



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
ELEKTROENERGEETIKA INSTITUUT

Väiketootja mõju pingekvaliteedile jaotusvõrgus Elektrilevi OÜ näitel

Elektroenergeetika õppekava

Kõrgepingetehnika õppetool

Magistritöö

Õppetooli juhataja prof J. Valtin

Juhendaja ass J. Niitsoo

Lõpetaja R. Armas

Tallinn 2014

Autorideklaratsioon

Deklareerin, et käesolev lõputöö, mis on minu iseseisva töö tulemus, on esitatud Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika instituudile haridusastme lõpudiplomi taotlemiseks elektroenergeetika erialal. Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Lõpetaja (allkiri ja kuupäev) _____

Lõputöö kokkuvõte

<i>Autor:</i> Rasmus Armas	<i>Lõputöö liik:</i> Magistritöö
<i>Töö pealkiri:</i> VÄIKETOOTJATE MÕJU PINGEKVALITEEDILE JAOTUSVÕRGUS ELEKTRILEVI OÜ NÄITEL	
<i>Kuupäev:</i> 02.06.2014	71 lk
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool	
<i>Teaduskond:</i> Energeetika	
<i>Instituut:</i> Elektroenergeetika	
<i>Õppetool:</i> Kõrgepingetehnika	
<i>Töö juhendaja(d):</i> assistent Jaan Niitsoo	
<i>Töö konsultant (konsultandid):</i> –	
<i>Sisu kirjeldus:</i> Lõputöö ajendiks on hajatootmiseseadmete üha suurenev levik ja töö eesmärgiks on anda teoreetiline ülevaade väiketootjate liitumisega seotud võimalikest mõjudest pingekvaliteedile ning analüüsida pikaajaliste mõõtmisandmete alusel mõjusid Elektrilevi OÜ jaotusvõrgus. Töö esimeses peatükis antakse teoreetiline ülevaade väiketootjate mõistest ja liigitusest ning väiketootja liitumisprotseduurist Elektrilevi OÜ jaotusvõrguga. Töö teises peatükis antakse ülevaade avalike jaotusvõrkude ja tootmiseseadmetega seotud pingekvaliteeti reguleerivatest standarditest. Vaadeldakse EVS-EN 50160 standardis käsitletavaid pingekvaliteedi parameetreid ning antakse ülevaade väiketootjate võimalikest mõjudest vastavatele parameetritele. Töö kolmandas peatükis esitatakse pikaajaliste pingekvaliteedi mõõtmiste mõõtepunktide loetelu, kirjeldatakse andmete esitamise põhimõtteid ja kasutatakse <i>PQI</i> indeksi ning esitatakse mõõtmistulemused vastavalt EVS-EN 50160 parameetri jaotusele. Töö neljandas peatükis analüüsitakse mõõtetulemusi. Tulemustest järeldub, et väiketootjad pole avaldanud negatiivset mõju pingekvaliteedile Elektrilevi OÜ jaotusvõrgus.	
<i>Märksõnad:</i> Pingekvaliteet, väiketootjad, hajatootmine, värelus, harmoonikud, THD, PQI, EN 50160, jaotusvõrk, aeglased pingemuutused, toitepinge lohk, toitepinge muhk	

Summary of the diploma work

<i>Author:</i> Rasmus Armas	<i>Kind of the work:</i> Master thesis
<i>Title:</i> IMPACT OF SMALL PRODUCERS ON POWER QUALITY IN DISTRIBUTION GRIDS BASED ON ELEKTRILEVI OÜ GRID	
<i>Date:</i> 02.06.2014	71 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>Faculty:</i> Power Engineering	
<i>Department:</i> Electrical Power Engineering	
<i>Chair:</i> High Voltage Engineering	
<i>Tutor(s) of the work:</i> teaching assistant Jaan Niitsoo	
<i>Consultant(s):</i> –	
<i>Abstract:</i> <p>The motivation for writing this Master's thesis is the growing interest in distributed generation and the aim is to give an overview of the possible effect of small producers on power quality in distribution grids and to analyze these effect in the distribution grid of Elektrilevi OÜ.</p> <p>The first chapter gives an overview of the concept of small producers and the procedure for connecting to Elektrilevi OÜ grid.</p> <p>The second chapter gives an overview of relevant standards that regulate power quality for networks and devices. An overview of EN 50160 is given with the possible effect of small producers on the power quality parameters described in the standard.</p> <p>The third chapter gives an overview of the measurement sites, the devices and the methods used for presenting the measurement data. After this the measurement data is presented according to EN 50160 standard.</p> <p>In the last chapter the measurement results are analyzed. The results show that small producers have not had a negative effect on the power quality in the distribution grid of Elektrilevi OÜ.</p>	
<i>Key words:</i> Power quality, small producers, distributed generation, DG, flicker, harmonics, THD, PQI, Power Quality Index, EN 50160, distribution grid, supply voltage variations, voltage dip, voltage swell	

Sisukord

Jooniste ja tabelite loetelu.....	6
Lõputöö ülesanne.....	8
Eessõna.....	10
Sissejuhatus.....	11
1 Väiketootjad.....	14
1.1 Väiketootja mõiste ja liigid.....	14
1.2 Väiketootjate liitumine elektrivõrguga	16
2 Pingekvaliteedi nõuded jaotusvõrkudes ja väiketootjate mõju	21
2.1 Pingekvaliteeti käsitlevad standardid.....	21
2.2 Pinge tunnussuurused.....	23
2.2.1 Sagedus	23
2.2.2 Väiketootjate mõju sagedusele	23
2.2.3 Toitepinge aeglased muutused	24
2.2.4 Väiketootja mõju toitepinge aeglastele muutustele	25
2.2.5 Kiired pingemuutused ja väreelus.....	27
2.2.6 Väiketootjate mõju kiiretele pingemuutustele ja väreleusele	28
2.2.7 Toitepinge asümmeetria	29
2.2.8 Väiketootjate mõju toitepinge asümmeeriale	29
2.2.9 Harmoonikud.....	30
2.2.10 Väiketootjate mõju harmoonikutele.....	31
2.2.11 Pinge sündmused.....	32
2.2.12 Väiketootjate mõju pinge sündmustele	33
3 Mõõtmiste tulemused	36
3.1 Mõõteandmete esitamise põhimõtted.....	37
3.2 Sagedus	38
3.3 Toitepinge aeglased muutused.....	38
3.4 Kiired pingemuutused ja väreelus.....	41
3.5 Toitepinge asümmeetria.....	46
3.6 Harmoonikud	46
3.7 Pinge sündmused	51
3.8 Kokkuvõte.....	55
4 Järeldused	57
4.1 Mõju pingetasemel liitumispunktis	57
4.2 Mõju pingeharmoonikute ja värelese tasemel liitumispunktis.....	58
4.3 Mõju pingelohkude sügavusele ja kestusele	60
4.4 Pikaajalised mõjud liitumispunkti pingekvaliteedile ja hooajalised muutused.....	61
4.5 Kokkuvõte.....	61
5 Lõputöö kokkuvõte	63

Jooniste ja tabelite loetelu

Joonis 2.1 Pingetase koos hajatootmisseadmega enne (a) ja pärast lühist (b) [18].....	26
Joonis 2.2 Pingetase hajatootmisseadmega liini alguses [17]	27
Joonis 2.3 CBEMA graafik	35
Joonis 2.4 ITIC graafik.....	35
Joonis 3.1 Toitepinge aeglaste muutuste mõõtetulemused sünkroongeneraatoriga mõõtepunktides piirväärtus 1 alusel.....	39
Joonis 3.2 Toitepinge aeglaste muutuste mõõtetulemused asünkroongeneraatoriga mõõtepunktides piirväärtus 1 alusel.....	40
Joonis 3.3 Toitepinge aeglaste muutuste mõõtetulemused muudes mõõtepunktides piirväärtus 1 alusel.....	40
Joonis 3.4 Värelustugevuse mõõtetulemused tuuleelektrijaamade mõõtepunktides	43
Joonis 3.5 Värelustugevuse mõõtetulemused muudes mõõtepunktides.....	43
Joonis 3.6 Mõõtepunkti MP5 aktiivvõimsuse ja värelustugevuse hajuvusdiagramm.....	44
Joonis 3.7 Mõõtepunkti MP8 aktiivvõimsuse ja värelustugevuse hajuvusdiagramm.....	45
Joonis 3.8 Mõõtmispunkti MP9 aktiivvõimsuse ja värelustugevuse hajuvusdiagramm.....	45
Joonis 3.9 Asümmeetria mõõtetulemused.....	46
Joonis 3.10 THD _U mõõtetulemused	47
Joonis 3.11 Mõõtepunkti MP10 aktiivvõimsuse ja THD _U hajuvusdiagramm	48
Joonis 3.12 Mõõtepunkti MP6 aktiivvõimsuse ja THD _U hajuvusdiagramm	48
Joonis 3.13 Pingeharmonikute mõõtetulemused sünkroongeneraatoriga mõõtepunktides....	49
Joonis 3.14 Pingeharmonikute mõõtetulemused asünkroongeneraatoriga mõõtepunktides ..	50
Joonis 3.15 Pingeharmonikute mõõtetulemused muude mõõtepunktides	50
Joonis 3.16 Pinge sündmused asünkroongeneraatoriga mõõtepunktides (MP3, MP7 ja MP8)52	
Joonis 3.17 Pinge sündmused sünkroongeneraatoriga mõõtepunktides (MP4, MP9 ja MP10)	53
Joonis 3.18 Pinge sündmused muudes mõõtepunktides (MP1, MP2 ja MP6).....	53
Joonis 3.19 Pinge sündmused MP5 mõõtepunktis	54
Joonis 3.20 Pinge sündmused MP11 mõõtepunktis	54
Tabel 1.1 Suhteliste voluharmonikute piirväärtused A/MVA [32].....	20
Tabel 2.1 Sageduse piirväärtused jaotusvõrkudes [34]	23

Tabel 2.2 Toitepinge aeglaste muutuste piirväärtused jaotusvõrkudes [34]	24
Tabel 2.3 Väreluse piirväärtused jaotusvõrkudes [34].....	28
Tabel 2.4 Toitepinge asümmeetria piirväärtused jaotusvõrkudes [34]	29
Tabel 2.5 Üksikute harmoonikute piirväärtused jaotusvõrkudes [34]	31
Tabel 2.6 Toitepinge sündmuste lävepiirid [34]	32
Tabel 2.7 Pingelohkude liigitamine [34].....	33
Tabel 2.8 Pingemuhkude liigitamine [34].....	33
Tabel 3.1 Mõõtmispunktid	36
Tabel 3.2 Sageduse mõõtmistulemused	38
Tabel 3.3 Toitepinge aeglaste muutuste	41
Tabel 3.4 Kiirete pingemuutuste arv	42
Tabel 3.5 Pingelohkude jaotus kõigis mõõtepunktides kogu mõõtmisperioodil	51
Tabel 3.6 Pingemuhkude jaotus kõigis mõõtepunktides kogu mõõteperioodil	52
Tabel 3.7 Summaarne PQI	56
Tabel 4.1 Mõõtetulemuste kokkuvõte	62

Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema:	Väiketootjate mõju pingekvaliteedile Elektrilevi OÜ näitel
Üliõpilane:	Rasmus Armas, 122365
Lõputöö juhendaja:	assistent Jaan Niitsoo
Õppetool:	Kõrgepingetehnika
Õppetooli juhataja:	prof Juhan Valtin
Lõputöö esitamise tähtaeg:	02.06.2014

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppetooli juhataja (allkiri)

Teema põhjendus:

Hajatootmise laiema levikuga toimub väiketootjate liitumine jaotusvõrkudega. Tootmiseseadme lisandumine jaotusvõrku mõjutab nii releekaitse põhimõtteid, võimsusvoogude suundasid kui lokaalset pingekvaliteeti. Võrguettevõtte peab tagama kvaliteetse elektritoite ning sellest tulenevalt on vaja analüüsida väiketootjate mõju pingekvaliteedile. Antud töö raames uuritakse praktiliste mõõtmistulemuste alusel väiketootjate mõju pingekvaliteedile nende liitumispunktis.

Töö eesmärk:

Töö eesmärgiks on uurida väiketootjate liitumiste mõju liitumispunkti pingekvaliteedile jaotusvõrgus.

Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- Uurida väiketootjate mõju pikaajalise pingetaseme muutustele liitumispunktis.
- Uurida väiketootjate mõju pingeharmonikute tasemele liitumispunktis.
- Uurida väiketootjate mõju väreelse tasemele liitumispunktis.
- Uurida väiketootjate mõju sõltuvust toodetavast võimsusest lähtuvalt.

Lähteandmed:

Töö käigus kasutatakse väiketootjate liitumispunktidesse paigaldatud statsionaarsete pingekvaliteedianalüsaatoritega salvestatud mõõtmisandmeid Elektrilevi OÜ-st.

Uuritakse vastavasisulisi publikatsioone teadusartiklite andmebaasidest ning raamatukogust.

Eessõna

Käesoleva magistritöö teema valik on tulnud seoses töötamisega Elektrilevi OÜ Automaatika osakonnas. Elektrilevis töötamise käigus olen tegelenud pingekvaliteedi teoreetiliste alustega ja praktiliste mõõtmistega nii võrgus üldiselt kui konkreetsete tarbijate ja tootjate juures. Töö käigus tekkinud küsimuste ja probleemide lahendamine on tekitanud süvendatud huvi teema vastu ning viinud mõõtmistulemuste üldistamiseni. Uurimistöö teema täpsemal piiritlemisel aitas lõputöö juhendaja.

Käesoleva töö jaoks kasutatud mõõtmisandmed on kogutud Elektrilevi OÜ pingekvaliteedi statsionaarse seiresüsteemi abil. Töö teoreetilise osa koostamisel on kasutatud vastavasisulisi publikatsioone teadusartiklite andmebaasidest ja Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogust, asjakohaseid standardeid ning Elektrilevi OÜ normdokumente.

Soovin tänada oma kolleege Elektrilevi OÜ automaatika osakonnast, lõputöö juhendajat, Kaspar Kaarlepa, Ott Antsmaad, Margus Sirelit ja Tõnis Tajurit, kes on aidanud nõu ja jõuga antud töö koostamisel ja andmete kogumisel. Lisaks soovin tänu avaldada Alexander Mazikale, kes on aidanud nii lõputöö tehniliste küsimustega kui pingekvaliteedi üldiste küsimuste lahti mõtestamisega.

Rasmus Armas

E. Vilde tee 123.30, Tallinn, Harjumaa

rasmus.armas@gmail.com

+372 5635 8700

Sissejuhatus

Energia tarbimine maailmas on pidevalt kasvav – aastail 1980-2000 kasvas aastane tarbimine keskmiselt 2%, kuid pärast aastat 2000 on energia tarbimine kasvanud keskmiselt 2,5 % aastas [1]. Maailma Energeetikanõukogu (*WEC – World Energy Council*) hinnangul on aastal 2050 maailmas kasutusel vähemalt kaheksa erinevat energiaallikat (kivisüsi, õli, maagaas, tuumakütus, hüdroenergia, biomass ning tuule- ja päikeseenergia) ja ükski neist ei saavuta rohkem, kui 30% summaarsest energiatarbest [2]. Selle kontseptsiooni täitumisel on suur roll hajatootmisel. Hajatootmine katab suurt hulka erinevaid tehnoloogiaid, mis tekitavad uusi võimalusi energiaturul ning suurendavad tööstuse konkurentsi, kuid hajatootmise suurim potentsiaalne kasu on läbi võimsusvoogude ümberkujundamise. Lokaalse tootmise abil loodetakse vähendada energia ülekande ja jaotamise kadusid ning kulusid, mis hetkel moodustavad tarbija elektrienergia hinnast umbes 40% [3].

Elektrivõrk on traditsiooniliselt kavandatud ülevalt alla põhimõttel – suurtes elektrijaamades toodetud energia kantakse ülekandevõrgus laiali ning jaotatakse läbi jaotusvõrkude tarbijatele. Jaotusvõrgud on ehitatud passiivsetena, ühesuunalist energiavoogu silmas pidades [4]. Hajatootmine muudab jaotusvõrgud aktiivseteks, mõjutades nii võimsusvoogusid, pingeprofiili, stabiilsust, releekaitset kui ka tarbijate ja elektritootjate pingekvaliteeti.

Tänapäevastes jaotusvõrkudes on pingekvaliteedi probleemid ka ilma hajatootmise seadmeteta märgatavad. Pinge kvaliteedi probleemid võivad olla tingitud erinevatest põhjustest. Näiteks on enamik madal- ja keskpingevõrke olemuselt radiaalvõrgud, kus peamiselt esinevad probleemid pingelohkude, pinge harmoonikute ja asümmeetriaga. Probleeme tekitavad pikad liinid, suured kontorihooned elektroonikaseadmetega ja ebaühtlane koormusjaotus [5]. Probleemi süvendab ka tänapäevaste tarbimisseadmete vähenenud häiringukindlus, näiteks infotehnoloogia seadmete mõõtmete vähendamisest tingituna [6].

Hajatootmiseseadmete lisandumine võrku võib avaldada praegusele olukorrale suurt mõju ja kindlasti suurendab juba olemasoleva probleemi kompleksust [4]. Hajatootmiseseadmete lisandumine võib avaldada nii positiivset [7-16] kui negatiivset mõju [4, 5, 11, 17-23]. Hajatootmise võimalikud positiivsed mõjud on pingetaseme stabiliseerimine, töökindluse suurenemine, kadude ning ülekande- ja jaotusvõrkude liinide koormatuse vähenemine. Lisaks väheneb taastuvate energiaallikate kasutamisel jäätmete ja heitgaaside teke. Hajatootmiseseade võib olla nii reserv-elektrigeneraator toitekatkestuste puhuks, tipukoormuse ajaks tarbimise tipu vähendamiseks või lihtsalt elektrienergia tootmiseks. Negatiivse poole pealt võivad

hajatootmiseseadmed põhjustada releekaitseadmete liigrakendumist või rakendustõrkeid, saarestumist, harmoonikuid, pinge taseme tõusu ja probleeme pinge automaatse reguleerimisega.

Ka Eestis on hajatootmine levima hakanud ning Elektrilevi OÜ andmetel on nende hallatava jaotusvõrguga alates 2010. aastast liitunud 31 elektrijaama võimsustega alates 11 kW kuni 6,9 MW [24]. Lisaks neile on Elektrilevi OÜ jaotusvõrguga ka varasemalt liitunud haja- ning mikrotootjaid, mis antud tabelis ei kajastu. Sellest tulenevalt on ka Eesti tekkinud vajadus analüüsida hajatootjate võimalike mõjusid pingekvaliteedile.

Eestis on mõnel määral läbi viidud ka praktilisi mõõtmisi ja uuritud üksikute seadmete mõju pingekvaliteedile [25], äritarbijate pingekvaliteeti [26], elektrituulikute [27] ja päikesepaneelide mõju pingekvaliteedile [28]. Uuringutes on piirdutud üksikute asukohtade, lühikese mõõtmisperioodiga või analüüsitud pingekvaliteedi taset ainult konkreetse tarbija seisukohast. Täiendavalt vajavad uurimist hajatootmise võimalikud pikemaajalised mõjud, hooajalised mõjud, koostootmis- ja biogaasijaamade mõjud pingekvaliteedile ning üldine pingekvaliteedi tase jaotusvõrkudes. Samuti on vaja suurendada läbi viidud mõõtmiste mahtu, kuna hetkel on uuritud ainult üksikute seadmete mõjusid või on mõõtmised olnud lokaalse iseloomuga.

Käesoleva töö eesmärk on pikaajaliste mõõtmisandmete analüüsi abil hinnata hajatootmiseseadmete mõju pingekvaliteedile Elektrilevi OÜ jaotusvõrgus. Töö raames piirdutakse väiketootjatega ning kasutatakse pikaajalisi pingekvaliteedi mõõtmistulemusi 11 hajatootmiseseadme liitumispunktides Elektrilevi OÜ jaotusvõrgus. Töö ülesandeks on analüüsida järgmisi teemasid:

- väiketootjate pikaajalised mõjud liitumispunkti pingekvaliteedile ja selle hooajalised muutused;
- väiketootjate mõju pingetasemele liitumispunktis;
- väiketootjate mõju pingeharmonikute ja väreeluse tasemele liitumispunktis;
- väiketootjate mõju pingelohkude sügavusele ja kestusele.

Töö esimeses peatükis antakse ülevaade hajatootmise ja väiketootjatega seotud mõistetest ning erinevatest tehnoloogiatest, mida hajatootmisel kasutatakse. Peatüki lõpus antakse ülevaade väiketootjate liitumisprotsessist Elektrilevi OÜ jaotusvõrguga ning selle raames teostatavast võrguanalüüsist.

Töö teises peatükis antakse ülevaade pingekvaliteeti reguleerivatest standarditest nii jaotusvõrkude kui ka üksikute seadmete kohta. Pikem ülevaade antakse pingekvaliteedi erinevatest aspektidest jaotusvõrkudes ning elektrienergia tootmiseseadmete võimalikest mõjudest vastavatele aspektidele.

Töö kolmanda peatüki alguses antakse ülevaade praktiliste mõõtmiste läbiviimise metoodikast, mõõtepunktidest ja mõõtmisandmete esitamise metoodikast. Seejärel esitatakse praktiliste mõõtmiste tulemused vastavalt teises peatükis välja toodud pingekvaliteedi aspektidele.

Neljandas (viimases) peatükis analüüsitakse ja üldistatakse kolmandas peatükis käsitletud mõõtmistulemusi. Mõõtmistulemuste alusel tehakse järeldused hajatootmiseseadmete mõjudest pingekvaliteedile Elektrilevi OÜ jaotusvõrgus vastavalt sissejuhatuses toodud teemadele.

Töö raames läbi viidud praktilised mõõtmised on teostatud Elektrilevi OÜ statsionaarse pingekvaliteedi seiresüsteemiga kasutades pingekvaliteedianalüsaatoreid *Elspec G4420*. Mõõtmiste teostamisel ja mõõtmisandmete esitamisel on lähtutud standardi EN 61000-4-30 klass A nõuetest ning standardist EVS-EN 50160. Mõõtmistulemusi on analüüsitud *Elspec Investigator* ja *Microsoft Excel* tarkvarade abil.

1 Väiketootjad

Hajatootmise mõistet defineeritakse erinevates riikides ja organisatsioonides mõnevõrra erinevalt, sõltuvalt näiteks ajaloolistest põhjustest ja elektrisüsteemi suuruselt. Mõned võimalikud hajatootmise määratlused on [18]:

- IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) defineerib hajatootmisüksust kui elektrijaama, mis on piisavalt palju väiksem suurtest elektrijaamadest (üldiselt kuni 10 MW), et seda võib ühendada võrku peaaegu kõigis punktides
- EPRI (*Electric Power Research Institute*) defineerib hajatootmist kui elektrienergia tootmist jaamades võimsusega mõnest kilovatist kuni 50 MW
- IEA (*International Energy Agency*) defineerib hajatootmist kui elektrienergia tootmist, mis on üldiselt ühendatud jaotusvõrku ja mille toodetud energia tarbitakse lokaalselt
- CIGRE (*Conseil International des Grandes Réseaux Électriques*) defineerib hajatootmist kui elektrienergia tootmist, mis pole keskselt planeeritud, keskselt rakendatud ja on üldiselt ühendatud jaotusvõrku ning on väiksem kui 50-100 MW

Eesti kontekstis loetakse hajatootjaks elektrienergia tootmisüksust, mis on väikese võimsusega (3-10 000 kW) ja mis asetseb tarbija lähedal, sealhulgas kasutades taastuvaid energiaallikaid ja/või soojust ning elektri koostootmiseseadmeid [29].

Hajatootjaid saab omakorda jaotada väiksemateks gruppideks tootmisvõimsuse, kasutatava tehnoloogia ja kütuseliigi alusel. Hajatootmiseseadmed on tihti paigaldatud lõpptarbija poolt, mitte võrguettevõtja poolt.

1.1 Väiketootja mõiste ja liigid

Hajatootmiseseadmed jaotatakse Eestis üldjuhul tootmisvõimsuse alusel nelja kategooriasse [30]:

- Mikrotootjad, tootmisvõimsusega kuni 11 kW, mis üldjuhul liituvad madalpingel
- Pisitootjad, tootmisvõimsusega 11-200 kW, mis üldjuhul liituvad madalpingel 0,4 kV või keskipingel 6,3-20 kV
- Väiketootjad, tootmisvõimsusega 200 kW kuni 5 MW, mis üldjuhul liituvad keskipingel 6,3-20 kV
- Suurtootjad, tootmisvõimsusega 5-10 MW, mis üldjuhul liituvad põhivõrguga kõrgepingel 110-330 kV

Hajatootmiseseadmeid võib jaotada lisaks kasutatava energiaallika (tuule-, päikese- ja hüdroenergia, biogaas, diisel jne) või elektrienergia tootmiseseadme alusel (inverter, asünkroon- või sünkroongeneraator).

Enamik võrguga paralleeltöösse viidud hajatootmiseseadmetest on kolmefaasilised sünkroongeneraatorid [13]. Sünkroongeneraatori puhul kasutatakse ergutuseks alalisvälja ning sellest tulenevalt saab sünkroongeneraatoriga lisaks aktiivenergia tootmisele ka toota või tarbida reaktiivenergiat. Sünkroongeneraatoreid kasutatakse näiteks muutuva kiirusega elektrituulikutes ning reservtoiteallikana mootor-generaatorploki koosseisus. Sünkroongeneraatori võime toota ja tarbida reaktiivenergiat tähendab, et suure võimsusega seadmeid saab kasutada pingereguleerimiseks nõrkades võrkudes. Selline pingetaseme reguleerimine peab olema koordineeritud võrguettevõtte pingeregulaatorite ja kaitseseadmetega, et vältida valetöid.

Sünkroongeneraatorid võivad omada ka negatiivset mõju pingekvaliteedile. Näiteks muutuvkiirusega ajamite tootmisel sünkroongeneraatoriga võib harmoonmoonutuse tase võrgus tõusta liiga kõrgele tasemele ja lühiste korral võib tekkida valesti- või mittetöötamisi kui relekaitse pole koordineeritud sünkroongeneraatoriga töötamiseks [18]. Samuti võib sünkroongeneraator tekitada võrku kõrgemaid harmoonikuid, peamiselt kolmandat harmoonikut [13].

Asünkroongeneraatorid on laialdaselt kasutusel elektrituulikutes ja on tüüpiliselt võimsusega kuni 500 kW [5]. Asünkroongeneraatori puhul on võrguga ühendamine lihtsam, sest selle sünkroniseerimiseks ei ole vaja lisaseadmeid. Erinevalt sünkroongeneraatoritest ei saa asünkroongeneraatoriga toota reaktiivenergiat, seadme töötamiseks on vaja välist reaktiivenergia allikat. Reaktiivenergia võidakse võtta elektrivõrgust, kuid selle tulemusena võib langeda võrgu pingeline. Alternatiivselt kasutatakse kohapeale paigaldatud kondensaatorpatareisid, et tagada reaktiivenergia olemasolu. Kondensaatorpatareide paigaldamine võib aga tekitada täiendavaid probleeme: resonantsnähtused võrguharmoonikutega või omaergutus võrgust eraldumise korral [18].

Hajatootmiseseadmetega, kus elektrienergia toodetakse alalisvooluna või vahelduvvooluna, mille sagedus erineb võrgusagedusest, tuleb kasutada inverterit. Esialgselt kasutati türistoride baasil töötavaid invertereid, mis tekitasid võrku suurel määral harmoonikuid [18]. Tänapäeval kasutatakse pulsilaiusmodulatsiooni tehnoloogial põhinevaid *IGBT*-transistoritega invertereid. Inverterite tehnoloogia areng on oluliselt vähendanud nende poolt võrku tekitatud

harmoonikute taset [13]. Inverterite eeliseks on ka väga kiire lülitatavus – inverteri saab välja lülitada millisekundite jooksul.

Elektrijaama tüübi alusel on Elektrilevi OÜ jaotusvõrguga kõige enam liitunud koostootmisjaamu, kõigist liitumislepingu sõlminud elektritootjatest alates 19.07.2010 on 66% koostootmisjaamad [24]. Koostootmisjaamades kasutatakse kütusena näiteks bio- ja maagaasi ning tootmise tulemusena saadakse nii soojust kui elektrienergiat. Koostootmisjaamades kasutatakse üldjuhul sünkroongeneraatoreid.

Tuuleelektrijaamad on Elektrilevi OÜ jaotusvõrgus samuti levinud, moodustades 25% liitumislepingu sõlminud elektritootjatest [24]. Tuuleelektrijaamades kasutatakse üldjuhul asünkroongeneraatoreid, kuid on võimalik kasutada ka sünkroongeneraatoreid, mille puhul peab tagama tiiviku pöörlemiskiiruse muutumatuse.

Lisaks on Elektrilevi OÜ jaotusvõrguga liitunud hüdro-, diisel- ja päikeseelektrijaamu [24]. Liitunud hüdrojaamade võimsus jääb alla 0,5 MW ning väikese võimsusega hüdrojaamade puhul kasutatakse üldjuhul asünkroongeneraatorit.

1.2 Väiketootjate liitumine elektrivõrguga

Elektrijaamade ühendamist elektrivõrguga reguleerib Eestis Vabariigi Valitsuse kehtestatud määrus „Võrgueeskiri“ [31]. Määrusega reguleeritakse seadmete süsteemiga ühendamist, näiteks releekaitseõuded, mõõtmiste edastamine, kooskõlastamised ja võimsusreguleerimine ning tootmiseseadme tehnilisi nõudeid, näiteks generaatori talitlus sageduse ja pinge muutustel, primaar- ja sekundaarreguleerimine ning nõuetekohasuse kontrollimine.

Elektritootjate liitumisel Elektrilevi OÜ võrguga eristatakse mikrotootjate ja teiste elektritootjate liitumisi. Mikrotootjate puhul on protsess lihtsustatud ning üldiselt võtab liitumise vormistamine aega kuni kaks kuud.

Elektritootjate liitumisprotsessi all vaadeldakse tootjaid võimsusega alates 11kW kuni 5MW (suurema võimsusega tootjad liituvad üldjuhul põhivõrguga). Liitumisprotsess jagatakse neljaks sammuks:

1. Liitumistaotluse esitamine ja pakkumise saamine
2. Liitumislepingu sõlmimine
3. Elektritootmiseseadme kasutusele võtmine
4. Võrgulepingu sõlmimine

Protsessi esimeses etapis esitab klient liitumistaotluse, mille alusel Elektrilevi OÜ viib läbi võrguanalüüsi ning koostab võrguühenduse tehnilise lahenduse pakkumuse. Juhul kui elektrijaama nimivõimsus on üle 1 MW (tuuleelektriijaamad puhul üle 200 kW) tuleb liitumisprotsessi esimese etapi jooksul liitumistaotlus kooskõlastada ka süsteemihalduriga.

Võrguanalüüsi käigus vaadeldakse järgmisi aspekte [32]:

- Kiired pingemuutused
- Aeglased pingemuutused
- Pikaajalise värelustugevuse analüüs
- Vooluharmonikute analüüs
- Lühisvoolude analüüs
- Läbilaskevõime analüüs

Kiirete pingemuutuste analüüsi käigus hinnatakse tootmiseseadme lülitamisest põhjustatud kiire pingemuutuse suurust. Pingemuutus liitumispunktis ei tohi ületada 4%. Kiire pingemuutuse arvutuslikul hindamisel arvestatakse seadme niminäivvõimsuse ja võrgu lühisvõimsuse suhet, võrgu lühisimpedantsi nurka ja seadme nihkenurka käivitamisel ning käivitusvoolu kordsustegurit (valem (1.1)).

$$u = k_{käv} * \frac{S_{nmax}}{S_{kv}} * \cos(\psi + \varphi) \quad (1.1)$$

kus

- $k_{käv}$ – tootmiseseadme käivitusvoolu kordsus,
- S_{nmax} – tootmiseseadme niminäivvõimsus, VA
- S_{kv} – liitumispunkti lühisvõimsus, VA
- ψ – võrgu lühisimpedantsi nurk, rad
- φ – tootmiseseadme võimsusteguri nihkenurk käivitamisel, rad

Tootmiseseadme käivitusvoolu kordsus sõltub tootmiseseadme tehnilisest lahendusest ning täiendava info puudumisel arvestatakse järgnevalt:

- $k_{käv} = 1,2$, kui tegemist on täppissünkroniseerimisega sünkroongeneraatoriga või inverteriga
- $k_{käv} = 1,5$, kui tegemist on täppissünkroniseerimisega ja kaksiktoitega asünkroongeneraatoriga

- $k_{k\ddot{a}iv} = 4$, kui tegemist on asünkroongeneraatoriga (voolupiiranguga lühisrootor), mille võrkuühendamine toimub 95-105% sünkroonkiirusest
- $k_{k\ddot{a}iv} = 8$, kui tegemist on asünkroongeneraatoriga, mida käivitatakse võrgust ning käivitusvool pole teada

Elektrituulikute puhul hinnatakse lülitustoimingutest tingitud pingemuutusi järgneva valemiga (valem (1.2)):

$$u = k_u(\psi_k) * \frac{S_n}{S_{kv}} \quad (1.2)$$

kus

k_u – pingemuutustegur

ψ_k – võrguimpedantsi faasinurk, rad

Aeglaste pingemuutuste analüüsi käigus hinnatakse elektrijaama püsitalitluse käigus tekitatavaid aeglast pingemuutusi liitumispunktis – elektrijaam ei tohi põhjustada aeglast pingemuutust üle 4%. Aeglast pingemuutust arvutatakse võrgust reaktiivvõimsuse tarbimise ja reaktiivvõimsuse tootmise režiimides järgnevate valemitega (vastavalt valemid (1.3) ja (1.4)):

$$u_L = \frac{S_{EJmax}(R_{kV} \cos|\varphi| - X_{kV} \sin|\varphi|)}{U_N^2} \quad (1.3)$$

$$u_L = \frac{S_{EJmax}(R_{kV} \cos|\varphi| + X_{kV} \sin|\varphi|)}{U_N^2} \quad (1.4)$$

kus

S_{EJmax} – elektrijaama suurim näivvõimsus, VA

R_{kV} – võrgu lühisaktiivtakistus, Ω

X_{kV} – võrgu lühisreaktiivtakistus, Ω

U_N – liitumispunkti nimipinge, V

φ – elektrijaama võimsusteguri nihkenurk, rad

Pikaajalise värelustugevuse analüüsi käigus hinnatakse tootmisseedme poolt emiteeritavat värelust P_{lt} – madalpingel ei tohi värelustugevus olla suurem kui 0,5 ja keskpingel kui 0,25. Värelustugevus püsitalitlusel leitakse seedme nimivõimsuse ja võrgu lühisvõimsuse suhte ning seedme värelusteguri abil (valem (1.5)).

$$P_{lt} = c_{v\ddot{a}r} * \frac{S_n}{S_{kv}} \quad (1.5)$$

kus

$c_{v\ddot{a}r}$ – tootmiseadme v\ddot{a}relustegur

Kui liitumispunkti on \ddot{u}hendatud mitu tootmiseadet siis arvutatakse summaarne v\ddot{a}relusetugevus P_{ltres} j\ddot{a}rgneva valemiga (valem (1.6)):

$$P_{ltres} = \sqrt{\sum_i P_{lti}^2} \quad (1.6)$$

Vooluharmonikute anal\ddot{u}isi k\ddot{a}igus hinnatakse tootmiseadme poolt tekitatud vooluharmonikuid tootmiseadme t\ddot{u}bikatsetuste protokollil alusel. \ddot{U}hes liitumispunktis lubatud vooluharmonikute piirv\ddot{a}rtused arvutatakse suhtelise lubatud vooluharmonikute ja liitumispunkti l\ddot{u}hisv\ddot{o}imsuse alusel (valem (1.7)), suhtelised lubatud vooluharmonikud on toodud j\ddot{a}rgnevas tabelis (tabel 1.1).

$$I_{vhlub} = i_{vhlub} * S_{kv} \quad (1.7)$$

kus

I_{vhlub} – lubatud vooluharmoniku tase, A

i_{vhlub} – suhteline lubatud vooluharmonik, A/MVA

Tabel 1.1 Suhteliste vooluharmonikute piirväärtused A/MVA [32]

Järk	Võrgu nimipinge				
	0,4 kV	6,3 kV	10,5 kV	15,75 kV	21 kV
3	3	0,097	0,058	0,039	0,029
5	1,5	0,097	0,058	0,039	0,029
7	1	0,137	0,082	0,055	0,041
9	0,7	0,087	0,052	0,035	0,026
11	0,5	0,087	0,052	0,035	0,026
13	0,4	0,063	0,038	0,025	0,019
15	-	0,037	0,022	0,015	0,011
17	0,3	0,037	0,022	0,015	0,011
19	0,25	0,03	0,018	0,012	0,009
21	-	0,02	0,012	0,008	0,006
23	0,2	0,02	0,012	0,008	0,006
25	0,15	0,017	0,01	0,007	0,005
27	0,139	0,0157	0,0093	0,0065	0,0046
29	0,129	0,0147	0,0086	0,0060	0,0043
31	0,121	0,0137	0,0081	0,0056	0,0040
33	0,114	0,0129	0,0076	0,0053	0,0038
35	0,107	0,0121	0,0071	0,0050	0,0036
37	0,101	0,0115	0,0068	0,0047	0,0034
39	0,096	0,0109	0,0064	0,0045	0,0032

Lühisvoolude analüüsi käigus hinnatakse võrguelementide dünaamilise ja termilise taluvuse vastavust süsteemi ja generaatori summaarse lühisvoolu väärtusele. Koormusvoolu analüüsi käigus hinnatakse võrguelementide lubatud maksimaalse koormusvoolu vastavust elektriijaama suurimale koormusvoolule.

Elektritootja liitumise esimese etapi lõpuks esitab Elektrilevi OÜ kliendile lepingupakkumise liitumise tehniliste tingimuste ja eeldatava liitumistasuga. Protsessi teises etapis sõlmib klient liitumislepingu.

Liitumise kolmandas etapis toimub elektriijaama ja võrguühenduse projekteerimine ning väljaehitamine. Klient koostab elektriijaama tehnilise projekti ning kooskõlastab selle Elektrilevi OÜ-ga, kes vajadusel kooskõlastab selle süsteemihalduriga. Pärast võrguühenduse ja elektriijaama ehituse lõppemist toimub elektriijaama pingestamine ning katsetamine. Elektriijaama katsetamise käigus hinnatakse elektriijaama vastavust Võrgueeskirja nõuetele.

Kolmanda etapi lõpuks väljastatakse kliendile katsete eduka läbimise kohta nõuetekohasuse kinnitus. Elektritootja liitumise neljandas etapis sõlmitakse elektritootjaga tähtajatu võrguleping.

2 Pingekvaliteedi nõuded jaotusvõrkudes ja väiketootjate mõju

Võrguettevõtetele esitatud elektrivarustuse kvaliteedinõuded on jagatud järgnevalt:

- Teeninduse nõuded
- Elektrienergia kvaliteet
 - o Elektrivarustuse kindluse nõuded
 - o Pingekvaliteedi nõuded

Teeninduse nõuetega reguleeritakse võrguteenuse osutamise seotud tüüpiliste tegevuste tähtaegu, näiteks plaanilistest katkestustest ette teatamine, mõõteseadmete vahetamine kliendi soovil, päringutele vastamine jne. Elektrivarustuse kindluse nõuetega reguleeritakse katkestuste lubatud kestusi ja katkestuste korral elektrivarustuse taastamise aega.

2.1 Pingekvaliteeti käsitlevad standardid

Pingekvaliteedi all mõistetakse pinge põhiliste tunnussuuruste reguleerimist. Eestis on majandus- ja kommunikatsiooniministri määruse alusel [33] võrguettevõtetal soovitatav pingekvaliteedi nõuetes lähtuda EVS-EN 50160 standardist.

Standardi eesmärk on kirjeldada ja määratleda avalike elektrivõrkude toitepinge tunnussuuruseid sageduse, pinge väärtuse, lainekuju ja faasidevaheliste pingete sümmeetria suhtes. Standardis on kirjeldatud järgmised pinge tunnussuurused [34]:

- Võrgusagedus
- Toitepinge aeglased muutused
- Kiired pingemuutused
- Toitepinge asümmeetria
- Harmoonikute pinge
- Vaeharmonikute pinge
- Toitepingele pealdate võrgusignaalpinge
- Pinge sündmused
- Toitepinge katkestused
- Toitepinge lohud/muhud
- Transientliigpinged

Standardi alusel reguleeritakse tunnussuuruseid madal-, kesk- ja kõrgepingevõrkudes kliendi liitumispunktis. Standardis on ära toodud osade suuruste piirväärtused, kuid osadel suurustel on ainult soovituslikud väärtused või mõõtmismetoodika. Standard reguleerib ainult normaaltalitluse olukorda ja ei kehti erandolukordades, nagu erandlikud ilmastikuolud või loodusõnnetused, vääramatu jõu esinemine, kolmandate osapoolte sekkumine jne. Samuti ei kehti standard, kui kasutaja paigaldis või seadmed ei vasta asjakohastele standarditele.

Erinevate seadmete elektrikvaliteeti reguleeritakse eraldi veel mitmete teiste standardite alusel sõltuvalt seadmete võimsusest, paigalduskeskkonnast ja tüübist, näiteks:

- EVS-EN 61000-3-2: Piirväärtused. Vooluharmonikute emissiooni piirväärtused (seadmete sisendvoolu korral kuni 16 A faasi kohta)
- EVS-EN 61000-3-3: Piirväärtused. Pingemuutude, pingekõikumiste ja pingeväreluse piiramine avalikes madalpingelistes elektrivarustussüsteemides tingimusteta ühendatavate seadmete nimivoolu puhul kuni 16 A faasi kohta
- EVS-EN 61000-3-11: Piirväärtused. Pingemuutuste, pingekõikumiste ja väreluse piiramine avalikes madalpingelistes elektrivarustussüsteemides ühendustingimuste kohaselt ühendatavatele seadmetele nimivooluga kuni 75 A
- EVS-EN 61000-3-12: Piirväärtused. Avalikesse madalpingevõrkudesse ühendatud seadmete poolt genereeritud vooluharmonikute piirväärtused sisendvoolu korral üle 16A, kuid mitte üle 75 A faasi kohta
- EVS-EN 61400-21: Elektrivõrguga ühendatud elektrituulikute elektri kvaliteedi näitajate mõõtmine ja hindamine

Elektritootjatele kehtivad elektrikvaliteedi nõuded on kehtestatud üldjuhul riiklike standardite ja määrustega ning võrguettevõtjate nõuetega. Alapeatükis 1.2 anti ülevaade Elektrilevi OÜ liitumisprotsessist ja kehtivatest nõuetest elektrikvaliteedile väiketootjate liitumise korral.

Elektrikvaliteedi mõõtmise metoodika ja kasutatavate seadmete täpsusklassid on reguleeritud järgnevate standardite alusel:

- EVS-EN 61000-4-7: Katsetus- ja mõõtetehnika. Jagu 7: Toitesüsteemide ja nendega ühendatud seadmestiku harmooniliste ja vaheharmooniliste mõõtmiste ja mõõteaparatuuri üldjuhend
- EVS-EN 61000-4-15: Katsetus- ja mõõtetehnika. Värelusmõõtur. Talitluse ja ehituse iseloomustus
- EVS-EN 61000-4-30: Katsetus- ja mõõtetehnika. Elektrikvaliteedi mõõtemetodid

2.2 Pinge tunnussuurused

Käesoleva töö raames käsitletakse kõiki EVS-EN 50160 standardis kirjeldatud pinge tunnussuuruseid ning vastavaid piirväärtusi, välja arvatud toitepingele pealdateid võrgusignaalpinge. Toitepingele pealdateid võrgusignaalpinge puhul on tegemist side pidamiseks kasutatava täiendava signaaliga, mis on seotud konkreetsete sisedeadmetega ning jääb seetõttu välja antud töö piirist.

Järgnevalt antakse ülevaade EVS-EN 50160 standardis toodud pinge tunnussuurustest ning nende piirväärtustest. Lisaks antakse ülevaade väiketootjate võimalikust mõjust vastavatele tunnussuurustele.

2.2.1 Sagedus

Toitepinge nimisagedus Eesti elektrisüsteemis on 50 Hz. Sagedust hinnatakse 10 sekundi jooksul mõõdetud keskvaartuse alusel [34]. Sageduse piirväärtused normaaltalitusel madal- ja keskpinge võrkudes on toodud järgnevas tabelis (tabel 2.1).

Tabel 2.1 Sageduse piirväärtused jaotusvõrkudes [34]

Võrgu ühendus ühendsüsteemiga	Piirväärtus 1	Piirväärtus 2 (100% ajast)
Sünkroonselt ühendatud võrk	99,5% aastast 50 Hz ± 1 % 49,5 Hz – 50,5 Hz	50 Hz + 4 % / – 6 % 47 Hz – 52 Hz
Sünkroonselt ühendamata võrk	95% nädalast 50 Hz ± 2 % 49 Hz – 51 Hz	50 Hz ± 15 % 42,5 Hz – 57,5 Hz

2.2.2 Väiketootjate mõju sagedusele

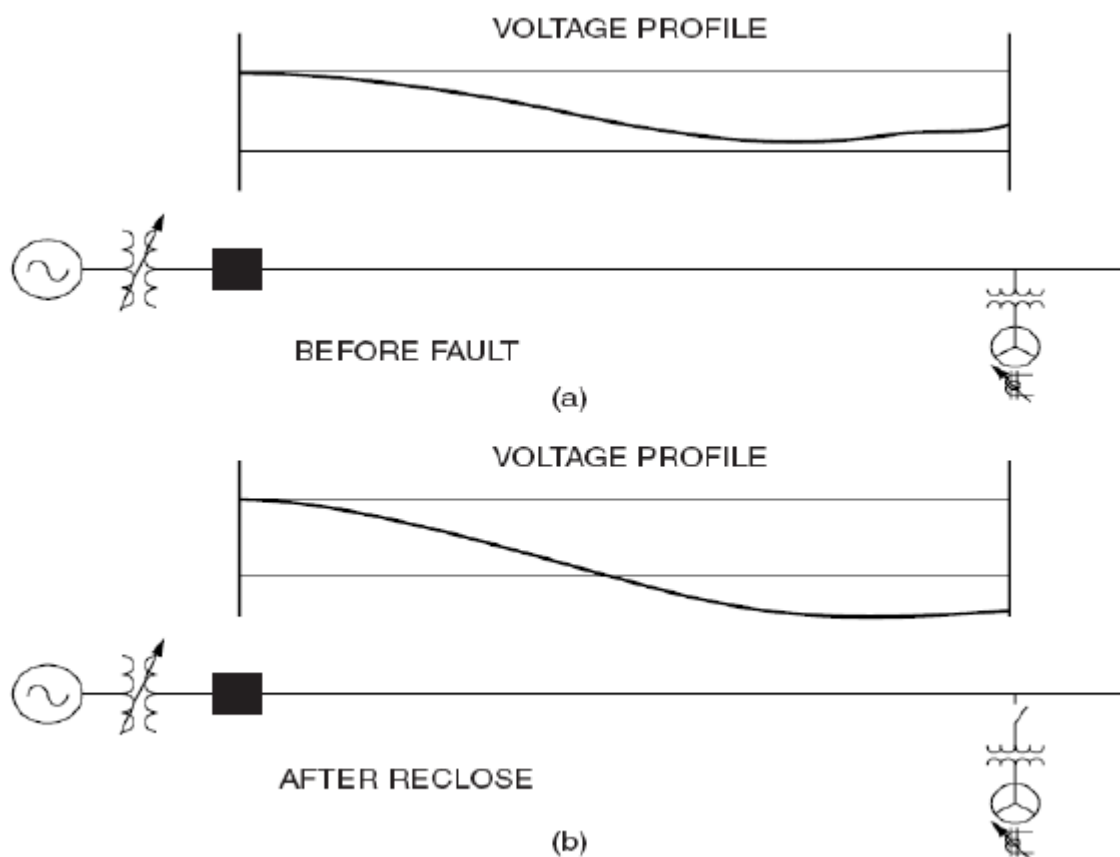
Jaotusvõrku lisanduvad hajatootmisseadmed võivad mõjutada süsteemi sagedust tootmise ja tarbimise tasakaalu häirimise läbi. Võrgu nimisageduse tagamise eest vastutab süsteemihaldur, kes kes peab tagama tootmise ja tarbimise tasakaalu. Hajatootmisseadmete tootmisvõimsus pole üldjuhul süsteemihalduri poolt juhitav ja taastuvaid energiaallikaid kasutavate tootmisseadmete võimsus võib lühikese aja jooksul suurel määral varieeruda [19]. Väikese võimsusega hajatootmisseadmete mõju on piiratud, kuid suurema võimsusega seadmed ja hajatootmise osakaalu suurenemine muudavad probleemi tõsisemaks [20]. Sageduse hälbed võivad muuta elektrimootorite kiirust, kahjustada generaatoreid ja häirida tundliku elektroonika tööd.

2.2.4 Väiketootja mõju toitepinge aeglastele muutustele

Toitepinget reguleeritakse jaotusvõrkudes jõutrafo ülekandesuhte muutmisega, reaktiivvõimsusega kompenseerimisega ja võrgu planeerimisel trafo ülekandesuhete ja liinide pingekadude optimeerimisega. Pinge reguleerimise põhimõtted on jaotusvõrkudes välja töötatud radiaalse võrgu jaoks võimsusvooga alajaamast tarbija suunas, kuid hajatootmiseseadmete lisandumisega võib võimsusvoo suund muutuda ja võrk lakkab olemast passiivne [17]. Suurte võimsustega tootmiseseadmete lisandumine võib viia pingetaseme ebastabiilsuseni: pinge reguleerimine kahe-suunalise võimsusvoo korral ja reaktiivenergia kompenseerimine muutuvad keerukamaks ja võivad tekitada probleeme, kui puudub kooskõlastatud kontrollmehhanism [38].

Tootmiseseadmete lisandumisel jaotusvõrku muutub pinge reguleerimise vahemik kitsamaks ja sõltub liitumispunkti lühisvõimsusest. Pingelang sõltub peamiselt elektrivõrgu takistuse aktiivosast, kuna hajatootmiseseadmed toodavad üldiselt ainult aktiivvõimsust. Ainult aktiivvõimsuse tootmine võib muuta võrgus ülekantavaid reaktiivvõimsuse voogusid, mis võib tekitada lähedal asuvates alajaamades üle- või alapingeid [20]. Olukord on seda keerukam, mida suurema võimsusega ja mida kaugemale võrgu sõlmalajaamadest tootmiseseadmed liidetakse [39]. Hajatootmiseseadmete liitumisega seotud põhiliseks tehniliseks probleemiks loetakse võrgus toimuvat pingetaseme tõusu [38]. Pingetaseme tõus võib olla nii positiivse kui negatiivse mõjuga.

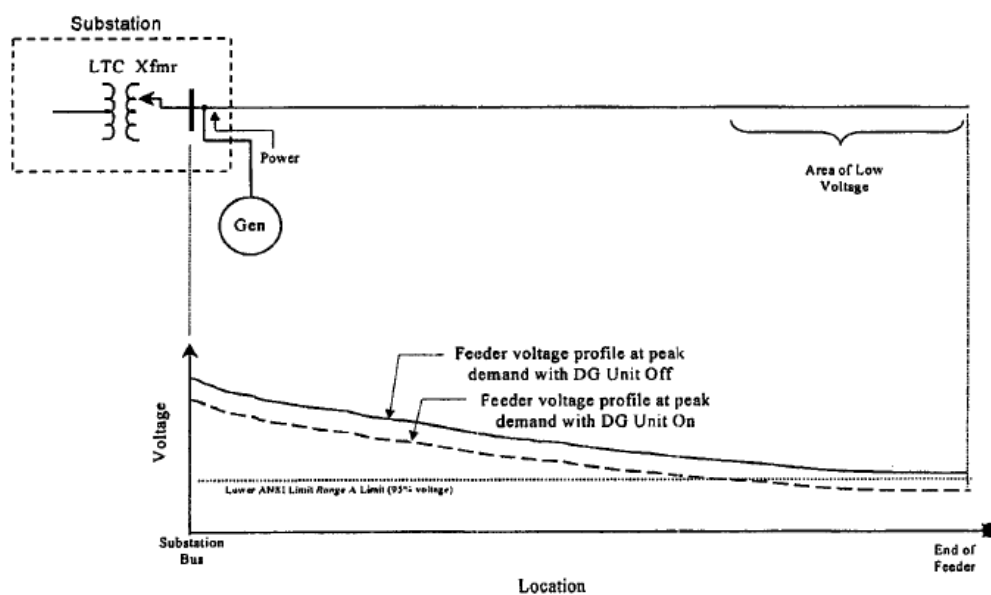
Hajatootmiseseadme liitumine võib avaldada mõju pinge reguleerimisele ka rikestest tingitud väljalülitamiste tõttu. Enne lühist (joonis 2.1, a) on fiidri pingetase lubatud piirides, hajatootmiseseadme võimsus on piisavalt suur, et fiidri lõpus pingetaset tõsta. Fiidris tekib lühis, mille tõttu automaatika katkestab fiidri toite alajaama poolt. Pärast lühise möödumist ja fiidri taaspingestamist (joonis 2.1, b) on hajatootmiseseade võrgust eraldatud, kuna tootmiseseade eraldatakse lühise korral, et vältida saartalitlust. Selle tulemusena on pingetase fiidri lõpus oluliselt langenud ning väljunud lubatud piiridest.



Joonis 2.1 Pingetase koos hajatootmisseedmega enne (a) ja pärast lühist (b) [18]

Hajatootmisseedmete lisandumine võib pingetaset ka liiga kõrgeks tõsta. Normaalolukorras, ilma hajatootmisseedmeteta, leiab liinides ja jõutrafoodes aset teatud pingelang ning pingetase liini lõpus on madalam, kui toitealajaamas. Hajatootmisseedmete lisandumine tekitab vastassuunalise võimsusvoo ja vähendab seeläbi pingekadusid, mille tulemusena võib pinge tõusta lubatud piirväärtustest kõrgemale [17].

Samas võib liini algusesse lisatud hajatootmisseedme tekitada ka vastupidist efekti. Juhul kui liini alguses toimub pinge reguleerimine liini koormuse järgi, võib vahetult pinge reguleerimisseedme järgi paigutatud hajatootmisseedme segada fiidri koormuse korrektset mõõtmist ja sellest tulenevalt pinge reguleerimist (illustreerib joonis 2.2). Hajatootmisseedme toodetav võimsus vähendab pingeregulaatori vaatest fiidri koormust ning sellest tulenevalt vähendab kontroller pingetaset toitealajaamas. Tulemuseks väheneb fiidri lõpus pingetase liiga palju ja väljub lubatud piiridest.



Joonis 2.2 Pingetase hajatootmiseseadmega liini alguses [17]

Hajatootmiseseadmetega seotud pingetaseme probleemide leevendamisele võib kaasa aidata olukord, kus hajatootmiseseadmetel lubatakse toota ja tarbida reaktiivvõimsust. Reaktiivvõimsuse allikaid on jaotusvõrkudes üldiselt vähe ja nad on ebahühtlase jaotusega. Hajatootmiseseadmete reaktiivenergia tootmise võimekust saab kasutada, et tagada võrgupinge stabiilsus [14].

Võrgu reaktiivenergia taseme kontroll on aga keerukas ülesanne ning sõltub mitmetest aspektidest: võrgu konfiguratsioon, tarbimise maht ja iseloom, ülekandevõrgu koormus, elektrienergia tootmise maht ja tootmiseseadmete asukohad. Seetõttu peab reaktiivenergia tootmine olema koordineeritud kõigil tasemetel, et tagada pinge püsimine lubatud normide piires.

2.2.5 Kiired pingemuutused ja värelus

Toitepinge kiireks muutuseks loetakse pinge efektiivväärtuse kiiret muutust kahe püsiva taseme vahel. Kiirete pingemuutuste all vaadeldakse muutusi, mis jäävad allapoole pingelohu või –mahu piirmäära ($\pm 10\%$). Toitepinge kiireid muutusi võivad tekitada koormuse muutumine, võrgus toimuvad lülitamised või rikked ning ka tootmiseseadmete lülitamine. Praegusel hetkel puuduvad piirväärtused võrguettevõtetele kiirete pingemuutuste esinemise sageduse või muude parameetrite kohta.

Väreluseks loetakse elektrivalgustuse poolt esile kutsutud nägemisaistingut, mille tekitab valgustuse heleduse või spektraaljaotuse ajaline kõikumine. Värelust hinnatakse kahe parameetri alusel [34]:

- Lühiajaline värelustugevus P_{st} , mida mõõdetakse 10-minutilises ajavahemikus
- Pikaajaline värelustugevus P_{lt} , mis arvutatakse 2-tunnises ajavahemikus P_{st} väärtustest

Värelus piirväärtused jaotusvõrkudele normaaltalitluse korral on toodud järgnevas tabelis (tabel 2.3).

Tabel 2.3 Väreluse piirväärtused jaotusvõrkudes [34]

Võrgu tüüp	Piirväärtus 1
Madalpingevõrk	95% ajast nädalases ajavahemikus $P_{lt} \leq 1$
Keskpingevõrk	95% ajast nädalases ajavahemikus $P_{lt} \leq 1^1$

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

Elektrilevi OÜ kehtestatud liitumistingimuste alusel on piirväärtused väiketootjate tekitatud kiiretele pingemuutustele ja värelustugevusele järgnevad [32]:

- Elektritootja lülitamisest tingitud kiire pingemuutus liitumispunktis ei tohi olla suurem kui 4%
- Elektritootja emiteeritav pikaajalise värelustugevuse P_{lt} väärtus ei tohi olla madalpingel suurem kui 0,5 ja keskpingel suurem kui 0,25

2.2.6 Väiketootjate mõju kiiretele pingemuutustele ja värelusele

Hajatootmiseadmed võivad põhjustada värelust ja kiireid pingemuutuseid mitmel põhjustel, mitte ainult lülitamiste käigus. Lihtsamal juhul võib põhjuseks olla seadme mehaanilisest võnkumisest tingitud väljundvõimsuse muutumine, keerukamatel juhtudel võib põhjus olla kehvast koordineeritusest tootmiseadmete ja muude võrgus olevate seadmete vahel. Näiteks hajatootmiseadme võimsuse muutmine põhjustab võrgus eespool oleva pingeregulaatori pidevat lülitamist [17] ja kuigi hajatootmiseadme võimsuse võnkumine ei tekita liigset värelust, siis koos regulaatori pideva lülitamisega võib värelus ületada lubatud piirväärtusi.

Elektrituulikute puhul tekib värelust mitmel põhjusel. Tuulekiiruse muutumine tekitab tuuliku võimsuse kõikumist, samuti tekitab võimsuse võnkumist torni varjuefekt, mis omakorda tekitab võrgus värelust [21]. Tuulekiiruse muutmine ± 1 m/s tekitab umbes $\pm 20\%$ muutuse keskmises võimsuses laba kalde reguleerimisega tuulikutel, mis on oluliselt suurem muutus võrreldes õhuvoolu rebenemisega reguleeritavate tuulikutega [5]. Tuulekiirusest tingitud võimsuse muutmine toimub tavaliselt mõne sekundilise ajavahemiku jooksul, torni varjuefekt

tekitab võnkeid kolmekordsel pöörlemissagedusel. Fikseeritud kiirusega tuulikute puhul on umbes 30% kogu väreelusest tingitud torni varjuefektist [5]. Suurim erinevus fikseeritud ja muutuva kiirusega tuulikute vahel on see, et fikseeritud kiirusega tuulikute puhul tuulekiiruse kasvamisel väreelus suureneb, muutuva kiirusega tuulikute puhul samal ajal väreelus väheneb.

Induktsioon generaatorite puhul on peamiseks väreeluse ja kiirete pingemuutuste põhjuseks seadme lülitamine. Generaatori sisse lülitamisel tekib sisselülitamise tõukevool, mis on umbes viis korda suurem kui nimivool. Suure võimsusega generaatori puhul tekitab selline lülitamine võrgus pingelangu, mis kestab mitu perioodi ja võib tekitada nähtavad värelust.

Sisepõlemismootoriga elektritootmisseadme puhul võib väreelus tekkida mootori ebakorrektsel töötamise korral, kui mootor tõrgub. Näiteks diisलगeneraatorite puhul võib tõrkumist põhjustada kehva kütuse kvaliteet või mootori rike. Sellest tulenevalt hakkab mootori võimsuse kõikumine ja võib põhjustada tugevat värelust, kui kõikumise sagedus on väreeluse kõige tundlikuma sageduse lähedal [40].

Hajatootmisseadmete liitumine võrku võib omada ka positiivset efekti, mitte tekitada täiendavat värelust või kiireid pingemuutuseid. Pöörlevate elektritootmisseadme lisandumine võib suurendada võrgus lühisvoolusid, mille tulemusena suureneb võrgu võime värelust vähendada [4].

2.2.7 Toitepinge asümmeetria

Toitepinge asümmeetria väljendab faasidevaheliste pingete efektiivväärtuste või faasinurkade ebahühtlust. Ebavõrdsuse määra hinnatakse vastujärgnevuskomponendi suhtena pärisjärgnevuskomponenti. Toitepinge asümmeetria piirväärtused normaaltalitluse korral nii madal- kui keskpingel on toodud järgnevas tabelis (tabel 2.4).

Tabel 2.4 Toitepinge asümmeetria piirväärtused jaotusvõrkudes [34]

Võrgu tüüp	Piirväärtus 1
Madal- või keskpingevõrk	95% mõõdetud väärtustest nädalases ajavahemikus 0% - 2% ¹

¹ Mõnes piirkonnas võib liitumispunktis ettetulev asümmeetria olla kuni 3%

2.2.8 Väiketootjate mõju toitepinge asümmeetriale

Toitepinge asümmeetria peamine põhjustaja on ebahühtlane koormus faasil. Enamik madalpinge ja osad keskpinge tarvitid on ühefaasilised seadmed, mille kasutamine

kolmefaasilises süsteemis tekitab ebasümmeetriat – ebaühtlane koormus tekitab erinevaid pingelange faasides ja toitepinge muutub ebasümmeetriliseks.

Toitepinge asümmeetriat võivad tekitada ka hajatootmisseadmed. Näiteks madalpingevõrku liituvad ühefaasilised päikesepaneelid tõstavad pinget vastavas faasis, kuhu nad ühendatud on. Ülejäänud faaside pinge jääb madalamaks ning võrgus tekib asümmeetria. Toitepinge asümmeetriast tingituna võivad induktsioon mootorid ja generaatorid üle kuumeneda, kuna neil on suhteliselt väike vastujärgnevustakistus [4]. Keskpingel on enamik tarviteid sümmeetrilised kolmefaasilised ning ka keskpingele liituvad elektritootjad on üldiselt kolmefaasilised. Sellest tulenevalt on keskpinge asümmeetria tase üldiselt madala. Madal- ja keskpinge trafode puhul ühtlustatakse keskpinges koormust trafo täht-kolmnurk lülitusgruppi kasutades.

2.2.9 Harmoonikud

Harmoonikute käsitlemisel vaadeldakse eraldi pinge- ja vooluharmoonikuid. Avalikes elektrivõrkudes reguleeritakse üldjuhul pingeharmoonikute väärtusi, kuna pingeharmoonikud mõjutavad kõiki kliente. Üksikute tarvitite ja tootmisseadmete reguleerimisel kasutatakse vooluharmoonikuid. Pingeharmoonikuks nimetatakse siinuspinget, mille sagedus on täisarvkorda suurem toitepinge põhikomponendi sagedusest. Analoogiliselt on defineeritud ka vooluharmoonikud. Harmoonikute käsitlemiselt eristatakse ka paaris ja paarituid harmoonikuid ning vaeharmoonikuid. Vaeharmoonikute puhul on tegemist siinuspingega, mille sagedus ei ole põhikomponendi sageduse täisarvkordne.

EVS-EN 50160 standardi alusel hinnatakse pingeharmoonikuid kahte moodi:

- Üksikult harmooniku pinge suhtelise amplituudi U_h alusel põhikomponendi U_I suhtes
- Ühiselt pinge harmoonmoonutusteguri THD_U (*Total Harmonic Distortion*) alusel

Üksikuid harmoonikuid hinnatakse 10-minutilise keskmise efektiivväärtuse alusel mille mõõdetud väärtustest 95% peavad jääma alla poole kehtestatud piirväärtusi. Üksikute harmoonikute piirväärtused normaaltalitusel nii madal- kui keskpingevõrgus on toodud järgnevas tabelis (tabel 2.5). Lisaks on määratud piirväärtus harmoonmoonutustegurile – THD_U ei tohi olla suurem kui 8%. Üksikuid harmoonikuid vaadeldakse kuni 25-nda järguni, sest kõrgemad harmoonikud on üldiselt väikesed ning resonantsnähtuste tõttu ettearvamatud. Harmoonmoonutustegur arvutatakse kasutades harmoonikuid kuni 40-nda järguni.

Tabel 2.5 Üksikute harmoonikute piirväärtused jaotusvõrkudes [34]

Paaritud harmoonikud				Paaris harmoonikud	
3-jagamatud		3-ga jaguvad			
Järk h	Piirväärtus U_h	Järk h	Piirväärtus U_h	Järk h	Piirväärtus U_h
5	6,0%	3	5,0% ¹	2	2,0%
7	5,0%	9	1,5%	4	1,0%
11	3,5%	15	0,5%	6 - 24	0,5%
13	3,0%	21	0,5%		
17	2,0%				
19	1,5%				
23	1,5%				
25	1,5%				

¹ Olenevalt võrgu ehitusest võib 3. harmoonik olla oluliselt väiksem

Elektrilevi OÜ on kehtestanud liitumistingimuste alusel piirväärtused kõigi väiketootjate vooluharmonikutele (tabel 1.1). Vooluharmonikute piirväärtused on seotud võrgu lühisvõimsusega arvestamaks võrgu tugevust.

2.2.10 Väiketootjate mõju harmoonikutele

Pingeharmonikuid põhjustavad peamiselt ebalineaarsed koormused, mille voolu tarbimine pole siinuseline [34]. Tekkivad vooluharmonikud tekitavad võrgu näivtakistusel mitte-siinuselise pingelangu ja seeläbi pingeharmonikuid. Ka elektritootmiseseadmed võivad põhjustada harmoonikuid. Tekkivate harmoonikut järk ja suhteline väärtus sõltub elektritootmiseseadmete tehnoloogiast ja ehitusest.

Invertereid kasutavad seadmed võivad tekitada tõsiseid probleeme pingeharmonikutega. Vanemate, türistoride baasil töötavate inverteri puhul oli harmoonikute probleem väga tõsine, kuid tänapäevaste pulsilaiusmodulatsiooniga ja IGBT-transistoreid kasutavate inverteritega on probleem vähenenud [17]. Tänapäevaste inverteriga on tekkinud aga uus moonutusi tekitav probleem – inverterite lülitussagedus võib tekitada resonantsi võrgu primaarseadmetega [18]. Selle tulemusena tekivad 35-ndat ja kõrgemat järku pingeharmonikud, mis moonutavad lainekuju ja tekkiv nulliläbimismüra võib segada erinevate elektrooniliste seadmete tööd (näiteks kellade).

Pöörlevad generaatorid võivad samuti tekitada pingeharmonikuid, sõltuvalt nende ehituse eripäradest: mähiste ehitus, südamiku mitte-lineaarsuse, maandus jne. Generaatori mähisesammu valik võimaldab optimeerida toodetava pinge lainekuju ja mõjutab ka võimalike harmoonikute tekkimist [41]. 5/6 mähissammuga generaatorites tekib vähem 5-ndat ja 7-ndat harmoonikut, kuid võib tekkida rohkem 3-ga jaguvaid harmoonikuid. Enamlevinud on 2/3 mähissammuga generaatorid, mille puhul tekib vähem 3-ndat harmoonikut, kuid vastavalt rohkem 5-ndat ja 7-ndat. 2/3 mähissammuga generaatoritel on aga väiksem nulljärgnevustakistus ja seetõttu võivad tekitada generaatoriga ühenduses olevad muud seadmed liigselt kolmandast harmoonikust tingitud koormust generaatoris, mis võib viia ülekuumenemiseni [17].

Elektrituulikute tekitatud moonutused sõltuvad nii kasutatava generaatori tehnoloogiast kui jõuelektroonikast. Generaatoris võivad tekkida harmoonikud õhuvahes, kui staatori või rootori mähised on mitte-siinuselise jaotusega, või ka uuretes, mida põhjustab põhivälja möödumine staatori uuretest ja sellest tingitud pinge muutumine sammudena, mitte siinuselisel [5]. Tänapäevaste tuulikute harmoonikute spektrum koosneb üldiselt nii kitsas- kui lairiba komponentidest ning domineerivad ei pruugi olla enam 3-jagamatud paaritud harmoonikud. Jõuelektroonika arenguga ja laialdasema kasutamisega on tekkinud rohkem paaris- ja vaeharmonikuid, eriti kõrgemat järku [22].

2.2.11 Pinge sündmused

Toitepinge sündmuste all vaadeldakse nelja nähtust [34]: toitepinge katkestused, toitepinge lohud, toitepinge muhud ja transient-liigpinged. Antud nähtuste puhul on tegemist ettearvamatute ja suuresti juhuslike sündmustega. Sündmust esinemise tõenäosus on oleneb võrgu konfiguratsioonist ja vaatluspunktist, kuid on sellegipoolest väga korrapäratu. Seetõttu puuduvad antud hetkel toitepinge sündmustele piirväärtused. On antud ainult lävepiirid erinevate sündmuste jaoks, mis on toodud järgnevas tabelis (tabel 2.6).

Tabel 2.6 Toitepinge sündmuste lävepiirid [34]

Võrgu tüüp	Lävepiirid			
	Toitepinge katkestus	Pingelohk	Pingemuhk	Transient liigpinge
Madalpingevõrk (4-juhtmeline 3- faasiline)	$<5\% U_f$	$<90\% U_f$	$>110\% U_f$	$>110\% U_f$
Keskpingevõrk	$<5\% U$	$<90\% U$	$>110\% U$	$>110\% U$

Madalpingevõrkudes vaadeldakse neljajuhtmeline ja kolmefaasilise võrgu puhul faasi ja neutraali vahelise pinge sündmuseid, keskpingevõrkudes arvestatakse faasidevahelisi pingeid. Pingelohkude hindamisel kasutatakse kahte parameetrit: jääkpinge ja pingelohu kestus. Jääkpinge on sündmuse käigus mõõdetud minimaalne pinge efektiivväärtus, mida väljendatakse protsendina etalonpingest. Pingelohu kestuse arvestus algab, kui esimene faas langeb allapoole lävepiiri, ning lõpeb, kui kõik faasid on ülalpool lävepiiri. Pingemuhkude puhul kasutatakse analoogiliselt kahte parameetrit: muhu pinge ja kestus. Mõlema parameetri hindamisel arvestatakse sündmuse lõpu lävepiiri puhul ka 2% hüstereesiga.

Statistika kogumiseks tuleb salvestada pingelohkude ja –muhkude puhul mõlemad parameetrid ning standardis on toodud statistika teostamiseks eraldi tabelid, mille alusel sündmuseid jaotada pingelohkude (tabel 2.7) või –muhkudena (tabel 2.8). Pingelohkude tabelis on toodud ka toitepinge katkestused, mille kestus on alla ühe minuti.

Tabel 2.7 Pingelohkude liigitamine [34]

Jääkpinge u [%]	Kestus t [ms]				
	$10 \leq t \leq 200$	$200 < t \leq 500$	$500 < t \leq 1000$	$1000 < t \leq 5000$	$5000 < t \leq 60\,000$
$90 > u \geq 80$	lahter A1	lahter A2	lahter A3	lahter A4	lahter A5
$80 > u \geq 70$	lahter B1	lahter B2	lahter B3	lahter B4	lahter B5
$70 > u \geq 40$	lahter C1	lahter C2	lahter C3	lahter C4	lahter C5
$40 > u \geq 5$	lahter D1	lahter D2	lahter D3	lahter D4	lahter D5
$5 > u$	lahter X1	lahter X2	lahter X3	lahter X4	lahter X5

Tabel 2.8 Pingemuhkude liigitamine [34]

Muhu pinge u [%]	Kestus t [ms]		
	$10 \leq t \leq 500$	$500 < t \leq 5000$	$5000 < t \leq 60\,000$
$u \geq 120$	lahter S1	lahter S2	lahter S3
$120 > u \geq 110$	lahter T1	lahter T2	lahter T3

2.2.12 Väiketootjate mõju pinge sündmustele

Pingemuhkude tüüpilised põhjused on ümberlülitamised ja koormuse väljalülitamine. Transient-liigpingeid põhjustavad peamiselt äike või lülitusliigpinged. Pingelohke põhjustavad peamiselt ülisuured voolud, mis on tingitud kas riketest võrgus või tarbija paigaldises või ka suure võimsusega seadmete sisse lülitamisest. Hajatootmiseseadmed võivad mõjutada peamiselt pingelohkusi ja –muhkusi ja seda nii positiivselt kui negatiivselt.

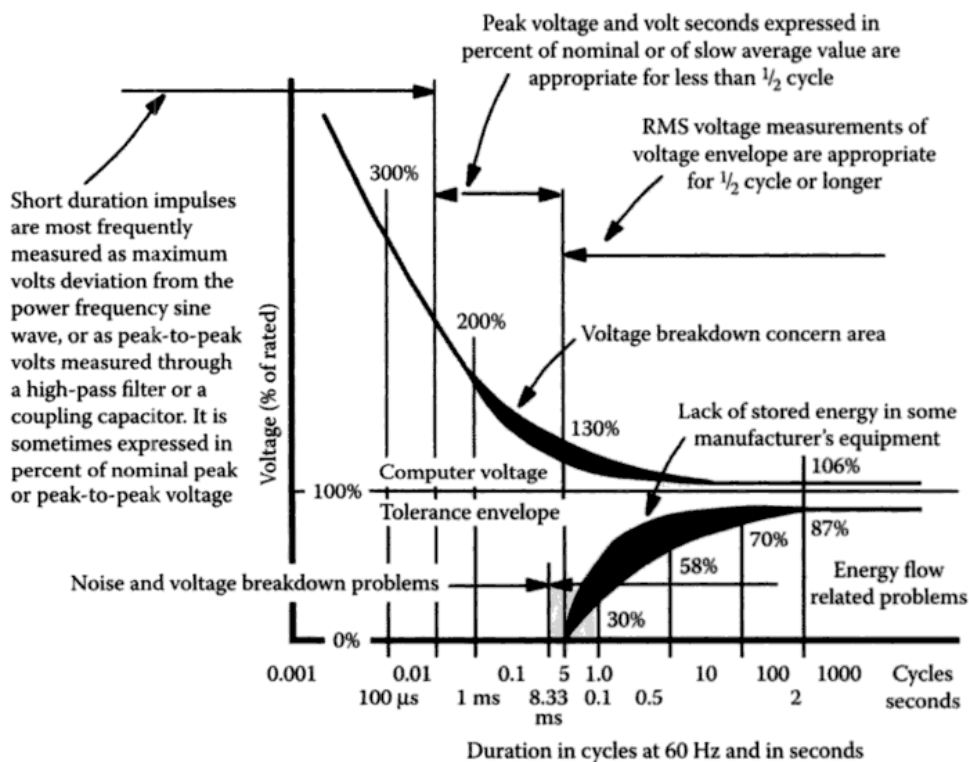
Hajatootmiseseadmete lisamine süsteemi suurendab üldjuhul süsteemi lühisvõimsust ja –voolu. Lühisvõimsuse muutus mõjutab võrgus tekkivad pingelohke ning üldjuhul on

hajatootmiseseadmetega võrgus pingelohkude jääkpinged suuremad, kui ilma tootmiseseadmeteta [15, 42]. Hajatootmiseseadme võime pingelohkusi tasandada sõltub oluliselt seadme tüübist ja paigutusest. Suure võimsusega sünkroongeneraatorid suudavad lokaalselt pingetaset hoida ja pingelohu mõju vähendada, kuid näiteks jõuotafode takistus piirab generaatori võimaliku positiivset mõju teistele fiidritele. Ka inverteritel põhinevad tootmiseseadmed võivad aidata pingetaset hoida, kui nendega on lubatud toota reaktiivenergiat [13].

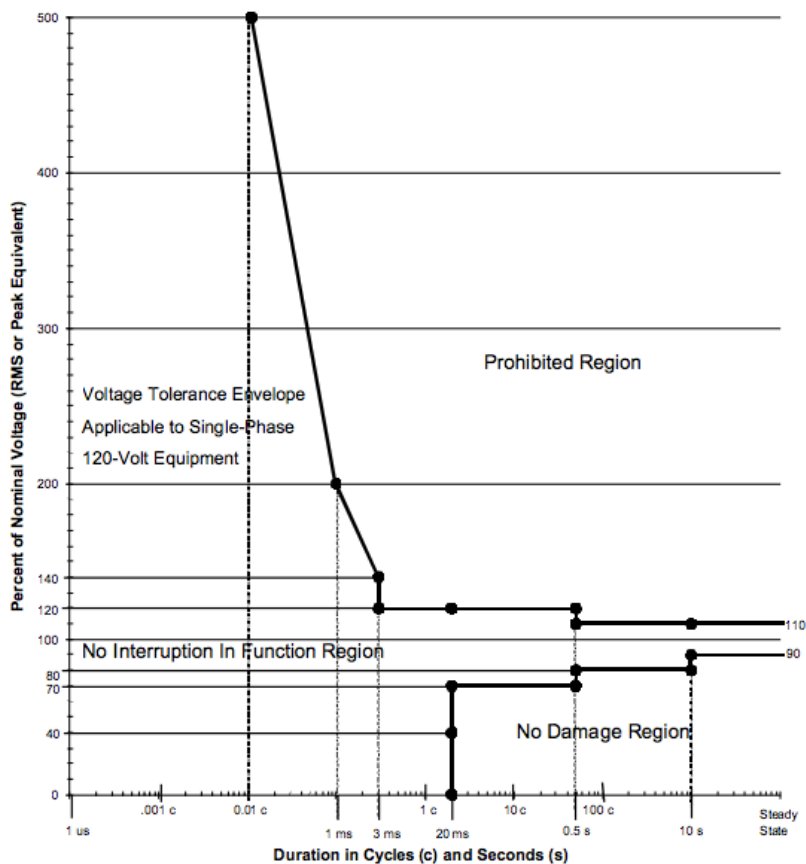
Pingelohkude puhul on suurima positiivse mõjuga sünkroongeneraatorid, mis kasutavad võimsusteguri alusel reguleerimist [16]. Sünkroongeneraatorid, mida reguleeritakse ainult ergutuse järgi või on püsiergutusega, omavad väiksemat positiivset mõju. Induktsioongeneraatorite mõju on üldjuhul negatiivne nii pingelohu kestuse kui sügavuse osas. Induktsioongeneraator tarbib võrgust reaktiivenergiat ning mida suurema kiirusega masin pöörleb, seda rohkem reaktiivenergiat võrgust tarbitakse. Rikke kõrvaldamisel generaatori kiirus ei taastu koheselt ning reaktiivenergia tarbimise tõttu võrgupinge ei taastu koheselt ja pingelohu kestus suureneb.

Hajatootmiseseadmed võivad tekitada ka pingemuhke. Näiteks nõrka võrgu paigaldatud päikesepaneelid võivad lokaalset võrgu pinget tõsta ning selge ilma korral tekitada olukorra, kus ületatakse pingemahu lävepiir. Hajatootmiseseadmete kehva koordineerimise korral pingeregulaatoritega võib tekkida olukord, kus tootmiseseadme tekitatud vastassuunalise võimsusvoo tõttu hakkab kontrolleri liigselt lülitama, mis võib tekitada liiga kõrgeid või madalaid pingeid võrgus [40]. Ka saarestumise või generaatori eneseinduktsiooni korral võivad võrgus tekkida liigpinged, mis ületavad pingemahu lävepiiriid ja võivad seadmeid rikkuda.

Pingelohkude ja –muhkude mõjude hindamiseks tarbija seadmetele kasutatakse *CBEMA* ja *ITIC* graafikuid (vastavalt joonis 2.3 ja joonis 2.4). *Computer and Business Equipment Manufacturers' Association (CBEMA)* lõi samanimelise graafiku 1970. aastatel juhiseks oma liikmetele tootmiseseadmete ehitamiseks [43]. Graafik kirjeldab infotehnoloogiliste seadmete võimet jätkata töötamist pingelohkude ja –muhkude korral. 1994. aastal loodi *CBEMA* poolt koostatud töögrupp (*Information Technology Industry Council, ITIC*) uuendatud graafik – *ITIC* graafik.



Joonis 2.3 CBEMA graafik



Joonis 2.4 ITIC graafik

3 Mõõtmiste tulemused

Mõõtmised on läbi viidud Elektrilevi OÜ võrgus 11 erinevas mõõtepunktis üheksas alajaamas. Mõõtmispunktide iseloomustav informatsioon on toodud järgnevas tabelis (tabel 3.1).

Tabel 3.1 Mõõtmispunktid

Mõõtmispunkt	U_C [kV]	Elektrijaama tüüp	Generaatori tüüp
MP1	6,3	Tuuleelektrijaam	Inverter (<i>IGBT</i>)
MP2	6,3	Tuuleelektrijaam	Inverter (<i>IGBT</i>)
MP3	10,5	Koostootmisjaam	Asünkroongeneraator
MP4	10,5	Koostootmisjaam	Sünkroongeneraator
MP5	10,5	Koostootmisjaam	Asünkroongeneraator
MP6 ¹	0,23	Diisel- ja tuuleelektrijaam	Sünkroon- ja asünkroongeneraator
MP7	10,5	Tuuleelektrijaam	Asünkroongeneraator
MP8	10,5	Tuuleelektrijaam	Asünkroongeneraator
MP9	10,5	Koostootmisjaam	Sünkroongeneraator
MP10	15,7	Biogaasijaam	Sünkroongeneraator
MP11	10,5	Biogaasijaam	Sünkroongeneraator

¹ MP6 puhul on tegemist madalpinges läbi viidud mõõtmistega sünkroonselt ühendamata võrgus. Arvestatakse faasi ja maa vahelist nimipinget.

Mõõtmised on läbiviidud *Elspec G4420* pingekvaliteedianalüsaatoritega, mis on olnud paigaldatud elektritootjate liitumispunkti (v.a. MP6, kus seade asub elektritootjatele lähimas alajaamas). Pingekvaliteedianalüsaatorid vastavad IEC 61000-4-30 standardis toodud klass A täpsusnõuetele. Mõõtmisteks on kasutatud pinge- ja voolutrafode 0,5 täpsusklassiga mähiseid.

Mõõtmispunktide andmeid vaadeldakse ajavahemikus 2013. aasta 24. nädal (09.06.2013) kuni 2014. aasta 14. nädal (05.04.2014). Mõõtmispunktide MP1 ja MP2 puhul on seadmed paigaldatud 2014. aasta alguses ning mõõtmisandmed on olemas alates 05.02.2014. Mõõtmispunkt MP3 pingekvaliteedianalüsaatori mõõtmisandmed on olemas alates 02.08.2013. Mõõtmispunkti MP7 puhul puuduvad mõõtmisandmed nädalatel 34-39 kvaliteedianalüsaatori rikkest tulenevalt.

3.1 Mõõteandmete esitamise põhimõtted

Mõõtmisandmete esitamisel eristatakse pingele sündmusi ja kestvaid nähtusi. Pingele sündmuste alla kuuluvad pingelohud, -muhud ja katkestused. Sündmuste esitamiseks kasutatakse EVS-EN 50160 standardis kirjeldatud põhimõtteid statistilise info kogumiseks. Sündmusi kirjeldatakse kestuse ja suhtelise jääk- või liigpinge abil (tabel 2.7 ja tabel 2.8).

Kestvate nähtuste kohta mõõtmisandmete esitamisel tuleb arvestada erinevate piirväärtustega kesk- ja madalpingel ning toitepinge mõõtmisandmete esitamisel mõõtmispunktide erineva pingetasemega (0,4 kV kuni 15 kV). Sellest tulenevalt kasutatakse pidevate nähtuste jaoks *PQI* (*Power Quality Index*) väärtuseid [44].

PQI arvutamisel kasutatakse EVS-EN 50160 ja EVS-EN 61000-4-30 standardites toodud andmete keskmistamise põhimõtteid, näiteks sünkroonselt ühendatud madalpingevõrkudes kasutatakse 10-minuti keskmise efektiivväärtuse 95% usaldusvahemiku. Kui *PQI* arvutamisel on vaja hinnata nii positiivseid kui negatiivseid muutusi, kasutatakse absoluutväärtuseid. Saadud väärtused normaliseeritakse ehk jagatakse läbi vastava parameetri piirväärtusega, mille tulemusena saadakse *PQI* väärtus antud parameetri vastava piirväärtuse jaoks. Näiteks THD_U mõõdetud väärtuste puhul 3,8% ja 10% on *PQI* väärtused vastavalt 0,475 ja 1,25 (THD_U piirväärtus on 8%). *PQI* väärtus 0,475 näitab, et antud mõõtmistulemus moodustab 47,5% piirväärtusest ehk jääb alla lubatud piirväärtuse. *PQI* väärtused üle 1 tähendavad piirväärtuste ületamist.

PQI väärtuste keskmistamisel kasutatakse järgnevat loogikat:

- juhul kui kõik *PQI* väärtused on väiksemad kui 1, kasutatakse maksimaalset *PQI* väärtust;
- juhul kui üks või mitu *PQI* väärtust on suuremad kui 1, summeeritakse vastavate parameetrite üle 1 olevad osad ja liidetakse need 1-le.

Näiteks *PQI* väärtuste puhul THD_U ja asümmeetria jaoks vastavalt 1,25 ja 1,3 on üle ühe olevad osad 0,25 ja 0,3. Summaarne *PQI* väärtus on seega 1,55, mis saadakse jääkide liitmisel 1-le.

PQI väärtuse kasutamine lihtsustab erinevate parameetrite hindamist ja võrdlemist ning lubab samal skaalal võrrelda ka erinevate piirväärtuste või suurte erinevustega parameetreid, näiteks aeglaseid pingemuutusi 0,4 kV ja 10 kV võrkudes. Graafikutes ja tabelites on *PQI* väärtus toodud protsentidena, et lihtsustada mõõtmisandmetest arusaamist.

3.2 Sagedus

Sageduse mõõtmistulemused on toodud eraldi mõlema piirväärtuse osas (vastavalt tabel 2.1), mõõtetulemused on jagatud kaheks: MP6 mõõtetulemused on eraldi välja toodud ning ülejäänud mõõtepunktide mõõtetulemused on toodud välja koos (tabel 3.2). Mõõtepunkti nr. 6 mõõtetulemused on eraldi välja toodud, kuna tegemist on sünkroonselt mitte ühendatud mõõtmispunktiga, mille puhul kehtivad ka eraldi piirväärtused. Ülejäänud mõõtmispunktide puhul on tegemist sünkroonselt ühendatud mõõtmispunktidega ning kuna sünkroonsüsteemis on sagedus sama, saab kõiki mõõtepunkte esitada ühe tulemusega.

Tabel 3.2 Sageduse mõõtmistulemused

Mõõtepunkt	Piirväärtus 1 ¹	Piirväärtus 2 ¹
MP6	0,54%	0,94%
MP1-MP5 ja MP7-MP11	4,46%	2,58%

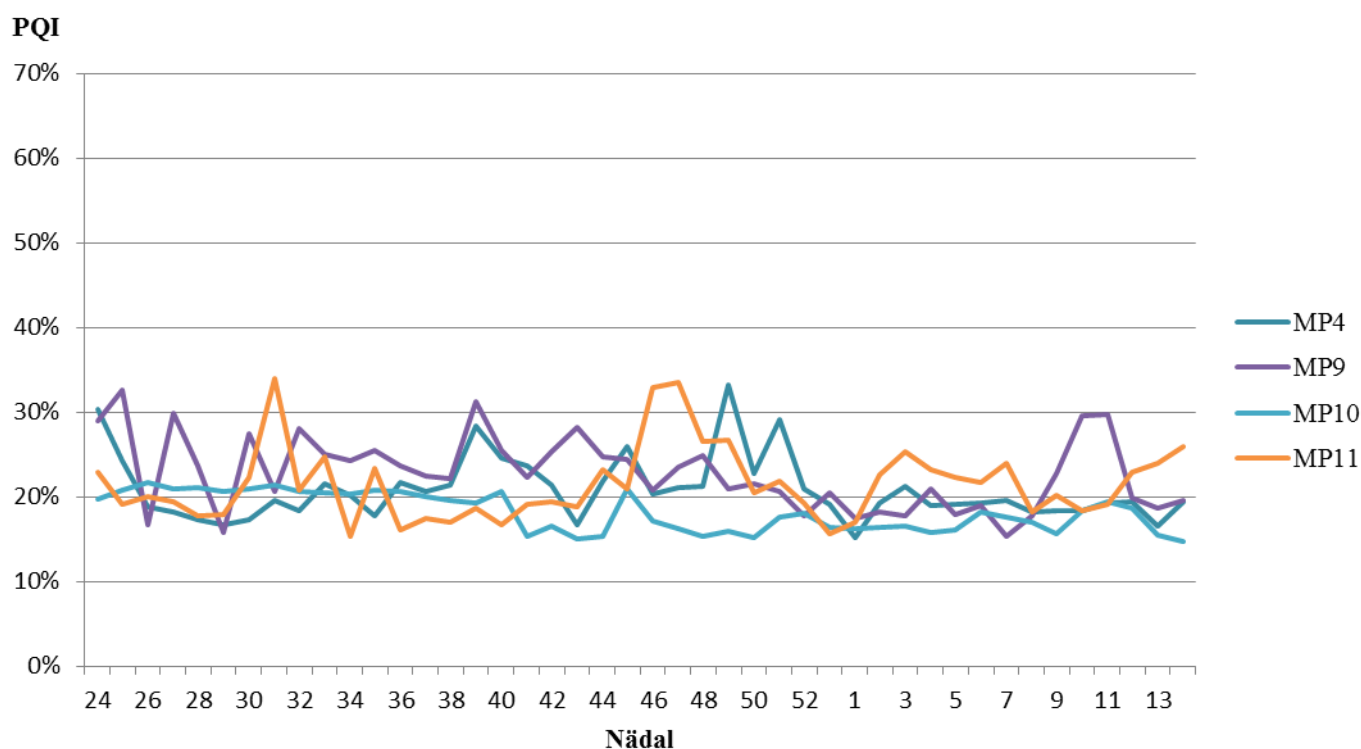
Mõõtmiste tulemustest on näha, et sageduse kvaliteet on väga hea. Sünkroonsüsteemis ei ületa sageduse 10 sekundi keskvärtuse absoluutne viga 99,5% ajast 0,022 Hz piiri. Sünkroonselt ühendamata elektrivõrgus on mõõtmistulemuste alusel sageduse kvaliteet samuti väga hea – 95% ajast ei ületa sageduse 10 sekundi keskvärtuse absoluutne viga 0,005 Hz piiri. Konkreetsete mõõtmistulemuste alusel on sageduse kvaliteet sünkroonselt ühendamata võrgus kõrgem, kui sünkroonalal.

3.3 Toitepinge aeglased muutused

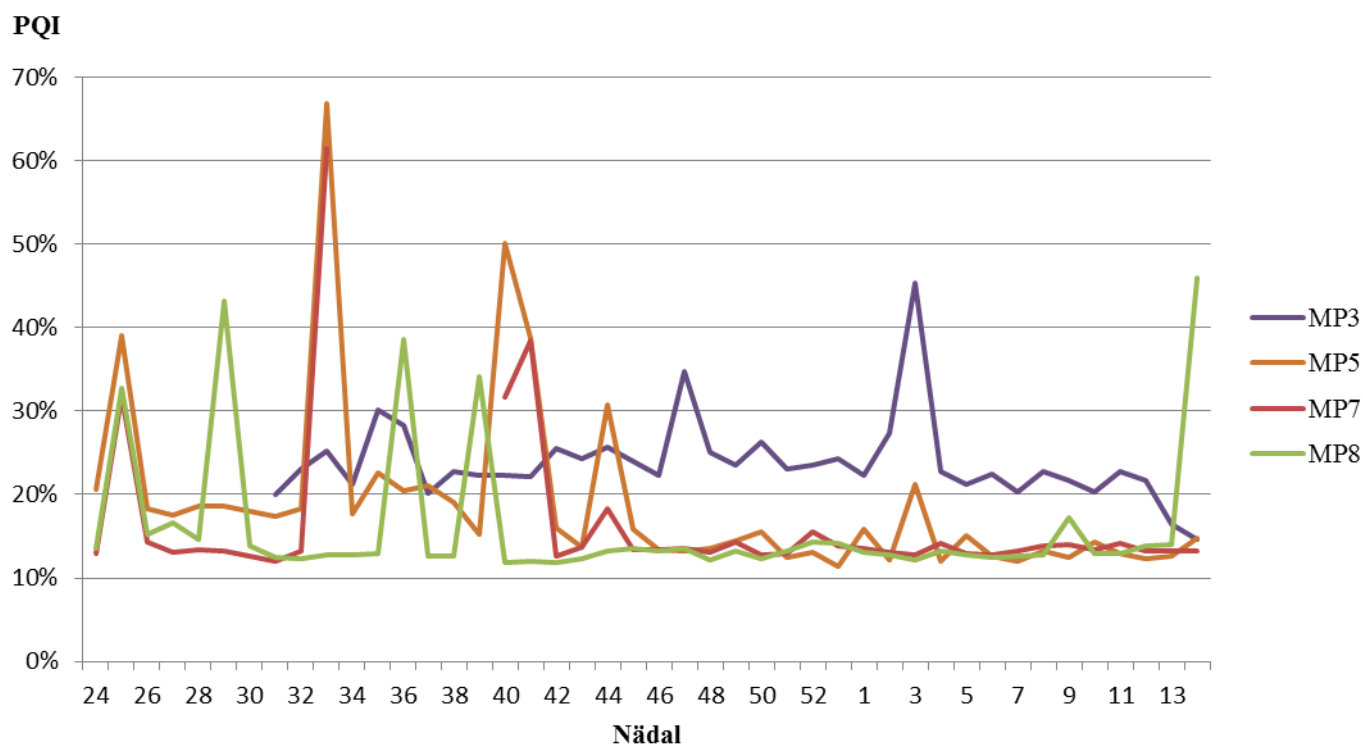
Toitepinge aeglase muutuste mõõtmistulemused on toodud eraldi mõlema piirväärtuse kohta (vastavalt tabel 2.2). Piirväärtuse 1 mõõtmistulemused on esitatud graafiliselt kolmel joonisel, kuhu on grupeeritud erineva tehnoloogiaga tootmisadmed: mõõtepunktid sünkroongeneraatoriga (joonis 3.1), asünkroongeneraatoriga (joonis 3.2) ja muud mõõtepunktid (joonis 3.3). Mõõtmistulemused on esitatud nädala kaupa.

Sünkroonselt ühendamata madalpinge jaotusvõrkude jaoks puuduvad piirväärtuse 1 normatiivid, mille tõttu on MP6 puhul kasutatud piirväärtus 1 jaoks madalpinge piirväärtusi toitepinge aeglase muutuste jaoks sünkroonselt ühendatud jaotusvõrkudes. Vastavate piirväärtuste kasutamine võimaldab hinnata toitepinge aeglaseid muutusi võrreldes ülejäänud mõõtepunktidega. Piirväärtus 2 mõõtmistulemused on esitatud tabeli kujul ühe näitajana kogu mõõtmisperioodi kohta (tabel 3.3).

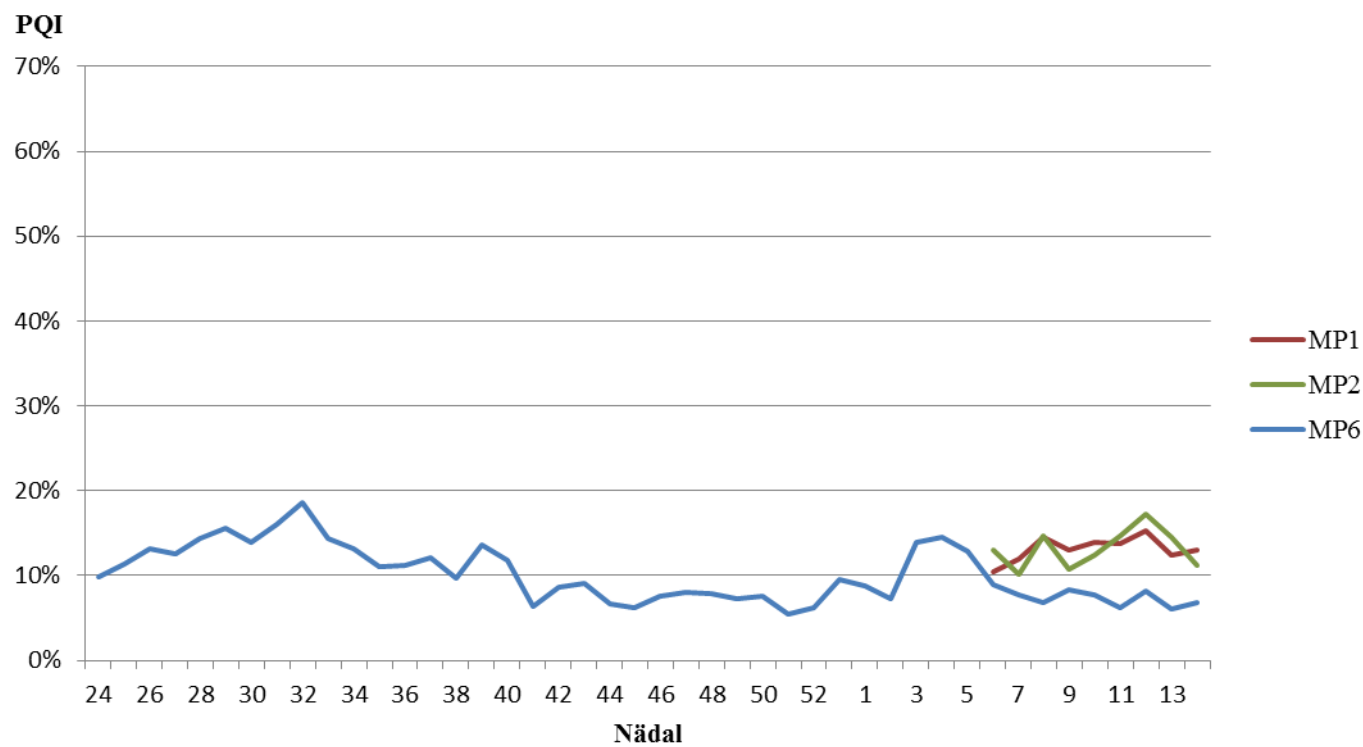
Nädalastest mõõtmistulemustest on näha, et kõikidel nädalatel püsivad toitepinge aeglased muutused lubatud piirnormides ja üldine *PQI* tase on madal, keskmiselt on *PQI* väärtus 17,7%. Graafikutelt on näha, et *PQI* tase püsib üldiselt ka suhteliselt ühtlane, keskmiselt on vahe *PQI* nädalaste väärtuste vahel 12,3% (ei arvestata asünkroongeneraatoriga mõõtepunkte). Asünkroongeneraatoriga mõõtepunktide puhul esinevad aga suuremad variatsioonid *PQI* väärtustes. *PQI* keskmised väärtused MP3, MP5, MP7 ja MP8 mõõtepunktides on vastavalt 23,8%, 19,0%, 16,4% ja 16,2%, maksimaalsed *PQI* väärtused aga vastavalt 45,3%, 66,9%, 61,4% ja 45,9%.



Joonis 3.1 Toitepinge aeglase muutuste mõõtetulemused sünkroongeneraatoriga mõõtepunktides piirväärtus 1 alusel



Joonis 3.2 Toitepinge aeglaste muutuste mõõtetulemused asünkroongeneraatoriga mõõtepunktides pürväärtus 1 alusel



Joonis 3.3 Toitepinge aeglaste muutuste mõõtetulemused muudes mõõtepunktides pürväärtus 1 alusel

Piirväärtus 2 mõõtetulemustest on näha, et toitepinge aeglasel muutused püsivad ka kogu perioodi vältel lubatud piirnormides. Mõõtetulemustest on näha, et ka piirväärtus 2 alusel on üldine *PQI* tase madal, keskmiselt 20,0%. Toitepinge aeglase muutuste osas on kõrgeima *PQI* väärtusega nii piirväärtus 1 kui piirväärtus 2 alusel MP5 mõõtepunkt. Piirväärtus 2 alusel on kõrge *PQI* väärtusega ka mõõtepunktid MP7 ja MP8, kuid erinevalt piirväärtus 1 tasemest on mõõtepunkti MP3 *PQI* tase piirväärtus 2 alusel suhteliselt madal.

Tabel 3.3 Toitepinge aeglase muutuste mõõtetulemused piirväärtus 2 alusel

Mõõtepunkt	<i>PQI</i>
MP1	5,74%
MP2	9,56%
MP3	8,14%
MP4	23,82%
MP5	35,51%
MP6	5,94%
MP7	33,49%
MP8	33,31%
MP9	22,22%
MP10	17,81%
MP11	24,57%

Üldiselt on mõõtmistulemustest alusel toitepinge aeglasel muutused kogu mõõtmisperioodil lubatud piirväärtuste piires ning keskmine *PQI* tase on madal. Mõnevõrra suuremaid *PQI* väärtusi ja variatsiooni on mõõtmistulemuste alusel mõõtepunktides MP3, MP5, MP7 ja MP8.

3.4 Kiired pingemuutused ja värelus

Väreluse mõõtmistulemused on toodud graafiliselt, kus mõõtmispunktid on jagatud kahte gruppi: tuuleelektrijaamade mõõtepunktid (joonis 3.4) ja muud mõõtepunktid (joonis 3.5). Mõõtmiste tulemused on esitatud nädala kaupa. Tabeli kujul on esitatud kiirete pingemuutuste arv kogu mõõtmisperioodi jooksul ja keskmisena ühe nädala kohta kõigis mõõtepunktides (tabel 3.4). Täiendavalt on esitatud hajuvusdiagrammid elektrijaama aktiivvõimsuse ja mõõdetud värelustugevuse kohta mõõtepunktides MP5 (joonis 3.6), MP8 (joonis 3.7) ja MP9 (joonis 3.8). Hajuvusdiagrammidel on kasutatud 10 minuti keskmisi väärtusi.

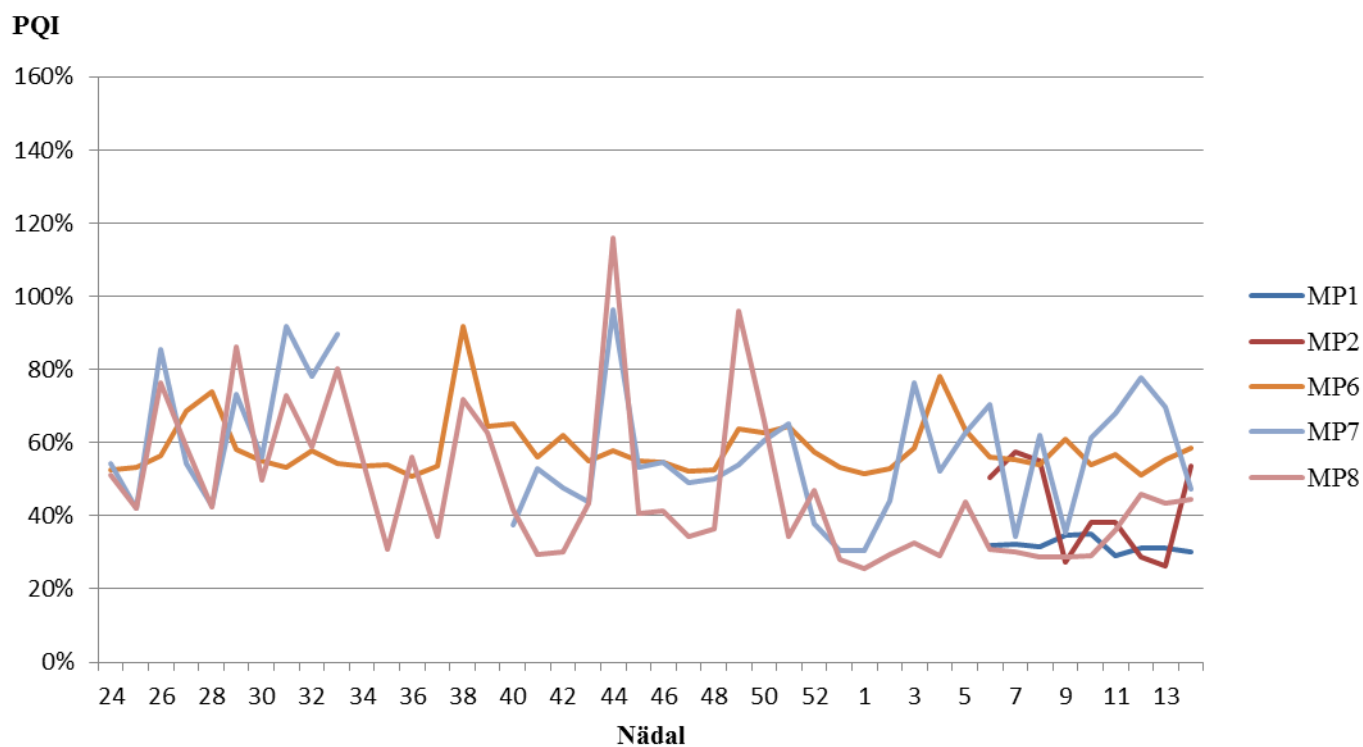
Kiirete pingemuutuste mõõtetulemustest võib näha, et sündmuste arv erinevates mõõtepunktides erineb väga suurel määral. Kõige kõrgema absoluutse ja suhtelise sündmuste arvuga on mõõtepunkt MP6, kus keskmiselt on 194,3 sündmust nädalas. Samuti eristub mõõtepunkt MP3, mille puhul on nii absoluutne kui suhteline sündmuste arv madalam kui ülejäänud mõõtepunktides, vastavalt 6 sündmust kokku 37 nädala jooksul ja 0,2 sündmust keskmiselt nädalas.

Tabel 3.4 Kiirete pingemuutuste arv

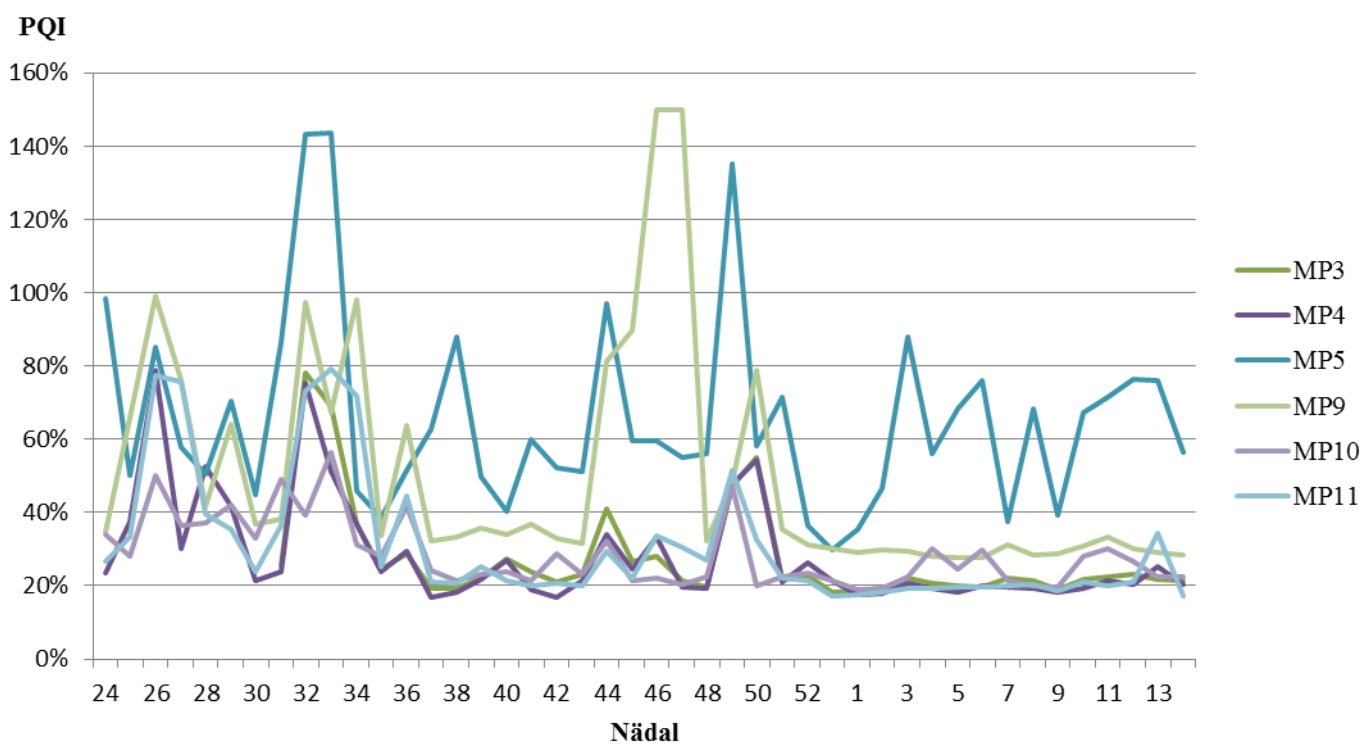
Mõõtepunkt	Kiirete pingemuutuste arv [tk]	Kiirete pingemuutuste arv nädalas keskmiselt [tk]
MP1	10	1,1
MP2	18	2,00
MP3	6	0,2
MP4	86	2,0
MP5	98	2,2
MP6	8548	194,3
MP7	288	7,6
MP8	328	7,5
MP9	233	5,3
MP10	50	1,1
MP11	50	1,1

Värelustugevus mõõtmistulemustest on näha, et P_{it} on ületanud mõne nädala puhul lubatud piirväärtuse ning üldine väreluse tase on kõrge. Värelustugevus on ületanud lubatud piirväärtuse MP5 puhul kolmel nädalal, MP9 puhul kahel nädalal ja MP8 puhul ühel nädalal. Mõõtmistulemustest on näha, et värelusetugevuse muutused nädalaste mõõtmistulemuste vahel on suured ning keskmine PQI hälve mõõtmispunkti minimaalse ja maksimaalse väärtuse vahel on 62,8%. Väikseima hälbe on MP1 mõõtmistulemused, kus maksimaalne ja minimaalne PQI väärtus on vastavalt 35,2% ja 29,1%.

Maksimaalselt on 47. nädalal MP9-s pikaajaline värelustugevus nädalases ajavahemikus jäänud 95% ajast alla poole 1,50 piiri, mis ületab lubatud piirväärtust poole võrra. PQI väärtus on 75% või suurem 41 nädalase mõõtmisväärtuse puhul ehk 10,2% kõigist mõõtmistest. Kõrgeima keskmise värelustugevusega on MP5, kus PQI keskmine väärtus on 65,74%. Värelustugevus on kõige madalama keskmise tasemega MP3 ja MP4 puhul, kus keskmine PQI väärtus on vastavalt 27,4% ja 28,3%. MP3 ja MP4 mõõtetulemustest on ka minimaalsed nädalased PQI väärtused – vastavalt 18,3% ja 16,6%.

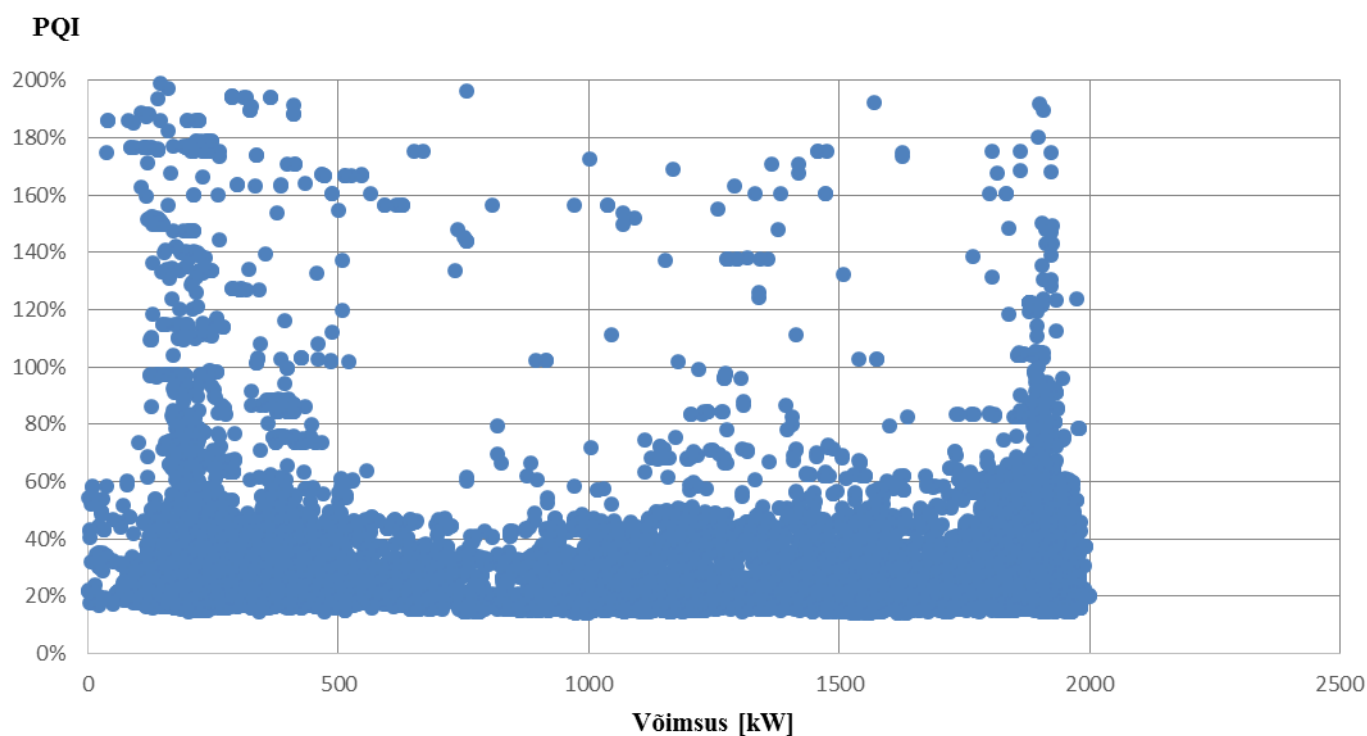


Joonis 3.4 Värelustugevuse mõõtetulemused tuuleelektrijaamade mõõtepunktides

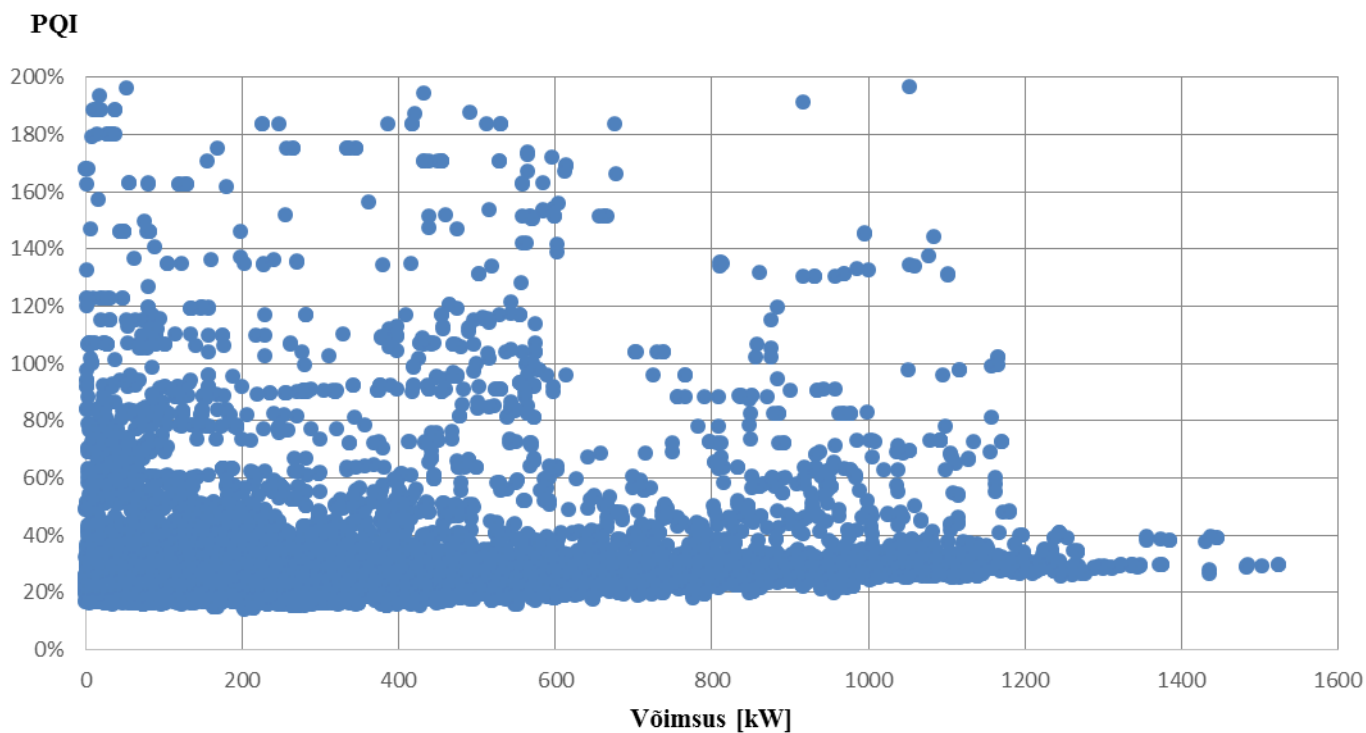


Joonis 3.5 Värelustugevuse mõõtetulemused muudes mõõtepunktides

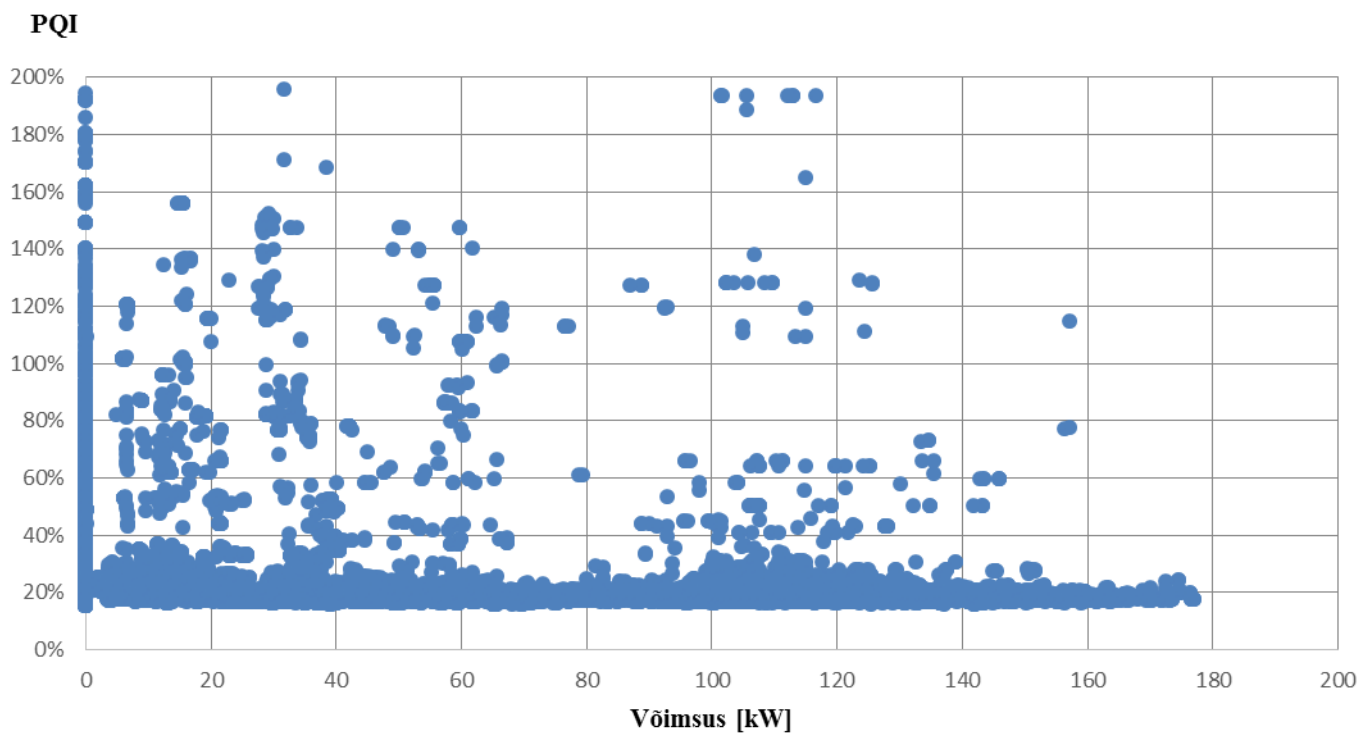
Mõõtepunktide MP5, MP8 ja MP9 hajuvusdiagrammid näitavad, et korrelatsioon elektrijaamade võimsuse ja mõõdetud värelustugevuse vahel praktiliselt puudub. Kõigis kolmes mõõtepunktis jääb korrelatsioonikordaja absoluutväärtus alla 0,12. Mõõtepunkt MP8 puhul on mõõtmistulemustest näha värelustugevuse minimaalse väärtuse kasvu võimsuse suurenemise korral. Analoogiliselt on mõõtepunkt MP5 puhul võimalik jälgida värelustugevuse minimaalse väärtuse mõningast langemist võimsuse suurenemise korral. Ka ülejäänud mõõtepunktide puhul jääb aktiivvõimsuse ja värelustugevuse vaheline korrelatsioon samale tasemel, ehk parameetrid ei korreleeru.



Joonis 3.6 Mõõtepunkti MP5 aktiivvõimsuse ja värelustugevuse hajuvusdiagramm



Joonis 3.7 Mõõtepunkti MP8 aktiivvõimsuse ja värelustugevuse hajvusdiagramm

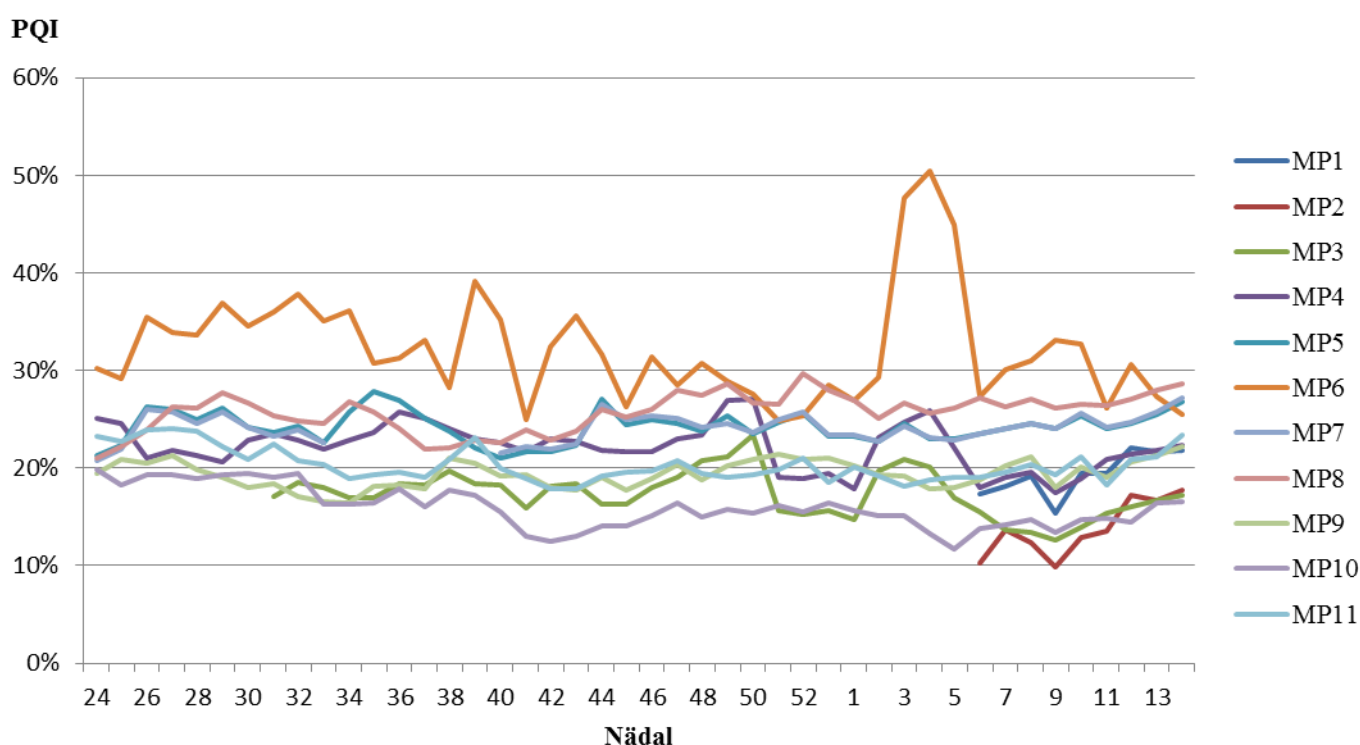


Joonis 3.8 Mõõtmispunkti MP9 aktiivvõimsuse ja värelustugevuse hajvusdiagramm

3.5 Toitepinge asümmeetria

Toitepinge asümmeetria mõõtetulemused on toodud ühe graafikuna, mõõtmiste tulemused on esitatud nädala kaupa (joonis 3.9). Mõõtetulemustest on näha, et asümmeetria tase on üldiselt madal, keskmine PQI väärtus on 22,2%. Samuti on graafikult näha, et asümmeetria tase hooajaliselt muutub vähe, püsides samal tasemel nii suvel kui talvel.

Mõõtmistulemuste alusel eristub teistest suurema asümmeetriaga MP6, mille keskmine PQI väärtus on 32,2% ja maksimaalne väärtus 50,5%. Minimaalne PQI väärtus on MP2-s mõõdetud 9,9%. Asümmeetria tase on mõõtmistulemuste alusel suhteliselt stabiilne, keskmiselt on mõõtepunkti minimaalse ja maksimaalse PQI väärtuse vahe 9,34%.



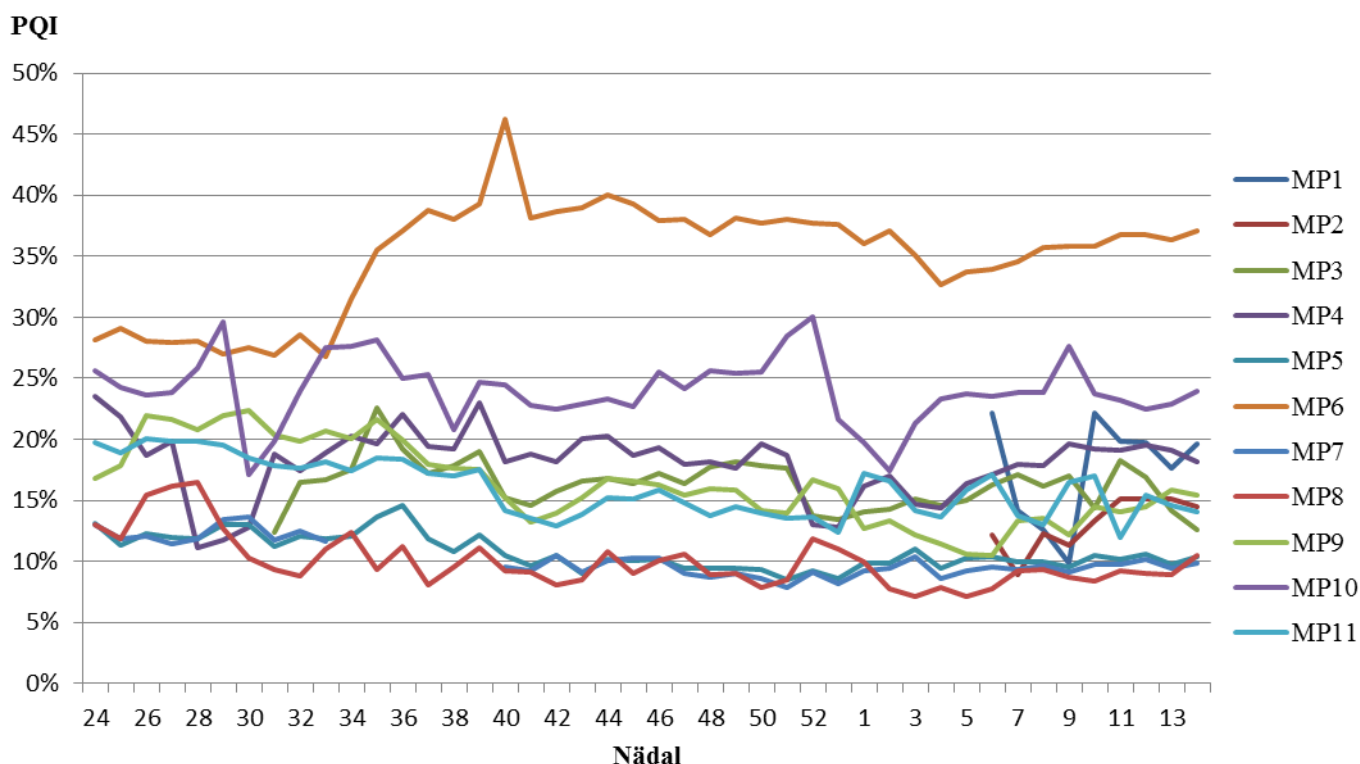
Joonis 3.9 Asümmeetria mõõtetulemused

3.6 Harmoonikud

Pingeharmonikute mõõtetulemused on esitatud eraldi üksikute harmoonikute ja THD_U kohta. THD_U mõõtmistulemused on esitatud nädala kaupa ühe graafikuna (joonis 3.10). Üksikute harmoonikute kohta on toodud kogu mõõtmisperioodi kirjeldavad tulemused, mis on esitatud kolme graafikuna: pingeharmonikud sünkroongeneraatoriga mõõtepunktides (joonis 3.13), asünkroongeneraatoriga mõõtepunktides (joonis 3.14) ja muudes mõõtepunktides (joonis

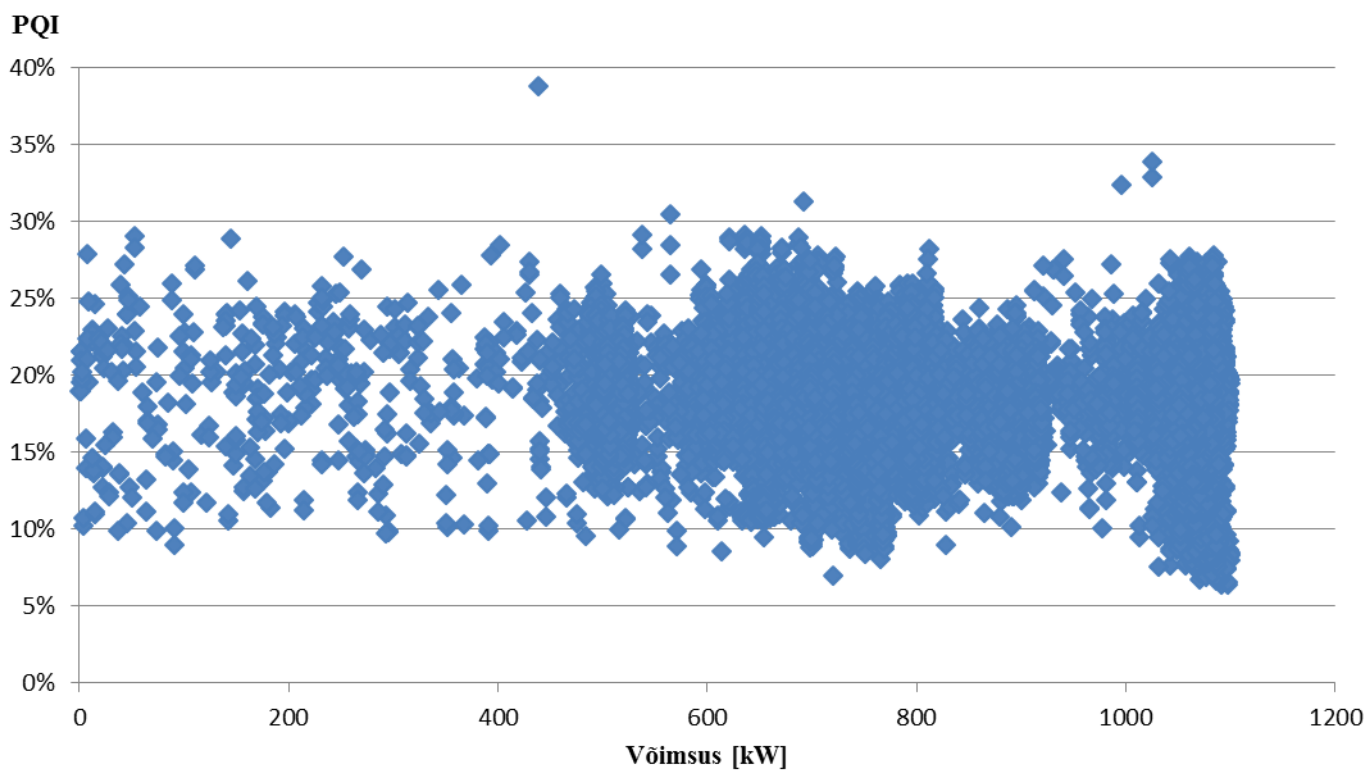
3.15). Graafikutel on toodud nädalaste mõõtmistulemuste PQI väärtuste vahemik, näiteks MP4 puhul jäävad 5. harmooniku võimalikud väärtused vahemiku 10,8% kuni 29,2%. Täiendavalt on esitatud mõõtepunktide MP10 ja MP6 elektrijaama aktiivvõimsuse ja THD_U hajuvusdiagrammid (vastavalt joonis 3.11 ja joonis 3.12).

THD_U mõõtmistulemustest on näha, et harmoonikute üldine tase jääb lubatud piirväärtuse alla ja on üldiselt suhteliselt madal – keskmine PQI väärtus on 17,0%. Samas on mõõtetulemustest näha, et MP6 keskmine THD_U tase on oluliselt kõrgem teistest mõõtepunktidest – PQI keskmine väärtus on 35,0%.

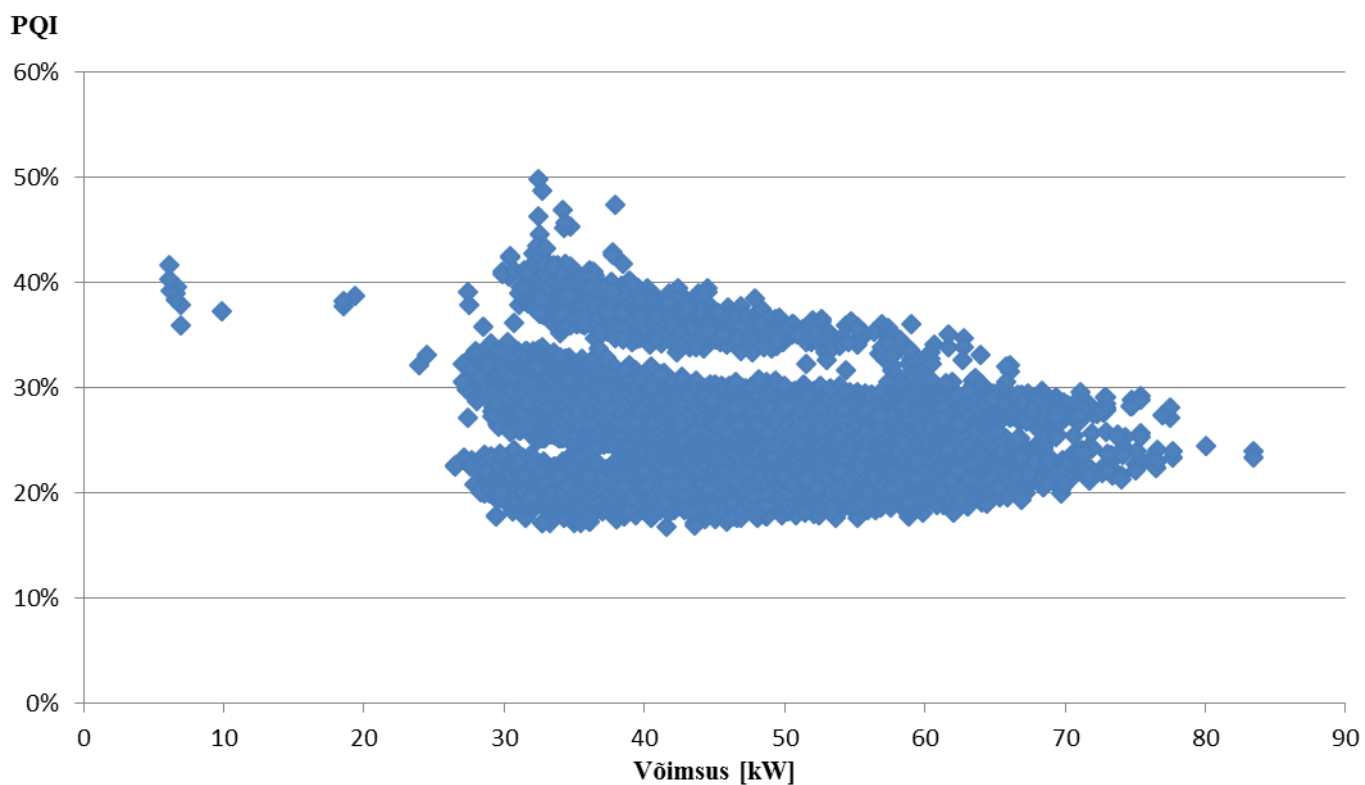


Joonis 3.10 THD_U mõõtetulemused

Mõõtepunktide MP6 ja MP10 aktiivvõimsuse ja THD_U hajuvusdiagrammilt on näha, et elektrijaama aktiivvõimsuse ja THD_U vahel korrelatsioon puudub. Ka ülejäänud mõõtepunktide puhul on korrelatsioon aktiivvõimsuse ja THD_U vahel nõrk



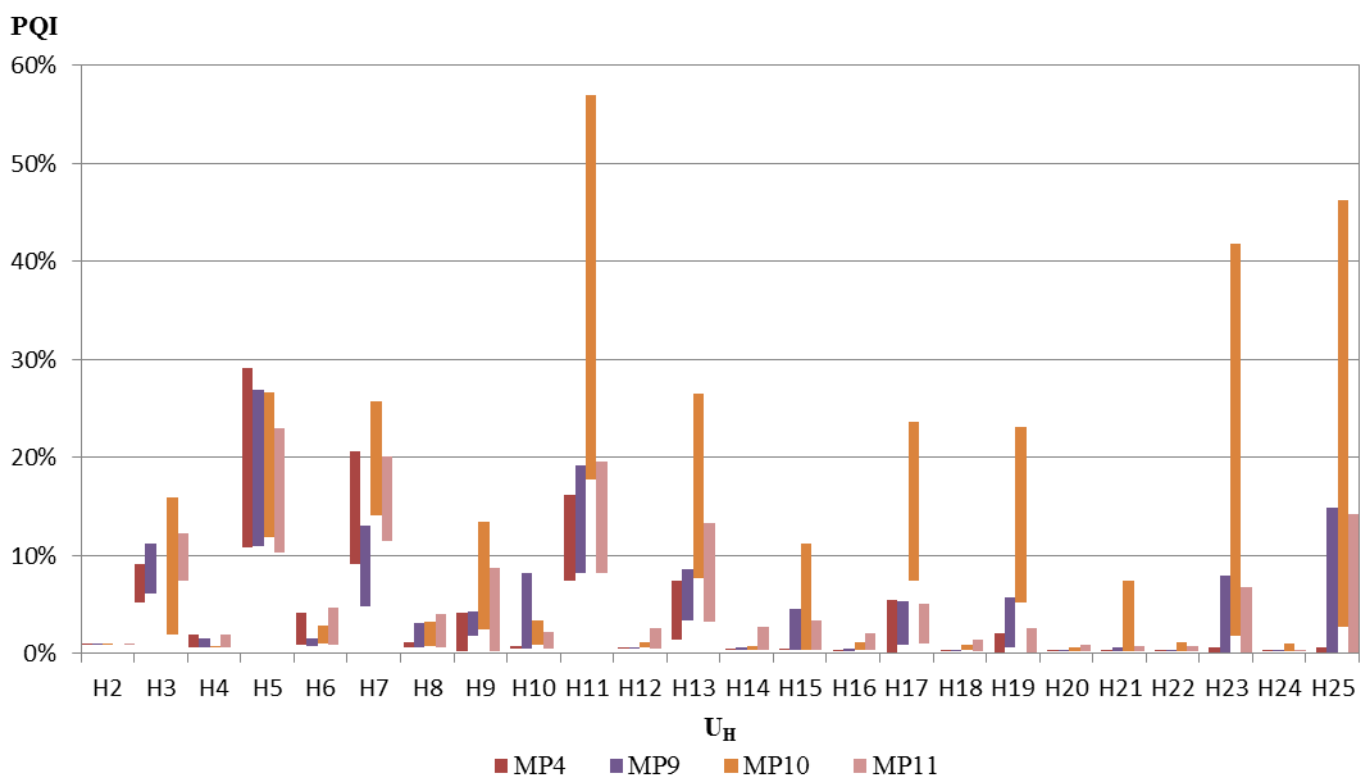
Joonis 3.11 Mõõtepunkti MP10 aktiivvõimsuse ja THD_U hajvusdiagramm



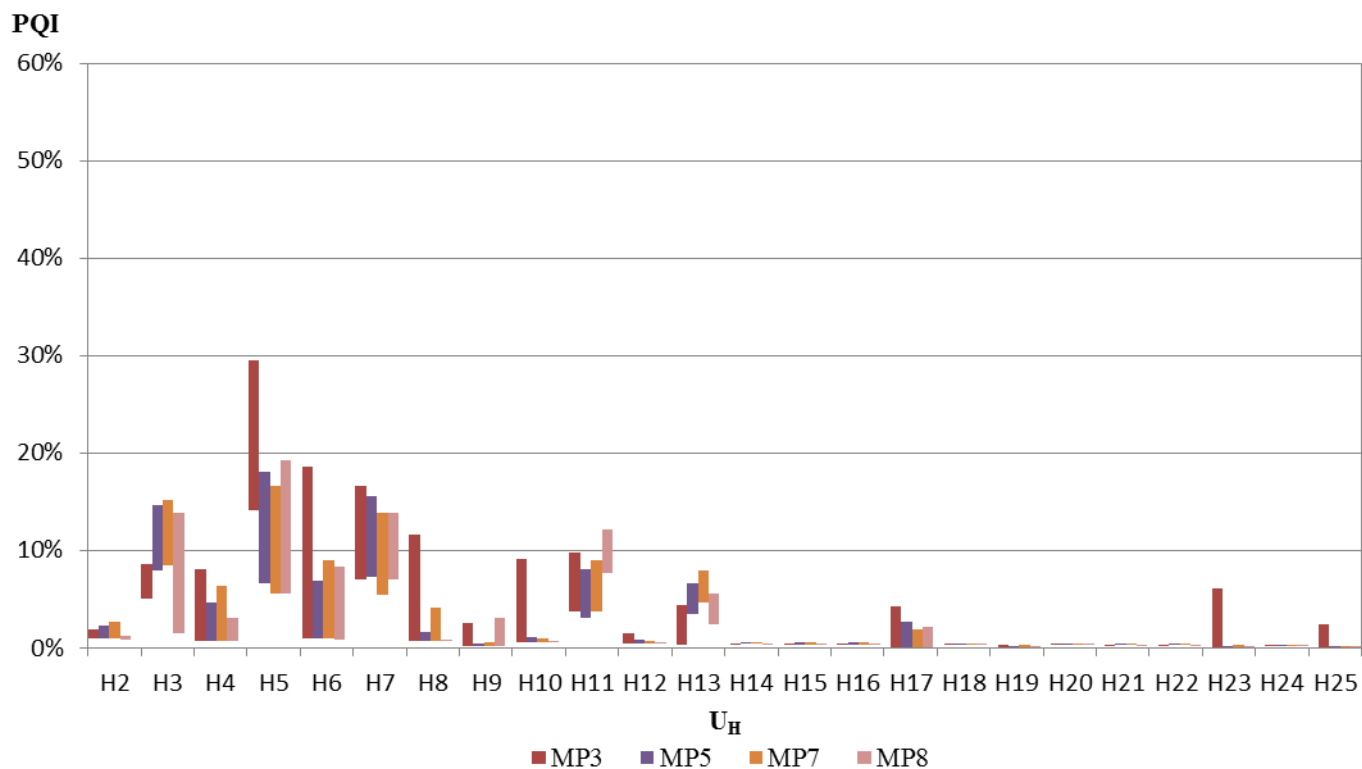
Joonis 3.12 Mõõtepunkti MP6 aktiivvõimsuse ja THD_U hajvusdiagramm

Üksikute harmoonikute mõõtmistulemustest on näha, et ühegi mõõtmispunkti puhul ei ületanud harmoonikute tasemed lubatud piirväärtusi. *PQI* maksimaalne väärtus on 57,0% MP10 11. harmooniku puhul. Graafikutelt on näha, et *PQI* väärtused võivad kõikuda väga suurel määral ja sõltuvalt mõõtepunktist võivad domineerida kas madalamad (kuni 13. harmoonik) või kõrgemad harmoonikud.

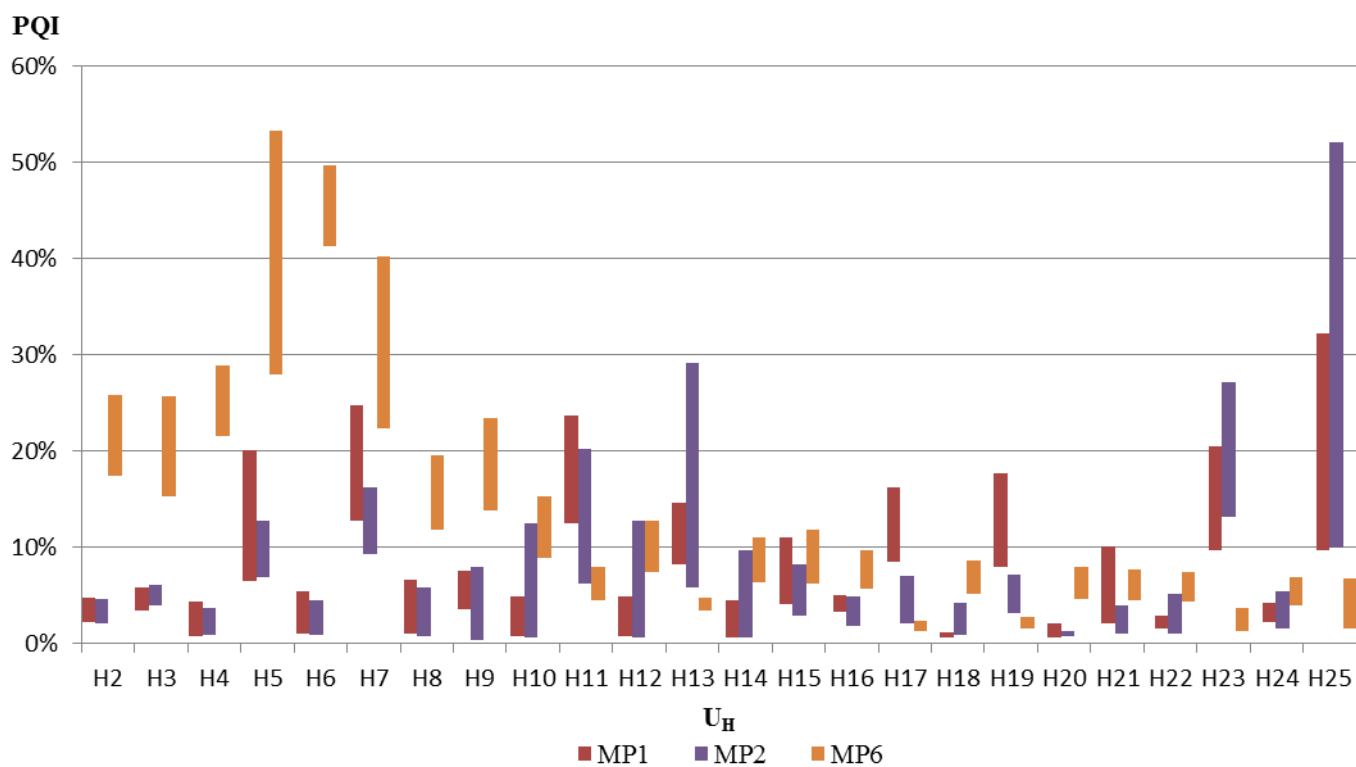
Mõõtmistulemustest on näha, et üldiselt domineerivad paaritud harmoonikud ning paari harmoonikute tase on oluliselt madalam – keskmiselt on *PQI* väärtus paaritute harmoonikute puhul 8,0% ja paaris harmoonikute puhul 2,8%. Kõige kõrgema keskmise *PQI* väärtusega harmoonikud on 5., 7. ja 11. väärtustega vastavalt 18,9%, 15,1% ja 13%. Ülejäänud harmoonikute puhul jäävad *PQI* keskmised väärtused alla 10% piiri.



Joonis 3.13 Pinge harmoonikute mõõtetulemused sünkroongeneraatoriga mõõtepunktides



Joonis 3.14 Pingeharmonikute mõõtetulemused asünkroongeneraatoriga mõõtepunktides



Joonis 3.15 Pingeharmonikute mõõtetulemused muude mõõtepunktides

3.7 Pinge sündmused

Pinge sündmuste mõõtmistulemused on esitatud nii tabelina kui graafikutena. Pingelohkude ja –muhkude koondstatistika kõigi mõõtepunktide kohta kogu mõõteperioodil on esitatud EVS-EN 50160 standardis soovitatud statistiliste tabelitena (tabel 3.5 ja tabel 3.6). Lisaks on graafikutena esitatud pinge sündmuste statistika, kus eraldi on välja toodud elektrijaama töötamise ja mitte töötamise ajal toimunud sündmused. Graafikud on grupeeritud generaatori tehnoloogia alusel: asünkroongeneraatoriga mõõtepunktid (joonis 3.16), sünkroongeneraatoriga mõõtepunktid (joonis 3.17) ja muud mõõtepunktid (joonis 3.18).

Eraldi on välja toodud mõõtepunktide MP5 ja MP11 pingesündmuste graafikud (joonis 3.19 ja joonis 3.20). Vastavates mõõtepunktides oli pinge sündmuste arv kõige suurem, vastavalt 574 ja 310 sündmust, ning eraldi graafikud suurendavad andmete ülevaatlikkust. Graafikutele on lisaks sündmustele toodud *ITIC* kõver musta joonena – kahe musta joone vahelisele alale jäävad sündmused ei tekita infotehnoloogia seadmete töötamises tõrkeid, väljapoole jäävad sündmused võivad kaasa tuua seadme riknemise või tõrke.

Koondstatistika mõõtetulemustest on näha, et mõõtmisperioodi jooksul ei esinenud ühtegi pingemuhku, mille parameetrid jäävad standardi ette antud piiridesse. Mõõtmisperioodil esines transient-liigpingeid, kuid sündmuste kestused jäävad alla 10 ms ja seega ei kajastu tabelis. Mõõtmistulemustest on näha, et kogu mõõtmisperioodi vältel toimus 1563 pingelohku, ehk keskmiselt ühes nädalas ühe mõõtepunkti kohta 3,9 sündmust.

ITIC graafiku piirväärtuste alusel on pingelohkude koguarvust 1211 sündmuse puhul tegemist selliste sündmustega, mille puhul infotehnoloogilised seadmed peaksid jätkama töötamist ilma tõrgeteta. Kogu sündmuste arvust moodustab see 77,5%.

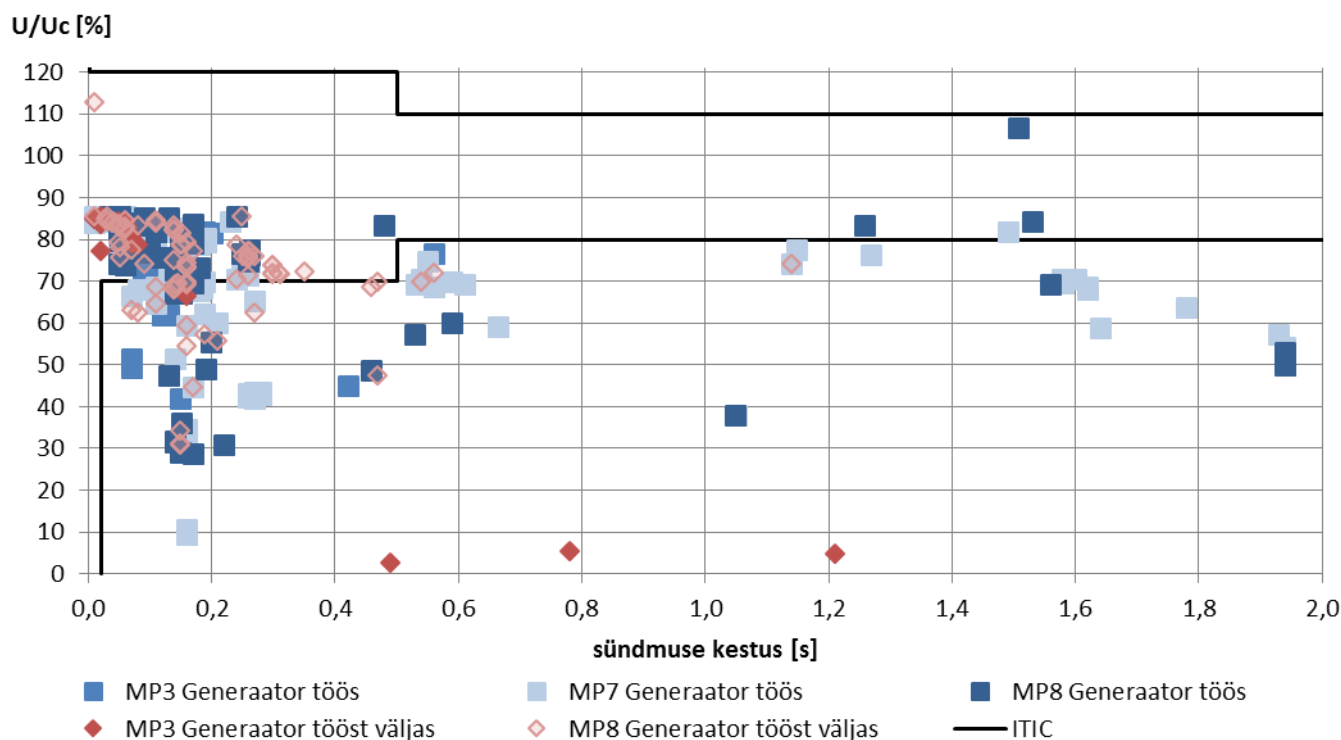
Tabel 3.5 Pingelohkude jaotus kõigis mõõtepunktides kogu mõõtmisperioodil

Jääkpinge u [%]	Kestus t [ms]				
	$10 \leq t \leq 200$	$200 < t \leq 500$	$500 < t \leq 1000$	$1000 < t \leq 5000$	$5000 < t \leq 60\ 000$
$90 > u \geq 80$	765	151	62	0	0
$80 > u \geq 70$	168	65	15	9	0
$70 > u \geq 40$	142	60	15	22	2
$40 > u \geq 5$	22	11	2	3	0
$5 > u$	2	1	1	25	20

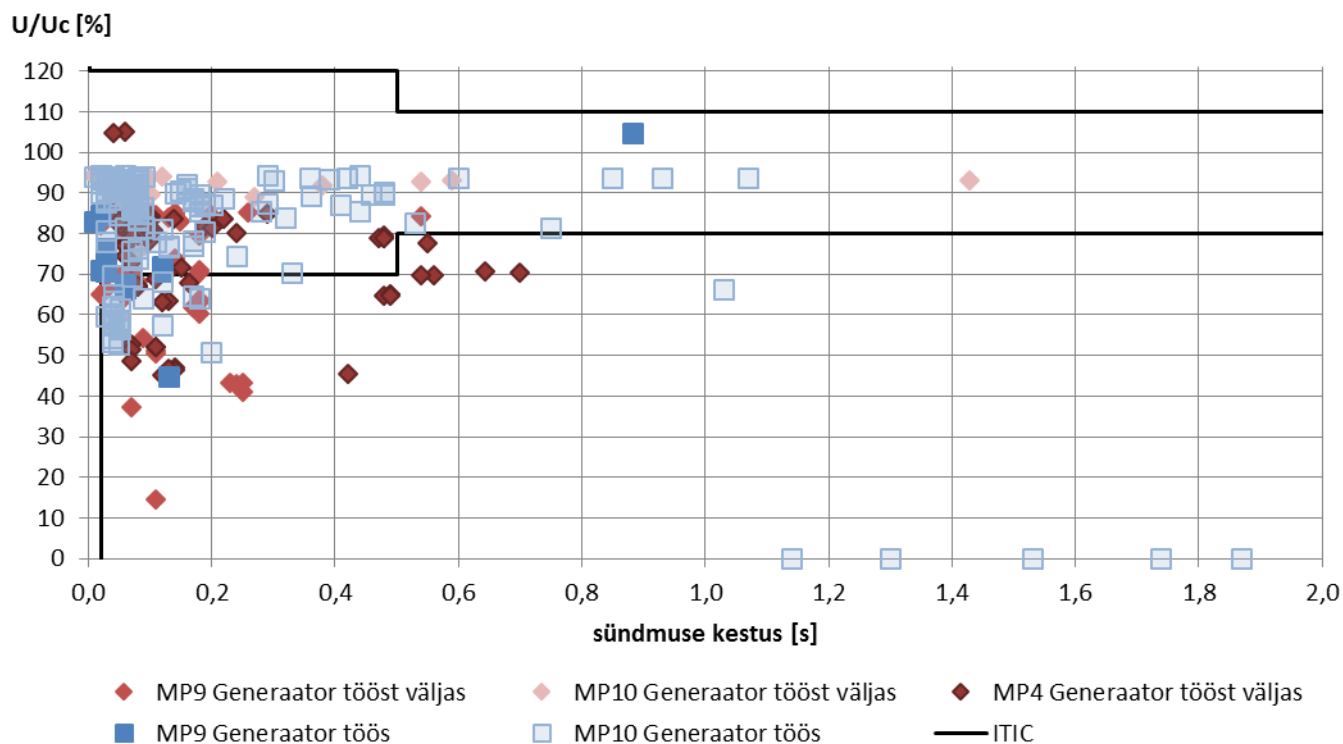
Tabel 3.6 Pingemuhkude jaotus kõigis mõõtepunktides kogu mõõteperioodil

Muhu pinge u [%]	Kestus t [ms]		
	$10 \leq t \leq 500$	$500 < t \leq 5000$	$5000 < t \leq 60\ 000$
$u \geq 120$	0	0	0
$120 > u \geq 110$	0	0	0

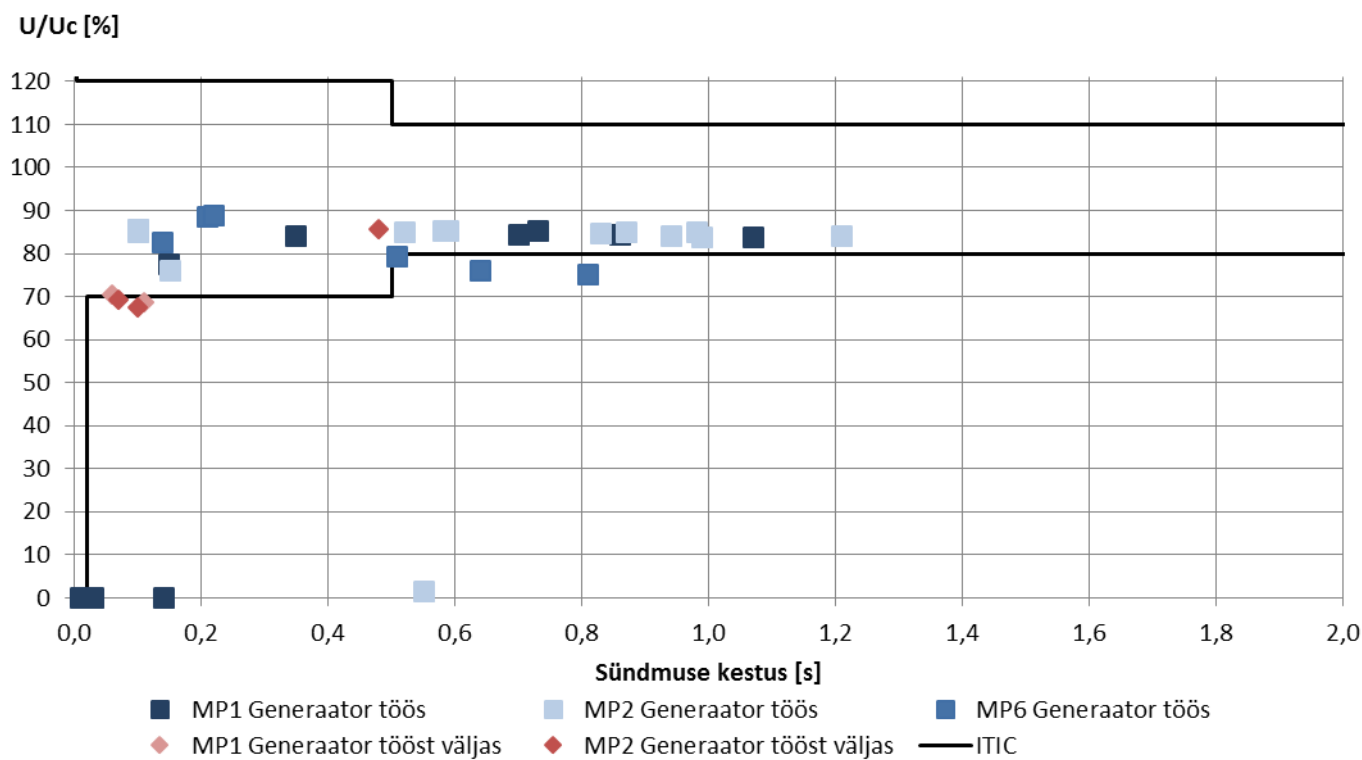
Pinge sündmuste graafikutelt on näha, et pinge sündmuste arvud erinevate mõõtmispunktide puhul varieeruvad suurel määral. Kõige vähem sündmusi nädala kohta esines mõõtepunktis MP6, kus kokku registreeriti 13 sündmust 44 nädala jooksul ehk keskmisel 0,3 sündmust nädalas. Kõige suurema absoluutse ja suhtelise sündmuste arvuga on eraldi graafikutel välja toodud mõõtepunktid MP5 ja MP11. Mõõtepunktis MP5 registreeriti kogu mõõtmisperioodil kokku 556 pingelohku, ehk keskmiselt 12,6 sündmust nädalas. Nendest sündmustest olid *ITIC* graafiku alusel 486 sellised, mille puhul infotehnoloogilised seadmed jätkavad töötamist ilma tõrgeteta, ehk kogu sündmustest 87,4% ei tekita infotehnoloogia seadmete töötamises tõrkeid. Mõõtepunktis MP11 registreeriti samal perioodil 291 sündmust ehk keskmiselt 6,6 sündmust nädalas. Mõõtepunkt 11 sündmustest 85,9% puhul ei teki infotehnoloogia seadmete töös tõrkeid.



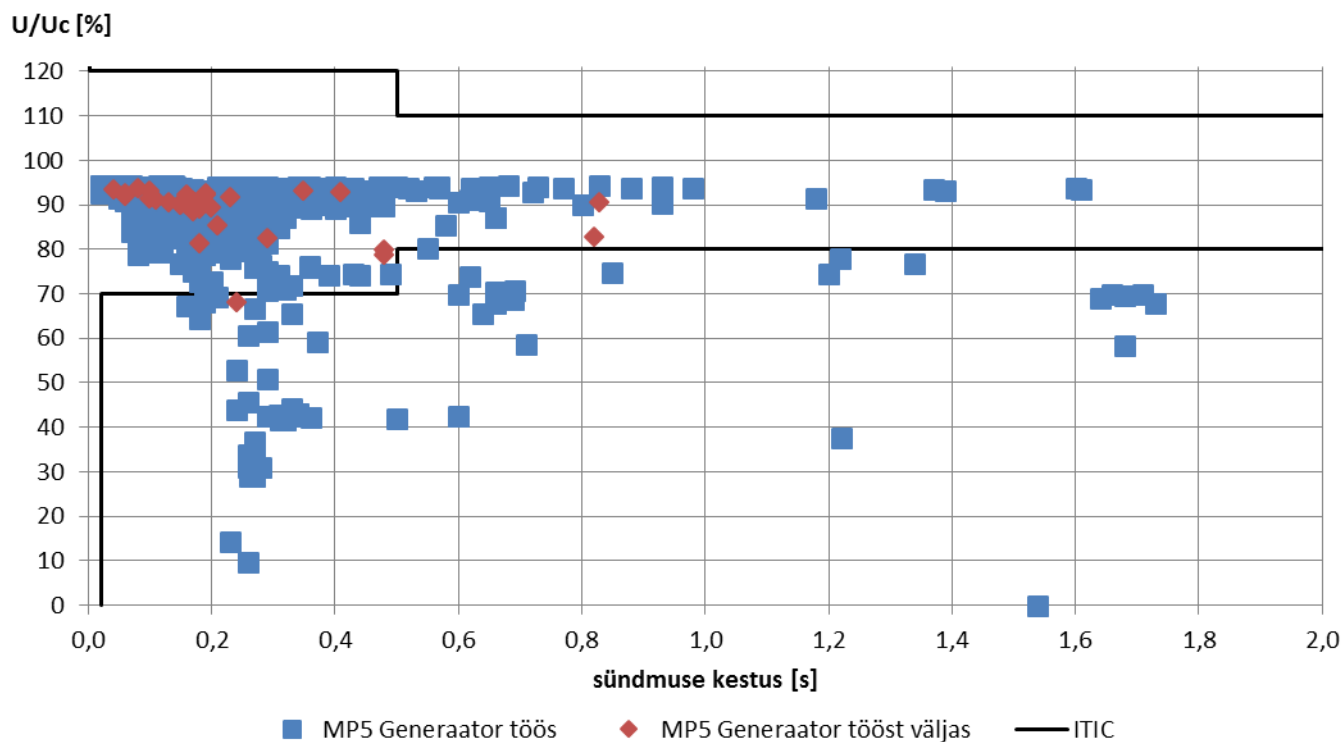
Joonis 3.16 Pinge sündmused asünkroongeneraatoriga mõõtepunktides (MP3, MP7 ja MP8)



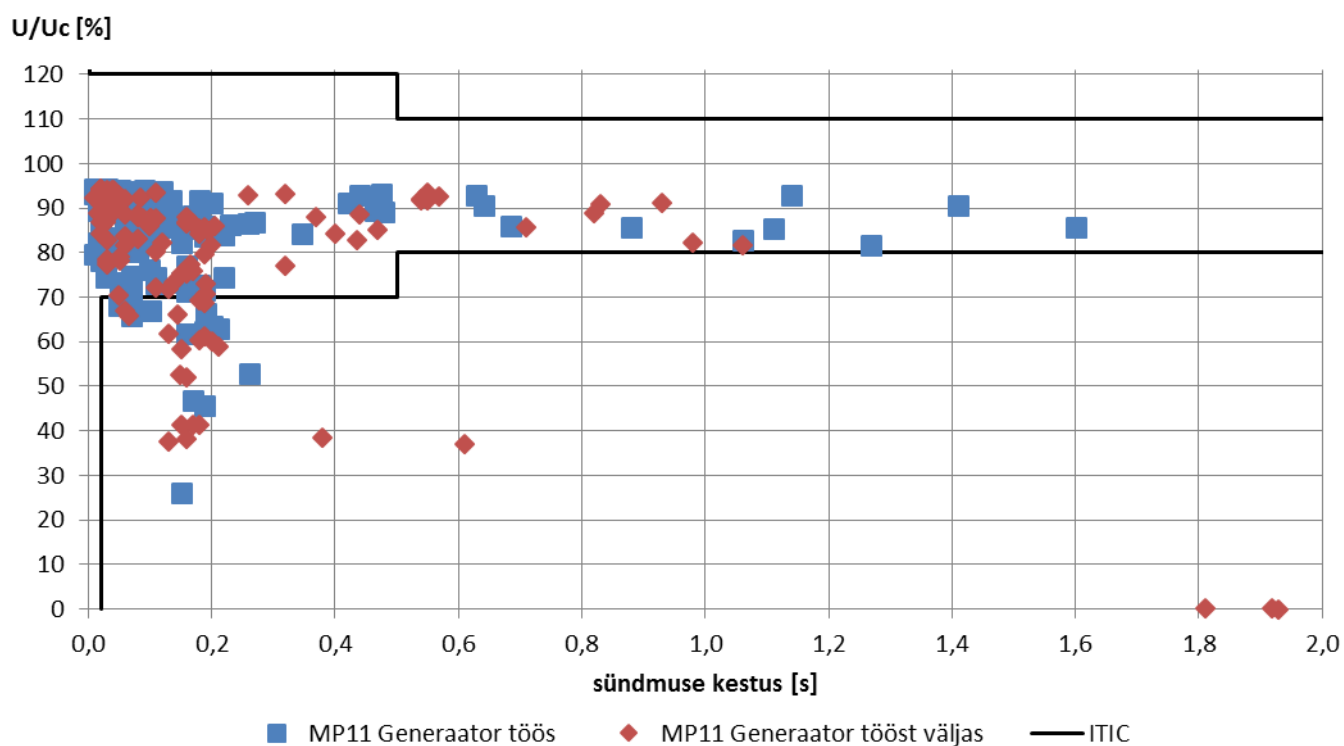
Joonis 3.17 Pinge sündmused sünkroongeneraatoriga mõõtepunktides (MP4, MP9 ja MP10)



Joonis 3.18 Pinge sündmused muudes mõõtepunktides (MP1, MP2 ja MP6)



Joonis 3.19 Pinge sündmused MP5 mõõtepunktis



Joonis 3.20 Pinge sündmused MP11 mõõtepunktis

3.8 Kokkuvõte

Mõõtetulemuste summaarselt esitamiseks analüüsiti kõik parameetreid, mille puhul varasemalt toodi välja nädalaste mõõtmiste tulemused: toitepinge aeglased muutused piirväärtus 1 alusel (joonis 3.1 – joonis 3.3), värelus (joonis 3.4 ja joonis 3.5), asümmeetria (joonis 3.9) ja THD_U (joonis 3.10). Summaarne PQI on esitatud kõigi mõõtmispunktide jaoks iga nädala kohta tabeli kujul (tabel 3.7) ning tulemuste ülevaatlikkuse suurendamiseks on kasutatud värviskaalat roheline, kollane ja punasega. PQI väärtuse puhul kuni 5% on tabeli ruut värvitud roheliseks, PQI väärtuse 40% puhul kollaseks ja väärtuse puhul 80% või rohkem punaseks. Summaarse PQI väärtuse arvutamisel lähtuti peatükis 3.1 käsitletud põhimõtetest:

- juhul kui kõik PQI väärtused on väiksemad kui 1, kasutatakse maksimaalset PQI väärtust;
- juhul kui üks või mitu PQI väärtust on suuremad kui 1, summeeritakse parameetrite üle 1 olevad jäägid ja liidetakse need 1-le.

Mõõtmistulemustest on näha, et kokku kuue nädala puhul on mõne mõõtepunkti puhul ületatud lubatud piirväärtusi. Samuti on mõõtetulemust näha, et kõigi ületamiste puhul oli tegemist ainult ühe parameetriga, värelustugevusega. Kõigist nädalastest summaarse PQI väärtusest on 75% või kõrgemad 41 ehk 10,7% kõigist nädalatest. Kõige kõrgema keskmise PQI väärtusega on mõõtepunkt MP5 ja kõige madalam keskmise väärtusega on mõõtepunktid MP3 ja MP4, vastavalt 66% ja 30% mõlemad. Mõõtmistulemustest on näha, et kõige rohkem nädalaid, kus summaarne PQI on alla 30% on mõõtepunktis MP4, MP1, vastavalt 30 nädalat ja 29 nädalat.

Tabel 3.7 Summaarne PQI

Nädal	MP1	MP2	MP3	MP4	MP5	MP6	MP7	MP8	MP9	MP10	MP11
24				30%	99%	53%	54%	51%	35%	34%	27%
25				38%	50%	53%	42%	42%	66%	28%	33%
26				79%	85%	56%	85%	76%	99%	49%	78%
27				30%	58%	69%	54%	59%	76%	36%	76%
28				53%	51%	74%	43%	42%	42%	37%	39%
29				42%	70%	58%	73%	86%	64%	42%	36%
30				23%	45%	55%	56%	50%	37%	33%	24%
31			26%	24%	86%	53%	92%	73%	38%	49%	37%
32			78%	75%	143%	58%	78%	59%	97%	39%	73%
33			69%	51%	144%	54%	90%	80%	67%	56%	79%
34			37%	37%	46%	54%		56%	98%	31%	72%
35			30%	24%	39%	54%		31%	34%	28%	25%
36			29%	29%	52%	51%		56%	64%	42%	45%
37			20%	25%	63%	54%		34%	32%	25%	21%
38			23%	24%	88%	92%		72%	33%	21%	21%
39			22%	28%	50%	64%		63%	36%	25%	25%
40			27%	27%	50%	65%	38%	42%	34%	24%	21%
41			24%	24%	60%	56%	53%	29%	37%	23%	20%
42			26%	23%	52%	62%	48%	30%	33%	29%	21%
43			24%	23%	51%	55%	44%	43%	32%	23%	20%
44			41%	34%	97%	58%	96%	116%	81%	32%	29%
45			27%	26%	59%	55%	53%	41%	90%	23%	22%
46			28%	33%	59%	55%	55%	41%	150%	25%	34%
47			35%	23%	55%	52%	49%	34%	150%	24%	33%
48			25%	23%	56%	52%	50%	37%	32%	26%	27%
49			47%	48%	135%	64%	54%	96%	48%	47%	51%
50			55%	54%	58%	63%	61%	66%	79%	26%	32%
51			23%	29%	72%	64%	65%	34%	35%	28%	22%
52			23%	26%	37%	57%	38%	47%	31%	30%	21%
53			24%	21%	30%	53%	31%	28%	30%	22%	19%
1			22%	18%	35%	51%	31%	27%	29%	20%	20%
2			27%	23%	46%	53%	44%	29%	30%	19%	23%
3			45%	25%	88%	58%	76%	32%	30%	22%	25%
4			23%	26%	56%	78%	52%	29%	28%	30%	23%
5			21%	22%	68%	64%	63%	44%	28%	25%	22%
6	32%	50%	22%	20%	76%	56%	70%	31%	28%	30%	22%
7	32%	58%	22%	20%	38%	55%	34%	30%	31%	24%	24%
8	32%	55%	23%	20%	68%	54%	62%	29%	28%	24%	20%
9	35%	27%	22%	20%	39%	61%	36%	29%	29%	28%	20%
10	35%	38%	22%	19%	67%	54%	61%	29%	31%	28%	21%
11	29%	38%	23%	21%	71%	57%	68%	36%	33%	30%	20%
12	31%	29%	23%	21%	76%	51%	78%	46%	30%	27%	23%
13	31%	26%	22%	25%	76%	55%	70%	44%	29%	23%	35%
14	30%	54%	21%	22%	57%	59%	47%	46%	29%	24%	26%
Keskmine	32%	42%	30%	30%	66%	58%	58%	48%	50%	30%	32%

4 Järeldused

Mõõtetulemuste analüüsi teostamisel lähtutakse töö sissejuhatuses püstitatud eesmärkidest ja töö järeldused tuuakse sama jaotuse alusel:

- väiketootjate mõju pingetasemele liitumispunktis;
- väiketootja mõju pingeharmonoonikute ja väreelse tasemele liitumispunktis;
- väiketootjate mõju pingelohkude sügavusele ja kestusele;
- väiketootjate pikaajalised mõjud liitumispunkti pingekvaliteedile ja hooajalised muutused.

4.1 Mõju pingetasemel liitumispunktis

Väiketootjate võimalikust mõjust toitepinge tasemele anti ülevaade peatükis 2.2.3. Mõju võib olla nii positiivne kui negatiivne. Näiteks võimsusvoo suuna muutmine ja sellest tingitud probleemid automaatsete pingereguleerimisega, liinide pingelangude vähenemine ja tulenevalt pingetaseme tõusmine üle lubatud piiride või ka lubatud piiridesse, pingetaseme stabiliseerimine sünkroongeneraatoritega reaktiivvõimsuse tootmise ja tarbimisega.

Mõõtetulemustest on näha, et üldiselt on toitepinge ettenähtud tasemele lähedal ja aeglasel muutused on väikesed. *PQI* keskmine tase on 17,7%. Mõõtetulemusest on näha ka asünkroongeneraatoriga mõõtepunktide puhul *PQI* taseme suurem variatsioon võrreldes ülejäänud mõõtepunktidega. Sünkroongeneraatoriga mõõtepunktides jäävad maksimaalsed *PQI* väärtused nädala kohta alla 34%, asünkroongeneraatoriga mõõtepunktides on maksimaalsed väärtused vahemikus 45% kuni 67%.

Asünkroongeneraatoriga mõõtepunktide toitepinge suurem variatsioon võib olla tingitud asünkroongeneraatori töötamiseks vajaliku reaktiivenergia lokaalsest kompenseerimisest. Kuna Elektrilevi OÜ jaotusvõrguga liituvatel tootjatel on keelatud reaktiivenergiat toota ja tarbida, siis peavad asünkroongeneraatorit kasutavad elektrijaamad reaktiivenergiat kohapeal kompenseerima. Sünkroongeneraatoriga elektrijaamades see vajadus puudub, kuna sünkroongeneraatori saab kasutada selliselt, et reaktiivenergiat ei tarbita ega toodeta. Lokaalne reaktiivenergia kompenseerimine ei pruugi olla piisava täpsusega ning tekkivad variatsioonid võivad mõjutada lokaalset pingetaset ja tekitada pingetaseme täiendavat kõikumist.

Käesolevas töös toodud mõõtetulemuste alusel pole võimalik lõplikult hinnata, kas asünkroongeneraatoriga mõõtepunktide toitepinge suurem variatsioon on tingitud lokaalse võrgu eripäradest või vastavatest elektrijaamadest. Vajalik oleks täiendavalt analüüsida võrgu

konfiguratsiooni, mõõta võrgu normaalseid reaktiivenergiavoogusid ja asünkroongeneraatori töötamisest tingitud muutusi nendes. Võrgu toitepinge taseme ja reaktiivenergiavoogude ning elektriijaama tootmise ja reaktiivenergia kompenseerimise täpsuse vahelise korrelatsiooni või selle puudumise alusel saaks hinnata elektriijaama mõju täpsemalt.

Üldiselt on antud mõõtetulemused kooskõlas varasemate uurimistulemustega. Hajatootmisega seotud toitepinge probleemid avalduvad pigem nõrgas võrgus ja suure summaarse võimsusega hajatootmise korral. Antud töös analüüsitud väiketootjad asuvad kõik keskpinge võrgus (v.a. mõõtepunkt MP6), kus pingereguleerimise seadmed asuvad lähedal ja võrk on suhteliselt tugev. Mõõtepunkti MP6 korral on aga tegemist sünkroonselt ühendamata väikse võrguga, kus pingereguleerimine toimubki analüüsitud diisलगeneraatorite abil. Mõõtmistulemuste alusel mõõtepunktiga MP6 seotud elektriijaamas pinge reguleerimine piisavalt kiire ja toitepinge tase püsib lubatud piiride sees.

Mõõtetulemuste alusel võib järeldada, et väiketootjad, mis ei kasuta asünkroongeneraatoreid, pole avaldanud negatiivset mõju toitepinge aeglastele muutustele, mis püsivad suhteliselt madalal tasemel. Asünkroongeneraatorite võimalik negatiivne mõju suurema toitepinge variatsiooni näol vajab täiendavat uurimist. Samuti ei saa teha järeldusi väiketootjate võimalikust positiivsest mõjust, kuna puuduvad võrreldavad mõõtetulemused väiketootjate liitumisele eelnevast perioodist.

4.2 Mõju pingeharmonikute ja väreluse tasemel liitumispunktis

Väiketootjate võimalik mõju pingeharmonikute tasemele on käsitletud peatükis 2.2.9. Invertereid kasutavad väiketootjad võivad tekitada tõsiseid probleeme pingeharmonikutega, kui kasutatakse vanemaid tehnoloogilisi lahendusi. Tänapäevaste *IGBT*-transistoritega inverterite puhul on madalate harmoonikute probleem vähenenud, kuid uurimistöodes on märgitud 35. ja kõrgemate harmoonikute tasemete tõus. Pöörlevad generaatorid võivad tekitada 3-ndat, 5-ndat ja 7-ndat harmoonikut sõltuvalt tehnoloogilisest lahendusest. Tänapäevastel pöörlevatel masinatel üritatakse paaritud harmoonikuid vähendada ning selle tulemusena võivad domineerida hoopis paaris- ja vaeharmonikud.

Mõõtmistulemustest on näha, et kõigi mõõtepunktide üldine THD_U tase on suhteliselt madal – keskmine PQI on 17,0%. Mõõtepunktis MP6 on THD_U tase selgelt kõrgem võrreldes ülejäänud mõõtepunktidega, keskmine PQI väärtus on 35,0% ja maksimaalne 46,2%. Üksikute harmoonikute mõõtetulemustest on näha, et mõõtepunktis MP6 on domineerivad madalamad harmoonikud, eriti 5. ja 7. harmoonik. Mõõtepunkti MP6 keskmisest kõrgem

harmoonikute tase võib olla tingitud sellest, et tegemist on väikese sünkroonselt ühendamata võrguga. Kuna võrgus puuduvad suuremad tööstustarbijad ja sümmeetrilised kolmefaasilised seadmed on ühefaasiliste mitte-lineaarsete takistusega tarvitite osakaal suhteliselt suur, mis tekitab kõrge harmoonikute taseme.

Üksikute harmoonikute mõõtetulemusest on näha, et erinevate tehnoloogiate ja mõõtepunktide puhul on erinevad harmoonikud domineerivad. Mõõtepunktides MP1 ja MP2, kus kasutatakse *IGBT*-transistoreid kasutavaid inverterid, on suurima *PQI* väärtusega kõrgemad paaritud harmoonikud, näiteks 13., 23. ja 25. harmoonik. Mõõtetulemused ühtivad varasemate uurimistöödega, kus on välja toodud tänapäevaste inverterite puhul kõrgemate harmoonikute suurenemine. Kõrgemate harmoonikute suur osakaal on mõõteandmete alusel ka mõõtepunktis MP10, kus kasutatakse sünkroongeneraatorit. Üldiselt on nii sünkroon- kui asünkroongeneraatoriga mõõtepunktides domineeriv 5. harmoonik.

Väiketootjate võimalikust mõjust kiiretele pingemuutustele ja väreleusele anti ülevaade alapeatükis 2.2.5. Väiketootjatest tingitud kiirete pingemuutuste arvu suurenemine ja väreleustugevuse tõusmine võib olla tingitud näiteks tootmisseadme väljundvõimsuse muutumisest, eriti elektrituulikute puhul, või koordineeritusest automaatse pingeregulaatoriga. Väiketootja liitumine võib omada ka positiivset mõju, suurendades võrgu lühisvõimsust ja seeläbi võrgu võimet väreleust vähendada.

Mõõtetulemustest on näha, et väreleuse tase ületab mõnedel nädalatel lubatud piirväärtuse ja ka üldine tase on suhteliselt kõrge – keskmine *PQI* väärtus on 43,6%. Mõõtepunktide MP5, MP8 ja MP9 puhul ületab väreleus lubatud piirväärtuse nädalaste mõõtmiste puhul vähemalt ühe nädala jooksul. Tehnoloogiliselt on tegemist erinevat tüüpi elektrijaamadega: mõõtepunkti MP5 puhul on tegemist koostootmisjaamaga, kus kasutatakse asünkroongeneraatorit, mõõtepunkti MP8 puhul on tegemist tuulepargiga, kus kasutatakse asünkroongeneraatorit, ja mõõtepunkti MP9 puhul on tegemist koostootmisjaamaga, kus kasutatakse sünkroongeneraatorit. Analoogilise tehnoloogiaga muudes mõõtepunktides väreleuse piirväärtuse ületamist ei registreeritud. See näitab, et väreleuse kõrge tase pole seotud konkreetse tehnoloogilise lahendusega, vaid sõltub muudest parameetritest.

Samade mõõtepunktide aktiivvõimsuse ja väreleuse hajuvusdiagrammidelt on näha, et korrelatsioon elektrijaama tootmise ja väreleuse taseme vahel puudub. Sellest järeldub, et väreleuse väga kõrge tase pole seotud otseselt elektrijaama töötamisega ning eeldatavalt on tingitud muudest sündmustest võrgus. Mõõtepunkti MP8 puhul on hajuvusdiagrammilt nähtav väreleuse minimaalse väärtuse kasv elektrijaama aktiivvõimsuse suurenemisel. Sellest võib

järeldada, et elektriyaam mõjutab väreluse taset, kuid ka maksimaalse aktiivvõimsuse juures püsib *PQI* väärtus 20-40% vahel.

4.3 Mõju pingelohkude sügavusele ja kestusele

Väiketootjad võimalik mõju pingelohkudele käsitleti alapeatükis 2.2.11. Mõju pingelohkudele võib olla nii positiivne kui negatiivne ja sõltub üldiselt kasutatava generaatori tüübist ja juhtimisseadmete konfiguratsioonist. Sünkroongeneraatorid üldjuhul mõjuvad positiivselt, suurendades jääkpinget ja vähendades sündmuse kestust. Induktsioongeneraatori mõju on pigem negatiivne, kuna seadme töötamiseks tarbitakse reaktiivenergiat ning pingelohu tekkimisel reaktiivenergia tarbimine võrgust suureneb, seeläbi suurendades lohu sügavust.

Mõõtetulemuste alusel on näha, et mõõtepunktides, kus kasutatakse elektrienergia tootmiseks invertereid, ei esine pingelohkude parameetrite vahel erinevusi elektriyaama töötamise ja mitte töötamise korral. Asünkroongeneraatoriga mõõtepunktides on mõõtetulemustest näha, et elektriyaama töötamise korral esineb mõnevõrra rohkem sündmusi kõrge jääkpingega ja kestusega üks kuni kaks sekundit. Selliste sündmuste esinemine võib olla tingitud asünkroongeneraatorite töötamiseks vajaliku reaktiivenergia tarbimisest. Pingelohu tekkimisel lokaalselt kompenseeritava reaktiivenergia tase langeb ning võrgust tarbitava reaktiivenergia tase tõuseb, mis pikendab võrgu toitepinge taastumist.

Sünkroongeneraatorit kasutavate elektriyaamade mõõtepunktide mõõtetulemuste üldiselt graafikult (joonis 3.17) on näha teatud erinevust elektriyaama töötamise ja mitte töötamise vahel. Mõõtmiste jooksul on generaatori töötamise ajal registreeritud vähem sündmusi, mis langevad *ITIC* graafiku alumise joone alla ehk põhjustavad infotehnoloogia seadmetele tõrkeid. Samas mõõtepunkti MP5 mõõtetulemustes (joonis 3.19) analoogilist erinevust ei esine. Arvestades mõõtepunkti MP5 sündmuste suuremat hulka võib järeldada, et ka sünkroongeneraatori kasutamine ei oma pingelohkude sügavusele ja kestusel nähtavad mõju.

Mõõtetulemuste järeldused langevad kokku varasemate uurimistöödega. Asünkroongeneraatorite mõju on üldjuhul negatiivne, mõjutades nii pingelohu sügavust kui kestust, mida kinnitavad ka antud mõõtetulemused. Sünkroongeneraatorite positiivse mõju põhjuseks on varasemates uurimistöödes toodud võime reaktiivenergiat toota ja tarbida. Elektrilevi OÜ jaotusvõrgus pole väiketootjatel lubatud võrgust reaktiivenergiat tarbida ega võrku reaktiivenergiat toota, seega väheneb sünkroongeneraatorite võimalik positiivne mõju ning ka mõõtmistulemused kinnitavad seda.

Antud mõõtmiste puhul on väiketootjate mõju hindamisel lähtutud mõõtetulemuste statistilisest jaotusest ning sündmusi eraldi analüüsitud pole. Mõõtmiste jooksul registreeritu kokku 1563 pinge sündmust. Mõõtmistulemuste kinnitamiseks on vajalik täiendavate statistiliste andmete kogumine, et tagada järelduste usaldusväärsus.

4.4 Pikaajalised mõjud liitumispunkti pingekvaliteedile ja hooajalised muutused

Väiketootjate pikaajalist mõju ja pingekvaliteedi hooajalisi muutusi saab hinnata erinevate parameetrite nädalaste mõõtetulemuste graafikute alusel (joonis 3.1 - joonis 3.5, joonis 3.9 ja joonis 3.10) ja summaarse *PQI* tabeli alusel (tabel 3.7).

Summaarsetest mõõtmistulemustest on näha, et üldiselt on pingekvaliteet hea ning *PQI* keskmine väärtus on 44%. Kogu mõõtmiste jooksul esines 6 nädalat, kus mõnes mõõtepunktis ületati lubatud piirväärtusi, ehk kogu mõõtmistest moodustab see kõigest 1,5%. Samuti on mõõtmistulemustest näha, et *PQI* kõrgemate väärtuste esinemine on pigem juhuslik ja lokaalne ning hooajaliseid erinevusi või kogu võrgu pingekvaliteeti tugevalt mõjutavaid sündmusi ei esine. Ka erinevate parameetrite nädalaste mõõtmistulemuste graafikutelt on näha, et aasta jooksul ei esine selgeid erinevusi pingekvaliteedi tasemes. Esineb üksikuid kõrvalekaldeid, mis on juhuslikud ja lokaalse iseloomuga.

Mõõtmistulemustest on näha, et mõõtmisperioodi alguse ja lõpu võrdlusel on pingekvaliteedi keskmine tase mõnevõrra paranenud. Mõõtmisperioodi esimese 26 nädala jooksul on keskmine *PQI* väärtus 50% ning maksimaalne 150%. Mõõtmisperioodi viimase 18 nädala jooksul on keskmine *PQI* väärtus 38% ning maksimaalne 88%. Selle alusel võib järeldada, et väiketootjad pole avaldanud pikaajalist negatiivset mõju pingekvaliteedile. Mõõtmistulemuste alusel aga ei saa hinnata, kas pingekvaliteedi mõningane paranemine on seotud väiketootjatega või pigem juhuslik.

4.5 Kokkuvõte

Mõõtmistulemuste alusel on üldine pingekvaliteedi tase mõõtepunktides hea kõigi EN 50160 standardis reguleeritud parameetrite puhul, välja arvatud värelius (tabel 4.1). Värelyuse keskmine *PQI* väärtus ületab enamik teisi parameetreid kaks või rohkem korda ning värelyuse puhul esines piirväärtuste ületamist. Väiketootjate mõju värelyuse tasemel on aga väike ning värelyuse kõrge tase on tingitud muudest nähtustest võrgus. Ülejäänud parameetrite puhul on

keskmine *PQI* väärtus 13% ning ka maksimaalne *PQI* väärtus jääb kõigi parameetrite puhul alla 70%.

Tabel 4.1 Mõõtetulemuste kokkuvõte

Parameeter	Piirväärtus	Keskmine <i>PQI</i>	Maksimaalne <i>PQI</i>
Sagedus	1	4,5% (0,5% ¹)	
Sagedus	2	2,6% (1,0% ¹)	
Toitepinge aeglased muutused	1	18,5%	66,7%
Toitepinge aeglased muutused	2	20,1%	35,5%
Värelus		43,6%	150,0%
Asümmeetria		22,2%	50,5%
<i>THD_U</i>		17,4%	46,2%
Harmonikud		5,4%	57,0%

¹ Mõõtepunkti MP6 väärtused, mis on arvatud sünkroonselt ühendamata võrgu jaoks

Mõõtmistulemuste analüüsi tulemusena võib öelda, et kokkuvõttes pole käesolevas töös käsitletud väiketootjad pingekvaliteedile selget negatiivset mõju avaldanud. Antud lõputöö tulemused kehtivad praegusele hetkele ning käsitlevad mõõtmistulemuste alusel võrgus juba toimunud olukorda. Vastavaid mõõtmistulemusi ei saa üldistada tulevikule ning antud lõputöö järelduste alusel ei saa teha ennustusi väiketootjate võimaliku mõju kohta jaotusvõrkude pingekvaliteedile tulevikus hajatootmise mahu suurenemisel või võrgu konfiguratsiooni muutumisel.

Käesoleva lõputöö mõõtetulemuste alusel vajab täiendavat uurimist asünkroongeneraatorite võimalik negatiivne mõju toitepinge aeglase muutuste suuremale variatsioonile ja pingelohkude kestusele. Samuti on vajalik täiendavate mõõtmiste läbiviimine käesoleva lõputöö järelduste kinnitamiseks ning elektritootjate mõjude uurimisel on vajalik analüüsida ka väiksema võimsusega tootjate mõju jaotusvõrkude elektrikvaliteedile, eriti mikrotootjate mõju madalpingevõrkudes.

5 Lõputöö kokkuvõte

Hajatootmise levikuga seoses on hakanud maailmas üha rohkem jaotusvõrku liituma elektritootjaid, nii ühefaasilisi mikrotootjaid kui kolmefaasilisi väiketootjaid. Traditsioonilised passiivsed jaotusvõrgud on muutumas aktiivseks võrguks, kus võimsusvoo suund pole selgelt ette määratletav. Tootmisseadmete lisandumine muudab olukorra keerukamaks ning elektritootjad võivad omada mõju ka pingekvaliteedile. Ka Eestis on hajatootmine levima hakanud ning Elektrilevi OÜ jaotusvõrku on lisandunud alates 2010. aastast 31 elektrijaama. Käesoleva töö eesmärk on anda ülevaade väiketootjate võimalikust mõjust pingekvaliteedile ning analüüsida pikaajaliste mõõtmistulemuste alusel olukorda Elektrilevi OÜ jaotusvõrgus.

Esimeses peatükis antakse ülevaade väiketootja mõistest ja liigitusest, mis erinevates riikides ja organisatsioonides on mõnevõrra erinev. Eesti kontekstis loetakse hajatootmiseks selliseid tootmisüksuseid, mis on väikese võimsusega (3-10 000 kW) ja mis asuvad tarbija lähedal. Väiketootjateks loetakse tootmisvõimsusi 200 kW kuni 5 MW, mis üldjuhul liituvad keskpingel. Lisaks antakse ülevaade väiketootjate liitumisprotsessist Elektrilevi OÜ jaotusvõrguga. Liitumisprotsess koosneb neljast sammust: taotluse esitamine ja pakkumise saamine, liitumislepingu sõlmimine, elektritootmisseadme kasutusele võtmine ja võrgulepingu sõlmimine. Pikem ülevaade tehakse liitumispakkumise koostamise käigus tehtavast võrguanalüüsist, mille käigus vaadeldakse järgnevaid aspekte: kiired pingemuutused, aeglased pingemuutused, värelustugevus, vooluharmonikud, lühisvoolud ja võrgu läbilaskevõime.

Töö teises peatükis antakse ülevaade pingekvaliteeti reguleerivatest standarditest nii jaotusvõrkudele kui tootmisseadmetel. Pingekvaliteedi nõuded on osa võrguettevõtetele kehtestatud elektrivarustuse kvaliteedinõuetest, kuhu kuuluvad lisaks teeninduse ja elektrivarustuse kindluse nõuded. Pingekvaliteeti jaotusvõrkudes reguleerib EVS-EN 50160 standard, mille eesmärk on kirjeldada ja määratleda avalike elektrivõrkude toitepinge tunnussuuruseid.

Peatükis teises pooles antakse pikem ülevaade pingekvaliteedi tunnussuurustest, standardites kehtestatud piirväärtustest ning väiketootjate võimalikust mõjust vastavatele parameetritele. Väiketootjad võivad pingekvaliteedile mõjuda nii positiivselt kui negatiivselt. Näiteks on võimalik väiketootjate liitumisega suurendada toitepinge stabiilsust ja tõsta toitepinge taset vajalike piirväärtuste vahele. Samas võib väiketootja liitumise tulemusena toitepinge tase

tõusta liiga kõrgele, kuna lokaalse tootmise puhul väheneb võrgus tekkiv pingelang ning pingetase tõuseb. Elektriülekannete lisandumise võivad tekkida probleemid värelevuse ja harmoonikute taseme tõusuga. Samuti võivad tootmiseladmed mõjutada pingesündmuste jääkpingeid ja kestust. Sünkroongeneraatorite võime reaktiivenergiat toota ja tarbida võib aidata pingelohu sügavust vähendada ja kestust lühendada, samas võib asünkroongeneraator mõjuda vastupidiselt. Töö raames käsitletakse järgnevat pingesündmuste tunnussuureid:

- Sagedus
- Toitepinge aeglased muutused
- Kiired pingemuutused ja värelevus
- Toitepinge asümmeetria
- Pingeharmoonikud
- Pingesündmused

Kolmanda peatüki alguses antakse ülevaade mõõtmispunktidest ja mõõtmistulemuste esitamise meetodikast. Mõõtmised viidi läbi 44 nädala jooksul 11 erinevas mõõtepunktis. Mõõtmispunktid paiknevad väiketootjate liitumispunktis ning mõõtmised on läbi viidud nii tuuleelektri-, koostoomis- ja diiselektrijaamade juures. Tehnoloogiliselt toimub elektrienergia tootmine erinevates mõõtepunktides nii asünkroon- kui sünkroongeneraatorite abil ja ka inverterite abil. Mõõtmised on läbi viidud ajavahemikul 09.06.2013 kuni 05.04.2014.

Mõõtmistulemuste esitamisel kasutatakse PQI indeksit, et lihtsustada erinevatel pingetel ja erinevatel piirväärtustega mõõtepunktide andmete võrreldavust. PQI indeks on suhteline väärtus, mis näitab mõõtetulemuse ja parameetrite kehtestatud piirväärtuse omavahelist suhet. PQI väärtuse puhul 1 on mõõtetulemus võrdne kehtestatud piirväärtusega, ühest suuremad väärtused tähendavad piirväärtuse ületamist. Näiteks THD_U väärtuse 4% väärtuse puhul on PQI 0,5 ehk mõõtetulemus moodustab 50% piirväärtusest (THD_U piirväärtus on 8%). PQI väärtused on esitatud protsendina.

Seejärel esitatakse mõõtetulemused eraldi parameetrite kaupa. Mõõtetulemused esitatakse kas nädalate kaupa või kogu mõõteperioodi kohta vastavalt piirväärtuses kehtestatud mõõteperioodile. Täiendavalt on esitatud hajuvusdiagramme elektrijaama aktiivvõimsuse ja värelevustugevuse või THD_U kohta. Mõõtmistulemustest on näha, et ainult värelevuse puhul esineb piirväärtuse ületamist. Värelevuse piirväärtus ületatakse mõõtepunktides MP5, MP8 ja MP9 kokku 6 erineva nädala korral. Maksimaalne PQI väärtus on 150% mõõtepunkti MP9

puhul 47. nädalal. Ülejäänud parameetrite puhul *PQI* tasemed madalamad ning standardis kehtestatud piirväärtuseid ei ületata.

Peatüki lõpus antakse ülevaade mõõtepunktide üldise pingekvaliteedi taseme kohta summaarse *PQI* väärtuse abil. Mõõtetulemustest on näha, et üldiselt on pingekvaliteedi tase hea ning keskmine summaarse *PQI* väärtus on 44%. Kogu mõõtmiste jooksul esines 6 nädalat, kus ületati kehtestatud piirväärtusi, mis moodustab kõigist hinnatud nädalastest perioodidest 1,5%.

Töö neljandas peatükis analüüsitakse mõõtetulemusi ning tehakse järeldused väiketootjate mõjust pingekvaliteedile. Kõigepealt hinnatakse väiketootjate mõju liitumispunkti toitepinge tasemele. Üldiselt on toitepinge tase hea ning keskmine *PQI* väärtus on 17,7%. Toitepinge taseme stabiilsus erineb asünkroongeneraatoriga ja muude mõõtepunktide vahel – asünkroongeneraatoritega mõõtepunktides on toitepinge variatsioon suurem, mis võib olla tingitud asünkroongeneraatori töötamiseks vajaliku reaktiivenergia lokaalsest kompenseerimisest. Pinge langemisel kompenseerimise tase ka langeb ja asünkroongeneraatori võrgust tarbitav reaktiivenergia mõnevõrra suureneb, mis omakorda tekitab võrgus pingelangu. Mõõtmistulemuste alusel järeldatakse, et väiketootjad, kes ei kasuta asünkroongeneraatorit, pole avaldanud negatiivset mõju toitepinge tasemele.

Järgnevalt analüüsitakse väiketootjate mõju pingeharmonikute ja väreelse tasemele. Mõõtmistulemuste alusel on pingeharmonikute tasemed suhteliselt madalad, keskmine *PQI* väärtus on 17,0%. Kõrgem THD_U tase esineb mõõtepunktis MP6, mille puhul on tegemist sünkroonselt ühendamata väikese võrguga. Väreelse tase võrgus on kõrgem ning mõne nädala puhul ületatakse standardis kehtestatud piirväärtused. Väreelus piirväärtused ületatakse mõõtepunktides, kus kasutatakse tehnoloogiliselt erinevaid elektritootmise viise. Mõõtepunktid on nii asünkroon- kui sünkroongeneraatoriga koostootmisjaamade kui asünkroongeneraatoreid kasutava tuuleelektrijaama liitumispunktides. Elektriijaamade aktiivvõimsuse ja värelostugevuse hajuvusdiagrammilt on näha, et aktiivvõimsuse ja väreelse taseme vahel korrelatsiooni pole. Selle alusel järeldatakse, et väiketootjad pole avaldanud negatiivsed mõju pingeharmonikute ja väreelse tasemele liitumispunktis.

Kolmandaks analüüsitakse väiketootjate mõju pingelohkude sügavusele ja kestusele. Mõõtetulemustest on näha, et asünkroongeneraatoriga mõõtepunktides esineb elektrijaama töötamise ajal mõnevõrra rohkem ühe kuni kahe sekundilise kestusega pingelohke. Pikemate pingelohkude tekkimine võib olla tingitud asünkroongeneraatori poolt võrgust tarbitava reaktiivenergia suurenemisest pingelohu korral ning sellest tulenevat pingelohu jääkpinge

langemist ja kestuse suurenemist. Ülejäänud mõõtepunktide puhul ei esine erinevus elektri jaama töötamise ja mitte töötamise korral.

Viimasena analüüsitakse väiketootjate pikaajalist mõju ja hooajalisi muutusi pingekvaliteedis. Mõõtmistulemustest on näha, et mõõtmisperioodi teisel poolel on pingekvaliteedi tase mõnevõrra parem. Mõõtmisperioodi esimese 26 nädala jooksul on keskmine *PQI* väärtus 50%, järgneva 18 nädala jooksul on keskmine *PQI* väärtus 38%. Maksimaalsed *PQI* väärtused samal perioodil on vastavalt 150% ja 88%. Hooajalisi muutusi mõõtmistulemusest ei avalda ning pingekvaliteedi tase on pigem juhusliku iseloomuga.

Kokkuvõttes saab mõõtmistulemustest järeldada, et üldiselt pole väiketootjad pingekvaliteedile selget negatiivset mõju avaldanud. Täiendavalt on vaja uurida asünkroongeneraatorite võimaliku negatiivset mõju toitepinge aeglase muutuste ja pingelohkude kestuse ja sügavuse osas. Töö tulemuste kinnitamiseks on vajalik täiendavate statistiliste andmete kogumine, et suurendada tulemuste usaldusväärsust.

Kirjandus

- [1] G. Tverberg, „Is it really possible to decouple GDP growth from Energy Growth?“, Our Finite World, 15 November 2011. [WWW] <http://ourfiniteworld.com/2011/11/15/is-it-really-possible-to-decouple-gdp-growth-from-energy-growth/>. [19.03.2014]
- [2] „New ERA for electricity in Europe. Distributed generation: key issues, challenges and proposed solutions“, European Commission, Brussels, 2009.
- [3] „Elektriarve komponendid“, Elering AS. [WWW] <http://elering.ee/elektriarve-komponendid/>. [19.03.2014]
- [4] A. Baghini, Handbook of Power Quality, Wiley, 2008.
- [5] A. Latheef, M. Negnevitski, K. Muttaqi ja S. Perera, „Present Understanding of the Impact of Distributed Generation of Power Quality“, *Power Engineering Conference, 2008. AUPEC '08*, Sydney, NSW, 2008.
- [6] J. Anuszczyk ja B. Terlecki, „Analysis of electrical power quality“, *Electrical Power Quality and Utilisation. EPQU 2009. 10th International Conference on*, Lodz, 2009.
- [7] G. Joos, B. T. Ooi, D. McGillis ja F. D. Galiana, „The potential of distributed generation to provide ancillary services“, *Power Engineering Society Summer Meeting. IEEE*, kd. 3, pp. 1762-1767, 2000.
- [8] T. E. McDermott ja R. C. Dugan, „PQ, reliability and DG“, *Industry Applications Magazine. IEEE*, kd. 9, nr 5, pp. 17-23, 2003.
- [9] A. Le, M. Kashem, M. Negnevitsky ja G. Ledwich, „Maximising voltage support in distribution systems by distributed generation“, *TENCON 2005 IEEE Region 10*, Melbourne, 2005.
- [10] K. Dang, J. Yu, T. Dang ja B. Han, „Benefit of distributed generation on line loss reduction“, *Electrical and Control Engineering. ICECE. International Conference on*, Yichang, 2011.

- [11] W. G. Morsi ja M. E. El-Hawary, „Effect of distributed generation on voltage flicker in distributed systems: A case study,“ *Electrical and Computer Engineering. CCECE 2008. Canadian Conference on*, Niagra Falls, 2008.
- [12] R. Brown ja L. Freeman, „Analyzing the reliability impact of distributed generation,“ *Power Engineering Society Summer Meeting*, kd. 2, pp. 1013-1018, 2001.
- [13] I. El-Samahy ja E. El-Saadany, „The Effect of DG on Power Quality in a Deregulated Environment,“ *Power Engineering Society General Meeting. IEEE*, San Francisco, CA, 2005.
- [14] S. Abbott ja D. J. Morrow, „Using existing distributed generation to mitigate voltage issues on the network,“ *Universities Power Engineering Convergence. UPEC, 45th International*, Cardiff, 2010.
- [15] J. A. Martinez ja J. Martin-Arnedo, „Impact of Distributed Generation on Distribution Protection and Power Quality,“ *Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES '09. IEEE*, Calgary, AB, 2009.
- [16] M. Venmathi, J. Vargese, L. Ramesh ja E. S. Percis, „Impact of Grid Connected Distributed Generation on Voltage Sag,“ *Sustainable Energy and Intelligent Systems (SEISCON 2011), Internatinal Conference on*, Chennai, 2011.
- [17] P. P. Barker ja R. W. de Mello, „Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems: Part 1 - Radial Distribution Systems,“ *Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE (vol 3)*, Seattle, WA, 2000.
- [18] U. N. Khan, „Distributed Generation and Power Quality,“ *Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2014 14th International Conference on*, Krakow, Poland, 2014.
- [19] G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans ja W. D'haeseleer, „Distributed generation: definition, benefits and issues,“ *Energy Policy*, kd. 33, nr 6, pp. 787-798, 2005.
- [20] M. Farhoodnea, A. Mohamed, H. Shareef ja H. Zayandehroodi, „Power quality impacts of high-penetration electric vehicle stations and renewable energy-based

- generators on power distribution systems," *Measurement*, kd. 46, pp. 2423-2434, 2013.
- [21] W. Deng, W. Pei ja Z. Qi, „Impact and improvement of Distributed Generation on voltage quality in Mirco-Grid," *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. DRPT 2008*, Nanjuing, 2008.
- [22] K. Yang, M. H. J. Bollen, E. O. Anders Larsson ja M. Wahlberg, „Measurements of harmonic emission versus active power from wind turbines," *Electric Power Systems Research*, kd. 108, pp. 304-314, 2014.
- [23] F. C. L. Trindade, K. V. do Nascimento ja J. C. M. Vieira, „Investigation on Voltage Sags Caused by DG Anti-Islanding Protection," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, kd. 28, nr 2, pp. 972-980, 2013.
- [24] „Liitunud elektritootjad". [WWW] https://www.elektrilevi.ee/-/doc/6305157/kliendile/el_info_liitunud_tootjad.pdf. [19.03.2014]
- [25] J. Niitsoo, Kompaktluminofoorlampide mõju elektrivõrgule: magistritöö, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2010.
- [26] T. Vinnal, Eesti ettevõtete energiatarbimise uurimine ja soovitusel tarbimise optimeerimiseks: doktoritöö, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2011.
- [27] I. Palu, Pingekvaliteet elektrituulikuid sisaldavas nõrgas elektrivõrgus: magistritöö, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2005.
- [28] A. Keerme, Päikesepaneelide mõju elektrikvaliteedile: bakalaureusetöö, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2013.
- [29] Ü. Treufeldt, P. Raesaar, H. Tammoja, J. Niitsoo ja I. Palu, „Elektritootjate ühendamine jaotusvõrku," Tallinna Tehnikaülikool, Elektroenergeetika instituut, Tallinn, 2011.
- [30] „Liitumine elektritootjale". [WWW] <https://www.elektrilevi.ee/et/kuidas-elektritootja-liitub>. [17.03.2013]
- [31] „Võrgueeskiri (Vastu võetud 26.06.2003, viimati jõustunud 01.07.2003)" Elektrooniline Riigi Teataja. [WWW]

- <https://www.riigiteataja.ee/akt/129122012061?leiaKehtiv>. [01.04.2014]
- [32] Elektrilevi OÜ, Ettevõtte standard - Elektritootjate tehniliste lahenduste koostamise juhend, 2014.
- [33] „Võrguteenuste kvaliteedinõuded ja võrgutasude vähendamise tingimused kvaliteedinõuete rikkumise korral. (Vastu võetud 17.04.2005, viimati jõustunud 01.01.2011)“ Elektrooniline Riigi Teataja. [WWW] <https://www.riigiteataja.ee/akt/129122010047>. [29.03.2014]
- [34] Avalike elektrivõrkude pinge tunnussuurused: Eesti standard EVS-EN 50160:2010, Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2011.
- [35] „IPS/UPS“ Wikipedia. [WWW] <http://en.wikipedia.org/wiki/IPS/UPS>. [30.03.2014]
- [36] Elering, „Eesti elektrisüsteemi tarbimisnõudluse rahuldamiseks vajlaiku tootmisvaru hinnang“ Tallinn, 2013.
- [37] „Elektrikvaliteet“ Arengufond. [WWW] <http://www.energiatalgud.ee/index.php?title=Elektrikvaliteet>. [18.03.2013]
- [38] J. Driesen ja R. Belmans, „Distributed generation: challenges and possible solutions“ *Power Engineering Society General Meeting. IEEE*, Montreal, 2006.
- [39] S. Quaia, „Distributed Generation and under load transformers operation: Voltage quality problems and possible improvements“ *Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion. SPEEDAM 2010*, Pisa, 2010.
- [40] „Power Quality Distributed Generation Workbook,“ EPRI, Palo Alto, CA, 2003.
- [41] J. Al-Tayie, C. Whitworth ja A. Biebighaeuser, „AC Generators with 2/3rd and 5/6th winding pitch“ [WWW] https://www.cumminsgeneratortechnologies.com/www/en/media/whitepapers/Winding%20Pitch%20White%20Paper_EN_LR.pdf. [05.04.2013]
- [42] L. Camilo, J. C. Cebrian, N. Kagan ja N. M. Matsuo, „Impact of distributed generaiton units on the sensivity of customers to voltage sags“ *Electricity Distribution. CIRED 2005. 18th International Conference and Exhibition on*, Turin, 2005.

- [43] „International Committee for Information Technology Standards,“ Wikipedia, 13.12.2013. [WWW] http://en.wikipedia.org/wiki/International_Committee_for_Information_Technology_Standards. [06.04.2014].
- [44] J. Gordon, J. Meyer ja P. Schegner, „Design Aspects for large PQ Monitoring Systems in the future Smart Grids“ *Power and Energy Society General Meeting, IEEE*, San Diego, 2011.