



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

# **PINGETRAFODE MÕJU ANALÜÜS ELEKTRI- KVALITEEDI MÕÕTMISTELE ÜLEKANDEVÕRGUS**

## **ANALYSIS OF THE EFFECT OF INSTRUMENT VOLTAGE TRANSFORMERS ON POWER QUALITY MEASUREMENTS IN TRANSMISSION NETWORK**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Mari Neissaar

Üliõpilaskood 176774AAVM

Juhendaja: doktorant-nooremteadur Mari Löper  
professor Jako Kilter

# AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

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

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

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

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

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina Mari Neissaar

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Pingetrafode mõju analüüs elektrikvaliteedi mõõtmistele ülekandevõrgus,

mille juhendajad on Mari Löper ja Jako Kilter,

- 1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

- 1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

\_\_\_\_\_ (kuupäev)

---

<sup>1</sup> Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

# LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

*Autor:* Mari Neissaar

*Lõputöö liik:* Magistritöö

*Töö pealkiri:* Pingetrafode mõju analüüs elektrikvaliteedi mõõtmistele ülekandevõrgus

*Kuupäev:* 18.05.2021

71 lk (lõputöö lehekülgede arv koos lisadega)

*Ülikool:* Tallinna Tehnikaülikool

*Teaduskond:* Inseneriteaduskond

*Instituut:* Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

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

*Töö konsultant (konsultandid):* -

*Sisu kirjeldus:*

Töö eesmärgiks on uurida Eesti ülekandevõrgus kasutusel olevate pingetrafode mõju pingeharmonikute (kuni 50nda järguni) mõõtmistele. Töös võrreldakse Eesti ja Soome vaheliste alalisvooluühenduste EstLink 1 ja EstLink 2 fiidri mahtvusliku pingetrafo, mahtvuslik-takistusliku pingejaguri ja PQ-sensoriga mahtvusliku pingetrafo pingeharmonikute mõõtmisi. Estlink 1 fiidri mõõteahelast koguti mõõteandmeid ajaliselt sünkroniseeritult ühe nädala vältel. Estlink 2 mõõtetulemused on teostatud erinevatel võimsustasemetel. Mõõtmiste põhjal kogutud andmete alusel analüüsitakse programmi MatLabi abiga kasutusel olevate seadmete kasutatavust pingeharmonikute mõõtmiseks ja analüüsiks Eesti ülekandevõrgus. Samuti on töö tähtsaks uurimismeetodiks kirjanduse analüüs, kus tuuakse välja pingeharmonikute mõju elektri kvaliteedile ja selle mõõtmine ülekandevõrgus. Lisaks on kirjeldatud erinevaid pingetrafosid ja nende sobivust elektri kvaliteedi seiramiseks ülekandevõrgus.

Lõputöö tulemuseks on välja selgitada, millised käesolevas töös vaadeldud pingetrafo võimaldavad kõrgemate pingeharmonikute, kuni 50nda järguni, mõõtmisi ning mis on nende seadmete mõõtmiste täpsused. Samuti uuritakse, kas mahtvuslikule pingetrafole paigaldatud PQ sensor võimaldab paremaid elektri kvaliteedi mõõtmisi ning kas pingejaguril on teostatud mõõtmistel eeliseid.

Töö tulemused on kasulikud Eesti ülekandevõrgu elektri kvaliteedi mõõtesüsteemi arendamiseks, sest lõputöö tulemustest selgub, millised käesoleva töö käigus vaadeldud pingetrafo annavad elektri kvaliteedi mõõtmistel usaldusväärseid tulemusi ja tehakse ettepanekud, kuidas elektri kvaliteedi mõõtesüsteemi tulevikus parandada.

*Märksõnad:* mahtvuslik pingetrafo, PQ sensor, pingejagur, kõrgemad pingeharmonikud, elektri kvaliteet

## ABSTRACT

*Author:* Mari Neissaar

*Type of the work:* Master Thesis

*Title:* Analysis of the effect of instrument voltage transformers on power quality measurements in transmission network

*Date:* 18.05.2021

*71 pages (the number of thesis pages including appendices)*

*University:* Tallinn University of Technology

*School:* School of Engineering

*Department:* Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

*Supervisor(s) of the thesis:* Early Stage Researcher - Mari Löper, Professor Jako Kilter

*Consultant(s):* -

*Abstract:*

The purpose of this thesis is to analyze the effect of instrument voltage transformers on voltage harmonics (up to the 50<sup>th</sup>) measurements in Estonian transmission network. Measurements are performed on capacitive voltage transformer, PQ sensor and RC-voltage divider measuring circuits of DC connections (Estlink 1, Estlink 2) between Estonia and Finland. For the analysis of the collected measurement data the program MatLab is used to find out whether the measuring equipment used in Estonian transmission network is capable for power quality measurements and analysis. Another important research method is the analysis of the literature, which highlights the effect of voltage harmonics on power quality and its measurement in transmission network. In addition, various voltage transformers and their suitability for power quality monitoring in transmission network have been subscribed.

The result is to find out, which voltage transformers considered in this thesis allow measurements of higher voltage harmonics (up to the 50<sup>th</sup>) and what are the accuracy of these measurements. Furthermore, it is also examined if PQ-sensor allows better power quality measurements and whether the voltage divider has advantages on the performed measurement results.

The outcome of this thesis is useful for the future development of the power quality measurement system of Estonia transmission network, because the results show which considered voltage transformers give reliable results on power quality measurements and make proposals to improve power quality measurement system in future.

*Keywords:* capacitive voltage transformer, PQ sensor, voltage divider, voltage harmonics, power quality

# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	<b>Pingetraafode mõju analüüs elektrikvaliteedi mõõtmistele ülekandevõrgus</b>
Lõputöö teema inglise keeles:	<b>Analysis of the effect of instrument voltage transformers on power quality measurements in transmission network</b>
Üliõpilane:	<b>Mari Neissaar, 176774AAVM</b>
Eriala:	<b>Elektroenergeetika</b>
Lõputöö liik:	<b>magistritöö</b>
Lõputöö juhendaja:	<b>doktorant-nooremteadur Mari Löper</b>
Lõputöö kaasjuhendaja: (ettevõtte, amet ja kontakt)	<b>professor Jako Kilter</b>
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	<b>24.05.2021</b>
Lõputöö esitamise tähtaeg:	<b>18.05.2021</b>

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendaja (allkiri)

---

Õppekava juht (allkiri)

---

Kaasjuhendaja (allkiri)

## 1. Teema põhjendus

Elektrisüsteemides on toimumas põhimõttelised muutused seoses taastuenergeetika järjest suureneva osakaaluga ja peamiseks muutuseks võrreldes senisega on konverterite osakaalu suurenemine. Sellest tulenevalt on elektri ülekandevõrkudes järjest olulisemaks muutumas elektrikvaliteedi mõõtmine ja hindamine. Eesti põhivõrgu elektrikvaliteedi täpsemaks hindamiseks tulevikus on vajalik teada erinevate mõõtetraafode mõju elektrikvaliteedi mõõtmistele, eriti tuleb tähelepanu pöörata harmoonikute mõõtmistele. Eesti ülekandevõrgus on suuremahuliselt paigaldatud nii statsionaarseid elektri kvaliteedi mõõteseadmeid kui ka faasimõõteseadmeid, mis on ühendatud erinevate mõõteseadmetega. Kasutusel on pingejagureid, mahtuvuslikke pingetrafosid ja PQ sensoreid. See annab võimaluse analüüsida Eesti ülekandevõrgu elektrikvaliteedist lähtuvalt pingeharmonikute mõõtmiste olukorda analüüsides nende

erinevate mõõtetrafode mõju mõõteseadmete täpsusele. Selle alusel saab lisaks pingetrafode analüüsile hinnata ka Eesti põhivõrgus installeeritud elektrikvaliteedi mõõtesüsteemi ülesehitust.

## **2. Töö eesmärk**

Töö eesmärgiks on uurida Eesti ülekandevõrgus põhiliselt kasutusel olevate pingetrafode mõju pingeharmonikute mõõtmistele. Töö raames vaadeldakse 330 kV võrgus põhiliselt kasutatavaid mõõteseadmeid ja võrreldakse nende mõõtetulemusi pingejaguri mõõtmistega. See valik on seotud seadmete asukohaga – pingejagurid asuvad Eesti ülekandevõrgud ainult Estlink alalisvooluühenduste lahtrites.

Mõõtmiste põhjal kogutud andmete alusel analüüsitakse erinevate seadmete kasutatavust pingeharmonikute mõõtmiseks ja analüüsiks Eesti põhivõrgus.

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

Kas mahtvuslikku pingetrafot on võimalik kasutada kõrgemate pingeharmonikute mõõtmiseks ja võimalusel uurida, mis on selliste mõõtmiste täpsus?

Missugust mõju avaldab mahtvuslikule pingetrafole paigaldatud PQ sensor kõrgemate pingeharmonikute mõõtmise raamistikus?

Kas ja missugused eelised on mahtvuslikul pingejaguril kõrgemate pingeharmonikute mõõtmisel?

Mida peaks arvestama Eesti põhivõrgu elektrikvaliteedi mõõtesüsteemi arendamisel, lähtudes erinevat tüüpi pingetrafode karakteristikutest ja kasutusest?

## **4. Lähteandmed**

Mõõteandmed juhendajalt ja iseseisvatelt mõõtmistelt.

## **5. Uurimismeetodid**

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

## **6. Graafiline osa**

Graafiline osa peamiselt töö põhiosas.

## **7. Töö struktuur**

- 1 Elektri kvaliteet ja selle mõõtmine ülekandevõrkudes
  - 1.1 Elektri kvaliteet ülekandevõrkudes
  - 1.2 Elektri kvaliteedi mõõtmine ülekandevõrkudes
  - 1.3 Erinevate mõõtetrafode mõju harmoonikute mõõtmisele
- 2 Eesti ülekandevõrgu elektri kvaliteedi mõõtmiste metoodika
  - 2.1 Mõõtepunktide valik
  - 2.2 Mõõtmiste metoodika
- 3 Mõõtetulemuste analüüs
  - 3.1 Mõõtetulemuste analüüsi metoodika
  - 3.2 Tulemused
- 4 Kokkuvõte

## **8. Kasutatud kirjanduse allikad**

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

IEEE standard 1159 „Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality“.

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.

## **9. Lõputöö konsultandid**

## **10. Töö etapid ja ajakava**

Eesti elektrikvaliteedi mõõtesüsteemi uurimine, mõõtesõlmede valik, andmete kogumine (31.03.2020)

Kirjanduslike allikate läbitöötamine (31.10.2020)

Teooria osa mustand (21.03.2021)

Andmete analüüsi esimene lähend (21.03.2021)

Lõputöö mustandi esitamine (25.04.2021)

Lõputöö esitamine (18.05.2021)



# SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE .....	4
ABSTRACT .....	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE .....	6
EESSÕNA .....	10
SISSEJUHATUS .....	11
1. ELEKTRI KVALITEET JA SELLE MÕÕTMINE ÜLEKANDEVÕRKUDES.....	13
1.1 Elektri kvaliteet ülekandevõrkudes .....	13
1.1.1 Taastuvate energiaallikate mõju elektri kvaliteedile .....	15
1.1.2 Harmoonikute mõju elektri kvaliteedile.....	16
1.1.3 Eesti ülekandevõrk .....	18
1.2 Elektri kvaliteedi mõõtmine ülekandevõrkudes .....	20
1.2.1 Standardid ja piirväärtused harmoonikute mõõtmiseks.....	21
1.2.2 Standard IEC 61000-4-30.....	24
1.3 Erinevate mõõtetrafode mõju harmoonikute mõõtmistele .....	25
1.3.1 Erinevate mõõtetrafode tööpõhimõte .....	26
1.3.2 Mõõtetrafode mõõtetäpsused .....	30
2. EESTI ÜLEKANDEVÕRGU ELEKTRI KVALITEEDI MÕÕTMISTE METOODIKA .....	33
2.1 Mõõtepunktide valik.....	33
2.2 Mõõtmiste metoodika.....	34
2.2.1 Mõõtmised Harku alajaamas Estlink 1 fiidris.....	34
2.2.2 Mõõtmised Püssi alajaamas Estlink 2 fiidris .....	36
2.3 Mõõteandmed programmist iQ+ Client .....	37
3. MÕÕTETULEMUSTE ANALÜÜS.....	41
3.1 Mõõtetulemuste analüüsi metoodika .....	41
3.2 Estlink 1 fiidri mõõtetrafode analüüs .....	43
3.3 Estlink 2 fiidri mõõtetrafode analüüs .....	52
3.4 Järeldused .....	57
KOKKUVÕTE .....	59
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	62
LISAD .....	66

## **EESSÕNA**

Lõputöö teema sõnastati Tallinna Tehnikaülikooli doktorant-nooremteaduri Mari Löper ja professor Jako Kilter algatusel. Põhilised algandmed koguti Estlink 1 mõõtmiste käigus Harku alajaamas, mille läbiviimist aitas teostada käidukorraldaja Keyt Auner. Andmed võrdlemiseks olid eelnevalt juhendajal Mari Löper kogutud Püssi alajaama 330 kV jaotla Estlink 2 lahtri pingetrafolelt.

Täna kõiki eelnevalt loetletud isikuid, tänu kellele sai käesolev magistri töö võimalikuks.

## SISSEJUHATUS

Ülekandevõrkudes on mittelineaarsete tarbijate ja häiringuallikate, näiteks jõuelektronika, osakaalu suurenemine tekitanud olukorra, kus üha olulisemal kohal on kõrgemate pinge- ja vooluharmonikute mõõtmine ja hindamine. Sellist põhimõttelist muudatust ülekandevõrgus tekitab järjest suurenev taastuvenergeetika ja jõuelektronikaseadmete osakaal. Eesti ülekandevõrku on paigaldatud nii statsionaarseid elektri kvaliteedi mõõteseadmeid kui ka faasimõõteseadmeid, mis on ühendatud erinevate mõõteseadmetega. Pinge mõõtmiseks on kasutusel on pingejagurid, PQ sensorid, mahtvuslikud ja induktiivsed pingetraford. Selleks, et tulevikus täpsemalt hinnata Eesti ülekandevõrgu elektrikvaliteeti, on tarvis teada erinevate mõõtetrafode mõju elektrikvaliteedi mõõtmistele, eriline tähelepanu on vaja pöörata harmoonikute mõõtmistele. Käesoleva töö praktiline osa põhineb mahtvuslik-takistuslikult pingejagurilt, PQ-sensorilt ja mahtvuslikult pingetrafoolt kogutud andmete analüüsist, et hinnata erinevate mõõtetrafode kasutatavust elektri kvaliteedi mõõtmiseks ülekandevõrgus.

Käesolev lõputöö koosneb kolmest osast – teoreetilisest ja praktilisest osast ning mõõteandmete analüüsist. Teoreetilisest osast seletatakse vastavalt kirjanduse analüüsile tööga seotud aspekte. Seletatakse lahti ülekandesüsteemide elektri kvaliteedi olemus ning kuidas toimub selle mõõtmine. Samuti uuritakse kirjandusest saadud informatsiooni põhjal, kuidas erinevad mõõtetrafod avaldavad mõju elektri kvaliteedi, täpsemalt pingeharmonikute, mõõtetulemustele. Kirjandusest kogutud teavet mõõtetrafode mõju kohta saab kõrvutada läbiviidud katsete tulemuste ja analüüsiga ning teha järeldused.

Selle töö teises osas analüüsitakse Eesti ülekandevõrgu elektrikvaliteedi mõõtesüsteemist lähtuvalt pingeharmonikute mõõtmiste olukorda ning erinevate mõõtetrafode mõju mõõteandmete täpsusele, selleks, et luua põhi edasisele elektrikvaliteedi mõõtmiste uurimisele Eesti ülekandevõrgus. Töö käigus uuritakse mahtvusliku pingetrafo, mahtvusliku pingetrafo, millele on paigaldatud PQ-sensor, ning pingejaguri mõõtetulemuste erinevusi. Harku alajaama Estlink 1 lahtris teostati nädala vältel ajaliselt sünkroniseeritud mõõtmised, et võrrelda mahtvusliku pingetrafo ja pingejaguri mõõtetulemusi. Lisaks sellele vaadeldi teise lõputöö raames Püssi alajaamas Estlink 2 lahtris läbiviidud elektri kvaliteedi mõõtmiste andmeid pingejaguri ja PQ-sensoriga varustatud mahtvusliku pingetrafo mõõteahelatest. Mõõtmised teostati elektri kvaliteedi analüsaatoritega Qualitrol Informa PMD-A (Estlink 1) ja a-berle PQ-Box 200 (Estlink 2), mis vastavad standardis IEC 61000-4-30 [1] kirjeldatud

mõõtemetodi klass A tingimustele kõikide elektriliste parameetrite mõõtmistel. Andmete analüüsimiseks kasutatakse arvutusprogrammi MatLab.

Töö viimases osas analüüsitakse kogutud mõõteandmete põhjal saadud tulemusi ja antakse lõputöö ülesandes püstitatud küsimustele vastused. Töö tulemusena analüüsitakse ülekandevõrku paigaldatud erinevat tüüpi mõõtetetrafoodega tekkida võivaid probleeme. Kasutatud kirjandusele tuginedes ja mõõteandmete analüüsist lähtuvalt selgub, milliseid mõõtetrafosid on võimalik kasutada ülekandevõrgus kõrgemate pingeharmonikute mõõtmiseks, milline on erinevat tüüpi mõõtetrafode täpsus teostatud mõõtmistel ning kas ja milliseid eeliseid leidub selles töös uuritud mõõtetrafodel. Teostatud analüüsile põhinedes tehakse ettepanekud, millega tuleb arvestada Eesti ülekandevõrgu elektri kvaliteedi mõõtesüsteemi arendamisel.

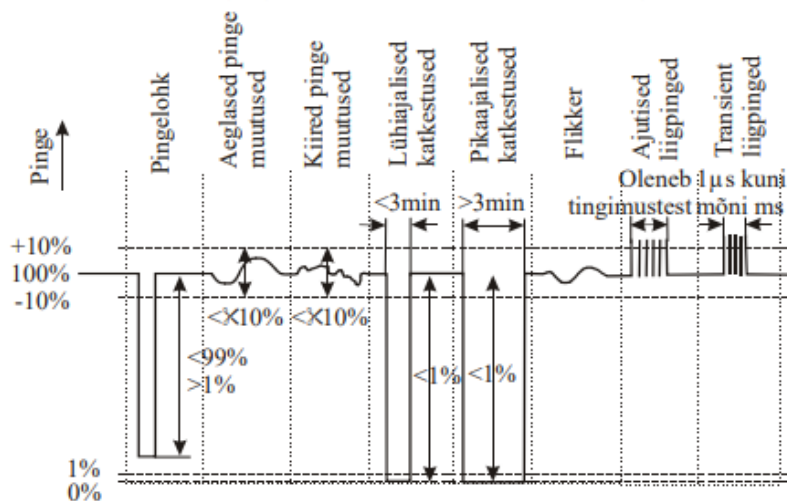
Töö tulemused on kasulikud ülekandevõrgu elektri kvaliteedi mõõtesüsteemi arendamiseks ja täiendamiseks. Lõputöö tulemustest selgub, millised käesoleva töö käigus vaadeldud Eesti ülekandevõrgus kasutusel olevad pingetrafood annavad elektri kvaliteedi mõõtmistel usaldusväärseid tulemusi ja kuidas elektri kvaliteedi mõõtesüsteemi tulevikus parandada.

# 1. ELEKTRI KVALITEET JA SELLE MÕÕTMINE ÜLEKANDEVÕRKUDES

Elektri kvaliteet viitab erinevatele elektromagnetilistele nähtustele, mis iseloomustavad elektrisüsteemis kindlal ajahetkel ning kohas pinget ja voolu [2]. Üldjuhul mõeldakse elektri kvaliteedi all elektritarbijate elektrivarustuskindlust ning talitlusparameetrite vastavust nimisuurustele. See hõlmab endast elektritoite olemasolu, sageduse ja pinge väärtust ning lainekuju tunnusjooni. Elektri kvaliteedi normiks võib lugeda elektriliste parameetrite piire, mis vahemikus saavad elektrilised seadmed töötada ilma häireteta või oodatavat eluiga vähendamata. Probleemid elektri kvaliteedis, olenevalt raskusastmest, mõjutavad kõiki elektriseadmeid nagu näiteks elektrimootoreid, trafosid, generaatoreid, arvuteid, kommunikatsioonivahendeid ja kodumasinaid [3]. Elektrivõrgus toimuvad häired ja madal elektri kvaliteet põhjustab tootmisettevõtetele kadusid, millest tulenevad rahalised kahjud. Elektri kvaliteedi häiringute majanduslikud kulud on kõrged, eriti tööstuses. Kulud sisaldavad tootmiskadu, kallite seadmete kahju, palgakulu ning tootmise taaskäivitamise kulusid. [4] Elektri kvaliteedi probleemidest põhjustatud majanduslike kulude suurus sõltub olukorrast ja ettevõttest. Erinevate uurimiste käigus on leitud, et ettevõtte kulud võivad ulatuda üle 100 000 € aastas [5] või isegi üle 200 000 € aastas [6]. Tööstusettevõtte valdkonnast sõltuvalt on pingelohu korral hinnangulised rahalised kahjud näiteks paberitööstuses 30 000 (USD), autotööstuses 75 000 (USD) ning pooljuhtidetööstuses 2 500 000 (USD) [7].

## 1.1 Elektri kvaliteet ülekandevõrkudes

Elektri kvaliteedi hoidmiseks ja elektrivõrgu talitluse juhtimiseks jälgitakse pidevalt elektrivõrgu elektrilisi parameetreid, sh pinget, voolu, võimsustegurit, võimsust, ülekantud energiat. Viimastel aastakümnetel on üha enam suurenenud huvi ja vajadus elektri kvaliteedi seireks. Seda põhjustab asjaolu, et võrku lisatakse üha enam elektroonilisi seadmeid, mis võivad põhjustada elektri kvaliteedi langust, kuna tekitavad elektromagnetilisi häireid, või mis on ise tundlikud sellistele nähtustele. Sellisteks seadmeteks on infotehnoloogilised seadmed, jõuelektroonika, näiteks reguleeritava kiirusega ajamid (ingl. k. ASD – *Adjustable speed Drives*) ja programmeeritavad loogikakontrollerid (ingl. k. PLC – *programmable logic controllers*) [3]. Häiringud elektri kvaliteedis võivad kesta millisekunditest kuni tundideni, joonisel 1.1 on näidatud peamised elektri kvaliteedi näitajad ja nende iseloomulikud omadused [7].



Joonis 1.1 Elektri kvaliteedi peamised näitajad [7]

Elektri kvaliteedi ettekirjutatud nõuded kehtivad elektrivõrgu normaalalatluse korral, kui ei ole teisiti viidatud. Normaalseks talitluseks ei loeta lühiste ajal ja sellele järgnevaid talitlusi, vääramatut jõudu, erakorralisi katkestusi, mis on põhjustatud plaanilistest tööddest ning olukorda, mil klient ületab kokkulepitud häiringute emissiooni määrasid. Järgnevalt on välja toodud olulisemad elektrivõrgu kvaliteedinäitajad.

Standardi EVS-EN 50160 [8] kohaselt on kõrgpingevõrkudes tunnussuurused liigitatud kaheks suuremaks grupiks – pidevateks nähtusteks ning pinge sündmusteks. Kestvateks nähtusteks loetakse olukorda, mil aja jooksul tekivad pidevalt kõrvalekaldeid nimiväärtusest. Selliseid olukordi põhjustab peamiselt koormuste muutused või mittelineaarsed koormused. Kestvate nähtuste alla kuuluvad võrgusagedus, toitepinge aeglased ja kiired muutused, pinge asümmeetria, harmoonikud ja vaeharmonoonikud. Pinge sündmusteks loetakse järske ja märkimisväärseid kõrvalekaldeid normaalsest või soovitud lainekujust. Selliseid sündmuseid tekitavad tavaliselt ettearvamatud sündmused (nt rikked) või välised põhjused (nt ilmastikuolud, kolmandate osapoolte tegevus.) Pinge sündmuste alla liigitatakse katkestused, pinge lohud/muhud ja transientliigpinged.

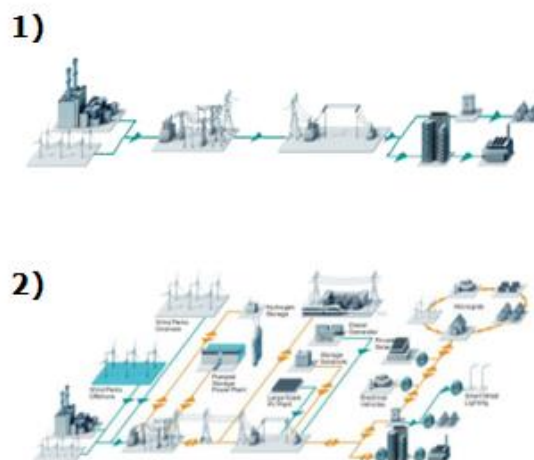
Elektri kvaliteedil on otsene mõju elektrivõrgus olevatele seadmetele ja tarbijatele. Võrku lisatakse üha enam seadmeid, mis põhjustavad kõikumisi elektri kvaliteedis (nt jõuelektronika) või mis on väga tundlikud elektri kvaliteedi kõikumistele. Selle tõttu on väga oluline jälgida pidevalt elektri kvaliteeti ülekandevõrkudes. Euroopas uuritakse üha enam elektri kvaliteeti, nt loodi üle-Euroopaline projekt MIGRATE [9], mille raames vaadeldakse elektri kvaliteeti, et leida elektrivõrgus praegu ja tulevikus toimuvatele tehnoloogilistele väljakutsetele lahendused. Sellest projektist võtavad osa üle Euroopa

13 riiki ja 23 partnerit, kelle hulka kuuluvad põhivõrke haldavad ettevõtted ja ülikoolid, näiteks Eestist, Soomest ja Saksamaalt.

### 1.1.1 Taastuvate energiaallikate mõju elektri kvaliteedile

Euroopa Liidu taastuvenergeetika direktiiv sätestab, et aastaks 2020 peavad Euroopa Liidu liikmesriikide energiatarbimine olema kaetud vähemalt 20% ulatuses taastuvatest energiaallikatest ning 2030. aastaks peab see olema vähemalt 32% [10]. Seoses taastuvate energiaallikate (tuule- ja päikesepargid jne) ühendamisega võrku, suureneb jõuelektronika, akude ja alalisvooluühenduste (ingl. k. *High Voltage Direct Current - HVDC*) kasutamine elektrivõrkudes. Eelnevalt nimetatud seadmed tekitavad häiringuid elektri kvaliteedis ning lisaks sellele on jõuelektronika oluliselt tundlikum elektrisüsteemi parameetrite muutumisele [11].

Elektrivõrgu struktuuri ja toimimist mõjutab üha enam asjaolu, et energia ei liigu enam ühe suunaliselt elektrijaamast tarbijani, vaid ka tarbija tootmisseadmed suunavad võrku energiat. Klassikaline elektrivõrgu struktuur on tootmine – ülekandevõrk – jaotusvõrk – tarbimine. [12] Tänapäevane elektrivõrgu struktuur on aga keerulisem, kuna ka tarbijad saavad oma seadmetega võrku elektrit toota, mis on näha jooniselt 1.2. Elektrivõrku lisatakse üha enam taastuvaid energiaallikaid, mille kõikuval võimsusel on negatiivne mõju elektri kvaliteedile. Kõik tarbijad, nii väikekliendid (eramud, väikesed tööstushooned) kui suured tööstused soovivad teatud tasemel elektri kvaliteeti. Kliendid eeldavad elektrienergiat ostes, et tarbimist häirivad võimalikult vähesed katkestused ja rikked.



Joonis 1.2 Elektrisüsteemi struktuur: 1) tsentraliseeritud ja ühesuunaline (klassikaline) 2) hajutatud ja kahesuunaline [12]

Elektrivõrgus toimuvate uute asjaoludega ja väljakutsetega, lisaks võrgu pidevale keerukuse suurenemisele, kaasnevad ka probleemid [12]:

- Võrku ühendatud taastuenergia allikate elektritootmine on ebaühtlane (kõrgemal pingel – tuulepargid; madalamal pingel – üksikud päikesepaneelid);
- Muutuv energiavoo suund, k.a. energia edastamine kõrgemal pingel;
- Vähenev lühisvõimsus, millega kaasneb elektrisüsteemi tugevuse ja elastsuse vähenemine;
- Inverterid ja ebalineaarsed koormused tekitavad võrku harmoonikuid;
- Pinge ja voolu piigid jaotusvõrgus;
- Asümmeetria, eriti madalpinges.

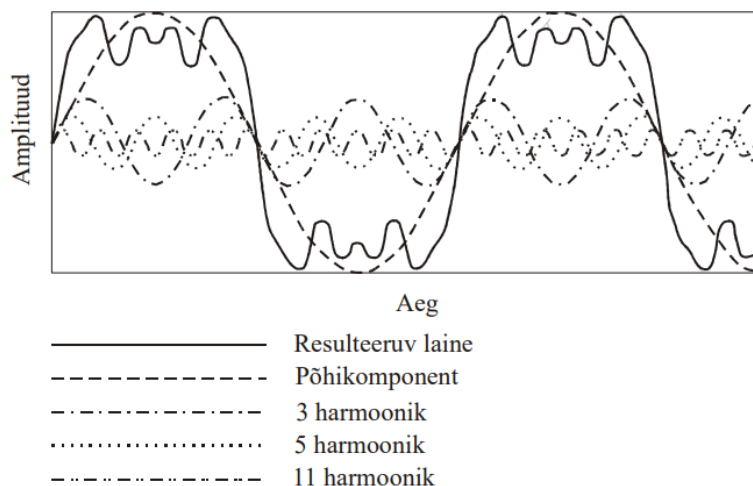
Üha enam võrku lisatavate inverteritega suureneb ka mõju elektri kvaliteedile, eriti harmoonikute osas. Viimaste aastatega on lühiajaliste pingelohkude ja katkestuse arv suurenenud, kuid neid häiringuid pole ametlikult registreeritud. [12] Ainult rikkelised, planeerimata katkestused, mis kestavad rohkem kui kolm minutit, arvestatakse SAIDIs. SAIDI on elektri võrguteenuse kvaliteedinäitaja, millega hinnatakse võrguteenuse kvaliteeti ja katkestuse mõju tarbijale. Eesti ülekandevõrgus on rikestest põhjustatud katkestuste kestuseks ühe tarbimiskoha kohta aastas lubatud kuni 150 tundi. Määruses „Võrguteenuste kvaliteedinõuded ja võrgutasude vähendamise tingimused kvaliteedinõuete rikkumise korral“ [13] on loetletud, millistel juhtudel võib katkestuse aeg ületada 150 tundi aastas tarbimiskoha kohta ning millised on võrgutasu vähendamise tingimused, kui katkestuse aeg ületab lubatud suurust. Tööstustes kasutatakse üha enam kaasaegseid protsesse ja tundlikuid seadmeid, millele avaldavad mõju isegi lühiajalised katkestused. Elektri kvaliteedi mõõtmistel ja seirel on oluline neid arenguid arvestada.

### **1.1.2 Harmoonikute mõju elektri kvaliteedile**

Energeetikas on eelkõige kasutusel vahelduvvool ehk siinusvool, sest sellel on alalisvoolu ees eelised nii elektrienergia tootmises, jaotamises kui ka tarbimises. Üheks eeliseks on võimalus trafosid kasutades vahelduvpinget ökonoomselt muuta, et elektrienergiat suurte vahemaade korral üle kanda kõrgemal pingel ning samuti erinevate tarbijate toiteks madalal pingel. Alalisvool on kasutusel olukordades, kus see on kindlalt vajalik. Samuti kasutatakse alalisvooluühendusi erinevate parameetritega elektrisüsteemide vahel. Näiteks on kõrgepingelised alalisvooluühendused kasutusel Soome ja Eesti vahel, Estlink 1 ja Estlink 2.



Elektrienergia ülekandmiseks ja jaotamiseks kasutatakse kindla sagedusega vahelduvvoolu, Euroopas on standardsageduseks 50 Hz (Ameerikas 60 Hz). Vahelduvvooluga võrgus esinevad lainekujudes põhi- ja kõrgemad harmoonikud. Harmoonikud on erineva sagedusega siinuseliselt muutuvad voolu- ja pingekomponendid, millel on iseloomulik amplituud, sagedus ja faasinurk. Joonisel 1.3 on näidatud põhiharmooniku (50 Hz) siinuslaine, 3 järgu harmooniku (150 Hz), 5 järgu harmooniku (250 Hz) ja 11 järgu harmooniku (550 Hz) lainekuju ning milline on harmoonikute tõttu tekkinud moonutatud lainekuju ehk resulteeruv laine. Harmoonikud jaotatakse täiendavalt paarituteks, paaris- ja vaeharmoonikuteks, kus kahe esimese siinuslaine sagedused on vastavalt paaritu ja paarisarv täiskordsed põhiharmooniku sagedusega. Vaeharmoonikud on oma nime saanud sellest, et nende sagedus ei ole põhiharmooniku täisarvukordne [14]. Kuna kõrgepinge võrgus on suurte mahtuvuste ja induktiivsuste tõttu madalad resonantssagedused, siis on pinge vaeharmoonikutel väike mõju. Seetõttu pole selle nähtuse kohta piirväärtuseid esitatud [8]. Põhiliselt tekitavad elektrivõrgu pinge siinuslainekujus moonutusi, ehk harmoonikuid, mittelineaarsete koormusgraafikutega seadmed. Sellisteks seadmeteks on infotehnoloogilised seadmed, jõuelektronika, näiteks juhitavad ajamid, programmeeritavad loogikakontrollerid, muundurid, keevitusmasinad ja kaarsulatusahjud.



Joonis 1.3 Kõrgemate harmoonikute tõttu moonutatud põhikomponendi lainekuju näide [7]

Kõrgemate harmoonikute esinemine elektrivõrgus ei tähenda, et süsteem lakkab täielikult toimimast, kuigi need tekitavad võrku ühendatud seadmetes erinevaid häiringuid. Harmoonikud on nagu teised elektri kvaliteeti mõjutavad nähtused ning nende mõju ulatus sõltub võrgu ja seadmete töö- ning häiringukindlusest. Näiteks ühe tööstuse seadmed, mis tekitavad võrku harmoonikud, ei pruugi olla häiringutundlikud ning tööstus jätkab oma tavapärasest toimimist. Kuid kuna kõrgemad harmoonikud kanduvad

edasi elektrivõrku, siis need võivad mõjutada teisi seadmeid, mis on rohkem häiringutundlikumad ning mille töö võib olla seetõttu häiritud. Järgnevalt on loetletud, kuidas avaldavad kõrgemad pinge- ja vooluharmonikud mõju erinevatele seadmetele. Tüüpsemad harmoonikute tekitatud vead ja häiringud [15]:

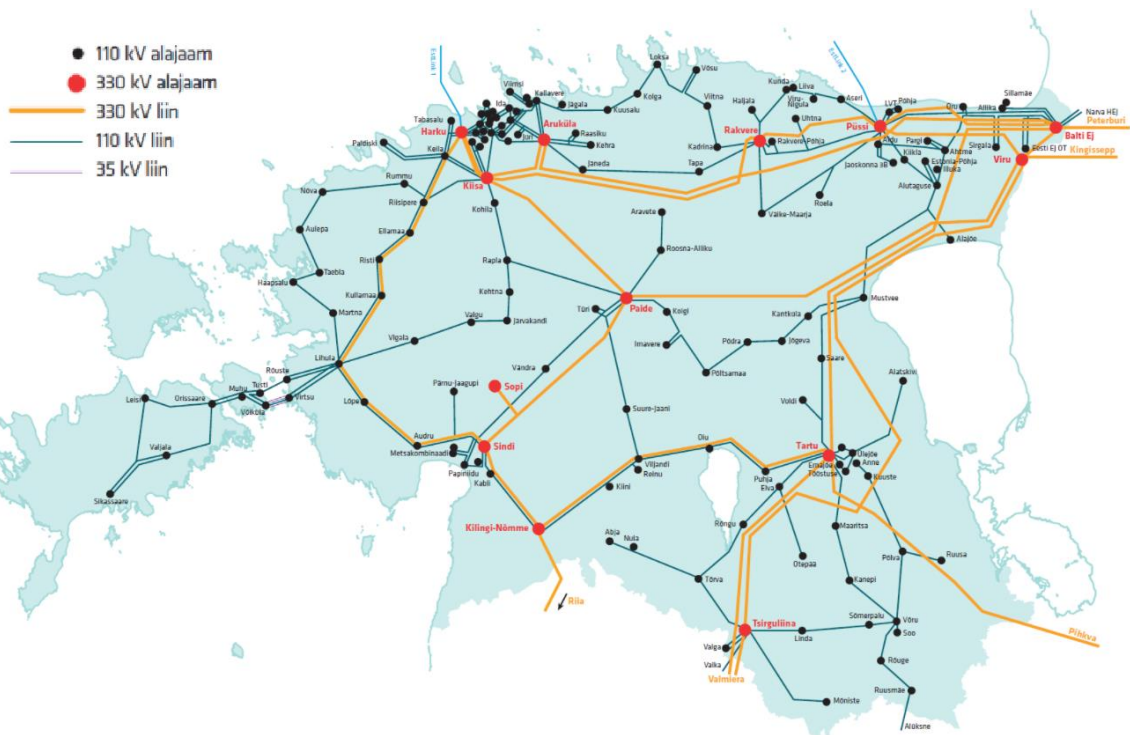
- Suurenenud neutraalivoolud, mis põhjustavad trafo neutraali ülekuumenemist;
- Vead elektrimõõteseadmetes;
- Võimsusteguri vähenemine;
- Trafode ülekuumenemine - eriti kolmnurkühendusega trafod, kuid samuti solenoid mähiste ning valgusti liiteseadiste (ballast) puhul;
- Mootorites ja generaatorites tekivad vastu- ja nulljärgnevuspinged, mis põhjustavad kuumenemist, lisakoormust isolatsioonile ja pingetrafode magnetahelatele ning pingetõusu (keskpingevõrkude) faasijuhtmete ja maa vahel [16];
- Häiringud kaitseseadmete töös, näiteks kaitsereleede vale rakendumine;
- Elektroonikaseadmete häired ja rikked.

Kõrgemad harmoonikud on püsivalt ja jäädavalt elektrivõrgus põhjustades seadmetes ja elektrivõrgus erinevaid häiringuid, mille tõttu on nende uurimine ja analüüsimine olulisel kohal.

### **1.1.3 Eesti ülekandevõrk**

Suurte elektrienergia võimsuste edastamiseks on kasutusel kõrgpingelised ülekandevõrgud. Kuna ülekantavad võimsused on suured ning edastust üritatakse võimalikult ökonoomsena hoida, siis ülekandevõrgus rakendatud pingeastmed algavad suurusjärgust 110 kV (liinipinge). Eesti ülekandevõrk moodustub kõrgepinge õhuliinidest ning maa- ja merekaabelliinidest, mida haldab Elering AS. Joonisel 1.4 on Eesti kaardil välja joonistatud Elering AS-i hallatav ülekandevõrk.

Suurte elektrikoguste ülekandmiseks on Eesti ülekandevõrgus 330 kV õhuliinid, piirkondade vaheliseks elektri jaotamiseks on 110 kV õhuliinid. Eesti ülekandevõrgus on piiriülesed vahelduvvooluühendused Venemaa, Soome ja Lätiga. Elering AS-i juhtimisel olevad Soome ja Eesti vahelised alalisvooluühendused EstLink 1 ja EstLink 2 koosnevad nii maismaal kui ka meres kulgevast kaablist. Käesolevas töös teostati mõõtmised eelnevalt nimetatud alalisvooluühenduste mõõtemuundurite peal.



Joonis 1.4 Elering AS-i hallatav Eesti ülekandevõrgu kaart [17]

Estlink 1 on esimene Eesti ja Soome vaheline alalisvooluühendus, mille võimsus on 350 MW ning pinge 150 kV. Estlink 1 on Soome Espoo alajaama ja Eesti Harku alajaama vaheline kaabel, mille alalisvool muundatakse alalisvoolu muundurjaamades 330 kV vahelduvpingeks. Estlink 2 on aastal 2014 vastuvõetud Eesti ja Soome vaheline alalisvoolu ühendus, mis on Soomes asuva Anttila alajaama ja Eestis asuva Püssi alajaama vahel. Kaabli kogupikkus on ca 170 km, millest umbes 12 km maakaablit on Eestis. Estlink 2 alalisvoolu pingeline on 450 kV ning Püssi alajaamas muundavad alalisvoolu muundurjaamad alalisvoolu 330 kV vahelduvvooluks. Kaabli planeeritud ülekandevõimsus on 650 MW ning energiat on võimalik edastada mõlemas suunas.

Ülekandevõrkudes on üha olulisemal kohal täpne elektri kvaliteedi mõõtmine ja hindamine, kuna järjest suurenev mittelineaarsete tarbijate ja muude häiringuallikate hulga kasv põhjustab põhimõttelisi muutuseid elektrisüsteemides. Eesti ülekandevõrgus on elektri kvaliteedi seireks kasutusel statsionaarsed mõõteseadmed ja faasimõõteseadmed. Elektri kvaliteedi mõõtmiseks ja hindamiseks kasutatakse induktiivseid- ja mahtvuslikke mõõtetrafosid, PQ-sensoriga mahtvuslikke pingetrafosid ning pingejagureid. Induktiivsed pingetrafod ei ole kasutusel 330 kV tasemel. Elektri kvaliteedi täpsemaks hindamiseks tulevikus on vajalik teadmine, milline on erinevate mõõtetrafode mõju elektri kvaliteedi mõõtetulemustele.

## 1.2 Elektri kvaliteedi mõõtmine ülekandevõrkudes

Elektri kvaliteedi mõõtmiste olulisus on aastatega suurenenud, kuna võrgus kasvab mittelineaarsete tarbijate ja allikate hulk pidevalt. Elektrivõrku lisatakse üha enam seadmeid, mis põhjustavad häiringuid elektri kvaliteedis (harmonikute teke) ning samas on tundlikud elektrisüsteemi parameetrite kõikumisele. Selliste seadmete järjest kasvavat osakaalu mõjutab näiteks taastuvenergeetika suurenev osakaal. Nendeks seadmeteks on erinevad pooljuhttehnoloogial töötavad muundurid – elektrituulikute inverterid, FACTS-seadmed (ingl. k. „*Flexible Alternating Current Transmission System*“, paindlikud jõupooljuhtmuunduritega seadmed vahelduvvooluvõrgu talitusparameetrite juhtimiseks). [18] Harmonikute tekitajaid lisandub ajas pidevalt juurde, mille tõttu muutub ka elektri kvaliteedi seire ülekandevõrgus üha olulisemaks, et tagada ülekandevõrgule ettenähtud pinge kvaliteedi nõuded.

Elektrivõrgus teostatakse erinevaid mõõtmisi – kommerts mõõtmine põhisagedusel, rikketalitlussuuruste mõõtmine ja elektritoite kvaliteedi mõõtmised. Käesolevas töös on põhirõhk kvaliteedi mõõtmistel, kuid lühidalt on järgnevalt ka teised stsenaariumid lahti kirjutatud. Võrgu tavatalitluses on olulisemaks mõõtmiseks kommerts mõõtmised, mille puhul on olulisemateks parameetriteks pinge ja voolu efektiivväärtused. Pinge ja voolu mõõtmiste käigus saadud väljund peab vastama tegelikkuses nende suuruste väärtusele liinis. Peale selle, peab mõõtemuunduri väljundpinge ja -vool omama väikest nihkenurka. Lihtsamate kommerts mõõtmiste puhul tekitavad ebatäpsuseid pinge- ja voolumõõteviga ning pinge ja voolu mõõtmisel esinev nurgaviga. [18] Standardis EVS-EN-61869-1 [19] on esitatud üldnõuded elektrivõrgus kasutatavatele mõõte- ja kaitsetrafodele. Konkreetsed nõuded erinevate mõõtetrafode täpsustele on toodud lisanõuetena standardis EVS-EN 61869-5 [20] mahtuvuslikule pingetrafole ja standardis EVS-EN 61869-3 [21] induktiivpingetrafole. Mõõte-pingetrafole täpsusklass näitab suurimat lubatud protsentides esitatud pingeviga nimipingel ja -koormusel [21]. Mõõtetulemuste täpsuse tagamiseks kasutatakse mõõtemuundureid klassiga 0,2 või 0,5, madalamat klassi – 0,1 – kasutatakse erimõõtmisteks [18].

Rikketalitlussuuruste mõõtmisel mõõdetakse normaaltalitlusest oluliselt erinevaid füüsikalisi suuruseid ja nende kombinatsioone. Mõõdetavad suurused võivad erineda absoluutväärtuste (nt lühised) ja sageduse poolest. Näiteks lühiste tekkimisel võib löökvool olla kümneid kordi suurem liini normaaltalitlusvoolust ning võrgus võivad esineda tunduvalt kõrgemal sagedusel või aperiodilised pinge- ja voolukomponendid. Rikketalitlussuuruste mõõtmisel on mõõtemuunduritel füüsikalised ja ehituslikud piirangud. Seetõttu on antud juhul standardite EVS-EN 61869-5 [20], EVS-EN 61869-3

[21] ja EVS-EN 61869-2 [22] alusel määratud suurem tolerants. Kaitsetrafode täpsusklassid pingemõõtmistel on 3% ja 6% [20], [21] ning voolumõõtmistel 5% ja 10% [22].

### 1.2.1 Standardid ja piirväärtused harmoonikute mõõtmiseks

Harmoonikud põhjustavad seadmetes ja elektrivõrgus erinevaid häiringuid, mille tõttu on nende uurimine, analüüsimine ning piirväärtuste kehtestamine olulisel kohal. Mittelineaarsed seadmed ehk seadmed, mille impedantsi muutus sõltub sisendpingest (näiteks elektrituulikute inverterid), põhjustavad moonutusi voolu siinuslainekujus, isegi kui toitepinge on siinuseline. Mittesiinuselised voolud sisaldavad endas ka vooluharmoonikuid, mis vastavalt ülekandevõrgu impedantsile tekitab pingelangu, mis omakorda moonutab toitepinge siinuslainet. [4] Pinge kvaliteedi püsima jäämiseks on oluline sätestada ja jälgida piirväärtused vooluharmoonikute emissioonide kohta elektrivõrgus.

Kõrgemad harmoonikud on püsivalt ja jäädavalt elektrivõrgus ning põhjustavad mittesiinuselise voolu, mida on võimalik käsitleda perioodilise funktsioonina. Selleks, et analüüsida keerulisi signaale, millel on palju erinevaid sagedusi, on kasutusele võetud mitmeid matemaatilisi meetodeid. Nendest populaarseim on *Fourier'* teisendus, mille kohaselt on võimalik igasugust perioodilist funktsiooni kujutada reana. Sellised meetodid töötavad ideaalselt vaid juhul, kui mõõdetav signaal koosneb kindlates vahemikes harmoonikutest ning sageduse väärtused on mõõteperioodil püsivad. Siinuskuju muutvaid vaheharmoonikuid tavalised mõõteseadmed otseselt tuvastada ei suuda, mõõteseadme tuvastab need osaliselt mõõdetud vaheharmoonikutele lähedal olevatele põhikomponendi täisarv-kordsete harmoonikutena. [15]

Standardi EVS-EN 50160 kohaselt hinnatakse pingeharmoonikuid üksikult kuni 50nda järguni ja ühiselt (harmoonmoonutustegur). Üksikult hinnates vaadatakse amplituudi  $U_h$  ja põhiharmooniku amplituudi  $U_1$  suhtega, kus  $h$  näitab kõrgema harmoonilise järku. Ühiselt hindamiseks kasutatakse harmoonmoonutustegurit THD (ingl. k *Total harmonic distortion factor*), mille leidmiseks kasutatakse avaldist 1.1: [8]

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} (U_h)^2}}{U_1} \quad (1.1)$$

Harmoonikute taseme üldiseks hindamiseks elektrivõrgu kindlates punktides, milleks valitakse tavaliselt klientide liitumispunktid, kasutatakse ühe nädala vältel mõõdetud 10-minutilisi pinge efektiivväärtuse keskväärtuseid ning tulemused peavad 95 % juhtudel olema väiksemad või võrdsed, kui tabelis 1.1 väljatoodud väärtused. Tabelis 1.1 järgi ei määratleta harmoonikuid üle 25nda järgu, kuna need on tavaliselt väikesed ja resonantsnähtuste tõttu suurel määral ettearvamatud. Toitepinge harmoonimoonutustegur THD piirväärtus on standardi EVS-EN-50160 [8] kohaselt läbivaatamisel.

Tabel 1.1 Üksikute harmoonikute pingepidesuurused liitumispunktis kuni järguni 25 protsentides nimipingest  $u_1$  [8]

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

Ülekandevõrkude rajamisel tuleb arvestada alates planeerimise tasandist pingepinge- ja voluharmoonikutega. Standardis IEC 61000-3-6 [23] on toodud soovituslikud harmoonikute väärtused (Tabel 1.2), kuid need võivad erineda vastavalt piirkonna või süsteemioperaatori eelistustele. Standardis [23] on kõrgepingevõrkude soovituslik THD tase 3 %.

Tabel 1.2 Pingeharmoonikute soovituslikud väärtused planeerimise tasemel kõrgepinge võrkudes protsentides nimipingest  $u_1$  [23]

Paaritud harmoonikud				Paarisharmoonikud	
3-ga jagumatud		3-ga jaguvad			
Järk $h$	Suhteline väärtus $u_h, \%$	Järk $h$	Suhteline väärtus $u_h, \%$	Järk $h$	Suhteline väärtus $u_h, \%$
5	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
$17 \leq h \leq 49$	$1,2 \cdot \frac{17}{h}$	$21 < h \leq 45$	0,2	$10 \leq h \leq 50$	$0,19 \cdot \frac{10}{h} + 0,16$

Vooluharmonikute puhul normitakse harmoonikute voolu ehk psfomeetrilist faasivoolu  $I_p$ , mis arvutatakse keskmise aktiivvõimsuse ja nimipinge juures liitumispunktis, kui võimsustegur on 1. Psfomeetrilist faasivoolu arvutatakse avaldisega 1.2 [14] ning suurimad vooluharmonikute väärtused, mis on tarbijale lubatud võrku anda, on esitatud tabelis 1.3. Joonisel 1.4 on selgitusena välja toodud avaldises 1.2 olev harmooniku sageduse kaal  $p_h$  ehk kui halvasti teatud harmoonilise sagedus mõjub.

$$I_p = \frac{1}{1000} \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^{h=N} (p_h \cdot I_h)^2} \quad (1.2)$$

kus

$h$  – harmooniku number

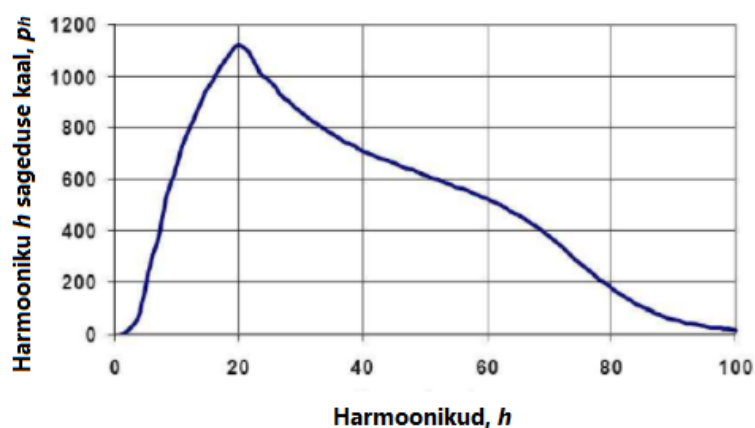
$N$  – harmoonikute koguarv

$I_h$  –  $h$  harmooniku faasivool

$p_h$  – harmooniku  $h$  sageduse kaal (selgitav joonis 1.5)

Tabel 1.3 Suurimad lubatud voolu emissiooni väärtused tarbijatele [14]

<b>Protsent (%) tarbija nimivoolust</b>	
Voolu maksimaalne moonutus	6 %
Psfomeetrilise faasivoolu väärtus	5 A
Voolu vastujärgnevuskomponent	20 %



Joonis 1.5. Erinevate harmooniliste psfomeetrilised kaalutegurid [14]

Püsiolukorras on lubatud paaritute vooluharmonikute harmoonmoonutustegur THD voolutugevuse suhtes 5 % ning samas sagedusvahemikus paaris vooluharmonikute piiremissioonid ei tohi ületada 25 % paaritutele vooluharmonikutele lubatud väärtuseid. Tarbijate poolt tekitatavad harmoonilised ei tohi põhjustada liitumispunktis pingetõusu. [14]

### 1.2.2 Standard IEC 61000-4-30

Standard IEC 61000 [1] on rahvusvaheline standard, milles käsitletakse elektromagneetilise ühilduvuse (ingl. k. EMC – *Electromagnetic compatibility*) teemat ning osas 4-30 on kirjeldatud testimise ja mõõtmise tehnikaid, täpsemalt on lahti seletatud elektri kvaliteedi mõõtmise meetodid. Selles standardis on jaotatud elektri kvaliteedi mõõtemetodid kahte klassi – A ja S.

Klass A on kasutusel juhtudel, mil on tarvis väga täpseid mõõtetulemusi. Näiteks lepinguliste pöördumiste puhul, kui on tarvis lahendada vaidluseid, ning kontrollides võrguparameetrite vastavust standarditele. Klassi A mõõtmiste puhul tehakse mõõtmised ühe signaali jaoks kahe erineva seadmega, mis vastavad antud klassi nõuetele. Kahe erineva seadmega teostatud mõõtetulemuste erinevused peavad jääma selle parameetri kindlaks määratud mõõtemääramatuse piiridesse. Mõõtemetodi klassi S kasutatakse statistilistel eesmärkidel, näiteks erinevateks uuringuteks või elektrikvaliteedi hindamiseks, mida on võimalik läbi viia piiratud parameetrite alamhulgaga. Antud klassil on samad mõõteintervallid, nagu klassil A, kuid madalamad nõuded mõõtetulemuste hindamiseks.

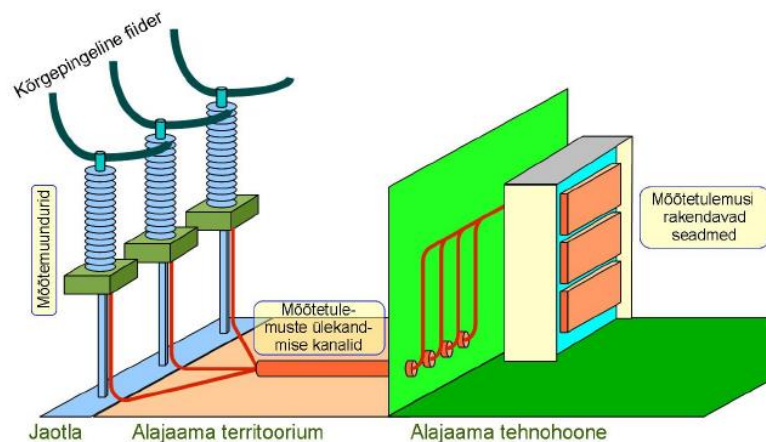
Käesoleva töö praktilises osas uuritakse pingeharmonikuid, seetõttu toodi antud standardist välja vaid pingeharmonikute mõõtmine. Mõõtemetod A-klassi puhul on pingeharmonikute baasmõõtmised määratletud standardi EVS-EN 61000-4-7 [24] klassiga I. Mõõtmised peavad küündima vähemalt 50nda harmoonikuni. Mõõtemetod S-klassi puhul on samad mõõtmised määratletud samas standardis klassiga II ning mõõtmised peavad olema teostatud vähemalt 40nda harmoonikuni.

Mõõtemääramatused on klassi A ja S puhul käsitletud standardis EVS-EN 61000-4-7 [24] vastavalt klassidega I ja II. Mõõtemetodi klassi A puhul peab mõõtepiirkond olema standardi EVS-EN 61000-2-4 [25] järgi 10...200 % klassi 3 ühilduvuse tasemest. Mõõtemetodi klass S puhul on vahemikuks 10...100 %. Pinge vaaharmonikute puhul on baasmõõtmised, mõõtemääramatused ja -piirkonnad määratletud klass A puhul samade tingimustega, nagu pinge harmoonikute mõõtmisel. S-klassi puhul on need mõõtmised täpsustatud tootja poolt.



## 1.3 Erinevate mõõtetrafode mõju harmoonikute mõõtmistele

Elektri kvaliteeti mõõtes jälgitakse tavaliselt pinget ja voolu hetkväärtuseid, samuti ka pinget ja voolu vahelist nurka. Selleks, et elektriliste suuruste (vool, pinget) mõõtmised oleksid täpsed ning mõõtetulemused usaldusväärsed, tuleb arvestada mõõtemuunduri (ehk mõõtetrafo) ja sellega seotud lülid omadustega. Joonisel 1.6 on välja toodud mõõtetrafoga seotud olulisemad lülid, milleks on mõõtetulemust ülekandev kanal ja mõõtetulemust rakendav seade. Läbi ülekandmise kanali kantakse mõõtetulemuse jaotlast mõõtetulemuse rakendavate seadmeteni, milleks on relekaitsekontrollerid, arvestid, regulaatorid, rikke asukoha määrajad, sündmuste salvestid jne.



Joonis 1.6 Lihtsustatud skeem alajaama mõõteseadmetest ja olulisematest lülidest [18]

Uuringus [18] kirjeldatakse, et mõõtetrafod on mõõtevahendid, mis muundavad nende sisendisse rakendatud kõrgepingelise ning suure voolu signaali kindlal viisil sõltuvaks madalapingeliseks mõõtesignaaliks. Muundurite ülesanne on edastada informatiivne signaal edasi mõõteriistadele ja arvestitele. Kaitsemõõtemuundur on seade, mis edastab informatsiooni kaitse- või juhtseadmetele või sarnastele seadmetele. Ülekandevõrkude alajaamades kasutatud mõõtemuundureid saab jagada uuringu [18] põhjal tööpõhimõtete ning väljundi omadusi arvestades kaheks. Esiteks on kasutusel tavapärased ehk konventsionaalsed mõõtemuundurid, millel on väljundid relekaitseseadmete toiteks ja mõõtetulemuste edastamiseks. Tavapärased mõõtemuundurid sobivad tööks alajaamadesse, kus on elektromehaanilised releed. Sellistel mõõtetrafodel on võimas tavatalitluse väljundkoormus, suuruses kümned kuni sajad VA, samuti on mõõteseadme sisendi koormus suur. Konventsionaalsed mõõtemuundurid on näiteks pinget- ja voolutrafad, mahtuvusliku pingejaguriga pingetrafad, kuid viimane ei ole sobilik vanemate relekaitseseadmete toiteks.

Alajaamades täiselektroonsele releekaitstesüsteemile ülemineku tulemusena on vähenenud mõõtemuundurite nõutavad väljundvõimsused, kuna need on aktiivseadmed ja nende energiavarustus saadakse mõõteväljunditest sõltumatutelt ahelatelt. Sellised muudatused võrgus võimaldasid kasutusele võtta uusi erinevaid mõõteseadmeid, näiteks mahtvuslikud pingetraford. Sellistest muudatustest tulenevalt on teiseks jaotuseks uuringu [18] põhjal mittetavapärased ehk mittekonventsionaalsed mõõtemuundurid, mis omavad ainult mõõtetulemuse edastamiseks ette nähtud väljundit. Nende mõõtemuundurite definitsiooniks võib pidada standardite EVS-EN 61869-1 [19] järgi antud määratlusi alajaama mõõteseadmetele. Erinevalt tavapärastest mõõtemuunduritest on mittetavapärastel mõõtemuunduritel väike väljundi võimsus ning selleks võib olla väikepingeline, optiline analoogsignaali või diskreetne info. Nendes mõõtemuundurites on kasutusel erinevad tajurid. Selleks, et tajurilt tulevat signaali väljastada mõõtesuurust rakendavale aparaadile, on tarvis seda täiendavalt võimendada või töödelda. Mittetavapärased mõõtemuundurid on näiteks mahtvus-takistuslikud ja takistuslikud pingejagurid, õhksüdamikuga vooluandurid ning optilised pinge- ja vooluandurid.

### **1.3.1 Erinevate mõõtetrafode tööpõhimõte**

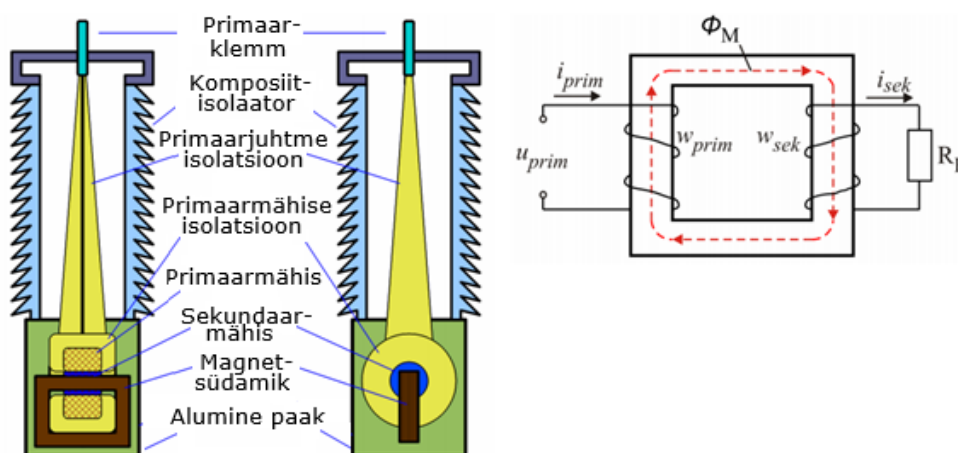
Sõltuvalt rakendusotstarbele eristatakse mõõte- ja kaitsetrafosid. Selles töös keskendutakse mõõtefunktsiooni omavatele mõõtetrafodele, mille alla kuuluvad erinevad induktiivsed ja mahtvuslikud mõõtetrafod, takistuslikud ja mahtvuslik-takistuslikud pingejagurid, voolutajurid, erinevad optilised mõõtemuundurid ning voolumõõtešundid.

Vahelduvvoolu võrgus kasutatakse mõõtmiseks pingetrafosid, kui liiga kõrgete pingete tõttu on erinevate mõõteseadmete, releede jm vahetu võrku ühendamine ohtlik või tehniliselt võimatu. Üldjuhul valmistatakse pingetrafosid ühefaasilistena, kuid keskpinge võrkudes kasutatakse ka kolmefaasilisi pingetrafosid. Kõrgepingevõrkudes (110 kV ja rohkem) on kasutusel isoleerkestas pingetraford, kuid keskpinge võrkudes on lisaks veel ka metallkestas pingetraford. Pingetrafoodel on reeglina kaks sekundaarmähist, millest üks on peamiselt kaitsetrafodes kasutusel nulljärgnevuspinge tuvastamiseks, ning need sobitatakse mõõte- või automaatikaseadme pingele ja ühendusviisiga. Primaarmähis lülitatakse aga kõrgepingeahelasse rööpselt.

Mõõtetrafode puhul on nende täpsus väga oluline, kuid on olukordi, mille tõttu tekivad mõõtmistel vead. Näiteks on võimalike vigade põhjustajateks kõrgemad pingeharmonoonid, sageduse kõrvalekalded, vastujärgnevuskomponendid

(asümmeetria) ning mõõtetrafode mittelineaarsus. Pingetrafod on võimalik tööpõhimõtte alusel jagada rühmadesse ning järgnevalt on need lahti seletatud:

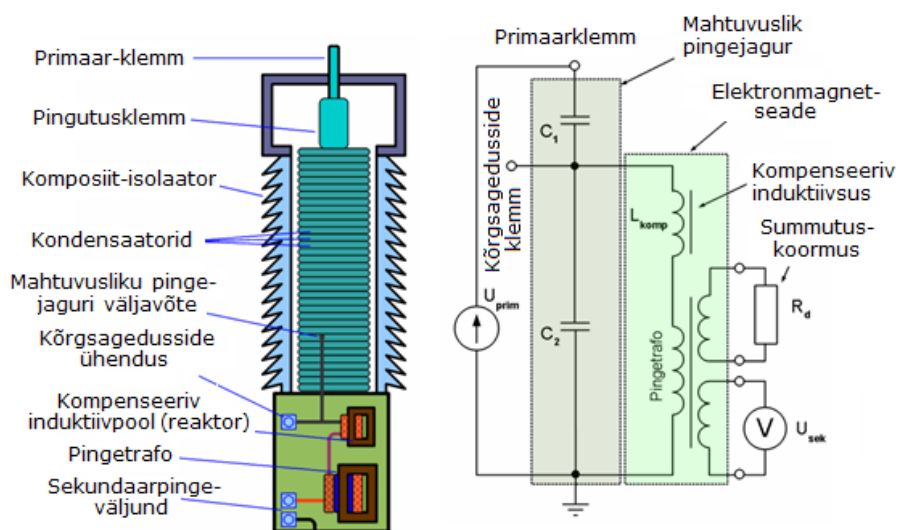
**Induktiivpingetrafode** ehk elektromagnetiliste pingetrafode põhikomponentideks on primaar- ja sekundaarmähis(ed), mis on paigutatud ümber leht- või lintterasest südamikku. Joonisel 1.7 on selgitavalt välja toodud induktiivsepingetrafo kahes vaates läbilõiked ning lihtsustatud tööpõhimõtte skeem, kus  $U_{prim}$ ,  $w_{prim}$  ja  $i_{prim}$  on vastavalt primaarmähise pingele ehk mõõdetav pingele, keerdude arv ning vool;  $U_{sek}$ ,  $w_{sek}$  ja  $i_{sek}$  on vastavalt sekundaarmähise väljundpingele, keerdude arv ning vool; magnetvoogu trafo magnetsüdamikus tähistab  $\Phi_M$ . Primaarmähis on ühendatud mõõdetava pingele tasemele ning sõltuvalt pingele suuruselt valitakse selle mähise parameetrid ja isolatsioon. Sekundaarmähis on mõõtesuuruse väljundiks. Mõõtetrafol võib olla mitu erineva otstarbega sekundaarmähist. Näiteks suurema täpsusklassiga kommertsmõõtemähised ning suurema mõõteulatusega relekaitse mähised.



Joonis 1.7 Induktiivpingetrafo läbilõige ja lihtsustatud tööpõhimõtet selgitav skeem [18]

Antud mõõtetrafosid toodetakse elektrivõrgus kõikidele nimipingetele ja tänu lihtsale ehitusele on need väga töökindlad. Ka majanduslikult on induktiivpingetrafod kasulikud, kuna neid on lihtne ja odav paigaldada ning hoolduskulud on madalad. Pingetrafode puhul on küllastumine oht suur, nii on ka selle trafo puuduseks küllastumine (magnetsüdamik), mille tagajärjel trafo kuumeneb ning võib tekkida ferresonants. Küllastunud magnetsüdamikuga trafol tekivad vead rikkeolukordade tuvastamisel, näiteks rikke ajal pingele mõõtmine või liigpingete mõõtmine [18]. Tehnilises aruandes IEC/TR 61869 [26] on välja toodud, et induktiivpingetrafode (pingetele 52 kV ... 1100 kV) käitumine kõrgetel pingetel halveneb sagedustel üle 500 Hz ja tavalised induktiivtrafod ei anna täpset tulemust sagedustel, mis ületab viiendat harmoonikut.

**Mahtvusliku pingetrafo** ehk kondensaatorpingetrafo põhikomponentideks on kondensaatoritest koosnev mahtvuslik pingejagur ja elektromagnetseade (Joonis 1.8). Kõrgepingele alajaamades kasutatakse mahtvuslikku pingetrafo, mille pingejagurile on rakendatud magnetsüdamikuga pingetrafo, millelt saadakse sekundaarpinge väljund. Selline lahendus võimaldab saada mahtvusliku pingetrafo sekundaarväljundi sarnaseks induktiivpingetrafo näitajatele.



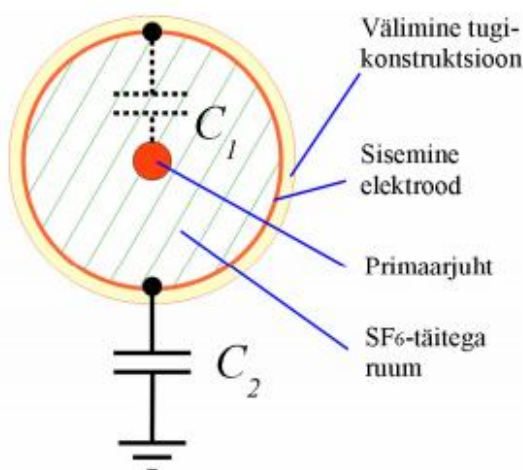
Joonis 1.8 Mahtvusliku pingetrafo läbilõige ja askeem [18]

Võrreldes induktiivpingetrafoodega on mahtvuslike pingetrafo täpsus väiksem, kuid need on oluliselt odavamad. Mahtvusliku pingetrafo ülekandesuhe on sõltuvuses mõõdetava pinge sagedusest ning nõutav sagedus on  $50 \text{ Hz} \pm 0,5 \text{ Hz}$  ehk mõõtetäpsus on suur vaid põhisageduse ümber. Selle omaduse tõttu pole elektri kvaliteedi ja pingeharmonikute mõõtmine antud seadmega võimalik. Mahtvusliku pingetrafo eeliseks on selle lihtne konstruktsioon, väike komponentide arv ning seadme kaalu ei suurenda massiivne trafo terassüdamik [18]. Sarnaselt induktiivpingetrafo, on ka sellel mõõtetrafo oht ferreesonantsi tekkeks. Tehnilises aruandes IEC/TR 61869 [26] on märgitud, et mahtvuslikud pingetrafo ei sobi teisest järgust kõrgemate harmoonikute mõõtmiseks. Sellise täpsusega mõõtetrafo ei saa kasutada elektri kvaliteedi hindamiseks, kuid selle probleemi lahendamiseks on tootjate poolt leitud lahendus, kus on lisatud pingetrafole täiendav funktsionaalsus, näiteks PQ-sensor.

**PQ-Sensor** on unikaalne seade, mille abil on võimalik mahtvuslikku pingetrafo kasutada kõrgemate harmoonikute ja elektri kvaliteedi mõõtmisteks. Sõltumata elektrivõrgu pingeklassist, on võimalik PQ-sensor ühendada võrgus olemas olevale mahtvuslikule pingetrafole ning see ei avalda mõju pingetrafo tavapärasele toimimisele [27]. Nagu ka eelnevalt on välja toodud, siis mahtvuslike pingetrafo mõõtmistäpsus

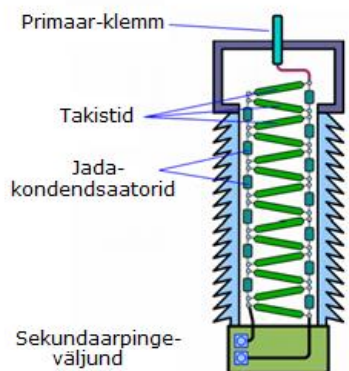
sõltub mõõdetava pinge sagedusest - mida põhisagedusele sarnasem signaal, seda täpsem mõõtetulemus. Kui mahtuvuslikule pingetrafole on lisaks paigaldatud PQ sensor, võimaldab see mõõta sagedusi vahemikus 10...5000 Hz [28]. See tähendab, et elektrisüsteemis põhisagedusega 50 Hz on võimalik PQ-sensoriga mõõta kuni 100.harmoonikuni.

**Mahtuvuslik pingejagur** koosneb põhimõtteliselt kahest liini ja maa vahele jadalülituses ühendatud järjestikku kondensaatorist (Joonis 1.9). Mahtuvusliku pingejaguri täpsus on tagatud laias sagedusribas (ulatus tavaliselt kilohertsidesse), mis tähendab, et see sobib hästi kõrgemate pingeharmonikute mõõtmiseks. Peale selle on antud mõõteseade töökindel, vastupidav ning odav. Peamiseks puuduseks on alaliskomponendiga siirdeprotsesside mõõtmiste läbiviimiseks mittesobivus [18]. Tehnilises aruandes IEC/TR 61869 [26] on öeldud, et mahtuvuslikul pingejaguril mõju harmoonikute mõõtmistel amplituudile puudub, kuid faasinurgale on mõju olemas.



Joonis 1.9 Mahtuvusliku pingejaguri konstruktsiooni näide gaasisoleeritud alajaamas [18]

**Takistuslik pingejagur** koosneb kahest liini ja maa vahele jadalülituses ühendatud aktiivtakistusest. Kompenseeritud pingejagurites ehk RC-pingejagurites on ühendatud paralleelselt pingejaguri takistitega lisakondensaatorid, mille eesmärk on kompenseerida induktiivsust ja hajutatud mahtuvust (Joonis 1.10). Need esinevad takistite ja teiste juhtide vahel. Selliselt suudetakse tagada lai töösagedusriba, tänu millele saab selle seadmega mõõta täpselt elektri kvaliteeti ja kõrgemaid pingeharmonikuid.

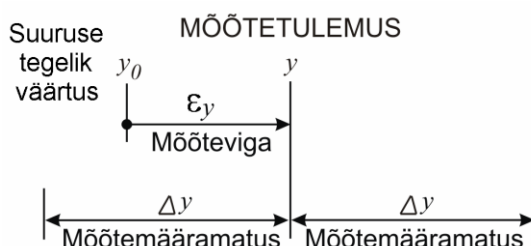


Joonis 1.10 Kompenseeritud ehk mahtuvuslik-takistusliku pingejaguri läbilõige [18]

Erinevalt mahtuvuslikust pingejagurist, sobib antud mõõteseade ka erinevate siirdeprotsesside mõõtmiseks. Takistusliku pingejaguri peamiseks puuduseks on väike väljundivõimsus, mis tekitab vajaduse tavamõõtmisteks lisavõimenduslüli olemasolu. Lisaks eraldub pingejaguris olevatelt takistitelt soojuslik võimsus, mida mõjutab pingejagurit läbiv vool, kuid kuna sellest sõltub mõõtmiste täpsused, ei saa voolu väga väikeseks viia. [18] Tehnilises aruandes IEC/TR 61869 [26] on välja toodud, et antud mõõteseadmel harmoonikutele ja teistele elektri kvaliteedinäitaja mõõtmistele mõju ei ole. Selle põhjal võib väita, et eelnevalt loetletud mõõteseadmetest sobivad kõrgemate pingeharmonikute mõõtmiseks pingejagurid ja PQ-sensoriga mahtuvuslikud pingetraford.

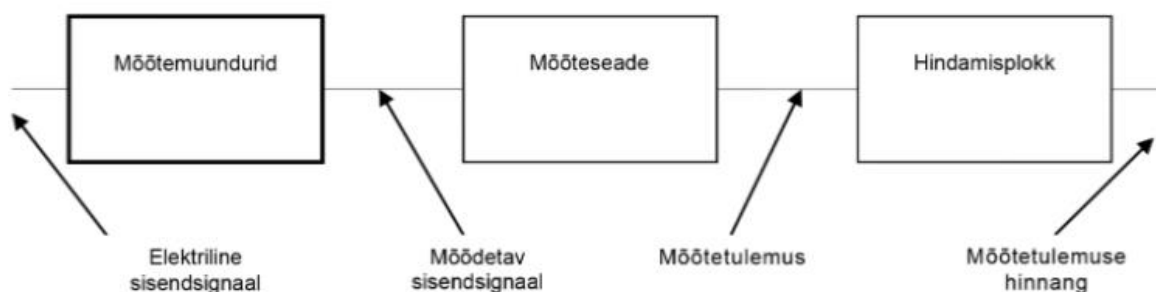
### 1.3.2 Mõõtetrafode mõõtetäpsused

Olenemata, kui täpselt ja hoolikalt mõõtmisi läbi viiakse, pole kunagi võimalik saada täpset väärtust. Kõiki mõõtmisi mõjutavad mõõtetäpsuse ja -tulemuse usaldusväärsus. Joonisel 1.11 on selgitatud mõõtetulemus  $y$ , mis on suuruse väärtuste kogum, mis koos kogu muu saadaoleva asjakohase infoga omistatakse mõõtesuurusele; mõõteviga  $\epsilon_y$ , mis on mõõtetulemuse ja mõõdetava suuruse tegeliku väärtuse  $y_0$  erinevus ning mõõtemääramatus  $\Delta y$ , mis on vahemik, milles mõõtetulemuse põhjal võib esineda mõõdetava suuruse väärtus.



Joonis 1.11 Mõõtetulemuse, -vea ja määramatuse seletus [18]

Selleks, et teha kindlaks, kuidas mõjutavad erinevad mõõtetrafod üldist elektri kvaliteedi mõõtmiste määramatust, tuleb arvestada mõõtmismeetodiga ja mõõtetrafo elektrilise käitumisega häiringute korral. Standardi IEC/TR 61869-103 [26] järgi käsitletav kogu mõõteahel on skemaatiliselt esitatud joonisel 1.12. Mõõtemuundurite panust üldisesse mõõtemääramatusesse tuleb kvantitatiivselt arvestada lisamääramatusena. Mõõtmistel ilmnevad määramatused on käsitletud standardites EVS-EN 61000-4-30 [1], EVS-EN 60359 [29], EVS-EN 61557-12 [30]. Kogu süsteemi määramatust mõjutavad väliste tajurite talitlusmääramatus, juhtmete takistus, mõõteseadme olemuslik määramatus tavatingimustel, elektrisüsteemi elektriliste parameetrite, nt harmoonikute, põhjustatud hälbed, väliste tegurite (nt temperatuuri) põhjustatud hälbed.



Joonis 1.12 Kogu mõõteahela skemaatiline selgitus [26]

Mõõteseadme olemuslik määramatus on käsitletud standardi EVS-EN 61869 [19] lisanõuetena erinevatele mõõteseadmetele. Pingetrafoode viga koosneb suhte- ehk pingeveast  $\varepsilon$  ja nurgaveast  $\Delta\varphi$ . Protsentides väljendatud suhteviga määratakse avaldisega 1.3 [19]:

$$\varepsilon = \frac{(k_r \cdot U_S - U_P)}{U_P} \cdot 100 [\%] \quad (1.3)$$

kus

$k_r$  – trafo nimiülekanadesuhe

$U_P$  – tegelik primaarpinge

$U_S$  – tegelik sekundaarpinge, kui  $U_P$  on rakendatud mõõtmistingimustes

Mõõtepingetrafo pinge- ja nurgavea väärtused ei tohi ületada tabelis 1.4 esitatud mahtvuslikule ja induktiivsele pingetrafole kehtestatud piirväärtuseid pingevahemikus 80 % kuni 120 % nimipingest ning koormustel vahemikus 0 VA kuni 100 % nimikoormusel võimsusteguril 1 esimeses koormuspiirkonnas või vahemikus 25 % kuni 100 % nimikoormustest võimsusteguril 0,8 teises koormuspiirkonnas. [20][21]

Tabel 1.4 Mõõte-pingetrafode pingeviga ja nurgaviga piirväärtused [20][21]

Klass	Pingeviga (suhteviga) $\epsilon_U$ $\pm \%$	Nurgaviga $\Delta\phi$	
		$\pm$ Minutit	$\pm$ Sentiradiaani
0,1*	0,1	5	0,15
0,2	0,2	10	0,3
0,5	0,5	20	0,6
1,0	1,0	40	1,2
3,0	3,0	Määratlemata	Määratlemata

Märkus. Klass 0,1 on kasutusel induktiivpingetrafode korral.

Elektri kvaliteedi jälgimisel ja seiramisel on oluline, et mõõteseadmed vastaksid neile kehtestatud nõuetele [19] ja edasisel tegevusel tuleb arvestada kogu süsteemi määramatusega k.a mõõtetrafo enda viga ning proovida seda matemaatiliselt kompenseerida või vähemalt arvesse võtta.



## 2. EESTI ÜLEKANDEVÕRGU ELEKTRI KVALITEEDI MÕÕTMISTE METOODIKA

Käesolevas töös analüüsitakse kahe erineva meetodiga kogutud suuremahulisi elektri kvaliteedi mõõtmiste andmeid. Mõõteandmete analüüsiga soovitakse saada infot, millise mõõtemuunduriga on elektri kvaliteeti, täpsemalt kõrgemate pingeharmonikute, kuni 50nda järguni, osakaalu ülekandevõrgus, kõige täpsem mõõta. Selle raames teostati mõõtmised Estlink 1 fiidris mahtuvusliku pingetrafo ja pingejaguri mõõteahelast. Lisaks vaadeldi andmeid Estlink 2 fiidris olevate PQ sensoriga mahtuvusliku pingetrafo ja pingejaguri mõõteahelatest.

### 2.1 Mõõtepunktide valik

Mõõtmised toimusid Eesti - Soome vahelistel alalisvooluühendustel, kuna lisaks tuule- ja päikeseparkidele, on alalisvooluühenduse muundurid ühed suuremad harmoonikute allikad [31] ning lisaks on need Eesti ülekandevõrgus ainukesed punktid, milles asuvad pingejagurid. Selle töö tarbeks toimusid peamised mõõtmised Harku alajaamas Estlink 1 fiidris mahtuvusliku pingetrafo ja mahtuvuslik-takistusliku pingejaguri mõõteahelates.

Teine mõõtmine toimus Püssi alajaamas Eesti – Soome vahelise alalisvooluühenduse Estlink 2 fiidris olevate PQ sensoriga mahtuvusliku pingetrafo ja pingejaguri mõõteahelates. Nende mõõtmiste eesmärk polnud käesoleva lõputöö tarbeks, vaid Estlink 2 mõõtmiste tulemusi vaadeldi teise töö raames. Selles töös kasutati Estlink 2 mõõteandmeid, et analüüsida, kas kõrgemate pingeharmonikute mõõtmistel ilmneb seadmete erinevuses korrelatsioon võimsustaseme suhtes. Eesti – Soome vaheliste alalisvooluühenduste Estlink 1 ja Estlink 2 asukohad kaardil on näidatud joonisel 2.1.



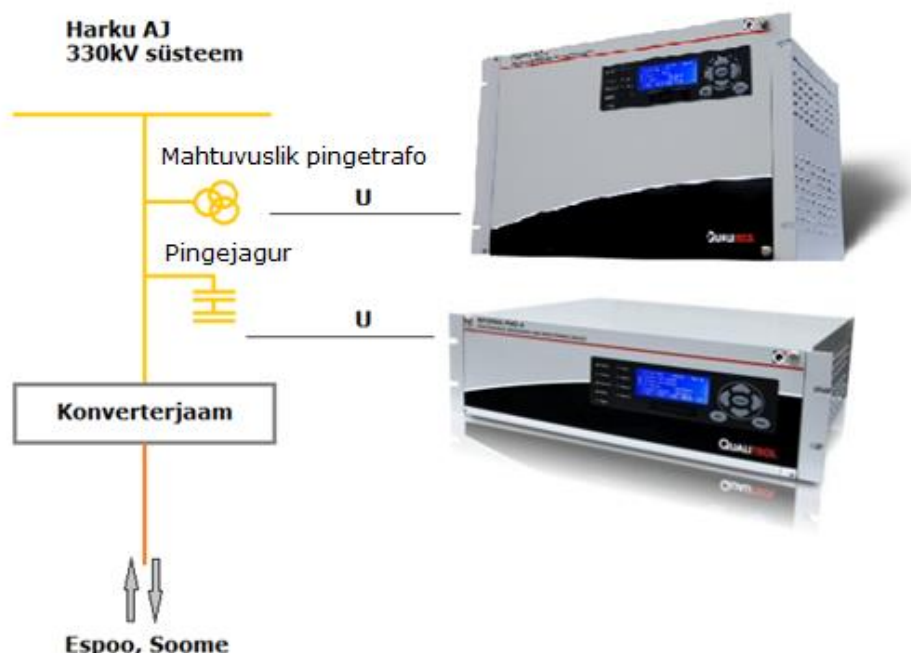
Joonis 2.1 Eesti ja Soome vahelised alalisvooluühendused Estlink 1 ja Estlink 2 [32]

## 2.2 Mõõtmiste metoodika

### 2.2.1 Mõõtmised Harku alajaamas Estlink 1 fiidris

Harku alajaamas Estlink 1 fiidris olevate pingejaguri ja mahtuvusliku pingetrafo mõõtteahelates toimus pidev mõõtmine vahemikus 14. veebruar – 20. veebruar 2020, mil salvestati informatsioon mõlema mõõtemuunduri pealt paralleelselt ja ajaliselt sünkroniseeritult. Mõõtmised teostati elektri kvaliteedi kohta, kus põhirõhk oli kõrgematel pingeharmonikutel. Joonisel 2.2 on esitatud lihtsustatud skeem, kuidas olid mõõteseadmed ühendatud Estlink 1 fiidris.

Mõlemasse mõõtteahelasse ühendati elektri kvaliteedi analüsaator Qualitrol Informa PMD-A [33], mis vastab standardis IEC 61000-4-30 [1] kirjeldatud mõõtemetodi klass A tingimustele kõikide elektriliste parameetrite mõõtmisel. Klass A on kasutusel juhtudel, mil on tarvis väga täpseid mõõtetulemusi. Selline elektri kvaliteedi analüsaator suudab pidevalt salvestada kuni 1014 elektrilise parameetri miinimum, maksimum ja keskmised väärtused 10-minutiliste intervallidena. Harmoonikute mõõtmisel on tulemused kajastatud iga sekundi järelt. Harku alajaama Estlink 1 fiidris olevate pingejaguri ja mahtuvusliku pingetrafo mõõtteahelatesse ühendatud mõõteseadmed on näha joonistel 2.3 ja 2.4.



Joonis 2.2 Elektri kvaliteedi mõõteseadmete põhimõtteline ühendusskeem Harku alajaamas Estlink 1 fiidris



Joonis 2.3 Harku alajaamas Estlink 1 pingejaguri kamber (vasakul) ja mõõteahelasse ühendatud Qualitrol Informa PMD-A mõõteseade (paremal)



Joonis 2.4 Harku alajaamas Estlink 1 pingetrafo kamber (vasakul) ja mõõteahelasse ühendatud Qualitrol Informa PMD-A mõõteseade (paremal)

## 2.2.2 Mõõtmised Püssi alajaamas Estlink 2 fiidris

Teostatud mõõtmiste eesmärk ei olnud käesoleva lõputöö tarbeks, vaid Estlink 2 mõõtmiste tulemusi vaadeldi teise töö raames. Selles töös kasutati Estlink 2 mõõteandmeid, et analüüsida, kas kõrgemate pingeharmonikute mõõtmistel ilmneb korrelatsioon ja vaadeldakse, kas on vajalik tulevikus täpsemalt hinnata erinevusi pingejaguri ja PQ sensoriga mahtuvusliku pingetrafo mõõteahelates. Mõõtmiste lihtsustatud katseskeem on esitatud joonisel 2.5. Tuleb tähele panna, et nende mõõtmiste otsene eesmärk ei olnud otseselt pingeharmonikute mõõtmine erinevate mõõtetrafodega, mille tõttu mõõtmised ei olnud ajaliselt sünkroniseeritud. Sellest olenematam analüüsiti neid andmemahte Estlink 1 mõõtmistele lisaks, võimalike seoste leidmiseks selle töö eesmärkidest lähtuvalt.



Joonis 2.5 Elektri kvaliteedi analüsaatori põhimõtteline ühendusskeem Püssi alajaamas Estlink 2 fiidris

Elektri kvaliteedi mõõtmised Püssi alajaamas viidi läbi 2019. aasta sügisel Estlink 2 fiidri pingejaguri (02.09 – 05.09) ja PQ sensoriga mahtuvusliku pingetrafo (29.08 – 01.09) mõõteahelates pingekvaliteedi analüsaatoriga a-eberle PQ-Box 200 [34], mis vastab standardis IEC 61000-4-30 [1] kirjeldatud mõõtemetodi klass A tingimustele kõikide elektriliste parameetrite mõõtmistel. Nende mõõtmiste käigus mõõdeti erinevatel võimsustel võrgus olevaid kõrgemaid pingeharmonikuid (kuni 50nda järguni) nii Eesti-Soome suunal, kui ka vastupidi. Erinevatel võimsustel kestis mõõteperiood 10 minutit. Võrdluse jaoks valiti välja 5 mõõtmist mõlemal suunal, kokku 10 punkti. Mõõtepunktide valimisel lähtuti, et nii PQ sensoril ja pingejaguriga on mõõdetud sama võimsust. Järgnevatel tabelites 2.1 ja 2.2 on välja toodud valitud punktid katsekavadest.

Tabel 2.1 Uuritavad mõõtepunktid Estlink 2 peal, Eesti- Soome suunal

	Võimsus	PQ sensor		Pingejagur	
		Aeg	Tegelik võimsus, MW	Aeg	Tegelik võimsus, MW
1	520 MW (80%)	30.08 kell 08:30	529,85	04.09 kell 11:14	520
2	455 MW (70%)	30.08 kell 08:43	453,26	04.09 kell 09:06	455
3	325 MW (50%)	01.09 kell 02:38	329	04.09 kell 08:22	325
4	195 MW (30%)	30.08 kell 01:15	195	03.09 kell 19:27	195
5	65 MW (10%)	30.08 kell 00:25	65	03.09 kell 07:46	65

Tabel 2.2 Uuritavad mõõtepunktid Estlink 2 peal, Soome-Eesti suunal

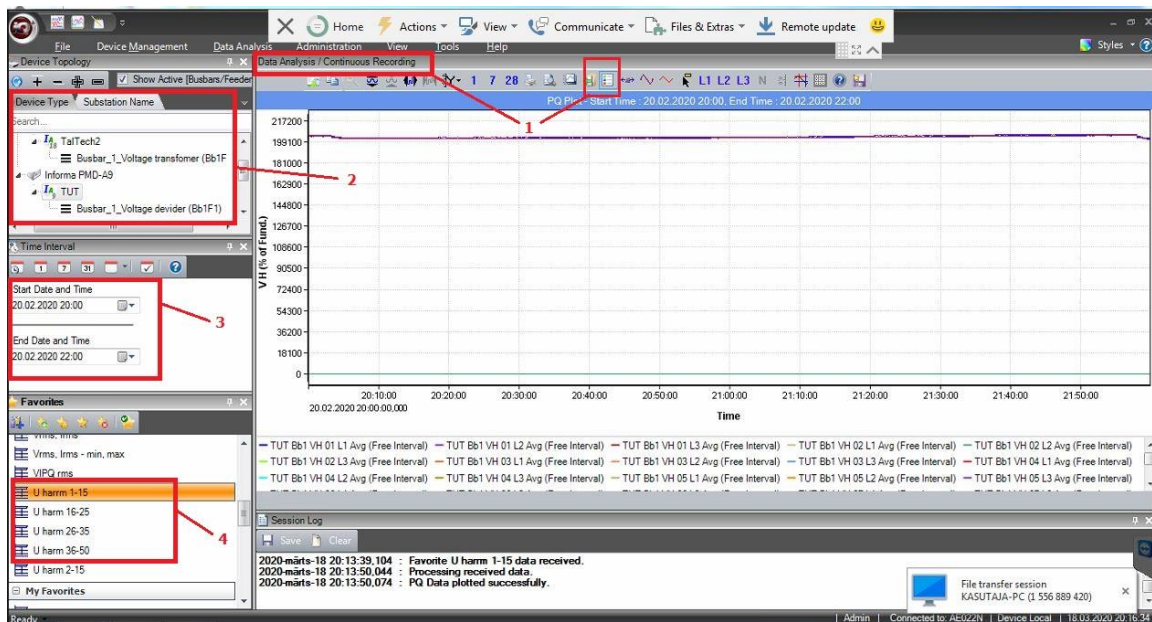
	Võimsus	PQ sensor		Pingejagur	
		Aeg	Tegelik võimsus, MW	Aeg	Tegelik võimsus, MW
1	650 MW (100%)	29.08 kell 21.03	650	02.09 kell 12:37	650
2	520 MW (80%)	29.08 kell 17.07	518,3	02.09 kell 11:05	523
3	325 MW (50%)	29.08 kell 10:02	326,3	02.09 kell 13:16	325
4	195 MW (30%)	29.08 kell 16:40	194	02.09 kell 13:40	195
5	65 MW (10%)	29.08 kell 11:50	64,8	03.09 kell 09:02	64,5

## 2.3 Mõõteandmed programmist iQ+ Client

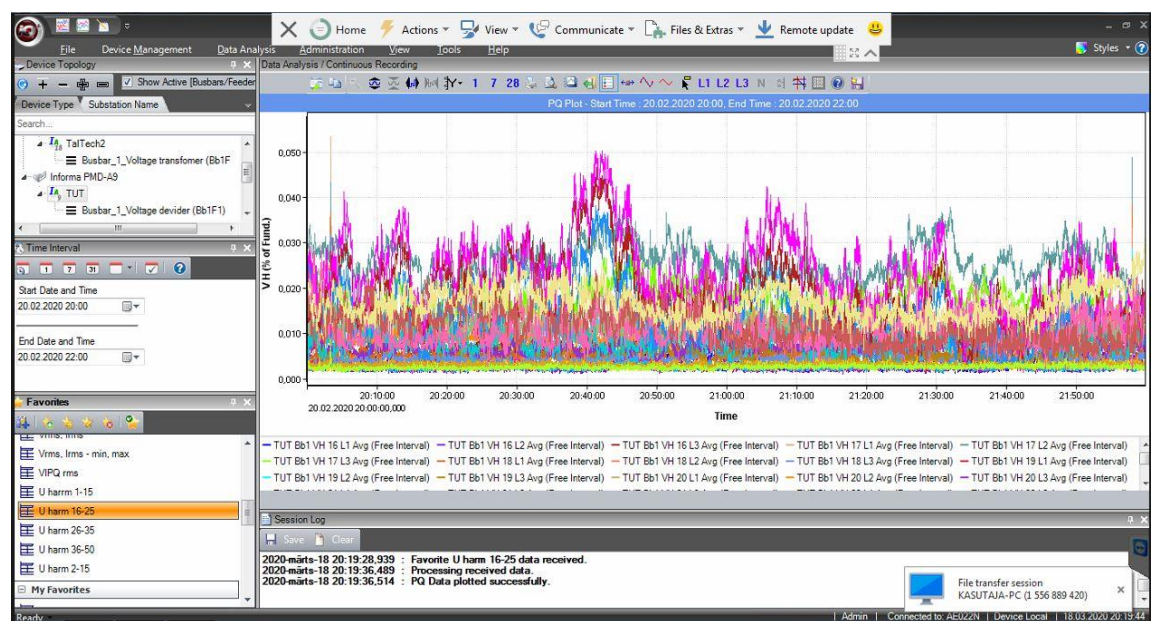
Mõõteseadmetest Qualitrol Informa PMD-A pingeharmonikute mõõteandmete kättesaamiseks käesolevas töös kasutati programmi iQ+ Client [35], millega on võimalik hõlpsalt Qualitrol seadmete mõõdetud andmeid koguda ning analüüsida. Arvutile, kuhu oli paigaldatud programm iQ+ Client ehk kuhu salvestusid teostatud mõõtmiste andmed, puudus otsene ligipääs, selle pärast toimusid mõõteandmete allalaadimised kaugjuurdepääsu tarkvara TeamViewer-i kaudu.

Joonisel 2.6 on nummerdatud ühest neljani toimingute järjekord, kuidas mõõtetulemusi iQ+ Client programmist alla laadida. Alustuseks tuleb valida andme analüüsi (ingl. k. *Data Analytics*) tööribalt „pidevad salvestused“ (ingl. k. *Continuous recordings*) (Joonis 2.6 punkt 1), järgmise sammuna peab valima seadme, mille mõõdetud andmeid programm graafikuna esitab (Joonis 2.6 punkt 2). Antud näitel tähistab mõõteseadet nimega „TalTech2“ seadet, mis kogus infot Estlink 1 fiidri mahtuvusliku pingetrafo mõõteahelast ja „TUT“ pingejaguri mõõteahelast. Kui soovitud mõõteseadet on välja

valitud tuleb programmile ette anda ajavahemik, mille kohta mõõteandmeid kajastada (Joonis 2.6 punkt 3). Mõõtmised toimusid ajavahemikul 14.02.2020 – 20.02.2020, kuid mahukate mõõtmiste korral on programmi ladusamaks tööks soovituslik valida lühem ajavahemik, antud juhul valiti ajavahemikuks kaks tundi. Kui mõõteseade ja mõõtmiste ajavahemik on valitud, tuleb järgmisena selekteerida, milliseid mõõdetud parameetreid programm graafikutele kujutab (Joonis 2.6 punkt 4). Kuna käesoleva töö raames mõõdeti kõrgemaid harmoonikuid, siis valiti vastavad lahtrid välja ning programm laadis andmed ja kujutas valitud ajaperioodil mõõdetud harmoonikute mõõtetulemused graafiliselt, mis on kujutatud joonisel 2.7.

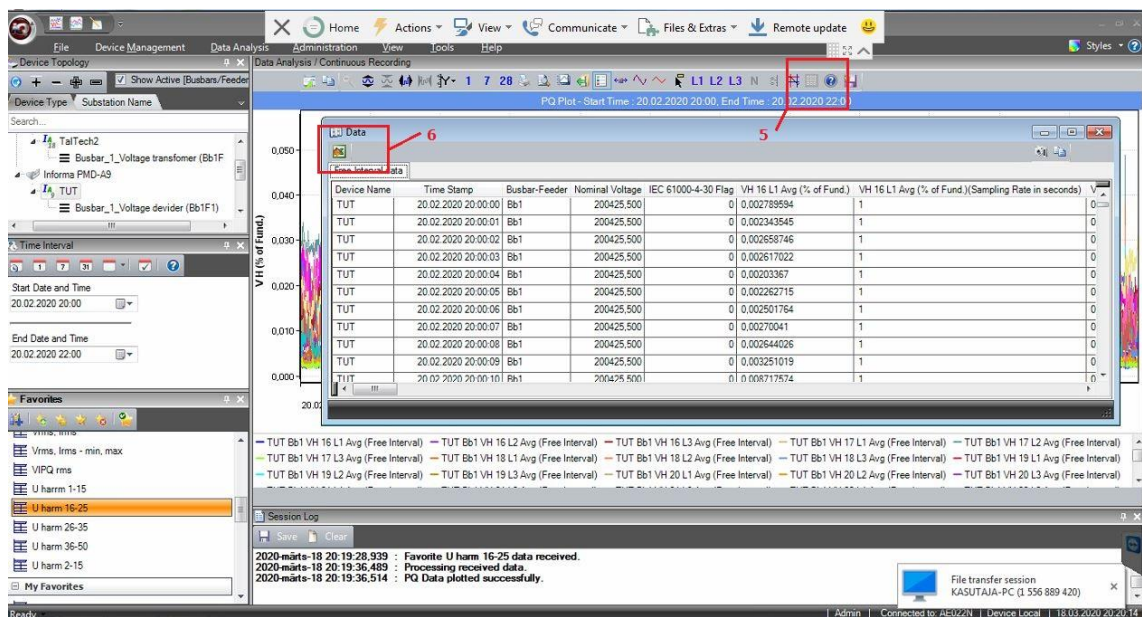


Joonis 2.6 Vaade programmis iQ+ Client. Toimingud 1-4

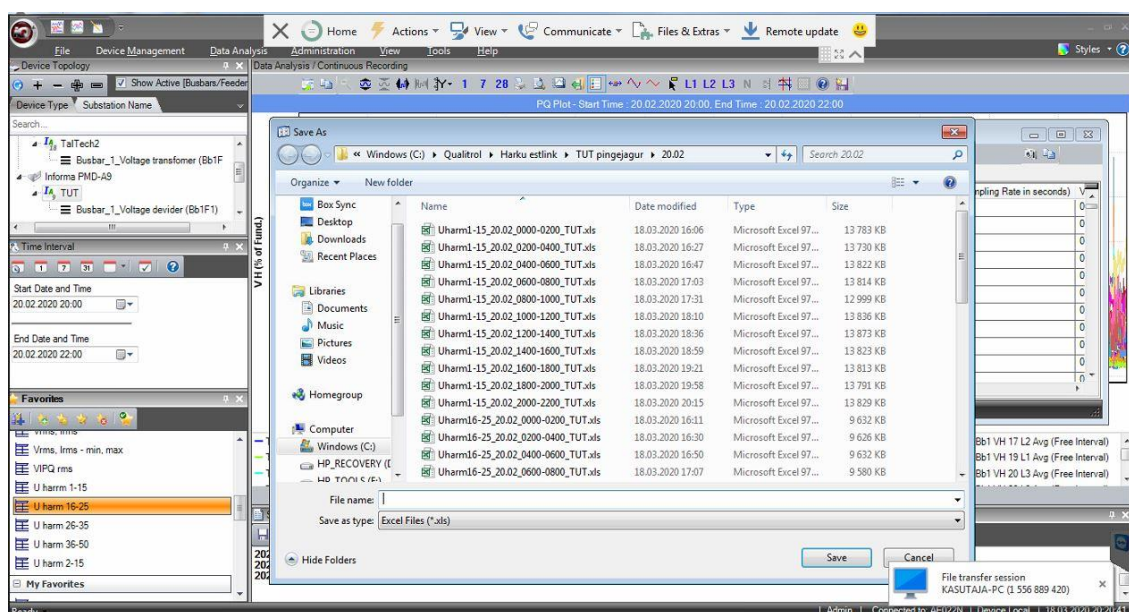


Joonis 2.7 Vaade pingeharmonikute mõõtetulemustest programmis iQ+ Client

Programm kujutab kasutaja poolt välja selekteeritud mõõteseadme, ajaperioodi ja parameetrite kohta mõõtetulemused graafiliselt (Joonis 2.7). Valitud mõõteandmete edasiseks analüüsiks on tarvis andmete Exceli tabelina alla laadimine. Joonisel 2.8 on kujutatud mõõteandmete allalaadimiseks vajalikud toimingud 5 ja 6. Vajutades tööribal olevale ikoonile „vaata andmeid“ (ingl. k. *View data*) avaneb uus aken ning on võimalik andmeid tabelina kuvada (Joonis 2.8 punkt 5). Andmete aknas vajutades ikoonile „Excelisse“ (ingl. k. *to Excel*) on võimalik salvestada selekteeritud mõõteandmed vajalikus (.csv) formaadis (Joonisel 2.8 punkt 6). Joonisel 2.9 on näidatud avanenud salvestamise aken, et salvestada valitud mõõteandmed soovitud kausta.



Joonis 2.8 Vaade programmist iQ+ Client. Toimingud 5-6



Joonis 2.9 Vaade programmist iQ+ Client. Avanenud salvestamise aken

Selleks, et salvestada terve mõõteperioodi ja mõlema mõõteseadme tulemused, tuleb järjest ajaliselt ja harmoonikute kaupa mõõteandmed programmis iQ+ Client laadida ja Excelina salvestada. Kui kõik mõõteperioodi andmed on vajaliku formaati salvestatud, saab hakata neid edasi analüüsima. Andmete analüüsimine on kirjeldatud punktis 3.1.

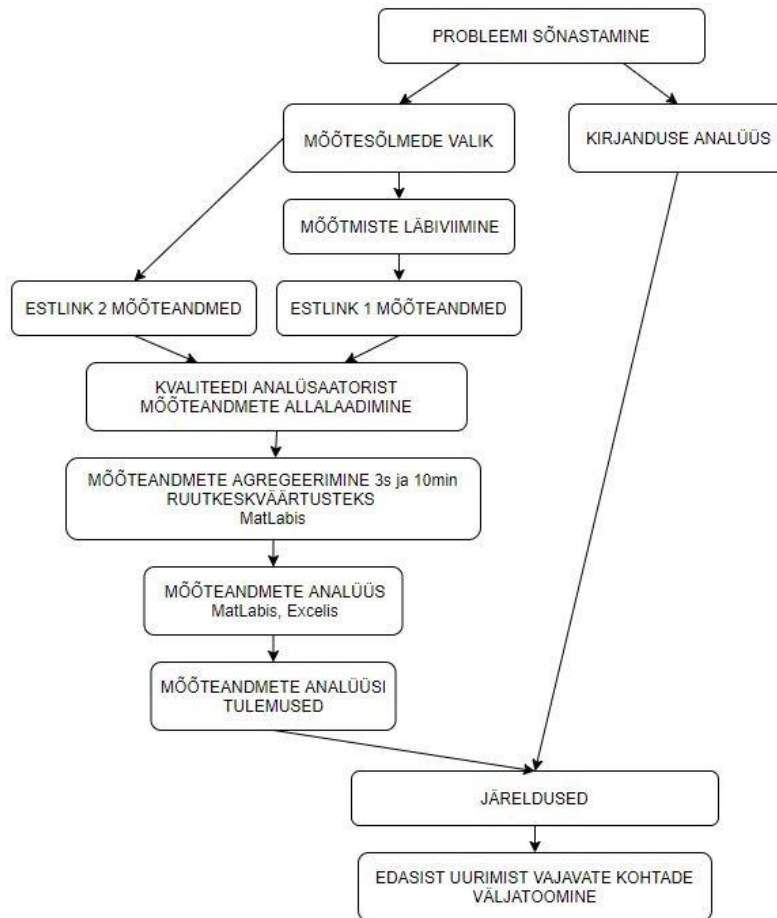


### **3. MÕÕTETULEMUSTE ANALÜÜS**

Käesolevas peatükis analüüsitakse Eesti - Soome alalisvooluühenduse Estlink 1 fiidri mahtvusliku pingetrafo ja pingejaguri mõõteahelate kõrgemate pingeharmonikute (kuni 50nda järguni) mõõtetulemuste erinevusi. Mõõtmised teostati ajavahemikul 14.02.2020 – 20.02.2020, mille käigus mõõdeti mõlema mõõtemuunduri pealt paralleelselt ja ajaliselt sünkroniseeritult elektri kvaliteeti, kus põhirõhk oli kõrgematel pingeharmonikutel. Estlink 1 mõõteahelas teostati mõõtmised elektri kvaliteedi analüsaatoriga Qualitrol Informa PMD-A, mis kuulub täpsusklassi A lähtudes standardist EVS-EN-61000-4-30 [1]. Elektri kvaliteedi analüsaator salvestas mõõtetulemused iga 1 sekundi järel. Lähtudes asjaolust, et võrku ülespandud seadmetele ei ole võimalik teostada otsest mõõtetrafode mõõtmist, valiti mõõtmiste iseloomust ja kirjanduslikule alusele, et nende mõõteseadmete harmoonikute mõõtmistäpsus on kõrge, tuginedes referents-mõõtetrafoks pingejagur. Lisaks analüüsitakse Estlink 2 fiidris PQ-sensori ja pingejagurite mõõteahelates toimunud mõõtmiste alusel, kas ja kuidas erinevad nendest ahelatest salvestatud mõõteandmete tulemused ning kas need korreleeruvad võimsustaseme suhtes.

#### **3.1 Mõõtetulemuste analüüsi meetodika**

Käesoleva lõputöö eesmärgiks on uurida Eesti ülekandevõrgus kasutusel olevate pingetrafode mõju pingeharmonikute mõõtmistele. Joonisel 3.1 on selle lõputöö analüüsi meetodika ülevaatlilik plokk skeem, millel on näidatud etapid, kuidas jõuti lõputöö tulemusteni. Mõõtepunktideks valiti Eesti – Soome vaheliste alalisvooluühenduste Estlink 1 ja Estlink 2 fiidrite mõõteahelad, sest need muundurjaamad on ühed suuremad harmoonikute allikad elektrivõrgus ja samuti on need Eesti ülekandevõrgus ainukesed mõõtepunktid, kuhu on paigaldatud mahtvuslik-takistuslikud pingejagurid. Estlink 1 fiidri mõõteahelas on kasutusel mahtvuslik pingetrafo ja mahtvuslik-takistuslik pingejagur. Estlink 2 fiidri mõõteahelas on kasutusel mahtvuslik-takistuslik pingejagur ja mahtvuslik pingetrafo, millele on paigaldatud PQ-sensor. Kirjanduse analüüsi käigus selgus, et mahtvusliku pingetrafo mõõtmiste täpsus ei suuda tagada elektri kvaliteedi, sh kõrgemate pingeharmonikute, asjakohast mõõtmist, aga mahtvuslik-takistusliku pingejaguri ja PQ-sensori suur töösagedusriba võimaldab kõrgemaid pingeharmonikuid täpselt mõõta. Mõõtetulemuste analüüsi käigus selgub, kas ja kuidas on need seadmed kasutatavad pingeharmonikute mõõtmiseks ja analüüsiks Eesti ülekandevõrgus.



Joonis 3.1 Analüüsi metoodika ülevaatlik plokk skeem

Mõõteandmeid vaadeldi agregeerides neid vastavalt standardile IEC 61000-4-30 [1] mõõteperioodi 3 sekundi ja 10 minuti ruutkeskväärtusteks. Standardi kohaselt peab harmoonikute tasemete mõõtmiste aja baasintervall olema 50 Hz toitesüsteemis 10 perioodi ning selle väärtusi agregeeritakse 150-perioodiliseks ja 10 min intervalliks. Agregeerimist tuleb teostada ruutjuurena sisendväärtuste aritmeetiliste keskmiste ruutude summast. Ruutkeskmiste väärtused leitakse avaldisega 3.1 [36]:

$$F_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} F_h^2} \quad (3.1)$$

kus

$F_{rms}$  – ruutkeskmise funktsioon  $F$

$T$  – periood

$h$  – harmooniku järk

Mõõtmistulemuste erinevuse vahelise lineaarse seose kirjeldamiseks leiti korrelatsioonikordaja, millega on võimalik võrrelda tulemuste korreleeruvust. Korrelatsioonikordaja näitab seose tugevust, kui kordaja suurus jääb alla 0,3 on seos olematu; 0,3 ja 0,5 vahel on seos nõrk; 0,5 ja 0,7 vaheline väärtus näitab keskmise tugevusega seost ja üle 0,7 näitab tugevat seost. Negatiivne kordaja näitab, et ühe tunnuse suuruste kasvamisel suurenevad ka teise tunnuse väärtused ja negatiivse kordaja puhul ühe tunnuse suuruse kasvamisel teise tunnuse väärtused vähenevad. Korrelatsioonikordajate väärtused arvutati Estlink 1 mõõtetulemuste korral suuremate erinevustega pingeharmonikutele, et võrrelda, milline on erinevus mõõteseadme mõõdetud signaali vahel. Estlink 2 puhul leiti korreleeruvus mõõteseadmete erinevuse ja võimsustasemete vahel, et selgitada välja, kas võimsustase mõjutab nende seadmete mõõtmiste erinevusi. Korrelatsioonikordaja arvutati avaldisega 3.2 [37]:

$$Correl(X,Y) = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}} \quad (3.2)$$

kus

$x$  ja  $y$  – valimi väärtused

$\bar{x}$  – valimi X keskväärtus

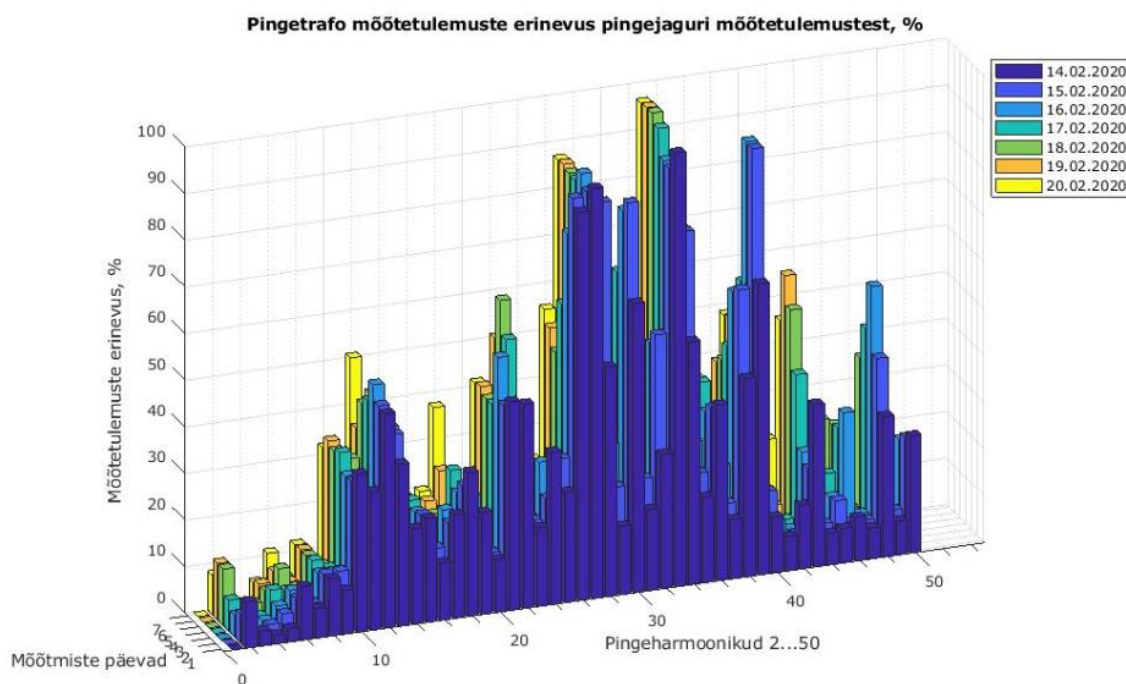
$\bar{y}$  – valimi Y keskväärtus

Estlink 1 mõõtmised teostati kahe elektri kvaliteedi analüsaatoriga, mis mõõtsid paralleelselt ja olid ajaliselt sünkroniseeritud. Need mõõtmised on omavahel otseselt võrreldavad ning andmete analüüsimiseks kasutatakse kahte erinevat agregeerimissammu: 3 sekundi ja 10 minuti. Estlink 2 mõõtetulemused mõõdeti eri aegadel, kuid samadel võimsustel. Nendest mõõteandmetest võetakse kõrgemate pingeharmonikute ning THD 3 sekundi ja 10 minuti keskväärtused. Samuti võrreldakse mõõtmiste vahemikes võimsuseid, kas ja kui suur oli erinevus. Andmemassiivide analüüsimiseks kasutatakse programme MatLab ja Excel.

## 3.2 Estlink 1 fiidri mõõtetrafode analüüs

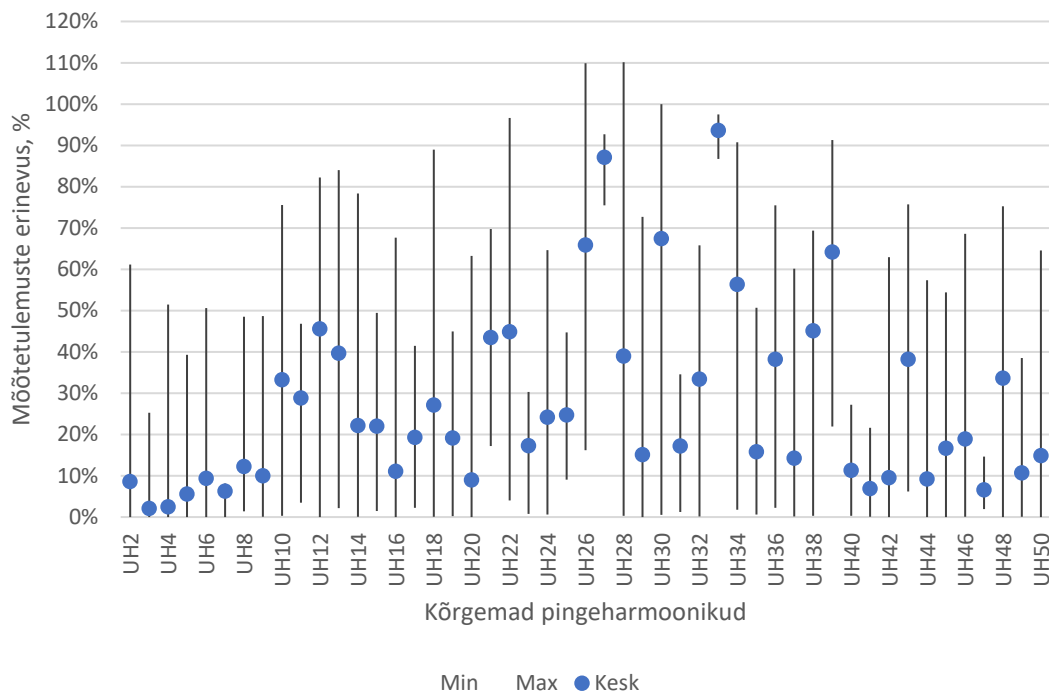
Joonisel 3.2 on toodud Estlink 1 fiidri pingejaguri ja mahtuvusliku pingetrafo mõõteahelate ajaliselt sünkroniseeritult nädala pikkuse mõõteperioodi vältel mõõdetud kõrgemate pingeharmonikute, kuni 50nda järguni, tulemuste keskmine erinevus päevade kaupa. Arvestades seadmete ülesehitust ning omadusi on antud töös referents mõõteseadmeks valitud pingejagur. Joonisel 3.2 on mõeldud mõõtetulemuste

erinevuste all seda, kui mitu protsenti moodustab mõõteseadmete mõõtetulemuste erinevus pingejaguri mõõdetud väärtusest.

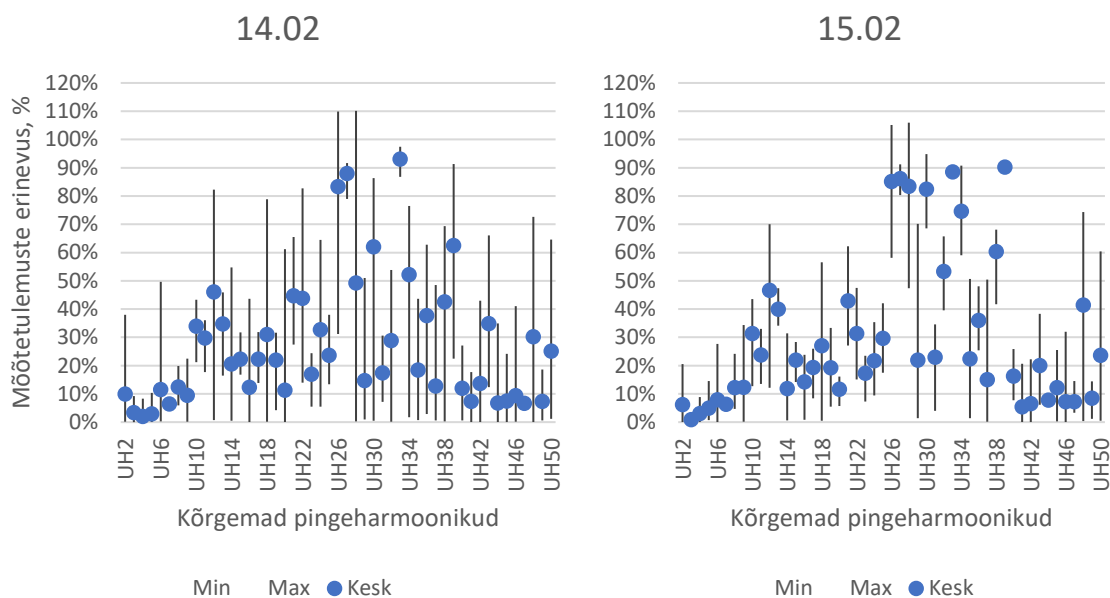


Joonis 3.2 Estlink 1 fiidri mahtuvusliku pingetrafo ja pingejaguri mõõteahelate kõrgemate pingeharmonikute (kuni 50nda järguni) mõõtetulemuste keskmine erinevus protsentides

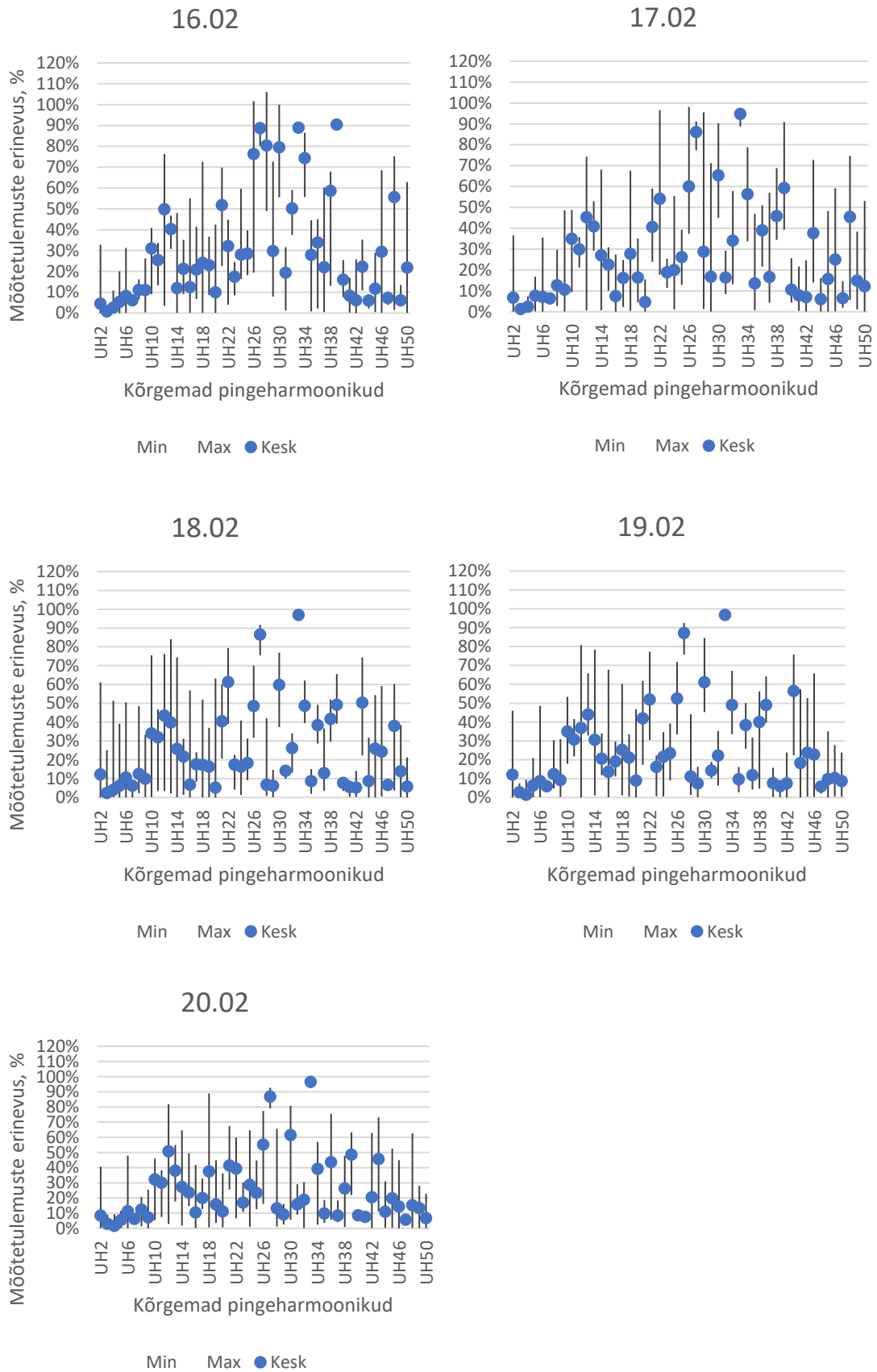
Estlink 1 fiidri mahtuvusliku pingetrafo ja pingejaguri mõõteahelate kõrgemate pingeharmonikute mõõtmiste erinevused on esitatud graafiliselt joonistel (Joonis 3.3 ja Joonis 3.4), kus on näidatud kõrgemate pingeharmonikute (50nda järguni) keskmine, suurim ja vähim mõõtetulemuste erinevus. Seejuures on kõik graafikud ühes mõõtkavas. Nädala mõõtetulemuste erinevuse graafikul (Joonis 3.3) on läbivaldt nähtav, et mõõtetrafode mõõtetulemuste erinevused on väga suured, seetõttu on välja toodud ka päevade keskmised erinevused (Joonis 3.4), et anda ülevaadet, milline on olukord päevade lõikes. Mõõtetrafode kõrgemate pingeharmonikute mõõtmiste nädala keskmised erinevused on toodud tabelites (Tabel 3.1, Tabel 3.2).



Joonis 3.3 Estlink 1 fiidri mahtuvusliku pingetrafo ja pingejaguri mõõteahelate kõrgemate pingeharmonikute (kuni 50nda järguni) nädala mõõtetulemuste keskmine, suurim ja vähim erinevus protsentides



Joonis 3.4 Estlink 1 mahtuvusliku pingetrafo ja pingejaguri mõõteahelate kõrgemate pingeharmonikute (kuni 50nda järguni) päevaste mõõtetulemuste keskmine, suurim ja vähim erinevus protsentides (jätkub)



Joonis 3.4 Estlink 1 mahtuvusliku pingetrafo ja pingejaguri mõõteahelate kõrgemate pingeharmonikute (kuni 50nda järguni) päevaste mõõtetulemuste keskmine, suurim ja vähim erinevus protsentides

Graafikutelt väljendub läbivalt tendents, et mahtvusliku pingetrafo ja mahtvuslik-takistusliku pingejaguri mõõtetulemuste keskmine erinevus on alla 10 % terve nädala vältel kuni pingeharmoniku järguni 7. Selles olukorras tuleb arvestada seda, et ka nende pingeharmonikute puhul on suurim erinevus kohati üle 60 %, vaid 7.järgu pingeharmonikul on suurim nädala mõõtmistulemuste erinevus alla 10 % mahtvuslik-takistusliku pingejaguri mõõdetud tulemustest. Mahtvusliku pingetrafo mõõtetäpsus on suurim põhisagedusel ning sellest suurematel sagedustel, ilma lisaseadmata (nt PQ-sensor), on mahtvusliku pingetrafo mõõtetulemused juhuslikud. Sellest lähtudes on huvitav asjaolu, et mahtvusliku pingetrafo mõõtetulemuste keskmine erinevus mahtvuslik-takistusliku pingejaguri tulemustest kõrgematel pingeharmonikutel (järgud 41, 42, 44, 47, 49) on samuti alla 10 %. Kõrgemate pingeharmonikute, järguga 41 ja 47, mõõtetulemuste keskmine erinevus jäi iga päev alla 10 %. Nende pingeharmonikute vähimad mõõteerinevused olid kuni 5 % ning suurimad kuni 20 % takistuslik-mahtvusliku pingejaguri mõõdetud tulemustest. Sellised tulemused kõrgemate pingeharmonikutega (järgus 40..50) võivad olla juhuslikud, kuid seda tuleks edasi uurida.

Tabel 3.1 Kõrgemate pingeharmonikute mahtvusliku pingetrafo ja pingejaguri mõõtetulemused

<b>Paaris pingeharmonikute mõõtetulemused</b>			
<b>Järk</b>	<b>Pingejagur, V</b>	<b>Mahtvuslik pingetrafo, V</b>	<b>Keskväärtuste erinevus, %</b>
2	59,43 ± 0,89 <sub>95%</sub>	55,78 ± 1,08 <sub>95%</sub>	8,61 ± 0,62 <sub>95%</sub>
4	55,66 ± 1,13 <sub>95%</sub>	54,86 ± 1,08 <sub>95%</sub>	2,46 ± 0,25 <sub>95%</sub>
6	30,31 ± 0,73 <sub>95%</sub>	29,11 ± 0,68 <sub>95%</sub>	9,35 ± 0,56 <sub>95%</sub>
8	128,87 ± 2,86 <sub>95%</sub>	144,10 ± 3,20 <sub>95%</sub>	12,25 ± 0,19 <sub>95%</sub>
10	63,70 ± 1,15 <sub>95%</sub>	84,73 ± 1,52 <sub>95%</sub>	33,22 ± 0,45 <sub>95%</sub>
12	23,71 ± 0,61 <sub>95%</sub>	11,52 ± 0,05 <sub>95%</sub>	45,56 ± 1,09 <sub>95%</sub>
14	12,38 ± 0,26 <sub>95%</sub>	13,57 ± 0,12 <sub>95%</sub>	22,20 ± 0,93 <sub>95%</sub>
16	18,16 ± 0,38 <sub>95%</sub>	17,07 ± 0,22 <sub>95%</sub>	11,04 ± 0,57 <sub>95%</sub>
18	15,76 ± 0,75 <sub>95%</sub>	11,26 ± 0,02 <sub>95%</sub>	27,11 ± 1,10 <sub>95%</sub>
20	27,30 ± 0,61 <sub>95%</sub>	25,59 ± 0,44 <sub>95%</sub>	8,99 ± 0,48 <sub>95%</sub>
22	9,55 ± 0,11 <sub>95%</sub>	13,58 ± 0,07 <sub>95%</sub>	44,92 ± 1,01 <sub>95%</sub>
24	10,12 ± 0,10 <sub>95%</sub>	12,22 ± 0,03 <sub>95%</sub>	24,13 ± 0,65 <sub>95%</sub>
26	6,57 ± 0,06 <sub>95%</sub>	10,71 ± 0,03 <sub>95%</sub>	65,76 ± 1,18 <sub>95%</sub>
28	10,72 ± 0,41 <sub>95%</sub>	13,06 ± 0,29 <sub>95%</sub>	38,84 ± 2,36 <sub>95%</sub>
30	5,46 ± 0,10 <sub>95%</sub>	8,73 ± 0,02 <sub>95%</sub>	67,35 ± 0,92 <sub>95%</sub>
32	10,23 ± 0,53 <sub>95%</sub>	12,55 ± 0,45 <sub>95%</sub>	33,32 ± 0,99 <sub>95%</sub>
34	6,30 ± 0,23 <sub>95%</sub>	9,31 ± 0,19 <sub>95%</sub>	56,28 ± 1,10 <sub>95%</sub>
36	5,98 ± 0,22 <sub>95%</sub>	7,23 ± 0,02 <sub>95%</sub>	38,18 ± 0,54 <sub>95%</sub>
38	5,49 ± 0,17 <sub>95%</sub>	7,51 ± 0,12 <sub>95%</sub>	45,02 ± 1,00 <sub>95%</sub>
40	22,83 ± 1,25 <sub>95%</sub>	21,58 ± 1,11 <sub>95%</sub>	11,26 ± 0,33 <sub>95%</sub>

Tabel 3.1 järg

<b>Paaris pingeharmonikute mõõtetulemused</b>			
<b>Järk</b>	<b>Pingejagur, V</b>	<b>Mahtuvuslik pingetrafo, V</b>	<b>Keskväärtuste erinevus, %</b>
42	7,61 ± 0,11 <sub>95%</sub>	7,03 ± 0,02 <sub>95%</sub>	9,52 ± 0,66 <sub>95%</sub>
44	30,56 ± 0,73 <sub>95%</sub>	27,89 ± 0,68 <sub>95%</sub>	9,20 ± 0,50 <sub>95%</sub>
46	16,52 ± 0,33 <sub>95%</sub>	13,63 ± 0,21 <sub>95%</sub>	19,00 ± 1,05 <sub>95%</sub>
48	11,06 ± 0,34 <sub>95%</sub>	6,20 ± 0,02 <sub>95%</sub>	33,67 ± 1,51 <sub>95%</sub>
50	12,93 ± 0,30 <sub>95%</sub>	12,32 ± 0,28 <sub>95%</sub>	14,85 ± 0,89 <sub>95%</sub>

Tabel 3.2 Kõrgemate pingeharmonikute mahtuvusliku pingetrafo ja pingejaguri mõõtetulemused

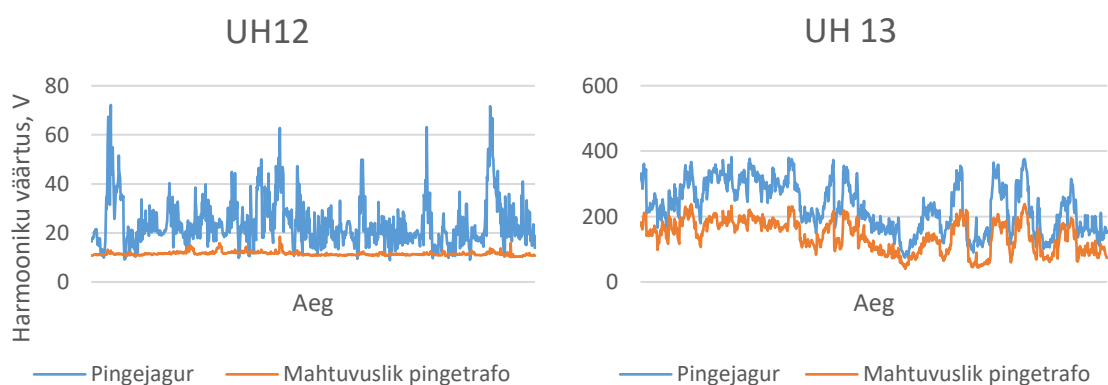
<b>Paaritute pingeharmonikute mõõtetulemused</b>			
<b>Järk</b>	<b>Pingejagur, V</b>	<b>Mahtuvuslik pingetrafo, V</b>	<b>Keskväärtuste erinevus, %</b>
3	879,35 ± 7,01 <sub>95%</sub>	885,97 ± 7,56 <sub>95%</sub>	2,08 ± 0,14 <sub>95%</sub>
5	727,59 ± 13,27 <sub>95%</sub>	757,82 ± 13,23 <sub>95%</sub>	5,58 ± 0,29 <sub>95%</sub>
7	1596,26 ± 14,64 <sub>95%</sub>	1695,40 ± 15,65 <sub>95%</sub>	6,24 ± 0,04 <sub>95%</sub>
9	125,29 ± 1,58 <sub>95%</sub>	129,97 ± 2,12 <sub>95%</sub>	9,99 ± 0,45 <sub>95%</sub>
11	524,26 ± 9,69 <sub>95%</sub>	372,34 ± 6,86 <sub>95%</sub>	28,84 ± 0,30 <sub>95%</sub>
13	230,22 ± 4,78 <sub>95%</sub>	140,39 ± 3,07 <sub>95%</sub>	39,66 ± 0,47 <sub>95%</sub>
15	53,86 ± 0,88 <sub>95%</sub>	41,92 ± 0,67 <sub>95%</sub>	22,00 ± 0,27 <sub>95%</sub>
17	63,82 ± 1,46 <sub>95%</sub>	51,12 ± 1,12 <sub>95%</sub>	19,31 ± 0,29 <sub>95%</sub>
19	37,84 ± 1,01 <sub>95%</sub>	30,23 ± 0,78 <sub>95%</sub>	19,09 ± 0,47 <sub>95%</sub>
21	50,62 ± 0,80 <sub>95%</sub>	27,63 ± 0,35 <sub>95%</sub>	43,46 ± 0,76 <sub>95%</sub>
23	88,97 ± 3,37 <sub>95%</sub>	73,30 ± 2,76 <sub>95%</sub>	17,31 ± 0,20 <sub>95%</sub>
25	86,19 ± 3,26 <sub>95%</sub>	64,73 ± 2,43 <sub>95%</sub>	24,72 ± 0,43 <sub>95%</sub>
27	130,92 ± 2,62 <sub>95%</sub>	15,73 ± 0,21 <sub>95%</sub>	87,07 ± 0,25 <sub>95%</sub>
29	21,86 ± 0,72 <sub>95%</sub>	21,45 ± 0,57 <sub>95%</sub>	15,10 ± 0,91 <sub>95%</sub>
31	83,51 ± 2,82 <sub>95%</sub>	70,49 ± 2,48 <sub>95%</sub>	17,16 ± 0,34 <sub>95%</sub>
33	295,68 ± 7,87 <sub>95%</sub>	14,01 ± 0,14 <sub>95%</sub>	93,64 ± 0,25 <sub>95%</sub>
35	77,00 ± 6,99 <sub>95%</sub>	66,28 ± 5,79 <sub>95%</sub>	15,77 ± 0,73 <sub>95%</sub>
37	82,26 ± 4,64 <sub>95%</sub>	73,22 ± 4,29 <sub>95%</sub>	14,24 ± 0,65 <sub>95%</sub>
39	49,25 ± 1,35 <sub>95%</sub>	13,41 ± 0,36 <sub>95%</sub>	64,10 ± 1,37 <sub>95%</sub>
41	46,56 ± 1,33 <sub>95%</sub>	43,37 ± 1,23 <sub>95%</sub>	6,87 ± 0,23 <sub>95%</sub>
43	44,40 ± 0,83 <sub>95%</sub>	28,60 ± 0,94 <sub>95%</sub>	38,24 ± 1,14 <sub>95%</sub>
45	17,91 ± 0,25 <sub>95%</sub>	15,73 ± 0,21 <sub>95%</sub>	16,67 ± 0,88 <sub>95%</sub>
47	184,98 ± 6,14 <sub>95%</sub>	173,28 ± 5,80 <sub>95%</sub>	6,55 ± 0,07 <sub>95%</sub>
49	123,82 ± 2,90 <sub>95%</sub>	111,85 ± 2,92 <sub>95%</sub>	10,67 ± 0,51 <sub>95%</sub>

Estlink 1 mahtuvuslik-takistusliku pingejaguri ja mahtuvusliku pingetrafo mõõteahelates teostatud mõõtmisel kogutud andmed ei võimalda käesolevas töös süvitsi uurida, milline on mõõteseadmete otsene mõju elektri kvaliteedi

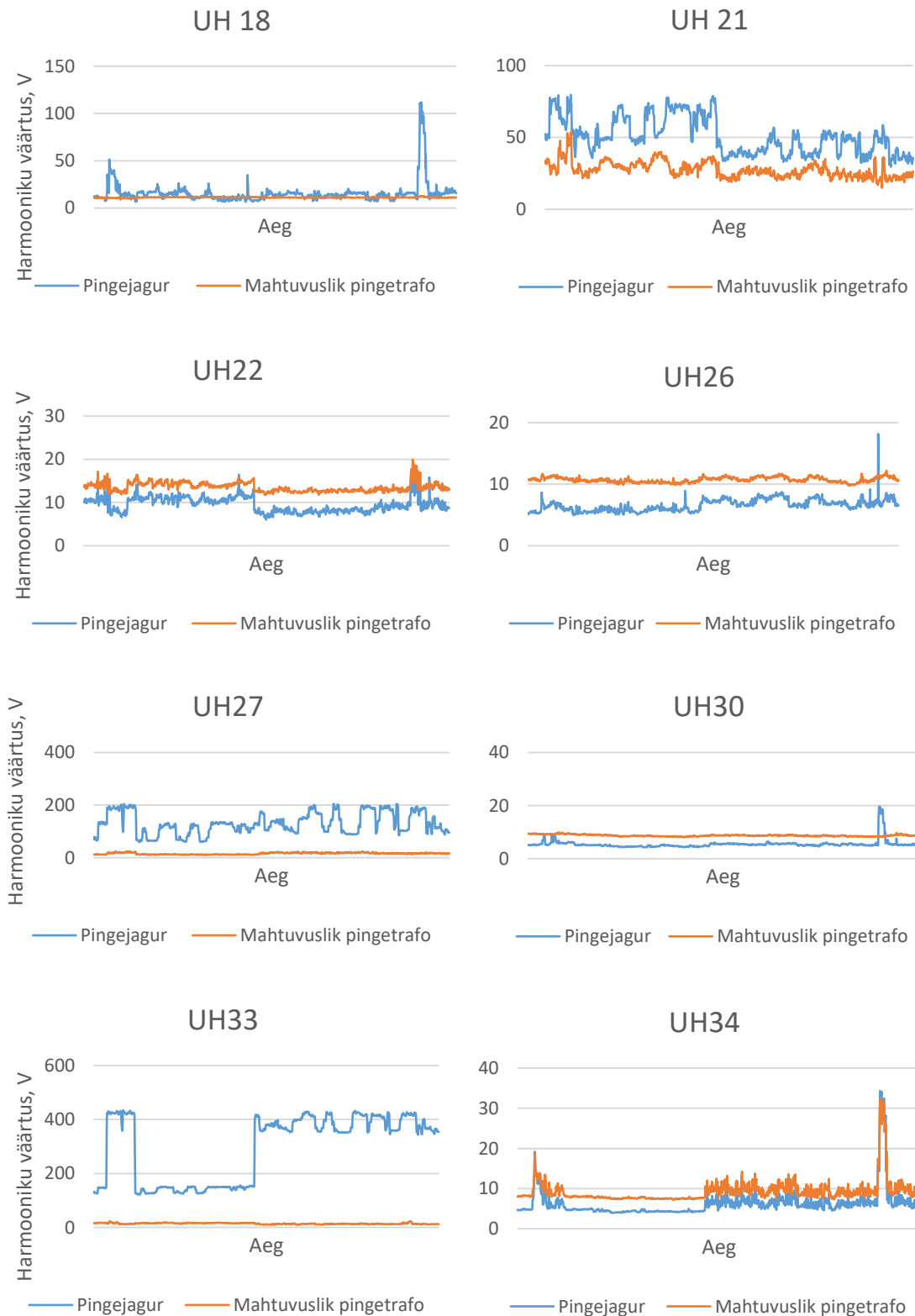


mõõtetulemustele. Samuti mõõteseadmete nimiandmete, mis pole avalikult kättesaadav informatsioon, puudumise tõttu pole võimalik Estlink 1 mõõteseadmete mõõtemääramatust arvestada. Mõõtetulemuste erinevuse põhjal võib öelda, et ilma lisafunktsionaalsuseta mahtuvuslik pingetrafo ei sobi elektri kvaliteedi mõõtmisteks. Näiteks 33.järgu pingeharmoniku kahe erineva mõõteseadme mõõtetulemuste erinevus ületab 90 % ning nädala vältel olid vaid üksikute pingeharmonikute (järguga 2..7, 9, 20, 41, 42, 44, 47) mõõtetulemuste erinevused alla 10 %. Mahtuvusliku pingetrafo täpsus on kõrge üksnes põhisageduse juures, kõrgemal sagedusel see seade täpset tulemust ei anna. Jooniselt 3.3 on näha, et mõõteseadmete nädala mõõtetulemuste erinevused on väga suured, juhuslikud ja nende põhjal ei saa öelda põhjust, millest need erinevused on tingitud. Mõõtetulemuste erinevuste vahel ei tekkinud tendentsi, kus mõõteerinevused on ühtlaselt suuremad või väiksemad, mistõttu ei saa mõõteseadmete erinevust elimineerida ka kompenseerimisalgoritmi koostamisel. Edasisel uurimisel tuleks teostada kõrgemate pingeharmonikute mõõtmised koos faasinurkade mõõtmistega, et saada parem ülevaade. Lisaks tuleks edasi vaadelda, kas selles töös esinenud tendents kõrgemate pingeharmonikute (järguga 41, 42, 44, 47) mõõtetulemuste erinevuste kohta oli juhuslik.

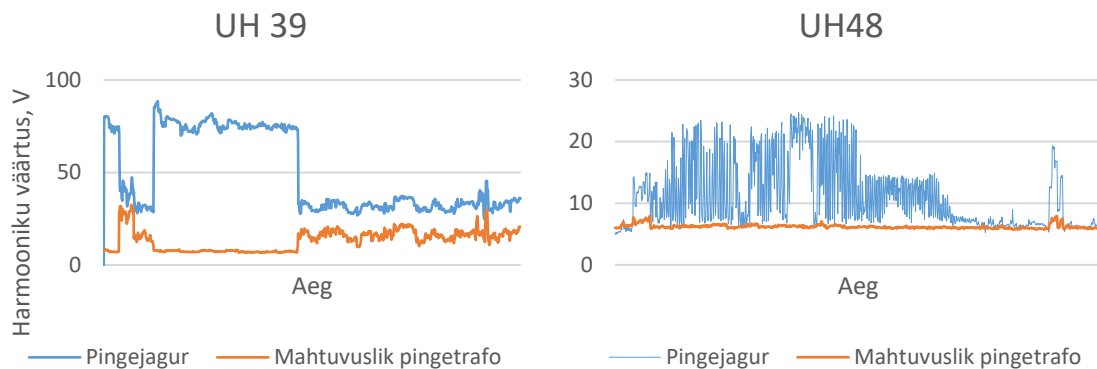
Joonise (Joonis 3.3) ja tabelite (Tabel 3.1, Tabel 3.2) põhjal valiti välja kõrgemad pingeharmonikud, mille puhul mõõtetulemuste erinevuste vahemikud olid kõrgemad. Nende kõrgemate pingeharmonikute mõõtetulemused ja mõõtmiste korrelatsioonikordajad on koondatud tabelisse (Tabel 3.3). Samuti on graafiliselt välja toodud nende pingeharmonikute mõõtmistulemused mahtuvuslik-takistusliku pingejaguriga ja mahtuvusliku pingetrafoga joonisel (Joonis 3.5). Graafikud pole samas mõõtekavas.



Joonis 3.5 Kõrgemate pingeharmonikute nädala mõõteandmed, mille kahe erineva mõõteseadme mõõtetulemuste erinevusvahemik oli suurem (jätkub)



Joonis 3.5 Kõrgemate pingeharmonike nädala mõõteandmed, mille kahe erineva mõõteseadme mõõtetulemuste erinevusvahemik oli suurem (jätkub)



Joonis 3.5 Kõrgemate pingeharmonikute nädala mõõteandmed, mille kahe erineva mõõteseadme mõõtetulemuste erinevusvahemik oli suurem

Joonisel 3.5 välja toodud kõrgemate pingeharmonikute korrelatsioonikordajad näitavad mahtuvuslik-takistusliku pingejaguri ja mahtuvusliku pingetrafo seost ajaliselt. Pingeharmonikutel järguga 12, 18, 21, 27, 30 ja 48 on kahe erineva seadme mõõtetulemuste vahel nõrk või lausa olematu seos. Näiteks pingeharmonikul järguga 12 on mõõtetulemuste keskväärtuste protsendiline erinevus  $45,56 \pm 1,09_{95\%}$  % ning mõõtetulemuste vahel on olematu seos (korrelatsioonikordaja on 0,39). Mahtuvusliku pingetrafo mõõteahelast on mõõdetud üpris stabiilne harmooniku väärtus, ( $11,52 \pm 0,05_{95\%}$ ) V, terve nädala vältel. Mahtuvuslik-takistusliku pingejaguri mõõteahela mõõtetulemused on nädala vältel hüplikumad, kohati on mõõteseadmete mõõtetulemuste erinevus isegi üle 80 %. Mahtuvuslik-takistusliku pingejaguri mõõtetulemuste hüplikust tingib mõõteseadme suur täpsus ja tundlikkus kõrgemate sageduste mõõtmisel. Selline olukord, kus mahtuvuslik-takistuslik pingejagur suutis tuvastada harmooniku väärtuse kõikumisi täpsemalt, kui mahtuvuslik pingetrafo, on joonisel 3.5 harmoonikutel järguga 12, 18, 27, 30, 33, 39 ja 48. Harmoonikute järguga nendel mõõtetulemuste erinevustel seost ei tundu olevat, vaid sellised erinevused on tingitud ühe seadme sobivusega harmoonikute mõõtmiseks ja teise mittesobivusega.

Teise näitena võib tuua pinge-harmoniku järguga 13, mille puhul on nädala vältel mõlemad mõõtetetraford sarnaselt ja peaaegu sünkroonselt tuvastanud pingeharmoniku osakaalu tõusu ja langust, mida näitab ka korrelatsioonikordaja 0,94. Selle pingeharmoniku puhul on mõõtetulemuste keskväärtuste protsendiline erinevus  $39,66 \pm 0,47_{95\%}$  %. Pingejagur tuvastas keskmiseks tulemuseks nädalas  $230,22 \pm 4,78_{95\%}$  V, mahtuvuslik pingetrafo aga  $140,39 \pm 3,07_{95\%}$  V. Lisaks veel tasub märkimist, et osadel kõrgematel harmoonikutel, joonisel 3.5 järguga 13, 22, 26, 34, mõõdavad seadmed harmoonikute väärtust ligilähedaselt sama joonega ehk mõõteseadmed suudavad tuvastada sarnaselt pingeharmonikute osakaalu tõusu ja langust, seda näitab ka korrelatsioonikordaja, kuid erinevus on mõõtetulemuste keskväärtuste erinevuses, kus

tabeli 3.3 järgi on see kohati  $65,76 \pm 1,18_{95\%}$  %. Selline tulemus on huvitav ning tasuks edasi uurida, kas mõõtetulemuste erinevused ja korreleeruvus on sõltuvuses harmooniku järguga.

Tabel 3.3 Suuremate mõõtmistulemuste erinevustega pingeharmonikud

Järk	Pingejagur, V	Mahtuvuslik pingetrafo, V	Keskväärtuste erinevus, %	Korreleerivsuskordaja
12	$23,71 \pm 0,61_{95\%}$	$11,52 \pm 0,05_{95\%}$	$45,56 \pm 1,09_{95\%}$	0,39
13	$230,22 \pm 4,78_{95\%}$	$140,39 \pm 3,07_{95\%}$	$39,66 \pm 0,47_{95\%}$	0,94
18	$15,76 \pm 0,75_{95\%}$	$11,26 \pm 0,02_{95\%}$	$27,11 \pm 1,10_{95\%}$	0,31
21	$50,62 \pm 0,80_{95\%}$	$27,63 \pm 0,35_{95\%}$	$43,46 \pm 0,76_{95\%}$	0,49
22	$9,55 \pm 0,11_{95\%}$	$13,58 \pm 0,07_{95\%}$	$44,92 \pm 1,01_{95\%}$	0,95
26	$6,57 \pm 0,06_{95\%}$	$10,71 \pm 0,03_{95\%}$	$65,76 \pm 1,18_{95\%}$	0,68
27	$130,92 \pm 2,62_{95\%}$	$15,73 \pm 0,21_{95\%}$	$87,07 \pm 0,25_{95\%}$	0,51
30	$5,46 \pm 0,10_{95\%}$	$8,73 \pm 0,02_{95\%}$	$67,35 \pm 0,92_{95\%}$	0,04
33	$295,68 \pm 7,87_{95\%}$	$14,01 \pm 0,14_{95\%}$	$93,64 \pm 0,25_{95\%}$	0,61
34	$6,30 \pm 0,23_{95\%}$	$9,31 \pm 0,19_{95\%}$	$56,28 \pm 1,10_{95\%}$	0,99
39	$49,25 \pm 1,35_{95\%}$	$13,41 \pm 0,36_{95\%}$	$64,10 \pm 1,37_{95\%}$	-0,77
48	$11,06 \pm 0,34_{95\%}$	$6,20 \pm 0,02_{95\%}$	$33,67 \pm 1,51_{95\%}$	0,31

Tabelisse (Tabel 3.3) koondatud kõrgemate pingeharmonikute põhjal on näha, et isegi kui mõõtetulemused pingejaguri ja mahtuvusliku pingetrafo vahel korreleeruvad, siis võib endiselt keskväärtuste erinevus olla liiga suur (näiteks 13.pingeharmonik). Võib oletada, et pingejaguri mõõtetulemuste hüplikust põhjustasid antud mõõtepunktiga ühendatud elektrivõrgu osad ja nende iseloom ning kuna mahtuvuslik pingetrafo ei oma mõõtetäpsust kõrgemate pingeharmonikute mõõtmisel, siis selle mõõtetulemustes need ei kajastunud. Andmete vähesuse tõttu pole võimalik selgemaid järeldusi teha, kuid edasi uurides tuleks arvestada ja informatsiooni omada, mis toimub elektrivõrgus.

### 3.3 Estlink 2 fiidri mõõtetrafode analüüs

Mahtuvuslikule pingetrafole paigaldatud PQ-sensor võimaldab kõrgemate pingeharmonikute taseme mõõtmist kuni 5000 Hz-ni, mis on 50 Hz põhisagedusega süsteemis kuni 100.harmonik. Seetõttu Estlink 2 mõõtmiste puhul ei valita pingejagurit referents mõõteseadmeks ega vaadata mõõtetulemuste erinevuse protsenti pingejaguri mõõtetulemustest. Tabelisse 3.4 on koondatud Estlink 2 mõõtmistega seotud andmed. Estlink 2 mõõtmiste puhul vaadeldakse, kas mõõteandmete erinevus korreleerub võimsustaseme suhtes ning tulemused esitatakse tabelites (Tabel 3.5, Tabel 3.6).

Tabel 3.4 Estlink 2 mõõdetud harmoonmoonutusteguri väärtus ja tegelik võimsus, koondatud 10 minuti keskväärtuseks

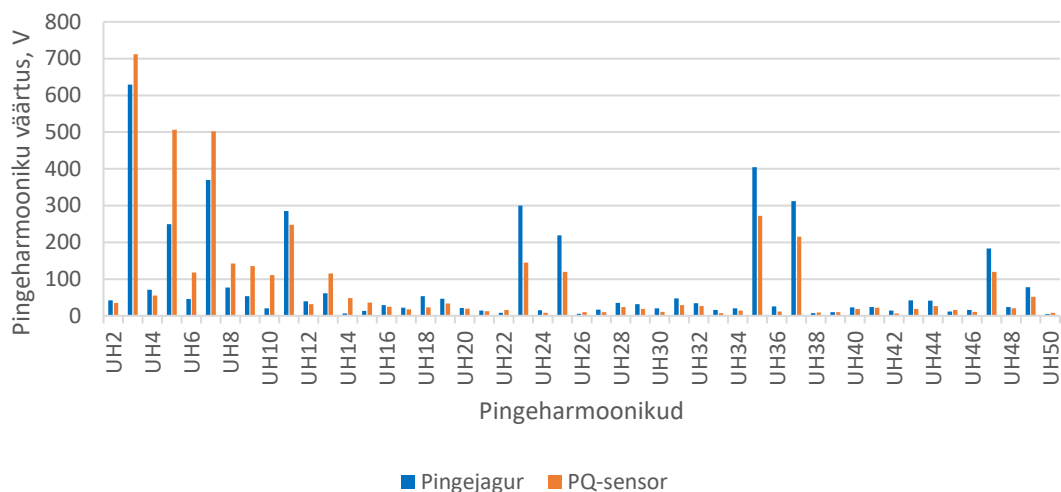
<b>Eesti – Soome suunal katsekavalaeline võimsus, MW</b>	<b>Eesti – Soome suunal tegelik võimsus, MW</b>		<b>Harmoonmoonutustegur THD, V</b>	
	<b>Pingejagur</b>	<b>PQ-sensor</b>	<b>Pingejagur</b>	<b>PQ-sensor</b>
65	66,24	67,10	1132,73	1180,77
195	195,21	197,45	1420,96	1198,35
325	325,83	329,39	1324,55	1198,82
455	457,03	460,33	1271,92	1077,15
520	522,51	531,27	1017,37	1081,26
<b>Soome - Eesti suunal katsekavalaeline võimsus, MW</b>	<b>Soome - Eesti suunal tegelik võimsus, MW</b>		<b>Harmoonmoonutustegur THD, V</b>	
	<b>Pingejagur</b>	<b>PQ-sensor</b>	<b>Pingejagur</b>	<b>PQ-sensor</b>
65	64,09	65,32	1094,97	1133,66
195	192,96	194,75	1375,59	1139,05
325	321,41	324,65	1307,11	1076,26
520	517,10	519,13	1004,17	1129,69
650	642,14	648,97	979,81	1264,69

Tabel 3.5 Estlink 2 THD andmete erinevuse korreleeruvus võimsustaseme suhtes

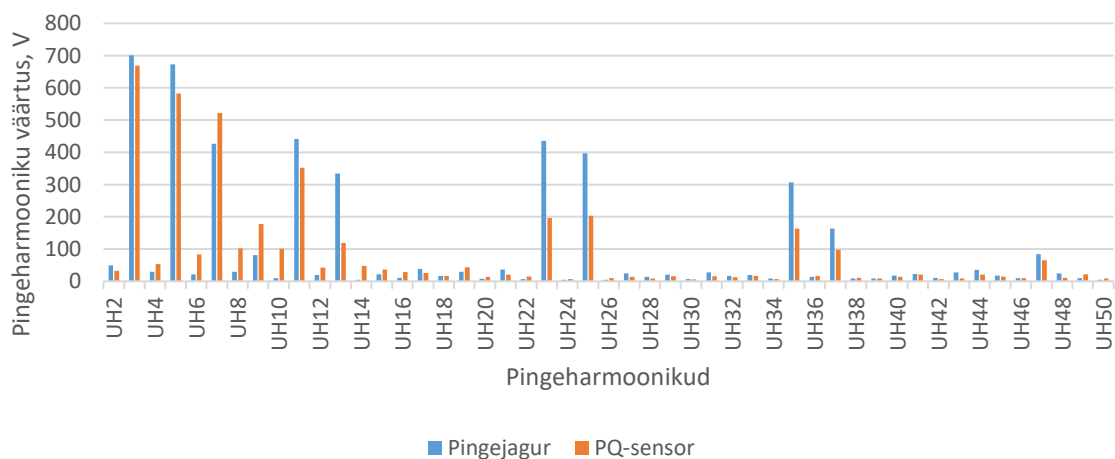
<b>Eesti – Soome suunal katsekavalaeline võimsus, MW</b>	<b>THD erinevus, V</b>	<b>Korreleatsioonikordaja</b>
65	48,04	0,08
195	222,61	
325	125,73	
455	194,77	
520	63,88	
<b>Soome - Eesti suunal katsekavalaeline võimsus, MW</b>	<b>THD erinevus, V</b>	<b>Korreleatsioonikordaja</b>
65	38,69	0,56
195	236,54	
325	230,85	
520	125,53	
650	284,88	

Tabelis 3.5 toodud andmete põhjal võib öelda, et antud mõõtmiste juures harmoonmoonutusteguri erinevus ei ole tugevas sõltuvuses võimsustasemest. Siinkohal tekkisid ka erinevused, mis suunal mõõtmised toimusid. Soome – Eesti suunal on

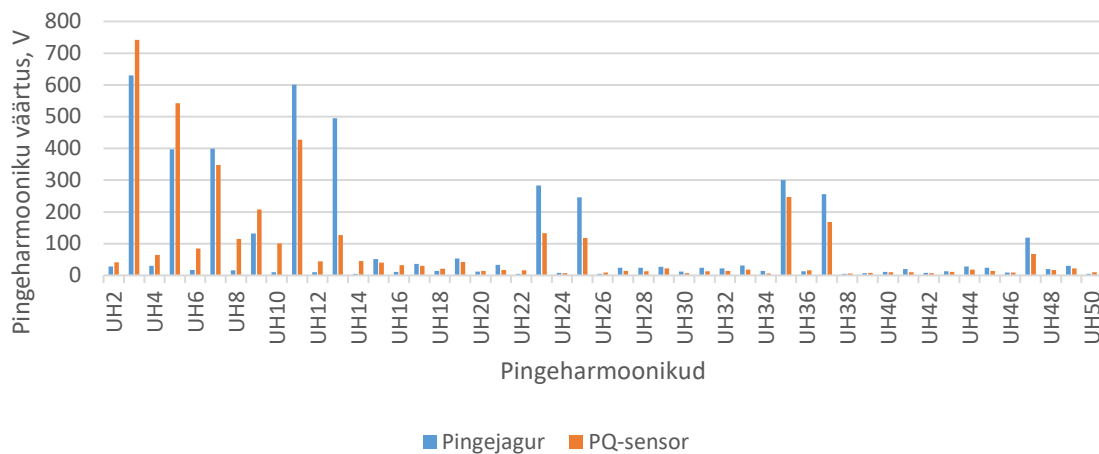
harmoonmoonutustegur THD keskmise tugevusega seotud võimsustasemest, Eesti – Soome suunal oli seos olematu. Selliseid tulemusi võis mõjutada mõõtmiste läbiviimise meetod. Tabelis 3.6 on välja toodud suurema osakaaluga pingeharmonoonikud ning nende korreleeruvus võimsustaseme suhtes. Joonistel (Joonis 3.5) on suurema osakaaluga pingeharmonoonikud selgesti eristatavad, kuid mida suurem on võimsustase, seda väiksema osakaaluga on pingeharmonoonikud peale 13.järku (Joonis 3.6...3.9).



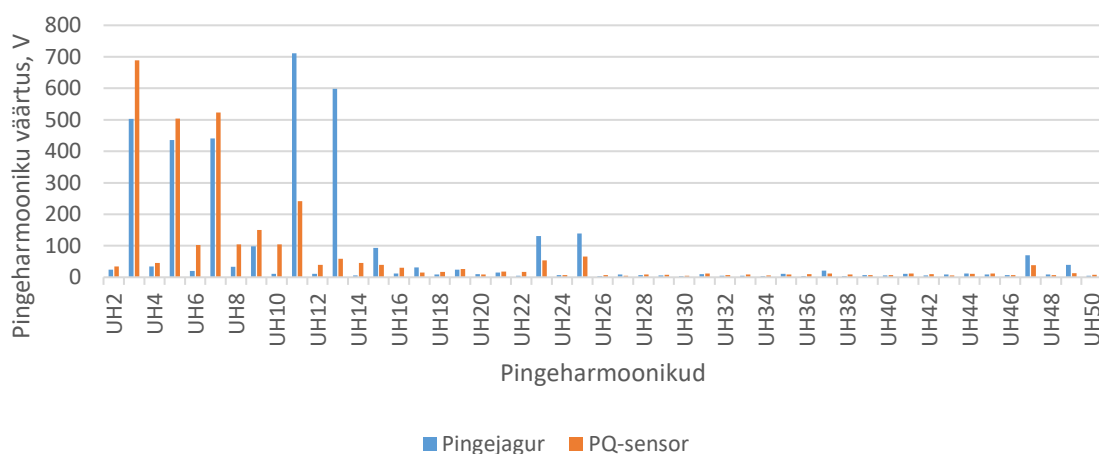
Joonis 3.5 Estlink 2 pealt pingejaguriga ja PQ-sensoriga mõõdetud pingeharmonoonikud (2 – 50) 65 MW võimsuse juures, Eesti – Soome suunal



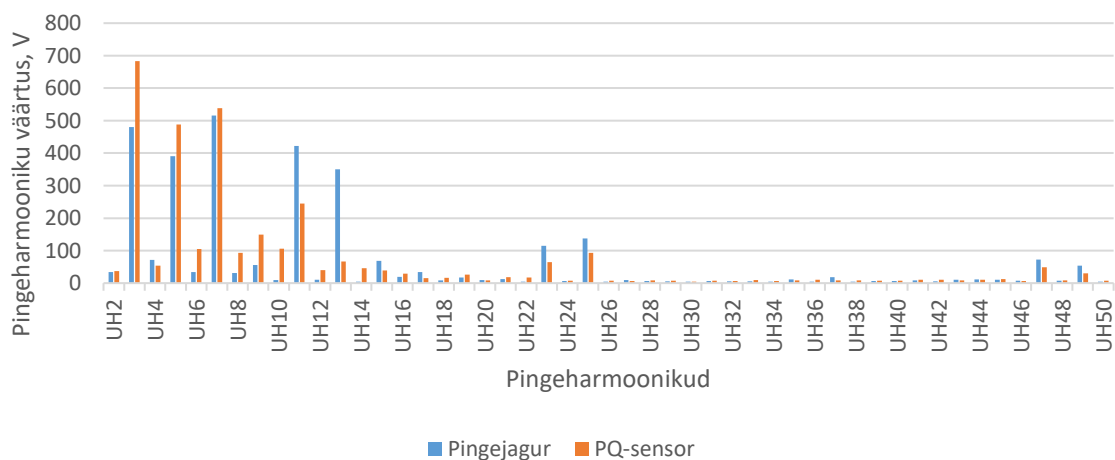
Joonis 3.6 Estlink 2 pealt pingejaguriga ja PQ-sensoriga mõõdetud pingeharmonoonikud (2 – 50) 195 MW võimsuse juures, Eesti – Soome suunal



Joonis 3.7 Estlink 2 pealt pingejaguriga ja PQ-sensoriga mõõdetud pingeharmonikud (2 – 50) 325 MW võimsuse juures, Eesti – Soome suunal



Joonis 3.8 Estlink 2 pealt pingejaguriga ja PQ-sensoriga mõõdetud pingeharmonikud (2 – 50) 455 MW võimsuse juures, Eesti – Soome suunal



Joonis 3.9 Estlink 2 pealt pingejaguriga ja PQ-sensoriga mõõdetud pingeharmonikud (2 – 50) 520 MW võimsuse juures, Eesti – Soome suunal

Tabel 3.6 Suurema osakaaluga pingeharmonikute mõõtetulemuste sõltuvus võimsustasemest

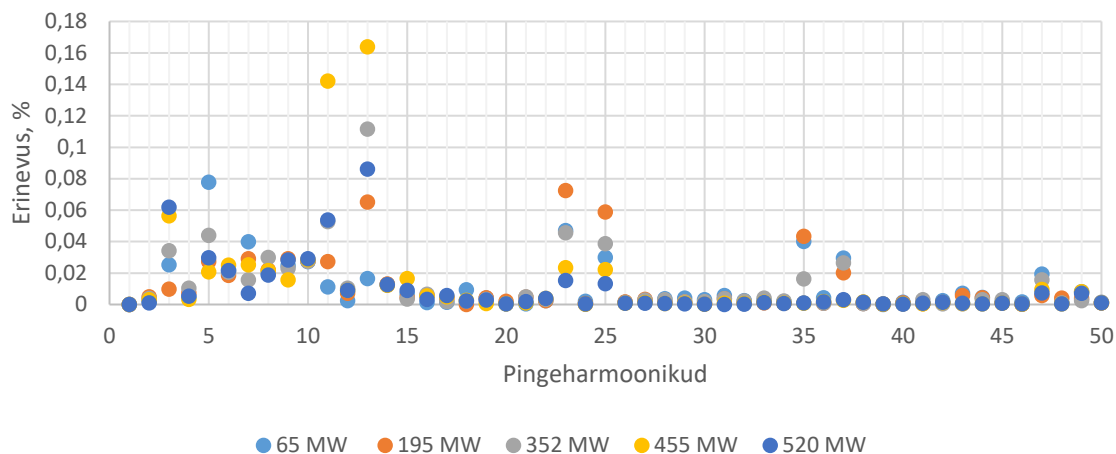
Järk	Korrelatsioonikordaja	Järk	Korrelatsioonikordaja
5	-0,75	29	-0,92
7	-0,86	31	-0,97
11	0,7	35	-0,94
13	0,76	37	-0,87
17	0,82	41	0,02
19	-0,71	43	-0,91
23	-0,78	47	-0,55
25	-0,61	49	0,12

Tabelis 3.6 esitatud pingeharmonikute mõõtetulemuste erinevus on tugevas seoses võimsustasemega. Kahel pingeharmonikul, 41.järk ja 49.järk, seost esmajoones ei täheldatud ehk nende puhul ei mõjutanud võimsustaseme muutus mõõtetulemuste erinevusi. Enamus tabelis 3.6 välja toodud pingeharmonikute mõõtetulemuste erinevus väheneb võimsustaseme suurenedes (korrelatsioonikordaja ees „miinus“ märk). Samuti on graafikutelt nähtav tendents, et võimsustaseme kasvades väheneb kõrgemate pingeharmonikute osakaal, mis omakorda mõjutab mõõtetulemuste erinevuse vähenemist. Üksikute pingeharmonikute (11, 13, 17. järk) osakaal tõuseb võimsustaseme kasvades. Tabelis 3.7 ja joonisel 3.10 on välja toodud mahtuvusliku pingetrafo, millele on paigaldatud PQ-sensor ja pingejaguri THD mõõtetulemuste erinevused protsentuaalselt. Tabelisse on toodud harmoonmoonutusteguri THD mõõtmiste tulemused ja erinevused ning joonisele (Joonis 3.10) on näidatud üksikult harmoonikute erinevus sõltuvalt võimsustasemest.

Tabel 3.7 Pingejaguri ja PQ-sensori THD mõõtetulemuste protsendiline erinevus võrgu pingest

Võimsus, MW	Pingejagur, %	PQ-sensor, %	Mõõteseadmete erinevus, %
65	0,34	0,36	0,01
195	0,43	0,36	0,07
325	0,40	0,36	0,04
455	0,39	0,33	0,06
520	0,31	0,33	0,02





Joonis 3.10 Üksikute pingeharmonikute mõõtmiste protsendiline erinevus sõltuvalt võimsusest

Tabelitest (Tabel 3.7, Tabel L2.1) ja jooniselt 3.10 on näha, et mõõteseadmete mõõtetulemuste erinevused harmoonmoonutusteguri puhul on 0,07 % ja üksikute harmoonikute vaates ei ületa erinevused 0,17 %. Suuremad erinevused on üksikutel harmoonikutel järguga 11 ja 13, kuid need võivad olla põhjustatud tervest mõõteahelast indutseeritud mõõtevigadest. Saadud tulemuste kohaselt võib järeldada vastavalt kirjanduses toodule, et mõlemad mõõteseadmed nii PQ-sensor kui pingejagur sobivad harmoonikute mõõtmiseks ning nende mõõteseadmete mõõtetulemuste erinevused on väikesed. Estlink 2 mõõtmiste tulemuste järgi ei ole võimalik teha detailseid järeldusi, kuna mõõtmised polnud ajaliselt sünkroniseeritud. Antud mõõtmiste erinevusi, lisaks mõõteseadmete omadustele, võisid mõjutada ka sündmused võrgus (k.a võrgu konfiguratsioon). Paremaks hindamiseks tuleks sarnased mõõtmised läbi viia erinevusega, et uutel mõõtmistel mõõteseadmete ahelates teostatakse mõõtmised ajaliselt sünkroniseeritult, et kontrollida, kas mõõteseadmete erinevus on minimaalne, nagu kirjanduses toodud.

### 3.4 Järeldused

Käesoleva töö kirjanduslikule ja mõõtetulemuste analüüsile tuginedes selgub, et mahtuvuslik pingetrafo ei sobi pingeharmonikute mõõtmiseks ülekandevõrgus, sest mõõdetud pingeharmonikute väärtused ei ole arvestatavad alates harmooniku 7. järgust. Mõõtetulemuste erinevusest ei tulnud välja tendentsi, kus mõõteerinevused oleksid ühtlaselt suuremad või väiksemad võrreldes mahtuvuslik-takistusliku pingejaguriga. Selle tõttu pole võimalik välja tuua kindlaid mõõteerinevuste põhjuseid, millele tuginedes saaks elimineerida erinevusi matemaatilise kompenseerimisalgoritmi abil.

Elektri kvaliteedi mõõtmiseks ja hindamiseks sobivad mahtvuslik-takistuslik pingejagur ja PQ-sensoriga mahtvuslik pingetrafo. Mõõtetulemustele ja kirjanduse analüüsile tuginedes saab väita, et mõõteseadmete erinevused on väga väikesed ning mõlemad sobivad elektri kvaliteedi, sh pingeharmonikute, mõõtmiseks. Eesti ülekandevõrgus on soovituslik tulevikus lisada mahtvuslikule pingetrafole lisaks PQ-sensor, et oleks võimalik elektri kvaliteeti paremini ja täpsemalt hinnata. Elektri kvaliteedi mõõtmisel ülekandevõrgus tuleb arvestada lisaks seadme mõõteveale ka terve mõõteahela mõõtemääramatusega.

Edasi tuleks vaadelda lisaks mõõtetrafole enda iseloomule ka terve mõõteahela poolt indutseeritud mõõtevigade ja vaadelda seda kui tervikut ning selle alusel uurida võimalusi mõõdeandmetes mõõtevea kompenseerimiseks matemaatiliselt.

## KOKKUVÕTE

Elektrisüsteemis on toimumas põhimõttelised muutused seoses järjest suureneva taastuvenergeetika osakaaluga, mille tulemusel lisatakse võrku üha enam mittelineaarseid koormuseid ja jõuelektroonika seadmeid, näiteks alalisvooluühenduse muundurid. Sellest tulenevalt on elektri kvaliteedi mõõtmine ja hindamine muutunud ülekandevõrkudes üha olulisemaks. Selleks, et Eesti ülekandevõrgus hinnata elektri kvaliteeti täpsemalt ja sellega seonduvalt arendada kvaliteedi hindamise protsessi, tuleb arvestada ja teada erinevate mõõtetrafode mõju elektri kvaliteedi mõõtmistele, eriti harmoonikute mõõtmistele.

Käesoleva lõputöö eesmärk oli uurida erinevate mõõtetrafode mõju kõrgemate pingeharmonikute mõõtmistele. Selleks vaadeldi Eesti ülekandevõrgus kahte mõõtepunkti, Eesti – Soome vahelisi alalisvooluühendusi Estlink 1 ja Estlink2. Sellised mõõtepunktid valiti selle lõputöö jaoks, kuna alalisvooluühenduse muundurjaamad on ühed suurimad harmoonikute võrku tekitajad ning Eesti ülekandevõrgus kasutatakse pingejagureid vaid nendes kahes mõõtepunktis. Töö teostamiseks viidi Harku alajaamas läbi praktilised mõõtmised, milleks kasutati standardile IEC 61000-4-30 [1] vastavat elektri kvaliteedi analüsaatorit. Mõõtmised teostati ajavahemikul 14.02.2020 – 20.02.2020, mille käigus mõõdeti mahtuvusliku pingetrafo ja mahtuvuslik-takistusliku pingejaguri pealt paralleelselt ja ajaliselt sünkroniseeritult elektri kvaliteeti, kus põhirõhk oli kõrgematel pingeharmonikutel. Teise mõõteperioodi jooksul koguti andmeid Püssi alajaamas Estlink 2 fiidris olevate PQ-sensoriga mahtuvusliku pingetrafo ja mahtuvuslik-takistusliku pingejaguri mõõteahelatest.

Lõputöö esimeses peatükis on antud ülevaade elektri kvaliteedist, mida see endast kujutab, mis seda mõjutab ja kuidas seda jälgitakse ülekandevõrgus. Selles peatükis keskendutakse rohkem pingeharmonikutele ning nende mõjule elektrivõrgus. Samuti tuuakse välja ülekandevõrgus kasutatavad erinevad mõõtetrafod ja nende mõju elektri kvaliteedi mõõtmistele. Teises osas on kirjeldatud lõputöö raames läbiviidud mõõtmiste meetodikat, mille raames seletatakse lahti, kuidas mõõtmised teostati, millised olid katseskeemid ja kuidas toimus andmete allalaadimine elektri kvaliteedi analüsaatorist.

Kolmandas peatükis on selgitatud, milline oli mõõtetulemuste analüüsi meetodika ja teostati mõõtetulemuste analüüs. Vastavalt lõputöö ülesandele mõõdeti pingeharmonikuid erinevates mõõtepunktides, kus olid kasutusel mahtuvuslik pingetrafo, pingejagur ja PQ-sensoriga mahtuvuslik pingetrafo. Estlink 1 mõõtmiste puhul vaadeldi pingejaguri ja mahtuvusliku pingetrafo mõõtetulemuste erinevusi nädalase ajaliselt sünkroniseeritud mõõtmiste põhjal. Estlink 2 mõõtetulemuste põhjal

hinnati, kuidas mõjutavad erinevad võimsustasemed PQ-sensori ja pingejaguri mõõtetulemuste erinevusi. Mõõtetulemuste analüüsimiseks kasutati arvutusprogrammi Matlab, mida kasutati suuremate andmehulkade töötlemiseks, näiteks agregeerimisel.

Pingeharmonikute mõõtetulemuste analüüsist Estlink 1 fiidri mahtuvusliku pingetrafo ja pingejaguri mõõteahelatest selgub, et mahtuvusliku pingetrafo ei edasta pingeharmonikute mõõtmisel usaldatavaid andmeid. Estlink 1 mõõtmiste puhul võeti referents mõõtemuunduriks mahtuvuslik-takistuslik pingejagur, kuna kirjandusele põhinedes on sellel lai töösagedusriba ning selle seadme ehituslikud omapärad ei mõjuta elektri kvaliteedi mõõtmistulemusi. Analüüsist selgus, et mahtuvuslik pingetrafo ei anna usaldusväärseid tulemusi, sest alates 7. järgu pingeharmonilisest on mõõtetulemuste erinevused suuremad, kui 10 % pingejaguri mõõdetud tulemustest. Samuti ei ilmnenud mõõteerinevuste suhtes sarnasusi, mille puhul oleksid mõõtetulemused olnud, kas suuremad või väiksemad pingejaguri mõõdetud tulemustest, vaid mõõtetulemused olid juhuslikud. Mõõteandmete analüüsi tulemused vastavad kirjanduses toodud informatsioonile, et mahtuvuslik pingetrafo ei sobi elektri kvaliteedi mõõtmisteks. Analüüsi põhjal ei leitud mingisugust seost mõõteandmete erinevuse osas, mis võimaldaks vaadeldavate mõõteseadmete mõõtetulemuste erinevusi kompenseerida. Sellegi poolest tuli mõõtetulemuste analüüsist välja huvitav olukord, kus kõrgemate pingeharmonikute (järguga 41, 42, 44, 47) mõõtmisel oli mahtuvusliku pingetrafo erinevus pingejaguri tulemustest väike. Edasistel uurimistel tuleks sellega tegeleda ja vaadelda, kas käesolevas töös saadud tulemused oli juhuslikud või mitte. Lisaks tasub veel märkimist, et üksikutel kõrgematel pingeharmonikutel, nt järguga 34, mõõdavad mõlemad seadmed harmoonikute väärtust sama joonega. Selline tulemus on huvitav ning seda tasuks edasi uurida.

Pingeharmonikute mõõtetulemuste analüüs Estlink 2 fiidri PQ-sensori ja pingejagurite mõõteahelate erinevuste kohta vastab kirjanduse analüüsis välja toodule, mis ütleb, et need mõõteseadmed sobivad elektri kvaliteedi hindamiseks, kuna neil on lai töösagedusriba. Nende mõõtmiste kohta vaadeldi ka võimsustaseme mõju erinevuste suurusele ning selle kohta suurt korreleeruvust ei märgatud. Estlink 2 mõõtmiste tulemuste järgi ei ole võimalik teha detailseid järeldusi mõõteseadmete erinevusest elektri kvaliteedi mõõtmiste tarbeks, kuna mõõtmised polnud ajaliselt sünkroniseeritud. Selleks, et täpsemalt võrrelda antud seadmeid, tuleks uued mõõtmised läbi viia ajaliselt sünkroniseeritult pikema ajaperioodi vältel või teostada katsed seadme põhiselt nii, et need ei ole võrku ühendatud ja seadme mõõteahel jääks samuti välja.

Lõputöö tulemuste põhjal saab anda esialgse hinnangu mõõteseadmete kasutatavuse kohta pingeharmonikute mõõtmiseks ja analüüsiks Eesti ülekandevõrgus. Täpsema

informatsiooni saamiseks tuleb teostada täiendavaid mõõtmiseid mõlema alalisvooluühenduse mõõteahelates pikema ajaliselt sünkroniseeritud mõõteperioodiga ja mõõtmistulemused peavad sisaldama ka harmoonikute faasinurga mõõtmisi, et teha tulemustest täpsemaid järeldusi, mida antud töös teha ei saanud. Samuti teeb autor ettepaneku edasi uurida, mis põhjustab PQ-sensori ja mahtuvuslik-takistusliku pingejaguri mõõtetulemustes selliseid erinevusi 11 ja 13 järgu pingeharmoniku mõõtmistel. Edasi tuleks vaadelda elektri kvaliteeti mõõtes, kuidas mõjutab terve mõõteahel kogu mõõteviga ja tuleks hinnata mõõteahelas tekkivat mõõteviga tervikuna ning leida võimalused mõõtevea kompenseerimiseks. Eesti ülekandevõrgus on soovituslik mahtuvuslikule pingetrafole paigaldada PQ-sensoreid, et paremini harmoonikuid hinnata.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

1. IEC standard 61000-4-30:2015 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods, 2015.
2. IEEE standard 1159 Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, 2009.
3. R. K. Rojin, „A review of Power Quality problems and solutions in Electrical Power System,” *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 2, issue 11, 2013.
4. D. O. Johnson and K. A. Hassan, „Issues of Power Quality in Electrical Systems,” *International Journal of Energy and Power Engineering*, vol. 5, no. 4, pp. 148-154, July 2016.
5. H. G. Beleiu, I. N. Beleiu, S. G. Pavel and C. P. Darab, „Management of Power Quality Issues from an Economic Point of View,” *Journal*, vol. 10, issue 7, 2018.
6. Z. Klaić, D. Sipl and S. Nikolovski, "Economic impact of Power Quality Disturbances," *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*, pp. 1-4, 2013.
7. M. Meldorf, H. Tammoja, Ü. Treufeldt ja J. Kilter, *Jaotusvõrgud*, Tallinn: TalTech Kirjastus, 2007.
8. Eesti standard, EVS-EN 50160:2010 Avalike elektrivõrkude pingete tunnussuurused, Eesti standardikeskus, 2019.
9. MIGRATE, „Projektist MIGRATE,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.h2020-migrate.eu/about.html>. [Kasutatud 11.05.2021].
10. Euroopa Liidu Teataja. „Euroopa Parlamendi ja Nõukogu direktiiv (EL) 2018/2001, taastuvatest energiaallikatest toodetud energia kasutamise edendamise kohta,” 2018. [Võrgumaterjal] Saadaval: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001&from=EN>. [Kasutatud 05.03.2021].
11. R. Stiegler, J. Meyer, J. Kilter and S. Konzelmann, "Assessment of Voltage Instrument Transformers Accuracy for Harmonic Measurements in Transmission Systems," *2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, pp. 152-157, 2016.

12. M. Schwenke and M. Unterweger, „Power Quality: New Tendencies in Standardization and Challenges of Energiewende,“ *23rd International Conference on Electricity Distribution*, 2015.
13. Riigi Teataja, Võrguteenuste kvaliteedinõuded ja võrgutasude vähendamise tingimused kvaliteedinõuete rikkumise korral, Riigi Teataja väljaandja, 2016.
14. Elering, Elektrienergia kvaliteet Elering AS 110 kV võrgus, Tallinn: Elering, 2015.
15. R. P. Bingham, „Harmonics – Understanding the Facts“, *Journal*, 2001.
16. T. Post, „Jaotusvõrgus esinevate rikete mõju uurimine tarbijate pingetele programmiga PSCAD,“ Magistritöö, Energeetika teaduskond, Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2015. [Võrgumaterjal] Saadaval: <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/0cd4ff51-5057-4e63-a552-06383c6b20f2>. [Kasutatud 04.03.2021].
17. Elering, „Elektri põhivõrgu kaart,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://elering.ee/elektri-pohivorgu-kaart>. [Kasutatud 03.03.2021].
18. L. Kütt, Mittetavapärased mõõtemuundurid (NCIT) ning tehnilised tingimused nende rakendamiseks Eesti elektrivõrguettevõtetes, Tallinn: TTÜ, 2012.
19. Eesti standard EVS-EN 61869-1:2009 Mõõtetrafod. Osa 1: Üldnõuded, Eesti standardikeskus, 2009.
20. Eesti standard EVS-EN 61869-5:2011 Mõõtetrafod. Osa 5: Lisanõuded mahtuvuslikele pingetrafodele, Eesti standardikeskus, 2011.
21. Eesti standard EVS-EN 61869-3:2012 Mõõtetrafod. Osa 3: Lisanõuded induktiivpingetrafodele, Eesti standardikeskus, 2012.
22. Eesti standard EVS-EN 61869-2:2013 Mõõtetrafod. Osa 2: Lisanõuded volutrafodele, Eesti standardikeskus, 2013.
23. IEC standard 61000-3-6:2008 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-6: Limits – Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MW, HV and EHV power systems, 2008.

24. Eesti standard 61000-4-7:2002 Elektromagnetiline ühilduvus (EMÜ) - Osa 4-7: Katse ja mõõtetehnika. Jagu Toitesüsteemide ja nendega ühendatud seadmestiku harmooniliste ja vaheharmooniliste mõõtmiste ja mõõteaparatuuri üldjuhend, Eesti standardikeskus, 2009.
25. Eesti standard EVS-EN 61000-2-4:2002 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-4: Environment – Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances, Eesti standardikeskus, 2002.
26. Tehniline aruanne IEC/TR 61869-103:2012 Mõõtetrafod – Mõõtemuundurite kasutamine elektri kvaliteedi mõõtmiseks, Eesti standardikeskus, 2020.
27. 50Hz Solutions, „PQ Sensor,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://50hzsolutions.com.au/products/power-quality-devices/pq-sensor/>. [Kasutatud 05.04.2021].
28. Pfiffner Group, „PQ-Sensor,” [Võrgumaterjal]. <https://www.pfiffner-group.com/products-solutions/details/pq-sensor>. [Kasutatud 05.04.2021].
29. Eesti standard EVS-EN 60359:2003 Elektrilised ja elektroonilised mõõteseadmed. Talitluskarakteristikud, Eesti standardikeskus, 2003.
30. Eesti standard EVS-EN 61557-12:2008 Elektriohutus madalpingevõrkudes vahelduvpingega kuni 1000 V ja alalispingega kuni 1500 V. Kaitsesüsteemide katsetus-, mõõte- ja seireseadmed – Osa 12: Talitluse mõõte- ja seireseadmed, Eesti standardikeskus, 2008.
31. J. Meyer, R. Stiegler and J. Kilter, "Accuracy of Voltage Instrument Transformers for Harmonic Measurements in Elering's 330-kV-Transmission Network," 2016 *Electric Power Quality and Supply Reliability (PQ)*, pp. 85-90, 2016.
32. POWTEC, „Valmis Estlink 2 merekaabel,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.powtec.ee/17-02-2014-valmis-estlink-2-merekaabel/>. [Kasutatud 13.05.2021].
33. Qualitrol, „INFORMA PMD-A Class A Power Quality Monitor,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.qualitrolcorp.com/products/power-quality-monitors/informa-pmd-a-class-a-power-quality-monitor/>. [Kasutatud 07.03.2021].
34. A-eberle, „The mobile Tool for the power Quality Expert,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.a-eberle.de/produkte/the-mobile-tool-for-the-expert-pq-box-200/?lang=en>. [Kasutatud 07.03.2021].



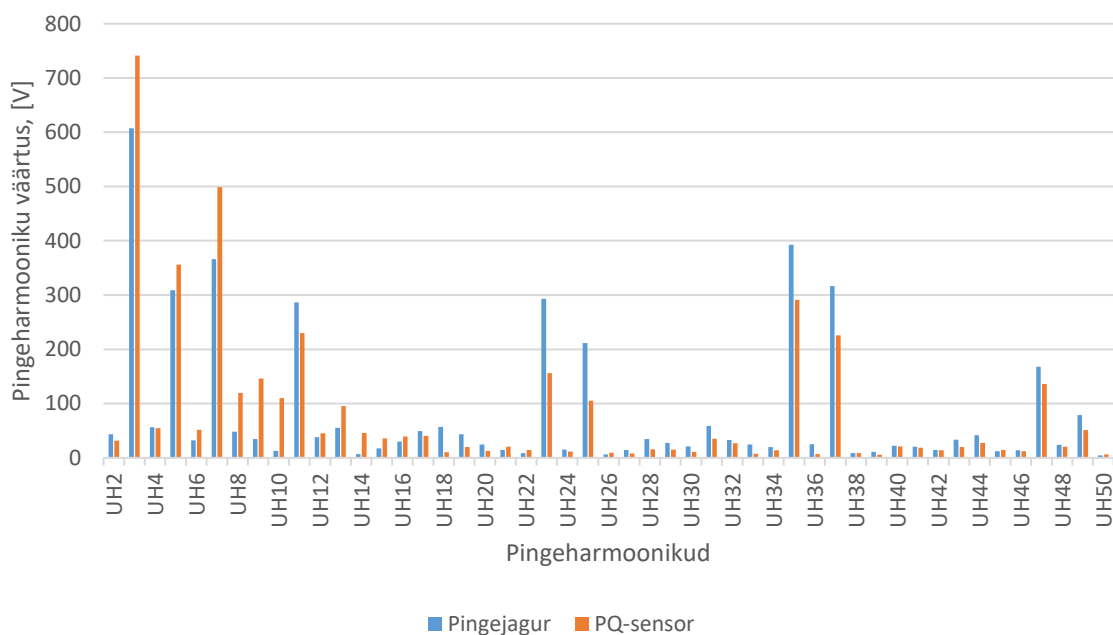
35. Qualitrol, „iQ+ Master Station Software,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.qualitrolcorp.com/products/cbm-software/multi-function-software/iq-master-station-software/>. [Kasutatud 07.03.2021].
36. F. C. De La Rosa, „Harmonics and power systems,” USA, 2006.
37. Microsoft, „CORREL function,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://support.microsoft.com/en-us/office/correl-function-995dcef7-0c0a-4bed-a3fb-239d7b68ca92>. [Kasutatud 10.05.2021].

## **LISAD**

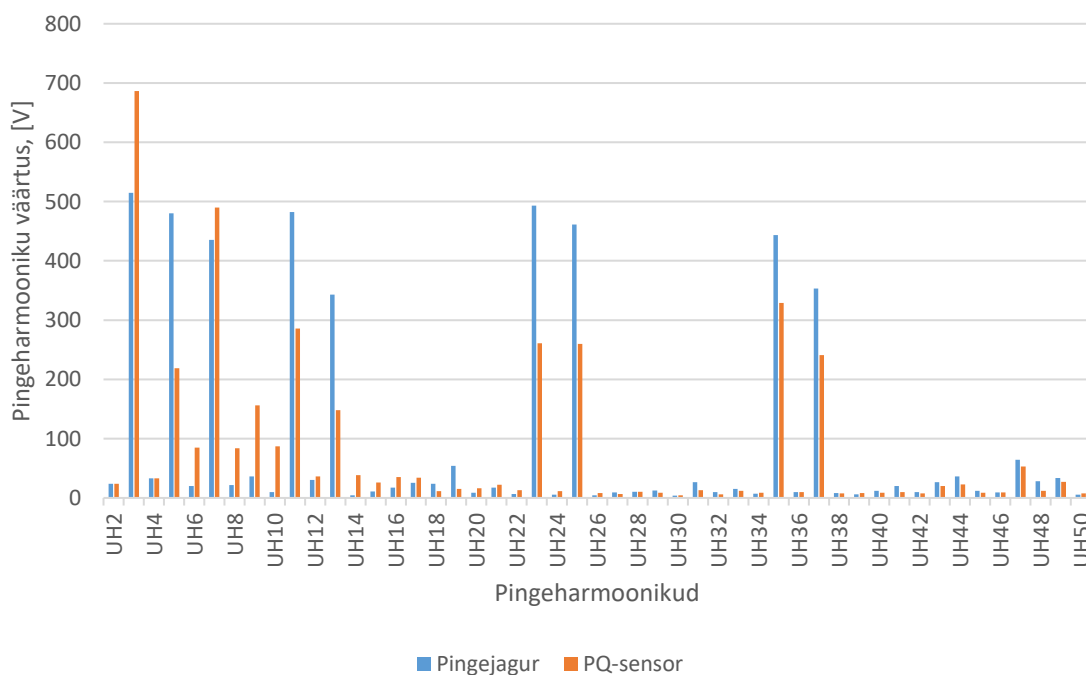
Lisa 1 Estlink 2 mõõtmiste erinevus Soome-Eesti suunal

Lisa 2 Estlink 2 tulemuste erinevus Eesti – Soome

## Lisa 1 Estlink 2 mõõtmiste erinevus Soome-Eesti suunal

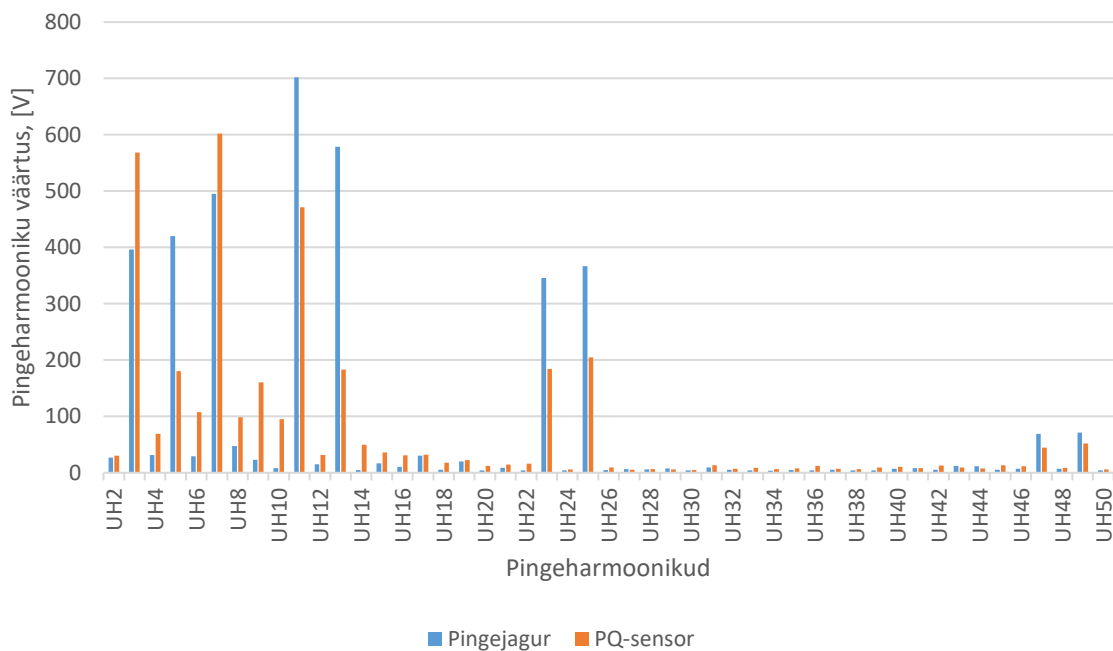


Joonis L1.1 Estlink 2 pealt pingeljaguriga ja PQ-sensoriga mõõdetud pingeharmonikud (2 – 50) 65 MW võimsuse juures, Soome – Eesti suunal

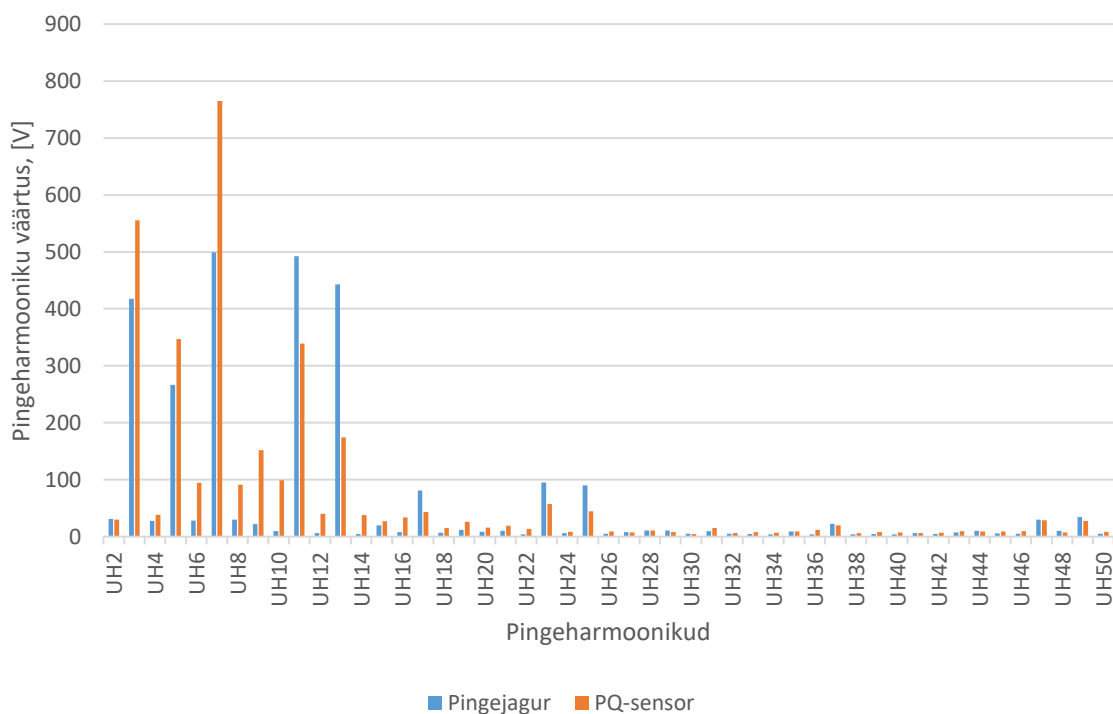


Joonis L1.2 Estlink 2 pealt pingeljaguriga ja PQ-sensoriga mõõdetud pingeharmonikud (2 – 50) 195 MW võimsuse juures, Soome – Eesti suunal

### Lisa 1 Estlink 2 mõõtmiste erinevus Soome-Eesti suunal

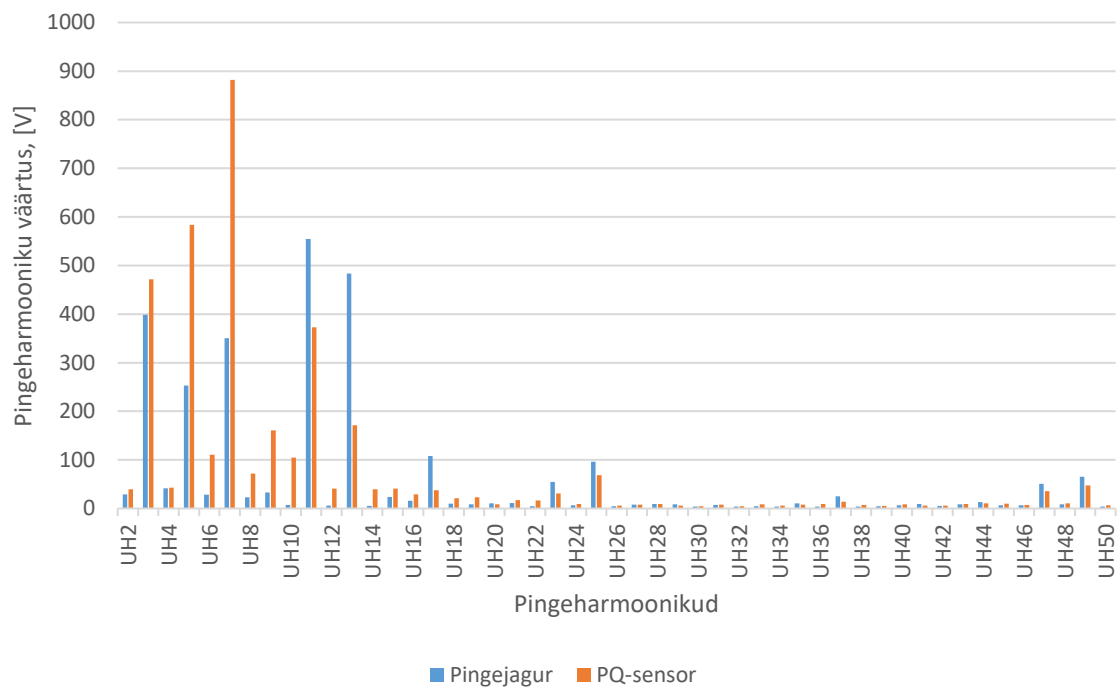


Joonis L1.3 Estlink 2 pealt pingeljaguriga ja PQ-sensoriga mõõdetud pingeharmonikud (2 – 50) 325 MW võimsuse juures, Soome – Eesti suunal



Joonis L1.4 Estlink 2 pealt pingeljaguriga ja PQ-sensoriga mõõdetud pingeharmonikud (2 – 50) 520 MW võimsuse juures, Soome – Eesti suunal

### Lisa 1 Estlink 2 mõõtmiste erinevus Soome-Eesti suunal



Joonis L1.5 Estlink 2 pealt pingejaguriga ja PQ-sensoriga mõõdetud pingeharmonoonikud (2 – 50) 650 MW võimsuse juures, Soome – Eesti suunal

## Lisa 2 Estlink 2 tulemuste erinevus Eesti – Soome

Tabel L2.1 Pingejaguri ja PQ-sensori 10 minuti keskvaärtuste mõõtetulemuste erinevused

Harmooniku järk	Mõõtetulemuste erinevused, %				
	65 MW	195 MW	352 MW	455 MW	520 MW
2	0,002	0,005	-0,004	-0,003	-0,001
3	-0,025	0,010	-0,034	-0,056	-0,062
4	0,005	-0,007	-0,010	-0,003	0,005
5	-0,078	0,027	-0,044	-0,021	-0,030
6	-0,022	-0,019	-0,021	-0,025	-0,021
7	-0,040	-0,029	0,016	-0,025	-0,007
8	-0,020	-0,022	-0,030	-0,022	-0,019
9	-0,025	-0,029	-0,023	-0,016	-0,028
10	-0,027	-0,028	-0,027	-0,029	-0,029
11	0,011	0,027	0,053	0,142	0,054
12	0,002	-0,007	-0,010	-0,009	-0,009
13	-0,016	0,065	0,112	0,164	0,086
14	-0,013	-0,013	-0,012	-0,012	-0,013
15	-0,007	-0,004	0,003	0,016	0,009
16	0,001	-0,006	-0,006	-0,005	-0,003
17	0,001	0,004	0,002	0,005	0,006
18	0,009	0,000	-0,002	-0,003	-0,002
19	0,004	-0,004	0,003	-0,001	-0,003
20	0,000	-0,002	-0,001	0,000	0,000
21	0,000	0,005	0,005	-0,001	-0,002
22	-0,002	-0,002	-0,003	-0,004	-0,004
23	0,047	0,072	0,046	0,023	0,015
24	0,002	-0,001	0,000	0,000	0,000
25	0,030	0,059	0,039	0,022	0,013
26	-0,001	-0,002	-0,001	-0,001	-0,001

## Lisa 2 Estlink 2 tulemuste erinevus Eesti – Soome

Tabel L2.1 järg

	<b>Mõõtetulemuste erinevused, %</b>				
<b>Harmoniku järk</b>	<b>65 MW</b>	<b>195 MW</b>	<b>352 MW</b>	<b>455 MW</b>	<b>520 MW</b>
27	0,002	0,003	0,003	0,001	0,001
28	0,004	0,002	0,003	-0,001	-0,001
29	0,004	0,002	0,002	-0,001	0,000
30	0,003	0,000	0,002	0,000	0,000
31	0,006	0,004	0,004	-0,001	0,000
32	0,002	0,001	0,002	0,000	0,000
33	0,003	0,001	0,004	-0,001	-0,001
34	0,002	0,001	0,002	-0,001	-0,001
35	0,040	0,043	0,016	0,001	0,001
36	0,004	-0,001	-0,001	-0,002	-0,002
37	0,030	0,020	0,026	0,003	0,003
38	-0,001	-0,001	-0,001	-0,002	-0,001
39	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
40	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000
41	0,000	0,001	0,003	0,000	-0,001
42	0,002	0,001	0,000	-0,001	-0,001
43	0,007	0,006	0,000	0,001	0,001
44	0,004	0,004	0,003	0,000	0,000
45	-0,001	0,001	0,003	-0,001	-0,001
46	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
47	0,019	0,006	0,016	0,010	0,007
48	0,001	0,004	0,001	0,000	0,000
49	0,008	-0,004	0,002	0,008	0,007
50	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001