



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

# ESTLINK 1 ALALISVOOLUÜHENDUSE HARMOONIKUTE KARAKTERISTIKUTE MÕÕTMINE JA ANALÜÜS

MEASUREMENT AND ASSESSMENT OF HARMONIC CHARACTERISTICS OF  
ESTLINK 1 HVDC LINK

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Rainer Tammus

Üliõpilaskood: 176859

Juhendajad: Doktorant-nooremteadur Mari Löper  
Dotsent Jako Kilter

Tallinn, 2020

## 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.

“03” Jaanuar 2020

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” ..... 202.....

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....” .....202... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

# LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

*Autor:* Rainer Tammus

*Lõputöö liik:* Magistritöö

*Töö pealkiri:* Estlink 1 alalisvoolu ühenduse harmoonikute karakteristikute mõõtmine ja analüüs

*Kuupäev:* 03.01.2020

76 lk

*Ülikool:* Tallinna Tehnikaülikool

*Teaduskond:* Inseneriteaduskond

*Instituut:* Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

*Töö juhendaja(d):* doktorant-nooremteadur Mari Löper, dotsent Jako Kilter

## *Sisu kirjeldus:*

Käesoleva lõputöö eesmärk on analüüsida Estlink 1 alalisvooluühenduse harmoonikute karakteristikuid. Selleks uuriti eelnimetatud alalisvooluühenduse harmoonikute emissiooni erinevates talitlustes erinevatel talitlusvõimsustel nii Soome-Eesti, kui ka vastupidisel suunal. Lisaks analüüsiti Estlink 1 sagedusejuhtimise funktsiooni mõju harmoonikute emissioonile. Töö tostamiseks viidi läbi praktilised mõõtmised Harku alajaamas, Estlink 1 lahtris perioodil 11.03.2019-18.03.2019, mille käigus salvestati pinge ja voolu harmoonikuid.

Töö esimeses osas antakse ülevaade elektrikvaliteedi mõõtmistest elektrivõrkudes keskendudes harmoonikute mõõtmistele. Töö annab ülevaate elektrienergia kvaliteediga, täpsemalt harmoonikutega, seotud nähtustest elektrivõrgus, harmoonikute mõjust elektriseadmetele ning kirjeldab nende tekke põhjuseid.

Lõputöö teises osas antakse ülevaade töös läbiviidud mõõtmiste meetodikast. Kirjeldatakse põhjalikumalt katsete meetodikat ja mõõtmiste teostamist. Lisaks tutvustatakse Estlink 1 alalisvooluühenduse ülekandetehnoloogiat, konverterjaama ja selle eripärasid.

Lõputöö kolmandas peatükis kirjeldada mõõtetulemuste analüüsi meetodikat, viiakse läbi mõõtetulemuste analüüs, mille põhjal tehakse üldistatud järeldus pinge- ja vooluharmoonikute mõõtetulemustest.

*Märksõnad:* elektrikvaliteet, harmoonikud, kvaliteedinormid, Estlink 1, HVDC.

## ABSTRACT

*Author:* Rainer Tammus

*Type of the work:* Master Thesis

*Title:* Measurement and assessment of harmonic characteristics of Estlink 1 HVDC link

*Date:* 03.01.2020

*76 pages*

*University:* Tallinn University of Technology

*School:* School of Engineering

*Department:* Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

*Supervisor(s) of the thesis:* PhD student-Junior researcher Mari Lõper, associate Professor Jako Kilter

*Abstract:*

The purpose of this thesis is to investigate the harmonic characteristics of Estlink 1 HVDC connection. Impact of different parameters like power flow direction, different loading of the connection and the impact of frequency regulation function is studied. This work includes practical measurements from Estonian Harku substation that were carried out in the period of 11.03.2019-18.03.2019 for voltage and current harmonics.

The first part of this thesis provides an overview of the most important normating documents in Estonia concerning the quality of electricity with the main focus of harmonics in the network. The definition and cause of harmonics and their influence to network devices is outlined.

The second part of this thesis provides an overview of the practical measurements part of the work. Description of the measurement methodology and testing scheme is introduced. Also, a technical overview of Estlink 1 HVDC connection is given.

The final chapter of the thesis consists of the method for the measurement data analysis and its implementation. Results and analysis has been carried out for both voltage and current harmonics, including assessment of the total harmonic distortion. The analysis is accompanied by scatterchart and graphs of measurement results, so that the reader can visualize and understand the results of the work.

*Keywords:* power quality, harmonics, quality standards, Estlink 1, HVDC.

# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	<b>Estlink 1 alalisvooluühenduse harmoonikute karakteristikute mõõtmine ja analüüs</b>
Lõputöö teema inglise keeles:	<b>Measurement and assessment of harmonic characteristics of Estlink 1 HVDC link</b>
Üliõpilane:	<b>Rainer Tammus, 176859AAVM</b>
Eriala:	<b>Elektroenergeetika</b>
Lõputöö liik:	<b>Magistritöö</b>
Lõputöö juhendaja:	<b>Doktorant-nooremteadur Mari Löper, dotsent Jako Kilter</b>
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	<b>31.01.2020</b>
Lõputöö esitamise tähtaeg:	<b>03.01.2020</b>

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendaja (allkiri)

---

Õppekava juht (allkiri)

## 1. Teema põhjendus

Euroopa Liidu taastuvenergeetika direktiiv sätestab, et aastaks 2020 peavad Euroopa Liidu liikmesriikide energia tarbimine olema kaetud 20% ulatuses taastuvatest energiaallikatest. Lisaks sellele on Euroopa komisjon teinud ettepaneku suurendada eelnimetatud eesmärki 27%-le aastaks 2030. Sellega seoses suureneb oluliselt jõuelektronika kasutamine elektrivõrkudes. Jõuelektronika seadmete kasutamine tähendab suuremat tähelepanu elektrikvaliteedile, sest lisaks nende seadmete olulisele panusele elektrikvaliteedi kõikumisele on eelnimetatud seadmed ka tundlikumad elektrisüsteemi parameetrite muutumisele. Seega võib järeldada, et põhivõrkudel tuleb tulevikus pöörata oluliselt suuremat tähelepanu elektrikvaliteedi hindamisele ja analüüsimisele.

Olulist rolli omab elektrikvaliteedi juures harmoonikute osakaal võrgus. Jõuelektronika seadmed paiskavad võrku suurel määral harmoonikuid olles ise harmoonikute mõjule väga tundlikud. Harmoonikute uurimine ülekandevõrkudes mängib suurt rolli teadustöodes ja ka ülekandevõrkude talitlemisel. Eesti ülekandevõrgu elektrikvaliteedi, täpsemalt harmoonikute, hindamisel ja edasisel analüüsimisel on oluline teada süsteemis paiknevate suurte seadmete mõju elektrivõrgule. Üheks teema osaks on uurida nende seadmete praktilist tööd, mis annab eelduse edasiste analüüside

teostamisele. Selleks uuritaksegi lõputöös Eestis asuva alalisvooluühenduse, Estlink 1, harmoonikute karakteristikuid teostades selle raames praktilisi mõõtmiseid.

## **2. Töö eesmärk**

Töö eesmärgiks on uurida Estlink1 alalisvooluühenduse harmoonikute karakteristikuid alalisvooluühenduse eripäradest lähtuvalt.

## **3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:**

Ühenädalase perioodi jooksul harmoonikute karakteristikute mõõtmine klass A kvaliteedimõõteseadmega.

Analüüsida teostatud mõõtetulemuste põhjal Estlink 1 harmoonikute karakteristikuid:

- Erinevate koormuse korral Eesti-Soome suunal;
- Erinevate koormuste korral Soome-Eesti suunal;
- Sagedusejuhtimisfunktsiooni mõju harmoonikute emissioonile.

## **4. Lähteandmed**

Seitsme päeva mõõtmiste andmed.

## **5. Uurimismeetodid**

Andmete analüüsimiseks kasutatakse arvutusprogrammi MatLab, mis võimaldab suuri andmekogumikke võrrelda ja vastavalt vajadusele analüüsida.

Mõõtmised viiakse läbi klass A kvaliteedimõõteseadmetega võimalikult täpsete tulemuste saamiseks. Tulemuseks on mõõtmiste alusel kokku pandud analüüs Estlink 1 harmoonikute karakteristikute kohta.

## **6. Graafiline osa**

Graafiline osa peamiselt töö põhiosas.

## **7. Töö struktuur**

- Sisukord;
- Lõputöö ülesanne;
- Eessõna;
- Sissejuhatus;
- Kirjanduse ülevaade:
  - Harmoonikud;
  - Estlink 1 HVDC konverterjaam;
- Mõõtmiste metoodika;
- Tulemuste analüüs;

- Kokkuvõte;
- Kasutatud kirjandus.

#### **8. Kasutatud kirjanduse allikad**

IEC standard 61000-4-30 „Testing and Measurement Techniques – Power Quality Measurement Methods“.

EN standard 50160 „Voltage Characteristics in Public Distribution Systems“.

J. Meyer, R. Stiegler, J. Kilter, „Accuracy of Voltage Instrument Transformers for Harmonic Measurements in Elering’s kV Transmission Network“, PQ 2016, Estonia.

R. Stiegler, J. Meyer, J. Kilter, S. Konzelmann, „Assessment of Voltage Instrument Transformers Accuracy for Harmonic Measurements in Transmission Systems“, ICHQP 2016, Brazil.

## SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE .....	3
ABSTRACT .....	4
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE .....	5
EESSÕNA.....	10
SISSEJUHATUS.....	11
1. ELEKTRI KVALITEET - HARMOONIKUD.....	13
1.1 Harmoonikute olemus.....	14
1.2 Harmoonikute mõju .....	18
1.3 Elektri kvaliteedi normdokumendid.....	20
2. ESTLINK 1 HARMOONIKUTE KARAKTERISTIKUTE MÕÕTMISTE METOODIKA.....	23
2.1 EstLink 1 alalisvooluühendus.....	23
2.1.1 Estlink 1 ülekandetehnoloogia .....	23
2.1.2 Estlink 1 konverterjaam .....	24
2.1.3 Konverterjaama PQ näitajad .....	26
2.2 Mõõtmiste metoodika .....	27
2.2.1 Mõõteahel.....	28
2.2.2 Katsekava .....	30
3. MÕÕTETULEMUSTE ANALÜÜS .....	32
3.1 Mõõtetulemuste analüüsi metoodika.....	32
3.2 Pingeharmoonikute analüüs.....	34
3.2.1 Pingeharmoonikud Eesti – Soome võimsusvoo suunal .....	34
3.2.2 Pingeharmoonikud Soome – Eesti võimsusvoo suunal .....	39
3.3 Vooluharmoonikud .....	44
3.3.1 Vooluharmoonikud Eesti – Soome võimsusvoo suunal.....	44



3.3.2 Vooluharmonikud Soome – Eesti võimsusvoo suunal .....	49
3.4 Harmoonutustegur .....	54
3.4.1 Pinge harmoonutustegur Eesti – Soome võimsusvoo suunal .....	55
3.4.2 Pinge harmoonutustegur Soome – Eesti võimsusvoo suunal .....	56
3.4.3 Voolu harmoonutustegur Eesti – Soome võimsusvoo suunal .....	57
3.4.4 Voolu harmoonutustegur Soome – Eesti võimsusvoo suunal .....	58
<b>KOKKUVÕTE</b> .....	62
SUMMARY .....	65
KASUTATUD KIRJANDUS .....	68
LISAD .....	71
Lisa 1 Pingeharmonikute mõõteandmete võrdlus võimsusvoode suhtes .....	71
Lisa 2 Vooluharmonikute mõõteandmete võrdlus võimsusvoode suhtes.....	74

## EESSÕNA

Käesoleva magistritöö teema sai pakutud lõputöö juhendaja poolt, kuna teema valikul ei olnud endal kindlat mõtet, millest sooviksin kirjutada. Siinkohal sooviksin tänada lõputöö juhendajat Mari Löperit, kes mind motiveeris kirjutamisel, kes on mind suunanud ja lahkelt aidanud kirjandusallikate otsimisel ja erinevate programmide õppimisel, tänu millele on käesolev töö valminud ja mille kirjutamise käigus olen saanud juurde uusi teoreetilisi ja praktilisi teadmisi.

Lõpetaja: Rainer Tammus

Aadress: Narva mnt 5-122, 10117 Tallinn

Telefon: +372 5554 0303

## SISSEJUHATUS

Taastuenergeetika võidukäik, Euroopa Liidu kliimapolitiika ja elektrisüsteemide tehnilised arengud on loonud elektrisüsteemide planeerimisel ja talitlemisel palju uusi väljakutseid. Aina suurem jõuelektrooniga kasutuselevõtt on tõstnud ülekandevõrkudes tähelepanu elektrikvaliteedile, selle monitoorimisele, hindamisele ja analüüsimisele.

Oluline roll elektrikvaliteedi juures on harmoonikute osakaalul võrgus. Jõuelektroonika seadmed paiskavad võrku suurel määral harmoonikuid olles ise harmoonikute mõjule väga tundlikud. Harmoonikute uurimine ülekandevõrkudes mängib suurt rolli teadustöodes ja ka ülekandevõrkude talitlemisel. Eesti ülekandevõrgu elektrikvaliteedi, täpsemalt harmoonikute, hindamisel ja edasisel analüüsimisel on oluline teada süsteemis paiknevate suurte seadmete mõju elektrivõrgule.

Samuti on viimastel aastatel oluliselt tõusnud huvi harmoonikute modelleerimisele elektrivõrkudes. Käesoleval hetkel puuduvad koherentsed kirjanduslikud allikad ülekandevõrgu kohta, milles oleks välja toodud reaalsed tehniliste rajatiste (alalisvooluühendust) mõjud harmoonikute emissioonile. Antud töö annab aluse harmoonikute modelleerimistulemuste valideerimiseks ja arendamiseks nii akadeemilisest kui ka praktilisest vaatepunktist.

Käesoleva magistritöö eesmärk on analüüsida Estlink 1 alalisvooluühenduse harmoonikute karakteristikuid. Töö raames teostati praktilised mõõtmised Harku alajaamas perioodil 11.03.2019-18.03.2019 kasutades klass A kvaliteedimõõteseadet. Mõõtmiste perioodiks koostati katsekava, mis võimaldaks harmoonikute karakteristikuid hinnata erinevates olukordades. Vaadeldi lähemalt Estlink 1 võimsusvoo suuna, koormatuse ja sagedusejuhtimise funktsiooni mõju harmoonikute karakteristikutele.

Töö esimene peatükk tutvustab elektrikvaliteeti, täpsemalt harmoonikuid. Kirjeldatakse harmoonikute olemust, nende tekkepõhjuseid ning mõju elektrivõrgu seadmetele. Samuti antakse ülevaade Eestis kasutusel olevatest standarditest, millest harmoonikute mõju mõõtmisel ja hindamisel tuleb lähtuda.

Teises peatükis annab autor ülevaate mõõtmiste meetodikast ja Estlink 1 ehitusest. Kirjeldatakse praktiliste mõõtmiste läbiviimist, katsekava koostamist ja mõõteahelat. Samuti kirjeldatakse töös kasutatud elektrikvaliteedi mõõteseadet, mida mõõtetulemuste salvestamiseks kasutati. Lisaks antakse ülevaade Estlink 1 alalisvoolu ülekandesüsteemi tehnilisest lahendusest ja põhilistest näitajatest.

Kolmas peatükk sisaldab mõõtmistulemuste analüüsi. Antakse ülevaade mõõteandmete analüüsimise meetodikast ning andmete esitamise põhimõtetest. Põhjendatakse analüüsi läbiviimiseks kasutatud meetodite kasutamist ning kirjeldatakse antud meetodikate läbiviimise põhimõtteid. Analüüsitakse pinget ja voolu harmoonikute karakteristikute mõõtmistulemusi erinevatel võimsustel ja võimsusvoo suundadel. Lisaks uuritakse sageduse reguleerimise funktsiooni mõju pinget- ja vooluharmoonikute karakteristikutele. Saadud tulemusi võrreldakse Elering AS-i poolt kehtestatud piirväärtustega.

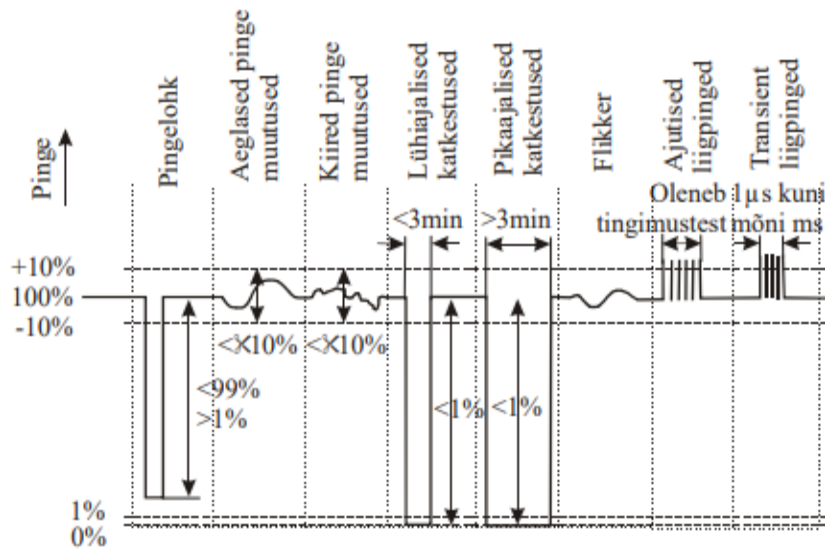
Lõputöös kasutatavad mõõtmistulemused on teostatud Elering AS seiresüsteemis kasutades EVS-EN-61000-4-30 [1] põhjal A-klassi nõuetele vastavat pingekvaliteedi analüsaatorit, milleks on Informa PMD-A. Mõõtmistulemuste analüüsi teostamiseks on kasutatud arvutusprogrammi MatLab ning Microsoft Excel tarkvarasid.

# 1. ELEKTRI KVALITEET - HARMOONIKUD

Elektri kvaliteet on näitaja, millele on hakatud viimastel aastatel pöörama üha rohkem tähelepanu. Jaotusvõrkudes on elektrikvaliteedi jälgimine olnud oluline juba aastakümneid samas kui ülekandevõrkudes on sellele suuremat tähelepanu hakatud pöörama lähiajal. Euroopas on elektrisüsteeme, milles on elektrikvaliteet ja selle jälgimise/analüüsimise meetodid põhjalikult välja arendatud (nt Iirimaa [2]) aga suuremas osas ei ole elektrisüsteemides olnud see prioriteetne ja on jäänud suhteliselt tagasihoidlikuks. Tulevikus on näha aga ülekandesüsteemides väljakutseid elektrikvaliteedi jälgimiseks, sest üha enam lisandub elektrisüsteemidesse suurel määral jõuelektroonika seadmeid (tuuleparkide, alalisvooluühenduste jms näol). Jõuelektroonika seadmed on tundlikud elektrikvaliteedile ja harmoonikutele, samas põhjustavad need seadmed ise elektrikvaliteedi halvenemist, eriti harmoonikute emissiooniga. Sellest tulenevalt on, nagu eelnevalt mainitud, hakatud elektrikvaliteedile pöörama ühe suuremat tähelepanu ülekandevõrkudes hakates uurima elektrikvaliteedi, eriti harmoonikute, mõju võrgu teistele osadele.

Elektri kvaliteedi all mõistetakse elektritarbijate elektrivarustuskindlust ja talitusparameetrite vastavust nimisuurustele. Elektri kvaliteet mõjutab majanduslikult elektrisüsteemi, võrguettevõtete seadmete ja kõigi elektritarbijate tööd. Erinevatest põhjustest tekkinud toitekatkestused (planeerimata- avariilise iseloomuga, tormid jne) ja pinge kõikumised võivad vähendada toodangut ja põhjustada praaki, mis omakorda võivad tekitada suuri rahalisi kahjusid. Tarbijate poolt genereeritud häiringute eemaldamine nõuab võrguettevõtelt investeringuid ja tõstab käidukuluseid. Tänapäeval on tööstuses tõusnud elektroonika ja automaatika osakaal- märkimisväärselt on suurenenud infotehnoloogia tähtsus. Vaieldamatult kõik elektroonikaseadmed on suuremal või väiksemal määral tundlikud toitepinge häirumisele, kuid on ka ise häiringute allikaks. Elektri kvaliteet mõjutab suurel määral seadmete töökindlust, eluiga, kasutegurit, stabiilsust, vaeleoperatsioonide teket, rikkeid jm. Elektrienergia tarnijale on pikkade katkestuste tõttu andmata ja saamata jäänud elektrienergia maksumus suur kulu ning kvaliteedinõuetele mittevastav toitepinge võib kahjustada tarbijate erinevaid seadmeid ning põhjustada liigseid toitepinge kadusid [3], [4].

Elektri kvaliteedi hindamisel on tähtis võrrelda reaalselt pinget ideaalse pingega. Ideaalne toitepinge peab vastama normdokumentides piiritletud väärtustele. Eestis käsitleb elektri kvaliteedistandardeid Eesti Standardikeskuse standard EVS-EN 50610:2010 [5]. Elektrivõrgu kvaliteeti mõjutavad mitmesugused häired (rikked, lülitused, looduslikud nähtused), mis tekitavad ideaalse toitepinge parameetrite kõrvalekaldumisi. Olulisemad elektri kvaliteedi näitajad ja nende iseloomulikud omadused on välja toodud joonisel 1.1 [3].



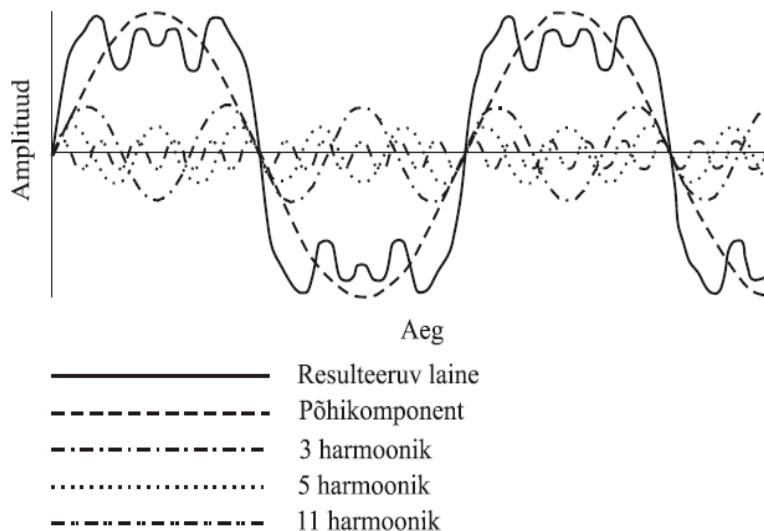
**Joonis 1.1. Elektri kvaliteedi näitajad [3]**

Harmonikud on elektri kvaliteedi nähtus, mis tekitab ülekandevõrkudes erinevaid häireid ning jõuelektroonika kasutamises ülekuumenemisi. Seoses jõuelektroonika suureneva kasutamisega tulevikus kasvab harmonikute analüüsimise tähtsus aina olulisemaks. Järgnevalt kirjeldatakse põhjalikumalt harmonikuid. Kirjeldatakse nende tekke põhjuseid, olemust ja mõju seadmetele. Samuti antakse ülevaade Eestis kasutusel olevatest standarditest, millest harmonikute mõju hindamisel tuleb lähtuda.

## 1.1 Harmonikute olemus

Harmonikud on põhjustatud peamiselt harmoonilistest moonutustest, mis tuleneb elektrisüsteemi mittelineaarsetest koormustest. Mittelineaarne koormus tähendab olukorda, kus vool ei ole proportsioonis rakendatud pingega, mille tulemusel esineb moonutatud kujuga perioodilist lainet. Illustreeriv näide harmonikuid sisaldavast lainekujust on toodud joonisel 1.5.

Elektritarbijate seadmeteks, mis genereerivad harmonikuid on mitmesugused mittelineaarsed koormused: alaldid, inverterid, juhitavad ajamid, televiisorid, printeri ja arvutid. Ülekandevõrkudes on suurimad harmonikute põhjustajad trafod, alaldid ja konverterjaamad, kus toimub alalisvoolu muundamine vahelduvvooluks. Selle tõttu esineb ülekandevõrkudes häireid nagu pinge lainekuju moonutus, trafode ja jõuseadmete ülekuumenemist, probleeme sideühenduses ning mikroprotsessorites ja konvertite välja lülitusi [6].



**Joonis 1.2. Harmoonikuid sisaldav lainekuju [3]**

Harmoonikuid saab kirjeldada Fourier'i teisenduse abil, mille perioodilist funktsioon ( $U_t$ ) on võimalik kujutada reana, mis koosneb erineva sagedusega siinuseliselt muutuvatest komponentidest [7].

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

kus

$U_h$  = komponendi iseloomulik amplituud

$h\omega_0$  = komponendi sagedus

$\Psi_h$  = faasinurk

Fourier'i rida võib esitada ka kui siinuseliste lainekujude rida, mis koosneb ainult paaritute harmoonikutest, kui positiivne ja negatiivne poolperiood on sama kujuga. Joonisel 1.6 on Fourieri rea moonutatud lainekujud.

Harmoonikute sisaldust võrgupingetes võib piiritleda nii üksikute kui ka kõiki harmoonikuid kokkuvõtva näitaja väärtusena. Sellisteks näitajateks on harmoonikutegur (THD), nõudlusmoonutustegur (TDD) ja harmoonikute variatsiooni tegur (HVF). Antud tegurid saab arvutada nii voolule kui pingele [5].

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2}}{U_1} \cdot 100\% \quad (1.2)$$

$$TDD_I = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n I_i^2}}{I_{max}} \cdot 100\% \quad (1.3)$$

$$HVF_U = \sqrt{\sum_{h=2}^i \frac{U_h^2}{U_1^2}} \cdot 100\% \quad (1.4)$$

kus

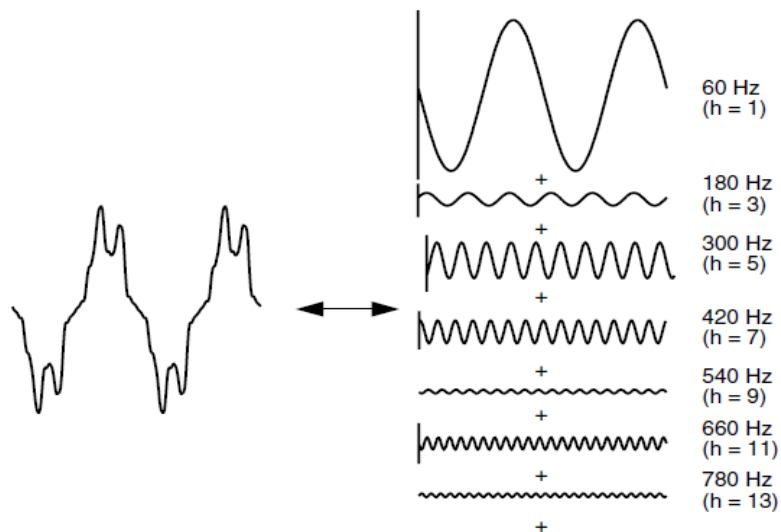
$U_1$  – pinge põhiharmoniku väärtus, V

$U_i$  – i-nda pingeharmoniku väärtus, V

$I_{max}$  – voolu maksimaalne väärtus, A

$I_i$  – i-nda voolu harmooniku väärtus, A

$i$  – harmooniku järk



**Joonis 1.3. Fourieri moonutatud lainekujud [7]**

Praktikas vaadeldakse harmoonikuid, kuni 50-nda järguni [5]. Üldreeglina kasutatakse harmoonikute taseme hindamiseks ühe nädalase mõõtevahemiku 10-minutilisi pinge efektiivväärtuse keskvaartusi. Saadud tulemused peavad 99% juhtumil olema väiksemad, kui tabelis 1.1 toodud väärtused. Pinge harmooniline tegur (THD) ei tohi ületada 3% kuni 40-nda järguni. Tabelis 1.1 on toodud kõrgemate pingeharmonikute (kuni 25-ndat järku) lubatavad väärtused nimipinge suhtes 110 kV võrgus, kus antud piirmäärad on kehtivad ka 330 kV võrgus [8].



**Tabel 1.1. Kõrgemate pingeharmonikute lubatavad väärtused [8]**

Paaritud harmoonikud				Paarisharmonikud	
3-ga jagumatud		3-ga jaguvad			
Järk $h$	Suhteline pinge $u_h, \%$	Järk $h$	Suhteline pinge $u_h, \%$	Järk $h$	Suhteline pinge $u_h, \%$
5	3	3	3	2	1
7	2,5	9	1,5	4	0,7
11	1,7	15	0,5	6	0,5
13	1,7	21	0,5	>6	0,3
17	1,2	>21	0,3		
19	1,2				
23	0,8				
25	0,8				
>25	0,5				

Vooluharmonikute puhul on välja toodud maksimaalsed lubatud voolu emissiooni väärtused (tabel 1.2), mida tarbija võib võrku anda, kus harmoonikute vool ehk psfomeetriline faasivool ( $I_p$ ) arvutatakse valemiga 1.5. Psfomeetriline faasivool on arvatud keskmise aktiivvõimsuse, nimipinge ning võimsusteguri 1 juures liitumispunktis [8].

$$I_p = \frac{1}{1000} \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^{h=N} (P_h \cdot I_h)^2} \quad (1.5)$$

kus

$I_h$  -  $h$  harmooniku faasivool

$h$  - harmooniku number

$N$  - harmoonikute koguarv

$P_h$  - harmooniku  $h$  sageduse kaal

**Tabel 1.2. Maksimaalsed lubatud voolu emissiooni väärtused tarbijatele [8]**

% tarbija nimivoolust	
Voolu maksimaalne moonutus	6 %
Faasivoolu psfomeetriline väärtus	5 A
Voolu vastujärgnevuskomponent	20 %

Vooluharmonikute puhul tuleb jälgida lubatavaid piiremissioonide väärtusi püsiolukorras. Tabelis 1.3 on toodud paaritute vooluharmonikute lubatavad piiremissioonid, kus tähelepanu tuleb pöörata sellele, et samas sagedusvahemikus paaris vooluharmonikute piiremissioonid ei tohi ületada 25% antud tabelis esitatud väärtusi [8].

**Tabel 1.3. Paaritute vooluharmonikute lubatavad piiremissioonid [8]**

Harmoniku järk	Vooluharmonikute piiremissioonid voolutugevuse suhtes %
$h < 11$	4,0
$11 \leq h < 17$	2,0
$17 \leq h < 23$	1,5
$23 \leq h < 35$	0,6
$35 \leq h < 50$	0,5
Harmonikute summaarne moonutustegur (TDD)	5

Oluline on tähelepanu pöörata kolmandatele harmoonikutele, sest nulljärgnevuse tõttu erineb nende käitumine võrgus teiste harmoonikutega võrreldes. Kolmandat järku harmoonikud on olulised maandatud tähega süsteemide korral, kus vool võib liikuda neutraalis, mis võib põhjustada neutraali ülekoormust ja seeläbi seadmete mitteotstarbekohast töötamist [3]. Vastavalt standardile IEC 61000-4-30:2015 [1] peavad kvaliteedi täppismõõteriistad harmoonikute ja vaeharmonikute mõõtmisel lähtuma klass A mõõteseadmete nõuetest.

## 1.2 Harmoonikute mõju

Harmonikud avaldavad mõju erinevatele seadmetele nagu trafod, kondensaatorpatareid, releed, elektrimootorid ning elektroonikaseadmed. Peamised nähtused, mis seadmetel avalduvad on nende ebakorrapärane töö, ülekuumenemine, suurenenud kaod ja enneaegne vananemine.

Harmonikute mõju piiramiseks on kehtestatud kindlad harmoonikute piirväärtused ehk tasemed elektrivõrgus, mis võimaldavad hoida harmoonikute osakaalu elektrivõrkudes kontrolli all. Toitesüsteemi sisestatavate harmooniliste voolude piiramist käsitleb standard IEC 61000-3-2:2019 [9], mis määrab seadmetele sisendvoolu piirid harmoonikute suhtes. Antud standard on kohaldatud elektriliste ja elektrooniliste seadmete suhtes, mille sisendvool on faasi kohta kuni 16 A (kaasa arvatud) ja mis on ette nähtud ühendamiseks üldkasutatavate madalpinge jaotussüsteemidega [9].

Mittelineaarsetest koormustest põhjustatud vooluharmonikud avaldavad mõju mitmetele elektrivõrgu komponentidele, kus näiteks trafodes, kondensaatorpatareides, ja mootorites põhjustavad kõrgemad harmoonikud ülekuumenemist, lisakadusid ja ülekoormust. Samuti võivad kodensaatorpatareid moodustada koos toiteallika induktiivsusega paralleelresonantsahela, kus resonantsi korral harmoonikud võimenduvad ning nende põhjustatud pinged ületavad nimipingeid, mille tulemuseks on rikked kondensaatorpatareis [10].

Tabelis 1.4 on toodud harmoonikute mõju eri seadmetele ning nende soovituslikke voolu, pinget ja harmoonikute sisalduse integraalnäitajate (kõiki harmoonikuid kokku võttev väärtus) piire [3].

**Tabel 1.4. Kõrgemate harmoonikute toime eri seadmetele [3]**

Seadmed	Mõju	Kvaliteedinäitajate piirid
Kondensaatorpatareid	kuumenemine; vananemine; resonants.	$I < 1,3 \cdot I_n$ $U < 1,1 \cdot U_n$ $THD_I < 83\%$
Mootorid	kaod ja kuumenemine; võimsuse langus; pulseeriv pöördemoment; müra.	$HVF \leq 2\%$
Trafod	kaod ja kuumenemine; mehaaniline vibratsioon, müra; eluea lühenemine.	
Võimsuslülitid	soovimatu väljalülitumine	$\frac{U_h}{U_1} \cdot 100\% \leq 12\%^6$
Kaablid	aktiivkadude suurenemine.	$THD_U \leq 10\%$ $\frac{U_h}{U_1} \cdot 100\% \leq 7\%$
Arvutid	talitluse probleemid.	$\frac{U_h}{U_1} \cdot 100\% \leq 5\%$
Jõuelektronikaseadmed	kommunikatsiooni ja sünkroniseerimisega seotud probleemid.	

Kõrgemate harmoonikute puhul tekivad täiendavad kaod trafodes, mille tulemusel trafod kuumenevad üle ning nende eluiga lüheneb. Pöörlevate masinate korral tekitavad harmoonikud vases- ja rauas

kadusid, mille tulemusel masinad kuumenevad, kus põhikomponendi magnetvälja ja harmoonikute vastastikusest toimest tingituna tekib masina võllil pulseeriv pöördemoment [3].

### 1.3 Elektri kvaliteedi normdokumendid

Harmoonikute mõju jälgimiseks ja mõõtmiseks on oluline teada normdokumentides käsitletavaid norme ja piiranguid. Antud alapeatükis annab töö autor lühiülevaate kolmest standardist: IEC 61000-4-30:2015 (käsitleb elektrienergia kvaliteedi mõõtmist), EVS-EN 50160:2010 (määratleb avalike elektrivõrkude pinge tunnussuurused) ja IEC/TR 61000-3-6:2008 (määratleb harmoonikute väärtused kesk-, kõrge- ja ülikõrgepinge võrkudes). Elektrienergia kvaliteedi standardeid on arvukalt, kuid antud lõputöö raames on autor keskendunud eelpool nimetatud standarditele, milledest tuleb lähtuda harmoonikute mõju hindamisel.

#### IEC 61000-4-30:2015

Standard IEC 61000-4-30:2015 „Katse- ja mõõtetehnika. Elektrienergia kvaliteedi mõõtmine“ [1] määratleb põhilised mõõteseadmete täpsusklassid, pingekvaliteedi mõisted, andmete agregeerimisalgoritmid, mõõtmiste läbiviimise tingimused, mõõteandmete markeerimise jpm. Antud standard ei sea piirväärtusi kvaliteedinäitajatele. Standard defineerib mõõtemetodid toitepinge sagedusele ja väärtusele, värelusele, pingelohkudele ja – muhkudele, toitekatkestustele, asümmeetriale, harmoonikutele ja vaeharmonikutele, toitepingele pealdate signaalipingetele ja kiirete pingemuutustele [1].

- Klass A (*Advanced*) - kõrge mõõtetäpsusega seade, mis on mõeldud ka ametlikeks täppismõõtmisteks. Klass A seadme alusmõõtevahemikuks (basic measurement time interval) on pinge harmooniku 10 tsüklile vastav intervall 50 Hz, 12 tsüklile vastav intervall aga 60 Hz. 10/12-tsükli mõõtmisi sünkroniseeritakse ajasignaali järgi iga 10 minuti möödudes. 10/12 tsükli intervallid agregeeritakse järgmisteks vahemikeks: 150/180 tsükli intervallid (viisteist järjestikust 10/12 tsükli mõõtmist, 10-minutilised intervallid ning 2-tunnised intervallid).
- Klass S (*Survey*) - seade mis kogub statistilisi andmeid, mille mõõtetäpsus ja nõutavate väljund parameetrite arv on madalaim. Klass S mõõteseadmed kasutavad samasid mõõtevahemikke, mida kasutavad klass A seadmed, kuid erinevus on sünkroniseerimismeetodites, kus klass A seadmed kasutavad kattuvaid mõõtevahemikke, kuid klass S mittekatuvaid.
- Klass B (*Basic*) - vananenud seadmete klass, mida antud redaktsioonis enam ei käsitleta.

## **EVS-EN 50160:2010**

Standard „EVS-EN 50160:2010 Avalike elektrivõrkude pingete tunnussuurused“ [5] määratleb, iseloomustab ja kirjeldab madal-, kesk- ja kõrgepinge vahelduvvoolu elektrivõrkude pingete põhilisi tunnussuurusi elektrivõrgu kasutaja liitumispunktis normaaltalitusel. Standard kirjeldab pingete tunnussuuruste piirväärtusi või prognoositavaid väärtusi mis tahes Euroopa avalike elektrivõrkude liitumispunktides, aga mitte üksiku elektrivõrgu kasutaja tavalist keskmist olukorda.

Standard eristab kolme pingete klassi: madalpinge (*low voltage, LV*) nimiefektiivväärtus kuni 1 kV, keskpinge (*medium voltage, MV*) nimiefektiivväärtus 1-36 kV, kõrgepinge (*high voltage, HV*) nimiefektiivväärtus 36-150 kV. Ülikõrgepinge (*extra high voltage, EHV*) puhul kasutatakse samu kriteeriume, mis kõrgepinge puhul, kuna ülikõrgepinge puhul standard puudub [11].

Standardis eristatakse kahte pingete tunnussuurusega seotud nähtuste rühma: pidevad nähtused ja pingete sündmused. Pingete nähtused on sageduse muutused, toitepinge aeglased ja kiired muutused, värelus, toitepinge asümmeetria, harmoonikute ja vaheharmoonikute pingete ning võrgusignaalpingete. Pingete sündmused on toitepinge katkestused, pingelohud ja -muhud ja transientliigpinged [5].

## **IEC/TR 61000-3-6:2008**

Standard IEC/TR 61000-3-6:2008 „Harmoonikute määramine kesk-, kõrge- ja ülikõrgepingevõrkudes (s.o kõigis võrkudes nimipingega üle 1 kV)“ [12] annab võrguettevõtte plaaniliste piirväärtuste seadmiseks soovituslikud harmoonikute väärtused. Plaanilisteks piirväärtusteks nimetatakse ettevõtte poolt kvaliteedinäitajatele seatavaid piirnorme. Piirnormide hindamiskriteeriumiks on kaks tingimust:

- 99% 3-sekundilisest mõõtmistest vähemalt 1 nädala jooksul peavad jääma alla harmoonikute lühiaegsusteguriga läbikorrutatud piirväärtuste;
- 95% 10-minutilistest mõõtmistest vähemalt 1 nädala jooksul peavad jääma alla seatud piirväärtuste.

Iga üksiku liituja lubatud emissioonide hindamiseks on välja toodud järgmised astmed [12]:

- Lihtsustatud hindamine, kus liituja paigaldises on väikese emissioonitasemega seadmeid, mis vastavad rahvusvahelistele normidele emissioonide valdkonnas või liituja lepinguline koguvõimsus on väike võrreldes liitumispunkti lühisvõimsusega (alla 0,2%). Kui eelnevalt

loetletud nõuded on täidetud, võib lugeda paigaldist nõuetele vastavaks ning piiremissioone ette mitte anda.

- Emissioonide piirväärtuste määramine vastavalt elektrivõrgu omadustele. Kui eelnevas punktis loetletud nõudeid ei täideta, määratakse liitujale individuaalsed piiremissioonide väärtused, lähtudes plaanilistest piirväärtustest. Arvesse tuleb siinkohal võtta nii elektrivõrgu lühisvõimsust liitumispunktis kui ka emissioonide mõjuga madalamatele pingeastmetele (kõrgematelt pingeastmetelt levivate häiringute liitumisel madalamate pingeastmete häiringutega ei tohi ületada viimastele seotud piirväärtusi).
- Erandite seadmine. Kui plaaniliste piirväärtuste tagamine ei ole võimalik, on võimalik saavutada võrguettevõtte ja liituja vahelisi kokkuleppeid, milles määratakse erandlikud tingimused ning võetakse arvesse plaanilised tegurid tulevikus.

Standard IEC/TR 61000-3-6:2008 [12] annab põhjaliku soovitusliku meetodika piiremissioonide hindamismeetoditele kõigi lubatud emissioonide hindamisastmete kohta ning on soovituslikuks aluseks individuaalsete piiremissiooni lepingute koostamiseks võrkudes nimipingetega üle 1 kV.

## 2. ESTLINK 1 HARMOONIKUTE KARAKTERISTIKUTE MÕÕTMISTE

### METOODIKA

Käesolevas peatükis kirjeldatakse Estlink 1 harmoonikute karakteristikute mõõtmiste metoodikat. Tutvustatakse lähemalt Estlink 1 alalisvooluühendust, selle ülekandesüsteemi ja konverterjaama ning kasutatud elektrikvaliteedi mõõteseadmeid ja –skeemi.

### 2.1 EstLink 1 alalisvooluühendus

Estlink 1 on alalisvooluühendus Eesti ja Soome vahel, mis valmis 2006 aastal. Tegemist on esimese ühendusliiniga, mis rajati Balti riikide ja Põhjamaade elektrivõrkude vahel. Kahe riigi ühendus toimub merekaabli kaudu, kus Eesti poolne ots asub Harku 330 kV alajaamas ning Soomes Espoo 400 kV alajaamas. Estlink 1 annab kauplemiss võimaluse Balti riikide ning Põhjamaade vahel ning suurendab oluliselt varustuskindlust Läänemere piirkonnas [13].



**Joonis 2.1. Estlink 1 asukohaskeem [14]**

#### 2.1.1 Estlink 1 ülekandetehnoloogia

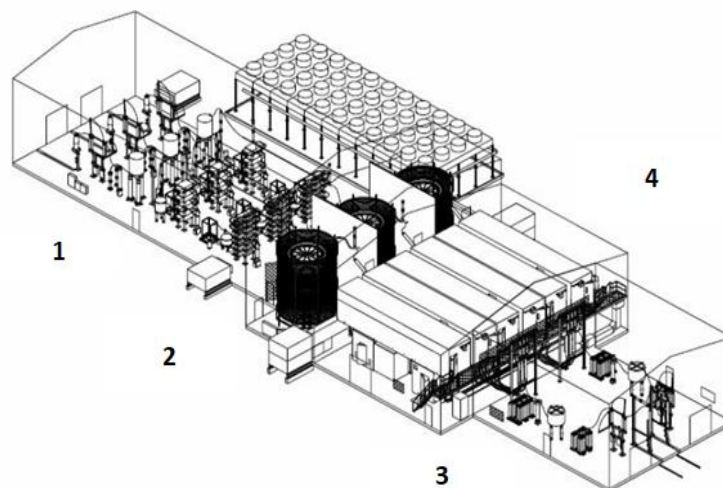
Estlink 1 puhul kasutatakse alalisvooluühendust, mille kogupikkus on 210 kilomeetrit, kus 148 km on sellest merekaablit ning 62 km maakaablit. Antud ühenduse puhul on tegemist alalisvoolukaablitega, mis võimaldavad elektriülekannet mõlemas suunas. Estlink 1 ülekandevõimsuseks on 350 MW alalisvoolu pingeks +/- 150 kV [15]. Ülekandesüsteemiks kasutatakse HVDC (*High Voltage Direct Current*) tehnoloogiat, mis sobib kasutamiseks erinevate sünkroonalaade ühendamiseks ka pikkade ülekandeliinide puhul. HVDC tehnoloogia puhul kasutatakse kõrgepinge alalisvoolu muundurtehnoloogiat, kus kesksel kohal on kaks konverterjaama, kus üks konverterjaamadest on

ühendatud Eestis paikneva Harku 330 kV alajaamaga ning teine Soomes asuva Espoo 400 kV alajaamaga [13].

### 2.1.2 Estlink 1 konverterjaam

Estlink 1 konverterjaamas on kasutusel HVDC VSC (*Voltage Source Converter*) tüüpi jaam. VSC tüüpi jaam on pingemuunduritel põhinev muundusalajaam. VSC-muundur võimaldab aktiivvõimsust juhtida mõlemas suunas, kuid tuleb tähele panna, et korraga juhitakse aktiivvõimsust ainult ühest otsast. Samuti on võimalik aktiivvõimsusest sõltumata tarbida ja genereerida reaktiivvõimsust. VSC tüüpi konverterjaamu on võimalik kasutada elektrisüsteemi juhtimiseks, avariitaolise korral on võimalik seda tüüpi jaamadega kaasa aidata elektrisüsteemi stabiilsuse säilimisele. Samuti võimaldavad kaheperioodilised elemendid pulsilaiusmodulatsiooni, mis tagab madalama harmoonikute taseme nii alalisvoolu kui vahelduvvoolu poolel [16].

HVDC ühenduste puhul on kasutusel ka LCC (*Line Commutate Converter*) tüüpi jaamad, mida kasutatakse Eestis ka Estlink 2 [17] ühenduse puhul. Võrreldes VSC muundurjaamaga, kus kasutatakse transistoril põhinevat tehnoloogiat, kasutatakse LCC puhul türistoridel põhinevat süsteemi. LCC süsteemi puhul on harmoonikute vähendamiseks nõutavad vahelduvvoolu ja alalisvoolu filtrid, samas VSC süsteemil seda nõutud ei ole [18].



**Joonis 2.2. Espoo konverterjaam (1 – vahelduvvoolu filtrid, 2 – muundurreaktorid, 3 – alalisvoolu reaktorid, 4 – isoleeritud bipolaarsete transistorite üksuste korpused) [13]**

Estlink 1 kasutab tootegrupi ABB HVDC Light VSC- tüüpi 2 konverterjaama. Konverterjaamad on ühendatud elektrivõrku 380 MVA kolmefaasilise jõutrafo kaudu. Konverterjaamad on võimelised tarbima või genereerima kuni 125 Mvar reaktiivvõimsust sõltumata aktiivvõimsuse ülekandest.



Konverterijaam koosneb erinevatest seadmetest, mis on paigutatud hoone sisse. Üks konverterijaam sisaldab endas vahelduvvoolu filtreid, alalisvoolu kondensaatorit, reaktorit, muundurklappe ning samuti juhtimissüsteemi seadmete reguleerimiseks [13]. Konverterijaama ehituse illustreerimiseks on toodud Joonisel 2.2 Soome pool asuv Espoo konverterijaam.

HVDC Light konverter põhineb kuue-pulsilisel pingemuunduril, millel on pooljuht ventiilid, mis koosnevad järjestikku ühendatud isoleeritud bipolaarsetest transistorite IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) üksustest. Iga IGBT üksus sisaldab 24 isoleeritud bipolaarset transistorit ja 12 diodkiipi, mis on ühendatud paralleelselt. Konverterijaama alalisvoolu poolele (*DC side*) sektsiooni on paigaldatud kondensaatoripank, mis tagab energiasalvestuse ja madala induktiivsusega väljalülitusvoolu tee. Kondensaatoripank on ühendatud negatiivse ja positiivse alalisvoolu poolega, mis on keskelt maandatud, et tagada konverteri maandus [13].

Estlink 1 konverteri puhul on tegemist kaheastmelise süsteemiga, kus lülitades transistoreid sisse- välja muudetakse alalisvoolu pinget vahemikus +150 kV kuni -150 kV. Estlink 1 kaheastmeline süsteem kasutab pulsilause modulatsiooni (PWM), kus iga ventiili lülitatakse 23 korda 50 Hz tsükli kohta. Konverteri vahelduvvoolu (*AC side*) poolel on ühendatud omavahel reas reaktorid. Konverteri reaktoriga on võimalik filtreerida PWM konverteri pinget, et anda soovitud sageduslik pinget ja soovitud takistus konverteri pinget ja filtreeritud vahelduvvoolu latipinget (195 kV) vahel. Vahelduvvoolu ja alalisvoolu vaheline võimsusvool määrab põhisageduspinget reaktorisse. Konverteri vahelduvvoolu amplituud ja faasipinget on määratud võrgupinget suurusega. Aktiiv- ja reaktiivvõimsuse suurust on võimalik reguleerida üksteistest sõltumata kasutades PWM süsteemi, mis võimaldab muuta konverteri pinget ja faasinurka. Konverteri reaktori (*Converter reactors*) jahutus toimub läbi õhkjahutuse, kus iga faasi jaoks on eraldi jahutus. Reaktoreid ümbritseb magnetkiirguste eest kaitsev kiht, mis kaitseb kiirguse välja levikut reaktoritest. Tänu kaitsvale kihile on võimalik reaktorid paigutada üksteise lähedale, mis võimaldab ruumi kokku hoida [13].

Konverterijaamal on kaks vahelduvvoolu filtrit, mis filtreerivad konverteri lülitamisel tekkinud harmoonikuid. Ühte vahelduvvoolu filtrit kasutatakse ainult siis, kui toimub konverteri käivitamine, et mitte ületada reaktiivvõimsuse maksimumi võrgus. Vahelduvvoolu filtrid on häälestatud 32 ja 60 harmoonikutele. Kuuega jaguvad harmoonikud tühistatakse optimeeritud pulsilause modulatsiooni (OPWM) lülitusmeetodiga. Konverteri alalisvoolu poolel asuvad alalisvoolukondensaatorid, mis vähendavad reaktorites ja klapikambrites tekkivaid pulseerivaid võnkeid [13].

Konverterijaama HVDC Light süsteemi on võimalik käivitada ka pärast täielikku kustumist (*black start*), kuna konverteril on võime genereerida pinget, mida saab muuta väga kiiresti amplituudi ja faasi suhtes.

Selline võimalus on rakendatud ka Estlink 1 Harku 330 kV alajaamas, kus trafo on varustatud erilise lisajõumähisega konverterjaama omatoiteks [13].

### 2.1.3 Konverterjaama PQ näitajad

HVDC *Light* on alalisvoolu ülekandesüsteemi tehnoloogia, missobib nii alalisvoolu edastamiseks kui ka reaktiivenergia tootmiseks ja tarbimiseks. Üks HVDC üksus on võimeline tootma ja tarbima, kuni 200 Mvar aktiiv- ja reaktiivvõimsust. Aktiiv- ja reaktiivvõimsust on võimalik juhtida üksteisest sõltumata, kus muudetakse konverteri väljundpinge põhikomponendi amplituudi ja faasinurka [19].

Konverteri aktiivvõimsust genereeritakse vastavalt alalisvoolu süsteemis seatud piirväärtustele. Aktiivvõimsust on võimalik muuta astmeliselt sisestades sättena uue väärtuse soovitud kiirusega. Kahe konverterjaama puhul on aktiivvõimsust võimalik üle kande vaid ühest jaamast korraga, kus teine konverterjaam peab kontrollima alalisvoolupinget. Aktiivvõimsuse ja alalispinge omavaheline reguleerimine toimub juhtimissüsteemide abil. HVDC *Light* konverterjaamad võivad üksteisest sõltumata genereerida või tarbida reaktiivvõimsust. Reaktiivvõimsust kantakse üle vastavalt piiritletud vahelduvvoolu suurusele. Reaktiivvõimsuse ülekandesuurust kontrollitakse võrgus trafo poole peal [20].

Aktiivvõimsus (P) ja reaktiivvõimsus (Q) leitakse konverterjaamas järgmiste valemitega:

$$P = \frac{U_C \cdot U_V \cdot \sin \delta}{\omega L} \quad (2.1)$$

$$Q = \frac{U_C \cdot (U_C - U_V) \cdot \cos \delta}{\omega L} \quad (2.2)$$

kus

$U_C$  – konverteri latipinge

$U_V$  – klapi latipige

$\delta$  – faasinurk konverteri pingete  $U_V$  ja  $U_C$  vahel

$L$  – konverteri reaktori induktiivsus

Reaktiivvõimsuse väärtust kontrollitakse konverteri latipingepinge  $U_C$  muutmisega, kus klapi latipinge  $U_V$  kontrollib reaktiivvõimsuse suurust trafo ja konverterjaama vahel ning trafo ja vahelduvvoolu süsteemi vahel [20].

Konverterjaama reaktiivvõimsuse ülekanne on määratletud järgnevalt [20]:

- kui  $U_C > U_V$ , siis konverter tarbib reaktiivvõimsust;
- kui  $U_V > U_C$ , siis konverter toodab reaktiivvõimsust.

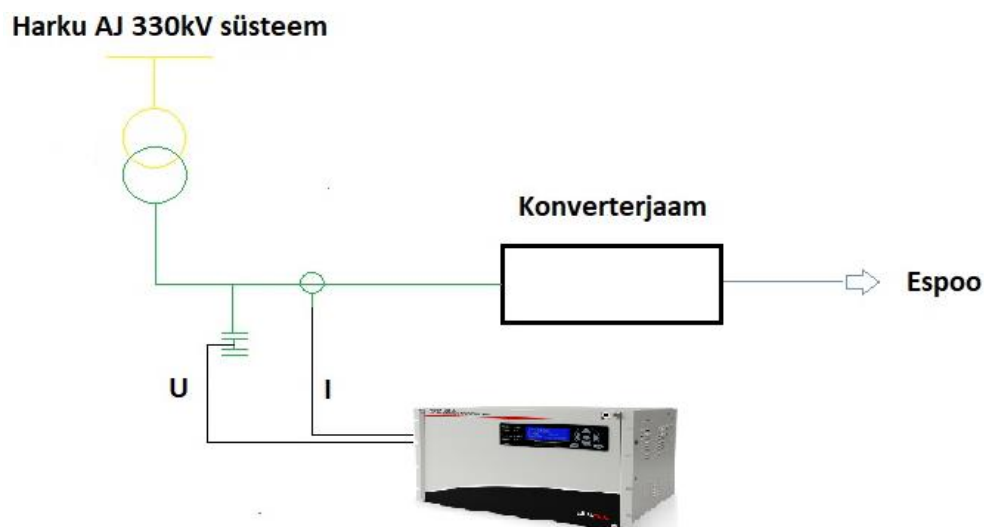
## 2.2 Mõõtmiste metoodika

Elektrikvaliteedi mõõtmiseks kasutatakse spetsiaalseid kvaliteedi mõõtesüsteeme. Mõõtesüsteemide esmatähtsaks osaks on kvaliteedimõõturid, mida võib liigitada järgnevalt:

- Statsionaarsed mõõteseadmed (püsivalt kohapeale paigaldatud seadmed), mis mõõdavad kvaliteediandmeid, teostavad andmete esmatöötlust ning edastamist. Kasutatakse pikemate mõõtmisvahemike ja suuremate mõõtesüsteemide puhul.
- Teisaldatavad mõõteseadmed (mobiilsed seadmed, võimalus teostada mõõtmisi asukohas, kus seda vaja) hõlmavad endas nii mõõteaparatuuri, visualiseerimise vahendeid kui ka info töötlust.

Võrguettevõtted kasutavad üldjuhul statsionaarseid kvaliteedi mõõtesüsteeme, mis täpsema analüüsi jaoks ei anna täielikku ülevaadet.

Estlink 1 alalisvooluühenduse harmoonikute karakteristikute mõõtmiste põhimõtteskeem toodud joonisel 2.3.



**Joonis 2.3. Katseskeem harmoonikute mõõtmiseks**

Lõputöö tarbeks teostatud mõõtmiseks kasutati Tallinna Tehnikaülikooli kvaliteedi mõõteseadet Qalitrol Informa PMD-A (joonis 2.4). Tegemist on teisaldatava mõõteseadmega, mis salvestab

mõõteandmeid vastavalt standardile IEC 61000-4-30 [1] A-klassi piiridest lähtuvalt. Seadme analoog kanalid on saadaval vahelduv- või alalisvooluna, mis tagab laiemat kasutusvaldkonna elektrikvaliteedi mõõtmisel. Qualitrol on võimalik salvestama panna nii voolu kui ka pinget kvaliteediparameetreid (võimsused, efektiivväärtused, harmoonikud, pingemuutused, värelus jm) [21].

Antud lõputöö raames paigutati Qualitrol Harku alajaama Estlink 1 lahtrisse, kus vastavalt peatükis 2.1 toodud katsekavale mõõdeti pinget ja voolu harmoonikuid.



**Joonis 2.4. Qualitrol Informa PMD-A seade [22]**

### **2.2.1 Mõõteahel**

Suurte voolude ja pingete mõõtmisteks kasutatakse kõrgepinge puhul mõõtetrafosid. Mõõtetrafod jagunevad pinget- ja voolutrafodeks, kus omakorda rakenduseesmärkide poolest jagunevad antud trafod mõõte- ja kaitsevoolutrafodeks [3]. Eestis on enim kasutusel induktiivsed pinget- ja voolutrafod ning mahtvuslikud pingetrafod. Vähem on Eestis levinud mahtvuslikud pingetrafodid ning optilised pinget- ja voolumõõtemuundurid [23].

Mõõtetrafode eesmärk on vähendada elektrienergia pinget ja voolu standardites määratletud mitteohtliku tasemeni. Mõõtetrafosid vajatakse elektrisüsteemides pinget, voolu, võimsuse, energia, võimsusteguri ja sageduse mõõtmiseks. Neid kasutatakse ka elektrisüsteemi kaitseks kaitsevahendite sisendina. Samuti võimaldavad mõõtetrafodid isoleerida pinget kõrgepinge ja mõõtevahendite vahel, mis vähendab kaitsekontuuride elektriisolatsiooni nõudeid ja tagab käitajate ohutuse [24].

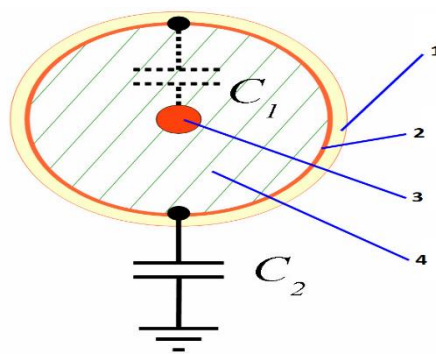
Voolu- ja pingetrafode puhul on tähtis kontrollida mõõtetrafode mõõtevea amplituud-sageduskarakteristikuid, kus tuleb jälgida suhtelist mõõtevea muutumist sõltuvalt mõõdetava signaali sagedusest. Näiteks harmoonikute mõõtmisel, kuni 50 järguni on sagedusvahemik kuni 2,5 kHz. Pingetrafodele on omane sageduskarakteristikute ebalineaarsus, sest suurem osa pingetrafosid tagavad ülekandesuhte stabiilsust vaid 1 kHz-ni. Voolutrafode ülekandekarakteristikud on stabiilsed

sagedustel kuni 10 kHz. Voolutrafode puhul mõjutab mõõtetäpsust induktiivne sekundaarkoormus [25].

Harku alajaamas Estlink 1 lahtrisse on käesoleval hetkel paigaldatud kaks erinevat mõõtetrafo tüüpi (mahtuvuslik pingetrafo ja pingejagur). Teostatud mõõtmised on läbi viidud Estlink 1 fiidrisse paigaldatud pingejaguri mõõteahelast, mis on harmoonikute mõõtmiseks sobilik. Harku alajaama on paigaldatud ka mahtuvuslikud pingetrafo aga need seadmed on enamasti ehitatud töötama ainult põhisageduse 50 Hz ümber, mis tähendab et pingeharmonikute mõõtmisteks antud lahendus täpseid mõõtetulemusi ei anna [26], [27].

### Mahtuvuslik pingejagur

Mahtuvuslikud pingejagurid koosnevad kahest järjestikku ühendatud kondensaatorist, mis on ühendatud liini ja maa vahele jadamisi. Joonisel 2.5 on toodud pingejaguri konstruktsiooni näide gaasisoleeritud alajaamas.



**Joonis 2.5. Pingejaguri konstruktsiooni näide gaasisoleeritud alajaamas (1 – välimine tugikonstruktsioon, 2 – sisemine elektrood, 3 – primaarjuht, 4 – SF<sub>6</sub>-täitega ruum) [23]**

Mahtuvuslikku pingejagurit läbiv vool on lineaarses sõltuvuses pinge muutumiskiirusest, mõõdetava pinge sagedusest ja pingejaguri kogumahtuvusest, mille tulemusel läbib väikestel sagedustel kondensaatoreid suhteliselt väike vool. Alaliskomponentide siirdeprotsessideks pingejagur ei sobi, kuna alalisvoolu korral kahaneb vool olematuks. Mahtuvuslik pingejagur sobib kõrgemate pingeharmonikute mõõtmiseks, kuna pingejaguri täpsus on tagatud väga laias sagedusribas. Samuti on mahtuvuslik pingejagur suhteliselt vastupidav erinevatele liigpingetele, kus liigpingete mõõtmisel määrab mõõteulatus ülemise piiri jagurile ühendatud võimendi sisendpingeulatus. Mahtuvuslikud pingejagurid sobivad mõõtmiste läbiviimiseks kõige paremini gaasisolatsiooniga alajaamades, kuna pingemuunduri rakendamiseks on kõik eeldused selleks täidetud. Mahtuvusliku pingejaguri eelisteks

on lihtne konstruktsioon, lai lineaarne tööpiirkond, lai sagedusriba ning ülekoormuse talumise võime. Pingejaguri puuduseks võib tuua alalispinge mõõtmise [23].

## 2.2.2 Katsekava

Antud lõputöö raames teostati Harku alajaamas mõõtmisi perioodil 11. märts kuni 18. märtsini 2019 aastal. Mõõtmised teostati katsekava alusel, mille koostamisel arvestati Estlink 1 eripärasid. Harmoonikute karakteristikute uurimiseks on katsed koostatud selliselt, et arvestatakse võimsusvoo suunda Eesti-Soome vahel, erinevaid võimsustasemeid (aktiiv- ja reaktiivvõimsust) ning samuti Estlink 1-le omase sageduse reguleerimise funktsiooni mõju. Katsekavad on toodud tabelites 2.1 ja 2.2.

**Tabel 2.1. Katsekava (Soome poolt sageduse reguleerimise funktsioon väljas)**

Estlink 1 Võimsusvoo suund Eesti→Soome			Estlink 1 Võimsusvoo suund Soome→Eesti		
Nr.	Võimsus	Mõõteperiood	Nr.	Võimsus	Mõõteperiood
1	350 MW	30 min	16	350 MW	30 min
2	300 MW		17	300 MW	
3	250 MW		18	250 MW	
4	200 MW		19	200 MW	
5	150 MW		20	150 MW	
6	100 MW/100 Mvar		21	100 MW/100 Mvar	
7	100 MW		22	100 MW	
8	50 MW/ 50 Mvar		23	50 MW/ 50 Mvar	
9	50 MW		24	50 MW	
10	40 MW		25	40 MW	
11	30 MW		26	30 MW	
12	20 MW		27	20 MW	
13	10 MW		28	10 MW	
14	0 MW/ 50 Mvar		29	0 MW/ 50 Mvar	
15	0 MW		30	0 MW	

**Tabel 2.2. Katsekava (Soome poolt sageduse reguleerimise funktsioon sees)**

Estlink 1 Võimsusvoo suund Eesti→ Soome			Estlink 1 Võimsusvoo suund Soome→ Eesti		
Nr.	Võimsus	Mõõteperiood	Nr.	Võimsus	Mõõteperiood
1	350 MW	30 min	9	350 MW	30 min
2	250 MW		10	250 MW	
3	200 MW		11	200 MW	
4	150 MW		12	150 MW	
5	100 MW/100 Mvar		13	100 MW/100 Mvar	
6	50 MW/50 Mvar		14	50 MW/50 Mvar	
7	25 MW		15	25 MW	
8	0 MW		16	0 MW	

### 3. MÕÕTETULEMUSTE ANALÜÜS

Käesolevas peatükis analüüsitakse Estlink 1 alalisvooluühenduse harmoonikute karakteristikuid ja kirjeldatakse nende analüüsi metoodikat. Harmoonikute karakteristikute analüüsimiseks teostati mõõtmised Harku alajaamas Estlink 1 lahtris. Mõõtmised teostati ajavahemikul 11.03.19 – 18.03.2019, mille käigus mõõdeti harmoonikute karakteristikuid erinevatel võimsustel (aktiiv- ja reaktiivvõimsusel) ning arvestades võimsusvoo suunda Eesti – Soome vahel. Samuti analüüsiti tulemusi vastavalt sageduse reguleerimise funktsioonile, kus hinnati sageduse reguleerimise mõju harmoonikute väärtustele. Analüüsitava koormuste valikul on lähtutud, et valimisse jääks nii madalamaid kui ka kõrgemaid koormusi. Mõõtetulemused teostati vastavalt standardile EVS-EN-61000-4-30 [1] A-klassi täpsuse nõuetele vastava kvaliteedi analüsaatoriga (Qualitrol Informa PMD-A), mis salvestas mõõtetulemusi iga 0,2 sekundi järel, et saada võimalikult täpsed tulemused.

#### 3.1 Mõõtetulemuste analüüsi metoodika

Andmete analüüsimiseks kasutati arvutusprogrammi Matlab, mis võimaldab suuri andmekogumikke võrrelda ja vastavalt vajadusele analüüsida. Arvutusprogrammis Matlab agregeeriti analüsaatorist saadud väärtused väiksemateks andmekogumikeks. Antud töös analüüsiti harmoonikute 2 sekundi ja 20 minuti agregeeritud andmeid. Kahekümne minuti agregeeritud andmete puhul võib tekkida oht, kus üksikud kõrgemad harmoonilised väärtused jäävad märkamata, kuna tulemused antakse antud ajaperioodi keskmisena. Tulenevalt sellest võrreldakse töös kahte ajaperioodi, et veenduda andmete täpsuses.

Mõõtetulemuste vahelise lineaarse seose kirjeldamiseks arvutati korrelatsioonikordaja, millega hinnati tulemuste korreleeruvust üksteisest. Korrelatsioonikordaja väärtused arvutati sõltuvalt sageduse reguleerimise funktsioonist, et võrrelda kui palju sageduse reguleerimine mõjutab saadud väärtusi erinevate võimsuste juures. Tulemuste korreleeruvuse tugevuse määrab arvutatud väärtus, kus tulemus 1 tähistab 100% korreleeruvust tulemuste vahel ning tulemus 0 näitab, et väärtused ei ole omavahel korrelatsioonis. Negatiivse märgiga tulemused tähistavad mõlema tulemuse negatiivset korreleeruvust. Korrelatsioonikordaja on võimalik arvutada valemiga (3.1) [28].

$$\text{Correl}(X, Y) = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2 \sum(y-\bar{y})^2}} \quad (3.1)$$

kus  $x$  ja  $y$  – valimi väärtused

$\bar{x}$  – valimi X keskvärtus



$\bar{y}$  – valimi Y keskvärtus

Näiteks, kasutades valemit (3.1) saame arvutada korrelatsioonikordaja 3. järku harmoonikule Eesti – Soome võimsusvoo suunal:

$$\text{Correl}(X, Y) = \frac{\sum(0,26 - 0,25)(0,28 - 0,26)}{\sqrt{\sum(0,26 - 0,25)^2 \sum(0,28 - 0,26)^2}} = \frac{0,0034}{0,0049} = 0,70$$

Antud näite puhul on korrelatsioonikordaja väärtus 0,70 mis näitab tugevat korreleeruvust andmete vahel. Tulenevalt sellest saame järeldada, et sõltumata sageduse reguleerimisest püsivad 3. järku harmooniku mõõtmistulemused Eesti – Soome võimsusvoo suunal sarnased teostatud mõõtmisperioodil. Sarnast arvutuskäiku on kasutatud ka kõikide teiste harmooniku järkude puhul, et võrrelda omavahelisi seoseid sageduse reguleerimise vaatest.

**Tabel 3.1. Kõrgemate harmoonikute pingete plaanilised piirväärtused 330 kV ülekandevõrgus [29]**

Paaritud harmoonikud				Paarisharmoonikud	
3-ga jagumatud		3-ga jaguvad			
Järk $h$	Suhteline pinge $u_h$ , %	Järk $h$	Suhteline pinge $u_h$ , %	Järk $h$	Suhteline pinge $u_h$ , %
5	2	3	2	2	1,4
7	2	9	1	4	0,8
11	1,5	15	0,3	6	0,4
13	1,5	21	0,2	8	0,4
17	1,2	>21	0,2	10	0,35
19	1			12	0,3
23	0,9			14	0,3
25	0,8			16	0,25
29	0,7			18	0,25
31	0,65			20	0,25
35	0,6			22	0,25
37	0,55			24	0,2
41	0,5			>24	0,2
43	0,45				
47	0,4				
49	0,4				

Üksikute pinge harmoonikute suhtelisi piirväärtusi vaadeldakse üldjuhul 25 järguni, kuna reeglina on nende väärtus väike või võimalike resonantsnähtuse tõttu ettearvamatu [8]. Standard IEC/TR 61000-3-6:2008 [12] käsitleb harmoonikute piirnormide määramist kesk-, kõrge- ja ülikõrgepingevõrkudes, mis annab võrguettevõttele soovituslikud harmoonikute väärtused plaaniliste piirväärtuste

seadmiseks. Põhivõrguettevõtja Elering AS-i kõrgemate harmoonikute pingete (kuni 50 – ndat järku) plaanilised piirväärtused 330 kV ülekandevõrgule on toodud tabelis 3.1.

Estlink 1 voolu harmoonikute karakteristikute mõõtmine teostati vastavalt tabelis 2.1 toodud katsekavale. Erinevalt pinge harmoonikute mõõtmisega, kus salvestati kõiki üksikuid harmoonikuid, mõõdeti voolu harmoonikuid 2...10. järku. Paaritute voolu harmooniku järkude välja arvutamiseks kasutati valemit 3.2.

$$6 \cdot n \pm 1 \quad (3.2)$$

kus  $n$  – harmooniku järk 2...8

Vooluharmoonikute hindamisel lähtuti Elering AS kvaliteedinõudest, kus 95% üksikute harmoonikute mõõtmistulemustest peavad jääma alla tabel 3.4 toodud väärtuste [30].

**Tabel 3.4. Elering AS piirväärtused vooluharmoonikutele  $I_h$  (kuni 50. järguni) [30]**

Harmooniku järk	Harmooniku piiremissioon, %	
	Paaritu	Paaris
$h < 11$	4,0	1,0
$11 \leq h < 17$	2,0	0,5
$17 \leq h < 23$	1,5	0,375
$23 \leq h < 35$	0,6	0,15
$35 \leq h < 50$	0,5	0,125

## 3.2 Pingeharmoonikute analüüs

Järgnevalt võrreldakse pingeharmoonikute karakteristikute mõõtetulemusi erinevatel võimsustel (aktiiv- ja reaktiivvõimsusel) ning arvestades võimsusvoo suunda Eesti – Soome vahel. Samuti analüüsitakse tulemusi vastavalt sageduse reguleerimise funktsioonile.

### 3.2.1 Pingeharmoonikud Eesti – Soome võimsusvoo suunal

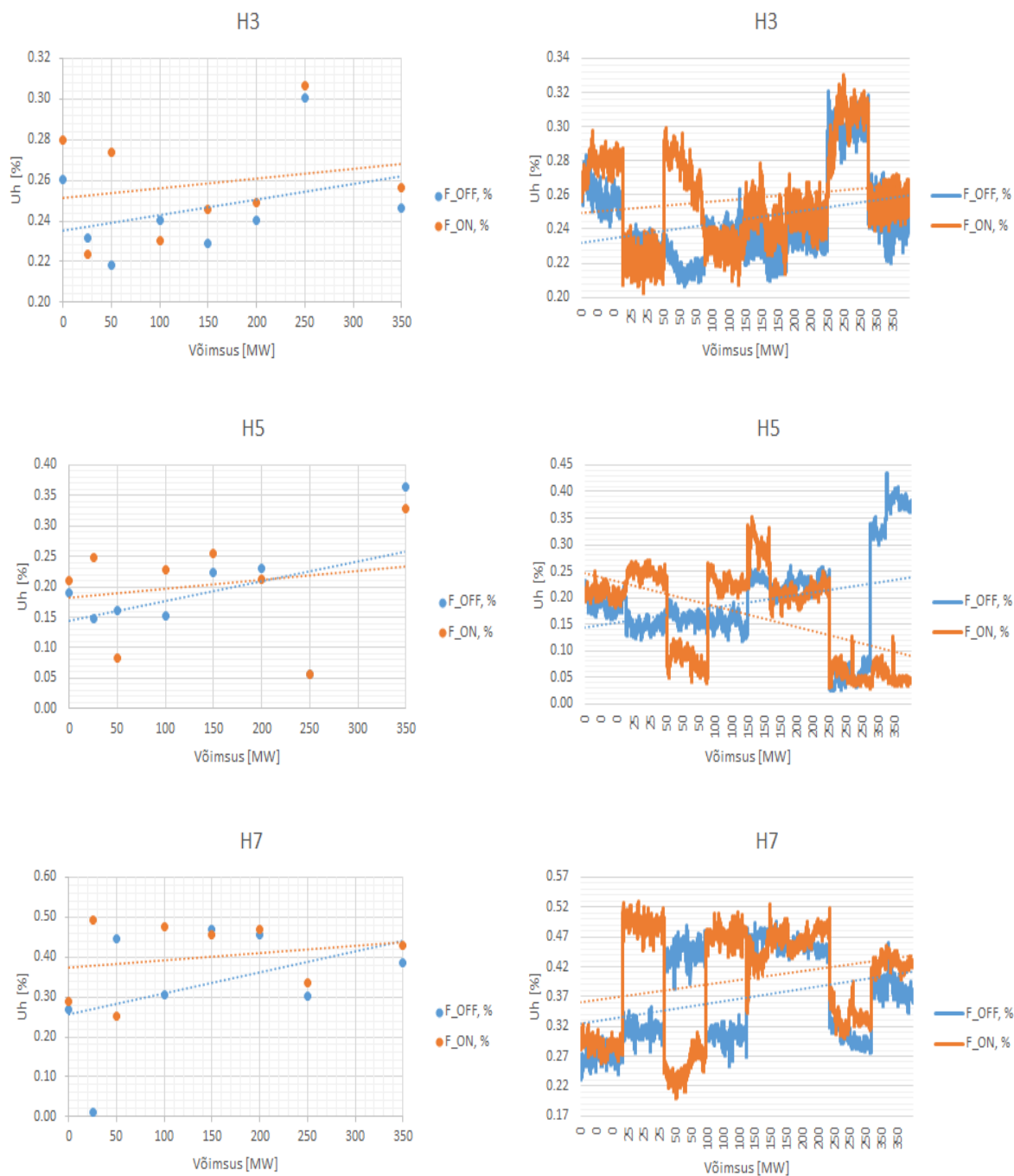
Allpool on analüüsitud Estlink 1 paaritute pinge harmoonikute (kuni 25. järguni) 20 minuti ja 2 sekundi agregeeritud väärtused Eesti – Soome võimsusvoo suunal. Harmoonikute 20 minuti väärtused on toodud joonisel 3.1 hajuvusdiagrammidel, et näha paremini tulemuste omavahelisi erinevusi ja korreleeruvust. Mõõtetulemuste 2 sekundi väärtused on toodud joonisel 3.1 graafiliselt, et paremini

hinnata erinevate koormuste korral harmoonikute maksimum ja miinimum väärtusi. Selleks, et hinnata sageduse reguleerimise funktsioonist mõjutatud mõõtmistulemuste erinevusi, teostati mõõtmised sisse lülitatud (F\_ON) ja välja lülitatud (F\_OFF) süsteemi korral. Lisaks on hajuvusdiagrammidele ja graafikutele arvatud lineaarjooned, mis märgivad harmoonikute taseme liikumist vastavalt võimsuse muutumisele.

Tabelis 3.2 on kokku võetud paaritute pingeharmonikute 20 minutilised karakteristikute erinevused Eesti – Soome võimsusvoo suunal. Samuti on tabelis toodud iga harmooniku mõõtmiste omavahelised korrelatsioonikordajad, sõltuvalt sageduse reguleerimisest.

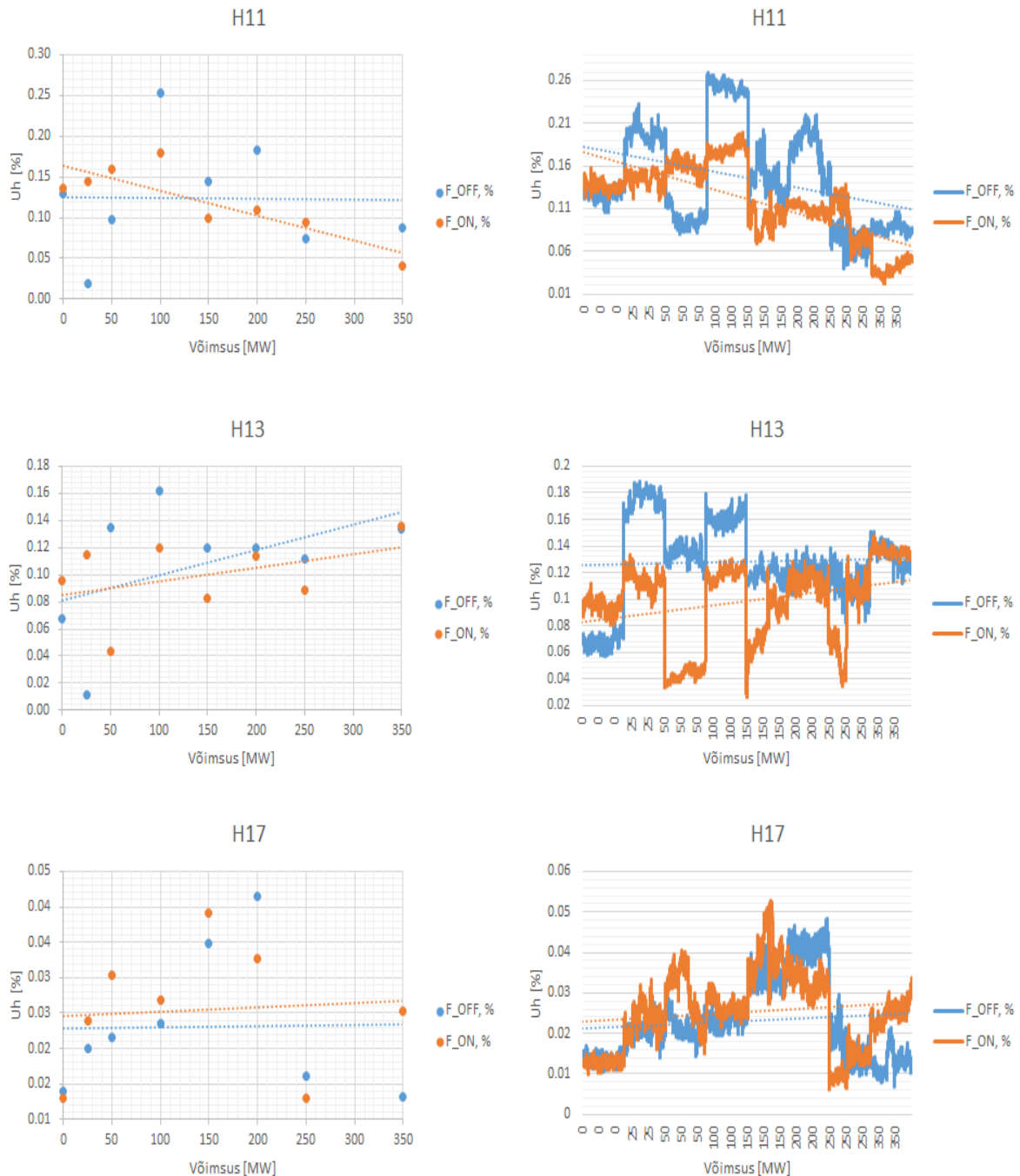
**Tabel 3.2. Paaritute pingeharmonikute 20 minutilised väärtused Eesti – Soome võimsusvoo suunal**

<b>Harmonikute osakaal erinevate võimsustasemetes juures</b>										
<b>Harmoniku järk</b>		<b>0MW</b>		<b>25MW</b>		<b>50MW50Mvar</b>		<b>100MW100Mvar</b>		
		F_OFF,%	F_ON,%	F_OFF,%	F_ON,%	F_OFF,%	F_ON,%	F_OFF,%	F_ON,%	
H3		0.26	0.28	0.23	0.22	0.22	0.27	0.24	0.23	
H5		0.19	0.21	0.15	0.25	0.16	0.08	0.15	0.23	
H7		0.27	0.29	0.01	0.49	0.45	0.25	0.30	0.48	
H9		0.07	0.05	0.03	0.06	0.03	0.06	0.04	0.06	
H11		0.13	0.14	0.02	0.15	0.10	0.16	0.25	0.18	
H13		0.07	0.10	0.01	0.12	0.13	0.04	0.16	0.12	
H17		0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	
H19		0.01	0.01	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0.03	
H23		0.08	0.08	0.01	0.12	0.04	0.06	0.03	0.10	
H25		0.12	0.12	0.03	0.06	0.04	0.12	0.09	0.05	
<b>Harmoniku järk</b>		<b>150MW</b>		<b>200MW</b>		<b>250MW</b>		<b>350MW</b>		
		F_OFF,%	F_ON,%	F_OFF,%	F_ON,%	F_OFF,%	F_ON,%	F_OFF,%	F_ON,%	
H3		0.23	0.25	0.24	0.25	0.30	0.31	0.25	0.26	
H5		0.22	0.25	0.23	0.21	0.06	0.06	0.36	0.33	
H7		0.47	0.46	0.45	0.47	0.30	0.33	0.39	0.43	
H9		0.05	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06	0.05	
H11		0.14	0.10	0.18	0.11	0.07	0.09	0.09	0.04	
H13		0.12	0.08	0.12	0.11	0.11	0.09	0.13	0.14	
H17		0.03	0.04	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.03	
H19		0.01	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.02	0.03	
H23		0.11	0.09	0.10	0.11	0.06	0.04	0.12	0.07	
H25		0.07	0.02	0.08	0.05	0.07	0.07	0.08	0.03	
<b>Korrelatsioonikordaja</b>										
<b>Harmoniku järk</b>	H3	H5	H7	H9	H11	H13	H17	H19	H23	H25
<b>Korrelatsiooni-kordaja</b>	0.71	0.79	-0.22	-0.69	0.33	-0.09	0.77	0.00	-0.21	0.03



**Joonis 3.1 Paaritute pingeharmonikute 20 minuti ja 2 sekundi väärtused Eesti – Soome võimsusvoo suunal (jätkub)**

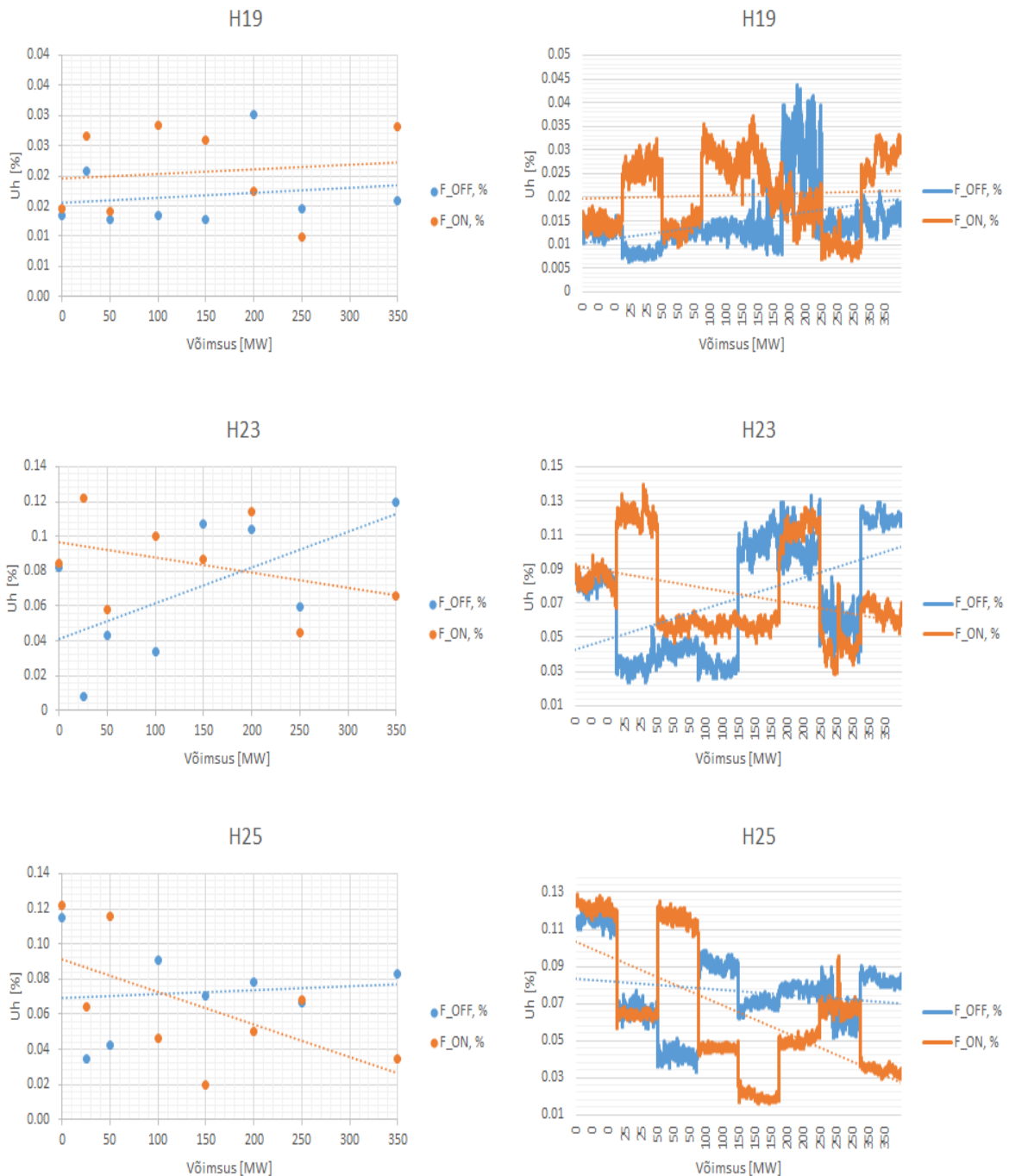
Joonisel 3.1 toodud hajuvusdiagrammidelt ja graafikutelt selgub, et harmoonikute karakteristikute mõõtetulemused ei ületa lubatud piirväärtusi. Kõige kõrgemat suhtelist harmooniku pinget ( $U_h$ ) väärtust avaldab 7. järku harmoonik, kui sageduse reguleerimine on sisse lülitatud, kus suhtelise harmooniku pinget väärtus on üle 0,5%. Sõltumata sageduse reguleerimisest on kõige kõrgemaid väärtusi näha samuti 7. järku harmooniku puhul, kus 90%  $U_h$  väärtustest jäävad vahemiku 0,2 – 0,5%.



**Joonis 3.1 Paaritute pingeharmonikute 20 minuti ja 2 sekundi väärtused Eesti – Soome võimsusvoo suunal (jätkub)**

Võrreldes 20 minuti hajuvusdiagramme ja 2 sekundi graafikuid saab järeldada, et graafikutel kujutatud mõõtetulemused on kõrgemad, kui hajuvusdiagrammidel. Selline nähtus on tingitud sellest, et 2 sekundi agregeeritud andmed on täpsemad, kuna 20 minuti andmete puhul agregeeritakse tulemused keskmisteks väärtusteks, mille tulemusel võivad üksikud kõrgemad väärtused märkamata jääda. Eelnevalt nimetatud olukorda võib näha 9. järku harmooniku puhul, kui sageduse reguleerimine on sisse lülitatud, kus 20 minuti mõõtetulemus 250MW puhul on 0,06%,

kuid 2 sekundi puhul 0,13%. Antud nähtus võib olla tingitud olukorrast, kui sageduse reguleerimise funktsioon sisse lülitatakse, kuna kõrgemad väärtused esinevad mõõtetulemuste alguses ning seejärel stabiliseeruvad.



**Joonis 3.1 Paaritute pingeharmonikute 20 minuti ja 2 sekundi väärtused Eesti – Soome võimsusvoo suunal**

Samuti esineb mõõtmistulemuste erinevusi, kui sageduse reguleerimine oli sisse või välja lülitatud. Kõige suuremat mõõtetulemuste erinevust on näha 5. järku harmooniku puhul, kus 350MW

võimsuse juures on mõõtetulemuste erinevus 0,3%. Kõige väiksemat mõõtetulemuste erinevust on näha 17. järku harmooniku puhul, kus olenevalt võimsusest püsivad harmoonikute väärtused samal tasemel. Samuti on 17. järku harmooniku puhul näha tugevat korreleeruvust mõõtetulemuste vahel, kus arvutatud korrelatsioonikordaja väärtus on 0,77.

Võrreldes 20 minuti hajuvusdiagramme vastavalt võimsustele, siis jaotuvad tulemused harmooniku järkudel erinevalt. Kõige suuremat erinevust vastavalt võimsusele on näha 5 järku harmooniku puhul, kus võimsuse kasvades, kui sageduse reguleerimine on sisse lülitatud ulatub suhtelise harmooniku pinge 0,08 – 0,33%-ni. Analüüsid harmoonikute karakteristikute osakaalu võimsuse kasvades, siis selgub tendents kus ainult 11. järku harmooniku puhul langeb harmoonikute osakaal (mõlema mõõtmistulemuse puhul) võimsuse kasvades. Erinevusi on näha samuti 23. ja 25. järku harmoonikute puhul, kus sisse lülitatud sageduse reguleerimise funktsiooni korral langeb harmoonikute osakaal aga sisse lülitatud funktsiooni puhul kasvab. Antud mõõtetulemusi analüüsid saab järeldada, et erinevatel võimsustel jaotuvad harmoonikute karakteristikud erinevalt ehk ei esine läbivat mustrit, kus teatud võimsustel on kõrgemad või madalamad tulemused.

### **3.2.2 Pingeharmonikud Soome – Eesti võimsusvoo suunal**

Järgnevas alapeatükis on toodud paaritute pinge harmoonikute (kuni 25. järguni) 20 minuti ja 2 sekundi agregeeritud väärtused Soome – Eesti võimsusvoo suunal. Mõõtmised teostati samade koormuste juures nagu eelnevas alapeatükis. Paaritute pinge harmoonikute 20 minuti mõõtmistulemused Soome – Eesti võimsusvoo suunal on toodud tabelis 3.3.

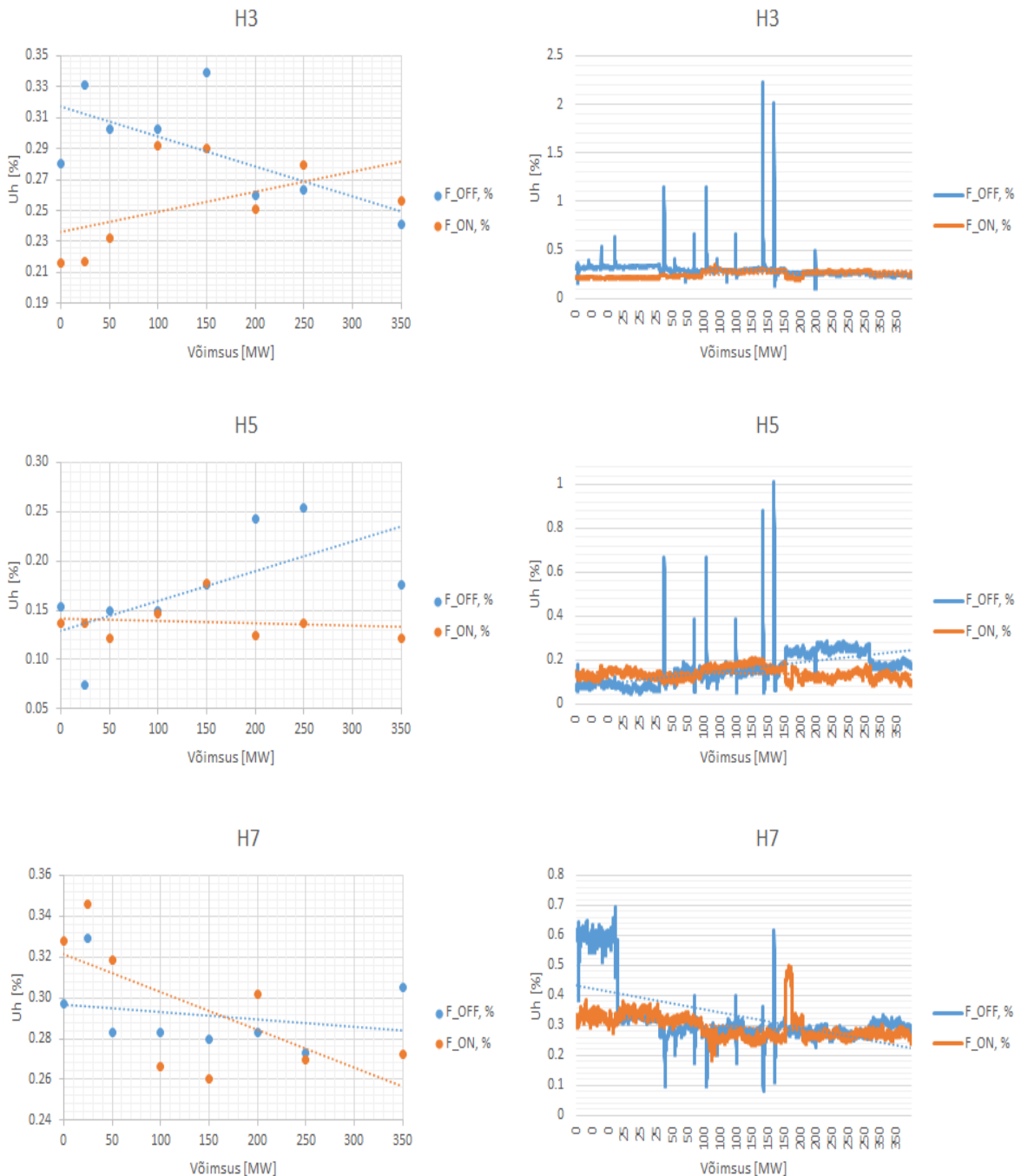
Joonisel 3.2 toodud 2 sekundi harmoonikute karakteristikute mõõtetulemustes on näha tendentsi, kus F\_OFF režiimis mõõdetud harmoonikute karakteristikutes esineb tavatuid pinge harmoonikute väärtuste kõikumisi. Võrreldes harmoonikute  $U_h$  väärtusi, siis selgub et kõige kõrgemaid väärtusi on mõõdetud 150MW koormuse juures, kus näiteks 3. järku harmooniku puhul ulatub  $U_h$  väärtus 2,3%-ni. Joonisel 3.2 on näha, et sageduse välja lülitatud režiimi puhul 150MW koormuse juures mõõdetud harmoonikute karakteristikud on läbivaldt kõrgemad kõigi paaritute harmoonikute puhul. Antud olukord võib olla tingitud spetsiifilise töörežiimiga mõõtepunkti, kuna mõjutatud on kõik harmoonikud konkreetsel ajahetkel. Samuti on graafikutelt näha kõrgemaid  $U_h$  väärtusi koormuste muutumiste hetkedel, millest võib järeldada et kõrgemad väärtused on põhjustatud võimsuste ümber lülitamistest.

**Tabel 3.3. Paaritute pingeharmonikute 20 minutilised väärtused Soome - Eesti võimsusvoo suunal**

Harmonikuteosakaal erinevate võimsustasemetel juures										
Harmonikujärk		0MW		25MW		50MW50Mvar		100MW100Mvar		
		F_OFF,%	F_ON,%	F_OFF,%	F_ON,%	F_OFF,%	F_ON,%	F_OFF,%	F_ON,%	
H3		0.28	0.22	0.33	0.22	0.30	0.23	0.30	0.29	
H5		0.15	0.14	0.07	0.14	0.15	0.12	0.15	0.15	
H7		0.30	0.33	0.33	0.35	0.28	0.32	0.28	0.27	
H9		0.03	0.04	0.04	0.03	0.07	0.03	0.07	0.04	
H11		0.16	0.15	0.05	0.15	0.16	0.14	0.16	0.11	
H13		0.11	0.11	0.07	0.10	0.11	0.13	0.11	0.06	
H17		0.04	0.02	0.04	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	
H19		0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	
H23		0.07	0.04	0.04	0.03	0.07	0.04	0.07	0.06	
H25		0.10	0.08	0.04	0.08	0.12	0.08	0.12	0.11	
Harmonikujärk		150MW		200MW		250MW		350MW		
		F_OFF,%	F_ON,%	F_OFF,%	F_ON,%	F_OFF,%	F_ON,%	F_OFF,%	F_ON,%	
H3		0.34	0.29	0.26	0.25	0.26	0.28	0.24	0.26	
H5		0.18	0.18	0.24	0.12	0.25	0.14	0.18	0.12	
H7		0.28	0.26	0.28	0.30	0.27	0.27	0.31	0.27	
H9		0.08	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	
H11		0.05	0.06	0.07	0.11	0.09	0.05	0.08	0.06	
H13		0.10	0.10	0.07	0.07	0.06	0.10	0.04	0.07	
H17		0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	
H19		0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	
H23		0.07	0.09	0.07	0.06	0.06	0.07	0.04	0.05	
H25		0.08	0.08	0.09	0.08	0.09	0.08	0.03	0.07	
Korrelatsioonikordaja										
Harmonikujärk	H3	H5	H7	H9	H11	H13	H17	H19	H23	H25
Korrelatsiooni-kordaja	0.02	-0.09	0.64	-0.05	0.48	0.39	0.57	-0.13	0.41	0.64

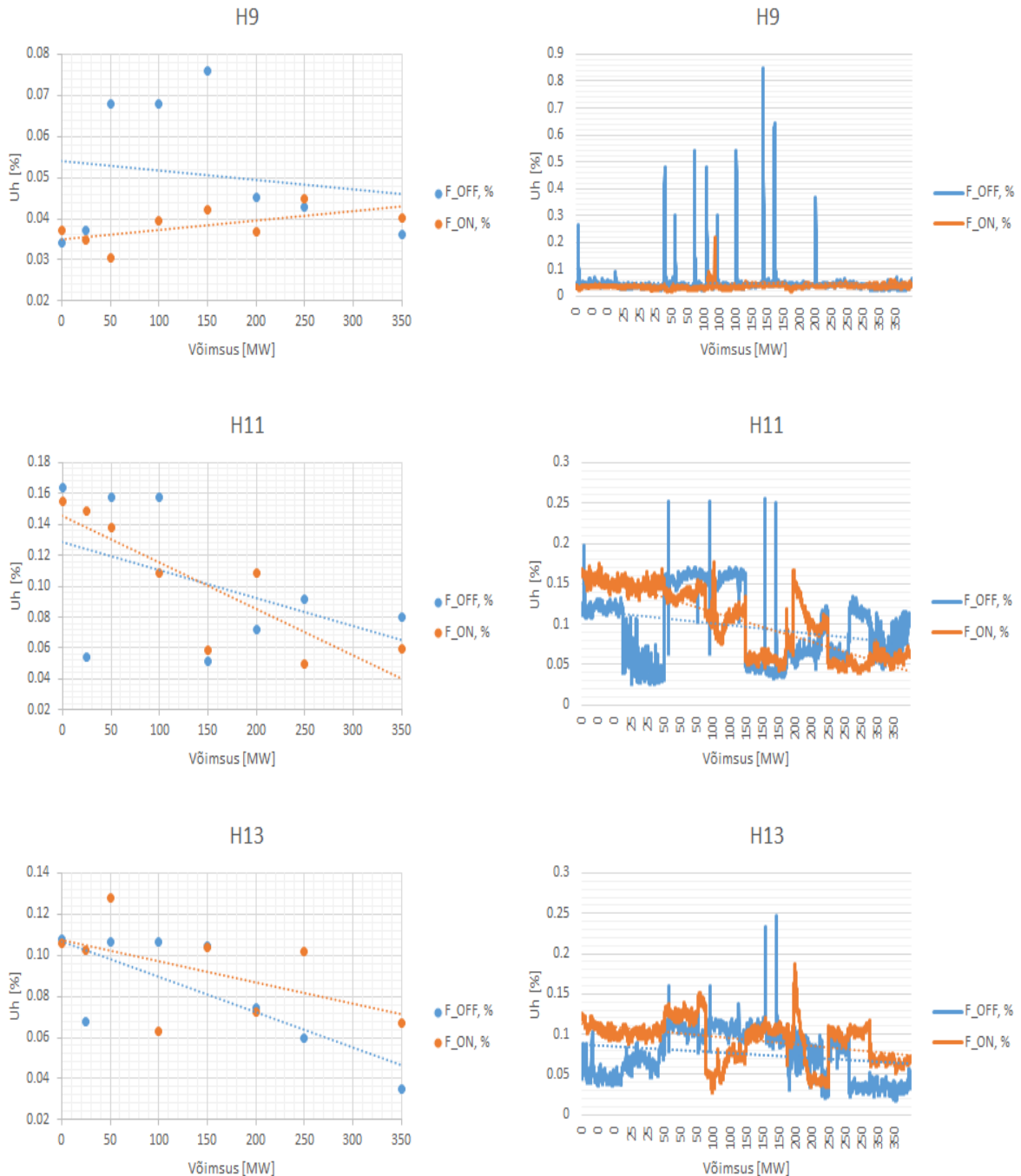
Võrreldes joonise 3.2 hajuvusdiagramme ja graafikuid võib näha asjaolu, kus graafikutel näidatud mõõtmistulemused on märgatavalt kõrgemad, kui hajuvusdiagrammidel. Antud olukord näitab, kui suured erinevused on 20 minuti ja 2 sekundi agregeeritud andmete vahel. Kus näiteks 3. järku harmooniku puhul 150MW koormuse juures on mõõtmistulemuste erinevus 2%. Selline mõõtetulemuste erinevus näitab, kui palju täpsemad on 2 sekundi agregeeritud andmed 20 minuti andmetest. Võrreldes hajuvusdiagramme ilmneb tendents, kus võimsuse kasvades suhtelise harmooniku pinged väärtused vähenevad. Sellest tulenevalt saab väita, et madalamate võimsuste juures esineb suhtelisi harmooniku pingeid rohkem.





**Joonis 3.2 Paaritute pingeharmonikute 20 minuti ja 2 sekundi väärtused Soome – Eesti võimsusvoo suunal (jätkub)**

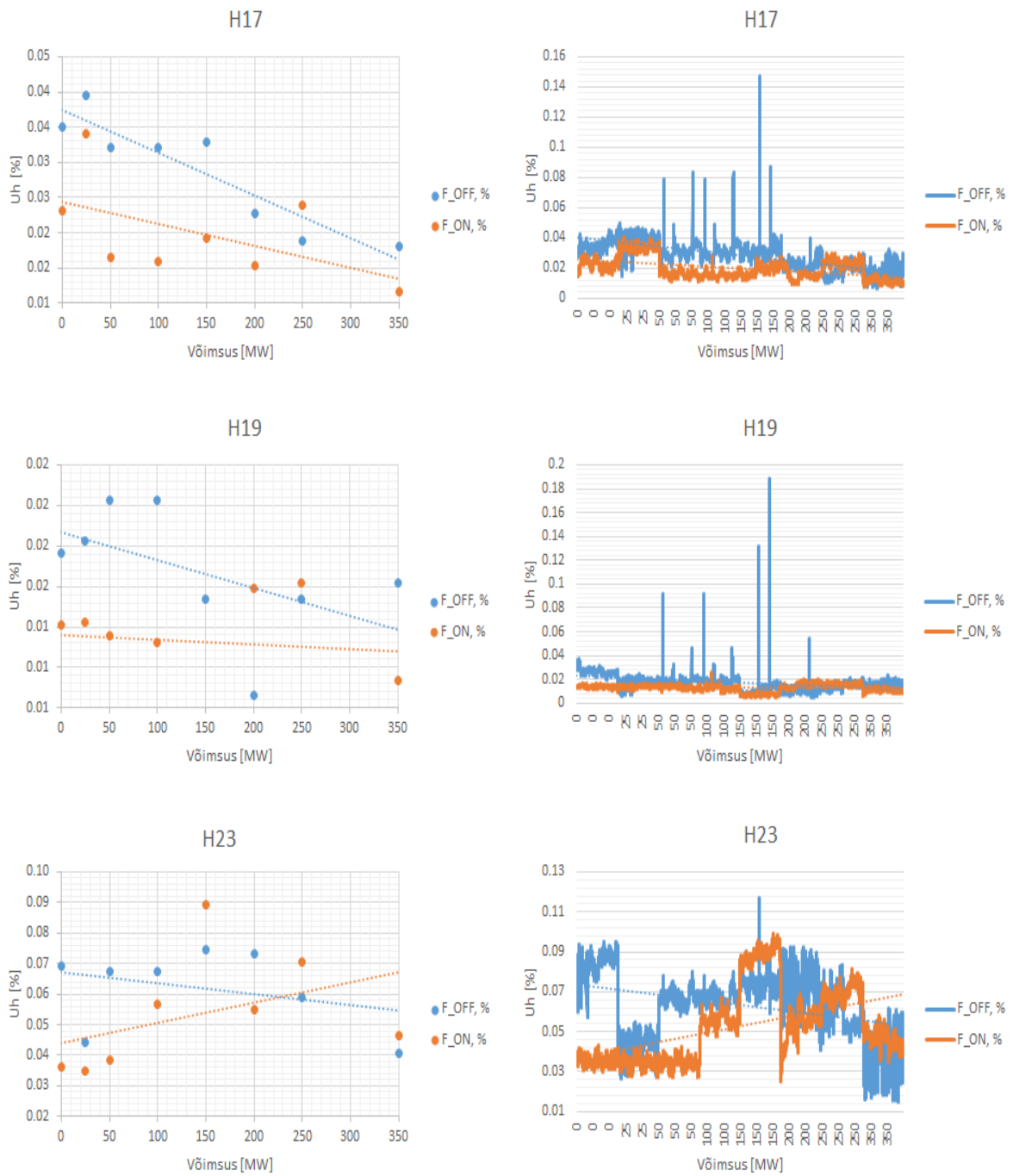
Võimsusvoode liikumis suundade võrdluses saab järeldada, et suhteliste pingeharmonikute väärtused Eesti – Soome võimsusvoo suunal on tunduvalt ebastabiilsemad, kui Soome – Eesti võimsusvoo suunal. Kui vaadata alapeatükis 3.2.1 joonisel 3.1 toodud mõõtmistulemusi, siis on näha läbivat momenti, kus koormuse muutmine mõjutab harmoonikute väärtusi oluliselt rohkem kui alapeatükis 3.2.2 joonisel 3.2 toodud mõõtetulemuses.



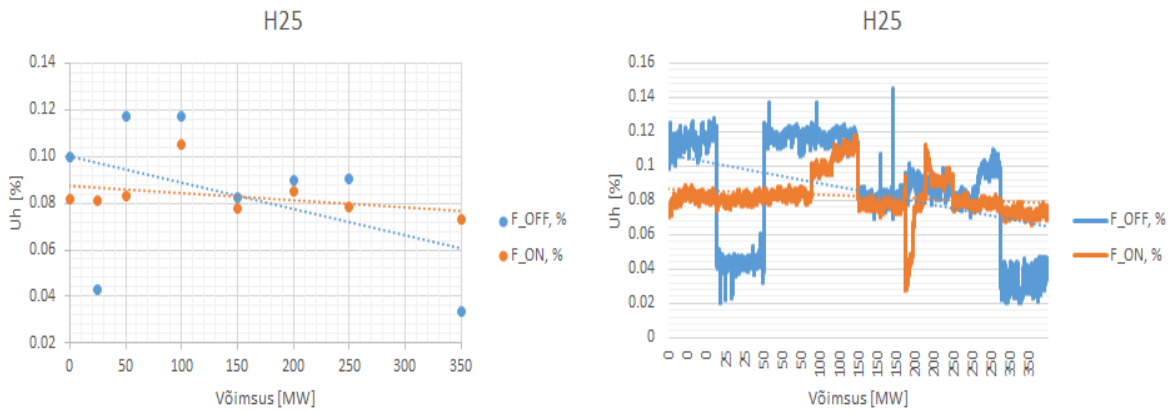
**Joonis 3.2 Paaritute pingeharmonikute 20 minuti ja 2 sekundi väärtused Soome – Eesti võimsusvoo suunal (jätkub)**

Võimsusvoogude võrdluses on näha ka erinevusi sageduse reguleerimis funktsioonist tingitud mõõtetulemustes. Eesti – Soome võimsusvoo suuna mõõtmistulemustes ilmneb, et kõrgemaid suhtelisi harmooniku väärtusi on mõõdetud, kui sageduse reguleerimine oli sisse lülitatud, kuid samas Soome – Eesti võimsusvoo suunal mõõdeti kõrgemaid väärtusi, kui sageduse reguleerimine oli välja lülitatud. Tulenevalt sellest saab järeldada, et sageduse reguleerimine funktsioon mõjutab pinge harmoonikute karakteristikute mõõtmistulemusi märgatavalt rohkem Eesti – Soome

võimsusvoo suunal. Pingeharmonikute karakteristikute mõõtmistulemuste võrdlus võimsusvoode suhtes on toodud lisas 1.



**Joonis 3.2 Paaritute pingeharmonikute 20 minuti ja 2 sekundi väärtused Soome – Eesti võimsusvoo suunal (jätkub)**



**Joonis 3.2 Paaritute pingeharmonikute 20 minuti ja 2 sekundi väärtused Soome – Eesti võimsusvoo suunal**

### 3.3 Vooluharmonikud

#### 3.3.1 Vooluharmonikud Eesti – Soome võimsusvoo suunal

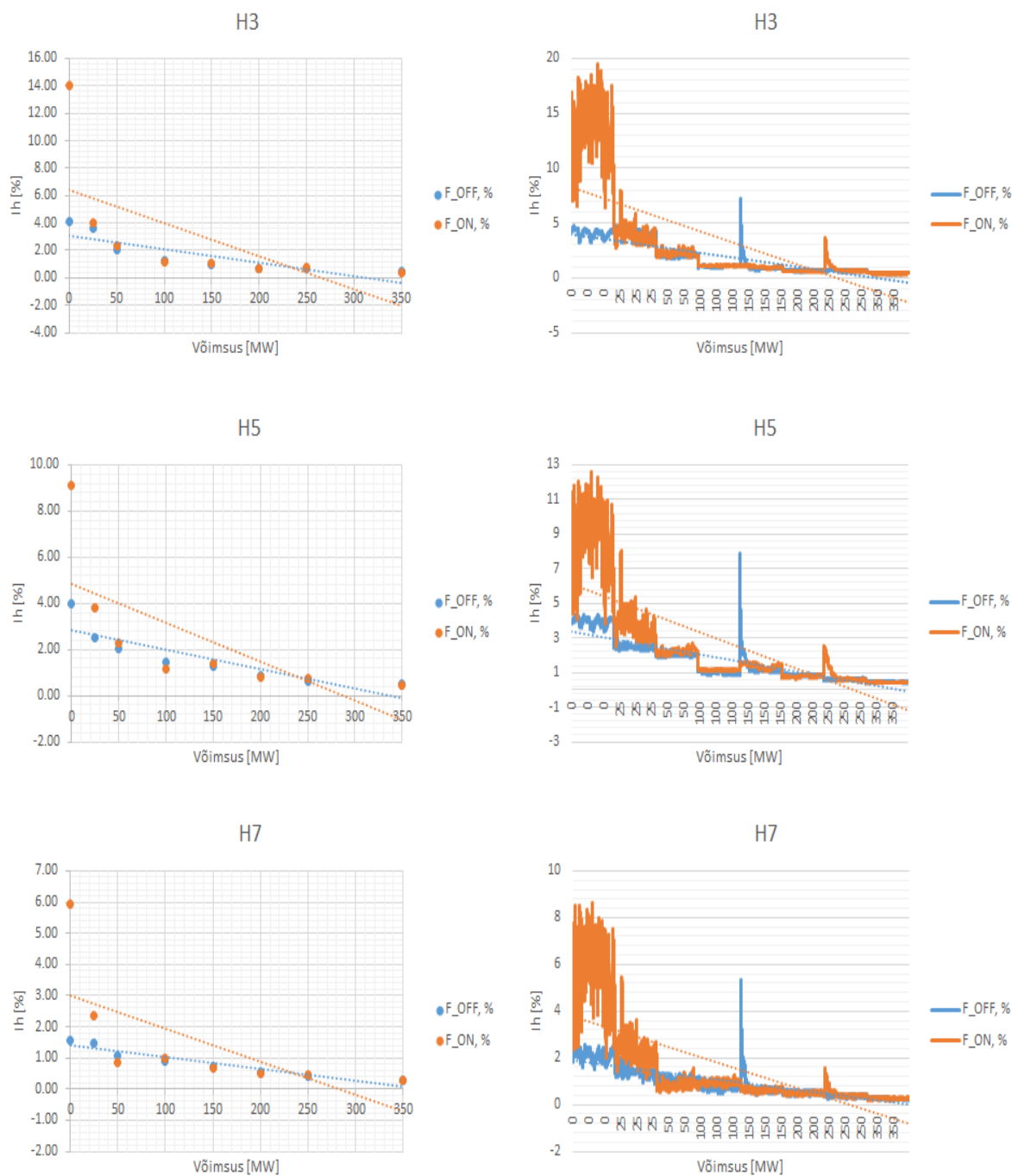
Antud alapeatükis on toodud voolu harmoonikute karakteristikute 20 minuti ja 2 sekundi agregeeritud mõõtetulemused. Üksikute voolu harmoonikute suhtelisi piirväärtusi vaadeldakse üldjuhul 25 järguni, kuna reeglina on nende väärtus väike või võimalike resonantsnähtuse tõttu ettearvamatu [7]. Analüüsitud on paarituid harmoonikuid, et näha mõõtetulemuste erinevusi harmoonikute emissioonist ning sõltuvalt sageduse reguleerimise funktsioonist. Tabelis 3.5 on toodud voolu harmoonikute 20 minuti agregeeritud andmed, kus on välja toodud erinevate võimsuste mõõtetulemused ning arvutatud korrelatsioonikordajad.

Jooniselt 3.3 ilmneb, et kõikide mõõdetud harmoonikute puhul on kõige kõrgemaid mõõtetulemusi näha 0MW võimsuse juures, kui sageduse reguleerimine on sisse lülitatud (F\_ON). Kõige kõrgemaid suhtelisi voolu harmoonikute ( $I_h$ ) väärtusi on registreeritud 3. ja 11. järku harmoonikute puhul, kus  $I_h$  väärtused on vahemikus 5...19%. Väiksemaid  $I_h$  väärtusi F\_ON režiimi puhul ilmutab aga 19. järku harmoonik, kus mõõtetulemused 0MW võimsuse juures jäävad vahemikku 0,15...0,4%. Võrreldes 20 minuti ja 2 sekundi mõõtetulemusi omavahel, siis selgub, et mõõtetulemuste erinevused ei ole nii suured, kui olid pingeharmonikute puhul mis näitab et mõõtetulemuste väärtused püsivad konstantselt kõrgemad olenemata ajaperioodi agregeerimisest. Kui võrrelda tabelis 3.4 toodud piiremissioonide väärtusi mõõtetulemustega, siis nähtub, et lubatud väärtusi ületavad 3., 5., 7., 9., 11. ja 13. järku harmoonikud, kus mõõdetud väärtused jäävad vahemiku 2,6 – 19%.

**Tabel 3.5. Paaritute vooluharmonike 20 minutilised väärtused Eesti - Soome võimsusvoo suunal**

<b>Harmonikuteosakaal erinevate võimsustasemetete juures</b>										
<b>Harmonikujärk</b>		<b>0MW</b>		<b>25MW</b>		<b>50MW50Mvar</b>		<b>100MW100Mvar</b>		
		F_OFF,%	F_ON,%	F_OFF,%	F_ON,%	F_OFF,%	F_ON,%	F_OFF,%	F_ON,%	
H3		4.10	14.01	3.61	4.04	2.00	2.29	1.29	1.13	
H5		3.96	9.12	2.51	3.79	2.04	2.27	1.46	1.17	
H7		1.58	5.96	1.49	2.38	1.07	0.87	0.91	0.98	
H9		1.06	2.15	0.62	1.52	0.31	0.56	0.22	0.45	
H11		2.19	15.39	7.74	6.12	1.86	2.37	0.95	0.92	
H13		0.16	2.67	1.37	1.60	0.05	0.06	0.38	0.02	
H17		0.37	0.28	0.09	0.13	0.57	0.20	0.04	0.29	
H19		0.13	0.28	0.12	0.14	0.05	0.05	0.02	0.02	
H23		0.16	0.51	0.09	0.20	0.05	0.08	0.03	0.05	
H25		0.28	1.43	0.25	0.36	0.09	0.19	0.07	0.06	
<b>Harmonikujärk</b>		<b>150MW</b>		<b>200MW</b>		<b>250MW</b>		<b>350MW</b>		
		F_OFF,%	F_ON,%	F_OFF,%	F_ON,%	F_OFF,%	F_ON,%	F_OFF,%	F_ON,%	
H3		0.98	1.02	0.70	0.63	0.69	0.78	0.43	0.43	
H5		1.25	1.39	0.87	0.80	0.64	0.77	0.48	0.45	
H7		0.73	0.66	0.55	0.52	0.40	0.45	0.28	0.28	
H9		0.34	0.26	0.23	0.18	0.13	0.21	0.15	0.14	
H11		1.03	0.54	0.74	0.52	0.33	0.44	0.19	0.11	
H13		0.34	0.26	0.22	0.20	0.18	0.16	0.08	0.08	
H17		0.03	0.04	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	
H19		0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	
H23		0.05	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	
H25		0.08	0.03	0.06	0.04	0.06	0.04	0.06	0.04	
<b>Korrelatsioonikordaja</b>										
<b>Harmonikujärk</b>	H3	H5	H7	H9	H11	H13	H17	H19	H23	H25
<b>Korrelatsiooni-kordaja</b>	0.85	0.96	0.81	0.97	0.42	0.36	0.58	0.94	0.97	0.85

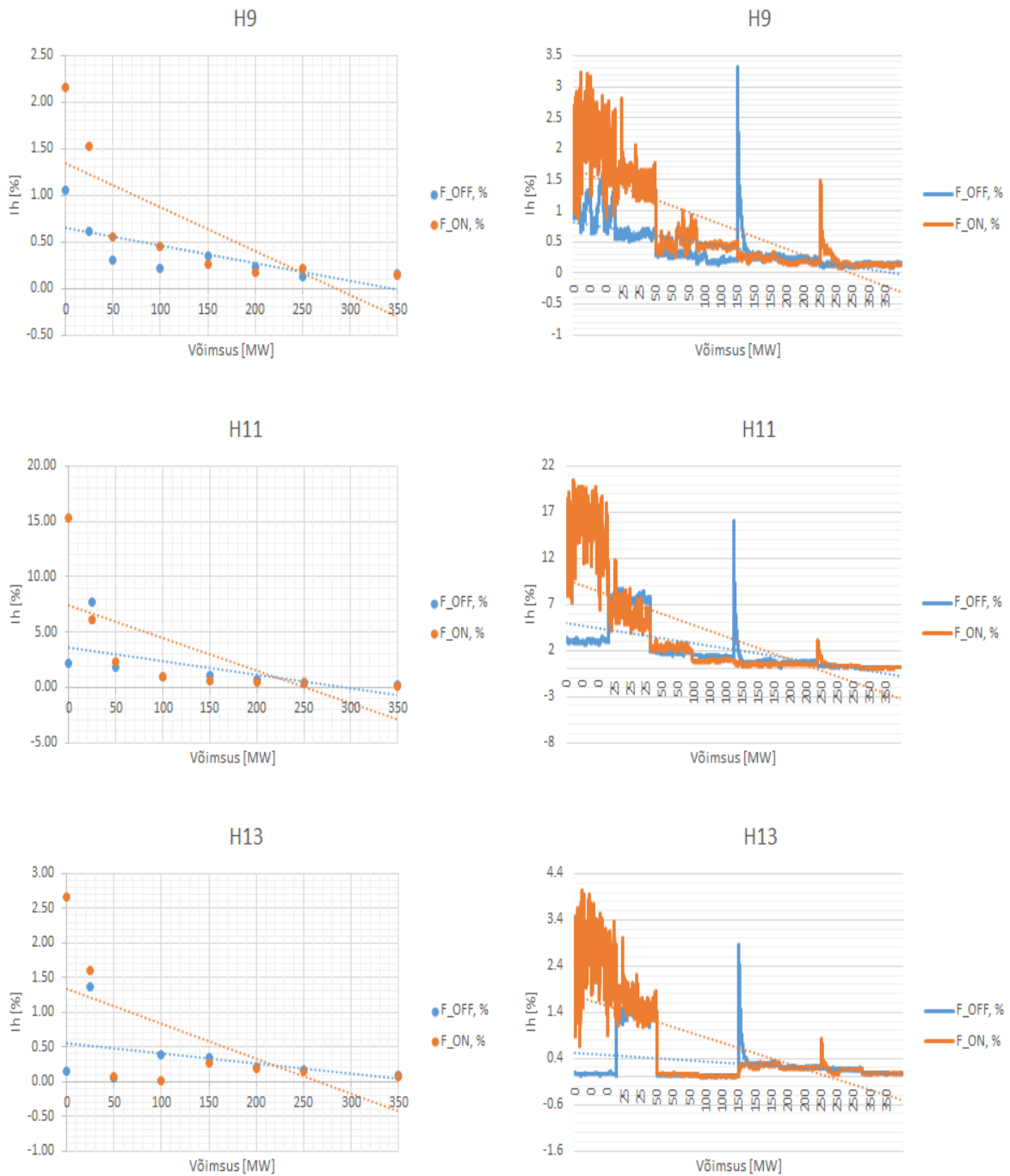
Sageduse reguleerimise välja lülitatud funktsiooni (F\_OFF) korral jäävad mõõtetulemused valdavalt samale tasemele. Suurimat hetkelist väärtust ilmutab vaid 150MW võimsuse juures registreeritud mõõtetulemus, kus 11. järku harmooniku puhul on I<sub>h</sub> tulemuseks registreeritud 16%. Samas hajuvusdiagrammidel ei ole 150MW võimsuse juures kõrgemaid väärtusi registreeritud, millest võib järeldada, et antud kõrgemad väärtused 150MW koormuse juures on põhjustatud võimsuse ümber lülitamisest, kus antud väärtus on hetkeline ning mööduva loomuga.



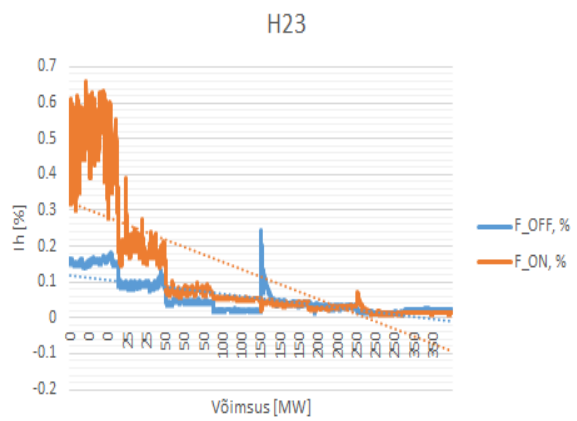
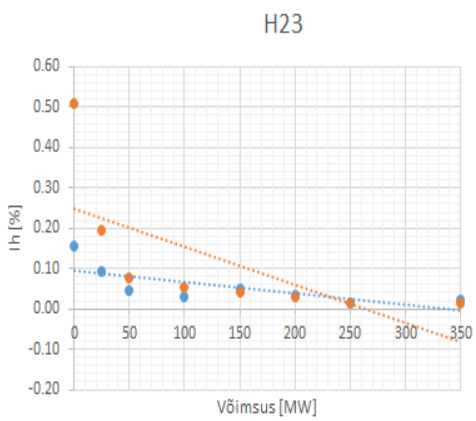
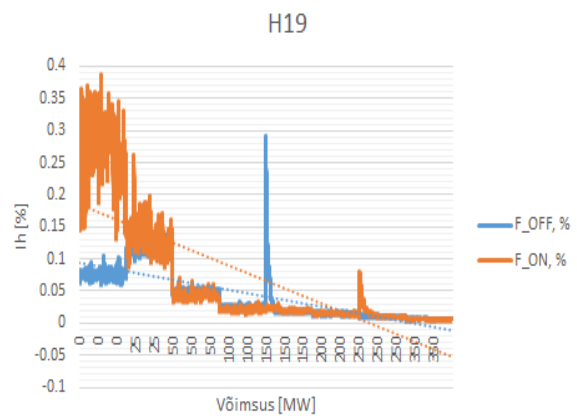
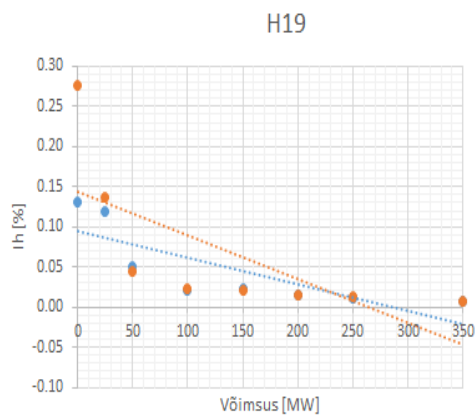
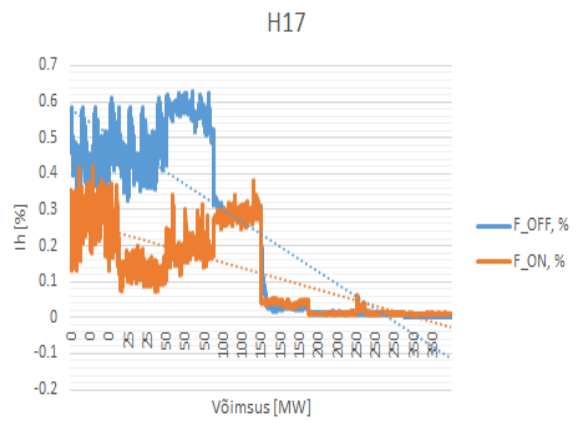
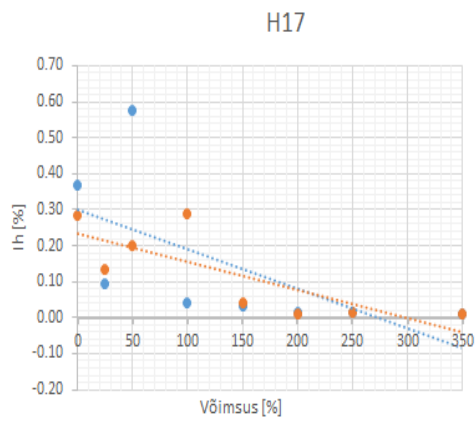
**Joonis 3.3. Paaritute vooluhaarmoonikute 20 minuti 2 sekundi väärtused Eesti – Soome võimsusvoo suunal (jätkub)**

Tabelis 3.5 toodud korrelatsioonikordajatest on näha, et sõltumata mõõtetulemuste erinevusest on F\_OFF ja F\_ON tulemuste vahel tugev korreleeruvus. Kõige väiksem korreleeruvus on arvatud 13. järku harmooniku puhul (0,36) ja tugevaim 23. järku (0,97). Tugevat korreleeruvust mõõtetulemuste vahel kinnitavad ka joonisel 3.3 kujutatud lineaarjooned, mis märgivad I<sub>h</sub> väärtuste langemist võimsuse kasvades. Analüüsidest joonisel 3.3 mõõtmistulemusi saame järeldada, et voolu harmoonikute osakaal on tunduvalt kõrgem madalamate koormuste juures, kus eelkõige mõjutab

mõõtmistulemuste väärtusi sageduse reguleerimise funktsioon. Kõige kõrgemat harmoonikute osakaalu on näha 0MW võimsuse juures ning kõige madalamat 350MW juures.

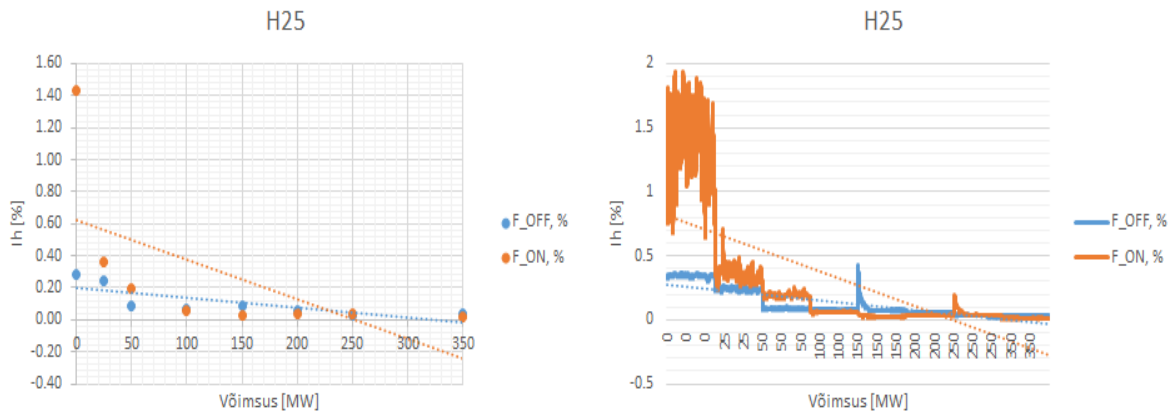


**Joonis 3.3. Paaritute vooluharmonikute 20 minuti 2 sekundi väärtused Eesti – Soome võimsusvoo suunal (jätkub)**



**Joonis 3.3. Paaritute vooluharmonikute 20 minuti 2 sekundi väärtused Eesti – Soome võimsusvoo suunal (jätkub)**





**Joonis 3.3. Paaritute vooluharmonikute 20 minuti 2 sekundi väärtused Eesti – Soome võimsusvoo suunal**

### 3.3.2 Vooluharmonikud Soome – Eesti võimsusvoo suunal

Järgnevas alapeatükis on kirjeldatud paaritute voolu harmoonikute karakteristikute (kuni 25. järguni) 20 minuti ja 2 sekundi agregeeritud mõõtetulemused Soome – Eesti võimsusvoo suunal. Mõõtmised teostati samade koormuste juures nagu seda tehti alapeatükis 3.3.1. Paaritute vooluharmonikute agregeeritud 20 minuti mõõtmistulemused Soome – Eesti võimsusvoo suunal on toodud tabelis 3.6.

Joonisel 3.4 ilmneb tendents, kus võrreldes voolu harmoonikute mõõtetulemusi Eesti – Soome võimsusvoo suunaga, näeme et kõrgemad väärtused on samuti 0MW võimsuse juures, kui sageduse reguleerimine oli sisse lülitatud. Kõrgemat väärtust on mõõdetud 11. järku harmooniku puhul, kus suhtelise voolu harmooniku väärtuseks on 27%. Madalamat mõõtetulemust on registreeritud 19. järku harmooniku puhul, kus mõõtetulemused jäävad 0,2 – 0,45%. Samuti võib näha üksikuid kõrgemaid väärtusi 200MW koormuse algfaasis, võib järeldada et antud nähtus on tingitud võimsuse ümber lülitamisest.

Analüüsidest mõõtetulemusi, kui sageduse reguleerimise funktsioon oli välja lülitatud, siis ilmneb nähtus, kus 9. järku harmooniku puhul on 2 sekundi mõõtetulemustes näha üksikuid kõrgemaid väärtusi, mis ei kajastu 20 minuti hajuvusdiagrammidel. Antud olukord võib olla tingitud spetsiifilise töörežiimiga mõõtepunkti, kuna väärtused on mööduva loomuga ning ei kajastu 20 minuti mõõtmistulemuste hajuvusdiagrammidel.

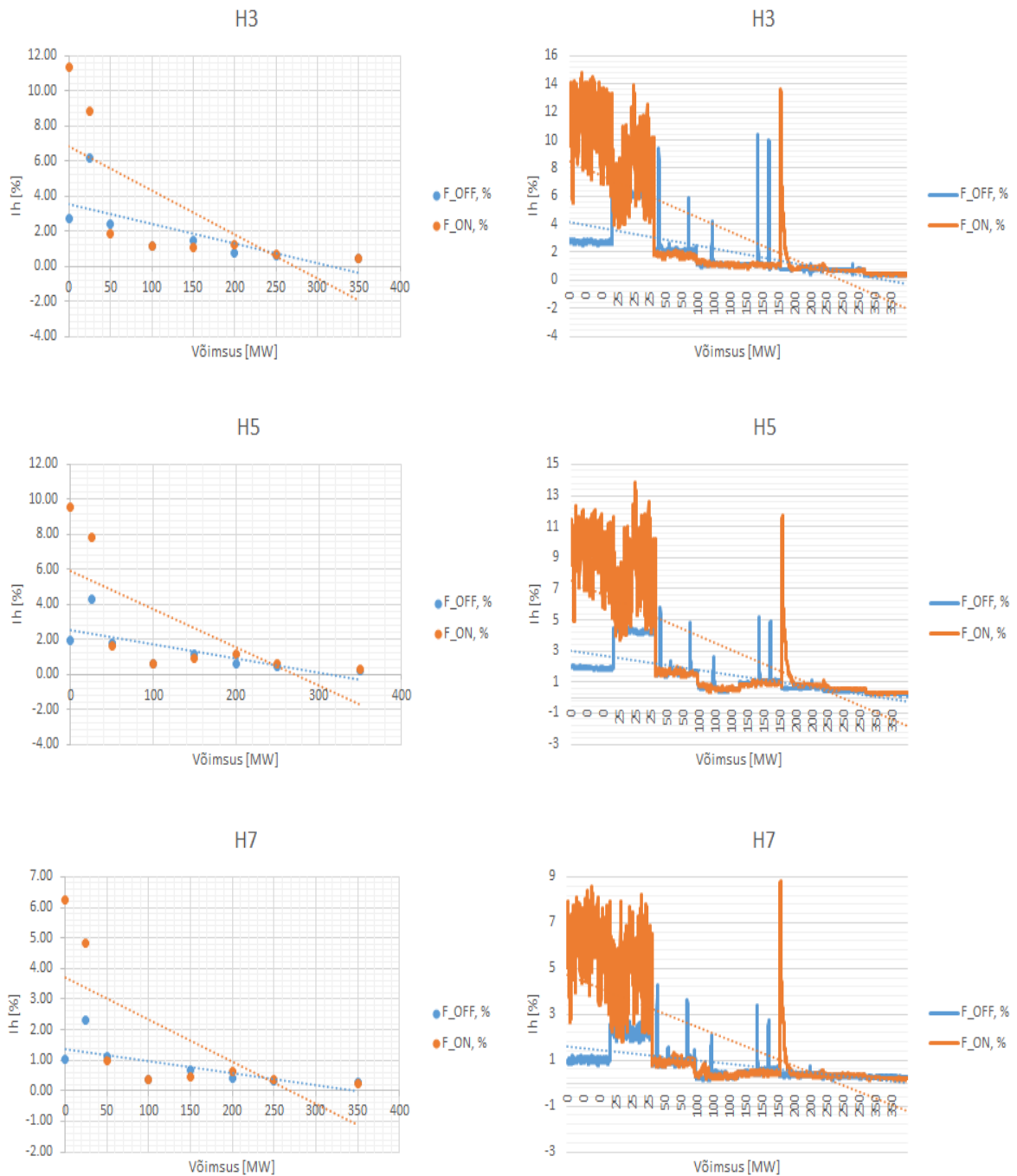
**Tabel 3.6. Paaritute vooluharmonikute 20 minutilised väärtused Soome – Eesti võimsusvoo suunal**

<b>Harmonikuteosakaal erinevate võimsustasemete juures</b>										
<b>Harmonikujärk</b>		<b>0MW</b>		<b>25MW</b>		<b>50MW50Mvar</b>		<b>100MW100Mvar</b>		
		F_OFF,%	F_ON,%	F_OFF,%	F_ON,%	F_OFF,%	F_ON,%	F_OFF,%	F_ON,%	
H3		2.74	11.33	6.14	8.83	2.38	1.85	1.19	1.19	
H5		1.93	9.57	4.32	7.84	1.75	1.61	0.62	0.61	
H7		1.04	6.23	2.30	4.82	1.11	0.97	0.37	0.37	
H9		0.36	1.50	0.92	1.11	0.49	0.26	0.19	0.21	
H11		3.91	19.71	2.66	15.29	3.35	3.23	1.19	1.41	
H13		0.08	3.05	0.90	2.34	0.06	0.04	0.03	0.03	
H17		0.57	0.30	0.16	0.27	0.44	0.52	0.16	0.21	
H19		0.05	0.35	0.10	0.25	0.05	0.04	0.02	0.02	
H23		0.11	0.31	0.14	0.23	0.07	0.05	0.03	0.03	
H25		0.25	0.94	0.21	0.74	0.21	0.15	0.10	0.10	
<b>Harmonikujärk</b>		<b>150MW</b>		<b>200MW</b>		<b>250MW</b>		<b>350MW</b>		
		F_OFF,%	F_ON,%	F_OFF,%	F_ON,%	F_OFF,%	F_ON,%	F_OFF,%	F_ON,%	
H3		1.47	1.10	0.75	1.21	0.63	0.69	0.44	0.45	
H5		1.19	0.94	0.63	1.15	0.44	0.58	0.23	0.30	
H7		0.66	0.47	0.39	0.62	0.31	0.36	0.30	0.21	
H9		0.30	0.16	0.14	0.22	0.13	0.12	0.09	0.10	
H11		0.72	0.81	0.57	1.40	0.49	0.32	0.18	0.28	
H13		0.28	0.27	0.16	0.30	0.11	0.19	0.07	0.09	
H17		0.04	0.02	0.02	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01	
H19		0.03	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	
H23		0.05	0.05	0.02	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	
H25		0.08	0.08	0.06	0.07	0.05	0.05	0.02	0.03	
<b>Korrelatsioonikordaja</b>										
<b>Harmonikujärk</b>	H3	H5	H7	H9	H11	H13	H17	H19	H23	H25
	0.75	0.77	0.72	0.61	0.80	0.49	0.84	0.74	0.88	0.84

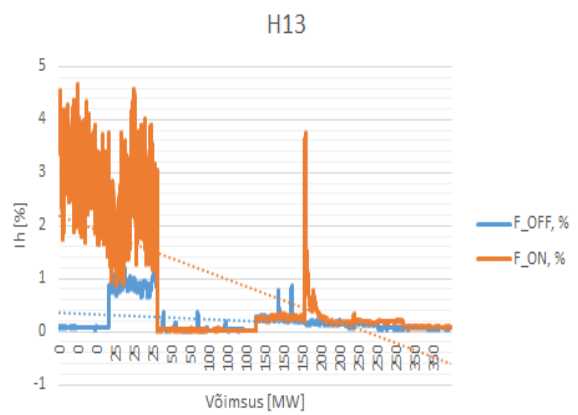
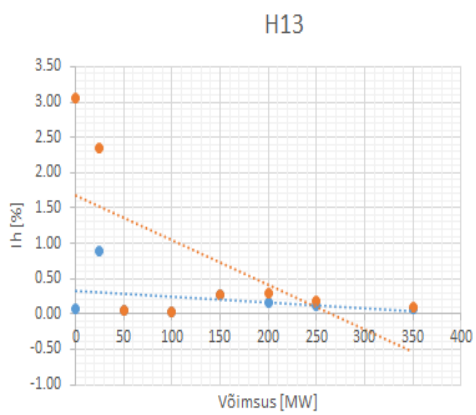
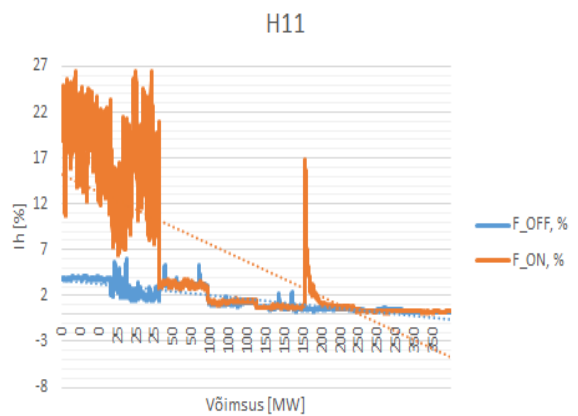
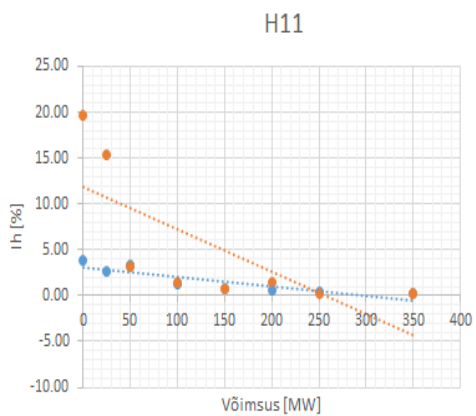
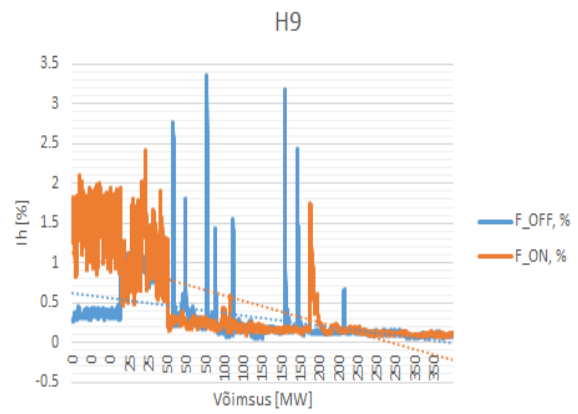
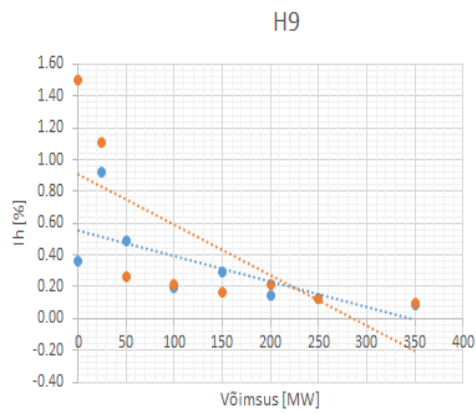
Üksikute kõrgemate väärtuste paremaks visualiseerimiseks on lõputöö lisas (lisa 2) toodud 2 sekundi voolu harmoonikute karakteristikute mõõtetulemuste võrdlused, kus on graafiliselt ära toodud harmoonikute osakaalu maksimum ja miinimum väärtused.

Hajuvusdiagrammide ja graafikute mõõtetulemustes võib näha mõningaid erinevusi, kus graafikutel esitatud mõõtetulemused on mõnevõrra kõrgemad. Antud olukord on tingitud mõõtetulemuste agregeerimisest, kus üksikud kõrgemad väärtused jäävad registreerimata, kuna olukord on toimunud lühikese ajaperioodil.

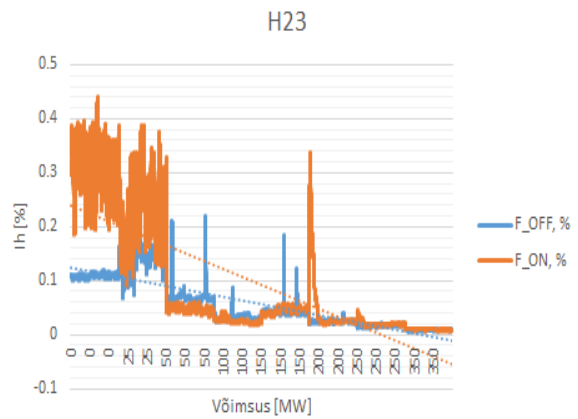
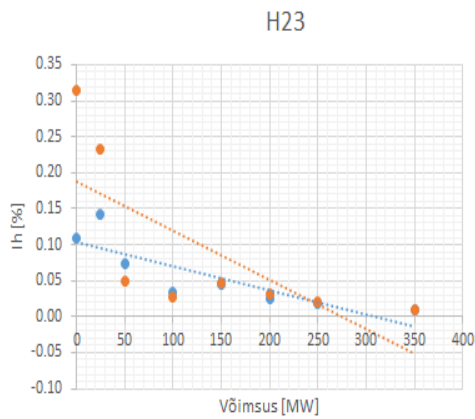
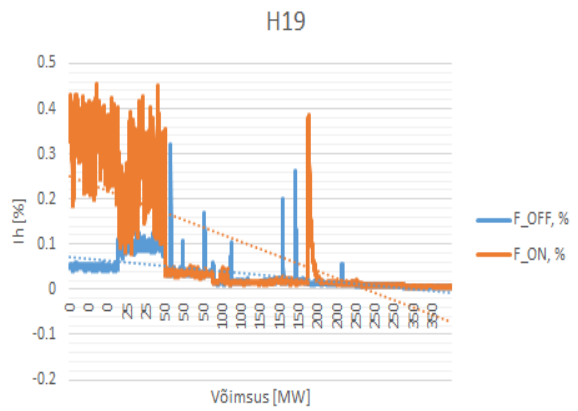
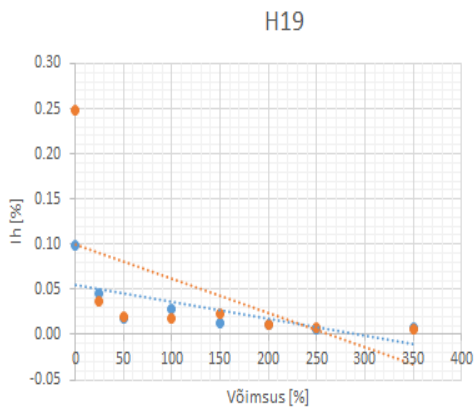
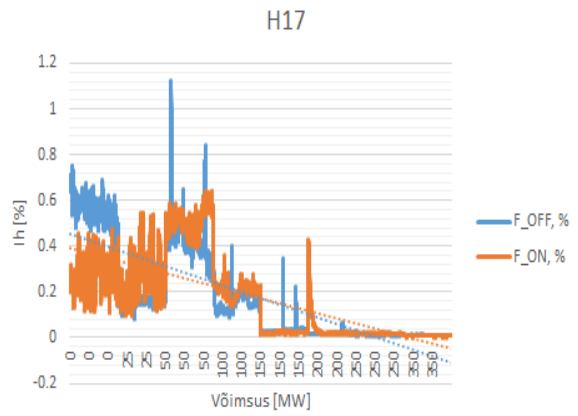
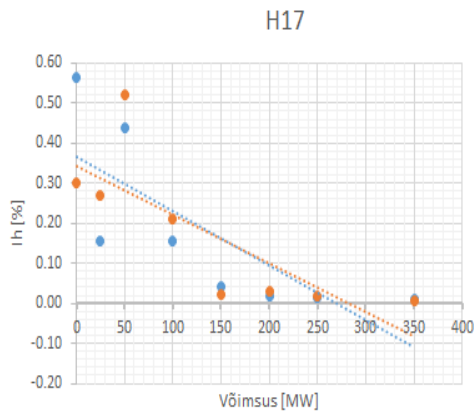
Võrreldes võimsusvoogude liikumise suundasi võib järeldada, et mõõtetulemustes suuri erinevusi ei ole, kus oleks näha lineaarjoonte langemist võimsuste kasvades ning tugevat korreleeruvust mõõtetulemuste vahel.



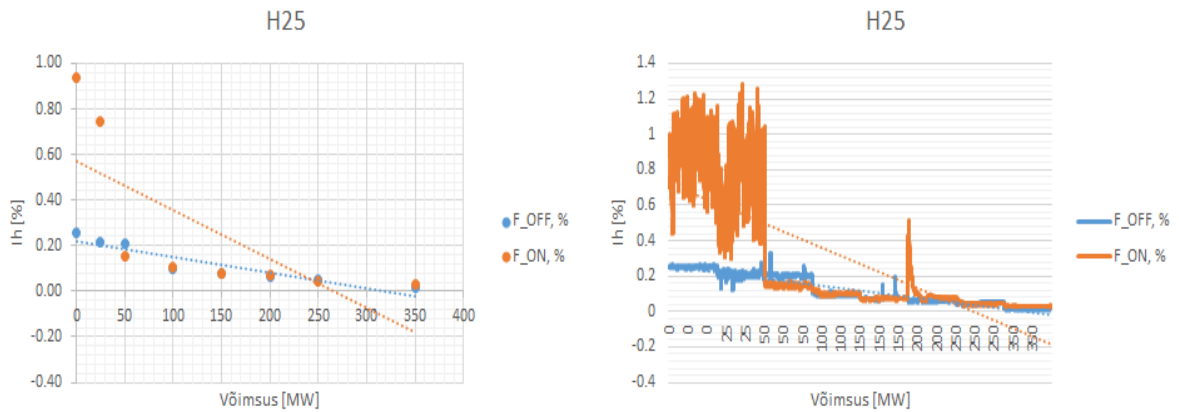
**Joonis 3.4. Paaritute voolu harmoonikute 20 minuti 2 sekundi väärtused Soome – Eesti võimsusvoo suunal (jätkub)**



**Joonis 3.4. Paaritute voolu harmoonikute 20 minuti 2 sekundi väärtused Soome – Eesti võimsusvoo suunal (jätkub)**



**Joonis 3.4. Paaritute voolu harmoonikute 20 minuti 2 sekundi väärtused Soome – Eesti võimsusvoo suunal (jätkub)**



**Joonis 3.4. Paaritute voolu harmoonikute 20 minuti 2 sekundi väärtused Soome – Eesti võimsusvoo suunal**

### 3.4 Harmoonutustegur

Harmoonutustegurit (THD) kasutatakse enamasti pinge moonutuste kirjeldamiseks, kuna pingepõhikomponent muutub ainult paari protsendi ulatuses, siis on THD peaaegu alati tähenduslik arv. Voolu harmoonutusteguri kujutamise on võrdlemise keeruline, kuna erinevalt pingest on voolu väärtus liitumispunktis mõnevõrra muutuv. Väikeste voolude korral võivad moonutused olla suured, kuna vooluharmoonikute emissioonid ei sõltu suurel määral genereeritavast ega tarbitavast võimsusest, mis aga ei avalda ohtlikku mõju elektrivarustusele [3].

Pinge ja voolu harmoonutusteguri väärtused on arvatud valemitega 3.3 ja 3.4 [3].

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2}}{U_1} \cdot 100\% \quad (3.3)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n I_i^2}}{I_1} \cdot 100\% \quad (3.4)$$

kus

$U_1$  – pingepõhikomponenti väärtus, V

$U_i$  – i-nda pingeharmooniku väärtus, V

$I_1$  – voolu põhikomponenti väärtus, A

$I_i$  – i-nda voolu harmooniku väärtus, A

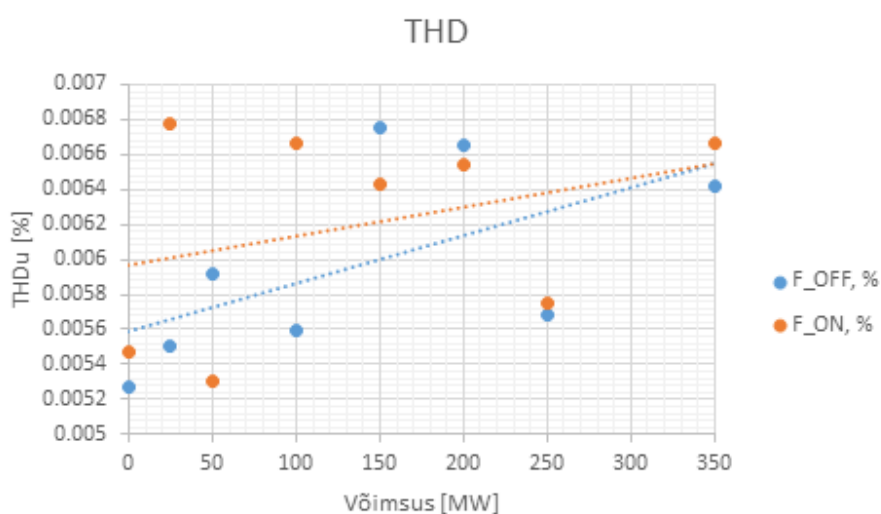
$i$  – harmooniku järk

Harmonutustegurile THD on kehtestatud Elering AS-i poolt hindamiskriteerium, kus 110 kV pingel ei tohi THD 99-protsentili väärtus ületada 3%, kus 330 kV võrgu hindamisel lähtutakse samast kriteeriumist [29].

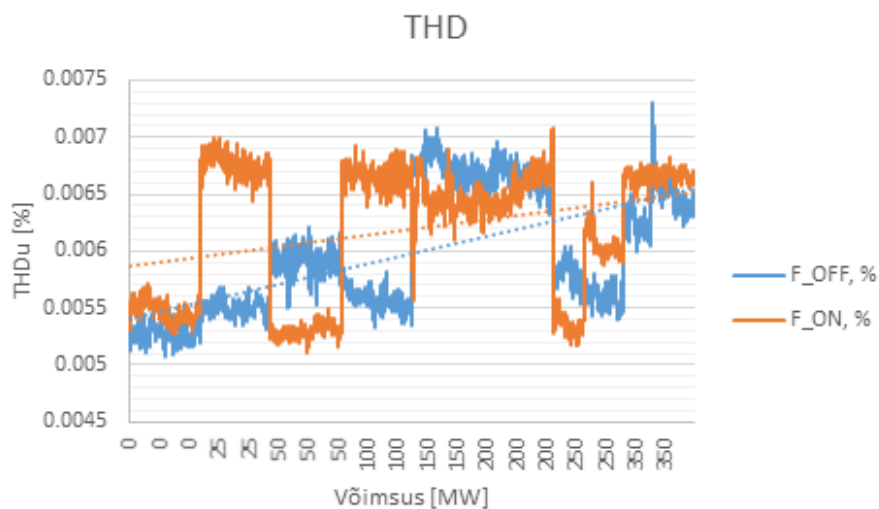
Järgnevates alapeatükkides on kokku võetud pinge ja voolu harmoonikute kogu perioodi hõlmavad andmed (2. kuni 50. järku harmoonikud)

### 3.4.1 Pinge harmoonutustegur Eesti – Soome võimsusvoo suunal

Eesti – Soome võimsusvoo suuna kogu perioodi hõlmavaid andmeid pinge harmoonutusteguri ( $THD_u$ ) kohta võtavad kokku joonised 3.5 ja 3.6.



Joonis 3.5.  $THD_u$  20 minuti andmed Eesti – Soome võimsusvoo suunal

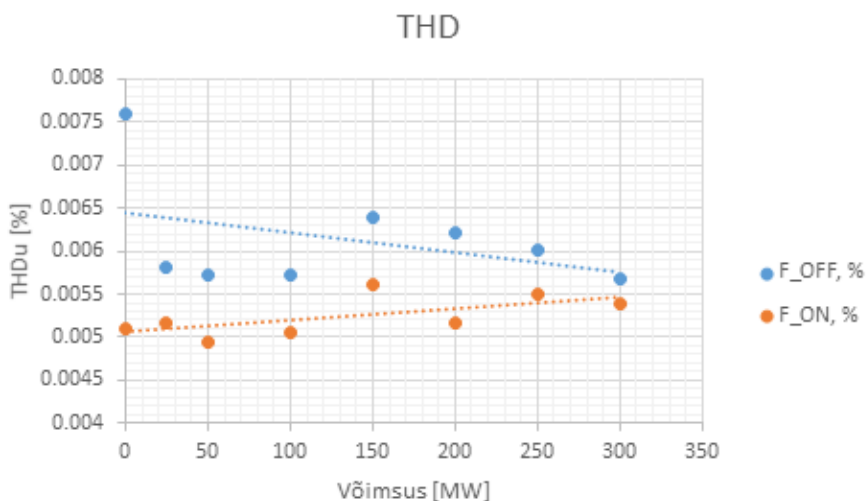


Joonis 3.6.  $THD_u$  2 sekundi andmed Eesti – Soome võimsusvoo suunal

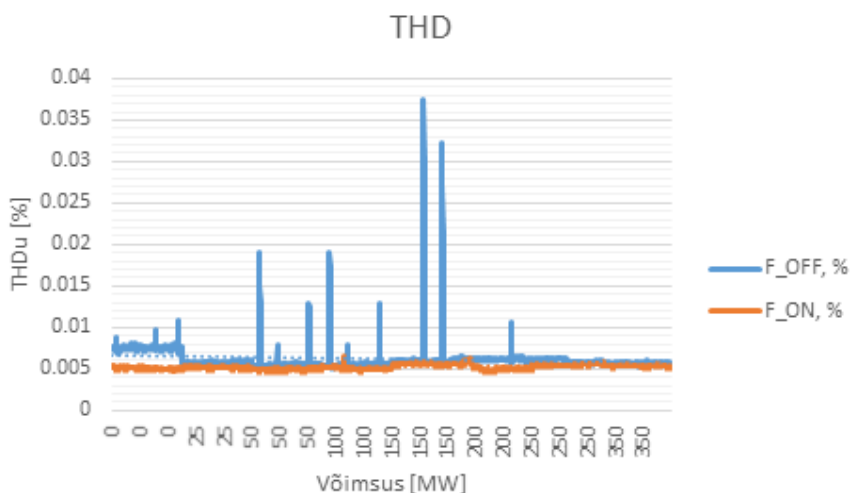
Analüüsid THD väärtusi võib järeldada, et kõik 99-protsentiili väärtused jäävad lubatud piiridesse (kõrgeim väärtus 0,0073% punktis 350MW, kui sageduse reguleerimine oli välja lülitatud). Võrreldes tulemusi 20 minuti hajuvusdiagrammi ja 2 sekundi graafikult, siis jäävad mõõtetulemused samadesse piiridesse. Tulenevalt sageduse reguleerimisest on mõõtetulemuste erinevusi näha võimsustel 25MW ja 100MW100Mvar, kus sageduse reguleemise sisse lülitatud funktsiooni puhul on tulemused kõrgemad.

### 3.4.2 Pinge harmoonutustegur Soome – Eesti võimsusvoo suunal

Joonistel 3.7 ja 3.8 on toodud pinge harmoonutusteguri 20 minuti 2 sekundi väärtused Soome – Eesti võimsusvoo suunal.



Joonis 3.7. THD<sub>u</sub> 20 minuti andmed Soome – Eesti võimsusvoo suunal



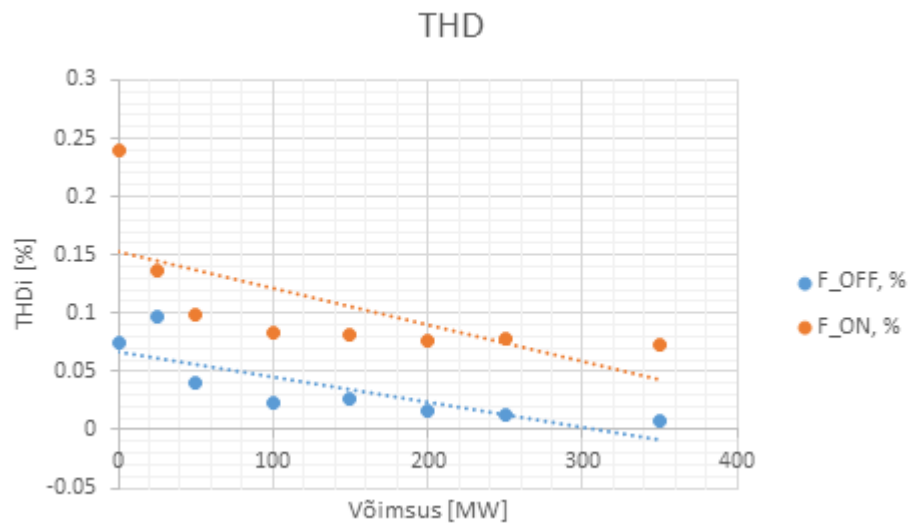
Joonis 3.8. THD<sub>u</sub> 2 sekundi andmed Soome – Eesti võimsusvoo suunal



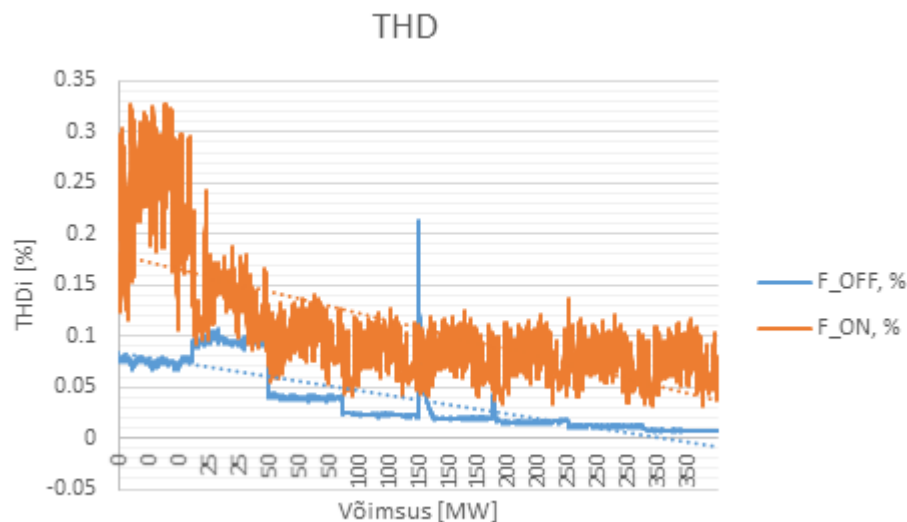
Võrreldes jooniseid, siis on näha mõõtmistulemuste erinevusi, kus 20 minuti mõõtmistulemuste kõrgeim väärtus on 0,0076%, kuid 2 sekundi kõrgeim mõõtmistulemus 0,037%. Joonisel 3.8 nähtub, et teatud ajahetkedel esineb kõrgemaid THD<sub>i</sub> väärtusi, ent on ebaselge mis on selle põhjuseks.

### 3.4.3 Voolu harmoonutustegur Eesti – Soome võimsusvoo suunal

Joonistel 3.9 ja 3.10 on toodud voolu harmoonutusteguri (THD<sub>i</sub>) 20 minuti ja 2 sekundi mõõtetulemuste andmed.



Joonis 3.9. THD<sub>i</sub> 20 minuti andmed Eesti – Soome võimsusvoo suunal



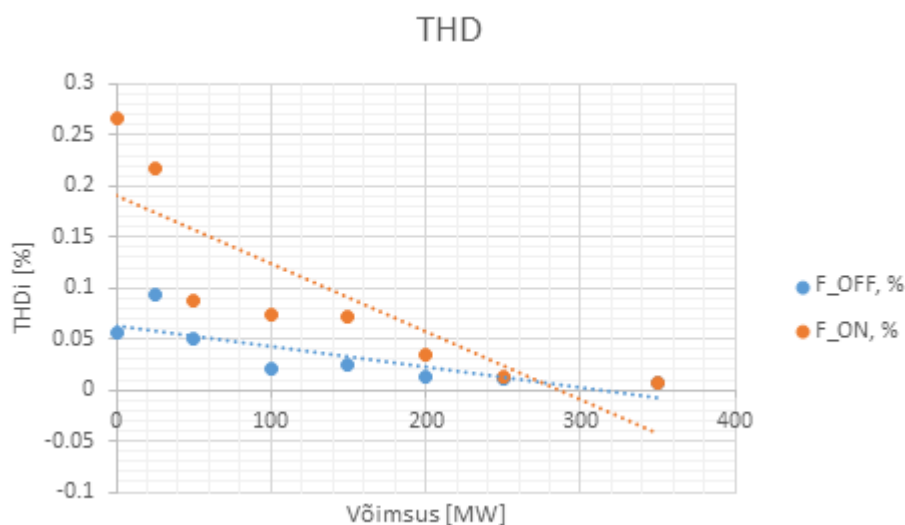
Joonis 3.10. THD<sub>i</sub> 2 sekundi andmed Eesti – Soome võimsusvoo suunal

Analüüsid THD<sub>i</sub> väärtusi võib näha, et kõik 99-protsentiili väärtused jäävad lubatud piiridesse. Kõrgeim mõõtmistulemus on mõõdetud joonisel 3.10, kus F\_ON režiimis oli THD<sub>i</sub> väärtus 0,33%, kus aga 20 minuti mõõtmistulemus sama võimsuse juures oli 0,24%. Kõrgemaid THD<sub>i</sub> väärtusi on mõlema joonise puhul täheldatud madalamate võimsuste juures, kus võimsuse kasvades voolu harmoonutusteguri väärtused langevad.

Joonisel 3.10 ilmneb nähtus, kus 150MW võimsuse (F\_OFF) juures on tavaolukorrast kõrgeim väärtus. Antud olukord võib olla tingitud koormuse ümber lülitamisest, kuna kõrgeim mõõtetulemus on lühiajaline ning mööduva iseloomuga.

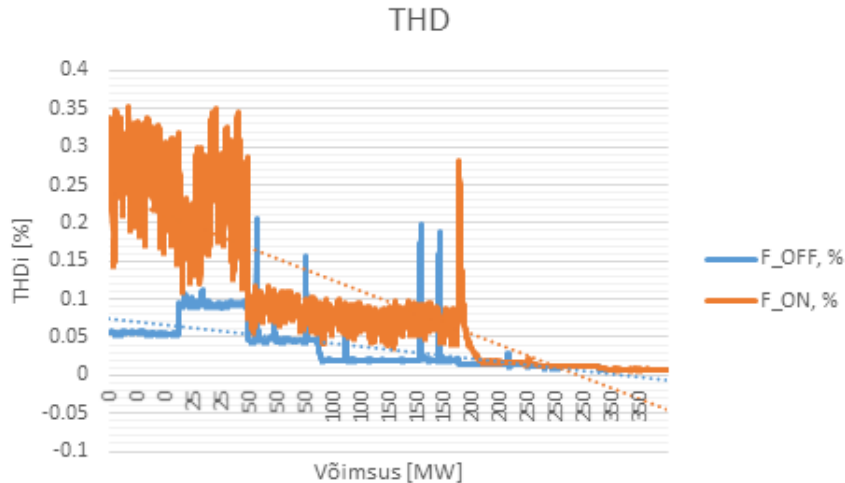
### 3.4.4 Voolu harmoonutustegur Soome – Eesti võimsusvoo suunal

Joonistel 3.11 ja 3.12 on toodud voolu harmoonutusteguri (THD<sub>i</sub>) 20 minuti ja 2 sekundi mõõtetulemused Soome – Eesti võimsusvoo suunal. Analüüsid THD<sub>i</sub> väärtusi võib näha, et kõik 99-protsentiili väärtused jäävad lubatud piiridesse. Kõrgeim THD<sub>i</sub> väärtus mõõdeti 0,34% joonisel 3.12, kus aga joonisel 3.11 mõõdeti 0,26%.



**Joonis 3.11. THD<sub>i</sub> 20 minuti andmed Soome – Eesti võimsusvoo suunal**

Joonisel 3.12 on näha mõningaid mõõtetulemuste kõikumisi, kus 150MW võimsuse juures ulatuvad mõõtmistulemused 0,04% kuni 0,2%. Selline nähtus võib olla tingitud spetsiifiliste töörežiimidega mõõtepunktis. Samuti on näha kõrgemat THD<sub>i</sub> väärtust 200MW võimsuse algfaasis, mis võib olla tingitud koormuse ümber lülitamisest, kuna kõrgeim väärtus on mööduva loomuga ning lühiajaline.



**Joonis 3.12. THD<sub>i</sub> 2 sekundi andmed Soome – Eesti võimsusvoo suunal**

Analüüsid pingeharmonikuteguri mõõtmistulemusi, siis selgus et kõik 99-protsentiili väärtused jäävad lubatud piiridesse. Kõrgeim THD<sub>u</sub> väärtus Eesti – Soome võimsusvoo suunal oli 0,0073% võimsusel 350MW ning Soome – Eesti võimsusvoo suunal 0,037% võimsusel 150MW. Mõlemate tulemuste korral oli sageduse reguleerimine välja lülitatud. Võimsusvoode võrdluses on näha, et sageduse reguleerimine mõjutab oluliselt Eesti – Soome võimsusvoo suunda, kus tulemuste erinevused on märgatavad. Analüüsid THD<sub>u</sub> osakaalu võimsuse kasvades, siis selgub et Eesti – Soome võimsusvoo suunal kasvab THD<sub>u</sub> osakaal koos võimsusega, kus aga Soome – Eesti suunal väärtused ei muutu.

Analüüsid THD<sub>i</sub> väärtusi võib näha, et kõik 99-protsentiili väärtused jäävad lubatud piiridesse. Kõrgeim mõõtmistulemus on mõõdetud joonisel 3.10, kus F\_ON režiimis oli THD<sub>i</sub> väärtus 0,33%, kus aga 20 minuti mõõtmistulemus sama võimsuse juures oli 0,24%. Kõrgemaid THD<sub>i</sub> väärtusi on mõlema võimsusvoo suuna puhul täheldatud madalamate võimsuste juures, kus võimsuse kasvades voolu harmoonikuteguri osakaal langeb. Samuti on näha mõlema võimsusvoo suundade puhul tavaolukorrast kõrgemaid väärtusi võimsuste muutumiste hetkedel. Antud olukord võib olla tingitud koormuse ümber lülitamisest, kuna kõrgemad THD<sub>i</sub> väärtused on lühiajalised ning mööduva iseloomuga.

Eelnevalt on toodud harmoonikute mõõtetulemuste väärtused ja nende analüüs. Tulemuste analüüsist saab järeldada, millist mõju avaldab Estlink 1 lahtris asuv pingejagur harmoonikutele erinevatel koormustel, võimsusvoo suundadel ja sõltuvalt sageduse reguleerimise funktsioonist. Tulemustest on näha, et harmoonikute mõõtmistulemused on väga erinevad sõltuvalt koormusest, võimsusvoost ning sageduse reguleerimisest. Pingeharmonikute võimsusvoode liikumise suundade

võrdluses võib järeldada, et suhteliste pingeharmonikute väärtused Eesti – Soome võimsusvoo suunal on ebastabiilsemad, kui Soome – Eesti võimsusvoo suunal. Analüüsidest Eesti – Soome võimsusvoo mõõtmistulemusi, siis on näha läbivat momenti, kus koormuse muutmine mõjutab harmoonikute väärtusi oluliselt rohkem kui Soome – Eesti võimsusvoo mõõtetulemusi. Samuti on näha võimsusvoogude võrdluses erinevusi sageduse reguleerimis funktsioonist tingitud mõõtetulemustes. Eesti – Soome võimsusvoo suuna mõõtmistulemustes ilmneb, et kõrgemaid suhtelisi harmooniku väärtusi on mõõdetud, kui sageduse reguleerimine oli sisse lülitatud, kus samas Soome – Eesti võimsusvoo suunal mõõdeti kõrgemaid väärtusi, kui sageduse reguleerimine oli välja lülitatud. Tulenevalt sellest võib järeldada, et sageduse reguleerimine funktsioon mõjutab pinge kvaliteeti Eesti – Soome võimsusvoo suunal rohkem. Võrreldes 20 minuti hajuvusdiagramme vastavalt võimsustele, siis jaotuvad tulemused harmooniku järkudel erinevalt. Kõige suuremat erinevust vastavalt võimsusele on näha 5 järku harmooniku puhul, kus võimsuse kasvades kui sageduse reguleerimine on sisse lülitatud ulatub suhtelise harmooniku pinge 0,08 – 0,33%-ni. Analüüsidest harmoonikute osakaalu võimsuse kasvades, siis selgub tendents kus ainult 11. järku harmooniku puhul langeb harmoonikute osakaal (mõlema mõõtmistulemuse puhul) võimsuse kasvades.

Voolu harmoonikute mõõtmistulemuste võrdluses selgus tendents, kus voolu harmoonikute osakaal on tunduvalt kõrgem madalamate koormuste juures, kus eelkõige mõjutab mõõtmistulemuste väärtusi sageduse reguleerimise funktsioon. Kõige kõrgemat harmoonikute osakaalu on näha 0MW võimsuse juures, kus suhtelise harmooniku pinge väärtus ulatub 27% - ni. Sageduse reguleerimise välja lülitatud funktsiooni korral jäävad mõõtetulemused valdavalt samale tasemele. Analüüsidest mõõtetulemusi, kui sageduse reguleerimise funktsioon oli välja lülitatud, siis ilmneb nähtus kus 9. järku harmooniku puhul on 2 sekundi mõõtetulemustes üksikuid kõrgemaid väärtusi, mida on täheldatud ka ülejäänud harmoonikute puhul, kuid pole visuaalselt nii tugevalt esindatud.

Antud olukord võib olla tingitud spetsiifilise töörežiimiga mõõtepunkti, kuna väärtused on mööduva loomuga ning ei kajastu 20 minuti mõõtmistulemuste hajuvusdiagrammidel. Analüüsidest pinge harmoonutusteguri mõõtmistulemusi, siis selgus et kõik 99-protsentiili väärtused jäävad lubatud piiridesse. Kõrgemaid voolu harmoonutusteguri väärtusi on mõlema võimsusvoo suuna puhul täheldatud madalamate võimsuste juures, kus võimsuse kasvades voolu harmoonutusteguri osakaal langeb.

Autor on seisukohal, et põhjalikumalt on vaja uurida sageduse reguleerimise funktsioonist tingitud kõrgemaid pinge harmoonikute tekke põhjuseid. Täpsemalt tuleb uurida, miks kajastuvad

kõrgemad pinge harmoonikute väärtused Eesti – Soome võimsusvoo suunal, kui sageduse reguleerimise funktsioon oli sisse lülitatud. Lisaks tuleb uurida nii pinge kui ka voolu harmoonikute puhul üksikute kõrgemate mõõtetulemuste tekke põhjuseid ning millest on tingitud võimsusvoode mõõtmistulemuste erinevused. Teostada tuleks põhjalikumaid mõõtmisi, mis võimaldaksid mõõta harmoonikute nurka, mille tulemusel saaks veelgi täpsemad mõõtetulemused mida edasi analüüsida.

## KOKKUVÕTE

Viimastel aastatel on ülekandevõrkudes oluliselt tõusnud huvi elektrikvaliteedi hindamise ja analüüsimise vastu. Rohkem on hakatud tähelepanu pöörama harmoonikutele ja nende mõjule elektrivõrgu seadmetele. Lisaks, on selle raames põhjalikumalt uurima hakatud harmoonikute modelleerimist elektrivõrkudes, mis võimaldab täpselt analüüsida harmoonikute tekkimist ja nende mõju jõuelektroonikaseadmetele. Harmoonikute modelleerimise arendamiseks on oluline omada reaalseid mõõtetulemusi, mida nii akadeemilisest kui praktilisest vaatepunktist oleks võimalik kasutada mudelite valideerimiseks ja tulemuste hindamiseks.

Lõputöö eesmärk oli uurida Estlink 1 alalisvooluühenduse harmoonikute karakteristikuid erinevates talitusolukordades. Täpsemalt vaadeldi harmoonikute karakteristikuid alalisvooluühenduse erinevate võimsustasemetel juures ning erineva võimsusvoo korral. Lisaks uuriti Estlink 1-le iseloomuliku sagedusejuhtimise funktsiooni mõju harmoonikute emissioonile. Töö teostamiseks viidi läbi Harku alajaamas praktilised mõõtmised, milleks kasutati standardi kohaselt klass A kvaliteedianalüsaatorit. Mõõtmised toimusid perioodil 11.03.19-18.03.2019, kus kvaliteedianalüsaatoriga salvestati Estlink 1 ping- ja vooluharmoonikuid.

Lõputöö esimeses osas on antud ülevaade elektrikvaliteedist, kirjeldatakse täpsemalt harmoonikuid, nende tekkepõhjuseid ja mõju seadmetele. Samuti antakse ülevaade mõningatest Eestis kasutusel olevatest normdokumentidest, millest harmoonikute mõju hindamisel ja mõõtmisel tuleb lähtuda.

Teises osas on kirjeldatud lõputöö raames teostatud mõõtmiste meetodikat ja antakse ülevaade mõõtmiste protsessist. Kirjeldatud on mõõtmiste tarbeks koostatud katsekava ja eesmärgi, kasutatud mõõteseadet ja katseskeemi. Mõõtmised viidi läbi standardile EVS-EN-61000-4-30 A-klassi täpsuse nõuetele vastava kvaliteedianalüsaatoriga. Lisaks antakse põhjalik ülevaade Estlink 1 ülekandesüsteemist ning kasutuses olevast konverterjaamast. Kirjeldatakse konverterjaama ülekandesüsteemi tehnoloogiat ja tuuakse välja põhilised näitajad.

Lõputöö kolmandas peatükis on selgitatud mõõtetulemuste analüüsi meetodikat ja on teostatud mõõtmistulemuste analüüs. Vastavalt lõputöö ülesande püstitusele mõõdeti ping- ja vooluharmoonikute väärtusi erinevatel koormustel ning võimsusvoo suundadel. Samuti analüüsiti tulemusi vastavalt sageduse reguleerimise funktsioonile, kus hinnati sageduse reguleerimise mõju harmoonikute väärtustele.

Mõõtetulemuste analüüsimiseks kasutati arvutusprogrammi Matlab, mida kasutati mõõtetulemuste analüüsi lihtsustamist andmete agregeerimiseks kahele ajaperioodile. Selle eesmärgiks oli võrrelda mõõtmistulemuste erinevusi, veenduda andmete täpsuses ja vaadata agregeerimise mõju tulemustele.

Pingeharmonikute mõõtetulemuste analüüsist selgub, et mõõdetud parameetrid püsivad normide piires. Kõige kõrgemat harmooniku pinge väärtust on mõõdetud Soome – Eesti võimsusvoo suunal, kus 150MW võimsuse juures ulatub 3. järku harmooniku väärtus 2,3%. Eesti – Soome võimsusvoo suunal jäi kõige kõrgem mõõdetud väärtus aga alla 0,5%. Sageduse reguleerimisest tingitud kõige suuremat erinevust on täheldatud Eesti – Soome võimsusvoo suunal 5. järku harmooniku puhul, kus 350MW võimsuse juures on mõõtetulemuste erinevus 0,3%. Samuti tuleb tähelepanu pöörata Soome – Eesti võimsusvoo suunal esinevate üksikute kõrgemate harmoonikute väärtustele, kus näiteks 150MW võimsuse juures, kui sageduse reguleerimine oli välja lülitatud, esines kõigis paaritutes harmoonikutes normaalolukorrast kõrgemaid väärtusi. Antud olukord võib olla tingitud spetsiifilise töörežiimiga mõõtepunktis, kuna mõjutatud on kõik harmoonikud konkreetsel ajahetkel. Samuti on graafikutelt näha kõrgemaid harmoonikute väärtusi koormuste muutumiste hetkedel, autor on seisukohal, et antud olukord on põhjustatud võimsuste ümberlülitamisest.

Kõige märkimisväärsemaid pingeharmonikute väärtuste erinevusi on näha võimsusvoogude liikumissuundade võrdluses. Analüüsi põhjal koostatud graafikutelt selgub, et harmoonikute väärtused Eesti – Soome võimsusvoo suunal on tunduvalt ebastabiilsemad, kui Soome – Eesti võimsusvoo suunal. Mõõtmistulemuste võrdluses on näha läbivat olukorda, kus koormuse muutmine mõjutab harmoonikute väärtusi oluliselt rohkem Eesti – Soome võimsusvoo suunal. Samuti on näha võimsusvoogude võrdluses erinevusi sagedusreguleerimise funktsioonist tingitud mõõtetulemustes. Eesti – Soome võimsusvoo suuna mõõtmistulemustes ilmneb olukord, et kõrgemaid suhtelisi harmooniku väärtusi on mõõdetud olukorras, kui sageduse reguleerimine oli sisse lülitatud, kuid Soome – Eesti võimsusvoo suunal mõõdeti kõrgemaid väärtusi, kui sageduse reguleerimine oli välja lülitatud. Sellest võib järeldada, et sageduse reguleerimise funktsioon mõjutab pingekvaliteeti Eesti – Soome võimsusvoo suunal märkimisväärselt rohkem aga samas võib tulemus olla mõjutatud töö autorile ettenägematutest tingimustest ja andmete puudulikest.

Vooluharmonikute analüüsis ilmselt ilmnes tendents, kus kõrgeimaid mõõtetulemusi on kõikide harmoonikute puhul näha madalate võimsuste juures. Kõige kõrgemaid väärtusi mõõdeti 11. järku harmooniku puhul, kus Eesti – Soome suunal oli harmooniku väärtus 19% ning Soome – Eesti võimsusvoo suunal 27%. Mõlema võimsusvoo suunal saadud tulemused olid mõõdetud, kui sageduse reguleerimine oli sisse lülitatud. Selle funktsiooni puudumisel püsisid väärtused normi

piires. Sellest võib järeldada, et sagedusreguleerimise funktsioon mõjutab oluliselt harmoonikute väärtusi eelkõige madalamatel võimsustel. Võrreldes mõõtmistulemusi Elering AS-i poolt kehtestatud vooluharmonikute piirväärtustega, siis saab järeldada et lubatud piirväärtusi ületavad 3., 5., 7., 9., 11. ja 13. järku harmoonikud. Samas tuleb täheldada, et antud piirväärtuste ületused on lühiajalised ja mõõtmiste pikkus ei luba hinnata nende standardikohast piirväärtuste ületamist pikema aja jooksul. Samuti on näha, et andmete agregeerimisel ei kajastu pikemas perioodis üksikuid kõrgemaid väärtusi, mis ei kajastu ka nende hajuvusdiagrammidel. Nimetatud erinevus võib olla tingitud spetsiifilise töörežiimiga mõõtepunktides, kuna väärtused on mööduva loomuga ning lühiajalised. Samuti tuleb tähelepanu pöörata ka võimsuste muutumistele, kus üksikute võimsuste juures on täheldatud kõrgemaid harmoonikuid ümberlülitamiste hetkedel.

Pingeharmonootusteguri *THD* väärtused jäävad mõlemal võimsusvoo suunal lubatud piiridesse, kus kõrgeim väärtus Eesti – Soome suunal on 0,0073% võimsusel 350MW ning Soome – Eesti suunal 0,037% võimsusel 150MW. Analüüsides vooluharmonootusteguri *THD* väärtusi, selgub et kõik 99-protsentiili väärtused jäävad lubatud piiridesse. Kõrgeimaid väärtusi on täheldatud mõlema võimsusvoo suunal madalate võimsuste puhul, kui sageduse reguleerimine oli sisse lülitatud, mis kajastus ka üksikute voolu harmoonikute mõõtmistel.

Lõputöö tulemuste põhjal saab anda esialgse hinnangu Estlink 1 harmoonikute karakteristikutele. Täpsema informatsiooni saamiseks harmoonikute karakteristikute ja mõjurite tendentsi kohta tuleb teostada täiendavaid mõõtmisi pikema aja jooksul ja detailse kvaliteedimõõteseadmega, sest käesoleva töö tulemusi ei ole võimalik põhjalikult täpseks hinnata. Järgmiste mõõtmiste korral annab olulist kasu ka harmoonikute faasinurga mõõtmine. Lisaks teeb töö autor ettepaneku uurida täpsemalt sagedusreguleerimise funktsiooni mõju harmoonikute väärtusele.



## SUMMARY

The importance of measuring and analysing the electrical power quality has risen more and more in the transmission networks. Problems regarding the operation of power electronic devices has made the monitoring of harmonics more important to study their influence to network devices. Moreover, this has increased the studies for harmonic modelling. For this purpose, it is necessary to evaluate harmonic emissions of HVDC (and other power electronic installations) to further investigate this problem. Real life measurements can give an valuable contribution to these studies, e.g for harmonic modelling, these measurements can provide information for model validation and results assessment.

The purpose of this final thesis was to investigate the characteristics of Estlink 1 HVDC harmonic in different operating points. These operating points included different power flow direction, different power of the HVDC link and the influence of frequency control function to the harmonics emission. For this work, practical measurements of current and voltage harmonics were carried out in the period of 11.03.2019-18.03.2019. Class A power quality measurement device was used for measurements in the Harku substation.

The first chapter of the thesis provides an overview of electrical power quality with the focus on harmonics. Their description, formation and effects to other network devices is also given. For more information, an overview of the standards used in Estonia for harmonic measurements and assessment is provided.

The second chapter describes the measurement methodology, which gives an overview of the measurement process. The measurement scheme and purpose are described for all measurement purposes. The measurements were carried out according to the standard EVS-EN-61000-4-30 with a quality analyser complying with the requirements of class A measurement device. Furthermore, a thorough overview of the Estlink 1 HVDC transmission system and its conversion station is given.

The third chapter of the final thesis consists of the introduction to result analysis methodology and its implementation. To characterise harmonic emission of the HVDC link the values of voltage and current harmonics were measured in different operating points. Results were analysed based on the power of the link, the direction of power flow. Moreover, the influence of the frequency control function was studied.

Massive amounts of data were gathered from the results. MatLab program was used for aggregating the measurement results for better understanding. For this purpose, the data was

aggregated over two periods of time to compare the differences in measurement results and to verify the accuracy of the data.

Results for voltage harmonics show that the measured parameters are within the limits. The value of the highest voltage harmonic was measured in the power flow direction of Finnish – Estonian where at the power of 150MW 3<sup>th</sup> order harmonic value is 2.3%. However, the highest measured value for the Estonian – Finnish direction was below 0.5%. The most significant difference due to the frequency adjustment has been observed in the Estonian-Finnish direction. In this case for 350MW, the 5<sup>th</sup> order of the harmonics show the measurement results of 0.3%. Attention should also be paid to the values of individual higher harmonics in the Finland-Estonia power flow direction, where, for example at 150MW capacity, when the frequency control function was switched off. This situation can be attributed to a specific operating mode at the metering point, since all the harmonics are affected at a given point in time. It is also seen from the graphs that higher harmonics values at moments of power changes can lead to the conclusion that this situation is caused by switching capacities.

The most notable differences between the values of voltage harmonics are seen between the direction of the power flow. It is evident from the results that the values of harmonics in the direction of the Estonian – Finnish power flow are far more unstable than the Finnish-Estonian power flow. The comparison of the measurement results show a situation where the change in the harmonics is more significant when the power flow is in the direction of Estonia – Finnish. There can be also made a comparison for the influence of frequency control. The measurement results of the Estonian – Finnish power flow direction reveal that higher relative harmonic values have been measured when the frequency control function is on. On the other hand, in Finland – Estonia direction the measured harmonic values are higher when than the frequency control function is switched off. Consequently, it can be concluded that the frequency adjustment function has a significant impact on the voltage quality in the Estonian – Finnish capacity flow direction. However, it may be also influenced by unknown measures which cannot be taken into account because of the quality of the measurement results.

An analysis of the current harmonics revealed a tendency where the highest measurement results are visible at low power for all harmonics. The highest values were measured at 11<sup>th</sup> order. Harmonic values of 19% in the Estonian-Finnish power flow direction and 27% in the Finnish-Estonian power flow direction. The values obtained for both power flow directions were measured when the frequency control function was turned on. Turning off this function influences the harmonics, which remained within the limits. Given the tendency, the frequency control function has a significant impact on the values of harmonics, particularly at lower capacities. In comparison

with the values of the flow harmonics established by Elering AS it can be concluded that the permitted limit values exceed the limits of 3, 5, 7, 9, 11. and 13. order harmonics. Attention also needs to be paid to changes in power in which point the higher harmonics have been observed at the moment of switching in individual capacities.

The values of the voltage harmonic coefficient THD remain within the limits of both power flow directions, where the highest value in the Estonia-Finland direction is 0.0073% of the capacity of 350MW and the Finnish – Estonian direction at 0.037% of the power of 150MW. Higher THD values were observed in shorter timescale. However, it can be argued that all the 99-percentile values of the THD remain within acceptable limits. The highest values have been observed for both power flow direction for low capacities when the frequency adjustment was switched on, which was also reflected in the measurements of the individual flow harmonics.

The results of this thesis gives an initial assessment of the harmonics characteristics of Estlink 1 HVDC link. Further measurements and research is needed for a more detailed analysis with longer measurement periods and more accurate measurement device. The author of this work suggests to use a measurement device with the capability of measuring harmonic angles for a more profound assessment. Furthermore, a study is proposed to clarify the influence of the frequency control function to harmonic emission fo these types of HVDC links.

## KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] IEC, IEC 61000-4-30 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods, 2008: IEC.
- [2] A. Božiček, B. Blažič, E. Bećirović, J. Milanović, M. Löper, J. Kilter, T. Trummal, S. Hellmuth, M. Kuschke ja K. Strunz, Influence of PQ disturbances on operation of PE rich power networks, Migrate, 2018.
- [3] M. Meldorf, H. Tammoja, Ü. Treufeldt ja J. Kilter, Jaotusvõrgud, Tallinn: TTÜ, 2007.
- [4] M. A. Masoum ja E. F. Fuchs, Power Quality in Power Systems and Electrical Machines, Imprint, 2015.
- [5] Eesti standard, EVS-EN 50160:2010 Avalike elektrivõrkude pinge tunnussuurused, Eesti standardikeskus, 2011.
- [6] G. Levačić, A. Župan ja M. Čurin, „An overview of harmonics in power transmission networks,“ Researchgate, [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/325494296\\_An\\_overview\\_of\\_harmonics\\_in\\_power\\_transmission\\_networks](https://www.researchgate.net/publication/325494296_An_overview_of_harmonics_in_power_transmission_networks). [Kasutatud 02 01 2020].
- [7] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso ja H. W. Beaty, Electrical Power Systems Quality, McGraw Hill Professional, 2012.
- [8] Energiatalgud, „Elektrienergia kvaliteet Elering AS 110 kV võrgus,“ [Võrgumaterjal]. Available: [https://energiatalgud.ee/img\\_auth.php/c/cd/Elering\\_AS.\\_Elektrienergia\\_kvaliteet\\_Elering\\_AS\\_110\\_kV\\_v%C3%B5rgus.pdf](https://energiatalgud.ee/img_auth.php/c/cd/Elering_AS._Elektrienergia_kvaliteet_Elering_AS_110_kV_v%C3%B5rgus.pdf). [Kasutatud 28 10 2019].
- [9] IEC, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current  $\leq 16$  A per phase), Eesti standardikeskus, 2019.
- [10] J. Sun, G. Wang, X. Du ja H. Wang, „A Theory for Harmonics Created by Resonance in Converter-Grid Systems,“ IEEE, [Võrgumaterjal]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/>

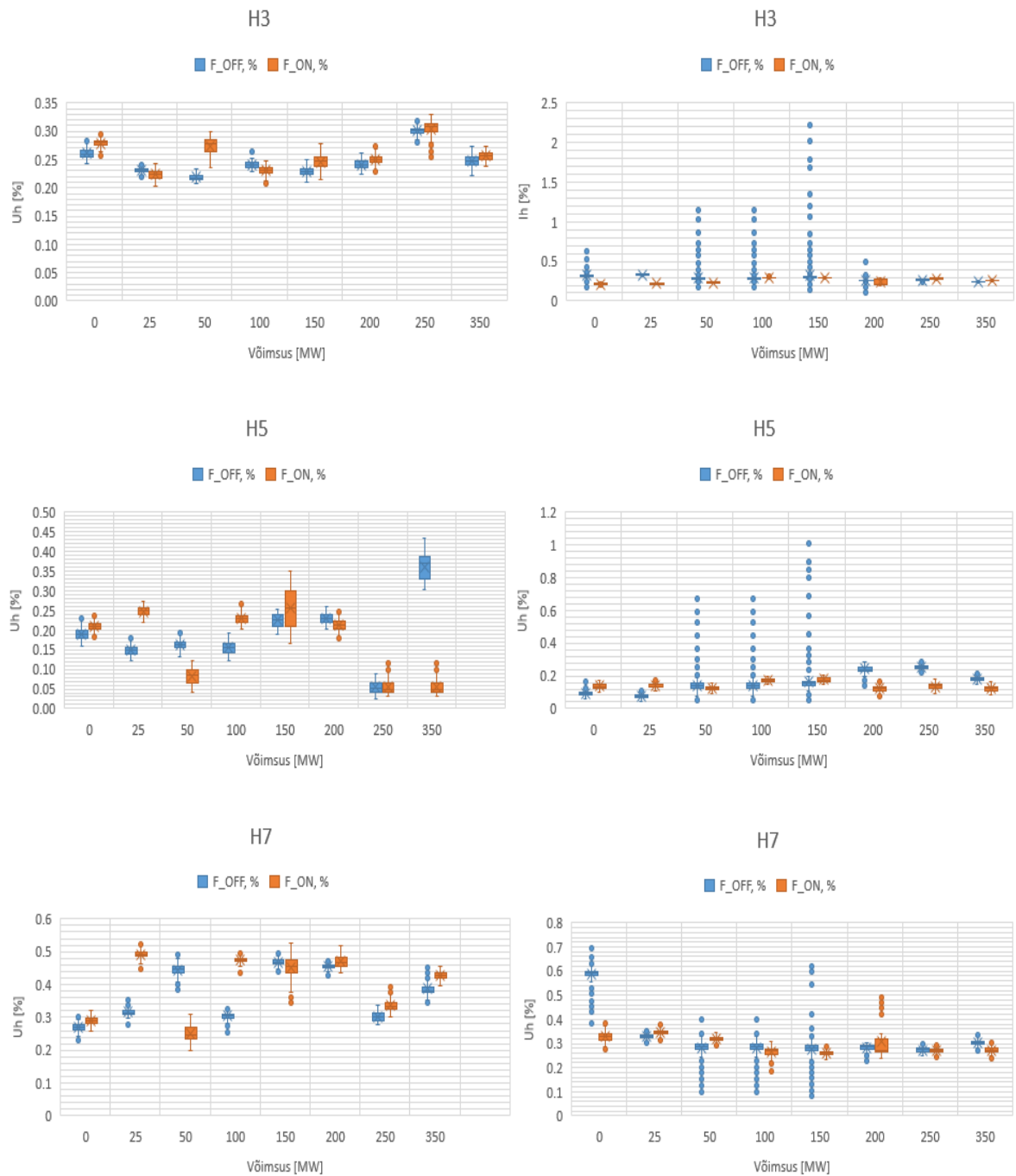
stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8462784&tag=1. Kasutatud 02 01 2020].

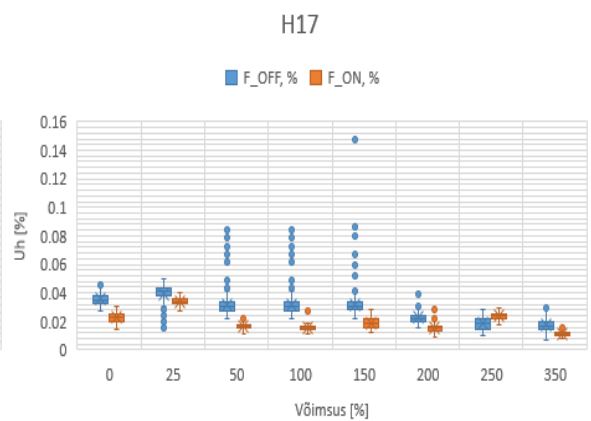
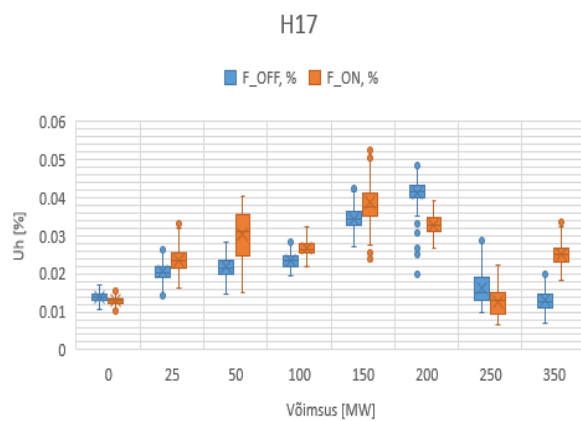
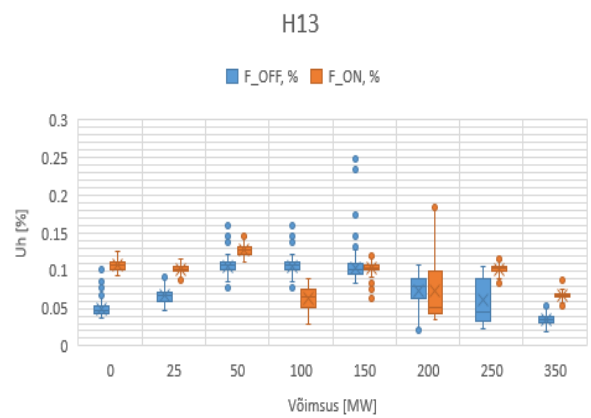
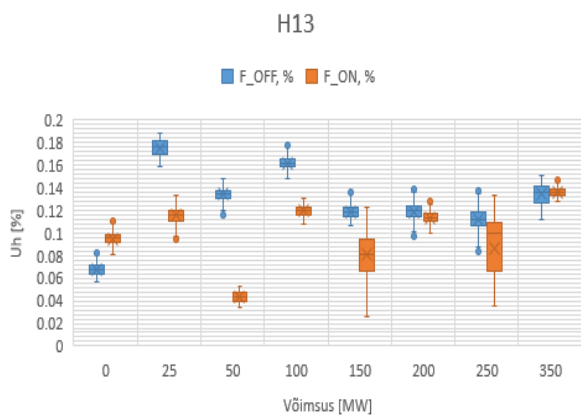
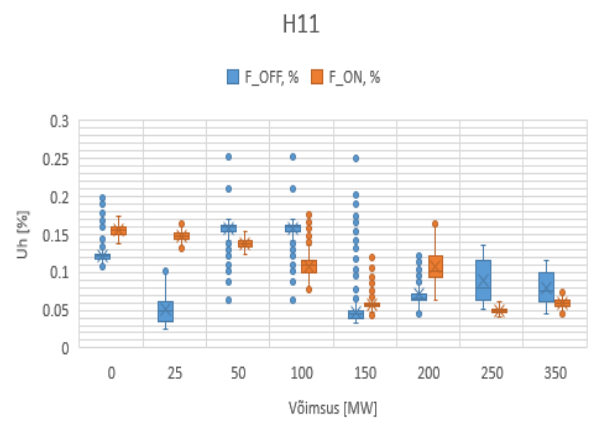
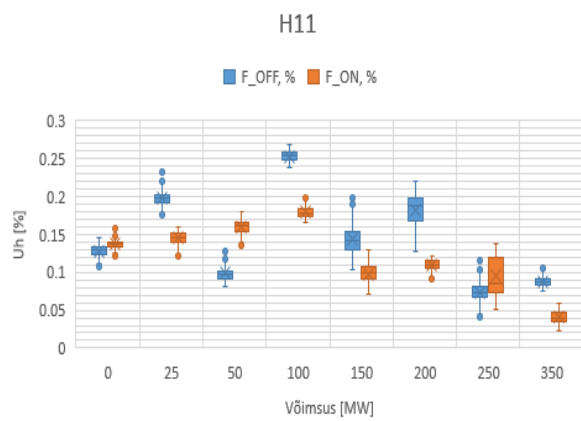
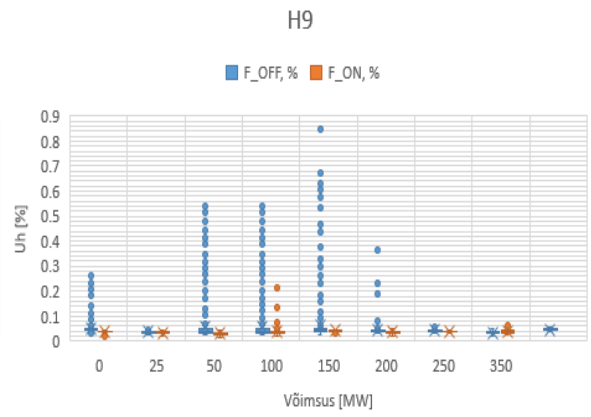
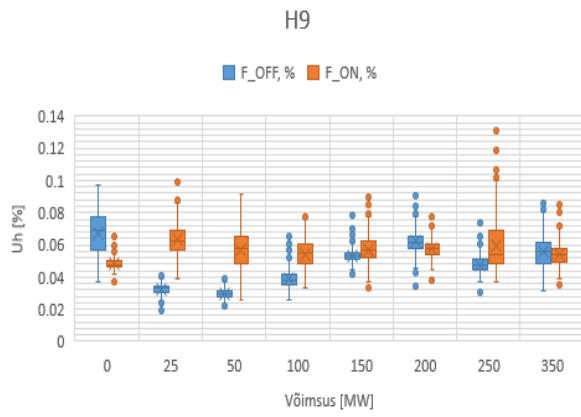
- [11] CEER/ECRB, Guidelines of Good Practice on the Implementation and Use of Voltage Quality Monitoring Systems for Regulatory Purposes, Brüsse: ECRB, 2012.
- [12] IEC, IEC/TR 61000-3-6:2008 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-6 - Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems, IEC, 2008.
- [13] L. Ronström, M. L. Hoffstein, R. Pajo ja M. Lahtinen, The Estlink HVDC Light Transmission System, Tallinn: Cigre, 2007.
- [14] Wikipedia, „Estlink,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://et.wikipedia.org/wiki/Estlink>. [Kasutatud 11 04 2019].
- [15] Elering, „EstLink 1 vs EstLink 2,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://estlink2.elering.ee/estlink-1-vs-estlink-2/>. [Kasutatud 11 04 2019].
- [16] J. Kilter ja M. Meldorf, „Elektrisüsteem,“ Tallinn, TTÜ elektroenergeetika instituut, 2008.
- [17] E. AS, „EstLink 2,“ [Võrgumaterjal]. Available: [http://estlink2.elering.ee/public/Dokumendid/EL2\\_teabeleht\\_A4\\_eng.pdf](http://estlink2.elering.ee/public/Dokumendid/EL2_teabeleht_A4_eng.pdf). [Kasutatud 27 12 2019].
- [18] R. A. Mukhedkar, „Introduction to HVDC,“ Alstom, [Võrgumaterjal]. Available: [https://sari-energy.org/oldsite/PageFiles/What\\_We\\_Do/activities/HVDC\\_Training/Presentations/Day\\_7/LCC\\_vs\\_VSC\\_ALSTOM.pdf](https://sari-energy.org/oldsite/PageFiles/What_We_Do/activities/HVDC_Training/Presentations/Day_7/LCC_vs_VSC_ALSTOM.pdf). [Kasutatud 01 01 2020].
- [19] R. Grünbaum, B. Halvarsson ja A. W. Wilczynski, FACTS AND HVDC LIGHT FOR POWER SYSTEM INTERCONNECTIONS, ABB, 1999.
- [20] ABB, „Power Systems – HVDC,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://new.abb.com/docs/default-source/ewea-doc/hvdc-light.pdf>. [Kasutatud 15 04 2019].
- [21] Qualitrol, „Power Quality Monitors,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.qualitrolcorp.com/products/power-quality-monitors/>. [Kasutatud 21 10 2019].

- [22] Insulect. [Võrgumaterjal]. Available: <https://insulect.com/products/qualitrol-informa-pmd-a-power-quality-monitoring>. [Kasutatud 21 10 2019].
- [23] L. Kütt, Mittetavapärased mõõtemuundurid (NCIT) ning tehnilised tingimused nende rakendamiseks Eesti elektrivõrguettevõtetes, Tallinn: TTÜ, 2012.
- [24] U. A. Bakshi ja A. V. Bakshi, Electrical Measurements and Instrumentation, Pune: Technical publication, 2014.
- [25] J. Meyer, J. Kilter, B. Howe, F. Zavoda, L. Tenti, J. Gordin ja J. V. Milanovic, Contemporary and Future Aspects of Cost Effective Power quality monitoring - Position paper of CIGRE WG C4.112, Tartu: Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ), 2012.
- [26] Ust-Kamenogorsk Capacitor, „Capacitive Voltage Transformers,“ 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ukkz.com/en/capacitive-voltage-transformers.html>.
- [27] Artech, Theory and technology of instrument transformers, Artech, 2019.
- [28] Microsoft. [Võrgumaterjal]. Available: <https://support.office.com/en-us/article/correl-function-995dcef7-0c0a-4bed-a3fb-239d7b68ca92>. [Kasutatud 17 12 2019].
- [29] E. AS, „Kliendi elektripaigaldise tehniliste nõuete juhend,“ Tallinn, 2019.
- [30] Elering, Elektrienergia kvaliteet Elering AS 110 kV võrgus, Tallinn: Elering, 2015.
- [31] Artech, An approach to instrument transformers, Artech, 2019.
- [32] F. C. De La Rosa, Harmonics and Power systems, New York: CRC Press, 2006.
- [33] E. V. Valitsus, „Energiamajanduse riiklik arengukava aastani 2020,“ [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.mkm.ee/sites/default/files/elfinder/article\\_files/energiamajanduse\\_arengukava\\_2020.pdf](https://www.mkm.ee/sites/default/files/elfinder/article_files/energiamajanduse_arengukava_2020.pdf). [Kasutatud 2019 12 22].
- [34] M. H. J. Bollen, N. Etherden, K. Yang ja G. W. Chang, „Continuity of Supply and Voltage Quality in the Electricity Network of Future,“ Hong Kong, 2012 IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2012.

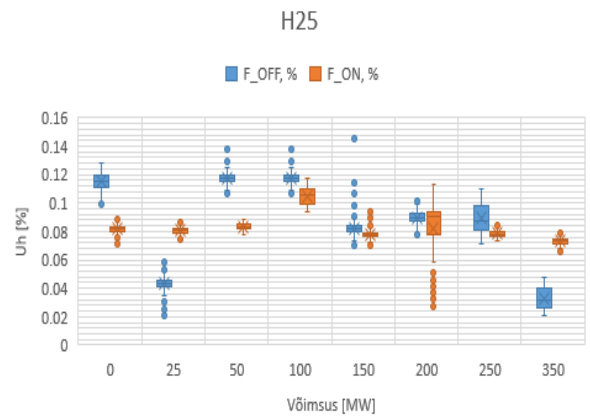
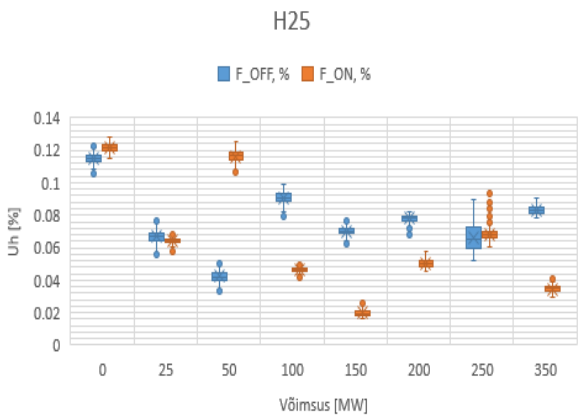
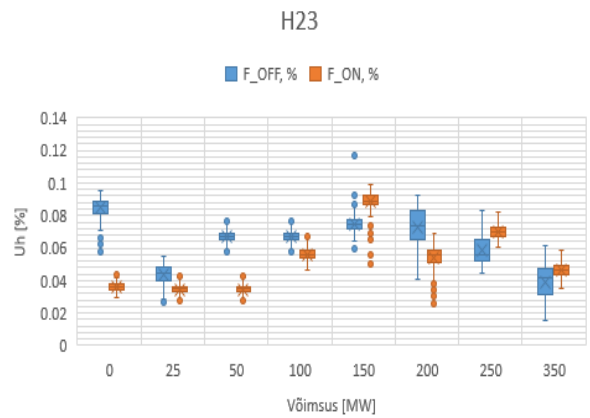
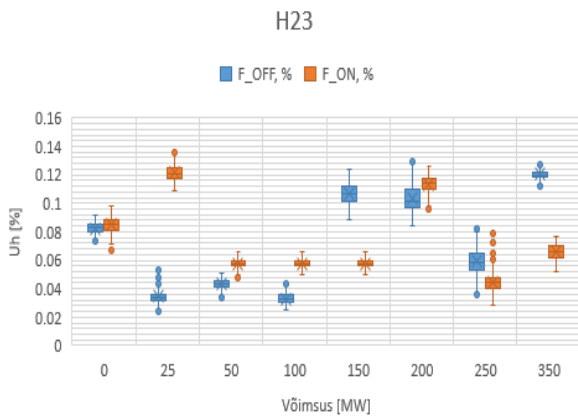
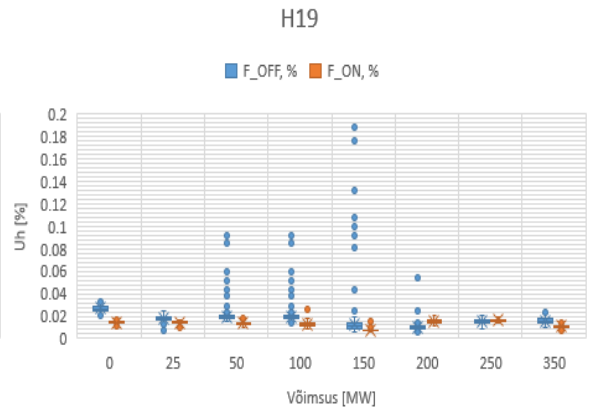
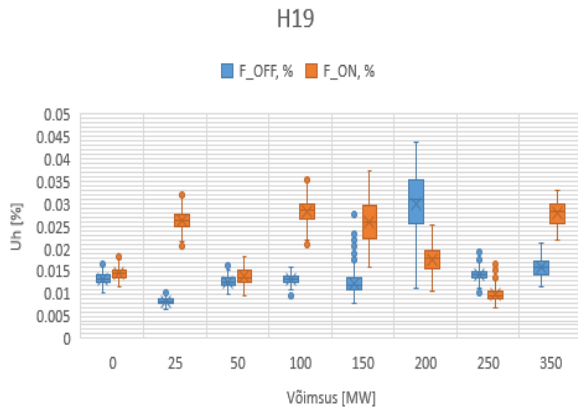
# LISAD

## Lisa 1 Pingeharmonikute mõõteandmete võrdlus võimsusvoode suhtes









## Lisa 2 Vooluharmonike mõõteandmete võrdlus võimsusvoode suhtes

