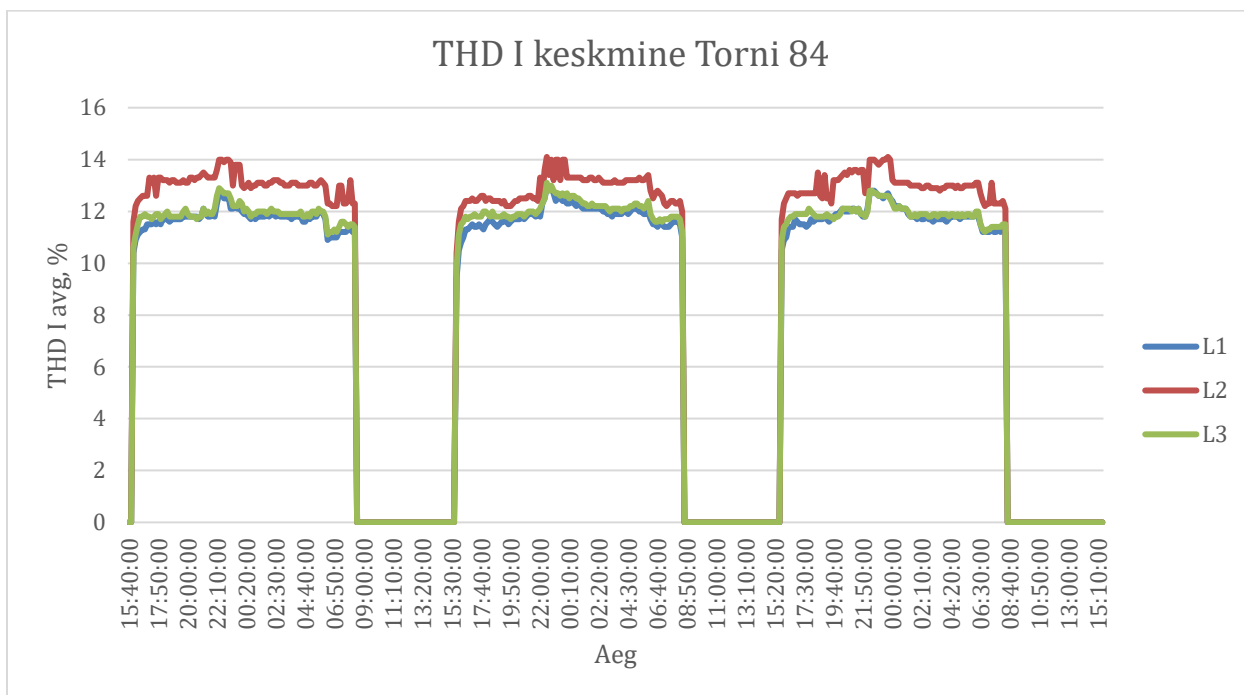
Joonistel 4.29 ja 4.30 on näha harmoonmoonutustegurit rekonstrueeritud ja rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgus ajaliselt. Vertikaalsed jooned graafikutel näitavad valgustuse süttimise ja kustumise ajahetke. Punase vertikaaljoonega on näidatud valgustuse süttimise hetk ning sinise vertikaalse joonega on valgustuse kustumise hetk. Joonisel 4.30 on kujutatud rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgu graafik, kus on näha üsna ühtlast harmooniliste moonutuste taset 2% lähedal. Võrreldes Annelinnas oleva Tornivalgustuskilbiga on moonutuste tase ühtlasem ja vähem mõjutatud teistest tarbijatest. Sellest võib järeldada, et vanema tehnoloogia tänavavalgustuslambid selles piirkonnas võivad tekitada võrku harmoonilisi moonutusi, kuid need pole piisavalt kõrged, et neid oleks võimalik graafikult selgelt välja lugeda. Kui aga vaadelda joonist 4.29, kus on graafik rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgu harmooniliste moonutuste osakaal ajaliselt, siis võib näha korrapäraseid tõuse ja languseid. Harmoonilised moonutused hakkavad tõusma leedvalgustite süttimise hetkest ning saavutavad maksimumi umbes kell 22:00. Kui aga moonutused oleksid sõltuvuses tänavavalgustusvõrgust, siis näeksime graafikul terve põlemisperioodi jooksul ühtlast kõrget harmoonmoonutustegurit. Sarnaselt Sõpruse 25 kilbi piirkonnaga on valgustuse süttimine kokku langenud ajaga, kus Annelinna piirkonna elanikud jõuavad töölt koju ning alustavad koduste toimetustega. Graafikult saab välja lugeda ka selle, et öö saabudes langeb harmoonmoonutustase madalale. Mõõdetud piirkondade põhjal ei saa seostada harmoonmoonutusteguri muutumist tänavavalgustusvõrguga.



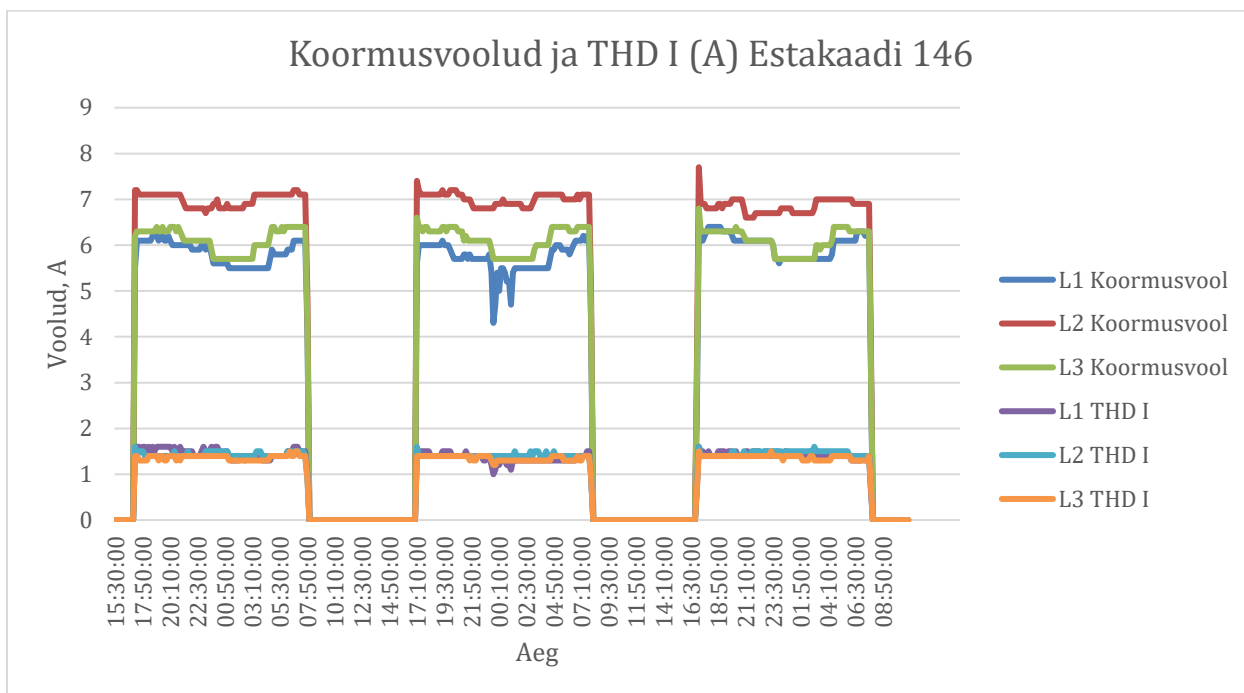
Joonis 4.31. Rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgu koormusvoolud ja vooluharmonikute summaarne moonutustegur (periood 01.12.2021-04.12.2021)



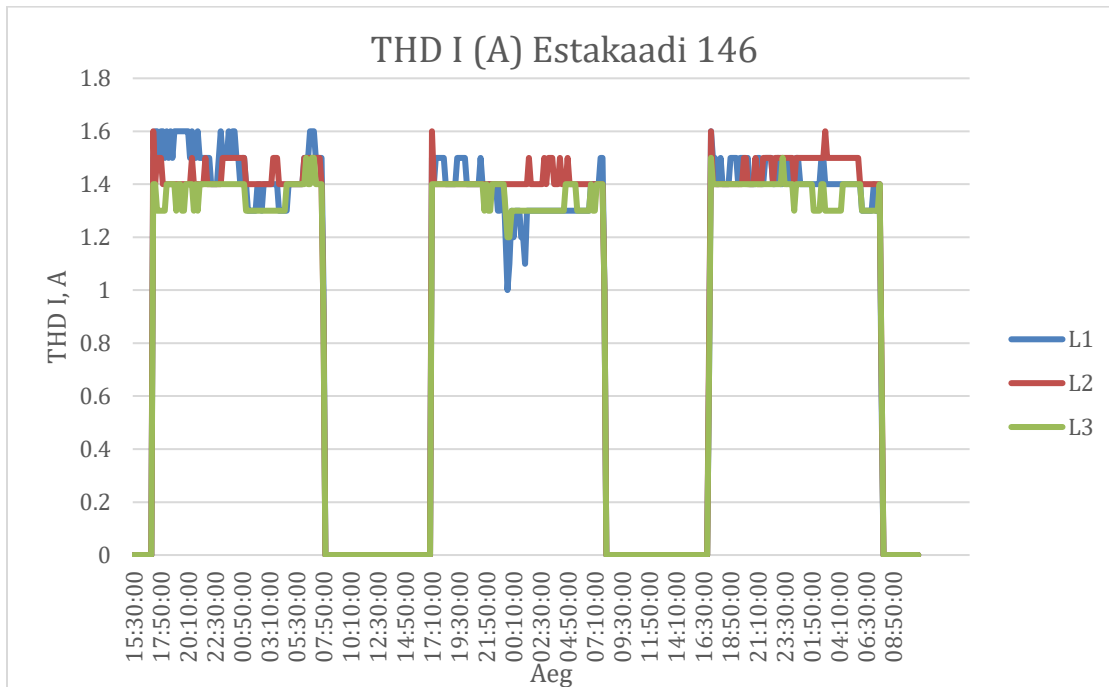
Joonis 4.32. Vooluharmonikute summaarne moonutustegur rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgus (periood 01.12.2021-04.12.2021)



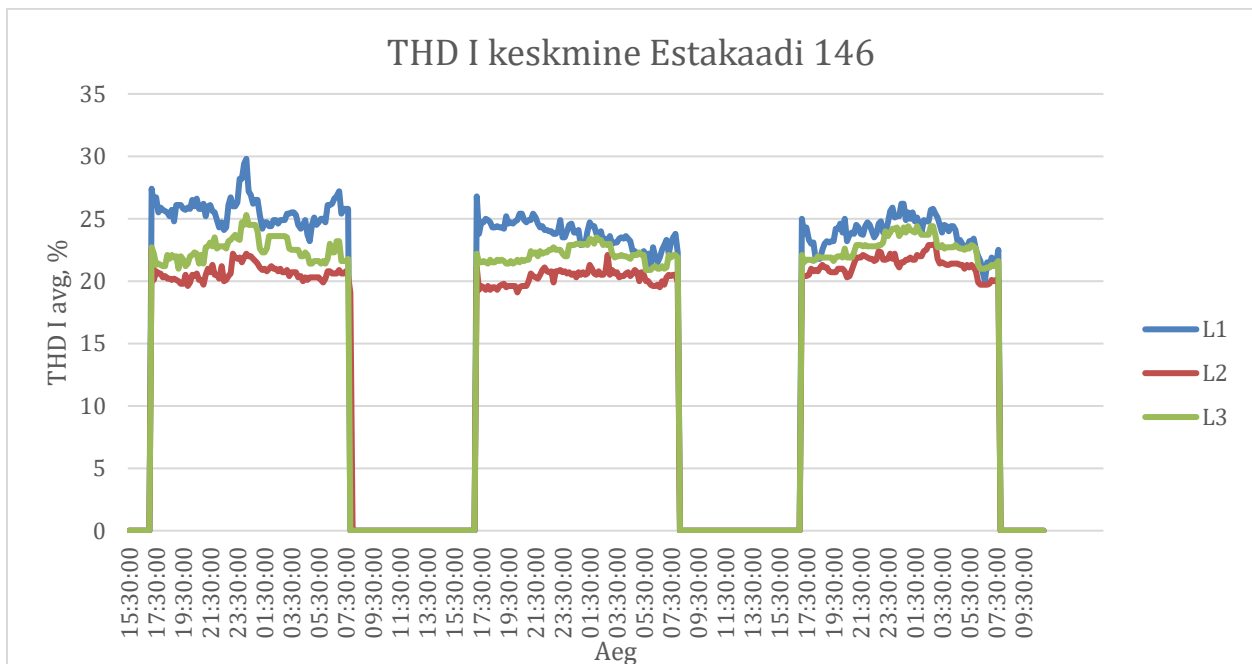
Joonis 4.33 Vooluharmonikute summaarse moonutusteguri osakaal protsentuaalselt rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgus (periood 01.12.2021-04.12.2021)



Joonis 4.34. Rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgu koormusvoolud ja vooluharmonikute summaarne moonutustegur (periood 03.02.2022-06.02.2022)



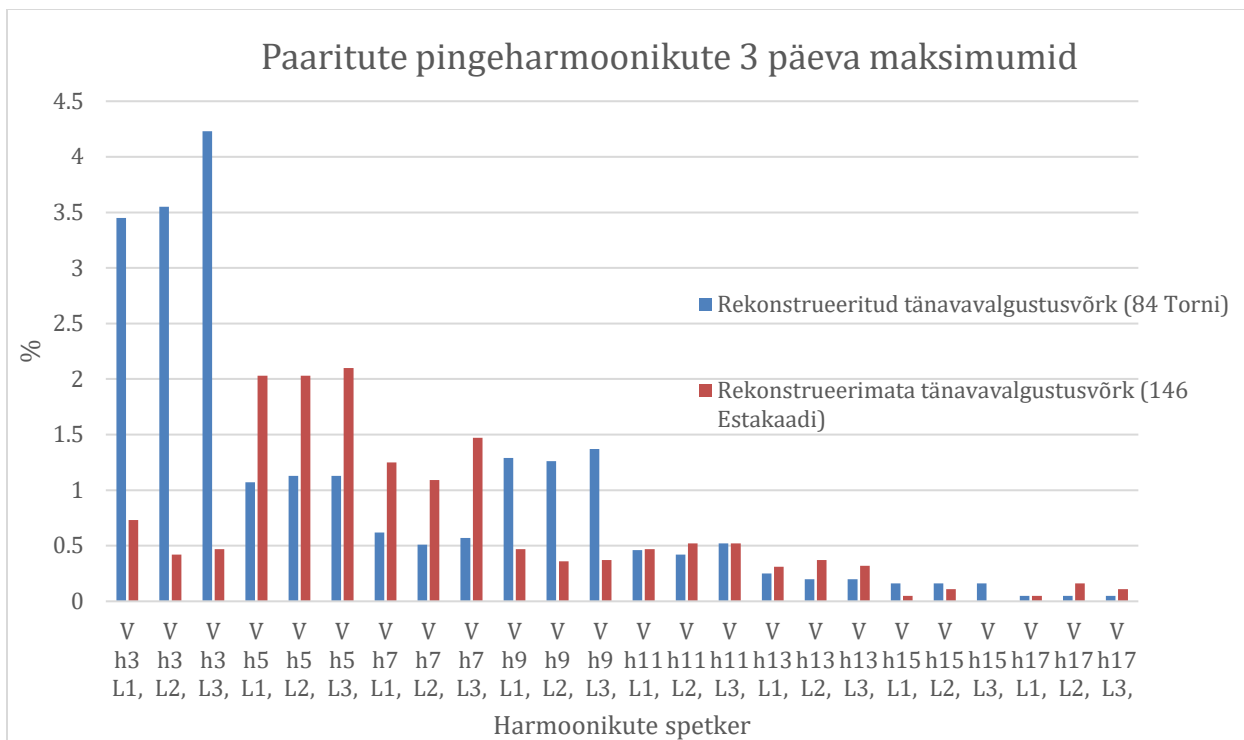
Joonis 4.35. Vooluharmonikute summaarne moonutustegur rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgus (periood 03.02.2022-06.02.2022)



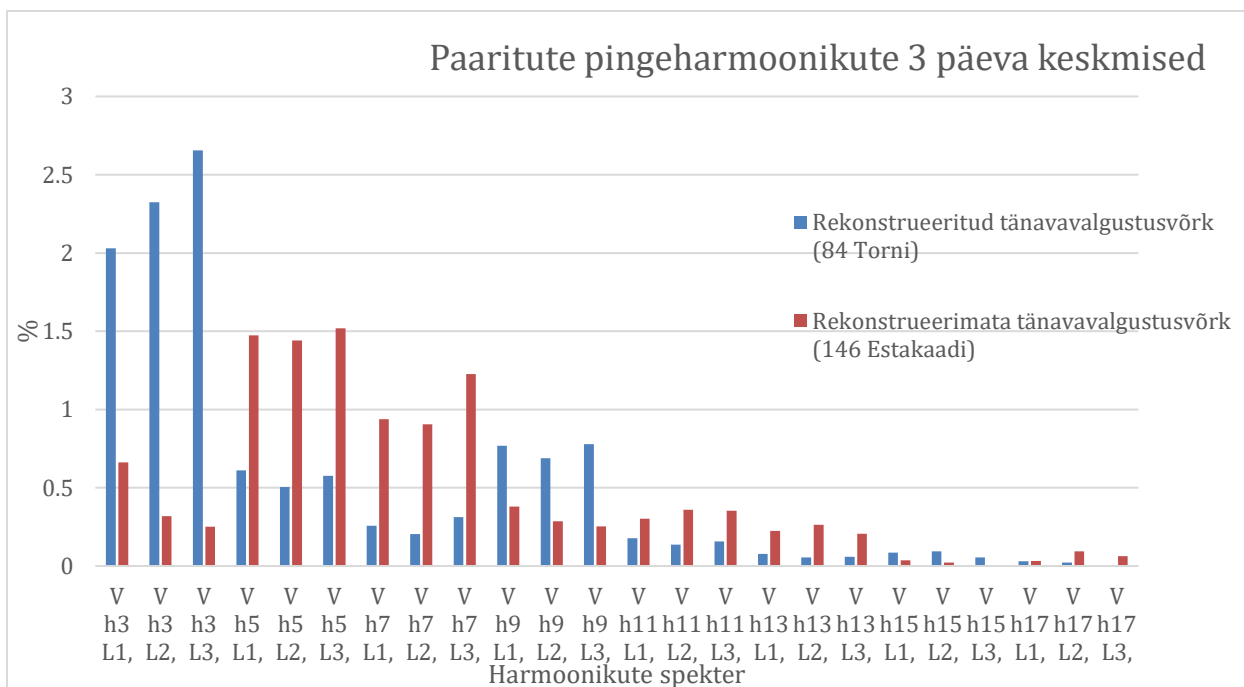
Joonis 4.36. Vooluharmonikute summaarse moonutusteguri osakaal protsentuaalselt rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgus (periood 03.02.2022-06.02.2022)

Joonisel 4.31 on kujutatud rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgu koormusvoolud ja vooluharmonikute summaarne moonutustegur 3 päeva jooksul. Jooniselt on näha, et rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgus on koormusvoolud üsna madalad. Keskmine koormusvool selles tänavavalgustusvõrgus on umbes 2 amprit kõikides faasides. Graafikus nähaolevate koormusvoolude põjal võib väita, et valgustitele ei ole tehases programmeeritud hämardamisrežiimi. Valgustid töötavad kogu aja maksimaalse võimusega. Joonisel 4.32 on välja toodud eraldi vooluharmonikute summaarne moonutustegur 3 päeva jooksul. Vooluharmonikute osa jääb faasides vahemikku 0,23 kuni 0,27 amprit ning Joonisel 4.33 on näha vooluharmonikute osakaalu protsentuaalselt koormusvoolus 11-14%. Võrreldes eelnevalt vaadeldud rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgu piirkonda (Sõpruse 25), siis protsentuaalselt on vooluharmonikute osakaal umbes protsendi võrra kõrgem.

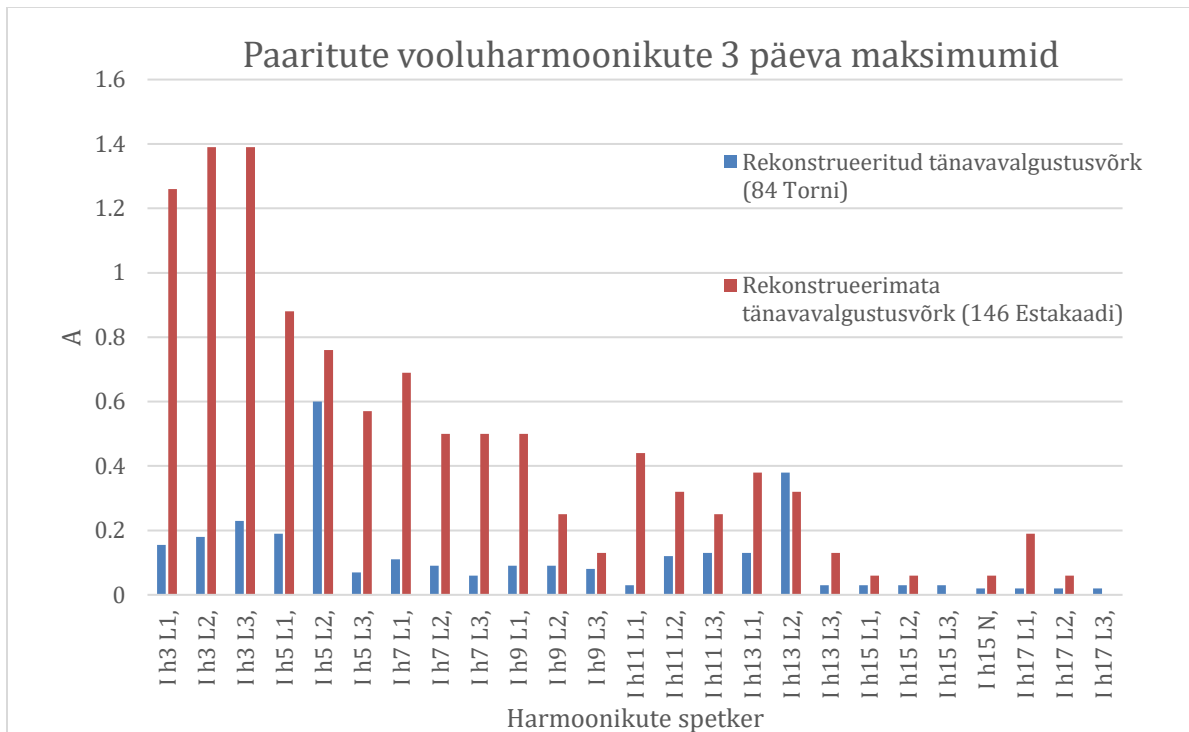
Joonisel 4.34 on välja toodud rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgu koormusvoolud ja vooluharmonikute summaarne moonutustegur 3 päeva jooksul. Selle kohaselt on rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgus koormusvoolud ootuspäraselt kõrgemad, kui uues tänavavalgustusvõrgus. Süttimise hetkel tõusevad voolud 7 amprini teises faasijuhis. Keskmine koormusvool selles tänavavalgustusvõrgus jääb 6-7 ampri juurde. Graafikult on näha koormusvoolude järgi, et antud rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgus ei ole valgustitel kontrolleri, mis hämardaks valgustid madalama võimsusega töötama. Joonisel 4.35 on välja toodud eraldi vooluharmonikute summaarne moonutustegur 3 päeva jooksul. Vooluharmonikute osa jääb faasides vahemikku 1,3 kuni 1,6 amprit ja vastavalt joonisele 4.36 on vooluharmonikute protsentuaalne osakaal 20-27% koormusvooludest. Võrreldes rekonstrueeritud ja rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgu Tornis 84 ja Estakaadi 146 piirkondade näitel, siis võib öelda, et rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgus on vooluharmonikute osakaal protsentuaalselt 10% kõrgem. Kui võrrelda summaarset vooluharmonikute moonutustegurit on rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgus THD I peaaegu 7 korda kõrgem. Kõrgem THD I rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgus on tingitud ka kõrgematest koormusvooludest.



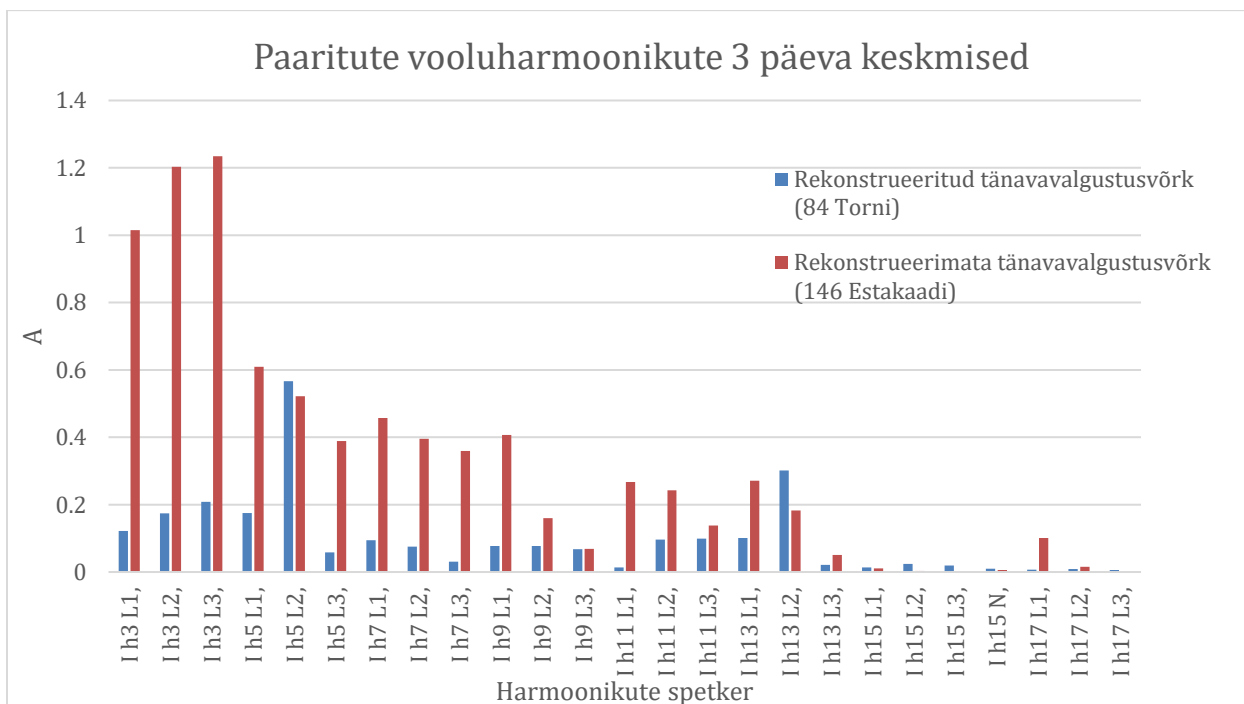
Joonis 4.37. Paaritute pingeharmonikute maksimumide spektri võrdlus rekonstrueerimata ja rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgus



Joonis 4.38. Kolme päeva keskmiste paaritute pingeharmonikute spektri võrdlus rekonstrueerimata ja rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgus



Joonis 4.39. Paaritute vooluharmonikute maksimumide spektri võrdlus rekonstrueerimata ja rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgus

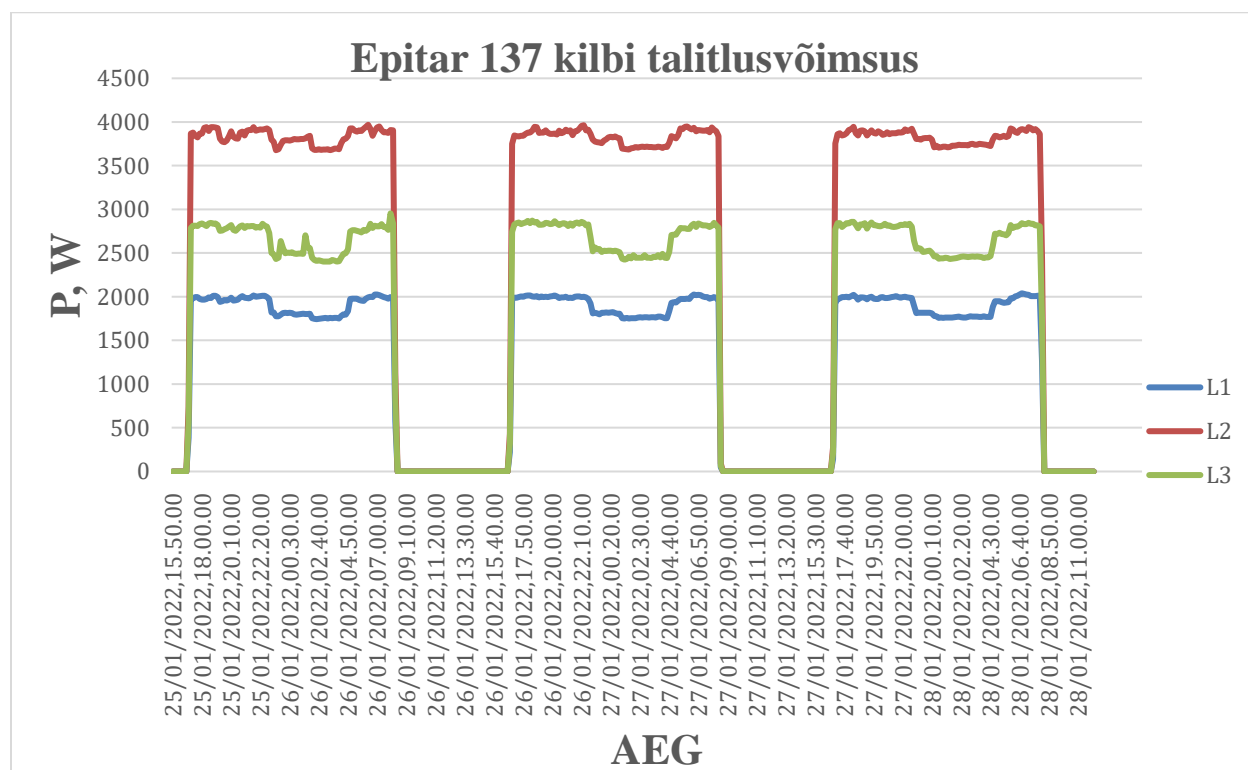


Joonis 4.40. Kolme päeva keskmiste paaritute vooluharmonikute spektri võrdlus rekonstrueerimata ja rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgus

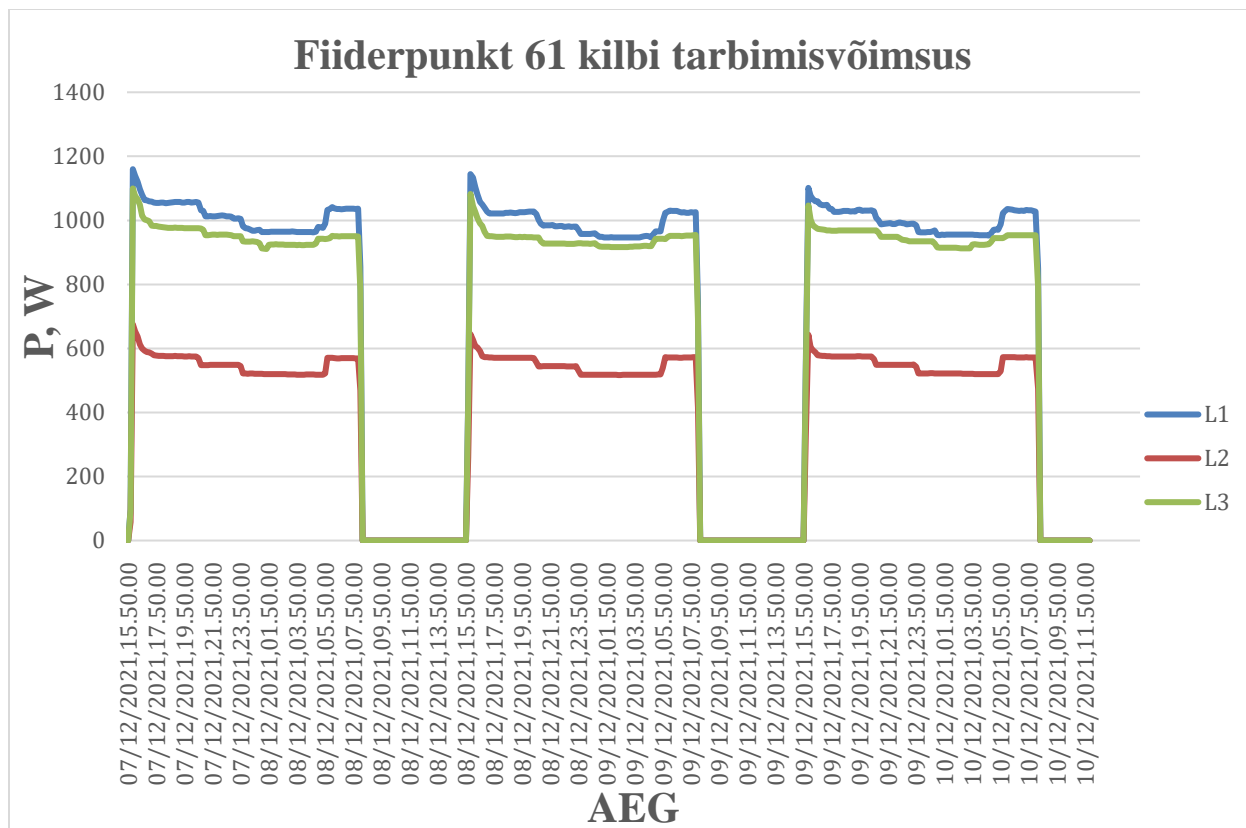
Joonistel 4.37 ja 4.38 on kujutatud paaritute pingeharmonikute 3-päeva keskmiseid ja maksimaalseid spektreid faaside kaupa. Tulpdiagrammilt on näha sarnaselt eelnevalt uuritud piirkondadele, et protsentuaalselt on rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgus pingeharmonikuid rohkem kolmandat ja üheksandat järku ning rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgus viiendat ja seitsmendat järku. Pingeharmonikuid mõjutavad ka teised tarbijad võrgus. Kuna kilbi piirkond Torn 84 asub Annelinnas kortermajade vahel, siis tõenäoliselt kõrged pingeharmonikud on tekitatud sealsete elanike elektriseadmete poolt. Kilbi piirkond Estakaadi 146 aga asub piirkonnas, kus on kolm uut kortermaja ning tarbimist vähem. Teiste tarbijate poolt samas võrgus tekitatud moonutuste tõttu pole võimalik võrrelda rekonstrueeritud ja rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrke eelnimetatud tulpdiagrammide põhjal. Joonistel 4.39 ja 4.40 on välja toodud paaritute vooluharmonikute kolme päeva keskmiseid ja maksimaalseid spektreid faaside kaupa. Tulpdiagrammide põhjal saab välja tuua sarnaselt eelnevalt uuritud piirkondadele selget vooluharmonikute ülekaalu rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgus. Igas spektris on näha vanas valgustusvõrgus kordades rohkem vooluharmonikuid, kui seda on uues valgustusvõrgus. Kui vaadelda graafikutelt, millised vooluharmonikute spektreid leidub tänavavalgustusvõrgus, siis võib välja tuua, et põhiliselt esineb kolmandat, viiendat, seitsmendat ja üheksandat järku pinge- ja vooluharmonikuid.

4.1.3 Mõõtmised juhtimiskilpide piirkondades 61 Fiiderpunkt ja 137 Epitar

Fiiderpunkti ja Epitari juhtimiskilpide piirkonnad valiti võrdlusesse, kuna need on valgustite arvu poolest sarnased. Epitari piirkonnas on kokku 56 naatrium valgustit metall- ja raudbetoonmastidel ning elektritoide nii õhu kui kaabelliiniga. Fiiderpunkt kilbi piirkonnas 50 leedvalgustit metallist mastide otsas ning kaabeldus on ehitatud maakaabelliiniga AXPK 4G25. Fiiderpunkti tänavavalgustuse juhtimiskilp asub Annelinna piirkonna südames, Kaunase pst 1 kortermaja taga. Epitari tänavavalgustuse juhtimiskilp asub Ringtee 3 kortermaja taga, kus on lisaks tänavavalgustusele ka mõned paneelmajad ning tööstushoone. Epitari kilbi piirkonnas on kasutusel naatriumvalgustid on võimsusega 70-250W. 70W valgusteid on 2 tk, 100W valgusteid on 30tk, 150W valgusteid 27tk ning 250W valgusteid 4tk. Estakaadi piirkonna installeeritud koguvõimsus on 8190W. Torni kilbi piirkonnas on kasutusel uued Philips leedvalgustid võimsusega 22W, 51W ja 86W ning piirkonna installeeritud koguvõimsus on 2291,5W. Joonisel 4.41 ja 4.42 on välja toodud Epitari ja Fiiderpunkti kilbi 3 ööpäeva tarbimisvõimsused vattides.



4.41. Epitari kilbi talitlusvõimsus perioodil 25.01.2022-28.01.2022

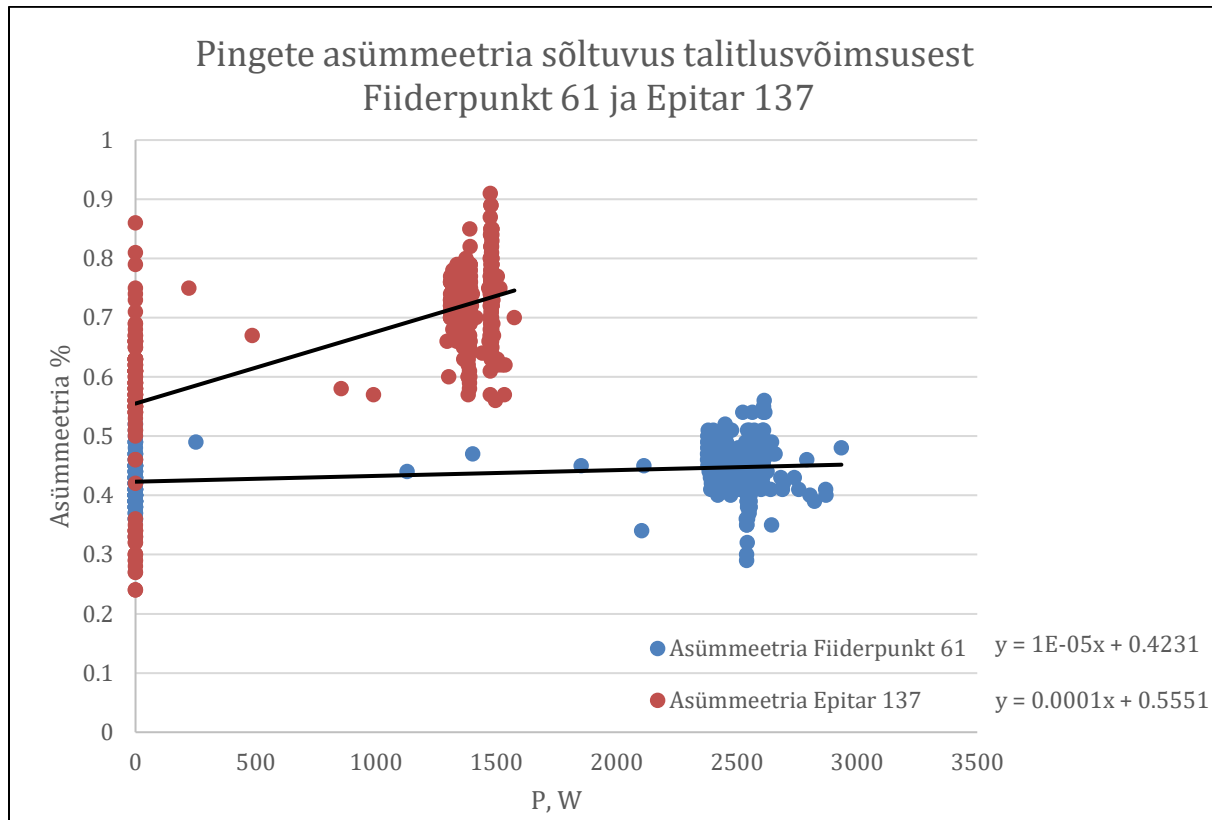


4.42. Fiiderpunkt 61 kilbi võimsus perioodil 07.12.2021-10.12.2021

Joonisel 4.41 on välja toodud, et valgustus süttis Epitari valgustuse kilbi piirkonnas umbes kell 15:50. Graafikult on näha, et faasid selles piirkonnas on ebaühtlaselt koormatud, näiteks esimene faas on koormatud võimsusega 2000W ning teine faas 4000W. Võrreldes eelnevalt uuritud Sangla ja Estakaadi piirkonnaga võib öelda, et hämardamise mõju võimsusele on öösel väiksem sarnaselt Estakaadi piirkonnale. See on põhjusel, et nii Estakaadi kui Epitari kilbi piirkonnas on varustatud ainult osad naatriumvalgustid kontrolleriiga. Rootsisis toodetud Coala kontrolleri pildi leiab lisas 2. Graafiku kohaselt lülituvad valgustid Epitari piirkonnas säästurežiimile keskööl ning tagasi 100% võimsusega tööle varahommikul.

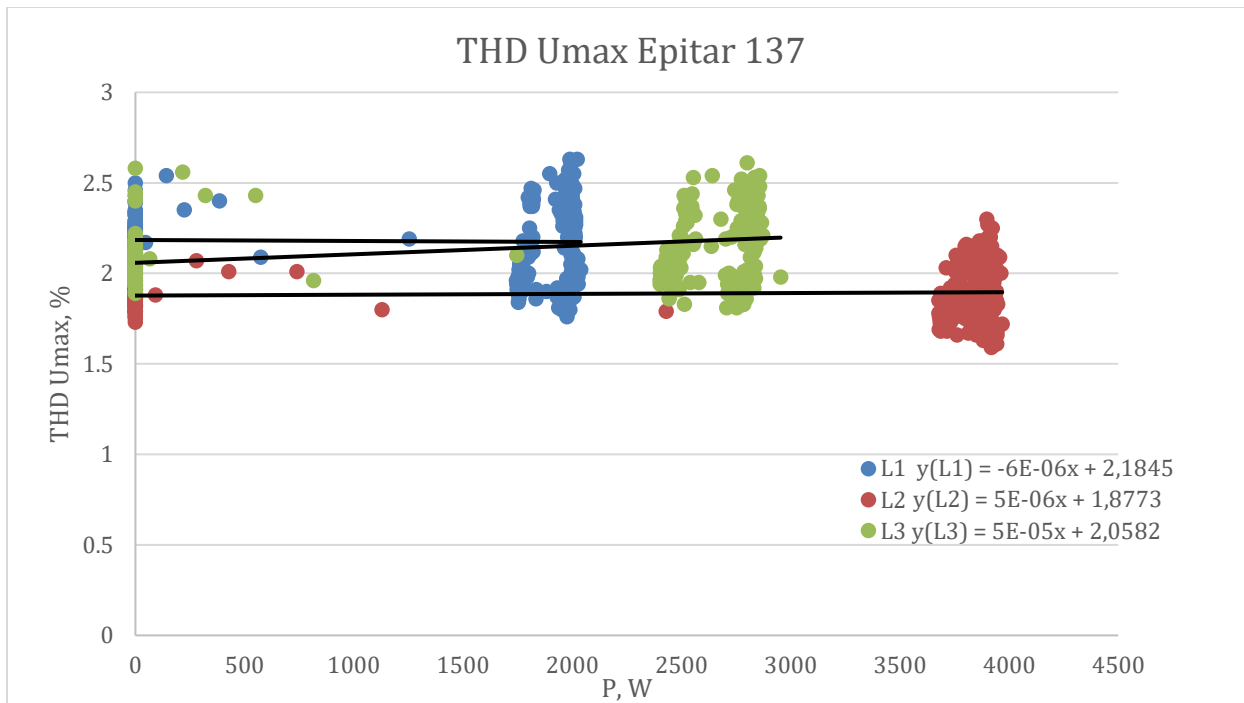
Joonisel 4.42 on kujutatud rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgu võimsusgraafik Fiiderpunkti kilbi piirkonnas. Kuna mõõtmised kilpides on teostatud erinevatel aegadel, siis valgustuse süttimise aeg erinevates kilbipiirkondades graafikutel võib muutuda mõne tunni võrra. Süttimisel töötavad leedvalgustid täisvõimsusel. Esimene ja kolmas faas on üsna võrdselt koormatud 1000W lähedal, kuid teise faasi koormus on 600W. Alates kella 21:00-st alustavad valgustid hämardamist vastavalt lisas 2 välja toodud Tartu linna välisvalgustuse

hämardamistabelile. Hämardamine programmeeritakse tehases valgustitele tootja poolt vastavalt valgustusklassile.

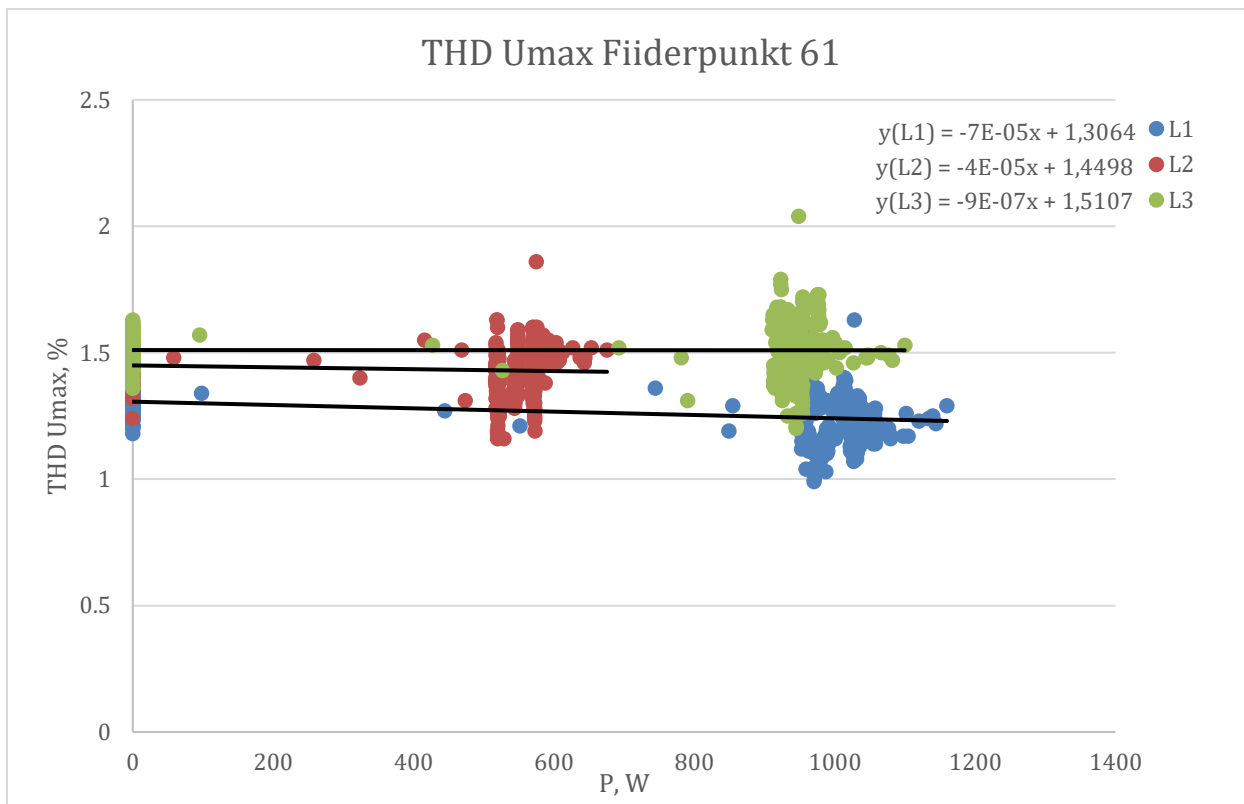


Joonis 4.43. Pingete asümmeetria seos tänavavalgustusvõrgu talitlusvõimusega

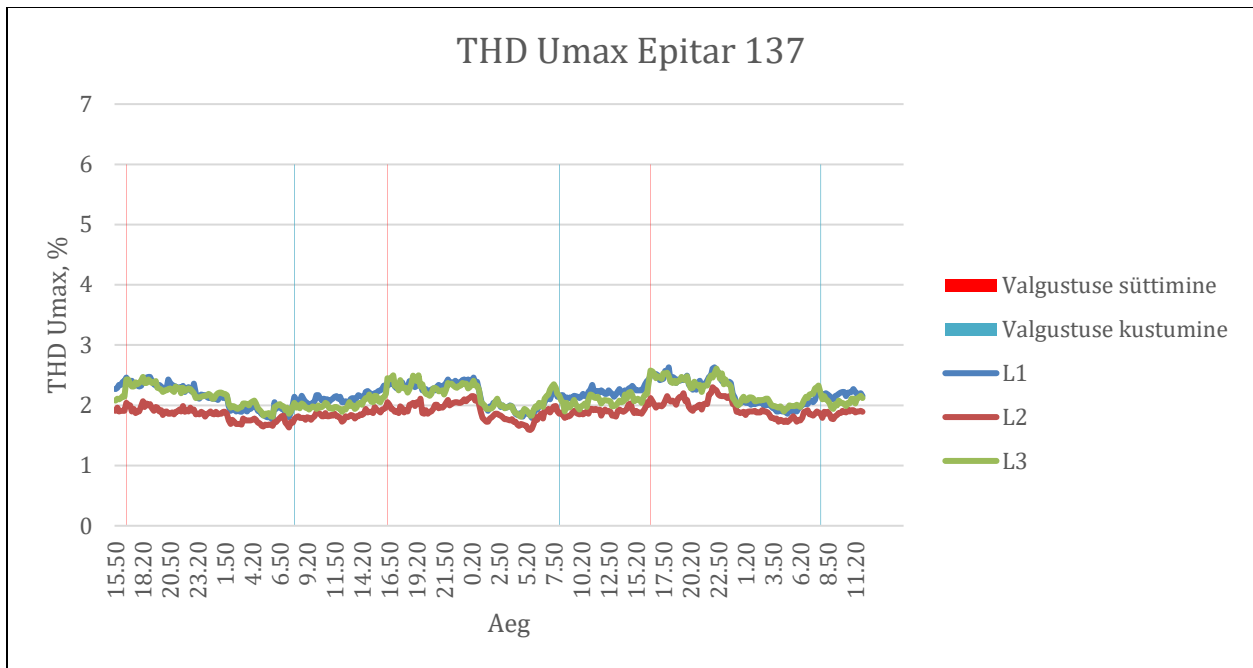
Joonisel 4.43 on välja toodud pingete asümmeetria seos tänavavalgustusvõrgu talitlusvõimsustega. Joonisel on näha trendijoone tõusu mõlemas tänavavalgustusvõrgus. Rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgus on trendijoone tõus märgatavalt suurem: 0,15%. See võib tuleneda ebaühtlaselt koormatud faasidest. Siiski on tänavavalgustusvõrgu mõju elektrivõrgu pingete asümmeetriale minimaalne. Standardiga EVS-EN:50160 on lubatud vastujärgnevuskomponent kuni 2%. Soovituslikult ei tohiks mõõdetud tulemus ületada 1%. Seega antud võrgus mõõdetud asümmeetria tase vastab nii standardile kui ka soovituslikule väärtusele. Samuti on tänavavalgustusvõrgu elektriseadmed kõik ühefaasilised, ning asümmeetria iseenesest täiendavaid lisakadusid ei põhjusta.



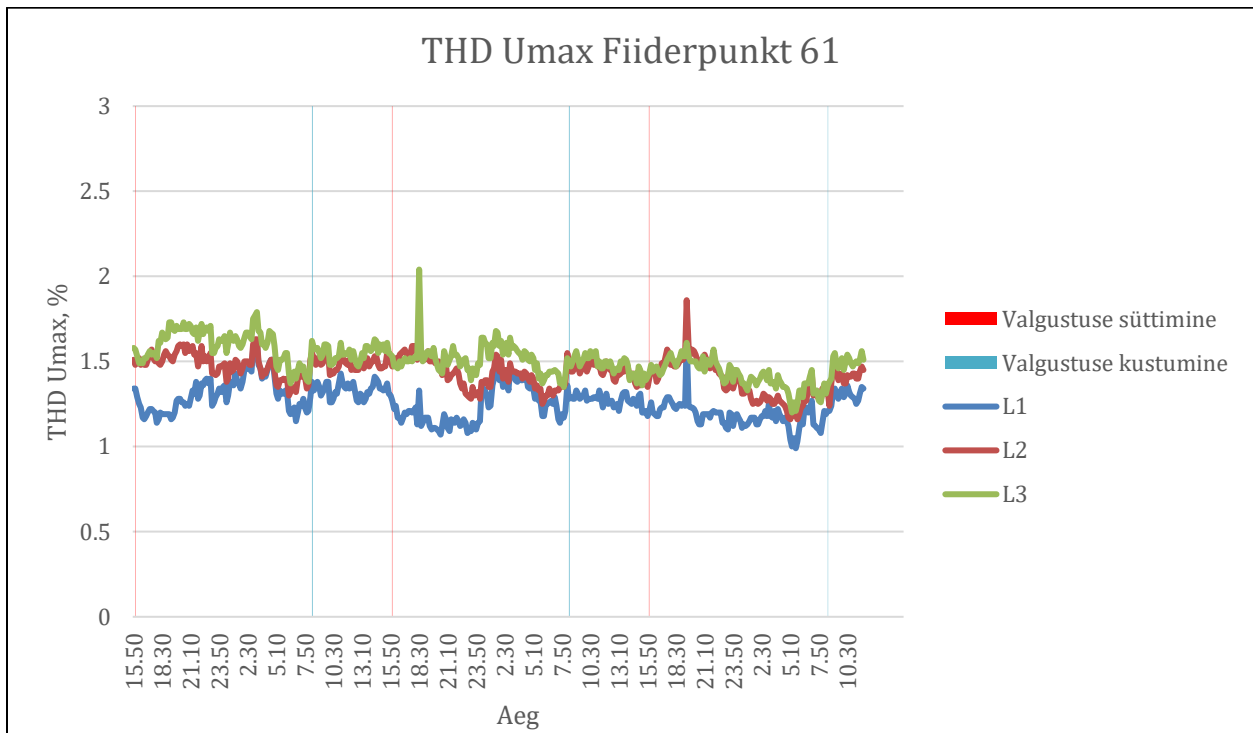
Joonis 4.44. Pinge harmoonmoonutusteguri seos rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgu talitlusvõimsusega



Joonis 4.45. Pinge harmoonmoonutusteguri seos rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgu talitlusvõimsusega



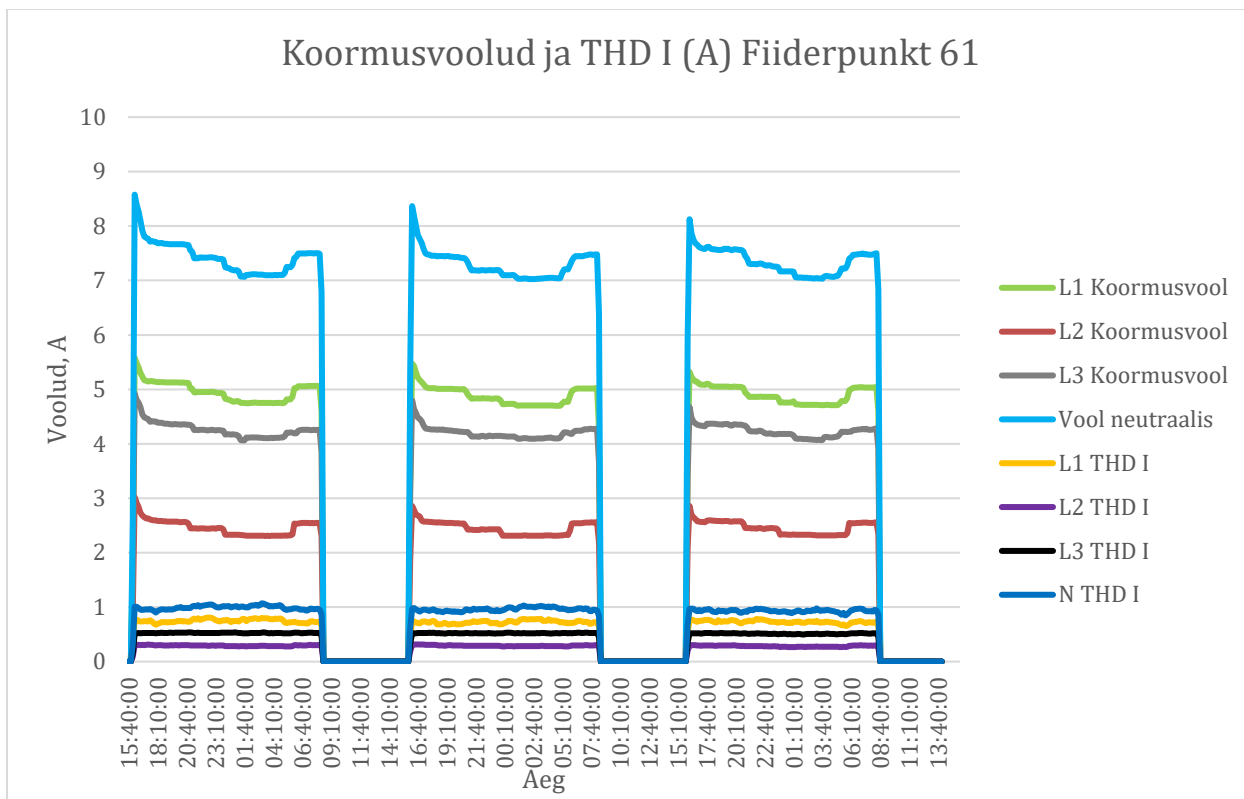
Joonis 4.46. Pinge harmoonmoonutustegur 3 ööpäeva jooksul rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgus



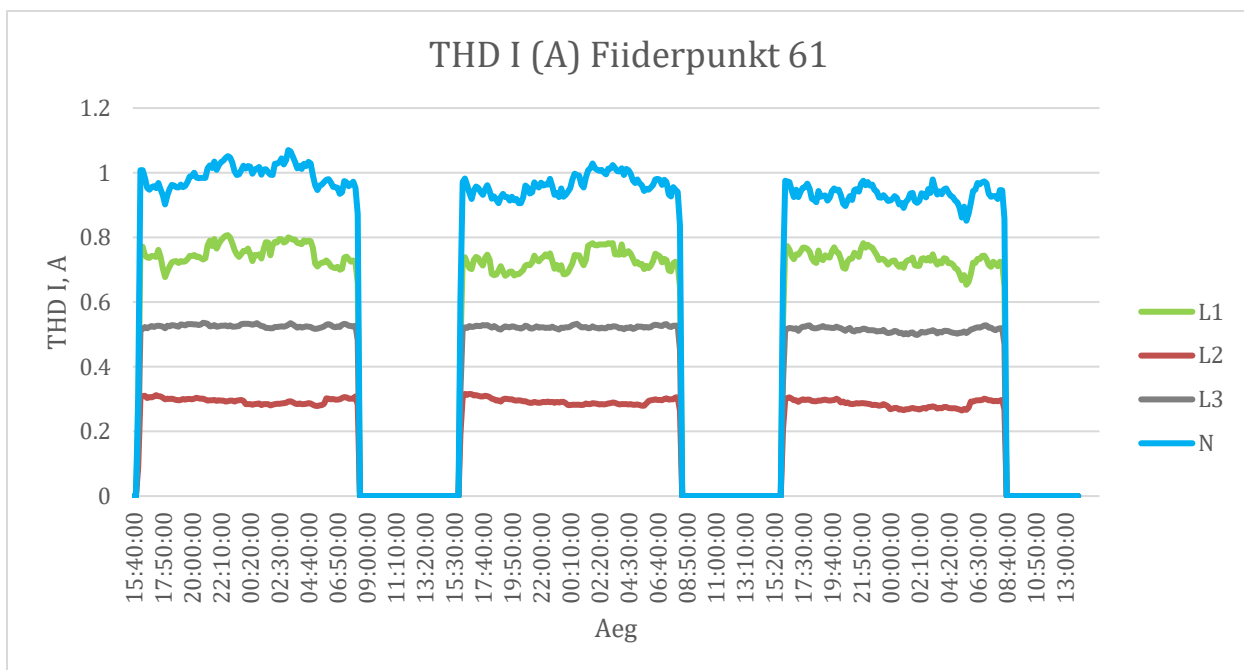
Joonis 4.47. Pinge harmoonmoonutustegur 3 ööpäeva jooksul rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgus

Joonisel 4.44 ja 4.45 on kujutatud rekonstrueeritud ja rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgu harmoonmoonutusteguri osakaalu sõltuvus tänavavalgustuse tarbimisvõimsusega. Graafikutelt on näha, et rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgu harmoonmoonutusteguri trendijoon on tõusvas ning rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgus langevas suunas vastavalt tarbimisvõimsuse kasvule. Vaadeldes graafikute trendijooni, on näha et need on peaaegu horisontaalsed. Sellest võib järeldada, et uuritavad tänavavalgustusvõrgud ei mõjuta pinge harmoonmoonutustegurit võrgus.

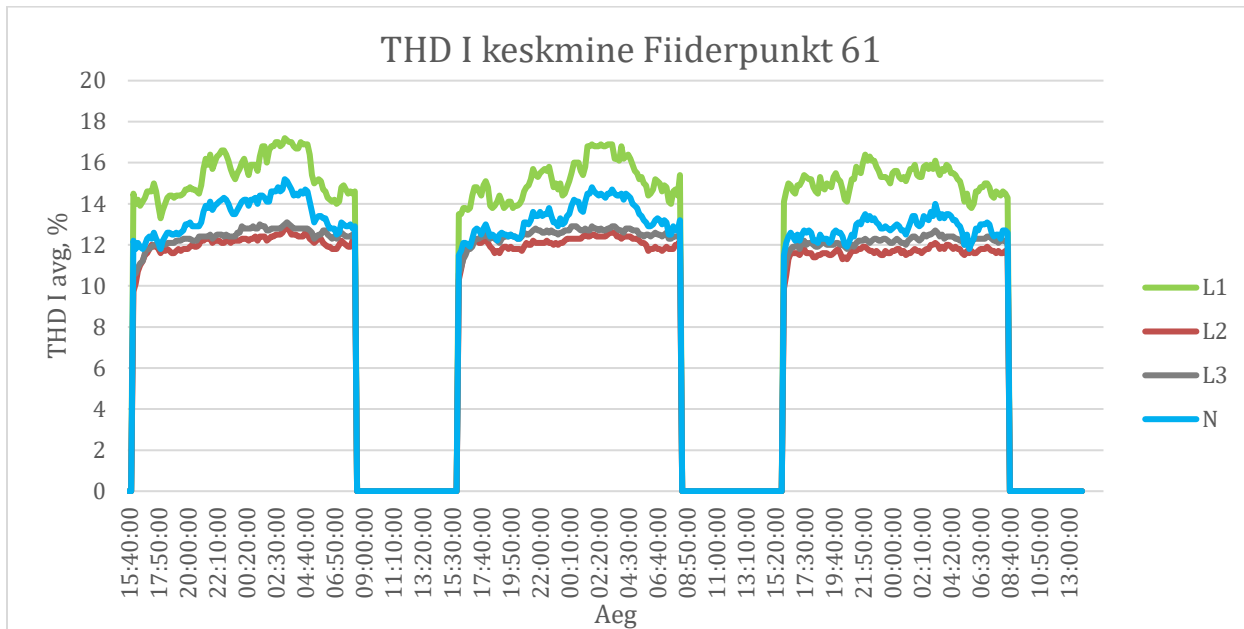
Joonistel 4.46 ja 4.47 on välja toodud harmoonmoonutustegurid rekonstrueeritud ja rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgus ajaliselt. Vertikaalsed jooned graafikutel näitavad valgustuse süttimise ja kustumise hetke. Punase vertikaaljoonega on näidatud valgustuse süttimise hetk ning sinise vertikaalse joonega kustumise hetk. Joonisel 4.46 on rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgu graafik, kus võib näha üsna ühtlast harmooniliste moonutuste taset 2% lähedal. Graafiku põhjal võib järeldada, et valgustuse süttimise hetkel tõuseb harmoonmoonutuse tase, südaööl langeb tagasi alla ning hommikul on taas tõusvas suunas. Võib arvata, et tegemist on tänavavalgustuse mõjuga, kuna graafik jookseb sarnaselt võimsuse graafikuga. Arvatavasti on tegemist siiski paneelmajades elavate inimeste tarbimise mõjutusega, kuna valgustuse süttimine langeb kellaajale, mil inimesed jõuavad töölt koju. Võrreldes Annelinnas oleva Fiiderpunkt 61 valgustuskilbiga, on moonutuste tase kõrgem ning Sellest võib järeldada, et vanema tehnoloogia tänavavalgustuslambid selles piirkonnas võivad tekitada võrku harmoonilisi moonutusi, kuid need pole piisavalt kõrged, et neid oleks võimalik graafikult selgelt välja lugeda. Kui aga vaadelda joonist 4.47, kus on graafik rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgu harmooniliste moonutuste osakaal ajaliselt, siis näeme ebakorrapäraseid tõuse ja languseid, mida ei ole võimalik seostada tänavavalgustusvõrguga. Mõõdetud piirkondade põhjal ei saa seostada pinge harmoonmoonutusteguri muutumist tänavavalgustusvõrguga.



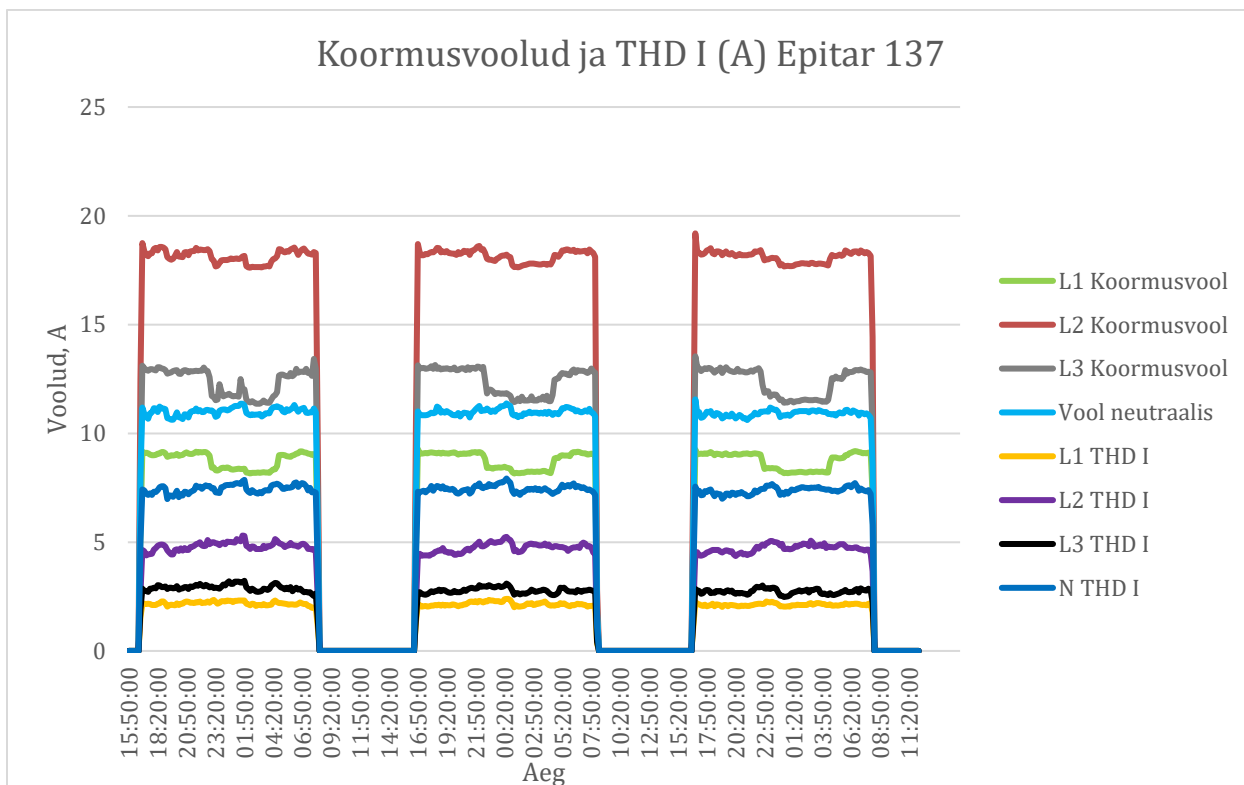
Joonis 4.48. Rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgu koormusvoolud ja vooluharmonikute summaarne moonutustegur (periood 07.12.2021-10.12.2021)



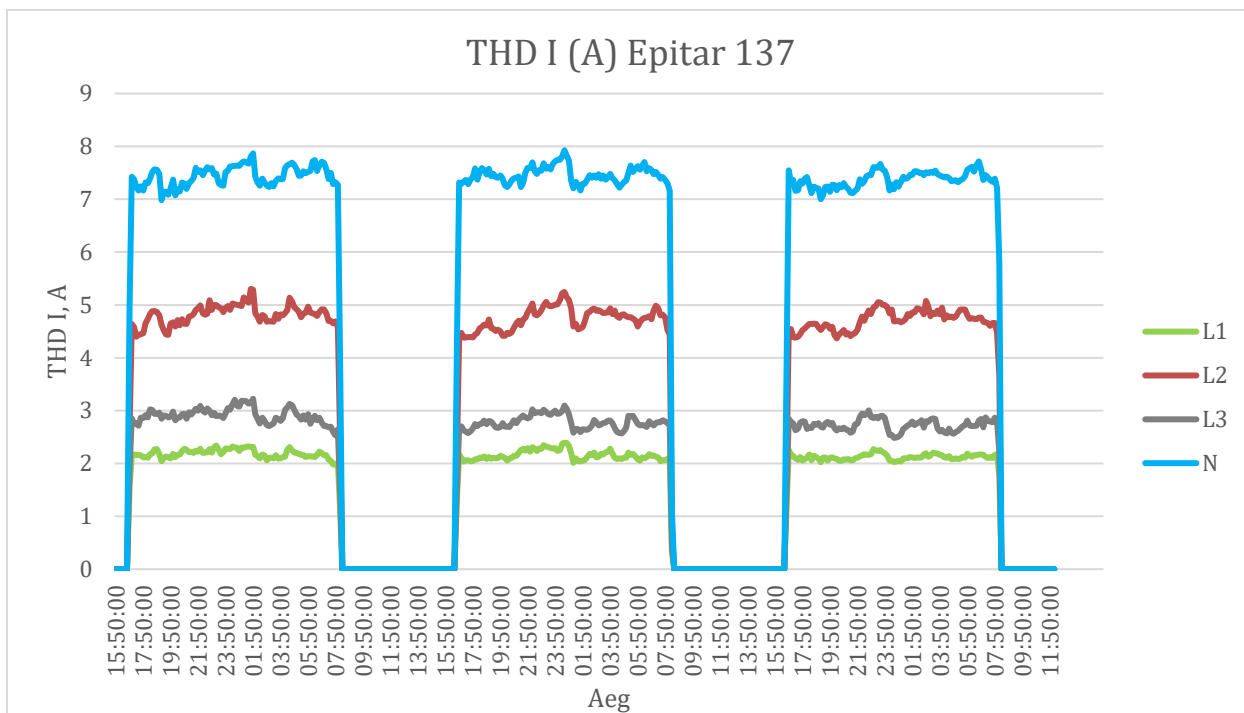
Joonis 4.49. Vooluharmonikute summaarne moonutustegur rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgus (periood 07.12.2021-10.12.2021)



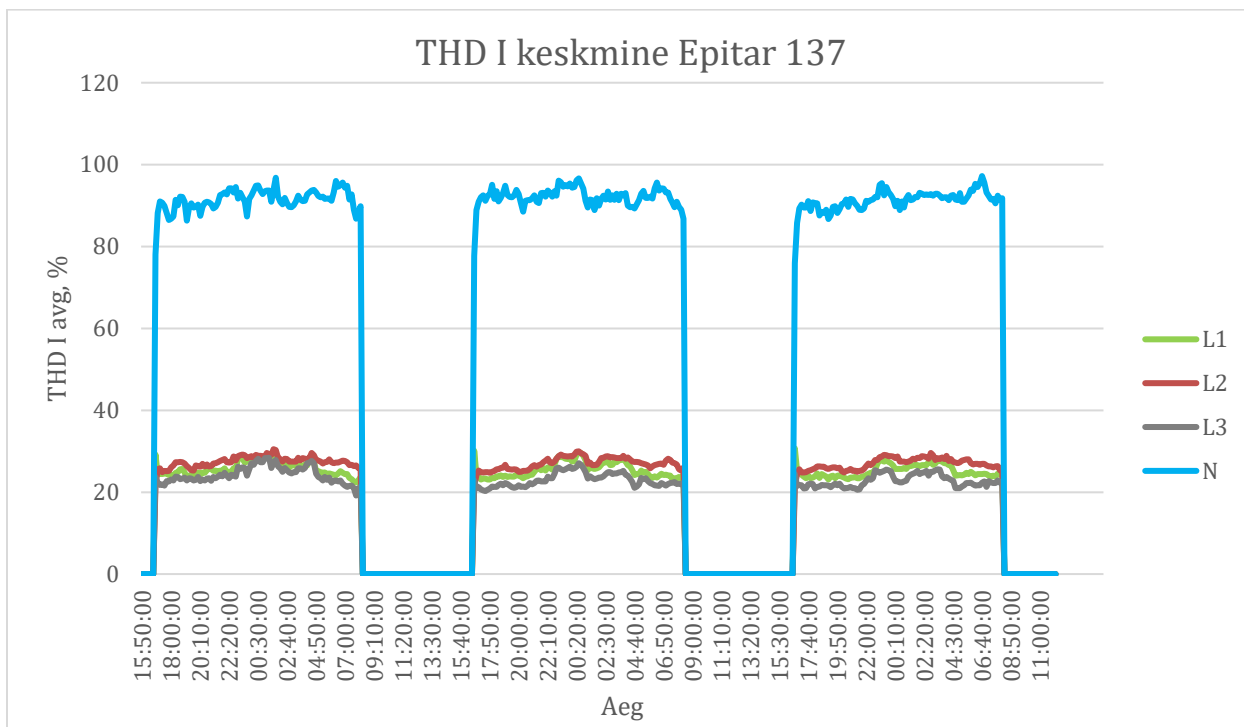
Joonis 4.50 Vooluharmonike summaarse moonutusteguri osakaal protsentuaalselt rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgus (periood 07.12.2021-10.12.2021)



Joonis 4.51. Rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgu koormusvoolud ja vooluharmonike summaarne moonutustegur (periood 25.01.2022-28.01.2022)



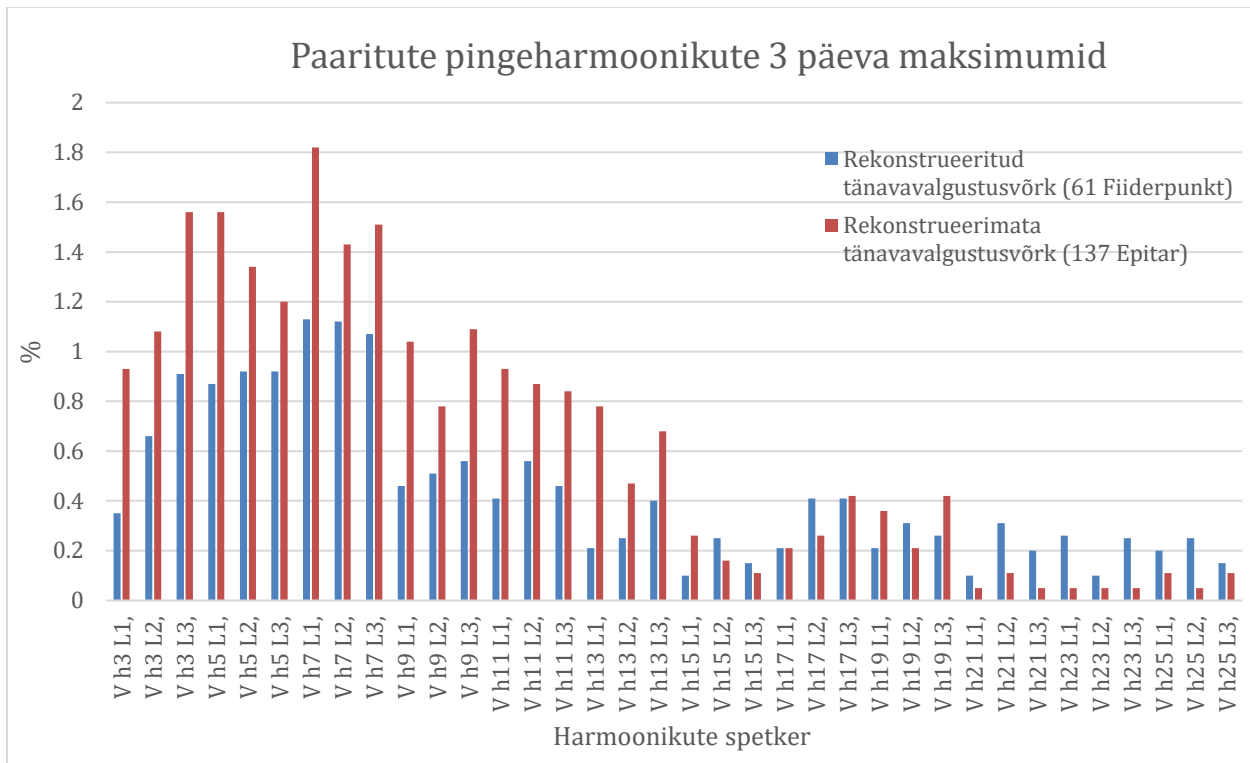
Joonis 4.52. Vooluharmonikute summaarne moonutustegur rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgus (periood 25.01.2022-28.01.2022)



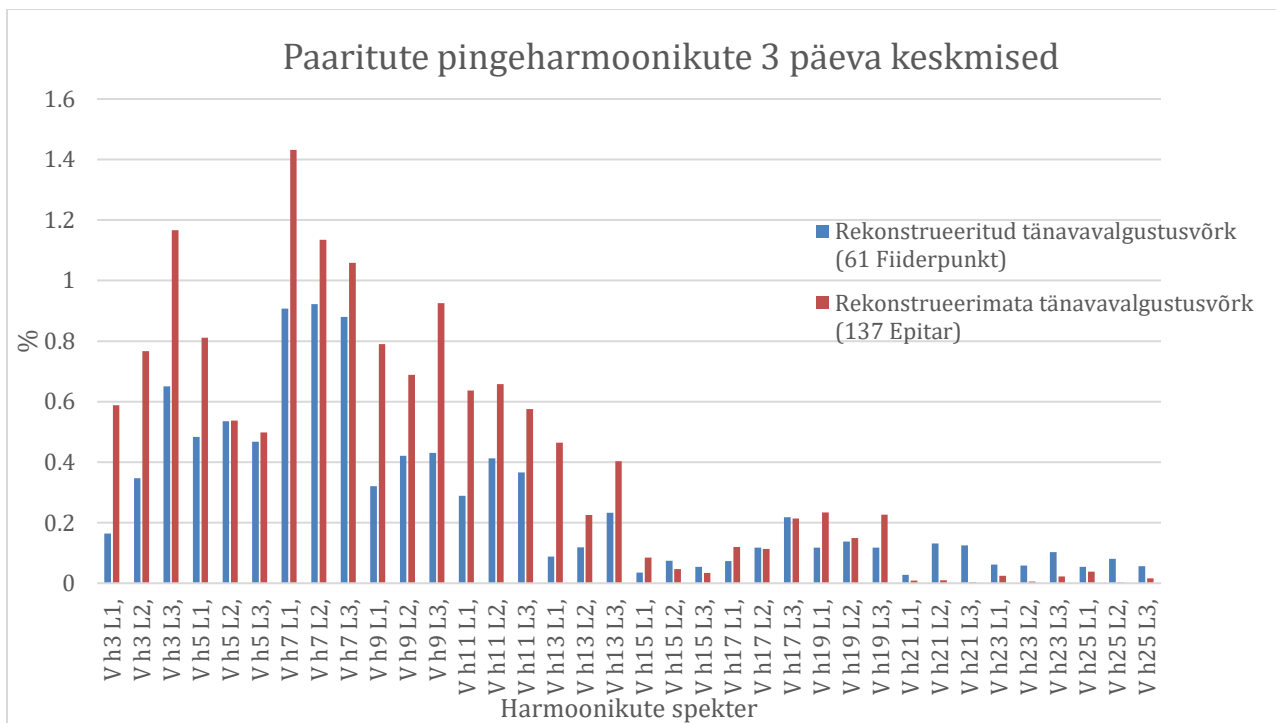
Joonis 4.53. Vooluharmonikute summaarse moonutusteguri osakaal protsentuaalselt rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgus (periood 25.01.2022-28.01.2022)

Joonisel 4.48 on välja toodud rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgu koormusvoolud ja vooluharmonikute summaarne moonutustegur 3 päeva jooksul nii faasides kui ja neutraalis. Joonisel on näha, et rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgus on koormusvoolud üsna madalad. Keskmise koormusvoolu selles tänavavalgustusvõrgus on umbes 3-5 amprit. Faasid on selles tänavavalgustusvõrgus aga ebaühtlaselt koormatud ning tulenevalt sellest on ka vool neutraalis 7-8 amprit. Graafikult võib välja lugeda koormusvoolude järgi, et valgustitele on tehases programmeeritud hämardamisrežiimi. Joonisel 4.49 on välja toodud eraldi vooluharmonikute summaarne moonutustegur 3 päeva jooksul. Vooluharmonikute osa jääb faasides vahemikku 0,3 kuni 0,8 amprit ning neutraalis 1 ampri juurde. Joonisel 4.50 on kujutatud vooluharmonikute protsentuaalset osakaalu koormusvooludest. Protsentuaalselt on vooluharmonikuid faasides umbes 12-17% ning neutraalis 12-15%, kui vaadata vooluharmonikute suurust amprites, siis need jäävad alla 1 ampri. Võrreldes eelnevalt vaadeldud rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgu piirkondadega (Sõpruse 25 ja Tornis 84), siis protsentuaalselt on vooluharmonikute osakaal umbes 3-5% võrra kõrgem.

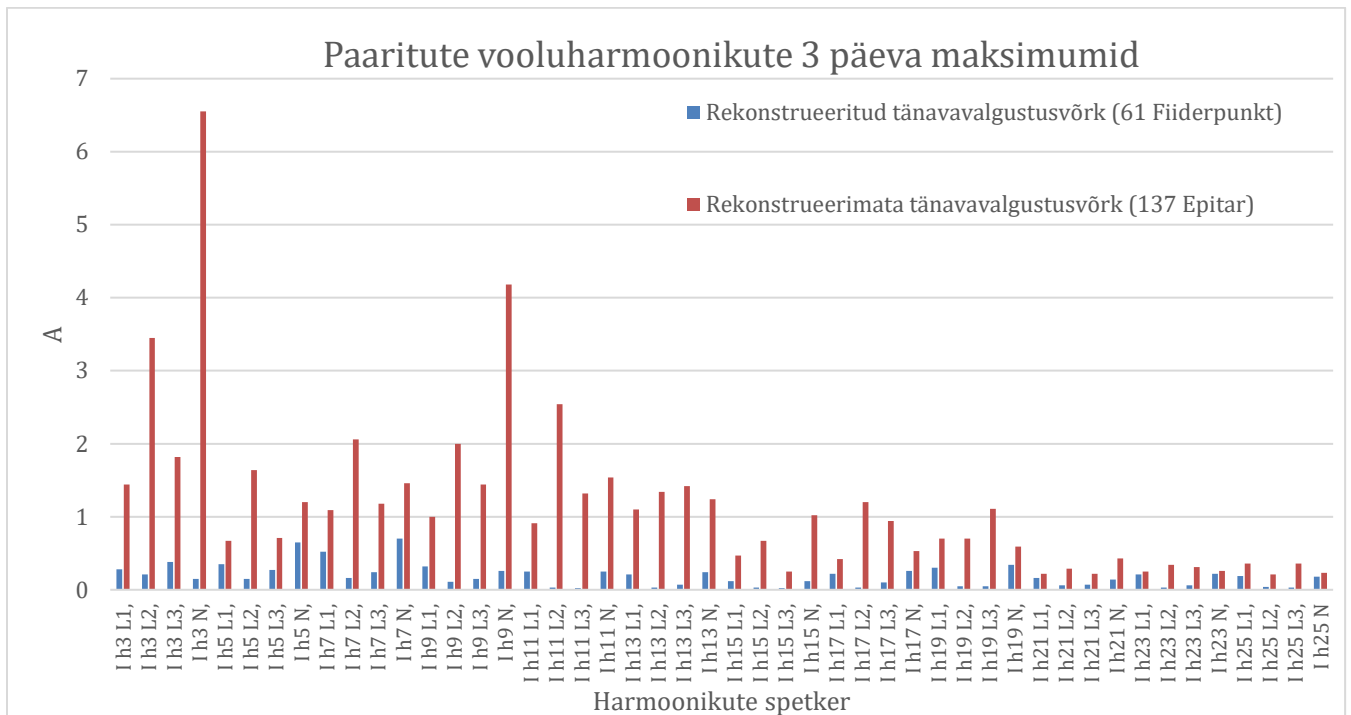
Joonisel 4.51 on välja toodud rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgu koormusvoolud ja vooluharmonikute summaarne moonutustegur 3 päeva jooksul. Rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgus on koormusvoolud ootuspäraselt kõrgemad kui uues tänavavalgustusvõrgus. Süttimise hetkel tõusevad voolud 18 ampri teises faasijuhis. Keskmise koormusvoolu selles tänavavalgustusvõrgus jääb 9-18 ampri lähedale. Vool neutraalis on valgustuse töötamise ajal 11-12 amprit. Graafikult on ka näha koormusvoolude järgi, kuidas toimub eelprogrammeeritud valgustites hämardamine vastavalt Tartu linna hämardamisgraafikule. Joonisel 4.52 on kujutatud eraldi vooluharmonikute summaarne moonutustegur 3 päeva jooksul faasides ja neutraalis. Vooluharmonikute osa jääb faasides vahemikku 2-5 amprit ning neutraalis 7-8 amprit. Joonisel 4.53 on välja toodud vooluharmonikute protsentuaalne osakaal koormusvooludest. Protsentuaalselt on vooluharmonikuid faasides umbes 20-28% ning neutraalis 78-97%, mis tähendab, et enamuse voolu neutraalis tekitavad vooluharmonikud. Kõrged voolud neutraalis tekitavad kadusid trafodes, pingete moonutusi ning koormavad neutraalijuhti. Tänavavalgustusvõrgus on toiteliinid pikkuse tõttu üledimensioneeritud ning koormusvoolud üsna madalad. Kui vaadata Epitar 137 piirkonna jooniseid 4.52 ja 4.53, siis võib järeldada, et vool neutraalis on kõrgem kui faasides ning enamuse sellest on vooluharmonikud.



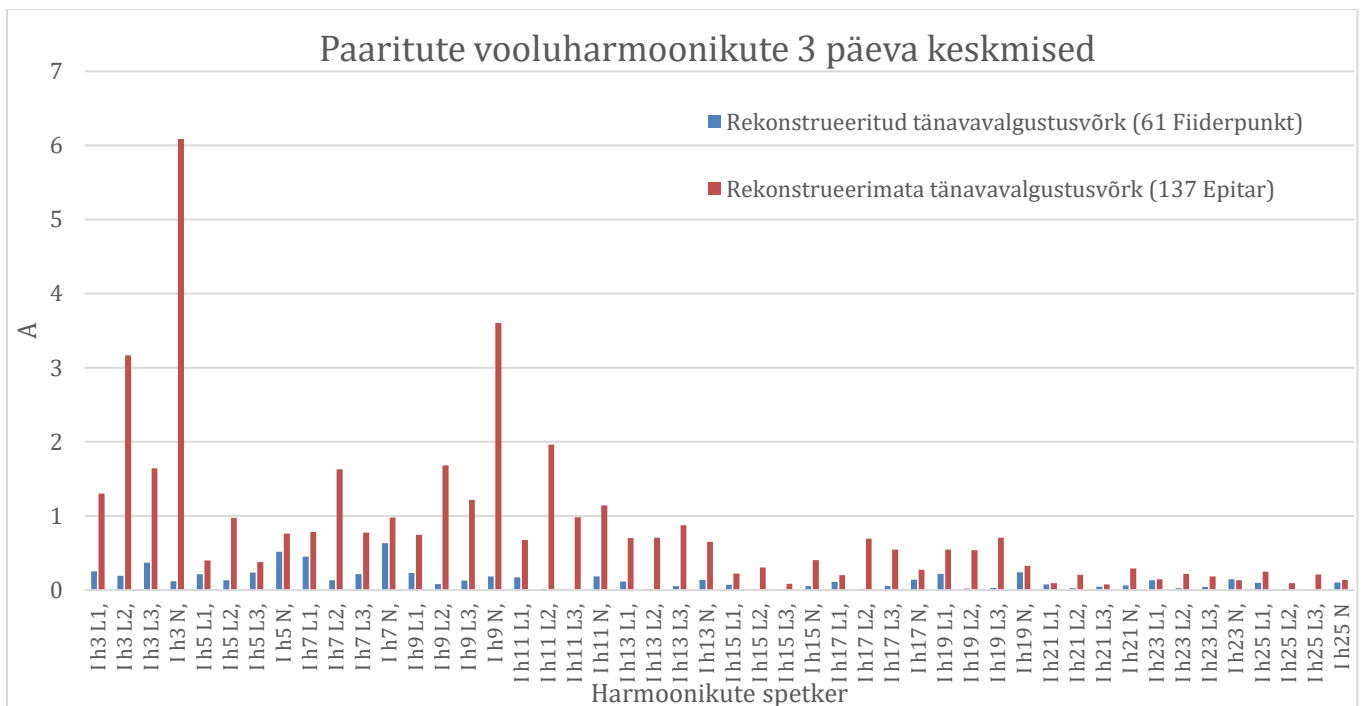
Joonis 4.54. Paaritute pingeharmonikute maksimumide spektri võrdlus rekonstrueerimata ja rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgus



Joonis 4.55. Kolme päeva keskmiste paaritute pingeharmonikute spektri võrdlus rekonstrueerimata ja rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgus



Joonis 4.56. Paaritute vooluharmonikute maksimumide spektri võrdlus rekonstrueerimata ja rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgus



Joonis 4.56. Kolme päeva keskmiste paaritute vooluharmonikute spektri võrdlus rekonstrueerimata ja rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgus

Joonistel 4.54 ja 4.55 on kujutatud paaritute pingeharmonikute 3 päeva keskmiseid ja maksimaalseid spektreid faaside kaupa. Sarnaselt eelnevalt uuritud piirkondadele, on protsentuaalselt rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgus pingeharmonikuid rohkem kolmandat, viiendat ja üheksandat järku ning rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgus seitsmentat, üheksandat ja üheteistkümnendat järku. Pingeharmonikuid mõjutavad ka teised tarbijad võrgus. Kuna kilbipiirkond Fiiderpunkt 61 asub Annelinnas kortermajade vahel, siis tõenäoliselt kõrged pingeharmonikud on tekitatud sealsete elanike poolt. Kilbipiirkond Epitar 137 asub samuti piirkonnas, kus on mõned paneelmajad ning üks tööstushoone. Seetõttu pole võimalik võrrelda rekonstrueeritud ja rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrke eelnimetatud tulpdiagrammide põhjal. Joonistel 4.56 ja 4.57 on välja toodud paaritute vooluharmonikute kolme päeva keskmiseid ja maksimaalseid spektreid faaside kaupa. Tulpdiagrammidel on näha sarnaselt eelnevalt uuritud piirkondadele selget vooluharmonikute ülekaalu rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgus. Naatriumlampidega valgustusvõrgu igas spektris võib näha kordades rohkem vooluharmonikuid kui seda on leedlampidega valgustusvõrgus. Vaadeldes graafikutelt vooluharmonikute spektreid, mida leidub tänavavalgustusvõrgus, siis näeme, et põhiliselt esineb kolmandat, viiendat, seitsmendat ja üheksandat järku pinge- ja vooluharmonikuid. Võrreldes eelnevalt uuritud piirkondadega, on nendes jutimiskilpides mõõdetud vooluharmonikuid ka neutraaljuhis. Joonistelt 4.56 ja 4.57 on näha, et rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgus neutraaljuhis on kolmandat ja üheksandat järku vooluharmonikute osakaal kaks korda kõrgem kui faasides.

KOKKUVÕTE

Käesoleva töö uurimise alla on võetud 6 tänavavalgustusvõrgu piirkonda, 3 rekonstrueerimata ja 3 rekonstrueeritud paigaldist. Kolm uuritud rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrku asuvad Tartus, Annelinna piirkonnas. Igale leedvalgustitega piirkonnale valiti võrdluseks sama arv naatriumvalgustitega võrk, et oleks võimalik võrrelda rekonstrueerimata ja rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrke paari kaupa. Uurimuse eesmärk oli hinnata rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgu mõju Elektrilevi 0,4 kV võrgule ning võrrelda seda rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrguga, kus on kasutusel kõrgrõhu-naatriumvalgustid. Mõju hindamiseks teostati 12-piirkonna valgustuse juhtimiskilpides mõõtmised ning vastavalt valgustite arvule ja eelanalüüsile valiti välja 6 kilpi uurimiseks. Mõõtmiste teostamiseks ajavahemik oli 2021.11-2022.01. Mõõtmistulemustest võrreldi pingeparameetrite seost tarbimisvõimsustega, vooluharmonoonikute summaarset moonutustegurit ning paaritute vooluharmonoonikute spektreid.

Üheks lahendatavaks küsimuseks oli madalpinge võrguosa mudeli koostamine ning modelleerimistulemuste võrdlemine mõõtmistulemustega programmis PSCAD. Töö mõõtetulemuste analüüsimise käigus jõuti järeldusele, et mudeli koostamine valgustusvõrgu kohta pole vajalik, kuna leedvalgustite voolud on niivõrd madalad. Näiteks on piirkonna Fiiderpunkt 61 valgustuse klipi esimese fiidri koormused keskmiselt 1 amper faasi kohta ning teise fiidri koormused keskmiselt 1,7 amprit faasi kohta. Alajaama 0,4 kV poole koormused on valgustuse põlemise ajal faasides keskmiselt 110-120 amprit. Õhtuti võivad koormused tõusta kuni 180 amprini faasi kohta ning südaööst kuni hommikuni on koormus keskmiselt 60-80 amprit faasi kohta. Seega, kui võtta arvesse mõlema tänavavalgustuse fiidri voolud, on tänavavalgustuse koormus alajaama koormusest keskmiselt 2,2-2,3%. Moonutuste taset mõjutab võrgus märkimisväärselt rohkem teised sama madalpinge tarbijad ning rekonstrueeritud valgustusvõrgu mõju on marginaalne.

Faasipingete mõõtetulemuste analüüsist selgus, et tänavavalgustuse süttimisel ja põlemisel jäi pinge samaks või muutus minimaalselt ning pingete miinimum ja maksimumväärtuste vahe ei sõltu tänavavalgustuse põlemisest. Andmetest polnud võimalik loogiliselt seostada madalaid pinge tõuse ja languseid rekonstrueeritud või rekonstrueerimata võrguga. Pinge harmoonmoonutusteguri seos tänavavalgustusvõrgu tarbimisvõimsusega uuritavates piirkondades on samuti marginaalne. Graafikutele lisati valgustuse süttimise ja kustumise ajahetkedele ka vertikaalsed jooned, et graafikuid parem jälgida oleks. Jooniseid analüüsides

selgus, et pinge harmoonmoonutustegurite muutusi pole võimalik seostada tänavavalgustusvõrgu töötamisega. Pigem on graafikutelt näha korrapäraseid tõuse ja languseid, mida saab seostada linnakodanike tarbimisharjumuste ja rutiiniga. Antud uurimuse põhjal saab järeldada, et tänavavalgustusvõrk ei põhjusta pingete kogumoonutuste tõusu võrgus.

Uuritavates piirkondades mõõdeti koormusvoole, vooluharmonikuid, vooluharmonikute osakaalu ning kahes piirkonnas uuriti ka vooluharmonikuid neutraalis. Summaarne moonutustegur (THD I) rekonstrueeritud tänavavalgustusvõrgus jääb vahemikku 0,2-0,8A. Kui võrrelda rekonstrueeritud tänavavalgustuse piirkondade vooluharmonikute moonutusteguri osakaalu koormusvooludest, siis kõigis kolmes uuritavas piirkonnas jäävad need enamuses vahemikku 11-14%. Naatriumlampidega võrkudes on mõõdetud koormusvoolud 2-3 korda kõrgemad ning vooluharmonikud faasides 6-12 korda kõrgemad võrreldes leedvalgustitega võrkudes. Rekonstrueerimata tänavavalgustusvõrgu vooluharmonikute osakaal koormusvooludest jääb vahemikku 20-30%. Epitar 137 piirkond, kus toimusid ka mõõtmised neutraalis, on näha valgustuse töötamise ajal vooluharmonikuid vahemikus 7-8A ning osakaal neutraali voolus umbes 90%. Mõõtmistulemustest võib välja lugeda, et tänavavalgustusvõrgu rekonstrueerimine vähendab oluliselt vooluharmonikuid.

Pinge- ja vooluharmonikute uurimisel võeti vaatluse alla ka piirkondade spektrite võrdlus. Graafikutel on kõrvuti rekonstrueeritud ja rekonstrueerimata võrgu spektri võrdlus, kus on välja toodud paaritud pinge- ja vooluharmonikud kuni 25-nda järguni. Piirkondades kus tulemused üle 17 järgu on marginaalsed, võeti võrdlusesse kuni 17-nda järguni. Enamus mõõdetud võrke asuvad Tartus kortermajade piirkonnas ning erandiks on Sangla 36 piirkond, mis asub eramute keskel. Pinge- ja vooluharmonikute spektreid uurides on näha kõigis kolmes võrdluses viiendat ja seitsmendat järku pinge- ja vooluharmonikute kõrgemat taset rekonstrueerimata võrkudes ning kolmandat järku rekonstrueeritud võrkudes. Töö eelmises etapis uuritud pinge harmoonmoonutusteguri seos tänavavalgustusvõrgu töötamisega aga puudus, seega ei saa seostada kõrgeid kolmandat järku pinge- ja vooluharmonikuid leedvalgustitega. Pigem risustavad võrku linnakodanike seadmed kodudes. Naatriumvalgustitega võrgu spektrist võib seose leida seitsmenda järgu harmoonikutega, kuna kõikides spektrite võrdlustes on rekonstrueerimata võrgus see märgatavalt kõrgem. Siiski ei saa antud lõputöös kasutatud mõõtemetoodikaga selgelt eristada tänavavalgustusvõrgu mõju pinge- ja vooluharmonikutele Elektrilevi võrgus. Mõju hindamise jaoks oleks vaja tänavavalgustusvõrk isoleerida teistest tarbijatest või leida piirkond, kus tänavavalgustuse toiteks on eraldi alajaam.

Tulpdiagrammidel on välja toodud nelja piirkonna faaside vooluharmonikute spekter ning kahe piirkonna võrdluses on välja toodud ka vooluharmonikute spekter neutraalis kuni 25 järguni. Uurimuse kohaselt on vooluharmonikud rekonstrueerimata võrgus igas spektris kordades kõrgemad kui rekonstrueeritud võrgus. Näiteks on Fiiderpunkt 61 ja Epitar 137 piirkondade võrdluses kolmandat järku vooluharmonikute vahe neutraalis 51 kordne, naatriumlampidega piirkonnas 6A ning LED lampidega 0,118A. Vooluharmonikute spektris on naatriumlampidega võrgus enamjaolt esindatud kolmandat, viiendat, üheksandat ja üheteistkümnendat järku vooluharmonikuid. Antud mõõtmiste tulemus näitab, et Tänavavalgustustaristu rekonstrueerimine vähendab koormusvoolusid ning vooluharmonikuid, mis tagab energiasäästu ja parema elektrikvaliteeti võrgus.

SUMMARY

6 areas of the street lighting network, 3 unreconstructed and 3 reconstructed installations have been included in the study of this work. The three reconstructed street lighting networks studied are located in the Annelinna area of Tartu. For each LED luminaire area, the same number of sodium luminaire networks were selected for comparison in order to be able to compare unreconstructed and reconstructed street lighting networks in pairs. The aim of the study was to evaluate the impact of the reconstructed street lighting network on Elektrilevi's 0.4 kV network and to compare it with the non-reconstructed street lighting network, where high-pressure sodium luminaires are used. To assess the effect, measurements were performed in the 12-zone lighting control panels, and 6 panels were selected for examination according to the number of luminaires and the preliminary analysis. The period for performing the measurements was 2021.11-2022.01. From the measurement results were compared the relationship between voltage parameters and consumption capacities and the total distortion factor of current harmonics and the spectra of odd current harmonics.

One of the issues to be solved was to compile a model of the low voltage network part and to compare the modeling results with the measurement results in the program PSCAD. During the analysis of the measurement results of the work, it was concluded that it is not necessary to compile a model for the lighting network, because the currents of LED luminaires are so low. For example, the Fiiderpunkt 61 street light region has an average of 1-2 amp per phase. The loads on the 0.4 kV side of the substation are on average 110-120 amps when the street lights are working. In the evening, loads can rise to 180 amps per phase, and from midnight to morning, loads average 60-80 amps per phase. Thus, taking into account the currents of street lighting the load is on average 2.2-2.3% of the load of the substation. The level of distortion in the network is significantly more affected by other consumers of the same low voltage grid, and the effect of the reconstructed street lighting network is marginal.

The analysis of the measurement results of the phase voltages revealed that the voltage remained the same or changed minimally when the street lighting was switched on and, and the difference between the minimum and maximum values of the voltages did not depend on the working of the street lighting. From the data, it was not possible to logically relate the low voltage rises and falls to the reconstructed or non-reconstructed network. The relationship between the voltage harmonic distortion factor and the consumption capacity of the street lighting network in the studied areas is also marginal. Vertical lines were added to the graphs to indicate when the lights were on and off to better monitor the graphs. The analysis of the

figures revealed that the changes in the voltage harmonic distortion factors cannot be related to the operation of the street lighting network. Rather, the graphs show regular ups and downs that can be attributed to the consumption habits and routines of the city's citizens. Based on this study, it can be concluded that the street lighting network does not cause an increase in the total voltage distortion in the network.

Load currents, current harmonics, the proportion of current harmonics were measured in the studied areas, and current harmonics in neutral were also studied in two areas. The total distortion factor (THD I) in the reconstructed street lighting network is in the range of 0.2-0.8A. When comparing the share of distortion factor of the current harmonics of the reconstructed street lighting areas in the load currents, they are in the range of 11-14% in most of the three studied areas. The measured load currents are 2-3 times higher in the networks with sodium lamps and the current harmonics in the phases are 6-12 times higher compared to the networks with LED luminaires. The share of current harmonics in the unreconstructed street lighting network in the load currents is in the range of 20-30%. The area of the Epitar 137 where the measurements were made in neutral shows current harmonics in the range of 7-8A during lighting operation and a share of about 90% in neutral current. It can be read from the measurement results that the reconstruction of the street lighting network significantly reduces current harmonics.

A comparison of regional spectra was also considered in the study of voltage and current harmonics. The graphs show a comparison of the spectrum of the reconstructed and non-reconstructed networks, showing the odd voltage and current harmonics up to the 25th order. In areas where results above the 17th grade are marginal, up to the 17th grade was compared. Most of the measured networks are located in the area of apartment buildings in Tartu, with the exception of the area of Sangla 36, which is located in the middle of private houses. Examining the spectra of voltage harmonics, all three comparisons show higher levels of fifth and seventh order voltage harmonics in unreconstructed networks and third order in reconstructed networks. However, the relationship between the voltage harmonic distortion factor studied in the previous stage of the work and the operation of the street lighting network was not present, so high third-order voltage harmonics cannot be associated with LED luminaires. Rather, the network is being cluttered by citizens electrical equipment in their homes. The spectrum of the network with sodium luminaires can be related to the seventh order harmonics, as it is significantly higher in all spectral comparisons in the unreconstructed network. However, the measurement methodology used in this thesis cannot clearly distinguish the effect of the street lighting network on voltage harmonics in the Elektrilevi

network. For the impact assessment, it would be necessary to isolate the street lighting network from other consumers or to find an area where the street lighting is powered by a separate substation.

The bar graphs show the spectra of the current harmonics of the four region phases, and the comparison of the two regions also shows the spectrum of the current harmonics up to 25 degrees in neutral. According to the study, the current harmonics in the non-reconstructed network are many times higher in each spectrum than in the reconstructed network. For example, a comparison of the third-order current harmonics in the Fiiderpunkt 61 area and Epitar 137 regions is 51 times greater in neutral, with sodium lamps in region 6A and LED lamps in 0.118A. In the spectrum of current harmonics, third-, fifth-, ninth- and eleventh-order current harmonics are mostly represented in the network with sodium lamps. The result of these measurements shows that the reconstruction of street lighting infrastructure reduces load currents and current harmonics, which ensures energy savings and better electricity quality in the network.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

1. T. Lehtla, T. Vinnal, "Elektrivarustuse tulevikuvisioonid," Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2016.
2. E. Tiigimägi. "Elektrivõrgud: Loengukonspekt," Tallinna Tehnikaülikool.
3. M. Meldorf, H. Tammoja, Ü. Treufeldt, J. Kilter, "Jaotusvõrgud," Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2007.
4. E. Risthein, "Valgustehnika sõnastik," Tallinn: Tallinna kirjastus Valgus, 1982.
5. T. Tamm, "Valgustustehnika I", Tallinn: TTÜ kirjastus, 2009.
6. R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso & H. W. Beaty, "Electrical Power Systems Quality," McGraw Hill Professional, 2012.
7. J. Kilter, T. Kangro, T. Sarnet, I. Palu, "Elektriraudtee ja selle mõjud elektrisüsteemi talitlusele," Tallinn, 2015. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://elering.ee/sites/default/files/attachments/Elektriraudtee_ja_selle_mojud_elektrisust_eemi_talitlusele_1.pdf. [Kasutatud 19.04.2022]
8. Eesti standard, EVS-EN 50160:2010 Avalike elektrivõrkude pingetunnussuurused, Eesti standardikeskus, 2019.
9. K. H. Bachanek, B. Tundys, T. Wiśniewski, E. Puzio, A. Marušková, "Intelligent Street Lighting in a Smart City Concepts—A Direction to Energy Saving in Cities: An Overview and Case Study," *Energies*, vol. 22, issue 11, 23 May, 2021, doi: [10.3390/en14113018](https://doi.org/10.3390/en14113018).
10. R. Martinek, P. Bilik, J. Baros et al., "Design of a Measuring System for Electricity Quality Monitoring within the SMART Street Lighting Test Polygon: Pilot Study on Adaptive Current Control Strategy for Three-Phase Shunt Active Power Filters," *Sensors*, vol. 20, issue 6, 19 Mar. 2020, doi: [10.3390/s20061718](https://doi.org/10.3390/s20061718).
11. Alternatiivsete tehniliste lahenduste kasutamine pingeprobleemide lahendamisel madalpingevõrgus [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.elektrilevi.ee/doc/8644141/ettevottest/tutvustus/failid/pingeprobleemid_madalpingevorgus.pdf. [Kasutatud 10.04.2022].

12. R. M. Abdalaal, C. N. M. Ho, C. K. Leung, et al., "A Remotely Control Dimming System for LED Lamps with Power Factor Correction", *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) 2018 IEEE*, pp. 4721-4727, 2018, doi: [10.1109/EPEC.2017.8286200](https://doi.org/10.1109/EPEC.2017.8286200).
13. I. Ramljak, A. Tokić. "Harmonic emission of LED lighting". *Energy*, vol. 8, issue 1, pp 1-26, Dec. 2019, doi: [10.3934/energy.2020.1.1](https://doi.org/10.3934/energy.2020.1.1).
14. T. Korõtko, I. Drovtar, "Targa linna teenuste võimaldamine tänavavalgustusvõrkude kaudu," *Elektriala* nr 8, 2021.
15. P. Drogna, P. Durana, T. Betko, "Research of the Negative Influence of Dimmed LED Luminaires in Context of Smart Installations," *Sustainability*, vol. 13, issue 17, 30 Aug. 2021, doi: [10.3390/su13179753](https://doi.org/10.3390/su13179753).
16. P. Natthanon, J. Chaiyan, N. Atthapol, "Harmonics and Reduction of Energy Consumption in Lighting Systems by Using LED Lamps," *Energies*, vol. 11, issue 11, pp 1-27, Nov. 2018.
17. E. Sadeghian, "Modeling and Checking the Power Quality of High Pressure Sodium Vapor Lamp" *Munich Personal RePEc Archive* [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://mpra.ub.uni-muenchen.de/86668/1/MPRA_paper_86668.pdf. [Kasutatud 10.04.2022].
18. M. N. Nehdi, W. Nsibi, A. Chammam, A. Sellami & G Zissis, "Harmonic characterization of HPS lamp fed by two supply modes," *2015 7th International Conference on Modelling, Identification and Control*, 2015.
19. Tartu linna tänavavalgustuse andmebaas [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://gis.tartu.ee/portal/apps/dashboards/fc415f69e16c4b45a9d1350abf347763> [Kasutatud 19.04.2022].
20. Tartu linn [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://tartu.ee/et/tanavavalgustuse-rekonstrueerimine-annelinnas>. [Kasutatud 19.04.2022].
21. Nõuded Tartu Linna 0,4kV välisvalgustuse juhtimiskiblile, 2021.
22. TARTU LINNA VALGUSTUSE ÜLDPLANEERING Etapp 1: Linnavalgustuse eelanalüüs, Eesti valgustusdisainerite assotsiatsioon (25.04.2022).
23. A. Reinmann, "Tehnilised nõuded Tartu linna välisvalgustuse juhtimissüsteemile, kilpide (VJK) juhtimissüsteemile ja valgustikontrolleritele."

24. Tartu välisvalgustuse tehnilised tüüptingimused valgustuse projekteerimiseks.
25. H. Karawia, M. Elhoseiny, M. Mahmoud, "Harmonic analysis for street lighting lamps," *CIREC - Open Access Proceedings Journal*, pp: 655-658, Jun. 2017, doi: 10.1049/oap-cired.2017.0493.
26. T. Slangen, T. Wijk, V. Čuk, S. Cobben, "The Propagation and Interaction of Supraharmonics from Electric Vehicle Chargers in a Low-Voltage Grid," *Energies*, vol. 13, issue 15, pp 1-27, 28 Jul. 2020, doi: 10.3390/en13153865.
27. EVS-EN 13201- 5:2015 Teevalgustus. Osa 5: Energiatõhususnäitajad, Tallinn 2015.
28. 220 Energia [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.220energia.ee/eraklient-elekter/viimase-12-kuu-kaalutud-keskmised-borsihinnad>. [Kasutatud 10.05.2022]
29. Keskkonna investeringute keskus [Võrgumaterjal. Saadaval: <https://kik.ee/et/projekt/tanavavalgustuse-rekonstrueerimine-annelinnas>. [Kasutatud 12.05.2022]

LISAD

Lisa 1 Tartu linna välisvalgustuse hämardamise tabel



Lisa 1. Tartu linna välisvalgustuse hämardamise režiimid

LED lampide hämardamine toimub kõikidel valgustitel vastavalt ajatabelile **v.a alla 35W** valgustitel.

LED lambid hämardatakse vastavalt ajatabeli valgustusklassile etteantud skaala järgi

	KELLAAEG, ALGAV TUND																			
	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	
Valgustusklass M	Hämardamisel alles jääv valgustustase protsentides																			Valgustusklasside muutmise
M1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	80	80	50	50	50	80	100	100	100	100	M1 - M2 - M3 - M2 - M1
M2	100	100	100	100	100	100	100	80	80	80	50	50	50	50	80	100	100	100	100	M2 - M3 - M4 - M3 - M2
M3	100	100	100	100	100	100	100	80	80	80	50	50	50	50	80	100	100	100	100	M3 - M4 - M5 - M4 - M3
M4	100	100	100	100	100	100	80	80	80	80	40	40	40	40	80	100	100	100	100	M4 - M5 - M6 - M5 - M4
M5	100	100	100	100	100	100	60	60	60	60	40	40	40	40	60	100	100	100	100	M5 - M6 - P5 - M6 - M5
M6	100	100	100	100	100	100	50	50	50	50	50	50	50	50	50	100	100	100	100	M6 - P6 - M6
Valgustusklass P																				
P1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	80	50	50	50	50	80	100	100	100	100	P1 - P2 - P3 - P2 - P1
P2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	80	50	50	50	50	80	100	100	100	100	P2 - P3 - P4 - P3 - P2
P3	100	100	100	100	100	100	100	100	80	80	40	40	40	40	80	80	100	100	100	P3 - P4 - P5 - P4 - P3
P4	100	100	100	100	100	100	100	100	60	60	40	40	40	40	60	60	100	100	100	P4 - P5 - P6 - P5 - P4
P5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	P5
P6	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	P6
Valgustusklass C																				
C0 - C5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
Väljakud:																				
Sportiväljakud	100	100	100	100	100	100	100	50	50	30	30	30	30	30	30	50	50	100	100	
Koorteväljakud	100	100	100	100	100	100	100	50	30	30	30	30	30	30	30	50	50	100	100	
Välised jõuväljakud	100	100	100	100	100	100	100	50	30	30	30	30	30	30	30	100	100	100	100	

VALGUSTUSKLASSID:

Valgustusklass M - on ette nähtud rakendamiseks mootorsõidukijuhtidele liiklusteel keskmise kuni suurema sõidukiiruse korral

Valgustusklass P - on ette nähtud rakendamiseks jalakäijate ja pedaaljalgratturite suhtes kõnniteel, jalgrattateel, sõiduteede ohutusribadel ja muudel tänavaosadel, mis kulgevad eraldi või pikki sõiduteed, elupiirkondade teedel, kõnniteedel, parkimisplatsidel, kooliüuedel, parkides jms.

Valgustusklass C - on ette nähtud rakendamiseks konfliktipiirkondades

TÄNAVATÜÜPID

Tartu linna tänavate jaotus tänavatüüpideks liiklusintensiivsuse ja strateegilise tähtsuse järgi vastavalt Tartu Linnvalitsuse dokumendile Lisa 1.

Lisa 2 Tartu tänavavalgustuse juhtimiskilbi tüüpjoonis

Main technical features:

- Max current - measurement part: 63 A
- Max current - junction part:
- Rated voltage: 230/400 V
- Rated voltage of the insulation: 500 V
- Rated frequency: 50-60 Hz
- IP protection level: IK10, IP 44
- Working temperature: -25-55 C
- Compatible with norms: EN 60 439-1
- Insulation class: II

Type:
Tartu TV

Card number:

Lisa 3 Tartu tänavavalgustuse juhtimiskilbi tüüp skeem

VJK NÄIDISSKEEM	FAASI- AIOOTUS	TARBIJA NIMETUS	MÄRKUSED KAABLI MÄRK	MÕÕDETUD- KÕRRAUS A / kW	MÕÕDETUD- IF LÕHIS PIDI LÕPUS	Tähis	Tehnilised andmed	Mark	
	L1,L2,L3	Tolle liitumiskilbi	AXPK 4650			GS1	Pealüht 3F In=200A Uünp=6kV In=50kA	ENSTO KSM	
	L1,L2,L3	Pealüht 3x6kA				1FV	Piltlupuse rüübevoolukatla 25A 30 mA	Schneider IK	
	L1,L2,L3	GS1 Pealüht				U1	Pingekontrollrela (kaas@Tartus, faasi kadumine)	Schneider	
		1FV Pingepiirid				11QF	Kontrolleri toiteplokk (automaat In=16A (N))	Schneider IC60H	
		13QF Kontrolleri toide				12QF	Juhtehaig toide (automaat In=100A (N))	Schneider IC60H	
		13QF Juhtehaig toide				13QF	Ülaandur/õhuvälgustus (automaat In=16A (N))	Schneider IC60H	
		13QF Ülaandur/õhuvälgustus toide				14QF	Piltlupuse lülitus (automaat In=1x16A(N))	Schneider IC60H	
		14QF Piltlupuse toide				ZK	Piltlupuse rüübevoolukatla 25A 30 mA	Schneider IK	
		14QF Piltlupuse lülitus				14QF	Piltlupuse lülitus (automaat In=1x16A(N))	Schneider IC60H	
		X1.1 Kõli piltlupuse				R1	Ülaandur/välgustus rüübevoolu	Schneider	
		S1 Valgustus rüübevoolu (pealüht)				X1.1	Kõli piltlupuse DIN listul	Schneider	
		R1 Ülaandur/välgustus rüübevoolu				FA1	Astronoomiline lülit	Schneider Astro 1C	
		FA1 Astronoomiline lülit				S1	Ülaandur/välgustus		
		SA1 Juhtimislootseami õmberlüliti (valgustus)				SA1	Õmberlüliti auto/pealüht	Schneider P ACT19	
		SA2 Juhtimislootseami õmberlüliti (põhitoide)				SA2	Õmberlüliti auto/pealüht	Schneider P ACT19	
		EL1 Kõli valgustus				KM1	kontaktor 3F In= AC3- 46A + abikontakt 1N0+1NC	Schneider LC1D80	
		KM1 Kontaktor				EL1	Valgusti lülit lülitus loenduriga 3-6W IP 44		
		L1,L2,L3	Valgustus juhtimise kontaktor						
		L1	Fidler 1. Turu silla pools - parem pool	AXPK 4025			QF2	automaat In=1x20A(N) Uünp=6kV abikontakt 1N0+1NC	Schneider IC60H
		L3					QF3	automaat In=1x20A(N) Uünp=6kV abikontakt 1N0+1NC	Schneider IC60H
	L1	Fidler 2. Turu Tehase poole - vasak pool	AVVG 4X16			QF4	automaat In=1x20A(N) Uünp=6kV abikontakt 1N0+1NC	Schneider IC60H	
	L3					QF5	automaat In=1x20A(N) Uünp=6kV abikontakt 1N0+1NC	Schneider IC60H	
	L1	Fidler 3. Turu Tehase poole - parem pool	AVVG 4X35			QF6	automaat In=1x20A(N) Uünp=6kV abikontakt 1N0+1NC	Schneider IC60H	
	L3					QF7	automaat In=1x20A(N) Uünp=6kV abikontakt 1N0+1NC	Schneider IC60H	
	L1					QF8	automaat In=1x20A(N) Uünp=6kV abikontakt 1N0+1NC	Schneider IC60H	
	L3					QF9	automaat In=1x20A(N) Uünp=6kV abikontakt 1N0+1NC	Schneider IC60H	
	L1					QF10	automaat In=1x20A(N) Uünp=6kV abikontakt 1N0+1NC	Schneider IC60H	
	L3					QF11	automaat In=1x20A(N) Uünp=6kV abikontakt 1N0+1NC	Schneider IC60H	
	L1					QF12	automaat In=1x20A(N) Uünp=6kV abikontakt 1N0+1NC	Schneider IC60H	
	L3	Fidler 4. Turu - Sõbra rüüt ja turu vasak pool	AVVG 4X35			QF13	automaat In=1x20A(N) Uünp=6kV abikontakt 1N0+1NC	Schneider IC60H	
	L1					QF14	automaat In=1x20A(N) Uünp=6kV abikontakt 1N0+1NC	Schneider IC60H	
	L3								

Lisa 4. Naatriumlampides kasutatav kontrolleri hämardamiseks

