



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
ELEKTROENERGEETIKA INSTITUUT

# Elektrienergia kvaliteet Eesti elektrisüsteemi ülekandevõrgus

Elektroenergeetika õppekava

Energiasüsteemide õppetool

Magistritöö

Õppetooli juhataja      prof    H. Tammoja

Juhendaja                dots    J. Kilter

Lõpetaja                    A. Mazikas

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> Alexander Mazikas	<i>Lõputöö liik:</i> Magistritöö
<i>Töö pealkiri:</i> Elektrienergia kvaliteet Eesti elektrisüsteemi ülekandevõrgus	
<i>Kuupäev:</i> 02.06.2014	116 lk
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool <i>Teaduskond:</i> Energeetika <i>Instituut:</i> Elektroenergeetika <i>Õppetool:</i> Energiasüsteemid	
<i>Töö juhendaja(d):</i> dotsent Jako Kilter <i>Töö konsultant (konsultandid):</i> -	
<i>Sisu kirjeldus:</i> <p>Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli kaardistada elektrienergia kvaliteedinäitajad Eesti ülekandevõrgus, anda ülevaade kvaliteedimõõtmiste alustest ja põhimõtetest. Töö praktiliseks väljundiks on Eesti ülekandevõrgus kehtivate elektrienergia kvaliteedinõuete täiendamissettepanekute väljatöötamine.</p> <p>Töö annab ülevaate elektrienergia kvaliteedimõõtmiste teoreetilistest ja praktilistest külgedest, sidudes antud teema Eesti elektrisüsteemi ülekandevõrgu elektrienergia kvaliteedimõõtesüsteemiga ja selle kvaliteedinäitajatega.</p> <p>Töös tutvustatakse elektrienergia kvaliteediga seotud mõisteid ja nähtusi, antakse ülevaade tähtsamatest Eestis kehtivatest normdokumentidest elektrienergia kvaliteedi alal, samuti tutvustatakse Venemaa elektrisüsteemi kvaliteedinõudeid.</p> <p>Kirjeldatud on kvaliteedisüsteemide ülesehituse seaduspärasused ning antud ülevaade Eesti ülekandevõrgu kvaliteedisüsteemist.</p> <p>Teostatud on elektrienergia kvaliteedinäitajate pikaajaliste ja nädalasiseste muutumistrendide analüüs mitmes mõõtepunktis Eesti ülekandevõrgu piires, mille põhjal on formuleeritud hinnang tuuleelektri jaamade ja konverterseadmete mõjust elektrienergia kvaliteedile. Töö sisaldab ka soovitusi elektrienergia kvaliteedinõuete arendamiseks Eesti põhivõrguettevõttes Elering AS</p>	
<i>Märksõnad:</i> elektrienergia kvaliteedi hindamine, elektrienergia kvaliteedi mõõtesüsteemid, elektrienergia kvaliteedinormid, elektrienergia kvaliteet, elektrisüsteemid, elektrivõrgud, EN 50160, IEC 61000, pingekvaliteet, ГОСТ Р 54149	

# Summary of the diploma work

<i>Author:</i> Alexander Mazikas	<i>Kind of the work:</i> Master thesis
<i>Title:</i> Power quality in Estonian electric power transmission grid	
<i>Date:</i> 02.06.2014	116 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology <i>Faculty:</i> Power Engineering <i>Department:</i> Electrical Power Engineering <i>Chair:</i> Power Systems	
<i>Tutor(s) of the work:</i> Associate Professor Jako Kilter <i>Consultant(s):</i> -	
<i>Abstract:</i> <p>The purpose of this master thesis was to map power quality indices in Estonian electric power transmission grid and to give an overview of the fundamentals and principles of power quality monitoring. The practical output consists of proposing suggestions for power quality guidelines currently in use in Estonian transmission grid.</p> <p>The work provides an overview of theoretical and practical sides of power quality monitoring, bonding them into context of Estonian power transmission systems' power quality monitoring system and its indicators.</p> <p>The terms and phenomena related to power quality are introduced in the thesis. An overview of the most important guidelines in the field of power quality in Estonia is given. A review of power quality standards in use in Russian power system is also presented.</p> <p>The principles of organization of power quality monitoring, as well as an overview of Estonian power quality monitoring system are given.</p> <p>An analysis of long-term and weekly trends of power quality indicators in several metering points in Estonian electric power transmission system is performed, upon which an estimation of wind parks' and power electronic converter devices' impact on power quality is deduced. The thesis also contains suggestions for further development of power quality guidelines of Estonian transmission system operator Elering AS.</p>	
<i>Key words:</i> power quality assessment, power quality monitoring systems, guidelines for electrical power quality, power quality, electrical power systems, electrical power networks, , EN 50160, IEC 61000, voltage quality ГОСТ P 54149	

# Резюме заключительной работы

<i>Автор:</i> Александр Мазикас	<i>Вид работы:</i> магистерская диссертация
<i>Заглавие работы:</i> Качество электрической энергии в системе передачи электрической энергии Эстонии	
<i>Дата:</i> 02.06.2014	116 стр.
<i>Университет:</i> Таллинский Технический Университет <i>Факультет:</i> Энергетики <i>Институт:</i> Электроэнергетики <i>Кафедра:</i> Энергетических систем	
<i>Руководитель (руководители) работы:</i> доцент Яко Кильтер <i>Консультант(ы) работы:</i> -	
<i>Реферат:</i> Назначение данной диссертации – дать представление об уровне показателей качества электрической энергии (э/э) в системе передачи э/э Эстонии, а также обзор основ и главных принципов учёта качества э/э. Практическим выводом проделанной работы является выработка рекомендаций по изменению требований к качеству э/э, используемых в системе передачи э/э Эстонии. В работе обозреваются теоретические и практические аспекты учёта качества э/э, особенно в контексте их связи с системой учёта качества э/э в системе передачи э/э Эстонии и показателями качества э/э в ней. В диссертации приводятся описания терминов и явлений, связанных с качеством э/э, даётся обзор важнейших нормативных документов по качеству э/э, действующих в Эстонии, а также нормативов по качеству э/э в системе электроснабжения России. Описываются общие принципы построения систем учёта качества э/э и система контроля качества э/э в системе передачи э/э Эстонии. Проведён анализ долгосрочных и недельных трендов изменения показателей качества э/э в нескольких точках измерения в системе передачи э/э Эстонии, на основе которого сформулирована оценка влияния ветряных электростанций и силовых электронных преобразовательных устройств на уровень качества э/э. В работе приведены также рекомендации по развитию требований системного оператора Эстонии, Elering AS, к качеству э/э.	
<i>Ключевые слова:</i> оценка качества электрической энергии, системы учёта качества электрической энергии, нормы качества электрической энергии, качество электрической энергии, системы электроснабжения, электрические сети, EN 50160, IEC 61000, качество напряжения, ГОСТ Р 54149	

# Sisukord

Lõputöö ülesanne.....	8
Eessõna .....	10
Sissejuhatus.....	11
<b>1 Elektrienergia kvaliteet ja selle mõju ühiskonnale .....</b>	<b>13</b>
1.1 Eesti elektrisüsteem .....	13
1.2 Elektrisüsteemide parameetrid.....	16
1.3 Elektrienergia kvaliteedinäitajad.....	20
1.3.1 Kvaliteedinäitajate klassifikatsioon .....	20
1.3.2 Aeglased pingemuutused.....	21
1.3.3 Harmoonikud ja vaheharmoonikud.....	22
1.3.4 Signaalipinged.....	24
1.3.5 Kiired pingemuutused ja värelus.....	24
1.3.6 Pingelohud, pingemuhud ja toitekatkestused .....	25
1.3.7 Toitepinge asümmeetria .....	27
1.3.8 Sageduse hälbed.....	28
1.3.9 Alalisvoolukomponendid vahelduvvooluvõrkudes.....	28
1.3.10 Mittevõnkuvad siirdeprotsessid.....	28
1.3.11 Võnkuvad siirdeprotsessid.....	29
1.4 Mittekvaliteetse elektrivarustuse mõju .....	29
1.4.1 Harmoonikute mõju.....	32
1.4.2 Pingelohkude ja lühikeste toitekatkestuste mõju.....	33
1.4.3 Elektrienergia kvaliteedi parendamine .....	34
1.5 Elektrienergia kvaliteedi normdokumendid.....	35
1.5.1 IEC 61000 .....	36
1.5.1.1 EVS-EN 61000-2-2 .....	36
1.5.1.2 IEC/TR 61000-3-6:2008.....	37
1.5.1.3 IEC/TR 61000-3-7:2008.....	38
1.5.1.4 EVS-EN 61000-4-7:2002/A1:2009 .....	40
1.5.1.5 EVS-EN 61000-4-15:2011 .....	41
1.5.1.6 IEC 61000-4-30:2008.....	41
1.5.2 EVS-EN 50160:2010 .....	45
1.5.2.1 Pidevad nähtused .....	46
1.5.2.2 Pinge sündmused .....	48
1.5.3 GOCT P 54149-2010.....	50
1.5.4 CBEMA, ITI ja SEMI F47 kõverad.....	52
1.5.5 Elering AS nõuded elektri kvaliteedile .....	53
<b>2 Kvaliteedi mõõtesüsteemid .....</b>	<b>55</b>
2.1 Kvaliteedisüsteemide osad.....	55
2.2 Kvaliteedimõõtesüsteemide otstarve.....	58
2.3 Mõõtepunktide paigutus.....	59
2.4 Mõõdetavate parameetrite valik.....	60
2.5 Kvaliteedimõõtmiste rahvusvaheline kogemus.....	61
2.6 Elering AS-i elektrikvaliteedi mõõtesüsteem.....	63
<b>3 Elektrienergia kvaliteedimõõtmiste tulemus ja analüüs.....</b>	<b>65</b>
3.1 Pikaajalised mõõtmised.....	66
3.1.1 Sagedus .....	66
3.1.2 Aeglased pingemuutused .....	68
3.1.3 $THD_U$ ja harmoonikud.....	72
3.1.4 Pikaajaline värelus $P_H$ .....	76
3.1.5 Asümmeetria.....	79
3.1.6 Pingesündmused ja töökindlusnäitajad.....	82

3.2	Nädalaste mõõteandmete analüüs .....	85
3.2.1	<i>Sagedus</i> .....	85
3.2.2	<i>Aeglased pingemuutused</i> .....	85
3.2.3	<i>Värelus</i> .....	87
3.2.4	<i>THD<sub>u</sub> ja pingeharmonikud</i> .....	89
3.2.5	<i>TDD<sub>i</sub> ja voolu harmoonikud</i> .....	93
3.3	Soovitused Elering AS kvaliteedinõuete täiendamiseks .....	97
3.3.1	<i>Sagedus</i> .....	97
3.3.2	<i>Aeglased pingemuutused</i> .....	97
3.3.3	<i>THD<sub>u</sub> ja pingeharmonikud</i> .....	98
3.3.4	<i>TDD<sub>i</sub> ja vooluharmonikud</i> .....	98
3.3.5	<i>Värelus</i> .....	99
3.3.6	<i>Asümmeetria</i> .....	99
3.3.7	<i>Pinge sündmused</i> .....	99
3.4	Estlink 1 töörežiimi ja pingekvaliteedi vaheline seos .....	99
<b>4</b>	<b>Kokkuvõte ja soovitused .....</b>	<b>107</b>
	<b>Kasutatud kirjandus .....</b>	<b>110</b>
	<b>Lisad .....</b>	<b>114</b>
L.1.	<b>Eesti 110 – 330 kV elektrisüsteemi kaart .....</b>	<b>115</b>
L.2.	<b>Elektrijaamade paiknemine Eestis .....</b>	<b>116</b>