



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND

---

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

FAASIMÕÕTESEADME MÕÕTETEHNOLOOGIATE  
TESTIMINE JA ANALÜÜS

TESTING AND ASSESSMENT OF PHASOR MEASUREMENT UNIT MEASUREMENT  
ALGORITHMS

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Uku Salumäe

Üliõpilaskood: AAVM144152

Juhendaja: Dots Jako Kilter

Tallinn, 2017.a.

## 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.

“.....” ..... 201.....

Autor: .....  
/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“.....” ..... 201.....

Juhendaja: .....  
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....” .....201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....  
/ nimi ja allkiri /

# Lõputöö kokkuvõte

<i>Autor:</i> Uku Salumäe	<i>Lõputöö liik:</i> magistritöö
<i>Töö pealkiri:</i> Faasimõõteseadmehä määõtetehnoloogiate testimine ja analüüs	
<i>Kuupäev:</i> 19.05.2017	112 lk
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool	
<i>Teaduskond:</i> Inseneriteaduskond	
<i>Instituut:</i> Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut	
<i>Töö juhendaja(d):</i> dotsent Jako Kilter	
<i>Töö konsultant (konsultandid):</i>	
<i>Sisu kirjeldus:</i> Käesoleva töö eesmärgiks on uurida faasimõõteseadmehä määõteveea sõltuvust määõtmistes kasutatud algoritmidest ja tehnoloogiatest. Määõteveea uurimiseks on läbi viidud katsed faasimõõteseadmehä erinevate konfiguratsioonide korral ning katse tulemuste alusel on hinnatud konfiguratsiooni määõju faasimõõteseadmehä määõtetulemusele. Kirjeldatud on erinevate faasimõõteseadmehä säte aluseks olevaid algoritme ja signaalitääõtluseks kasutatavaid määõtetehnoloogiasid ning analüüsitud nende määõju faasimääõtmistele. Faasimääõteseadmehä määõtetäpsuse hindamiseks koostati testskeem, mille alusel viidi läbi nelja erineva faasimääõteseadmehä dünaamilised ja staatilised katsed. Katsete läbiviimiseks on kasutatud reaalaajasimulaatorit RTDS. Katse tulemusi hinnati faasimääõtmiste standardis IEEE C37.118.1 kirjeldatud faasimääõtmiste määõteveea hindamiseks loodud suuruste alusel. Töö tulemuseks on erinevate säte, nagu näiteks filtrite ja andmeakna pikkuse, määõju hinnang faasimääõtmistele ning soovituslikud sätegrupid faasimääõtmiste läbiviimiseks dünaamilistes ja staatilistes olukordades. Töös saadud tulemused väivad olla abiks faasimääõteseadmehä konfigureerimisel kasutatavate soovituslike säte valikul. Töö sisu väib aidata faasimääõteseadmehä tööpääõhimääõtetest ja komponentidest aru saamisel. Töö väib olla ka abiks reaalaajasimulaatori kasutamisel faasimääõteseadmehä testimiseks.	
<i>Märksääõnad:</i> Faasimääõteseade, määõteveega, signaalitääõtlus, faasimääõteseadmehä katsetamine, IEEE C37.118.1, RTDS	

# Summary of the Diploma Work

<i>Author:</i> Uku Salumäe	<i>Type of the work:</i> Master Thesis
<i>Title:</i> Testing and assessment of phasor measurement unit measurement algorithms	
<i>Date:</i> 19.05.2017	112 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology <i>School of Engineering</i>	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Tutor(s) of the work:</i> Associate professor Jako Kilter <i>Consultant(s):</i>	
<i>Abstract:</i> Measurement algorithms used in the phasor measurement unit can have a significant influence on the measurement accuracy. This thesis studies the measurement error dependence on the measurement algorithm used in the phasor measurement unit. The main measurement algorithms and technologies of the phasor measurement unit are described. Research was carried out by practical testing with the four different phasor measurement units. Static and dynamic conditions were tested with the test setup. Real-time digital simulator RTDS was used for the modelling of the test cases and generation of the test signals. Research used settings such as filter and data window length in the phasor measurement units to study the different phasor measurement unit measurement algorithms. Standard IEEE C37.118.1 measurement error variables were used in the analysis of the static and dynamic tests. Study presents the recommended setting groups for the tested phasor measurement units. The influence of the basic settings to the measurement error are assessed. Results of this work might be useful in the configuration of the phasor measurement units. Test method used in this work can be used in the future testing of the phasor measurement units.	
<i>Keywords:</i> Phasor measurement unit, measurement error, signal processing, phasor measurement unit testing, IEEE C37.118.1, RTDS	

# Sisukord

<b>Eessõna .....</b>	<b>8</b>
<b>Sissejuhatus.....</b>	<b>9</b>
<b>1 Faasimõõtmiste tehnoloogia .....</b>	<b>11</b>
1.1 Ülevaade faasimõõteseadmetest .....	11
1.2 Sisendsignaali diskreetimine ja ajaallikas.....	14
1.2.1 Sisendsignaali diskreetimine .....	14
1.2.2 Ajaallikas.....	18
1.3 Sünkrofaasori estimeerimine.....	20
1.4 Filtrid.....	25
<b>2 Faasimõõteseadmete katsetamine .....</b>	<b>30</b>
2.1 Ülevaade faasimõõteseadmete katsetamisest.....	30
2.2 Kasutatud seadmed .....	35
2.3 Katsete kirjeldus.....	48
<b>3 Katsete tulemused ja analüüs.....</b>	<b>55</b>
3.1 Dünaamilise testi tulemused ja analüüs .....	55
3.1.1 Referentssuurused .....	55
3.1.2 PMU1 dünaamilise testi tulemused ja analüüs .....	58
3.1.3 PMU2 dünaamilise testi tulemused ja analüüs .....	65
3.1.4 PMU3 dünaamilise testi tulemused ja analüüs .....	71
3.1.5 PMU4 dünaamilise testi tulemused ja analüüs .....	77
3.2 Staatilise testi tulemused ja analüüs.....	83
3.2.1 PMU1 staatilise testi tulemused ja analüüs .....	84
3.2.2 PMU2 staatilise testi tulemused ja analüüs .....	86
3.2.3 PMU3 staatilise testi tulemused ja analüüs .....	89
3.2.4 PMU4 staatilise testi tulemused ja analüüs .....	92
3.3 Soovitused seadmete konfigureerimiseks .....	94
3.3.1 PMU1 soovituslik konfiguratsioon.....	95
3.3.2 PMU2 soovituslik konfiguratsioon.....	96
3.3.3 PMU3 soovituslik konfiguratsioon.....	96
3.3.4 PMU4 soovituslik konfiguratsioon.....	97
<b>Kokkuvõte.....</b>	<b>98</b>
<b>Kasutatud kirjandus .....</b>	<b>102</b>
<b>Lisad .....</b>	<b>105</b>
<b>L.1. Faasimõõtmiste nõuded staatilises olukorras.....</b>	<b>106</b>
<b>L.2. Faasimõõtmiste nõuded dünaamilises olukorras.....</b>	<b>108</b>

# 1 Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema:	<b>Faasimõõteseadmehaavaluõõtehnoloõiate testimine ja analüüs</b>
Üliõpilane:	<b>Uku Salumäe, AAVM144152</b>
Eriala:	<b>Elektroenergeetika</b>
Lõputöö liik:	Magistritöö
Lõputöö juhendaja:	Jako Kilter
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	01.07.2017
Lõputöö esitamise tähtaeg:	<b>25.05.2017</b>

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendaja (allkiri)

---

Instituudi direktor (allkiri)

## 1.1 Teema põhjendus:

Laimõõtesüsteem on arenev tehnoloõia, mis võimaldab jälgida elektrisüsteemis protsesse, mida siiani ei ole võimalik olnud jälgida. Laimõõtesüsteemi üles seatud faasimõõteseadmehaavaluõõtehnoloõiate on erinevate allikate põhjal piisavalt täpsed mõõdetavate parameetrite nominaalsuuruste juures. Samas dünaamiliste protsesside mõõtmisel nende mõõtetäpsus halveneb. Dünaamiliste protsesside mõõtmistäpsuse suurendamiseks on faasimõõteseadmehaavaluõõtehnoloõiate kasutusel erinevad filtrid ja algoritmid, ehk soovitud sündmuse mõõtmiseks võib kasutada vastavat konfiguratsiooni. Teadmine faasimõõteseadmehaavaluõõtehnoloõiate pakutavatest võimalustest erinevate protsesside mõõtmiseks oleks tähtis laimõõtesüsteemi omanikele ehk siis põhivõrgu ettevõtetele.

Töö võimaldaks saada ülevaadet faasimõõteseadmehaavaluõõtehnoloõiate kasutatavatest erinevatest mõõtmistehnoloõiatest ning annaks teadmisi nende mõjust faasimõõtmistele.

## 1.2 Töö eesmärk:

Töö eesmärgiks on uurida faasimõõteseadmehaavaluõõtehnoloõiate ehitust ja tema parameetritest tulenevate tegurite mõju mõõtetäpsusele.

## 1.3 Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Missugune on faasimõõteseadmehaavaluõõtehnoloõiate mõõtmistehnoloõiate?

Milline on faasimõõteseadmetes kasutatavate algoritmide ja filtrite mõju tema mõõtetäpsusele?  
Kuidas käituvad faasimõõteseadmed erinevates olukordades sõltuvalt sätestusest?

#### **1.4 Lähteandmed:**

Töös kasutatakse teadusandmebaaside materjale, raamatukogu kirjandust ja seadmete manuaale.

#### **1.5 Lõputöö konsultandid (vajadusel):**

---

Konsultant nimi (allkiri, kuupäev)

---

Konsultant nimi (allkiri, kuupäev)

# Eessõna

Lõputöö teema valisin tulenevalt huvist elektrimõõtmiste vastu ja oma varasemast kokkupuutest faasimõõteseadmete testimisega. Oma senises töös olen käsitlenud faasimõõteseadmete mõõtetäpsuse sõltuvust sätestusest ning osaliselt ka seetõttu soovisin teemat rohkem uurida. Kuigi lõputöös on uuritud ainult faasimõõteseadmeid on autoril olnud soov laiendada oma teadmisi laiemalt elektrimõõtmiste kohta. Lõputöö koostamisega soovisin olla abiks inimestele, kes puutuvad kokku faasimõõteseadmete konfigureerimisega. Tänan oma juhendajat, kes on lõputöö koostamist suunanud ja andnud häid ideid teema arendamisel.

Lõpetaja: Uku Salumäe

Aadress: Mäehansu talu, Varangu küla, Haljala vald, Lääne-Virumaa, 45320

Töökoht: TTÜ Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

E-mail: uku.salumae@gmail.com



# Sissejuhatus

Elektrienergia on tänu oma laiadele kasutusvõimalustele ja lihtsale ning odavale transpordile kujunenud üheks peamiseks inimese kasutatavaks energialiigiks. Elektrienergia tähtsuse tõttu on vajalik tagada elektrisüsteemide pidev töö ning ülekantava elektri kvaliteet. Nende ülesannete täitmiseks on vajalik omada pidevat ja täpset ülevaadet elektrisüsteemi tööst, mida saab teha mitmesuguste mõõtmiste abil. Süsteemi jälgitavaid parameetreid on palju, aga elektrisüsteemi iseloomu tõttu on tähtsamateks jälgitavateks parameetriteks elektrilised parameetrid. Viimasel ajal on hakanud elektrisüsteemi parameetrite jälgimiseks laialdaselt levima faasimõõtmiste tehnoloogia.

Elektrisüsteemi töö juhtimiseks on vajalik omada pidevat ja täpset informatsiooni süsteemi parameetritest. Elektrisüsteemis kasutatakse süsteemi parameetrite jälgimiseks 1...2 s või pikema ajasammuga SCADA mõõtmisi. Tänapäeval juhitakse SCADA mõõtmiste alusel igapäevaselt elektrisüsteemi tööd, samas ei võimalda nad saada infot 1...2 s kiiremini toimuvate protsesside kohta. SCADA mõõtmistest ei ole ka otseselt võimalik saada infot faasinurkade kohta. Faasimõõtmiste kasutamine lisaks traditsioonilistele SCADA mõõtmistele võimaldaks jälgida neid protsesse ja parameetreid kuna faasimõõtmised on tihedama mõõtesagedusega ning nende abil on otseselt võimalik mõõta faasinurki. Tänu sellele saab faasimõõtmiste alusel koostada elektrisüsteemi seireks ja juhtimiseks rakendusi, mida SCADA mõõtmiste abil on raske või ei ole võimalik koostada. Näiteks võib tuua nurgastabiilsuse jälgimine ning ebastabiilsuse ennetamine, sest selle protsessi dünaamika on liiga kiire SCADA mõõtmiste jaoks ning protsessi jälgimiseks on ka vajalik info faasinurkade kohta [1]. Faasimõõtmiste puuduseks on mõõtmiste suur andmehulk, mistõttu tehnoloogia laiema kasutuse korral võib tekkida probleeme mõõteandmete töötlemise ja salvestamisega. Faasimõõtmiste laiemal kasutusel elektrisüsteemi juhtimiseks tuleb faasimõõtmistes ja selle põhistes rakendustes veenduda vigadeta töös, et vältida valesid otsuseid elektrisüsteemi juhtimisel.

Käesoleva töö eesmärgiks on uurida faasimõõtmisteks kasutatavate faasimõõteseadmete mõõtevigade tulenevalt mõõtmisteks kasutatud algoritmidest ja tehnoloogiast. Mõõtevea uurimiseks on esmalt vajalik välja selgitada ja kirjeldada peamisi faasimõõteseadmes kasutatavaid mõõtetehnoloogiaid ning algoritme. Näiteks võib ühes faasimõõteseadmes seadistamisel olla võimalik valida mitmete filtrite vahel. Töös on käsitletud erinevate faasimõõteseadmetes kasutatavate sätete mõju mõõtetulemusele. Eesmärgi saavutamiseks on

läbi viidud katsed erinevate faasimõõteseadmeh konfiguratsioonide korral. Katsed on korraldatud pidades silmas elektrisüsteemis esinevaid võivaid olukordi.

Töö esimene peatükk sisaldab ülevaadet faasimõõtmiste tehnoloogiast ning kirjeldust erinevatest faasimõõteseadmeh komponendidest. Faasimõõtmiste ülevaates on lühidalt kirjeldatud faasimõõteseadmeh eesmärki elektrivõrgus ning sellest tulenevalt elektrivõrgu parameetreid, mida faasimõõteseadmeh peaksid mõõtma. Faasimõõteseadmeh komponendidest on töös kirjeldatud kolme: A/D konverter, faasimõõtmiste estimaator ning faasimõõtmistel kasutatavad filtrid. Kõikide komponendid puhul on kirjeldatud nende tööpõhimõtet ning peamisi tehnilisi parameetreid. Faasimõõtmiste estimaatori peatükis on kirjeldatud põhiliselt faasimõõteseadmeh kasutatavaid estimaatori algoritme.

Töö teine peatükk sisaldab ülevaadet faasimõõteseadmeh katsetamisest maailmas ning töös läbi viidud katsetuste kirjeldust. Peatükis on kirjanduse ülevaade faasimõõteseadmeh katsetamisest maailmas. Välja on toodud faasimõõteseadmeh katsetamisel leitud probleemsed kohad. Lisaks on kirjeldatud testimiseks kasutatud testseadmeh ja testitavaid faasimõõteseadmeh. Faasimõõteseadmeh testiti kahes olukorras: staatilises ja dünaamilises. Olukordade testimiseks koostati simulatsioonimudelid, mille alusel genereeriti faasimõõteseadmeh testisignaalid.

Töö kolmandas ja viimases peatükis on toodud faasimõõteseadmehga läbi viidud katsetuste tulemused ja katsete analüüs. Katsete tulemused on esitatud faasimõõteseadmeh mõõtevigade kujul. Analüüsis on võrreldud tulemusi erinevate faasimõõteseadmeh konfiguratsioonide korral ning hinnatud sätete sobivust katses tehtud sündmuste mõõtmiseks. Kolmas peatükk lõpeb testitud faasimõõteseadmehga katsete alusel antud soovitusliku konfiguratsiooniga.

Töö tulemusena on välja selgitatud faasimõõteseadmeh konfiguratsiooni mõju faasimõõteseadmeh mõõtetäpsusele töös läbi viidud katsete alusel. Töö tulemus võib olla kasuks faasimõõteseadmeh seadistamisel elektrisüsteemis. Tööd võib ka kasutada näitena faasimõõteseadmehga testimisest. Samuti võib tööst leida faasimõõteseadmehga tööpõhimõtte kirjeldust ning erinevate faasimõõteseadmeh komponendid rolli faasimõõtmiste läbiviimisel.

## 2 Faasimõõtmiste tehnoloogia

### 2.1 Ülevaade faasimõõteseadmest

Faasimõõteseadmest (PMU ehk ing. k. *phasor measurement unit*) kasutatakse elektrisüsteemis pinget ja voolutugevuse mõõtmiseks. Faasimõõtmiste tehnoloogia on võrreldes elektrisüsteemiga suhteliselt uus, kuna ta põhineb digitaalsel arvutustehnikal. Esimesed faasimõõteseadmest prototüübid valmistati 1980-ndatel aastatel USA-s. Laialdasemat kasutust elektrisüsteemis on faasimõõteseadmest leidnud 21. sajandil. Teiste elektrisüsteemis kasutust leidnud mõõtetehnoloogiatega võrreldes on faasimõõtmistel mitmeid eeliseid. Neist üks tähtsamaid seisneb võimaluses mõõta sünkroniseeritult pinget- ja voolu faasinurka elektrisüsteemi erinevates sõlmedes, mistõttu on mõõtmised erinevates süsteemi sõlmedes võrreldavad. Teiste tehnoloogiate ees on eeliseks ka faasimõõtmiste kõrgem sagedus. Faasimõõtmiste mõõtesagedus on kordades kiirem võrreldes standardsete SCADA mõõtmistega. Faasimõõtmiste sünkroniseeritus ja kõrgem mõõtesagedus võimaldavad koostada rakendusi näiteks nurga- ja pingestabiilsuse jälgimiseks ning saartalitluse avastamiseks [1].

Elektrisüsteemis esinevad protsessid võib liigitada järgmiselt [2]:

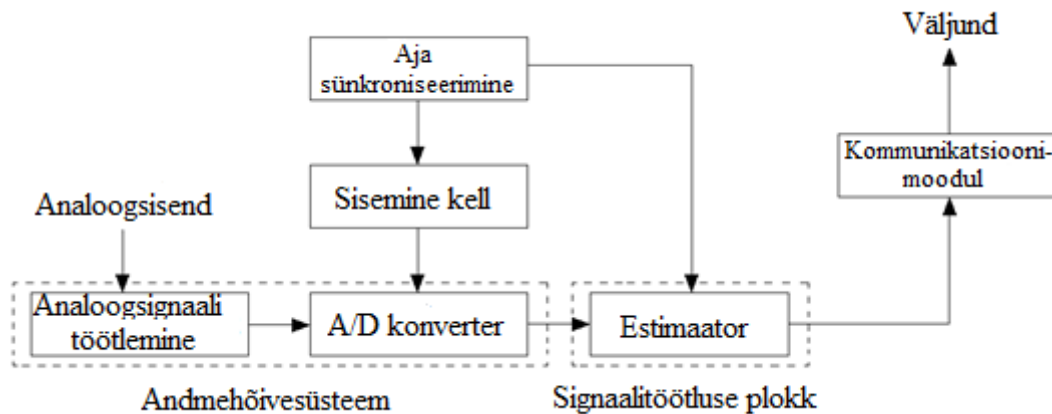
- Soojuslikud protsessid (soojuselektrijaama katla dünaamika)
- Elektromehaanilised protsessid (generaatori rootori nurga muutused)
- Aeglased elektromagnetilised protsessid (elektrivõrgus toimuvad lühised ja lülitused)
- Kiired elektromagnetilised protsessid (liigpinged).

Faasimõõteseadmest eesmärgiks on mõõta toodud loetelust soojuslike ja elektromehaaniliste protsesside poolt põhjustatud süsteemi parameetrite muutusi. Elektromagnetilisi protsesse on nende kiire iseloomu tõttu raske või võimatu faasimõõteseadmestega korrektselt mõõta. Elektromagnetilisi protsesse ei saa seetõttu faasimõõtmiste tehnoloogia piirangute tõttu informatiivselt kirjeldada ning faasimõõtmistes esinevad nad müra. Elektromagnetiliste protsesside mõju tuleks seetõttu mõõtetulemustest välja filtreerida. [3]

Faasimõõteseadmest kasutavad sisendina mõõtetetrafaase sekundaarmähiste pingeid ja voole (joonis 1.1). Seadmest viiakse signaalid esmalt töötlemiseks sobilikule kujule. Kõigepealt on mõõteseadmest pinget- ja voolusensorid, mis viivad signaalide nivoo vajalikule tasemele (joonis 1.1 analoogsignaali töötlemine). Seejärel signaalid filtreeritakse madalpääsu filtriga ning viiakse diskreetsele kujule A/D konverteris. Faasimõõteseadmest mõõtetäpsuse tagamiseks on

vajalik A/D konverteri ajas konstantne diskreetimissagedus. Diskreetimissagedust hoitakse ühtlasena seadme sisemise kella abil (Joonis 1.1 sisemine kell), mille täpsust tagab GPS ajasignaali (Joonis 1.1 Aja sünkroniseerimine). [3]

Faasimõõteseadmete põhimõtteskeem on joonisel 1.1.



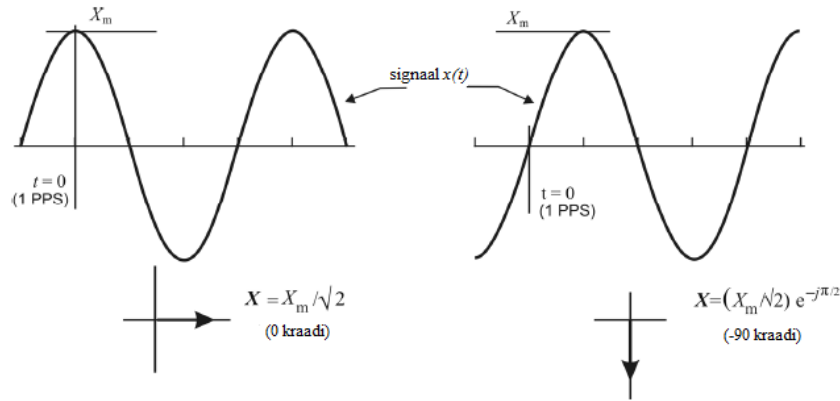
**Joonis 2.1. Faasimõõteseadme tööpõhimõtte skeem [3]**

Diskreetitud signaal on sisendiks signaalitöötlusplokkile (joonisel 1.1 signaalitöötuse plokk), kus koostatakse mõõdetud suuruste estimaadid (sünkrofaasor, sagedus, sageduse muutumise kiirus). Estimateerimiseks võib kasutada mitmeid meetodeid, näiteks diskreetne Fourier' teisendus (DFT) ja demodulatsioon. Signaalitöötuse plokkis liidetakse faasimõõtmiste juurde ka ajamärgendid GPS signaali alusel. Viimane etapp faasimõõteseadmes on mõõdetud suurused kommunikatsioonimooduli abil saatmine andmete konsentraatorisse (PDC). [3]

Faasimõõteseadmete mõõdetavad suurused on defineeritud standardis IEEE C37.118.1-2011 [1]. Nendeks on sünkrofaasor, sagedus ja sageduse muutumise kiirus. Neist esimene, sünkrofaasor, kannab informatsiooni mõõdetud signaali efektiivväärtuse ja nurga kohta. Sünkrofaasor  $X(t)$  on defineeritud valemiga 1.1 [4].

$$X(t) = \frac{X_m(t)}{\sqrt{2}} e^{j(2\pi \int g(t) dt + \varphi)} \quad (1.1)$$

Valemis 1.1 on  $X_m(t)$  signaali hetkväärtus,  $g(t)$  tegeliku ja nominaalse sageduse vaheline erinevus ja  $\varphi$  faasinurk. Sünkrofaasorit arvutatakse koosinusfunktsiooni põhjal. Selle tõttu on sünkrofaasori faasinihe null, kui  $X_m(t)$  hetkväärtus on maksimaalne. Sünkrofaasori ja tema arvutamise aluseks oleva signaali vahelist seost on kujutatud joonisel 1.2 [4].



### Joonis 2.2. Sünkrofaasori koosinusfunktsioonina [4]

Valemi 1.1 sisend on mõõdetud sageduse ja nominaalse sageduse vahe  $g(t)$ . Suurus  $g(t)$  taandab sünkrofaasori faasinurga nominaalsagedusele. See tähendab, et konstantse faasinihkega  $\varphi = \text{const}$  signaali faasinurk püsib konstantne kui signaali tegelik sagedus ei erine nimisagedusest. Tegeliku sageduse erinevusel nimisagedusest on positiivsete  $g(t)$  juhtudel sünkrofaasori nurk kasvav ning negatiivsete  $g(t)$  väärtuste korral sünkrofaasori nurk kahanev.

Sagedus on võnkumiste perioodi pöördväärtus. Sagedust võib vaadelda ka kui faasinurga muutumise kiirust ajas, ehk tegemist on faasinurga esimese tuletisega aja järgi. Standardis IEEE C37.118.1-2011 on nimetatud asjaolu sageduse defineerimisel ära kasutatud. Faasimõõteseadme sisendsignaali  $x(t)$  võib kirjeldada valemiga 1.2, kus  $X_m$  on signaali amplituudväärtus ning  $\omega$  on signaali nurkkiirus [4].

$$x(t) = X_m \cos(\omega t + \varphi) = X_m \cos[\psi(t)] \quad (1.2)$$

Võttes aluseks valemi 1.2 saab faasimõõtmistel sagedust arvutada valemiga 1.3 [4].

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\psi(t)}{dt} \quad (1.3)$$

Faasimõõtmised on tihedalt seotud elektrisüsteemi nimisagedusega. Sünkrofaasori puhul taandatakse faasinurk süsteemi nominaalse sagedusega signaalile. Standardi [4] järgi on sageduse infot võimalik faasimõõteseadmetel edastada absoluutsuurusena, aga ka sageduse hälbena süsteemi nimisagedusest.

Sageduse muutumise kiirus (ROCOF) on sageduse esimene tuletis aja järgi. Standardis [4] on ROCOF defineeritud valemiga 1.4.

$$ROCOF(t) = \frac{df(t)}{dt} \quad (1.4)$$

Faasimõõteseadmed edastavad mõõdetud suurusi andmete kontsentraatorisse. Erinevate tootjate faasimõõteseadmeid võivad olla samas laimõõtesüsteemis, seetõttu on andmete edastamise formaat faasimõõteseadmete ja PDC (ing. k. *phasor data concentrator*) vahel reguleeritud standardiga [5]. Soovituslikud mõõteandmete edastamissagedused (ing. k. *reporting rate*) on standardis [4]. Kõik kolm eespool kirjeldatud suurust edastatakse sama sagedusega, edastamissagedus peab standardi [4] järgi olema süsteemi sageduse tegur. Tabelis 1.1 on standardi [4] järgi soovituslikud edastamissagedused sõltuvalt süsteemi nominaalsest sagedusest.

**Tabel 2.1. Faasimõõtmiste edastamissagedused [4]**

Süsteemi sagedus	50 Hz			60 Hz				
Edastamissagedus, sõnumit sekundis (fps)	10	25	50	10	12	15	30	60

Standard [4] lubab lisaks tabelis 1.1 toodud edastamissagedustele ka teisi täisarvuliste kordajatega edastamissagedusi. Seadmetes võib kasutada näiteks kasutusel kõrgemaid (100/120, 200/240 fps) ja ka madalamaid (1, 5 fps) edastamissagedusi.

## 2.2 Sisendsignaali diskreetimine ja ajaallikas

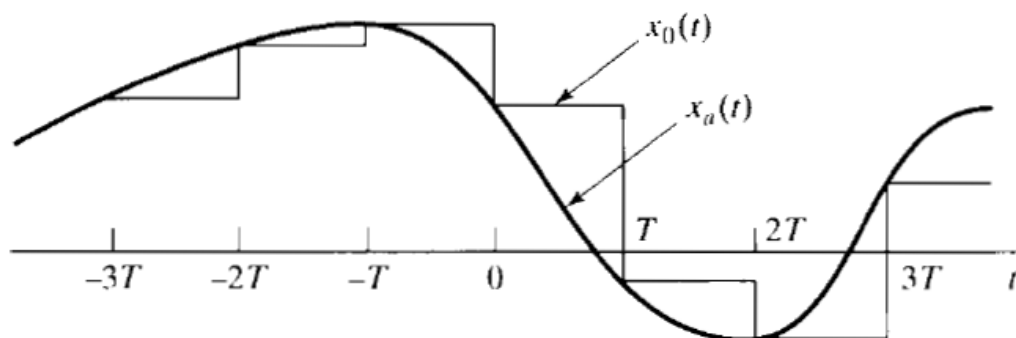
### 2.2.1 Sisendsignaali diskreetimine

Andmete töötlemiseks mikroprotsessoris on vaja mõõtetrafodelt tulevad pinge- ja voolusisendid viia esmalt analoogkujult digitaalseks ehk diskreetida. Andmete diskreetimiseks on kasutusel analoog-digitaal konverter ehk A/D konverter. Sisendandmete diskreetimise võib jagada kaheks: sãmplimine ja kvantimine [6]. Sãmplimine toimub abstsiststelje muutujaga (nimetatakse ka domeeniks, sõltumatuks muutujaks või siis x-teljeks) ja kvantimine ordinaattelje muutujaga (nimetatakse ka diapsooniks, sõltuvaks muutujaks või siis y-teljeks). Näiteks ajas muutuva pingsignaali diskreetimisel on sõltumatu muutuja aeg ja sõltuv muutuja pinge. A/D konverteri parameetrid tulenevad kahest diskreetimise protsessist. Diskreetimissagedus (seotud abstsiststelje muutujaga) määrab ära diskreetimise tulemusena saadavate andmete mõõtetiheduse ehk diskreetimissammu [7]. Bitimäär (ing. k. *bit rate*) määrab ära ordinaattelje muutuja võimalike väärtuste hulga.

Signaali diskreetimine viib sisendsignaali abstsissi analoogväärtused A/D konverteri väljundis diskreetseks. Sisuliselt määratakse ära, millistel ajahetkedel signaali kvanditakse.

Diskreetimissageduse valikul tuleb lähtuda eelkõige sisendsignaali ribalaiusest (ing. k. *bandwidth*). Seose analoogsignaali ribalaiuse ja minimaalse diskreetimissageduse vahel defineerib Nyquist-Shannoni teoreem. Minimaalsel diskreetimissagedusel ei esine diskreetimisel infokadu. Sagedusega  $B$  ( $B$  – Nyquisti sagedus) piiratud analoogsignaali saab täielikult diskreetida (see tähendab ilma infokaota) kasutades diskreetimissagedust üle  $2*B$  Hz [6]. Näiteks sisendsignaali diskreetimiseks, mis sisaldab ainult 50 Hz komponenti, piisab diskreetimissagedusest üle 100 sãmplit sekundis.

Signaali kvantimine (ing. k. *quantization*) on seotud A/D konverteri bitimãrraga. Signaali kvantimine viib sisendsignaali ordinaadi analoogvãrtused vãljundis diskreetssele kujule ehk kahendkoodi ning see sisaldab endas kolme operatsiooni. Esimeses etapis võetakse sisendist ordinaadi vãrtus ning hoitakse seda teatav periood. Etapp on vajalik kuna signaali kvantimine võtab teatava aja, mille jooksul peab kvanditav signaal olema konstantne. Teises etapis viiakse esimeses etapist saadud signaal binaarsele kujule. Üldiselt on kogu mõõdetav diapsoon jaotatud osadeks A/D konverteri bitimãra alusel, mille igale osale vastab unikaalne binaarkood. Näiteks 8 bitise A/D konverteri mõõdetav diapsoon on jaotatud  $2^8$  ehk 256 osaks. Üldiselt vastab madalaim jãrk mõõtediapsoonist vãikseimale binaarkoodile ning suurim jãrk mõõtediapsoonist vastab kõrgeimale binaarkoodile. Kui signaal võib olla nii positiivne kui ka negatiivne, siis on enamasti arvutustehnika seisukohalt mõttekam kasutada kodeeringut kus suurima kaaluga bitt (ing. k. *most significant bit*) tähistab signaali mãrki. Sellisel juhul viiakse kirjeldatud protsess lãbi kvantimise kolmandas etapis. Protsessi on kujutatud joonisel 1.3. [6]



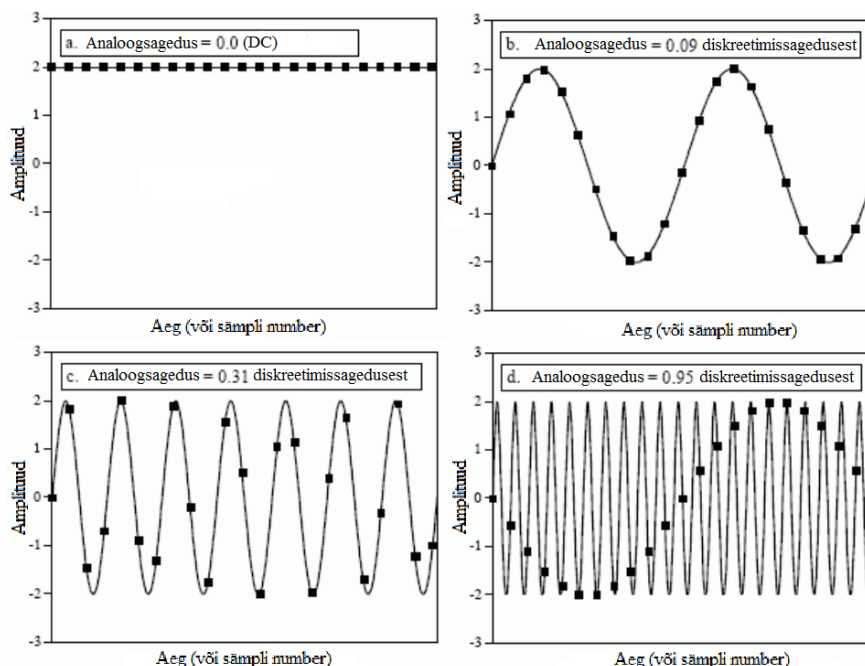
**Joonis 2.3. Signaali kvantimine [6]**

Signaali diskreetimisel tekivad nii sãmplimise kui ka kvantimise tõttu vead. Sãmplimisel on tãhtis hoida diskreetimissagedus võimalikult konstantne. Joonisel 1.1 nãidatud A/D konverter saab oma ajasisendi seadme kohalikult kellalt, mida omakorda hoitakse tãpsena GPS kella abil. Faasimõõteseadmetel on A/D konverteri ajasisendi tãpsus eriti tãhtis, kuna faasinurk sõltub

otseselt signaali mõõtmise ajahetkest. Näiteks kui seadme kohaliku kella ja UTC aja vahel esineb nihe 32  $\mu$ s, siis 50 Hz süsteemis tekib faasinurga viga  $0,58^\circ$ , millele vastav TVE on 1,01%. Standardi [4] järgi on selline viga juba lubatud piiridest väljas.

Signaali kvantimisel ei vasta üldiselt kvanditud väljundsignaal analoogkujul sisendsignaalile. Viga tuleneb analoogsignaali kujutamisest diskreetse signaaliga [6]. Kvanditud signaal saab oma väärtuse võtta lõpliku arvu olekute vahel, mille hulk on ära määratud A/D konverteri bitimääraga. Kvanditav analoogsignaali saab aga võtta väärtuse lõpmatust hulgast olekutest. Seetõttu kvantimisel ümardatakse analoogsignaali ühele diskreetsele tasemele. Tekkiva vea maksimaalne suurus on ära määratud bitimääraga. Näiteks 8 bitine A/D konverter võimaldab anda signaalile 4096 olekut. Kui analoogsignaali ümardatakse lähima olekuni, siis on suurim võimalik viga 0,012 %.

Sisendsignaali spektris Nyquisti sagedusest kõrgemate komponentide esinemisel hakkavad Nyquisti sagedusest kõrgemad sagedused signaali diskreetimisel esinema kui madalamad sagedused [6]. Kirjeldatud nähtus on diskreetsignaali spektrite kattumine (ing. k. *aliasing*). Joonisel 1.4 on kujutatud erinevate sagedustega analoogsignaali diskreetimine sama diskreetimissagedusega, et mõista paremini signaali spektri kattumise probleemi olemust.



**Joonis 2.4. Spektri kattumise probleemi olemuse illustatsioon [7]**

Joonisel 1.4 osas a, b ja c on diskreetimissagedus piisav analoogsignaali diskreetimiseks, osas d aga ei ole. Osa d diskreetitud signaali sagedus on väiksem, kui tegeliku analoogsignaali

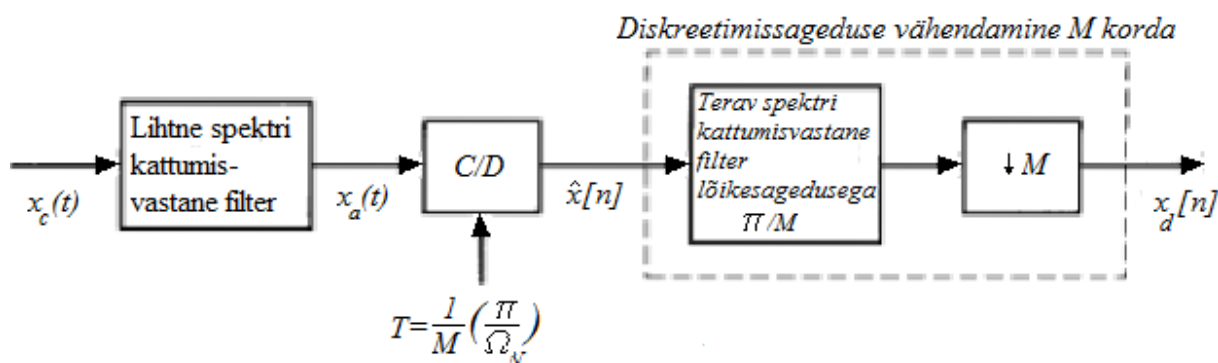


sagedus, ehk kõrgema sagedusega komponent esineb diskreetitud signaalis madalama sagedusega komponendina. [7]

Signaali spektri kattumise probleemi on võimalik lahendada kahel viisil. Esimene lahendus oleks valida diskreetimissagedus sisendsignaali spektriga võrreldes piisavalt kõrge. Praktikas on see lahendus aga ebaotstarbekas, kuna sisendsignaali spektris on üldiselt infot kandva signaali sagedusriba väike signaali kogu spektriga võrreldes. Terve spektri katmiseks oleks seega vajalik kõrge diskreetimissagedus. Diskreetimisest saadav andmehulk oleks seetõttu suur ning signaalitöötamiseks vajalik arvutusvõimsus oleks samuti suur. Samas sisaldaksid andmed enamasti müra [6]. Praktikas kasutatav lahendus on signaali spektrist välja filtreerida ebahuvitavad ehk müra sisaldavad kõrgemad sagedused. Esmane filtreerimine tuleks teha analoogsignaaliga ehk enne signaali diskreetimist. Kirjeldatud filtrit nimetatakse spektri kattumise vastaseks filtriks (ing. k. *anti-aliasing filter*).

Spektri kattumise vastase analoogfiltri valikul tuleb arvestada teatavate analoogfiltrite puudustega. Ideaalse filtri sageduskajas (ing. k. *frequency response*) on pääsuriba (ing. k. *pass-band*) ja tõkkeriba (ing. k. *stop-band*) vahel hüppeline üleminek, reaalses analoogfiltrites on nende vahel alati teatava pikkusega üleminekutsoon [6]. Spektri kattumise vastase filtri lõikesagedus peaks seega eelnevast tulenevalt paiknema mõningal määral allpool Nyquisti sagedust, et vältida üleminekutsooni kattumist Nyquisti sagedusest kõrgemate sagedustega. Ideaalse filtri hüppekajas (ing. k. *step response*) ei esine filtri väljundis sisendile reageerimisel viivitust, samuti ei esine ka sageduskajas üleviset (ing. k. *overshoot*). Reaalses analoogfiltrites aga võib teatavate filtri parameetrite korral esineda nii viivitus kui ka ülevise. Eelnevast tuleneb, et kasutatav spektri kattumise vastane analoogfilter peab täitma suhteliselt kõrgeid nõudmisi. Kirjeldatud nõudmistele vastava filtri koostamine on praktikas aga kallis.

Üks viis analoogfiltri puudustest üle saamiseks on kasutada esmalt kõrgendatud diskreetimissagedusega A/D konverterit, mis võimaldab spektri kattumise vastases filtris kasutada kõrgemat lõikesagedust. Seejärel võib filtreerida diskreetitud andmeid digitaalse filtriga ning vähendada diskreetimissagedust soovitud määran. Kirjeldatud protsessi on kujutatud joonisel 1.5 [6].



**Joonis 2.5. Kõrgendatud diskreetimissageduse kasutamine A/D konverteris [6]**

Kõrgendatud diskreetimissageduse kasutamine A/D konverteris võimaldab kasutada lihtsamat spektri kattumise vastast analoogfiltrit ning teha põhiline filtreerimine digitaalfiltriga (joonis 1.5). Kuna digitaalfiltrid on odavamad võrreldes analoogfiltritega, siis kõrgendatud diskreetimissageduse kasutamine on odavam võrreldes ainult analoogfiltri kasutamisega.

### 2.2.2 Ajaallikas

Faasimõõtmiste jaoks on vajalik täpne ajasisend. Ajasisendiks kasutatakse üldiselt GPS (ing. k. *Global Positioning System*) aega ehk UTC põhise maailmaaega. Jooniselt 1.1 võib näha, et faasimõõteseadmetes on ajasisend kahes kohas: A/D konverteris ja estimaatoris. Eespool mainiti, et A/D konverter vajab diskreetimissageduse täpsena hoidmiseks välist ajaallikat. A/D konverteri otsene ajasisend on seadme kohalik kell, mis annab vajaliku sagedusega impulsse A/D konverterisse. Samuti vajab estimaatori plokk mõõtmistele ajamärgise andmiseks ajasisendit.

GPS on USA kaitseministeeriumi poolt loodud ja hallatav globaalne positsioneerimise süsteem. Süsteem on loodud eelkõige geograafilise asukoha positsioneerimiseks. Geograafiline positsioneerimine kasutab aga täpset aega, mistõttu aja täpsuse suhtes kriitilised süsteemid saavad GPS ajasignaali ära kasutada. GPS koosneb 24 – 32 ümber maakera orbiidil olevast satelliidist, aja täpsuse määramiseks on vajalik vastuvõtja poolt vähemalt 4 satelliidi samaaegne nähtavus [3]. GPS satelliidid edastavad signaale kahel sagedusel:  $L1 = 1575,42$  MHz ja  $L2 = 1227,6$  MHz [3]. Edastatakse kolme pseudo-juhusliku müra koodi (ing. k. *pseudo-random noise code*), mis on järgnevas loetelus toodud.

- C/A kood
- P kood
- Y kood

Signaali vastuvõtja peab koodi dekrüpteerimiseks teadma iga satelliidi võtit. Esimene, C/A kood, on mõeldud tsiviilkasutuseks, ehk pseudo-juhusliku müra koodi võti on avalik. C/A kood kasutab signaali edastamiseks L1 sagedust. Teine, P kood, on saadaval nii L1 kui ka L2 sagedusel. P kood on peamine kasutatav kood navigeerimiseks. Juhul kui on kahtlus P koodi segamisele kasutatakse Y koodi. Tegemist on krüpteeritud koodiga, mille võti ei ole avalik, kood on mõeldud USA sõjaväe poolt militaarseks kasutamiseks. Y koodi edastatakse ainult L2 sagedusel.

GPS signaal on suhteliselt nõrga võimsusega, mistõttu ei ole võimalik signaali otseselt siseruumides kasutada. Lahenduseks on kasutada siseruumides GPS kella, mis saab aja väljaspool ruume asuvat GPS vastuvõtja antennilt ning omakorda jagab siseruumides ajasignaali [3].

Põhiline kasutatav GPS kella standard ajasignaali jagamiseks on IRIG. IRIG abil on võimalik ajasignaali edastada kuues erinevas formaadis (tabel 1.2).

**Tabel 2.2. IRIG formaadi karakteristikud [8]**

Formaat	Formaat A	Formaat B	Formaat D	Formaat E	Formaat G	Formaat H
<b>Biti sagedus (ing. k. bit rate)</b>	1000 pps	100 pps	1 ppm	10 pps	10 000 pps	1 pps
<b>Sõnumi sagedus (ing. k. frame rate)</b>	10 sõnumit/s	1 sõnum/s	1 sõnum/h	6 sõnumit /min	100 sõnumit/s	1 sõnum /min

IRIG formaadid erinevad üksteisest ajakoodi edastamise kiiruse (biti sagedus) ja sellest tulenevalt ka sõnumi pikkuse poolest. Alajaamades kasutatakse üldiselt IRIG-B formaati. IRIG koodid erinevad üksteisest lisaks formaadile ka veel modulatsiooni, alussignaali sageduse ja signaali lisatava info poolest. IRIG formaadi definitsioonis esimene number peale tähist on modulatsiooni tähis ning selle sisu on järgmine.

- 0 on pulsilaiusmodulatsiooni
- 1 on amplituudmodulatsioon
- 2 on Manchesteri modulatsioon

IRIG formaadi definitsioonis teine number peale tähist tähistab alussignaali (ing. k. *carrier frequency*) sagedust, ning selle sisu on järgmine.

- 0 on alussignaali sagedusega 0 Hz
- 1 on alussignaali sagedusega 100 Hz

- 2 on alussignaali sagedusega 1 kHz
- 3 on alussignaali sagedusega 10 kHz
- 4 on alussignaali sagedusega 100 kHz
- 5 on alussignaali sagedusega 1 MHz

Kolmas number formaadi definitsioonis tähistab on mõeldud tähistamiseks kas edastatavas sõnumis on peale ajakoodi (BCD) veel kontrollfunktsioone (CF) või sisaldab IRIG koodi mõõdunuid sekundeid päeva algusest (SBS). Kolmas number sisu formaadi definitsioonis on järgnev.

- 0, kood sisaldab BCD, CF ja SBS
- 1, kood sisaldab BCD ja CF
- 2, kood sisaldab BCD
- 3, kood sisaldab BCD ja SBS

IRIG-B002 näiteks on bitisagedusega 100 Hz, sõnum on pulsilaiusmodulatsiooniga, alussignaali on alalissignaali ja kood sisaldab ainult BCD, ehk ainult ajamärgist.

### 2.3 Sünkrofaasori estimateerimine

Andmete diskreetimise järel koostatakse signaalitöötluse ploki faasimõõtmiste estimateerimine. Faasimõõtmiste koostamiseks on vajalik info faasori amplituudi, faasinurga ja sageduse kohta. Faasimõõtmised koostatakse põhiharmoniku põhjal, seega on vajalik välja filtreerida sisendist ülejäänud sagedused ja hinnata eespool toodud parameetreid põhiharmoniku kohta. Parameetrite hindamiseks on kirjanduses välja pakutud mitmeid meetodeid. Faasimõõteseadmete tootjad ei ole faasimõõtmiste estimateerimiseks kasutatud meetodeid enamasti avaldanud. Allika [9] andmeil ei ole samas tegelikult kasutatavate algoritmide hulk suur. Tüüpiliselt kasutatakse faasimõõteseadmetes diskreetsel Fourier' teisendusel (DFT) põhinevaid algoritme ning standardi C37.118.1-2011 lisas C kirjeldatud demodulatsioonil põhinevat algoritmi [9]. Kirjanduses on välja pakutud ka näiteks funktsiooni sobitamisel [3] (ing. k. *curve fitting*) ja Kalmani filtril põhinevat lahendust [9]. Käesolevas alapeatükis on lühidalt kirjeldatud diskreetse Fourier' teisenduse olemust, erinevaid algoritme DFT realiseerimiseks ning on toodud puudused DFT rakendamisel. Lisaks on lühidalt toodud ka mõningaid teisi meetodeid faasimõõtmiste parameetrite hindamiseks.

Diskreetne Fourier' teisendus seisneb diskreetsete andmete teisendamises ajadomeenist sagedusdomeeni, mille järel on võimalik hinnata erinevat järku sageduste amplituudi ja

faasinurka. See on ainus praktikas rakendatav meetod Fourier' teisenduste perekonnas, sest see tegeleb diskreetsete ja lõpliku pikkusega signaalidega ning on seetõttu võimalik arvutustehnika abil rakendada. Diskreetne Fourier' teisendus on defineeritud valemiga 1.5 [6].

$$X[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi kn/N} \quad (1.5)$$

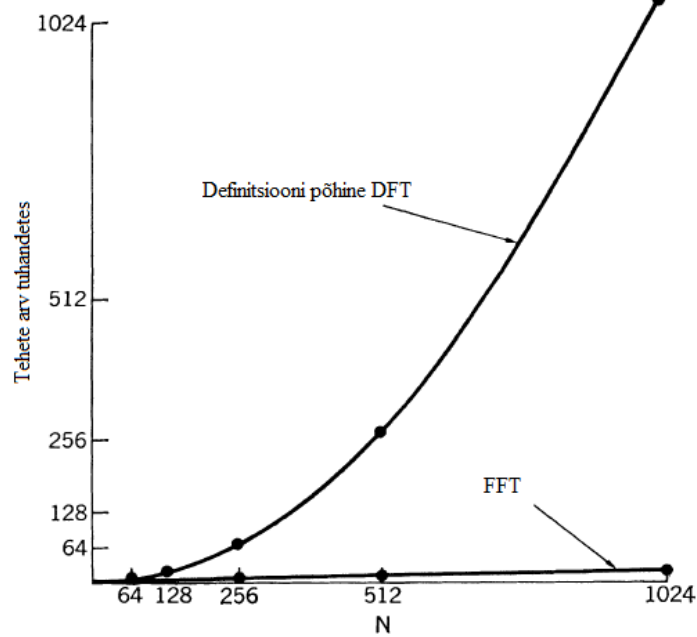
$X[k]$  on diskreetne Fourier' teisendus funktsioonist  $x[n]$ ,  $N$  sãmplite arv andmeaknas ja  $k$  on DFT järk (ing. k. *DFT bin*).

DFT rakendamine toob tulemuseks sageduskarakteristiku, mis on ära määratud järkudena 0-st kuni  $\frac{N}{2} - 1$ -ni ning nende peegeldusena 0 järgu suhtes negatiivsesse spektrisse. Sagedusspektri järkude sageduste väärtuste määramiseks on vaja teada diskreetimissagedust  $f_s$ . Üksiku järgu sagedus kohal  $n$  on diskreetimissageduse  $f_s$  ja sãmplite arvuga ühes andmeaknas  $N$  ära määratud valemiga 1.6.

$$f_1 = \frac{nf_s}{N}, n = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} - 2, \frac{N}{2} - 1 \quad (1.6)$$

DFT sagedusspekter sõltub sãmplite arvust  $N$  ühes andmeaknas. DFT järkude arv suureneb sãmplite arvu kasvuga sisendis. Sãmplite arvu saab suurendada kahel viisil. Üks viis on suurendada diskreetimissagedust, samuti on võimalik suurendada andmeakna laiust. Diskreetimissageduse suurenemisel laieneb sagedusspekter, sest DFT suudab haarata kõrgemaid järke sagedusi. Andmeakna laiendamisel väheneb järkude vaheline vahe. Sisuliselt tähendab diskreetimissageduse tõstmine, et suudetakse haarata kõrgemaid harmoonikuid sisendis, andmeakna laiendamine võimaldab esimese harmooniku järgu sagedust vähendada.

Peamiselt kasutatakse diskreetse Fourier' teisenduse arvutamiseks kiiret Fourier' teisendust (FFT) [6]. FFT algoritmid hakkas laialdaselt levima pärast 1965-ndat aastat, kui J. W. Cooley ja J. W. Tukey avaldasid artikli, milles on kirjeldatud FFT algoritmi ja selle rakendust arvutustehnika abil [8]. FFT eelis definitsiooni põhise DFT algoritmi (valem 1.5) ees on kiirus. Definitsiooni põhise DFT arvutustehete hulk on proportsionaalne  $N^2$ -ga ( $O(N^2)$ ) [6]. FFT arvutustehete hulk on seevastu proportsionaalne  $N \log_2 N$ -ga ( $O(N \log_2 N)$ ) [5]. FFT algoritm kasutab seega tulemuseni jõudmiseks vähem arvutustehteid, mis saavutatakse korduvate arvutustehete hulga vähendamises. FFT eelis definitsiooni põhise DFT ees kiiruses esineb eelkõige suurema sãmplite hulga  $N$  korral. Selle illustatsiooniks on FFT ja definitsiooni põhise DFT arvutustehete võrdlus joonisel 1.6.



**Joonis 2.6. Definitsiooni põhise DFT ja FFT arvutustehete võrdlus [11]**

FFT algoritmid vajavad tööks samplite hulka, mis oleks kahe aste (nt. 256, 512 ja 1024). See omadus võib tekitada probleeme FFT arvutamisel, samas on ka selle piirangu kõrvaldamiseks töötatud välja mõningaid meetmeid [11].

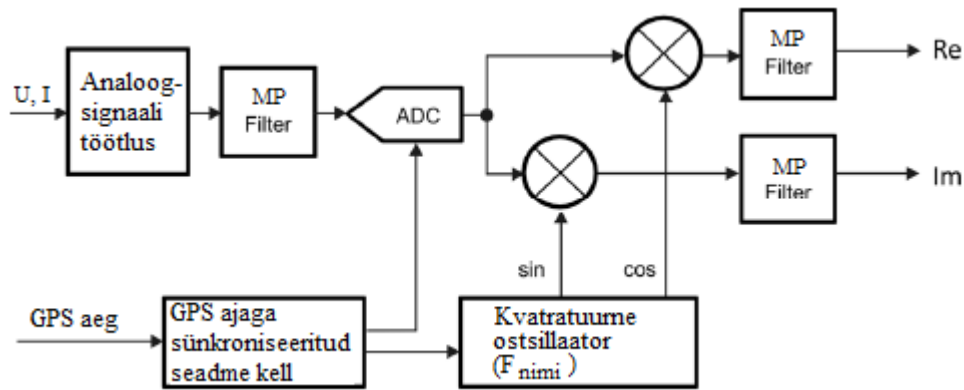
DFT täpsus on peamiselt mõjutatud kahest probleemist: signaali spektri kattumisest ja spektri puistenähtusest (ing. k. *spectral leakage*) [11]. Spektri kattumine on tingitud liiga väikesest diskreetimissagedusest, mistõttu Nyquisti sagedusest kõrgemad sagedusega harmoonikud mõjutavad nimetatud piirist allpool olevaid sagedusi. Sisuliselt on tegemist andmete diskreetimisel esineva probleemiga ning täpsemalt on nimetatud probleemi ja selle lahendusi kirjeldatud peatükis 1.2. Spektri puistenähtus tekib, kui signaalis sisalduv sagedus ei mahu täisperioodi arvu kordselt andmeaknasse ära [12]. Nähtust võib vaadelda ka kui andmeakna piiridel esineva signaali katkevusega. Spektri puiste tekib kuna DFT järgud on kindlad sagedused, mis on ära määratud samplite arvuga. Sisendsignaalis aga võib esineda ka sagedusi, mis ei lange kokku DFT järkudega. Sellisel juhul need sagedused hakkavad mõjutama ülejäänud järke. Mõju on tugevam puistenähtust tekitava sagedusele lähemates ning nõrgem kaugemates järkudes [12].

Spektri puistenähtuse mõju vähendamiseks kasutatakse aknafunktsioone (ing. k. *window function*) [12]. DFT kasutamiseks on vajalik valida kindel samplite hulk, ehk ära määrata andmeaken. Aknafunktsioonide abil on võimalik anda andmeaknas olevatele samplitele erinev kaal. Aknafunktsiooni  $w[n]$  kasutamise saab valem 1.5 järgmise kuju (valem 1.7) [6].

$$X[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} w[n]x[n]e^{-j2\pi kn/N} \quad (1.7)$$

DFT kasutamine on lihtsaim ning seetõttu ka üks laiemalt levinud viis sünkrofaasori hindamiseks [3]. DFT kasutamisel sünkrofaasori hindamiseks tuleb aga arvestada tema ebatäpsusega olukordades, kui hinnatavad parameetrid (faasori amplituud, faasinurk) muutuvad ühe DFT andmeakna vältel ning põhiharmooniku sagedus hälbib nimisagedusest. Seejuures oleneb DFT täpsus dünaamilistes olukordades suuresti andmeakna pikkuse valikust. Lühem andmeaken on efektiivsem faasori järskudel muutustel (dünaamilistes olukordades). Pikem andmeaken on efektiivsem staatilistes olukordades.

Teine laialdast kasutust leidnud sünkrofaasori estimateerimise algoritm on demodulatsioonil põhinev. Demodulatsioonil põhinevat estimateerimise algoritmi on kirjeldatud standardi IEEE C37.118.1-2011 lisas C toodud referentsmudelil [4]. Demodulatsioonil põhineva algoritmi põhimõtteskeem koos signaali diskreetmise plokiga on joonisel 1.7.



**Joonis 2.7. IEEE C37.118.1-2011 referentsmudel sünkrofaasori estimateerimiseks [4]**

Signaal esmalt diskreetitakse A/D konverteris (joonisel 1.7 tähistatud ADC). Algoritm eeldab konstantset diskreetimissagedust, seega on vajalik A/D konverteri diskreetimissageduse konstantsust, mis saavutatakse GPS ajaga sünkroniseeritud seadme kellaga. Diskreetitud signaal korrutatakse nimisagedusega signaaliga ehk demoduleeritakse. Nimisagedusega signaali kandja saadakse kvadratuurse ostsillaatori abil. Signaal viimaks filtreeritakse madalpääsu filtri abil ning tulemuseks on sünkrofaasori estimaat. Matemaatiliselt on algoritm kirjeldatav valemiga 1.8.

$$X[i] = \frac{\sqrt{2}}{\sum_{k=-N/2}^{N/2} W[k]} \sum_{k=-N/2}^{N/2} x[i+k]W[k] \exp(-j(i+k)\Delta t\omega_0) \quad (1.8)$$

Valemis 1.8 on  $\omega_0$  põhiharmooniku nurksagedus,  $N$  on filtri järk,  $\Delta t$  on diskreetimisintervall,  $W[k]$  on filtri koefitsient kohal  $k$  ja  $x[i+k]$  on diskreetitud signaali väärtus kohal  $i+k$ . [4]

Standardi C37.118.1 lisas C on toodud referentsmudel nii P kui ka M klassi faasimõõteseadmetele. Mõlema klassi mudelid kasutavad eespool toodud põhimõtet signaali estimateerimiseks. Kahe klassi algoritmi vahe seisneb signaali filtreerimises. Filtri valikust tuleneb ka algoritmi andmeakna pikkus. Täpsemalt on referentsmudeli filtreid käsitletud peatükis 1.4.

Otsesel mudeli lähendamise algoritmid (ing. k. *direct model matching*) põhinevad sünkrofaasori hindamisel otseselt ajadomeenis. Sisuliselt kasutatakse erinevaid funktsiooni lähendamise (ing. k. *curve-fitting*) algoritme [3]. Funktsiooni lähendamisel otsitakse parameetreid, mille alusel koostatud sünkrofaasor kirjeldaks kõige täpsemalt sisendsignaali. Levinud meetod parameetrite sobivuse hindamiseks on vähimruutude meetod [3].

Kõik eelnevalt kirjeldatud algoritmid eeldavad, et sisendsignaal püsib mõõteandmete töötluse vältel konstantne. Standard [4] defineerib sünkrofaasorit kui konstantset suurust andmeakna vältel. Nende suuruste taga olevad tegelikud mõõdetud signaalid ei pruugi aga seda olla ning seetõttu on kirjanduses sünkrofaasori mõistet laiendatud ka juhtudele kui otsitavad parameetrid muutuvad andmeakna vältel. Lahendusena on välja pakutud sünkrofaasori mooduli ja faasinurga lähendamist ühes andmeaknas Tayloriga abil [3]. Kirjeldatud lähenemine sünkrofaasorile peaks võimaldama paremini mõõta dünaamilisi olukordi. Tegemist ei ole siiski standardis [4] toodud definitsiooniga ning ilmselt ei ole seetõttu suuremat kasutust leidnud reaalses faasimõõteseadmetes.

Sageduse leidmiseks kasutatakse enamasti valemit 1.3. Valemist 1.3 tuleneb, et sageduse hälve nimisagedusest on faasinurga esimene tuletis aja järgi. See tähendab, et sagedust saab leida kasutades faasinurga muutust ajas. Näitena sageduse estimateerimisest on toodud valem 1.9 [3].

$$f(nT_s) \approx \frac{1}{4\pi T_s} \varphi((n+1)T_s) - \varphi((n-1)T_s) \quad (1.9)$$

Valemis 1.9 on  $n$  sageduse estimateerimise punkt,  $T_s$  on ajaintervall kahe sageduse estimateeritud väärtuse vahel ja  $\varphi$  faasinurk. Valemis 1.9 tulemuseks on sageduse hälve nimisagedusest, seega tegeliku sageduse saamiseks tuleb tulemusele juurde liita põhiharmooniku sagedus.

Sageduse muutuse kiirus on standardis [4] defineeritud valemiga 1.4. Sageduse muutuse kiirus ROCOF on definitsiooni järgi sageduse esimene tuletis aja järgi. Teades sünkrofaasori nurka



saab sarnaselt sagedusele seega sageduse muutuse kiirust leida otseselt definitsiooni kaudu. Näide sageduse muutuse estimateerimisest on valem 1.10 [3].

$$ROCOF(nT_s) \approx \frac{1}{2\pi T_s^2} \varphi((n+1)T_s) - 2\varphi(nT_s) + \varphi((n-1)T_s) \quad (1.10)$$

## 2.4 Filtrid

Faasimõõtmiste kvaliteedi tagamises on suur osa signaali filtreerimisel. Sisendsignaali teisendamisel analoogkujult digitaalkujule on vajalik spektri kattumise vältimiseks signaal filtreerida madalpääsufiltriga. Tegemist on sisendandmete diskreetimisel esineva probleemiga ning lähemalt on seda kirjeldatud alapeatükis 1.2. Mõõtmiste täpseks sooritamiseks aga ainult A/D konverteris aset leidva filtreerimisest ei piisa. Sünkrofaasor kirjeldab põhiharmooniku parameetreid, seega tulemuse täpsuse tagamiseks võib olla nõutav põhiharmoonikust erinevate sageduste välja filtreerimine. Filtrite valik on aga alati seotud kompromissiga. Parandades filtri abil tulemust ühe kriteeriumi järgi, moonutatakse samas tulemust mõne teise kriteeriumi järgi [6]. Järgnevas alapeatükis on kirjeldatud erinevaid filtrite tüüpe ning nende häid ja halbu külgi. Samuti on kirjeldatud standardi IEEE C37.118.1-2011 lisas C esitatud filtreid.

Filtreid iseloomustatakse järgmiste karakteristikute alusel.

- impulsskaja (ing. k. *impulse response*)
- hüppekaja (ing. k. *step response*)
- sageduskaja (ing. k. *frequency response*)

Kolm karakteristikut on omavahel seotud, ehk teades neist ühte võib ülejäänud kaks leida tema alusel [7]. Hüppekaja on impulsskaja integraal aja järgi. Sageduskaja on impulsskaja Fourier' teisendus. Impulsskaja ja hüppekaja kirjeldavad filtri käitumist ajadomeenis, sageduskaja kirjeldab filtri käitumist sagedusdomeenis. Filtri karakteristikuid saab analüüsida erinevate parameetrite alusel. Hüppekajas vaadatakse hüppe kiirust, üldiselt on soovitud filtri kiire reageering sisendi hüppele. Jälgitakse ka filtri üleviset (ing. k. *overshoot*). Ülevise on filtrites mittesoovitud parameeter ning headel filtritel esineb üleviset vähem. Kolmas parameeter hüppekaja iseloomustamiseks on hüppe lineaarsus või sümmeetrilisus. Parameetriga jälgitakse, kas filtri hüppekaja on sümmeetriline oma algus ja lõpufaasis. Lineaarse hüppekajaga filtreid peetakse paremaks. Sageduskaja puhul jälgitakse, et üleminekuriba (ing. k. *transition band*) filtri pääsuuala (ing. k. *passband*) ja keeluriba (ing. k. *stop band*) vahel oleks võimalikult väike. Pääsuribas peaks filtril olema võimalikult väike pulsatsioon (ing. k. *ripple*), ehk sisuliselt peaks

filter pääsuribas kohtlema kõiki sagedusi sarnaselt. Kolmas parameeter on filtri keeluriba summutus. Keeluribas peaks filter sagedusi summutama võimalikult palju. Lisaks eespool mainitud parameetritele võib olla vaja jälgida ka filtri faasinurga moonutust ning filtri toimeaega. [6] [7] [13]

Filtreid ei ole võimalik koostada heade parameetritega nii aja- kui ka sagedusdomeenis ning seetõttu tuleb teha kompromiss filtrite disainis [7]. Filtri head parameetrid ajadomeenis annavad soovitud tulemuse dünaamilistes olukordades, aga ei pruugi vajalike sagedusi välja filtreerida staatilistes olukordades. Hea sageduskajaga filter võib seevastu küll filtreerida mittesoovitud sagedused välja, aga ta ka moonutab mõõtmisi dünaamilistes olukordades.

Filtrite ehituse alusel saab neid mitmeti rühmitada. Üheks rühmituseks on analoog- ja digitaalfiltrid. Analoog- ja digitaalfiltrite vahel esineb ehituses põhimõtteline erinevus. Analoogfiltrid on füüsilised filtrid ning on koostatud erinevatest elektroonika komponentidest. Digitaalfiltrid on seevastu tarkvaralised filtrid. Filtreeritavad signaalid on analoogfiltrite puhul pidevad ehk analoogsignaaliid, digitaalfiltrite puhul peavad signaalid olema diskreetsed. Eespool toodud filtrite karakteristikute alusel hinnates on üldiselt digitaalfiltrid paremate parameetritega kui analoogfiltrid [13]. Digitaalfiltrid on ka odavamad ning töökindlamad võrreldes analoogfiltritega, kuna nende realiseerimiseks ei ole vajalik filter valmis ehitada füüsilistest komponentidest. Analoogfiltrid on digitaalfiltritest paremad ainult kiiruses [7]. Pidevate signaalide töötlemise korral peab kasutama analoogfiltreid. Signaalitöötlemise valdkonnas on tänu oma omaduste eelistatud siiski digitaalfiltrid.

Digitaalfiltreid jagatakse mitterekursiivseteks ehk FIR filtriteks ja rekursiivseteks ehk IIR filtriteks [13]. Erinevus nende kahe vahel seisneb selles, et mitterekursiivsed on tagasisideta ning rekursiivsed on tagasisidega filtrid.

Mitterekursiivne ehk FIR filtri rakendatakse kasutades filtri impulsskaja konvolutsiooni filtreeritava signaaliga. Filtri impulsskaja nimetatakse ka filtri kerneliks, kuna teda kasutatakse filtri rakendamises. Matemaatiliselt näeb operatsioon välja järgmine (valem 1.11) [13].

$$y_n = \sum_{k=-N}^N c_k u_{n-k} \quad (1.11)$$

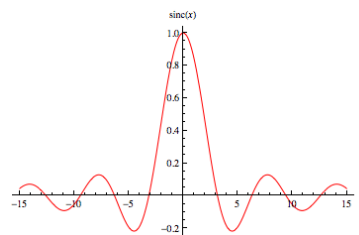
Valemis 1.11 on  $y_n$  filtreeritud signaal kohal  $n$ ,  $N$  pool filtri impulsskaja sãmplite arvust,  $c$  filtri impulsskaja ning  $u$  filtreeritav signaal.

Üks lihtsamaid FIR filtreid on liikuv keskmine (ing. k. *moving average filter*). Liikuva keskmisega filter sisuliselt võtab aritmeetilise keskmise teatava suurusega andmeaknast. Filter on lihtne koostada ning ta on kiire, kuna ei nõua rakendamisel palju arvutustehteid. Filtri saab, kui valemis 1.11 anda filtri koefitsientidele võrdsed väärtused, määratuna valemiga 1.12.

$$c = \frac{1}{2N} \quad (1.12)$$

Liikuva keskmise filtri puhul on muudetavateks parameetriteks andmeakna pikkus, mille vältel liikuvat keskmist sooritatakse ning samuti saab muuta andmeakna paigutust filtri keskme suhtes [13]. Liikuva keskmise filter on üks enim kasutatav ja seetõttu ka üpriski heade omadustega filter, mida kasutatakse ajadomeenis sisalduva info filtreerimiseks. Filtri rakendamine võimaldab vähendada juhusliku müra sisendis, säilitades ajadomeenis olevaid signaali trende [7].

Sagedusdomeenis sisalduva info filtreerimiseks FIR filtri abil koostatakse esmalt filtri soovitud sageduskaja. Sageduskaja abil leitakse filtri impulsskaja *Fourier*' pöördteisendusega. Kui filtri sageduskaja on koostatud ideaalsena, ehk üleminekuriba pääsuriba ja keeluriba vahel puudub, siis filtri impulsskaja koosneb funktsioonidest, mis on lõpmatult pika perioodiga. Filtri rakendamisel tekitab see aga probleeme, kuna signaali filtreerimine on võimalik ainult lõpliku pikkusega filtriga. Filtri impulsskajast valitakse seetõttu teatava suurusega oma keskpunkti suhtes sümmeetriline andmeaken. Lõpliku pikkusega filtri kasutamisel ei ole filtri sageduskaja enam ideaalne. Filtri sageduskajasse tekib üleminekuriba ning pääsuribas ja keeluribas esineb pulsatsioon. Probleemi suurust on võimalik vähendada suurendades filtri andmeakna pikkust, mis aga tähendab aeglasemat filtrit. Probleemi saab lahendada kasutades aknafunktsioone. Tehnika vähendab filtri impulsskaja piiridel funktsioonide katkevust ning tulemuseks on väiksem pulsatsioon sageduskajas. Üleminekuriba laiust kirjeldatud tehnika ei vähenda. Kirjeldatud viisil saadud filtrit nimetatakse inglise keeles ka *windowed sinc* filtriks, kuna filtri impulsskaja on *sinc* funktsiooniga kirjeldatav. *Sinc* funktsiooni näidis on joonisel 1.8. [6] [13]



**Joonis 2.8. Sinc funktsiooni näidis**

Aknafunktsioonide eesmärk on vähendada lõpliku pikkusega andmeakende kasutamisel signaali puistet [12]. Oma rakendamise viisilt on aknafunktsioonid sarnased FIR filtritele (ehk viiakse läbi konvolutsioon sisendsignaaliga) ning neid võib vaadelda kui ühte FIR filtrite alaliiki. Aknafunktsioonide kasutamisega väheneb andmeakna piiridel esinev signaali puistenähtust põhjustav funktsioonide katkevuse mõju [13]. Välja on töötatud mitmeid aknafunktsioone. Nimetada võib näiteks *Hamming*, *Blackman*, *Kaiser*, *Hann* nimelisi aknafunktsioone ning kolmnurkse ja ristküliku kujulisi aknafunktsioone [12]. Lihtsaim neist on ristküliku kujuline aknafunktsioon, mis annab andmeakna sees olevatele sãmplitele võrdse kaalu väärtusega 1. Ristküliku kujuline aknafunktsioon ei vähenda filtri pulsatsiooni sageduskajas, kuna sisuliselt ei mõjuta ta filtri impulsskaja. Ülejäänud aknafunktsioonid vähendavad sageduskajas pulsatsiooni, aga nad suurendavad ka filtri üleminekuriba laiust ning muudavad filtri latentsemaks [13]. Aknafunktsioone on lähemalt kirjeldatud näiteks allikas [12].

IIR filtri matemaatiline kuju on valemis 1.13.

$$y_n = \sum_{k=-N}^N c_k u_{n-k} + \sum_{k=0}^M d_k y_{n-k} \quad (1.13)$$

Valemis 1.13 on  $M$  väljundis olevate sãmplite hulk, mis kasutatakse filtri tagasisides ning  $d$  on filtri koefitsiendid tagasiside arvestamises. IIR filtri erinevus FIR ees on eelnevate väljundite arvestamises filtri parameetrite arvutuses ehk tagasiside olemasolus.

Sagedusdomeenis sisalduva info filtreerimiseks on laialdaselt levinud rekursiivsed filtrid nagu *Chebyshev* ja *Butterworth*. Need digitaalsed filtrid on tuletatud samanimelistest analoogfiltritest. Nimetatud filtrite eelis mitterekursiivsete filtrite ees on kitsam üleminekuriba pääsu- ja keeluriba vahel ning väiksem latentsus. *Chebyshev*'i filter on võrreldes *Butterworth*'i filtriga kitsama üleminekuribaga, kuid seevastu esineb tema sageduskajas rohkem üleviset ja pulsatsiooni. *Chebyshev*'i filtreid jagatakse tüüp I-ks ja tüüp II-ks. Tüüp I filtril esineb pulsatsioon pääsuribas, tüüp II filtril esineb pulsatsioon keeluribas. Nii *Chebyshev*'i kui ka *Butterworth*'i filtri puhul tuleb arvestada filtri faasinihke sõltuvust sagedusest. [13]

Järgnevalt on kirjeldatud standardis C37.118.1-2011 lisa C kirjeldatud referentsmudeli filtreid. Nimetatud standardis on referentsmudel jagatud kaheks: P klassi mudel ja M klassi mudel. Kahe mudeli vaheline erinevus seisneb kasutatavas filtris. Referentsmudeli P klassi filter kasutab kahe põhiseduse perioodi pikkust kolmnurkset aknafunktsiooni. Filtri ja seega estimaatori akna pikkus on konstantne erinevate edastamissageduste korral. Kolmnurkse aknafunktsiooni

keskpunkt asub estimaadi ajamärgisega samas kohas, ehk filter on sümmeetriline nullpunkti suhtes. See võimaldab lihtsustada estimaadi ajamärgistamist ja faasinurga vea kompenseerimist. Referentsmudeli M klassi filter on tuletatud eespool kirjeldatud sagedusdomeeni filtrist (*windowed sinc* filter). Aknafunktsioonina kasutatakse referentsmudelis Hamming'u aknafunktsiooni. Filtri pikkus sõltub edastamissagedusest. Seega andmeakna pikkus M klassi referentsmudelis on sõltuv edastamissagedusest, olles pikem madalamatel edastamissagedustel. M klassi filter filtreerib välja edastamissageduse Nyquisti sagedusest kõrgemaid sagedusi. P klassi filter ei suuda seda kõikide sageduste korral tagada. M klassi filter on seetõttu ka mõnevõrra pikema latentsusega. [4] [14]

## 3 Faasimõõteseadmete katsetamine

### 3.1 Ülevaade faasimõõteseadmete katsetamisest

Kvaliteedi ja võrreldavuse tagamiseks on faasimõõtmistele esitatavad nõuded ülemaailmselt standardiseeritud. Ühtne faasimõõtmiste standard on tingitud faasimõõtmiste iseloomust. Faasimõõteseadmete efekt elektrisüsteemis tuleneb eelkõige nende rakendusest laimõõtmistes, ehk paljude faasimõõteseadmete üheaegsest mõõtmistest elektrisüsteemi erinevates sõlmedes. Neid mõõtmisi kasutatakse elektrisüsteemi seisundi hindamises ning sellele tuginedes võidakse juhtida elektrisüsteemi tööd. Kirjeldatud asjaolu aga tähendab, et seisundi õigeks hindamiseks peavad faasimõõtmised olema täpsed nii elektrisüsteemi normaaltalitluses kui ka avariitalitluses ehk faasimõõteseadmepid peavad säilitama oma täpsuse ka juhul kui mõõdetavad parameetrid muutuvad laiades piirides. Lisaks eelnevale peavad erinevad faasimõõteseadmepid suutma mõõta piisavalt ühesuguselt, et oleks võimalik võrrelda süsteemi erinevatest sõlmedest saadud mõõtmisi.

Standardis IEEE C37.118.1-2011 [4] on defineeritud suurused, mida faasimõõteseadmepid peavad mõõtma ja tingimused, millele mõõdetud suurused peavad vastama. Standardis faasimõõteseadmepile esitatud nõuded on jagatud kaheks: klass P ja klass M. Põhjus kahe klassi jaoks on faasimõõteseadmepite erinevad kasutusala. Klass P faasimõõteseadmepid peaksid olema suunitletud rohkem kaitsele, mistõttu nende mõõtmised peaksid olema kiiremad kui klassil M. Klass M faasimõõteseadmepid on suunitletud rohkem seirele, seetõttu on nende mõõtetäpsuse nõuded karmimad. Iga faasimõõteseadmepi peaks olema võimeline täitma vähemalt ühe klassi nõudeid.

Standardi C37.118.1-2011 järgi hinnatakse faasimõõteseadmepite mõõtetäpsust kolme parameetri järgi. Esimene parameeter on TVE (ing. k. *Total Vector Error*), mis on defineeritud valemiga 2.1 [4]. TVE-ga hinnatakse sünkrofaasori viga.

$$TVE(n) = \sqrt{\frac{(\hat{X}_r(n) - X_r(n))^2 + (\hat{X}_i(n) - X_i(n))^2}{(X_r(n))^2 + (X_i(n))^2}} \quad (2.1)$$

Valemis 2.1 on suurused  $\hat{X}_r(n)$  ja  $\hat{X}_i(n)$  vastavalt faasimõõteseadmepi mõõdetud sünkrofaasori reaali- ja imaginaarosa ajahetkel  $n$ . Suurused  $X_r(n)$  ja  $X_i(n)$  on vastavalt sünkrofaasori reaali- ja imaginaarosa tegelikud väärtused ajahetkel  $n$ . Valemiga 2.1 hinnatakse

mõõdetud ja tegeliku suuruse vahe suhet tegelikusse suurusse. Teine parameeter faasimõõteseadmete täpsuse hindamiseks on sageduse viga (FE ehk ing. k. *frequency error*), mis on defineeritud valemiga 2.2 [4].

$$FE = |f_{tegelik} - f_{mõõdetud}| = |\Delta f_{tegelik} - \Delta f_{mõõdetud}| \quad (2.2)$$

Kolmas parameeter on sageduse muutuse kiiruse viga (RFE ehk ing. k. *ROCOF measurement error*), mis on defineeritud valemiga 2.3 [4].

$$RFE = \left| \left( \frac{df}{dt} \right)_{tegelik} - \left( \frac{df}{dt} \right)_{mõõdetud} \right| \quad (2.3)$$

Lisaks eespool toodud kolmele suurusele on standardis IEEE C37.118.1-2011 defineeritud parameetrid, mis on seotud faasimõõtmiste kiirusega. Mõõtmiste reaktsiooniaeg (ing. k. *response time*) defineeritakse ajana, mis kulub faasimõõtmistel üleminekuks ühest staatilisest olekust teise juhul kui sisendsignaalis esineb hüpe [4]. Kahe staatilise oleku vaheline üleminek arvestatakse ajahetkest, kui faasimõõtmised väljuvad täpsuspiirist, kuni ajahetkeni, millal faasimõõtmised sisenevad uuesti täpsuspiiridesse ja jäävad sinna püsima. Käesolevas töös on reaktsiooniaja määramiseks kasutatud täpsuspiiri 1%. Sisendsignaali hüpe saab standardi IEEE C37.118.1-2011 järgi olla kas amplituudi või faasinurga hüpe. Mõõtmiste hilistusaeg (ing. k. *delay time*) defineeritakse ajavahemikuna hetkest kui sisendsignaalis esineb hüpe kuni hetkeni, millal faasimõõtmised saavutavad poole oma staatilise olukorra väärtusest [4]. Signaali hüpe viiakse läbi ainult parameetriga, mille alusel hilistusaega ka hinnatakse. Mõõtmiste latentsus (ing. k. *reporting latency*) on ajaviide sisendsignaalis esineva sündmuse ja tema esinemise faasimõõtmistes vahel [4].

Standardis IEEE C37.118.1.2011 on kirjeldatud katsed, mille alusel määratakse faasimõõteseadmete vastavust nõutele. Katsed on jagatud staatilisteks ja dünaamilisteks. Staatilised katsed testivad faasimõõteseadmete vastavust nõutele staatilistes olukordades, ehk kui sisendsignaalis ei esine katse vältel muutusi. Dünaamiliste katsetega testitakse faasimõõteseadmete vastavust juhtudele kui sisendsignaalis esineb muutusi. Testid peab läbi viima referentstingimustele vastavana. Referentstingimustele vastavus tähendab testi all mitteolevate sisendsignaali parameetrite väärtuste vastavust nimitingimustele. Samuti peab välise keskkonna temperatuur olema vahemikus 20°C – 26°C ning õhuniiskus alla 90%. Staatiliste testide korral peab testi kestvus olema vähemalt 5 sekundit. [4]

Standardile IEEE C37.118.1-2011 avaldati aastal 2014 lisa IEEE C37.118.1a-2014 [14], mis viis mõningatesse algse standardi nõuetesse sisse muudatused. Algse standardi järgi oli teatavate nõuete täitmine olemasolevate faasimõõtmiste algoritmide järgi raskendatud. Standardi lisaga vähendati problemaatilistele nõuete piirmääre. Lisas L.1 tabelis L.1.1 on toodud sünkrofaasorile esitatud nõuded staatilistes testides ning tabelis L.1.2 on nõuded sageduse ja sageduse muutuse mõõtmistele staatilistes olukordades. Standardi kohaselt on kuus staatilise olukorra testi: põhiharmooniku sageduse hälve nimisuurusest, pinge amplituudi muutus, voolu amplituudi muutus, faasinurga muutus, harmoonikute sisaldus signaalis ja ribavälise (ing. k. *out-of-band*) häiringuga signaal. Dünaamilised testid sisaldavad ribalaiuse, sagedushüppe, amplituudi- ja faasinurga hüppe testi. Ribalaiuse test sisaldab amplituudi- ja faasimodulatsiooni. Nõuded ja testitingimused on kirjeldatud lisas L.2 toodud tabelites. [4] [14]

Soovituslik juhend faasimõõteseadmete testimiseks on IEEE C37.242-2013 [14]. Dokumentis on kirjeldatud protseduure ja tingimusi, mis on vajalikud faasimõõteseadmete sünkroniseerimiseks, kalibreerimiseks, testimiseks ja installeerimiseks. Juhendi väärtus seisneb eelkõige faasimõõteseadmete testimise protseduuri ning kasutatavate testseadmetele esitatavate nõuete kirjeldamises. Testseadme täpsust saab hinnata suurusega TUR (ing. k. *Test Uncertainty Ratio*), mis kirjeldab kui palju peab kalibreerimisel kasutatav referents olema täpsem kalibreeritavast seadmest. TUR on defineeritud kui mõõdetava suuruse lubatava tolerantsi suhe kahekordsesse kalibreerimisprotsessi 95% mõõtemääramatusse. TUR-i kõrgemad väärtused võimaldavad läbi viia täpsemat kalibreerimist. Kalibreerimisprotsessides ja ka PMU-de testimisel on TUR väärtuseks määratud vähemalt neli.

Juhend IEEE C37.242-2013 jaotab faasimõõteseadmete testimiseks kasutatavad seadmed kahte gruppi: spetsiaalselt PMU-de testimise tarbeks loodud testseadmed ning standardsed testseadmed. Spetsiaalselt PMU-de testimise tarbeks loodud testseadmetel peaks tõestatud olema TUR vähemalt 10. Standardsete testseadmetele ei ole esitatud nii karmi TUR-i nõuet, nende on see väärtus vähemalt 4, mis on ka üldlevinud kalibreerimisel kasutatav väärtus. Üldiselt peaks testseadmete kalibreerimise läbi viima selleks tunnustatud labor. Juhendis on siiski välja toodud mõningad protseduurid kalibreerimaks testseadmete faasinurka. Kalibreerimisprotsessiks on vajalik kõrge täpsusega ostilloskoop ning GPS-i ajaallikana kasutatavat 1PPS ajasignaali.

Faasimõõteseadmete testimiseks on maailmas läbi viidud mitmeid uuringuid. Märkimisväärset tööd faasimõõteseadmete testimisel on läbi viidud USA-s NIST-is (*National Institute of*



*Standards and Technology*) [16] [17]. Lisaks NIST-ile on ka paljud teadusasutused viinud läbi uurimusi, mis on keskendunud testitavate PMU-de vastavusele üksikute või osade standardi nõuetest. Välja võib tuua allikad [18] [19] ja [20]. Artiklis [18] on uuritud faasimõõteseadmeha standardi ja dünaamilist vastavust standardile C37.118.1-2011. Artiklites [19] ja [20] on uuritud faasimõõteseadmeha vastavust standardi lisaga [13] kehtestatud nõuetele. Suures osas on NIST-i ja teiste uuringute tulemused sarnased. Staatilistest testidest ei läbi PMU-d eelkõige ribavälise häiringuga testi. See viitab probleemidele PMU filtrites, sest ribavälise häiringu test peaks testimise spektri kattumisevastase filtri korrektsust. Paljud faasimõõteseadmeha ei läbi ka dünaamilisi teste, kusjuures probleeme on kõigi standardikohaste testidega. Dünaamilistes testides valmistab probleeme sageduse ja sageduse muutumise kiiruse viga.

Aastal 2009 viis NIST läbi Brasiilia põhivõrgu operaatori ONS tellimisel kaheksa faasimõõteseadmeha testimise, et teha taustauuringut Brasiilia põhivõrgu faasimõõteseadmeha hankele. Töös viidi läbi faasimõõteseadmeha võrdlus nii staatiliste kui ka dünaamiliste testide alusel kahel esitamissagedusel (12 fps-i ja 60 fps-i). Staatilistes testides vaadeldi lisaks standardi katsetele ka mõõtetäpsust sisendsignaali asümmeetria korral. Staatilistes testides esines suuremaid probleeme ribavälise signaali testiga, kus kõikidel PMU-del oli 12 fps-i korral TVE üle 1% ning 60 fps-i korral jäi ainult ühe PMU TVE alla 1%. Ülejäänutes staatilistes testides suuremaid probleeme ei esinenud. Dünaamilised testid ei olnud töö valmimise ajal veel standardi alusel reguleeritud. Siiski testiti amplituudi ja faasinurga modulatsiooni (ribalaius) ning amplituudi ja faasinurga hüppe. Ribalaiuse testis olid tulemused kõikuvad. Esines suuri erinevusi nii seadmete kui ka esitamissageduste vahel. Staatilistes testides häid tulemusi näidanud PMU-d täitsid sisendsignaali hüppe testis 100 ms reaktsioonaja nõuet (edastamissagedus 60 fps). Esitamissagedusel 12 fps-i oli reaktsioonaja nõue 200 ms. Kaheksast PMU-st täitsid seda nõuet kuus. [16]

Aastatel 2012 kuni 2014 viidi NIST-is läbi standardi [4] ja tema lisale [14] nõuetele vastavad põhjalikud testid. Vaatluse all oli 10 faasimõõteseadmeha erinevatelt tootjatelt. Katsete käigus viidi läbi kõik IEEE C37.118.1 kohased testid. Katsete käigus selgus, et ühegi tootja PMU ei olnud algselt suuteline läbima kõiki teste. Infot jagati seadmete tootjatega, mille peale uuendati seadmeid. Testide lõppedes suutsid mõned seadmed täita algse standardi ja tema lisaga seatud nõudeid. Probleemaatilisteks testideks osutusid dünaamilised testid ning ribavälise häiringuga test. Dünaamilistes testides oli seadmetel eelkõige probleeme sageduse ja sageduse muutuse kiiruse täpsusega. Toodi välja, et osades seadmetes võis probleemi tekitada sageduse mõõtmise

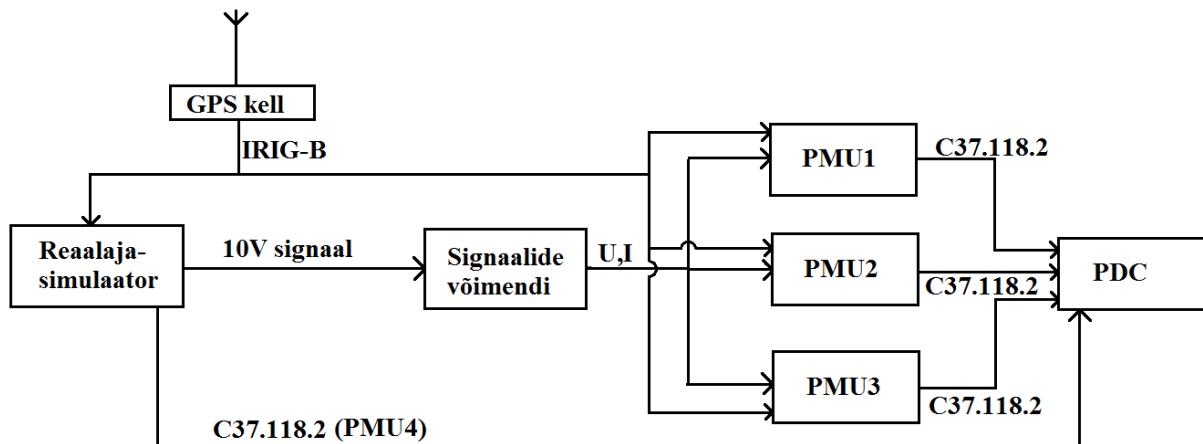
mittekattumine mõõtmiste ajamärgiga. Ribavälise häiringuga test on vajalik spektri kattumisvastase filtri testimiseks. Osad PMU-d ei täitnud nimetatud testiga seatud nõudeid, mis viitab asjaolule, et neil võib olla probleeme filtritega. Testitulemustes võis täheldada rohkem probleeme madalamatel edastamissagedustel. [3] [17]

Standardi alusel tehtud testidest samm edasi oleks simuleeritud elektrivõrgu olukordade põhjal tehtud katsed. Need peaksid võimaldama faasimõõteseadmete tööd hinnata reaalse elektrivõrgu sündmuste korral. Kirjeldatud tingimustel läbi viidud katseid on mõnevõrra raskem hinnata, sest sellistes olukordades on sünkrofaasorit keeruline matemaatiliselt deterministlikult ära kirjeldada. See olukord erineb standardikohastest katsetest, kus sisendsignaal on suhteliselt lihtsalt võimalik matemaatiliselt kirjeldada. Lahenduseks võib olla kasutada referentsina piisavalt täpset sünkrofaasori, sageduse ja sageduse muutuse kiiruse estimaatorit. See tähendab referents PMU kasutamist või katsete käigus sisendandmete salvestamist ning nende põhjal referentsignaali välja arvutamist. Reaalsete olukordade põhjal tehtud katsete käigus muutuvad enamasti korraga mitmed sisendsignaali parameetrid, näiteks faasinurk, signaali amplituud ja sagedus. Mitmete samaaegselt muutuvate parameetrite korral võib faasimõõteseadmete mõõtetäpsus olla mõjutatud rohkem kui standardi põhjal läbi viidud testid. Mõningaid töid kirjeldatud suunal on maailmas tehtud, samas on neid märgatavalt vähem avaldatud võrreldes standardi kohaselt läbi viidud katsetega. Näiteks võib tuua töö [21], kus hinnati faasimõõteseadmete mõõtetäpsust kahel erineval elektrivõrgus aset leidva sündmuse korral. Üheks sündmuseks oli kolmefaasiline lühis, teiseks oli süsteemide vahelise ülekandeliini väljalülitumine. Mõõtetulemused ei erinenud referentsist palju.

Erinevate katsete tulemustes on sarnaseid jooni. Probleeme valmistavad ribavälise häiringuga signaal ja dünaamilised katsed. Dünaamilistes katsetes on rohkem probleeme sageduse ja sageduse muutumise kiiruse mõõtetäpsusega. Ribavälise häiring on elektrisüsteemis suhteliselt vähe levinud ning tõenäoliselt ei ole mõõtetulemuste täpsus elektrisüsteemis sellest märkimisväärselt mõjutatud. Asjaolu on arvesse võetud ning standardi lisaga IEEE C37.118.1a on nõudeid ribavälise häiringuga katsele vähendatud. Probleemid dünaamiliste katsetega on samas jäänud.

## 3.2 Kasutatud seadmed

Käesolevas alapeatükis on kirjeldatud katsetes kasutatud seadmeid ning nende parameetreid. Katse läbiviimiseks oli vaja GPS kella, elektrisüsteemi simulaatorit, signaaligeneraatorit, signaalide võimendit ja faasimõõteseadmeid. Faasinurkade kalibreerimiseks oli kasutusel ka ostsilloskoop. Katse skeem on joonisel 2.1.



### Joonis 3.1. Katseseadmed ja nende vahelised ühendused

Katsetes kasutati reaalajasimulaatorit RTDS. Katsete vältel on selle põhiline roll simulatsioonide läbiviimine ning tarvilike analoogsignaali genereerimine. RTDS võimaldab välja anda kuni 10 voldise pingega analoogsignaale, mida üldjuhul ei ole võimalik kasutada sekundaarseadmete sisenditena. Analoogsignaali võimendamiseks kasutati võimendit Omicron CMS356, mis võimendab RTDS-i analoogsignaali faasimõõteseadmete jaoks sobivateks pingeteks ja vooludeks. Faasimõõteseadmed edastavad mõõdetud suurused IEEE C37.118.2-2011 standardi kohases formaadis andmete kontsentraatorisse (PDC). RTDS võimaldab simulatsiooni lisada ka faasimõõtmisi, mida seejärel saab edastada standardi IEEE C37.118.2-2011 kohases formaadis PDC-sse. Lisaks füüsilistele PMU-dele (joonis 2.1 PMU1, PMU2 ja PMU3) testiti ka RTDS-i sisemist PMU-d (joonis 2.1 PMU4). Kui füüsilised PMU-d said signaali võimendi vahendusel, siis virtuaalne PMU sai oma sisendsignaali otse simulatsioonist ning edastas oma mõõtmised RTDS-i simulatsioonist otse PDC-sse. Katsete vältel oli vajalik anda GPS ajasignaali nii PMU-dele kui ka reaalajasimulaatorisse, tagamaks mõõtmistes ja signaali genereerimises vajalik täpsus. Ajasignaali jagamiseks kasutati GPS kell SEL 2407, mis edastas GPS signaali alusel ajasignaali formaadis IRIG-B002.

Katsete läbiviimiseks oli üks põhilisemaid komponente reaalajasimulaator RTDS (ing. k. *Real Time Digital Simulator*), mida kasutati elektrisüsteemi simulatsioonide läbiviimiseks ning ka

signaaligeneraatorina. RTDS on Kanadas toodetud riistvaral põhinev elektrisüsteemi simulaator. Selle põhiline erinevus ja ka eelis mõningate teiste elektrisüsteemi simulaatorite ees on simulatsioonide toimumine reaalajas. Reaalajas töötamine tähendab, et RTDS-i simulatsioonid kestavad sama kaua, kui simulatsioonis toimuvad protsessid. See võimaldab RTDS-i lisamoodulite abil simulatsiooni siduda näiteks erinevaid elektrisüsteemis kasutatavaid füüsilisi juht- ja kontrollplokkide ning kontrollida nende tööd. [22]

RTDS koosneb mitmetest komponentidest, mida kasutaja saab vastavalt vajadusele juurde lisada või eemaldada. RTDS ei ole seega standardne toode vaid igal kasutajal on vastavalt soovidele tarnitud RTDS. Töös kasutatud RTDS-i pilt eest- ja tagantvaates on joonisel 2.2.



**Joonis 3.2. RTDS eest- ja tagantvaates (eestvaade vasakul, tagantvaade paremal)**

RTDS-i peamiseks komponentideks on stendid (ing. k. *rack*). Iga RTDS peab sisaldama vähemalt ühte stendi. Töös kasutati ühte stendi, joonisel 2.2 kasutatud stend tähistatud numbritega 1, 2 ja 3. Stendi peamiseks osadeks on protsessorikaardid (joonisel 2.2 tähistatud number 1-ga). Protsessorikaardidel viiakse läbi simulatsioonide arvutused. Üks protsessorikaart koosneb kahest RISC tüüpi mikroprotsessorist. Protsessorikaardi kommunikatsiooni jaoks on tema tagaküljel kas optikapordid või siis *rack*'i sisemiseks andmevahetuseks *back pane connector*. Protsessorikaartide kasutamisel simulatsioonis määratakse ära iga protsessori

kasutuse eesmärk simulatsioonis, ehk kas tegemist on kontrollkomponente arvutav protsessor või elektrisüsteemi komponente arvutav protsessor. Kontrollkomponente arvutavas protsessoris viiakse läbi näiteks simulatsioonis olevate loogikaplokkide ja elektrisüsteemis kasutatavate juhtimisplakkide arvutus. Elektrisüsteemi komponente arvutavas protsessoris viiakse läbi erinevate süsteemi komponentide (näiteks liinid, trafod, sünkroonmasinad) elektrilise poole arvutus. Üks protsessor igas simulatsioonis on alati määratud süsteemi talitluse arvutuseks (ing. k. *Network Solution*). RTDS-i kasutamiseks on tarkvara RSCAD. RSCAD-i abil koostatakse simulatsioonimudeleid, laetakse mudelid simuleerimiseks RTDS-i üles ja vajadusel juhitakse RTDS-i simulatsiooni tööd.

Simulatsiooni läbiviimist koordineerib GTWIF kaart (joonisel 2.2 number 3). Nimetatud kaardi kaudu laetakse protsessorkaartidele simulatsiooni läbiviimiseks vajalikud käsud, samuti jälgib GTWIF kaart simulatsiooni ajasammu. Kasutajal on ajasammu simulatsiooni koostamisel vastavalt vajadusele võimalik valida. Ühest küljest on lühema ajasammuga simulatsioon täpsem, samas aga peab RTDS olema võimeline simulatsioone läbi viima lühema ajasammuga. Töös kasutati ajasammu 20  $\mu$ s.

RTDS-i on võimalik lisada erinevaid I/O kaarte. Nendeks on GTDI (binaarsete sisenditeks), GTDO (binaarseteks väljunditeks), GTAI (analoogsisendid) ja GTAO (analoogväljundid). GTAO või GTAI kaardid võimaldavad kasutada 12 väljundit või sisendit. GTDO ja GTDI kaardid võimaldavad kasutada 64 väljundit või sisendit. Simulatsiooni on võimalik integreerida mitmeid ühte tüüpi kaarte. Kaartide kommunikatsioon *rack*'idega toimub läbi optiliste portide. Käesolevas töös oli vajalik kasutada ainult ühte GTAO kaarti, mis on joonisel 2.2 tähistatud numbriga 4. GTAO kaardi väljundpingete diapason on -10 V kuni 10 V (*peak-to-peak*). Kaardi D/A konverter on 16 bitine ning ta diskreetimissagedus on 1  $\mu$ s. Diskreetimissagedus on kõrgem kui simulatsioonide ajasamm, seetõttu GTAO interpoleerib ajasammu sees vahepealsed väljundi väärtused. Interpoleerimise meetodit on võimalik kasutaja poolt määrata.

Töös kasutati ka RTDS-i sisemist faasimõõtmiste funktsiooni. Funktsiooni kasutati GTNETx2 kaardi abil (joonisel 2.2 number 2). GTNETx2 kaart on mõeldud erinevate elektrisüsteemi kommunikatsiooniprotokollide kaudu väliste seadmetega suhtlemiseks. Kaardi nimes sisalduv x2 viitab, et samaaegselt on simulatsioonis võimalik kasutada kahte protokollit. Käesolevas töös kasutati GTNET PMU protokollit, mis võimaldas integreerida simulatsiooni faasimõõtmisi ning edastada neid IEEE C37.118.2-2011 formaadis andmete kontsentraatorisse. GTNET PMU protokollit kasutamiseks on nõutud RTDS-i aja sünkroniseerimine GPS ajaga.

Faasimõõteseadmeid sisaldavate katsete läbiviimiseks on samuti vajalik signaaligeneraatori sünkroniseerimine GPS ajaga. GPS ajaga sünkroniseerimine toimub RTDS-is GTSYNC kaardiga (joonisel 2.2 number 5). GTSYNC kaart võib saada GPS aja formaadis IRIG-B või PPS, mille ta edastab RTDS sisemises formaadis optikapordi kaudu GTWIF kaardile. GTSYNC kaardi abil on simulatsioonis võimalik kasutada kolme erinevat aega sisaldavat muutajat. Esimene neist on CRTSECD on käimasolev sekund. Teine on ADVSECD, mis on järgmine sekund. Kolmas on CRTNSEC, mis on käimasolevas sekundis möödunud nanosekundid. [22]

RTDS-i analoogväljundite kaart GTA0 väljastab ohutulpingel (SELV) signaale. Neis signaale ei ole võimalik sekundaarseadmetes otseselt kasutada. Vahepealseks lüliks RTDS-i ja faasimõõteseadmete vahel oli võimendi Omicron CMS356. Võimendi on kujutatud joonisel 2.3.



### **Joonis 3.3. Võimendi Omicron CMS356**

Võimendi väljundiks on kolm pluss üks pingesignaali ja kuus voolusignaali. Ühekorraga on seega võimalik genereerida kolmefaasilises süsteemis ühte gruppi pingeid ja kahte gruppi voole. Pingeid on võimalik genereerida kuni 0 – 300 V<sub>RMS</sub>, voole on võimalik genereerida 0 – 32 A<sub>RMS</sub> (6\*250 W) või 0 – 64 A<sub>RMS</sub> (3\*500 W) [23]. Väljundit diapsoonil kuni 64 A<sub>RMS</sub> saab kasutada ainult ühte kolmefaasilist gruppi. Võimendi kasutamisel tuleb arvestada, et ülekandesuhe sisendite ja väljundite vahel on ära määratud sisend- ja väljundgrupi valikuga. Seega peab 32 A<sub>RMS</sub> väljundvoolude puhul arvestama, et see on jagatud terve sisendi diapsooni peale. Võimendi sisendi ja väljundi vahel esineb 500 µs (±2 µs) suurune viide. Võimendi tüüpilised täpsuse parameetrid on tabelis 2.1 [23].

**Tabel 3.1. Võimendi Omicron CMS356 täpsus [23]**

	<b>Amplituudiviga</b>	<b>Faasinurga viga</b>
<b>Pinge väljundid</b>	0,06 % näidust + 0,02 % diapsoonist	0,05°
<b>Voolu väljundid (R<sub>load</sub> &lt; 0,5 Ω)</b>	0,1 % näidust + 0,04 % diapsoonist	0,1°

Töö käigus katsetati nelja faasimõõteseadet. Kolm neist olid füüsilised ja said oma sisendsignaali võimendilt, üks neist oli RTDS-i virtuaalne PMU. Töö üheks eesmärgiks oli testida faasimõõteseadmete erinevaid parameetreid ning leida katsete tulemusena nende mõju mõõtmistele. Järgnevalt on kirjeldatud manuaalide põhjal pinge- ja voolumõõtmiste parameetreid, faasimõõtmiste skeeme, faasimõõtmiste täpsust ja kasutaja poolt mõjutatavaid faasimõõtmiste konfiguratsiooni parameetreid. Pilt kolmest PMU-st ja GPS kellast on joonisel 2.4.



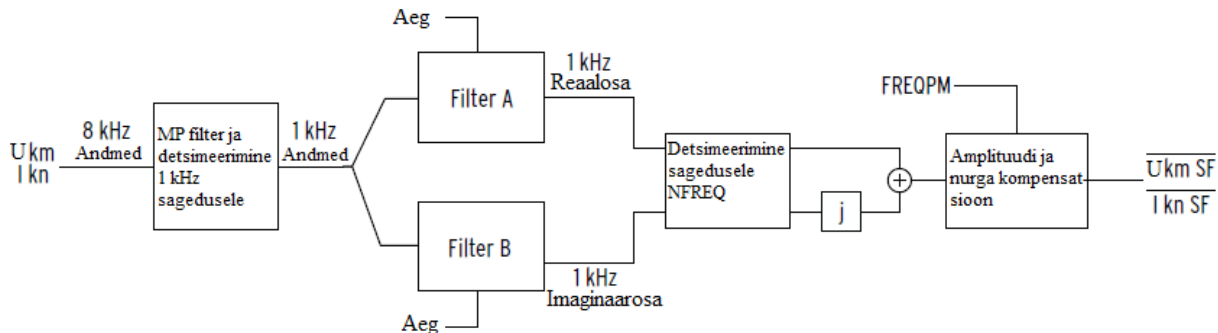
**Joonis 3.4. Kasutatud faasimõõteseadmed ja GPS kell**

Joonisel 2.4 on GPS kell (SEL 2407) tähistatud numbriga 1, PMU1 (SEL 487E) tähistatud numbriga 2, PMU2 (ABB RES670) tähistatud numbriga 3 ja PMU3 (Arbiter 1133a) tähistatud numbriga 4.

GPS kell on faasimõõtmistes ja faasimõõtmiste testides vajalik faasimõõteseadmetele ühtse faasinurga referentsi tagamiseks ning testsignaali võrreldavuse tagamiseks faasimõõtmistega. GPS kella täpsusest sõltub ka faasimõõtmiste täpsus. GPS aja täpsus sõltub sellisel juhul GPS kella mõõtemääramatusest ja GPS antenni ning kella vahelisest kaabli viitest. GPS kella aja määramatus on manuaali andmeil 100 ns, kui kasutusel on moduleerimata IRIG-B ajasignaal [24]. GPS kella ja kaabli vahelise kaabli pikkus on ligikaudu 100 m. Kasutusel on

koaksiaalkaabel margiga RF400, mille viide ühe meetri kohta on 3,92 ns. Sellisel juhul on kaabli viide ligikaudu 400 ns. Kokku on ajaallikast tingitud mõõteviga ligikaudu 500 ns, ehk sisuliselt võib selle mõõtmistes arvestamata jätta.

PMU1 faasimõõtmiste skeem on joonisel 2.5.



**Joonis 3.5. PMU1 faasimõõtmiste skeem [25]**

PMU1 faasimõõtmiste plokk kasutab sisendina A/D konverterist tulevat 8 kHz signaali. PMU1 on lisaks faasimõõtmistele integreeritud releekaitse ja monitoorimise funktsioonid, seega A/D konverteri signaali kasutavad ka kõik teised ping- ja voolumõõtmisi nõudvad IED funktsioonid. A/D konverteri ja IED ping- ning voolutrafode vahel on signaali kattumisvastane filter, mille lõikesageduseks on 3 kHz. A/D konverteri ja PMU funktsioonis kasutatakse IED sisemise kella aega, mida hoitakse sünkroniseerituna GPS ajaga IRIG-B signaali abil. PMU1 A/D konverter on diskreetimissagedusega 8 kHz. A/D konverteri bittide arvu ei ole manuaalis täpsustatud. Faasimõõtmistel kasutatud algoritmi ei ole manuaalis samuti täpsemalt kirjeldatud. Joonisele 2.5 tuginedes võib aga oletada, et see võib põhineda demodulatsioonil.

PMU1 faasimõõtmisi on võimalik konfigurereida mitmete parameetrite abil. Töös vaatluse all olnud parameetrid ja nende võimalikud väärtused on tabelis 2.2.

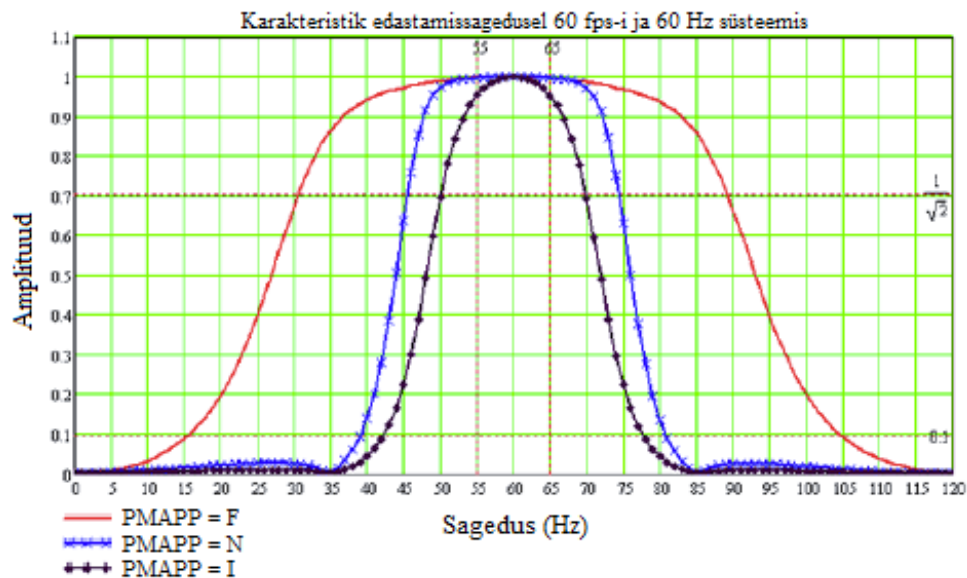
**Tabel 3.2. PMU1 faasimõõtmiste parameetrid [25]**

Parameeter	Väärtused
MRATE (edastamissagedu)	1, 2, 5, 10, 25, 50
PMAPP (filter)	N, F, I
PHCOMP (sageduse põhine kompenseerimine)	Y, N
PMFRQA (sageduse muutuse kiiruse algoritm)	S, F

Parameeter MRATE määrab PMU edastamissageduse. Elektrisüsteemi sagedusel 50 Hz on valikus kuus edastamissagedust, väikseim neist 1 kaader sekundis, kõrgeim 50 kaadrit sekundis.



Parameeter PHCOMP abil saab sisse lülitada sünkrofaasori sageduse põhise kompenseerimise. Parameetri aktiveerimise puhul lülitatakse sisse algoritm, mis kompenseerib faasori mooduli ja faasinurga vea sageduse hälbel põhisagedusest kuni  $\pm 5$  Hz. Parameeter PMFRQA mõjutab PMU sageduse muutumise kiiruse algoritmi. Sätel F (kiire säte) kasutatakse sageduse muutuse kiiruse arvutamiseks kolme perioodi andmeid, sätel S (aeglane säte) kasutatakse üheksa perioodi andmeid. Kiirem säte reageerib sageduse kiiretele muutustele kiiremini, aga sisaldab rohkem madalsageduslike võnkumisi. Aeglasem säte on stabiilsem, aga ei reageeri kiiretele sageduse muutustele nii kiiresti. Parameeter PMAPP määrab ära faasimõõtmiste filtri tüübi. Säte N on kitsama pääsuribaga filter, mis peaks tagama parema filtreerimise ribavälise häiringuga signaali korral. Säte F on laiema pääsuribaga filter, mis peaks tagama filtri kiirema töö ja seega ka faasimõõtmiste kiirema reageerimise signaali muutuste korral. Filtril on ka säte I, mis on võimalik valida ainult 60 Hz süsteemis. Filtrite sageduskaja on joonisel 2.6. [25]



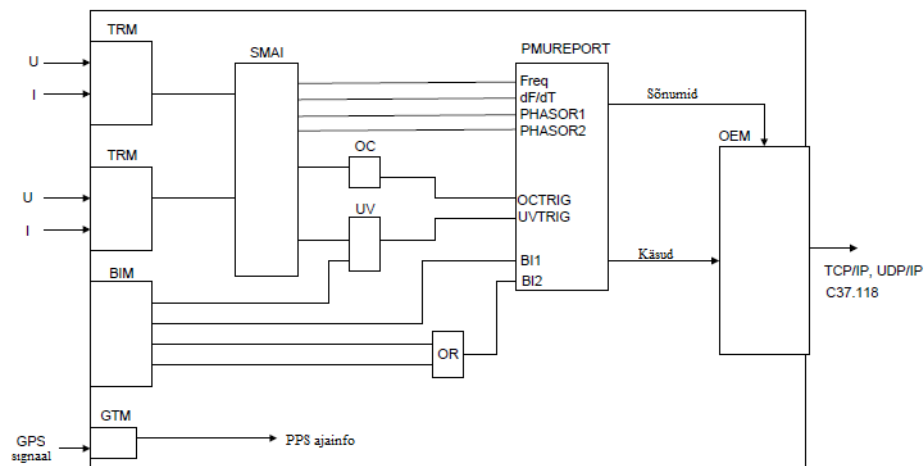
**Joonis 3.6. PMU1 ribapääsufiltri karakteristikud [25]**

PMU1 ping- ja voolusignaali parameetrid on tabelis 2.3.

**Tabel 3.3. PMU1 ping- ja voolusignaali parameetrid [25]**

	Pingesignaal, V	Voolusignaal, A
Nominaalväärtus	100 (L-L)	1
Mõõtediapasoon	0 – 300 (L-L)	0,1 – 18,2
Voolutrafo küllastus	-	20
Soojuslik taluvus	600 (10 s)	3 (Pidev)

PMU2 faasimõõtmiste skeem on joonisel 2.7 [26].

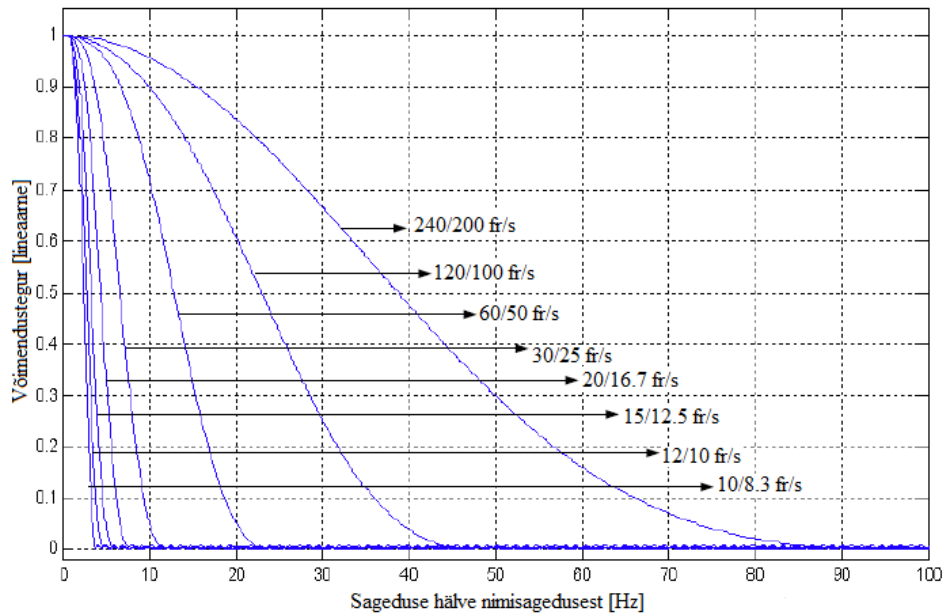


**Joonis 3.7. PMU2 faasimõõtmiste skeem [26]**

PMU2 ping- ja voolutrafod asuvad plokis TRM. Plokk TRM teeb sisendsignaalid sobivaks kasutamiseks plokis SMAI olevas A/D konverteris. PMU2 A/D konverter on diskreetimissagedusega 5 kHz (elektrisüsteemi sagedusel 50 Hz) ning 16 bitine. Seadme manuaalis ei ole kirjeldatud spektri kattumisvastase analoogfiltri parameetreid, mis peaks enne A/D konverterit olema. Diskreetimise järel filtreeritaks uuesti spektri kattumisvastase filtriga, mille lõikesagedus on 500 Hz. See filtreerimine on vajalik, kuna signaali sagedus vähendatakse selle järel 1 kHz-ni. Seejärel arvutatakse põhiharmoniku efektiivväärtus, faasinurk, sagedus, sümmeetrilised komponendid ja kõrgemad harmoonikud. Algoritmi, millega seda tehakse, ei ole manuaalis otseselt välja toodud. Kaudsete andmete põhjal võib oletada, et see on DFT põhine. Faasimõõtmiste plokk PMUREPORT kasutab nimetatud suurustest sisendina sümmeetrilisi komponente, sagedust ja sageduse muutumise kiirust. Andmed saavad PMUREPORT plokki kiirusega 1 kHz. Plokk arvutab nende põhjal välja sünkrofaasori, sageduse ja sageduse muutuse kiiruse, mida siis edastab kommunikatsiooniplokki kasutaja poolt valitud edastamissagedusega. Plokki on lisatud ka filter, mis peaks kõik signaalid, mis ei ole seotud faasimõõtmistega välja filtreerima. [26]

PMU2 faasimõõtmiste konfiguratsioonil saab valida erinevaid edastamiskiiruseid, filtri karakteristike (PMUREPORT plokis) ja sünkrofaasori ajamärgise kohta andmeaknas. Töös on uuritud edastamiskiiruste ja filtri karakteristikute mõju faasimõõtmistele. Ajamärgise asukohaks on valitud andmeakna keskpunkt. Edastamiskiirused on 50 Hz süsteemis 10, 25, 50, 100 või 200 kaadrit sekundis. Filtri karakteristikud on nimetatud vastavalt edastamiskiiruse valikule, mida nad peaksid filtreerima. Samas saab aga filtri karakteristiku valida sõltumatult

edastamiskiirusest. Manuaali järgi on siiski soovitatud valida sama filter, mis edastamiskiirus. Joonisel 2.8 on filtrite sageduskarakteristikud. [26]



**Joonis 3.8. PMU2 filtrite karakteristikud [26]**

Madalamatele edastamissageduste mõeldud filtrid on kitsama pääsuribaga põhiharmooniku ümber. Seega peaks nimetatud filtrite kasutamine ribavälise häiringuga signaalil andma täpsemaid faasimõõtmiste tulemusi. Samas on ka need filtrid aeglasemad, nagu näha tabelist 2.4 [26].

**Tabel 3.4. PMU2 filtrite viide [26]**

Filter	Viide, ms (50 Hz signaal)
10/8,3	475
12/10	387
15/12,5	308
20/16,7	231
30/25	153
60/50	74
120/100	24
240/200	13

PMU2 filtrite valikul tuleks seega arvestada kahe filtri parameetriga: filtri pääsuriba laius ja filtri viide. Manuaali järgi on filtri valikul soovitatud lähtuda edastamissagedusest, samas

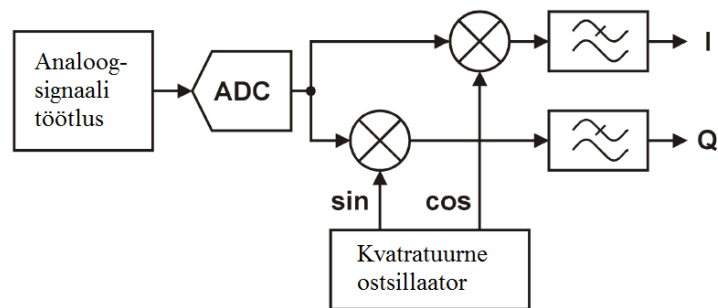
ilmselt on staatiliste signaalide puhul mõttekam valida kitsama pääsuribaga filter ning dünaamiliste signaalide puhul väiksema viitega filter.

PMU2 ping- ja voolusignaali parameetrid on tabelis 2.5.

**Tabel 3.5. PMU2 ping- ja voolusignaali parameetrid [26]**

	Pingesignaal, V	Voolusignaal, A
Nominaalväärtus	120 (L-L)	1
Mõõtediapasoon	0,5 – 288 (L-L)	0,2 – 40
Soojuslik taluvus	420 (Pidev)	4 (Pidev)

PMU3 on erinevalt kahest eelmisest faasimõõteseadmest mõeldud ainult elektrikvaliteedi ja faasimõõtmiste läbiviimiseks. Releekaitse funktsioone seadmel ei ole. Lihtsustatud skeem seadme signaalitööstusest on joonisel 2.9.



**Joonis 3.9. PMU3 lihtsustatud faasimõõtmiste skeem [27]**

PMU3 A/D konverter (joonisel 2.12 ADC) on 14 bitine ja diskreetimissagedusega 10240 Hz [27]. A/D konverteri ees olevat spektri kattumisvastase filtri parameetreid ei ole manuaalsis käsitletud. Sünkrofaasori estimateerimine põhineb standardis [4] näidatud demodulatsioonil põhineval estimaatoril [28]. PMU3 estimateerib sünkrofaasori esmalt 20 kaadrit sekundis sagedusega, misjärel teisendatakse sünkrofaasor sellelt sageduselt kasutaja poolt valitud edastamissagedusele. Estimaadi ajamärgis on andmeakna keskel, mis peaks vähendama sageduse hälbel põhisedusest estimaadi faasinurga viga. Seade võimaldab võrreldes eelneva kahe faasimõõteseadmega suhteliselt vaba faasimõõtmiste konfigureerimise valikut. Tabelis 2.6 on PMU3 seadistamisel kasutatavad erinevad sätted ja nende võimalikud väärtused. [28]

**Tabel 3.6. PMU3 faasimõõtmiste parameetrid [28]**

Säte	Väärtused
Edastamissagedus (50 Hz süsteemis), fps	1, 2, 5, 10, 25, 50
Sageduse põhine kompenseerimine, Hz	Off, $\pm 2$ , $\pm 5$ , $\pm 10$ ,
Andmeakna pikkus, põhiharmooniku perioodides	1 kuni 16
Estimaatori algoritm (aknafunktsioon)	<i>Raised Cosine, Hann, Hamming, Blackman, Triangular, Rectangular, Flat Top, Kaiser, Nutall 4-term</i>

Edastamissageduse sätte valikuga määratakse ära faasimõõtmiste edastamiskiirus. Sageduse põhine kompenseerimine (ing. k. *Adaptive Tuning*) korrigeerib estimaatori filtri parameetreid, juhul kui sageduses esineb kõrvalekaldeid nimisagedusest. Sättega saab valida sageduse piirid, mille sees funktsioon on aktiivne. Tegemist on sisuliselt tagasiside ahelaga, kuna sagedust arvutatakse sünkrofaasori abil. Suurtel sageduse hälvetel võib tekkida sageduse põhise kompenseerimisel probleeme algoritmi korrektse tööga. Andmeakna pikkuse valikul võib kasutada 1 kuni 16 põhiharmooniku perioodi pikkust andmeakent. Lühemad andmeaknad tagavad algoritmi kiirema reageeringu signaali järskudele muutustele, pikemad andmeaknad seevastu võimaldavad paremat tööd staatilise signaali korral. Estimaatori algoritm võimaldab valida aknafunktsiooni, mida kasutatakse signaali filtreerimiseks. Tootja ei soovita kasutada lihtsamaid aknafunktsioone, nagu *rectangular* ja *triangular*. Toote spetsifikatsioonis on kinnitatud, et faasimõõtmiste funktsiooni maksimaalne TVE on 0,1%, millele lisandub estimaatori viga. [28]

PMU3 ping- ja voolusignaali parameetrid on järgmised (tabel 2.7) [27].

**Tabel 3.7. PMU3 ping- ja voolusignaali parameetrid [27]**

	Pingesignaal, V	Voolusignaal, A
Nominaalväärtus	100 (L-L)	1
Mõõtediapasoon	0,5 – 600 (L-N)	0,2 – 10
Soojuslik taluvus	700 (Pidev)	11,7 (Pidev)

PMU4 on virtuaalne, RTDS-i sisse ehitatud PMU. Erinevalt eelnevast kolmest PMU-st kasutatakse see PMU sisendsignaalina otseselt RTDS simulatsioonis määratud muutujaid. Asjaolu tähendab, et PMU4 ei sisalda A/D konverterit, vaid tegemist on ainult faasimõõtmiste estimateerimisega otseselt sisendsignaalide põhjal ja seejärel mõõteandmete edasisaatmisega PDC-sse. PMU4 mõõteviga koosneb seega ainult estimaatori veast. PMU4 estimaator on praktiliselt identne IEEE C37.118.1 lisas C toodud faasimõõtmiste estimateerimise algoritmiga. Nimetatud algoritmi täpsem kirjeldus on peatükis 1.3 ja 1.4. PMU4 võimaldab kasutada nii P kui ka M klassi PMU mudelit. PMU konfiguratsioonis saab P klassi mudelis mõjutada ainult edastamissagedust. M klassi mudeli konfiguratsioonis on võimalik lisaks edastamissagedusele valida erinevate aknafunktsioonide vahel, ehk erinevate filtrite vahel. Tabelis 2.8 on PMU4 konfiguratsiooni parameetrid.

**Tabel 3.8. PMU4 faasimõõtmiste parameetrid [22]**

Säte	Väärtused
Edastamissagedus (50 Hz süsteemis), fps	1, 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200
Aknafunktsioon (M klass PMU)	<i>Hamming, Hann, Blackman, Nutall, Blackman-Harris, Blackman-Nutall, Kaiser, Dolph-Chebyshev, Gaussian</i>
Aknafunktsioon (P klass PMU)	Kolmnurkne

RTDS simulatsiooni iseärasuste tõttu tuleb PMU4 konfigureerimisel veel mõningaid parameetreid tähele panna. Esiteks tuleb valida GTSYNC kaardi väljastatav ajamuutuja. RTDS PMU kasutab ajamärgisteks järgnevat sekundit, seega tuleb valida GTSYNC järgneva sekundi muutuja. RTDS simulatsioon arvutab mudelis sõlmede vahelisi voole sõlmepingete alusel. Seega peavad pinged enne voolude arvutamist teada olema. Selle tõttu on simulatsioonis voolud pingetest ühe ajasammu võrra maas. RTDS PMU plokis on seda asjaolu võimalik arvesse võtta ning viivitada ühe ajasammu võrra pingesignaalide kasutamist. RTDS PMU estimaatori algoritmi arvutus kestab P klassi PMU-l neli ajasammu ning M klassi PMU-l seitse ajasammu. Seega RTDS PMU annab faasimõõtmiste kohta estimaadi vastavalt iga nelja või seitsme ajasammu järgi. Mõõtmiste edastamiseks detsimeerib simulatsioon faasimõõtmiste estimateerimise sagedust. Võimaldamaks määrata andmeakna paiknemist sisendandmete suhtes on võimalik määrata sisendsignaali lugemise viivitust ajasammudes. [22]

PMU4 mõõteviga sisaldab ainult faasimõõtmiste estimaatori viga. Faasimõõtmiste estimaatorina kasutatakse standardis IEEE C37.118 toodud algoritme, mis uuringute põhjal on piisavalt täpsed, et läbida kõik nimetatud standardis esitatud nõuded faasimõõteseadmetele [17]. Käesoleva töö seisukohast võimaldas see asjaolu kasutada dünaamilises testis PMU4 klass P algoritmi estimeeritud faasimõõtmisi referentsina teistele mõõtmistele. PMU4 klass M algoritmi estimeeritud faasimõõtmisi kasutati erinevate aknafunktsioonide testimiseks.

Füüsilistesse faasimõõteseadmetesse sisendina antud faasinurk erines testseadmete viite tõttu RTDS simulatsioonis esinenud faasinurgast. Tegelik PMU-de sisendsignaali faasinurga määramiseks mõõdeti võimendist väljunud pingsignaali ostsiloskoobiga. Faasinurga määramiseks kasutati standardis IEEE C37.242 toodud juhendit väikese modifikatsiooniga. Nimetatud juhendi sisu on kirjeldatud peatükis 2.1. Faasinurga määramiseks oli lihtsam liikuda ostsiloskoobi kuval signaali nullpunkti läbimise peale võrreldes faasinurga muutmisega RTDS simulatsioonis. Seetõttu määrati erinevalt juhendis toodult RTDS simulatsioonis faasinurgaks null ning määrati ostsiloskoobiga signaali nullpunkti läbimise hetk. Ülejäänud osas oli protseduur kooskõlas juhendiga. Kasutatud ostsiloskoobi parameetrid on tabelis 2.9.

**Tabel 3.9. Ostsiloskoobi parameetrid**

<b>Parameeter</b>	<b>Väärtus</b>
Vertikaalne resolutsioon, bit	16
Horisontaalne resolutsioon, MHz	50

Kirjeldatud protseduuri tulemusel saadud ajalised viited ja faasinihked simulatsiooni ja võimandi väljundi vahel on tabelis 2.10.

**Tabel 3.10. Ostsiloskoobiga faasinurga kalibreerimise tulemused**

<b>Simulatsiooni faasinurk, °</b>	<b>Signaali nullpunkti läbimise hetk, µs</b>	<b>Faasinurk PMUde klemmidel, °</b>
0	559	10,06
180	550	9,9

Simulatsiooni faasinurga 0 korral oli nullpunkti läbimine negatiivsest väärtusest positiivsesse väärtusesse. Simulatsiooni faasinurga 180 korral oli nullpunkti läbimine positiivsest väärtusest negatiivsesse väärtusesse. Tabelis 2.14 toodud kahe faasinihke väike erinevus viitab alaliskomponendi olemasolule signaalis. Faasinihkena kasutatakse kahe tulemuse aritmeetilist keskmist ehk 9,98°. Seda tulemust kasutatakse füüsiliste PMUde ja simulatsiooni tulemuste

võrdluses voolude korral. Pingete puhul oli referentsfaasori arvutamisel sisse lülitatud pinge signaali ühe ajasammu pikkune viide. Füüsiliste PMU-de pinge faasinurga hindamiseks on seega vajalik ostilloskoobiga mõõdetud ajast lahutada 20  $\mu$ s, et arvestada referentsfaasori arvutamisel sisse viidud ühe ajasammu pikkust viidet. 20  $\mu$ s võrra väiksem viide tähendab kasutatud pinge faasinihkeks 9,62°.

### **3.3 Katsete kirjeldus**

Käesoleva töö üheks osaks on faasimõõteseadmehete katsetamine erinevates olukordades. Katsetuste eesmärk on selgitada välja faasimõõteseadmehete konfiguratsiooni mõju mõõtetulemustele ning selle alusel soovitada faasimõõteseadmehete konfigureerimisel kasutatavaid parameetreid. Katsete koostamisel kaaluti kahte varianti: katsed standardite IEEE C37.118.1 ja IEEE C37.118.1a alusel või katsetamine reaalse elektrisüsteemi sündmuste põhjal.

Standardpõhiselt on maailmas läbi viidud mitmeid katseid. Peatükis 2.1 on kirjeldatud mõningaid neist ning nende tulemusi. Põhiline järeldus katsetest on, et faasimõõteseadmehete valmistavad probleemid dunaamilised olukorrad. Standardpõhised staatilised katsed on üldiselt nõuetele vastavate tulemustega, välja arvatud ribavälise häiringuga katse. Standardpõhised katsed testivad kõigi sisendsignaali parameetrite muutumist laiades piirides. Katsed eraldi on aga koostatud põhimõttel, et nimitingimusest erinev on ühe katse vältel ainult üks parameeter. Erinevate parameetrite samaaegset mõju katsetulemustele ei vaadelda.

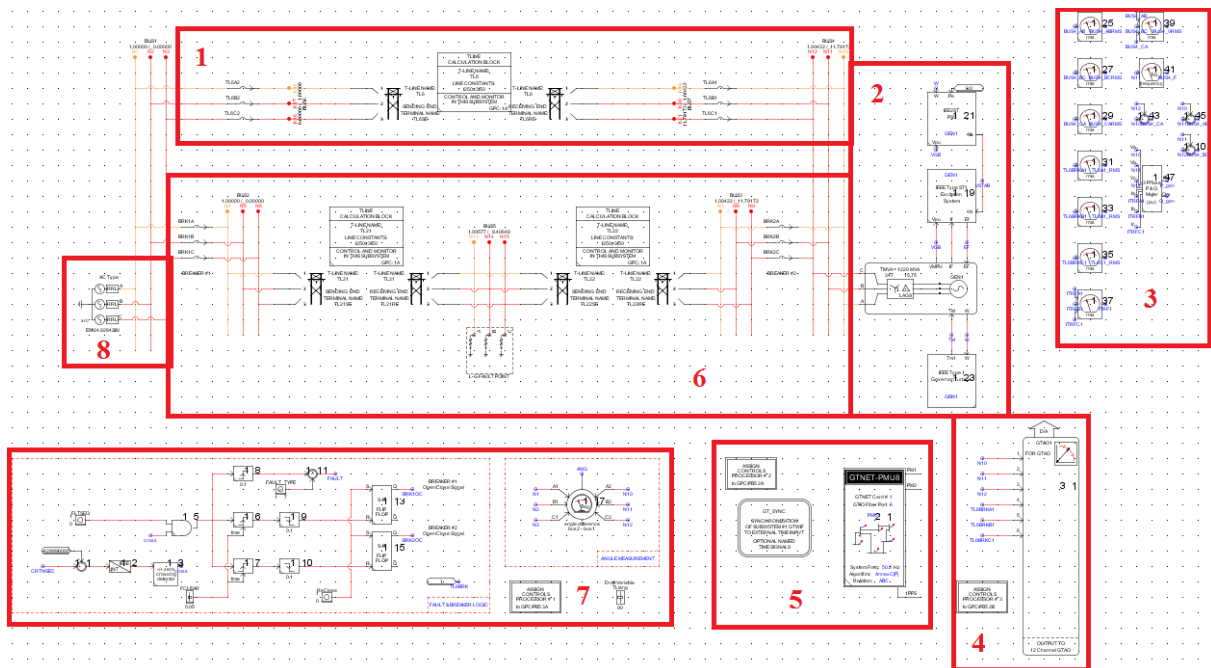
Faasimõõteseadmehete katsetusi reaalse sündmuste alusel on maailmas läbi viidud vähem. Reaalse sündmuste läbimängimine samas mõjutab mitmeid parameetreid korraga, mis võib mõõtetulemusi mõjutada erinevalt võrreldes standardikohaste katsetega. Selliste katsete korraldamisel tuleb siiski silmas pidada, et faasimõõteseadmehete mõõdetavate sündmuste iseloom ja hulk elektrisüsteemis võib olla erinev ja väga suur, mistõttu nende testimiseks reaalse sündmuste alusel tuleks esmalt kindlaks teha sündmused, mis võimalikult täpselt võimaldavad faasimõõteseadmehete hinnata.

Käesolevas töös valiti eesmärgi saavutamiseks teine tee ehk faasimõõteseadmehete konfiguratsiooni mõju mõõtetäpsusele hinnati elektrisüsteemi olukorra simuleerimise abil. Hinnang mõõtetäpsusele anti kahe olukorra alusel. Üks oli staatiline situatsioon ehk sisendparameetrid ei muutunud katse vältel, teine oli dunaamiline ehk katse vältel parameetrid muutusid. Seega oli vajalik koostada simulatsioonid nende kahe juhtumi kohta, mille alusel



koostati PMU-dele sisendsignaaliid. Simulatsioonid viidi läbi reaalajasimulaatoris RTDS (ing. k. *Real-Time Digital Simulator*) ning simulatsioonide mudelid koostati tarkvaras RSCAD. RTDS-i ja teiste töös kasutatud seadmete kirjeldus ning katsete füüsiline skeem on peatükis 2.2. Järgnevalt on kirjeldatud kahte simuleeritud juhtumit.

Dünaamilises juhtumis simuleeriti elektrisüsteemi tööd siirdetalitluses. Katsetatud skeem koosnes sünkroongeneraatorist, süsteemist ja kahest liinist, mis ühendasid sünkroongeneraatorit ja süsteemi. Dünaamilise juhtumi jaoks koostati RTDS-i tarkvaras RSCAD simulatsioonimudel. Simulatsiooni algul olid töös mõlemad liinid. Sündmuseks on ühe liini peal toimuv lühis, mille tagajärjel lülitub liin mõlemast otsast välja. Sündmuse järgselt jääb seega töösse ainult üks liin, mille ülekantav võimsus on kahekordne võrreldes lühise eelse olukorraga. Testitavad faasimõõteseadmed mõõdavad sündmust töösse jääva liini generaatori poolsest otsast. Simulatsiooni skeem on joonisel 2.10.



**Joonis 3.10. Dünaamilise testi RSCAD mudel**

Vastavalt eespool olevale kirjeldusele võib joonise 2.10 jagada kaheksaks (tähistatud numbritega joonisel). Sünkroongeneraator koos ergutus- ja turbiini kiirusregulaatori ning PSS-iga on tähistatud number 2-ga. Sünkroongeneraatoriga koos on simuleeritud ka trafo. Sünkroongeneraatori ja trafo parameetrid on tabelis 2.11. Generaatori ja tema juhtahelate modelleerimisel kasutati enamasti simulatsioonimudelid toodud generaatorit, muudetud on ainult trafo ülepingsepoole pinge ja generaatori sagedus.

**Tabel 3.11. Sünkroongeneraatori ploki parameetrid**

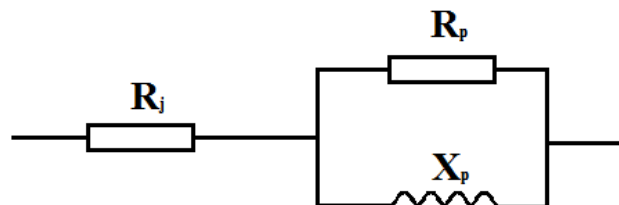
Parameeter	Väärtus
Generaatori nimivõimsus, MVA	1220
Sagedus, Hz	50
Trafo nimivõimsus, MVA	1220
Trafo mähiste nimipinged, kV (L-L)	347/15,75

Kaks liini on simuleeritud plokkidega 1 ja 6. Liinil 6 toimub simulatsiooni käigus lühis, mille tõttu liin lülitub mõlemast otsast välja. Lühis toimub liini 6 generaatori poolses otsas kaugusel, mis on 10% liini pikkusest. Liin 1 jääb lühise järgselt töösesse ning liini 1 generaatori poolsest otsast mõõdetakse sündmust faasimõõteseadmetega. Liinid 1 ja 6 on identsete parameetritega (tabel 2.12). Liinid on üheaheelised ning nende elektrilised parameetrid vastavad kahejuhtmelise lõhisfaasiga liinile. Kasutatud juhtmemargiks on *Finch*. Faasid paiknevad maapinna suhtes ühel kõrgusel ning kahe äärmise faasi kaugus keskmisest faasist on 7,5 m. Faasijuhtmete kõrgus maast madalaimas punktis on 9,7 m ning juhtmete riipe on 6 m. Liinil on kasutatud kahte piksekaitsetrossi.

**Tabel 3.12. Liini 1 ja 6 parameetrid**

Parameeter	Väärtus
Liini pikkus, km	250
Ahelate arv	1
Pikiaktiivtakistus, $\Omega$	6,45
Pikiinduktiivtakistus, $\Omega$	75
Põikijuhtivus, S	0,000955

Plokiga 8 on modelleeritud elektrisüsteemi ülejäänud osa. Süsteemi takistust on modelleeritud RRL plokiga (joonis 2.11).



**Joonis 3.11. RRL plokk**

Simulatsioonis kasutatud RRL ploki parameetrid on tabelis 2.13.

**Tabel 3.13. RRL ploki parameetrid**

Parameeter	Väärtus
Süsteemi sagedus, Hz	50
Süsteemi pärijärgnevustakistus, $\Omega$	$25 < 80^\circ$
Lühisvõimsus, MVA	4356

Kirjeldatud generaatori, liinide ja süsteemi parameetritega on võimsusvoog generaatori ja süsteemi vahel 600 MW ja 39 Mvar. Pinge generaatori trafo ülempingepoolel on 353 kV ja ühe liini vool enne lühist on ligikaudu 500 A, peale lühist suureneb vool kaks korda ligikaudu 1000 A-ni.

Number 7-ga tähistatud (joonis 2.10) on võimsuslülitite ja lühise juhtimise plokk. Liini 6 võimsuslülitid hoitakse kogu aeg sees. Mõlemad liini 1 võimsuslülitid lülitatakse simulatsioonis määratud aja pärast peale lühise algust välja. Tegevusega kõrvaldatakse ka lühis liinil. Juhtumi modelleerimisel kasutati lühise kestvust 200 ms. Lühise kestvus on suhteliselt pikk, et tagada dünaamilise juhtumise kriitilise juhtumi simulatsioon ning saavutada pärast lühist faasimõõteseadmete mõõdetavate parameetrite suhteliselt suures ulatuses võnkumine. Simuleeriti kahte lühise tüüpi: kolmefaasiline ja ühefaasiline maalühis. Lühisekohas määrati lühistakistuseks 0,1  $\Omega$ . Tagamaks faasimõõteseadmetega mõõdetud tulemuste omavahelist võrreldavust korraldati kõik lühised ühel ajal alates sekundi algusest.

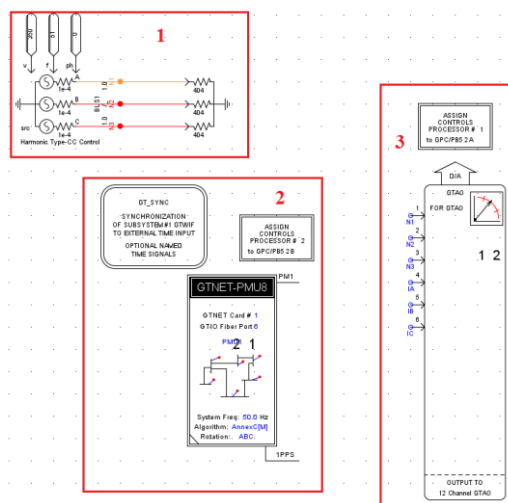
Numbriga 5 (joonis 2.10) on tähistatud RTDS-i faasimõõteseadmete mudel. Mudelit on täpsemalt kirjeldatud peatükis 2.3. Numbriga 4 (joonis 2.10) on tähistatud RTDS-i GTA0 kaardi plokk, mille abil genereeritakse simulatsiooni alusel 10 V pingesignaalid võimendi sisendiks. Täpsemalt on jällegi seda plokki kirjeldatud peatükis 2.2. Numbriga 3 (joonis 2.10) on tähistatud erinevad mõõteseadmed, mille abil jälgitakse simulatsiooni käigus esinevaid pingeid, voole ja sagedust.

Plokid 3, 4, 5, 7 ja generaatori ergutusregulaator, turbiini kiirusregulaator ja PSS (elektrisüsteemi stabilisaator, ingl. k. *Power System Stabilizer*) on RTDS-i kontrollkomponentidest tehtud, ehk nad vajavad simulatsioonis kontrollprotsessorit. Kokku kasutati simulatsioonis kolme kontrollprotsessorit. Üks kontrollprotsessor määrati tegelema generaatori juhtimise, lühise ja võimsuslülitite juhtimise ning mõõteseadmetega. Teine kontrollprotsessor määrati plokile 5 tegelema PMU-dega. Kolmas kontrollprotsessor määrati GTA0 kaardi peale. Kuna simulatsioon ei olnud suur, oleks ilmselt võinud ka ühe

kontrollprotsessoriga süsteemi simuleerida, aga analoogkaardi ja PMU-de töökiiruse tagamiseks eraldati neile eraldi protsessorid. Simulatsiooni elektrisüsteemi simulatsiooni viis läbi kaks protsessorit. Üks protsessor arvutas komponente, teine tegeles süsteemi võimsusvoogude arvutamisega (*Network solution*). Simulatsiooni ajasammuks määrati 20  $\mu$ s. Ajasammu väärtus on suhteliselt väike, RTDS-i manuaalis on standardseks ajasammuks soovitatud 50-60  $\mu$ s. Ajasammu vähendamine oli põhjustatud vajadusest vähendada RTDS-i simulatsiooni viidet, mis tähendas väiksemat faasinihet füüsiliste PMU-de ja RTDS-i simulatsiooni vahel.

Dünaamilistes testides oli esmalt staatiline olukord, misjärel toimus lühise tagajärjel pinge ja voolu amplituudis ning faasinurgas järsk muutus ja sageduse kõikumine. Kolme kuni nelja sekundi jooksul peale lühis olukord stabiliseerus ning tekkis uus staatiline olukord. Dünaamilise testi tulemuste hindamiseks oli töös põhiline probleem piisava täpsusega referentsi koostamine. Referentsi koostamiseks oli üheks võimalikuks lahendusteks hilisem faasimõõtmiste estimaadi arvutamine katsete käigus salvestatud hetkväärtuste alusel. Kirjeldatud lähenemine oleks nõudnud piisava täpsusega estimaatori koostamist. Estimaatori koostamine käesolevas töös oleks olnud aeganõudev ning tõenäoliselt ei oleks lõpptulemus olnud parem kasutatud lahendusest. Seetõttu võeti referentsfaasorina kasutusele PMU4 klass P algoritmi järgi arvutatud mõõtmised. PMU4 klass P algoritm on koostatud IEEE C37.118.1 lisas C toodud algoritmi järgi, mistõttu on see erinevate allikate andmeil piisavalt täpne, et läbida kõik nimetatud standardis toodud testid [4] [17].

Testimaks PMU-de tööd staatilises olukorras koostati RSCAD-is joonisel 2.12 toodud mudel.



**Joonis 3.12. Staatilise testi RSCAD mudel**

Staatilise juhtumi simulatsioonis testiti PMU-de mõõtetäpsust nimisagedusest erineval sagedusel koos harmoonikute sisaldusega signaalis. Põhiharmooniku ja kõrgemate harmoonikute parameetrid on tabelis 2.14.

**Tabel 3.14. Staatilise testi parameetrid**

<b>Parameeter</b>	<b>Väärtus</b>
Süsteemi sagedus, Hz	49,5
Teise harmooniku sisaldus signaalis, %	1
Kolmanda harmooniku sisaldus signaalis, %	2,7
Seitsmenda harmooniku sisaldus signaalis, %	2,1
Üheteistkümnenda harmooniku sisaldus signaalis, %	1,5
THD, %	3,9

Staatilise testi parameetrid valiti eesmärgiga testida mõõtetäpsust nimisagedusest erineval põhisagedusel. Faasimõõteseadmete mõõtealgoritmid on loodud mõõtma täpselt signaali nimisagedusel. Sageduse hälbel nimisagedusest aga võib mõõtmistesse tekkida viga, mistõttu on staatilises testis süsteemi sageduseks määratud 49,5 Hz. Signaali hälve põhisagedusest on suhteliselt suur ning hetkel Eesti elektrivõrgus sageduse 0,5 Hz suurust hälvet tihti ei esine. Samas sellised häiringud võivad esineda ning nendel juhtumitel oleks faasimõõtmistel suhteliselt suur osa süsteemi olukorra hindamisel. Signaali on lisatud ka erinevat järku harmoonikuid, kuna reaalses süsteemis võivad mõõdetavad signaalid olla moonutatud.

Staatilise testis ei ole testi vältel sisendsignaalides muutusi. Testi läbiviimisel rakendati vaatluse all olnud seadmetele signaalid ning seejärel oodati signaalide stabiliseerumist. Tulemuste analüüsiks kasutati 30 s pikkust mõõtmist. Staatilistes testides kasutati tulemuste hindamiseks referentsina sisendsignaali matemaatilist kirjeldust. Selline lähenemine võimaldab testseadmete piisava täpsuse korral tagada absoluutselt täpse referentsi. Lähenemist võimaldas signaali matemaatilise kirjeldamise lihtsus.

Dünaamilises ja staatilises testis sooviti leida erinevusi nende mõõtetäpsuses erinevate konfiguratsioonide korral ning nende alusel hinnata konkreetsete sätete sobivust erinevates olukordades. Vaatluse all olnud sätted olid samad nii staatilises kui dünaamilises testis. Need sätted olid järgmised.

- Edastamissagedus
- Andmeakna pikkus
- Filter
- Sageduse põhine sünkrofaasori kompenseerimine
- Ajamärgise asukoht andmeaknas
- Sageduse muutumise kiiruse estimateerimise algoritm

Kõrgem edastamissagedus peaks dünaamilistes olukordades olema väiksema latentsuse ja viitega võrreldes madalamate edastamissagedustega. Madalam edastamissagedus tagab osadel PMU-del stabiilsemad mõõtmised staatilistes olukordades juhul, kui PMU estimaatori algoritm võtab andmeakna valikul arvesse edastamissagedust. Madalamatel edastamissagedustel on ka väiksemad andmehulgad, mida peab edastama ja salvestama, mistõttu on ka madalamad nõudmised sidesüsteemile ja PDC-le. Katsetes kasutati ühte PMU-d, millel sai valida andmeakna pikkust sõltumatult teistest parameetritest. Pikema andmeaknaga estimaatorid peaksid olema staatilises olukordades väiksema müraga (stabiilsemad) ning täpsemad. Lühem andmeaken peaks olema väiksema latentsuse ja viitega dünaamilistes olukordades ehk reageerima kiiremini. Kõikidel PMU-del sai valida estimaatoris kasutatavate erinevate filtrite karakteristikute vahel. Peatükis 1.4 on kirjeldatud, et filtrite puhul on valik kompromiss kahe parameetri vahel. Filtri paremad omadused sagedusdomeenis (ehk summutab mittesoovitavaid sagedusi rohkem) tähendavad üldjuhul filtri halvemaid omadusi ajadomeenis (ehk filter on suurema viitega) ja vastupidi. See tähendab, et dünaamilistes olukordades võiks paremini sobida väiksema viitega filtrid ning staatilistes olukordades võiks paremini sobida paremate filtreerivate omadustega filtrid. Enamikes faasimõõteseadmetes on võimalik valida sageduse põhise sünkrofaasori kompenseerimise säte. Säte võimaldab valida sageduse põhise kompenseerimise piire ning ka tema välja lülitamist. See säte peaks sünkrofaasori arvutamisel nihutama kasutatava filtri pääsuriba keset tegelikule põhiharmooniku sagedusele. Sätte väljalülitamisel on filtri pääsuriba kese mõõtmiste vältel nimisagedusel. Mõningatel PMU-del on võimalik valida ka ajamärgise asukohta andmeaknas. Faasimõõtmiste standard näeb ette, et see on andmeakna keskel [4]. Kirjanduses on ka soovitatud mõõtmiste täpsuse tagamiseks ajamärgis paigutada andmeakna keskele [3]. Samas on alternatiivideks ka ajamärgise paigutamine andmeakna algusesse või lõppu. Ühel katsetatud PMU-l on võimalik valida sageduse muutuse arvutamise algoritmi. See võimaldas valida algoritmis sageduse andmete kasutamise perioodi ehk kas kasutada sageduse estimaati pikema või lühema perioodi vältel.

## 4 Katsete tulemused ja analüüs

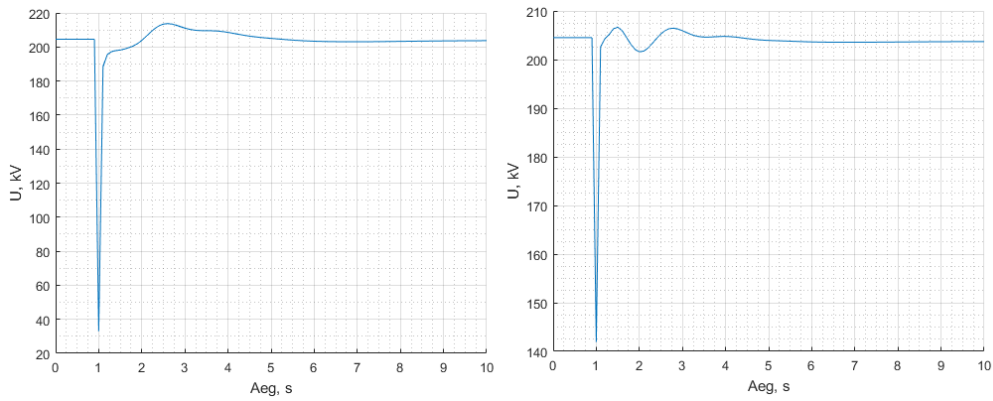
### 4.1 Dünaamilise testi tulemused ja analüüs

Käesolevas peatükis on dünaamilise testi katsetulemused ja analüüs. Esitatud on tulemused nelja faasimõõteseadmekohta, ehk kolme füüsilise ja ühe virtuaalse faasimõõteseadmekohta. Esitatud on ka referentsfaasori mõõtetulemused. Referentsfaasorina kasutati PMU4 mõõtetulemusi, kui ta oli sätestatud PMU klass P mõõtmisi läbi viima. Referentsfaasori valikut on seletatud peatükis 2.3 dünaamilise testi kirjelduses. Katsete tulemused on esitatud TVE (sünkrofaasori viga), FE (sageduse viga) ja RFE (sageduse muutuse kiiruse viga) kujul. TVE, FE ja RFE on arvatud peatükis 2.1 toodud valemiste alusel. Dünaamilises katses on vajalik hinnata ka mõõtmiste reaktsiooniaega. Faasimõõtmistel on reaktsiooniaeg ajavahemik, mis faasimõõteseadmel ühest staatilisest olukorrast teise jõudmiseks. Käesolevas töös on reaktsiooniaeg mõõdetud ajavahemikuna alates faasimõõteseadmekohta TVE väljumisest 1% piiridest kuni TVE naasmiseni ja jäämiseni 1% piiridesse. Nimetatud suurused on arvatud referentsfaasori suhtes. Faasimõõteseadmekohta katsetati dünaamilises testis kahel edastamissagedusel: 10 fps ja 50 fps. Mõlemal edastamissagedusel testiti kokku kaheksa erinevat sättegrupp. Tulemuste analüüsis on ühe faasimõõteseadmekohta sättegruppide omavaheline võrdlus, mille alusel hinnatakse sättegruppide sobivust dünaamilises testis simuleeritud sündmuse mõõtmiseks. Analüüsis on ka hinnatud üksikute sätete mõju mõõtetulemustele.

#### 4.1.1 Referentssuurused

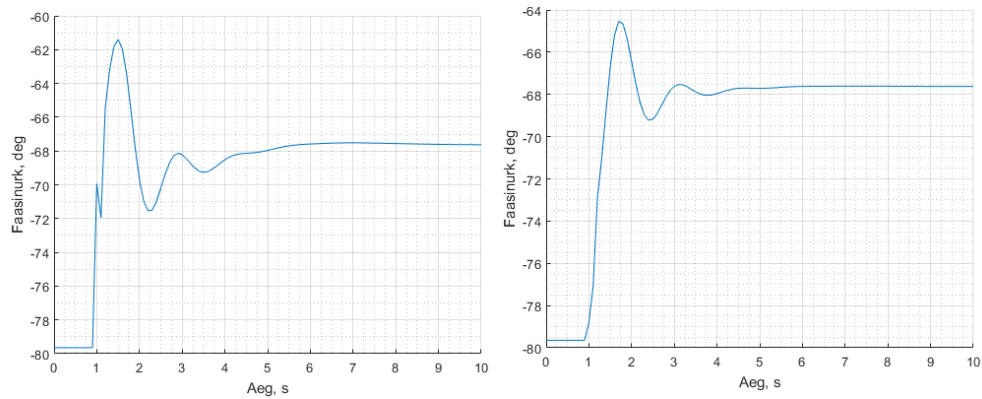
Käesolevas alapeatükis on referentssuuruse pinged, voolud, sagedused ja sageduse muutuse kiiruse graafikud nii kolmefaasilise kui ka ühefaasilise lühise korral. Esitatud on referentssuurused edastamissageduse 10 fps-i kohta illustreerimaks testi vältel aset leidnud muutusi. Dünaamilise testi katsete analüüs on läbi viidud ka edastamissagedusel 50 fps-i, kus referentsina on kasutatud samal edastamissagedusel referentsfaasori väärtusi.

Joonisel 3.1 on faasipinge efektiivväärtus dünaamilises katses kolmefaasilise (joonisel vasakul) ja ühefaasilise lühise (joonisel paremal) korral.



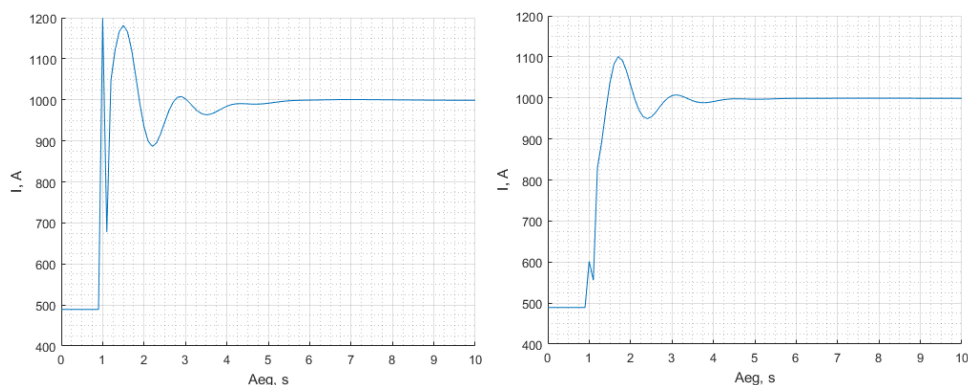
**Joonis 4.1. Referentsfaasori pinge efektiivväärtus kolmefaasilisel (vasakul) ja ühefaasilisel (paremal) lühisel**

Joonisel 3.2 on faasi ja maa vahelise pinge faasinurga referentssuurus dünaamilises katses kolmefaasilise (graafikul vasakul) ja ühefaasilise lühise (graafikul paremal) korral.



**Joonis 4.2. Referentsfaasori pinge faasinurk kolmefaasilisel (vasakul) ja ühefaasilisel (paremal) lühisel**

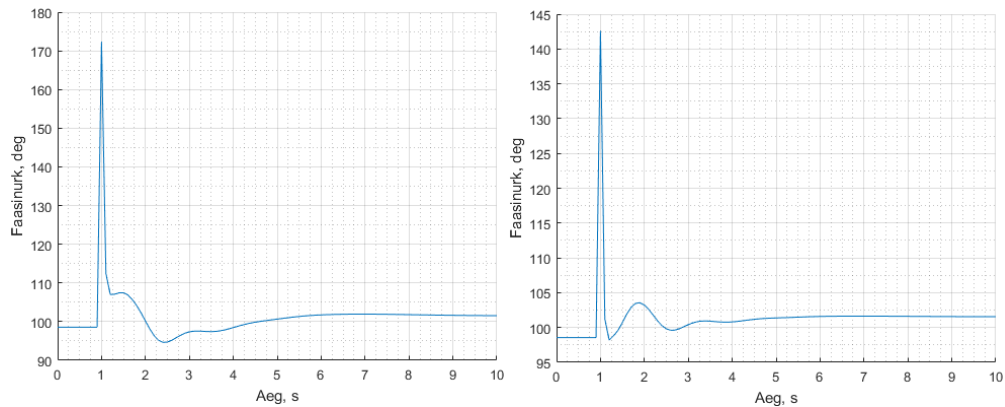
Joonisel 3.3 on referentsfaasori voolutugevuse efektiivväärtus dünaamilises katses kolmefaasilise (vasakul) ja ühefaasilise (paremal) lühise korral.



**Joonis 4.3. Referentsfaasori voolutugevuse efektiivväärtus kolmefaasilisel (vasakul) ja ühefaasilisel (paremal) lühisel**

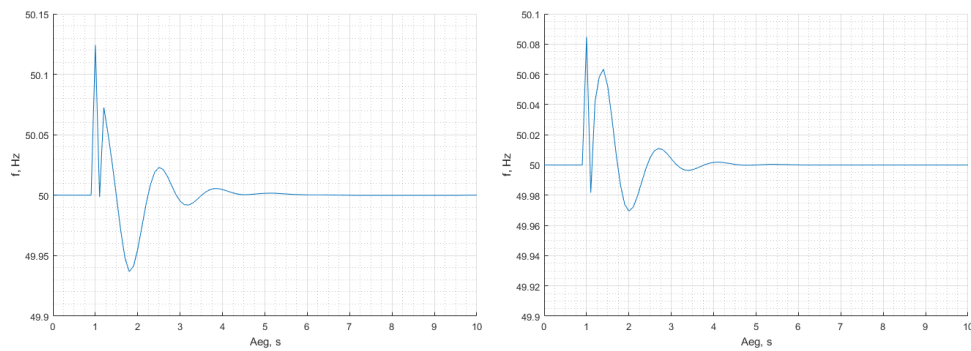


Joonisel 3.4 on referentsfaasori voolutugevuse faasinurk dünaamilises katses kolmefaasilise (vasakul) ja ühefaasilise (paremal) lühise korral.



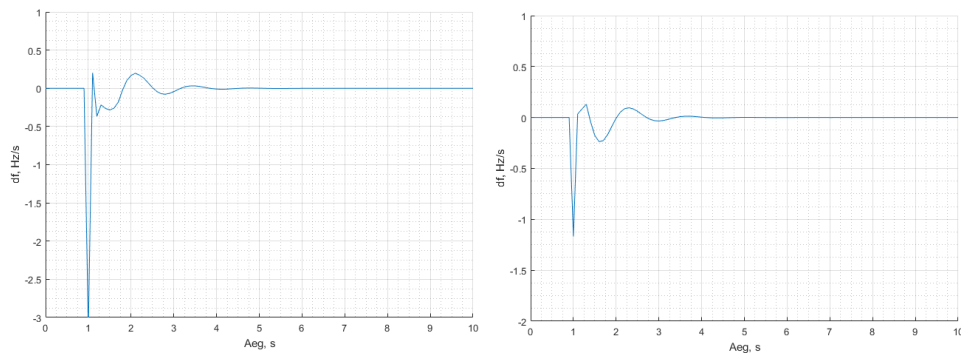
**Joonis 4.4. Referentsfaasori voolutugevuse faasinurk kolmefaasilisel (vasakul) ja ühefaasilisel (paremal) lühisel**

Joonisel 3.5 on referentsagedus dünaamilises katses kolmefaasilisel (vasakul) ja ühefaasilisel (paremal) lühisel.



**Joonis 4.5. Referentsagedus kolmefaasilisel (vasakul) ja ühefaasilisel (paremal) lühisel**

Joonisel 3.6 on sageduse muutuse kiiruse referents dünaamilises katses kolmefaasilisel (vasakul) ja ühefaasilisel (paremal) lühisel.



**Joonis 4.6 Sageduse muutuse kiiruse referents kolmefaasilisel (vasakul) ja ühefaasilisel (paremal) lühisel**

Dünaamilise katse referentssuurused on toodud 10 s ajavahemikus. Katse algab staatilise olukorraga. Lühis korraldatakse 1 s pärast katse algust, mille tagajärjel esineb pinges, voolutugevuses, sageduses ja sageduse muutuse kiiruses järsk hüpe. 200 ms pärast lühise algust lülitatakse välja liin, mille peal lühis toimus ning lühis kõrvaldatakse. Pärast kirjeldatud sündmusi esineb pinges, voolus, sageduses ja sageduse muutuse kiiruses võnkumised, mis sumbuvad ligikaudu 4 s pärast (5 s pärast katse algust). Katse lõpus on jällegi staatiline olukord uute talitlusparameetritega.

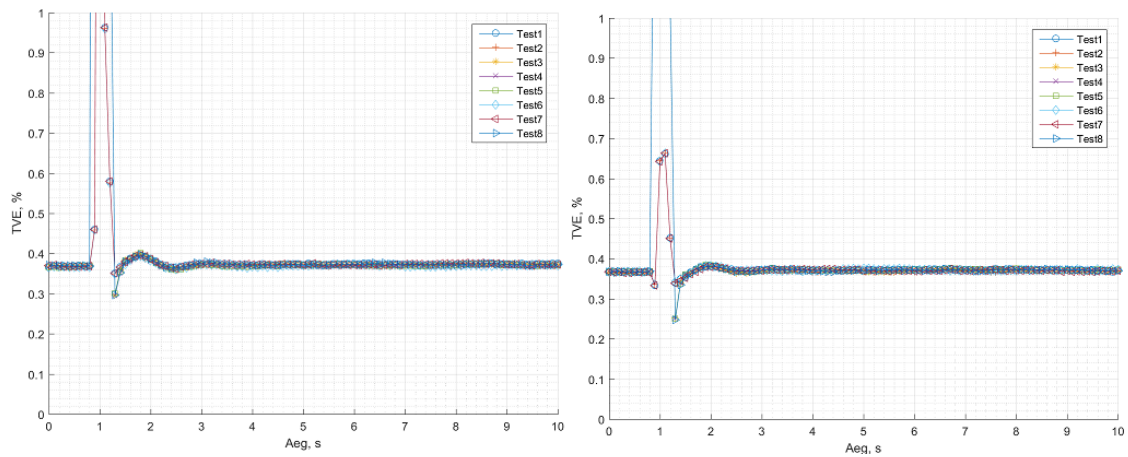
#### 4.1.2 PMU1 dünaamilise testi tulemused ja analüüs

PMU1 dünaamilise testi tulemused ja analüüs on toodud alljärgnevas alapeatükis. Toodud on joonised pinge ja voolutugevuse TVE ning sageduse ja sageduse muutuse kiiruse vea kohta. Lisaks on toodud pinge ja voolutugevuse reaktsiooniajad lühise korral. Hinnatud on erinevate sättegruppide mõju mõõteveale. Tabelis 3.1 on kaheksa testitud sättegruppi edastamissagedusel 10 fps.

**Tabel 4.1. PMU1 sättegruppid dünaamilise testi ajal (edastamissagedus 10 fps)**

Sättegrupp	Filter (F – kiire, N – kitsas)	Sageduse põhine kompenseerimine (Y – sisse lülitatud, N – välja lülitatud)	Sageduse muutuse kiiruse algoritm (S – aeglane, F – kiire)
Test1	F	Y	S
Test2	F	N	S
Test3	N	Y	S
Test4	N	N	S
Test5	N	N	F
Test6	F	N	F
Test7	F	Y	F
Test8	N	Y	F

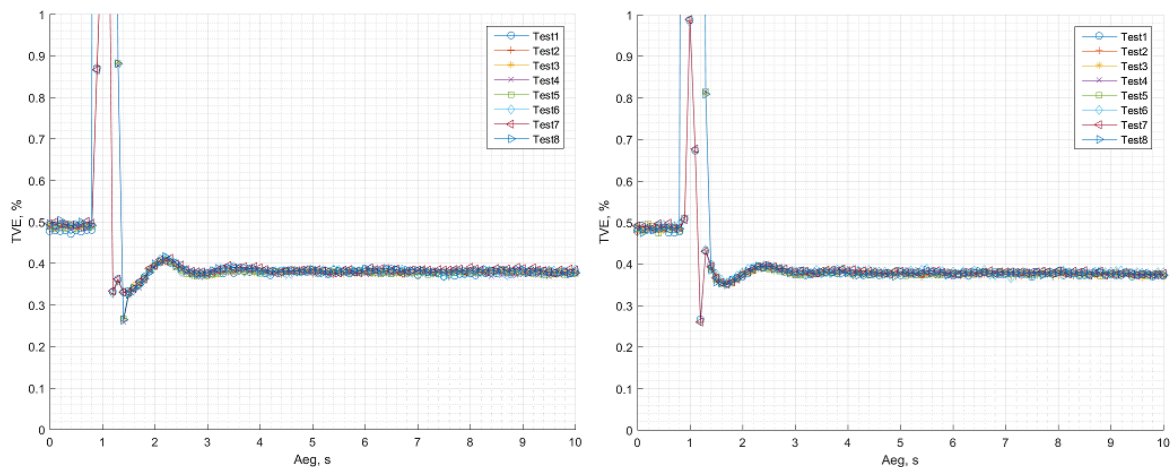
Joonisel 3.7 on PMU1 pinge TVE dünaamilise testi ajal nii kolmefaasilise (vasakul) kui ka ühefaasilise (paremal) lühise korral.



**Joonis 4.7. PMU1 ping TVE dünaamilises testis edastamissagedusel 10 fps (kolmefaasiline lühis vasakul, ühefaasiline lühis paremal)**

Jooniselt 3.7 võib näha, et PMU1 ping TVE on mõlema lühise liigi puhul sarnase veaga referentsfaasori suhtes. Ühefaasilise lühise katses on filtri sättega N ping TVE terve katse vältel alla 0,5%, kaasa arvatud lühise ajal. Mõningate sättegruppide ping TVE jäämine ka lühise ajal alla 1% viitab nende sättegruppidega mõõtmiste suurt sarnasust referentsfaasori mõõtmistele.

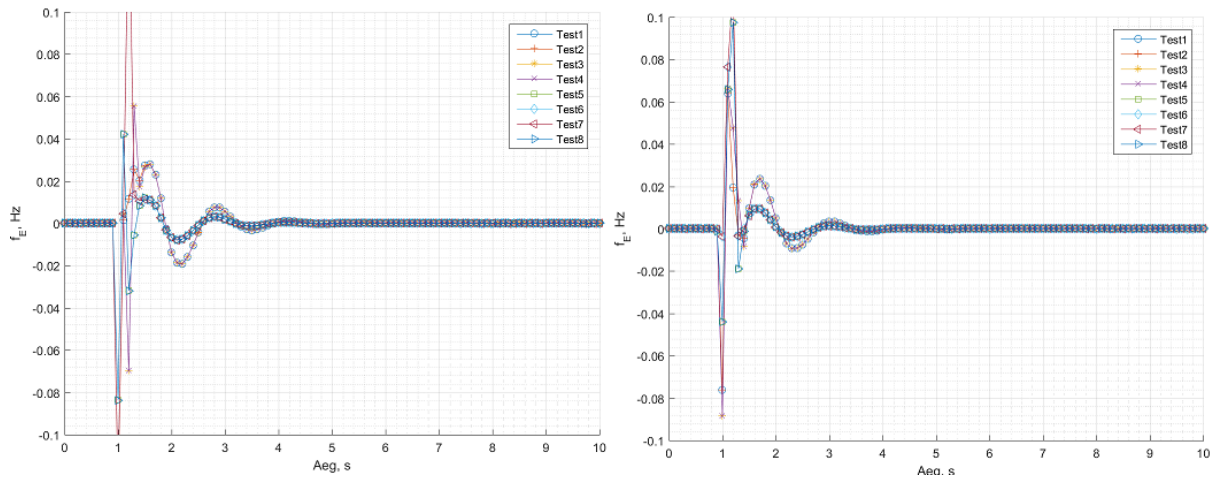
Joonisel 3.8 on PMU1 voolutugevuse TVE dünaamilise testi ajal (kolmefaasiline lühis vasakul, ühefaasiline lühis paremal).



**Joonis 4.8. PMU1 voolutugevuse TVE dünaamilises testis edastamissagedusel 10 fps (kolmefaasiline lühis vasakul, ühefaasiline lühis paremal)**

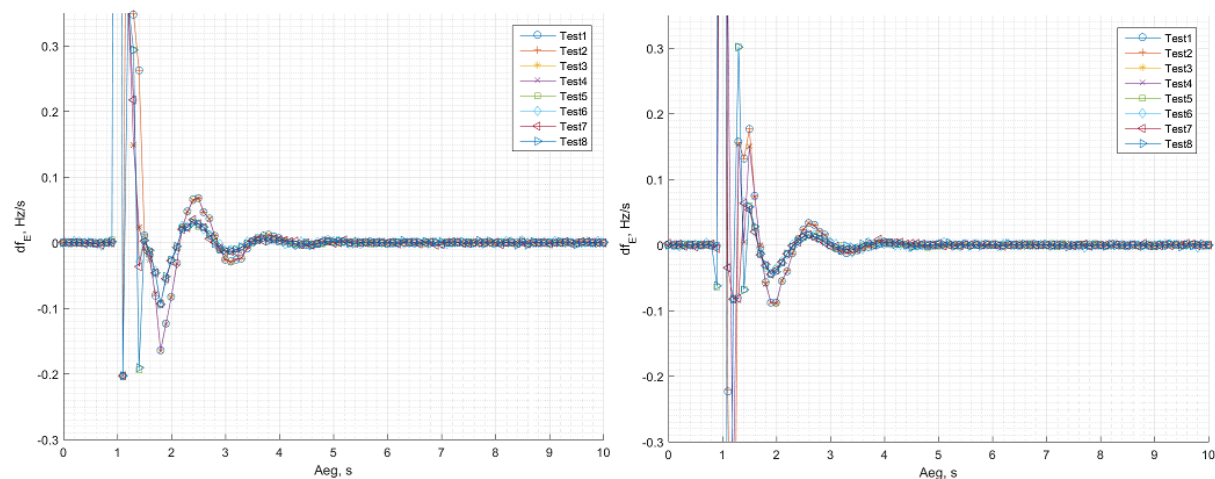
PMU1 voolu mõõtmine ei sõltu joonis 3.8 põhjal sättegruppidest. Kõikide sättegruppide korral on PMU1 voolu TVE samal tasemel. PMU1 ping TVE ei sõltunud samamoodi PMU1 sättestusest. PMU1 voolu TVE on joonise 3.8 põhjal enne lühist suurem kui pärast lühist. Lühise eelses staatilises olukorras oli voolutugevus kaks korda madalam, kui lühise järgselt. Mõõtevea

erinevus enne ja pärast lühist võib seetõttu olla põhjustatud A/D konverterist. Samas ainult nende katsetulemuste põhjal on seda ennatlik kindlalt väita. Joonisel 3.9 on PMU1 sageduse viga edastamissagedusel 10 fps.



**Joonis 4.9. PMU1 sageduse viga dünaamilises testis edastamissagedusel 10 fps (kolmefaasiline lühis vasakul, ühefaasiline lühis paremal)**

PMU1 sageduse muutuse kiiruse algoritmi sätte S suurendab joonis 3.9 põhjal sageduse viga referentsfaasori suhtes. Vea suurenemine on suhteliselt suur, ulatudes kuni kahekordse suurenemiseni. Viga võib tuleneda aeglasema algoritmi suuremast latentsusest, mis mõjutab ka sageduse arvutamise kiirust. Joonisel 3.10 on PMU1 sageduse muutuse kiiruse viga (RFE) vastavalt ühefaasilise ja kolmefaasilise lühise korral.



**Joonis 4.10. PMU1 sageduse muutuse kiiruse viga dünaamilises testis edastamissagedusel 10 fps (kolmefaasiline lühis vasakul, ühefaasiline lühis paremal)**

PMU1 sageduse muutuse kiiruse viga (RFE) sõltub oodatult sageduse muutuse kiiruse algoritmi valikust. Joonise 3.10 põhjal on suurem viga sätte S (aeglane algoritm) korral, ehk oodatult on

dünaamilises olukorras aeglasem algoritm ebatäpsem. Tabelis 3.2 on PMU1 pinge ja voolutugevuse mõõtmiste reaktsiooniajad kaheksa erineva sättegrupiga.

**Tabel 4.2. PMU1 sättegruppide reaktsiooniajad (10 fps)**

Sättegrupp	Reaktsiooniaeg, ms (Pinge TVE)		Reaktsiooniaeg, ms (Voolu TVE)	
	Ühefaasiline lühis	Kolmefaasiline lühis	Ühefaasiline lühis	Kolmefaasiline lühis
Test1	0	200	0	300
Test2	0	200	0	300
Test3	500	500	500	500
Test4	500	500	500	500
Test5	500	500	500	500
Test6	0	200	0	300
Test7	0	200	0	300
Test8	500	500	500	500

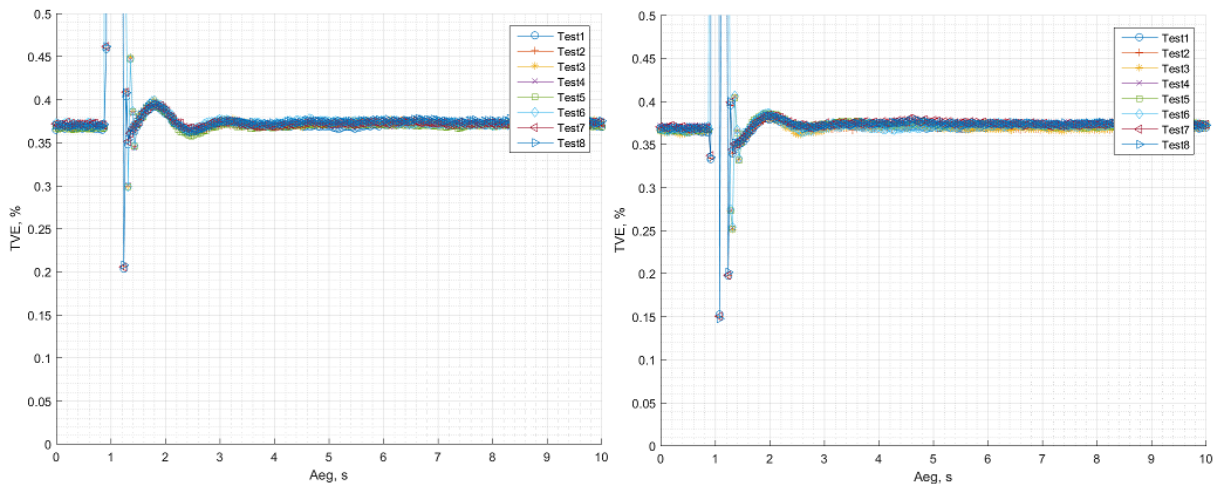
Tabelist 3.2 võib näha, et sättegruppidel test3, test4, test5 ja test8 on ülejäänud sättegruppidega võrreldes üle kahe korra suurem reaktsiooniaeg. Aeglasema reaktsioonijaga sättegrupid on filtri sättega N. Reaktsiooniaeg nimetatud filtri sättega oli olenemata lühise tüübist 500 ms. Filtri säte F reaktsiooniaeg ühefaasilisel lühisel oli null, ehk tema viga referentsfaasori suhtes ei ületanud 1%, ehk nagu eespool mainitud ilmselt on selle filtri sättega mõõtmised väga sarnased standardis [3] toodud klass P faasimõõteseadme mõõtmistega.

Tabelis 3.3 on PMU1 kaheksa sättegruppi dünaamilise testis edastamissagedusel 50 fps-i.

**Tabel 4.3. PMU1 sättegrupid dünaamilise testi ajal (edastamissagedus 50 fps)**

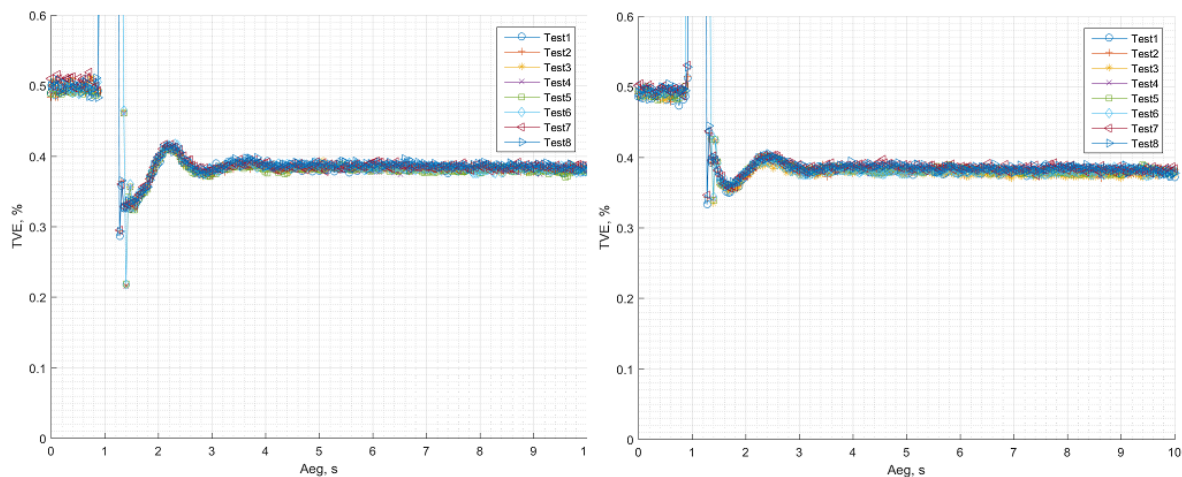
Sättegrupp	Filter (F – kiire, N – kitsas)	Sageduse põhine kompenseerimine (Y – sisse lülitatud, N – välja lülitatud)	Sageduse muutuse kiiruse algoritm (S – aeglane, F – kiire)
Test1	F	Y	S
Test2	F	N	S
Test3	N	Y	S
Test4	N	N	S
Test5	N	N	F
Test6	N	Y	F
Test7	F	N	F
Test8	F	Y	F

Joonisel 3.11 on PMU1 pinget TVE edastamissagedusel 50 fps (vasakul kolmeefaasiline lühis, paremal ühefaasiline lühis).



**Joonis 4.11. PMU1 pinget TVE dünaamilises testis edastamissagedusel 50 fps (kolmeefaasiline lühis vasakul, ühefaasiline lühis paremal)**

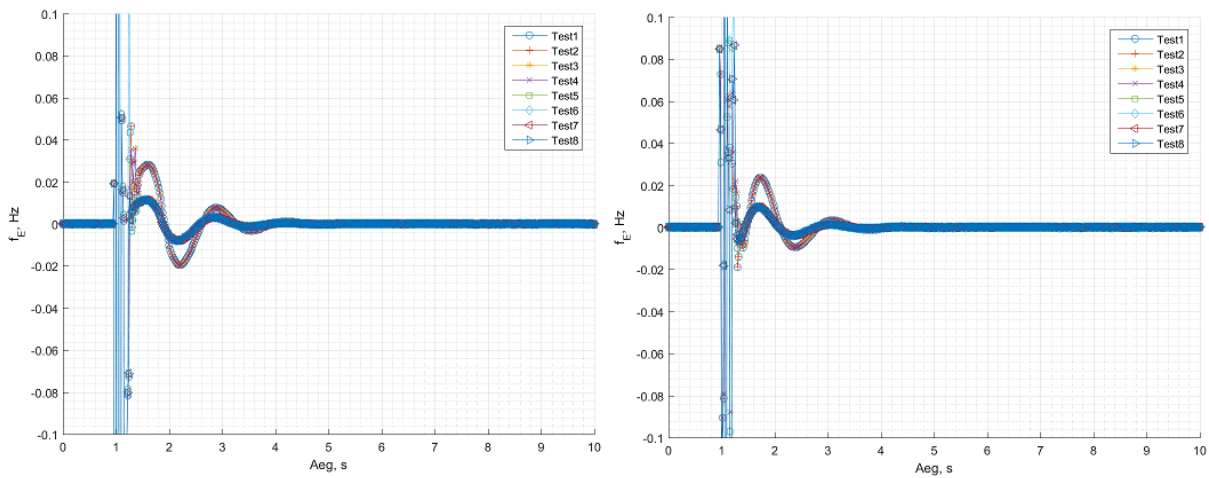
Joonis 3.11 on näha, et ka kõrgemal edastamissagedusel ei ole märgatavaid erinevusi sättegruppide vahel. PMU1 pinget TVE on kõrgemal edastamissagedusel ligikaudu samal tasemel kui madalamal edastamissagedusel. Joonisel 3.12 on PMU1 voolutugevuse TVE edastamissagedusel 50 fps-i (vasakul kolmeefaasiline lühis, paremal ühefaasiline lühis).



**Joonis 4.12. PMU1 voolutugevuse TVE dünaamilises testis edastamissagedusel 50 fps (kolmeefaasiline lühis vasakul, ühefaasiline lühis paremal)**

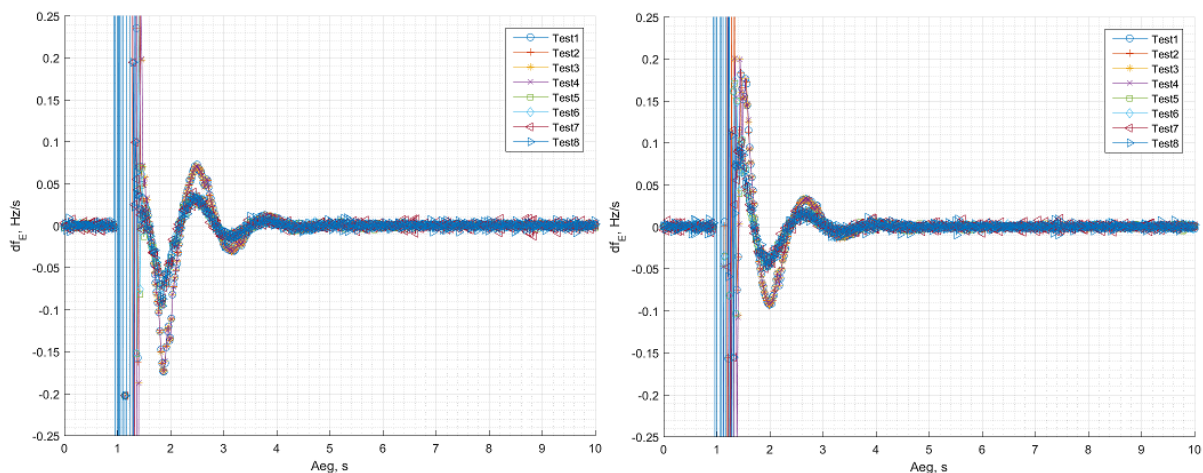
Joonisel 3.12 toodud PMU1 voolutugevuse TVE ei oma erinevusi sättegruppide vahel. Sarnane käitumine PMU1 voolutugevuse TVE-s oli ka madalamal edastamissagedusel. Joonisel 3.12 on lühise järgselt voolu TVE väiksem kui lühise eelselt. Selline olukord oli ka madalamal edastamissagedusel. PMU1 voolutugevuse TVE on mõlemal edastamissagedusel ligikaudu

sama suur. Joonisel 3.13 on PMU1 sageduse viga dünaamilises testis edastamissagedusel 50 fps-i (vasakul kolmefaasiline lühis, paremal ühefaasiline lühis).



**Joonis 4.13. PMU1 sageduse viga dünaamilises testis edastamissagedusel 50 fps (kolmefaasiline lühis vasakul, ühefaasiline lühis paremal)**

Joonisel 3.13 on näha, et sarnaselt madalamale edastamissagedusele on PMU1 sageduse viga sõltuv sageduse muutuse kiiruse algoritmist. Sageduse muutuse kiiruse algoritmi sättel S on sageduse viga üle kahe korra suurem kui sättel F. Sageduse viga ei ole jooniste 3.9 ja 3.13 põhjal sõltuv edastamissagedusest. Mõlemal edastamissagedusel on sageduse viga ligikaudu sama suur. Joonisel 3.14 on PMU1 sageduse muutuse kiiruse viga edastamissagedusel 50 fps-i (vasakul kolmefaasiline lühis, paremal ühefaasiline lühis).



**Joonis 4.14. PMU1 sageduse muutuse viga dünaamilises testis edastamissagedusel 50 fps (kolmefaasiline lühis vasakul, ühefaasiline lühis paremal)**

PMU1 sageduse muutuse kiiruse viga on ka kõrgemal edastamissagedusel sõltuv sageduse muutuse kiiruse algoritmist. Sageduse muutuse kiiruse algoritmi sätte S korral on viga üle kahe korra suurem kui sätte F korral. Kõrgemal edastamissagedusel ei ole sageduse muutuse kiiruse

viga muutunud võrreldes madalama edastamissagedusega. Tabelis 3.4 on PMU1 sättegruppide reaktsiooniajad edastamissagedusel 50 fps-i.

**Tabel 4.4. PMU1 sättegruppide reaktsiooniajad (50 fps)**

Sättegrupp	Reaktsiooniaeg, ms (Pinge TVE)		Reaktsiooniaeg, ms (Voolutugevuse TVE)	
	Ühefaasiline lühis	Kolmefaasiline lühis	Ühefaasiline lühis	Kolmefaasiline lühis
<b>Test1</b>	180	280	280	300
<b>Test2</b>	180	280	280	300
<b>Test3</b>	300	300	340	340
<b>Test4</b>	300	300	340	340
<b>Test5</b>	300	300	340	340
<b>Test6</b>	300	300	340	340
<b>Test7</b>	180	280	280	300
<b>Test8</b>	180	280	280	300

Tabelis 3.4 jagunevad PMU1 sättegruppid reaktsiooniaja põhjal kaheks. Filtri sättega F sättegruppid (test1, test2, test7 ja test8) on lühema reaktsioonijaga ning filtri sättega N sättegruppid (test3, test4, test5 ja test6) on pikema reaktsioonijaga (tabel 3.4). Kahe filtri sätte reaktsioonijaga vahe on tabel 3.4 põhjal maksimaalselt 120 ms (pinge mõõtmised ühefaasilisel lühisel). Kahe filtri sätte reaktsioonijaga vahe kolmefaasilisel lühisel on praktiliselt minimaalne. Kõrgema edastamissageduse kasutamisega on reaktsiooniajad osaliselt vähenenud. Vähenemine ei ole toimunud kõikides sättegruppides. Filtri sättega F on reaktsioonijad kahel edastamissagedusel sarnased. Filtri sätte N kasutamine on kõrgemal edastamissagedusel vähendanud reaktsioonijaga ligikaudu 200 ms võrra.

PMU1 dünaamilise testi mõõtetulemusi ei mõjutanud praktiliselt üldse sageduse põhise kompenseerimise säte. Põhjuseks võib olla sageduse liiga väike hälve nimisagedusest, mistõttu kompenseerimata mõõtmiste viga on vähemärgatav. Kompenseerimise kasutamine samas ei suurendanud mõõtmiste reaktsioonijaga.



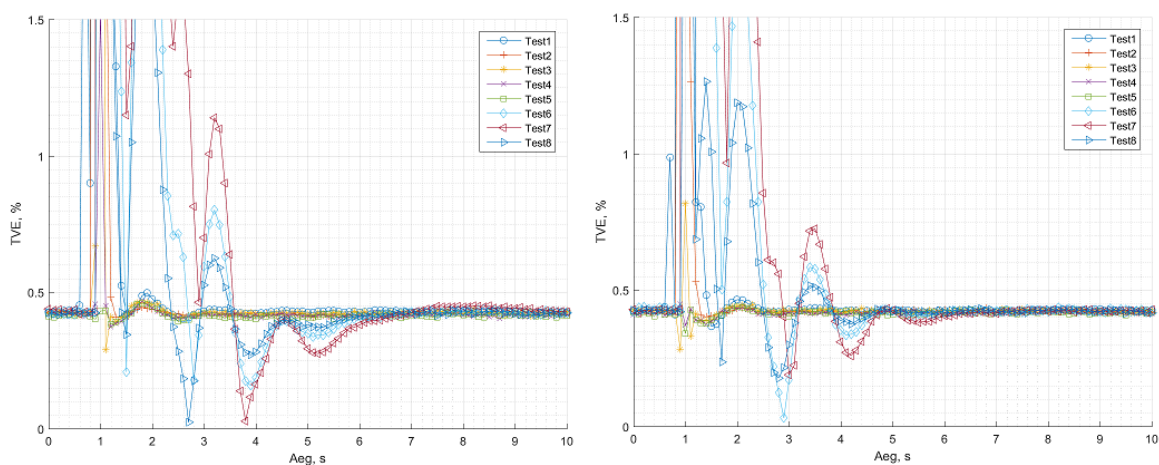
### 4.1.3 PMU2 dünaamilise testi tulemused ja analüüs

PMU2 dünaamilise testi tulemused ja analüüs on toodud alljärgnevas alapeatükis. Tabelis 3.5 on PMU2 kaheksa sättegruppi dünaamilises testis edastamissagedusel 10 fps.

**Tabel 4.5. PMU2 sättestus dünaamilise testi ajal (10 fps)**

Sättegrupp	Filter	Ajamärgise asukoht andmeaknas
<b>Test1</b>	12/10	Keskel
<b>Test2</b>	30/25	Keskel
<b>Test3</b>	60/50	Keskel
<b>Test4</b>	120/100	Keskel
<b>Test5</b>	240/200	Keskel
<b>Test6</b>	60/50	Alguses
<b>Test7</b>	30/25	Alguses
<b>Test8</b>	120/100	Alguses

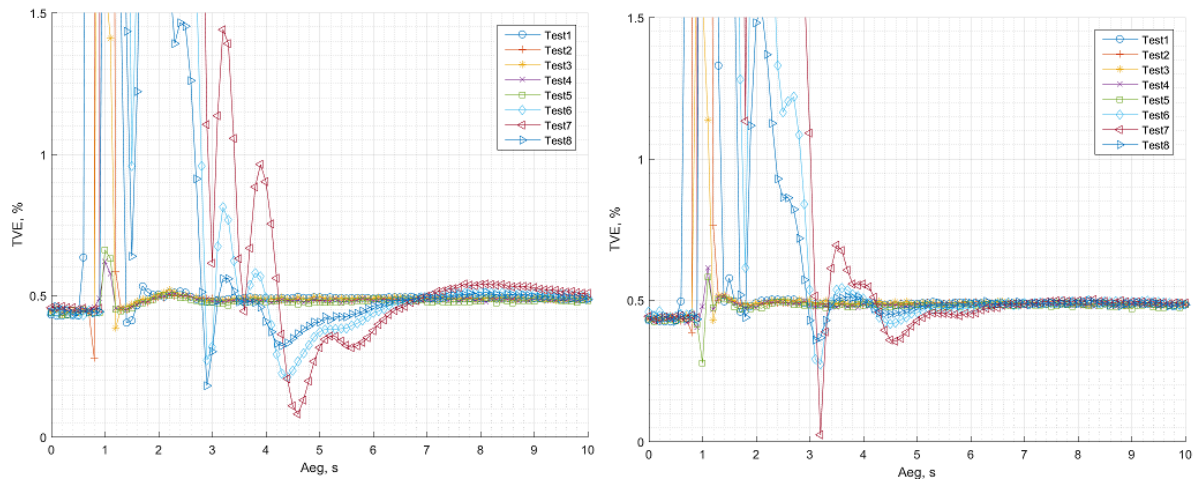
Joonisel 3.15 on PMU2 pinget TVE dünaamilise testi ajal (vasakul kolme faasiline lühis, paremal ühefaasiline lühis).



**Joonis 4.15. PMU2 pinget TVE dünaamilises testis edastamissagedusel 10 fps (kolme faasiline lühis vasakul, ühefaasiline lühis paremal)**

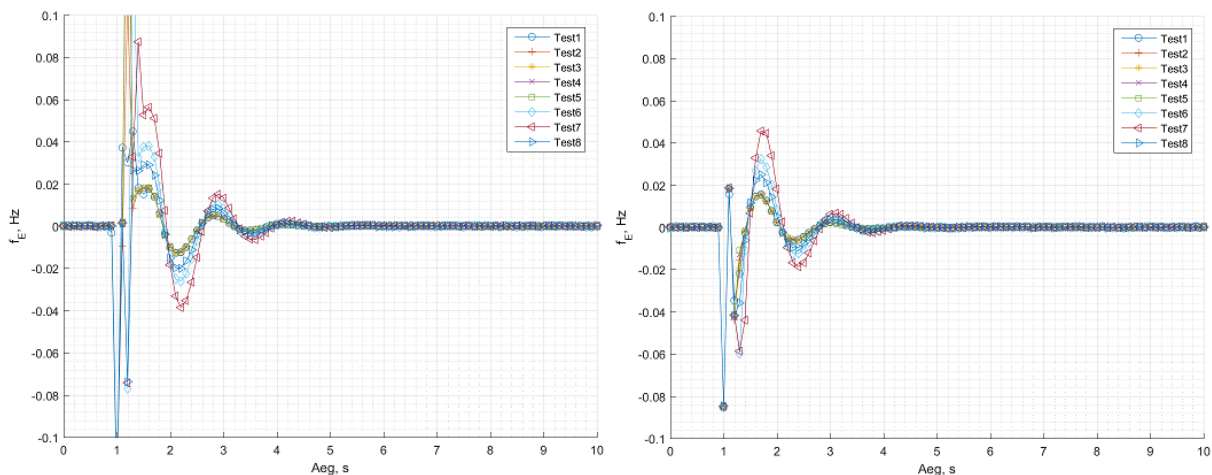
Joonisel 3.15 on näha, et PMU2 pinget mõõtmised on suuresti mõjutatud andmeakna paiknemisest ajamärgise suhtes (sättegrupid test6, test7 ja test8). Pinget mõõtmiste viga suureneb nimetatud sättegruppide korral märgatavalt. Standardis IEEE C37.118.1 on määratud andmeakna paiknemine ajamärgise suhtes sümmeetriliselt keskel, ehk sisuliselt ei ole sellise sättega mõõtmised standardile vastavad. Kuna referentsfaasori mõõtmistel oli ajamärgise andmeakna keskel, siis tõenäoliselt on suur mõõteviga põhjustatud sama ajamärgisega

mõõtmiste erinev paiknemine ajas. Joonisel 3.16 on PMU2 voolutugevuse TVE dünaamilise testi ajal (kolmefaasiline lühis vasakul, ühefaasiline lühis paremal).



**Joonis 4.16. PMU2 voolutugevuse TVE dünaamilises testis edastamissagedusel 10 fps (kolmefaasiline lühis vasakul, ühefaasiline lühis paremal)**

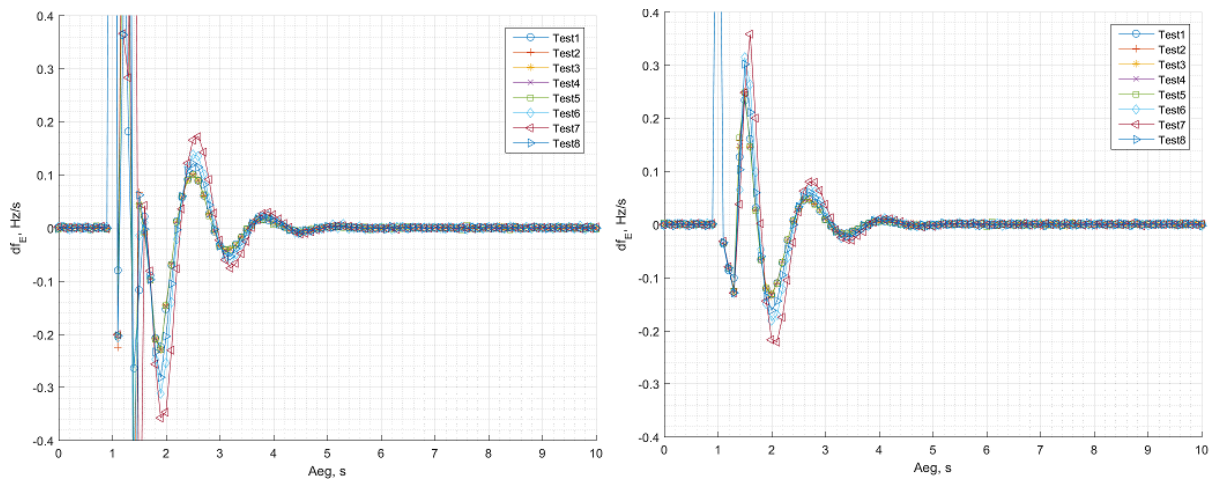
PMU2 voolutugevuse TVE suureneb kolme sättegrupi korral märgatavalt. Sättegruppideks on sarnaselt pinge mõõtmistele test6, test7 ja test8, ehk siis mõõtmised ajamärgisega andmeakna alguses. Lühise järgselt PMU2 voolutugevuse TVE mõnevõrra suureneb võrreldes lühise eelse olukorraga. PMU1 voolutugevuse mõõteviga omas vastupidist käitumist, mistõttu on raske sellist käitumist seletada. Joonisel 3.17 on PMU2 sageduse viga edastamissagedusel 10 fps-i (kolmefaasiline lühis vasakul, ühefaasiline paremal).



**Joonis 4.17. PMU2 sageduse viga dünaamilises testis edastamissagedusel 10 fps (kolmefaasiline lühis vasakul, ühefaasiline lühis paremal)**

PMU2 sageduse viga suureneb sarnaselt pinge ja voolu TVE-le sättegruppide test6, test7 ja test8 korral. Sageduse vea suurenemine test7 ning esimese viie testi vahel on ligikaudu kolm korda. Sättegrupp test7 on ajamärgisega andmeakna alguses ja filtriga 30/25 (kõige suurema

latentsusega filter). Joonisel 3.18 on PMU2 sageduse muutuse kiiruse viga edastamissagedusel 10 fps-i.



**Joonis 4.18. PMU2 sageduse muutuse viga dünaamilises testis edastamissagedusel 10 fps (kolmefaasiline lühis vasakul, ühefaasiline lühis paremal)**

PMU2 sageduse muutuse kiiruse viga sättegruppide test6, test7 ja test8 korral kõrgem kui ülejäänud sättegruppide puhul. Samade sättegruppide puhul on ka pinge ja voolu TVE ning sageduse viga ülejäänud sättegruppidest suurem. Nimetatud sättegruppide sageduse muutuse kiiruse viga erinevus ülejäänud sättegruppidest on samas väiksem kui pinge ja voolu TVE ning sageduse viga korral. Tabelis 3.6 on PMU2 pinge ja voolu TVE reaktsiooniajad kaheksa sättegrupiga.

**Tabel 4.6. PMU2 sättegruppide reaktsiooniajad (10 fps)**

Sättegrupp	Reaktsiooniaeg, ms (Pinge TVE)		Reaktsiooniaeg, ms (Voolu TVE)	
	Ühefaasiline lühis	Kolmefaasiline lühis	Ühefaasiline lühis	Kolmefaasiline lühis
Test1	400	800	800	800
Test2	400	400	400	400
Test3	0	200	400	400
Test4	0	200	0	0
Test5	0	0	0	0
Test6	1500	1400	2000	1900
Test7	1600	2500	2200	2600
Test8	1400	1300	1500	1800

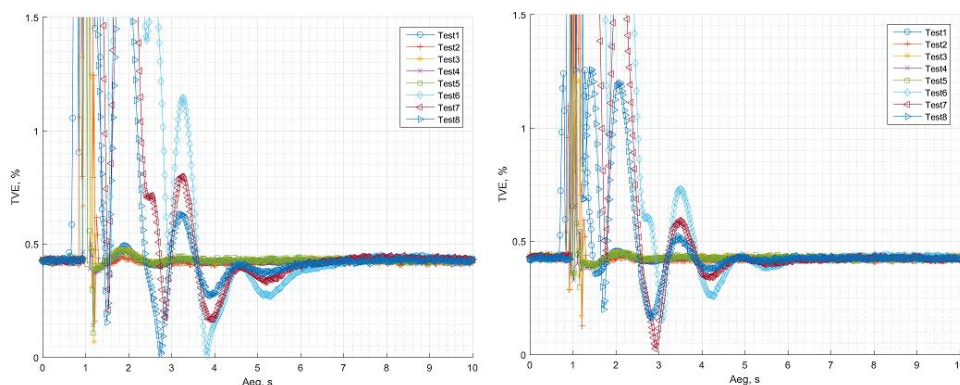
Tabel 3.6 kinnitab eespool täheldatud sättegruppide test6, test7 ja test8 suurt erinevust ülejäänud sättegruppidega võrreldes. Nimetatud sättegruppide reaktsiooniajad ulatuvad alates 1,3 s kuni 2,6 s, mis on isegi käesoleva katse ekstreemsetes tingimustes lubamatult palju. Ülejäänud sättegruppides sõltub reaktsiooniaeg filtri sättest. Madalalamatele edastamissagedustele mõeldud filtrid on oodatult pikema reaktsiooniajaga ning kõrgematele edastamissagedustele mõeldud filtrid on oodatult lühema reaktsiooniajaga. Test4 ja test5 sättegrupid (vastavalt filtri säte 120/100 ja 240/200) olid katses olematu reaktsiooniajaga praktiliselt kõikidel juhtudel, seega võib arvata, et käsitletud sättegrupid on väga sarnase käitumisega referentsfaasori mudeliga võrreldes.

Tabelis 3.7 on PMU2 kaheksa sättegruppi dünaamilise testi ajal edastamissagedusel 50 fps-i.

**Tabel 4.7. PMU2 sättegrupid dünaamilise testi ajal (50 fps)**

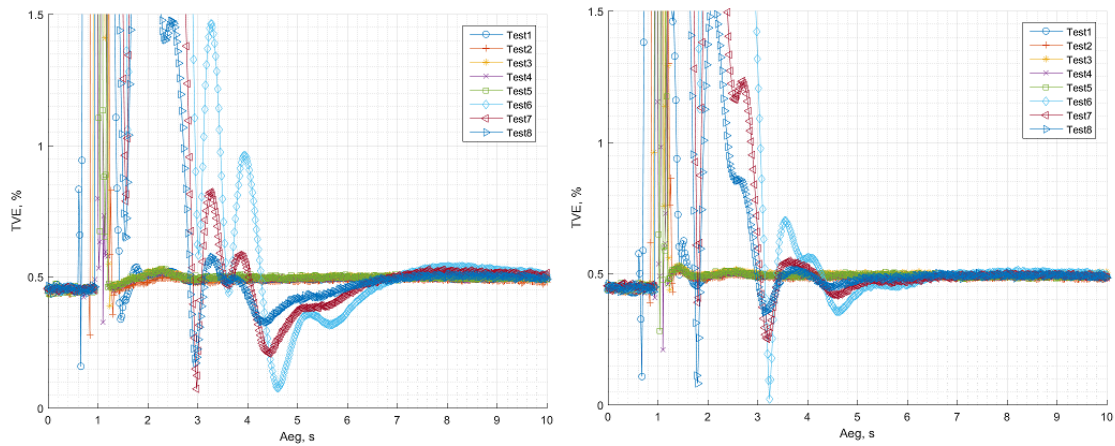
Sättegrupp	Filter	Ajamärgise asukoht andmeaknas
<b>Test1</b>	12/10	Keskel
<b>Test2</b>	30/25	Keskel
<b>Test3</b>	60/50	Keskel
<b>Test4</b>	120/100	Keskel
<b>Test5</b>	240/200	Keskel
<b>Test6</b>	30/25	Alguses
<b>Test7</b>	60/50	Alguses
<b>Test8</b>	120/100	Alguses

Joonisel 3.19 on PMU2 pinge TVE edastamissagedusel 50 fps-i (vasakul kolmefaasiline lühis, paremal ühefaasiline lühis).



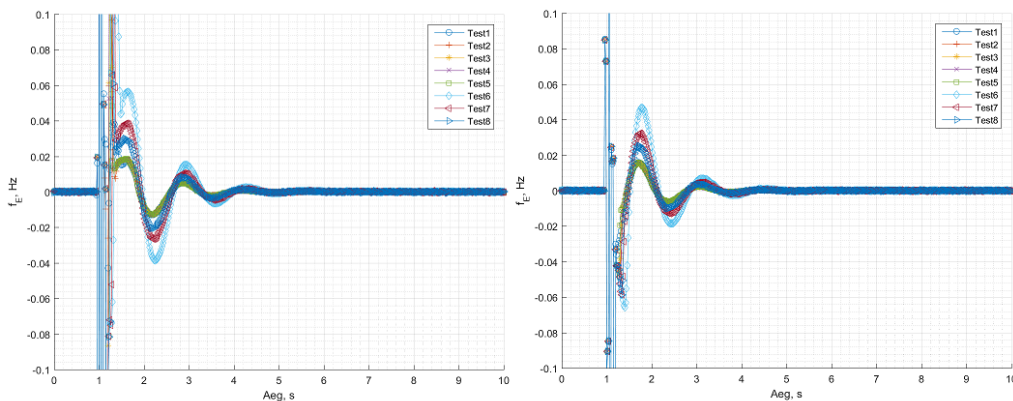
**Joonis 4.19. PMU2 pinge TVE dünaamilises testis edastamissagedusel 50 fps (kolmefaasiline lühis vasakul, ühefaasiline lühis paremal)**

Joonisel 3.19 on näha, et ka kõrgemal edastamissagedusel on PMU2 pinge mõõtetäpsus halb, kui kasutatud on sättegrupe test6, test7 ja test8. Kõrgema edastamissageduse kasutamisega ei muutu pinge mõõteviga. Kõrgemal edastamissagedusel on sättegruppide test6, test7 ja test8 TVE võnkumised võrrelduna madalama edastamissagedusega sama suured. Joonisel 3.20 on PMU2 voolu TVE edastamissagedusel 50 fps-i (vasakul kolmefaasiline lühis, paremal ühefaasiline lühis).



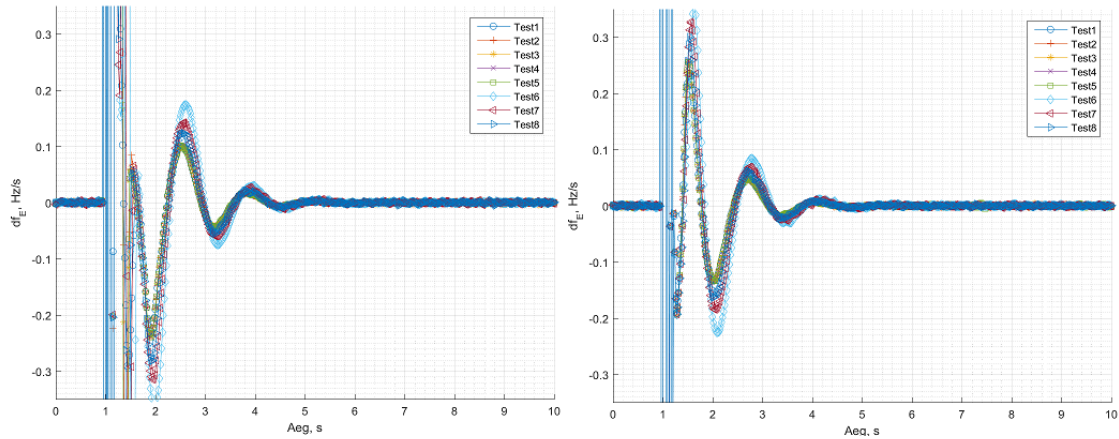
**Joonis 4.20. PMU2 voolutugevuse TVE dünaamilises testis edastamissagedusel 50 fps (kolmefaasiline lühis vasakul, ühefaasiline lühis paremal)**

PMU2 voolutugevuse TVE on kõrgemal edastamissagedusel samal tasemel võrreldes madalama edastamissagedusega. Voolutugevuse TVE-s on sarnaselt eelnevatele joonistele kolm ülejäänutest eristuvat sättegruppi (test6, test7 ja test8). Voolutugevuse TVE tõuseb lühise järgses staatilises olukorras võrreldes lühise eelse staatilise olukorraga. Joonisel 3.21 on PMU2 sageduse viga edastamissagedusel 50 fps-i (vasakul kolmefaasiline lühis, paremal ühefaasiline lühis).



**Joonis 4.21. PMU2 sageduse viga dünaamilises testis edastamissagedusel 50 fps (kolmefaasiline lühis vasakul, ühefaasiline lühis paremal)**

PMU2 sageduse veas esineb sarnaselt pingele (joonis 3.19) ja voolule (joonis 3.20) kolme sättegrupiga (test6, test7 ja test8) märgatav mõõteviga. Kõrgemal edastamissagedusel ei esine sageduse vea suuruses muutusi võrreldes madalama edastamissagedusega. Joonisel 3.22 on PMU2 sageduse muutuse kiiruse viga edastamissagedusel 50 fps-i (vasakul kolmefaasiline lühis, paremal ühefaasiline lühis).



**Joonis 4.22. PMU2 sageduse muutuse kiiruse viga dünaamilises testis edastamissagedusel 50 fps (kolmefaasiline lühis vasakul, ühefaasiline lühis paremal)**

Sageduse muutuse kiiruse viga edastamissagedusel 50 fps on sarnane sageduse muutuse kiiruse veaga madalamal edastamissagedusel. Sättegruppide test6, test7 ja test8 mõõteviga on kõrgem kui ülejäänud sättegruppidel, samas on sageduse muutuse kiiruse viga erinevus ülejäänud sättegruppidest väiksem võrreldes teiste mõõtevigaadega. Tabelis 3.8 on toodud PMU2 erinevate sättegruppide reaktsiooniajad edastamissagedusel 50 fps-i.

**Tabel 4.8. PMU2 sättegruppide reaktsiooniajad (50 fps)**

Sättegrupp	Reaktsiooniaeg, ms (Pingele TVE)		Reaktsiooniaeg, ms (Voolule TVE)	
	Ühefaasiline lühis	Kolmefaasiline lühis	Ühefaasiline lühis	Kolmefaasiline lühis
<b>Test1</b>	600	680	680	700
<b>Test2</b>	260	380	380	400
<b>Test3</b>	240	280	300	320
<b>Test4</b>	140	160	260	260
<b>Test5</b>	140	160	260	260
<b>Test6</b>	2580	2460	2120	2520
<b>Test7</b>	1460	1380	1960	1920
<b>Test8</b>	1320	1280	1460	1780

Tabelist 3.8 on näha, et test6, test7 ja test8 on reaktsiooniaegadega 1,28 s kuni 2,58 s. Madalamal edastamissagedusel (tabel 3.6) olid samade sättegruppide reaktsiooniajad praktiliselt samad. Ülejäänutel sättegruppidel on reaktsiooniajad 0,16 s kuni 0,7 s. Need reaktsiooniajad on jällegi suhteliselt sarnased madalamal edastamissageduse reaktsiooniaegadega. Erandiks on test4 ja test5, kus reaktsiooniaeg ei ole enam 0.

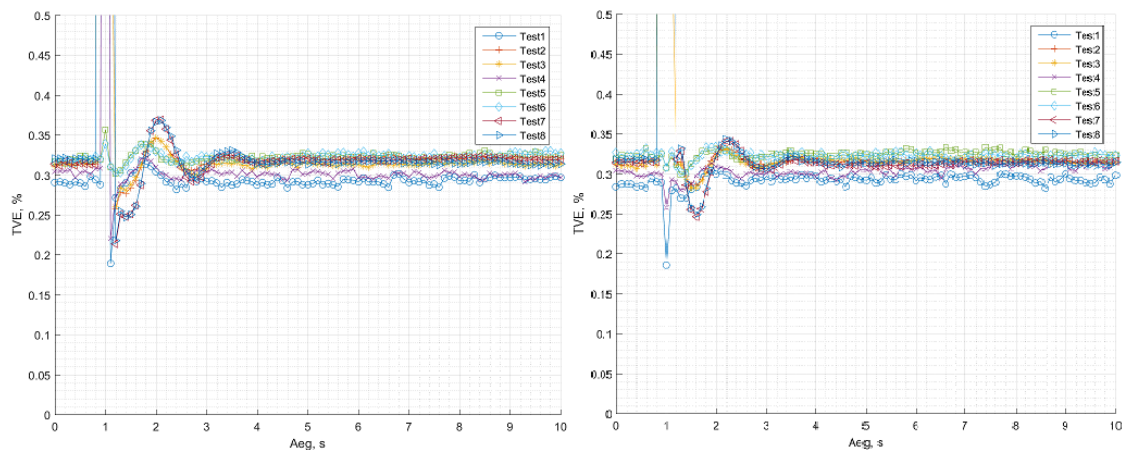
#### 4.1.4 PMU3 dünaamilise testi tulemused ja analüüs

PMU3 dünaamilise testi tulemused on toodud alljärgnevas peatükis. Tabelis 3.9 on PMU3 kaheksa sättegruppi edastamissagedusel 10 fps-i.

**Tabel 4.9. PMU3 sättegrupid dünaamilise testi ajal (10 fps)**

Sättegrupp	Filter	Sageduse põhine kompenseerimine	Andmeakna pikkus
Test1	Hamming	$\pm 2\text{Hz}$	1
Test2	Hamming	$\pm 2\text{Hz}$	5
Test3	Hamming	Väljas	5
Test4	Hamming	Väljas	1
Test5	Ristkülik	Väljas	1
Test6	Ristkülik	$\pm 2\text{Hz}$	1
Test7	Ristkülik	Väljas	5
Test8	Ristkülik	$\pm 2\text{Hz}$	5

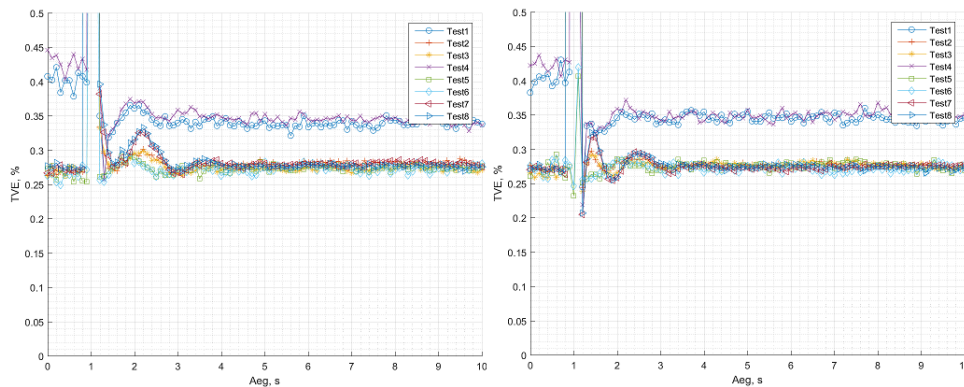
Joonisel 3.23 on PMU3 pinget TVE dünaamilise testi ajal (vasakul kolmefaasiline lühis, paremal ühefaasiline lühis).



**Joonis 4.23. PMU3 pinget TVE dünaamilises testis edastamissagedusel 10 fps (kolmefaasiline lühis vasakul, ühefaasiline lühis paremal)**

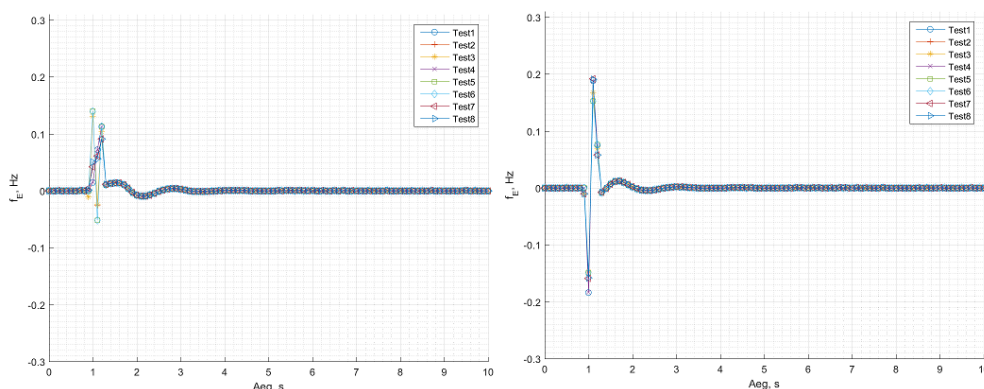
Joonisel 3.23 on näha, et lühise järgselt esineb sättegruppide test7 ja test8 tulemustes ülejäänutega võrreldes mõnevõrra suurem TVE võnkumine. Sättegrupid test7 ja test8 on

ristküliku kujulise filtriga ja andmeakna pikkusega 5 perioodi. Sättegruppide vahel esineb staatilises olukorras ka erinev mõõteviga. Teistest väiksema TVE-ga eristuvad sättegrupid test1 ja test4. Test1 ja test4 on filtriga *Hamming* ja andmeakna pikkusega 1 periood. Joonisel 3.24 on PMU3 voolu TVE dünaamilise testi ajal (kolmefaasiline lühis vasakul, ühefaasiline lühis paremal).



**Joonis 4.24. PMU3 voolutugevuse TVE dünaamilises testis edastamissagedusel 10 fps (kolmefaasiline lühis vasakul, ühefaasiline lühis paremal)**

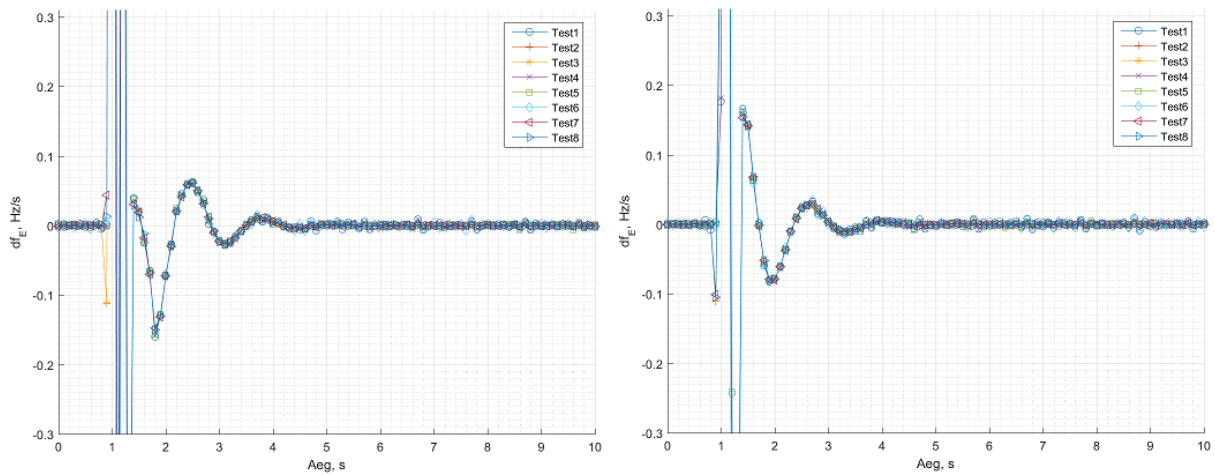
Joonisel 3.24 on näha PMU3 voolutugevuse TVE-s sättegruppide test7 ja test8 võnkumist pärast lühist. PMU3 pinge mõõtmises on sättegruppide test1 ja test4 TVE väiksem kui ülejäänud sättegruppidel. PMU3 voolutugevuse TVE-s on olukord vastupidine, sättegrupid test1 ja test4 on kõrgema mõõteviga kui ülejäänud sättegrupid. Lisaks on sättegruppide test1 ja test4 voolutugevuse mõõteviga on pärast lühist väiksem kui enne lühist. Ülejäänud sättegruppidel on märgata TVE väikest suurenemist peale lühist. PMU3 pinge ja voolutugevuse mõõteviga sättegrupist sõltuvalt on seega suhteliselt erinev ning nende andmete põhjal ei saa teha järeldusi üksikute sätete mõjust dünaamilise olukorra mõõtmisele. Joonisel 3.25 on PMU3 sageduse viga edastamissagedusel 10 fps-i (kolmefaasiline lühis vasakul, ühefaasiline paremal).



**Joonis 4.25. PMU3 sageduse viga dünaamilises testis edastamissagedusel 10 fps (kolmefaasiline lühis vasakul, ühefaasiline lühis paremal)**



PMU3 sageduse viga on suhteliselt väike kõikide sättegruppide puhul. Joonisel 3.26 on PMU3 sageduse muutuse kiiruse viga edastamissagedusel 10 fps-i.



**Joonis 4.26. PMU3 sageduse muutuse kiiruse viga dünaamilises testis edastamissagedusel 10 fps (kolmefaasiline lühis vasakul, ühefaasiline lühis paremal)**

PMU3 sageduse muutuse kiiruse viga on erinevate sättegruppide korral suhteliselt ühesugune. Tabelis 3.10 on PMU3 pinge ja voolu TVE reaktsiooniajad kaheksa erineva sättegrupiga.

**Tabel 4.10. PMU3 sättegruppide reaktsiooniajad (10 fps)**

Sätteg grupp	Reaktsiooniaeg, ms (Pinge TVE)		Reaktsiooniaeg, ms (Voolu TVE)	
	Ühefaasiline lühis	Kolmefaasiline lühis	Ühefaasiline lühis	Kolmefaasiline lühis
Test1	0	200	200	300
Test2	400	300	400	400
Test3	400	300	400	400
Test4	0	200	200	300
Test5	0	0	0	300
Test6	0	0	0	300
Test7	400	300	400	400
Test8	400	300	400	400

Tabeli 3.10 võib jagada sättegrupid kahte gruppi. Esimesse gruppi kuuluvad test1, test4, test5 ja test6 ning teise gruppi kuuluvad test2, test3, test7 ja test8. Esimene grupp on mõnevõrra lühema reaktsiooniajaga kui teine grupp. Esimesel grupi sätetel on andmeakna pikkus üks periood ja teisel grupil on andmeakna pikkus viis perioodi. Andmeakna pikkus mõjutab seega oodatult pinge ja voolu reaktsiooniaega. Muude sätete valik tabel 3.10 põhjal reaktsiooniajale

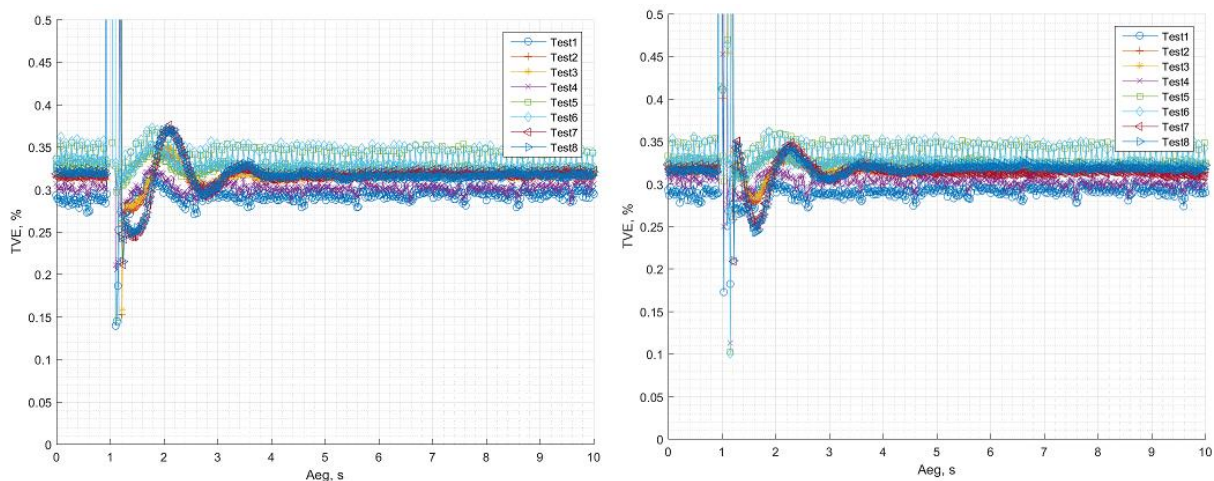
mõju ei avalda. Eespool toodud jooniste põhjal ei ole sättegruppide vahel erinevusi ka mõõdetud parameetrite mõõteveas. Edastamissagedusel 10 fps-i on seega lühema andmeakna pikkuse sättega mõõtmised paremad. Ülejäänud sätetel ei ole mõõtmistele suurt mõju

Tabelis 3.11 on PMU3 kaheksa sättegruppi edastamissagedusel 50 fps-i.

**Tabel 4.11. PMU3 sättegrupid dünaamilise testi ajal (50 fps)**

Säte	Filter	Sageduse põhine kompenseerimine	Andmeakna pikkus põhiharmoniku perioodides
Test1	Hamming	$\pm 2\text{Hz}$	1
Test2	Hamming	$\pm 2\text{Hz}$	5
Test3	Hamming	Väljas	5
Test4	Hamming	Väljas	1
Test5	Ristkülik	Väljas	1
Test6	Ristkülik	$\pm 2\text{Hz}$	1
Test7	Ristkülik	Väljas	5
Test8	Ristkülik	$\pm 2\text{Hz}$	5

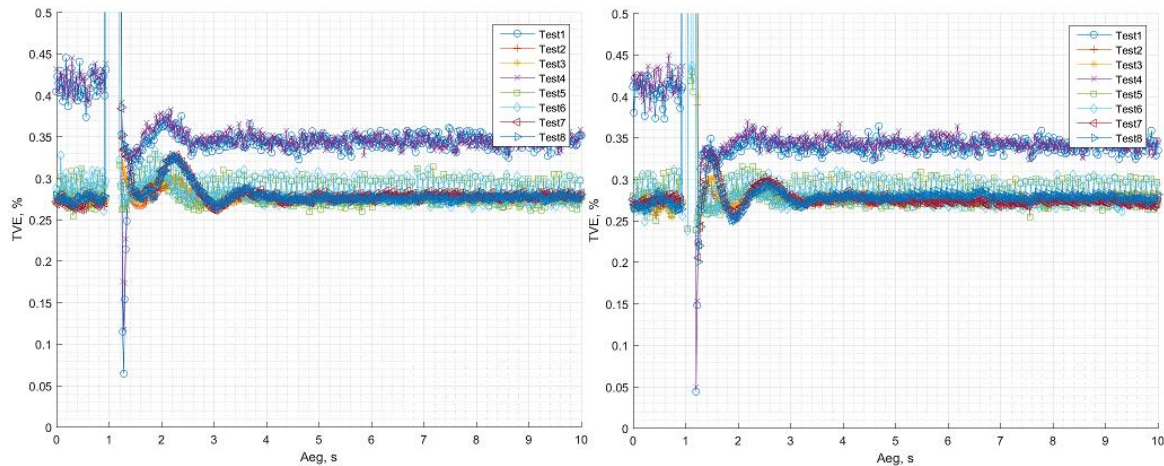
Joonisel 3.27 on PMU3 pinget TVE edastamissagedusel 50 fps-i (vasakul kolmefaasiline lühis, paremal ühefaasiline lühis).



**Joonis 4.27. PMU3 pinget TVE dünaamilises testis edastamissagedusel 50 fps (kolmefaasiline lühis vasakul, ühefaasiline lühis paremal)**

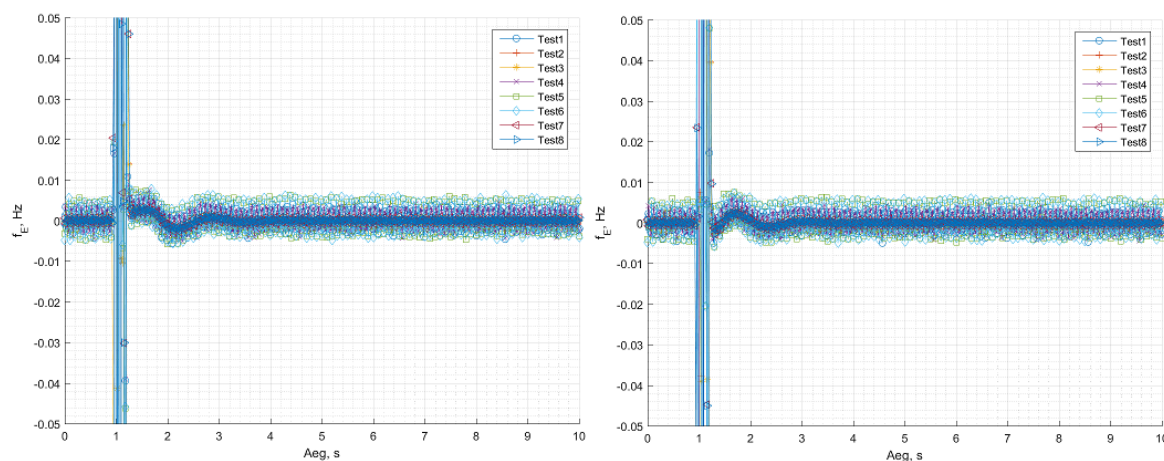
PMU3 pinget TVE edastamissagedusel 50 fps-i on staatilises olukorras sättegruppide test5 ja test6 korral mürarikas. Vähesemal määral esineb müra ka sättegruppide test1 ja test4 mõõtmistes. Teiste töös vaadeldud seadmete puhul sellist käitumist ei täheldatud. Samuti ei täheldatud nii suurt müra PMU3 mõõtmistes edastamissagedusel 10 fps-i. Test5 ja test6 on

ristküliku kujulise filtriga ning andmeakna pikkusega 1 periood. Test 1 ja test4 on filtriga *Hamming* ning andmeakna pikkusega 1 periood. Nende andmete põhjal võib järeldada, et selline käitumine on põhjustatud andmeakna pikkuse valikust. Joonisel 3.28 on PMU3 voolu TVE edastamissagedusel 50 fps-i (vasakul kolmefaasiline lühis, paremal ühefaasiline lühis).



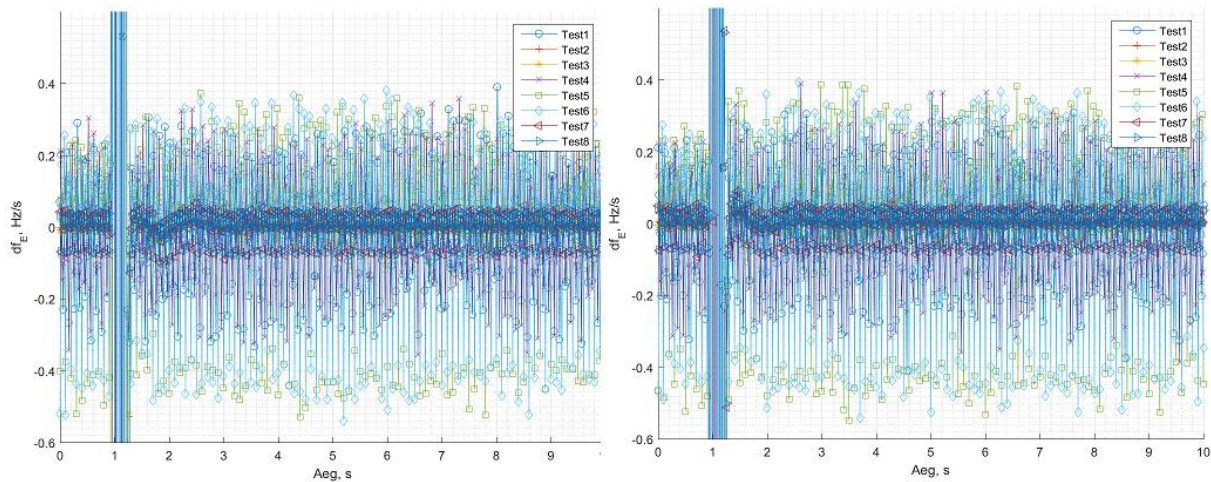
**Joonis 4.28. PMU3 voolutugevuse TVE dünaamilises testis edastamissagedusel 50 fps (kolmefaasiline lühis vasakul, ühefaasiline lühis paremal)**

PMU3 voolutugevuse TVE käitumine on sarnane PMU3 pingele TVE-le. Joonisel 3.28 on sättegruppide test1, test4, test5 ja test6 mõõtmistes märgata pingega sarnast müra. Sarnaselt joonisele 3.24 on ka kõrgemal edastamissagedusel märgata pärast lühist PMU3 voolutugevuse TVE vähenemist sättegruppide test1 ja test4 korral lühise eelse ajaga võrreldes. Joonisel 3.29 on PMU3 sageduse viga edastamissagedusel 50 fps-i (vasakul kolmefaasiline lühis, paremal ühefaasiline lühis).



**Joonis 4.29. PMU3 sageduse viga dünaamilises testis edastamissagedusel 50 fps (kolmefaasiline lühis vasakul, ühefaasiline lühis paremal)**

PMU3 osade sättegruppide juures märgatud pinge ja voolu TVE kõikumine on joonise 3.29 põhjal edasi kandunud sageduse veasse. Test5 ja test6 sättegruppide puhul on sageduse vea kõikumine ligikaudu  $\pm 75$  mHz. Sättegruppide test1, test4, test7 ja test8 puhul on sageduse vea kõikumine väiksem. Selle alusel võib väita, et ilmselt põhjustab TVE viga müra faasinurga mõõtmistes, kuna faasinurga alusel arvutatakse sagedust. Joonisel 3.30 on PMU3 sageduse muutuse kiiruse viga edastamissagedusel 50 fps-i (vasakul kolmefaasiline lühis, paremal ühefaasiline lühis).



**Joonis 4.30. PMU3 sageduse muutuse viga dünaamilises testis edastamissagedusel 50 fps (kolmefaasiline lühis vasakul, ühefaasiline lühis paremal)**

Jooniselt 3.30 viitab, et sageduse viga sättegruppide test1, test4, test5, test6, test7 ja test8 puhul on võimendunud sageduse muutuse kiiruse veasse. Sättegrupid test2 ja test3 on stabiilse mõõtmisega ka arvestades sageduse muutuse kiiruse viga. Maksimaalne sageduse muutuse kiiruse viga on sättegruppide test5 ja test6 korral ligikaudu 0,4 Hz/s. Muutuvaid signaali parameetreid on läbi viidud dünaamilises testis palju, seega ei ole võimalik määrata testile standardikohast piirmäära. Amplituudi ja faasinurga modulatsiooni katses on lubatud piirmäär RFE-le edastamissagedusel 50 fps-i 14 Hz/s (klass M PMU). Selle tasemega võrreldes jääb katses saadud 0,4 Hz/s piinormide sisse. Samas sageduse hälbe staatilises testis on piinorm 0,1 Hz/s. Katses saadud väärtused ületavad seda määra. Tabelis 3.12 on toodud PMU3 sättegruppide reaktsiooniajad edastamissagedusel 50 fps-i.

**Tabel 4.12. PMU3 sättegruppide reaktsiooniajad (50 fps)**

Sättegrupp	Reaktsiooniaeg, ms (Pinge TVE)		Reaktsiooniaeg, ms (Voolu TVE)	
	Ühefaasiline lühis	Kolmefaasiline lühis	Ühefaasiline lühis	Kolmefaasiline lühis
<b>Test1</b>	160	160	260	280
<b>Test2</b>	260	260	300	300
<b>Test3</b>	260	260	300	300
<b>Test4</b>	160	160	260	280
<b>Test5</b>	160	160	260	260
<b>Test6</b>	160	160	260	260
<b>Test7</b>	300	300	320	320
<b>Test8</b>	300	300	320	320

Tabelis 3.12 toodud reaktsiooniaegadest võib näha, et sarnaselt madalamale edastamissagedusele on reaktsiooniaeg sõltuv andmeakna pikkusest. Lühikese andmeakna pikkusega sättegrupid on lühema reaktsiooniajaga, pikema andmeakna pikkusega sättegrupid on pikema reaktsiooniajaga. Filtrite vahel esineb väikene erinevus *Hamming* filtri kasuks. Teooria alusel võiks arvata, et ristküliku kujuline filter on lühema reaktsiooniajaga. Kahe filtri vahe on samas väga väike, seega ei saa katsete tulemusena kahe filtri vahel eelistust teha. Tabelite 3.11 ja 3.13 põhjal ei anna kõrgem edastamissagedus madalama edastamissageduse ees reaktsiooniasjas märgatavat eelist.

PMU3 mõõtetulemused ei sõltunud dünaamilises testis sageduse põhisest kompenseerimise sättest ühegi vaadeldud parameetri alusel. Samasugune järeldus oli ka PMU1 mõõtmiste analüüsis. Põhjuseks võib jällegi olla liiga väike sageduse hälve põhisagedusest.

#### **4.1.5 PMU4 dünaamilise testi tulemused ja analüüs**

PMU4 dünaamilise testi tulemused on toodud alljärgnevas peatükis. Kolmest eelnevast PMU-st erinevalt on PMU4 virtuaalne PMU RTDS simulatsioonis. PMU4 põhineb IEEE standardi C37.118.1 lisa C mudelil. Nimetatud mudel on erinevate allikatele toetudes piisavalt täpne täitmaks kõiki IEEE C37.118.1 kohaseid nõudeid. Dünaamilises testis on seetõttu ka PMU4 P klassi mudelit kasutatud referentsina kõikidele teistele dünaamilise testi tulemustele.

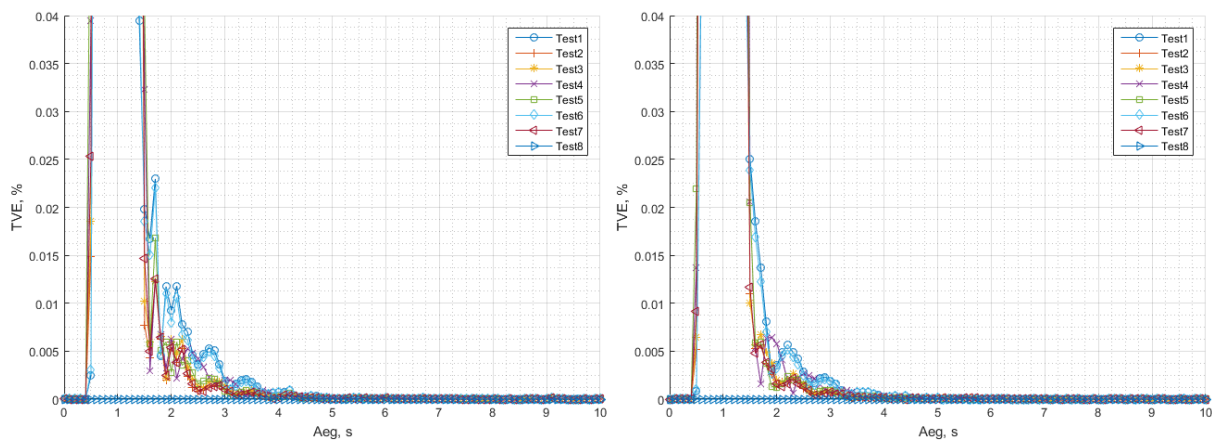
PMU4 võimaldab muuta konfiguratsioonis filtri sätet. Seetõttu testiti PMU4-ga erinevaid filtreid (aknafunktsioone). Kuna ainuke PMU4 erinevus sättegruppide vahel oli filter, siis saab nende katsete alusel vaadelda erinevate filtrite mõju mõõtetäpsusele.

PMU4 kaheksa sättegruppi edastamissagedusel 10 fps-i on tabelis 3.13.

**Tabel 4.13. PMU4 sättegrupid dünaamilise testi ajal (10 fps)**

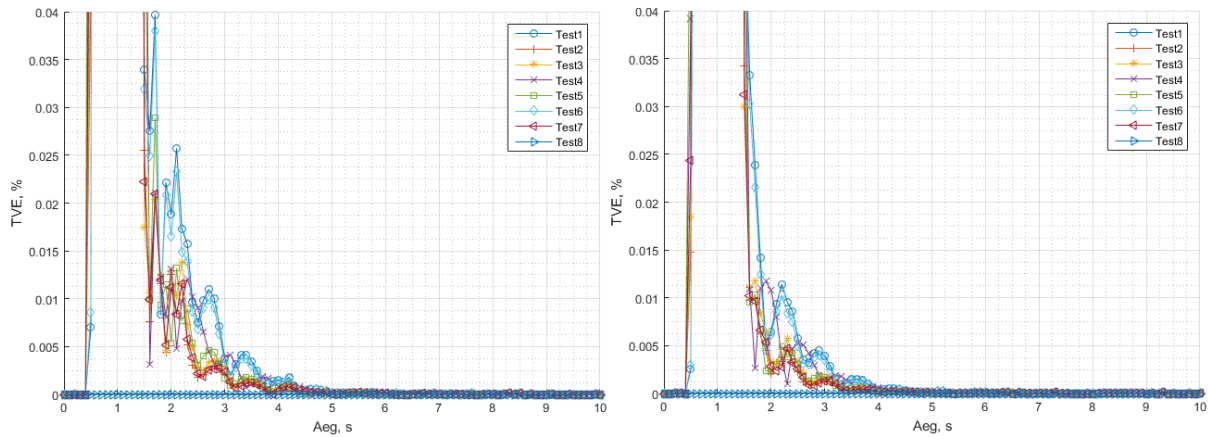
Sättegrupp	Filter
Test1	<i>Nutall</i>
Test2	<i>Blackman</i>
Test3	<i>Kaiser</i>
Test4	<i>Hann</i>
Test5	<i>Gaussian</i>
Test6	<i>Blackman-Harris</i>
Test7	<i>Dolph-Chebyshev</i>
Test8	Kolmnurkne (klass P mudel)

Joonisel 3.31 on PMU4 pinge TVE dünaamilise testi ajal (vasakul kolmefaasiline lühis, paremal ühefaasiline lühis).



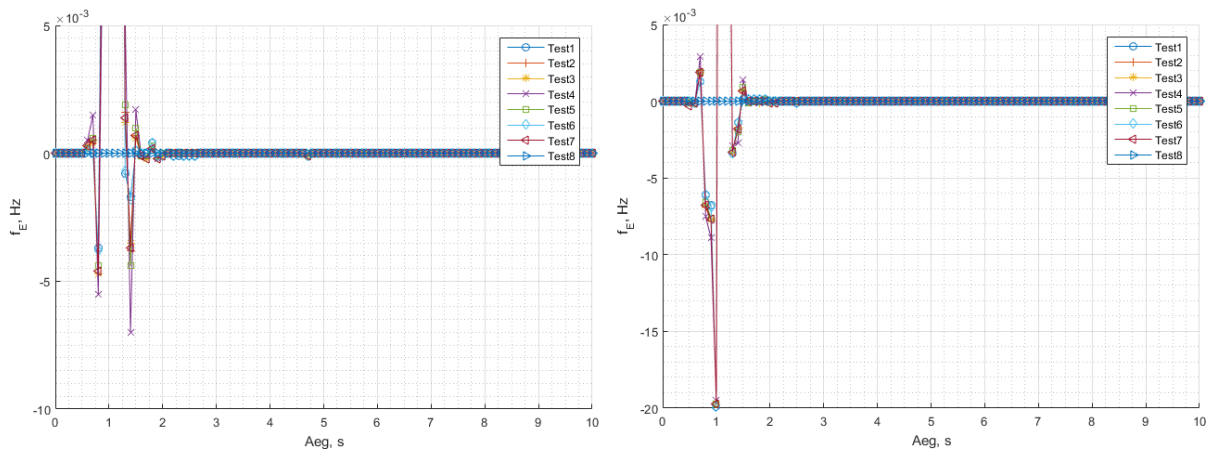
**Joonis 4.31. PMU4 pinge TVE dünaamilises testis edastamissagedusel 10 fps (kolmefaasiline lühis vasakul, ühefaasiline lühis paremal)**

Jooniselt 3.31 võib näha, et staatilises olukorras ei esine filtrite vahel erinevusi. Filtrite vaheline erinevus on ainult dünaamilises olukorras. Teooria põhjal võib oletada, et filtrite vahelise erinevuse dünaamilises olukorras põhjustab sageduse muutus. Filtrist põhjustatud viga ei ole siiski suur ning filtri vea olemasolu füüsilises PMU-s ei ole ilmselt eristatav muudest PMU mõõteviga põhjustavatest teguritest. Teistest filtritest mõnevõrra erineva veaga on test1 ja test5, ehk vastavalt filtrid *Nutall* ja *Gaussian*. Joonisel 3.32 on PMU4 volutugevuse TVE dünaamilise testi ajal (kolmefaasiline lühis vasakul, ühefaasiline lühis paremal).



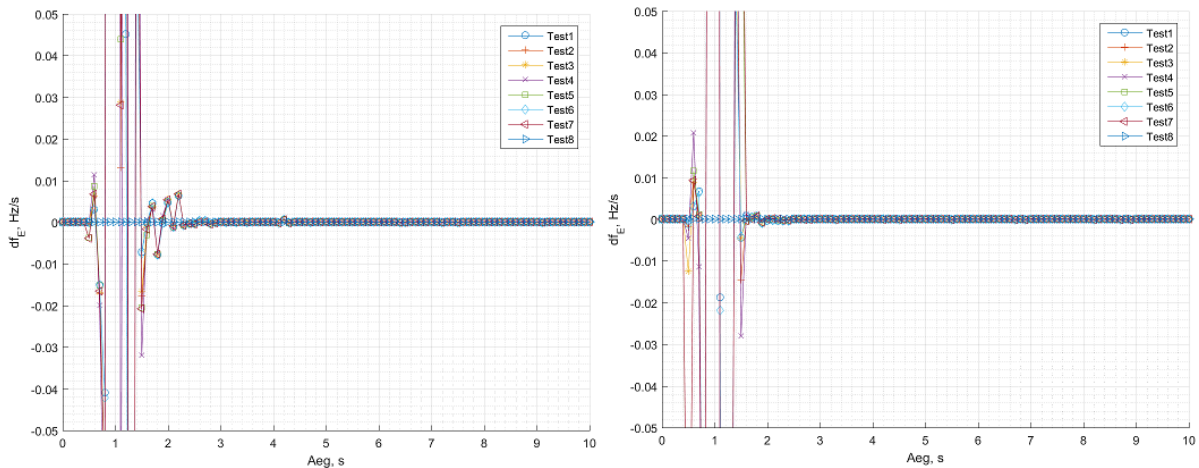
**Joonis 4.32. PMU4 voolutugevuse TVE dünaamilises testis edastamissagedusel 10 fps (kolmefaasiline lühis vasakul, ühefaasiline lühis paremal)**

PMU4 voolutugevuse TVE on sarnane PMU4 pingele (joonis 3.31 ja joonis 3.32). Suurt erinevust filtrite vahel ei ole ning teistest erinevad mõnevõrra filtrid *Nutall* ja *Gaussian*. Joonisel 3.33 on PMU4 sageduse viga edastamissagedusel 10 fps-i (kolmefaasiline lühis vasakul, ühefaasiline paremal).



**Joonis 4.33. PMU4 sageduse viga dünaamilises testis edastamissagedusel 10 fps (kolmefaasiline lühis vasakul, ühefaasiline lühis paremal)**

Jooniselt 3.33 on näha, et PMU4 mõõdetud sageduse erinevus filtrite vahel on pärast lühist sisuliselt olematu, ulatudes kolmefaasilisel lühisel maksimaalselt 7 mHz vahetult peale lühise kõrvaldamist. 2 s pärast katse algust ei ole võimalik enam joonise 3.33 alusel filtritel vahet teha. Joonisel 3.34 on PMU4 sageduse muutuse kiiruse viga dünaamilises testis edastamissagedusel 10 fps-i.



**Joonis 4.34. PMU4 sageduse muutuse kiiruse viga dünaamilises testis edastamissagedusel 10 fps (kolmefaasiline lühis vasakul, ühefaasiline lühis paremal)**

PMU4 sageduse muutuse kiiruse viga stabiliseerub nii kolme- kui ka ühefaasilise lühise korral 1,5 s pärast katse algust. Kolmefaasilise lühise järgselt esineb sageduse muutuse kiiruse veas erinevate filtrite korral pärast 1,5 s rohkem võnkumisi kui ühefaasilisel lühisel. Filtrite vahel erinevusi ei ole.

Pinge mõõtmiste reaktsiooniaeg oli nii kolme- kui ka ühefaasilisel lühisel 600 ms kõikide referentsfaasorist erinevate sätete korral. Voolu mõõtmiste reaktsiooniaeg oli nii kolme- kui ka ühefaasilisel lühisel 1s kõikide referentsfaasorist erinevate sätete korral. Need reaktsiooniajad on suhteliselt pikad võrreldes teiste faasimõõteseadmetega.

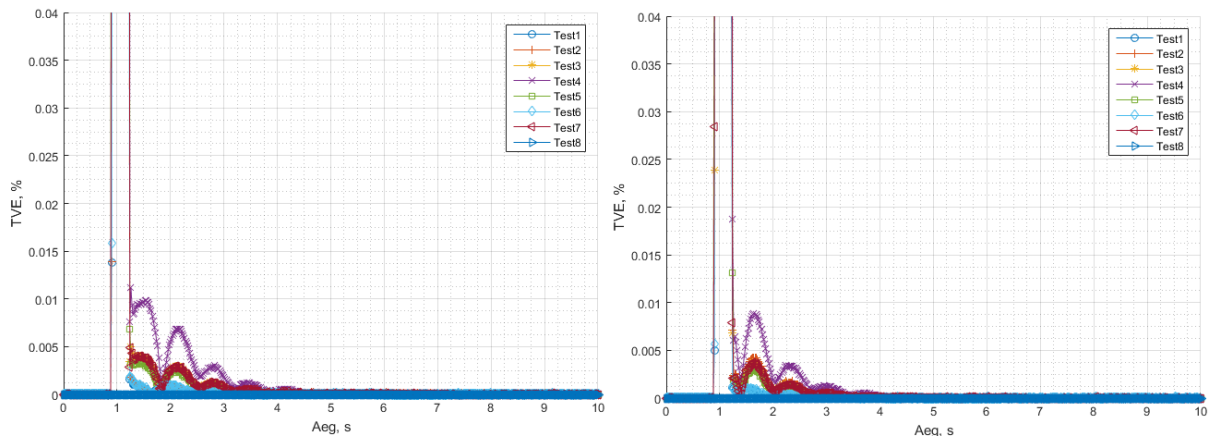
PMU4 kaheksa sättegruppi dünaamilise testi ajal edastamissagedusel 50 fps-i on tabelis 3.14.

**Tabel 4.14. PMU4 sättegruppid dünaamilise testi ajal (50 fps)**

Sättegrupp	Filter
Test1	<i>Nutall</i>
Test2	<i>Blackman</i>
Test3	<i>Kaiser</i>
Test4	<i>Hann</i>
Test5	<i>Gaussian</i>
Test6	<i>Blackman-Harris</i>
Test7	<i>Dolph-Chebyshev</i>
Test8	Kolmnurkne (klass P mudel)

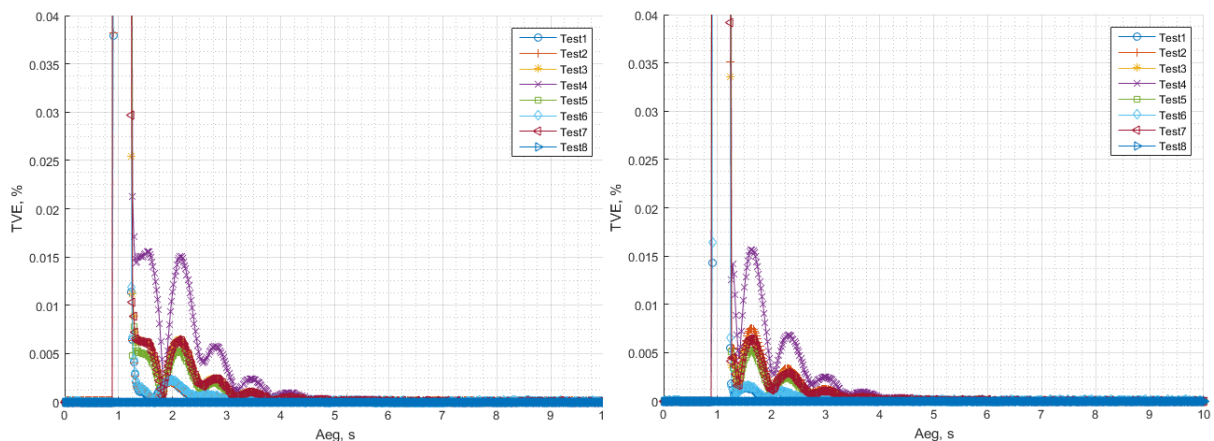
Joonisel 3.34 on PMU4 pinge TVE edastamissagedusel 50 fps-i (vasakul kolmefaasiline lühis, paremal ühefaasiline lühis).





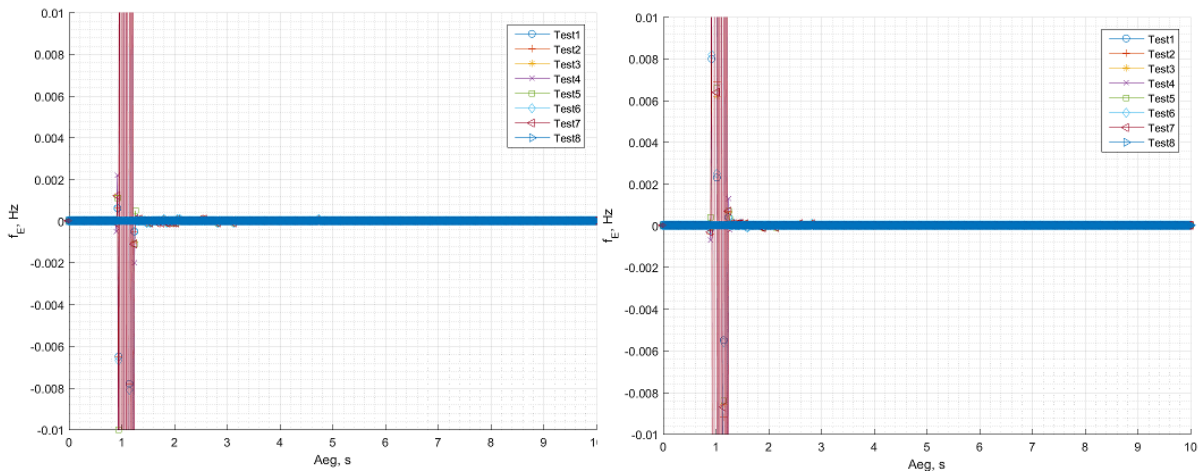
**Joonis 4.35. PMU4 pinge TVE dünaamilises testis edastamissagedusel 50 fps (kolmefaasiline lühis vasakul, ühefaasiline lühis paremal)**

PMU4 pinge TVE-s edastamissagedusel 50 fps-i esineb filtrite vahel selgem erinevus võrreldes madalama edastamissagedusega. Referentsfaasoriga võrreldes on suurema veaga filtrid *Kaiser* (test3), *Hann* (test4), *Gaussian* (test5) ja *Dolph-Chebyshev* (test7). Vea erinevus ei ole siiski suur, ulatudes maksimaalselt 0,01%-ni. Joonisel 3.36 on PMU4 voolutugevuse TVE edastamissagedusel 50 fps-i (vasakul kolmefaasiline lühis, paremal ühefaasiline lühis).



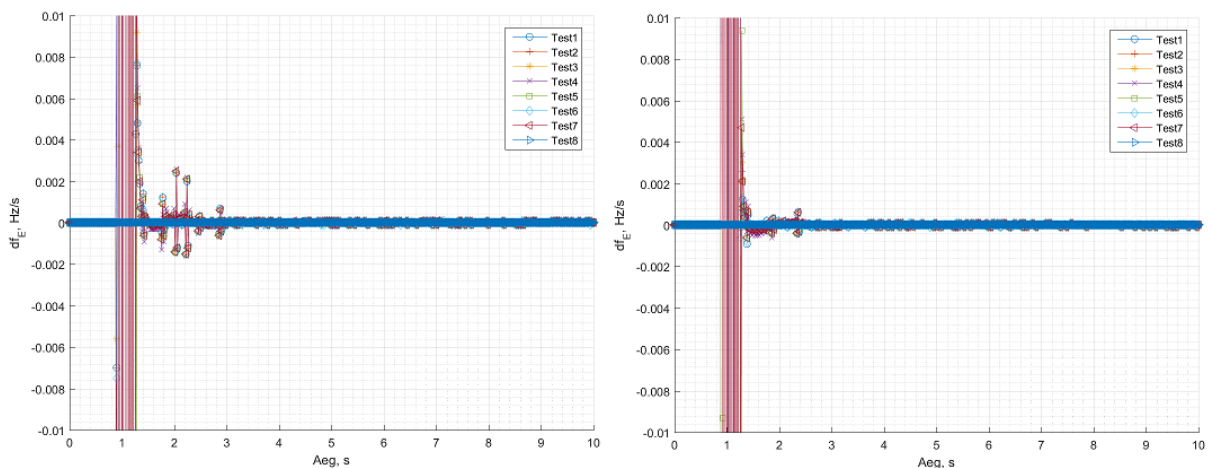
**Joonis 4.36. PMU4 voolutugevuse TVE dünaamilises testis edastamissagedusel 50 fps (kolmefaasiline lühis vasakul, ühefaasiline lühis paremal)**

Joonisel 3.36 on filtrid *Kaiser* (test3), *Hann* (test4), *Gaussian* (test5) ja *Dolph-Chebyshev* (test7) suurima TVE-ga referentsfaasori suhtes. PMU4 pinge TVE-ga võrreldes on märgata nimetatud filtrite kasutamisel suuremat viga, maksimaalne TVE filtril *Hann* ulatub üle 0,015%. Maksimaalne pinge TVE jäi alla 0,01%. Põhjus võib olla voolu suuremas muutuses pärast lühist. Joonisel 3.37 on PMU4 sageduse viga edastamissagedusel 50 fps-i (vasakul kolmefaasiline lühis, paremal ühefaasiline lühis).



**Joonis 4.37. PMU4 sageduse viga dünaamilises testis edastamissagedusel 50 fps (kolmefaasiline lühis vasakul, ühefaasiline lühis paremal)**

PMU4 sageduse viga on filtrite vahelises võrdluses praktiliselt olematu. Madalama edastamissagedusega (joonis 3.33) võrreldes on sageduse viga langenud. Joonisel 3.38 on PMU4 sageduse muutuse kiiruse viga edastamissagedusel 50 fps-i (vasakul kolmefaasiline lühis, paremal ühefaasiline lühis).



**Joonis 4.38. PMU4 sageduse muutuse kiiruse viga dünaamilises testis edastamissagedusel 50 fps (kolmefaasiline lühis vasakul, ühefaasiline lühis paremal)**

PMU4 sageduse muutuse kiiruse viga edastamissagedusel 50 fps-i on sarnaselt sageduse veale filtrite vahelises võrdluses praktiliselt olematu.

Filtrite reaktsiooniajad edastamissagedusel 50 fps-i on võrreldes madalama edastamissagedusega langenud (tabel 3.15).

**Tabel 4.15. PMU4 sättegruppide reaktsiooniajad (50 fps)**

Sättegrupp	Reaktsiooniaeg, ms (Pinge TVE)		Reaktsiooniaeg, ms (Voolu TVE)	
	Ühefaasiline lühis	Kolmefaasiline lühis	Ühefaasiline lühis	Kolmefaasiline lühis
<b>Test1</b>	160	200	280	280
<b>Test2</b>	180	200	280	280
<b>Test3</b>	180	200	280	300
<b>Test4</b>	200	220	300	300
<b>Test5</b>	180	200	280	300
<b>Test6</b>	160	200	280	280
<b>Test7</b>	180	200	280	300

Edastamissagedusel 50 fps-i esineb filtrite vahel väike erinevus reaktsiooniajas. Teistest pikem reaktsiooniaeg on filtril *Hann*. Ülejäänud filtrid on praktiliselt sama reaktsiooniajaga.

## 4.2 Staatilise testi tulemused ja analüüs

Hindamaks faasimõõteseadmete sätestuse mõju mõõtetäpsusele staatilises olukorras testiti faasimõõteseadmeid ka testi vältel konstantse sisendsignaali. Testiti faasimõõteseadmete mõõtetäpsust sageduse hälbe korral nimisagedusest. Sageduse hälbe suuruseks oli -0,5 Hz ning põhisageduseks seega 49,5 Hz. Signaali moonutati ka harmoonikutega. Testsignaali harmoonikute järk ja sisaldus on järgnevad.

- 2. järk (1% põhiharmoonikust)
- 3. järk (2,7% põhiharmoonikust)
- 7. järk (2,1% põhiharmoonikust)
- 11. järk (1,5% põhiharmoonikust)

Staatilises katses mõõdeti faasimõõteseadmetega pinget, sagedust ja sageduse muutuse kiirust. Tulemustena on toodud pinge TVE, sageduse viga (FE) ja sageduse muutuse kiiruse viga (RFE), mis on arvatud matemaatiliselt avaldatud referentssuuruste suhtes. Katsed kestsid 30 s. ning esitatud on nelja testitud faasimõõteseadme tulemused.

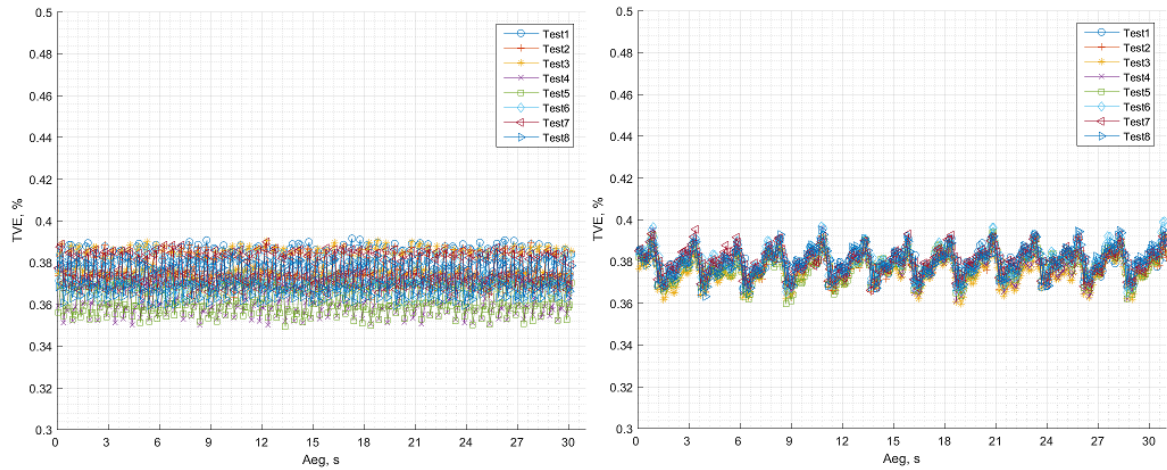
#### 4.2.1 PMU1 staatilise testi tulemused ja analüüs

Tabelis 3.16 on PMU1 sättegrupid staatilises testis.

**Tabel 4.16. PMU1 sättegrupid staatilise testi ajal**

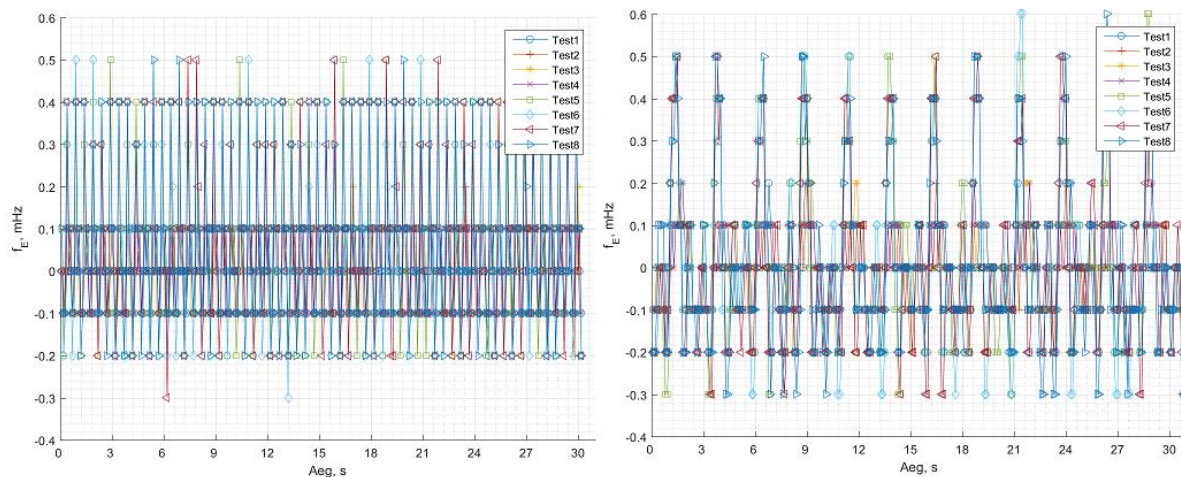
Sättegrupp	Edastamissagedus, fps	Filter (F – kiire, N – kitsas)	Sageduse põhine kompenseerimine (Y – sisse lülitatud, N – välja lülitatud)	Sageduse muutuse kiiruse algoritm (S – aeglane, F – kiire)
Test1	10	F	Y	S
Test2		F	N	S
Test3		N	Y	S
Test4		N	N	S
Test5		N	N	F
Test6		F	N	F
Test7		F	Y	F
Test8		N	Y	F
Test1	50	F	Y	S
Test2		F	N	S
Test3		N	N	S
Test4		N	Y	S
Test5		N	N	F
Test6		N	Y	F
Test7		F	Y	F
Test8		F	N	F

Joonisel 3.39 on PMU1 pinge TVE graafik staatilises testis (vasakul graafikul edastamissagedus 10 fps, paremal graafikul edastamissagedus 50 fps).



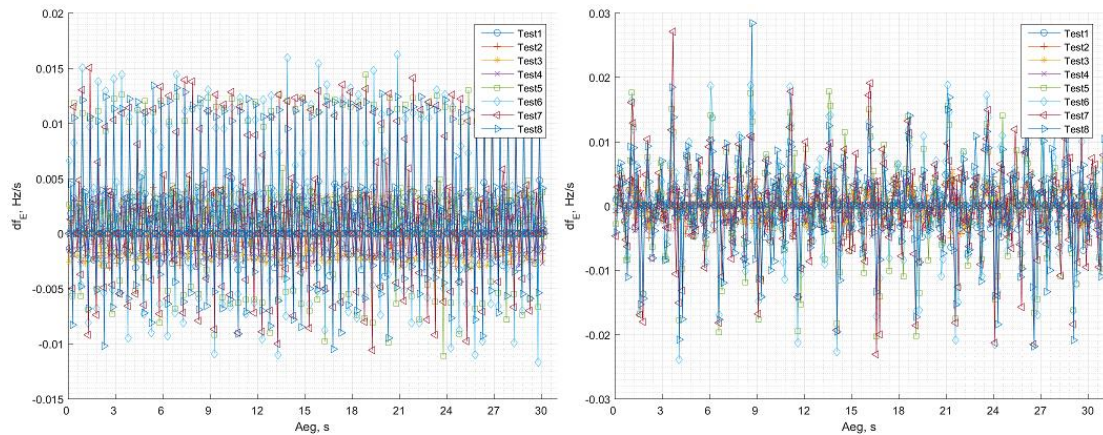
**Joonis 4.39. PMU1 pinge TVE staatilises testis (vasakul edastamissagedus 10 fps, paremal edastamissagedus 50 fps)**

Joonisel 3.39 on näha, et sätestusel ei ole PMU1 pinge mõõtmistele mõju. Kõrgemal edastamissagedusel (joonis 3.39 parempoolne graafik) on täheldada kõikides sättegruppides TVE võnkumist. Madalamal edastamissagedusel sellist võnkumist kastes ei olnud (joonis 3.40 vasakpoolne graafik). Joonisel 3.40 on PMU1 sageduse viga staatilises testis (vasakul graafikul edastamissagedus 10 fps, paremal graafikul edastamissagedus 50 fps).



**Joonis 4.40. PMU1 sageduse viga staatilises testis (vasakul edastamissagedus 10 fps, paremal edastamissagedus 50 fps)**

PMU1 sageduse vea sõltuvus sättegrupist on väike, jäädes kõikide sättegruppide korral alla 1 mHz. Edastamissagedus samuti ei mõjuta PMU1 sageduse viga märgatavalt. Joonisel 3.41 on PMU1 sageduse muutuse kiiruse viga staatilises testis (vasakul graafikul edastamissagedus 10 fps, paremal graafikul edastamissagedus 50 fps).



**Joonis 4.41. PMU1 sageduse muutuse kiiruse viga staatilises testis (vasakul edastamissagedus 10 fps, paremal edastamissagedus 50 fps)**

Sageduse veale sarnaselt on PMU1 sageduse muutuse kiiruse viga väike, jäädes mõlemal edastamissagedusel alla 50 fps-i. Sättegruppide vahel ei ole joonise 3.41 põhjal erinevusi.

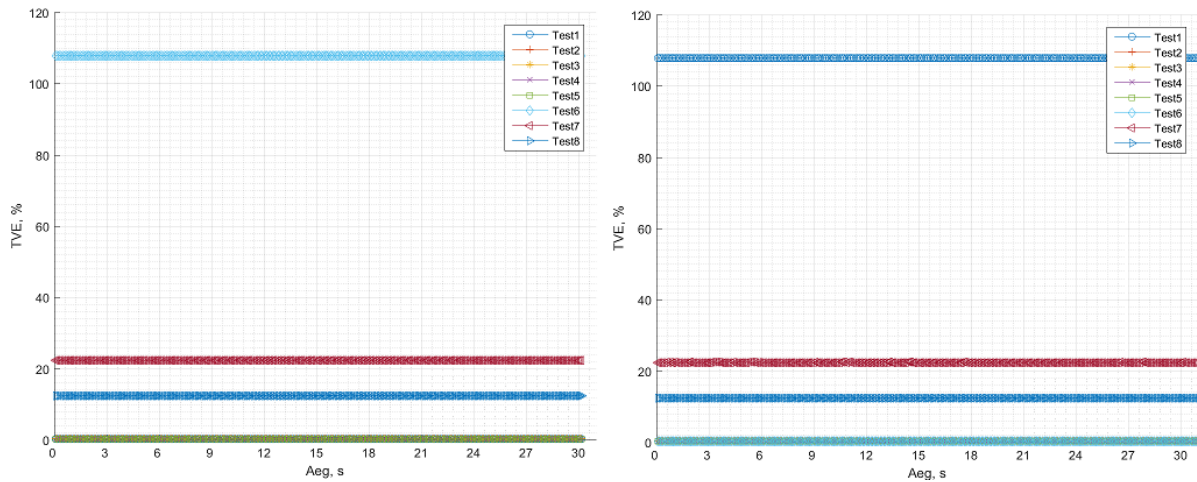
#### 4.2.2 PMU2 staatilise testi tulemused ja analüüs

Tabelis 3.17 on PMU2 sättegrupid staatilises testis.

**Tabel 4.17. PMU2 sättegrupid staatilises testis**

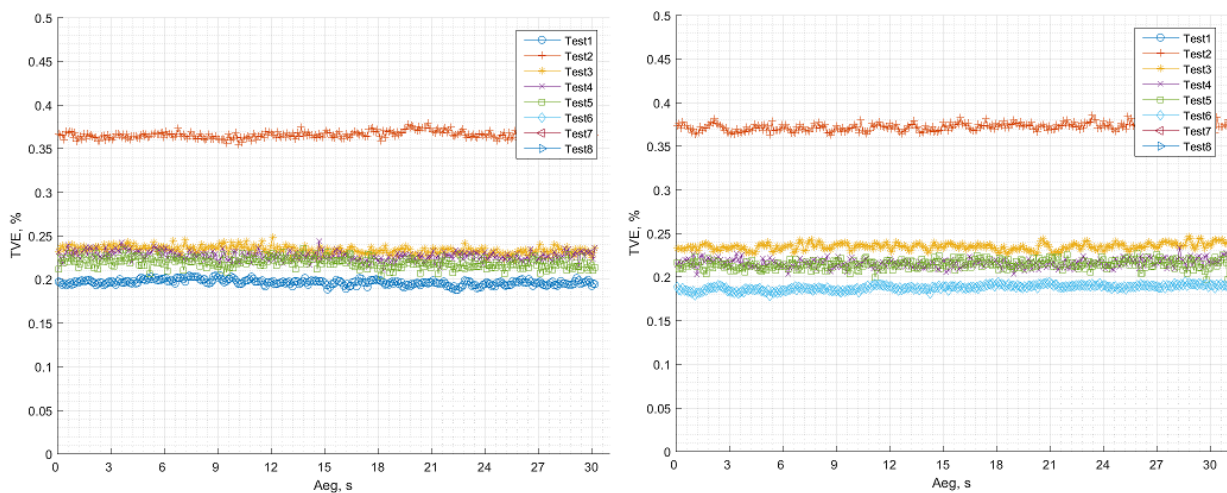
Sättegrupp	Edastamissagedus, fps	Filter	Ajamärgise asukoht andmeaknas
Test1	10	12/10	Keskel
Test2		30/25	Keskel
Test3		60/50	Keskel
Test4		120/100	Keskel
Test5		240/200	Keskel
Test6		12/10	Alguses
Test7		60/50	Alguses
Test8		120/100	Alguses
Test1	50	12/10	Alguses
Test2		30/25	Keskel
Test3		60/50	Keskel
Test4		120/100	Keskel
Test5		240/200	Keskel
Test6		12/10	Keskel
Test7		60/50	Alguses
Test8		120/100	Alguses

Joonisel 3.42 on PMU2 pinge TVE graafik staatilises testis (vasakul graafikul edastamissagedus 10 fps, paremal graafikul edastamissagedus 50 fps).



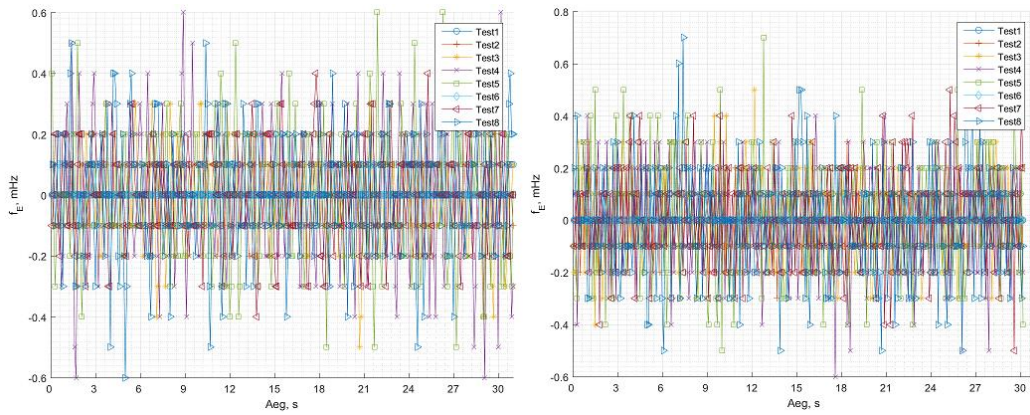
**Joonis 4.42. PMU2 ping TVE staatilises testis (vasakul edastamissagedus 10 fps, paremal edastamissagedus 50 fps)**

Joonisel 3.42 on näha, et ajamärgise paiknemine andmeakna alguses (sättegrupid test6, test7 ja test8) tekitab PMU2 ping mõõtmisesse suure vea. Ajamärgise paiknemine andmeakna alguses tekitab PMU2 mõõtmistes vea ka dünaamilises testis. Kolme viimase sättegrupi mõõtevea tõttu ei ole joonisel 3.42 eristatav ülejäänud sättegruppide mõõteveiga. Joonisel 3.43 on PMU2 ping TVE diapasoonis 0 kuni 0,5% eristamaks ülejäänud viie sättegrupi mõõteveiga.



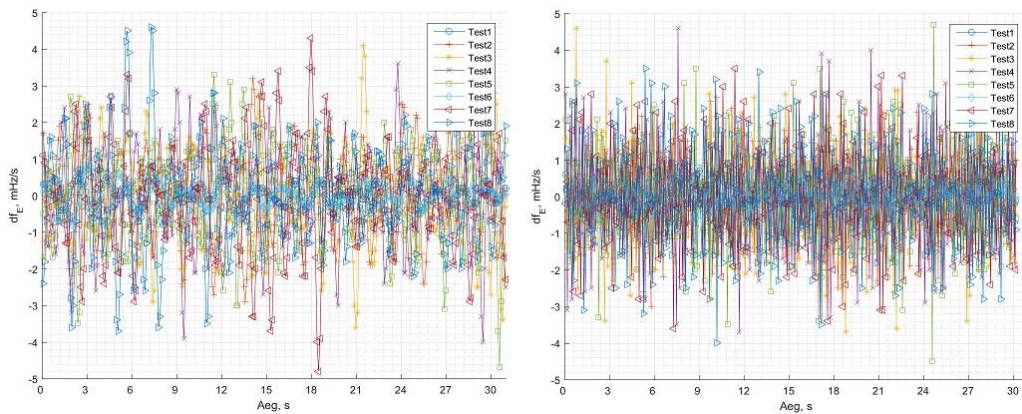
**Joonis 4.43. PMU2 ping TVE vahemikus 0 kuni 0,5% staatilises testis (vasakul edastamissagedus 10 fps, paremal edastamissagedus 50 fps)**

Ülejäänud sättegruppide ping mõõtmiste tulemustes on kõrgema veaga sättegrupp test5 (filter 30/25). Sättegrupi test5 ping TVE suureneb teiste sättegruppidega võrreldes natuke alla kahe korra. Joonisel 3.44 on PMU2 sageduse viga staatilises testis (vasakul graafikul edastamissagedus 10 fps, paremal graafikul edastamissagedus 50 fps).



**Joonis 4.44. PMU2 sageduse viga staatilises testis (vasakul edastamissagedus 10 fps, paremal edastamissagedus 50 fps)**

PMU2 sageduse viga on kõikide sättegruppide korral väike, jäädes alla 1 mHz. Pinge mõõtmistes oli kolme sättegrupi kasutamisel suur viga, mistõttu on sageduse väike viga mõnevõrra üllatav. Joonisel 3.45 on PMU1 sageduse muutuse kiiruse viga staatilises testis (vasakul graafikul edastamissagedus 10 fps, paremal graafikul edastamissagedus 50 fps).



**Joonis 4.45. PMU2 sageduse muutuse kiiruse viga staatilises testis (vasakul edastamissagedus 10 fps, paremal edastamissagedus 50 fps)**

PMU2 sageduse kiiruse muutuse viga on kõikide sättegruppide korral väike, jäädes alla 5 mHz/s.



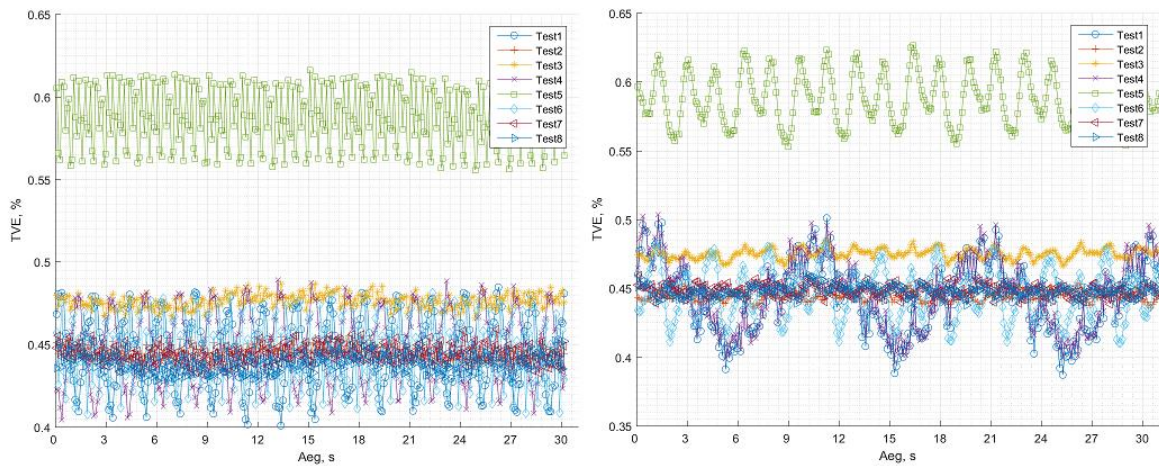
### 4.2.3 PMU3 staatilise testi tulemused ja analüüs

Tabelis 3.18 on PMU3 sättegrupid staatilises testis.

**Tabel 4.18. PMU3 sättegrupid staatilise testi ajal**

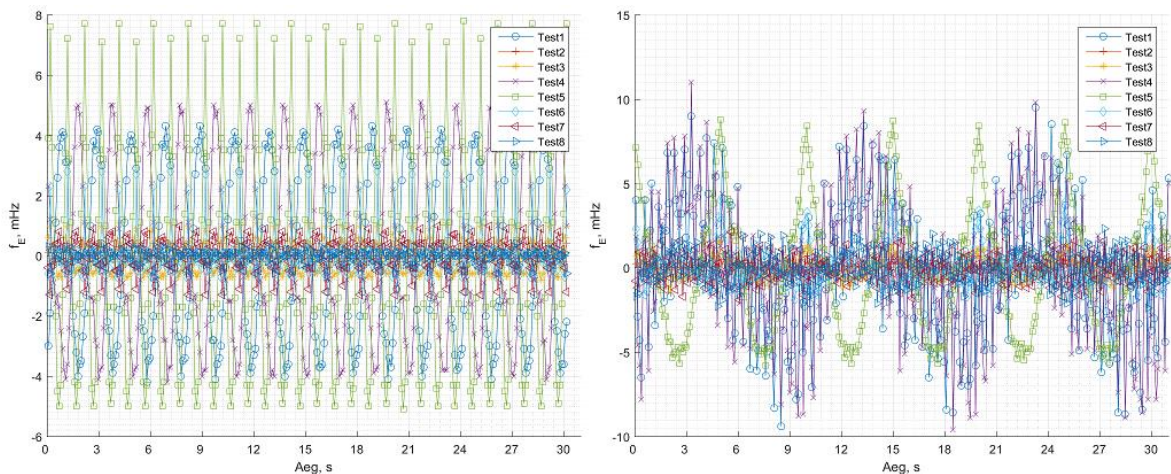
Sättegrupp	Edastamissagedus, fps	Filter	Sageduse põhine kompenseerimine	Andmeakna pikkus põhiharmoniku perioodides
Test1	10	<i>Hamming</i>	$\pm 2\text{Hz}$	1
Test2		<i>Hamming</i>	$\pm 2\text{Hz}$	5
Test3		<i>Hamming</i>	Väljas	5
Test4		<i>Hamming</i>	Väljas	1
Test5		Ristkülik	Väljas	5
Test6		Ristkülik	$\pm 2\text{Hz}$	5
Test7		<i>Flat Top</i>	Väljas	5
Test8		<i>Flat Top</i>	$\pm 2\text{Hz}$	5
Test1	50	<i>Hamming</i>	$\pm 2\text{Hz}$	1
Test2		<i>Hamming</i>	$\pm 2\text{Hz}$	5
Test3		<i>Hamming</i>	Väljas	5
Test4		<i>Hamming</i>	Väljas	1
Test5		Ristkülik	Väljas	5
Test6		Ristkülik	$\pm 2\text{Hz}$	5
Test7		<i>Flat Top</i>	$\pm 2\text{Hz}$	5
Test8		<i>Flat Top</i>	Väljas	5

Joonisel 3.46 on PMU3 pingete TVE graafik staatilises testis (vasakul graafikul edastamissagedus 10 fps, paremal graafikul edastamissagedus 50 fps).



**Joonis 4.46. PMU3 pinge TVE staatilises testis (vasakul edastamissagedus 10 fps, paremal edastamissagedus 50 fps)**

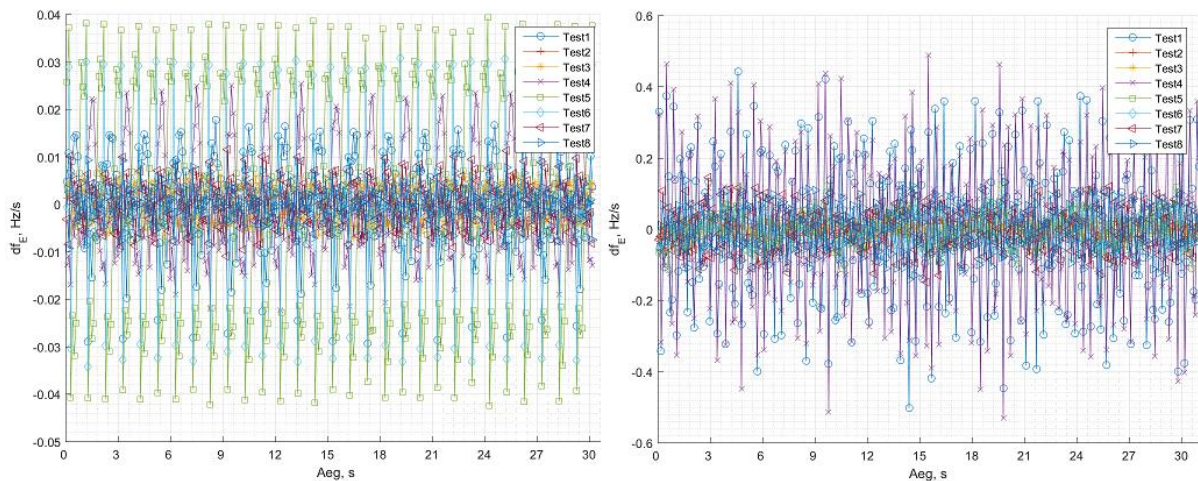
PMU3 pinge mõõteveale staatilises testis avaldab suurimat mõju sageduse põhine kompenseerimine. Joonise 3.46 põhjal on sättegruppides test3, test4, ja test5 (sageduse põhine kompenseerimine välja lülitatud) pinge mõõteviga ülejäänud sättegruppidega võrreldes suurem. Pinge mõõteviga suureneb ka ristküliku kujulise filtri kasutamisel, seda võib järeltada test5 kõrgemaist mõõteveast sättegruppide võrdluses. Peamiselt mõjutab joonis 3.46 põhjal mõõteviga siiski sageduse põhine kompenseerimine. Sättegrupi test6 mõõteveas esineb küll võnkumine, kuid see mõõteviga on siiski teiste sättegruppidega võrreldaval tasemel (test6 – ristküliku kujuline andmeaken ja sageduse põhine kompenseerimine  $\pm 2$  Hz). Joonisel 3.47 on PMU3 sageduse viga staatilises testis (vasakul graafikul edastamissagedus 10 fps, paremal graafikul edastamissagedus 50 fps).



**Joonis 4.47. PMU3 sageduse viga staatilises testis (vasakul edastamissagedus 10 fps, paremal edastamissagedus 50 fps)**

PMU3 sageduse viga staatilises testis on võrreldes eelmise kahe PMU-ga suurem, ulatudes edastamissagedusel 10 fps-i kuni 8 mHz-ni ja edastamissagedusel 50 fps-i üle 10 mHz-i.

Sageduse viga on sõltuv PMU3 konfiguratsioonist. Sättegruppide test1, test4 ja test5 korral esineb suurem sageduse viga, ülejäänud sättegruppide mõõteviga jääb alla 2 mHz-i. Test1 ja test4 on *Hamming* filtriga ning andmeakna pikkusega 1 periood, test5 on ristküliku kujulise andmeaknaga, andmeakna pikkusega 5 perioodi ning välja lülitatud sageduse põhise kompenseerimisega. Joonisel 3.48 on PMU3 sageduse muutuse kiiruse viga staatilises testis (vasakul graafikul edastamissagedus 10 fps, paremal graafikul edastamissagedus 50 fps).



**Joonis 4.48. PMU3 sageduse muutuse kiiruse viga staatilises testis (vasakul edastamissageduse 10 fps, paremal edastamissagedus 50 fps)**

PMU3 sageduse muutuse kiiruse viga sõltub joonise 3.48 põhjal suurel määral tema sätetestest. Madalamal edastamissagedusel (10 fps-i) ei ületa RFE 0,04 Hz/s piiri, kõrgemal edastamissagedusel (50 fps-i) ületab RFE sättegruppide test1 ja test4 korral 0,4 Hz/s piiri. Vahe kahe edastamissageduse vahel on ligikaudu kümnekordne. Suure vea põhjuseks võib olla lühike andmeakna pikkus (test1 ja test4 andmeakna pikkus 1 periood). Madalamal edastamissagedusel on kõrgema veaga sättegrupid test5 ja test6. Nimetatud sättegrupid on ristküliku kujulise filtriga. Ülejäänud sättegruppidest eristuvad ka test1 ja test4, aga siiski vähesemal määral, kui kõrgemal edastamissagedusel.

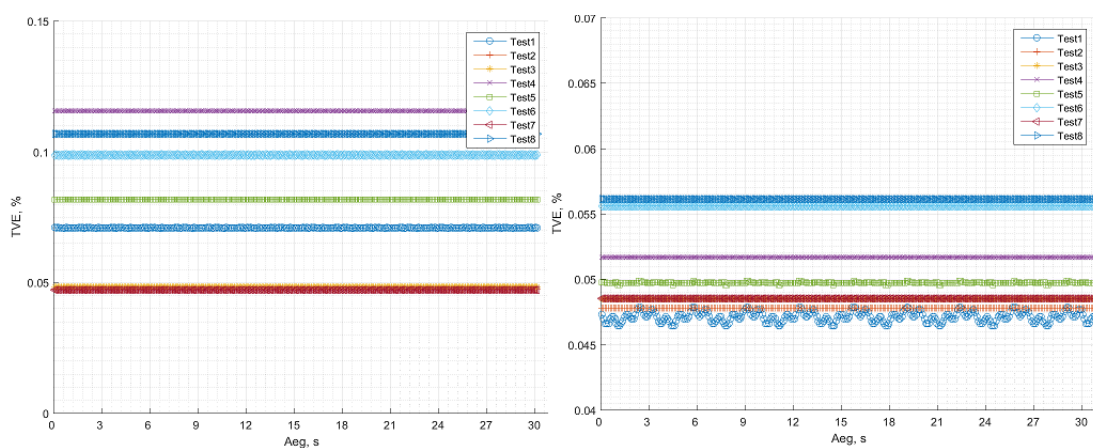
#### 4.2.4 PMU4 staatilise testi tulemused ja analüüs

Tabelis 3.19 on PMU4 sättegrupid staatilises testis.

**Tabel 4.19. PMU4 sättegrupid staatilise testi ajal**

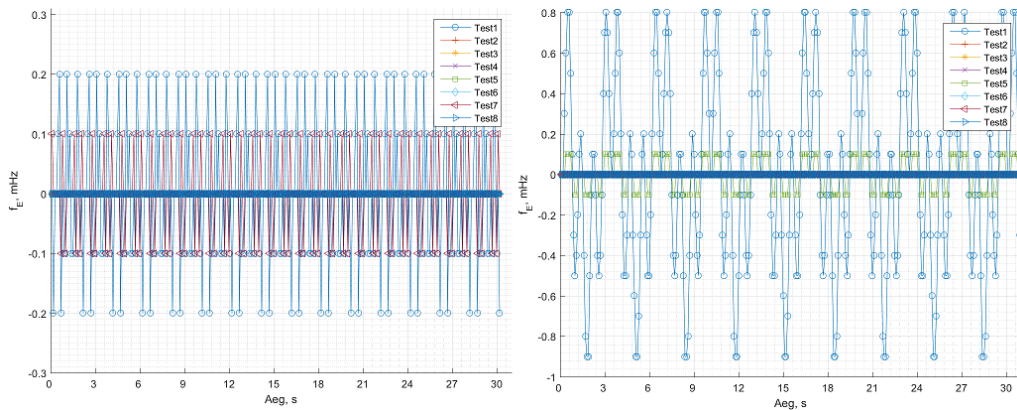
Sättegrupp	Edastamissagedus, fps	Filter
Test1	10	Hamming
Test2		Blackman
Test3		Kaiser
Test4		Hann
Test5		Gaussian
Test6		Blackman-Harris
Test7		Dolph-Chebyshev
Test8		Nutall
Test1	50	Hamming
Test2		Blackman
Test3		Kaiser
Test4		Hann
Test5		Gaussian
Test6		Blackman-Harris
Test7		Dolph-Chebyshev
Test8		Nutall

Joonisel 3.49 on PMU4 pinge TVE graafik staatilises testis (vasakul graafikul edastamissagedus 10 fps, paremal graafikul edastamissagedus 50 fps).



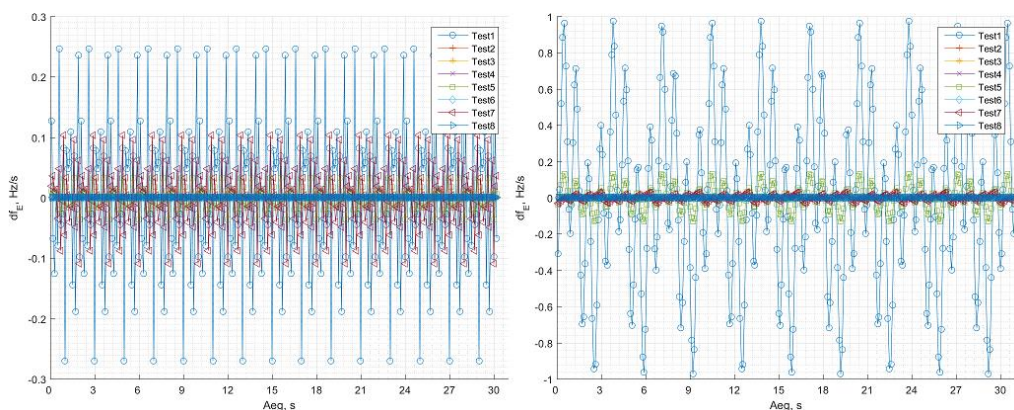
**Joonis 4.49. PMU4 pinge TVE staatilises testis (vasakul edastamissagedus 10 fps, paremal edastamissagedus 50 fps)**

Madalamal edastamissagedusel on PMU4 pingemõõteviga sättegruppidega test1, test4, test5, test6 ja test8 (vastavalt filtrid *Hamming*, *Hann*, *Gaussian*, *Blackman-Harris* ja *Nutall*) suurem kui kõrgemal edastamissagedusel. Kõrgemal edastamissagedusel on suurima mõõteviga test1 (filter *Hamming*). Staatilises testis on PMU4 mõõteviga suuremad kui dünaamilises testis. Põhjus on ilmselt staatilise testi suurem sageduse hälve nimisagedusest. Joonisel 3.50 on PMU4 sageduse viga staatilises testis (vasakul graafikul edastamissagedus 10 fps, paremal graafikul edastamissagedus 50 fps).



**Joonis 4.50. PMU4 sageduse viga staatilises testis (vasakul edastamissageduse 10 fps, paremal edastamissagedus 50 fps)**

PMU4 sageduse viga on sarnaselt pingemõõteviga sõltuv filtrist. Madalamal edastamissagedusel on suurima mõõteviga filtrid *Hamming* ja *Dolph-Chebyshev*. Edastamissagedusel 50 fps-i on suurima mõõteviga filtrid *Hamming* ja *Gaussian*. Ülejäänud filtrite puhul mõõteviga katses ei olnud. Joonisel 3.51 on PMU4 sageduse muutuse kiiruse viga staatilises testis (vasakul graafikul edastamissagedus 10 fps, paremal graafikul edastamissagedus 50 fps).



**Joonis 4.51. PMU4 sageduse muutuse kiiruse viga staatilises testis (vasakul edastamissagedus 10 fps, paremal edastamissagedus 50 fps)**

PMU4 sageduse muutuse kiiruse viga on sarnaselt sageduse veale sõltuv filtri valikust. Edastamissagedusel 10 fps-i on suurima mõõteveaga filtrid *Hamming* ja *Dolph-Chebyshev*. Edastamissagedusel 50 fps-i on suurima mõõteveaga filtrid *Hamming* ja *Gaussian*. Nimetatud filtrid olid probleemsed ka PMU4 sageduse veal. Ülejäänud filtrite mõõteveiga on sisuliselt nullilähedane. *Hamming* filtri mõõteveiga on kõrgemal edastamissagedusel kuni 1 Hz/s, mis on üpris suur mõõteveiga. Madalamal mõõtesagedusel on *Hamming* filtri viga väiksem.

### 4.3 Soovitused seadmete konfigureerimiseks

Mõõtetulemuste põhjal on võimalik teha järeldusi soovitusliku faasimõõteseadmete konfiguratsiooni kohta, mida on allpool iga PMU kohta ka tehtud. Tulemuste põhjal võib välja tuua mõningad üldistavad järeldused faasimõõteseadmete mõõtevea sõltuvusest konfiguratsioonist.

Kuigi katsetes oli andmeakna pikkust võimalik muuta ainult ühel faasimõõteseadmel, siis võib töö põhjal siiski järeldada mõõtevea tugevat sõltuvust andmeakna pikkusest. Katsete põhjal saab järeldada, et andmeakna pikkuse valik mõjutab PMU mõõtmisi rohkem, kui teised sätted. Töös läbi viidud katsete põhjal võib järeldada, et lühikesed andmeaknad (töös kasutati andmeakna pikkust 1 põhiharmooniku periood) on nii dünaamilistes kui ka staatilistes olukordades ebasoovitavad. Faasimõõteseadmetes on laialt levinud sageduse põhine sünkrofaasori kompenseerimine. Töös oli võimalik nimetatud algoritmi kasutada kahe seadmega. Dünaamilise testi tulemused ei näidanud sageduse põhise sünkrofaasori kompenseerimise vajalikust, samas ei mõjutanud säte ka mõõtmiste reaktsiooniga. Staatilises testis sageduse põhine kompenseerimine vähendas mõõteveiga, teise PMU puhul sättest tulenevalt märkimisväärseid erinevusi PMU mõõtmistes ei olnud. Kuna dünaamilises testis oli sageduse hälve põhisagedusest alla 100 mHz-i, siis ilmselt ei olnud sageduse muutus sünkrofaasori mõõtevea mõjutamiseks piisavalt suur. Sageduse suurtel hälvetel põhisagedusest võib mõõtmistel sageduse põhine kompenseerimine kasuks olla ning säte kasutamine töös ei suurendanud faasimõõtmiste viga.

Enamikul PMU-del on sätestusel võimalik valida filtri tüüp. Filtrite mõju mõõtetulemusele sõltus konkreetsest seadmest ja seadme filtrite valikust. Näiteks PMU1 filtrid mõjutasid mõõtetulemusi vähemärgatavalt, aga PMU2 filtri valikul oli mõõtetulemusele suurem roll. Töös võis märgata, et väiksema viitega filtrid võivad olla elektrisüsteemis parem valik. Väiksema latentsusega filtritel on kiirem reaktsiooniga, mistõttu on nende kasutamine dünaamilistes olukordades soovitatud. Suurema latentsusega filtrid võimaldavad paremat filtreerimist, aga

elektrisüsteemis üldiselt ei ole selliseid signaale, mille puhul see võiks välja tulla. Need filtrid on tõenäoliselt paremad ribavälise häiringu (olenevalt edastamissagedusest 55 – 100 Hz) olemasolul signaalis. Filtri valikul tuleks siiski esmalt arvestada filtri karakteristikutega ja erinevate olukordadega, mida seade peab mõõtma.

Töös uuriti ka edastamissageduse mõju mõõtetäpsusele. 50 Hz süsteemis on kõikidelt faasimõõteseadmelt nõutud vähemalt kolme edastamissageduse olemasolu: 10, 25 ja 50 fps. Töös uuriti neist kahte: 10 ja 50 fps. Edastamissageduse mõju mõõtetäpsusele oli märgata ainult ühel faasimõõteseadmel ning seda mõju oli võimalik vähendada teiste sätete õige valikuga. Mõõtmised edastamissagedusega 10 fps-i olid oodatult lühema reaktsioonijaga. Vahe reaktsiooniaegades oli siiski väike ja tulenes mõningatel juhtudel kõigest kõrgema edastamissageduse paremast resolutsioonist. Töös kasutatud edastamissagedusel ei täheldatud suurt erinevust faasimõõtmiste mõõtetäpsuses ja reaktsiooniajas.

#### 4.3.1 PMU1 soovituslik konfiguratsioon

PMU1 mõõteviga oli nii staatilises kui ka dünaamilises testis suhteliselt sõltumatu sättegrupi valikust. Pinge ja voolutugevuse mõõtetäpsus ei olnud mõjutatud sageduse põhiseisest kompenseerimisest ja sageduse muutuse kiiruse algoritmi valikust. Samuti ei olnud mõõtetäpsus mõjutatud edastamissageduse valikust. Dünaamilises testis olid kiiremad reaktsiooniajad filtri sättega F ja kõrgemal edastamissagedusel. Sageduse ja sageduse muutumise kiiruse mõõtmised sõltusid dünaamilises testis sageduse muutumise kiiruse algoritmi sättest. Nimetatud algoritmi sätte S korral oli sageduse ja sageduse muutumise kiiruse viga suurem kui sätte F korral. Staatilises testis ei olnud sageduse ja sageduse muutumise kiiruse viga sõltuv PMU1 sätestusest. Filtri valikul tuleb arvestada siiski ribavälise häiringu (olenevalt edastamissagedusest sageduse diapsoon 60 Hz – 120 Hz) olemasoluga, kuna filtri N eelis tuleb välja ribavälise häiringu olemasolus signaalis. Reaalsetes elektrisüsteemi mõõtmises on selliseid sagedusi siiski suhteliselt vähe ning seetõttu ei pruugi filter N omada eelist filtri F ees. PMU1 soovituslik sätestus katsete põhjal on tabelis 3.20. Katsete põhjal ei olnud

**Tabel 4.20. PMU1 soovituslik sättegrupp katsete põhjal**

<b>Edastamis-sagedus, fps</b>	<b>Filter (F – kiire, N – kitsas)</b>	<b>Sageduse põhine kompenseerimine (Y – sisse lülitatud, N – välja lülitatud)</b>	<b>Sageduse muutuse kiiruse algoritm (S – aeglane, F – kiire)</b>
50	F	Y või N	F

### 4.3.2 PMU2 soovituslik konfiguratsioon

PMU2 tulemused staatilises ja dünaamilises testis viitavad, et PMU2 konfigureerimisel tuleks valida ajamärgise paiknemine andmeakna suhtes keskele. Ajamärgise paiknemine andmeakna alguses mõjutab mõõtetäpsust tugevalt halvemuse poole. Staatiline ja dünaamiline test näitasid filtrite 60/50, 120/100 ja 240/200 eelist ülejäänud filtrite ees. Filtrite mõju oli tugevam dünaamilises testis. Filtrid 240/200 ja 120/100 on siiski üpriski laia pääsuribaga, mis võib suure teise harmooniku sisaldusega signaalis mõjutada mõõtetäpsust. Töö põhjal soovitatud filter on seetõttu 60/50 nii edastamissagedusele 10 fps-i kui ka 50 fps-i. Mõõtetäpsust edastamissageduse valik ei mõjutanud. PMU2 soovituslik sätestus katsete põhjal on tabelis 3.21.

**Tabel 4.21. PMU2 soovituslik sättegrupp katsete põhjal**

Edastamis-sagedus, fps	Filter	Andmeakna paiknemine ajamärgise suhtes
10 või 50	60/50	Keskel

### 4.3.3 PMU3 soovituslik konfiguratsioon

PMU3 mõõtetäpsus staatilises ja dünaamilises katses oli mõjutatud mitmetest sätetest. Peamine mõõtetäpsust mõjutanud säte oli andmeakna pikkus. Mõlema testi puhul oli mõõtetäpsus parem pikema andmeakna korral, samas dünaamilises testis oli lühema andmeakna valikul reaktsiooniaeg kiirem. Mõõtetäpsuse halvenemine siiski lühema andmeakna valikul oli siiski märgatav, seega on katsete põhjal soovituslik valida pikem andmeaken. Katses kasutati andmeakna pikkuseks 5 perioodi, kuid seadme konfigureerimisel võib valida ka teisi sätteväärtusi selle andmeakna pikkuse läheduses. Dünaamilises testis ei olnud PMU3 mõõtetulemus mõjutatud sageduse põhiseest kompenseerimisest. Põhjuseks võis olla sageduse liiga väike hälve, et säte omaks märkimisväärset mõju mõõtetäpsusele ja reaktsiooniajale. Staatilises testis oli sageduse hälve suurem ning selles testis omas sageduse põhine kompenseerimine suurt mõju mõõtetäpsusele. Töös soovitatakse sageduse põhine kompenseerimine sisse lülitada ning sätte suuruseks valida kas  $\pm 2$  Hz või  $\pm 5$  Hz tagamaks mõõtetäpsust ka sageduse hälbel põhised sagedusest. Filtrite valik mõjutab PMU3 mõõtetäpsust vähesel määral. Dünaamilises testis ei olnud filtri valikul suurt mõju PMU3 mõõtetäpsusele. Staatilises testis oli PMU3 mõõtetäpsus mõnevõrra halvem ristküliku kujulise filtri valikul. Teooria viitab, et suhteliselt sarnaselt võib käituda ka kolmnurkse kujuga filter, seega on soovitatud konfigureerimisel vältida neid kahte filtrit. Viga filtrite vahel ei olnud samas suur, seega tõenäoliselt ei oma filtri valik nii suurt tähtsust kui näiteks andmeakna pikkuse valik.



PMU3 mõõtetäpsus oli tugevalt mõjutatud edastamissageduse valikust. Madalamal edastamissagedusel oli PMU3 mõõteviga väiksem kui kõrgemal edastamissagedusel. Samuti oli madalamal edastamissagedusel PMU3 mõõteviga vähem tundlik sättegrupi valikust. Kõrgemal edastamissagedusel oli mõõtetäpsus tugevalt sõltuv sättegrupi valikust. Samas õige konfigureerimise korral on ilmselt võimalik saada PMU3 mõõtetäpsus soovitud tasemele. Tabelis 3.22 on katsete põhjal PMU3 soovituslik sätestus.

**Tabel 4.22. PMU3 soovituslik sätestus katsete põhjal**

Edastamissagedus, fps	Filter	Sageduse põhine kompenseerimine	Andmeakna pikkus põhiharmoniku perioodides
10 või 50	Mitte valida ristkülikut või kolmnurka	$\pm 2$ Hz või $\pm 5$ Hz	5

#### 4.3.4 PMU4 soovituslik konfiguratsioon

PMU4 mõõtmiste põhjal sai hinnata edastamissageduse ja filtrite mõju mõõtetäpsusele. PMU4 mõõtetäpsus oli nii staatilises kui ka dünaamilises testis suur ning filtrite ja edastamissageduste mõju mõõtetäpsusele oli väike. Staatilises testis oli mõnevõrra parem mõõtetäpsus madalamal edastamissagedusel. Filtrite valikus näitasid parimat mõõtetäpsust filtrid *Blackman* ja *Kaiser*. Tuleb jällegi märkida, et filtrite vahe oli väike ning füüsilises PMU-s ei ole tõenäoliselt võimalik eristada filtri viga teistest mõõtevea allikatest. Staatiline katse tehti ainult ühel sagedusel. Filtrite viga on aga sõltuv sagedusest ning seetõttu võib muudel sagedustel olla filtrite võrdluses viga erinev. Töö tulemusena antakse küll filtri soovitus, kuid tõenäoliselt tuleks faasimõõtmiste jaoks parima filtri määramiseks teha mahukamaid katseid.

**Tabel 4.23. PMU4 soovituslik sätestus katsete põhjal**

Edastamissagedus, fps	Filter
10 või 50	<i>Blackman</i> või <i>Kaiser</i>

# Kokkuvõte

Käesolevas töös uuriti faasimõõteseadme mõõtetehnoloogiaid. Mõõtetehnoloogiate uurimiseks tehti teoreetiline ülevaade faasimõõteseadmete mõõtmistest, kus kirjeldati peamisi faasimõõteseadme plokkide ja algoritme. Faasimõõteseadmete mõõtetehnoloogiate testimiseks viidi läbi kaks testi, kus uuriti faasimõõteseadme konfiguratsiooni mõju mõõtetulemustele. Testimise tulemusena anti soovitusi faasimõõteseadme konfigureerimiseks.

Töö esimeses peatükis on faasimõõtmiste teoreetiline ülevaade ning faasimõõteseadme peamiste plokkide ja algoritmide kirjeldus. Faasimõõteseade põhimõtteskeem koosneb mõõtesensoritest, A/D konverterist ja faasimõõtmiste estimaatori algoritmist. Töös on kirjeldatud A/D konverteris aset leidvat signaali diskreetimist ning tema mõjust faasimõõtmiste lõpptulemusele. Faasimõõteseadmes järgneb A/D konverterile faasimõõtmiste estimateerimine. Faasimõõtmiste tulemuseks on pinge ja voolutugevuse sünkrofaasor, sagedus ja sageduse muutuse kiirus. Faasimõõteseade peab suutma diskreetitud signaali alusel estimateerida neid kolme parameetrit. Peamiselt kasutatakse faasimõõteseadmetes kahte sünkrofaasori estimaatori algoritmi: DFT-1 (ing. k. *Discrete Fourier Transform*) põhinevat algoritmi ja demodulatsioonil põhinevat algoritmi. Mõlema algoritmi tööpõhimõtet on töös kirjeldatud. Faasimõõtmiste estimaatori algoritm sisaldab mõõtetäpsuse tagamiseks filtreid. Estimaatori algoritm on seadme valmistamisel kindlaks määratud, aga filtri sätet on enamasti võimalik muuta. Töös on kirjeldatud digitaalsete filtrite tööpõhimõtet ning erinevaid filtrite tüüpe.

Töö teises osas on kirjeldatud faasimõõteseadme katsetamise põhimõtted ja töö raames läbi viidud katsetuste skeemi ja seadmeid. Esmalt on toodud ülevaade faasimõõtmiste standarditest ning faasimõõteseadmete katsetamisest maailmas. Välja on toodud katsetuste käigus selgunud faasimõõteseadmete peamised probleemsed kohad. Töö raames viidi läbi faasimõõteseadmete katsetamine kahes olukorras (dünaamiline ja staatiline) ning erinevate sättegruppidega, et välja selgitada faasimõõteseadme konfiguratsiooni mõju mõõtetulemusele. Teises peatükis on reaalajasimulaatoris RTDS koostatud mudelite kirjeldus ning loetelu konfiguratsiooni sätetest, mida faasimõõteseadmetes katsete käigus testiti. Samuti on põhjendatud testmudelite valikut. Teine peatükk lõpeb kasutatud seadmete kirjeldusega. Faasimõõteseadmete testimiseks kasutati reaalajasimulaatorit RTDS, võimendit Omicron CMS356, GPS kella SEL 2407 ning nelja faasimõõteseadet. Reaalajasimulaator RTDS koosneb paljudest komponentidest, millest kirjeldatud on ainult töös kasutatud komponente. RTDS-i abil ei ole võimalik pinge- ja voolusignaale otse faasimõõteseadmetesse anda, mistõttu on vajalik RTDS-i signaale

võimendada. Signaalide võimendamiseks kasutati võimendit Omicron CMS356. Testimise läbiviimiseks on vajalik nii faasimõõteseadmep kui ka reaajasimulaator sünkroniseerida GPS ajaga, milleks kasutati GPS kella SEL 2407. Kirjeldatud on ka nelja testitud faasimõõteseadet, millest kolm olid füüsilised seadmed ning üks virtuaalne seade RTDS simulatsioonis.

Viimases peatükis on toodud teises peatükis kirjeldatud mudelite alusel läbi viidud katsete tulemusi. Katsed viidi läbi kahel edastamissagedusel: 50 fps-i ja 10 fps-i. Kirjeldatud on ka konkreetsete seadmete testitud konfiguratsioone. Tulemused on esitatud faasimõõtmiste mõõteveana, ehk siis hinnatud on TVE (sünkrofaasori viga), FE (sageduse viga) ja RFE (sageduse muutuse kiiruse viga) suurust. Dünaamilises testis on kasutatud faasimõõtmiste tulemuste hindamiseks referentsfaasorina RTDS PMU klass P faasimõõteseadet, mis tagab piisavalt täpse referentsi. Staatilises testis on võimalik kasutada mõõtevea arvutamiseks referentsina matemaatiliselt avaldatud väärtusi. Mõlemas testis analüüsiti tulemuste abil sättegruppide ja üksikute sätete mõju faasimõõtmiste täpsusele ning selle alusel on toodud soovitusel faasimõõteseadmep sätetamiseks.

Faasimõõteseadmep kasutati testide vältel erinevaid sätteid. Vaadeldud sätteid olid järgmised.

- sageduse põhine sünkrofaasori kompenseerimine
- andmeakna pikkus
- filtri tüüp
- andmeakna paiknemine ajamärgise suhtes
- sageduse muutuse kiiruse algoritmi valik
- edastamissagedus

Sätete valik sõltus konkreetsest seadmep. Uuriti erinevate sätete mõju faasimõõteseadmep mõõtetäpsusele ja kiirusele. Kuigi käsitleti ainult konkreetseid faasimõõteseadmep töös tehtud katsetes võib katsete tulemustes märgata mõningaid iseloomulike jooni.

Sageduse põhine sünkrofaasori kompenseerimine ei avaldanud faasimõõtmep väikesel sageduse hääbel põhisedusest märkimisväärt mõju. Faasimõõteseadmep mõõtetäpsus ei paranenud ega halvenenud ja reageerimisaeg jäi samaks nii sätete sees kui ka väljas olekul. Suuremal sageduse hääbel nimisedusest parandas sätete mõõtetäpsust. Andmeakna pikkuse mõju faasimõõtmep uuriti ühe faasimõõteseadmep abil ning kahe andmeakna pikkuse korral. Nimetatud sätete mõju faasimõõtmep oli võrreldes teiste sätetega suur. Töös selgus, et pikem andmeaken (5 põhiharmoniku perioodi) on sobilikum kui lühem andmeaken (1 põhiharmoniku perioodi). Viie põhiharmoniku perioodi pikkune andmeaken on ilmselt ka hea

valik andmeakna pikkuseks, samas optimaalse andmeakna pikkuse määramine nõuaks rohkem katsetamist.

Filtri valiku mõju faasimõõtmistele erines testitud faasimõõteseadmete vahel. Teoreetiliselt peaks väiksema viitega filtrid olema paremad dünaamiliste olukordade mõõtmisel ning sobilikuma sageduskajaga (ing. k. *frequency response*) filtrid paremad signaali ribavälise häiringuga (olenevalt edastamissagedusest on ribaväline häiring sagedusega 55 – 100 Hz) signaali mõõtmisel. Testides olid paremate tulemustega väiksema viitega filtrid. Parema sageduskarakteristikuga filtrid ei omanud eelist ilmselt ribavälise häiringu puudumise tõttu signaalis. Faasimõõtmiste filtreerimist võib läbi viia ka aknafunktsioonidega (ing. k. *window function*). Katsetulemused ei näidanud ühegi aknafunktsiooni selget eelist või puudust teiste ees. Ühe faasimõõteseadme katsetulemused viitasid ristküliku kujulise aknafunktsiooni kasutamisel mõnevõrra suuremat mõõteviiga. Ristküliku ja kolmnurga kujulised aknafunktsioonid on ühed lihtsamad aknafunktsioonid. Teiste valikute olemasolul tuleks neid vältida. Ülejäänud aknafunktsioonide kasutamisel suuri erinevusi mõõtetulemustes ei täheldatud. Tõenäoliselt on mõõtetulemuste erinevus keerulisemate aknafunktsioonide korral märgatav põhisageduse suurel kõikumisel ning selle välja selgitamiseks tuleks korraldada käesolevast töös korraldatutest mahukamaid katseid.

Ajamärgise paiknemine andmeakna suhtes on faasimõõtmiste standardis IEEE C37.118.1-2011 määratud andmeakna keskele. Tööst selgus, et ajamärgise paigutamine andmeakna algusesse tekitab dünaamilistes olukordades ja nimisagedusest erinevate signaalide korral märgatava mõõtevea. Faasimõõteseadme seadistamisel tuleks seetõttu määrata ajamärgis standardi IEEE C37.118.1-2011 kohaselt andmeakna keskele. Sageduse muutuse kiiruse algoritmi valik võimaldab määrata sageduse muutuse kiiruse arvutusel kasutatavate sageduse estimaatide hulka. Tulemused näitasid, et suurema hulga sageduse andmete kasutamine dünaamilises testis sageduse muutuse kiiruse arvutamisel suurendas sageduse ja sageduse muutuse kiiruse mõõteviiga.

Edastamissageduse mõju faasimõõteseadmete mõõtetäpsusele oli töös läbi viidud katsetes vähene. Kõrgema edastamissagedusega mõõtmised peaksid dünaamilistes olukordades olema lühema reageerimisajaga ning madalama edastamissagedusega mõõtmised seevastu peaksid olema stabiilsemad ning staatilistes olukordades paremad. Tõenäoliselt siiski sõltub reageerimisaeg ja mõõtetäpsus rohkem andmeakna pikkusest kui edastamissagedusest ning edastamissageduse roll on ainult ära määrata faasimõõtmiste resolutsioon.

Faasimõõteseadmeh sätetamisel võib töö tulemusena lähtuda järgmisest soovitustest.

- Sageduse põhine sünkrofaasori kompenseerimine sisse
- Andmeakna pikkus 5 põhiharmooniku perioodi
- Kasutada lühema viitega filtreid
- Ajamärgis andmeakna keskele

Töö tulemusena on välja selgitatud töös kasutatud seadmetele sobivad konfiguratsioonid. Tulemuste analüüsi käigus on uuritud sätetuse mõju faasimõõtmistele ning selle käigus välja selgitatud sätete mõju mõõteveale. Tehtud on ülevaade faasimõõteseadmeh enamkasutatavatest tehnoloogiatest ja komponentidest. Käesolev töö võimaldab faasimõõteseadmeh mõõtetehnoloogiatest ülevaatlikult aru saada ning töö annab soovitusi faasimõõteseadmeh konfigureerimiseks. Faasimõõteseadmehes kasutatavate mõõtetehnoloogiate mõju täpsemaks uurimiseks on vajalikud siiski mahukamad katsed suunatud konkreetselt ühe aspekti uurimiseks.

## Kasutatud kirjandus

- [1] I. Palu, M. Valdma, M. Meldorf, M. Keel, J. Šuvalova, V. Šlenduhoov, T. Kangro, S. Vaino, T. Sarnet, J. Kilter, E. Ülaver ja A. Reinson, „Eesti elektrisüsteemi laiseiresüsteemi arendamine ja analüüs (WAMPAC), I etapi aruanne,“ Tallinn, 2014.
- [2] Ü. Treufeldt, Lühised Elektrisüsteemis, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2002.
- [3] A. Monti, C. Muscas ja F. Ponci, Phasor Measurement Units and Wide Area Monitoring Systems, Elsevier, 2016.
- [4] *C37.118.1-2011 - IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems*, 2011.
- [5] IEEE, *C37.118.2-2011 - IEEE Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems*, 2011.
- [6] A. V. Oppenheim ja R. W. Shafer, Discrete-time signal processing - 3rd Edition, Harlow, Essex, UK: Pearson Education Limited, 2014.
- [7] S. B. Smith, The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing, Newnes, 2002.
- [8] Range Council Commanders - Telecommunications and Timing Group, „IRIG Serial Time Code Formats,“ September 2004. [Võrgumaterjal]. Available: <http://irigb.com/pdf/wp-irig-200-04.pdf>. [Kasutatud 9 Märts 2017].
- [9] I. Kamwa, S. R. Samantaray ja G. Joos, „Wide Frequency Range Adaptive Phasor and Frequency PMU Algorithms,“ *IEEE Transactions On Smart Grid*, kd. V, nr 2, pp. 569-579, 2014.
- [10] W. C. James ja W. T. John, „An Algorithm for Machine Calculation of Complex Fourier Series,“ *Mathematics of Computation*, nr 19, pp. 297-301, 1965.
- [11] G. D. Bergland, „A guided tour of the fast fourier transform,“ *IEEE Spectrum*, kd. 6, nr 7, pp. 41-52, 1969.

- [12] F. J. Harris, „On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform,“ *Proceedings of the IEEE*, kd. 66, nr 1, pp. 51 - 83, 1977.
- [13] R. W. Hamming, *Digital Filters*, Third Edition, Mineola, New York: Dover Publications, Inc., 1998.
- [14] *C37.118.1a-2014 - IEEE Standard for Synchrophasor measurements for Power Systems - Amendment 1: Modification of Selected Performance Requirements*, 2014.
- [15] *C37.242-2013 - IEEE Guide for Synchronization, Calibration, Testing, and Installation of Phasor Measurement units (PMUs) for Power System Protection and Control*, 2013.
- [16] R. M. Moraes, Y. Hu, G. Stenbakken, K. Martin, J. E. R. Alves, Jr., A. G. Phadke, H. A. R. Volskis ja V. Centeno, „PMU Interoperability, Steady-State and Dynamic Performance tests,“ *IEEE Transactions On Smart Grid*, kd. 3, nr 4, pp. 1660-1670, 2012.
- [17] G. Allen, „2014 NIST Assessment of Phasor Measurement Unit Performance,“ National Institute of Standards and Technology, 2016.
- [18] D. R. Gurusinge, A. D. Rajapakse ja K. Narendra, „Evaluation of Steady-State and Dynamic Performance of a Synchronized Phasor Measurement Unit,“ %1 *IEEE Electrical Power and Energy Conference*, London, Ontario, Canada, 2012.
- [19] R. Ghiga, Q. Wu, Martin, K. Martin, W. El-Khatib, L. Cheng ja A. H. Nielsen, „Steady-State PMU Compliance test under C37.118.1a-2014,“ %1 *PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe*, Ljubljana, Slovenia, 2016.
- [20] R. Ghiga, Q. Wu, K. Martin, W. Z. El-Khatib, L. Cheng ja A. Nielsen, „Dynamic PMU compliance test under C37.118.1a-2014,“ %1 *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Denver, Colorado, USA, 2015.
- [21] M. Balabin, K. Görner, Y. Li, I. Naumkin ja C. Rehtanz, „Evaluation of PMU performance during transients,“ %1 *Power Systems Technology*, Hangzhou, China, 2010.
- [22] RTDS Technologies, *RTDS User's manual*, RTDS Technologies, 2015.
- [23] Omicron Electronics GmbH, *CMS356 Reference Manual*, Omicron Electronics GmbH, 2016.

- [24] Schweitzer Engineering Laboratories, *SEL-2407 Sattelite Synchronized Clock Instruction Manual*, Pullman, Washington, USA, 2013.
- [25] Schweitzer Engineering Laboratories, *SEL-487E*, Schweitzer Engineering Laboratories, 2013.
- [26] ABB, *Technical reference manual, RES670 ANSI 1.2*, ABB, 2015.
- [27] Arbiter Systems, Inc, *Model 1133A User Manual*, Arbiter Systems, Inc, 2017.
- [28] Arbiter Systems, Inc, *Model 1133A Phasor Measurement Specifications*, Arbiter Systems, Inc, 2017.



# Lisad

L.1. Faasimõõtmiste nõuded staatilises testis

L.2. Faasimõõtmiste nõuded dünaamilises testis

## L.1. Faasimõõtmiste nõuded staatilises olukorras

Tabelites L.1.1 ja L.1.2 on faasimõõteseadmetele standardiga IEEE C37.118.1-2011 esitatud staatilise testide nõuded. Tabelis L.1.1 on nõuded sünkrofaasori mõõtetäpsusele ja tabelis L.1.2 on nõuded sageduse ja sageduse kiiruse muutumise mõõtetäpsusele. Standardi lisaga IEEE C37.118.1a-2014 osaliselt leevendati sageduse ja sageduse muutumise kiiruse nõudeid. Tabel L.1.2 on muudetud nõuetega kooskõlla viidud. Testide kirjeldused ja soovitused nende läbiviimiseks on standardis IEEE C37.242-2013.

**Tabel L.1.1. Nõuded sünkrofaasorile staatilises olukorras [3]**

Mõjutatav parameeter	Referentsväärtus	Mõjutatava parameetri minimaalne väärtus, mille korral peab TVE nõue täidetud olema			
		Klass P		Klass M	
		Diapasoon	Max TVE (%)	Diapasoon	Max TVE (%)
Sageduse hälve - $f_{dev}$ (1)	Nimisagedus - $F_0$	$\pm 2.0$ Hz	1	$\pm 2.0$ Hz kui $F_s < 10$ $\pm F_s/5$ kui $10 \leq F_s \leq 25$ $\pm 5.0$ Hz kui $F_s \geq 25$	1
Pinge amplituud	100% nimisuuruses $t$	80% - 120% nimisuurusest	1	10% - 120% nimisuurusest	1
Voolutugevuse amplituud	100% nimisuuruses $t$	10% - 200% nimisuurusest	1	10% - 200% nimisuurusest	1
Faasinurk, kui $ f_{in} - f_0  < 0,25$ Hz (2)	Konstantne või aeglaselt muutuv faasinurk	$\pm \pi$ rad	1	$\pm \pi$ rad	1
Harmonikute moonutus	$< 0,2\%$ (THD)	1%, kõik harmoonikud kuni 50 järguni	1	10%, kõik harmoonikud kuni 50 järguni	1
Ribaväline ( <i>out-of-band</i> ) häiring (3) (4)	$< 0,2\%$ (THD)		-	10% sisendsignaali amplituudist kui $F_s \geq 10$ $F_s < 10$ ei reguleerita	1,3

Ribavälise häiringuga test: Faasimõõtmiste pääsuriba laius on defineeritud kui  $|f - f_0| < F_s/2$ . Ribaväline häiring on signaal väljaspool pääsuriba ehk signaal sagedusega  $f$  kui  $|f - f_0| \geq F_s/2$ . Ribavälise häiringuga signaaliga testis muudetakse signaali põhisedust  $f_{in}$  valemiga L.1.1 määratud piirides.

$$f_0 - 0,1(F_s/2) \leq f_{in} \leq f_0 + 0,1(F_s/2) \quad (\text{L.1.1})$$

$f_0$  – nimisagedus

$F_s$  – edastamissagedus

$f_{in}$  – sisendsignaali põhisagedus

- (1) – Sageduse hälbe test tuleb läbi viia kolmel väliskeskkonna temperatuuril: 23°C ( $\pm 3^\circ\text{C}$ ), 0°C ja 50°C.
- (2) – Faasinurga testi võib sooritada sisendsignaali  $f_{in}$  hälbega nimisagedusest  $f_0$ , kui  $|f_{in} - f_0| < 0,25$  Hz. Väikene sageduse hälbe nimisagedusest võimaldab tekitada aeglaselt muutuva faasinurga, mis lihtsustab testimist märkimisväärselt mõjutamata teisi parameetreid.
- (3) – Signaal, mille sagedus ületab edastamissagedusega  $F_s$  määratud Nyquisti sageduse, võib esineda pääsuribas. Ribavälise häiringuga test kontrollib PMU spektri kattumisvastase filtri efektiivsust.
- (4) – Ribavälise häiringuga testi saab läbi viia kasutades testsignaali, mis koosneb ühel sagedusel häiringusignaali liidetuna nimisagedusel signaaliga. Testi korratakse kogu ribavälise häiringu testi diapasooni sagedustega. Pärijärgnevuse mõõtmisel on ka häiringusignaali pärijärgnevussignaali.

**Tabel L.1.2. Nõuded sagedusele ja sageduse muutuse kiiruse mõõtmisele staatilises testis [3] [13]**

Mõjutatav parameeter	Referentsväärtus	Nõuded mõõteveale			
		Klass P		Klass M	
Signaali sagedus	Sagedus $f_0$ , faasinurk konstantne	Diapsoon: $f_0 \pm 2.0$ Hz		Diapsoon $f_0$ ümber: $\pm 2.0$ Hz, kui $F_s \leq 10$ $\pm F_s/5$ , kui $10 \leq F_s < 25$ $\pm 5$ Hz, kui $F_s \geq 25$	
		Maksimaalne FE	Maksimaalne RFE	Maksimaalne FE	Maksimaalne RFE
		0,005 Hz	0,4 Hz/s	0,005 Hz	0,1 Hz/s
Harmonikut e moonutus	<0,2% THD	1% igast harmoonikust kuni 50. järguni		10% igast harmoonikust kuni 50. järguni	
		Maksimaalne FE	Maksimaalne RFE	Maksimaalne FE	Maksimaalne RFE
	$F_s > 20$	0,005 Hz	0,4 Hz/s	0,025 Hz	-
	$F_s \leq 20$	0,005 Hz	0,4 Hz/s	0,005 Hz	-
Ribavälise häiring (samad testi tingimused kui tabelis L.1.1)	<0,2% sisendsignaalist	Ei ole nõutud		Ribavälise häiringu signaal 10% põhisagedusel signaalist	
				Maksimaalne FE	Maksimaalne RFE
				0,01 Hz	-

## L.2. Faasimõõtmiste nõuded dünaamilises olukorras

Tabelites L.2.1, L.2.2, L.2.3, L.2.4, L.2.5 ja L.2.6 on faasimõõteseadmetele standardiga IEEE C37.118.1-2011 esitatud nõuded dünaamilistes olukordades. Tabelis L.2.1 ja tabelis L.2.2 on vastavalt sünkrofaasori ning sageduse ja sageduse muutuse kiiruse mõõtevea nõuded amplituudi- ja faasinurga modulatsiooni katses. Tabelis L.2.3 ja tabelis L.2.4 on vastavalt sünkrofaasori ning sageduse ja sageduse muutuse kiiruse mõõtevea nõuded sageduse muutuse katses. Tabelis L.2.5 ja tabelis L.2.6 on nõuded vastavalt sünkrofaasori ning sageduse ja sageduse muutuse kiiruse mõõtevea nõuded sisendsignaali hüppe katses. Kõigis kolmes dünaamilises katses on standardi lisaga IEEE C37.118.1a-2014 uuendatud mõõtevea nõudeid.

**Tabel L.2.1. Nõuded sünkrofaasorile amplituudi- ja faasinurga modulatsiooni katses [3] [13]**

Modulatsiooni tase	Referents-tingimused	Mõjutatava parameetri minimaalne väärtus, mille korral peab TVE nõue täidetud olema			
		Klass P		Klass M	
		Diapasoon	Max TVE (%)	Diapasoon	Max TVE (%)
$k_x = 0,1$ $k_a = 0 \text{ rad}$	Signaali nimisagedus ja nimiamplituud	Modulatsioonisagedus alates 0,1 Hz kuni $F_s/10$ või 2 Hz-ni (valida väiksem väärtus)	3	Modulatsioonisagedus alates 0,1 Hz kuni $F_s/5$ või 5 Hz-ni (valida väiksem väärtus)	3
$k_x = 0$ $k_a = 0,1 \text{ rad}$	Signaali nimisagedus ja nimiamplituud		3		3

**Tabel L.2.2. Nõuded sageduse ja sageduse muutuse kiiruse veale amplituudi- ja faasinurga modulatsiooni katses [3] [13]**

	Nõuded mõõteveale					
	Klass P			Klass P		
Edastamis-sagedus $F_s$	$F_r$ (Hz)	Max FE (Hz)	Max RFE (Hz/s)	$F_r$ (Hz)	Max FE (Hz)	Max RFE (Hz/s)
10	1	0,03	0,6	1	0,12	2,3
12	1,2	0,04	0,8	1,2	0,14	3,3
15	1,5	0,05	1,3	1,5	0,18	5,1
20	2	0,06	2,3	2	0,24	9,0
25	2	0,06	2,3	2	0,30	14
30	2	0,06	2,3	2	0,30	14
50	2	0,06	2,3	2	0,30	14
60	2	0,06	2,3	2	0,30	14

$F_r$  – Maksimaalne modulatsioonisagedus

Amplituudi- ja faasinurga modulatsiooni katsetes on testitavad kolmefaasilised sisendsignaalid  $X_a$ ,  $X_b$  ja  $X_c$  avaldatud järgmiste valemitega.

$$X_a = X_m [1 + k_x \cos(\omega t)] * \cos[\omega_0 t + k_a \cos(\omega t - \pi)] \quad (\text{L.2.1})$$

$$X_b = X_m [1 + k_x \cos(\omega t)] * \cos[\omega_0 t - \frac{2\pi}{3} + k_a \cos(\omega t - \pi)] \quad (\text{L.2.2})$$

$$X_c = X_m [1 + k_x \cos(\omega t)] * \cos[\omega_0 t + \frac{2\pi}{3} + k_a \cos(\omega t - \pi)] \quad (\text{L.2.3})$$

Valemities L.2.1, L.2.2 ja L.2.3 on  $X_m$  sisendsignaali nimiamplituud,  $\omega_0$  on nimisagedus,  $\omega$  on modulatsioonisagedus rad/s (tabelis L.2.2 tähistatud  $F_r$ ),  $k_x$  on amplituudi modulatsiooni tegur ja  $k_a$  on faasinurga modulatsiooni tegur.

**Tabel L.2.3. Nõuded sünkrofaasorile sageduse muutuse katses [3] [13]**

Testsignaal	Referents-tingimused	Mõjutatava parameetri minimaalne väärtus, mille korral peab TVE nõue täidetud olema				
		Sageduse muutuse kiirus	PMU klass	Välistusintervall (1)	Sageduse muutuse suurus	Max TVE (%)
Lineaarne sageduse muutus	Nimisagedus ja nimiamplituud	$\pm 1.0 \text{ Hz/s}$	P	$2/F_s$	$\pm 2 \text{ Hz}$	1
			M	$7/F_s$	$\pm (F_s/5)$ või $\pm 5 \text{ Hz}$ (väiksem väärtus valikust)	1

**Tabel L.2.4. Nõuded sagedusele ja sageduse muutuse kiirusele sageduse muutuse katses [3] [13]**

Testsignaal	Referents-tingimused	Välistusintervall		Nõuded mõõteveale			
		Klass P	Klass M	Klass P		Klass M	
Sama mis tabelis L.3.3	Signaali nimiamplituud ja faasinurk 0 rad	$2/F_s$	$7/F_s$	Max FE	Max RFE	Max FE	Max RFE
				0,01 Hz	0,4 Hz/s	0,01 Hz	0,2 Hz/s

$F_s$  – edastamissagedus

(1) – Välistusintervall on katses ajavahemik, mille jooksul faasimõõtseade ei pea vastama standardis toodud nõuetele.

**Tabel L.2.5. Nõuded sünkrofaasorile sisendsignaali hüppe katses [3] [13]**

Signaali hüppe kirjeldus	Referents-tingimused	Maksimaalne reageerimisaeg, hilistusaeg ja ülevise					
		Klass P			Klass M		
		Reageerimisaeg, s	Hilistusaeg, s	Ülevise	Reageerimisaeg, s	Hilistusaeg, s	Ülevise
Amplituud $\pm 10\%$	Kõik signaali parameetrid nimitingimustel katse alguses ja lõpus	$2/f_0$	$1/(4*F_s)$	5% hüppe väärtusest	$7/f_0$	$1/(4*F_s)$	10% hüppe väärtusest
Faasinurk $\pm 10^\circ$		$2/f_0$	$1/(4*F_s)$	5% hüppe väärtusest	$7/f_0$	$1/(4*F_s)$	10% hüppe väärtusest

**Tabel L.2.6. Nõuded sageduse ja sageduse muuruse kiiruse mõõtmistele sisendsignaali hüppe katses [3] [13]**

Signaali hüppe kirjeldus	Referents-tingimused	Maksimaalne reageerimisaeg, s			
		Klass P		Klass M	
		Sagedus	Sageduse muutumise kiirus	Sagedus	Sageduse muutumise kiirus
Amplituud $\pm 10\%$	Sama, mis tabelis L.2.5	$4,5/f_0$	$6/f_0$	$14/F_s$ või $14/F_0$ (1)	$14/F_s$ või $14/F_0$ (1)
Faasinurk $\pm 10^\circ$	Sama, mis tabelis L.2.5	$4,5/f_0$	$6/f_0$	$14/F_s$ või $14/F_0$ (1)	$14/F_s$ või $14/F_0$ (1)

(1) – Valida kahest valikust suurem väärtus