



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

110 KV ÜLEMPINGEGA JÕUTRAFODE MÕJU PINGEKVALITEEDI NÄITAJATELE

EFFECTS OF 110 KV TRANSFORMERS ON POWER QUALITY INDICES

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: A. Kukk

Üliõpilaskood: 153625AAVM

Juhendaja: A. Mazikas

Kaasjuhendaja: J. Kilter

Tallinn, 2019

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.

“.....” 2019

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 2019

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”2019

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

<i>Autor:</i> Ats Kukk	<i>Lõputöö liik:</i> Magistritöö
<i>Töö pealkiri:</i> 110 kV ülempingega jõutrafode mõju pingekvaliteedi näitajatele	
<i>Kuupäev:</i> 24.05.2019	79 lk
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool	
<i>Teaduskond:</i> Inseneriteaduskond	
<i>Instituut:</i> Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut	
<i>Töö juhendaja(d):</i> doktorant Alexander Mazikas, dotsent Jako Kilter	
<i>Sisu kirjeldus:</i> <p>Käesoleva lõputöö eesmärgiks on kirjeldada 110 kV ülempingega trafode mõju erinevatele pingekvaliteedi näitajatele. Analüüsi teostamiseks kasutati 10 erineva 110 kV ülempingega jõutrafo 2018 kalendriaasta vältel kogutud ülem- ja alampinge pingekvaliteedi näitajate mõõteandmeid.</p> <p>Töö esimeses peatükis on antud teoreetiline ülevaade pingekvaliteedi olemusest, pingekvaliteeti iseloomustavatest tunnussuurustest ning nende mõjudest elektrisüsteemi ühendatud seadmete tööle. Kirjeldatakse pingekvaliteedi näitajate mõõtemetodeid ja standarditest tulenevaid piirmäärasid.</p> <p>Teises peatükis kirjeldatakse trafo modelleerimiseks kasutatavaid aseskeeme ning põhivõrrandeid, antakse ülevaade trafodes esinevatest kadudest ning tuuakse välja ka pingekvaliteedi häiringutest tulenevate täiendavate kadude avaldumise trafodes.</p> <p>Lõputöö kolmandas peatükis esitletakse ning iseloomustatakse töö analüüsiks valitud trafosid ning nende toitepiirkondi, selgitatakse mõõteandmete kogumis- ning esitamispõhimõtteid ning antakse ülevaade analüüsi läbiviimiseks kasutatud meetodikatest.</p> <p>Lõputöö neljandas peatükis on läbi viidud mõõtetulemuste analüüs, mille põhjal tehakse üldistatud järeldus 110 kV ülempingega jõutrafode mõjust kiiretele pingemuutustele nagu lühiajaline värelus, pinge asümmeetria ning 3., 5., 7., 9. ning 11. järgu harmoonikute pingetele.</p>	
<i>Märksõnad:</i> Pingekvaliteet, värelus, toitepinge asümmeetria, harmoonikud, trafo, trafo aseskeem	

ABSTRACT

Author: Ats Kukk

Type of the work: Master Thesis

Title: Effects of 110 kV transformers on power quality indices

Date: 24.05.2019

79 pages

University: Tallinn University of Technology

School: School of Engineering

Department: Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

Supervisors of the thesis: Researcher Alexander Mazikas, Associate Professor Jako Kilter

Abstract:

The purpose of this thesis is to analyze and describe the effect of 110 kV transformers on power quality indices. The analysis is based on voltage quality measurement data gathered over the period of 01.01.2018-01.01.2019 from 10 different 110 kV transformers.

The first chapter gives a theoretical overview of power quality indices and their effect on equipment used in power grids. The measurement methods and limits of power quality indices are also discussed.

The second chapter describes the calculation of transformers via two-port networks and gives an overview of the transformer losses induced by the voltage quality disturbances.

The third chapter of the thesis gives an overview of the transformers and their respective regions that are used in the analysis. The principles of data collection, presentation and used analysis methods are given.

In the fourth chapter based on the analysis of data that is carried out, a generalized affect of 110 kV transformers on voltage quality indices such as short term flicker, voltage imbalance and the harmonics by the orders of 3, 5, 7, 9 and 11 are drawn.

Keywords: voltage quality, flicker, voltage imbalance, harmonics, transformer, two-port network

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	110 kV ülempingega jõutrafode mõju pingekvaliteedi näitajatele
Lõputöö teema inglise keeles:	Effects of 110 kV transformers on power quality indices
Üliõpilane:	Ats Kukk, 153625AAVM
Eriala:	Elektroenergeetika
Lõputöö liik:	Magistritöö
Lõputöö juhendaja:	Alexander Mazikas
Lõputöö kaasjuhendaja:	Jako Kilter
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	30.06.2020
Lõputöö esitamise tähtaeg:	24.05.2019

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

1. Teema põhjendus

Pingekvaliteet kui oluline elektrivarustuse kvaliteedi näitaja omab suurt mõju kõigile elektrisüsteemi osalistele. Oluliseks osaks pingekvaliteedi tagamise protsessis on elektrisüsteemiga liituvate elektripaigaldiste mõju modelleerimine. Põhivõrgu ja jaotusvõrgu vaheliste 110 kV ülempingega jõutrafode mõju pingekvaliteedi näitajatele on seni arvestatud kaudselt või jäetud arvestamata. Elering AS ning Elektrilevi OÜ pingekvaliteedi mõõtesüsteemid võimaldavad mõõta kõiki pingekvaliteedi parameetreid Eesti elektrisüsteemis paiknevate 110 kV ülempingega jõutrafode eri õlgades, luues võimaluse täpsemalt kindlaks teha jõutrafode mõju pingekvaliteedi näitajatele.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on uurida Eesti elektrisüsteemis paiknevate 110 kV ülempingega jõutrafode mõju pingekvaliteedi näitajate väärtustele üleminekul ülekandevõrgust jaotusvõrku.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

1. Analüüsida rahvusvahelist kirjandust elektrienergia kvaliteedi alal, keskendudes jõutrafodega seotud teemadele

2. Elering AS ja Elektrilevi OÜ mõõteandmete analüüs.
3. Hinnata mõõteandmete põhjal jõutrafode ülekandekarakteristikute määramise (eri pingekvaliteedi näitajate suhtes) võimalusi, vajadusel kasutades statistilist analüüsi.
4. Ülekandekarakteristikute määramise võimalusel jõutrafode aseseemide modelleerimine, nt kasutades neliklemmide teooriat. Vastasel juhul hinnata pingekvaliteedi häiringute mõju ulatust ning iseloomu olemasolevate mõõteandmete põhjal.

4. Lähteandmed

1. Mõõteandmed Elering AS ja Elektrilevi OÜ pingekvaliteedi mõõtesüsteemidest.
2. Erialane kirjandus ja publikatsioonid.

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	3
ABSTRACT	4
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	5
EESSÕNA.....	9
SISSEJUHATUS.....	10
1. ELEKTRI KVALITEET	12
1.1 Pingekvaliteedi regulatsiooni vajadus.....	13
1.2 Pingekvaliteedi näitajate mõjud ning piirmäärad.....	14
1.3 Värelustugevus	15
1.4 Toitepinge asümmeetria	16
1.5 Harmoonikute pinged	17
2. TRAFIO ASESKEEMID	21
2.1 Trafo magnetahelate vastastikune induktiivsus.....	21
2.2 Trafodes esinevad kaod.....	22
2.3 Harmoonikute poolt põhjustatud kaod trafodes.....	24
3. MÕÕTETULEMUSED	25
3.1 Mõõtetulemuste analüüsi meetodika.....	26
3.2 Mõõtetulemuste hajuvusdiagrammid	27
3.3 Mõõtetulemuste keskväärtuste võrdlus	28
3.4 Pingekvaliteedi näitajate sõltuvus trafo aktiivkoormusest	30
4. MÕÕTETULEMUSTE ANALÜÜS	32
4.1 Lühiajaline värelustugevus	32
4.2 Toitepinge asümmeetria	38
4.3 Harmoonikute pinged	44

4.3.1 3. järgu harmooniku pinge.....	45
4.3.2 5. järgu harmooniku pinge.....	50
4.3.3 7. järgu harmooniku pinge.....	55
4.3.4 9. järgu harmooniku pinge.....	60
4.3.5 11. järgu harmooniku pinge.....	65
KOKKUVÕTE.....	71
SUMMARY.....	74
KASUTATUD KIRJANDUS.....	77
LISAD.....	79

EESSÕNA

Käesoleva magistritöö teema on välja pakutud lõputöö juhendaja poolt, kes on Tallinna Tehnikaülikooli doktorant.

Pingekvaliteet avaldab tugevat mõju kõigile elektrisüsteemi ühendatud seadmetele ning komponentidele. Hindamaks pingekvaliteeti lõpptarbija juures on vajalik omada arusaama, kuidas pingekvaliteet põhivõrgust läbi trafode jaotusvõrku ja sealt edasi lõpptarbijani liikudes muutub. Seni on põhivõrgu ja jaotusvõrgu vaheliste 110 kV ülempingega jõutrafode mõju pingekvaliteedi näitajatele arvestatud kaudselt või jäetud arvestamata sest pingekvaliteedi analüüsiks on vajalik teostada pingekvaliteedi mõõtmisi, mida on igas tarbimispunktis ebaotstarbekas teha.

Eestis on põhi- ning jaotusvõrgu vaheliste jõutrafode analüüsiks soodne olukord, sest nii jaotusvõrguettevõtte (Elektrilevi OÜ) kui ka põhivõrguettevõtte (Elering AS) omavad samade trafode puhul vastavalt alam- ja ülempingeõlgadel pingekvaliteedi analüsaatoreid. See võimaldab mõõteandmete põhjal analüüsida 110 kV ülempingega jõutrafode mõju pingekvaliteedi näitajatele, mis on ka käesoleva lõputöö teema käsitus. Lõputöös analüüsitakse trafode mõju kiiretele pingemuutustele nagu lühiajaline väreelus, pinge asümmeetria ning harmoonikute pinged.

Lõputöö algandmetena on kasutatud Elektrilevi OÜ ning Elering AS pingekvaliteedi seiresüsteemidest saadud mõõtetulemusi. Töö koostamiseks on kasutatud erialast kirjandust standardite, raamatute ning teadusartiklite näol, mis on kogutud Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogust ning erinevatest andmebaasidest.

Töö autor soovib omalt poolt tänada lõputöö juhendajat Alexander Mazikat, kes on aidanud konsultatsioonide, märkuste ning soovitude näol kaasa töö valmimisele. Lisaks tänatakse Marko Kiiski ning Karel Mägi, kes aitasid lõputöö valmimiseks vajalike lähteandmete kogumisega.

Ats Kukk

Maarjamõisa tee 7, Aravete, Järva vald

kukkats@gmail.com

+372 5682 8705

SISSEJUHATUS

Suurenenud jõuelektronikal põhinevate seadmete kasutuselevõtt seoses nii tööstuste automatiseerimisega, hajatootmiseseadmete ühendamisel elektrivõrguga läbi inverterite kui ka eratarbijate kodumajapidamistes kasutuses olevate mittelineaarsete tarvitite näol on toonud olukorra, kus pingekvaliteedi häiringud avaldavad tugevat mõju elektrisüsteemi ja sellega ühendatud seadmete tööle. Vältimaks elektri kvaliteedi häiringutest tulenevaid negatiivseid mõjusid nii seadmetele kui lõpptarbijatele on oluline pingekvaliteedi näitajate regulatsioon, mille eesmärgiks on minimeerida elektrienergia ülekandel esinevaid kadusid, seadmetel esinevaid rikkeid ning seadmete üleliigset kuumenemist ja seeläbi ka eluea vähenemist.

Pingekvaliteedi mõõtmised aitavad hinnata pingehäiringute suurusjärku, mida elektrienergia ülekandeks kasutatavad seadmed peavad olema võimelised taluma, hõlbustades seeläbi seadmete dimensioneerimise ning investeeringute valiku põhimõtteid. Hindamiseks pingekvaliteeti lõpptarbijajuures on vajalik omada arusaama, kuidas pingekvaliteet põhivõrgust läbi trafode jaotusvõrku ja sealt edasi lõpptarbijani liikudes muutub [1] [2].

Käesoleva lõputöö eesmärgiks on 2018. kalendriaasta jooksul kogutud mõõteandmete analüüsi põhjal hinnata 110 kV ülempingega jõutrafode mõju ning määrata võimalusel ülekandekarakteristikud pingekvaliteedi näitajatele. Töö raames käsitletakse pingekvaliteedi pidevaid nähtuseid, täpsemalt kiireid pingemuutuseid nagu lühiajaline väreelus, pinge asümmeetria ning harmoonikute pinged. Töös kasutatakse 10 erineva 110 kV ülempingega jõutrafo pingekvaliteedi mõõtetulemusi, mis on kogutud jõutrafode ülem- ja alampingeõlgadest. Antud lõputöö eesmärk ei ole anda hinnangut analüüsitavate trafode mõõtetulemuste vastavusele kvaliteedinormidele.

Töö esimene peatükk annab teoreetilise ülevaate pingekvaliteeti iseloomustavatest tunnussuurustest ning standarditest, millest Eestis lähtutakse. Selgitatakse pingekvaliteedi regulatsiooni vajadusest ning pingehäiringutest tulenevatest mõjudest süsteemi ühendatud seadmetele. Kirjeldatakse pingekvaliteedi näitajate mõõtemetodeid ning standarditest tulenevaid piirmäärasid.

Teises peatükis kirjeldatakse aseskeeme ning võrrandeid, mida on võimalik kasutada trafode modelleerimiseks ning elektriliste seoste analüüsiks. Antakse ülevaade trafodes esinevate kadude põhjustest ning nende avaldumisest. Lisaks kirjeldatakse trafodes esinevate täiendavate kadude avaldumist, mis on põhjustatud pingekvaliteedi häiringutest.

Lõputöö kolmanda peatüki alguses kirjeldatakse töö analüüsiks valimisse valitud trafode põhilisi tehnilisi parameetreid ning nende toitepiirkondasid. Antakse ülevaade töös kasutatud mõõteandmete kogumiseks kasutatud meetodikast ning andmete esitamise põhimõtetest. Põhjendatakse analüüsi läbiviimiseks kasutatud meetodite kasutamist ning kirjeldatakse antud meetodikate läbiviimise põhimõtteid.

Lõputöö viimases peatükis viiakse läbi vastavalt kolmandas peatükis kirjeldatud meetodikatele valimisse kuuluvate trafode mõõtetulemuste analüüs. Analüüsi tulemuste põhjal tehakse järeldus, millist mõju 110 kV ülempingega jõutrafod kiiretele pingemuutustele nagu lühiajaline värelus, pinge asümmeetria ning harmoonikute pinged avaldavad.

Lõputöös kasutatavad mõõtmistulemused on teostatud Elering AS ning Elektrilevi OÜ pingekvaliteedi seiresüsteemides kasutades EVS-EN-61000-4-30 põhjal A-klassi täpsuse nõuetele vastavaid pingekvaliteedi analüsaatoreid, milleks on vastavalt Informa PMD-A ja Elspec Blackbox G4400. Mõõtetulemuste analüüsi teostamiseks on kasutatud Microsoft Excel ning RStudio tarkvarasid.

1. ELEKTRI KVALITEET

Elektri kvaliteeti saab mõista kui elektritarbijate varustuskindlust ja talitusparameetrite vastavust etteantud nimisuurustele. Sellest tulenevalt liigituvad elektrivarustuse kvaliteedinõuded, mida võrguettevõtjatele rakendatakse kahte kategooriasse:

- nõuded teeninduse kvaliteedile;
- nõuded elektrienergia kvaliteedile.

Teeninduse kvaliteedi nõuetega nähakse võrguettevõtjatele nii jaotus- kui ka põhivõrgu teeninduspiirkondades ette tavapärase teenuse pakkumise toimingute teostamiseks tähtsajad. Toimingud, millele tähtaegu rakendatakse on näiteks võrguühenduse katkestamine kliendi soovil või selle taaspingestamine pärast tekkinud maksevõla tasumist, tarbimiskoha ülevaatus seoses mõõteprobleemidega ning mõõteseadme vahetus kliendi soovil, tasusid ja makseid käsitletavatele päringutele vastamine ning plaanilistest katkestustest ja töödest asjaosalistele etteteatamine.

Elektrienergia kvaliteedi nõuded jagunevad omakorda nõueteks toitekatkestustega seotud elektrivarustuskindlusele ning pingekvaliteedile. Elektrivarustuskindluse nõuetega nähakse ette elektrivarustuse taastamise aeg katkestuse korral ning ühe tarbimiskoha kohta aastas lubatud katkestuste kestus.

Pingekvaliteeti saab võrguettevõtja poolt vaadatuna mõista kui mõõdetavate tunnussuuruste suhestumist vastava tunnussuuruse etteantud nimiväärtustesse. Vastavalt majandus- ja kommunikatsiooniministri määrusele nr 42 on Eestis pingekvaliteedi tagamisel soovitatav lähtuda standardist EVS-EN 50160, mis määratleb, iseloomustab ja kirjeldab madal-, kesk- ja kõrgepinge vahelduvvoolu elektrivõrkude pingetunnussuuruste piirväärtusi elektrivõrgu kasutaja liitumispunktis normaaltalitluses [3].

Standardi EVS-EN 50160 kohaselt saab avalikes madal-, kesk- ja kõrgepingevõrkudes elektrienergia pingetunnussuurused kategoriseerida kui [4]:

- Kestvateks nähtusteks, s.o ajas kestvalt esinevad kõrvalekalded nimiväärtusest, mille alla kuuluvad:
 - Toitepinge nimisagedus (*frequency of the supply voltage*);
 - Toitepinge aeglased muutused (*voltage variations*);
 - Kiired pingemuutused (*rapid voltage change*);
 - Üksik kiire pingemuutus (*single rapid voltage change*);
 - Värelustugevus (*flicker severity*);

- Toitepinge asümmeetria (*supply voltage unbalance*);
- Harmoonikute pinge (*harmonic voltage*);
- Vaheharmoonikute pinge (*interharmonic voltage*);
- võrgusignaali pinged (*mains signalling voltage*);
- Pinge sündmusteks, s.o järsud ja olulised kõrvalekalded normaalsest või soovitud lainekujust, mille alla kuuluvad:
 - Toitepinge katkestused (*supply voltage interruption*);
 - Toitepinge lohud/muhud (*supply voltage dip/swell*);
 - Transientliigpinged (*transient overvoltages*).

Käesolevas töös analüüsitakse pinge tunnussuuruste kestvatest nähtustest kiireid pingemuutuseid. Täpsemalt uuritakse 110 kV ülempingega trafode mõju lühiajalisele varelusele, toitepinge asümmeetriale ning 3., 5., 7., 9. ning 11 järku harmoonikute pingetele.

Antud tunnussuuruste mõõtemetodeid ja tulemuste interpretatsiooni käsitletakse standardis EVS-EN-61000-4 osas, kus mõõtemetodid on kirjeldatud igale asjakohasele parameetrile kujul, mis kindlustab usaldusväärsed ja korratavad tulemused, olenemata meetodi teostusest [5].

1.1 Pingekvaliteedi regulatsiooni vajadus

Elektrisüsteemi madal pingekvaliteet võib avaldada kahjulikku mõju nii süsteemi komponentidele kui ka lõpptarbija seadmetele. Sageli ei avaldu madala pingekvaliteedi mõju seadmes aga enne rikke tekkimist. Madalast pingekvaliteedist tulenevate rikete ärahoidmiseks on tähtis omada arusaama, kuidas elektri kvaliteeti mõjutavad häiringud tekivad ning millist mõju nad elektrisüsteemi ühendatud seadmete ja komponentide tööle avaldavad. Madala pingekvaliteedi mõju võib avalduda [6] [1]:

- Harmoonikute poolt põhjustatud kadudena ning liigse kuumenemise ja eluea vähenemise näol trafodes, mootorites, kaablites, kondensaatorpatareides;
- Liigpingetest tingitud seadmete isolatsiooni kahjustumise ning juhtimisseadmete väärakendumise näol;
- Varelusest tingitud nägemisaistingu häiringuna, mis väsitab silme ja põhjustab stressi;
- Toitekatkestustest tulenevate kahjude näol tootmistööstustes ning serveriparkides;
- Toitepinge asümmeetriast põhjustatud häiringuna kolmefaasiliste mootorite töös;
- Häiringuna pingelohutundlike seadmete nagu näiteks mikroprotsessorseadmed, arvutid ning asünkroonmasinate töös.

Vältimaks elektri kvaliteedi häiringutest tulenevaid negatiivseid mõjusid nii seadmetele kui lõpptarbijatele on oluline pingekvaliteedi näitajate regulatsioon, mille eesmärgiks on minimeerida elektrienergia ülekandel esinevaid kadusid, seadmetel esinevaid rikkeid ning seadmete üleliigset kuumenemist ja seeläbi ka eluea vähenemist. Pingekvaliteedi mõõtmised aitavad hinnata pingehäiringute suurusjärku, mida elektrienergia ülekandeks kasutatavad seadmed peavad olema võimelised taluma, hõlbustades seeläbi seadmete dimensioneerimise ning investeeringute valiku põhimõtteid.

Elektri kvaliteeti mõjutavate pinge tunnussuuruste ning häiringute regulatsiooniks on kasutusele võetud pingekvaliteedi standardid, mille eesmärgiks on määrata pinge tunnussuuruste piirmäärad selliselt, et võrku ühendatud seadmete töö ei oleks häiritud, näha ette ühtsustatud terminoloogia, määrata kindlaks protseduurid pingekvaliteedi näitajate mõõtmisele ning lisaks pakkuda ka ühist alust, millele seotud valdkonna insenerid oma töös saaks toetuda.

Pingekvaliteedi standardid on ametlikud kokkulepped võrguettevõtjate, tarbijate ning valitsuste vahel tagamaks elektrienergia tootmiseks, mõõtmiseks, ülekandeks ning tarbimiseks nõuetekohase metoodika ning protseduurid [1] [2].

1.2 Pingekvaliteedi näitajate mõjud ning piirmäärad

Vastavalt standardile EVS-EN-61000-4-30 võib püsiseisundite nähtuste mõõtmisel nagu harmoonikud ja värelus sageli teha kolmefaasiliste mõõtmiste asemel ühefaasilisi mõõtmisi kuna nende nähtuste faaside mõõteväärtused on omavahelises võrdluses talutavalt sümmeetrilised.

Võttes arvesse antud püsiseisundite nähtuste omavahelist sümmeetriat ning mõõteandmete suurt andmemahutu kasutatakse antud töös harmoonikute pingete ning lühiajalise väreluse analüüsiks kompaktsuse huvides faaside või liinipingete mõõtetulemuste aritmeetilisi keskmisi väärtuseid. Antud lähenemine aitab taandada analüüsivat andmehulka kompaktsemaks samal ajal arvestades kõikide faaside mõõteväärtuseid [5].

Näiteks antud töös analüüsitava trafo AJ1-T1 puhul erinevad 7. järgu harmooniku alampingepoole liinipingete keskäärtused nende aritmeetilisest keskmisest 1,04%, 1,89% ning 2,93%, mis viitab samuti mõõteandmete omavahelisele sümmeetriale ja sarnasusele.

Järgnevalt antakse uuritavate tunnussuuruste mõjude ning nende piirmäärade ülevaade ning selgitatakse, millest antud nähtused põhjustatud on.

1.3 Värelustugevus

Värelus on tingitud korduvate ja kiirete muutuste tõttu koormusvoolus, mis põhjustavad pinge kiireid muutuseid. Pinge muutustest tulenev elektervalgustuse heleduse või spektraaljaotuse ajaline kõikumine kutsub esile nägemisaistingu ebastabiilsuse mulje, mida kutsutakse väreluseks. Üheks kõige levinumaks väreluse põhjustajaks nii põhi- kui jaotusvõrkudes on tööstuslikud elektrikaarahjud.

Väreluse mõõtmiseks kasutatav meetodika ja selle mõõtmiseks kasutatavate seadmete nõutavad spetsifikatsioonid on täpsustatud standardis EVS-EN-61000-4-15. Standardis on kirjeldatud mõõtemetod, kuidas määrata värelustugevust läbi pinge mõõtmiste. Antud meetod võtab arvesse pinge muutustest tuleneva elektervalgustuse heleduse või spektraaljaotuse kõikumise ning määrab, milline on selle aistingu tajutav mõju inimesele. Mõõtemetodi väljundina toodud näitajat iseloomustatakse kui lühiajalist värelustugevust (P_{st}) ning see on normeeritud, mis tähendab, et väärtusele 1,0 vastavad pinge kõikumised põhjustavad 50% vaatlusrühmast elektervalgustuse väreluse tajumist [4] [1].

Standardi EVS-EN-50160 põhjal hinnatakse väreluse häiriva toime intensiivsust kahe suurusega [4]:

- 10-minutilises ajavahemikus mõõdetud lühiajaline värelustugevus (P_{st});
- Pikaajaline värelustugevus (P_{lt}), mis arvutatakse 2-tunnises ajavahemikus mõõdetud 12-st P_{st} väärtusest valemiga (1.1).

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{st}^3}{12}} \quad (1.1)$$

Standardis EVS-EN-50160 sätestatakse piirmäärad normaaltingimustes ainult pikaajalisele värelustugevusele (P_{lt}), mis on toodud tabelis (Tabel 1.1).

Tabel 1.1 EVS-EN-50160 Pikaajalise värelustugevuse piirmäärad [4]

Võrgu tüüp	Piirmäär
Keskpingevõrk	P_{lt} peab olema mis tahes nädalases ajavahemikus 95% ajast väiksem või võrdne 1-ga ¹
Kõrgpingevõrk	P_{lt} peab olema mis tahes nädalases ajavahemikus 95% ajast väiksem või võrdne 1-ga

¹ Väärtus on valitud eeldusel, et ülekandetegur kesk- ja madalpingevõrgu vahel on 1.

Lisaks standardis EVS-EN-50160 sätestatud värelustugevuse nõuetele on Eestis Elering AS määranud põhivõrguga liitumiseks omapoolsed tingimused, mis on toodud tabelis (

Tabel 1.2) [7].

Tabel 1.2 Elering AS värelustugevuse piirmäärad [7]

Võrgu tüüp	Piirmäär
110 kV	$E_{P_{st}i} = 1,0$ $E_{P_{lt}i} = 0,8$
330 kV	$E_{P_{st}i} = 0,8$ $E_{P_{lt}i} = 0,6$

1.4 Toitepinge asümmeetria

Pinge asümmeetriaks nimetatakse olukorda, kus kolmefaasilise süsteemi faasipingete amplituudid ei ole identsed ja/või faasidevahelised nurgad ei ole 120°. Sellest tulenevalt peab asümmeetria tingimustes lisaks pärijärgnevuskomponendile U_1 eksisteerima vastujärgnevuskomponent U_2 ja/või nulljärgnevuskomponent U_0 . Toitepinge asümmeetria võib olla tingitud näiteks [5] [2]:

- Koormuse ebaühtlasest jaotusest faaside vahel;
- Olukorrast, kus õhuliinide faasid on transponeerimata;
- Kolmefaasilise kondensaatorpatarei ühe faasi kaitse/sular on rakendunud;
- Ühe faasi katkemisest.

Vastujärgnevuskomponentidest tingitud asümmeetria häirib tarvitite, eriti mootorite talitlust – normaaltalitluses koosnevad kolmefaasilise süsteemi pinged ainult pärijärgnevuskomponentidest, mis kutsuvad kolmefaasilise mootori töös esile pärijärgnevusega pöördemomendi. Asümmeetriast tingitud vastujärgnevuskomponentide poolt tekitatavad vastujärgnevusvoolud indutseerivad aga sünkroonmasina staatori mähises vastujärgnevus-magnetvälja, mis pöörleb seisva staatori suhtes sünkroonkiirusega, kuid vastassuunas ning pöörleva rootori suhtes aga kahekordse sünkroonkiirusega. See tekitab mootori töös vastupidise pöördemomendi, mis põhjustab mootori töös vibratsiooni ning müra. Samuti kaasnevad ka rootori ergutus- ja summutusmähises ning massiivosades indutseeritud kahekordse sagedusega sekundaarvoolud, mis põhjustavad rootoris täiendavaid kadusid ning üleliigset kuumenemist. Nulljärgnevuskomponendi olemasolu tekitab neutraalinihke – potentsiaalide vahe maa ja faasipingete summa vahel, mille tagajärjel tekib lisakoormus isolatsioonile ja pingetrafoode magnetahelatele [6] [8] [9].

Toitepinge asümmeetria väärtused esitatakse suhteliste väärtustena protsentides pärijärgnevuskomponendist ning neid nimetatakse asümmeetriateguriteks. Vastujärgnevuskomponendi asümmeetriategur ($U_{2/1}$) ning nulljärgnevuskomponendi asümmeetriategur ($U_{0/1}$) arvutatakse vastavalt valemitega (1.2) ning (1.3) [5].

$$U_{2/1} = \frac{U_2}{U_1} * 100 = \frac{\text{vastujärgnevus}}{\text{pärijärgnevus}} * 100\% \quad (1.2)$$

$$U_{0/1} = \frac{U_0}{U_1} * 100 = \frac{\text{nulljärgnevus}}{\text{pärijärgnevus}} * 100\% \quad (1.3)$$

Standardi EVS-EN-50160 põhjal peab normaaltalitlustingimustes igas nädalases ajavahemikus 95% toitepinge vastujärgnevuskomponendi 10-minutilistest keskmistest efektiivväärtustest jääma vahemikku 0% kuni 2% pärijärgnevuskomponendist. Standardis normeeritakse piirmäärad üksnes vastujärgnevuskomponendile, sest see komponent on võrku ühendatud tarvitite võimalike häirete seisukohast oluline [4].

Lisaks standardis EVS-EN-50160 sätestatud toitepinge asümmeetria nõuetele on Eestis Elering AS määranud põhivõrguga liitumiseks omapoolsed tingimused, mille kohaselt ei tohi 110 kV võrgus vastujärgnevuskomponendi efektiivväärtuse 10-minutiline keskvärtus olla suurem kui 1,5% pärijärgnevuskomponendist iganädalasel mõõtmisel 95% juhtudest ning 330 kV võrgu puhul 1% pärijärgnevuskomponendist iganädalasel mõõtmisel 95% juhtudest [7].

1.5 Harmoonikute pinged

Enamasti eeldatakse, et elektrivõrgu pinge ja vool on siinuselise lainekujuga, kuid tihti esineb ka moonutatud perioodilist lainekuju. Voolu ja pinge harmoonikud on tingitud mittelineaarsetest koormustest. Mittelineaarse koormuse all mõistetakse seadet, mille voolu tarbimine ei ole proportsionaalne sellele rakendatud pingega. Sellest tulenevalt on antud seadmele ideaalse sinusoidse pinge rakendamisel resuldeeruv vool moonutatud. Põhilisteks harmoonikute allikateks elektrisüsteemis on [6] [1] [2]:

- Tööstuslikud mittelineaarsed koormused. Näiteks elektroonikaseadmed, juhitavad ajamid, alaldid, inverterid, kaarahjud, keevitusseadmed, lahenduslambid;
- Eratarbijate elektroonikaseadmed nagu näiteks televiisorid, arvutid, printerid, mikrolaine- ja induktsioonahjud.

Elektrivõrgu süsteemi impedantsi läbivad moonutatud voolud (harmoonikute voolud) põhjustavad omakorda harmoonikute pingelangu. Pinge lainekuju moonutuse tugevus ja seeläbi ka

harmonikute pingete suurused on sõltuvas voolumoonutusest ning süsteemi impedantsist, väikese takistusega võrgus jäävad voolu moonutustest põhjustatud pingelangud väikeseks ja naaberkoormuste toitepinge moonutused on väiksemad.

Harmonikute levimist võivad oluliselt mõjutada ka resonantsnähtused. Ahelal, mis sisaldab nii mahtvuslikke kui ka induktiivseid komponente, on üks või mitu resonantssagedust, mille puhul induktiivne ja mahtvuslik takistus on võrdsed. Juhul kui mingi harmooniku sagedus võrdub resonantssagedusega, võivad sellel sagedusel pinged ja voolu väärtused järsult tõusta.

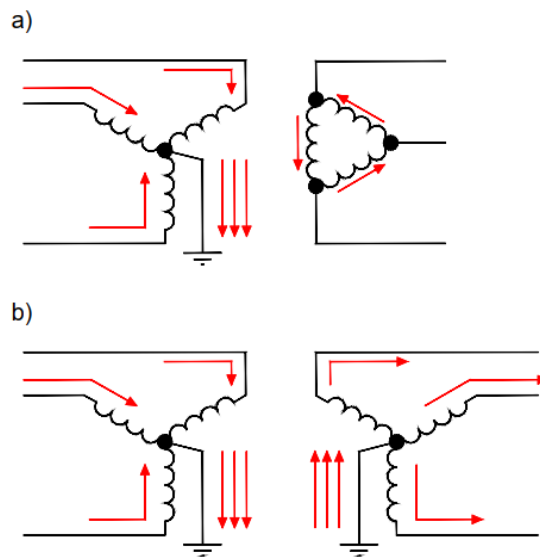
Võimalikku harmoonikute resonantsi summutab oluliselt võrgu aktiivtakistus. Võrgus summutavad resonantsi nii trafode kui õhuliinide ja kaablite aktiivtakistused. Probleeme võib tekkida kondensaatorpatareidega, mis on lülitatud alajaamade lattidele, kus suhteline aktiivtakistus on madal ning paralleelresonants seetõttu võimalik [6] [1].

Sümmeetrilises kolmeefaasilises süsteemis on võimalik harmooniku järgnevust määrata korrutades harmooniku järku (h) läbi pärijärgnevuskomponendi faaside pöörlemise suunaga ($0^\circ, 120^\circ, -120^\circ$). Teise järku harmooniku ($h=2$) puhul saaksime näiteks $2 \times (0^\circ, 120^\circ, -120^\circ) = (0^\circ, 240^\circ, -240^\circ) = (0^\circ, -120^\circ, 120^\circ)$, mille puhul on tegemist vastujärgnevusega. Kolmanda ($h=3$) järku puhul aga juba $3 \times (0^\circ, 120^\circ, -120^\circ) = (0^\circ, 360^\circ, -360^\circ) = (0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$, mille puhul on tegemist nulljärgnevusega. Sarnaselt on võimalik määrata ka faasijärgnevused kõikidele teistele harmoonikutele [6] [1]:

- Harmoonikud järguga $h=1, 4, 7, 10, 13, 16, \dots$ on üldiselt pärijärgnevusega;
- Harmoonikud järguga $h=2, 5, 8, 11, 14, 17, \dots$ on üldiselt vastujärgnevusega;
- Kolmandad harmoonikud $h=3, 6, 9, 12, 15, \dots$ on üldiselt nulljärgnevusega.

Kolmandatele harmoonikutele tuleb pöörata eraldi tähelepanu, sest nende nulljärgnevuse tõttu on nende käitumine võrgus teistsugune kui ülejäänud harmoonikutel. Kolmandat järku harmoonikute liikumisele avaldab mõju võrgu konfiguratsioon ning nende erinevus ülejäänud harmoonikutest tuleb välja maandatud tähega süsteemides, kus vool saab liikuda nulljärgnevuskomponentidele omaselt neutraalist läbi maa. Kolmandat järku harmoonikute nulljärgnevuse tõttu toimub maandatud tähega süsteemides nende liitumine neutraalis, mis võib omakorda põhjustada neutraali ülekoormust või seadmete mitteotstarbekohast töötamist, kuna pingelangu tõttu neutraalis on faasipinged moonutatud. Kolmnurkühendusega süsteemide korral sulguvad kolmandad harmoonikud trafo mähistes ja avalduvad seal mähiste kuumenemise näol. Avatud kolmnurkühendusega süsteemides kolmandad harmoonikud liituvad ning võivad tekitada soovimatuid pingeid mähiste otste vahel.

Kolmandate harmoonikute levimisel eri pingeastmetega võrkude vahel omab määravat rolli trafo lülitusgrupp. Joonisel (Joonis 1.1a) on toodud Ynd-lülitusgrupiga trafo, mille puhul kolmandad harmoonikud sisenevad Y mähisesse ning harmoonikute nulljärgnevuse tõttu toimub nende liitumine neutraalis. Sekundaarpoolsetel Δ -mähistel aga kolmandat järku harmoonikud sulguvad trafo mähistes ning ei avaldu väljuvates liinivooludes. Joonisel (Joonis 1.1b) on toodud aga Ynyn-lülitusgrupiga trafo, mille puhul kolmandad harmoonikud liiguvad tõkestamatult ühelt trafo mähiselt teisele ja sealt võrku [6] [1].



Joonis 1.1 Kolmeaga jaguvate harmoonikute voolude liikumine kolmefaasilises trafos [1]

Mainimist tasub, et Ynd- lülitusgrupiga trafo puhul toimub täielik kolmandate harmoonikute sulgumine juhul, kui kõikide faaside kolmandate harmoonikute voolude suurused on võrdsed. Ebasümmeetriliste kolmandat järku harmooniku voolude puhul kandub osa harmoonikute vooludest edasi liinidesse. Liinivooludesse jõudvate harmoonikute suurus on sõltuvuses antud harmoonikute voolude ebasümmeetriast. Näiteks kolmefaasilises süsteemis kolmandat järku harmooniku olemasolul ainult ühes faasis tekib olukord, kus antud harmoonikud ei sulgu trafo Δ -mähistes vaid kanduvad täiel määral edasi võrku [2].

Standardi EVS-EN-50160 kohaselt peab iga nädalases ajavahemikus iga harmooniku pinge 10-minutilistest keskmistest efektiivväärtustest 95% olema ettenähtud piirmäärade väiksemad või nendega võrdsed. Harmooniku pingete piirmäärad on sätestatud protsentides pinge põhikomponendist, mis on toodud nii kesk- kui kõrgepingele vastavalt tabelites (Tabel 1.3 ja Tabel 1.4). Standardis ei määratleta piirmäärasid üle 25-nda järku harmoonikute pingetele, sest nad on tavaliselt väikesed ning resonantsnähtuste tõttu suurel määral ettearvamatud [4].

Tabel 1.3 Harmoonikute pingete piirmäärad keskpingel [4]

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	6,0%	3	5,0%	2	2,0%
7	5,0%	9	1,5%	4	1,0%
11	3,5%	15	0,5%	6 kuni 24	0,5%
13	3,0%	21	0,5%		
17	2,0%				
19	1,5%				
23	1,5%				
25	1,5%				

Tabel 1.4 Harmoonikute pingete piirmäärad kõrgepingel [4]

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	5,0%	3	3,0%	2	1,9%
7	4,0%	9	1,3%	4	1,0%
11	3,0%	15	0,5%	6 kuni 24	0,5%
13	2,5%	21	0,5%		
17	läbivaatamisel				
19	läbivaatamisel				
23	läbivaatamisel				
25	läbivaatamisel				

Harmoonikute pingete usaldusväärsete mõõtetulemuste teostamiseks peab arvestama kasutatava pingetrafo sagedusreageeringu amplituudiga. Seadme sagedusreageeringu amplituud viitab, mitmekordselt erineb seadme väljundsignaali amplituud sisendsignaali amplituudist mingil kindlal sagedusribal. Trafode puhul nimetatakse sellist näitajat, mis on valdavalt määratud 50-60 Hz vahemikus, trafo ülekandesuhteks. Kasutusolevates pingekvaliteedistandardites määratakse pingetrafo täpsuse nõuded püsiseisundil ja nimisagedusel (50 Hz või 60 Hz). Kõrgematel sagedustel harmoonikute pingete mõõtmiseks kasutatavate pingetrafo sekundaarmähise mõõtetulemused võivad aga erineda harmoonikute pingete tegelikest väärtustest. Sagedusribal 100–2500 Hz võib epoksiidvaigust isolatsiooniga induktiivse pingetrafo mõõteviga nominaalkoormusel olla vahemikus 5–7% [10].

2. TRAFIO ASEESKEEMID

Trafo elektriliste ja magnetiliste suuruste arvutamise ja modelleerimise lihtsustamiseks on võimalik kasutada takistite ekvivalentset ahelat ehk trafo aseseemi, milles on kajastatud trafo kõik olulised parameetrid ning nendevahelised seosed. Trafo aseseemi koostamisel lähtutakse ühe mähise keerdude taandamisest teise mähise keerdude arvule, mille tulemusena on nende voolud, pinged ja muud suurused ühesugused – trafo ülekanalitegur on 1. Trafo mähiste keerdude taandamise tulemusena on võimalik primaar- ja sekundaarahelad omavahel läbi aseseemi ühendada ning seeläbi trafo analüüsi oluliselt lihtsustada [8] [11].

2.1 Trafo magnetahelate vastastikune induktiivsus

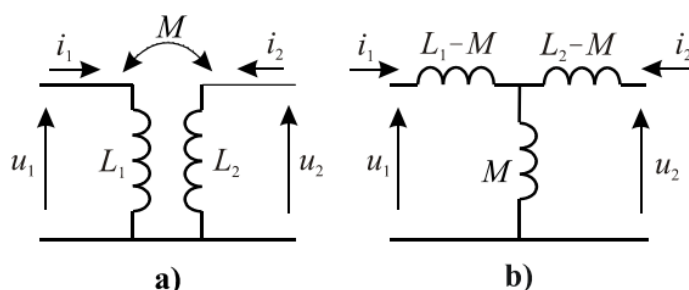
Joonisel (Joonis 2.1a) on toodud trafo magnetahelate oma ja vastastikuse induktiivsuse skeem, kus L_1 ning L_2 tähistavad vastavalt primaar- ja sekundaarmähise omainduktiivsusi ning M väljendab mähiste vastastikust induktiivsust. Vastastikune induktiivsus on võimalik avaldada omainduktiivsuste kaudu valemiga (2.1) [6].

$$M = \kappa \sqrt{L_1 L_2} \quad (2.1)$$

Kus sidestustegur κ avaldub valemiga (2.2) [6].

$$\kappa = \frac{R_1}{\sqrt{(R_1 + R_1)(R_2 + R_1)}} \leq 1 \quad (2.2)$$

Valemis (2.2) on R_1 ja R_2 vastavalt primaar- ning sekundaarmähise aktiivtakistused ning R_l on südamik magnetiline takistus ehk reluktants. Kuna elektrivarustuses on trafodel kõrge magnetilise läbitavusega ferromagnetiline südamik ning mähised on keritud üksteise peale siis magnetvoo leke on minimaalne ning $\kappa \approx 1$.

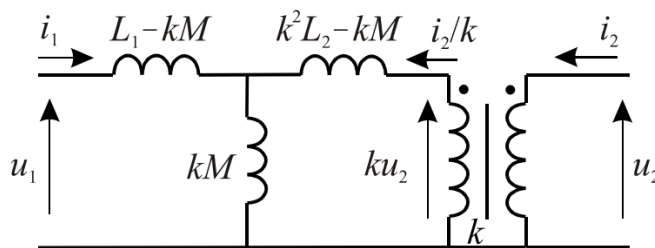


Joonis 2.1 Kahe magnetiliselt sidestatud mähise magnetahelate oma ja vastastikuse induktiivsuse skeem (a) ja selle lihtsustatud aseseem (b) [6]

Vastastikuseid induktiivsusi sisaldavate ahelate püsitalitluse analüüsimisel toetutakse efektiivväärtustele, kasutades võrrandeid (2.3). Vastastikuseid induktiivsusi iseloomustavatele võrranditele (2.3) vastab joonisel (Joonis 2.1b) toodud aseskeem.

$$\underline{U}_1 = j\omega L_1 \underline{I}_1 + j\omega M \underline{I}_2, \quad \underline{U}_2 = j\omega L_2 \underline{I}_2 + j\omega M \underline{I}_1 \quad (2.3)$$

Lisades aseskeemile (Joonis 2.1b) ideaalse trafo keerdude suhtega k saadakse tulemusena trafo aseskeem (Joonis 2.2), kusjuures vastastikuse induktiivsuse võrrandid (2.3) jäävad kehtima sõltumata k väärtusest. Tavapäraselt valitakse k võrdseks trafo tegeliku ülekandesuhtega, mille tulemusena on võimalik taandada trafo parameetreid tema primaarpoolele.



Joonis 2.2 Trafo aseskeem [6]

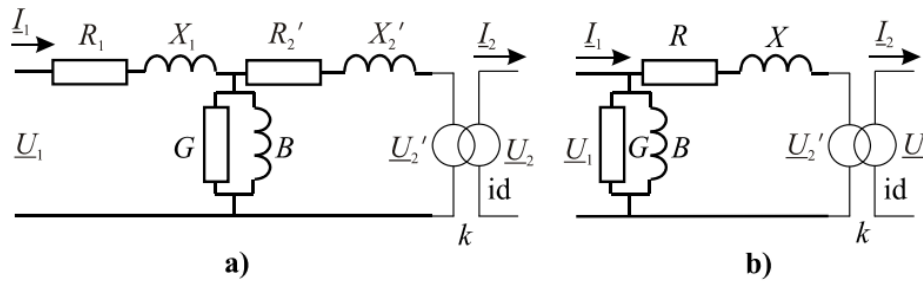
2.2 Trafodes esinevad kaod

Trafo analüüsimisel peab aga arvestama ka trafos esinevate kadudega. Üheks kadude põhjuseks on vaseskaod, mis on tingitud trafo mähiste aktiivtakistuse tõttu ning avalduvad trafo mähiste kuumenemise näol. Trafo aktiivtakistust on võimalik avaldada võrrandi (2.4) abil, milles R_1 on trafo primaarmähise aktiivtakistus ning R_2' on trafo sekundaarmähise aktiivtakistus taandatuna primaarpoolele. Lisaks esinevad trafos ka rauaskaod, mida põhjustab hüstereesiefekt ja pöörivoolud trafo südamikus [6] [12].

$$R = R_1 + R_2' = R_1 + \left(\frac{U_{1N}}{U_{2N}}\right)^2 * R_2 \quad (2.4)$$

Jõutrafo klassikaline T-aseskeem on toodud joonisel (Joonis 2.3a), milles R_1 ning R_2' vastavad trafo primaar- ning sekundaarmähise aktiivtakistustele, kus sekundaarmähise takistus on taandatud primaarpoolele. Suurused X_1 ning X_2' on trafo primaarpoolele taandatud puisteinduktiivtakistused, aktiivjuhtivus G vastab trafo rauaskaole ning reaktiivjuhtivus B on trafo magneetimitakistuse X_m pöördväärtus. Suurused U_2' ja I_2' on sekundaarpinge ja -vool taandatuna trafo primaarpoolele ning avalduvad vastavalt võrranditele (2.5) [12].

$$U_2' = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} * U_2 \quad I_2' = \frac{U_{2N}}{U_{1N}} * I_2 \quad (2.5)$$



Joonis 2.3 Trafo T- ja Γ -kujuline aseskeem [6]

Trafode analüüsimisel on võimalik kasutada ka lihtsustatud aseskeeme. Näiteks on võimalik T-aseskeemil tuua juhtivused G ja B aseskeemi primaar- või sekundaarklemmidele ning summeerida takistused $R=R_1+R_2'$ ja $X=X_1+X_2'$, mille tulemusena saadakse lihtsustatud Γ -aseskeem (Joonis 2.3b). Γ -aseskeem tagab elektrivõrkude praktilistel arvutamistel piki- ja põikharude parameetrite suure erinevuse tõttu piisava täpsuse.

Trafo aseskeemis (Joonis 2.3b) modelleerib pikitakistus R mähiste aktiivtakistust, millele vastab vaseskadu, X puistetakistust, millele vastab puistekadu. Põikjuhtivus G modelleerib trafo rauaskadu ning B magneetimiskadu.

Vaseskadu on pikiharus esinev kadu, mida arvutatakse valemiga (2.6) [12].

$$\Delta P_{Cu} = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} * R = \frac{S^2}{U^2} * R \quad (2.6)$$

Puistekao saab leida analoogiliselt valemiga (2.7) [12].

$$\Delta Q_X = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} * X = \frac{S^2}{U^2} * X \quad (2.7)$$

Trafos esinevad puisteinduktiivtakistused avalduvad omakorda valemiga (2.8), kus S_1 ning S_2 on vastavalt primaar- ning sekundaarmähise puisteinduktiivsused [8].

$$X = X_1 + X_2', X_1 = \omega S_1, \quad X_2' = \omega S_2' \quad (2.8)$$

Rauaskao saab määrata valemiga (2.9) [12].

$$\Delta P_{Fe} = U^2 * G \quad (2.9)$$

Magneetimiskadu leitakse analoogiliselt valemiga (2.9) [12].

$$\Delta Q_B = U^2 * B \quad (2.10)$$

Kokkuvõtvalt on võimalik trafo summaarsed aktiiv- ja reaktiivkoormuskadud määrata valemitega vastavalt (2.11) ning (2.12) [12].

$$\Delta P_T = \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe} = \frac{S^2}{U^2} * R + U^2 * G \quad (2.11)$$

$$\Delta Q_T = \Delta Q_X + \Delta Q_B = \frac{S^2}{U^2} * X + U^2 * B \quad (2.12)$$

2.3 Harmoonikute poolt põhjustatud kaod trafodes

Harmoonikute poolt põhjustatud vaseskaod trafodes on tingitud moonutatud voolude liikumisel läbi trafo primaar- ja sekundaarmähiste. Trafos esinevad vaseskaod on ruutvõrdelises seoses trafo mähiseid läbiva vooluga ning seega kasvavad harmoonikute poolt põhjustatud vaseskaod proportsionaalselt trafo mähist läbiva voolu efektiivväärtuse tõusuga, mis on tingitud harmoonikute vooludest [13].

Lisaks avalduvad harmoonikute poolt põhjustatud kaod trafo südamikus tekkivate pöörisvoolukadude näol. Faraday seaduse kohaselt indutseeritakse magnetvoo korral elektromotoorjõud kõikides kontuurides, mida antud magnetvoog läbib. Kui kontuur on juhtiv, siis tekib seal ka elektrivool. Voolu läbimisel magnetahelat toimub magnetahela kuumenemine seda läbiva vahelduvvoolu energia arvelt, mille tõttu nõrgeneb ka magnetväli. Magnetväljas kadunud energia asendatakse läbi toiteallika. Tekkivat energiakadu nimetatakse pöörisvoolukaoks [14].

Pöörisvoolukaod moodustavad osa rauaskadudest ning on ruutvõrdelises seoses trafo koormusvooluga ning koormusvoolu sagedusega, antud kadusid on võimalik arvutada valemiga (2.13) [14].

$$\Delta P_e = K_e * B_{max}^2 * f^2 * t^2 * V \quad (2.13)$$

kus

V – magnetahela ruumala;

K_e – magnetahela materjali eritakistust ja kasutatavaid mõõtühikuid arvestav tegur;

f – sagedus;

t – teraselehe paksus;

B_{max} – magnetvootiheduse amplituud.

3. MÕÕTETULEMUSED

Antud töös analüüsitakse mõõtetulemusi kümne trafo eri õlgadest. Seejuures trafod paiknevad viies eri alajaamas (igas alajaamas kaks trafot) ning kumbki trafo toidab eri keskpinge sektioone. See võimaldab analüüsida, kuivõrd erinevad on pingekvaliteedi näitajad ühe põhivõrgu punktiga ühendatud veidi erineva iseloomuga keskpingevõrgu osades. Mõõteandmed on pärit kokku 15 mõõtepunktist, millest viis kuuluvad Elering AS ning 10 Elektrilevi OÜ mõõtesüsteemi. Analüüsitavaate mõõtepunktide valikul on lähtutud, et valimisse jääks nii sarnaste kui ka erinevate parameetritega (trafo ülekandetegur, trafo võimsus) trafosid. Mõõtepunktide põhjal valitud trafode põhilised tehnilised näitajad on toodud tabelis (Tabel 3.1).

Tabel 3.1 Trafode põhiparameetrid

Trafo nimi	Ülempinge nimipinge U_{n1} [kV]	Alampinge nimipinge U_{n2} [kV]	Ülempinge nimivõimsus S_{n1} [MVA]	Alampinge nimivõimsus S_{n2} [MVA]	Trafo lülitusgrupp	Trafo neutraali maanduslülitise asend
AJ1-T1	110	20	25	25	Y_0/Δ -11	Sees
AJ1-T2	110	20	25	25	Y_0/Δ -11	Väljas
AJ2-T1.1 ¹ AJ2-T1.2 ¹	110	10	63	2 x 31,5	$Y_0/\Delta/\Delta$ -11-11	Sees
AJ3-T1	110	10	6,3	6,3	Y_0/Δ -11	-
AJ3-T2	110	10	10	10	Y_0/Δ -11	-
AJ4-T1	110	6	31,5	31,5	Y_0/Δ -11	Sees
AJ4-T2	110	6	31,5	31,5	Y_0/Δ -11	Väljas
AJ5-T1	110	6	40	40	Y_0/Δ -11	Väljas
AJ5-T2	110	6	40	40	Y_0/Δ -11	Sees

¹ Antud mõõtepunktide puhul on tegu kolmemähiselise trafo alampingepoole kahe erineva mähisega.

Alajaamade tarbimiskoormuseid ning toitepiirkondasid saab iseloomustada alljärgnevalt:

- Alajaam AJ1 – Osalise tööstuse osakaaluga maapiirkonnas asuv alajaam;
- Alajaam AJ2 – Suurt eramupiirkonda teenindav linnas asuv sõlmajaam, mille lähedal paikneb mitu konventsionaalset (sünkroongeneraatoriga) elektrijaama;
- Alajaam AJ3 – Peamiselt kodumajapidamiste koormustega (ilma tööstuseta) maapiirkonnas asuv alajaam;
- Alajaam AJ4 – Võrdlemisi suurt eramupiirkonda teenindav linnas asuv alajaam, sõlmjaamade läheduses;
- Alajaam AJ5 – Elamupiirkonda ja võrdlemisi suurt tööstuskoormust teenindav linnas asuv alajaam.

Elektrilevi OÜ ning Elering AS mõõtepunktide mõõtetulemused on teostatud standardi EVS-EN-61000-4-30 põhjal A-klassi täpsuse nõuetele vastavate pingekvaliteedi analüsaatoritega, milleks on vastavalt Elspec Blackbox G4400 ning Informa PMD-A. Alampingel on mõõteseadmed paigaldatud pinge mõõtmiste teostamiseks vastava sektsiooni latistusele ning voolu mõõtmiste teostamiseks jaotusseadme trafo kambrisse. Ülempingel toimuvad pinge mõõtmised alajaama latistusel, kus erinevate sektsioonide mõõtetulemustena kasutatakse ühist mõõtmist.

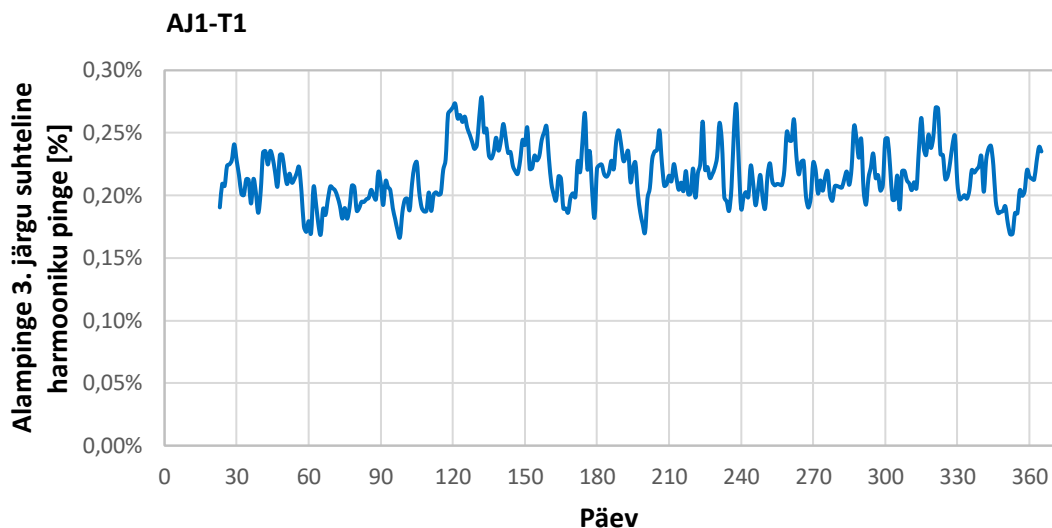
3.1 Mõõtetulemuste analüüsi meetodika

Mõõtetulemuste analüüsiks kasutatakse vastavalt standardile EVS-EN-61000-4-30 juhistele 10-minuti keskmistatud väärtuseid, harmoonikute pingete võrdlemisel kasutatakse ülempingel faasipinge mõõteväärtuseid ning alampingel liinipinge mõõteväärtuseid. Mõõtmised on teostatud perioodil 01.01.2018-01.01.2019.

Mõõtetulemused on alam- ning ülempingepoolel välja loetud vastavalt Elspec Investigator ning Qualitrol IQ+ Master Station tarkvaradega ning salvestatud Microsoft Excel formaadis aegridadena, millele antud töö analüüs tugineb. Mõõtetulemused on kogutud 2018 kalendriaasta jooksul ning kasutatud on mõõtetulemuste 10-minuti keskmistatud väärtuseid.

Teostatud mõõtmised on pidevad, kuid alajaama seadmete riketest, hooldusvajadusest või mõne muu tehnilise probleemi tõttu on trafode mõõtetulemustes aasta lõikes ajalised intervallid, kus mõõteandmed ei ole kättesaadavad. Sellest tulenevalt on aegridadena saadud tulemustest eemaldatud vastavalt mõõteandmete olemasolule kirjed selliselt, et igale alampinge mõõtmisele jääks vastama sama aegväärtusega ülempinge mõõtmine ja vastupidi.

Harmoonikute pingete ning lühiajalise väreluse analüüsiks on iga faasi- või liinipinge kohta saadud eraldi mõõtmine, misjärel on antud faasi- või liinipingete mõõteväärtustest analüüsi kompaktsuse huvides arvatud aritmeetiline keskmine, mida edaspidises analüüsis kasutatakse. Faasi- ja liinipingete aritmeetiliste keskmiste mõõteväärtuste kasutamine on põhjendatud punktis 1.2. Kasutatavate aegridade illustreerimiseks on joonisel (Joonis 3.1) toodud trafo AJ1-T1 alampinge 3. järgu harmooniku pingete mõõtetulemuste päevakeskmiste graafik.



Joonis 3.1 Trafo AJ1-T1 alampinge 3. järgu harmooniku pinge mõõtetulemused

3.2 Mõõtetulemuste hajvusdiagrammid

Faasi- ja liinipingetest keskmistatud ning kasutuskõlbmatutest andmetest puhastatud mõõtetulemuste põhjal koostatakse pingekvaliteedi näitajate alam- ning ülempinge mõõtetulemuste vahelised hajvusdiagrammid, mis on toodud punktides 4.1 - 4.3 ning nende alapeatükkides. Hajvusdiagrammide eesmärgiks on visualiseerida alam- ja ülempinge mõõtetulemuse omavahelist sõltuvust ning diagrammide põhjal saab teha esialgse järelduse määramaks, kas ja kuidas trafo antud pingekvaliteedi näitajat mõjutab.

Suure andmehulga tõttu ning mõõteandmete sõltuvuse paremaks visualiseerimiseks on pingekvaliteedi näitajate mõõtetulemused hajvusdiagrammide koostamiseks jagatud kitsastesse mõõtelahtritesse, mis võimaldab loendada, mitmel korral mõõdetud tulemused antud mõõtelahtris esinevad. Mõõtelahtris esinevate mõõtetulemuste sagedusest sõltuvalt muutub hajvusdiagrammil mõõtelahtri värvus vastavalt legendis toodud Loendile. Selline lähenemine aitab visualiseerida suure andmehulga puhul mõõtetulemuste koonduvust ning võimaldab ka selgemini välja tuua pingekvaliteedi näitajate alam- ning ülempinge mõõtetulemuste omavahelist korreleeruvust, mis tavalise hajvusdiagrammi puhul ilmned ei pruugi.

Hajvusdiagrammides kasutatavad mõõtetulemused on jaotatud vastavalt standardi EVS-EN-61000-4-30 soovitudele 100 mõõtelahtri vahel. Mõõtelahtrite valikul on lähtunud, et lahtrid hõlmaksid kõiki mõõtmisi minimaalsest kuni maksimaalse väärtuseni, mõõtelahtrite jaotus on ühtlane ning kõik mõõtelahtrid hõlmavad sama suurt mõõtevahemikku [5].

3.3 Mõõtetulemuste keskväärtuste võrdlus

Mõõtetulemuste võrdluseks on iga püsiseisundi keskväärtustele nii alam- kui ülempinge mõõtmisele määratud usaldusvahemik. Usaldusvahemikuks nimetatakse parameetri väärtuse piirkonda, mis kataks õige parameetri väärtuse populatsioonis teatud läve ületava tõenäosusega. Antud läve nimetatakse usaldusnivooks ning see valitakse olenevalt tunnuse tähendusest ja tulemuse tähtsusest. Teisisõnu arvutades mingi lõpliku suurusega valimi X tunnuse keskväärtuseks \bar{x} ning saades antud valimi usaldusvahemikuks usaldusnivoo $\beta\%$ juures $(\bar{x}-\mu, \bar{x}+\mu)$ või $\bar{x}\pm\mu$ saame öelda, et lõpmatu suurusega valimi, ehk populatsiooni korral jääks antud tunnuse keskväärtus $\beta\%$ tõenäosusega eelnevalt leitud usaldusvahemikku ehk $(\bar{x}-\mu, \bar{x}+\mu)$. Vastavalt standardi EVS-EN-61000-4-30 soovitudele on püsiseisundite analüüsiks 95% usaldusnivoo kasutamine küllaldane [5] [15].

Kuna mõõtetulemuste puhul on alam- ning ülempinge mõõtetulemuste keskväärtused teineteisele arvuliselt lähedased, on nende keskväärtuste omavahelise võrdsuse kontrollimiseks kasutatud kahepoolset Studenti t-testi kahe sõltumatu valimi (kahe üldkogumi keskväärtuste omavaheliseks võrdlemiseks) jaoks, mille tulemuste põhjal saab teha ettemääratud statistilise kindlusega järelduse, kas alam- ja ülempinge mõõtetulemuste keskväärtused on sarnased või mitte [16]. Antud testi koostamiseks on valitud usaldusnivoo 95% ning olulisuse nivoo $\alpha=0,05$ ehk 5%. Olulisuse nivoo määrab maksimaalse lubatava vea tõenäosuse ehk teisisõnu näitab, milline on tõenäosus et teostatud testi tulem on saadud läbi juhuse. Testi läbiviimisel saadud olulisuse nivood võrreldakse ettemääratud olulisuse nivooaga ning kui saadud tulemuse olulisuse nivoo on väiksem kui eelnevalt sätestatud siis saab väita, et teostatud test on statistiliselt oluline. Testi teostamiseks on kasutatud vabavaralist andmetöötlustarkvara RStudio [5].

T-testi läbiviimiseks koostatakse esmalt hüpoteeside paar (3.1). Hüpoteeside paar koosneb nullhüpoteesist, mida arvatakse olevat tõene enne statistilist testi ning tähistatakse kui H_0 . Nullhüpoteesile alternatiivset tõde nimetatakse sisukaks hüpoteesiks – H_1 [16]. Hüpoteeside paari põhjal tehakse kahe valimi uuritavate väärtuste kohta ka lõplik järeldus, jäädes kas nullhüpoteesi juurde või lükates nullhüpoteesi ümber ning seejärel võttes vastu sisuka hüpoteesi. Näiteks trafo AJ1-T1 alam- ja ülempinge toitepinge asümmeetria keskväärtuste omavaheliseks võrdluseks koostatud hüpoteeside paar näeb välja järgmiselt:

$$\begin{aligned} H_0: E(U_{2/1}(\text{alam}))_{AJ1-T1} &= E(U_{2/1}(\text{ülem}))_{AJ1-T1} \\ H_1: E(U_{2/1}(\text{alam}))_{AJ1-T1} &\neq E(U_{2/1}(\text{ülem}))_{AJ1-T1} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Hüpoteeside paari põhjal on antud näidise puhul nullhüpoteesiks, et trafo AJ1-T1 toitepinge asümmeetria keskvärtused on nii alam- kui ka ülempingepoolel võrdsed. Sellise hüpoteesi vastuvõtmine viitaks, et trafo antud kvaliteedinäitajale mingisugust mõju ei avalda ning pinge nähtus liiguks piiramatult läbi trafo.

Kahe valimi X ning Y keskvärtuste erinevuse tõestamiseks leitakse teststatistik valemiga (3.2). Käesoleva näite puhul vastaks valimile X toitepinge asümmeetria mõõtetulemused alampingel ning Y valimile toitepinge asümmeetria mõõtetulemused ülempingel [16].

$$T = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{\frac{s_x^2}{n} + \frac{s_y^2}{m}}} \quad (3.2)$$

,kus \bar{x} – valimi X keskvärtus
 \bar{y} – valimi Y keskvärtus
 s_x^2 – valimi X dispersioon
 s_y^2 – valimi Y dispersioon
 n – valimi X maht
 m – valimi Y maht

Valimi dispersiooni on võimalik arvutada valemiga (3.3) [16].

$$s_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})^2 \quad (3.3)$$

Arvutades valemiga (3.3) trafo AJ1-T1 toitepinge asümmeetria ülem- ja alampinge mõõtetulemuste dispersioonid ning seejärel kasutades valemit (3.2) toitepinge asümmeetria mõõteväärtustega saame teststatistiku (3.4):

$$T = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{\frac{s_x^2}{n} + \frac{s_y^2}{m}}} = \frac{0,327 - 0,314}{\sqrt{\frac{0,00209}{49303} + \frac{0,00285}{49303}}} = 40,11 \quad (3.4)$$

Pärast sobiva teststatistiku leidmist tuleb leida vabadusastmete arv df , mida on võimalik teha kasutades valemit (3.5). Vabadusastmete arv määrab valimi põhjal ära erinevate võimalike tulemuste (väärtuste) arvu [17].

$$df = \frac{\left(\frac{s_x^2}{n} + \frac{s_y^2}{m}\right)^2}{\frac{\frac{s_x^4}{n^2}}{(n-1)} + \frac{\frac{s_y^4}{m^2}}{(m-1)}} \quad (3.5)$$

Asendades valemis (3.5) väärtused lühiajalise vareluse mõõtetulemuste väärtustega saame antud näite puhul vabadusastmete arvuks:

$$df = \frac{\left(\frac{0,00209}{49303} + \frac{0,00285}{49303}\right)^2}{\frac{4,40 * 10^{-6}}{2,43 * 10^9} + \frac{8,11 * 10^{-6}}{2,43 * 10^9}} = 96392$$

Olles leidnud teststatistiku ning vabadusastmete arvu, leitakse teststatistiku kriitiline väärtus ($T_{\text{kriitiline}}$), mida võrreldakse seejärel varasemalt leitud teststatistikuga. Kui teststatistiku absoluutväärtus on suurem tema nullhüpoteesipõhise kriitilisest teststatistiku väärtusest, loetakse õigeks sisukas hüpotees H_1 . Vastasel juhul lükatakse sisukas hüpotees ümber ning jäädakse nullhüpoteesi H_0 juurde.

Teststatistiku kriitiline väärtus leitakse (Lisa 1) esitatud tabelist, kasutades varasemalt määratud olulisusenivood (α) ning leitud vabadusastmete arvu. Trafo AJ1-T1 toitepinge asümmeetria puhul on lisas (Lisa 1) esitatud tabeli põhjal kriitilise teststatistiku väärtus ligikaudu $T_{\text{kriitiline}} \approx 1,96$. Varasemalt leitud teststatistiku väärtus trafo AJ1-T1 lühiajalise varelustugevuse mõõteandmete puhul on aga $T=40,11$. Kahte teststatistikut omavahel võrreldes näeme, et $T > T_{\text{kriitiline}}$.

Saadud tulemuse põhjal saame lükata ümber nullhüpoteesi H_0 ning võtta vastu sisuka hüpoteesi H_1 ning väita, et trafo AJ1-T1 puhul ei ole toitepinge asümmeetria alam- ning ülempingemõõtmiste keskväärtused samad.

Sarnast arvutuskäiku on kasutatud ka kõikide teiste trafode pingekvaliteedi tunnussuuruste keskväärtuste omavaheliseks võrdluseks ning arvutuskäigu tulemused on toodud peatükis 4 ning selle alapeatükkides.

3.4 Pingekvaliteedi näitajate sõltuvus trafo aktiivkoormusest

Leidmaks, kas pingekvaliteedi näitajate alam- ja ülempinge mõõteväärtuste omavahelisele korreleeruvusele või pingehäiringute kandumisele läbi trafo omab mingit mõju ka trafo aktiivkoormus, on kõrvutatud ühe trafo (AJ1-T1) mõõtetulemused sõltuvalt trafo aktiivkoormusest.

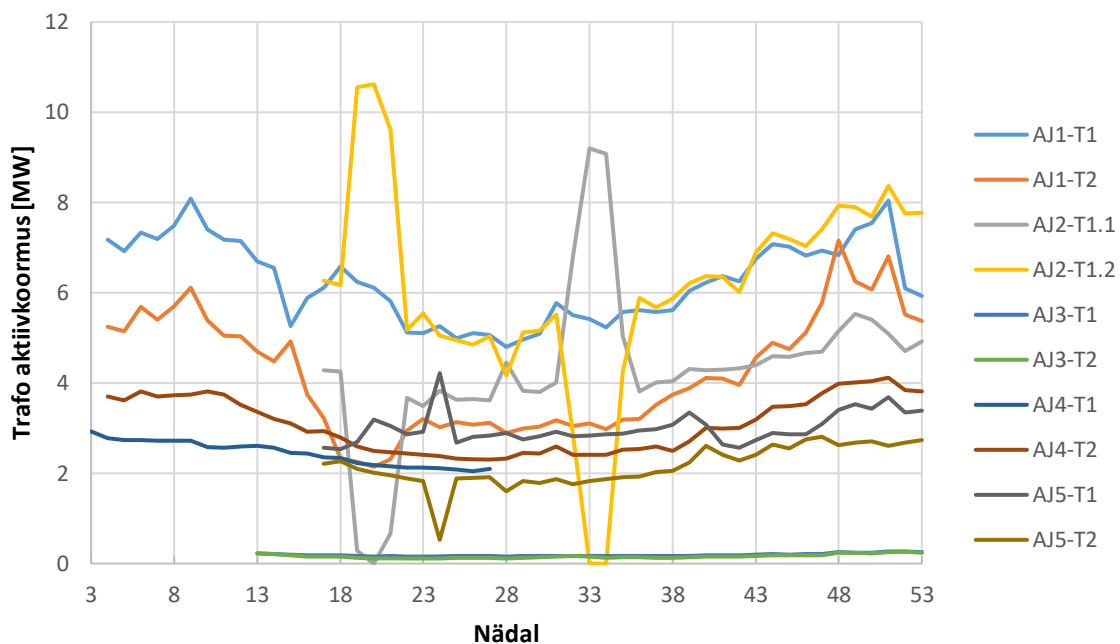
Aktiivkoormuse sõltuvuse esitamiseks on kasutusele võetud 50% trafo pingekvaliteedi mõõtetulemustest, mis on seejärel jaotatud kahte suuruselt võrdsesse gruppi. Esimesse gruppi kuuluvad mõõtetulemused, mille korral trafo aktiivkoormus on kogu aktiivkoormuse valimi alumises kvartiilis. Teisisõnu kuuluvad gruppi mõõteandmete valimist 25% andmeridadest, mille puhul on trafo aktiivkoormuse mõõtetulemused väiksemad ülejäänud valimis olevate trafo

aktiivkoormuse mõõtetulemustest. Teise gruppi kuuluvad mõõtetulemused, mille korral trafo aktiivkoormus on kogu aktiivkoormuse valimi mõõtetulemuste ülemises kvartiilis. See tähendab, et grupi moodustavad 25% mõõtetulemustest, mille puhul trafo aktiivkoormus on kõrgem kui ülejäänud valimis olevate trafo aktiivkoormuse mõõtetulemustel.

Illustreerimaks trafo aktiivkoormuse mõjusid pingekvaliteedi näitajatele on analüüsivate pingekvaliteedi näitajate kohta koostatud sarnaselt punktis (3.2) kirjeldatule hajuvusdiagrammid. Antud diagrammidel on kõrvutatud kahe eelnevalt paika pandud grupi mõõteväärtused, et tuua esile mõõteandmete koonduvuse või hajuvuse sõltuvus trafo aktiivkoormusest.

4. MÕÕTETULEMUSTE ANALÜÜS

Joonisel (Joonis 4.1) on toodud analüüsitava trafode aktiivkoormuste nädalakeskmised väärtused, mis iseloomustavad erinevate analüüsis olevate trafode tarbimispiirkondasid ning ka mõõtetulemuste olemasolu ajalisi perioode, mida analüüsis kasutatakse. Joonisel (Joonis 4.1) on AJ3-T1 ning AJ3-T2 aktiivkoormused kogu perioodi vältel teineteisele väga lähedased, mistõttu on neid joonisel visuaalselt raske eristada.

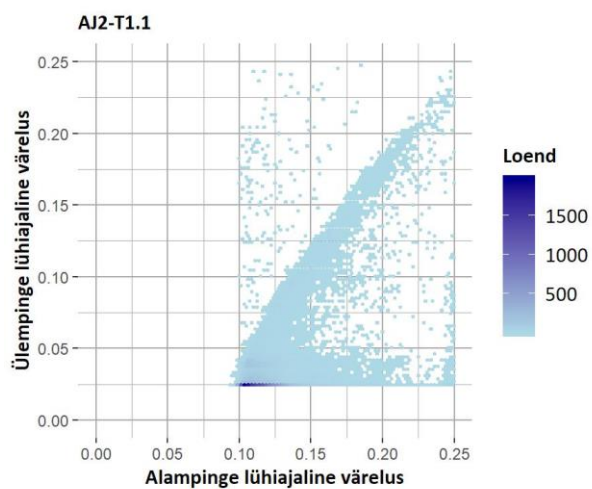
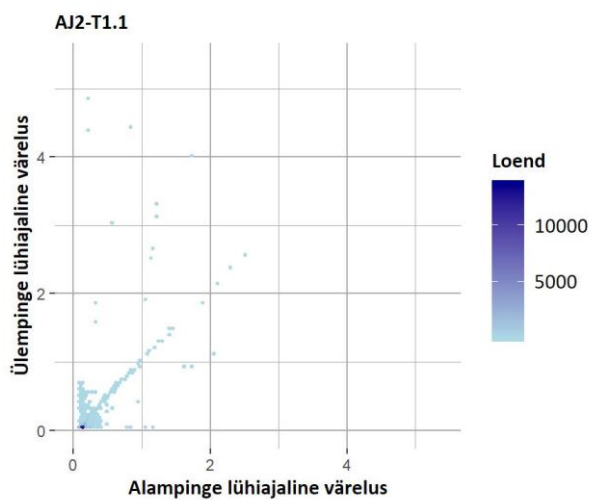
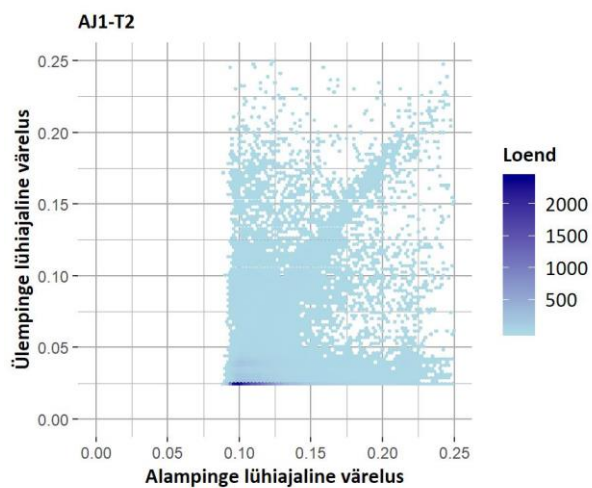
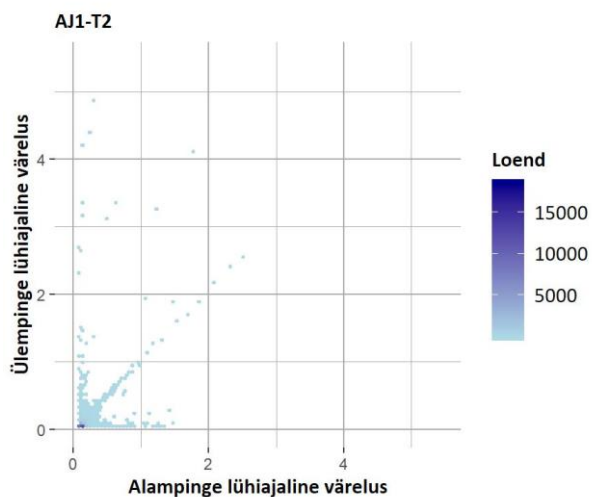
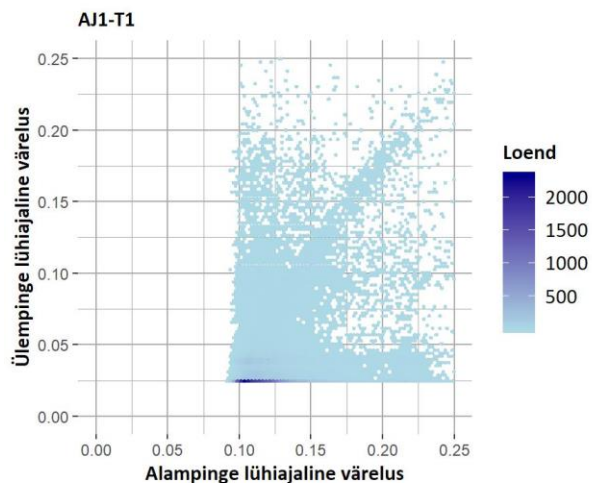
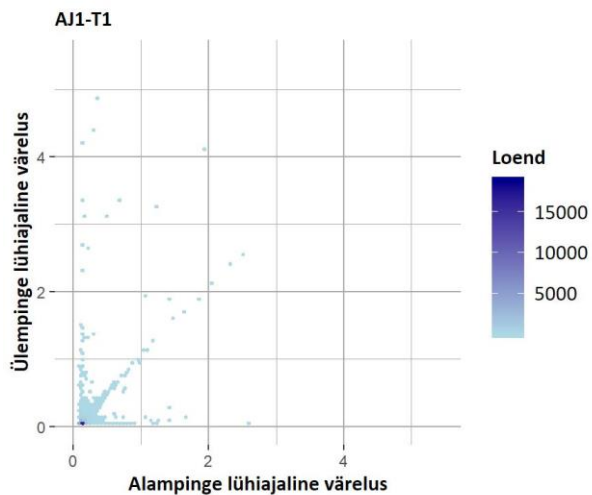


Joonis 4.1 Trafode 2018 kalendriaasta nädalakeskmiste aktiivkoormuste mõõtetulemused

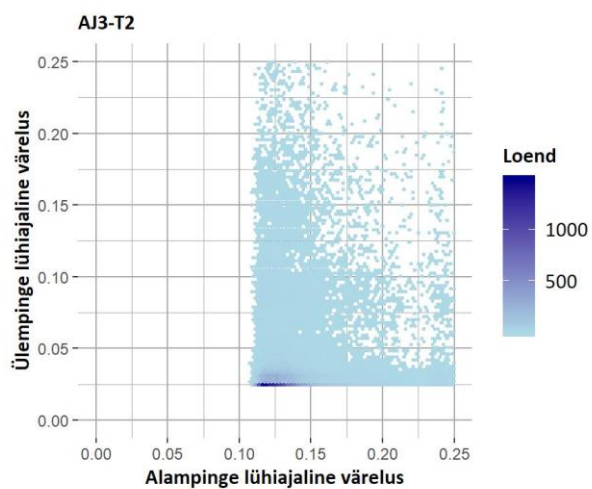
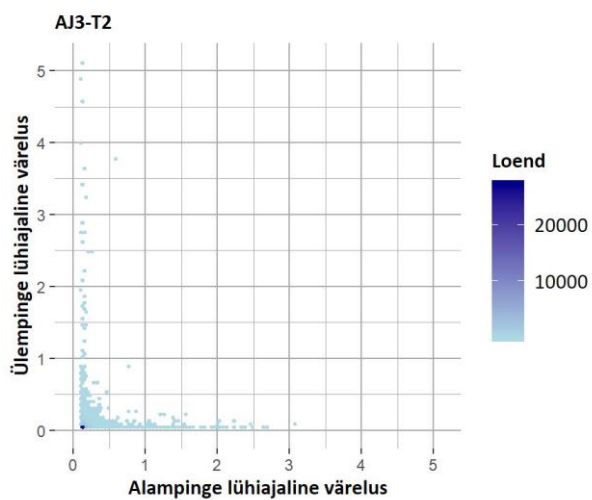
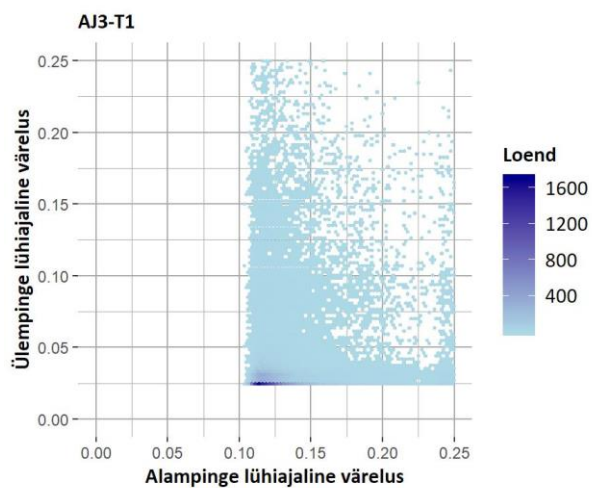
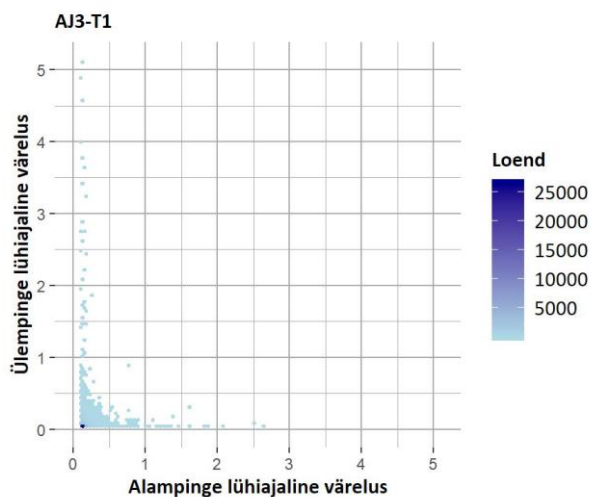
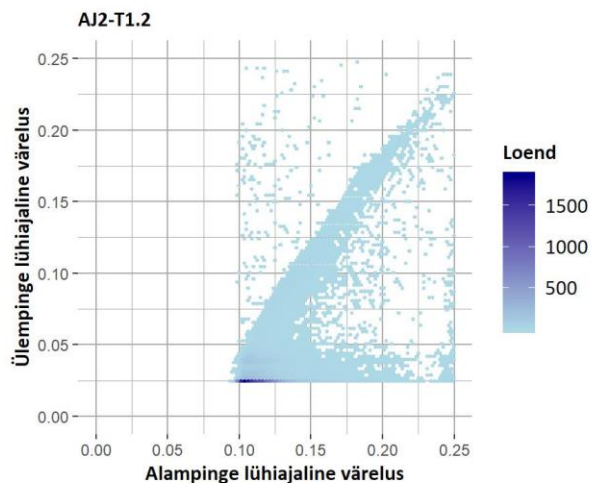
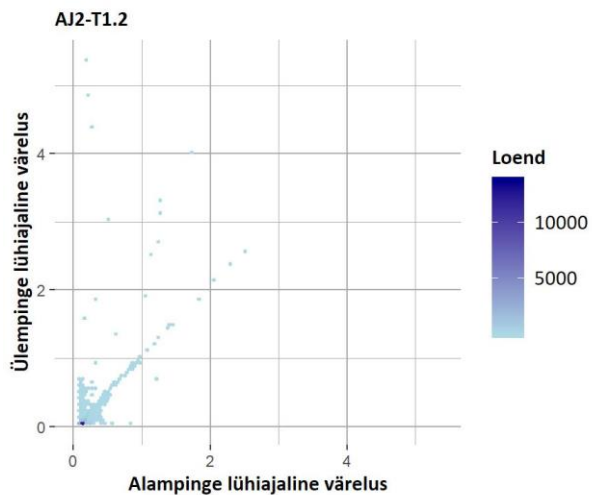
4.1 Lühiajaline värelustugevus

Värelustugevuse mõõtetulemused on esitatud graafiliselt hajuvusdiagrammidena joonisel (Joonis 4.2), seejuures hajuvusdiagrammide graafikud ei ole ühes mõõtkavas. Suure hulga mõõtetulemuste kontseentreerituse tõttu on iga trafo värelustugevuse hajuvusdiagrammiga paralleelselt välja toodud ka väljavõtte piirkonnast, kuhu suur hulk andmeid koondunud on.

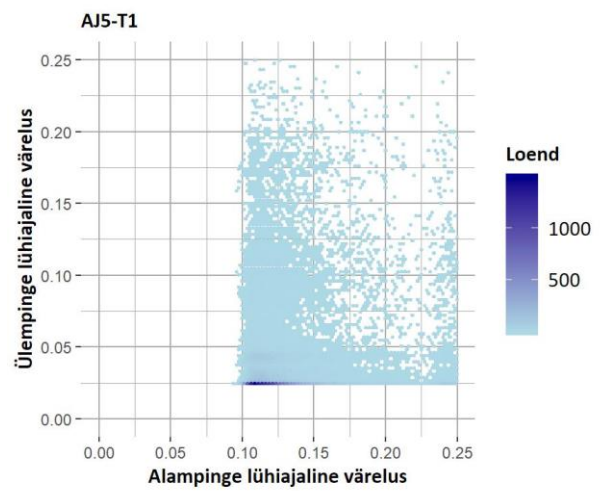
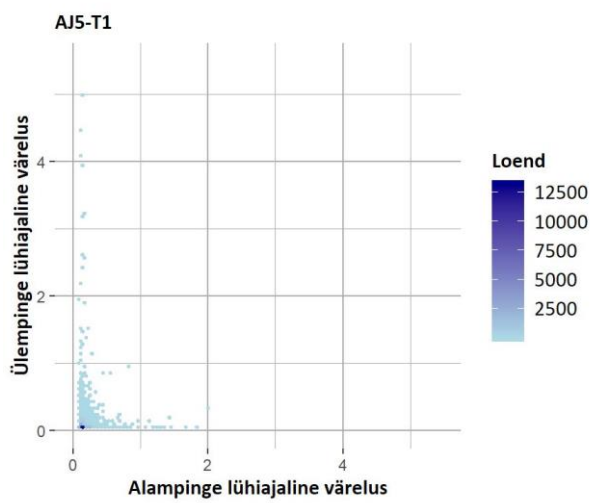
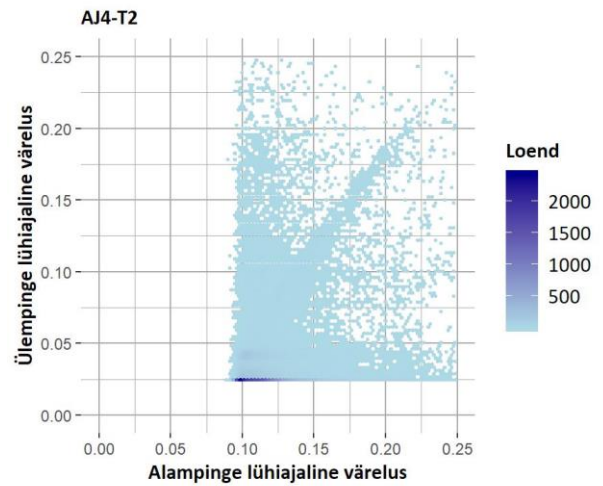
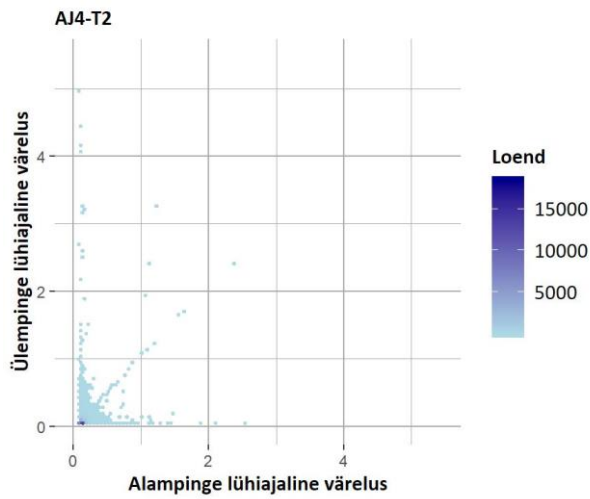
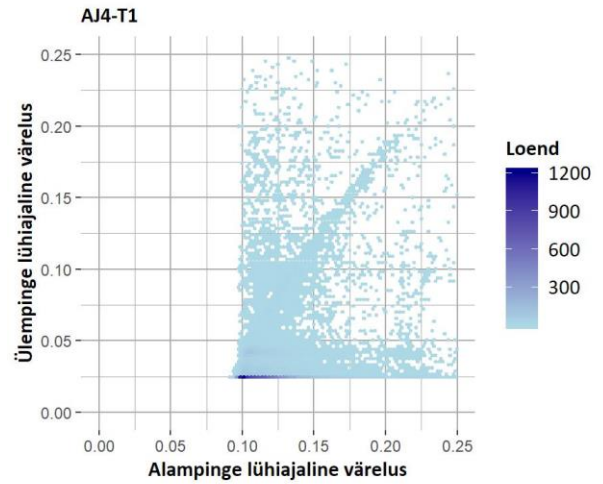
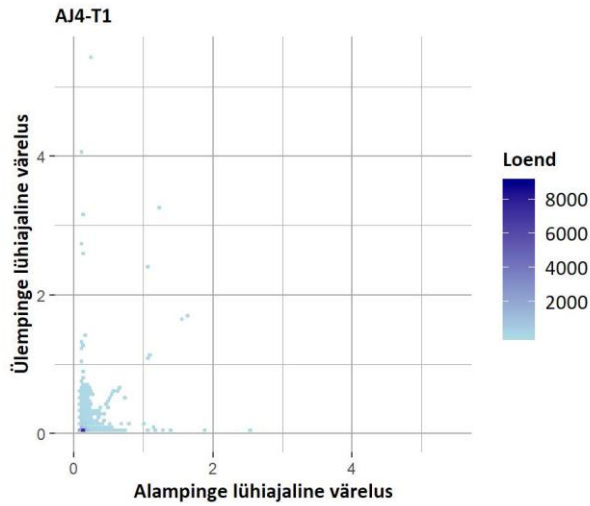
Lisaks on trafo aktiivkoormuse mõjude hindamiseks koostatud hajuvusdiagrammid trafo AJ1-T1 lühiajalise värelustugevuse mõõteväärtustele erinevate aktiivkoormuste korral vastavalt punktis 3.4 toodud juhiste, mis on toodud joonistel (Joonis 4.3 ja Joonis 4.4). Värelustugevuse keskäärtused, erinevused ülem- ja alampingepoole mõõtetulemuste vahel ning antud mõõtmiste omavahelised korrelatsioonikordajad on toodud tabelis (Tabel 4.1).



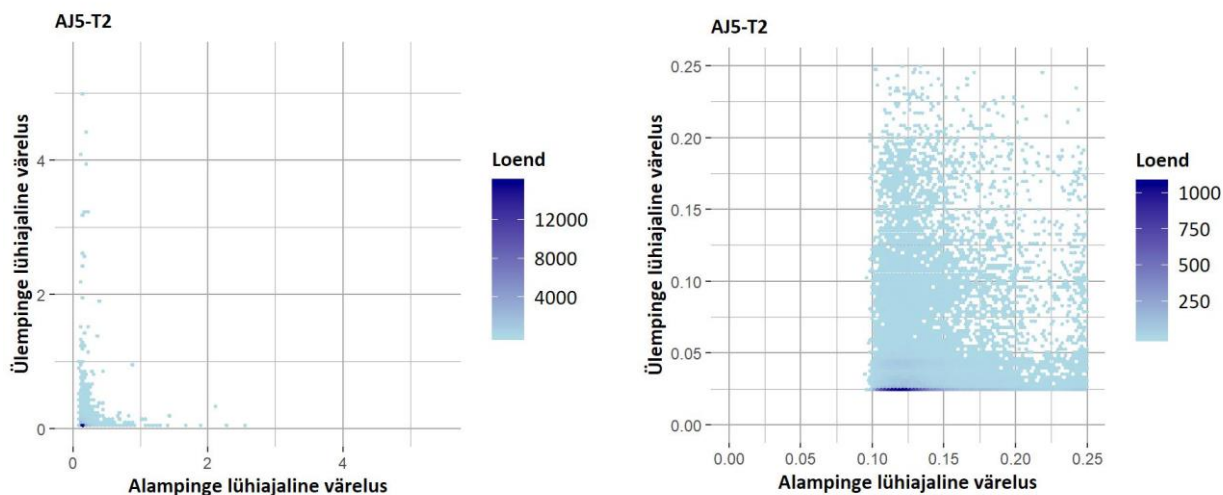
Joonis 4.2 Mõõtepunktide lühiajalise värelusetugevuse hajvusdiagrammid (jätkub)



Joonis 4.2 Mõõtepunktide lühiajalise värelusetugevuse hajuvusdiagrammid (jätkub)



Joonis 4.2 Mõõtepunktide lühiajalise värelusetugevuse hajvusdiagrammid (jätkub)



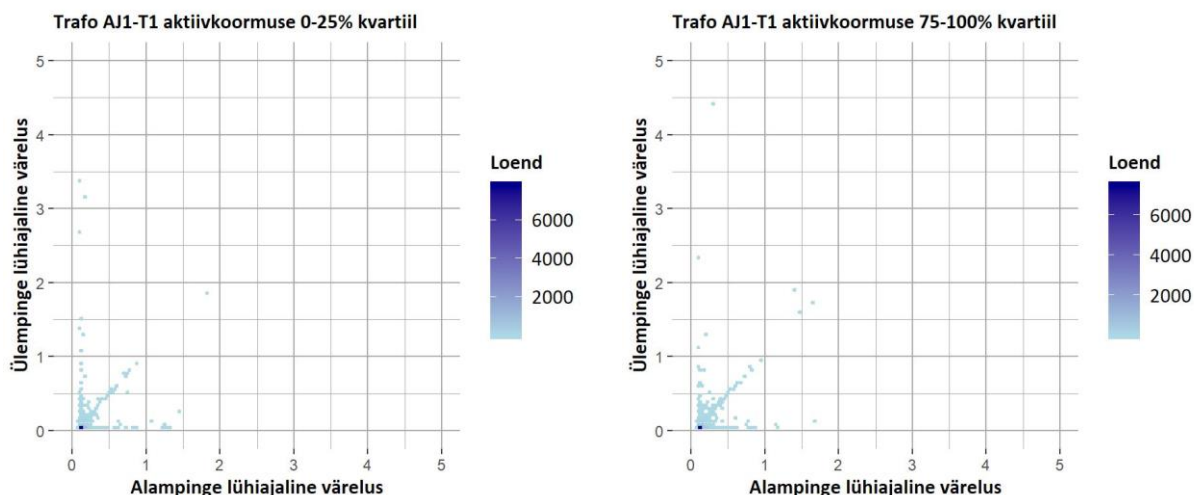
Joonis 4.2 Mõõtepunktide lühiajalise värelustugevuse hajuvusdiagrammid

Hajuvusdiagrammidelt ilmneb kõikide trafode puhul läbiv tendents, kus keskmiselt üle poole (50,4%) ülempinge mõõtetulemustest on sõltumatult alampinge mõõtetulemustest koondunud kitsasse vahemikku (ülempinge Pst = 0,024...0,026). Vastandlikult eristuvad vähemal või suuremal määral kaheksa trafo puhul piirkonnad, kus sõltumata ülempinge mõõtetulemustest on alampinge mõõteväärtused koondunud kitsasse piirkonda. Vaid AJ2-T1.1 ning AJ2-T1.2 puhul antud koonduvus puudub. Lisaks eristub kuue trafo (AJ1-T1, AJ1-T2, AJ2-T1.1, AJ2-T1.2, AJ4-T1 ning AJ4-T2) puhul lineaarse sõltuvuse piirkond, kus toitepinge väreluse kasvades alampinges kasvab ka proportsionaalselt selle väärtus ülempinges.

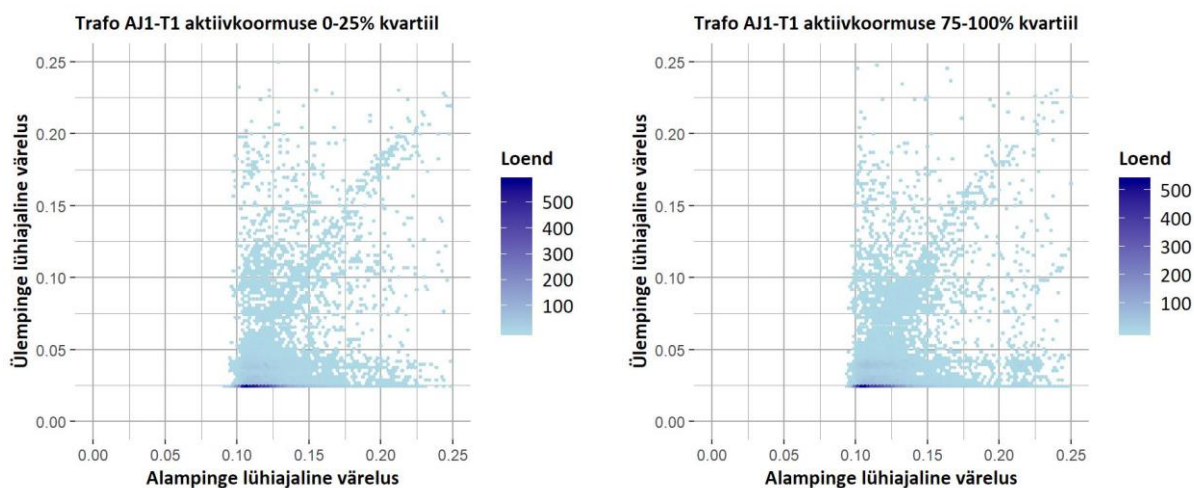
Joonistelt (Joonis 4.3 ja Joonis 4.4) on trafo AJ1-T1 mõõtetulemustest näha, et nii madala kui kõrge koormuse korral on lühiajalise väreluse mõõtetulemused ülempingel sõltumata alampinge mõõtetulemustest koondunud madalale tasemele. Samuti eristuvad erinevate koormuste korral sarnaselt eelnevale ka nõrgemalt kaks piirkonda, kus ühe piirkonna puhul alampinge mõõtetulemuse kasvades kasvab ka ülempinge mõõtetulemus. Teise piirkonna puhul jääb aga alampinge mõõtetulemus sõltumata ülempinge mõõtetulemusest madalale väärtusele.

Antud asjaoludest tulenevalt ilmneb, et lühiajalise värelustugevuse alam- ja ülempinge mõõtetulemuste koonduvusele trafo aktiivkoormus eristatavat mõju ei avalda.

Tõenäoline, et mõõtetulemuste koondumisel kolmeks eristuvateks piirkondadeks (kaks nn sõltumatut ning üks lineaarne) on olemas antud mõõtepunktidega ühendatud elektrivõrgu osade iseloomust (tarvitid, tootmiseadmed ning nende töörežiimist) tulenev põhjus, kuid vastavate andmete puudumise tõttu ei ole võimalik selgemaid järeldusi teha.



Joonis 4.3 Trafo AJ1-T1 lühiajalise väreluse sõltuvus trafo aktiivkoormusest



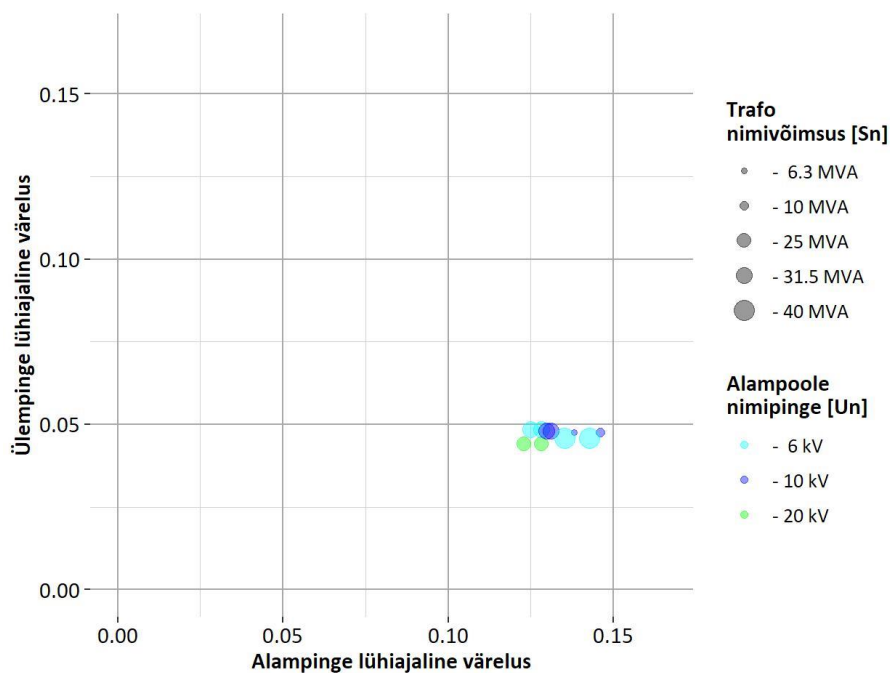
Joonis 4.4 Trafo AJ1-T1 lühiajalise väreluse sõltuvus trafo aktiivkoormusest – väljavõte

Tabel 4.1 Lühiajalise värelustugevuse mõõtetulemused

Trafo nimi	Korrelatsioonikordaja	Värelustugevuse keskväärtuste 95% usaldusvahemik		Keskvärtuste erinevuse 95% usaldusvahemik
		Alampinge	Ülempinge	
AJ1-T1	0,41	0,129 ± 0,00046	0,045 ± 0,00072	0,084 ± 0,00085
AJ1-T2	0,43	0,123 ± 0,00045	0,045 ± 0,00072	0,078 ± 0,00084
AJ2-T1.1	0,61	0,132 ± 0,00061	0,049 ± 0,00098	0,083 ± 0,00114
AJ2-T1.2	0,62	0,130 ± 0,00057	0,048 ± 0,00095	0,081 ± 0,00110
AJ3-T1	0,03	0,139 ± 0,00058	0,048 ± 0,00087	0,090 ± 0,00103
AJ3-T2	0,03	0,146 ± 0,00083	0,048 ± 0,00087	0,098 ± 0,00119
AJ4-T1	0,24	0,129 ± 0,00064	0,049 ± 0,00114	0,079 ± 0,00130
AJ4-T2	0,20	0,125 ± 0,00045	0,049 ± 0,00080	0,076 ± 0,00091
AJ5-T1	0,04	0,136 ± 0,00059	0,046 ± 0,00091	0,089 ± 0,00107
AJ5-T2	0,04	0,143 ± 0,0006	0,046 ± 0,00091	0,096 ± 0,00108

Teostatud t-testi tulemuste põhjal saab kõikide valimis olevate trafode alam- ja ülempinge toitepinge lühiajalise väreluse mõõtmistulemuste keskväärtuste kohta väita, et nad on statistiliselt oluliselt erinevad. Keskväärtuste erinevuste 95% usaldusvahemik on toodud tabelis (Tabel 4.1).

Tabelis (Tabel 4.1) kajastatud mõõtetulemuste keskväärtuste ning tabelis (Tabel 3.1) toodud trafo põhiparameetrite põhjal on koostatud lühiajalise väreluse keskväärtuste hajuvusdiagramm (Joonis 4.5) trafode lõikes.



Joonis 4.5 Värelustugevuse keskväärtuste hajuvusdiagramm

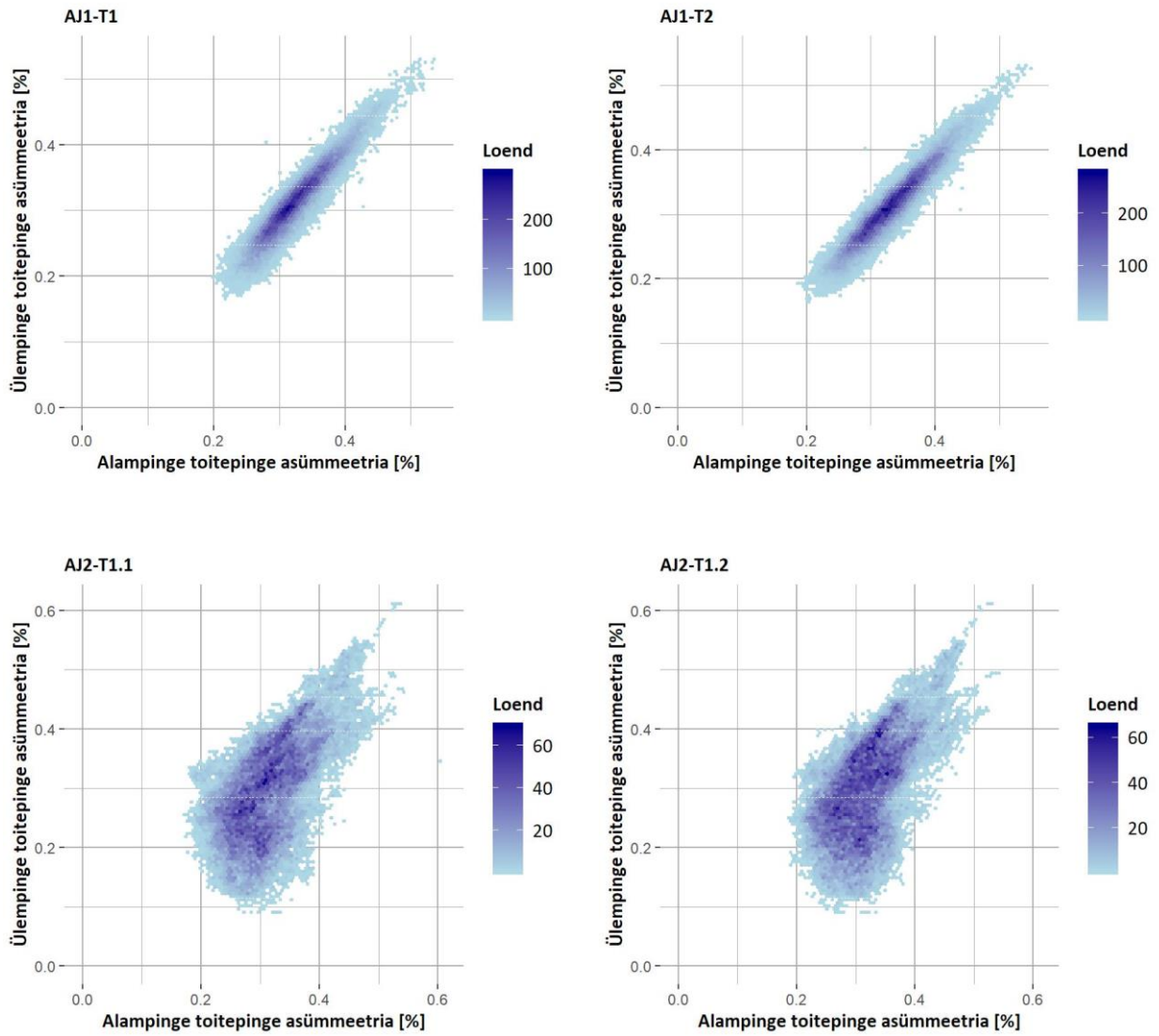
Jooniselt (Joonis 4.5) ilmneb, et analüüsitud trafode lühiajalise väreluse mõõtetulemuste ülempinge keskväärtused on sõltumata alampinge mõõtetulemustest koondunud ühtlasele tasemele.

4.2 Toitepinge asümmeetria

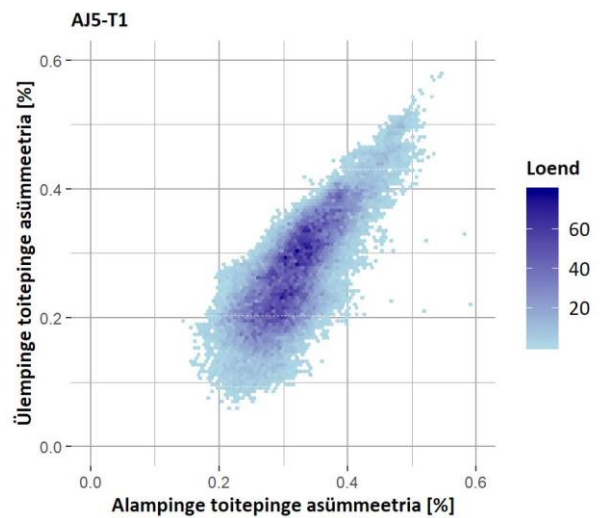
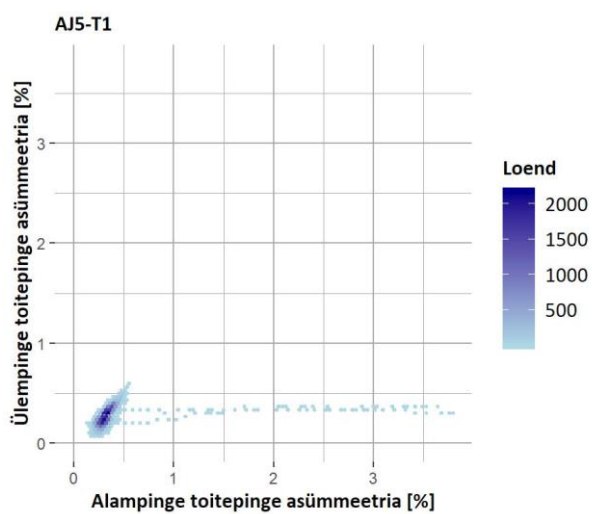
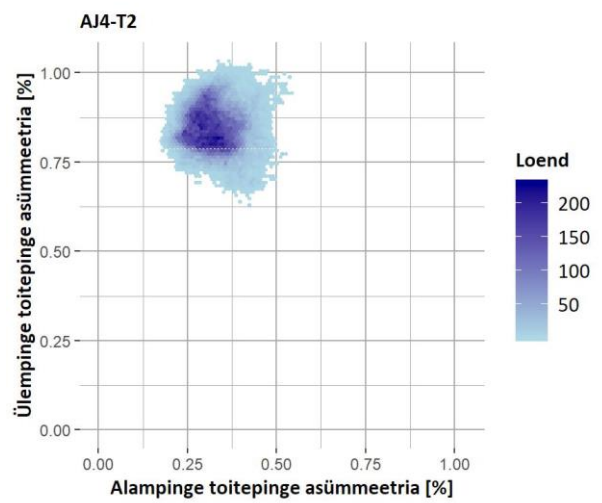
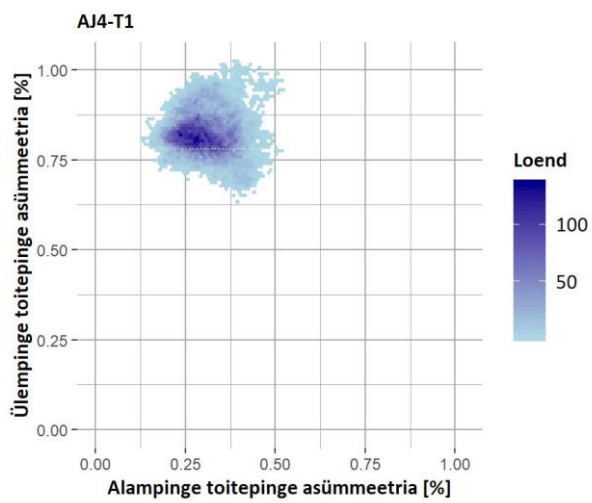
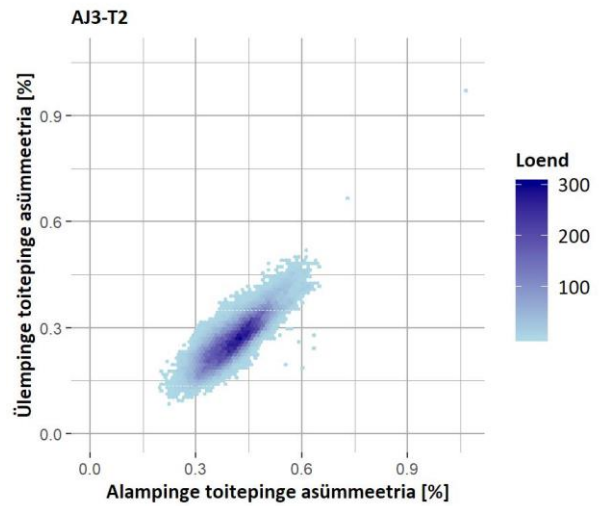
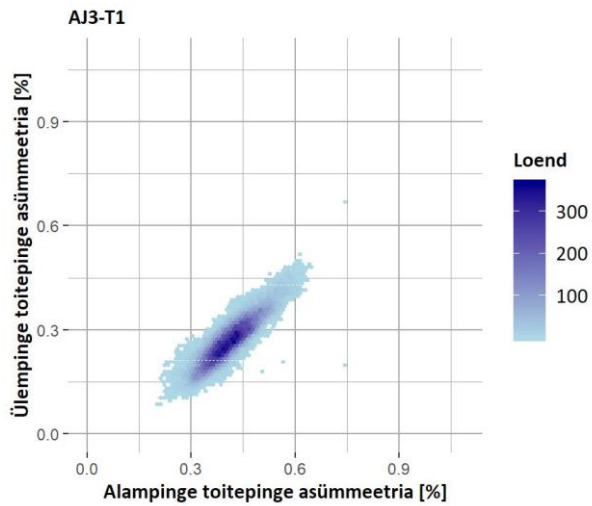
Toitepinge asümmeetria mõõtetulemused on esitatud graafiliselt hajuvusdiagrammidena joonisel (Joonis 4.6), seejuures hajuvusdiagrammide graafikud ei ole ühes mõõtkavas. Trafode AJ5-T1 ning AJ5-T2 puhul on üksikute pinge asümmeetria kõrgemate mõõteväärtuste tõttu alampingepoolle toodud eraldi väljavõtte piirkonnast, kuhu enamus andmeid koondunud on.

Lisaks on trafo aktiivkoormuse mõjude hindamiseks koostatud hajuvusdiagrammid trafo AJ1-T1 toitepinge asümmeetria mõõteväärtustele erinevate aktiivkoormuste korral vastavalt punktis 3.4

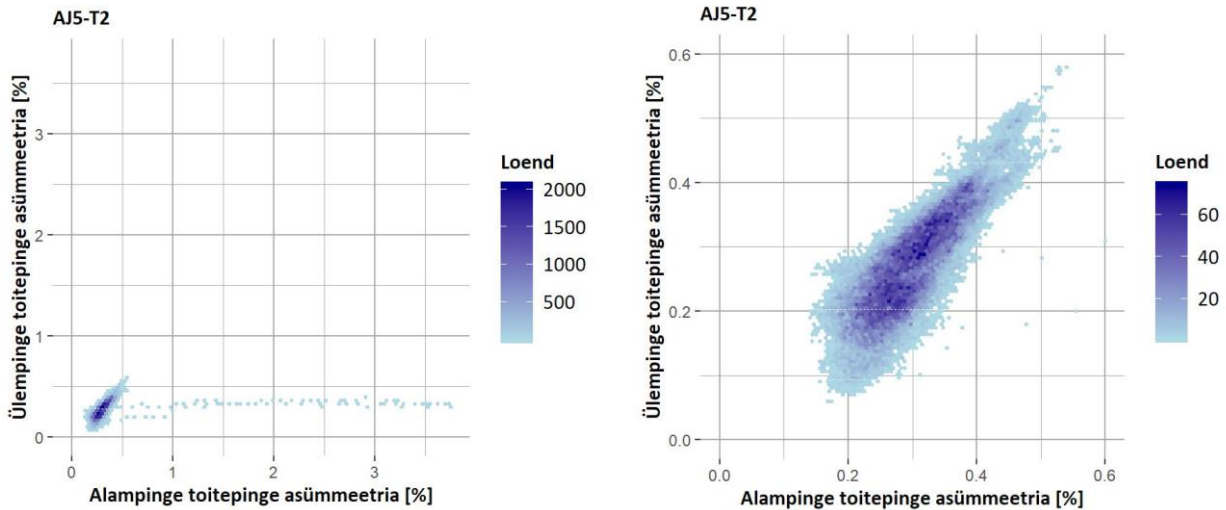
toodud juhistele, mis on toodud joonisel (Joonis 4.7). Toitepinge asümmeetria keskvaartused, erinevused ülem- ja alampingepoole mõõtetulemuste vahel ning antud mõõtmiste omavahelised korrelatsioonikordajad on toodud tabelis (Tabel 4.1).



Joonis 4.6 Mõõtepunktide toitepinge asümmeetria hajuvusdiagrammid (jätkub)



Joonis 4.6 Mõõtepunktide toitepinge asümmeetria hajuvusdiagrammid (jätkub)



Joonis 4.6 Mõõtepunktide toitepinge asümmeetria hajuvusdiagrammid

Toitepinge asümmeetria hajuvusdiagrammidelt (Joonis 4.6) ning tabelis (Tabel 4.2) toodud korrelatsioonikordajate põhjal nähtub, et kõikide trafode välja arvatud AJ4-T1 ning AJ4-T2 puhul on olemas alam- ning ülempinge mõõtetulemuste vahel tugev korreleeruvus, mis indikeerib toitepinge asümmeetria kandumisele läbi trafo.

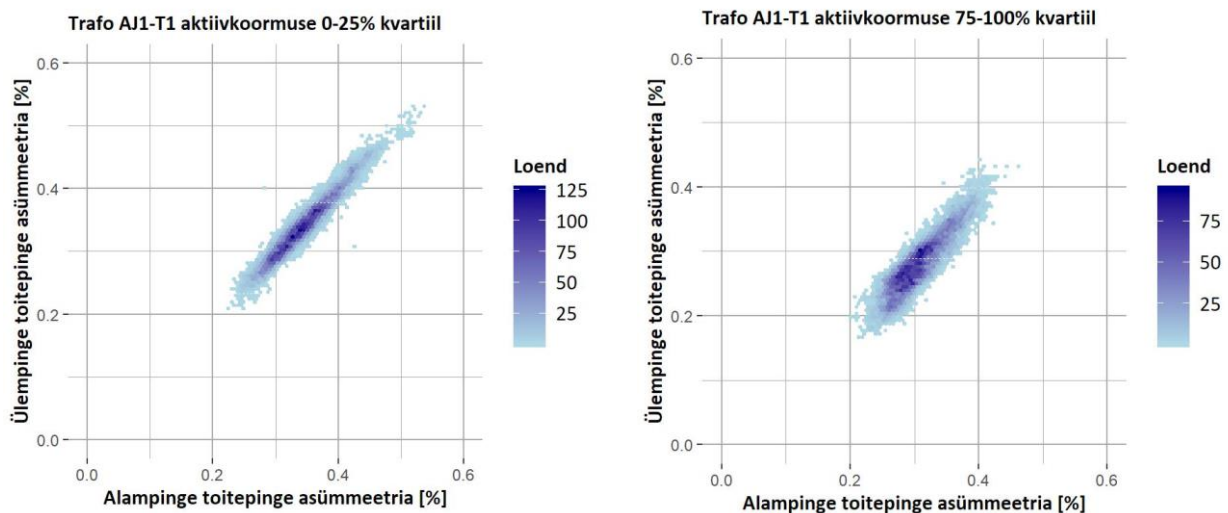
Toitepinge asümmeetria kandumisel läbi trafo on näha tendentsi, kus ülempinge mõõtetulemused on alampinge mõõtetulemustest madalamad, mida on näha ka tabelis (Tabel 4.2) esitatud keskväärtuste põhjal. Antud tulemused viitavad, et trafo avaldab toitepinge asümmeetria tasandavat efekti.

Pingete silumine võib olla tingitud olukorrast, kus toitepinge asümmeetria tõttu esineb kolmeefaasilise süsteemi toitepingetes ka nulljärgnevuskomponendid. Antud nulljärgnevuskomponentide mõjul tekivad trafo mähistes nulljärgnevusega voolud, mis on omavahelises võrdluses teineteisega faasis ning sulguvad trafo Δ -mähistes ning avalduvad pöörivoolukadudena. Trafot läbinud toitepinge asümmeetria on seega vabanenud nulljärgnevuskomponentidest, avaldades seeläbi ka kolmeefaasilise süsteemi toitepingetele siluvat efekti [18].

Trafode AJ4-T1 ning AJ4-T2 puhul võib ülem- ja alampinge mõõtetulemuste korreleeruvuse puudumine olla tingitud asjaolust, et antud alajaam on 110 kV võrgu poolt väga tugevalt seotud (omab kahte otseliini kahe erineva sõlmalajaamaga) ning lisaks on antud trafode aktiivkoormused (Joonis 4.1) võrdlemisi madalad, mistõttu koormuse asümmeetria ei avalda ülempinge asümmeetria tugevat mõju.

Trafode AJ5-T1 ning AJ5-T2 puhul on näha üksikuid mõõtetulemusi, kus alampinge toitepinge asümmeetria kasvab hüppeliselt samal ajal kui ülempinge mõõtetulemused jäävad praktiliselt muutumatuks. Arvestades, et vastavalt peatükis 3 kirjeldatule on antud alajaama puhul tegemist tööstuskoormust teenindava alajaamaga, võib antud erandlikel juhtudel olla tegemist olukorraga, kus toitepinge asümmeetria on tingitud tööstuslike koormuste mitesümmeetrilistest käivitusvooludest.

Joonisel (Joonis 4.7) on toodud AJ1-T1 toitepinge asümmeetria mõõtetulemuste sõltuvus trafo aktiivkoormusest. Jooniselt nähtub, et sõltumata trafo aktiivkoormust säilib toitepinge asümmeetria alam- ja ülempinge mõõtetulemuste vaheline korreleeruvus. Samuti nähtub asjaolu, et kõrgema koormuse korral on toitepinge asümmeetria väärtused nii ülem- kui alampingel väiksemad kui madala koormuse korral. Antud nähtus võib olla tingitud olukorrast, kus kõrgema koormuse korral on koormus faaside vahel ühtlasemalt jagunenud kui madala koormuse korral ning seega on ka toitepinge asümmeetria madalam.



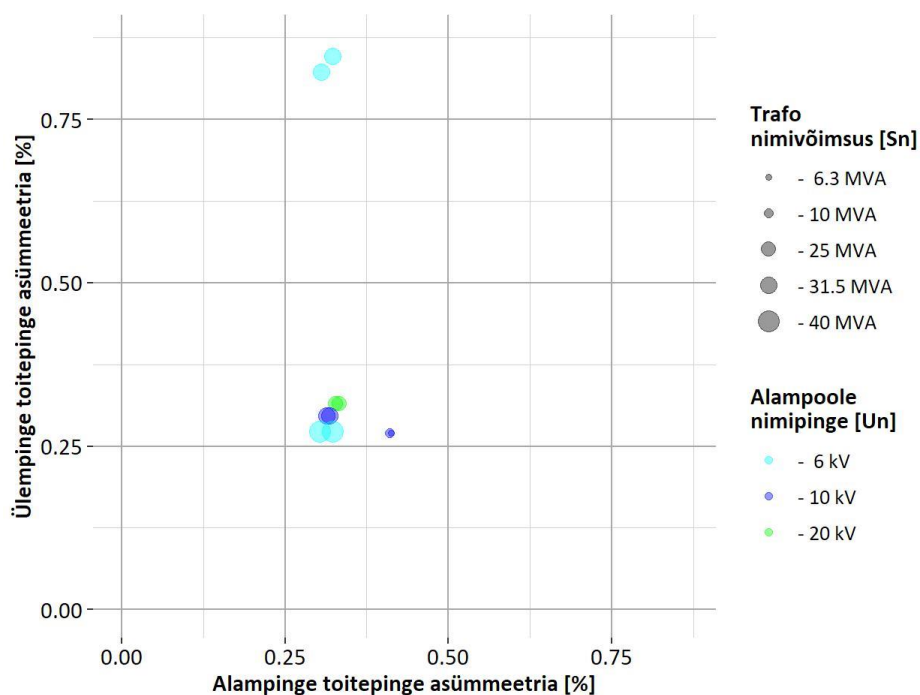
Joonis 4.7 Trafo AJ1-T1 toitepinge asümmeetria sõltuvus trafo aktiivkoormusest

Teostatud t-testi tulemuste põhjal saab kõikide valimis olevate trafode alam- ja ülempinge toitepinge asümmeetria mõõtmistulemuste keskväärtuste kohta väita, et nad on statistiliselt oluliselt erinevad. Keskväärtuste erinevuste 95% usaldusvahemik on toodud tabelis (Tabel 4.2).

Tabelis (Tabel 4.2) kajastatud mõõtetulemuste keskväärtuste ning tabelis (Tabel 3.1) toodud trafo põhiparameetrite põhjal on koostatud toitepinge asümmeetria keskväärtuste hajuvusdiagramm (Joonis 4.8) trafode lõikes.

Tabel 4.2 Toitepinge asümmeetria mõõtetulemused

Trafo nimi	Korrelatsioonikordaja	Toitepinge asümmeetria keskväärtuste 95% usaldusvahemik [%]		Keskväärtuste erinevuse 95% usaldusvahemik
		Alampinge	Ülempinge	
AJ1-T1	0,94	0,327 ± 0,00040	0,314 ± 0,00047	0,012 ± 0,00062
AJ1-T2	0,95	0,333 ± 0,00043	0,314 ± 0,00047	0,019 ± 0,00064
AJ2-T1.1	0,62	0,314 ± 0,00057	0,296 ± 0,00083	0,017 ± 0,00101
AJ2-T1.2	0,59	0,318 ± 0,00054	0,296 ± 0,00083	0,022 ± 0,00099
AJ3-T1	0,89	0,412 ± 0,00061	0,270 ± 0,00059	0,142 ± 0,00085
AJ3-T2	0,85	0,409 ± 0,00065	0,270 ± 0,00059	0,139 ± 0,00088
AJ4-T1	-0,08	0,305 ± 0,00077	0,822 ± 0,00067	-0,517 ± 0,00103
AJ4-T2	-0,06	0,322 ± 0,00048	0,846 ± 0,00050	-0,524 ± 0,00069
AJ5-T1	0,44	0,322 ± 0,00113	0,272 ± 0,00080	0,050 ± 0,00139
AJ5-T2	0,49	0,303 ± 0,00117	0,272 ± 0,00080	0,030 ± 0,00142



Joonis 4.8 Toitepinge asümmeetria keskväärtuste hajvusdiagramm

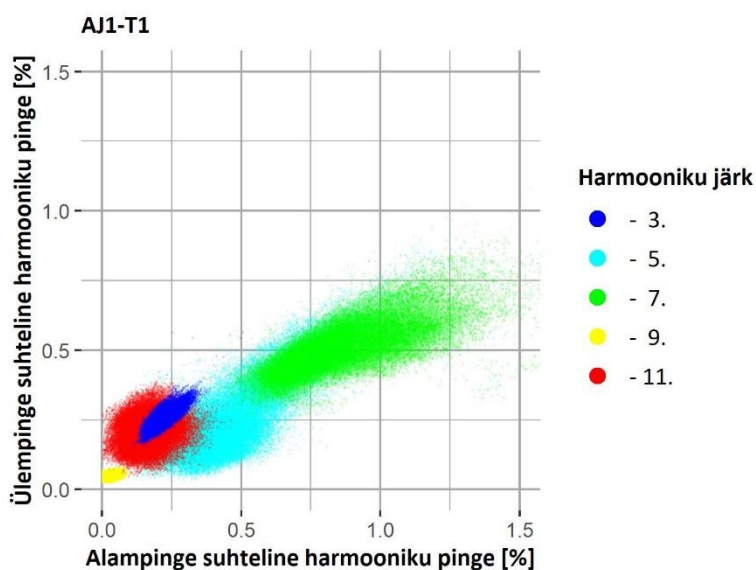
Jooniselt (Joonis 4.8) eristuvad selgelt kahe trafo (AJ4-T1 ja AJ4-T2) mõõtetulemused, millede toitepinge asümmeetria keskväärtused ülempingel on ülejäänud trafode mõõtetulemustest märgatavalt kõrgemad vaatamata asjaolule, et alampinge mõõteväärtused on teiste trafode mõõtetulemustega võrdlemisi sarnased. Nagu eelnevalt mainitud siis antud erinevus võis tuleneda

olukorrast, kus alajaama madala koormuse ning tugeva sidususe tõttu 110 kV poolel ei avalda alampinge toitepinge asümmeetria ülempinge toitepinge asümmeetria tugevat mõju.

Samuti on jooniselt (Joonis 4.8) näha, et kõigi trafode välja arvatud AJ3-T1 ning AJ3-T2 puhul on mõõtetulemuste keskvärtused alampingel väga sarnased. Eelmainitud kahe trafo AJ3-T1 ning AJ3-T2 alampinge toitepinge asümmeetria suuremad keskvärtused võivad tuleneda trafode paiknemisest hajaasustusega piirkonnas ja madalast aastaringsest aktiivkoormusest (Joonis 4.1), mille tõttu võib antud trafode koormus faaside vahel olla ebaühtlasemalt jagunenud kui teiste trafode puhul.

4.3 Harmoonikute pinged

Joonisel (Joonis 4.9) on kujutatud trafo AJ1-T1 erinevat järku harmoonikute pingete mõõtetulemuste hajuvusdiagrammid ühisel graafikul, et anda visuaalne interpretatsioon, kuidas erineva järgu suhteliste harmoonikute pinged teineteisse suhestuvad.



Joonis 4.9 AJ1-T1 suhteliste harmooniku pingete hajuvusdiagrammid

Jooniselt (Joonis 4.9) ilmneb, et kõige suuremaid väärtuseid nii alam- kui ülempinges omavad 5. ning 7. järku harmoonikud, millel on näha ka tugevat korrelatsiooni nii alam- kui ka ülempinge mõõtmiste vahel, mis viitab antud järkude harmoonikute levimisele läbi trafo.

Peatükis 1.5 kirjeldatule vastavalt sulguvad sümmeetriliste harmooniku voolude puhul kolmega jaguvad harmoonikud trafo Δ -mähistes ning ei avaldu liinivooludes. Joonisel (Joonis 4.9) on näha 9. järku harmoonikute koonduvust alampingel sõltumata ülempinge väärtustest. Mõõteandmete koonduvus on paremini esitatud 9. järku harmoonikute hajuvusdiagrammil (Joonis 4.19), kus on

selgelt näha alampinge mõõteandmete sõltumatust ülempinge mõõtevärtustest. 9. järgu suhteliste harmoonikute mõõteandmete koonduvus alampingeõlas viitab harmoonikute omavahelisele sümmeetrilisele ning seetõttu ka nende sulgumisele trafo Δ -mähistes.

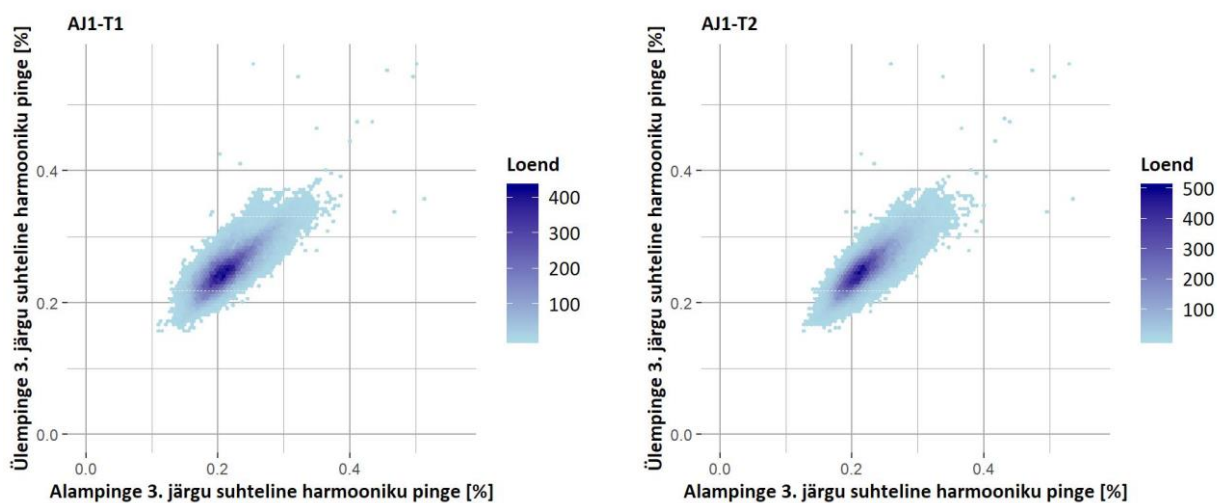
Erinevalt 9. järku harmoonikutele on 3. järgu harmooniku pingetel joonisel (Joonis 4.9) näha tugevat korreleeruvust alam- ja ülempinge mõõtetulemuste vahel, mis viitab, et 3. järgu harmoonikud liiguvad läbi trafo ja seega võivad antud harmoonikute voolud omavahelises võrdluses olla ebasümmeetrilised.

Harmooniku pingete omavahelises võrdluses paistab jooniselt (Joonis 4.9) välja trend, kus madalamate harmoonikute kandumine läbi trafo tuleb rohkem esile kui kõrgemate harmoonikute puhul. Erandina tuleb antud puhul välja tuua sümmeetrilised kolmandad harmoonikud, mis sulguvad trafo Δ -mähistes (antud juhul 9. järgu harmoonikud).

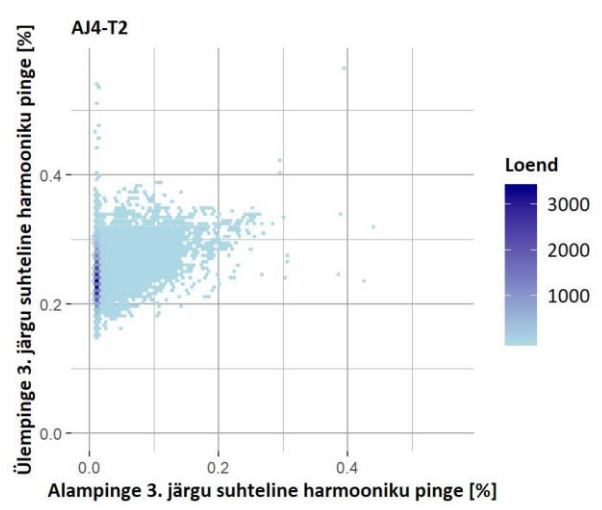
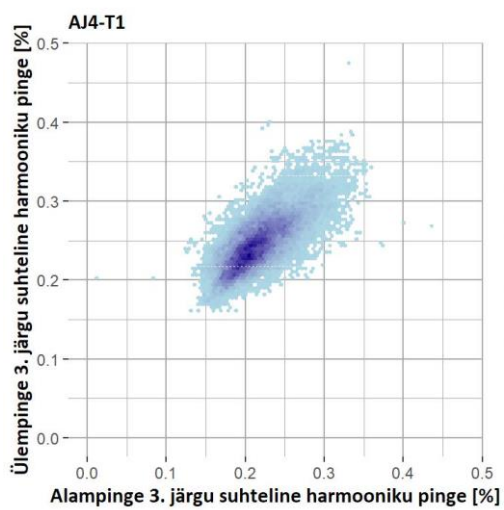
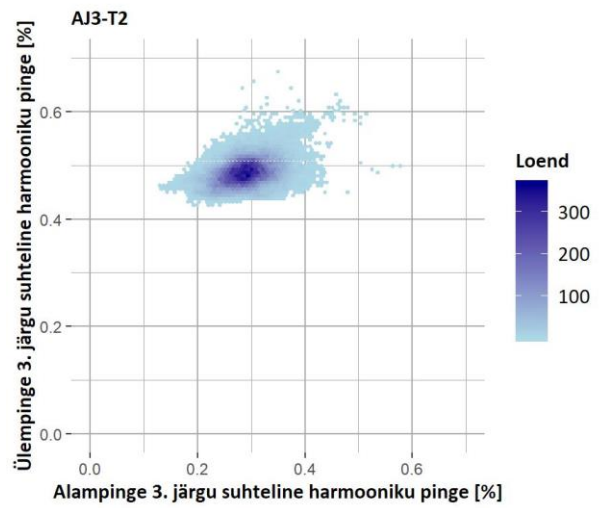
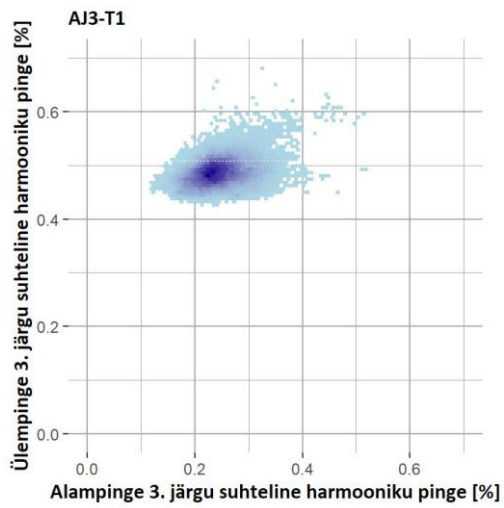
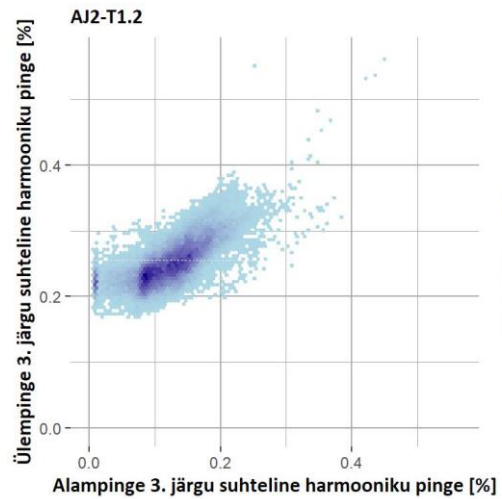
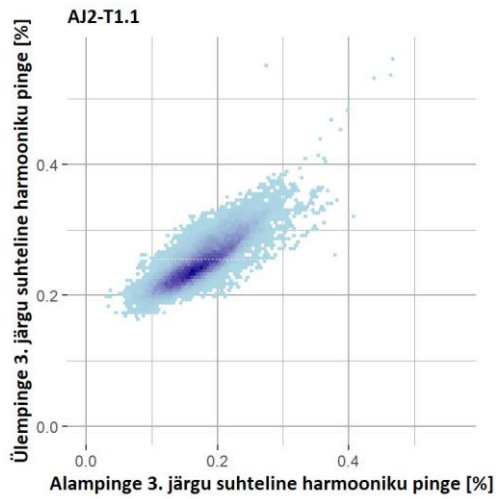
4.3.1 3. järgu harmooniku pinge

Ülem- ja alampinge mõõtetulemuste omavahelise sõltuvuse illustreerimiseks on 3. järgu suhteliste harmoonikute pingete mõõtetulemused esitatud graafiliselt hajuvusdiagrammina joonisel (Joonis 4.10), seejuures hajuvusdiagrammide graafikud ei ole ühes mõõtkavas. 3. järgu harmoonikute pingete keskvärtused, erinevused ülem- ja alampingepoole mõõtetulemuste vahel ning antud mõõtmiste omavahelised korrelatsioonikordajad on toodud tabelis (Tabel 4.3).

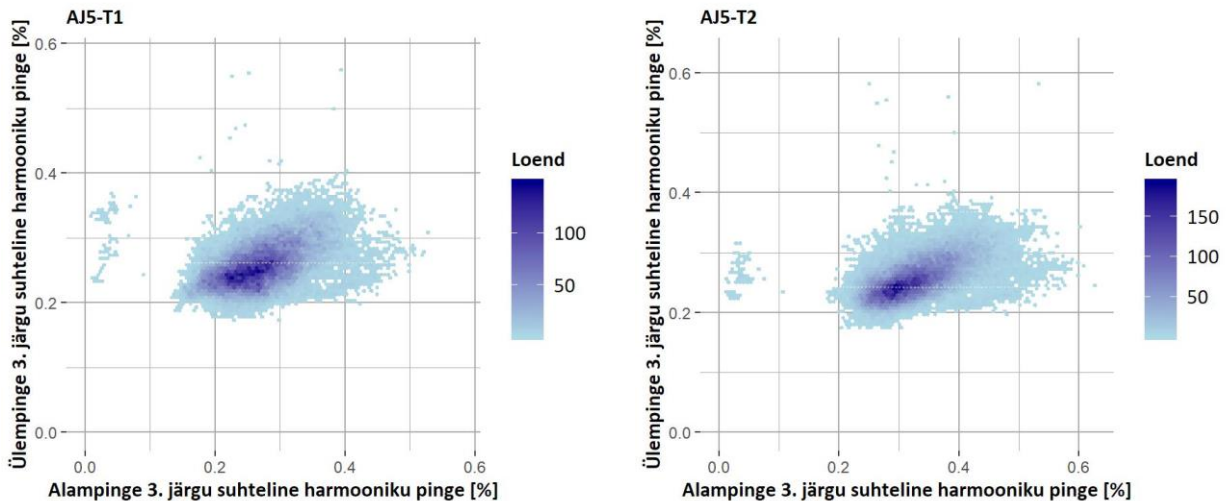
Lisaks on trafo aktiivkoormuse mõjude hindamiseks koostatud hajuvusdiagramm trafo AJ1-T1 3. järgu harmooniku pingete mõõtevärtustele erinevate aktiivkoormuste korral vastavalt punktis 3.4 toodud juhiste, mis on toodud joonisel (Joonis 4.11).



Joonis 4.10 Mõõtepunktide 3. järgu suhteliste harmooniku pingete hajuvusdiagrammid (jätkub)



Joonis 4.10 Mõõtepunktide 3. järgu suhteliste harmooniku pingete hajuvusdiagrammid (jätkub)



Joonis 4.10 Mõõtepunktide 3. järgu suhteliste harmooniku pingete hajuvusdiagrammid

3. järgu harmooniku pingete hajuvusdiagrammidelt (Joonis 4.10) ning tabelis (Tabel 4.3) toodud korrelatsioonikordajate põhjal nähtub, et kõikide trafode välja arvatud AJ3-T1, AJ3-T2 ning AJ4-T2 puhul on olemas alam- ning ülempinge mõõtetulemuste vahel tugev korreleeruvus, mis indikeerib 3. järgu harmoonikute kandumisele läbi trafo. Vastavalt peatükis 1.5 kirjeldatule viitab see asjaolule, et antud mõõtetulemustes esinevad 3. järku harmoonikud on omavahelises võrdluses ebasümmeetrilised (faaside harmoonikute voolude faasinurgad ei ühti ja/või harmoonikute voolude amplituudid ei ole võrdsed).

Kolmandate harmoonikute ebasümmeetria mainitud trafodes võib olla tingitud asjaolust, et antud trafod paiknevad tiheasustusega piirkondades, kus paikneb suurel määral eratarbijaid. Eratarbijate tarbimine tiheasustusega piirkondades on valdavalt ühefaasiline ning seeläbi võivad ka nende elektroonikaseadmete (televiisorid, arvutid, printerid jms) poolt põhjustatud kolmandat järku harmoonikud olla faaside omavahelises võrdluses ebasümmeetrilised.

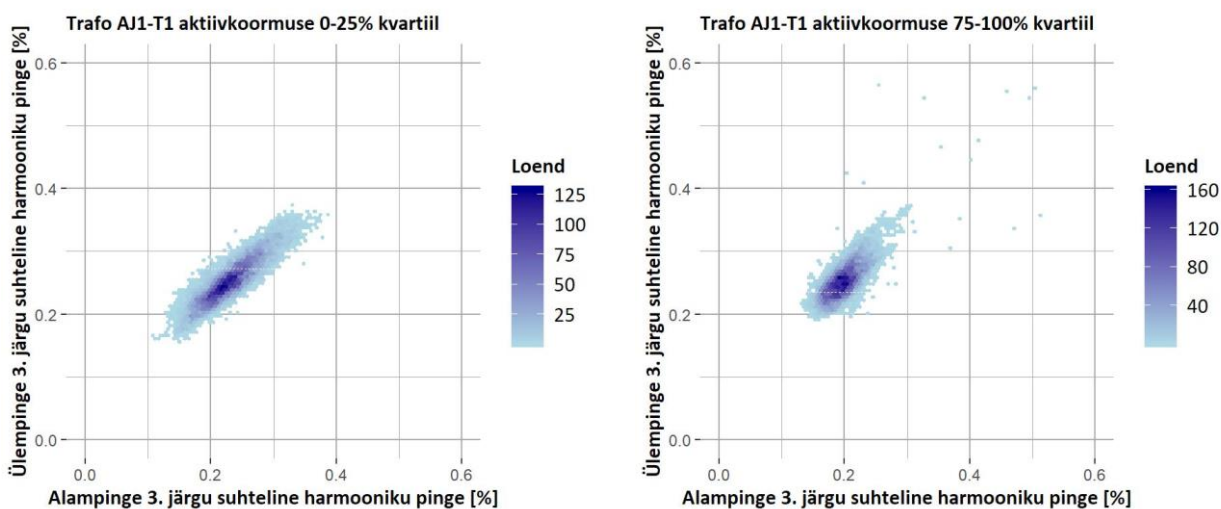
Erinevalt eelmainitud trafodele paistab hajuvusdiagrammidelt (Joonis 4.10) silma trafo AJ4-T2 mõõtetulemused, kus ligikaudu 69,5% alampinge mõõtetulemusi on koondunud kitsasse vahemikku (0,01-0,02). Mõõtetulemused viitavad asjaolule, et antud trafo puhul on kolmandad harmoonikud valdavalt sümmeetrilised, mistõttu ülempingelt tulenevad harmoonikud sulguvad trafo Δ -mähistes ega avaldu alampingepoolel.

Lisaks eristuvad hajuvusdiagrammidelt (Joonis 4.10) ühe alajaama kaks trafot AJ3-T1 ning AJ3-T2, mille puhul ei nähtu ei mõõtetulemuste koonduvust ega ka alam- ja ülempinge mõõtetulemuste tugevat korreleeruvust. Kuna tegemist on hajapiirkonnas asuva transiitalajaamaga (110 kV poolel),

mis asub erinevate tuuleparkide ning suure tarbimisega tiheasustuspiirkonna vahel siis toimub ka alajaama 110 kV õlgades elektri transiit tuuleparkidest tiheasustusega piirkonda. Kuna harmoonikute pinged on sõltuvuses harmoonikute vooludest (vt ptk 1.5) siis võib antud alajaama trafode puhul alam- ning ülempinge 3. järgu suhteliste harmooniku pingete mõõtetulemuste korreleeruvuse puudumine olla tingitud asjaolust, et alajaama 110 kV õlgasid läbib transiitvool, mis avaldab mõju ülempinge 3. järgu harmooniku mõõtetulemustele kuid mitte alampinge mõõtetulemustele.

Joonisel (Joonis 4.11) on toodud AJ1-T1 3. järgu suhtelise harmooniku pinge sõltuvus trafo aktiivkoormusest, mis on koostatud vastavalt punkti 3.4 kirjeldustele. Jooniselt (Joonis 4.11) nähtub, et trafo kõrgete aktiivkoormuse väärtuste juures on 3. järgu suhtelise harmooniku pinged alampingepoolel madalamad kui madala koormuse korral.

Antud nähtus võib olla tingitud asjaolust, et suuremal koormusel on kolmandaid harmoonikuid põhjustavate seadmete koormusosakaal väiksem ning kuna harmoonikute pinged on otseses sõltuvuses harmoonikute vooludest siis on ka suuremal koormusel 3. järgu suhteliste harmoonikute pingete mõõteväärtused alampingepoolel madalamad. Kuna ülempingel mõjutavad 3. järgu harmooniku väärtuseid lisaks trafole AJ1-T1 ka läbi AJ1-T2 liikuvad ning transiitvooludega kaasnevad harmoonikud siis trafo AJ1-T1 aktiivkoormusest tulenev muutus ülempingel nii tugevalt ei kajastu. Kolmandat järku harmoonikute ülekandumisele alampingest ülempingesse aga trafo aktiivkoormuse mõju ei tuvastatud.



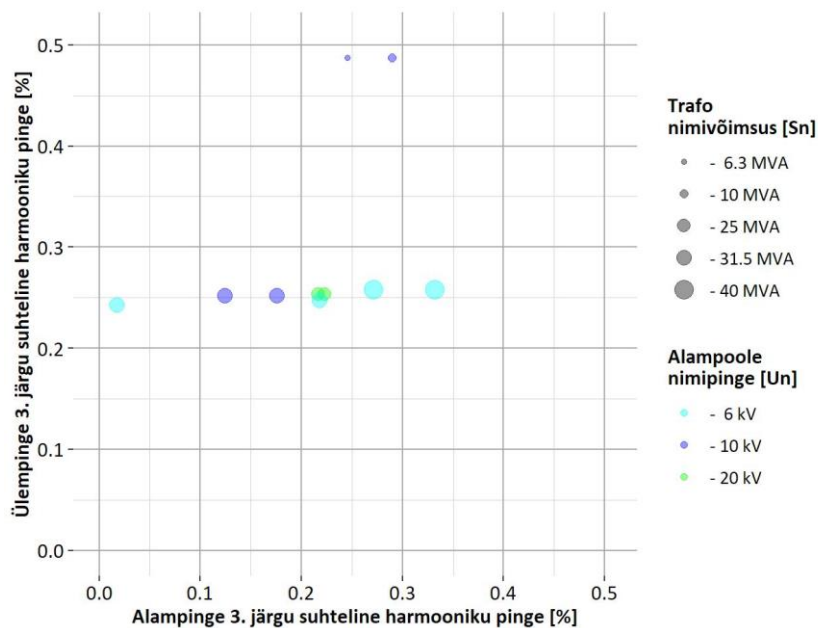
Joonis 4.11 Trafo AJ1-T1 3. järgu harmooniku pinge sõltuvus trafo aktiivkoormusest

T-testi tulemuste põhjal saab kõikide valimis olevate trafode alam- ja ülempinge 3. järgu harmoonikute pingete mõõtmistulemuste keskvärtuste kohta väita, et nad on statistiliselt oluliselt erinevad. Keskvärtuste erinevuste 95% usaldusvahemik on toodud tabelis (Tabel 4.3). Tabelist on näha, et valdavalt on trafode ülempingepoole mõõtetulemuste keskvärtus suurem kui alampingepoolel, vaid kahel puhul (AJ5-T1, AJ5-T2) on olukord vastupidine.

Tabel 4.3 3. järgu suhtelise harmoonikute pingete mõõtetulemused

Trafo nimi	Korrelatsioonikordaja	3. järgu suhtelise harmooniku pinge keskvärtuste 95% usaldusvahemik [%]		Keskvärtuste erinevuse 95% usaldusvahemik
		Alampinge	Ülempinge	
AJ1-T1	0,79	0,216 ± 0,00029	0,253 ± 0,00026	-0,036 ± 0,00039
AJ1-T2	0,82	0,223 ± 0,00028	0,253 ± 0,00026	-0,029 ± 0,00039
AJ2-T1.1	0,85	0,175 ± 0,00043	0,251 ± 0,00032	-0,076 ± 0,00054
AJ2-T1.2	0,68	0,124 ± 0,00052	0,251 ± 0,00032	-0,127 ± 0,00061
AJ3-T1	0,32	0,245 ± 0,00040	0,487 ± 0,00022	-0,241 ± 0,00046
AJ3-T2	0,36	0,289 ± 0,00039	0,487 ± 0,00022	-0,197 ± 0,00045
AJ4-T1	0,72	0,217 ± 0,00043	0,247 ± 0,00040	-0,029 ± 0,00059
AJ4-T2	0,32	0,017 ± 0,00021	0,242 ± 0,00027	-0,225 ± 0,00034
AJ5-T1	0,47	0,271 ± 0,00056	0,258 ± 0,00033	0,012 ± 0,00065
AJ5-T2	0,54	0,331 ± 0,00063	0,258 ± 0,00033	0,073 ± 0,00071

Mõõtetulemuste keskvärtuste (Tabel 4.3) ning trafo põhinäitajate (Tabel 3.1) põhjal on trafode löikes koostatud 3. järgu suhteliste harmoonikute keskvärtuste hajuvusdiagramm (Joonis 4.12).



Joonis 4.12 3. järgu harmoonikute pingete keskvärtuste hajuvusdiagramm

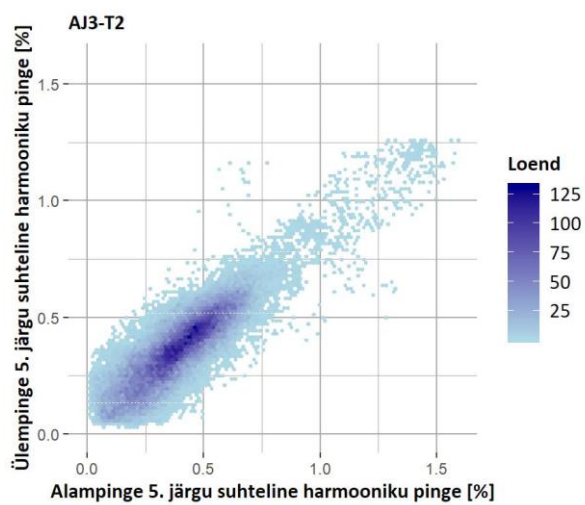
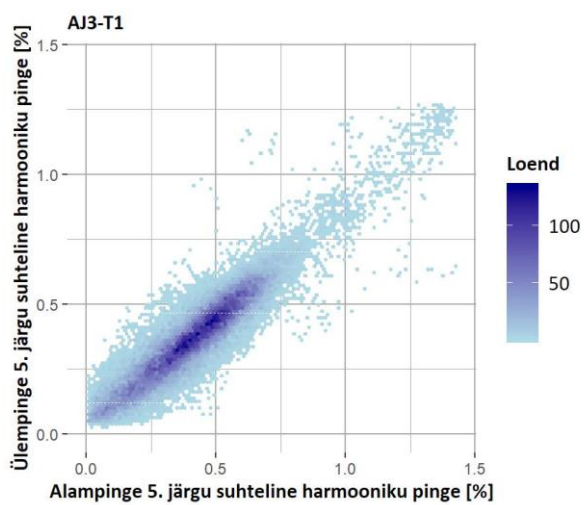
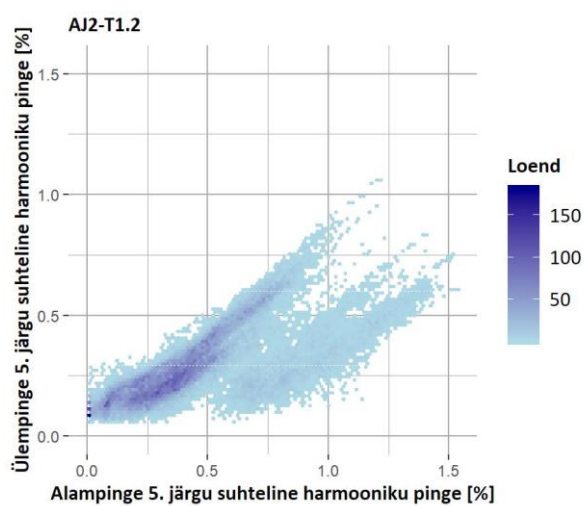
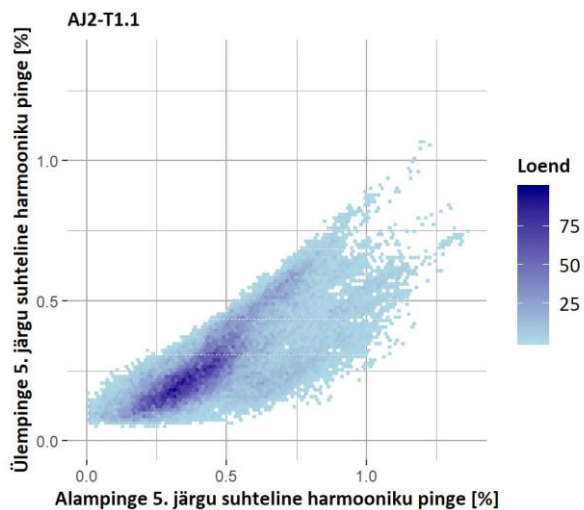
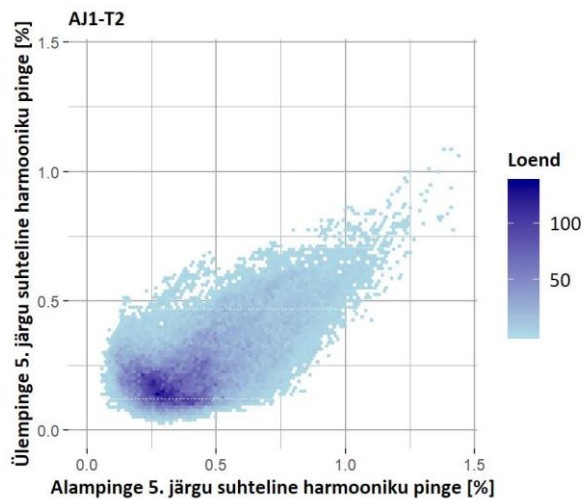
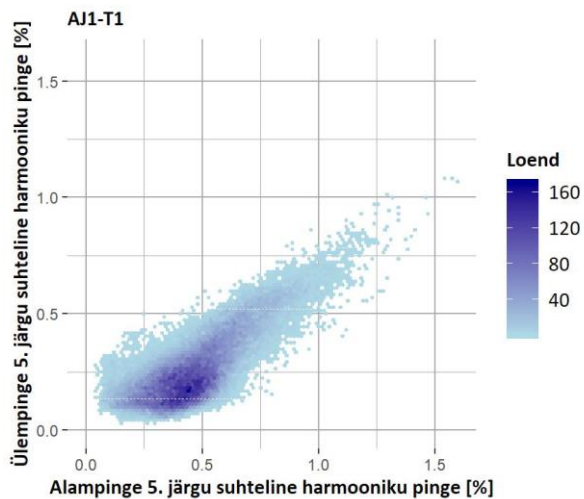
Jooniselt (Joonis 4.12) eristuvad selgelt kahe trafo (AJ3-T1, AJ3-T2) mõõtetulemused, millede 3. järgu suhteliste harmoonikute keskväärtused ülempingel on ülejäänud trafode mõõtetulemustest märgatavalt kõrgemad. Mõõtetulemuste erinevus võib olla tingitud asjaolust, et alajaam AJ3 puhul on tegemist hajaasustusega piirkonnas asuva madala koormusega alajaamaga, millel erinevalt teistest alajaamadest puudub ülempingel tugev elektriline sidestatus ümbritsevate alajaamadega (pikad õhuliinid). Seetõttu avaldavad antud alajaama 110 kV õlgasid läbiva transiitvooluga kaasnevad häiringud ülempingel alajaama mõõtetulemustele suuremat mõju kui nad seda teeksid tugevalt sidestatud alajaama puhul.

Samuti on jooniselt (Joonis 4.12) nähtav, et sõltumata alampinge 3. järgu suhtelise harmooniku pingete keskväärtustest on ülejäänud kaheksa trafo ülempinge mõõtetulemuste keskväärtused väga sarnased. Keskväärtuste sarnasus ülempingel on tingitud faktist, et alajaamad on geograafiliselt lähestikku (ühe piirkonna elektritoite varustuseks) ning nad on ka ülempingel teineteisega elektriliselt tugevalt seotud, mille tulemusena on harmoonikute suhteliste pingete väärtused ülempingel teineteisele sarnased.

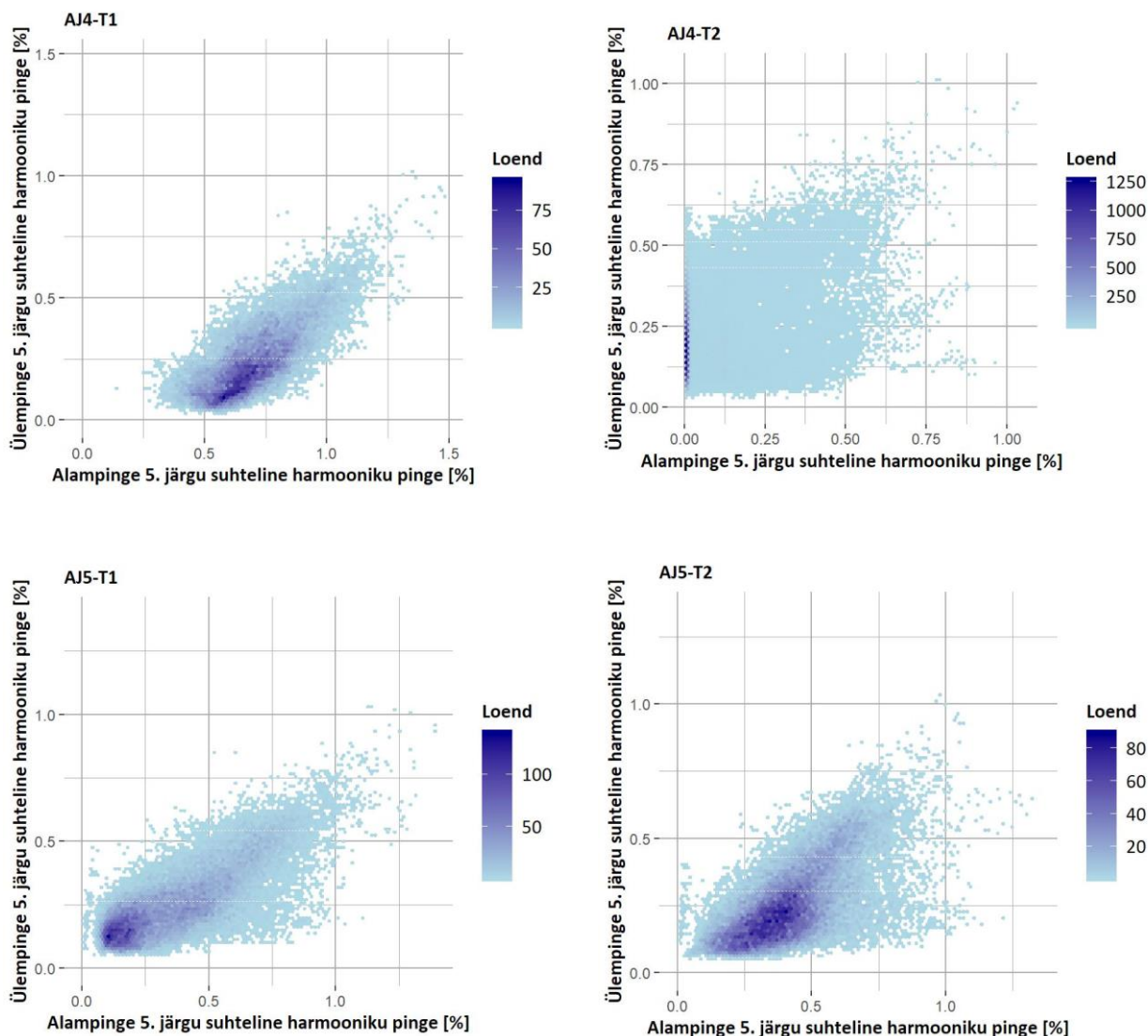
4.3.2 5. järgu harmooniku pinge

Ülem- ja alampinge mõõtetulemuste omavahelise sõltuvuse illustreerimiseks on 5. järgu suhteliste harmoonikute pingete mõõtetulemused esitatud graafiliselt hajuvusdiagrammina joonisel (Joonis 4.13), seejuures hajuvusdiagrammide graafikud ei ole ühes mõõtkavas. 5. järgu harmoonikute pingete keskväärtused, erinevused ülem- ja alampingepoole mõõtetulemuste vahel ning antud mõõtmiste omavahelised korrelatsioonikordajad on toodud tabelis (Tabel 4.4).

Lisaks on trafo aktiivkoormuse mõjude hindamiseks koostatud hajuvusdiagramm trafo AJ1-T1 5. järgu harmooniku pingete mõõteväärtustele erinevate aktiivkoormuste korral vastavalt punktis 3.4 toodud juhiste, mis on toodud joonisel (Joonis 4.14).



Joonis 4.13 Mõõtepunktide 5. järgu suhteliste harmooniku pingete hajvusdiagrammid (jätkub)



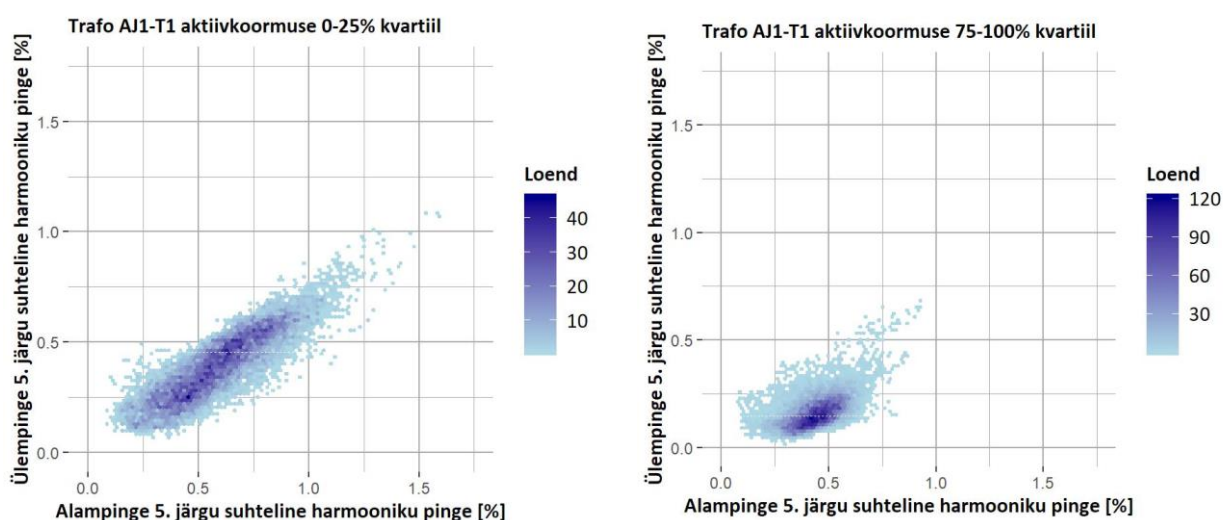
Joonis 4.13 Mõõtepunktide 5. järgu suhteliste harmoonikute hajuvusdiagrammid

5. järgu harmooniku pingete hajuvusdiagrammidelt (Joonis 4.13) ning tabelis (Tabel 4.4) toodud korrelatsioonikordajatest selgub, et üheksa trafo mõõteandmete puhul on alam- ning ülempinge mõõtetulemuste vahel olemas väga tugev positiivne korrelatsioon, mis viitab 5. järgu harmooniku pinge kandumisele läbi trafo.

Kõige nõrgem korrelatsioon (0,42) alam- ja ülempinge mõõtmiste vahel on trafol AJ4-T2, mille puhul on suur osa (65%) alampinge mõõtetulemustest koondunud kitsasse piirkonda (väiksemad kui 0,1%). Trafo AJ4-T2 koormusgraafikult (Joonis 4.1) nähtub, et analüüsitavaid mõõteandmeid on kogutud pea kogu 2018 kalendriaasta jooksul ning ka trafo koormustes ei peegeldu peale seosonsete muutuste ebaharilikke tendentse (koormuse ümbersuunamine hoolduse teostamiseks,

rikked trafol). Olemasolevate mõõtetandmete põhjal ei ole piisavalt infot, et koonduvuse põhjust tuvastada.

Joonisel (Joonis 4.14) on toodud AJ1-T1 5. järgu suhtelise harmooniku pinge mõõtetulemuste sõltuvus trafo aktiivkoormusest. Jooniselt nähtub, et trafo aktiivkoormuse suurenemisel toimub 5. järgu suhteliste harmooniku pingete koonduvus madalamale tasemele nii ülem- kui alampinge mõõtetulemustes. Mõõtetandmete koonduvus võib olla tingitud olukorrast, kus trafo aktiivkoormuse kasvades muutub viiendaid harmoonikuid põhjustavate seadmete koormusosakaal väiksemaks ning seega on ka 5. järku suhteliste harmoonikute voolude ja seeläbi ka vastavate harmoonikute pingete mõõtetulemused nii alam- kui ülempingetes madalamate väärtustega.



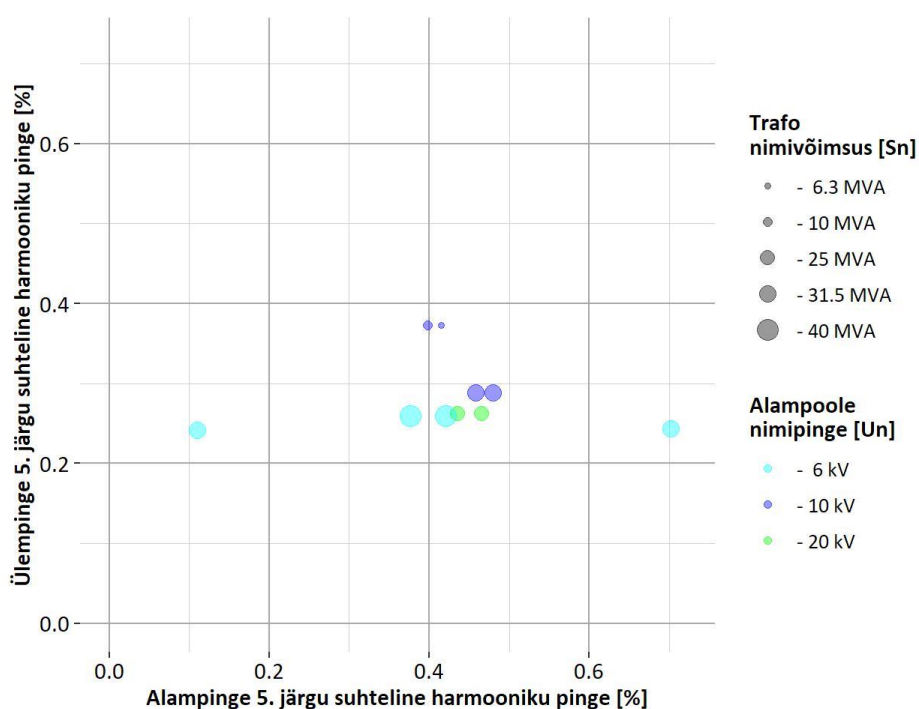
Joonis 4.14 Trafo AJ1-T1 5. järgu harmooniku pinge sõltuvus trafo aktiivkoormusest

T-testi tulemuste põhjal saab kõikide valimis olevate trafode alam- ja ülempinge 5. järgu harmoonikute pingete mõõtmistulemuste keskväärtuste kohta väita, et nad on statistiliselt oluliselt erinevad. Keskväärtuste erinevuste 95% usaldusvahemik on toodud tabelis (Tabel 4.4). Tabelist on näha, et üheksa trafo puhul on alampinge mõõtetulemuste keskväärtus suurem kui ülempingel, vaid trafo AJ4-T2 puhul on ülempinge keskväärtus suurem.

Tabelis (Tabel 4.4) kajastatud mõõtetulemuste keskväärtuste ning tabelis (Tabel 3.1) toodud trafo põhiparameetrite põhjal on koostatud 5. järgu suhteliste harmoonikute keskväärtuste hajuvusdiagramm (Joonis 4.15) trafode lõikes.

Tabel 4.4 5. järgu suhtelise harmoonikute pingete mõõtetulemused

Trafo nimi	Korrelatsioonikordaja	5. järgu suhtelise harmooniku pingete keskväärtuste 95% usaldusvahemik [%]		Keskväärtuste erinevuse 95% usaldusvahemik
		Alampinge	Ülempinge	
AJ1-T1	0,78	0,465 ± 0,00156	0,262 ± 0,00120	0,203 ± 0,00197
AJ1-T2	0,64	0,436 ± 0,00179	0,262 ± 0,00120	0,173 ± 0,00216
AJ2-T1.1	0,78	0,479 ± 0,00225	0,288 ± 0,00148	0,190 ± 0,00270
AJ2-T1.2	0,73	0,458 ± 0,00290	0,288 ± 0,00148	0,169 ± 0,00325
AJ3-T1	0,92	0,415 ± 0,00185	0,373 ± 0,00158	0,041 ± 0,00243
AJ3-T2	0,86	0,398 ± 0,00181	0,373 ± 0,00158	0,024 ± 0,00241
AJ4-T1	0,75	0,701 ± 0,00194	0,243 ± 0,00166	0,458 ± 0,00255
AJ4-T2	0,42	0,110 ± 0,00139	0,241 ± 0,00114	-0,131 ± 0,00180
AJ5-T1	0,78	0,376 ± 0,00225	0,259 ± 0,00139	0,117 ± 0,00265
AJ5-T2	0,66	0,420 ± 0,00170	0,259 ± 0,00139	0,161 ± 0,00220



Joonis 4.15 5. järgu suhteliste harmoonikute keskväärtuste hajuvusdiagramm

Jooniselt (Joonis 4.15) eristuvad sarnaselt 3. järgu harmooniku pingete mõõtetulemustele selgelt kahe trafo (AJ3-T1, AJ3-T2) mõõtetulemused, millede 5. järgu suhteliste harmoonikute keskväärtused ülempingel on ülejäänud trafode mõõtetulemustest märgatavalt kõrgemad. Mõõtetulemuste erinevus võis olla tingitud asjaolust, et alajaam AJ3 puhul on tegemist

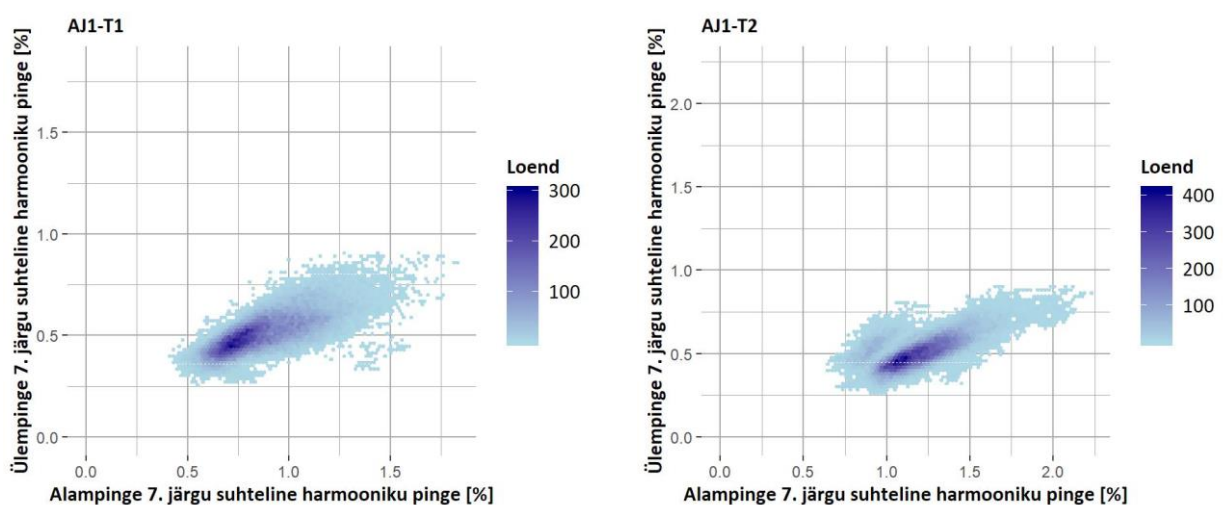
hajaasustusega piirkonnas asuva madala koormusega alajaamaga, millel erinevalt teistest alajaamadest puudub ülempingel tugev elektriline sidestatus ümbritsevate alajaamadega (pikad õhuliinid). Seetõttu avaldasid antud alajaama 110 kV õlgasid läbiva transiitvooluga kaasnevad häiringud ülempingel alajaama mõõtetulemustele suuremat mõju kui nad seda teeksid tugevalt sidestatud alajaama puhul.

Samuti on jooniselt (Joonis 4.15) näha, et sõltumata alampinge 5. järgu suhtelise harmooniku pingete keskväärtustest on ülejäänud kaheksa trafo ülempinge mõõtetulemuste keskväärtused väga sarnased. Keskväärtuste sarnasus ülempingel võib olla tingitud faktist, et alajaamad on ühe piirkonna elektritoite varustuseks ning seega on nad ülempingel teineteisega elektriliselt tugevalt seotud, mille tulemusena on ka harmoonikute suhteliste pingete väärtused ülempingel teineteisele sarnased.

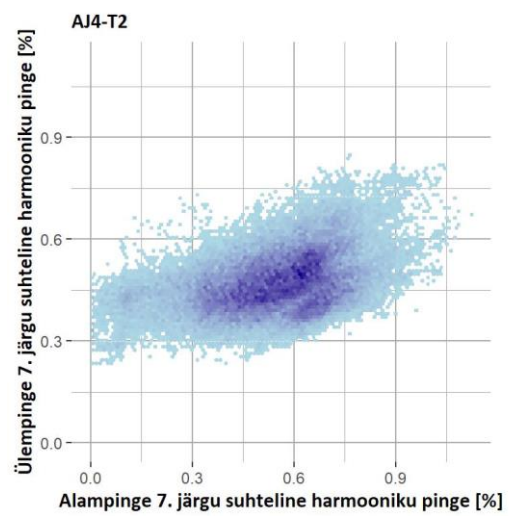
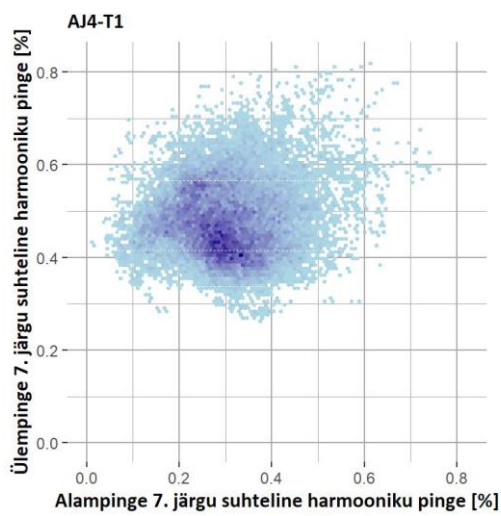
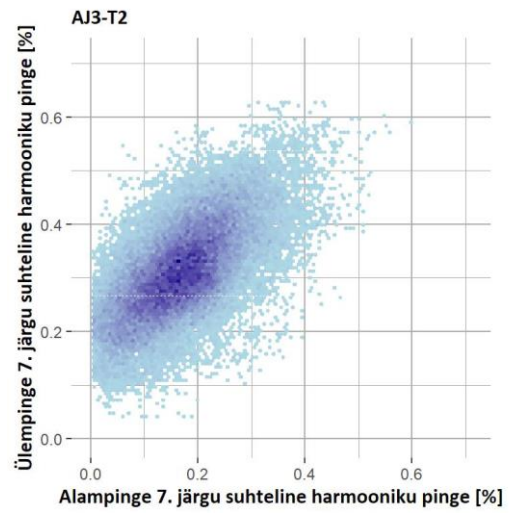
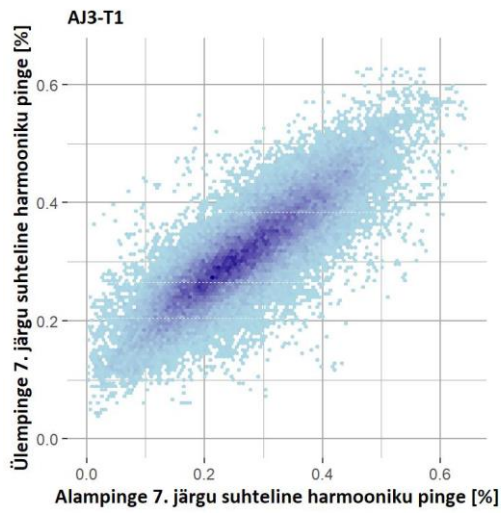
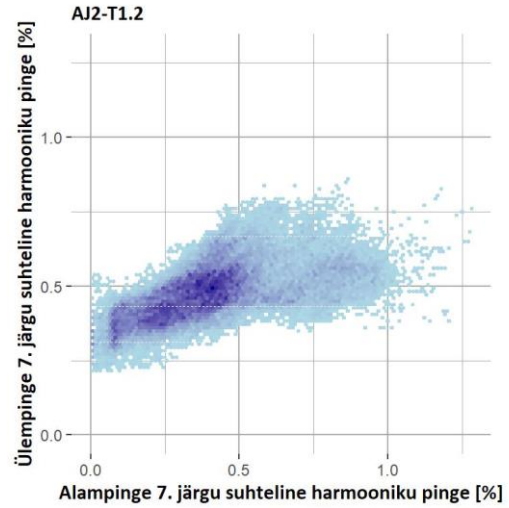
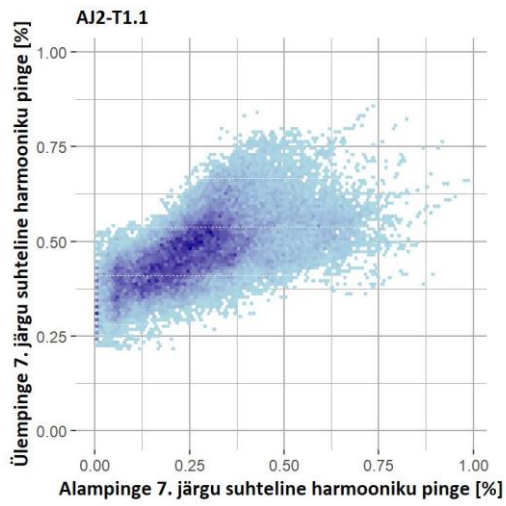
4.3.3 7. järgu harmooniku pinge

Ülem- ja alampinge mõõtetulemuste omavahelise sõltuvuse illustreerimiseks on 7. järgu suhteliste harmoonikute pingete mõõtetulemused esitatud graafiliselt hajuvusdiagrammina joonisel (Joonis 4.16), seejuures hajuvusdiagrammide graafikud ei ole ühes mõõtkavas. 7. järgu harmoonikute pingete keskväärtused, erinevused ülem- ja alampingepoole mõõtetulemuste vahel ning antud mõõtmiste omavahelised korrelatsioonikordajad on toodud tabelis (Tabel 4.5).

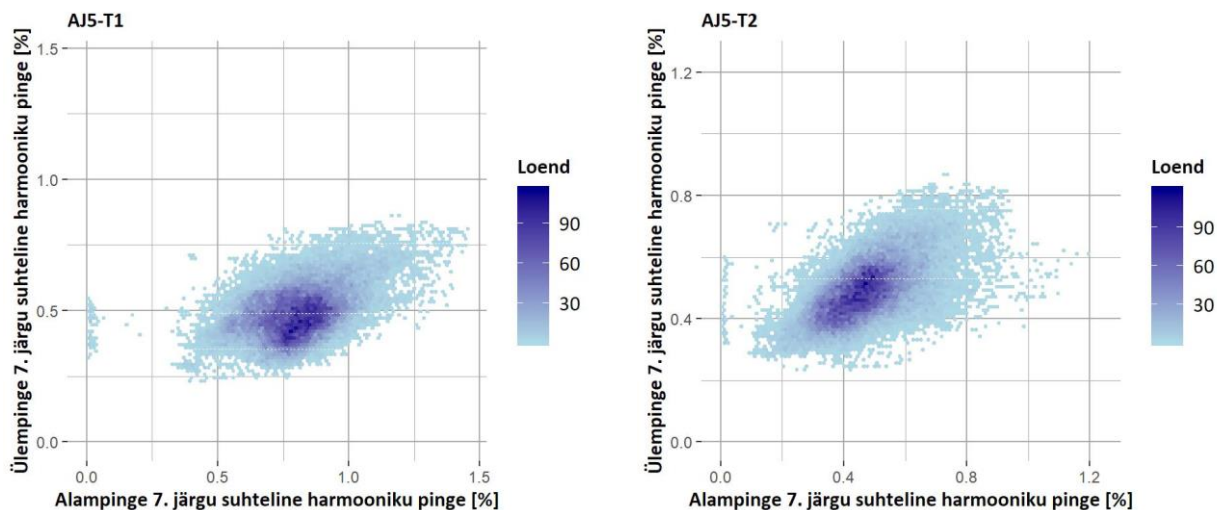
Lisaks on trafo aktiivkoormuse mõjude hindamiseks koostatud hajuvusdiagramm trafo AJ1-T1 7. järgu harmooniku pingete mõõteväärtustele erinevate aktiivkoormuste korral vastavalt punktis 3.4 toodud juhistele, mis on toodud joonisel (Joonis 4.17).



Joonis 4.16 Mõõtepunktide 7. järgu suhteliste harmooniku pingete hajuvusdiagrammid (jätkub)



Joonis 4.16 Mõõtepunktide 7. järgu suhteliste harmooniku pingete hajvusdiagrammid (jätkub)



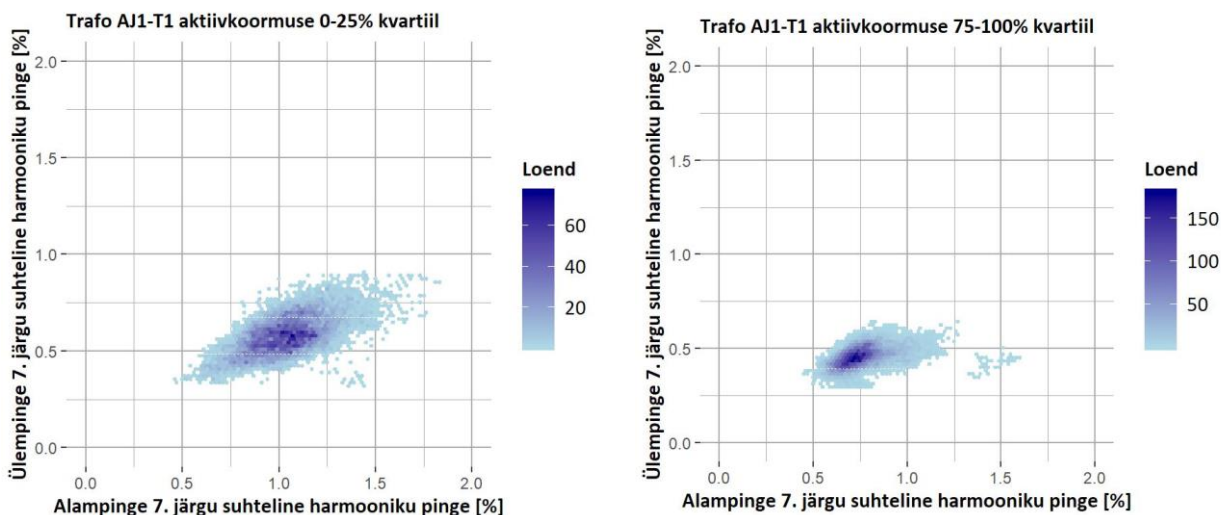
Joonis 4.16 Mõõtepunktide 7. järgu suhteliste harmoonikute hajuvusdiagrammid

7. järgu harmooniku pingete hajuvusdiagrammidelt (Joonis 4.16) ning tabelis (Tabel 4.5) toodud korrelatsioonikordajatest selgub, et üheksa trafo mõõteandmete puhul on alam- ning ülempinge mõõtetulemuste vahel olemas keskmise tugevusega korrelatsioon, mis viitab 7. järgu harmooniku pingete kandumisele läbi trafo. Vaid trafo AJ4-T1 puhul mõõteandmete omavaheline korreleeruvus praktiliselt puudub.

Võrdluses 3. ning 5. järgu suhteliste harmoonikute pingete hajuvusdiagrammidega (Joonis 4.10, Joonis 4.13) on 7. järgu suhteliste harmoonikute pingete hajuvusdiagrammidelt näha, et alam- ja ülempinge mõõtetulemuste hajuvus on üldiselt suurenenud ja ka nendevahelised korrelatsioonikordajad on madalamad. Mõõtetulemuste põhjal ilmneb tendents, kus kõrgema järgu harmoonikute alam- ja ülempinge mõõtetulemused ei korreleeru nii hästi kui madalama järgu harmoonikute mõõtetulemused. Antud erinevus võib olla tingitud asjaolust, et võrdse amplituudiga harmoonikute korral on kõrgema järgu harmooniku puhul trafot läbides esinevad rauaskaod suuremad kui madalama järgu harmooniku puhul. Sellest tulenevalt väljendub kõrgemate harmoonikute energia võrreldes madalama järgu harmoonikutega trafot läbides suuremal määral trafo südamikus ning mähistes eralduva soojuskadude näol kui mõõteandmetes.

Joonisel (Joonis 4.17) on toodud AJ1-T1 7. järgu suhtelise harmooniku pingete mõõtetulemuste sõltuvus trafo aktiivkoormusest. Jooniselt nähtub sarnaselt 5. järgu harmooniku pingete mõõtetulemustest, et trafo aktiivkoormuse suurenemisel toimub 7. järgu suhteliste harmooniku pingete koondumus madalamale tasemele nii ülem- kui alampinge mõõtetulemustes. Mõõteandmete koondumus võib sarnaselt 5. järgu harmooniku pingetele olla tingitud olukorrast, kus trafo aktiivkoormuse kasvades muutub seitsmendaid harmoonikuid põhjustavate seadmete

koormusosakaal väiksemaks ning seega on ka 7. järku suhteliste harmoonikute voolude ja seeläbi ka vastavate harmoonikute pingete mõõtetulemused nii alam- kui ülempinges madalamate väärtustega.



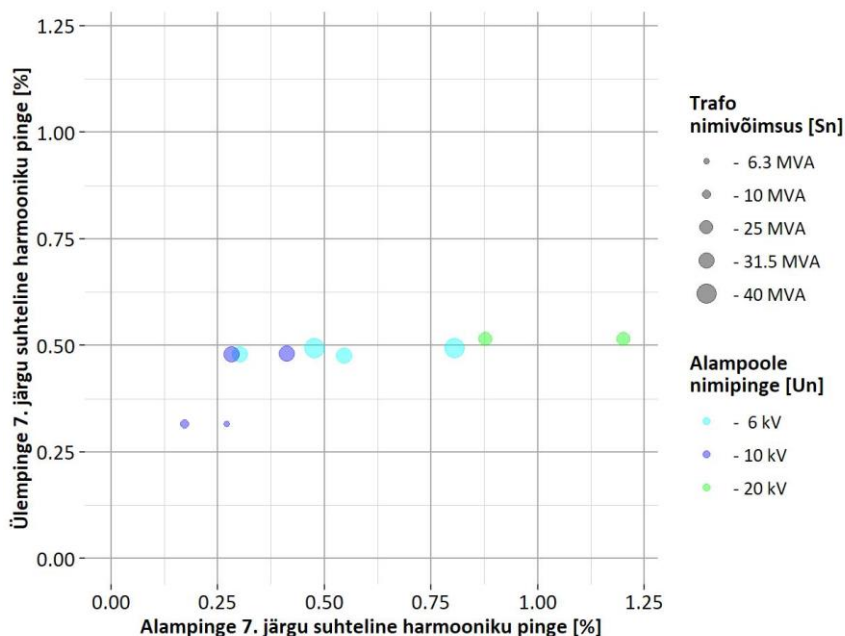
Joonis 4.17 Trafo AJ1-T1 7. järku harmooniku pinge sõltuvus trafo aktiivkoormusest

T-testi tulemuste põhjal saab kõikide valimis olevate trafode alam- ja ülempinge 7. järku harmoonikute pingete mõõtmistulemuste keskväärtuste kohta väita, et nad on statistiliselt oluliselt erinevad. Keskväärtuste erinevuste 95% usaldusvahemik on toodud tabelis (Tabel 4.5). Tabelist on näha, et nelja trafo puhul on alampinge mõõtetulemuste keskväärtus suurem kui ülempingel ning kuue trafo puhul on alampinge keskväärtus suurem.

Tabel 4.5 7. järku suhteliste harmoonikute pingete mõõtetulemused

Trafo nimi	Korrelatsioonikordaja	7. järku suhtelise harmooniku pinge keskväärtuste 95% usaldusvahemik [%]		Keskvärtuste erinevuse 95% usaldusvahemik
		Alampinge	Ülempinge	
AJ1-T1	0,73	0,876 ± 0,00168	0,515 ± 0,00168	0,361 ± 0,00186
AJ1-T2	0,69	1,201 ± 0,00178	0,515 ± 0,00178	0,686 ± 0,00195
AJ2-T1.1	0,62	0,282 ± 0,00161	0,480 ± 0,00161	-0,198 ± 0,00187
AJ2-T1.2	0,60	0,411 ± 0,00226	0,480 ± 0,00226	-0,068 ± 0,00245
AJ3-T1	0,84	0,270 ± 0,00099	0,315 ± 0,00099	-0,045 ± 0,00129
AJ3-T2	0,63	0,171 ± 0,00079	0,315 ± 0,00079	-0,143 ± 0,00114
AJ4-T1	0,07	0,302 ± 0,00119	0,480 ± 0,00119	-0,178 ± 0,00154
AJ4-T2	0,42	0,545 ± 0,00152	0,476 ± 0,00152	0,069 ± 0,00169
AJ5-T1	0,45	0,805 ± 0,00151	0,494 ± 0,00151	0,310 ± 0,00179
AJ5-T2	0,59	0,476 ± 0,00129	0,494 ± 0,00129	-0,018 ± 0,00161

Tabelis (Tabel 4.5) kajastatud mõõtetulemuste keskvärtuste ning tabelis (Tabel 3.1) toodud trafo põhiparameetrite põhjal on koostatud 7. järgu suhteliste harmoonikute keskvärtuste hajuvusdiagramm (Joonis 4.18) trafode lõikes.



Joonis 4.18 7.järgu suhteliste harmoonikute keskvärtuste hajuvusdiagramm

Jooniselt (Joonis 4.18) eristuvad sarnaselt 3. ja 5. järgu suhteliste harmoonikute pingete keskvärtuste võrdluses ühe alajaama kahe trafo (AJ3-T1 ning AJ3-T2) 7. järgu suhteliste harmoonikute pingete keskvärtuste mõõtetulemused, millede ülempinge väärtused on ülejäänud trafode mõõtetulemustest nähtavalt erinevad. 3. ja 5. järgu harmoonikute puhul olid antud trafode harmoonikute ülempinge mõõtetulemuste keskvärtused võrreldes teiste alajaamadega kõrgemad. Antud erinevus võis olla tingitud alajaama 110 kV õlgasid läbivast transiitvoolust, millega kaasnevad häiringud mõjutasid trafode AJ3-T1 ning AJ3-T2 ülempinge mõõteväärtuseid.

Seitsmenda järgu harmoonikute mõõtetulemuste keskvärtuste puhul on trafode AJ3-T1 ning AJ3-T2 puhul olukord vastupidine – mõõtetulemuste keskvärtused ülempingel on madalamad kui ülejäänud kaheksa trafo mõõtetulemuste keskvärtused.

Sarnaselt madalamat järku harmoonikute puhul võib mõõtetulemuste erinevus olla tingitud asjaolust, et alajaam AJ3 puhul on tegemist hajapiirkonnas asuva madala koormusega alajaamaga, millel erinevalt teistest alajaamadest puudub ülempingel tugev elektriline sidestatus ümbritsevate alajaamadega (pikad õhuliinid). Seetõttu avaldasid antud alajaama 110 kV õlgasid läbiva

transiitvooluga kaasnevad häiringud ülepingel alajaama mõõtetulemustele suuremat mõju kui nad seda teeksid tugevalt sidestatud alajaama puhul.

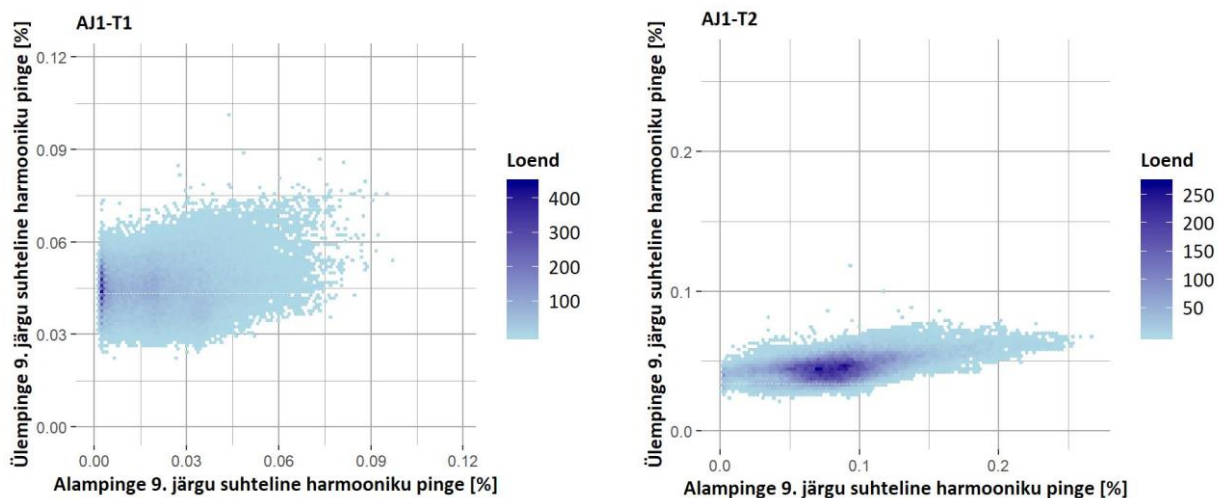
Pikkade õhuliinide tõttu on aga kõrvalasuvatest piirkondadest kõrgemate harmoonikute levik alajaamani AJ3 piiratud. Sellest tulenevalt on trafode AJ3-T1 ja AJ3-T2 7. järgu suhteliste harmoonikute pingete mõõtetulemused ka teiste trafode võrdluses madalamad.

Samuti on jooniselt (Joonis 4.18) näha sarnaselt 3. ning 5. järgu harmoonikute mõõtetulemustele, et sõltumata 7. järgu suhteliste harmooniku alampingete keskväärtustest on ülejäänud kaheksa trafo ülepinge mõõtetulemuste keskväärtused väga sarnased. Keskväärtuste sarnasus ülepingel võib olla tingitud faktist, et alajaamad on ühe piirkonna elektritoite varustuseks ning seega on nad ülepingel teineteisega elektriliselt tugevalt seotud, mille tulemusena on ka harmoonikute suhteliste pingete väärtused ülepingel teineteisele sarnased.

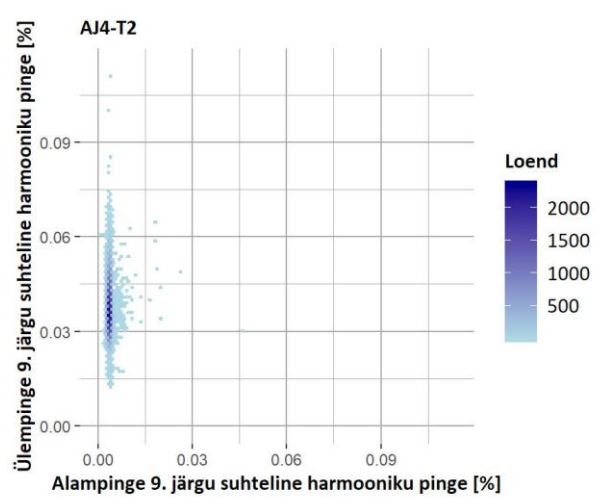
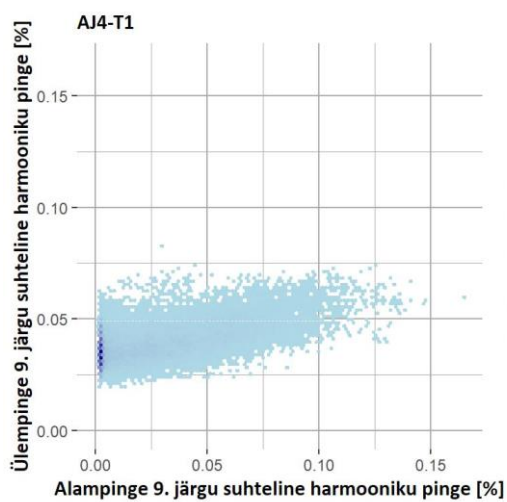
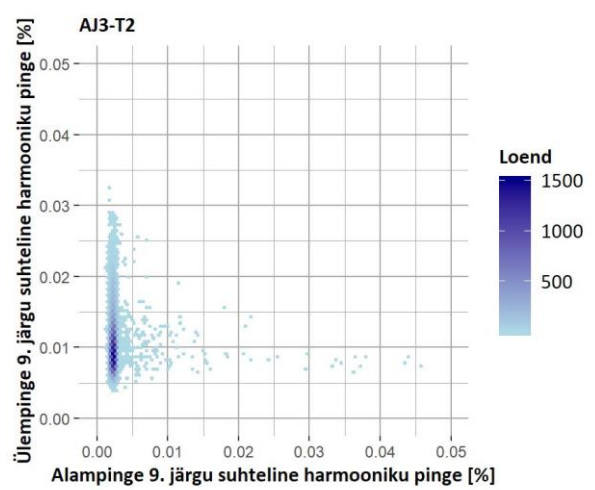
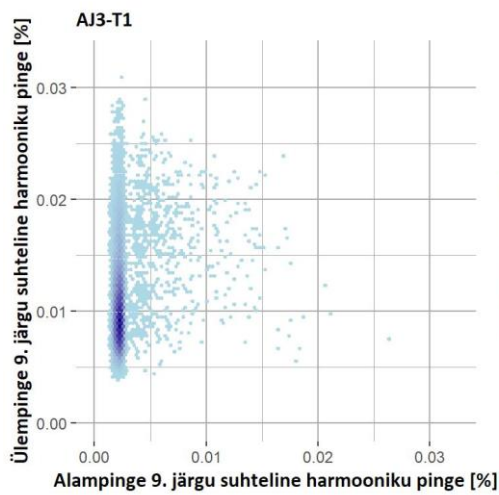
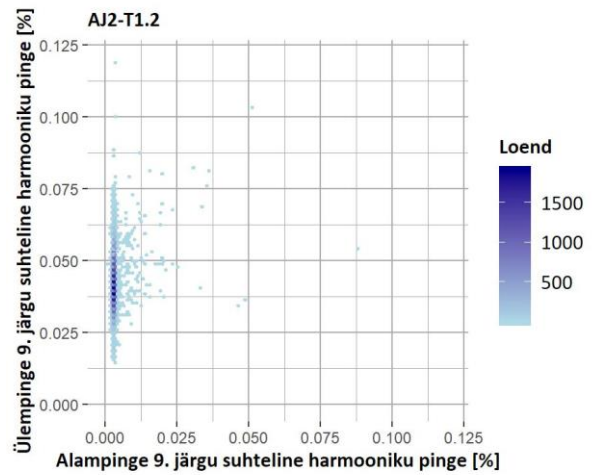
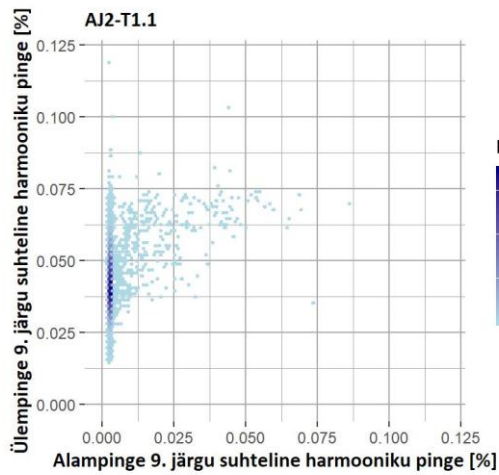
4.3.4 9. järgu harmooniku pinge

Ülem- ja alampinge mõõtetulemuste omavahelise sõltuvuse illustreerimiseks on 9. järgu suhteliste harmoonikute pingete mõõtetulemused esitatud graafiliselt hajuvusdiagrammina jooniselt (Joonis 4.19), seejuures hajuvusdiagrammide graafikud ei ole ühes mõõtkavas. 9. järgu harmoonikute pingete keskväärtused, erinevused ülem- ja alampingepoole mõõtetulemuste vahel ning antud mõõtmiste omavahelised korrelatsioonikordajad on toodud tabelis (Tabel 4.6).

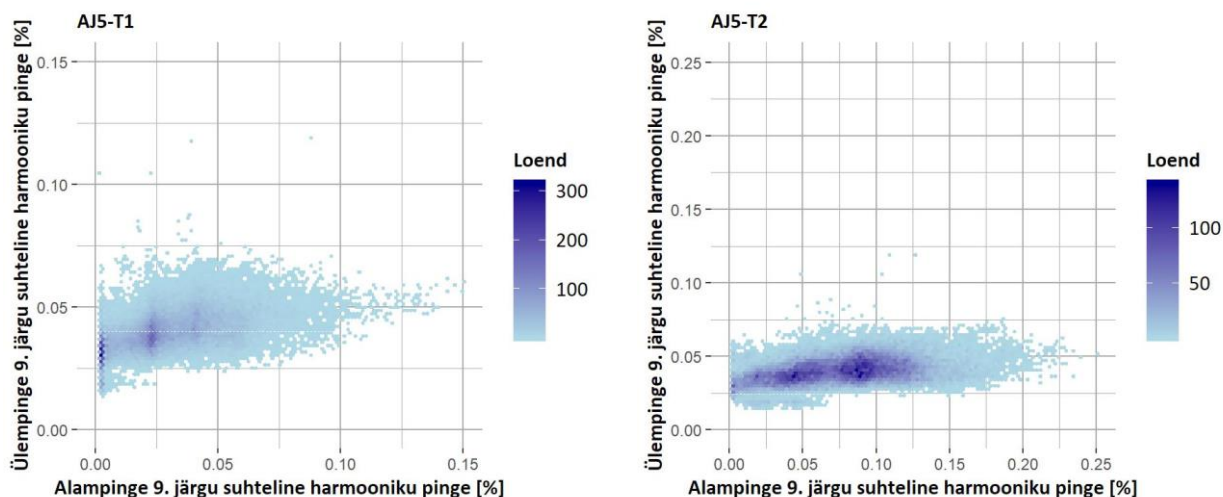
Lisaks on trafo aktiivkoormuse mõjude hindamiseks koostatud hajuvusdiagramm trafo AJ1-T1 9. järgu harmooniku pingete mõõteväärtustele erinevate aktiivkoormuste korral vastavalt punktis 3.4 toodud juhiste, mis on toodud jooniselt (Joonis 4.20).



Joonis 4.19 Mõõtepunktide 9. järgu suhteliste harmooniku pingete hajuvusdiagrammid (jätkub)



Joonis 4.19 Mõõtepunktide 9. järgu suhteliste harmooniku pingete hajuvusdiagrammid (jätkub)



Joonis 4.19 9. järgu suhteliste harmooniku pingete hajuvusdiagrammid

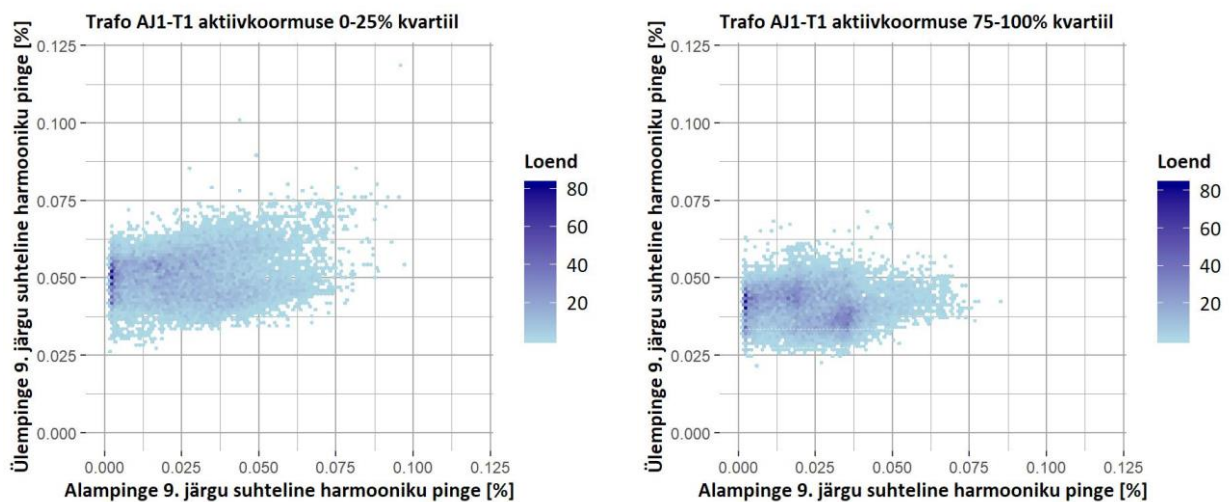
9 järgu harmooniku pingete hajuvusdiagrammidelt (Joonis 4.19) ilmneb kaheksa trafo puhul tendents, kus suur osa alampinge mõõtetulemusi on sõltumatult ülempinge mõõtetulemustest koondunud väga madalale tasemele, mis viitab, et 9. järgu harmoonikud eelmainitud trafode puhul läbi trafo ei kandu. Vastavalt peatükis 1.5 kirjeldatule viitab see, et antud mõõtetulemustes esinevad 9. järku harmoonikud on omavahelises võrdluses sümmeetrilised, mille tagajärjel harmoonikud sulguvad trafo Δ -mähistes ning ei avaldu väljuvates liinivooludes.

Kahe ülejäänud trafo AJ1-T2 ja AJ5-T2 puhul on aga hajuvusdiagrammidelt (Joonis 4.19) näha, et kuigi 9. järgu suhteliste harmoonikute pingete mõõtetulemused alam- ja ülempingel omavahel tugevalt ei korreleeru, ei sulgu nad ka trafo Δ -mähistes vaid kanduvad läbi trafo. Vastavalt peatükis 1.5 kirjeldatule viitab see asjaolule, et antud mõõtetulemustes esinevad 9. järku harmoonikud on omavahelises võrdluses ebasümmeetrilised (faaside harmoonikute voolude faasinurgad ei ühti ja/või harmoonikute voolude amplituudid ei ole võrdsed) ning selle tulemusena ei sulgu ka antud harmoonikud trafo Δ -mähistes.

Võrreldes trafode AJ1-T2 ja AJ5-T2 9. järgu suhteliste harmoonikute mõõtetulemuste hajuvusdiagramme madalamat järku harmoonikute hajuvusdiagrammidega on jätkuvalt näha tendentsi, kus harmooniku järku suurenedes kasvab ka mõõtetulemuste hajuvus.

Joonisel (Joonis 4.20) on toodud AJ1-T1 9. järgu suhtelise harmooniku pinge sõltuvus trafo aktiivkoormusest, mis on koostatud vastavalt punkti 3.4 kirjeldustele. Jooniselt (Joonis 4.20) nähtub, et enamus alampinge mõõtetulemustest on sõltumata ülempinge mõõtetulemustest ning trafo koormusest koondunud väga madalale tasemele. Küll aga ilmneb mõõtetulemuste puhul, mis

antud piirkonda kogunenud ei ole, et trafo kõrgema aktiivkoormuse korral on 9. järku suhteliste harmoonikute ülempinge mõõtetulemused koondunud üldiselt madalamale tasemele kui madala koormuse korral. Mõõteandmete koondumus madalamale tasemele võib olla tingitud asjaolust, kus koormuse kasvades on ka süsteemi koormusjaotuse seisukohast tõenäolisem, et koormusvoolud ja seeläbi ka 9. järku harmoonikute voolud on sümmeetrilisemalt jagunenud kui madala koormuse korral. Sellest tulenevalt on ka 9. järku harmoonikud omavahelises võrdluses sümmeetrilisemad ning sulguvad seetõttu trafo Δ -mähistes ning ei avaldu nii tugevalt trafo ülempinge mõõteandmetes.



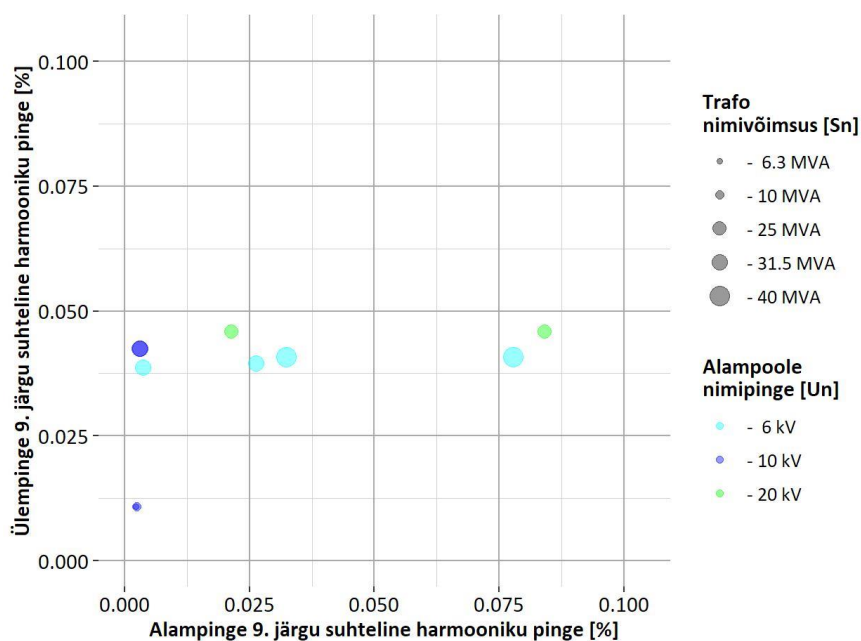
Joonis 4.20 Trafo AJ1-T1 9. järku harmooniku pinge sõltuvus trafo aktiivkoormusest

T-testi tulemuste põhjal saab kõikide valimis olevate trafode alam- ja ülempinge 9. järku harmoonikute pingete mõõtmistulemuste keskväärtuste kohta väita, et nad on statistiliselt oluliselt erinevad. Keskväärtuste erinevuste 95% usaldusvahemik on toodud tabelis (Tabel 4.6). Tabelist on näha, et 8 trafo puhul on ülempinge mõõtetulemuste keskväärtus märkimisväärselt kõrgem kui alampingel. Vaid kahe trafo (AJ1-T2, AJ5-T2), mis olid ka ainukesed trafod kus alampinge mõõteandmed ei olnud koondunud, on alampinge mõõtetulemuste keskväärtused suuremad.

Mõõtetulemuste keskväärtuste (Tabel 4.6) ning trafo põhinäitajate (Tabel 3.1) põhjal on trafode lõikes koostatud 9. järku suhteliste harmoonikute keskväärtuste hajuvusdiagramm (Joonis 4.21).

Tabel 4.6 9. järgu suhteliste harmoonikute pingete mõõtetulemused

Trafo nimi	Korrelatsioonikordaja	9. järgu suhtelise harmooniku pingete keskvaartuste 95% usaldusvahemik [%]		Keskvaartuste erinevuse 95% usaldusvahemik
		Alampinge	Ülempinge	
AJ1-T1	0,21	0,021 ± 0,00013	0,045 ± 0,00007	-0,024 ± 0,00015
AJ1-T2	0,50	0,084 ± 0,00031	0,045 ± 0,00007	0,038 ± 0,00032
AJ2-T1.1	0,18	0,002 ± 0,00002	0,042 ± 0,00009	-0,039 ± 0,00009
AJ2-T1.2	0,11	0,003 ± 0,00001	0,042 ± 0,00009	-0,039 ± 0,00009
AJ3-T1	0,12	0,002 ± 0,00001	0,010 ± 0,00003	-0,008 ± 0,00004
AJ3-T2	-0,01	0,002 ± 0,00003	0,010 ± 0,00003	-0,008 ± 0,00004
AJ4-T1	0,59	0,026 ± 0,00034	0,039 ± 0,00010	-0,013 ± 0,00035
AJ4-T2	0,01	0,003 ± 0,000004	0,038 ± 0,00007	-0,034 ± 0,00007
AJ5-T1	0,47	0,032 ± 0,00021	0,040 ± 0,00009	-0,008 ± 0,00023
AJ5-T2	0,38	0,077 ± 0,00040	0,040 ± 0,00009	0,036 ± 0,00041



Joonis 4.21 9. järgu suhteliste harmoonikute pingete keskvaartuste hajuvusdiagramm

Jooniselt (Joonis 4.21) eristuvad sarnaselt 3., 5. ning 7. järgu suhteliste harmoonikute pingete keskvaartuste võrdlusele ka 9. järgu puhul ühe alajaama kahe trafo (AJ3-T1 ning AJ3-T2) mõõtetulemused, millede ülempinge väärtused on ülejäänud trafode mõõtetulemustest nähtavalt erinevad. Sarnaselt 7. järgu suhteliste harmoonikute ülempinge mõõtetulemuste keskvaartustele

on ka trafodes AJ3-T1 ning AJ3-T2 9. järgu harmoonikute mõõtetulemused võrreldes teiste trafode ülempinge mõõtetulemustega madalamad.

Kuna tegemist on hajapiirkonnas asuva alajaamaga, millel erinevalt teistest alajaamadest puudub ülempingel tugev elektriline sidestatus ümbritsevate alajaamadega (pikad õhuliinid) siis on ka kõrvalasuvatest piirkondadest kõrgemate harmoonikute levik sinna piiratud. Lisaks on vastavalt hajuvusdiagrammidele (Joonis 4.19) näha, et antud alajaama trafodes AJ3-T1 ning AJ3-T2 esinevad 9. järku harmoonikud on valdavalt sümmeetrilised siis ei toimu ka nende kandumist läbi trafo.

Nendest põhjustest tulenevalt on trafode AJ3-T1 ja AJ3-T2 9. järgu suhteliste harmoonikute pingete ülempinge keskväärtused alajaama trafodest ning ümbritsevatest alajaamadest 110 kV liinide kaudu vähem mõjutatud ja 9. järgu suhteliste harmoonikute pingete keskväärtused on teiste trafode võrdluses madalamad (Joonis 4.21).

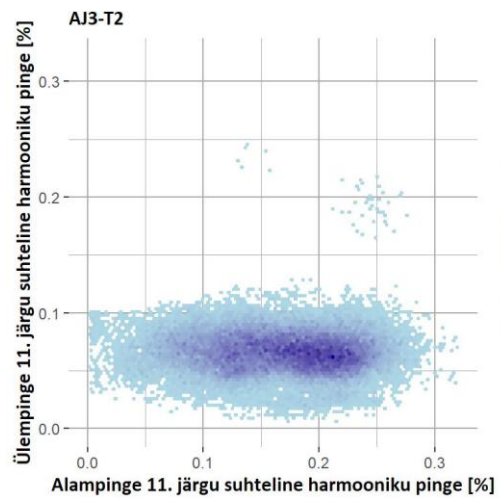
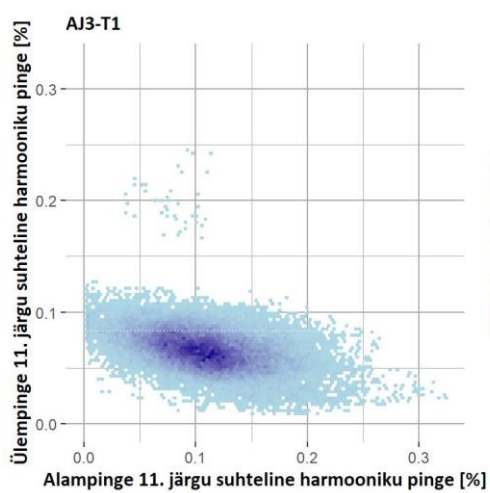
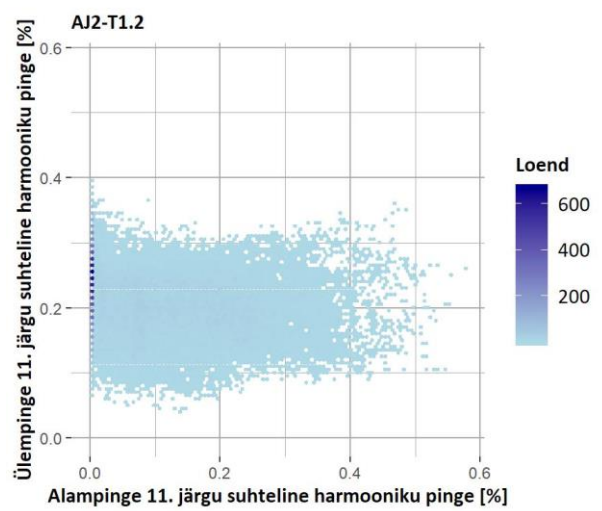
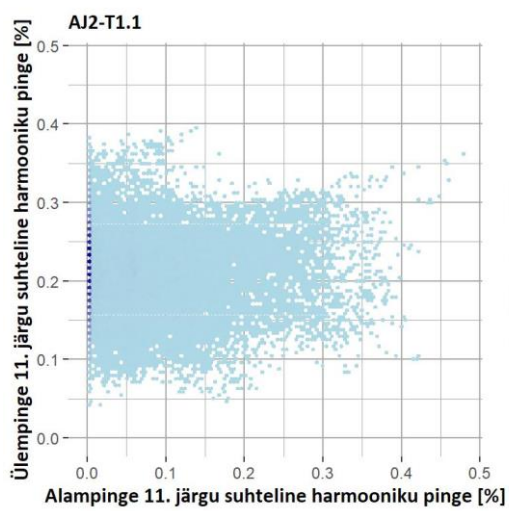
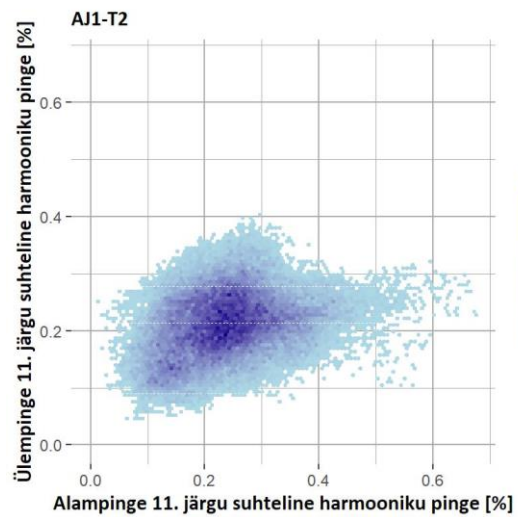
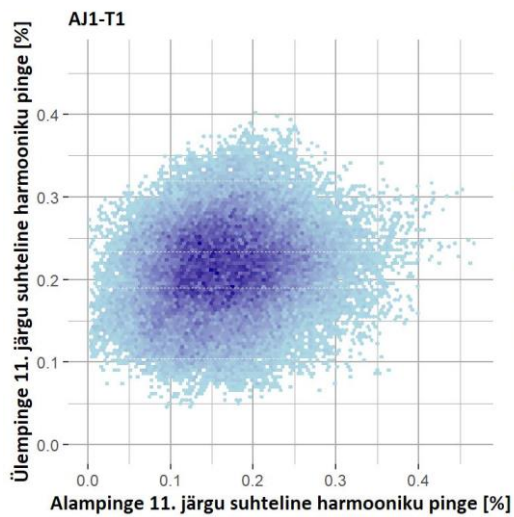
Jooniselt (Joonis 4.21) näha, et sõltumata 9. järgu suhteliste harmooniku alampingete keskväärtustest on ülejäänud kaheksa trafo ülempinge mõõtetulemuste keskväärtused teineteisele sarnased. Keskväärtuste sarnasus ülempingel võib olla tingitud faktist, et alajaamad on ühe piirkonna elektritoite varustuseks ning seega on nad ülempingel teineteisega elektriliselt tugevalt seotud, mille tulemusena on ka harmoonikute suhteliste pingete väärtused ülempingel teineteisele sarnased.

Lisaks eristuvad jooniselt (Joonis 4.21) selgelt trafode AJ1-T2 ning AJ5-T2 9. järgu suhteliste harmoonikute alampinge keskväärtused, mis on teiste trafodega võrdluses kõrgemad. Antud erinevus on tingitud 9. järku harmoonikute ebasümmeetriast ja nende kandumisest läbi trafo.

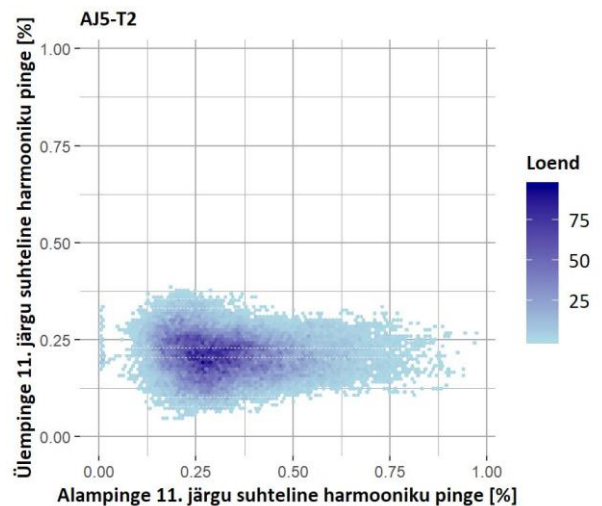
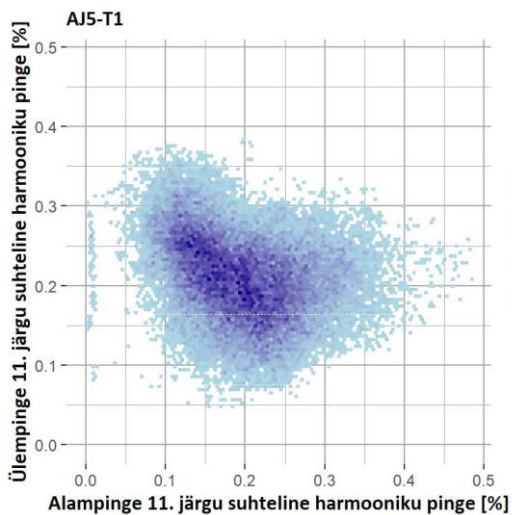
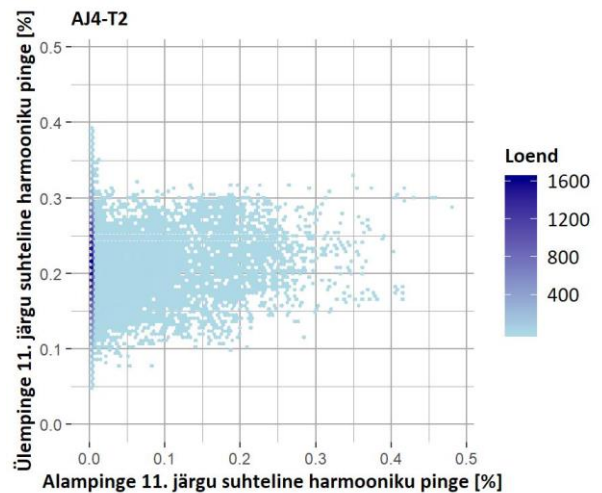
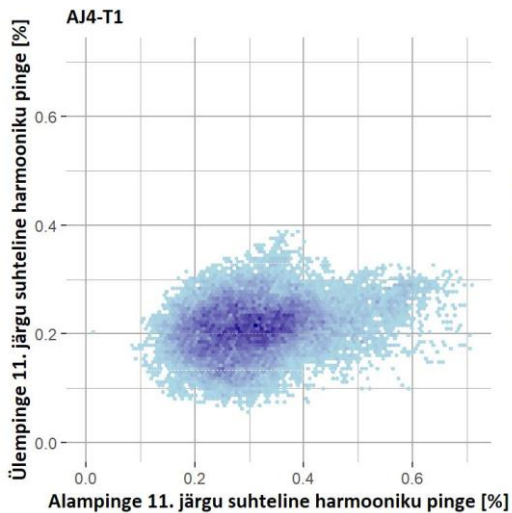
4.3.5 11. järgu harmooniku pinge

Ülem- ja alampinge mõõtetulemuste omavahelise sõltuvuse illustreerimiseks on 11. järgu suhteliste harmoonikute pingete mõõtetulemused esitatud graafiliselt hajuvusdiagrammina joonisel (Joonis 4.22), seejuures hajuvusdiagrammide graafikud ei ole ühes mõõtkavas. 11. järgu harmoonikute pingete keskväärtused, erinevused ülem- ja alampingepoole mõõtetulemuste vahel ning antud mõõtmiste omavahelised korrelatsioonikordajad on toodud tabelis (Tabel 4.7).

Lisaks on trafo aktiivkoormuse mõjude hindamiseks koostatud hajuvusdiagramm trafo AJ1-T1 11. järgu harmooniku pingete mõõteväärtustele erinevate aktiivkoormuste korral vastavalt punktis 3.4 toodud juhistele, mis on toodud joonisel (Joonis 4.23).



Joonis 4.22 Mõõtepunktide 11. järgu suhteliste harmooniku pingete hajuvusdiagrammid (jätkub)



Joonis 4.22 Mõõtepunktide 11. järgu suhteliste harmooniku pingete hajuvusdiagrammid

11. järgu harmooniku pingete hajuvusdiagrammidelt (Joonis 4.22) ning tabelis (Joonis 4.7) toodud korrelatsioonikordajatest selgub, et seitsme trafo mõõteandmete puhul on alam- ning ülempinge mõõtetulemuste vahel suur hajuvus ning mõõteandmete korrelatsioon praktiliselt puudub.

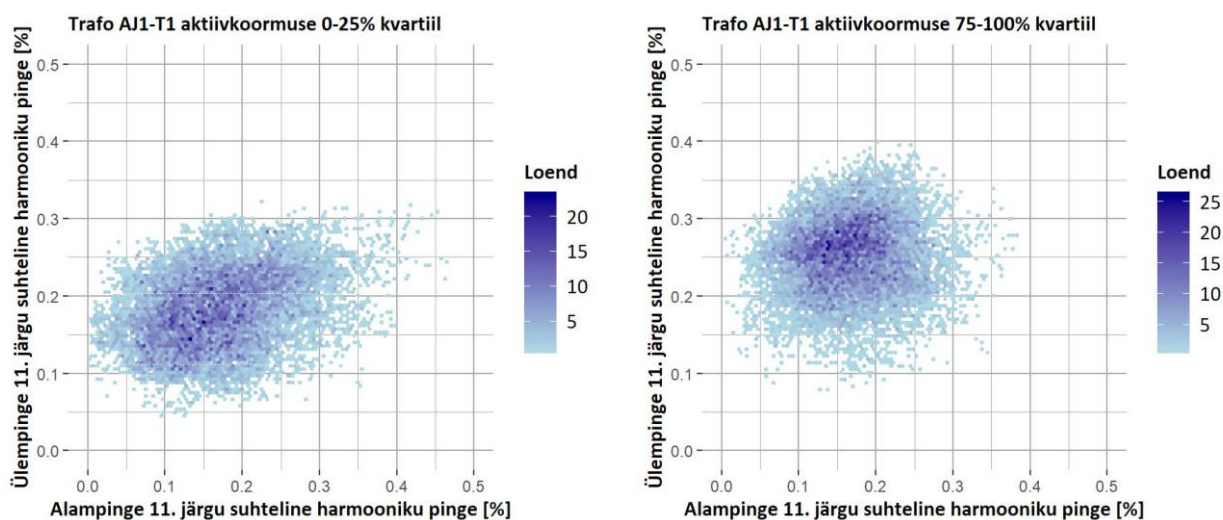
Võrreldes 11. järgu suhteliste harmoonikute pingete hajuvusdiagramme madalamate järkude vastavate hajuvusdiagrammidega jätkub tendents, kus kõrgema järgu harmoonikute alam- ja ülempinge mõõtetulemused ei korreleeru nii hästi kui madalama järgu harmoonikutel. Antud erinevus võib olla tingitud asjaolust, et võrdse amplituudiga harmoonikute korral on kõrgema järgu harmooniku puhul trafot läbides esinevad rauaskaod suuremad kui madalama järgu harmooniku puhul. Sellest tulenevalt väljendub kõrgemate harmoonikute energia võrreldes madalama järgu harmoonikutega trafot läbides suuremal määral trafo südamikis ning mähistes eralduva

soojuskadude näol kui mõõteandmetes. Sellest tulenevalt saab mõõteandmete põhjal väita, et 11. järgu suhtelised harmoonikud enam praktiliselt läbi trafo ei kandu.

11. järgu suhteliste harmoonikute pingete hajuvusdiagrammidelt (Joonis 4.22) ilmneb ülejäänud kolme trafo (AJ2-T1.1, AJ2-T1.2, AJ4-T2) puhul tendents, kus suur osa alampinge mõõtetulemusi on sõltumatult ülempinge mõõtetulemustest koondunud väga madalale tasemele.

Trafode koormusgraafikult (Joonis 4.1) nähtub, et trafo AJ4-T2 puhul on analüüsitavaid mõõteandmeid kogutud peaaegu kogu 2018 kalendriaasta jooksul ning ka trafo koormustes ei peegeldu peale sesoonsete muutuste ebaharilikke tendentse (koormuse ümbersuunamine hoolduse teostamiseks, rikked trafol). Olemasolevate mõõteandmete põhjal ei ole piisavalt infot, et koonduvuse põhjust tuvastada.

Joonisel (Joonis 4.23) on toodud AJ1-T1 11. järgu suhtelise harmooniku pinge mõõtetulemuste sõltuvus trafo aktiivkoormusest. Jooniselt nähtub, et trafo kõrgemal aktiivkoormusel on 11. järgu suhteliste harmooniku pingete ülempinge mõõtetulemused kõrgemal tasemel. Olemasolevate mõõteandmete põhjal ei ole piisavalt infot, et harmooniku kõrgema taseme põhjust tuvastada.



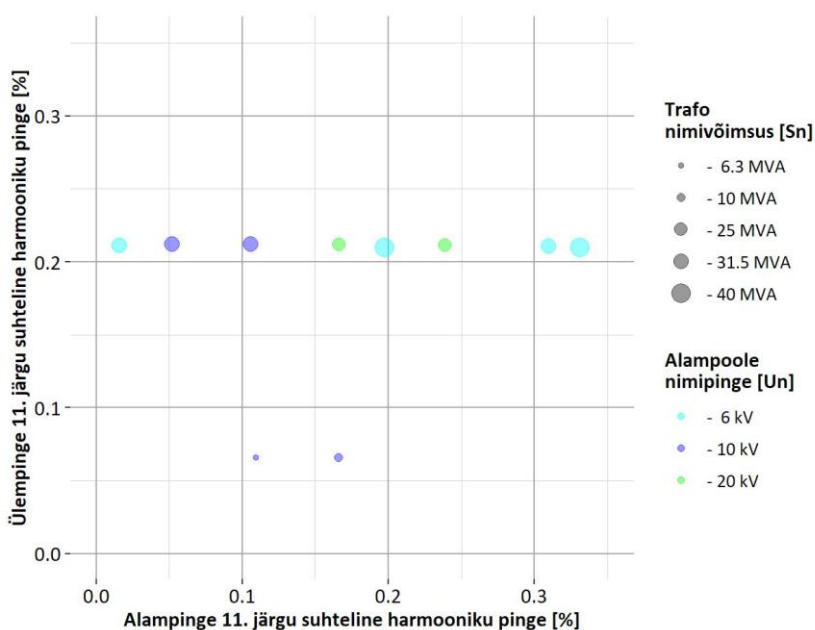
Joonis 4.23 Trafo AJ1-T1 11. järgu harmooniku pinge sõltuvus trafo aktiivkoormusest

T-testi tulemuste põhjal saab kõikide valimis olevate trafode alam- ja ülempinge 11. järgu harmoonikute pingete mõõtmistulemuste keskväärtuste kohta väita, et nad on statistiliselt oluliselt erinevad. Keskväärtuste erinevuste 95% usaldusvahemik on toodud tabelis (Tabel 4.7). Tabelist on näha, et viie trafo puhul on ülempinge mõõtetulemuste keskväärtused kõrgemad kui alampingel ning viie trafo puhul on olukord vastupidine.

Tabel 4.7 11. järgu suhteliste harmoonikute pingete mõõtetulemused

Trafo nimi	Korrelatsioonikordaja	11. järgu suhtelise harmooniku pinge keskväärtuste 95% usaldusvahemik [%]		Keskväärtuste erinevuse 95% usaldusvahemik
		Alampinge	Ülempinge	
AJ1-T1	0,16	0,166 ± 0,00056	0,211 ± 0,00047	-0,045 ± 0,00074
AJ1-T2	0,30	0,238 ± 0,00074	0,211 ± 0,00047	0,027 ± 0,00087
AJ2-T1.1	-0,05	0,051 ± 0,00079	0,212 ± 0,00056	-0,160 ± 0,00097
AJ2-T1.2	-0,29	0,105 ± 0,00116	0,212 ± 0,00056	-0,106 ± 0,00129
AJ3-T1	-0,44	0,109 ± 0,00040	0,066 ± 0,00016	0,043 ± 0,00044
AJ3-T2	-0,05	0,165 ± 0,00052	0,066 ± 0,00016	0,099 ± 0,00055
AJ4-T1	0,26	0,309 ± 0,00119	0,210 ± 0,00061	0,098 ± 0,00134
AJ4-T2	0,03	0,015 ± 0,00038	0,211 ± 0,00046	-0,195 ± 0,00060
AJ5-T1	-0,30	0,197 ± 0,00067	0,210 ± 0,00053	-0,013 ± 0,00086
AJ5-T2	-0,08	0,330 ± 0,00136	0,210 ± 0,00053	0,120 ± 0,00146

Tabelis (Tabel 4.7) kajastatud mõõtetulemuste keskväärtuste ning tabelis (Tabel 3.1) toodud trafo põhiparameetrite põhjal on koostatud 11. järgu suhteliste harmoonikute keskväärtuste hajuvusdiagramm (Joonis 4.24) trafode lõikes.



Joonis 4.24 11. järgu suhteliste harmoonikute pingete keskväärtuste hajuvusdiagramm

Jooniselt (Joonis 4.24) eristuvad sarnaselt madalamate järkude suhteliste harmoonikute pingete keskväärtuste võrdluses ühe alajaama kahe trafo (AJ3-T1 ning AJ3-T2) 11. järgu suhteliste harmoonikute pingete keskväärtuste mõõtetulemused, millede ülempinge väärtused on ülejäänud trafode mõõtetulemustest nähtavalt erinevad.

Sarnaselt 7. ning 9. järgu suhteliste harmoonikute ülempinge mõõtetulemuste keskväärtustele on ka trafodes AJ3-T1 ning AJ3-T2 11. järgu harmoonikute mõõtetulemused võrreldes teiste trafode ülempinge mõõtetulemustega madalamad.

Kuna tegemist on hajapiirkonnas asuva alajaamaga, millel erinevalt teistest alajaamadest puudub ülempingel tugev elektriline sidestatus ümbritsevate alajaamadega (pikad õhuliinid) siis on ka kõrvalasuvatest piirkondadest kõrgemate harmoonikute levik sinna piiratud. Lisaks on vastavalt 11. järgu harmoonikute hajuvusdiagrammidele (Joonis 4.22) näha, et antud alajaama trafode AJ3-T1 ning AJ3-T2 alam- ja ülempinge mõõtetulemused omavahel ei korreleeru.

Nendest põhjustest tulenevalt on trafode AJ3-T1 ja AJ3-T2 11. järgu suhteliste harmoonikute pingete ülempinge keskväärtused alajaama trafodest ning ümbritsevatest alajaamadest 110 kV liinide kaudu vähem mõjutatud ja 11. järgu suhteliste harmoonikute pingete keskväärtused on teiste trafode võrdluses madalamad (Joonis 4.24).

Jooniselt (Joonis 4.21) näha, et sõltumata 11. järgu suhteliste harmooniku alampingete keskväärtustest on ülejäänud kaheksa trafo ülempinge mõõtetulemuste keskväärtused teineteisele sarnased. Keskväärtuste sarnasus ülempingel võib olla tingitud faktist, et alajaamad on ühe piirkonna elektritoite varustuseks ning seega on nad ülempingel teineteisega elektriliselt tugevalt seotud, mille tulemusena on ka harmoonikute suhteliste pingete väärtused ülempingel teineteisele sarnased.

KOKKUVÕTE

Pingekvaliteet avaldab tugevat mõju kõigile elektrisüsteemi ühendatud seadmetele ning komponentidele. Hindamaks pingekvaliteeti lõpptarbija juures on vajalik omada arusaama, kuidas pingekvaliteet põhivõrgust läbi trafode jaotusvõrku ja sealt edasi lõpptarbijani liikudes muutub.

Käesoleva lõputöö eesmärgiks oli hinnata 110 kV ülempingega jõutrafode mõju ning määrata võimalusel ülekandekarakteristikud pingekvaliteedi kestvate nähtuste tunnussuurustele, täpsemalt kiiretele pingemuutustele nagu lühiajalisele värelusele, toitepinge asümmeetriale ning 3., 5., 7., 9. ja 11. järku harmoonikute pingetele.

Lõputöö esimeses peatükis on antud pingekvaliteeti iseloomustavate tunnussuuruste ning neid käsitlevate standardite kohta teoreetiline ülevaade. Kirjeldatud on Eestis avalike elektrivõrkude pinge tunnussuuruste regulatsiooniks kasutatavast standardist EVS-EN-50160 tulenevaid pingekvaliteedi tunnussuuruste piirmäärasid. Samuti on antud ülevaade pingehäiringute mõjudest süsteemi ühendatud seadmetele ning põhjendatud on ka pingekvaliteedi regulatsiooni vajadust.

Teises peatükis on kirjeldatud trafode modelleerimiseks ning arvutuste teostamiseks kasutatavaid trafo aseseeme ning võrrandeid. Antakse ka ülevaade trafodes esinevatest kadudest ning nende tekke põhjustest. Viimasena tuuakse ka eraldi välja pingekvaliteedi häiringutest tingitud täiendavate kadude avaldumise trafodes.

Lõputöö kolmandas peatükis on kirjeldatud töö analüüsiks kasutatud trafode tehnilisi parameetreid ning trafode toitepiirkondasid. Peatükis on antud ka ülevaade töös kasutatud mõõteandmete kogumise ning esitamise põhimõtetest. Lõputöö algandmetena on töös kasutatud Elektrilevi OÜ ja Elering AS pingekvaliteedi seiresüsteemidest 10 erineva jõutrafo alam- ja ülempingeõlgade mõõtetulemusi, mis on kogutud 2018 kalendriaasta jooksul. Samuti on peatükis kirjeldatud analüüsi läbiviimiseks kasutatud meetodite põhimõtteid.

Lõputöö neljandas peatükis on läbi viidud valimisse kuuluvate trafode mõõtetulemuste analüüs. Vastavalt lõputöö ülesande püstitusele analüüsiti 110 kV ülempingega jõutrafode mõju järgmistele pingekvaliteedi kestvatele nähtustele:

- Lühiajaline värelus;
- Toitepinge asümmeetria;
- Harmoonikute pinged (3., 5., 7., 9., ning 11. järk).

Analüüsi tulemusena ilmnes, et ülekandekarakteristikute määramine tuginedes trafo alam- ja ülempingeõlgades teostatud pingekvaliteedi mõõtmistele ei osutunud võimalikuks kuna

mõõtetulemuste vahelised seosed jäid osaliselt selgusetuks. Antud asjaolu on tingitud alampingeõlas paiknevate häiringuallikate võimsuse väiksusest võrreldes trafo ülempingeõlas esinevate võimsuste ja häiringutega. Samuti takistas ülekandekarakteristikute määramist ka suure arvu juhuslike mõjurite olemasolu elektrisüsteemis, mille mõju tugevust ning päritolu olemasolevate mõõteandmete põhjal ei suudetud tuvastada. Määramaks trafo täpset mõju pingekvaliteedi häiringutele on vajalik teostada kontrollitud laborimõõtmised.

Mõõtetulemuste analüüsi põhjal on võimalik teha üldistatud järeldus 110 kV ülempingega jõutrafode mõjust kiiretele pingemuutustele nagu lühiajaline värelus, pinge asümmeetria ning 3., 5., 7., 9. ning 11. järgu harmoonikute pingetele. Analüüsi tulemustest järeldub, et toitepinge asümmeetria kandub läbi trafo kuid silutakse osaliselt trafo mähistes. Pingete silumine on tingitud olukorrast, kus toitepinge asümmeetria tõttu esinevad kolmefaasilise süsteemi toitepingetes ka nulljärgnevuskomponendid. Antud nulljärgnevuskomponentide mõjul tekivad trafo mähistes nulljärgnevusega voolud, mis on omavahelises võrdluses teineteisega faasis ning sulguvad trafo kolmnurk-mähistes ning avalduvad pöörivoolukadudena. Trafot läbinud toitepinge asümmeetria on seega vabanenud nulljärgnevuskomponentidest, avaldades seeläbi ka kolmefaasilise süsteemi toitepingetele siluvat efekti.

Harmoonikute analüüsis ilmnes tendents, kus kõrgema järgu harmoonikud kandusid läbi trafo halvemini kui madalama järgu harmoonikud. Antud erinevus võib olla tingitud asjaolust, et võrdse amplituudiga harmoonikute korral on kõrgema järgu harmooniku puhul trafot läbides esinevad rauaskaod suuremad kui madalama järgu harmooniku puhul. Sellest tulenevalt väljendub kõrgemate harmoonikute energia võrreldes madalama järgu harmoonikutega trafot läbides suuremal määral trafo südamikus ning mähistes eralduva soojuskadude näol kui mõõteandmetes.

Antud tendentsile on erandiks kolmandat järku harmoonikud, mille läbikandumine on sõltuv antud harmoonikute omavahelisest sümmeetriast. Sümmeetrilised kolmandad harmoonikud on nulljärgnevusega, mis kolmnurkühendusega süsteemide korral sulguvad trafo mähistes ja avalduvad seal esinevate rauaskadudena. Ebasümmeetrilised kolmandat järku harmoonikud aga kanduvad osaliselt edasi võrku.

Samuti on harmoonikute kandumisel läbi trafo täheldatud tendentsi, kus trafo suurema aktiivkoormuse juures on harmoonikute tasemed nii alam- kui ülempingepoolel koondunud madalamale tasemele. Mõõteandmete koonduvus võib olla tingitud olukorrast, kus trafo aktiivkoormuse kasvades muutub harmoonikuid põhjustavate seadmete koormusosakaal

väiksemaks ning seega on ka vastavat järku suhteliste harmoonikute voolude ja seeläbi ka vastavate harmoonikute pingete mõõtetulemused nii alam- kui ülempinges madalamate väärtustega.

Lühiajalise vareluse mõõtetulemuste analüüsi põhjal selgus, et lühiajalise vareluse ülekandel läbi trafo tekkis valimis olevate trafode lõikes kolm iseseisvat piirkonda:

- Piirkond, mille puhul kogunes keskmiselt ligikaudu 50% ülempinge mõõtetulemustest väga madalale tasemele (ülempinge $P_{st} = 0,024...0,026$) sõltumata alampinge mõõtetulemustest;
- Nõrgemalt eristuv piirkond, mille puhul tekkis lühiajalise vareluse alam- ja ülempinge mõõtetulemuste vahel lineaarne korrelatsioon;
- Nõrgemalt eristuv piirkond, mille puhul kogunesid alampinge mõõtetulemused sõltumata ülempinge mõõtetulemustest väga madalale tasemele.

Teostatud analüüsi põhjal ilmnes ka, et pingekvaliteedi häiringute mõju arvestamisel tuleb kindlasti arvestada ka alajaama paiknemisest elektrisüsteemis tulenevate iseärasustega – sidususe tugevust põhivõrguga, alajaama koormuste iseloomuga ja nende võrreldavust põhivõrgus liikuvate koormusvoogudega. Analüüsi käigus avaldus, et nõrgema võrgu ja suuremate koormuste puhul tulevad analüüsitud pingehäiringute nähtuste sõltuvused trafo eri õlgades paremini esile kui madalate koormuste ja tugeva võrgu puhul.

Käesoleva lõputöö jätkuna kerkib esile kaks teemat, mida olemasolevate mõõteandmete põhjal antud lõputöös piisavalt täpselt käsitleda ei saadud. Esimesena peaks analüüsima, millest on tingitud eelnevalt mainitud lühiajalise varelustugevuse kolme iseseisva piirkonna kujunemine. Teise teemana saaks uurida jaotusvõrgust tulenevate pingekvaliteedi häiringute avaldumist 110 kV võrgus läbi 110 kV ülempingega jõutrafo sõltuvalt võrgu lühisvõimsusest ja trafo koormusest.

SUMMARY

Voltage quality has a strong effect on all equipment and components which are connected to the power grid. In order to assess the voltage quality at the end consumer one must have an understanding how the voltage quality will vary by moving from the transmission network through transformers to the distribution network.

The aim of this thesis was to evaluate the impact of 110 kV transformers on power quality indices and if possible, determine the transfer ratio to rapid voltage changes such as short-term flicker, voltage imbalance and voltage harmonics by the orders of 3, 5, 7, 9 and 11.

The first chapter of the thesis provides a theoretical overview of different power quality indices and standards which regulate them. In Estonia, the power quality indices are regulated with the standard of EVS-EN-50160. An overview of the effects of voltage quality disturbances on the devices and equipment connected to the power grid is given and the need for voltage quality regulation is justified.

The second chapter describes the two-port network models and equations used for modelling transformers and performing calculations. The chapter also gives an overview of the losses induced in transformers and the causes behind them. Finally, the manifestation of additional losses due to the voltage quality disturbances in transformers are discussed.

In the third chapter of the thesis the technical parameters of the transformers used for the analysis are given. In addition, the power supply areas of said transformers are described. The chapter gives an overview of the principles used for collecting and presenting the measurement data used in this thesis. Measurement data of power quality indices from 10 different power transformers collected throughout 2018 via the quality monitoring systems of Elektrilevi OÜ and Elering AS have been used for the analysis. Lastly, the analysis methods used in the thesis are described.

The fourth chapter of the thesis focuses on the analysis of measurement results of the transformers included in the sample. In accordance to the aim of the thesis the effects of 110 kV transformers on the following power quality indices were analysed:

- Short-term flicker;
- Voltage imbalance;
- Voltages of harmonics by the orders of 3, 5, 7, 9 and 11.

As a result of the analysis, it was found that the determination of the transmission characteristics based on the high voltage and medium voltage quality measurements was not possible as the

relations between the measurements remained partially unclear. This is caused due to voltage quality disturbances originating from the medium voltage side having low power when in comparison to the power levels and disturbances occurring in the high voltage side of the transformer. Likewise, the presence of large number of unknown disturbance sources in the power system, whose impact and origin could not be determined based on the existing measurement data, also prevented the determination of transmission characteristics. In order to determine the exact effect of the transformer on voltage quality disturbances, it is necessary to perform controlled laboratory measurements.

Based on the analysis of the measurement results, it is possible to make a generalized conclusion about the effect of 110 kV transformer on rapid voltage changes such as short-term flicker, voltage imbalance and voltage of harmonics by the orders of 3, 5, 7, 9 and 11. The results of the analysis suggest that voltage imbalance is transmitting through the transformer but is partially smoothed by the windings of the transformer. Due to the voltage imbalance, zero-sequence components are present in the voltages of a three-phase system which in turn will cause zero-sequence currents to flow in the windings of the transformer. These currents are in phase with each other and therefore get trapped in the windings on the delta side of the transformer and manifest in eddy-current losses. The voltage imbalance that has passed the transformer is thereby free of any zero-sequence components and therefore less distorted.

In harmonics analysis, there was a tendency where the higher order of harmonics passed through the transformer worse than the lower order harmonics. This difference may be influenced by the fact that in case of harmonics with equal amplitude, the higher orders of harmonics have higher hysteresis and eddy-current losses than the lower orders of harmonics. As a result, in case of the higher orders of harmonics, the energy manifests more in the form of heat losses induced in the transformer core and windings than it would in the case of a harmonic with a lower order. The exception to this tendency are the orders of harmonics that can be divided by three, for which the passing is dependent on the symmetry of the given harmonics. When said harmonics are symmetrical, they will have zero-sequence characteristics and therefore get trapped in the delta windings of the transformer and express there as eddy-current losses. However, when said harmonics are asymmetric, they will partly pass on to the grid.

In regards of harmonics there is also a tendency, where at the higher active load of the transformer, the levels of harmonics both on the upper and lower voltage side are concentrated at a lower level. The lower values of the measurement data may be due to a situation where in the case of an active load increase the proportional load of the harmonic sources becomes smaller than in the case of a

lower active load thus lowering the relative value of harmonic currents in relation to the total load current.

Based on the analysis of short-term flicker measurement results, it was found that during the transfer of short-term flicker through the transformer, three independent regions of data results were generated:

- Region, where on average, approximately 50% of high voltage measurements resided at a very low level (high voltage side $P_{st}=0,024\dots0,26$) regardless of the measurement results of the medium voltage side;
- A less distinctive region, where a linear correlation between the medium and high voltage measurement results occurred;
- A less distinctive region, where medium voltage measurements resided at a very low level regardless of the measurement results of the high voltage side.

On the basis of the analysis carried out, it was also found that when analyzing the impact of voltage disturbances, the location of the substation in regards of its position in the power grid must be considered – the strength of the cohesion with the rest of the transmission grid as well as the the nature of the substation loads and their comparability with the transit load flows moving in the 110 kV side must be taken into account.

As a continuation of this thesis, two topics arise that could not be sufficiently addressed in the thesis based on the existing measurement data. The first should be to analyze the cause behind the development of the three independent regions of the above-mentioned short-term flicker measurement results. Another topic could be to investigate the manifestation and propagation of voltage disturbances in the 110 kV transmission network originating from the distribution network and their correlation to the short-circuit power of the network and transformer load.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] R. Dugan, M. McGranaghan, S. Santoso ja W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, New York: McGraw-Hill Companies, inc., 2003.
- [2] E. Fuchs ja M. Masoum, *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines*, San Diego: Elsevier Inc., 2008.
- [3] „Võrguteenuste kvaliteedinõuded ja võrgutasude vähendamise tingimused kvaliteedinõuete rikkumise korral,“ 17.04.2005. [Võrgumaterjal].
<https://www.riigiteataja.ee/akt/121102016005?leiaKehtiv>. [Kasutatud 08 04 2019].
- [4] „EVS-EN 50160:2010 - Avalike elektrivõrkude pinge tunnussuurused,“ Tallinn: Eesti standardikeskus, 2011.
- [5] „EVS-EN 60100 - Elektromagnetiline ühilduvus Osa 4-30: Katsetus- ja mõõtetehnika; Elektrikvaliteedi mõõtemetodid,“ Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2015.
- [6] M. Meldorf, H. Tammoja, Ü. Treufeldt ja J. Kilter, „Jaotusvõrgud“, Tallinn, 2007.
- [7] Elering AS, „Põhivõrgu liitumistingimused,“ Elering AS, 05 03 2018. [Võrgumaterjal].
<https://elering.ee/liitumistingimused>. [Kasutatud 02 05 2019].
- [8] A. Voldek, „Elektrimasinad I“, Tallinn, 1973.
- [9] T.-H. Chen, C.-H. Yang ja T.-Y. Hsieh, „Case Studies of the Impact of Voltage Imbalance on Power Distribution Systems and Equipment,“ National Taiwan University of Science and Technology, Taipei, 2019.
- [10] A. Lipsky, N. Miteva ja E. Lokshin, „Errors in Measuring of High Voltage Harmonics in the Medium Voltage Power Networks,“ ENERGYCON 2014, Ariel University, Ariel, 2014.
- [11] J. Järvik, „Elektrotehnika Alused“, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2012.
- [12] E. Tiigimägi, „Elektrivõrgud“, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 1997.
- [13] D. Pejovski, K. Najdenkoski ja M. Digalovski, „Impact of different harmonic loads on distribution transformers,“ Elsevier LTd, Skopje, 2017.

- [14] K. Jansen ja A. Kallaste, „Elektrimasinate alused“, Tallinna Tehnikaülikool, 2017.
- [15] T. Kaart, „Matemaatiline statistika ja modelleerimine - Tõenäosus, teoreetilised jaotused, populatsiooni parameetrite hindamine,“ Eesti Maaülikool, [Võrgumaterjal]. http://www.eau.ee/~ktanel/DK_0007/DK_loeng21.pdf. [Kasutatud 7 05 2019].
- [16] M. Pihlak, „Klassikaline ja mitteparameetriline matemaatiline statistika“, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2018.
- [17] R. E. Walpole, S. L. Myers ja K. Ye, Probability & Statistics for Engineers and Scientists, New Jersey: Pearson Education inc., 2007.
- [18] M. Schael, P. Cueillette ja C. Sourkounis, „Modelling and Power Quality Evaluation of Power Transformers,“ IECON, Yokohama, 2015.

LISAD

Lisa 1 Studenti t-testi kriitilised väärtused erinevate olulisuse nivoode ning vabadusastmete arvu korral [16]

$k \backslash \beta$ kahepoolne	0.01	0.02	0.04	0.05	0.1	0.2
2	9.92	6.96	4.85	4.30	2.92	1.89
3	5.84	4.54	3.48	3.18	2.35	1.64
4	4.60	3.75	3.00	2.78	2.13	1.53
5	4.03	3.36	2.76	2.57	2.02	1.48
6	3.71	3.14	2.61	2.45	1.94	1.44
7	3.50	3.00	2.52	2.36	1.89	1.41
8	3.36	2.90	2.45	2.31	1.86	1.40
9	3.25	2.82	2.40	2.26	1.83	1.38
10	3.17	2.76	2.36	2.23	1.81	1.37
11	3.11	2.72	2.33	2.20	1.80	1.36
12	3.05	2.68	2.30	2.18	1.78	1.36
13	3.01	2.65	2.28	2.16	1.77	1.35
14	2.98	2.62	2.26	2.14	1.76	1.35
15	2.95	2.60	2.25	2.13	1.75	1.34
16	2.92	2.58	2.24	2.12	1.75	1.34
17	2.90	2.57	2.22	2.11	1.74	1.33
18	2.88	2.55	2.21	2.10	1.73	1.33
19	2.86	2.54	2.20	2.09	1.73	1.33
20	2.85	2.53	2.20	2.09	1.72	1.33
21	2.83	2.52	2.19	2.08	1.72	1.32
22	2.82	2.51	2.18	2.07	1.72	1.32
23	2.81	2.50	2.18	2.07	1.71	1.32
24	2.80	2.49	2.17	2.06	1.71	1.32
25	2.79	2.49	2.17	2.06	1.71	1.32
26	2.78	2.48	2.16	2.06	1.71	1.31
27	2.77	2.47	2.16	2.05	1.70	1.31
28	2.76	2.47	2.15	2.05	1.70	1.31
29	2.76	2.46	2.15	2.05	1.70	1.31
30	2.75	2.46	2.15	2.04	1.70	1.31
50	2.68	2.40	2.11	2.01	1.68	1.30
80	2.64	2.37	2.09	1.99	1.66	1.29
120	2.62	2.36	2.08	1.98	1.66	1.29
$k \backslash \beta$ ühepoolne	0.005	0.01	0.02	0.025	0.05	0.1